

Univerza v Ljubljani
Fakulteta *za elektrotehniko*



Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering



25. SEMINAR OPTIČNE KOMUNIKACIJE 2021

Ljubljana, 4. in 5. februarja 2021
ZBORNIK

25TH SEMINAR ON OPTICAL COMMUNICATIONS 2021

Ljubljana, 4 and 5 February 2021
PROCEEDINGS

UREDILA/EDITORS:

Tomi Mlinar, Boštjan Batagelj

Katalogni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in
univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID 54585347

ISBN 978-961-243-417-5 (PDF)

_ URL: <https://sok.fe.uni-lj.si/zborniki>

Copyright © 2021 Založba FE. All rights reserved.
Razmnoževanje (tudi fotokopiranje) dela v celoti ali po delih brez
predhodnega dovoljenja Založbe FE prepovedano.

Založnik: Založba FE, Ljubljana
Izdajatelj: Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana
Urednik: prof. dr. Sašo Tomažič
1. elektronska izdaja

Predgovor

Od izuma optičnega vlakna mineva že 50 let, pravi razmah gradnje optičnih omrežij do slehernega doma pa se je začel pred sedemnajstimi leti – tudi v Sloveniji. Od takrat je optična tehnologija vodilna in vseprisotna v komunikacijskih omrežjih, pa tudi na drugih področjih. Po zgledu razvijalcev celičnih radijskih komunikacij, ki so tehnologije že kmalu po njihovih komercialnih začetkih začeli ločevati po generacijah (1G do 5G), se zdaj tudi v fiksne komunikacije uvaja ta pojem. Pri fiksnih komunikacijah smo trenutno pri četrti generaciji (F4G), kar pomeni nekaj 100 Mbit/s prenosa podatkov do uporabnika. Naslednja generacija (F5G) naj bi končnim uporabnikom brez težav omogočala hitrosti dosti preko 1 Gbit/s, kar bo ob nizkih zakasnitvah in veliki zanesljivosti delovanja omogočalo uvedbo npr. video-storitev 8K, storitve navidezne resničnosti in izjemno interaktivno uporabniško izkušnjo tudi na velikih zaslonih. Sodobna optična tehnologija porabi za prenos enega bita informacije le tisočinko energije, potrebne za prenos po brezžični zvezi, izboljšanje spektralne učinkovitosti v komunikacijskih sistemih pa si obetamo z vpeljavo optičnih gradnikov na osnovi mikrovalovne fotonike in integrirane optike.

Razvoj področja optoelektronike in optičnih komunikacij je spodbudil prve začetke in kasnejši razvoj nove izobraževalne dejavnosti na Fakulteti za elektrotehniko že okoli leta 1980, torej razmeroma zgodaj. Sledilo je oblikovanje predmeta Optične komunikacije na dodiplomskem in podiplomskem študiju. Strokovne seminarje Optične komunikacije je zasnoval zasl. prof. dr. Jožko Budin iz izobraževalne dejavnosti, ki jo je pod okriljem projekta TEMPUS JEN-04202 v letih 1993 do 1997 izvajala Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Pri uvajanju začetnih tečajev in pozneje seminarjev je bilo zasl. prof. dr. Jožku Budinu v pomoč večletno sodelovanje s partnerskimi organizacijami projekta, in sicer Mednarodnim centrom za teoretično fiziko (ICTP) v Trstu, Univerzo v Trstu, Univerzo v Padovi, Univerzo Strathclyde v Glasgowu in drugimi. Nobenega dvoma ni, da je seminar Optične komunikacije v preteklih desetletjih bistveno prispeval k strokovnemu izpopolnjevanju telekomunikacijskih strokovnjakov. Njegov osnovni namen je bil razširjanje, izpopolnjevanje in osveževanje znanja o optičnih tehnologijah ter dvig strokovnosti zaposlenih na področju telekomunikacij v Sloveniji. Imel je ključno vlogo pri uvajanju tehnologije optičnega vlakna v slovenski prostor.

Dvajset prispevkov v tokratnem 25. zborniku seminarja Optične komunikacije obravnava predvsem dve pomembni področji: dostopovni in transportni del optičnih omrežij ter nove tehnološke rešitve v fotoniki.

Program prvega dne je posvečen povezavi končnega uporabnika z optičnim vlaknom. V uvodnem prispevku Boštjan Batagelj podaja retrospektivo uvajanja optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji, kjer predstavi ključne korake, akterje in tehnologije, ki so omogočili današnjo pokritost z optičnim omrežjem pri nas. V dopoldanskem delu sledita prispevka Roka Čotiča o vpeljevanju tehnologije XGS-PON v omrežje Telekoma Slovenije in pogled Mitje Golja iz Iskratela na prihodnost FTTH. V tem delu Katja Mohar Bastar z Digitalnega inovacijskega stičišča Slovenije razpravlja o pomenu optičnega omrežja za Slovensko digitalno družbo, Žan Knafelc z Agencije za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije pa predstavlja razvoj optičnih omrežij z vidika regulacije.

Ioannis Tomkos z Univerze v Patrasu podaja evolucijo fiksnih in brezžičnih omrežij v smeri omrežij šeste generacije (6G), Eran Inbar iz izraelskega podjetja Prisma Photonics pa predstavlja uporabo senzorjev na osnovi

optičnega vlakna. Sledi vrsta prispevkov o razvojnem delu laboratorijev na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer se raziskovalci ukvarjajo s fotonskimi integriranimi vezji in mikrovalovno fotoniko. V to skupino prispevkov spadajo predstavitve fotonskih integriranih vezij Janeza Krča in sodelavcev, integracije metamaterialov v fotonska integrirana vezja Andraža Debevca in sodelavcev, merjenje lomnega količnika v optičnem čipu Andreja Lavriča in premostitve pojava presiha moči v optični komunikacijski zvezi Kristjana Vuka Baliža.

V drugem dnevu seminarja Matjaž Vidmar osveži znanje z obravnavo fizikalnih osnov svetlobnega vlakna in njegovih omejitev ter osvetli ukrepe za njihovo premostitev. Klaus Samardžić iz podjetja SmartCom se v svojem prispevku pogloblja v transportna optična omrežja, ki naj bi zagotavljala dovolj velike zmogljivosti za potrebe mobilnih omrežij 5G. Sledi predstavitev uporabe 200 Gbit/s prenosnih sistemov DWDM na jedrnem omrežju RENE in priklop prvih rezidenčnih uporabnikov na 10 Gbit/s simetričnem dostopovnem omrežju XGS-PON, kar bo obravnaval Goran Živec.

V zadnjem delu zbornika so zbrane optične rešitve, kot so delujoč primer prostozračne optične zveze Luke Mustafa, uporabnost komunikacij z vidno svetlobo Žige Pušelca, prisotnost optičnih tehnologij na sodobnih potniških ladjah Mladena Radovanovića in uporaba optičnih kasnilnih linij Uroša Dragonje.

Kakovostna izvedba dosedanjih tečajev in seminarjev, sodelovanje priznanih vabljenih strokovnjakov, znaten interes udeležencev in premierna izvedba letošnjega spletnega seminarja, utrjuje naše prepričanje, da je redno strokovno spopolnjevanje strokovnjakov na naglo razvijajočem se področju optičnih komunikacij ne le primerno in koristno, ampak tudi potrebno in nujno. Med našimi strokovnjaki vlada izredno zanimanje za seznanjanje z novimi tehnologijami in za uporabo tega znanja v strokovnem delu. Ta seminar to v polni meri dokazuje. Postal je redna oblika strokovnega izpopolnjevanja in srečevanja vseh, ki jih zanimajo razvoj, novosti in dosežki zadnjega časa ter priložnost za dvig strokovnosti in širšo informiranost strokovnjakov o temah, ki odražajo razvoj v svetu in so že ali pa še bodo aktualne tudi za razvoj optičnih komunikacij v Sloveniji.

Organizatorji seminarja se zahvaljujemo vsem predavateljem za njihov neprecenljiv prispevek, med njimi vabljenima tujima predavateljema iz Grčije in Izraela, prav tako pa tudi domačim podjetjem in posameznikom za sodelovanje in pomoč pri pripravi ter izvedbi seminarja. Zahvala gre odgovornim v naših podjetjih in institucijah, ki so svojim strokovnjakom omogočili udeležbo na seminarju in s tem podprli to dejavnost.

Želiva vam, da v 25. zborniku seminarja Optične komunikacije najdete uporabne vsebine, ki vam bodo koristile v vašem poslovnem in osebnem življenju.

Ljubljana, februarja 2021

Tomi Mlinar in Boštjan Batagelj,
urednika

Foreword

It has been 50 years since the invention of optical fiber. Real expansion of the construction of optical networks to every home began seventeen years ago - also in Slovenia. Since then, optical technology has been a leader and ubiquitous in communication networks as well as in other fields. Following the example of the developers of cellular radio communications, who soon after their commercial beginnings began to separate technologies by generations (1G to 5G), this concept is now being introduced into fixed communications as well. In fixed communications, we are currently in the fourth generation (F4G), which means some 100 Mbps of data transfer to the user. The next generation (F5G) should easily allow end users speeds well over 1 Gbps, which will allow for example the introduction of 8K video service, virtual reality services and an interactive user experience even on big screens. Modern optical technology consumes only a one thousandth of the energy required for wireless transmission to transmit one bit of information, and we hope to improve spectral efficiency in communication systems by introducing optical building blocks based on microwave photonics and integrated optics.

The development of optoelectronics and optical communications stimulated the first beginnings and later development of a new educational activity at the Faculty of Electrical Engineering as early as around 1980. This was followed by the design of the course on Optical Communications in undergraduate and postgraduate studies. Professional seminars on Optical Communications developed professor emeritus Jožko Budin from the educational activity carried out by the Faculty of Electrical Engineering of the University of Ljubljana under the auspices of the TEMPUS JEN-04202 project in the years 1993 to 1997. In the introduction of courses and later seminars, prof. Jožko Budin cooperated with the partner organizations of the project by many years, namely the International Center of Theoretical Physics (ICTP) in Trieste, the University of Trieste, the University of Padova, the University of Strathclyde in Glasgow and others. There is no doubt that the Optical Communications seminar has made a significant contribution to the professional development of telecommunication professionals over the past decades. Its main purpose was to spread, improve and refresh knowledge about optical technologies and raise the professionalism of employees in the field of telecommunications in Slovenia. It played a key role in the introduction of optical fiber technology in Slovenia.

Twenty papers in this year's 25th proceedings of the Optical Communications seminar deal with two important areas: the access and transport optical networks and new technological solutions in photonics.

The programme of the first day is dedicated to the fiber to the home. In the introductory article, Boštjan Batagelj gives a retrospective of the introduction of the optical access network in Slovenia, where he presents the key steps, actors and technologies that enabled today's coverage with the optical network in Slovenia. The morning part is followed by Rok Čotič's contribution on the introduction of XGS-PON technology in the Telekom Slovenije network and view on the future of FTTH prepared by Mitja Golja from Iskratel. In this part, Katja Mohar Bastar from the Digital Innovation Hub of Slovenia discusses the importance of the optical network for the Slovenian digital society, and Žan Knafelc from the Agency for Communication Networks and Services of the Republic of Slovenia presents the development of optical networks from the regulatory point of view.

Ioannis Tomkos from the University of Patras presents the evolution of fixed and wireless networks in the direction of sixth generation (6G) networks, and Eran Inbar from the Israeli company Prisma Photonics presents the use of fiber-based sensors. The following is a series of papers on the development work of laboratories at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, where researchers deal with photonic integrated circuits and microwave photonics. This group of papers includes the presentation of photonic integrated circuits by Janez Krč and colleagues, the integration of metamaterials into photonic integrated circuits by Andraž Debevec and colleagues, the measurement of the effective refractive index of a fiber in a silicon chip by Andrej Lavrič and overcoming the power fading in optical communication link with the use of integrated microwave photonics by Kristjan Vuk Baliž.

On the second day of the seminar, Matjaž Vidmar refreshes our knowledge on the glass fiber by presenting its physical bases and limitations, and presents measures to overcome them. In his contribution, Klaus Samardžić from the company SmartCom delves into transport optical networks, which should provide sufficient capacity for the needs of 5G mobile networks. This is to be followed by a presentation of the use of 200 Gbps DWDM transmission systems on the RUNE core network and the connection of the first resident users to the 10 Gbps symmetric XGS-PON access network, which is to be discussed by Goran Živec.

The last part of the proceedings contains optical solutions, such as a working example of Luka Mustafa's free-air optical connection, the usefulness of Žiga Pušelec's visible light communications, the presence of optical technologies on modern passenger ships of Mladen Radovanović and the use of optical delay lines, which is to be presented by Uroš Dragonja.

Quality implementation of previous courses and seminars, participation of renowned invited experts, significant interest of participants and premiere of this year's webinar strengthens our belief that regular professional education of experts in the rapidly evolving field of optical communications is not only appropriate and useful, but also necessary. There is a great interest among our experts to get acquainted with new technologies and to use this knowledge in professional work. This seminar fully proves this. It has become a regular form of professional development and meeting of all those interested in recent developments, innovations and achievements, as well as an opportunity to raise professionalism and inform experts on topics that reflect achievements in the world and are already relevant for the development of optical communications in Slovenia.

The organizers of the seminar would like to thank all the lecturers for their invaluable contribution, including invited lecturers from Greece and Israel, as well as companies and individuals for their cooperation and assistance in the preparation and implementation of the seminar. Thanks go to those responsible in our companies and institutions who enabled their experts to participate in the seminar and thus support this activity.

We wish you to find useful content in the proceedings of the 25th Optical Communications seminar that will be useful in your business and private life.

Ljubljana, February 2021

Tomi Mlinar and Boštjan Batagelj, editors

Seznam prispevkov

	Avtor(ji)	Naslov predavanja	Stran
1	Boštjan Batagelj	Kronološki pregled uvajanja optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji	9
2	Katja Mohar Bastar	Pomen optičnega omrežja za Slovensko digitalno družbo	22
3	Rok Cotič	Vpeljava XGS-PON v Telekomu Slovenije	31
4	Žan Knafelc	Optična omrežja v Sloveniji	48
5	Mitja Golja	Pogled na bodočnost FTTH	60
6	Ioannis Tomkos	The evolution of fixed and wireless network generations towards 6G	75
7	Eran Inbar	Next Generation Fiber Sensing - Theory and Applications	77
8	Janez Krč, Andraž Debevc, Marko Topič, Aleksander Sešek, Bruno Cacovich, Miha Cacovich, Janez Trontelj, Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj	Uvod v ftonska integrirana vezja in aktivnosti s tega področja na FE	91
9	Andraž Debevc, Janez Krč, Marko Topič	Strukture metamaterialov za višjo stopnjo integracije v ftonskih integriranih vezjih	116
10	Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj	Merjenje učinkovitega lomnega količnika svetlovoda v silicijevem čipu	127
11	Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj, Andraž Debevc, Janez Krč	Premostitev presihanja moči v optični komunikacijski zvezi z uporabo integrirane mikrovalovne fotonike	134
12	Matjaž Vidmar	Svetlobno vlakno: primerjava, fizikalne osnove, omejitve in protiukrepi, 1. del	143
13	Matjaž Vidmar	Svetlobno vlakno: primerjava, fizikalne osnove, omejitve in protiukrepi, 2. del	143
14	Klaus Samardžić	Optična transportna omrežja z linijskimi kapacitetami za mobilna omrežja 5G	160
15	Goran Živec	Uporaba 200 Gbps prenosnih sistemov DWDM na jedrnem omrežju RUNE in priklop prvih rezidenčnih uporabnikov na 10 Gbps simetričnem dostopovnem omrežju XGS-PON	178
16	Luka Mustafa	Prostozračne optične zveze	184
17	Žiga Pušelj, Boštjan Batagelj	Komunikacije z vidno svetlobo	195
18	Mladen Radovanović, Boštjan Batagelj	Optične tehnologije na sodobnih ladjah	204
19	Jernej Mušič, Boštjan Batagelj	Lidar	219
20	Uroš Dragonja, Boštjan Batagelj	Uporaba optičnih kasnilnih linij	235

Table of contents

	Author(s)	Article	Page
1	Boštjan Batagelj	Chronological overview of the introduction of the optical access network in Slovenia	9
2	Katja Mohar Bastar	Importance of the optical network for the Slovenian digital society	22
3	Rok Cotič	Introduction of the XGS-PON in Telekom Slovenije	31
4	Žan Knafelc	Optical networks in Slovenia	48
5	Mitja Golja	A look at the future of FTTH	60
6	Ioannis Tomkos	The evolution of fixed and wireless network generations towards 6G	75
7	Eran Inbar	Next Generation Fiber Sensing - Theory and Applications	77
8	Janez Krč, Andraž Debevc, Marko Topič, Aleksander Sešek, Bruno Cacovich, Miha Cacovich, Janez Trontelj, Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj	Introduction to photonic integrated circuits and activities in this field at FEE	91
9	Andraž Debevc, Janez Krč, Marko Topič	Structures of metamaterials for a higher degree of integration in photonic integrated circuits	116
10	Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj	Measurement of the effective refractive index of a fiber in a silicon chip	127
11	Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj, Andraž Debevc, Janez Krč	Overcoming the power fading in optical communication link with the use of integrated microwave photonics	134
12	Matjaž Vidmar	Optical fiber: comparison, physical background, limitations and countermeasures, Part 1	143
13	Matjaž Vidmar	Optical fiber: comparison, physical background, limitations and countermeasures, Part 2	
14	Klaus Samardžič	Optical transport networks with line capacities for 5G mobile networks	160
15	Goran Živec	Use of 200 Gbps DWDM transmission systems on the RUNE core network and connection of the first resident users on a 10 Gbps symmetric XGS-PON access network	178
16	Luka Mustafa	Free-space optical communications	184
17	Žiga Pušelj, Boštjan Batagelj	Visible Light Communications	195
18	Mladen Radovanović, Boštjan Batagelj	Optical technologies on modern ships	204
19	Jernej Mušič, Boštjan Batagelj	Lidar	219
20	Uroš Dragonja, Boštjan Batagelj	Use of optical delay lines	235

Kronološki pregled uvajanja optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji

Chronological overview of the introduction of the optical access network in Slovenia

Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Katedra za informacijsko komunikacijske tehnologije, Laboratorij za sevanje in optiko

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Povzetek

Letos mineva več kot 3 desetletja od kar je bila v svetovni znanstveni literaturi prvič predstavljena pasivna optična tehnologija do končnega uporabnika. Mineva 17 let od kar je bil mednarodno sprejet GPON standard in prav toliko od kar se je optično dostopovno omrežje začelo graditi v Sloveniji. Prispevek je retrospektiva implementacije optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji. Predstavi ključne korake, akterje in tehnologije, ki so omogočili današnjo pokritost z optičnim omrežjem. Prikazane bodo tehnološke rešitve za optično dostopovno omrežje, ki so se uveljavile v slovenskem prostoru in ki jih lahko koristijo končni uporabniki.

Abstract

This year marks more than 3 decades since end user passive optical technology was first introduced into the world scientific literature. It has been 17 years since the internationally accepted GPON standard was introduced and just as long since the deployment of the optical access network started in Slovenia. The presentation is a retrospective on the implementation of the optical access network in Slovenia. It presents the main steps, actors and technologies that made today's optical network coverage possible. It presents

technological solutions for the optical access network that have been established in Slovenia and that can be used by end users.

Biografija avtorja

Boštjan Batagelj je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer predava predmete optične komunikacije, radijske komunikacije in satelitske komunikacije. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se med drugim ukvarja z fizičnim nivojem prenosnih in dostopovnih telekomunikacijskim omrežji zasnovanih na radijski in optični tehnologiji. Je avtor več kot 300 člankov, osmih patentnih prijav in sodeluje v domačih ter mednarodnih raziskovalnih projektih s področja optičnih in radijskih komunikacij.

Author's biography

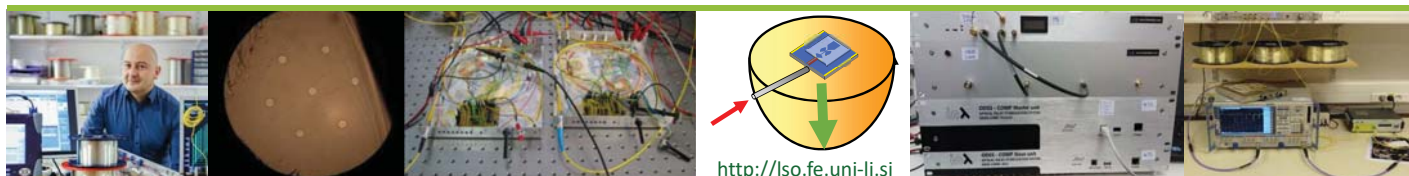
Boštjan Batagelj received his Ph.D. from the University of Ljubljana in 2003 for work on optical fiber nonlinearity measurements. He is currently an Assistant Professor at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana teaching courses in optical communications and radio communications. As a researcher he works at Radiation and optics laboratory. His research interests include work on the physical layer of optical transport and optical access networks including convergence with radio systems and components.

Kronološki pregled uvajanja optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji

izr. prof. dr. Boštjan Batagelj

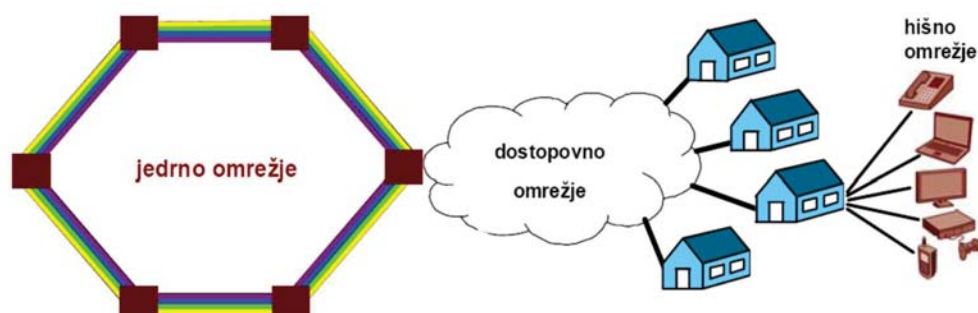
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

4. februar 2021

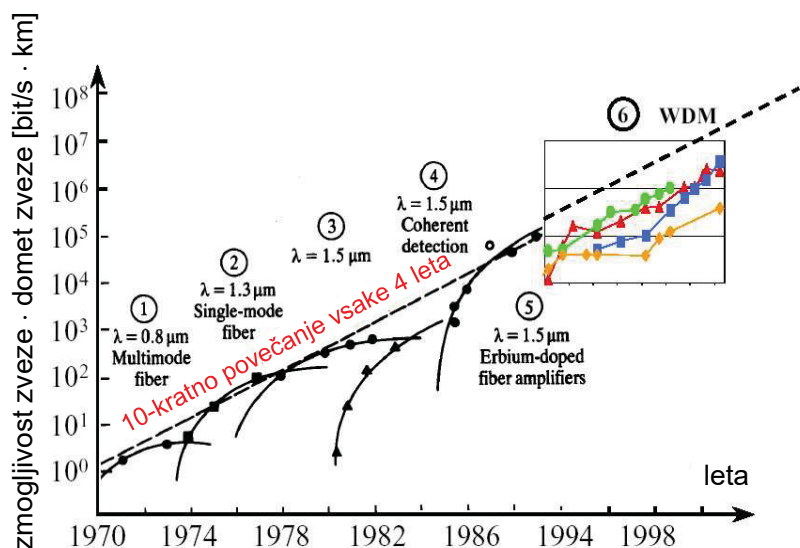


Vsebina predstavitve

- Zakaj optično vlakno v dostopu?
- Kronologija dogajanja v preteklih letih
 - od 2004 do 2009
 - od 2009 do 2021
- Tehnološke značilnosti optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji
 - točka – točka
 - točka – mnogo točk
- Kam naprej?



Razvoj optičnih komunikacij v prejšnjem stoletju za hrbtenico omrežja



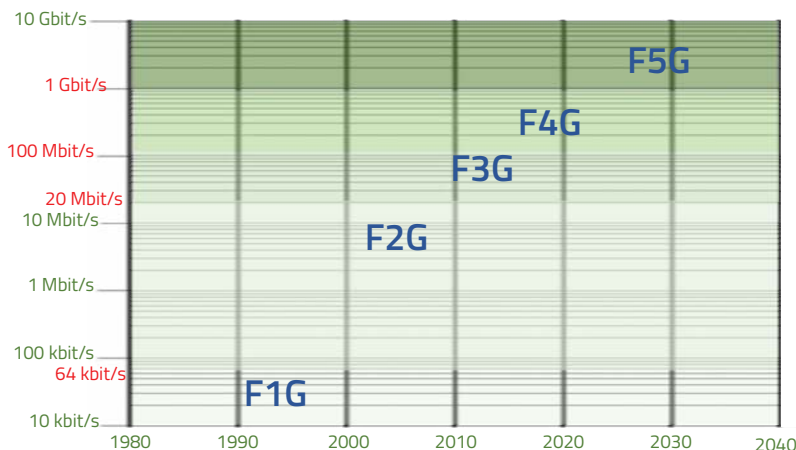
vir: E. Desurvire et al., "EDFA, Device and System developments, Vol. 2" J.Wiley & Sons, Inc., 2004.



Emanuel Desurvire, "Optical Communications in 2025", SOK 2006

- Leta 1970 je bila prva objava o WDM tehnologiji.
- Leta 1978 je bil izveden prvi laboratorijski WDM preizkus z uporabo dveh valovnih dolžin.
- Leta 1994 so se začeli uporabljati optični ojačevalniki.

Razvoj fiksnega omrežja v dostopu



F1G
Prva generacija fiksnih omrežij so bila telefonska omrežja v obdobju od začetka 19. stoletja do konca 20. stoletja, ko se pojavijo prve podatkovne storitve z uporabo klicnega dostopa in tehnologije ISDN. (Hitrosti prenosov do 64 kbit/s.)

F2G
Fiksno telekomunikacijsko omrežje vstopi v širokopasovno dobo v obdobju devetdesetih let prejšnjega in v prvem desetletju tega stoletja. Tehnologija ADSL je ponovno oživila sto let staro bakreno omrežje. (Prenosi do 20 Mbit/s)

F3G
Ker tehnologija ADSL ni podpirala storitev nad 30 Mbit/s, so operaterji za doseganje večje hitrosti uvedli tehnologijo VDSL in mrežno arhitekturo optičnih vlaken. (Prenosi do 100 Mbit/s)

F4G
Četrto generacijo zaznamuje vzpostavitev širokopasovnega optičnega dostopovnega omrežja – vlakno do doma, ki omogoča storitve 4K in stabilne zmogljivosti dostopa 100 Mbit/s ali več.

F5G
Specifikacije pete generacije fiksnih omrežij so usmerjene na dostopna omrežja, ki so v celoti izvedena iz optičnih vlaken, hitrost dostopa pa bo znašala več kot 1 Gbit/s.

vir: ETSI, Fifth Generation Fixed Network (F5G) <https://www.etsi.org/technologies/fifth-generation-fixed-network-f5g>

Boštjan Batagelj, Digitalni polet na krilih pete generacije, Delo, 23. 1. 2021 <https://www.delo.si/novice/znanoteh/digitalni-polet-na-krilih-pete-generacije/>



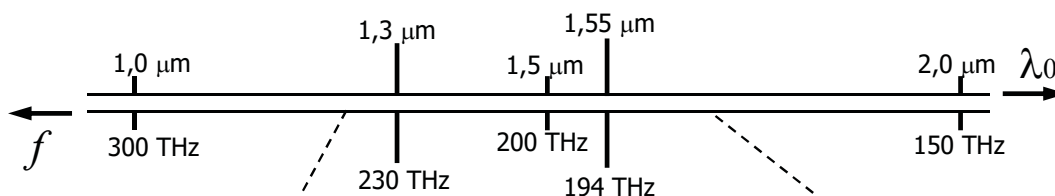
Primerjava optičnih vlaken z električnimi vodi



	bakrena parica, koaksialni vodnik	optično vlakno
izgube signala	(-) velike	(+) zelo majhne
frekvenčni pas	(-) majhen	(+) izredno velik
elektromagnetna občutljivost	(-) velika	(+) neobčutljivost
prisluškovanje	(-) enostavno	(-) je mogoče
galvanska ločitev	(-) v posebnih primerih	(+) vedno
komunikacijska oprema	(-) zahtevnejša	(+) enostavna
cena opreme	(+) cenejša	(+) drastično pada
energetska potratnost	(-) velika	(+) zelo majhna

Spekter optičnih komunikacij

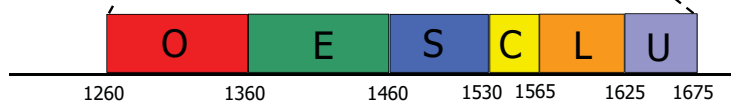
$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$



$$B_f \approx \frac{f^2}{c_0} \cdot B_\lambda = \frac{c_0}{\lambda_0^2} \cdot B_\lambda$$

$B_f \equiv$ frekvenčna pasovna širina

$B_\lambda \equiv$ valvnodolžinska pasovna širina



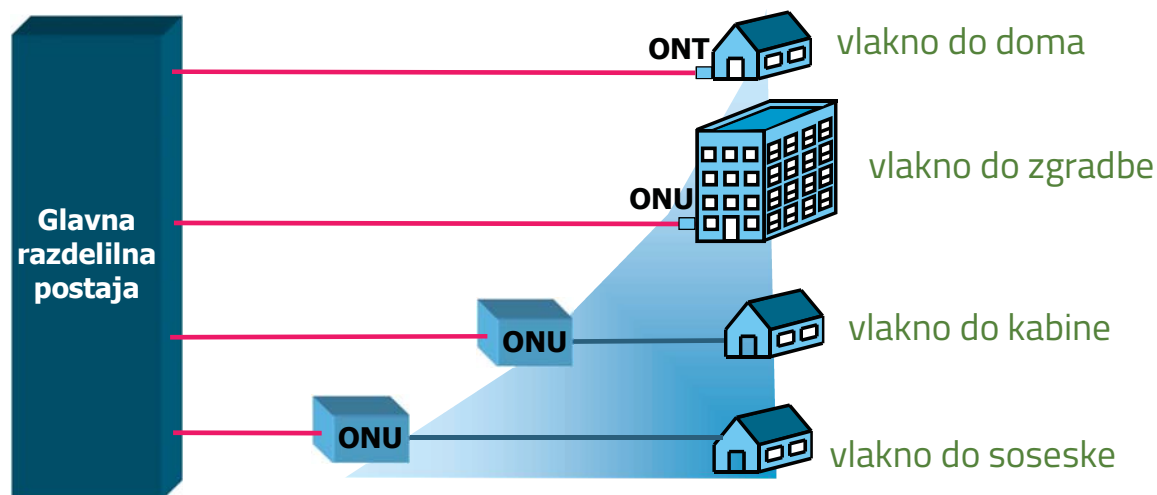
4,4 THz Erbijevo svetlobno ojačevalnik

frekvenčna in valvnodolžinska pasovna širina pri $\lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}$ in $f = 194 \text{ THz}$

B_λ	100 nm	10 nm	1 nm	0,1 nm	0,8 nm	0,08 nm	8 pm	0,8 pm
B_f	12,5 THz	1,25 THz	125 GHz	12,5 GHz	100 GHz	10 GHz	1 GHz	100 MHz

Vir: B. Batagelj, učbenik "Osnove optičnih komunikacij", 2015, http://iso.fe.uni-lj.si/studij/optika_vs/opticne%20komunikacije_BatageljB.pdf

FTTx (Fiber To The x) tehnologija



- ONT - (angl. Optical Network Terminal) optični omrežni terminal
- ONU - (angl. Optical Network Unit) optična omrežna enota

Začetki izgradnje optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji

- Septembra 2004 je Gratel začel za T-2 postavljati FTTH omrežje (enega prvih v Evropi).
- To je bil logičen korak, saj je bil do takrat T-2 brez lastne fizične telekomunikacijske infrastrukture – "greenfield" operator.



- Leta 2006 je bilo v izgradnjo zajetih že nekaj večjih mestih v Sloveniji.

Vir: Dušan Kočevar, "Deployment of Broadband Fiber-Optic Network in Slovenia". Gratel, Kranj, 2007.

- Leta 2006 je Telekom Slovenije začel množičen FTTH projekt, imenovan F².
- Bil je eden od prvih telekomov (nacionalnih operaterjev) v Evropi.
- Aprila 2007 je Telekom Slovenije priklopil svojega prvega FTTH naročnika.
- F² je imel za cilj opremiti 50.000 slovenskih domov do konca leta 2007 (dosegel je 40.000 v 2007).

Telekom Slovenije Group, "Annual report 2006 Telekom Slovenije Group and Telekom Slovenije d.d.", Ljubljana, May 2007.

Telekom Slovenije Group, "Annual report 2007 Telekom Slovenije Group and Telekom Slovenije d.d.", Ljubljana, May 2008.

<https://www.telekom.si/en/investor-relations/annual-and-interim-reports>

Slovenija ima zavidljivo pozicijo v svetu

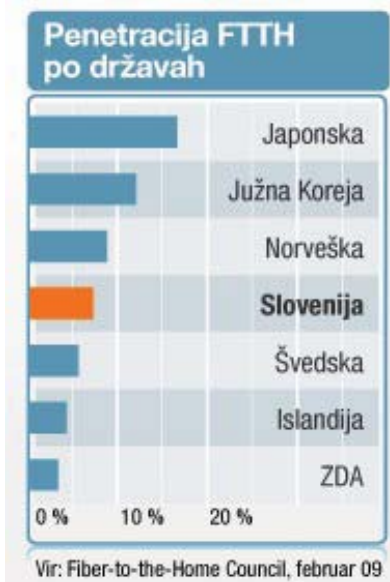
FTTH COUNCIL ISSUES FIRST OFFICIAL EUROPEAN RANKING OF FTTH MARKET PENETRATION

Brussels, Dec 15th, 2008 -

Sweden, Norway and Slovenia are the leaders in the first official European ranking of FTTH penetration published by the FTTH Council Europe today. The ranking shows the percentage of homes that receive broadband communications services over direct fibre optic connections. More than 80 percent of the

Country	Households connected in %
Sweden	8,28
Norway	7,22
Slovenija	4,72
Iceland	3,90
Denmark	3,11
Finland	1,73
Netherland	1,43
Italy	1,34
Estonia	0,99
Latvia	0,99

od 685 tisoč gospodinjstev



Pogled na prihodnost leta 2008

- Predvidevanja so leta 2008 uvrščala Slovenijo na drugo mesto v Evropi.

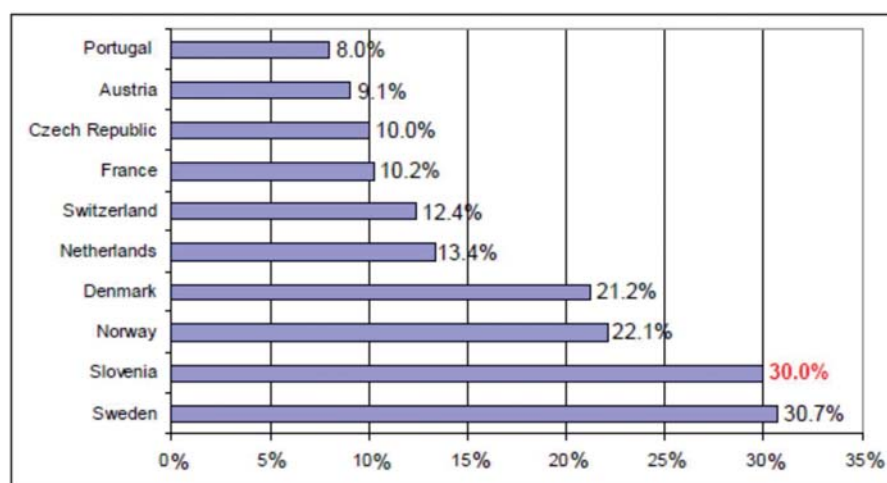


Figure 4. Top 10 European countries FTTH penetration rates (by the 2013).

Januarja 2011

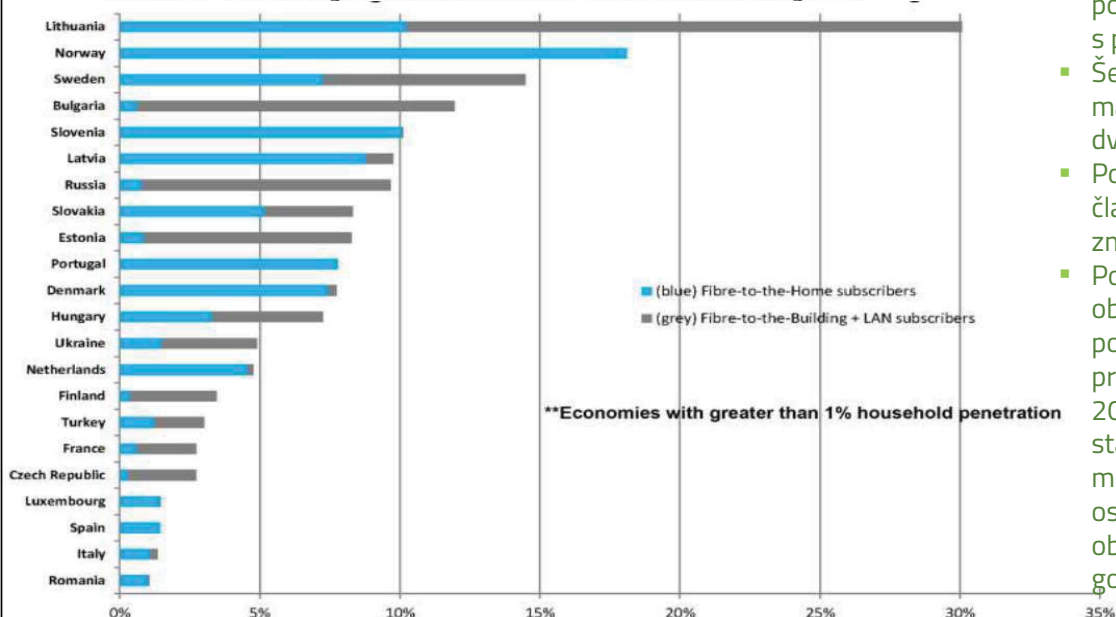
- Slovenija ponovno pridobi svetovno pozornost zaradi tehnologije FTTH.
- Tokrat zaradi prevelikega zadolževanja (800 milijonov evrov).
- Italijanski časopis "L'Espresso" razgalil propadle finančne posle mariborske nadškofije.



Vir: Tomaž Modic, Matjaž Polanič, "Kako sta Stres in Kramberger za Cerkev iz nič ustvarila milijonski dobiček", 3. avgust 2013, <https://www.dnevnik.si/1042600892>
"Zlom mariborske nadškofije je prisposoda za Slovenijo", Finance, 22. 1. 2014, <https://www.finance.si/8355508>

Junij 2012: Slovenija ima še vedno zavidljivo pozicijo v Evropi

Economies* with the Highest Penetration of Fibre-to-the-Home/Building + LAN



Statistični urad Republike Slovenije:

- 1. januarja 2011 je imela Slovenija 813.531 gospodinjstev, kar je povečanje za 128.000 v primerjavi s pred 10 let.
- Še posebej se je povečal delež manjših gospodinjstev z enim ali dvema članoma.
- Povprečno število družinskih članov v gospodinjstvu, se je zmanjšal z 2,8 na 2,5 članov.
- Povečanje števila gospodinjstev v obdobju od 2002 do 2011 je posledica povečanja števila prebivalcev (za 86.000 od leta 2002) in intenzivne gradnje stanovanj, ki zagotavljajo možnost za mlade, da zapustijo osnovno gospodinjstvo in oblikovanje svoje družine in gospodinjstva.

Opremljanje belih lis



- Gradnja odprtega širokopasovnega omrežja
- 82 milijona evrov EU denarja (od tega 12,4 milijona evrov nacionalnega denarja)
- 38 milijona privatnih investicij

- GOŠO1 (od 2008 do 2010), opremi 15.957 gospodinjstev s FTTH (konec 2015 je "take-up rate" 67%)
- GOŠO2 (od 2011 do 2012), opremi 13.497 gospodinjstev s FTTH (konec 2015 je "take-up rate" 33%).
- GOŠO 3 ni bil izpeljan
- GOŠO 4 v obsegu 7,6 milijona evrov (februar 2020) za 6.550 gospodinjstev do septembra 2023

Vir: "Načrt razvoja širokopasovnih omrežij naslednje generacije do leta 2020", marec 2016, a Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport ter zunanji deležniki,

<https://www.gov.si/assets/ministrstva/MJU/DI/Nacrt-razvoja-sirokopasovnih-omrezij.pdf>

Vir: European Commission, "The Broadband Handbook: 'Facing the challenges of broadband deployment in rural and remote areas'", 29. april 2020, <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/broadband-handbook-facing-challenges-broadband-deployment-rural-and-remote-areas>

Do leta 2013 za optiko 82,4 milijona evrov

Gradnja širokopasovnih omrežij je v Sloveniji na prednostni listi

Na Službi vlade za lokalno samoupravo in regionalno politiko (SVLR) so nam povedali, da je za gradnjo optičnih omrežij možno pridobiti sredstva iz Evropskega sklada za regionalni razvoj, in sicer v okviru Operativnega programa krepitev regionalnih razvojnih potencialov za obdobje 2007–2013.

Gradnja širokopasovnih omrežij je v okviru navedenega operativnega programa predvidena v prednostni usmeritvi, poimenovani Informacijska družba, ki je med drugim namenjena hitrejšemu razvoju informacijske družbe z možnostjo dostopa do širokopasovnih omrežij oziroma do storitev, ki jih ta omogočajo.

Optična vlakna za raziskovalce in kulturnike

Za zagotavljanje širokopasovnih povezav se izvajajo alternativne rešitve gradnje odprtih omrežij. Ta financirajo kot javno-zasebna partnerstva,

temeljnijo pa na različnih tehnologijah, denimo optika, xDSL, fiksni brezžični dostop (FWS), brezžične tehnologije ... »V prvem koraku je predvidena zagotovitev dostopa uporabnikom na celotnem ozemlju Slovenije do širokopasovnih storitev s funkcionalno zadovoljivo hitrostjo. V naslednjih korakih pa se bo omogočil dostop do večjih hitrosti s končnim dolgoročnim ciljem povezave večine prebivalcev v visoko zmogljivo – verjetno optično – omrežje, »poudarjajo na SV-LR. Projekti se bodo izvajali na območju vse Slovenije s poudarkom na pospešeni gradnji širokopasovnih omrežij v manj razvitih regijah, se posebej na podeželskih območjih. Predvidena je tudi zagotovitev hitrih povezav za potrebe organizacij s področja vzgoje, izobraževanja, raziskovanja in kulture.

Evropskega denarja skoraj šestkrat več kot domačega
Za izvedbo aktivnosti širokopasovnih povezav je pristojno ministrstvo za gospodarstvo v vlogi posredniškega telesa, razlagajo na SVLR. V novem programskem obdobju 2007–2013 znašajo sredstva za gradnjo širokopasovnih povezav

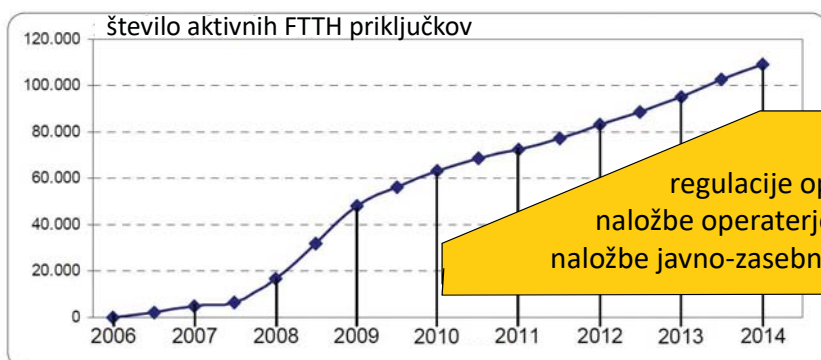
82,4 milijona evrov, od tega je 70 milijonov namenskih sredstev EU, natančneje Evropskega sklada za regionalni razvoj, preostalih 12,4 milijona je slovenska udeležba. Ministrstvo za gospodarstvo je v novem programskem obdobju 2007–2013 objavilo že en javni razpis za gradnjo, upravljanje in vzdrževanje odprtih širokopasovnih omrežij elektronskih komunikacij v lokalnih skupnostih, in sicer za 47,4 milijona evrov nepovratnih sredstev. Trenutno na direktoratu za elektronske komunikacije v okviru ministrstva za gospodarstvo potekajo aktivnosti za pripravo novega javnega razpisa za gradnjo širokopasovnih omrežij.

Del petih milijard za krizo gre tudi k nam

V okviru iskanja kriznih mehanizmov je bil na ravni EU dosežen okvirni dogovor o svežnju pet milijard evrov za oživitve evropskega gospodarstva. Del sredstev naj bi imelo na voljo tudi ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, in sicer za sofinanciranje gradnje širokopasovnih omrežij v okviru Operativnega programa razvoja podeželja za obdobje 2007–2013.

Prelomno leto 2009

- Zaradi ekonomske krize se popolnoma ustavi gradnja pri T-2. → Tudi Telekom Slovenije ustavi gradnjo.
- Na trg vstopi regulacija (tudi optičnega) dostopovnega omrežja.
- Regulacija prizadene zgolj Telekom Slovenije, saj jemlje dostopovno omrežje kot celoto.
- T-2 s 16% in Telemach s 13% tržnim deležem aktivnih povezav nista vključena v uredbo.



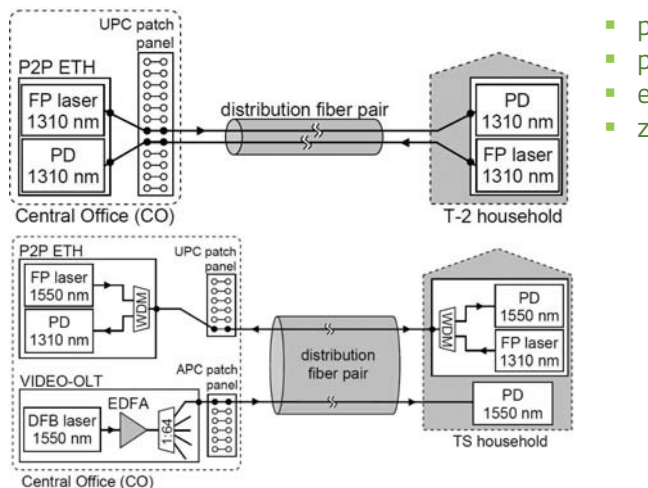
pospešena izgradnja omrežja FTTH v mestih s komercialnimi naložbami

izgradnja podeželskih območij z javno-zasebnim partnerstvom in upoštevanje načela odprtih dostopnih omrežij

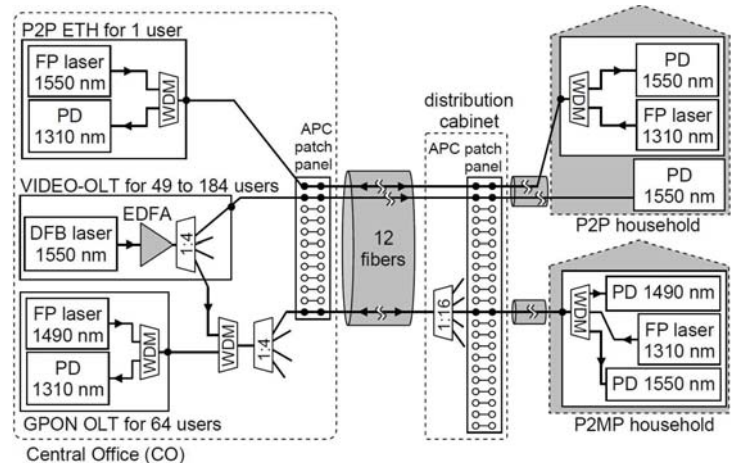
- Nekateri za zamrznitev gradnje krivijo APEK (današnji AKOS), ker mislijo, da predpisi za trg ovirajo naložbe.
- Vendar iz zaporedja dogodkov vemo, da to ni res, saj se je gradnja ustavila že preden je na trg vstopila regulacija v prvi polovici leta 2011.

Izvedbe optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji

- prenos po dveh vlaknih brez videa (zgolj IPTV)
- popolnoma dvosmerna zveza brez deljenja pasovne širine
- enostavnost izvedbe, vzdrževanja in nadgradnja
- za prenos podatkov se uporablja 1300 nm
 - nizke krivinske izgube
 - poceni FP laser (poceni pretvorniki)



- prenos po dveh vlaknih (ločen video)
- uporabljena WDM tehnologija za izogib motnjam
- odtok na 1310 nm (poceni FP laser pri uporabniku)
- dotok na 1550 nm
- distribucija videa na 550 nm (EDFA, deljenje)
- zahtevano dobro razmerje S/N
- problem je interferometriški šum
- APC konektorji na enem vlaknu



vir: Boštjan Batagelj, "Deployment of fiber-to-the-home in the Slovenian telecommunications market" *Fiber and integrated optics*, vol. 32, str. 1-11, 2013.

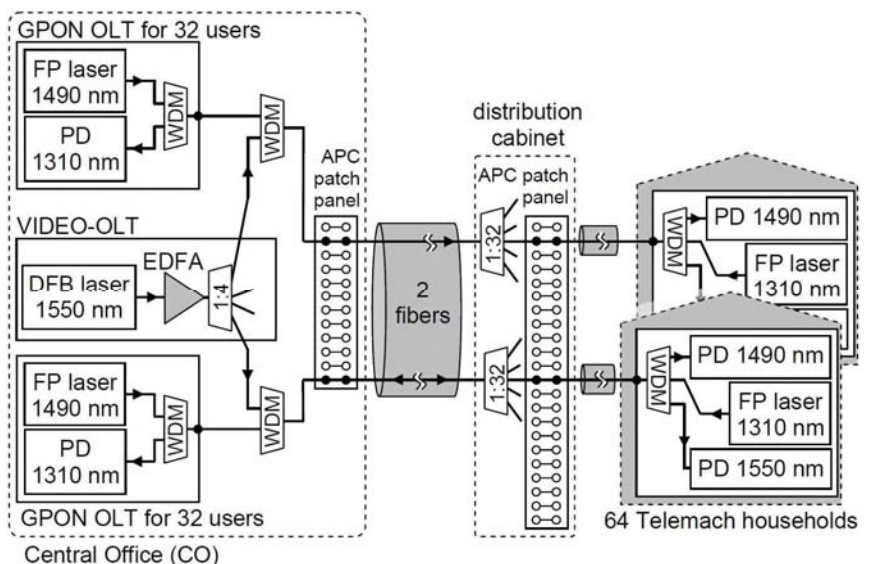
Kebeljski operaterji

Razlogi za nadgradnjo KKS v hibridno optično/koaksialno (angl. hybrid fiber-coaxial – HFC) omrežje:

- odpravljanje kaskade velikega števila električnih ojačevalnikov,
- zamenjava enosmernih ojačevalnikov za dvosmerni promet,
- razdelitev investicijskih stroškov na več uporabnikov,
- pomenljivo varčnejše vzdrževanje vlakenskih povezav.

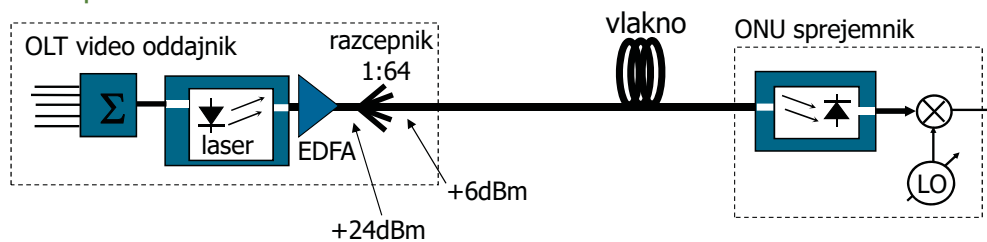
Razlogi za uvedbo popolnoma optičnega omrežja:

- za nadgradnjo HFC omrežja se uporablja uveljavljena tehnologija GPON.
- GPON zahteva le polovico servisnih posegov v primerjavi s HFC.
- Zaradi nizkih izgub v optičnem vlaknu se tudi privarčuje precej energije.

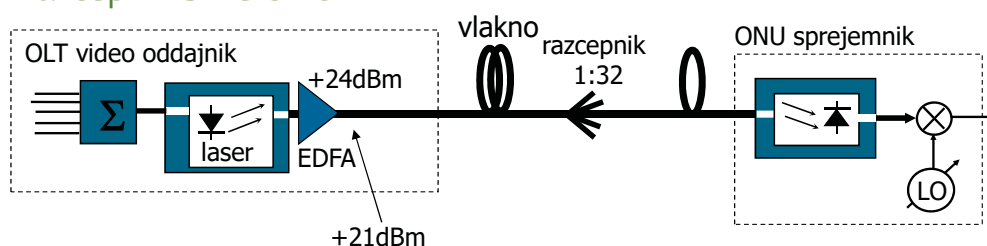


Namestitev razcepnika

Razcepnik v OLT

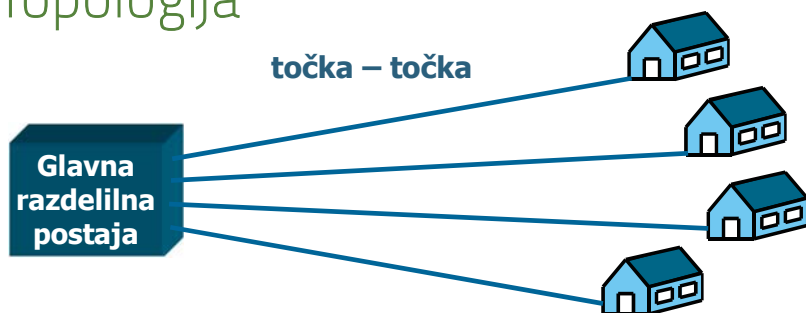


Razcepnik bliže ONU

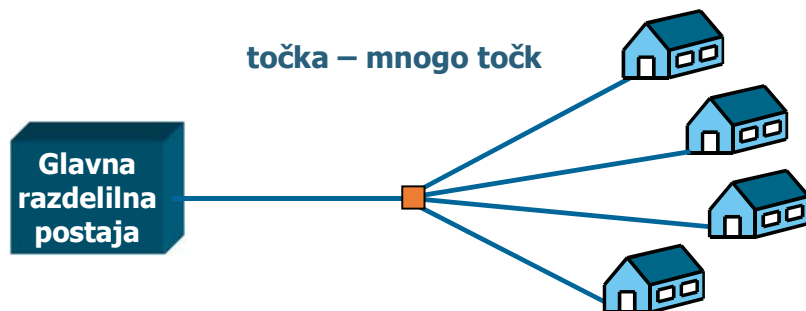


Topologija

točka – točka



točka – mnogo točk



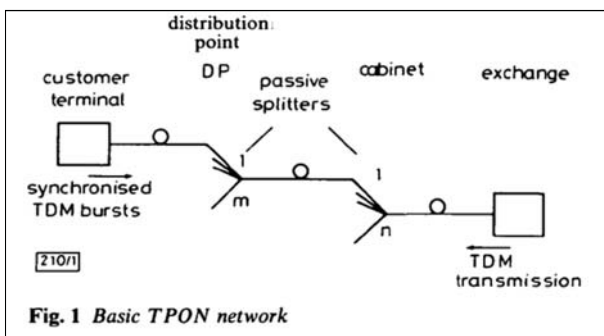
Topologija pasivne zvezde:

- povezava točka-točka
- usmerjevalnik v glavni razdelilni postaji
- enostavna nadgradnja sistema na višje zmogljivosti zvez
- popolnoma dvosmerna zveza brez deljenja pasovne širine
- domet do 80 km (120 km)
- do končnega uporabnika peljemo dve vlakni

Topologija pasivnega drevesa:

- zahteva manjšo količino položenega vlakna
- zahteva manj prostora v centrali
- manjša poraba električne energije v centrali
- porazdelitev stroškov izgradnje in obratovanja med več uporabnikov
- do končnega uporabnika peljemo eno vlakno (GPON v standardu predvideva eno ali dve vlakni)

Pasivno optično omrežje



- Prvi zapis o tehnologiji PON (angl. passive optical network)
 - J. R. Stern, et. al. (British Telecom), Passive Optical Local Networks for Telephony Applications and Beyond, Electronics Letters, november 1987
- Prvi standard tehnologije GPON (2004)

$$\text{delilno razmerje [dB]} = -10 \log\left(\frac{1}{N}\right)$$

1:2	3 dB
1:4	6 dB
1:8	9 dB
1:16	12 dB
1:32	15 dB
1:64	18 dB
1:128	21 dB

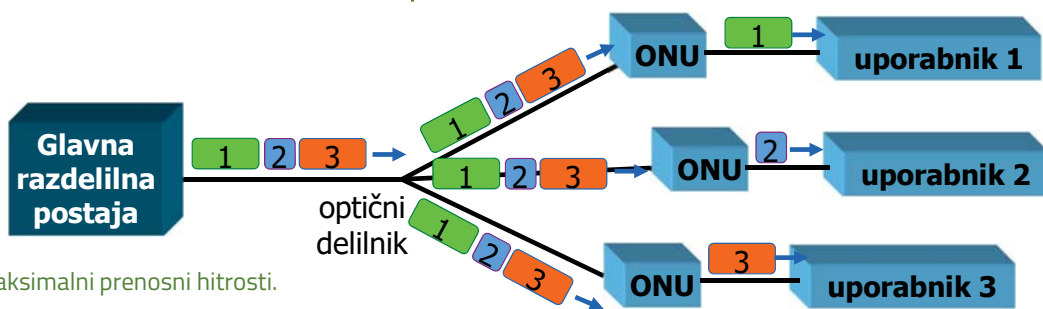
$$P_{\text{izh}} = \frac{P_{\text{vh}}}{N}$$

PON razcepnik

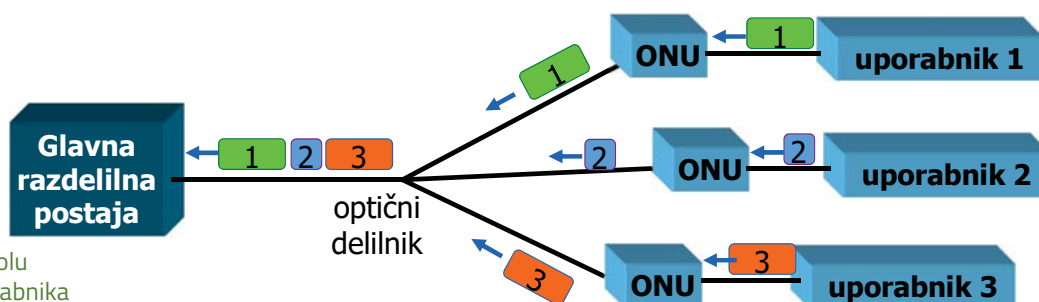
- Svetlobni razcepnik je vlakenski element, ki spaja eno optično vlakno na mnogo ločenih vlaken.
- Optični signal, ki prihaja na vhod razcepnika, se pojavi na vseh izhodih.
- Moč signala se razdeli med vse izhode.
- V primeru enakomernega deljenja moči je izhodna moč zmanjšana za faktor delilnega razmerja – število izhodov (N).
- Svetlobni razcepnik je linearen in recipročen element.

Časovni multipleks in časovni sodostop

- valovna dolžina 1550 nm ali 1490 nm
- Optična omrežna enota sprejme vse pakete in izloči samo tistega, ki je namenjen pripadajočemu uporabniku. -> prisluškovanje
- Optična omrežna enota deluje na maksimalni prenosni hitrosti.



- valovna dolžina 1310 nm
- preprečiti je potrebno kolizije med paketi
- ko ena izmed optičnih omrežnih enot govori, so ostale izključene (časovni sodostop)
- zahteva po komunikacijskem protokolu
- nevarnost pred neposlušnostjo uporabnika



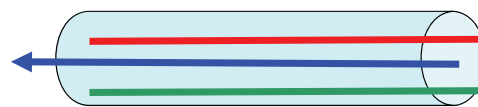
Tehnike razvrščanja v PON

- odtočni in dotočnim promet na istem vlaknu se ne smeta motiti

valvnodolžinsko razvrščanje:

- Za distribucijo videa se uporablja 1550 nm (EDFA, S/N, deljenje)
- Za podatke k uporabniku (dotok) se uporablja 1490 nm (laser z veliko močjo)
- Za podatke od uporabnika (odtok) se uporablja 1300 nm (poceni FP laser)

Data (up)
1310 nm



Video
1550 nm

Data (down)
1490 nm

časovno razvrščanje:

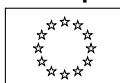
- upravljanje z dotočnim (angl. downstream) prometom
- upravljanje z odtočnim (angl. upstream) prometom

- Zahtevni uporabniki poleg zmožljive zveze želijo tudi nizke zakasnitve (angl. latency).
 - Dolžina dostopnega omrežja je maksimalno 20 km.
 - Hitrost razširjanja svetlobnega signala je $2 \cdot 10^8$ m/s.
 - Zakasnitev signala v eni smeri je 0,1 ms.
 - Zakasnitev signala v obe smeri je 0,2 ms.
 - Pri TDM PON je dotok sestavljen iz okvirjev, ki trajajo 0,125 ms.
 - Dinamično dodeljevanje pasovne širine (angl. Dynamic Bandwidth Allocation) ima odzivnost dveh ciklov, kar je 0,250 ms.
- GPON tehnologija je časovno potratna in neprimerna za zahtevne uporabnike.

Pred zaključkom

- “Digitalna Agenda” - strateški dokument evropske komisije izdan 2010

Europe's Digital Agenda



“By 2020, all Europeans should have access to internet of above 30 Megabits per second (Mbps) and 50% or more of European households have subscriptions above 100Mbps”

- Do leta 2020 naj bi vsi Evropejci imeli dostop do interneta s hitrostjo več kot 30 megabajtov na sekundo (Mbps), 50 % ali več evropskih gospodinjstev pa naj bi bilo naročenih na hitrosti, večje od 100 Mbps
- Septembra 2016 dopolnjeno na
 - The European Commission's public consultation on the needs for Internet speed and quality beyond 2020 and measures to fulfil these needs by 2025 reveals clear expectations for the quality of service of fixed Internet connectivity to improve by 2025, especially regarding downlink speed (above 1 Gbps) and responsiveness (less than 10 milliseconds), and confirms the increasing importance of features other than download speed for both fixed and mobile connectivity.
 - Strategic objective for 2025: Gigabit connectivity for all main socio-economic drivers such as schools, transport hubs and main providers of public services as well as digitally intensive enterprises.

(1) Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2010) 245 final, A Digital Agenda for Europe, 19.5.2010, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0245:FIN:EN:PDF>

(2) See Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, European broadband: investing in digitally driven growth, COM(2010) 472 final, 20/09/2010, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52010DC0472>

(3) See Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Connectivity for a Competitive Digital Single Market - Towards a European Gigabit Society, COM(2016) 587 final, 14.9.2016 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/GA/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0587>

Zaključki

- FTTH je končna rešitev v širokopasovnih dostopovnih tehnologijah
- Na žalost so investicije v FTTH v preteklosti zapoznele zaradi:
 - alternativnih vrvičnih rešitev (DOCSIS, VDSL, G.fast)
 - alternativnih brezvrvičnih rešitev (WiFi, 4G, 5G (26 GHz))
 - Napačnih političnih in menedžerskih odločitev
 - Pomanjkanja uporabnosti
- FTTH je najbolj energetsko učinkovita dostopovna tehnologija

Pomen optičnega omrežja za Slovensko digitalno družbo

Importance of the optical network for the Slovenian digital society

Katja Mohar Bastar

Digitalno inovacijsko stičišče Slovenije

katja.bastar@gmail.com

Povzetek

Digitalizacija je v letu 2021 že dejstvo, ki nam omogoča novo realnost v zadnjem letu. V tem letu smo ugotovili katere so glavne potrebe na digitalnem področju ter kje so močne in kje šibke točke. Pogoj, ki je vitalen pa je vsekakor infrastruktura. Kljub umestitvi Slovenije v povprečje EU glede na povezljivost v analizi kazalnikov DESI, nam to nikakor ne sme biti dovolj, temveč si mora Republika Slovenija prizadevati za polno pokritost z omrežjem, kar je bil tudi cilj Evropske Digitalne agende pred skoraj že desetletjem. Kljub številnim projektom, vključeni državni pomoči in razpisom za tržni interes, pa tega cilja še vedno nismo dosegli. Nadzor nad izvajanjem zavez v projektih, povezanih z državno pomočjo bo nuja, če bomo želeli doseči ustrezno pokritost ozemlja.

Abstract

In 2021 digitalization is already a fact, enabling the new normality we are facing. Last year brought us recognitions of the main needs on a digital field, where are our strong and weak spots. The vital condition is infrastructure. The fact of Slovenia being the EU average in the DESI index in the section of connectivity should not be sufficient but we must still aim for the reaching Digital agenda goals from almost a decade ago. Despite many projects and state aid engaged

commercial interest tenders, the goal is not reached by now. The supervision of the state aid projects realization is necessary if we want to achieve the sufficient coverage.

Biografija avtorja

Mag. Katja Mohar Bastar od marca 2020 deluje kot direktorica Digitalnega inovacijskega stičišča Slovenija, enotne točke za digitalizacijo v Sloveniji, s fokusom na digitalizaciji malih in srednjih podjetij, pa tudi drugih področij družbe. Pred tem je več kot 15 let delovala na področju regulative, ki jo preko Sekcije operaterjev elektronskih komunikacij in strateške skupine za regulativo in okolje pri Slovenski digitalni koaliciji aktivno spremlja še danes. Kot vodja regulative je bila od leta 2016 zaposlena v Telekomu Slovenije, do leta 2016 pa je bila na Agenciji za komunikacijska omrežja in storitve zaposlena kot vodja področja za telekomunikacije.

Seminar optične komunikacije: Pomen optičnega omrežja za slovensko digitalno družbo



DIGITALNO
INOVACIJSKO
STIČIŠČE SLOVENIJE

mag. Katja Mohar Bastar, direktorica DIH Slovenije



DIGITALNO
INOVACIJSKO
STIČIŠČE SLOVENIJE



EVROPSKA UNIJA
EVROPSKI SKLAD ZA
REGIONALNI RAZVOJ



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA GOSPODARSKI
RAZVOJ IN TEHNOLOGIJO



Naložbo sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.



DIGITALNO
INOVACIJSKO
STIČIŠČE
SLOVENIJE

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

ZAHAJMO DIGITALNO!



vzpostavitev digitalnega ekosistema



neposredna podpora MSP



dvig digitalnih kompetenc

vzpodbujanje inovacij in prototipov

podpora digitalni transformaciji



povezovanje na nacionalni in evropski ravni



promocija in ozaveščanje o pomenu digitalizacije





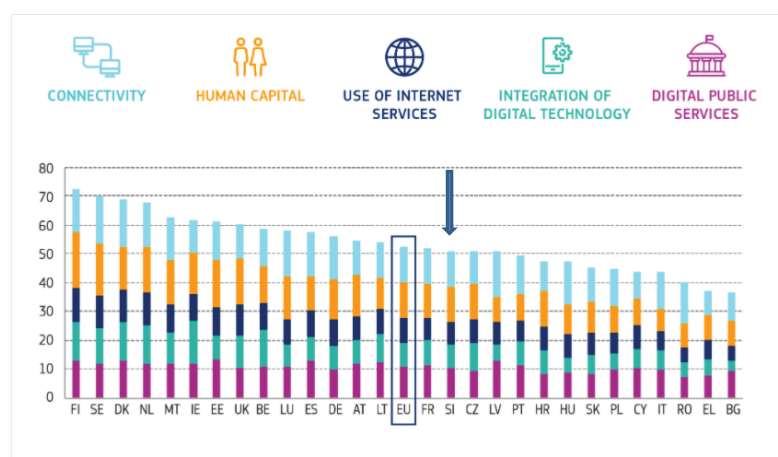
DESI indeks (digital economy and society index – indeks digitalnega gospodarstva in družbe), je sestavljen iz naslednjih komponent:

- Povezljivost, ki zajema fiksno in mobilno širokopasovni omrežje, torej, da sploh obstaja možnost da uporabniki dostopajo do storitev,
- Človeški kapital: veščine uporabe interneta in napredne veščine,
- Uporaba interneta, ki kaže koliko državljani uporabljamo internetne storitve in spletne transakcije,
- Integracija digitalne tehnologije, ki pomeni poslovno digitalizacijo in elektronsko trgovanje,
- Ter javne digitalne storitve ki zajemajo e-upravo in e-zdravje.

Vir: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/digital-economy-and-society-index-desi>



DESI 2020

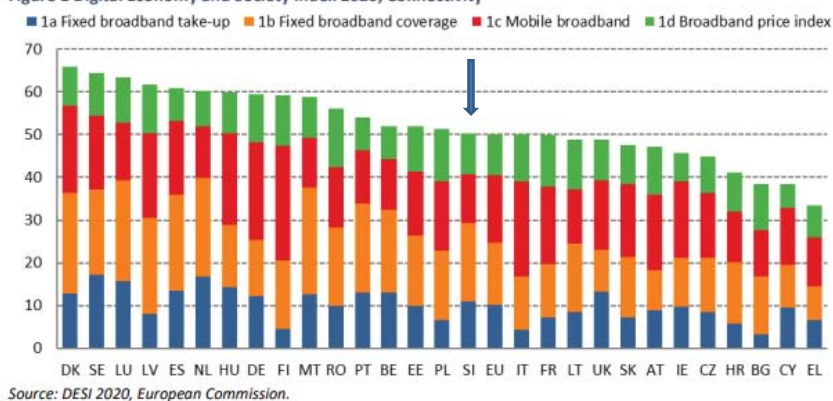


Vir: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/digital-economy-and-society-index-desi>

Teoretični okvir – DESI index

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

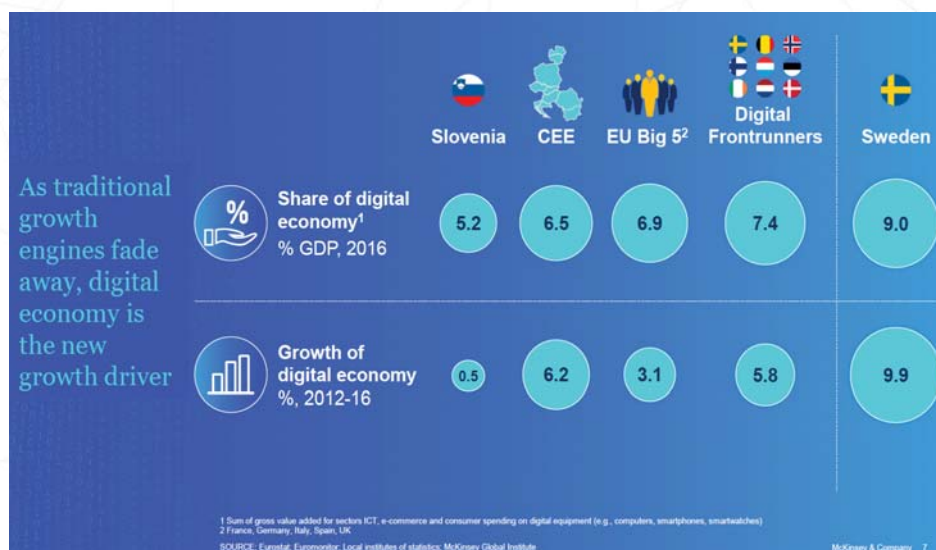
Figure 1 Digital Economy and Society Index 2020, Connectivity



Vir: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/digital-economy-and-society-index-desi>

Teoretični okvir – McKinsey študija

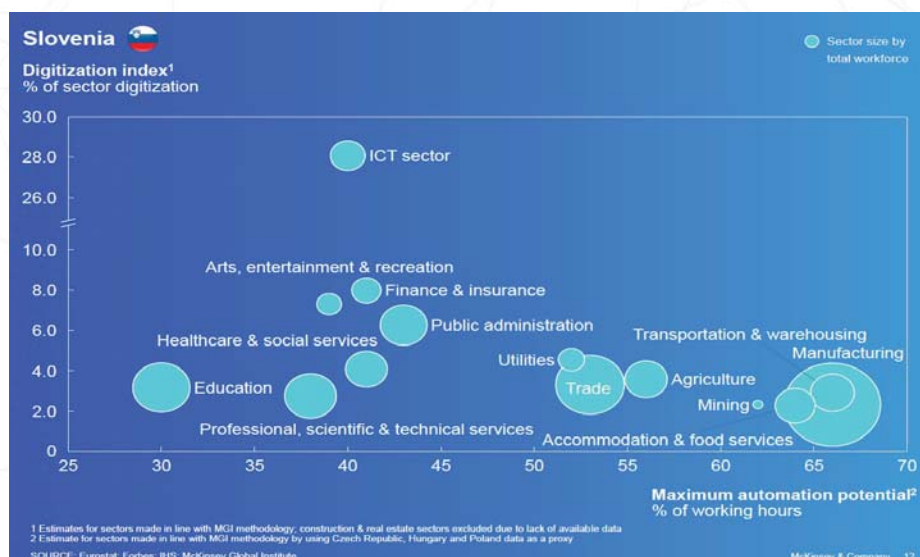
DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA



Vir: <https://digitalchallengers.mckinsey.com/>

Teoretični okvir – McKinsey študija

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA



Vir: <https://digitalchallengers.mckinsey.com/>

Teoretični okvir – McKinsey študija

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

10 recommendations to increase digitization in Slovenia

Public sector

- Build skillset for the future** by developing a wide-ranging reskilling strategy, updating youth education for the future and actively counteracting brain drain
- Support technology adoption in the public sector** by speeding up the development of online public services and its adoption
- Support technology adoption among businesses** by promoting digitization benefits and digital transformation, enabling e-commerce through favorable regulation and incentivizing companies to use digital tools
- Strengthen regional cross-border digital collaboration** by creating a strong digital pillar within regional collaboration platforms and ensuring standardized & flexible digital policy solutions
- Improve startup eco-system** by developing entrepreneurial talent pool and supporting startup hubs, increasing and simplifying access to capital

Private sector

- Invest in human capital** by preparing talent strategy for the digital economy, updating approach to recruiting and actively driving reskilling
- Actively adopt technology and innovation** by adapting your business model and leveraging digital tools in both revenue and cost management
- Embrace a pro-digital organizational culture** by ensuring role modeling from top leadership and implementing reinforcing mechanisms to reward adoption digital

Individuals

- Prepare for the digital economy** by investing in life-long learning, especially in competencies that are hard to automate
- Take advantage of digital tools** by leveraging digital platforms and tools in everyday life

McKinsey & Company 23

Vir: <https://digitalchallengers.mckinsey.com/>



- V tem desetletju preplet **digitalne preobrazbe s prehodom v četrto industrijsko revolucijo**, demografske spremembe, prehod v nizkoogljično družbo in gospodarstvo.
- **Znanje in neoprijemljiv kapital**, katerega pomen se bo v času četrte industrijske revolucije še povečal, je Slovenija zadržala relativne primerjalne prednosti glede na konkurenčne države in regije, ki pa jih postopoma izgublja.
- 26% tehnično ogroženih delovnih mest - pozitivno povezavo med digitalizacijo oz. robotizacijo in zaposlenostjo, kar pomeni, da podjetja, ki se uspejo prva preobraziti, realizirajo ne samo hitrejšo rast, ampak tudi pospešujejo zaposlenost.
- **Okrepljen socialni dialog** in vnaprejšnji družbeni dogovor o načinih ohranjanja družbene in teritorialne kohezije –neukrepanje povečanje nevarnosti socialnih neenakosti; potreba po skladnejšem teritorialnem razvoju
- Slovenija se po **indeksu digitalnega gospodarstva** in družbe sicer uvršča rahlo za povprečjem EU, pri čemer svoj zaostanek postopno povečuje.
- Pri osnovni ravni uvajanja digitalizacije v podjetja, so **velika podjetja med uspešnejšimi, majhna in srednja podjetja pa zaostajajo in so na povprečju EU**.

Vir:

https://www.umar.gov.si/fileadmin/user_upload/publikacije/Porocilo_o_produkivnosti/2020/slovenski/PoP_2020_splet.pdf



Priporočila UMAR ekonomski politiki

1. Bolj ambiciozen pristop k spodbujanju digitalne preobrazbe
2. Krepitev poslovnega okolja z digitalno-inovacijskim ekosistemom
3. Srednjeročnim potrebam prilagojen razvoj znanj in spretnosti
4. Nadaljnje vlaganje v digitalno infrastrukturo, varnost in odprte podatke
5. Mobilizacijo družbe za spremembe in vključujoč prehod

Vir:

https://www.umar.gov.si/fileadmin/user_upload/publikacije/Porocilo_o_produkivnosti/2020/slovenski/PoP_2020_splet.pdf



Priporočila UMAR za podjetniški sektor:

- Takojšen in strateški pristop k digitalni preobrazbi
- Intenzivna vlaganja v (vseživljenjsko) učenje zaposlenih ter vzpostavitev »digitalne miselnosti in kulture«,
- Pospešitev vlaganj v digitalne projekte (vlaganj, še posebej v raziskave, razvoj in inovacije)
- Preobrazba organizacije in poslovnih modelov

Vir:

https://www.umar.gov.si/fileadmin/user_upload/publikacije/Porocilo_o_produktnosti/2020/slovenski/PoP_2020_splet.pdf



- Slovenija je po vseh kazalnikih nekje okoli povprečja.
- Nujne so vzpodbude gospodarstvu za digitalno preobrazbo.
- Dvig kompetenc na ravni šolanja, kot tudi vseživljenjskega učenja – zaposlenih, potrošnikov, aktivnega pa tudi neaktivnega prebivalstva.
- Spodbujanje inovacij in raziskovanja za povečanje blaginje in konkurenčnosti.
- Oblikovanje socialne pogodbe.
- Oblikovanje teritorialno uravnotežene proizvodnje.
- Ustrezna regulativa, predvidljivost, sorazmernost.



Področja digitalizacije

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

Optična povezava do vseh slovenskih šol in izobraževalnih ustanov

- Pouk na daljavo – delo učiteljev iz prostorov šole;
- Sprememba kurikuluma in vključitev predmetov, ki učencem omogočajo izgradnjo digitalnih profilov;
- Spodbujanje šolskih inkubatorjev ;
- Motiviranje otrok in mladostnikov za tehnične poklice;
- Centralna točka za optično povezavo tudi na sivih in belih lisah.



Področja digitalizacije

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

Industrija 4.0

- Poslovni objekti izven komercialno zanimivih središč (teritorialna uravnoteženost)
- Potreba po hrbteničnem omrežju
- Integracija informacijsko komunikacijskih tehnologij (ERP, IoT, komunikacija človeka in stroja, kibernetiko fizični proizvodni sistemi)
- Obvladovanje rešitev 3.0
- Spodbujanje inovacijskih in eksperimentalnih okolij

Področja digitalizacije

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

Mala in srednja podjetja

- Najštevilčnejši segment
- Podpore za intenzivno digitalno transformacijo
- Teritorialna/ kohezijska razpršenost
- Agilnost in vitko delovanje
- Podporna okolja
- Slabše digitalizirana kot večja podjetja (e-računi, ERP, CRM, sistemi za zagotavljanje in upravljanje kakovosti)

HVALA

za pozornost!



info@dihslovenia.si

040 606 710

www.dihslovenia.si

Vpeljava XGS-PON v Telekomu Slovenije

Introduction of the XGS-PON in Telekom Slovenije

Rok Čotić

Telekom Slovenije

rok.cotic@telekom.si

Povzetek

V predavanju je zajeta kratka predstavitev storitvenih in tehnoloških trendov na področju širokopasovnega dostopa, ter vpliv enih na druge. Prikazan je razvoj optičnih tehnologij in pogled v prihodnost, kaj lahko na tem področju pričakujemo. Glavna tema je namenjena opisu možnosti vpeljave tehnologije XGS-PON v omrežje Telekoma Slovenije ter katerim tehnološkim lastnostim je pri tem potrebno posvetiti pozornost.

Abstract

The lecture includes a brief presentation of service and technological trends in the field of broadband access, and the impact of one on another. The development of optical technologies and a look into the future of what to expect in this field are presented.

Author's biography

Rok Čotić started his career in 1997 in the investment department of Telekom Slovenije. He was initially responsible for the TDM network and latter on for Centrex and xDSL technologies. He successfully completed his MBA in 2006 and in 2007 he became head of the Department for access elements. In 2013, he became the coordinator for access elements, and in 2016 he took over the management of the team for access devices and transmission systems.

Biografija avtorja

Rok Čotić je začel svojo kariero leta 1997 v investicijskem oddelku Telekoma Slovenije. Najprej je bil odgovoren za omrežje TDM, kasneje Centrex in xDSL. Leta 2006 je uspešno zaključil študij MBA in v letu 2007 postal vodja Oddelka za dostopovne elemente. V letu 2013 je postal koordinator za dostopovne elemente, v letu 2016 pa je prevzel vodenje tima za dostopovne naprave in sisteme prenosa.

Vpeljava XGS-PON v Telekomu Slovenije

Rok Čotić, MBA

4. februar 2021

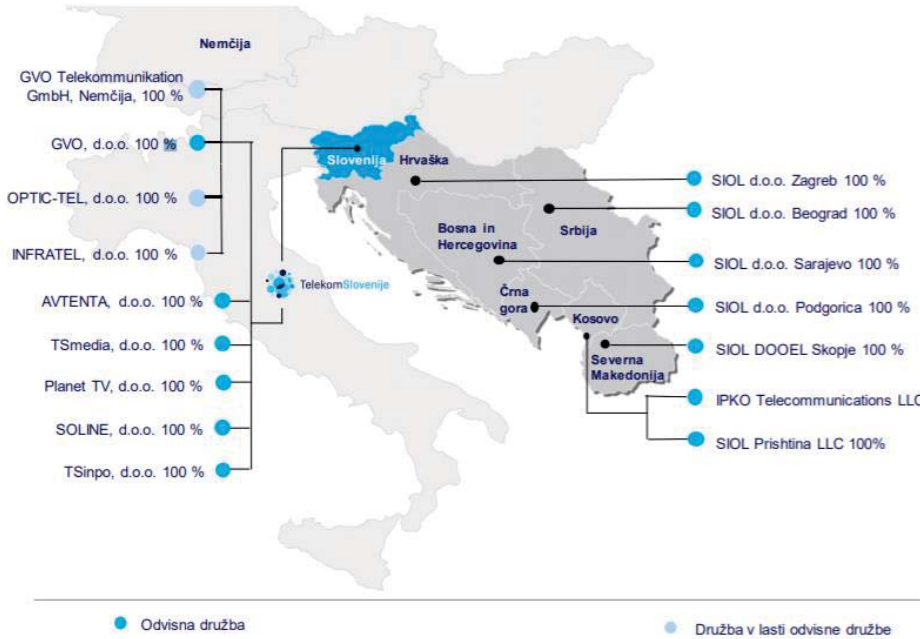
TelekomSlovenije 

Vsebina

- [Kratka predstavitev Telekoma Slovenije](#)
- Tehnološki in storitveni trendi
- PON tehnologija
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

Telekom Slovenije

Trgi in družbe Skupine Telekom Slovenije



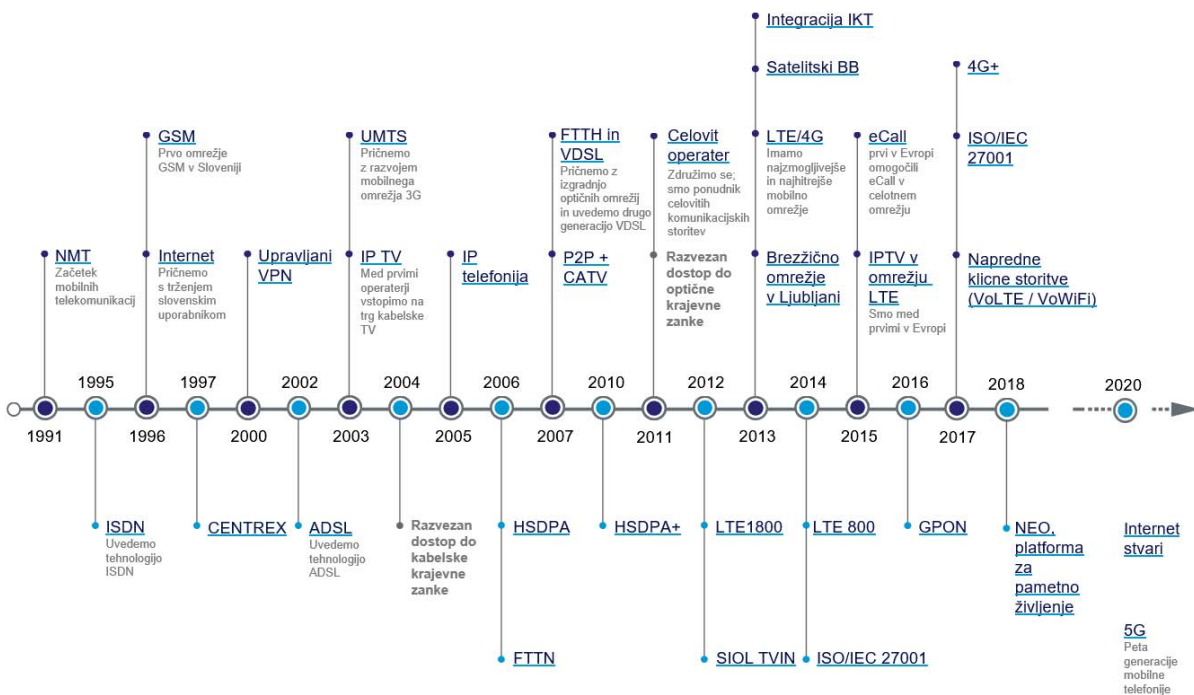
Vizija, poslanstvo in vrednote



3



Razvoj omrežja in storitev Telekoma Slovenije skozi čas



4



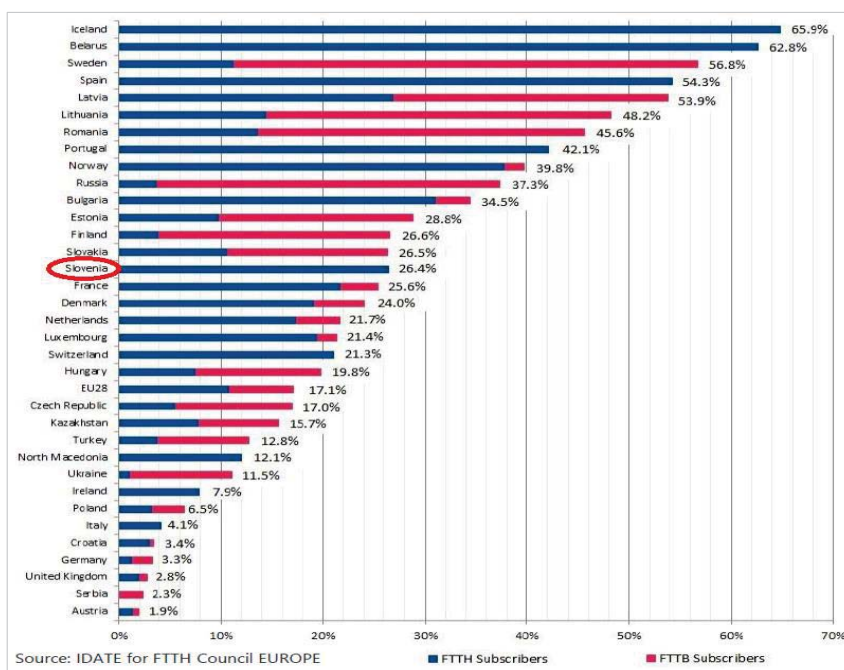
Vsebina

- Kratka predstavitev Telekoma Slovenije
- Tehnološki in storitveni trendi
- PON tehnologija
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

5

Trendi v svetu

- Giga Home evolucija;
- Rast podatkovnega prometa in NGA priključkov;
- Internet stvari;
- Mobilnost;
- Pospešena FTTH gradnja;
- Konvergenca 5G in FTTH;
- Novi poslovni modeli (Smart-x) in ekosistemi;
- Varnost in zasebnost;
- Kakovost in odlična uporabniška izkušnja;
- Infrastrukturalna konkurenca;
- Nove tehnologije in višje potrebe po pasovni hitrosti;
- Opuščanje bakrenih omrežij.



6

Zagotovitev dostopnega omrežja prihodnosti

Omrežje mora omogočati delovanje prihajajočih storitev

Prihaja **4K, 8K, VR/AR, IOT**, massive connectivity, IOE (Internet of Everything), videoanalitične rešitve, Internet TV, VR konference, VR gaming, telemedicina, ...

Smernice:

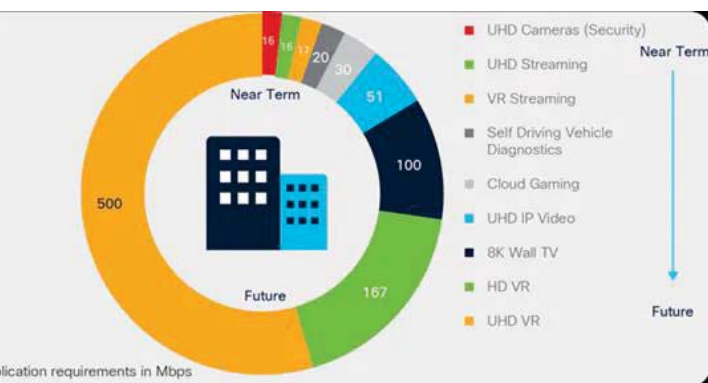
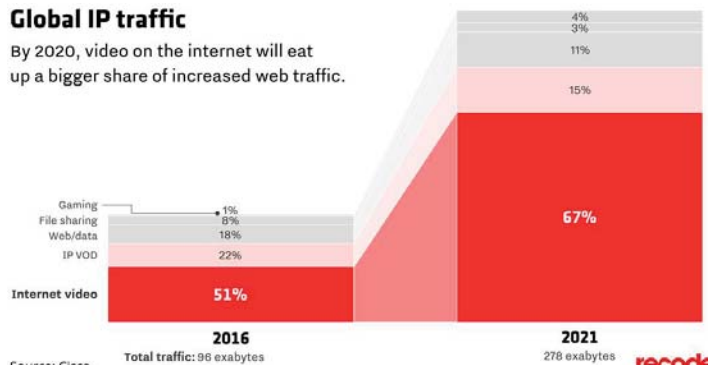
- Full 1Gbit/s mainstream -> Gigabitna družba
- Širjenje omrežja z opremo, ki podpira vgradnjo prihajajočih FTTH tehnologij in združevanje omrežij
- Ekonomičnost gre v smeri PON tehnologij
- **Masovni prehod** xDSL → FTTH



7

Global IP traffic

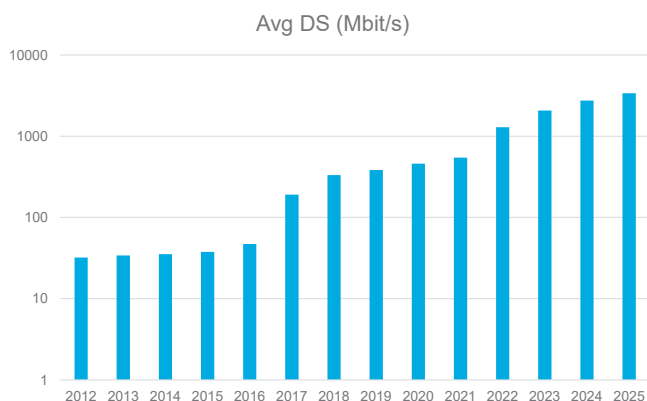
By 2020, video on the internet will eat up a bigger share of increased web traffic.



Source: Cisco Annual Internet Report, 2018–2023

TelekomSlovenije

Trendi - FTTH omrežja

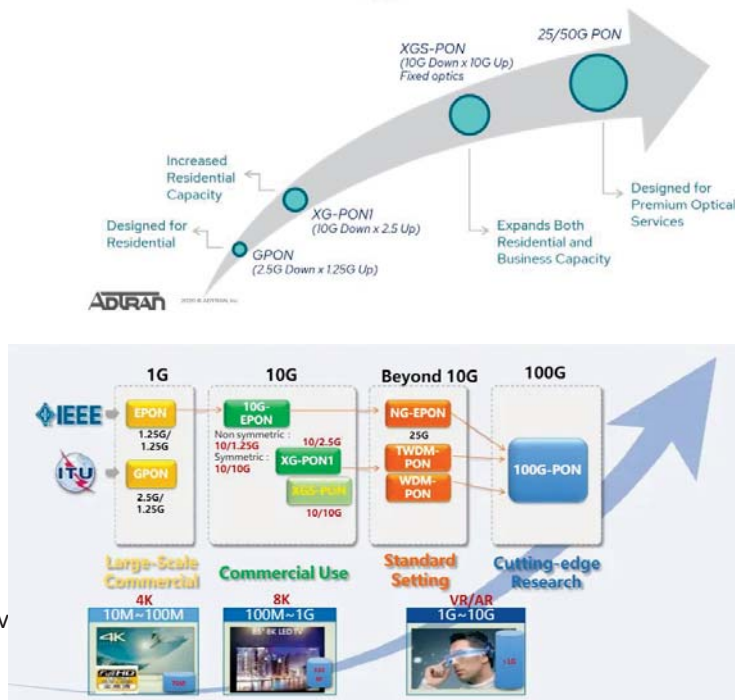


Vir: Telekom Slovenije

- do 2017 ima največji vpliv xDSL in maks. FTTH 100M zmogljiv
- do 2021 ima največji vpliv FTTH z maks 1G zmogljivosti;
- do 2025 ima največji vpliv FTTH z maks 10G zmogljivosti.

8

PON Technology Evolution



Vir: https://www.academia.edu/38090047/Fiber_Home_GPON_Solutions

TelekomSlovenije

Širokopasovna tehnologija bakrenega omrežja se poslavlja

Bakreno omrežje – Topologija točka – točka

POTS (Plain Old Telephone Service):

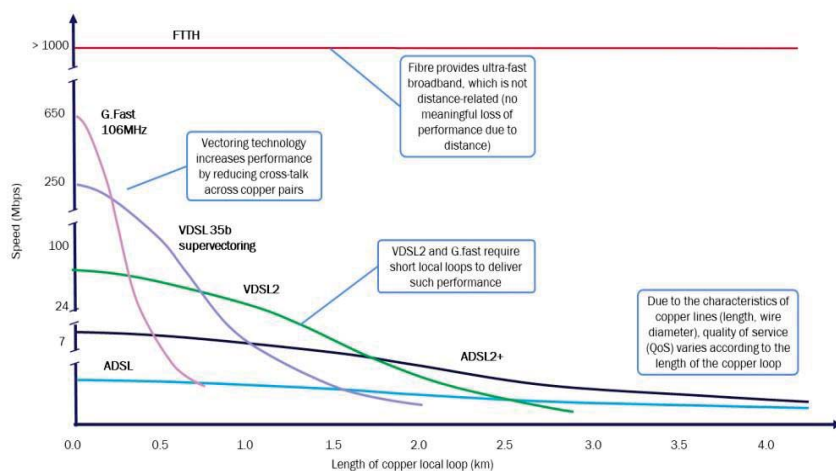
- zgrajeno za govorno telefonijo
- uporablja frekvenčni pas 300Hz – 3400Hz
- maksimalna hitrost preko analognih modemov 56 kbit/s

ADSL2+:

- vklopljeni naročnik z najdaljšo razdaljo 10km
- uporablja frekvenčni pas 138 kHz – 2,2 MHz
- maksimalna hitrost do 21 Mbit/s Down, do 1,2 Mbit/s Up

VDSL2:

- vklopljeni naročnik z najdaljšo razdaljo 2,2 km
- uporablja frekvenčni pas 2,2 MHz – 17 MHz
- maksimalna hitrost do 100 Mbit/s Down, do 20 Mbit/s Up



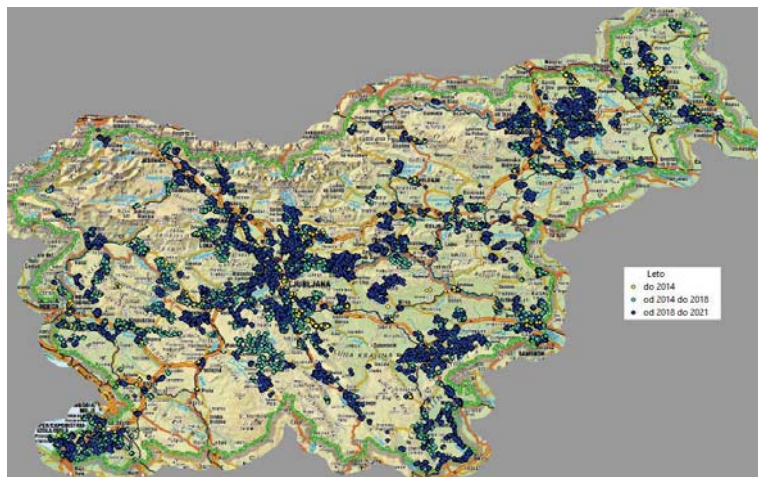
9

Širokopasovna strategija države:

- 2016: Načrt NGN 2020 (do 2020 zagotoviti 100Mbit/s dostop 96% gospodinjstev; preostalim 4% pa 30Mbit/s)
- 2018: Dodatek Načrtu NGN 2020
 - do 2025: šole, univerze, prometna središča 1Gbit/s simetrično
 - do 2025: vsa gospodinjstva 100Mbit/s z možnostjo nadgradnje na 1Gbit/s
 - do 2025: urbana območja ter pomembnejše ceste in železnice neprekinjeno pokrite s 5G

Gradnja FTTH v Telekomu Slovenije:

- FTTH gradnja od leta 2007
- Trenutno pokrivamo 370k gospodinjstev (45% od 824k)
- Odprto omrežje, pod enakimi pogoji za vse
- Pokritost gospodinjstev na ruralu 26%, suburbanih 43% in urbanih področjih 55%
- 43% zgrajene optične infrastrukture TS na področjih, kjer je gostota naseljenosti pod 500 prebivalcev na km²
- Zgrajen Tržni interes iz 2016; 45k gospodinjstev
- Več kot pol realiziranega od TI 2019; 12k gospodinjstev



Vir: Telekom Slovenije

10

Trend tehnologij na omrežju Telekoma Slovenije 2016 - 2020

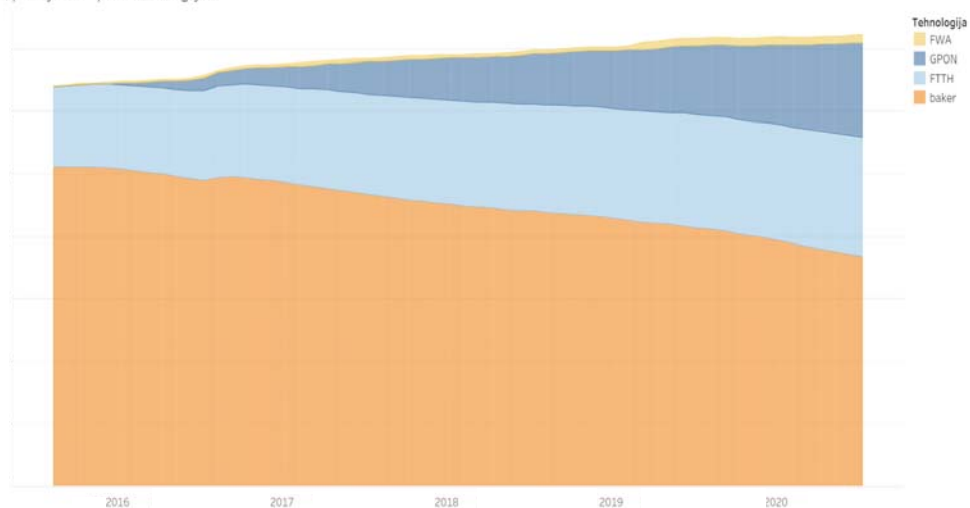
Vključitve na bakrenih paricah so v konstantnem upadu

FTTH tehnologije dobivajo vse večji delež

Z vpeljavo GPON tehnologije se v zadnjih letih povečuje delež P2MP

FTTH P2P tehnologija se je ustalila in je zadnjih nekaj let na približno isti ravni

BB priključki - po tehnologijah



Vir: Telekom Slovenije

TelekomSlovenije 

11

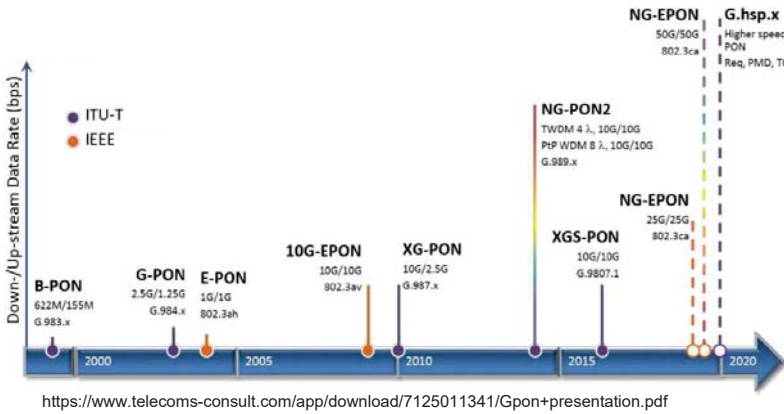
Vsebina

- Kratka predstavitev Telekoma Slovenije
- Tehnološki in storitveni trendi
- **PON tehnologija**
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

12

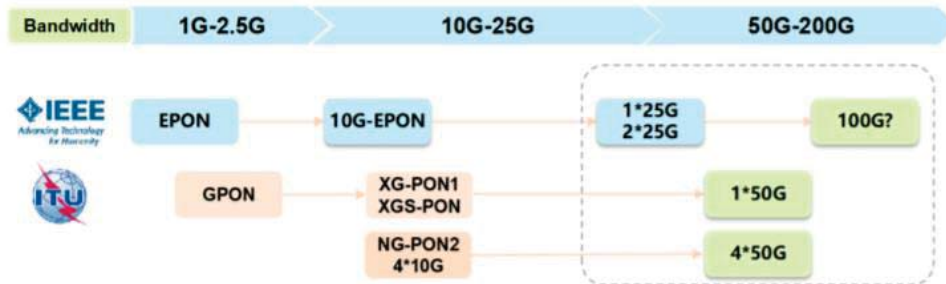
TelekomSlovenije 

Standardizacija PON tehnologije



Item	Downstream	IEEE	ITU-T
GPON/EPON	1G/2.5G	EPON (IEEE 802.3ah)	GPON (ITU-T G.984)
10G PON	10G	10G-EPON (IEEE 802.3av)	XG-PON (ITU-T G.987) XGS-PON (ITU-T G.9807)
50G PON	25G/50G	25G/50G EPON (IEEE 802.3ca)	50G PON (ITU-T G.hsp)

Vir: https://res-www.zte.com.cn/mediare/zte/Files/PDF/white_book/White_Paper_on_Next-Generation_Fixed_Network_Access_Technologies_20200922_EN.pdf



Source: https://res-www.zte.com.cn/mediare/zte/Files/PDF/white_book/White_Paper_on_Next-Generation_Fixed_Network_Access_Technologies_20200922_EN.pdf

13



PON evolucija (ITU-T družina)

GPON (2.5G Down x 1.25G Up)

XGPON (10G Down x 2.5G Up)

Valovne dolžine izbrane za koeksistenco z GPON

XGS-PON (10G Down x 10G Up)

Iste valovne dolžine kot XGPON1 / 10G-EPON

10G Upstream zagotavlja storite poslovnim strankam

NGPON2 (4-8 x 10Gx2.5G or 10Gx10G)

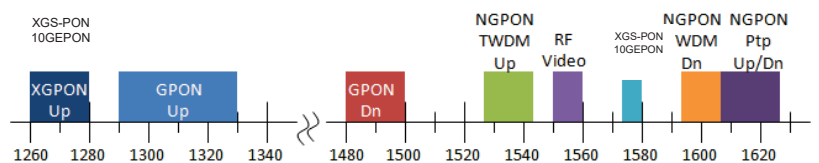
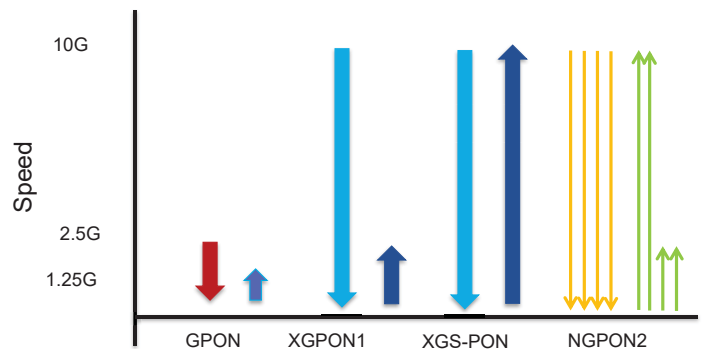
DWDM + PON = TWDM

- Višje cene komponent:
 - Nastavljivi filtri in laserji na ONT-ju
 - Povečane optične izgube

10G Upstream zagotavlja storite poslovnim strankam

Večkratne valovne dolžine omogočajo višje hitrosti

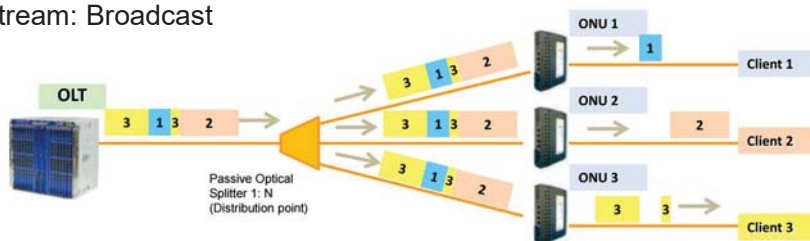
Stacking TDM PON -> TWDM-PON



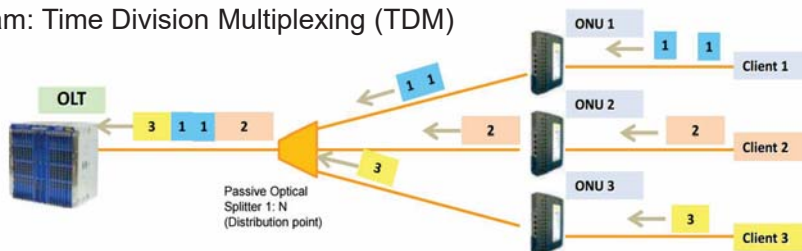
14

Princip delovanja TDM PON-a

Downstream: Broadcast



Upstream: Time Division Multiplexing (TDM)



15

15

TelekomSlovenije 

Primerjava GPON in XGS-PON

Najpomembnejše karakteristike in razlike med GPON in XGS-PON

	GPON	XGS-PON
valovna dolžina downstream	1490 nm	1577 nm
valovna dolžina upstream	1310 nm	1270 nm
tipi SFP (max RX sensitivity)	B+ (-28 dB), C+ (-32 dB), C++ (-35dB)	N1 (-29dB), N2 (-31dB), E1 (-33 dB), E2 (-35 dB)
downstream nazivna hitrost	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s
upstream nazivna hitrost	1,25 Gbit/s	10 Gbit/s
največja teor. fizična oddajna razdalja	60 km	100 km
največje teor. delilno razmerje	1:128	1:256
struktura okvirja	GEM	XGEM

ITU-T G.986: 1 Gbit/s point-to-point Ethernet-based optical access system:
Physical layer specification for ONT:

- Receive wavelength nm 1480-1500 (1490)
- Transmit wavelength nm 1260-1360 (1310)

16

TelekomSlovenije 

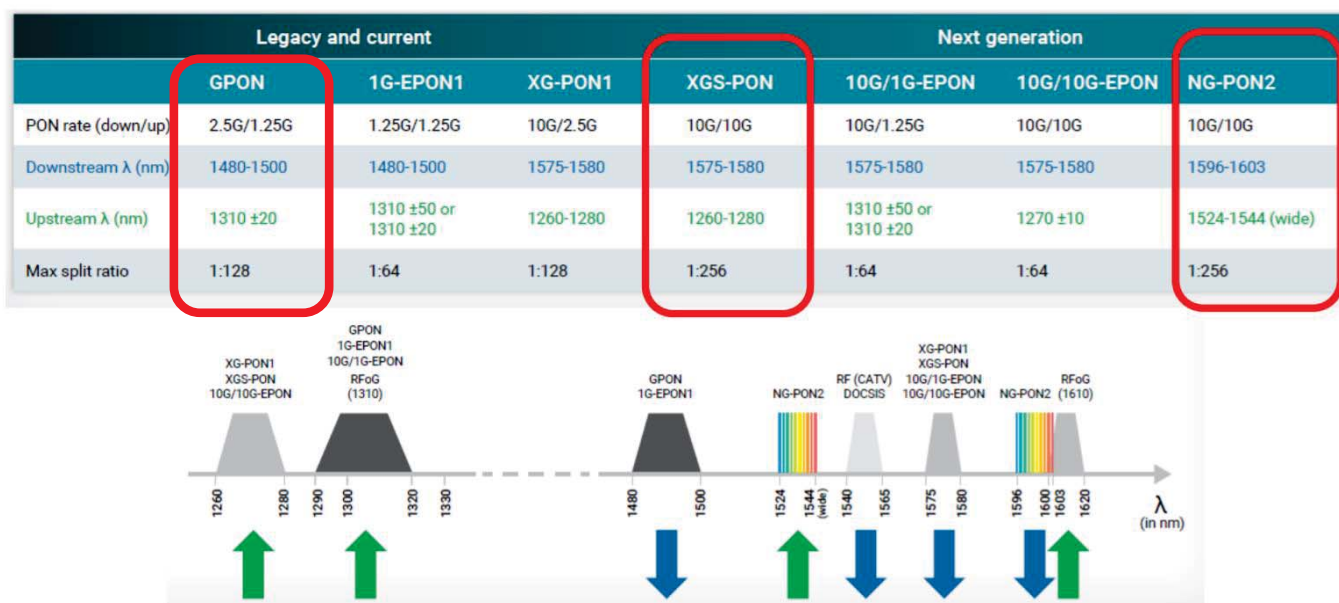
Vsebina

- Kratka predstavitev Telekoma Slovenije
- Tehnološki in storitveni trendi
- PON tehnologija
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

17

Možnosti vpeljave XGS-PON tehnologije

FTTH omrežje: Topologija P2PM (točka več točk)

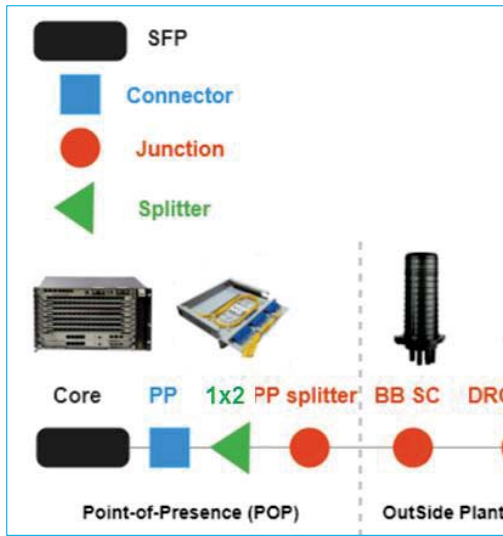


vir: http://www.kkk.torun.nu/wp-content/uploads/2018/06/KKK-2018_PON_naiozatok_ovoje_EAFU.pdf

18

Power budget – doseg

Table 6.2. Example of attenuation calculation.



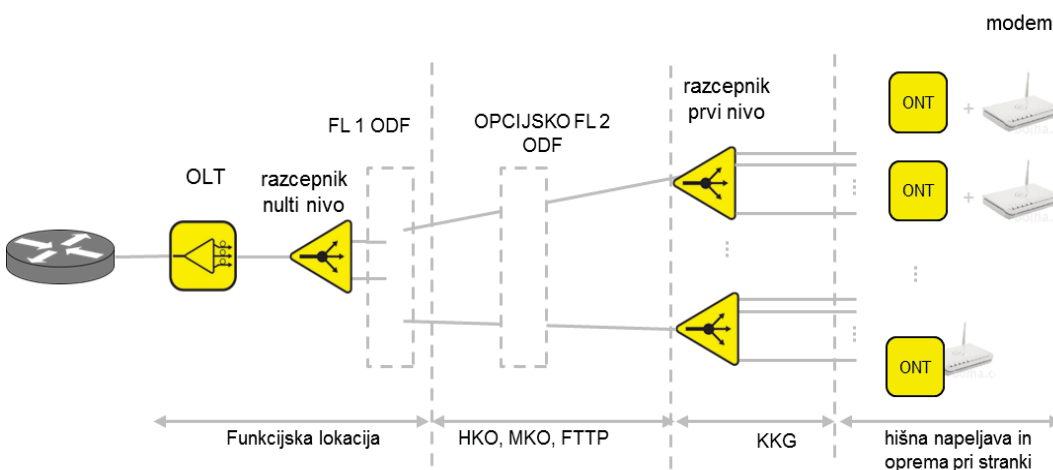
Attenuation calculation				
Link: Access node - Building distributor				
Fibre type: ITU-T G.652.D		Unit	Wavelength	
			1310 nm	1550 nm
1.	Fibre attenuation coefficient	dB/km	0,40	0,25
2.	Chromatic dispersion coefficient	ps/nm*km	3,50	18,00
3.	Link length	km	5,00	5,00
4.	Total fibre attenuation	dB	2,00	1,25
5.	Average splice loss	dB	0,10	0,10
6.	Number of splices	pc.	5	5
7.	Total splice loss	dB	0,50	0,50
8.	Repair splice loss	dB	1,00	1,00
9.	Average insertion loss of connection	dB	0,30	0,30
10.	Number of connections	pc.	6	6
11.	Total connector loss	dB	1,80	1,80
12.	Splitting loss, 1:32	dB	17,50	17,50
13.	Total attenuation of link	dB	22,80	22,05
14.	Maximum allowed attenuation	dB	25,00	25,00
15.	Attenuation margin	dB	2,20	2,95
16.	Total dispersion of link	ps/nm	17,50	90,00

<https://webthesis.biblio.polito.it/13091/1/tesi.pdf>

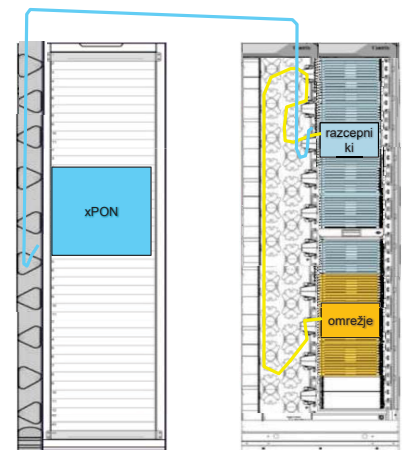
https://www.nestorcables.com/media/aineistopankki/kirjat/ftx_principles_technologies_and_installation_solutions_eng.pdf

Topologija PON omrežja

- Velja za vsa PON (Passive Optical Network) omrežja (GPON, XGS-PON, TWDM-PON, WDM-PON...)
- Del omrežja si delijo uporabniki na isti veji (OLT, vlakno pred spliterjem)
- Lahko je več nivojsko splitano (1-nivojsko, 2-nivojsko)

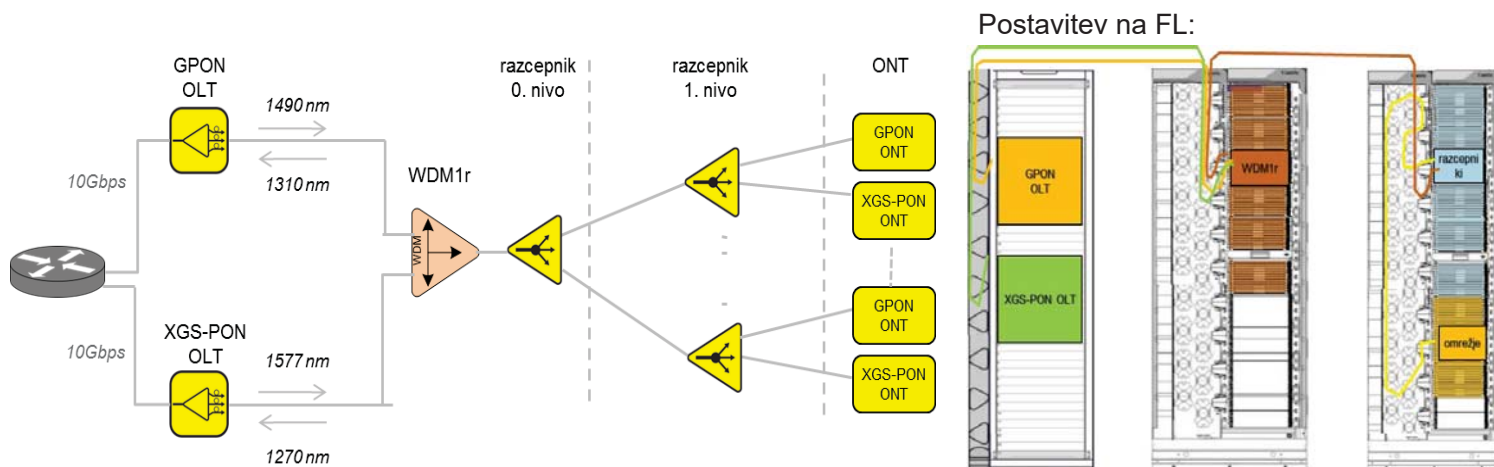


Postavitev na FL:



Vpeljava XGS-PON tehnologije na GPON-u – P2MP

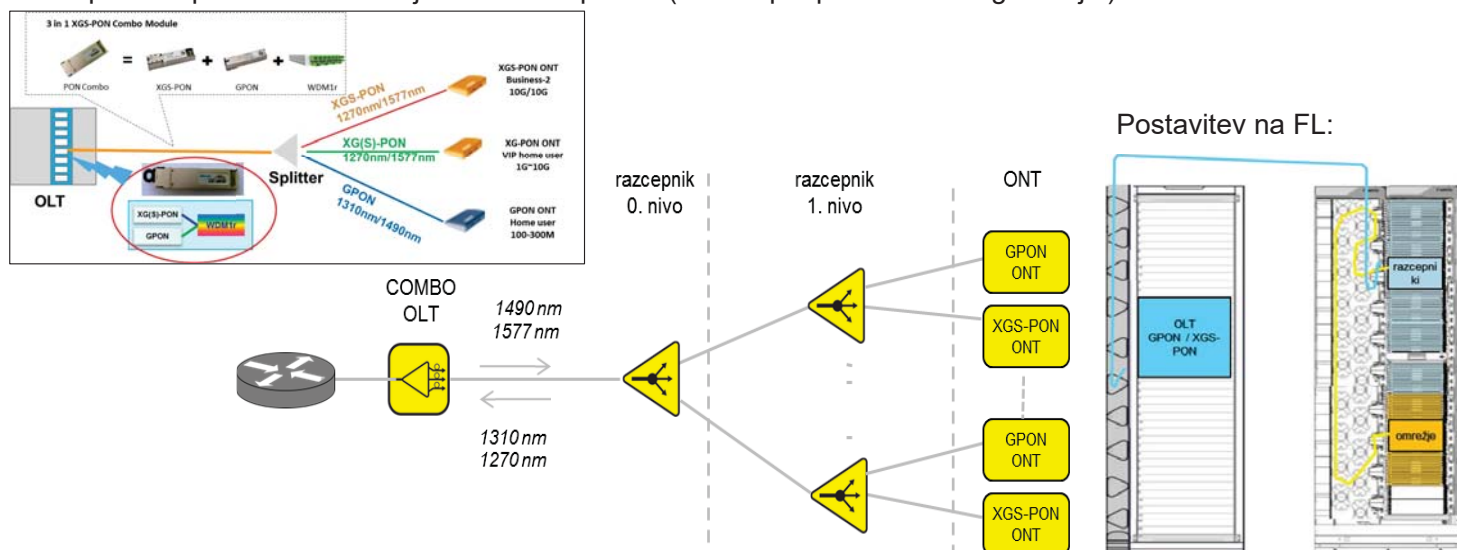
- Pouporaba obstoječega optičnega pasivnega omrežja
- Vpeljava sklopnega elementa WDM1r
- Istočasno delovanje GPON in XGS-PON tehnologije



21

Vpeljava XGS-PON tehnologije na GPON-u – Combo SFP

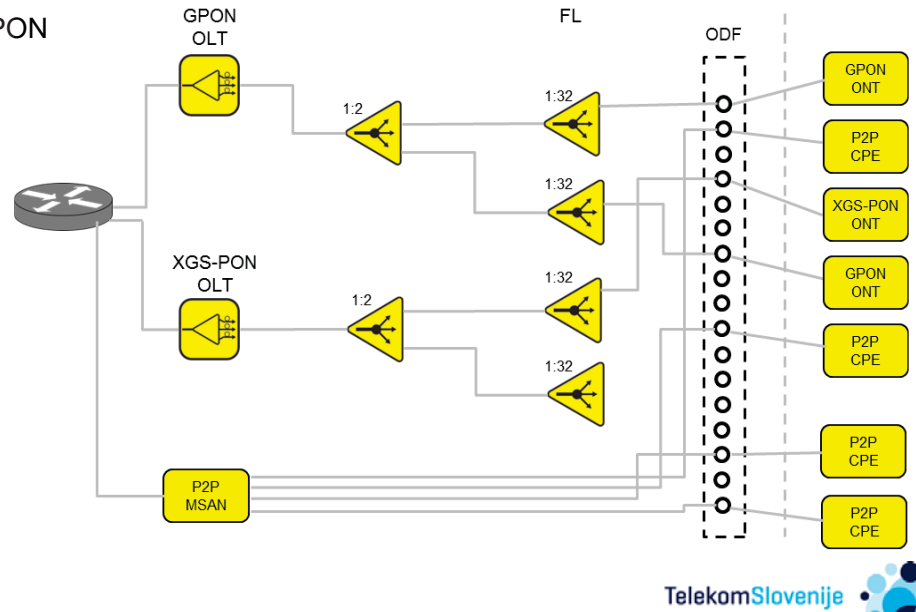
- Combo SFP omogoča združitev GPON, XGS-PON in WDM1r-ja na samem SFP-ju plošče
- Ni potrebe po zunanjem WDM1r-u
- Ni potrebe po ohranitvi obstoječe GPON opreme (možna pouporaba na drugih FL-jih)



22

Vpeljava XGS-PON tehnologije na P2P topologiji omrežja

- Pouporaba obstoječega pasivnega optičnega omrežja
- Brez vpeljave sklopnega elementa WDM1r
- Istočasno delovanje GPON in XGS-PON tehnologije
- Zagotavljanje regulatornih obveznosti

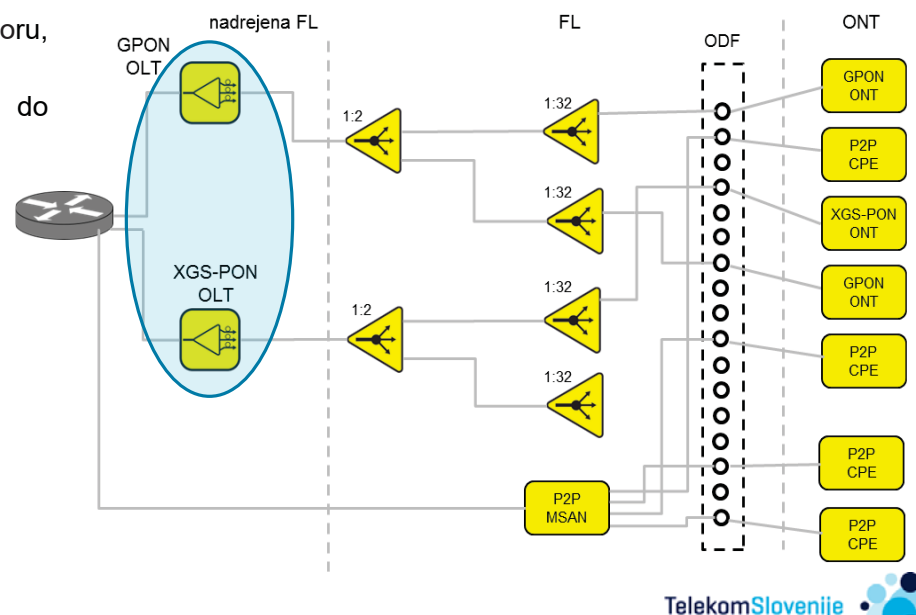


23

TelekomSlovenije

Vpeljava XGS-PON tehnologije na P2P topologiji omrežja iz nadrejene lokacije

- Pokrivanje večih P2P lokacij iz ene nadrejene funkcijske lokacije
- Dolgoročno ohranjanje potreb po prostoru, energiji in hlajenju
- Potrebne zadostne optične povezave do nadrejene FL

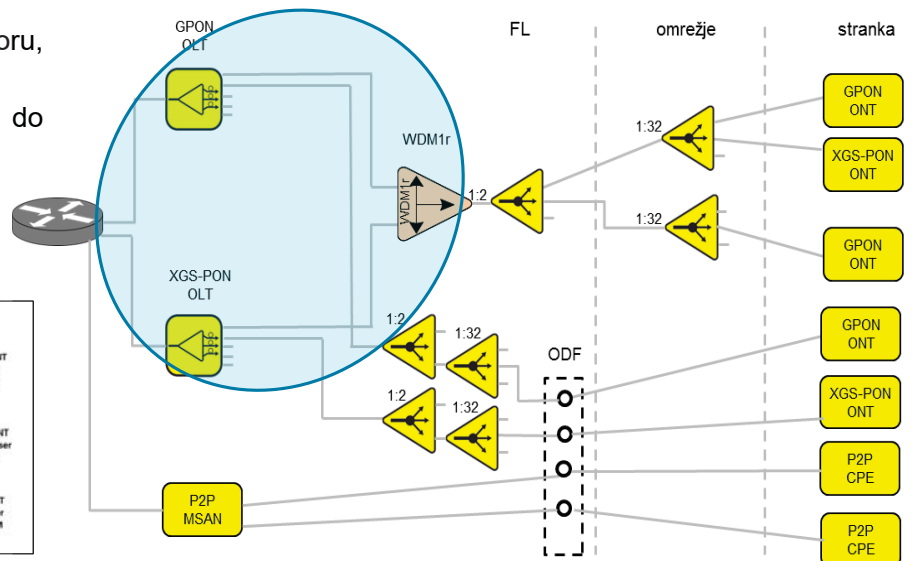
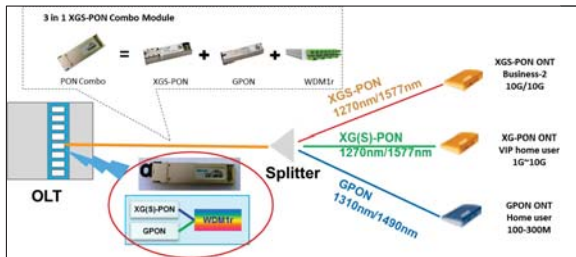


24

TelekomSlovenije

Vpeljava XGS-PON tehnologije na P2P in P2MP topologiji omrežja iz nadrejene lokacije

- Pokrivanje večih P2P in P2MP lokacij iz ene nadrejene funkcijske lokacije
- Omogočeno ohranjanje potreb po prostoru, energiji in hlajenju
- Potrebne zadostne optične povezave do nadrejene FL
- Potreben zadosten optični power budget



25

TelekomSlovenije

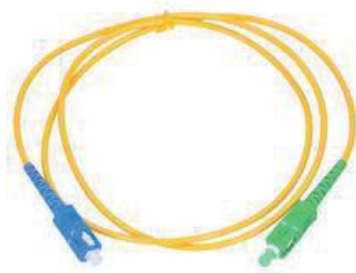
Oprema pri naročniku

Nadgradnja GPON->XGS-PON:

- Naročniki Telekom Slovenije bodo zaključeni z XGS-PON modemom
- Naročniki drugih ISP-jev bodo zaključeni z XGS-PON bridgem, ki bo imel 2,5 Gbit/s oz. 10Gbit/s ETH port
- Povezovalna vrvica iz doze do ONT-ja ostane ista

Nadgradnja P2P->XGS-PON:

- Naročniki Telekom Slovenije bodo zaključeni z XGS-PON modemom
- Naročniki drugih ISP-jev bodo zaključeni z XGS-PON bridgem, ki bo imel 2,5 Gbit/s oz. 10Gbit/s ETH port
- Povezovalna vrvica iz doze do ONT-ja se zamenja s takšno, ki ima SC/APC konektor
- Oz. se uporabi obstoječa vrvica in se namesti pretvornik SC/UPC->SC/APC



26

TelekomSlovenije

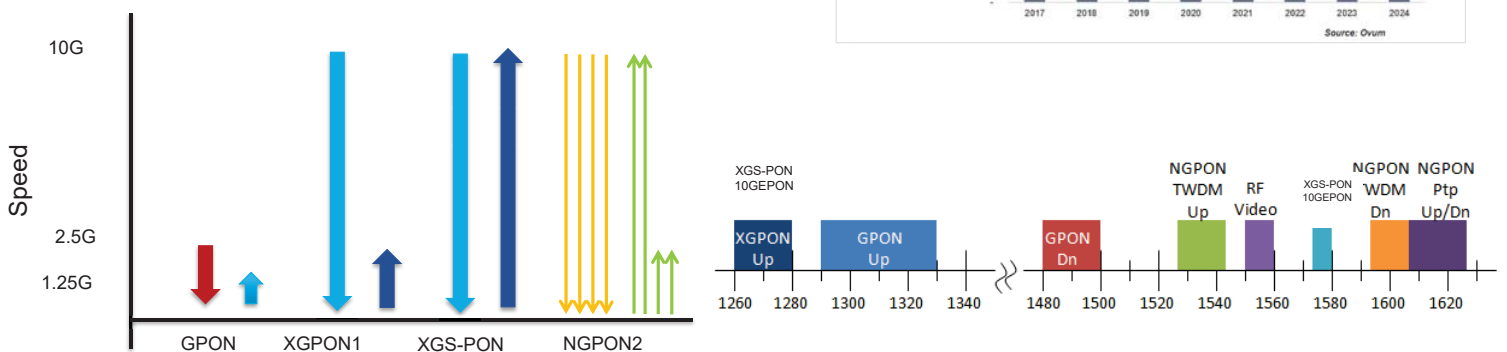
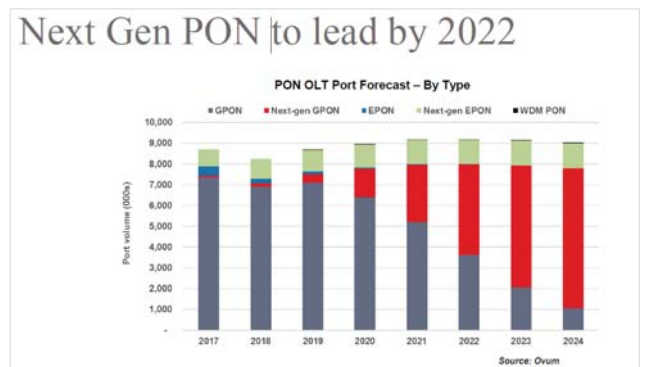
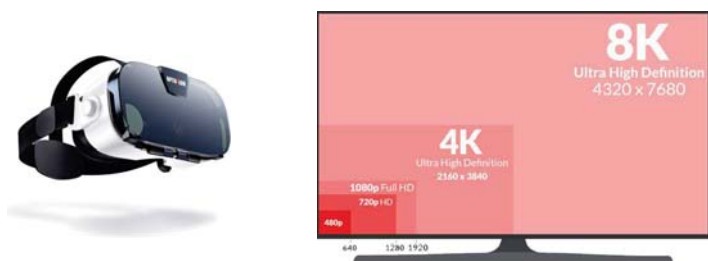
Vsebina

- Kratka predstavitev Telekoma Slovenije
- Tehnološki in storitveni trendi
- PON tehnologija
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

27



GPON tehnologije -> XGS-PON



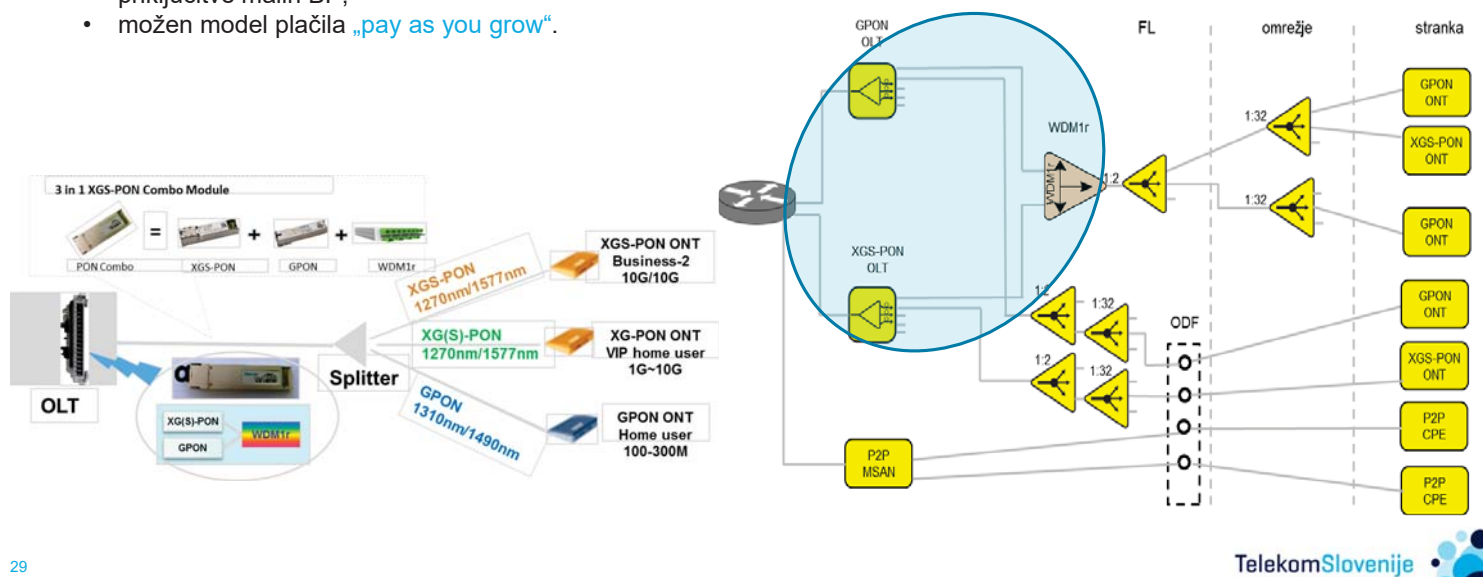
28



Nadgradnja GPON tehnologije -> XGS-PON

Možnih je več tehničnih rešitev – primer XGS/GPON Combo kartica:

- na P2MP omrežju - aktivna oprema, ki združuje valovne dolžine od GPON in XGS-PON;
- ena kartica oz. port → dve tehnologiji;
- vključevanje zahtevnejših poslovnih uporabnikov;
- priključitve malih BP;
- možen model plačila „pay as you grow“.



Prihodnost je optična

- Tehnološki in storitveni trendi narekujejo **višje hitrosti**
- Prihodnje tehnologije omogočajo **sobivanje** na obstoječem omrežju
- Dolgoročno je omogočeno **ohranjanje footprintsa**
- Potrebno je zgraditi **dodatne medkrajevne povezave**
- Masovna proizvodnja bo izbrala **cenovno učinkovito** tehnologijo



Hvala!

Telekom Slovenije, d.d.
Cigaletova 15
1000 Ljubljana

www.telekom.si
T: 041 700 700 ali 080 8000
E: info@telekom.si

TelekomSlovenije 

Optična omrežja v Sloveniji

Fibre networks in Slovenia

Žan Knafelc

Agencija za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije

zan.knafelc@akos-rs.si

Povzetek

Trg elektronskih komunikacij je bil liberaliziran že pred približno dvema desetletjema z namenom znižanja vstopnih ovir za konkurenčne ponudnike storitev, kar je prineslo pozitivne učinke za trg v smislu uvajanja sodobnih tehnologij, nižjih cen storitev in večje izbire za končne uporabnike. V prispevku je v kontekstu regulacije predstavljen tehnološki napredek na trgu in stanje optične infrastrukture v Sloveniji s pogledom v prihodnost.

Abstract

The electronic communications market was liberalized about two decades ago with the aim of reducing barriers to entry for competing service providers, which had positive effects on the market in terms of new technology deployments, lower prices for service and greater choices for end-users. In the context of regulation, the article presents technological progress on the market and the state of optical infrastructure in Slovenia with a view to the future.

uvajanja storitev. Ima univerzitetno izobrazbo s tehničnega in ekonomskega področja.

Author's biography

Žan Knafelc has been employed at AKOS since 2007, the last four years as a head of market regulation department for electronic communications. Prior to that, he gained experience working for a mobile operator in the product management. He holds degrees in technical and economics area.

Biografija avtorja

Žan Knafelc je na AKOS-u zaposlen od leta 2007, zadnja štiri leta kot vodja oddelka za regulacijo trga elektronskih komunikacij. Pred tem si je izkušnje nabiral pri mobilnem operaterju na področju razvoja in



Optična omrežja v Sloveniji

Seminar optične komunikacije 2021

Žan Knafelc, AKOS

Zoom, 4. februar. 2021



Kako se je začelo?

PRI MENI DOMA

23 let nazaj (1998)

- Klicni dostop
- 33,6 kbit/s



14 let nazaj (2007)

- Paket trojček – internet 1 Mbit/s

Danes (2021)

- Optika – 1 Gbit/s

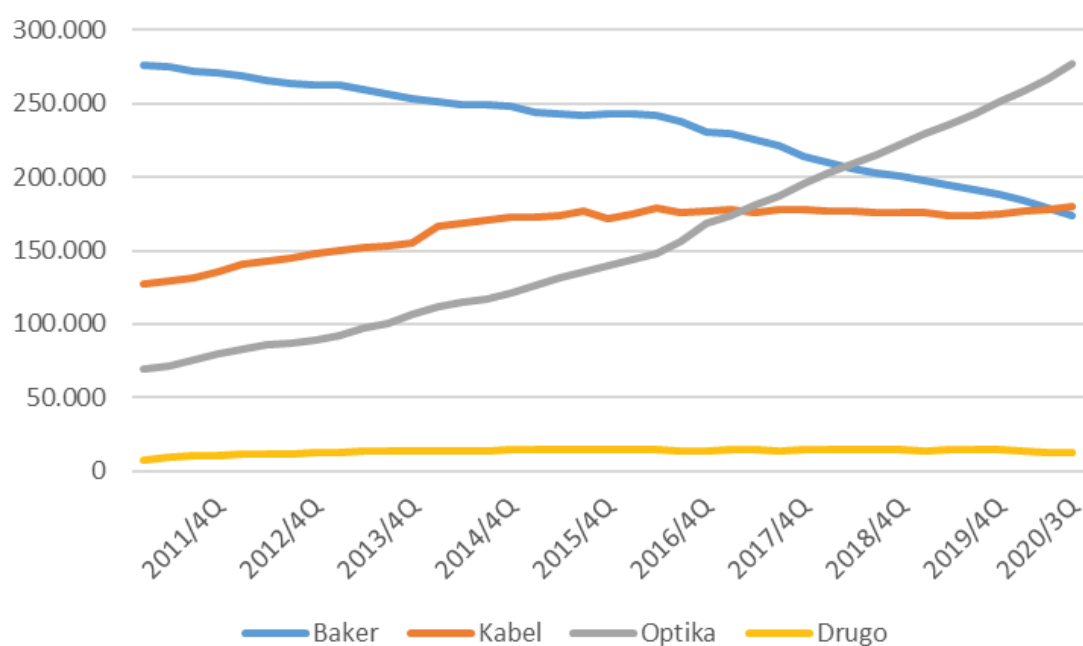


Prihodnost (2030)?

- Optika – 10 Gbit/s

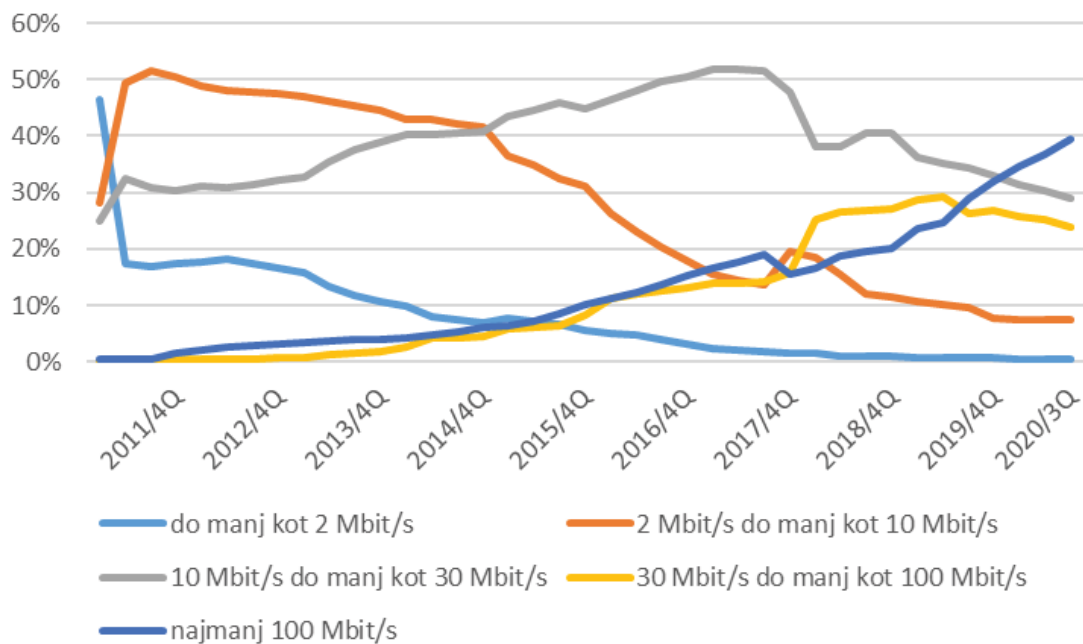
Dostopovna omrežja

MALOPRODAJNI TRG



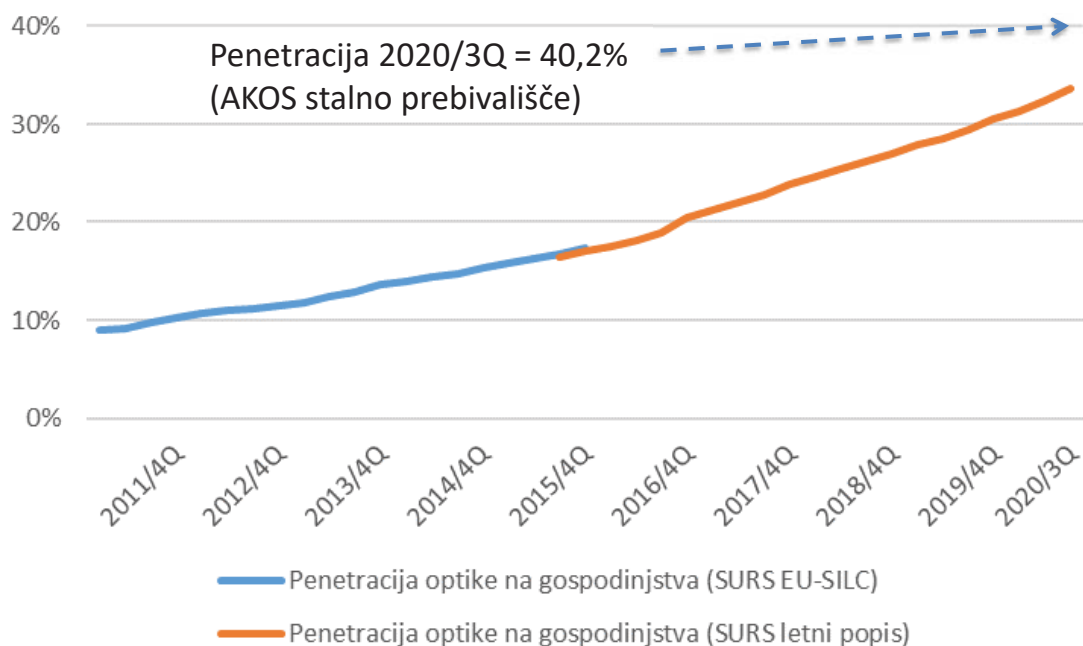
Hitrosti dostopa

MALOPRODAJNI TRG



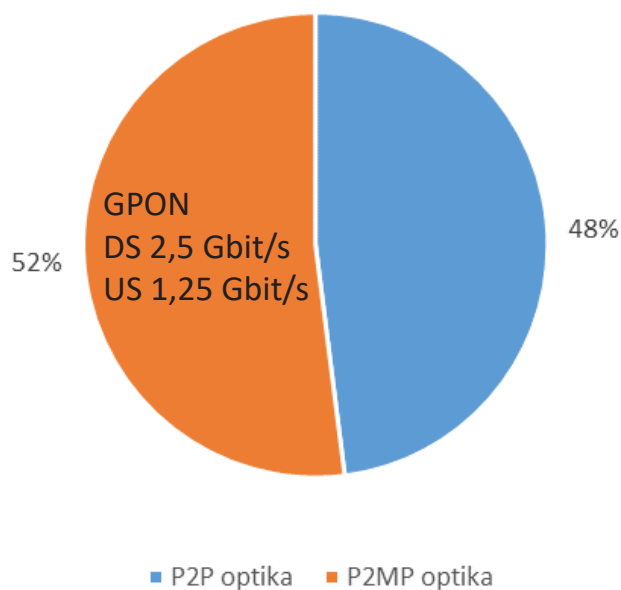
Penetracija optike

MALOPRODAJNI TRG



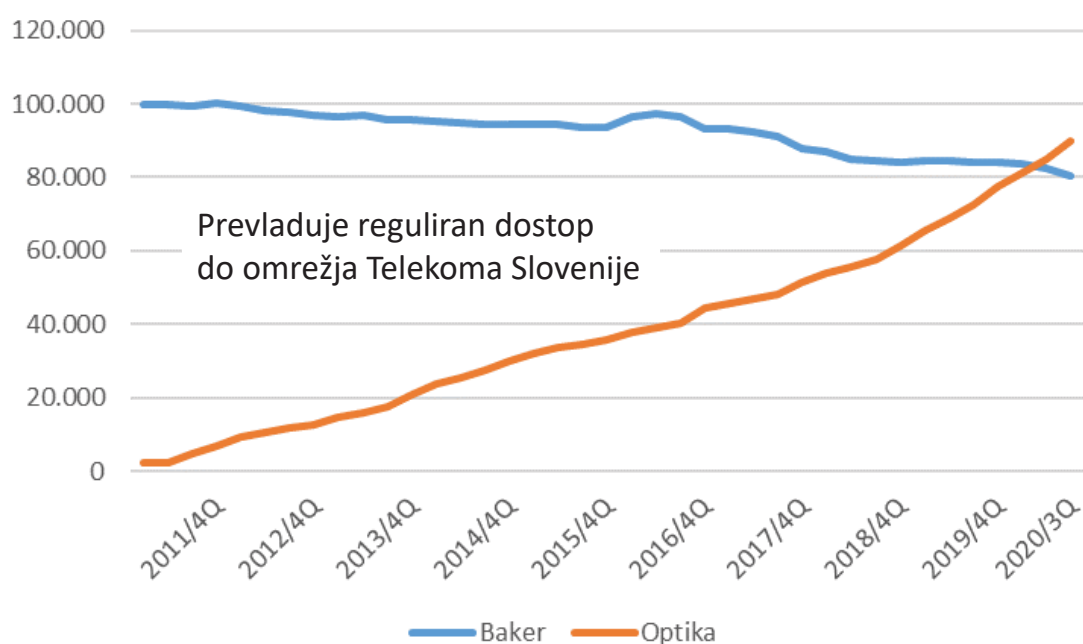
Topologija optike

MALOPRODAJNI TRG

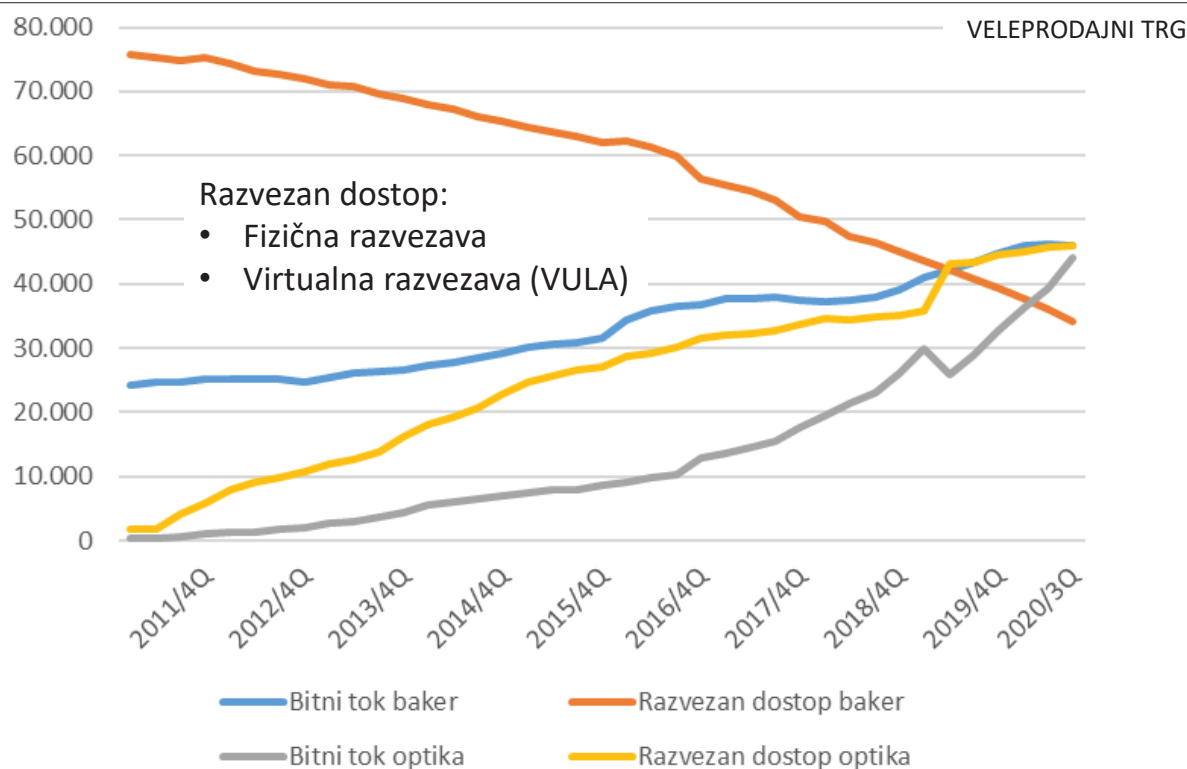


Veleprodajni dostop

VELEPRODAJNI TRG

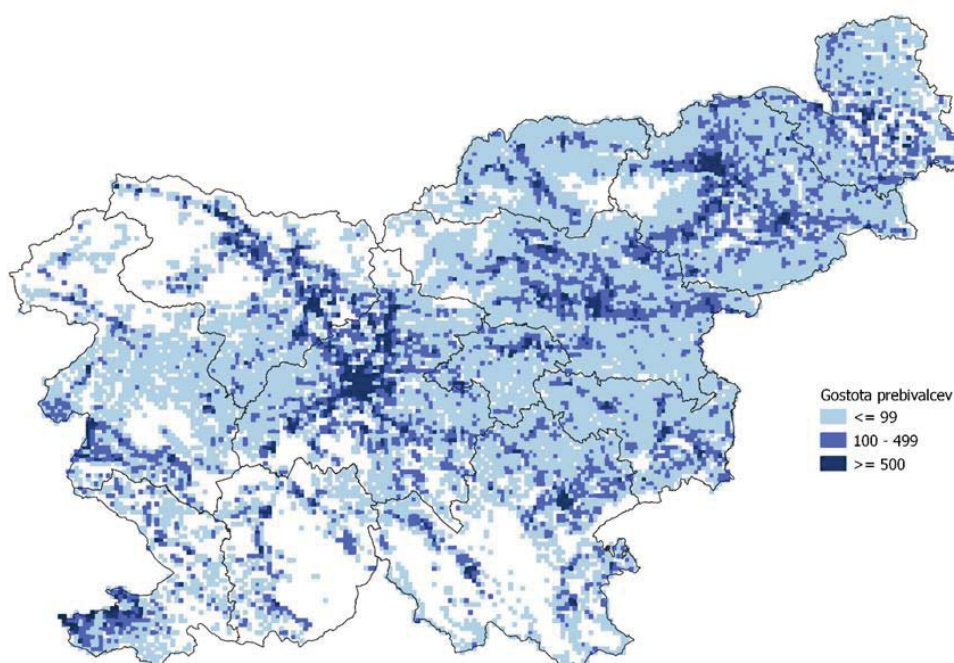


Veleprodajni dostop



Poseljenost Slovenije

Mreža 1000 m



Poseljenost Slovenije

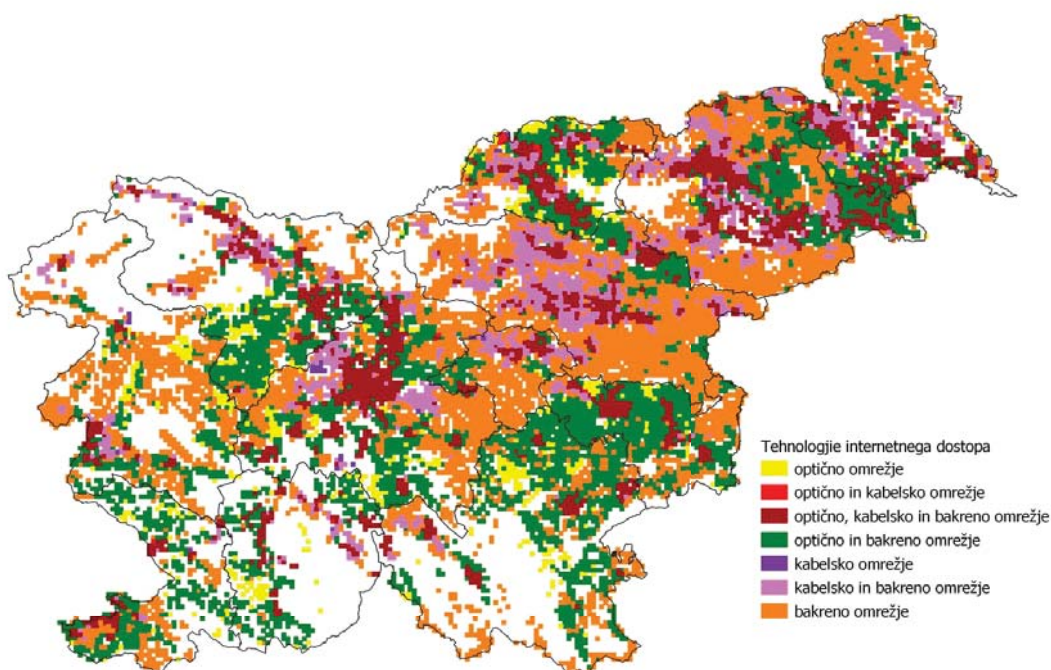
Mreža 1000 m

	Delež ozemlja	Delež gospodinjstev
Urbano	3,3%	57,6%
Suburbano	14,5%	27,7%
Ruralno	45,0%	14,7%
Ni poseljenosti	37,1%	---

Op.: Urbano (min 500 preb/m²), suburbano (100 do 499 preb/m²) in ruralno (1 do 99 preb/m²).

Pokritost omrežij

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)



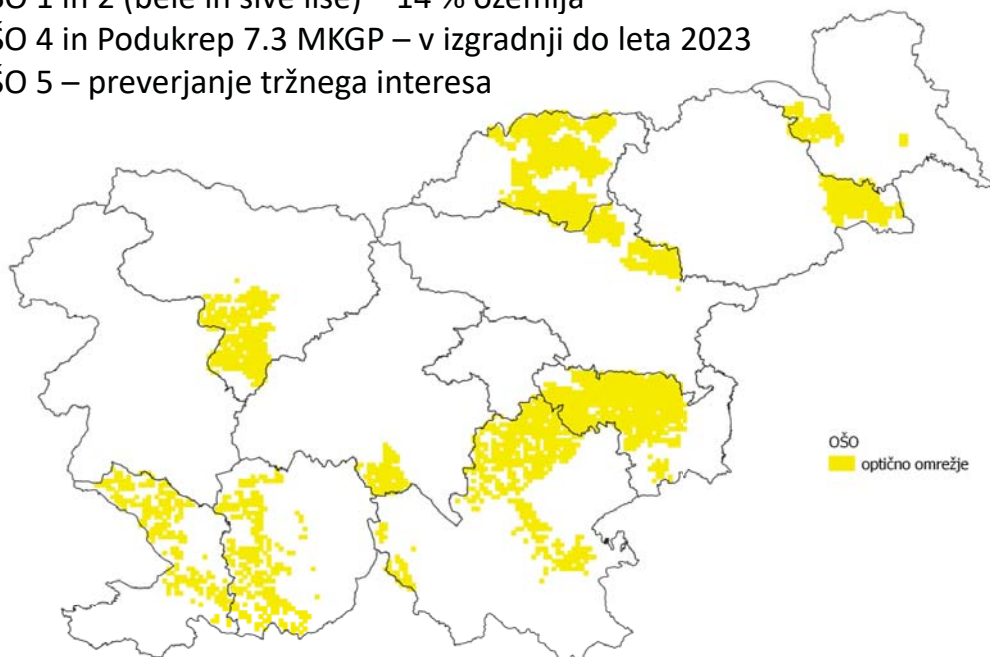
OŠO optična omrežja

OPT (zgrajeni in omogočeni priključki)

GOŠO 1 in 2 (bele in sive lise) – 14 % ozemlja

GOŠO 4 in Podukrep 7.3 MKGP – v izgradnji do leta 2023

GOŠO 5 – preverjanje tržnega interesa



Dostopovna omrežja

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)

	Pokritost ozemlja	Pokritost gospodinjstev
Baker	58,3%	78,9%
Kabel	16,2%	47,7%
Optika	30,7%	53,1%
Ni pokritosti z OPT	38,5%	7,3%

Dostopovna omrežja

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)

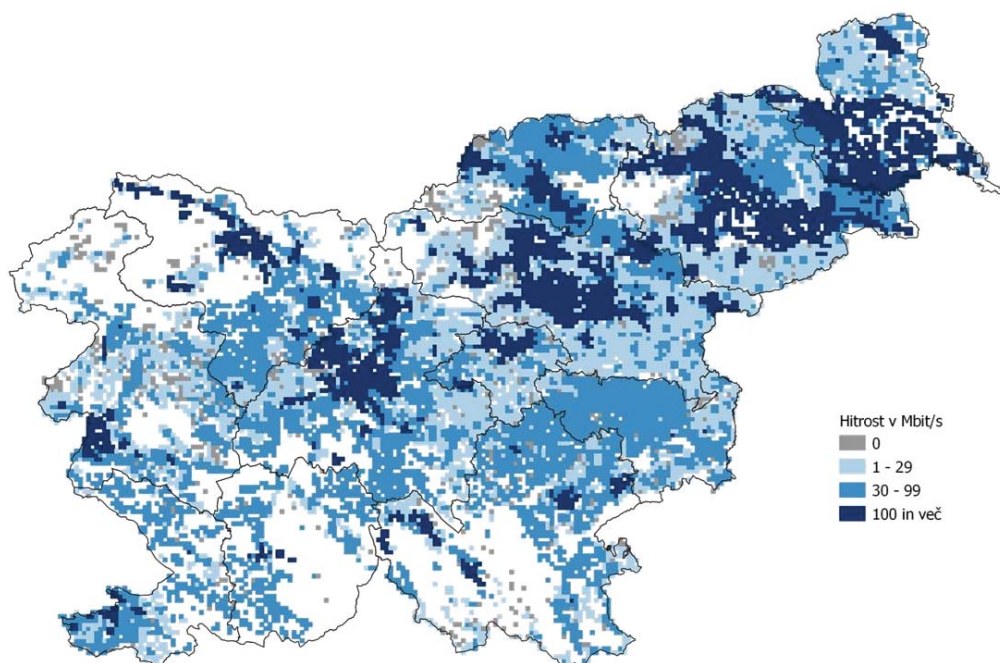
Pokritost gospodinjstev

	Urbano	Suburbano	Ruralno
Baker	86,0%	72,3%	63,4%
Kabel	65,6%	30,6%	9,6%
Optika	66,2%	37,9%	30,3%
Skupaj	98,0%	89,4%	78,0%

Op.: Urbano (min 500 preb/m²), suburbano (100 do 499 preb/m²) in ruralno (1 do 99 preb/m²).

Hitrosti dostopa

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)



Hitrosti dostopa

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)

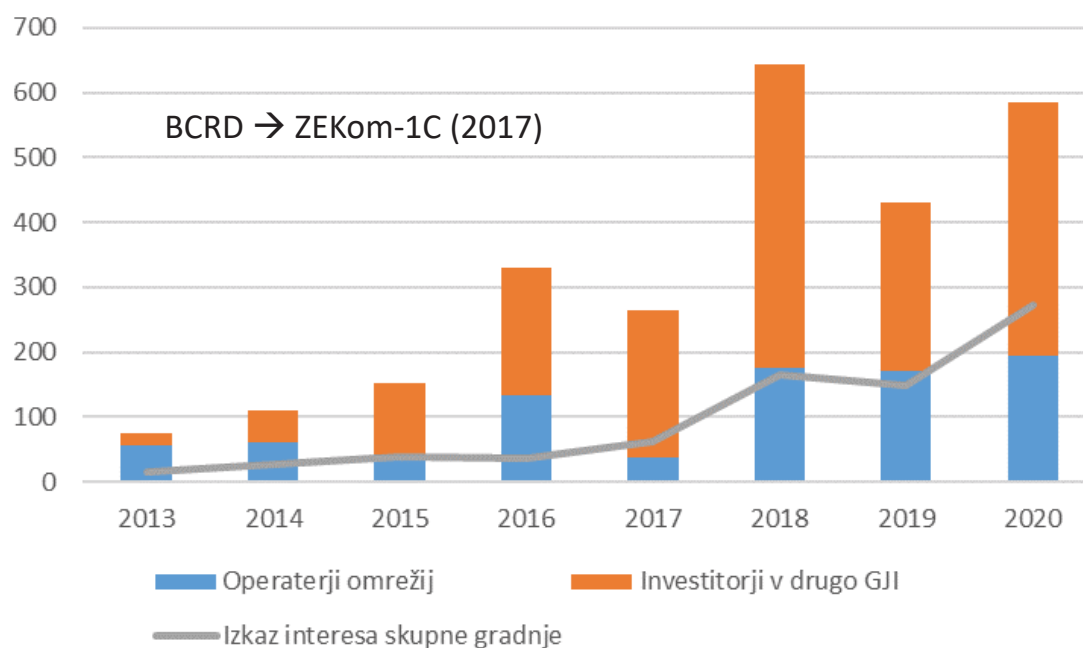
Pokritost gospodinjstev

	Urbano	Suburbano	Ruralno
100 Mbit/s in več	87,2%	59,0%	37,7%
30 do manj kot 100 Mbit/s	6,9%	11,5%	6,8%
Manj kot 30 Mbit/s	3,9%	18,9%	33,6%
Ni pokritosti z OPT	2,0%	10,6%	22,0%

Op.: Urbano (min 500 preb/m²), suburbano (100 do 499 preb/m²) in ruralno (1 do 99 preb/m²).

Skupne gradnje

Objave investorjev na portalu infrastrukturnih investicij



Simetrična regulacija (ZEKom-1):

- Skupna uporaba stavbne fizične infrastrukture
- Skupna uporaba napeljav v stavbah
- Dostop do fizične infrastrukture
- Dostop do neuporabljenih vlaken (druga GII)
- EECC → možnost razširitve obveznosti skupne uporabe napeljav v stavbah prek prve razdelilne točke (BEREC smernice)

Predhodna SMP regulacija (Odločba):

- Lokalni dostop (fizična in virtualna razvezava)
- Osrednji dostop (bitni tok) → izvzet iz Priporočila o upoštevni trgih (2020)
- Visokokakovostni dostop
- Postopen umik regulacije na območjih, ki se nagibajo k učinkoviti konkurenci na maloprodajnem trgu

EECC → ZEKom-2 do konca polovice leta 2021:

- Dostop do fizične infrastrukture kot prednostna obveznost
- Posebna regulativna obravnava skupnih vlaganj v visoko zmogljiva omrežja
- Manjši obseg obveznosti za izključno veleprodajne operaterje

Vprašanja?

zan.knafelc@akos-rs.si

Pogled na bodočnost FTTH

A look at the future of FTTH

Mitja Golja

Iskotel

golja@iskratel.si

Povzetek

Razvoj optičnih omrežij sledi razvoju ostalih informacijsko komunikacijskih storitev, ki jih končni uporabniki potrebujejo (oblačne storitve, delo na domu, navidezna resničnost/obogatena resničnost itd.). 10-gigabitne dostopovne tehnologije so danes že pri nas, poteka pa standardizacija in razvoj še hitrejših novih tehnologij. V predavanju bomo predstavili evolucijo tehnologij FTTH, njihove lastnosti, vpeljavo in poslovne vidike.

Abstract

Development of fibre optic networks is following the development of ICT services that are requested by end users (cloud services, virtual reality, augmented reality, etc.). 10 Gb access technologies are already deployed in Slovenia, we have already started the standardization and development of new faster technologies. In this lecture we will present the evolution of FTTH technologies, their characteristics, implementation and business aspects.

ukvarja z razvojem produktov, poslovnih modelov in strategij. Pred vodenjem razvoja poslov je delal na več vodilnih pozicijah v podjetju Iskotel, med drugim je bil odgovoren za vodenje produktne linije in razvoja.

Author's biography

Dr. Mitja Golja is a Business Development Director at Iskotel's Business Unit Broadband. He is responsible for new market strategies and go-to-market initiatives for new technologies. He brings 15+ years of global operating experience in the broadband-networking industry and a deep passion for product business development and strategy to Iskotel. Prior to heading business development, Mitja held various management positions within Iskotel. Amongst others he was in charge for product line management and R&D.

Biografija avtorja

Dr. Mitja Golja je zaposlen v podjetju Iskotel kot direktor razvoja poslov v poslovni enoti dostop. Odgovoren je za pripravo tržnih strategij in razvoja poslov novih tehnologij. Ima več kot 15 let izkušenj z globalnimi širokopasovnimi operaterji in se strastno



ISKRATEL

Pogled na bodočnost FTTH

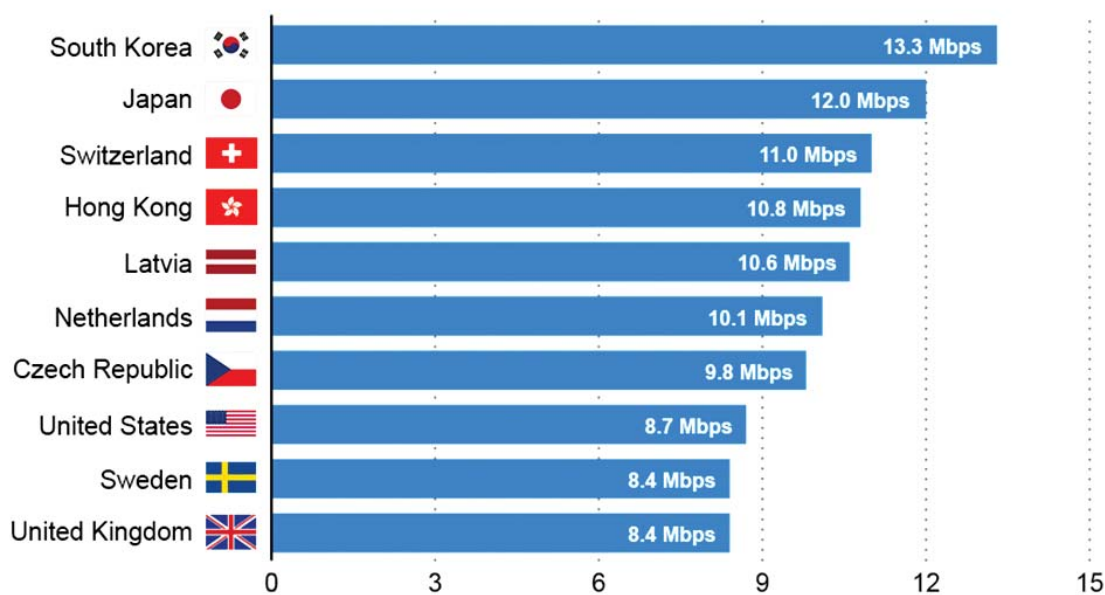
dr. Mitja Golja

Agenda

- ▶ Potreba po hitrosti
- ▶ Pregled novih FTTH tehnologij
- ▶ Poslovni vidiki uvedbe novih FTTH omrežij
- ▶ Sklep



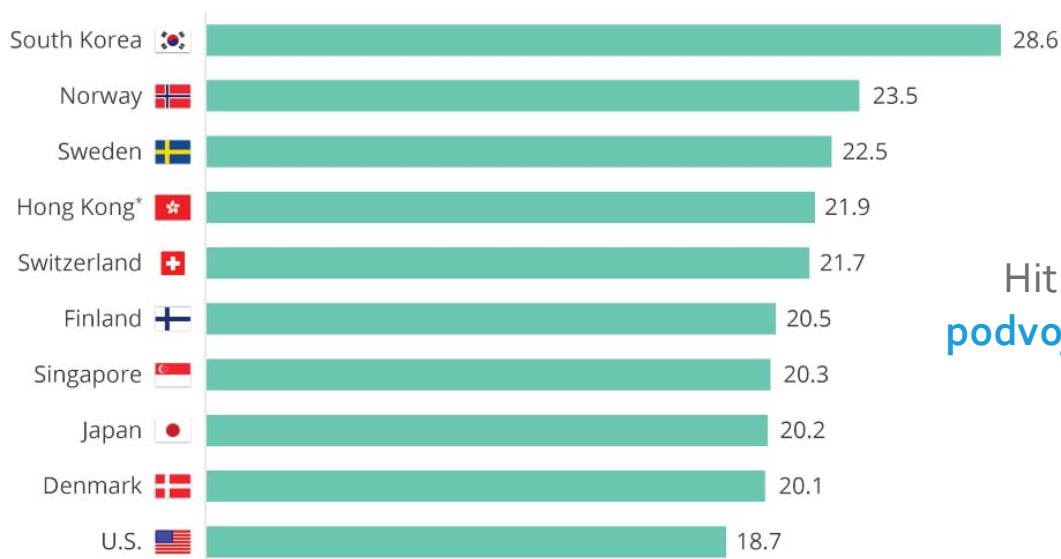
Potreba po hitrosti: Kje smo bili 2013



ISKRATEL

Potreba po hitrosti: Kje smo bili 2017

Average internet connection speed in Q1 2017 (in Mbps)



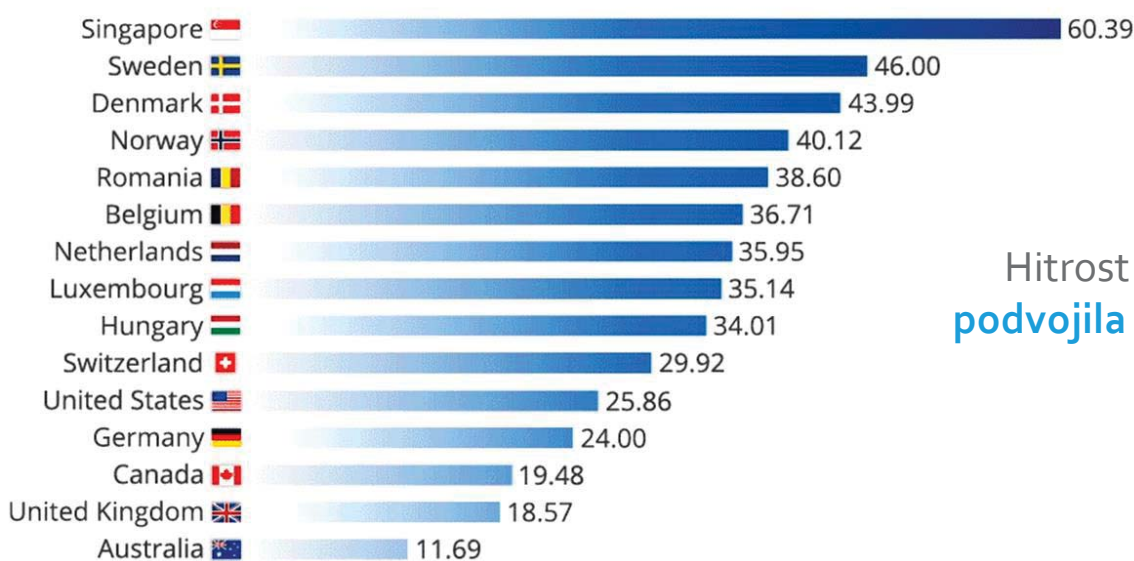
Hitrost se je
podvojila v 4 letih

ISKRATEL



Potreba po hitrosti: Kje smo bili 2018

Mean download speed in Megabits per second (in Mbps)

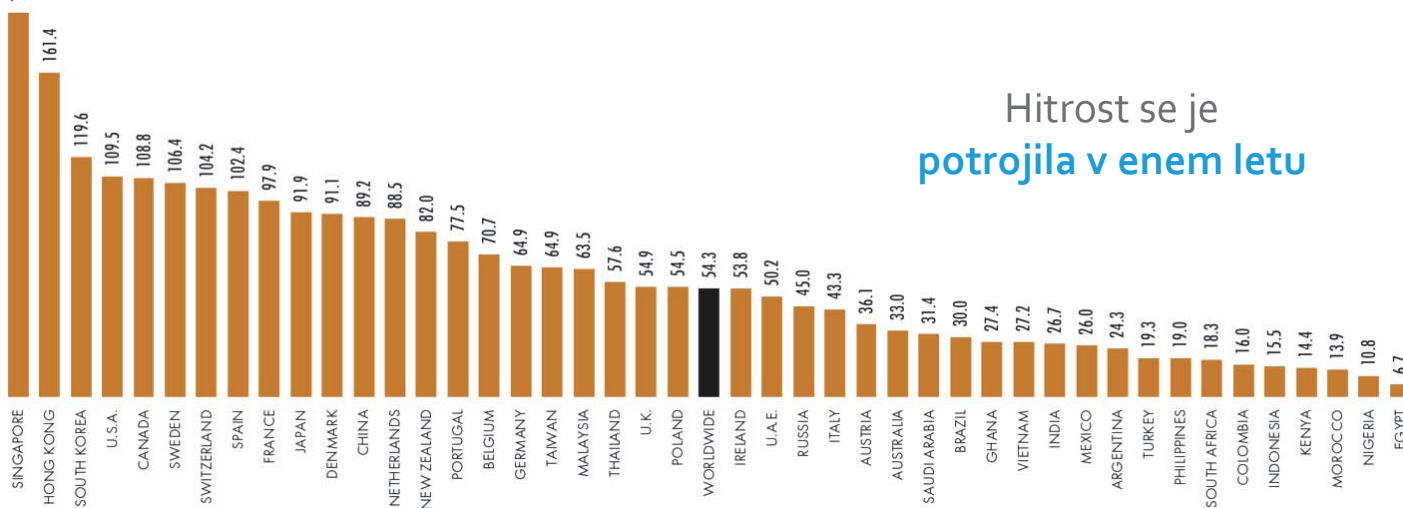


Hitrost se je podvojila v 1 letu

ISKRATEL

Potreba po hitrosti: Kje smo bili 2019

AVERAGE DOWNLOAD SPEED OF FIXED INTERNET CONNECTIONS, IN MBPS



Hitrost se je potrojila v enem letu

ISKRATEL

Potreba po hitrosi: Kje smo v 2021

Singapur: 226Mbps

Slovenija: 93Mbps

4k/UHD video

Navidezna in obogatena resničnost

Video na zahtevo

Oblačne storitve, shranjevanje

HD video konference

5G in mobilnost

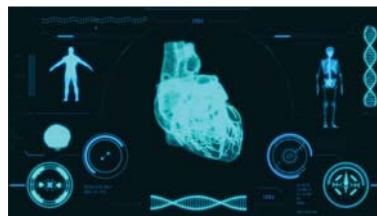
Delo in izobraževanje od doma

2020: >10-kratno povečanje zaradi COVID-19

ISKRATEL

NETFLIX

YouTube

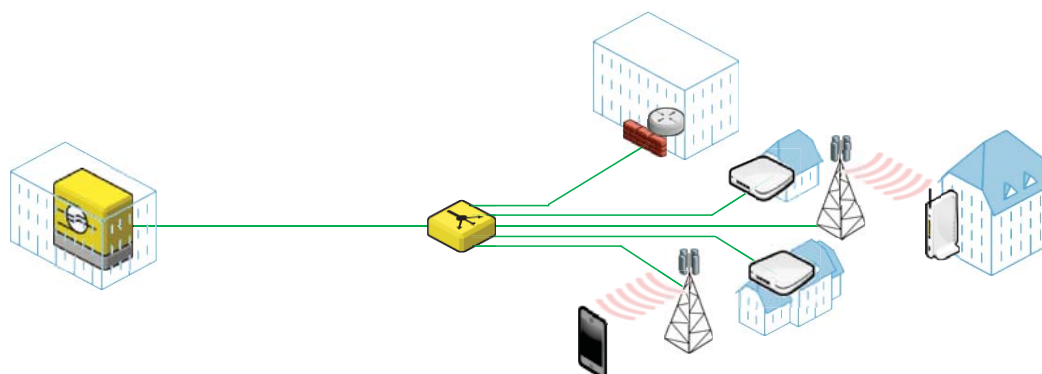


zoom



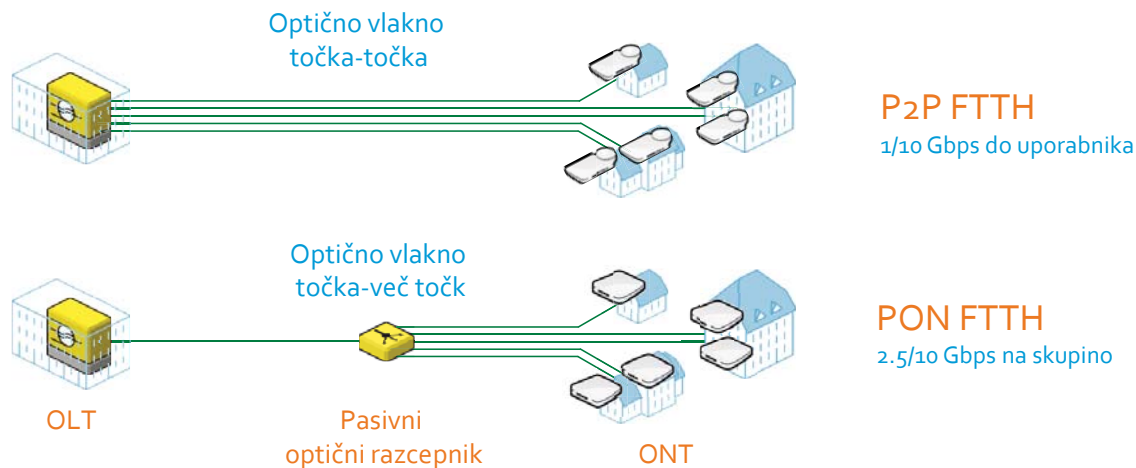
Konvergenčna dostopovna omrežja

- Rezdenčni uporabniki
- Poslovni uporabniki
- Hrbtenična povezava za mobilna omrežja



ISKRATEL

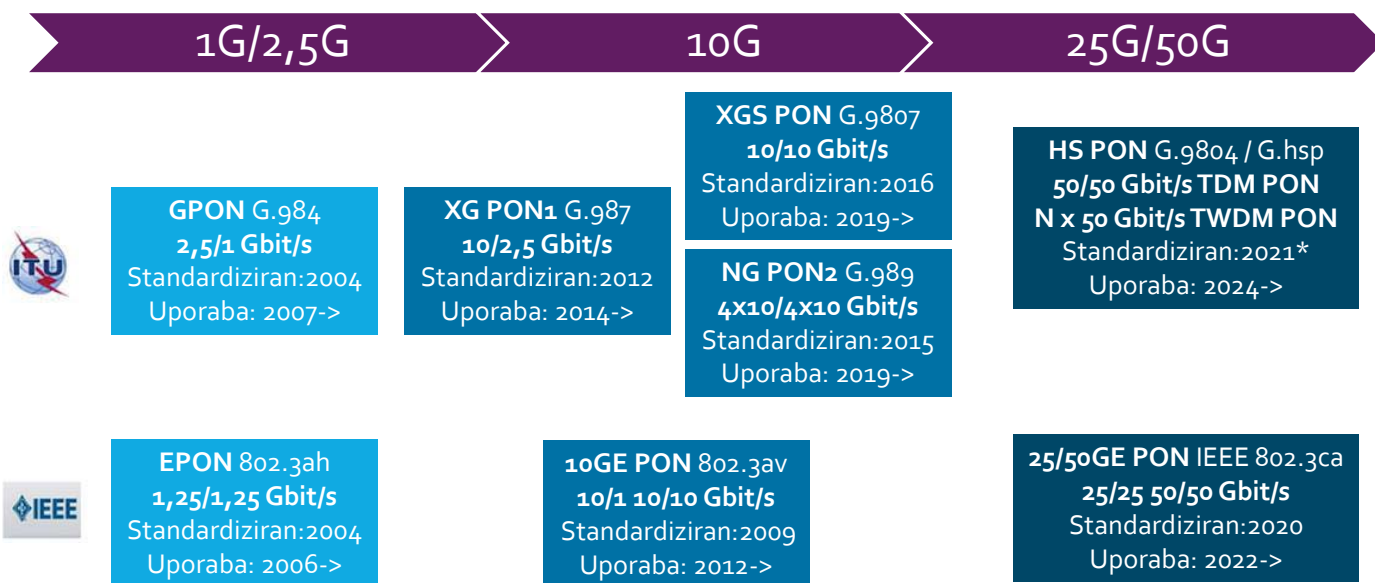
Optično vlakno do hiše - Fibre to the Home (FTTH)



© Iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

Evolucija PON tehnologij: standardizacija



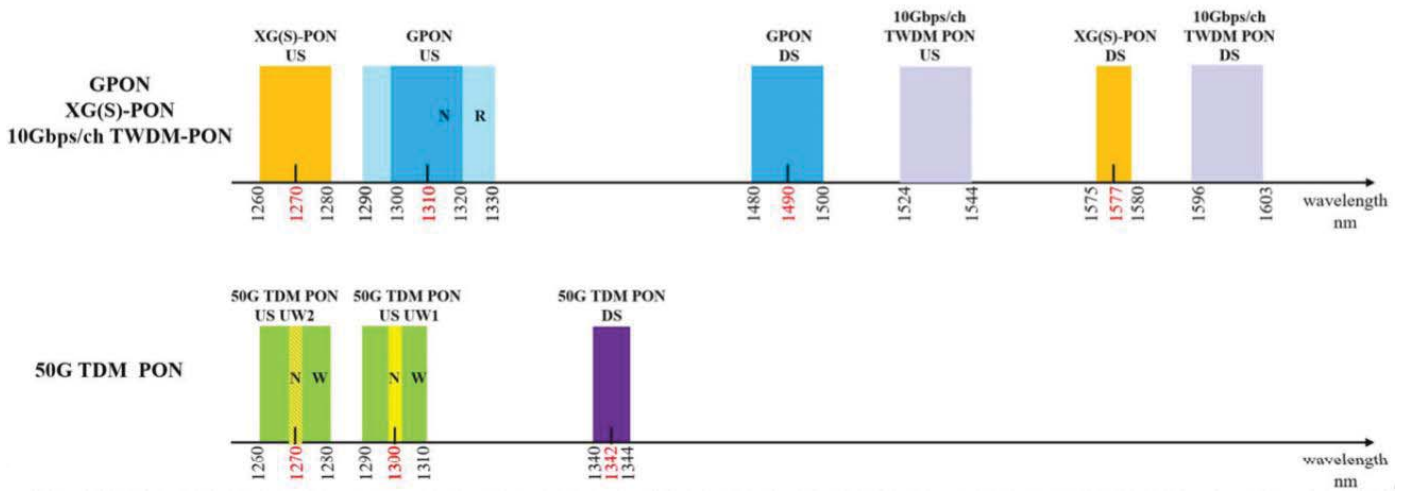
© Iskratel. All rights reserved.



ISKRATEL



Valovne dolžine PON tehnologij



ISKRATEL

25GS-PON iniciativa proizvajalcev

25GS-PON Multi Source Agreement to accelerate 25G PON

- ✓ The right performance for business & 5G xhaul
- ✓ De facto standard - Specification v1.0 ready
- ✓ Most cost-effective step beyond 10G



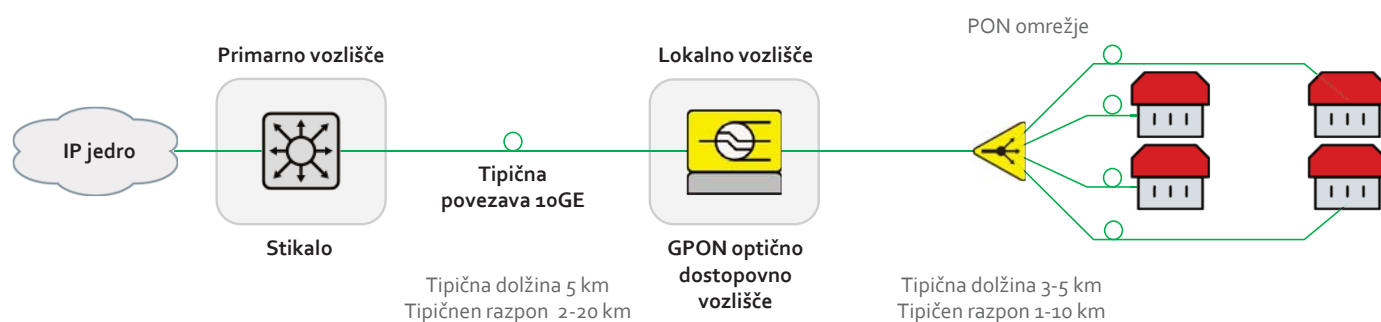
ISKRATEL

Poslovni vidiki novih FTTH omrežij

1. Zmanjševanje števila aktivnih lokacij
2. Podaljševanje življenjskega cikla uporabe naprav

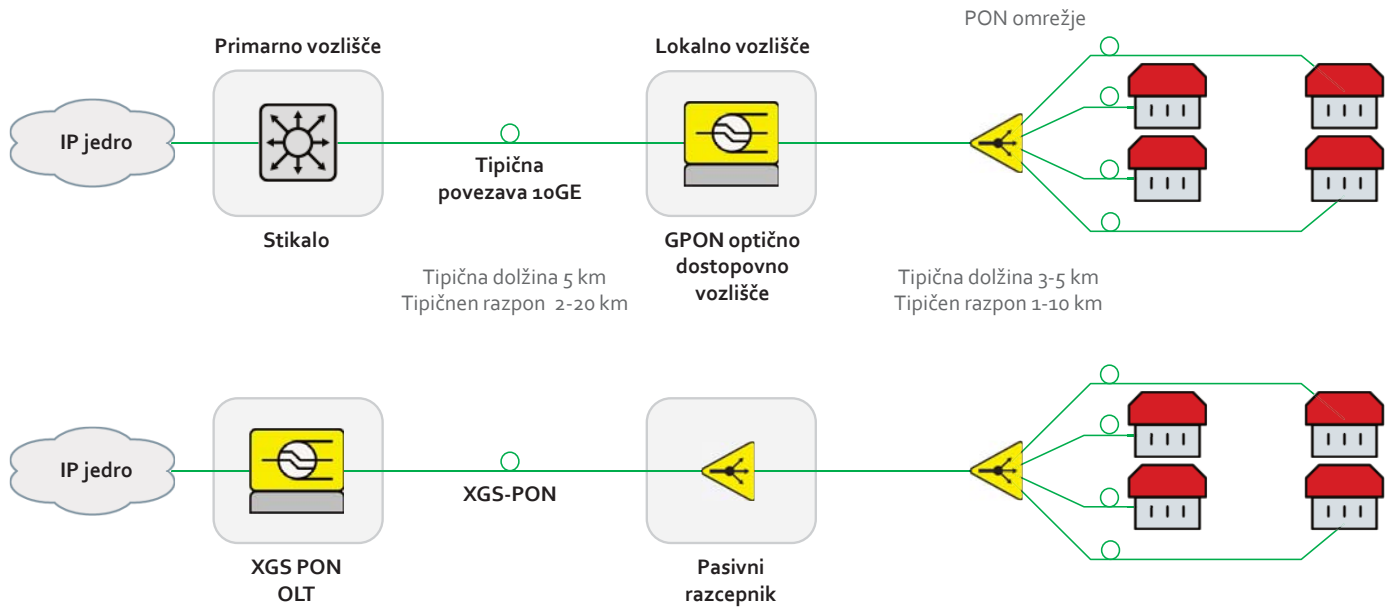
ISKRATEL

Gradnja PON omrežij z lokalne točke koncentracije



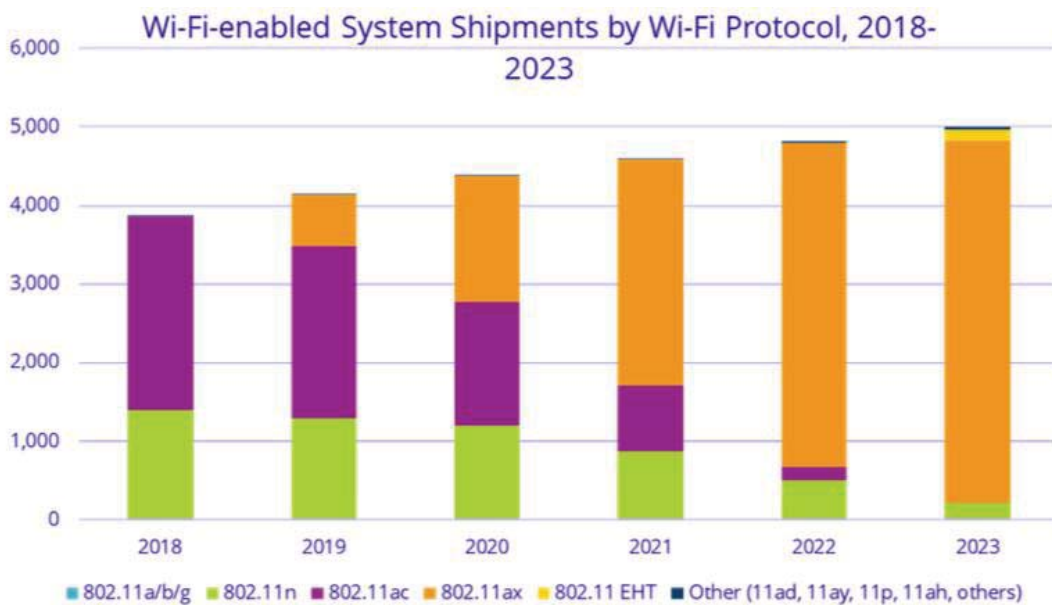
ISKRATEL

Gradnja PON omrežij z lokalne točke koncentracije



ISKRATEL

Posvajanje WLAN standardov: napoved

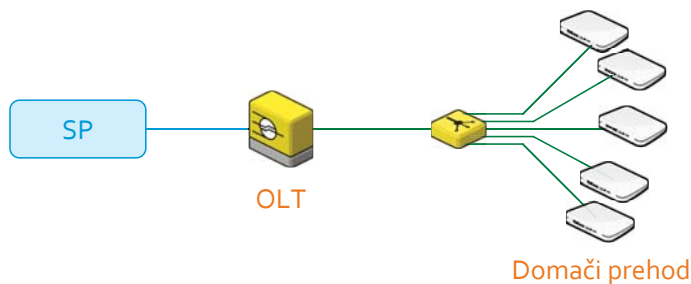


Vir: Wi-Fi chipset shipment forecast by IDC towards 2023

ISKRATEL

Ena uporabniška naprava

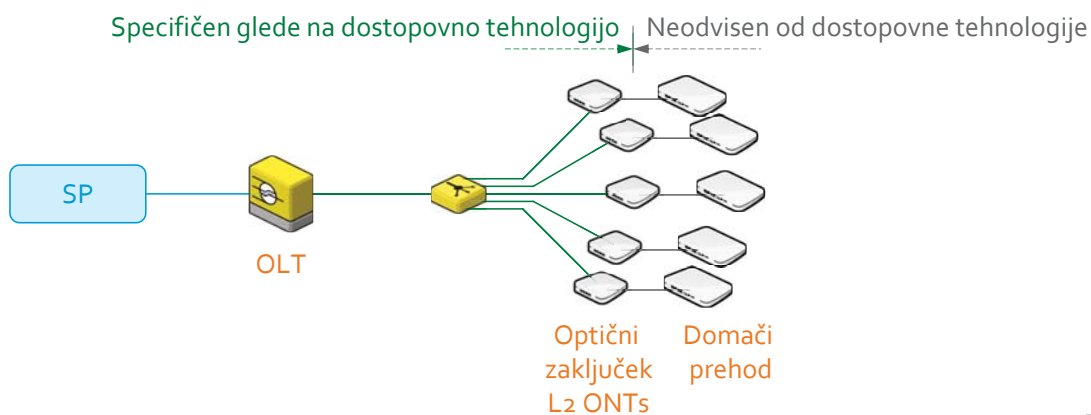
- Domači prehod je povezan preko podprte dostopovne tehnologije



ISKRATEL

Dve uporabniški napravi

- Enostavna menjava optičnega zaključka v primeru menjave dostopovne tehnologije
- Napredne funkcionalnosti zagotavlja domači prehod
- Možen več-operaterski model



ISKRATEL

Ena naprava ali dve napravi : izhodišča



WAN tehnologija se zamenja vsakih **7-10 let**

Ena naprava

Capex: zamenjava domačega prehoda
Opex: poseg na terenu

Dve napravi

Capex: zamenjava optičnega zaključka
Opex: poseg na terenu

LAN tehnologija se zamenja vsakih **3-4 leta**

Ena naprava

Capex: zamenjava domačega prehoda
Opex: poseg na terenu

Dve napravi

Capex: zamenjava domačega prehoda
Opex: pošljemo nov domač prehod po pošti

ISKRATEL

Ena naprava ali dve napravi: stroškovne predpostavke



Postavitev z **eno napravo**

- Strošek domačega prehoda - ena naprava **2.5 enoti** (relativno)

Postavitev z **dvema napravama**

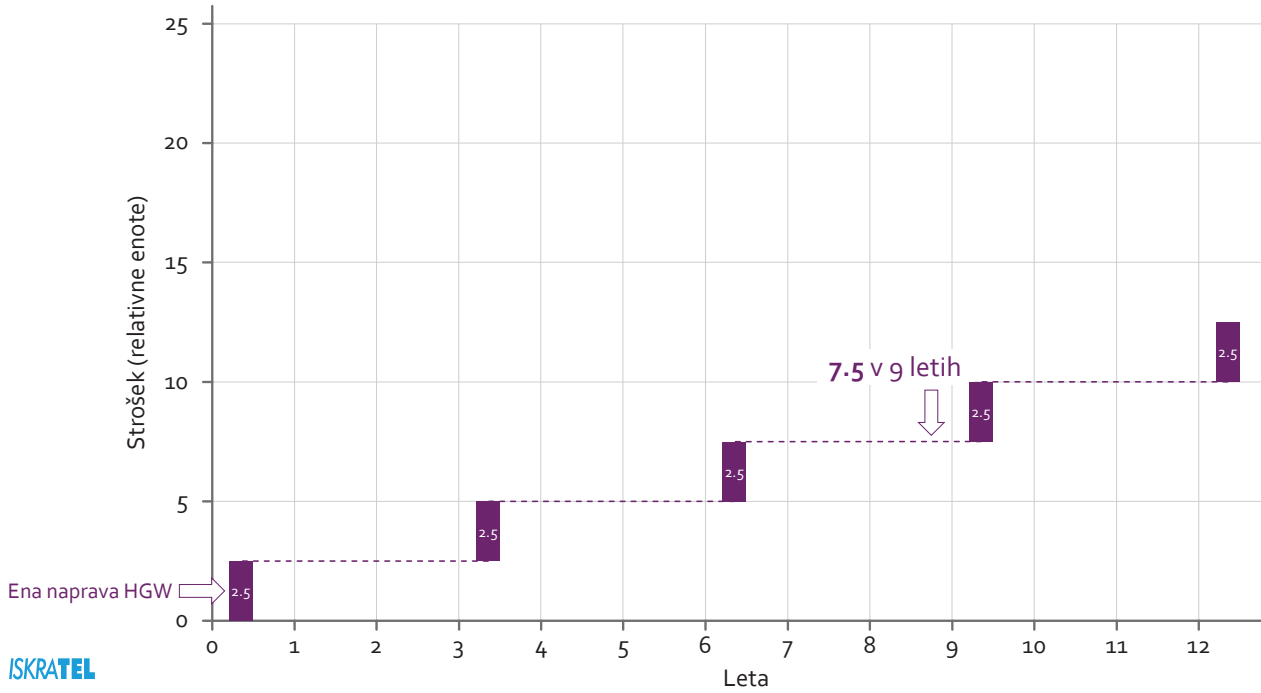
- Strošek samostojnega optičnega zaključka (L2 ONT) **1 enota** (relativno)
- Strošek samostojnega domačega prehoda **2 enoti** (relativno)

Strošek zamenjava opreme na terenu (obisk uporabnika na domu) **4 enote** (relativno)

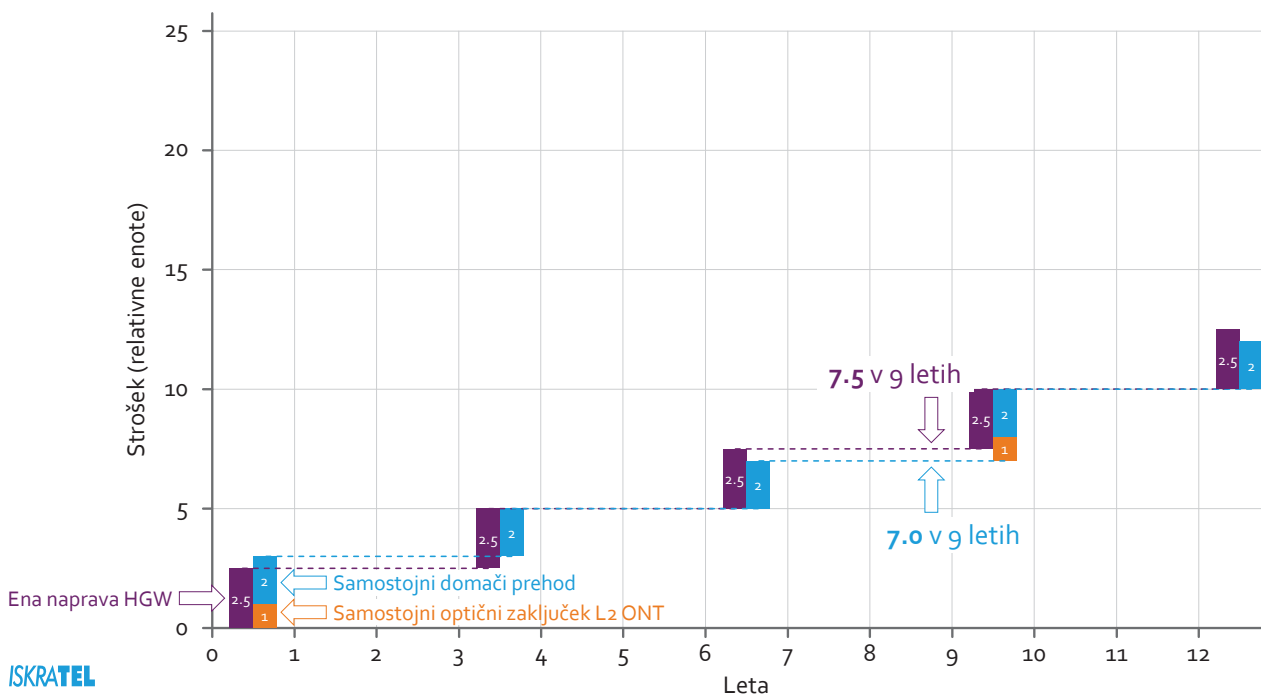
ISKRATEL



Ena naprava ali dve napravi: Capex



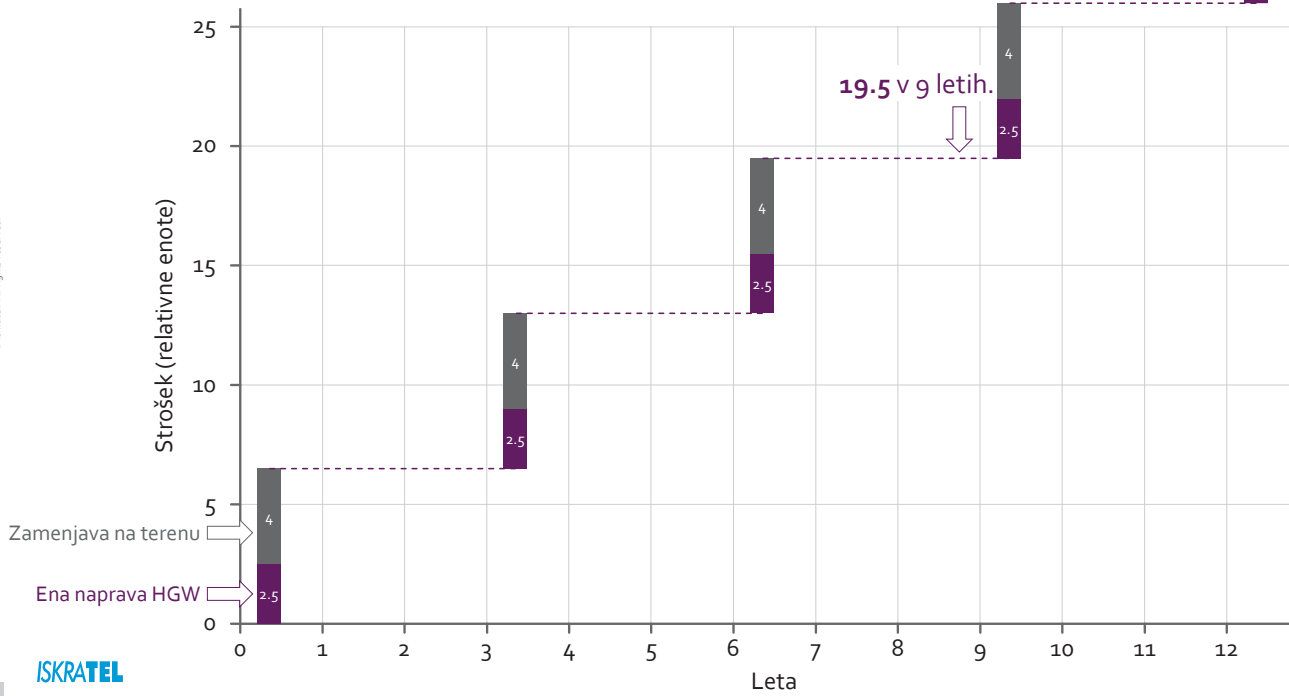
Ena naprava ali dve napravi: Capex





Ena naprava ali dve napravi: Capex in Opex

© Iskratel. All rights reserved.

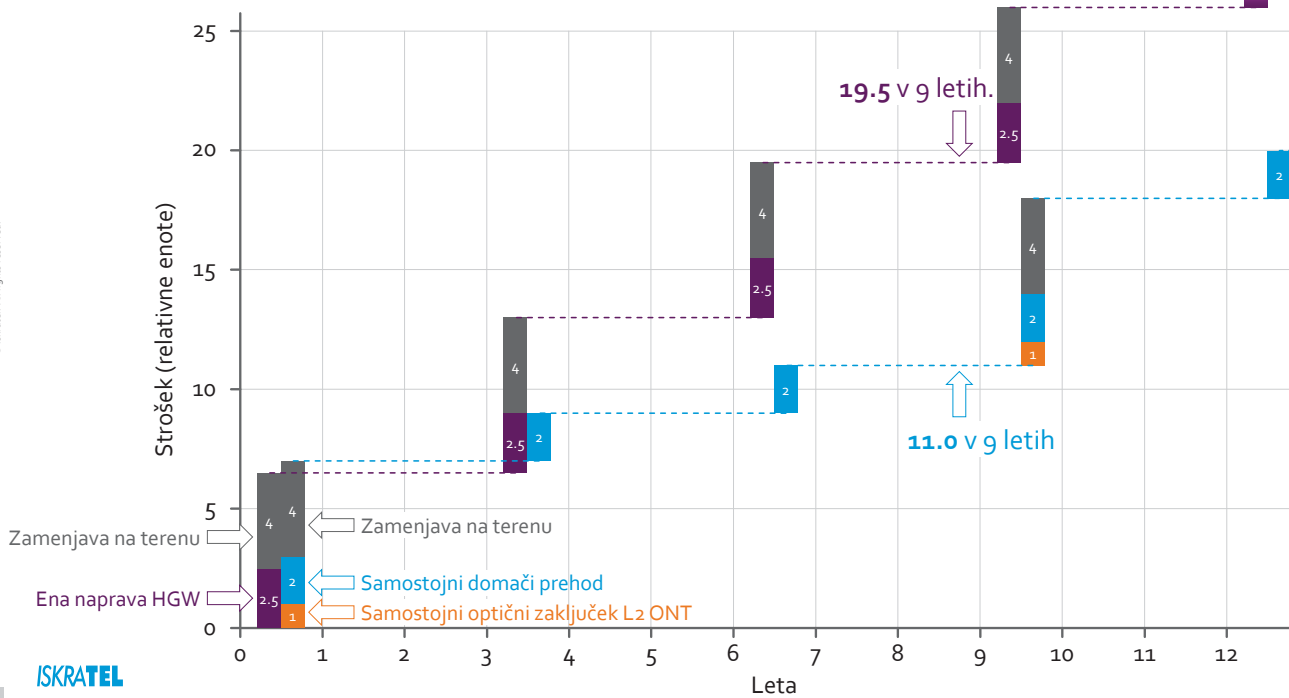


ISKRATEL



Ena naprava ali dve napravi: Capex in Opex

© Iskratel. All rights reserved.



ISKRATEL



Sklep

- Nove storitve in aplikacije pospešujejo **potrebo** po **višjih hitrostih**
- Za rezidenčne uporabnike **prevladuje PON** tehnologija
- **10Gbit/s** tehnologija se danes že uporablja, razvijajo se standardi za **25Gbit/s in 50Gbit/s**
- **Zmanjševanje** števila aktivnih **lokacij**
- Podaljševanje življenjskega cikla uporabe naprav
 - **Trend vpeljave dveh naprav**

© Iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL



Celovite **digitalne rešitve**
za **varno** in **pametno prihodnost**

Več kot **70 let** izkušenj
30 lokacij po vsem svetu
900 zaposlenih

Globalna prisotnost v več kot **50 državah**
100 milijonov zadovoljnih uporabnikov
Lastna razvoj in proizvodnja v **EU**

Vodilni evropski ponudnik rešitev za digitalno transformacijo **telekomunikacij, transporta, javne varnosti in energetike** ter nudenja **proizvodnih storitev.**



ISKRATEL

25

Hvala za pozornost. Vprašanja?



www.iskrateel.com



marketing@iskrateel.si



[linkedin.com/company/iskrateel](https://www.linkedin.com/company/iskrateel)



[@iskrateel](https://twitter.com/iskrateel)



Sign-up for Iskrateel's monthly newsletter at our webpage.



Family
Friendly
Enterprise

ISKRATEL



The evolution of fixed and wireless network generations towards 6G

Ioannis Tomkos

Department of Electrical and Computer Engineering of the University of Patras, Greece

tomkos.ioannis@gmail.com

Abstract

This article is focusing on the key steps that determined the evolution of architectures and technologies of Fixed and Wireless Broadband Networks over the past 50 years. We are currently in the 5th generation of this evolution, which is dominated by advanced communication systems and network technologies, on the way to define the 6th generation that will be based on the convergence of the communications infrastructure with computing infrastructure and the fusion of other technologies like sensing, AI, etc. with the goal to offer unprecedented experience to the end users.

Author's biography

Dr. Ioannis Tomkos is Professor of Optical Communications at the Department of Electrical and Computer Engineering of the University of Patras, Greece. His Research Group was/is involved in over 25 EU-funded research projects with a consortium-wide leading role (serving as Technical Manager of 10 major EU projects). In 2018, Dr. Tomkos was elected a Fellow of IEEE “for contributions in Dynamic Optical Networks”. He is also a Fellow of the IET (2010) and a Fellow of the “Optical Society - OSA” (2012). Together with his colleagues and students he has co-authored over 650 peer-reviewed archival articles, including over 150 Journal/Magazine/Book publications. His published work has received about 10.500 citations (h-factor=49).

Zaradi zaupne vsebine, prispevek ni objavljen.

Due to confidential content, the article has not been published.

Next Generation Fiber Sensing, Theory and Applications

Eran Inbar

Prisma Photonics, Israel

eran@prismaphotonics.com

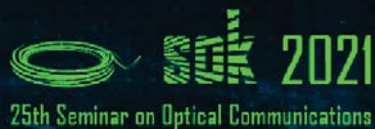
Abstract

Physical infrastructure – pipelines, powerlines, highways, railways, optical-networks, borders, perimeters & more – is huge market with a strong need for monitoring and control solutions. Fiber-optic sensing (using very long fibers as sensors) has been around for more than a decade and is probably the most cost effective, robust and reliable approach for long infrastructure monitoring (as opposed to thousands of discrete sensors). However, 3 major problems prevent it from being a widely spread solution: high false alarm rate, poor target classification and very limited ability to use already installed optical communication fiber cables as sensors. Prisma-Photonics' Hyper-Scan Fiber-SensingTM is a breakthrough patented technology enabling ultra-sensitive detection and intelligent machine learning classification which revolutionize the Fiberoptic Sensing market by increasing dramatically the detection sensitivity and solving the 3 major problems mentioned. In this presentation, we describe fiber sensing technology, next generation fiber sensing (i.e. Hyper-Scan) and show concrete applications of usage of this technology in the different market segments mentioned above.

utilities. Before that, he was the CEO and founder (2001-2016) of V-Gen: among the early and dominant players in the Fiber-Laser field. Eran holds a Ph.D. in Physical Electronics from Tel-Aviv University with many patents relating to novel laser design. In his diminishing free time, Eran is also an enthusiastic triathlete.

Author's biography

Dr. Eran Inbar is founder and CEO of Prisma Photonics since 2017. Prisma Photonics is using next-generation fiber sensing technology to monitor long stretched



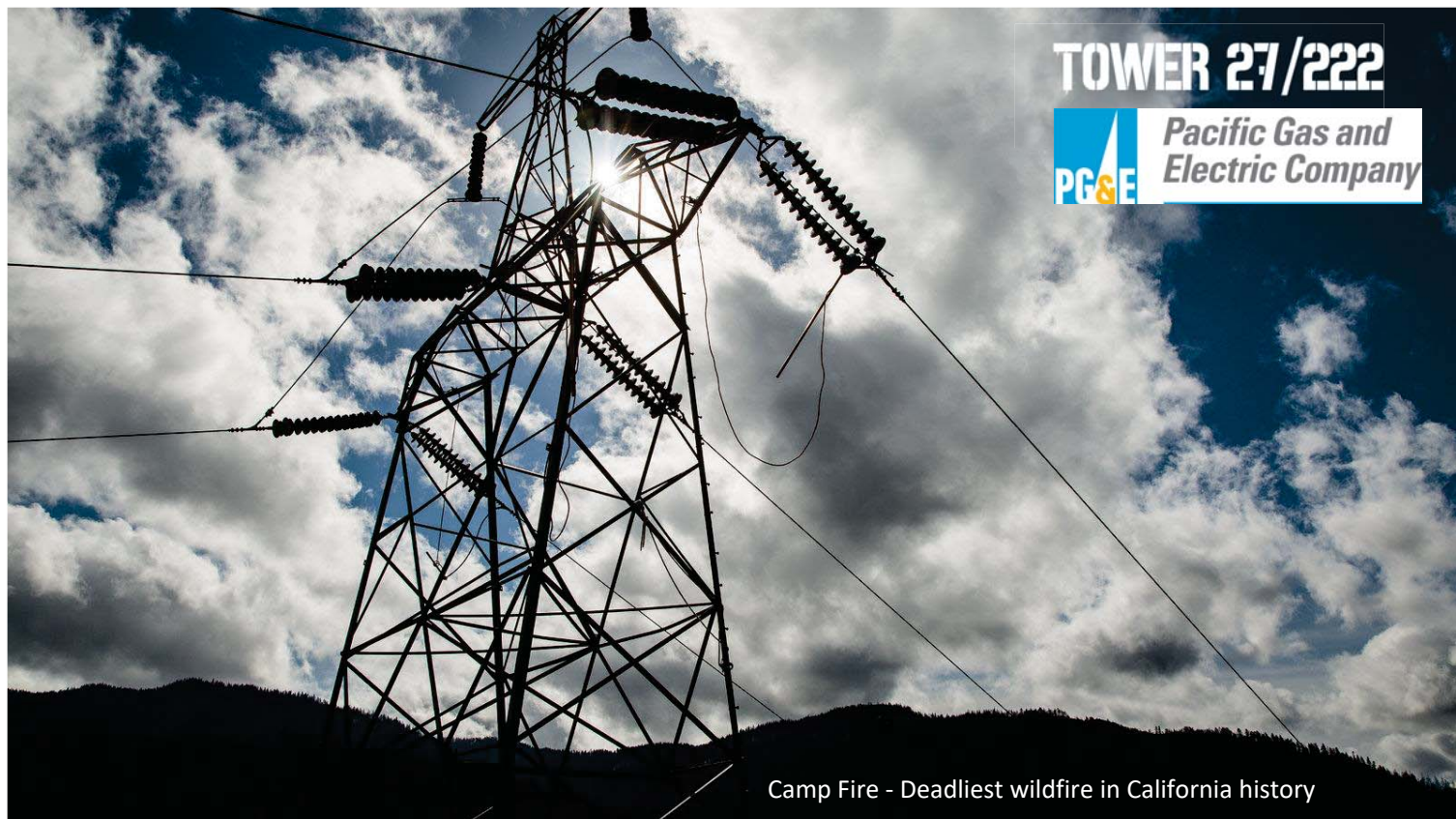
Next Generation Fiber Sensing - Theory and Applications

25th Seminar on Optical Communication


Dr. Eran Inbar, CEO

February 2021

This presentation contains information which is confidential and proprietary of Prisma Photonics and shall not be published, reproduced, copied, disclosed, or used for other than its intended purpose without the express written consent of a duly authorized representative of Prisma Photonics



- Tower 27/222 is **100 years old**
- Peak speed of fire was **250 kph**
- The town of Paradise burned in **4 hours**
- **85 people** died
- **620 KM²** were burned (4 x Ljubljana)
- **\$8.4 Bn** in insured losses

PG&E Pleads Guilty to 84 Counts of Manslaughter in Camp Fire Case

The California utility's transmission line started the 2018 fire that killed dozens and destroyed the town of Paradise.

The New York Times

© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

3

Sensing over long running utilities

- **Detecting faults on powerlines is not easy**, mainly for long lines
- **Regular sensing technologies is expensive or unreliable:**
 - Installation of multitude of sensors along the utility
 - Dependence on manual patrols, UAVs or other error prone inspection
- **Fiber Sensing along the powerline solves all that**
- **High sensitivity combined with simple installation over 100s of KMs**

- Optical fibers are placed along large-scale utilities in the last 20 years



- Along oil, gas and water pipelines
- With sub-sea utilities
- Along railways and main roads



Optical Fiber Sensing

- Using multi-thousands of sensors is a highly cumbersome solution
 - Huge cost for installation, maintenance and future upgrades.
 - Very long ramp-up time, etc.
- What is a “sensor-free” solution?
 - We are using pre-existing fiber cables as our sensors



Conventional multi-thousands of sensors

VS

Prisma Photonics' "Sensor's Free" solution



DAS: Distributed Acoustic Sensing

© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

8



Next Generation Fiber Sensing

- An Optical Interrogator (OI) system is sending laser pulses along the fiber and detecting & analyzing the back-reflected light
 - Prisma's technology overcomes fiber type and condition which limits existing DAS operational distance
- If a target along the fiber is generating an acoustical signal the system can detect it, find its location in meters resolution and classify it (e.g., differentiate between walking and digging, etc.)
 - Prisma's technology process huge (x100) amount of data enabling artificial intelligence to break today's limit of classification abilities



© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

9



We are Prisma Photonics



- Founded in 2017, Innovating next generation fiber sensors for smart infrastructure
- An expert team, a proven track record of building and scaling companies in deep technology and laser domain
- The company is in revenue stage with active pilots and initial commercial deployments
- Prisma Photonics offers solution to many segments
 - Power, Gas & Oil pipeline, Subsea infrastructure, Perimeter, Highways, Railway and physical cyber



Long Infrastructure use cases

PrismaPower

PrismaFlow

PrismaHedge

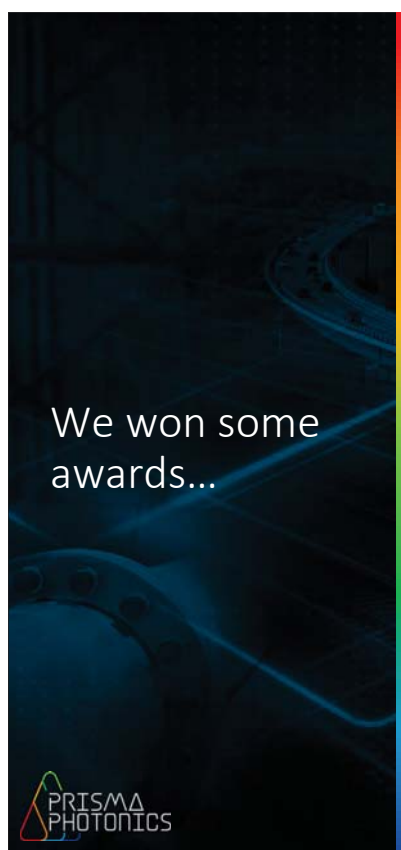
PrismaRail

PrismaSubsea

PrismaCyber

PrismaRoad

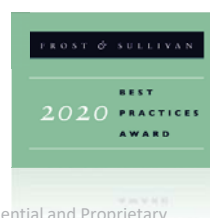
© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary



European Utility Week

Accelerate 2 Initiate!
2019 Winner!

2018 MITTEL



© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

12

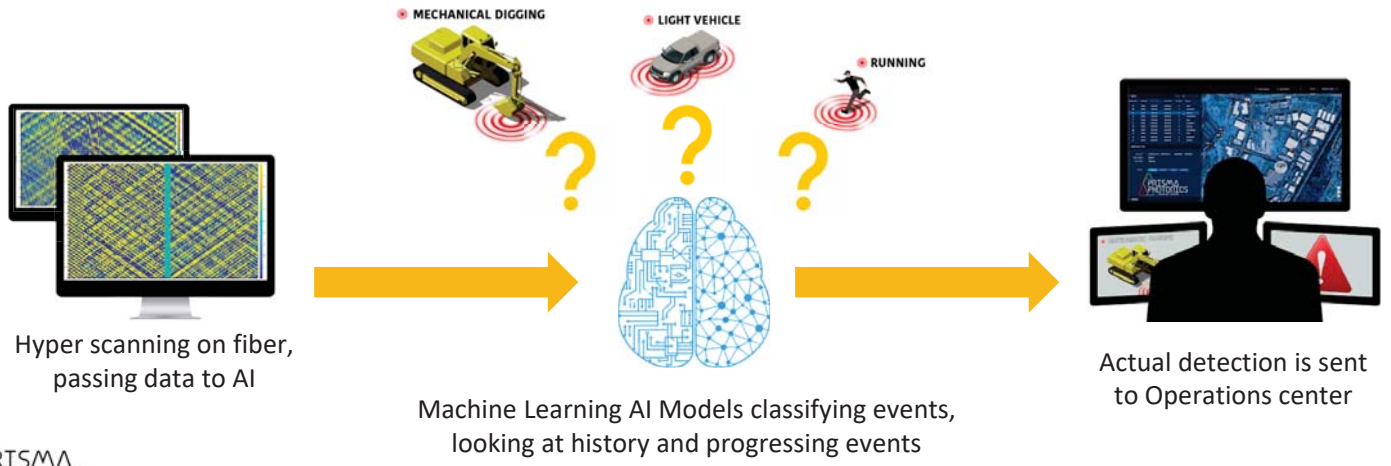
What is a 'sensor free' solution?

[Watch Video](#)

- A **disruptive solution** for physical infrastructure
- Covers a wide variety of use-cases:
 - safety, security, preventive & predictive maintenance
- **AI-Based classification** of events with **negligible false alarm rate**
- **Leverages preexisting fiber cables**, turning assets to value generators
 - The fiber is the sensor no need to install any sensors along physical infrastructure!
- Ramp-up time for **installation and the cost per meter are unparalleled low**
 - Compared to any conventional technology
- Prisma Photonics offers also an **innovative service model**
 - Data as a Service

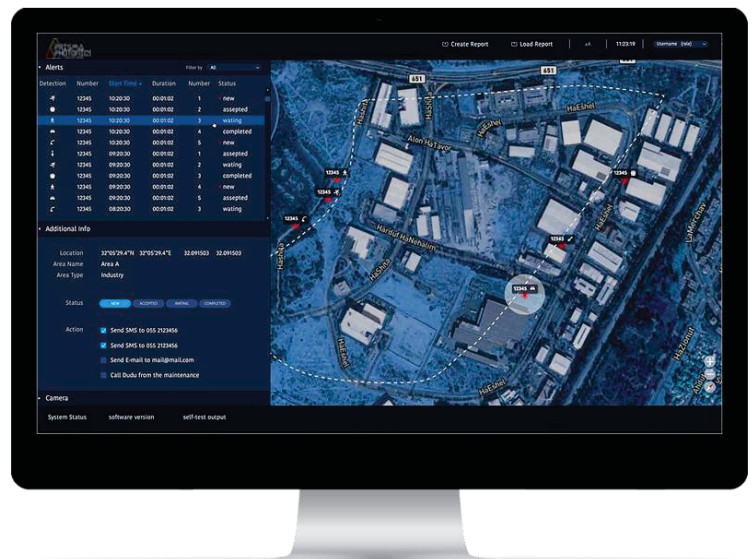
PrismaAI: Smart-Classification™

Using **Smart-Classification™** techniques to automatically identify and classify events:
Increasing Probability of Detection (PD) and eliminating False Alarm Rate (FAR)



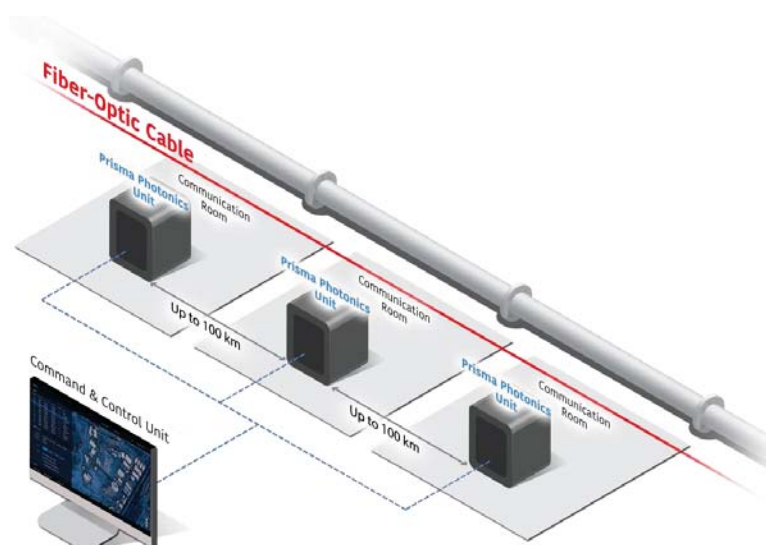
Schematic installation

- A single system monitors few hundred electrical towers
- All the data from multiple systems is consolidated into single C&C (command & control unit)



Cascaded schematic installation

- Single & Consolidated User Interface
- A single system monitors the pipeline
- All the data from multiple systems is consolidated into single C&C (command & control unit)



© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

16

Game Changer for Physical Infrastructure Monitoring

- **“Sensor Free”** - no installation on the infrastructure
- **“The Fiber is the Sensor”** - using preexisting fiber, extreme reliability and very long lifetime
- **Immediate ramp-up time** - from kick-off to full-functionally in a few days
- **One platform – multiple use cases** - predictive and preventive maintenance, safety, security, etc.
- **Disruptive technology for the first time** - ultra-sensitive fiber-sensing that can compensate the loss since the pre-existing fiber is in conduit and not buried directly in the ground
- **DaaS (Data as a Service model)** - the utility can use the solution in service model (Pay as You Grow) with no upfront cost or commitment



© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

17



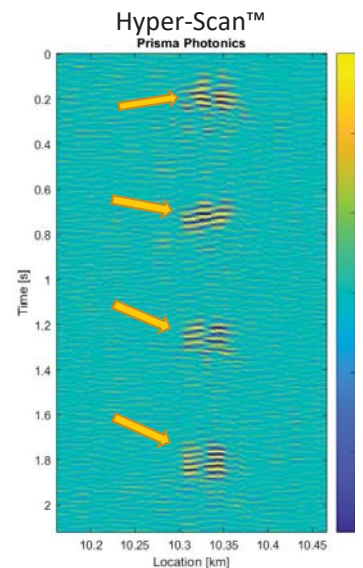
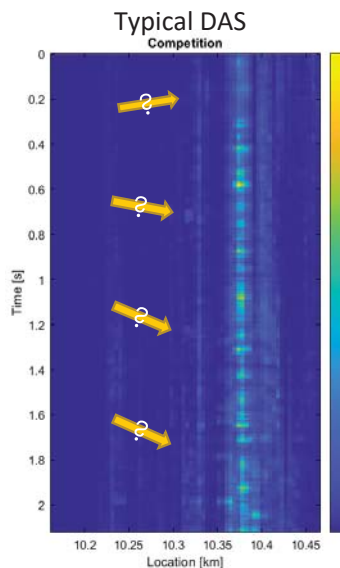
© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

18

Hyper-Scan™: excellent Signal-to-noise ratio

Step 30 meters from a buried optical cable

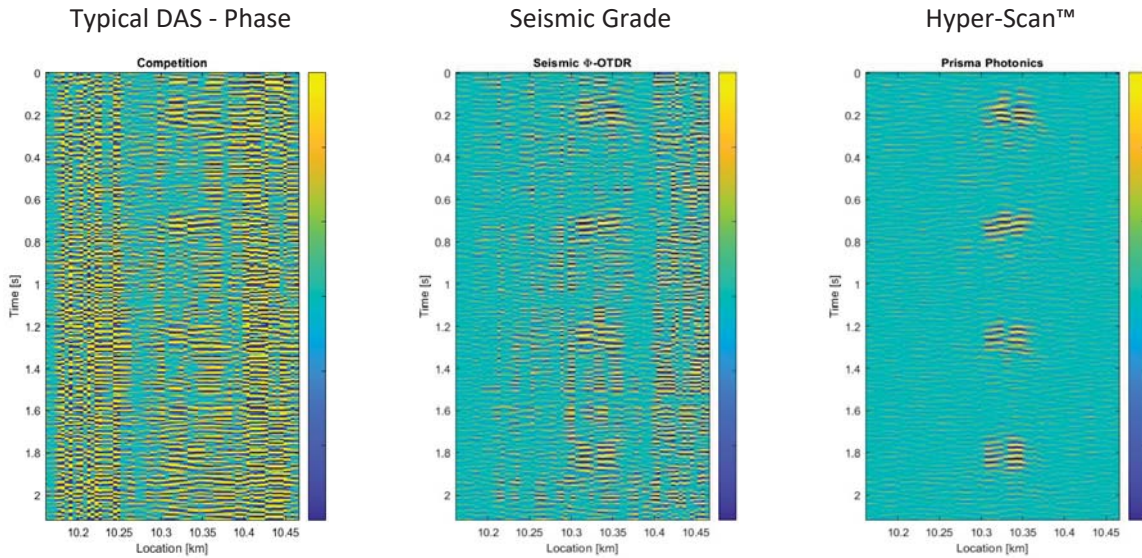
- Typical DAS:
- Undetectable
- Noise (Rayleigh fading)
- Hyper-Scan™ :
- Much better Signal to Noise
- No Rayleigh fading
- More detail:
 - Signal strength
 - Signal frequency
 - Wavefront phase



© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

19

Comparison with other phase sensitive, Phi-OTDR



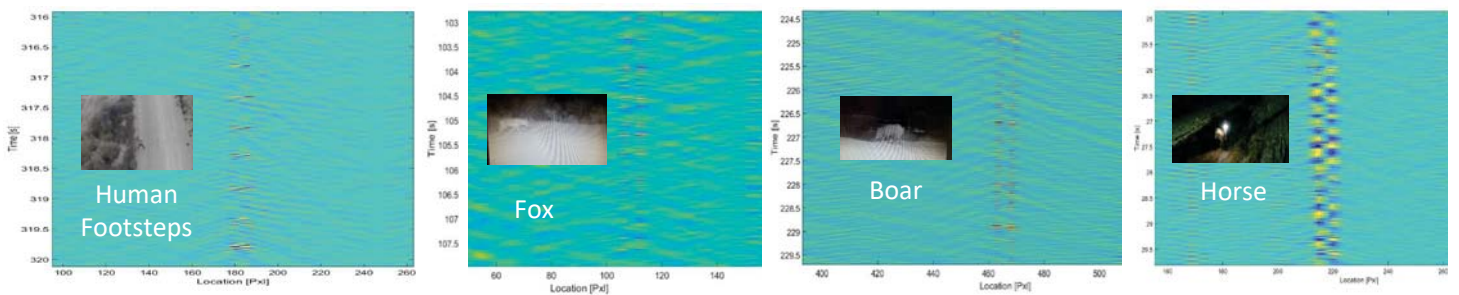
© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

20



Hyper-Scan™: detailed data

- Use detail to differentiate similar targets
- Well suited for Machine-Learning



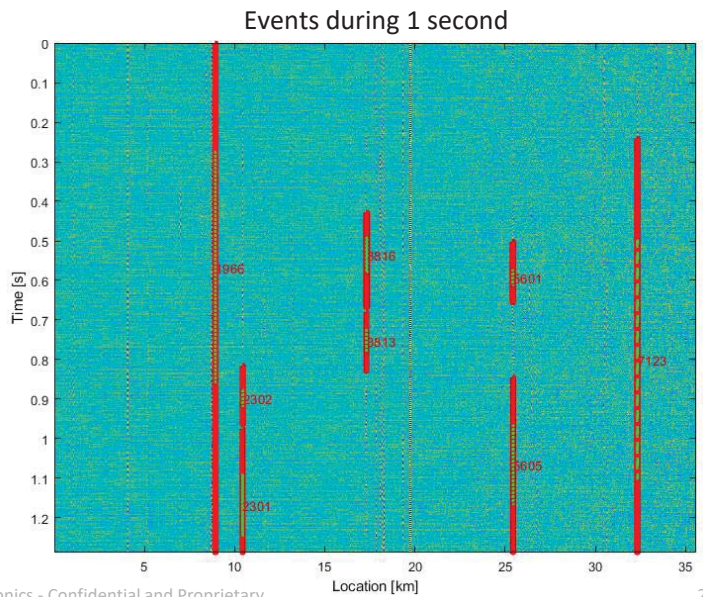
© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

21



Classification: key to low false positive alerts

- Monitored 35 km of gas transmission pipeline
- Many different activities near pipeline:
 - Highway
 - Cities
 - Construction sites
 - Agricultural fields



© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

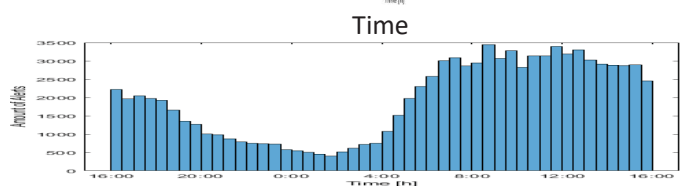
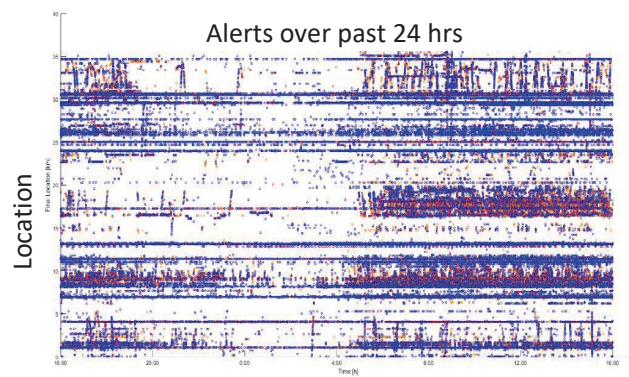


Classification: key to low false positive alerts

- Alerts in 24hrs:

Digger	Other classes
0	92,514

- Successfully reduced False / Nuisance Alarm Rate (FAR & NAR) to zero in a noisy real-life scenario

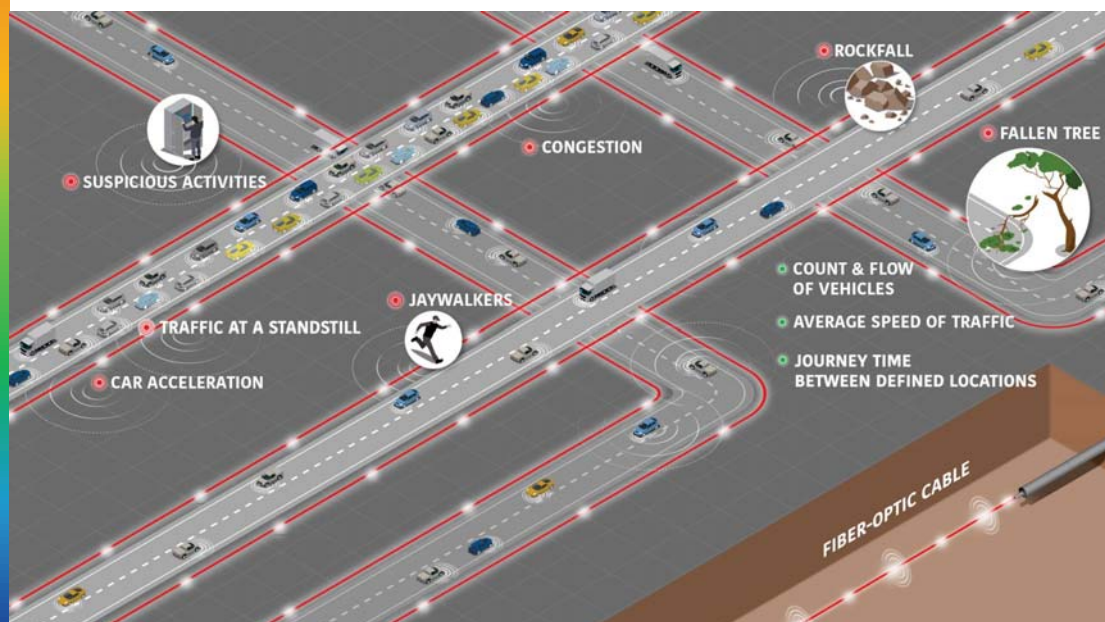


© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary



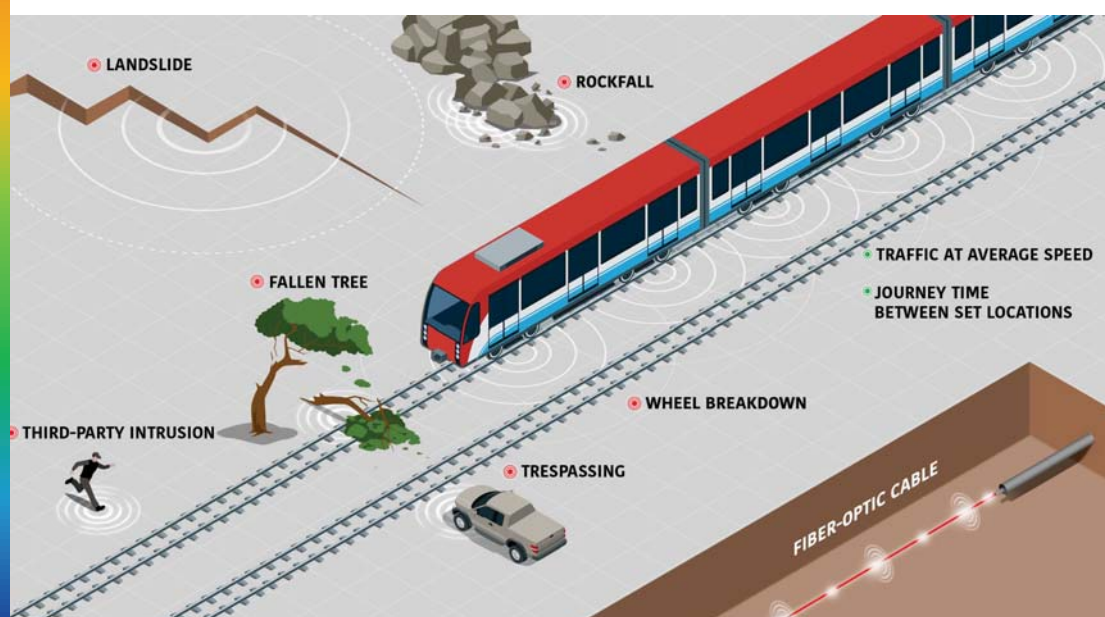
Sample: PrismaRoad Use Cases

- Accident detection
- "Car on the shoulder" alert
- Car speeding alert
- Average speed of traffic
- Congestion
- Traffic at a standstill
- Journey time between defined locations
- Vehicle count flow
- Volume estimate
- Rockfall and landslide events



Sample: PrismaRail Use Cases

- Real-time, accurate location of all trains on the rails
- Rockfall and landslide events
- Fallen trees near the train tracks
- Trespassing
- Intruders into the train track area
- Breakdown of train wheels
- Journey time between defined locations
- Average speed
- Vandalism



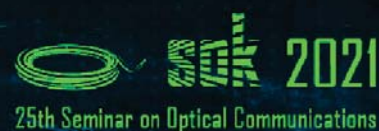
Summary

- A complete physical-infrastructure monitoring solution in a “Sensor Free” approach
- Covering a very wide variety of use-cases in safety, security, preventive & predictive maintenance
- An award-winning solution with commercial implementations



© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

26



Thank you for your attention

Dr. Eran Inbar

February 2021

eran@PrismaPhotonics.com

Visit us at www.PrismaPhotonics.com

This presentation contains information which is confidential and proprietary of Prisma Photonics and shall not be published, reproduced, copied, disclosed, or used for other than its intended purpose without the express written consent of a duly authorized representative of Prisma Photonics

Uvod v fotonska integrirana vezja in aktivnosti s tega področja na Fakulteti za elektrotehnikov v Ljubljani

Introduction to photonic integrated circuits and activities in this field at Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana

Janez Krč, Andraž Debevc in Marko Topič

UL FE, Laboratorij za fotovoltaiiko in optoelektroniko

Aleksander Sešek, Bruno Cacovich, Miha Cacovich in Janez Trontelj

UL FE, Laboratorij za fotovoltaiiko in optoelektroniko

Kristjan Vuk Baliž in Boštjan Batagelj

UL FE, Laboratorij za sevanje in optiko

janez.krc@fe.uni-lj.si

Povzetek

V prispevku so prikazane tehnološke rešitve za optično dostopovno omrežje, ki so se uveljavile v slovenskem prostoru in ki jih lahko koristijo končni uporabniki. Integracija fotonskih gradnikov predstavlja pomemben korak v smeri večje funkcionalnosti, zanesljivosti in cene fotonskih gradnikov in sistemov. Po kratkem uvodu v fotonska integrirana vezja so predstavljene prve aktivnosti s področja načrtovanja, izdelave in karakterizacije integriranih svetlovodnih struktur na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Abstract

The integration of photonic components represents an important step towards greater functionality, reliability and cost of photonic building blocks and systems. After a short introduction to photonic integrated circuits, there are presented first activities in the field of design, manufacturing and characterization of integrated waveguide structures at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana.

Biografija predavatelja

Dr. Janez Krč je redni profesor na Fakulteti za Elektrotehniko Univerze v Ljubljani in član Laboratorija za fotovoltaiiko in optoelektroniko na Katedri za elektroniko. Njegovo raziskovalno delo sega na področje opto-elektronskih simulacij, načrtovanja in karakterizacije sončnih celic, organskih svetlečih diod in fotonskih integriranih vezij.

Lecturer's biography

Dr. Janez Krč is a full professor at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, and a member of Laboratory of Photovoltaics and Optoelectronics at the Department of Electronics. His research work covers opto-electrical simulations, design and characterization of solar cells, organic light emitting diodes and photonic integrated circuits.



Uvod v fotonska integrirana vezja in aktivnosti s tega področja na FE

Janez Krč, Andraž Debevc in Marko Topič
Laboratorij za fotovoltaiiko in optoelektroniko – LPVO

Bruno Cacovich, Miha Cacovich, Aleksander Sešek in Janez Trontelj
Laboratorij za mikroelektroniko FE – LMFE

Kristjan Vuk Baliž in Boštjan Batagelj
Laboratorij za sevanje in optiko LSO

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko – UL FE
Tržaška 25, 1000 Ljubljana

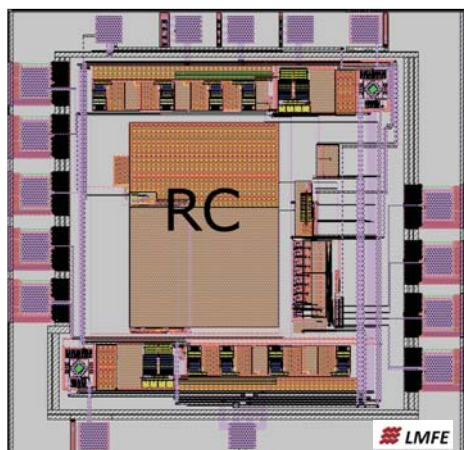


Vsebina predstavitev

- Uvod v fotonska integrirana vezja
- Aktivnosti na Fakulteti za elektrotehniko UL
 - Orodja za načrtovanje in simulacije
 - Merilna oprema
 - Izdelava prvih testnih vzorcev na osnovi tehnologije Si_3N_4

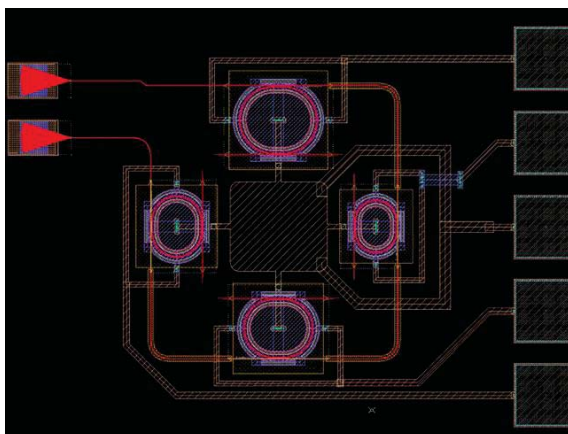
Uvod

Elektronsko integrirano vezje - IC
- elektroni -



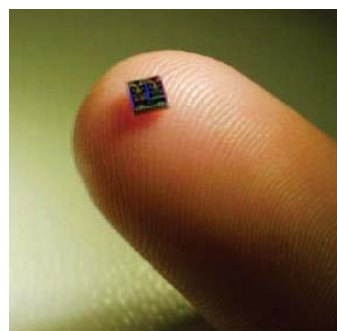
Fotonsko integrirano vezje - PIC
(Photonic Integrated Circuit)

- fotoni -



Integracija optičnih komponent

PIC



- majhno, lahko kombiniramo z IC
- kompaktnost, funkcionalnost
- odpadejo ohišja posameznih komponent
- uniformnost (enakost) komponent
- večja zanesljivost

- omejitve glede stopnje integracije

Energija

Podatkovni centri

Velik del energije se porabi za prenos podatkov (premikanje elektronov po bakrenih povezavah)

- ohmske izgube
- RLC zakasnitve
- EM interference

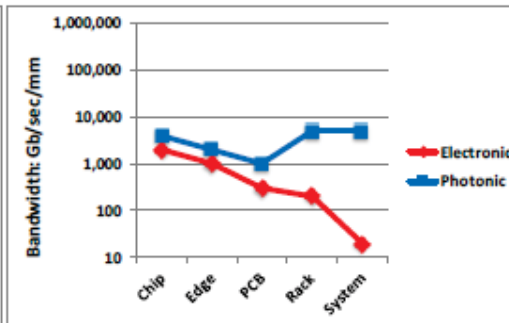
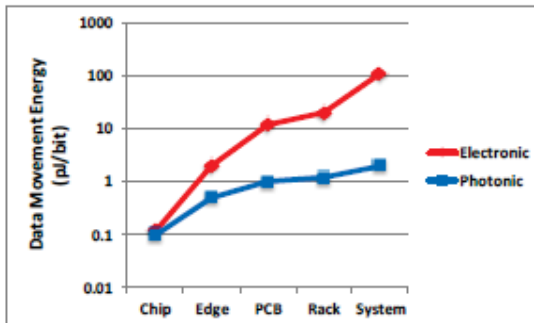


Silicon Photonics – PhD course prepared within FP7-224312 Helios project

Energija in pasovna širina – elektron in foton

Reduce Energy Consumption

Eliminate Bandwidth Taper




Courtesy of Karen Bergman, Columbia Uni.

Področja uporabe PIC

- telecom, datacom
- optično procesiranje signalov
- senzorika
- LIDAR
- kvantno računanje
- mikroskopija
- vesolje
- ...

Photonic IC technology is becoming mature



fiber sensor (Bragg grating readout)

> 250 PIC designs fabricated in JePPIX MPW runs @Oclaro, HHI, SMART, LionIX

optical switches

lasers

Optical data handling

Al-optical regenerator for constant wavelength WDM signals

WDM to TDM Trans-Multiplexer

Pulse serializers

Fiber sensor readout

Silicon nitride sensor readout

Fiber Bragg Grating readout

Fiber Bragg Grating readout

Medical and bio-imaging

Pulse shaper for bio-imaging

Integrated tunable laser for optical interferometric tomography

On-chip Optical to RF converter

lasers

Variety of lasers

Widely tunable ring laser

Variable wavelength wide pulse laser

Fibered-feedback multi-wavelength laser

Stable laser with integrated MZ modulator

QPMK receiver

Optical switching

4x4 space and wavelength selective switch


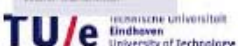
Fast optical switch matrix

Fiber to the home

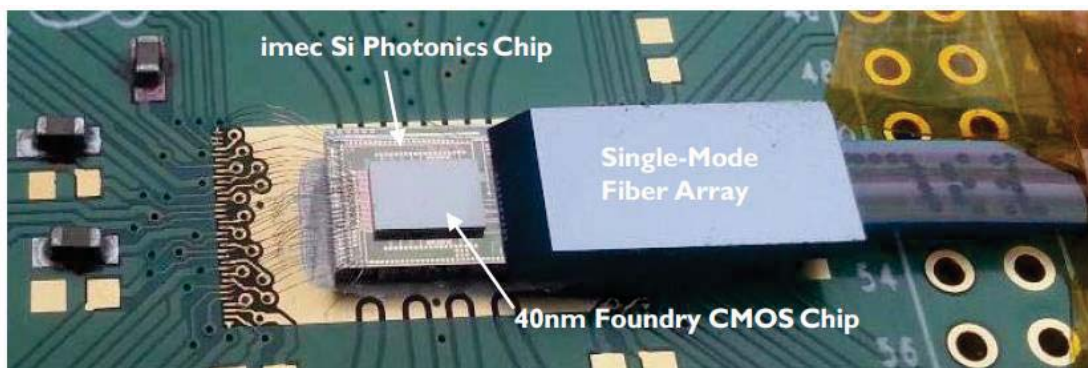
WDM receiver

WDM transmitter

INP and SI PIC International 1 March 2015, Brussels
12

Sožitje IC (CMOS) in PIC (Si tehnologija)

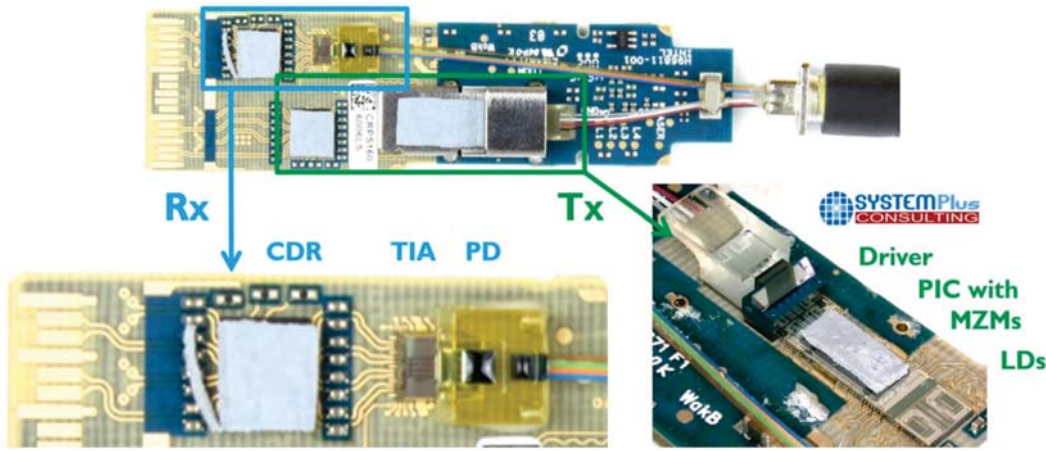


Hybrid CMOS Si-Photonic Transceiver Module



Courtesy of imec

FIBER-OPTIC TRANSCEIVERS ALL NEED ELECTRONICS



"Intel Silicon Photonic 100G PSM4 QFSP28 Transceiver", 12/12/2019

SPIE Photonics Europe 2020

High-speed electronics for silicon photonics transceivers (Invited Paper),

Johan Bauwelinck et al., imec, Univ. Gent (Belgium).

J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

9

Coherent transceivers

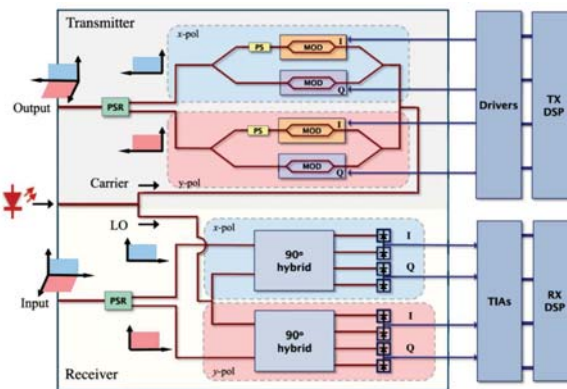


Figure 6: Block diagram of a fully integrated photonic coherent transceiver.

Table 1: Recent demonstrations of integrated silicon coherent optical transceivers.

Ref.	Year	Performance	Feature
[81, 82]	2016	DP QPSK/16/64-QAM, 30 Gbaud ^a	Ultrabroad band (O, E, S, C, L)
[78]	2020	400 Gb/s, near 70 Gbaud	6.41 b/s/Hz over 6600 km
[79]	2018	DP QPSK/16-QAM, 64 Gbaud	Hybrid integrated tunable laser
[80]	2020	DP 16-QAM, 96 Gbaud	50+ GHz electro-optoelectro bandwidths

^a The authors claimed 60 Gbaud under deployment with constellations up to 64 QAM for 600 Gb/s net per wavelength [82]. QPSK, quadrature phase-shift keying.

W. Shi et al.: Scaling capacity of fiber-optic transmission systems, *Nanophotonics* 2020; 9(16): 4629–4663

J. Krč et al.

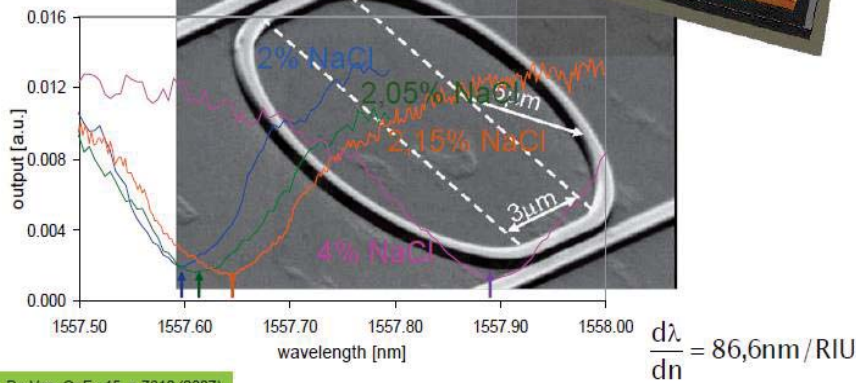
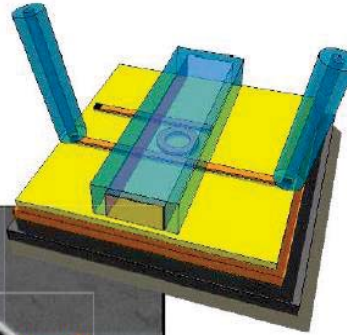
SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

10



MICRORING SENSOR

- Measure salt concentration
- ✓ Fluid overcladding
- ✓ Refr. index ~ Salt concentration
- ✓ Response of ring ~ refr. index
- ✓ $Q = 20000 \rightarrow$ minimum $\Delta n \sim 5 \cdot 10^{-5}$



Courtesy of imec

J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

11

Photonic digital to analog converter with MZMs and electrically (bit) controlled WGs

Photonic DAC (1)

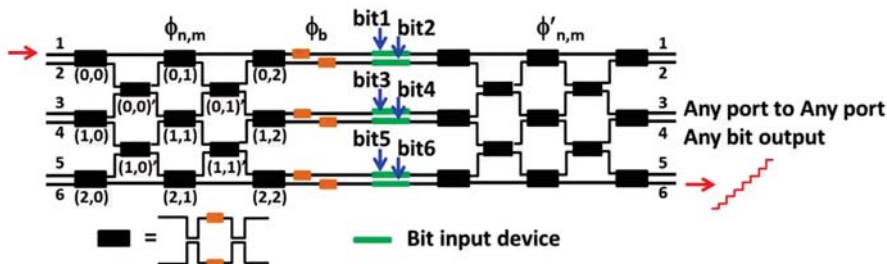
9/20

What kinds of photonic DAC?

- Bit-resolution reconfigurable
- Lossless, even if reconfigured
- Port-port reconfigurable

$$U = \left[\prod_{m=N-1}^1 U_m^c U_m^d U_m^c \right] U_0^c U_0^d U_0^c f(b) \left[\prod_{m=N-1}^1 U_m^c U_m^d U_m^c \right] U_0^c U_0^d U_0^c$$

Optics Express 27, 24914 (2019)



SPIE Photonics Europe 2020

Opportunities of silicon photonics for calculation and machine learning

applications (Invited Paper), Guangwei Cong et al., National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japan)

J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

12

Which flower it is?

Iris dataset: 150 samples

15/20

No.	Sepal length	Sepal width	Petal length	Petal width	Species
1	5.1	3.5	1.4	0.2	Setosa
2	4.9	3	1.4	0.2	Setosa
3	4.7	3.2	1.3	0.2	Setosa
...
51	7	3.2	4.7	1.4	Versicolor
52	6.4	3.2	4.5	1.5	Versicolor
53	6.9	3.1	4.9	1.5	Versicolor
...
101	6.3	3.3	6	2.5	Virginica
102	5.8	2.7	5.1	1.9	Virginica
103	7.1	3	5.9	2.1	Virginica
...

Dua, D. and Graff, C. (2019). UCI Machine Learning Repository [http://archive.ics.uci.edu/ml]. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science.

Procedures:

1. Data normalization
 $x = 2\pi \cdot [v - \min(v)] / [\max(v) - \min(v)]$
2. $\langle \phi \rangle$ initialization
3. Training $\langle \phi \rangle$ by bacterial foraging algorithm
4. Make image of samples appear at right positions as much as possible

SPIE Photonics Europe 2020

Opportunities of silicon photonics for calculation and machine learning

applications (Invited Paper), Guangwei Cong et al., National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japan)

J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

13

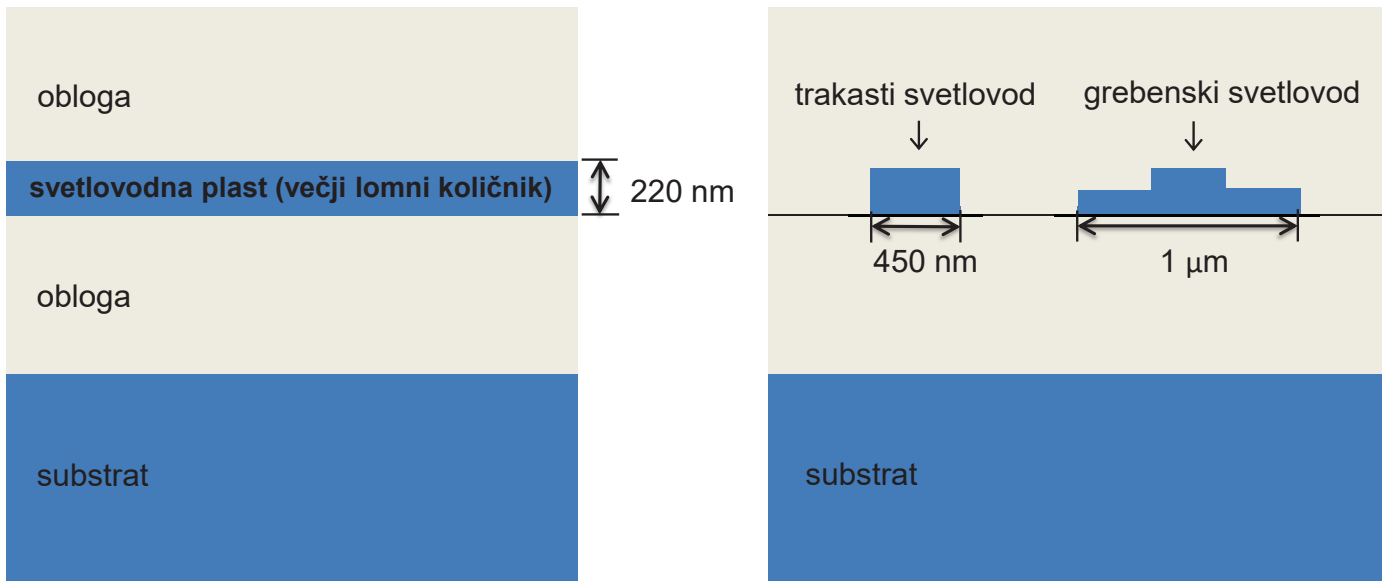
Osnovna struktura in gradniki PIC

J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

14

strukturiranje svetlovodne plasti

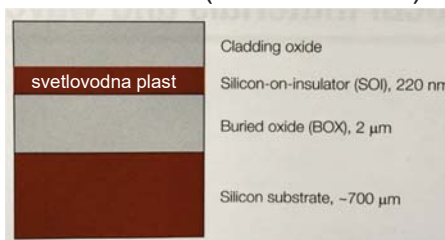


Tehnologije (material svetlovodne plasti)

- Si
- SiO_x
- Si₄N₄
- InP
- GaAs
- LiNbO₃
- polymers
- GFP (Si, Ge, Sn)

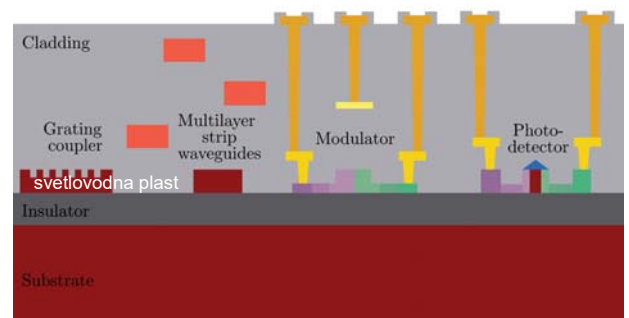
Primer strukture za Si:

struktura SOI (Si on insulator)



Za aktivne gradnike potrebujemo še ostale plasti

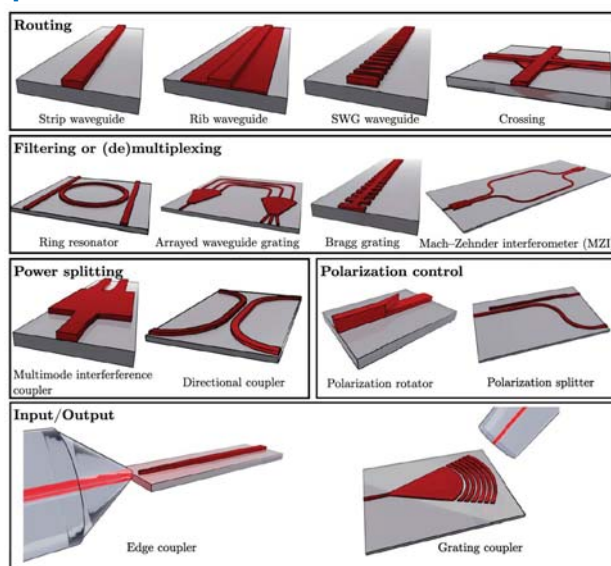
■ Si	■ Heater	■ p (+, ++) doped Si	■ Ge
■ SiO ₂ (thermal)	■ Metal 1	■ n (+, ++) doped Si	■ Si ₃ N ₄
■ SiO ₂ (deposited)	■ Metal 2		



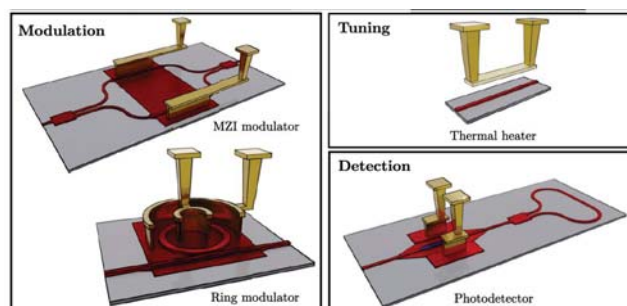
W. Shi et al.: Scaling capacity of fiber-optic transmission systems, *Nanophotonics* 2020; 9(16): 4629–4663

Primeri osnovnih gradnikov PIC (Si)

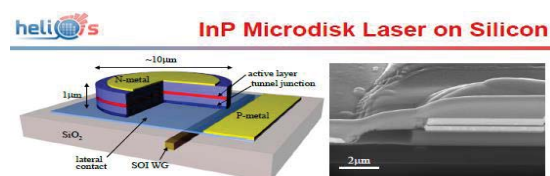
pasivni



aktivni



Integrirani laserji – uporaba direktnih polprevodnikov!



W. Shi et al.: Scaling capacity of fiber-optic transmission systems, *Nanophotonics* 2020; 9(16): 4629–4663

J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

17

Aktivnosti na področju PIC na FE

- Katedra za elektroniko
- Katedra za mikroelektroniko
- Katedra za informacijske in komunikacijske tehnologije

Laboratoriji:



J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

18

Izobraževanje - študenti

Fotonska integrirana vezja

- v okviru magistrskega študija:
Modul D - Fotonika



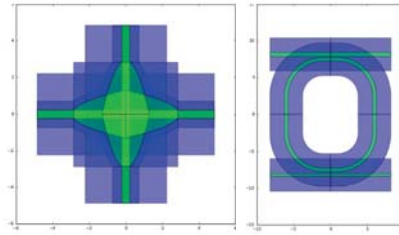
- v okviru doktorskega usposabljanja:
delno predmet **Optoelektronika**

in raziskovalno delo doktorandov
(LPVO, LSO)

Orodja za načrtovanje in simulacije PIC na FE

Načrtovalska orodja

➤ na osnovi vezij: **IPKISS**



```

# create 4 rings
for radius in [400, 380, 360, 340]:
    ring = Ring(radius=radius)
    layout = RingLayout(bend_radius=radius)
    # [some, coding] ... # mapping rings
    # [some, coding] ... # mapping rings
    rings.append(ring)

links = [
    # input coupler to splitter
    ("gs_in:port_1", "splitter:port_1"),
    # splitter to reference
    ("splitter:port_2", "gs_ref:port_1"),
    # connecting the rings together
    ("walk:port_3", "ring1:in1"),
    ("ring1:out1", "ring2:in1"),
    ("ring2:out1", "ring3:in1"),
    ("ring3:out1", "ring4:in1"),
    ("ring4:out1", "gs_out:port_3")
]

# create the pcell
my_circuit = PlaceAndRoute(my_cell=links, link=links)

# create layout
my_out = my_circuit.Layout(my_cell=my_cell, link=links)

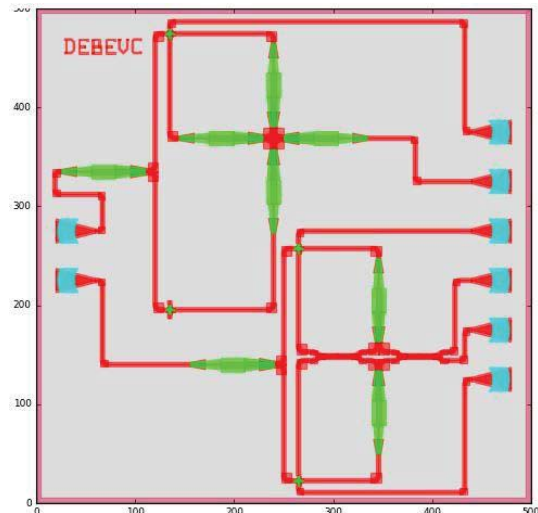
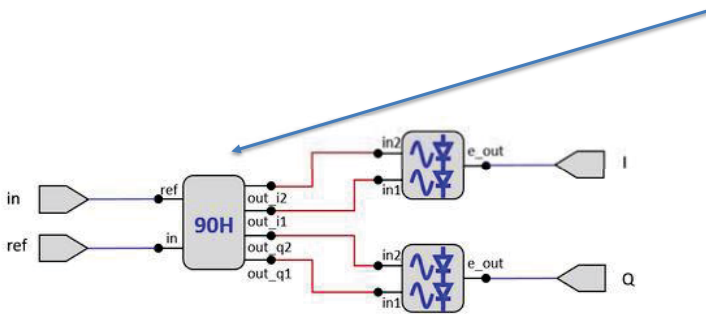
# simulate circuit
ce = my_circuit.CircuitEngine()
my_engine = ce.Engine()
my_simulation = my_engine.Simulation(my_out, my_simulation_params)
my_simulation.run()
    
```

<https://www.lucedaphotonics.com/en/product/ipkiss>

Načrtovanje z IPKISS-om

90° hibrid – dve izvedbi z uporabo MMI in smernih sklopnikov

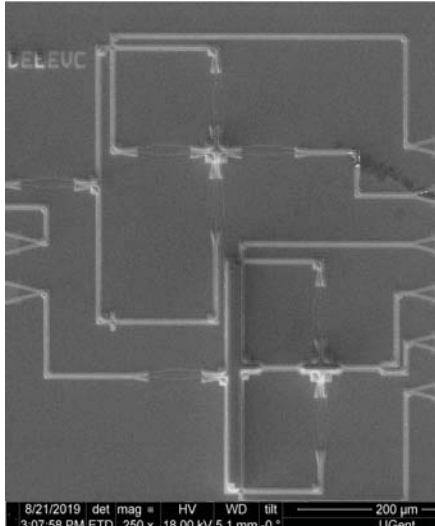
kvadratni demodulator:



A. Debevc, PIC design training Uni. Ghent

Načrtovanje z IPKISS-om

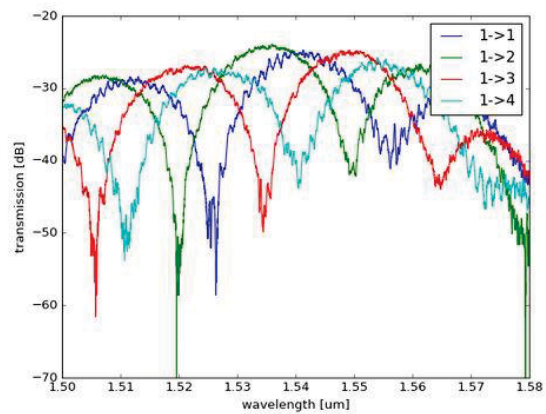
Izdelana 90° hibrida v silicijevi tehnologiji (SOI)
preko RMIT, Australian Photonics



A. Debevc

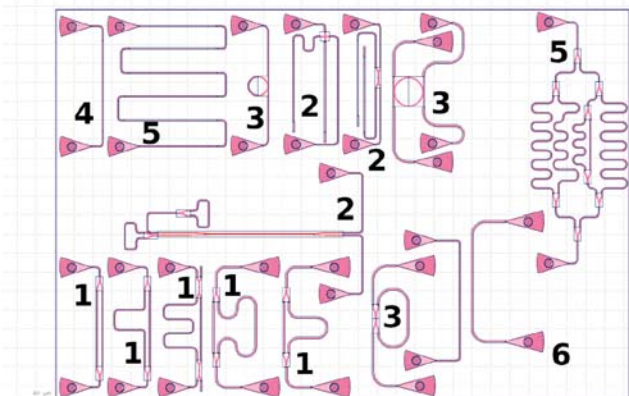
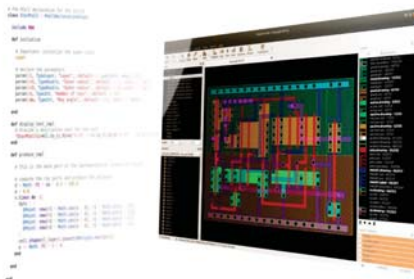
8/21/2019 det mag HV WD tilt 200 µm
3:07:58 PM ETD 250 x 18.00 kV 5.1 mm 0° UGent

Meritev izbranih izhodov:



Načrtovalska orodja

➤ na osnovi vezij: **Klayout**



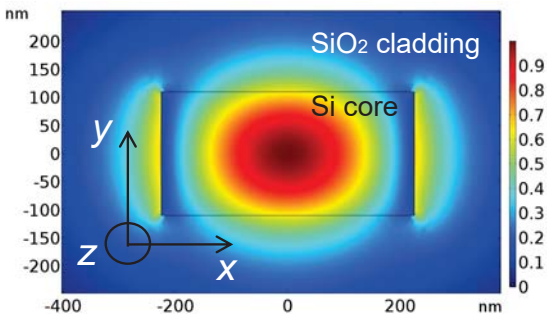
A. Lavrič

Gl. predstavitev **A. Lavriča** v
nadaljevanju SOK 2021

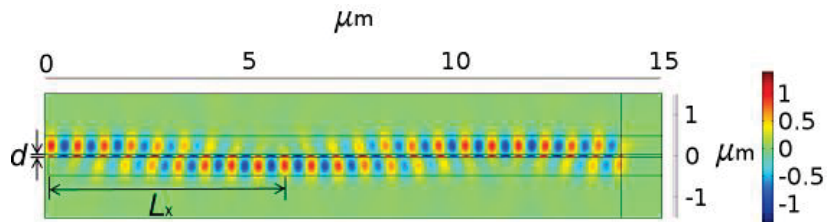
Načrtovalska orodja

➤ na osnovi komponent (EM): **COMSOL (FEM), LUMERICAL (FDTD)**

Simulacija električnega polja, trakasti svetlovod
Prečni pogled, x komponenta polja, rod TE1



Simulacija dela smernega sklopnika (dva Si svetloveda)
vzdolžni pogled, prečna komponenta električnega polja



A. Debevc et al. MIDEM 2018

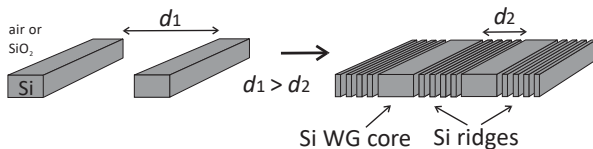
J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

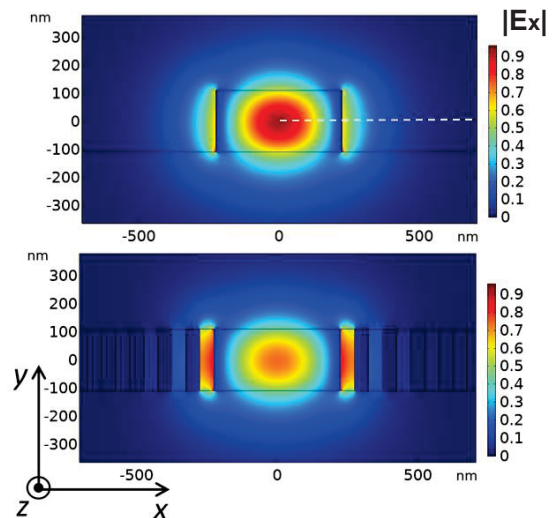
25

Optimizacija naprednih struktur s COMSOL-om

Optimizacija **metamaterialov** za večjo stopnjo integracije fotskih gradnikov v PIC



Gl. predstavitev **A. Debevca** v nadaljevanju SOK 2021



A. Debevc et al. SPIE Photonics Europe 2020

J. Krč et al.

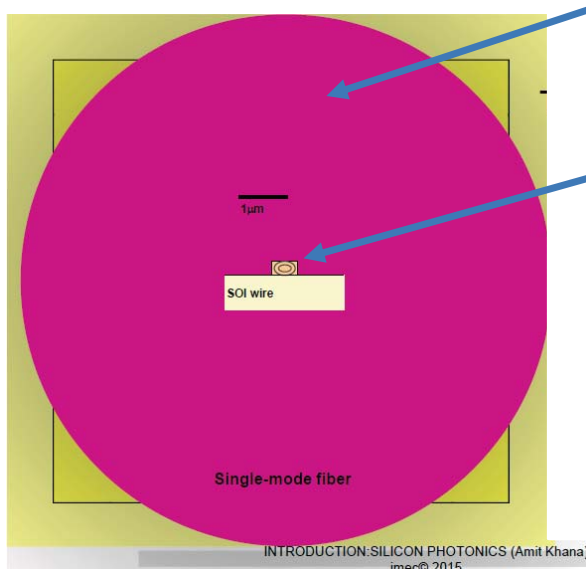
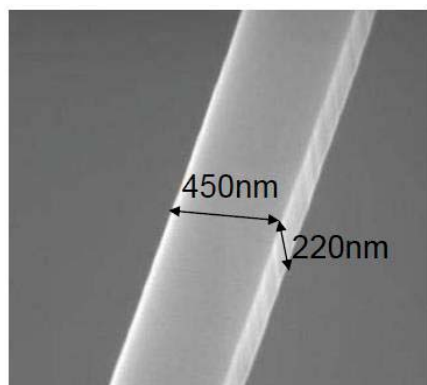
SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

26

Merilna oprema za optično karakterizacijo PIC na FE

Sklopitev z optičnim vlaknom

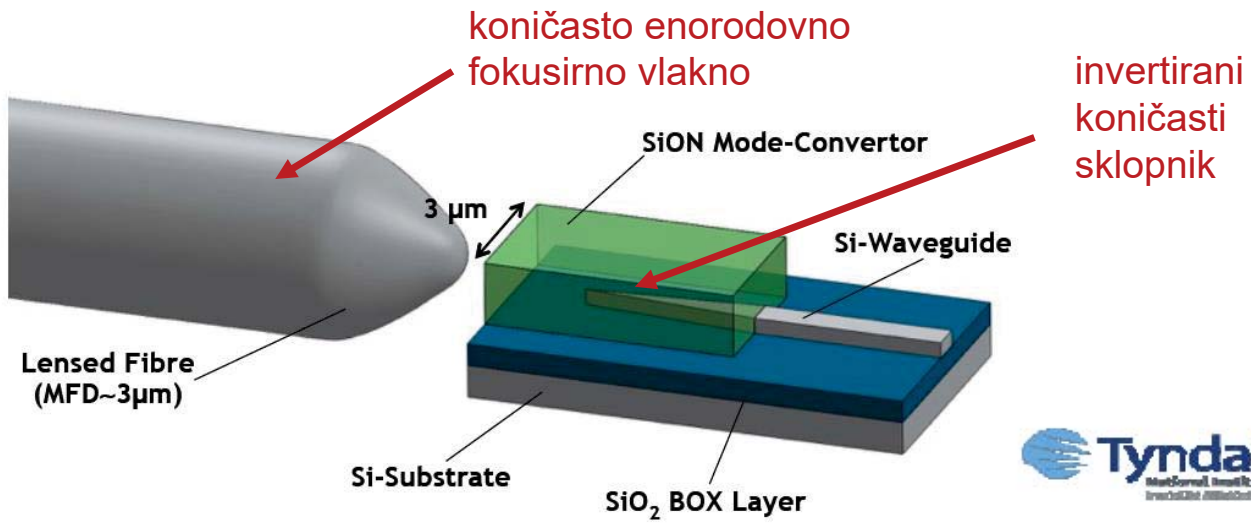
Si trakasti svetlovod
 $W = 450 \text{ nm}$



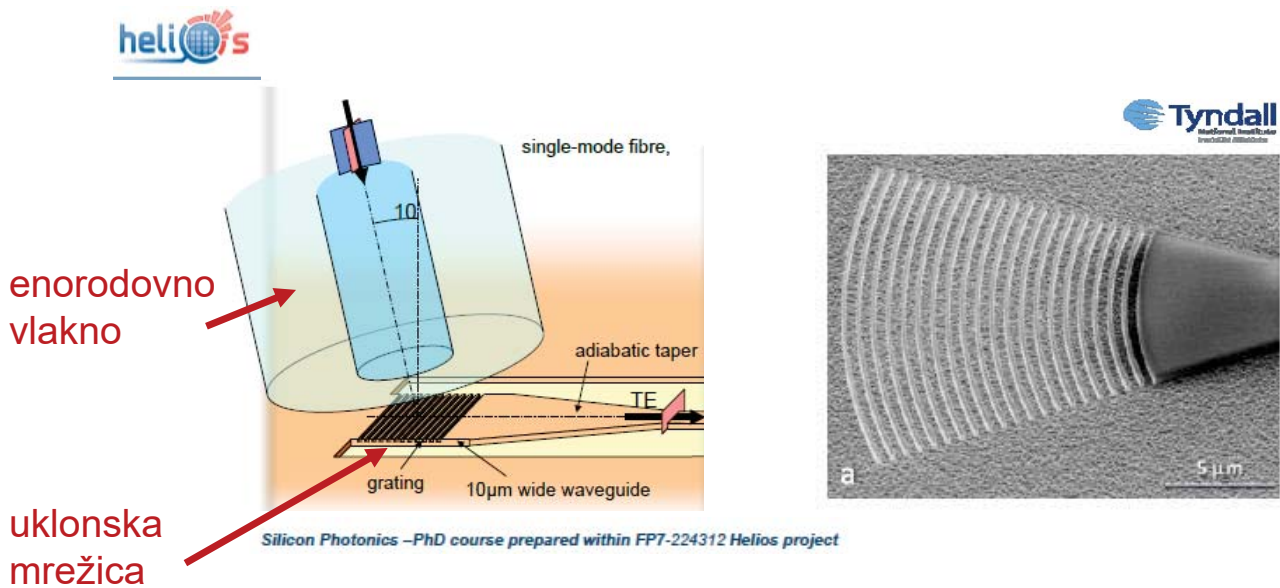
jedro vlakna
 $2R = 8 \mu\text{m}$

Si svetlovod
 $W \approx 450-500 \text{ nm}$

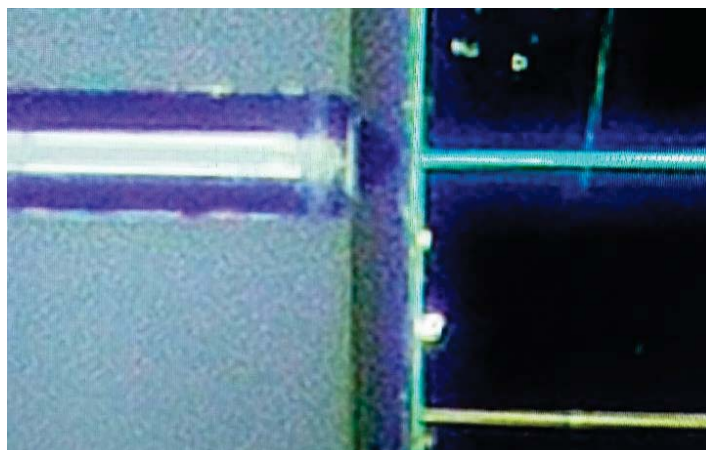
Horizontalni vhodno/izhodni sklopnik



Vertikalni vhodno/izhodni sklopnik (uklonska mrežica)



Koničasto vlakno in sklopitev svetlobe



UL FE

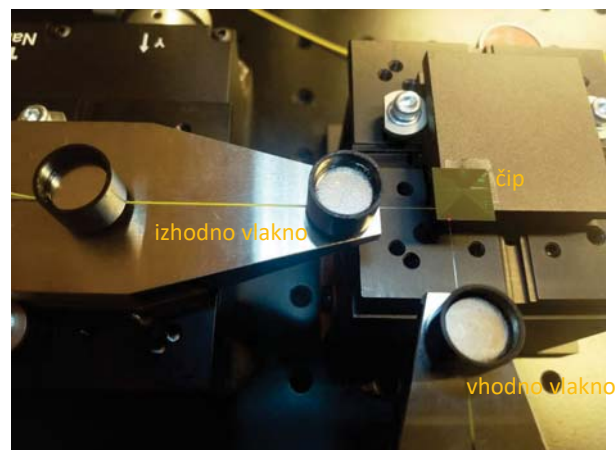
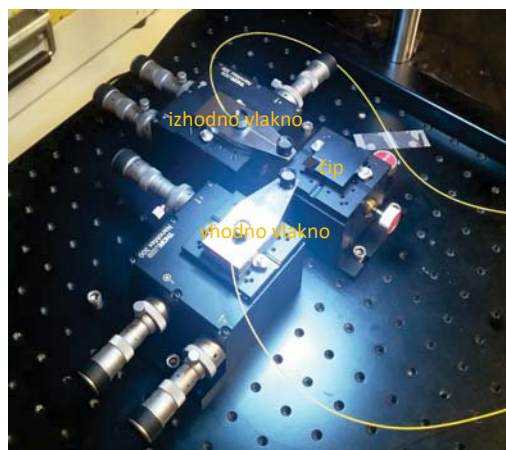
J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

31

Precizne mizice za sklopitev vlakna s svetlovodom na PIC

- ročna ločljivost: 100 nm (s piezzo aktuatorji ~ 20 nm)
- omogoča horizontalno (na slikah) in vertikalno sklopitev vlaken

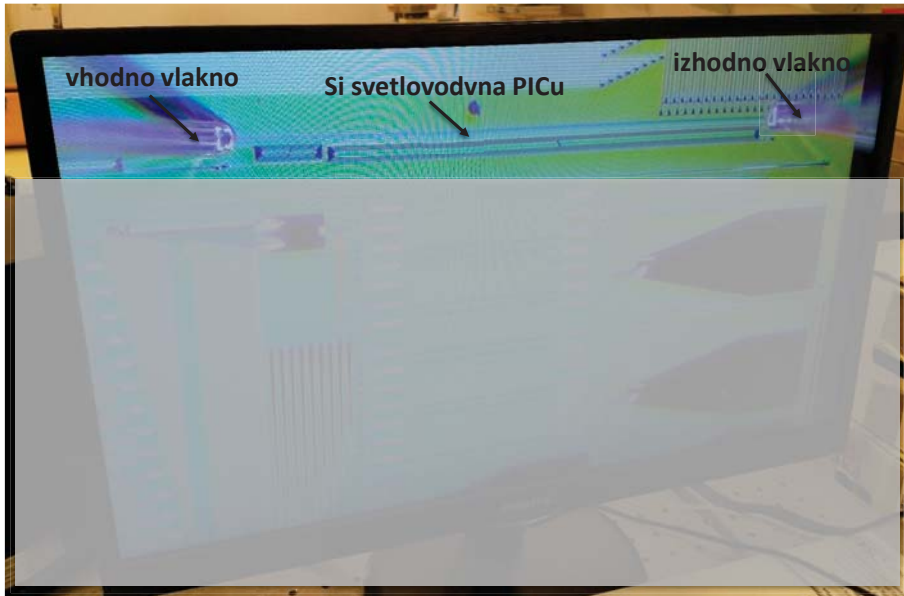


J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

32

Primer slike svetlovoda in priključnih vlaken zajete s kamero



Si PIC izdelan na Uni. Ghent in imec, Belgija

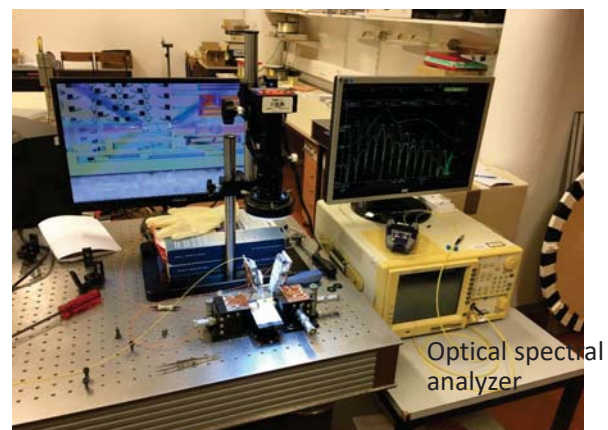
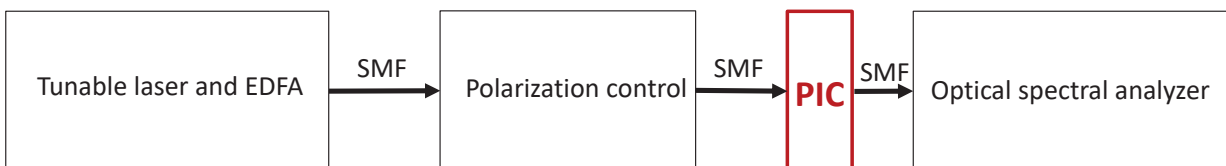


Meritve izvedene na FE

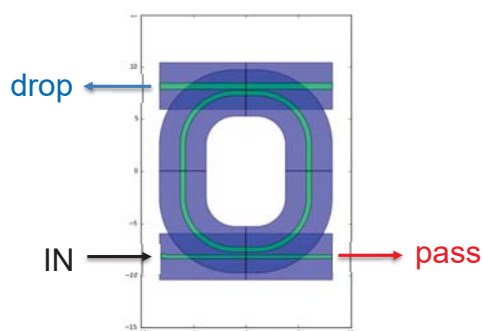


Primer vezave merilnega Sistema na FE

Microscope camera

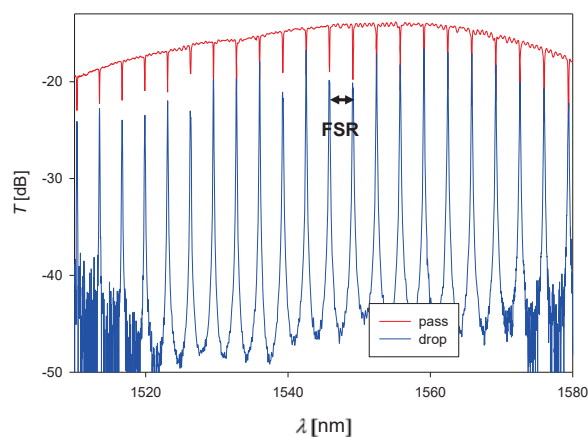


Prve meritve obročnega resonatorja



Gl. primer uporabe mikro obročnega resonatorja v RoF v predstavitvi
K. Baliž-a Vuk-a SOK 2021

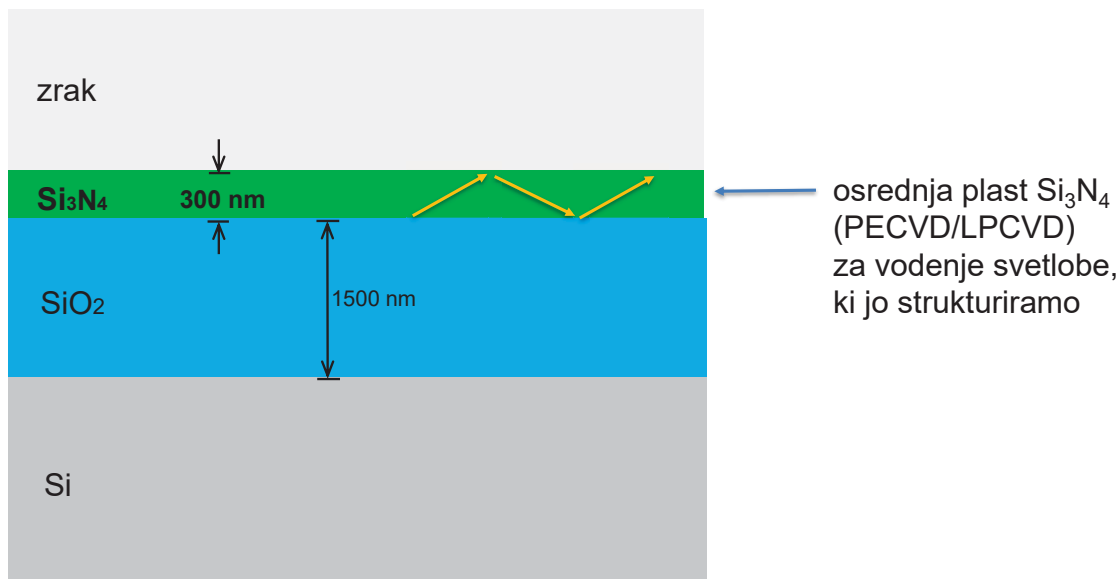
Izmerjena karakteristika izbranega obročnega resonatorja na PIC



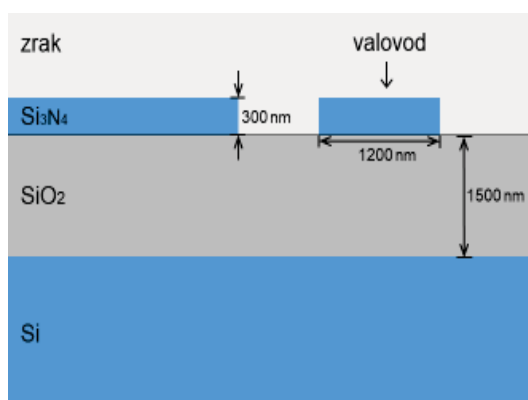
PIC izdelan na
GHENT UNIVERSITY
imec

Prvi testni vzorci na osnovi tehnologije Si_3N_4 izdelani na FE

Izhodišče - 4" Si rezina z SiO₂/Si₃N₄ plastema

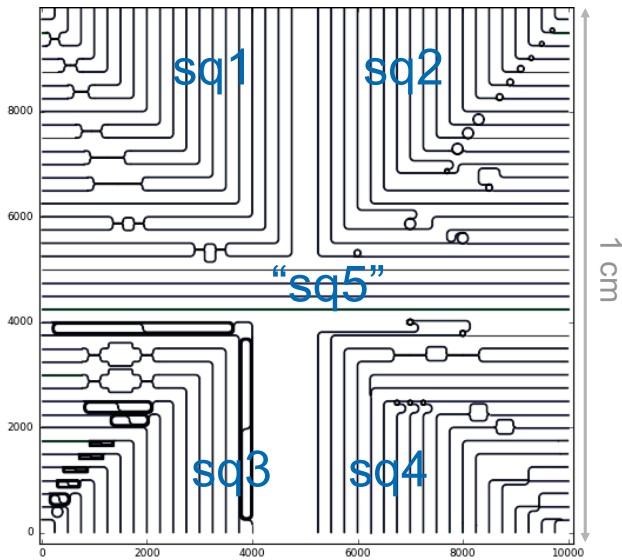


Postopek izdelave prvih testnih struktur na FE



- zasnova, načrt in simulacija testnih struktur -> gds datoteka (IPKISS) za izdelavo mask
- nanos SiO₂ in Si₃N₄ plasti na Si (PECVD, LPCVD)
- fotorezist, osvetljevanje preko maske, razvijanje, suho/mokro jedkanje Si₃N₄, razrez čipov
- preverjanje izjedkanih struktur (konfokalni mikroskop LMFE, elektronski mikroskop KI)
- optične meritve

Testno fotonsko integrirano vezje iz Si_3N_4 PIC ULFE 2019-1a (1 x 1 cm²)



Vključeni gradniki:

- ravni in ukrivljeni (L) svetlovodi različnih dolžin (tudi spiralni) in širin
- smerni sklopniki in razcepniki, presečišča
- obročni resonatorji različnih dimenzij
- Mach-Zehnderjevi interferometri
- valovni demultipleksor, Vernierjev filter
- nekateri ostali gradniki

J. Krč et al.

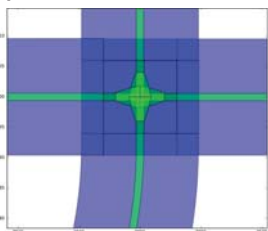
SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

39

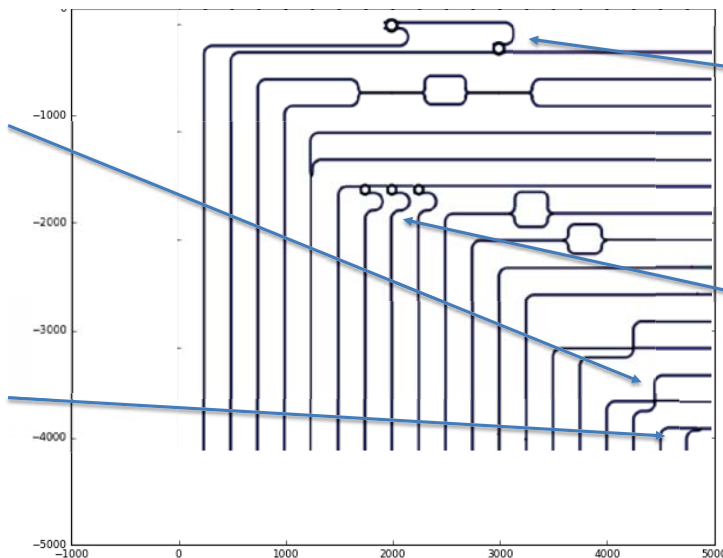
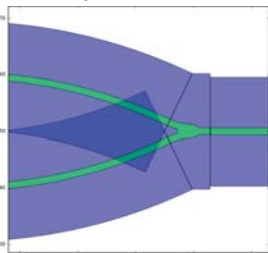
sq4

Nekatere strukture z različno funkcionalnostjo

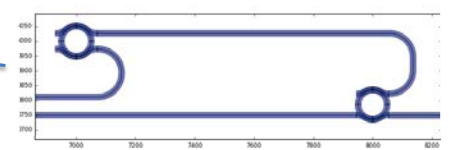
presečišče



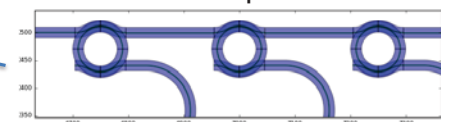
razcepnik



Vernierov filter



valovni demultipleksor

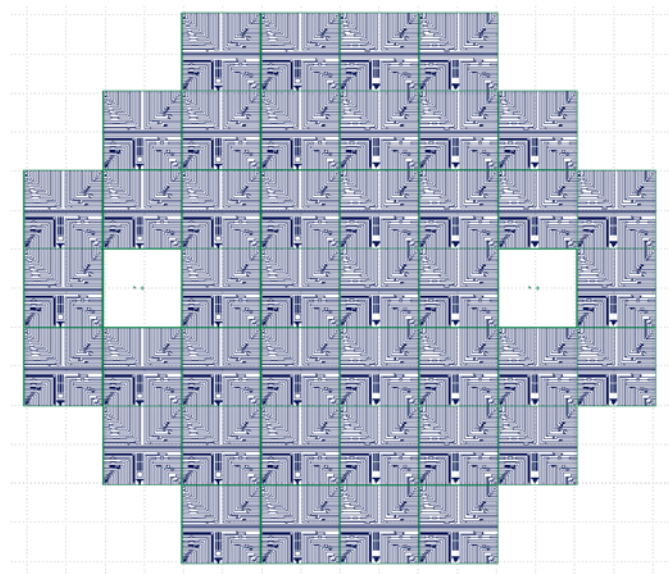


J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

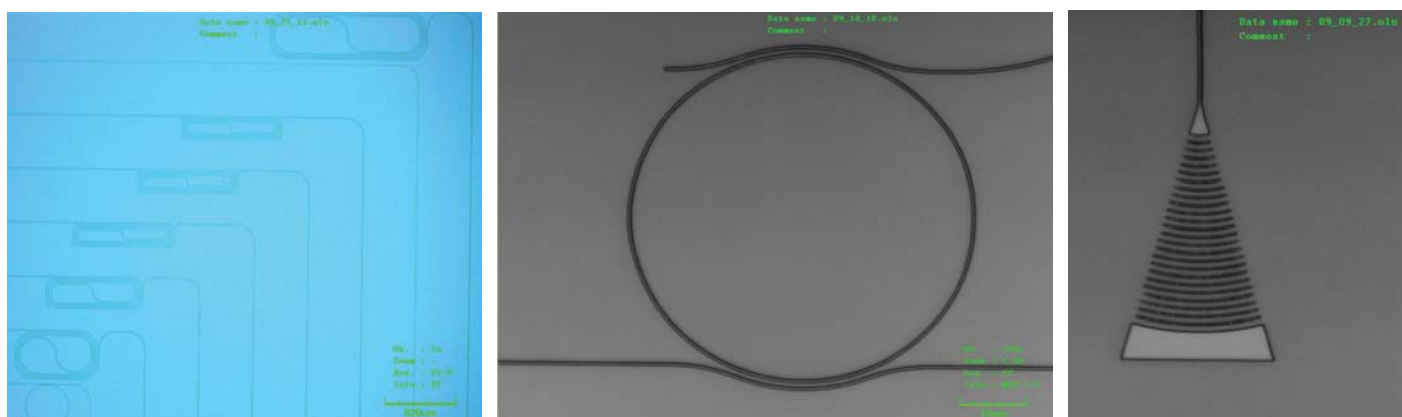
40

Načrt za masko za 4" Si rezino



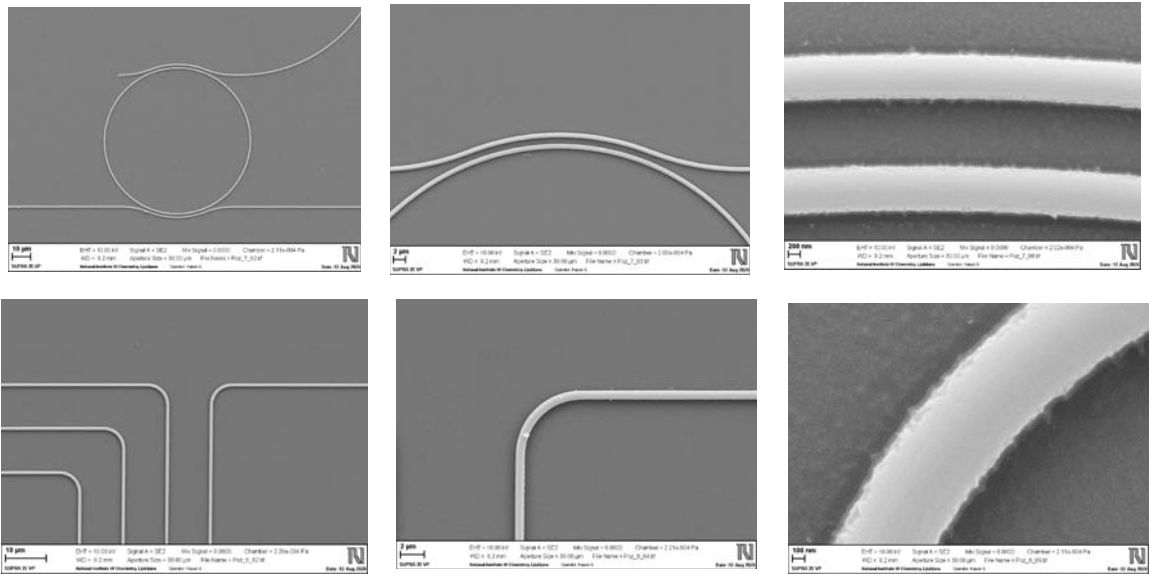
- 42 x 1 cm² čipov
- vključena dva, nekoliko različna dizajna

Slike prvih izdelanih struktur iz Si₃N₄ na FE



Posneto s konfokalnim mikroskopom v LMFE

SEM slike izdelanih struktur iz Si₃N₄ na FE



Posneto z elektronskim mikroskopom na Kemijskem inštitutu

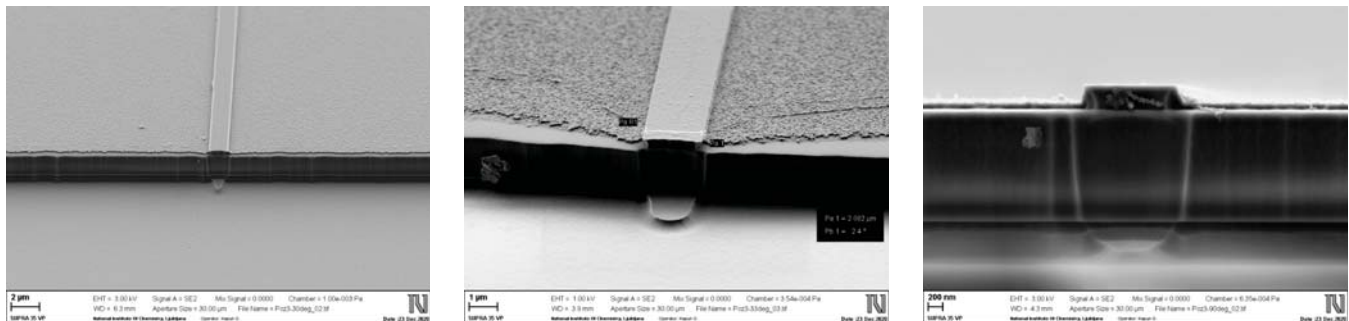
J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

43

SEM slike izdelanih struktur iz Si₃N₄ na FE

Rob svetlovoda



Posneto z elektronskim mikroskopom na Kemijskem inštitutu

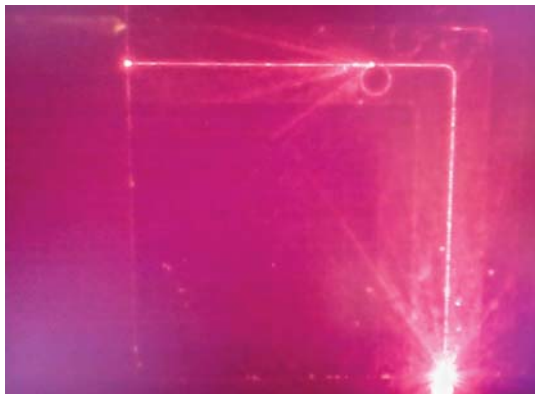
J. Krč et al.

SOK 4.-5. februar 2021, UL FE

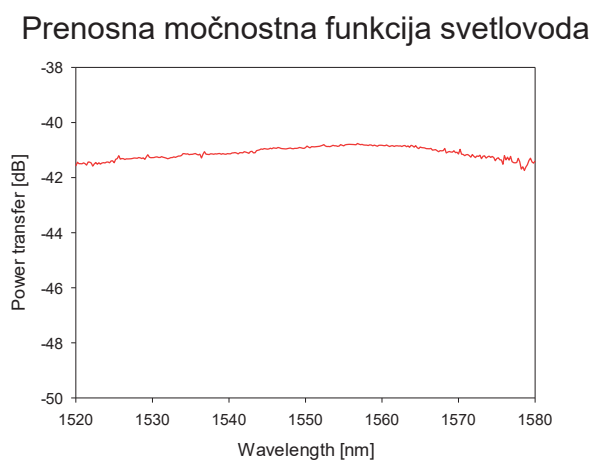
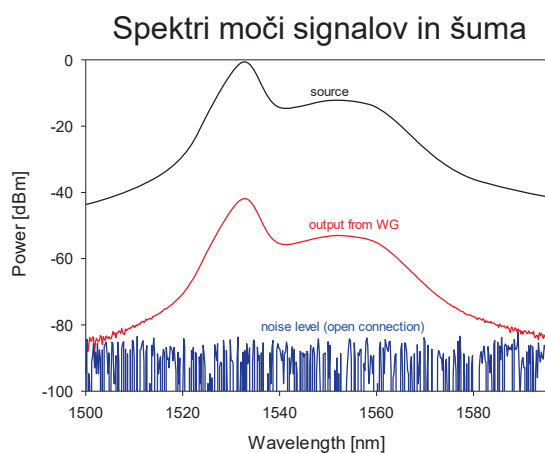
44

Prve optične meritve izdelanih svetlovodov iz Si_3N_4 na FE

Preizkus sklopitve z vidno svetlobo



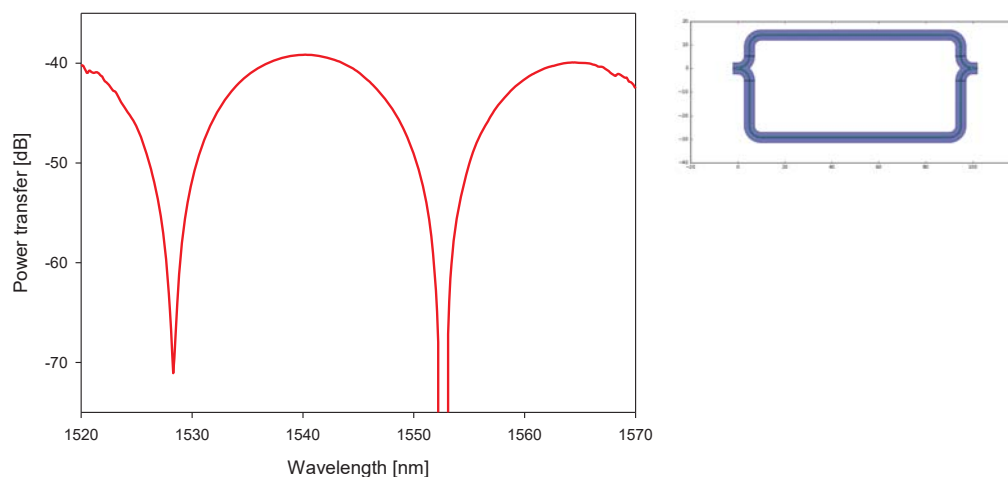
Prve optične meritve izdelanih svetlovodov iz Si_3N_4 na FE



Kasneje dosežena višja prenosna razmerja, npr. **- 18 dB**

Prve optične meritve izdelanih struktur iz Si_3N_4 na FE

Mach-Zehnder interferometer - MZI



Zaključek

- PIC so pomembni gradniki na področju optičnih komunikacij in na drugih področjih (hitrost, funkcionalnost, kompaktnost, cena)
- Na FE potekajo aktivnosti na področju načrtovanja (Si in Si_3N_4 tehnologije), karakterizacije in izdelave testnih struktur (Si_3N_4)
- S PIC se srečajo tudi študenti v izobraževalnem procesu
- Vljudno vabljeni, da prisluhnete predstavitev raziskovalnega dela doktorandov s področja PIC v nadaljevanju konference in k morebitnem sodelovanju!

janez.krc@fe.uni-lj.si

Strukture metamaterialov za višjo stopnjo integracije v fotonskih integriranih vezjih

Metamaterial structures for a higher degree of integration in Photonic Integrated Circuits

Andraž Debevc, Janez Krč in Marko Topič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Laboratorij za fotovoltaike in optoelektroniko

andraz.debevc@fe.uni-lj.si

Povzetek

Periodični metamaterial, ki sestoji iz izmenjujočih se plasti zraka in silicija ima potencial, da zniža presluh med integriranimi silicijevimi valovodi, če ga uporabimo kot stransko oblogo valovodov. To nam omogoča, da valovode postavimo bližje drug drugemu in s tem povečamo stopnjo integracije. V prispevku bodo predstavljene numerične simulacije in optimizacija valovodov z metamateriali. Predstavljeno bo tudi načrtano testno fotonsko integrirano vezje iz amorfnega silicija, ki vključuje valovode z metamateriali in je trenutno v izdelavi.

Abstract

A metamaterial consisting of periodically exchanging layers of air and silicon has the potential to reduce the cross-talk between silicon waveguides when used as the side cladding. This enables us to put waveguides closer together on the chip and in turn increase the integration density. Numerical simulations and optimization of waveguides with metamaterial cladding will be presented in this contribution. We will also present the design of a test photonic integrated circuit that is currently being fabricated. The chip will be made on amorphous silicon and will include waveguides with metamaterial cladding.

Biografija predavatelja

Andraž Debevc je leta 2017 končal magistrski študijski program Elektrotehnika na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Istega leta se je na tej fakulteti vpisal na doktorski študij in postal mladi raziskovalec v Laboratoriju za fotovoltaike in optoelektroniko. Pri raziskovalnem delu se ukvarja s področjem fotonike. Njegova primarna raziskovalna dejavnost vključuje načrtovanje, optično modeliranje in karakterizacijo fotonskih integriranih vezij.

Lecturer's biography

Andraž Debevc received his MSc in Electrical Engineering at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, in 2017. Since October 2017 he is a PhD student and a member of the Laboratory of Photovoltaics and Optoelectronics. His research work is related to photonics. The main research activities include design, optical modelling and characterization of photonic integrated circuits.

Strukture metamaterialov za višjo stopnjo integracije v fotonških integriranih vezjih

Andraž Debevc, Janez Krč in Marko Topič

Laboratorij za fotovoltaike in optoelektroniko - LPVO
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko,
Tržaška 25, 1000 Ljubljana



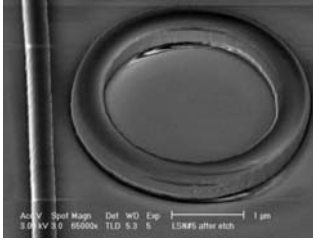
LPVO University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

Vsebina predavanja

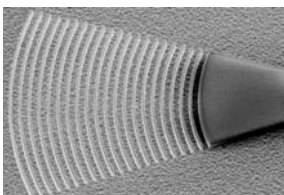
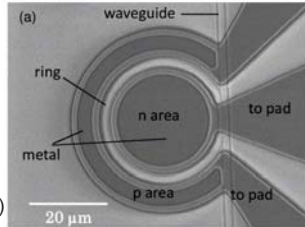
- Uvod
- Gostota integracije in metamateriali
- Rezultati simulacij in optimizacije strukture metamaterialov
- Zaključki

Uvod

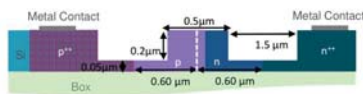
- Integrirane fonske komponente → **Fotonska integrirana vezja PIC**



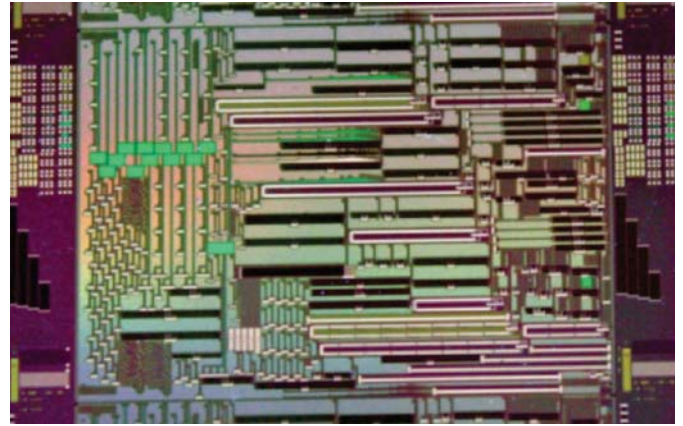
Xu e.a., Opt. Express. 16, pp 4309 (2008)



Rath e.a., Bjnano 4, pp 303 (2013)



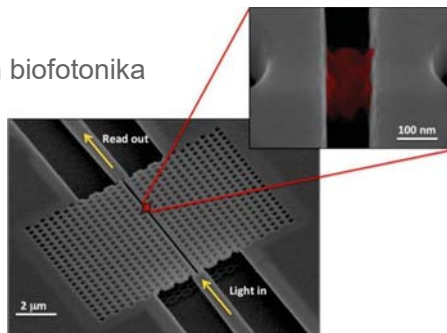
Dong e.a., Opt. Express. 17, pp 22487 (2009)



Novack e.a., Nanophotonics 3(4-5), pp 205-214 (2014)

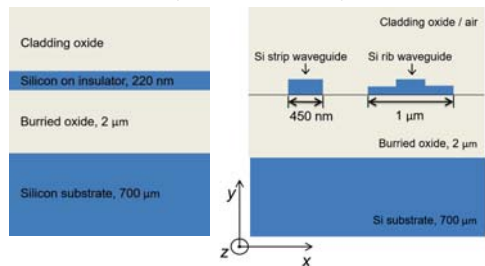
Uvod

- **Materialne platforme PIC:**
 - › Si, Si₃N₄, SiO₂, InP, LiNbO₃, polimeri,...
- **Aplikacije PIC:**
 - › Telekomunikacije in optično procesiranje signalov
 - › Optične povezave
 - › Medicinska sensorika in biofotonika
 - › LIDAR
 - › Kvantna fotonika



Scullion e.a., SPIE newsroom (2012)

Si valovodi na SOI (Silicon-on-Insulator) rezini:



Smit e.a., Semicond Sci. Technol. 29, pp. 41 (2014)

Gostota integracije in metamateriali

Presluh in gostota integracije PIC

- Z večjo gostoto integracije lahko povečamo zmogljivost fotonских integriranih vezij in znižamo njihovo ceno
- Optični presluh je eden izmed omejevalnih faktorjev višje gostote integracije
- Nekatere aplikacije kot npr. optični fazni niz za krmiljenje žarkov v LIDAR sistemih zahtevajo čim manjši razmik med posameznimi valovodi na čipu

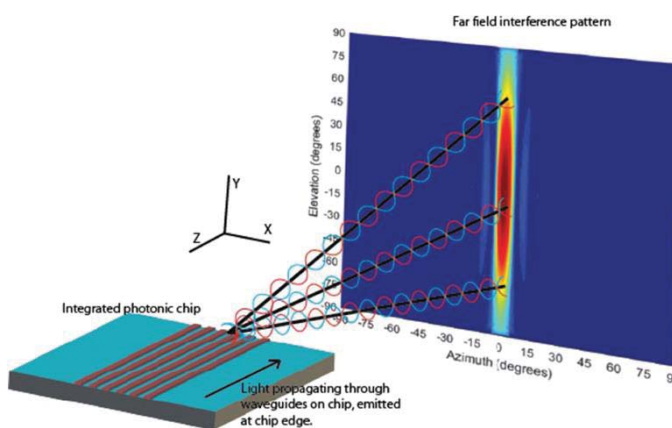
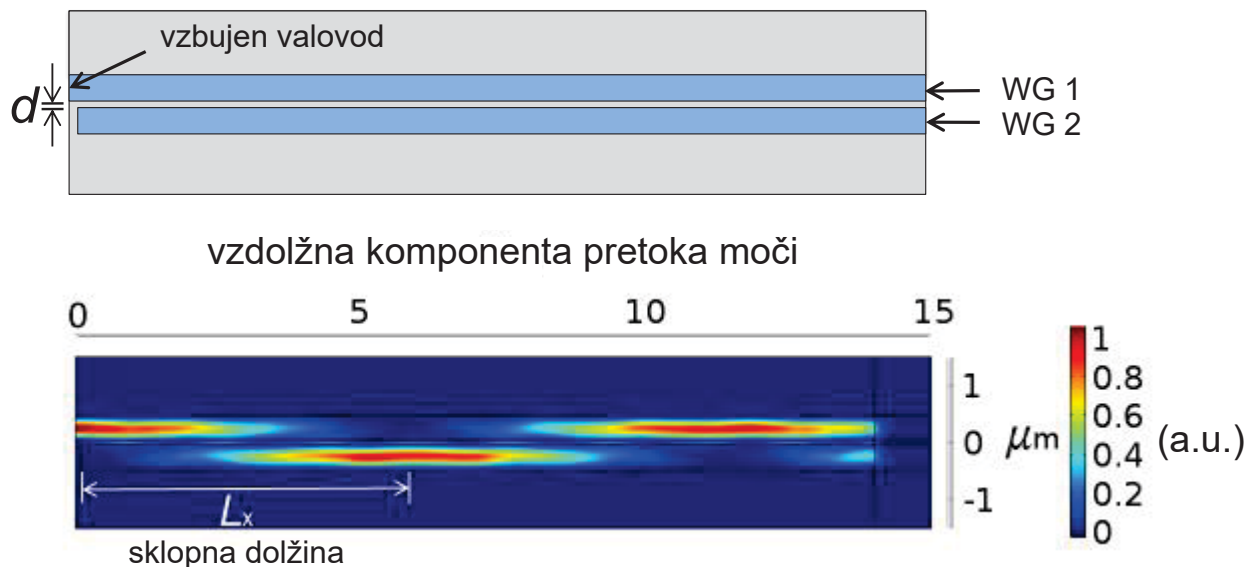


FIG. 1. Overview of end-firing waveguide optical phased array.

Kossey e.a., APL Photonics. 3, 011301 (2018)

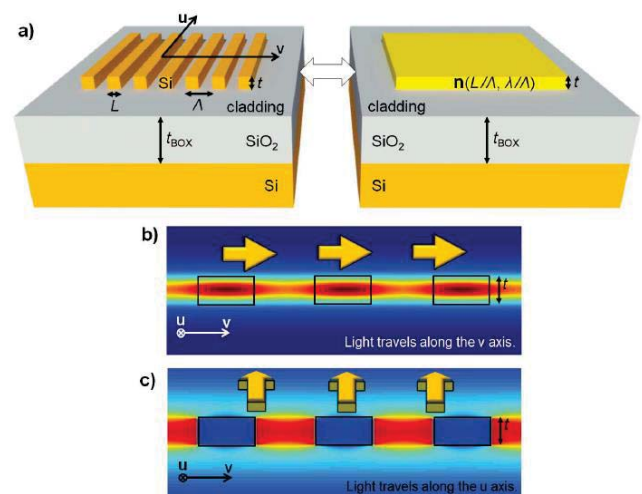
Sklopitev optičnih valovodov – pogled od zgoraj



Debevc e.a., MIDEM conference proceedings 54, pp 87 (2018)

Dielektrični metamateriali

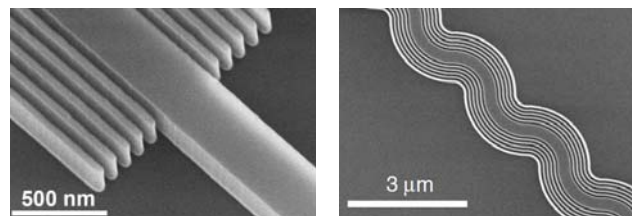
- Sestojijo iz dveh ali več periodično izmenjujočih se dielektričnih materialov s periodo, ki je občutno manjša od valovne dolžine svetlobe
- Anizotropnost lomnega količnika → lahko jo izkoristimo za manipulacijo svetlobe
- Izdelava se jih lahko z obstoječimi standardnimi proizvodnimi procesi (npr. CMOS)



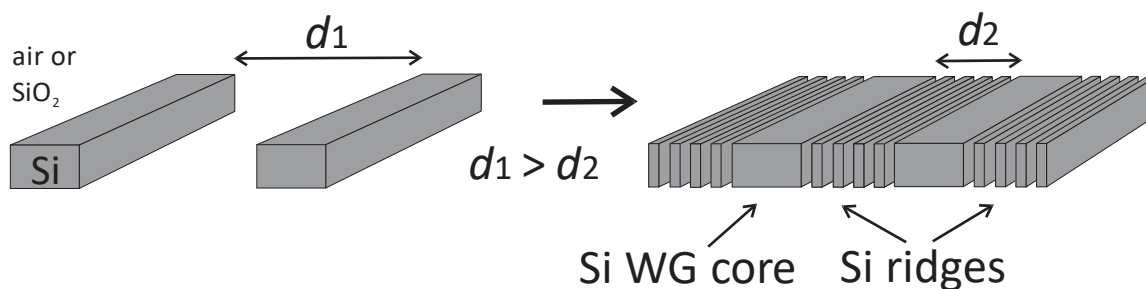
Halir e.a., Proc. IEEE 106, No. 12, pp. 2144 (2018)
Cheben e.a., Nature 560, pp 565 (2018)
Jahani e.a., Nat. Nanotechnol. 11, pp 23 (2016)

Valovodi z oblogo iz dielektričnih metamaterialov

- Z uporabo dielektričnega metamateriala kot stranske obloge valovoda lahko znižamo presluh in zmanjšamo razmik med valovodi
- Metamaterial sestoji iz materiala jedra (npr. Si) in materiala obloge (npr. zrak ali SiO₂)



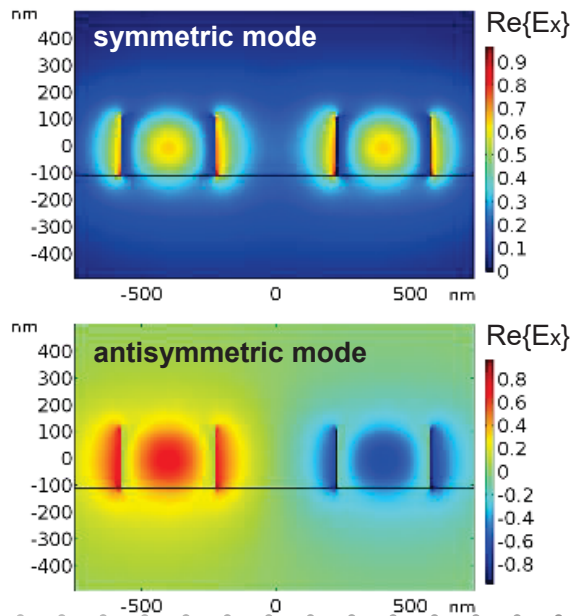
Jahani e.a., Nat. Commun. 9, pp 1893 (2018)



Rezultati simulacij in optimizacije strukture metamaterialov

Uporabljene metode

- Simulacije v frekvenčni domeni (COMSOL):
 - › Analiza rodov na osnovi 2-D metode končnih elementov (FEM)
 - › 2-D in 3-D FEM simulacije razširjanja valov
- Eigenmode expansion metoda (EME)
 - › Izračun sklopne dolžine iz efektivnih lomnih količnikov simetričnega in antisimetričnega rodu



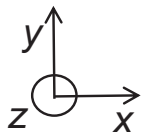
Vpogled v preseke električnega polja

trakasti valovod:

valovod z oblogo iz metamateriala:

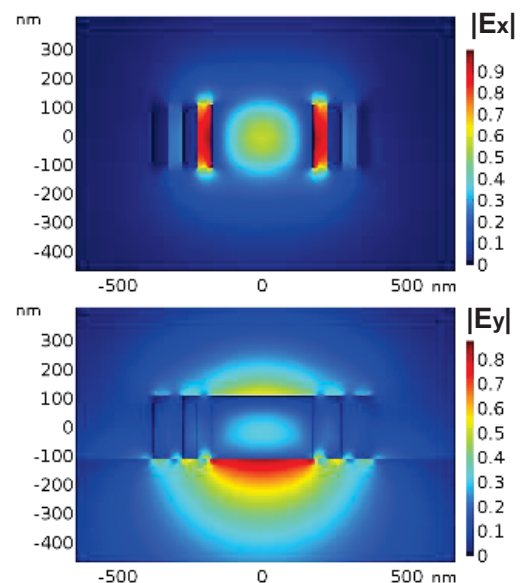
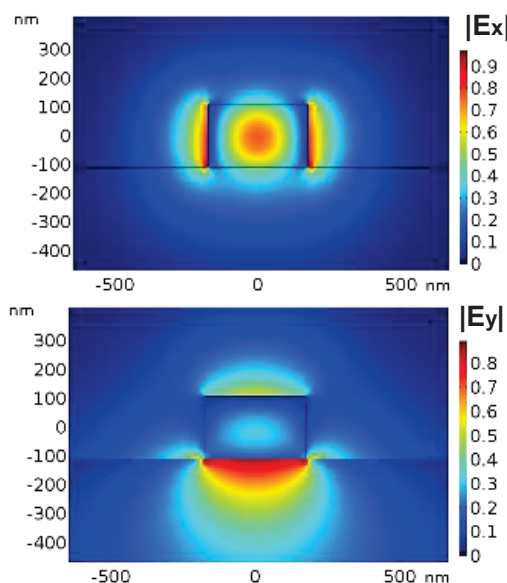
$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

TE rod:



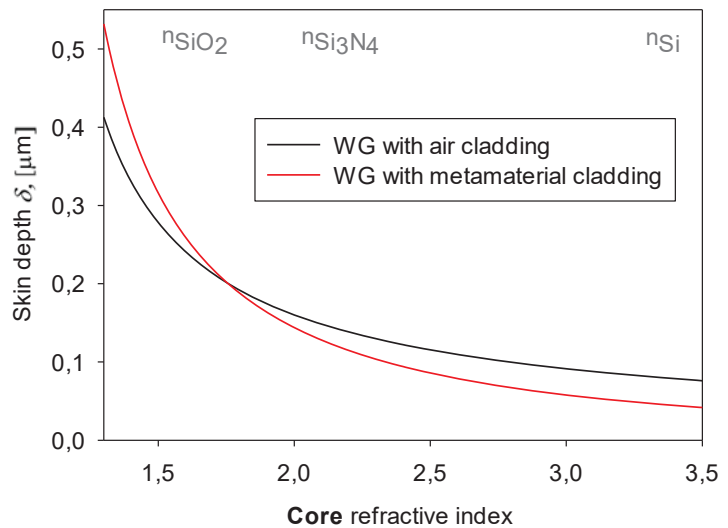
TM rod:

Debevc e.a.,
Proc.SPIE 11344,
Metamaterials XII,
1134420 (2020)



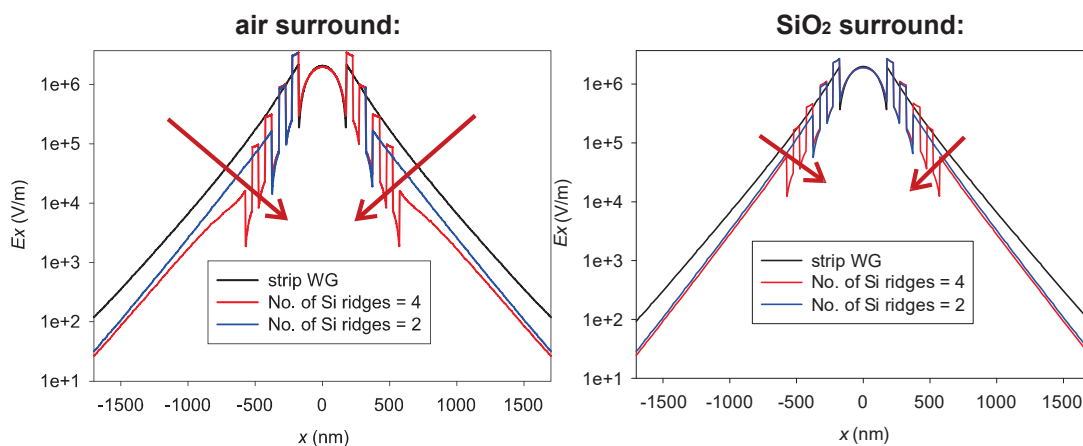
Izračun udorne globine električnega polja

- Dielektrični metamaterial lahko povzroči hitrejši upad evanescentnega polja – krajša udorna globina
- Pogoj je dovolj velik kontrast lomnih količnikov materialov, ki tvorijo metamaterial

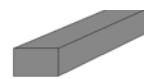


Debevc e.a., Proc.SPIE 11344, Metamaterials XII, 1134420 (2020)

Simulirani profili električnega polja (rod TE)



Trakasti valovod:



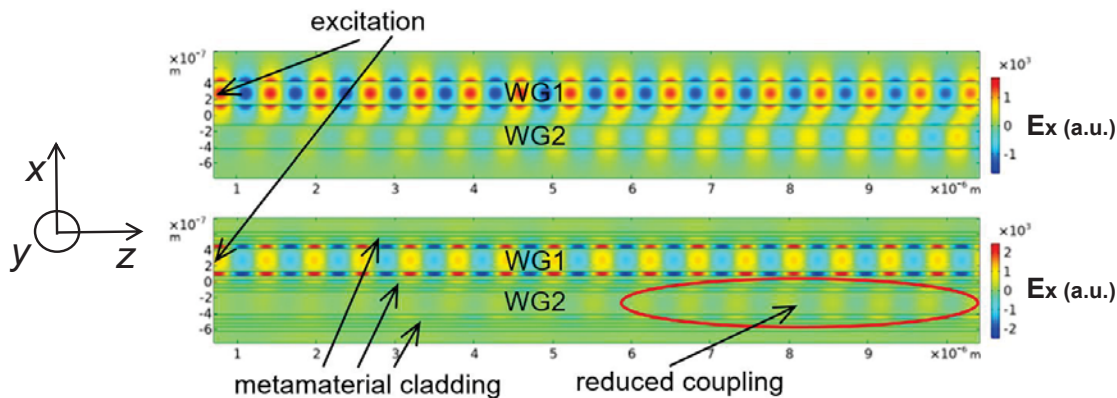
Valovod z oblogo iz metamateriala:



Večji kontrast lomnih količnikov → vpliv metamateriala je bolj izražen

Debevc e.a., Proc.SPIE 11344, Metamaterials XII, 1134420 (2020)

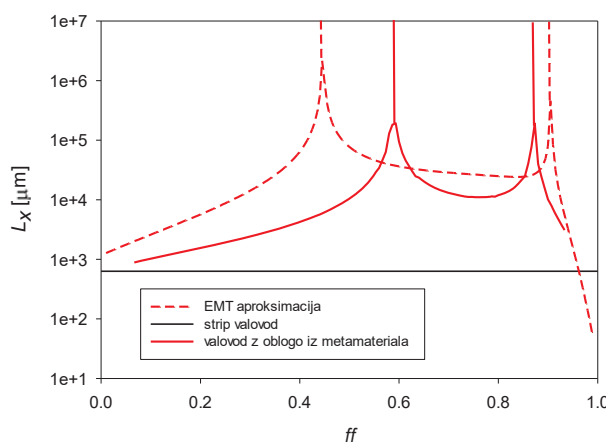
Simulacija sklapanja polja med dvema valovodoma



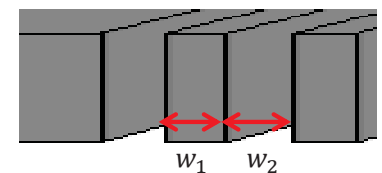
- Zaradi manjšega prekrivanja evanescenčnih polj rodov sklopljenih valovodov se v primeru obloge iz metamateriala polje iz vzbujenega valovoda počasneje sklaplja v priležni valovod

Simulacija sklopne dolžine

- Pri simulaciji smo spreminjali faktor polnitve (ff), ki predstavlja razmerje med širino S_i rebra in celotne periode metamateriala
- Pri določenih geometrijskih pogojih sklopna dolžina neomejeno naraste, kar lahko pojasnimo s teorijo sklopljenih rodov (CMT)



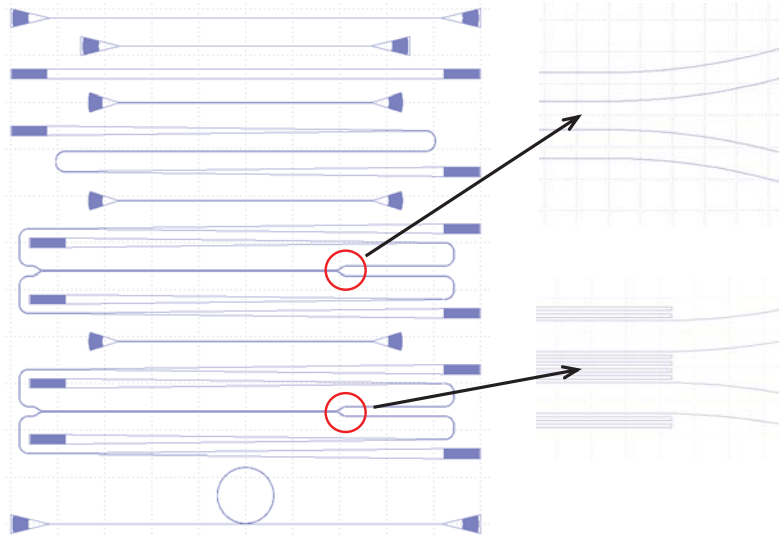
Faktor polnitve:



$$ff = \frac{w_1}{w_1 + w_2}$$

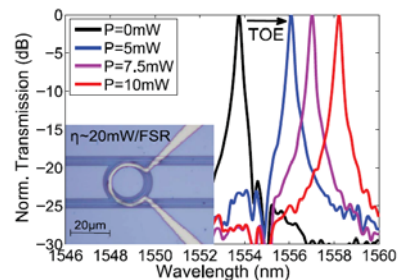
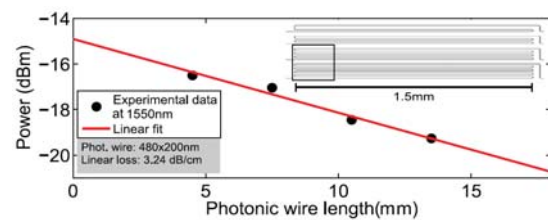
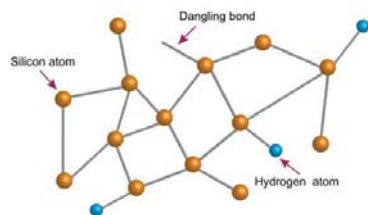
perioda metamateriala = 150 nm, širina jedra valovodov = 350 nm, razmik med valovodoma = 975 nm

Testno vezje na amorfni siliciju - v izdelavi v nanofotonskem tehnološkem centru Valencia



Hidrogenirani amorfni silicij kot material za integrirana ftonska vezja

- Lomni količnik primerljiv s kristalnim silicijem (lahko celo višji)
- Proces izdelave pri nižji temperaturi (PECVD), fleksibilnejša izbira substratov
- Možnost integracije z back-end-of-line CMOS procesa



Lipka e.a., Photon. Res. 4, No. 3, pp 126 (2016)

Zaključki

- Uporaba metamateriala kot stranske obloge integriranih valovodov lahko občutno zmanjša presluh med valovodi. To nam omogoča večjo gostoto integracije fotonih integriranih vezij
- Za želen vpliv metamateriala je ključen velik kontrast lomnih količnikov (npr. zrak in silicij)
- Zaradi hitrejšega upadanja evanescentnega polja zunaj jedra valovodov se presluh občutno zniža v primerjavi z običajnimi valovodi. Pod določenimi pogoji lahko zaradi medsebojne kompenzacije posameznih komponent sklopnih koeficientov dosežemo celo popolno izničenje presluha

Merjenje efektivnega lomnega količnika svetlovoda v silicijevem čipu

Measurement of the effective refractive index of a fiber in a silicon chip

Andrej Lavrič in Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Laboratorij za sevanje in optiko

andrej.lavric@fe.uni-lj.si

Povzetek

Integrirana ftonska vezja so vse bolj privlačna v optičnih komunikacijah, senzoriki, obdelavi in prenosu podatkov. V prispevku je predstavljen preprost ftonski čip z različnimi testnimi strukturami. Podrobneje so predstavljeni rezultati določanja dejanskega efektivnega lomnega količnika valovoda z uporabo Mach-Zehnderjevega interferometra.

Abstract

Integrated silicon photonics has gained significant attraction in various technology fields such as optical communications, sensing, data processing and transfer. In this contribution we present a simple optical chip which was designed to perform different tests. In particular we show the results of determination of an actual effective refractive index of an integrated waveguide by using Mach-Zehnder interferometer.

so fazni šum, optoelektronika, metamateriali in mikrovalovna fotonika.

Lecturer's biography

Andrej Lavrič received his master's degree from the University of Ljubljana in 2019. He is currently working as a junior researcher and PhD candidate in the Radiation and Optics Laboratory at the University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering. His research interest include phase noise, optoelectronics, metamaterials and microwave photonics.

Biografija predavatelja

Andrej Lavrič je magistriral na Univerzi v Ljubljani v letu 2019. Trenutno je mladi raziskovalec v Laboratoriju za sevanje in optiko Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Področja njegovega raziskovanja

Določanje dejanskega efektivnega lomnega količnika svetlovoda v silicijevem optičnem čipu

Andrej Lavrič

prof. dr. Janez Krč, izr. prof. dr. Boštjan Batagelj

Ljubljana, 2. februar 2021



1 / 11

Redosled

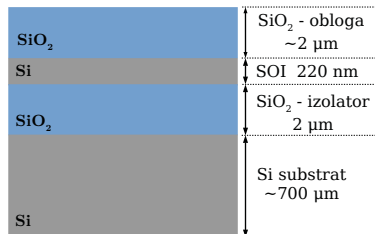
Tehnologija in izdelan čip

Delovanje MZI in efektivni lomni količnik

Rezultati meritev in analiza

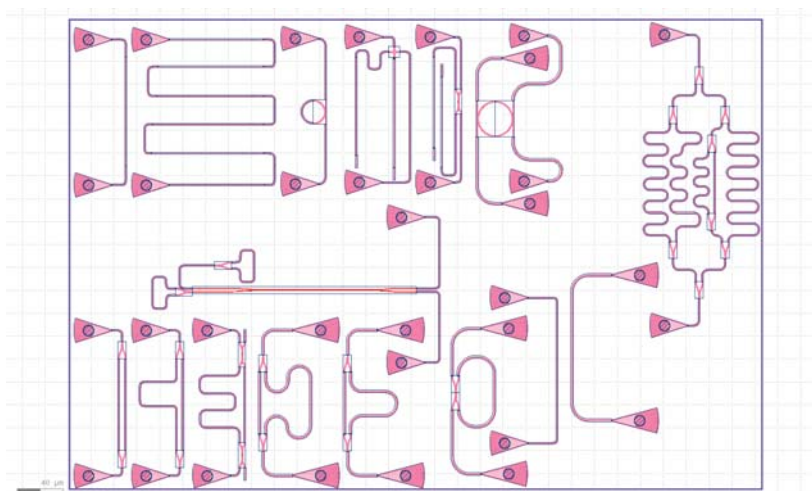
2 / 11

SOI in elektronski snop



3 / 11

Izdelan čip



4 / 11

Mach-Zehnderjev interferometer

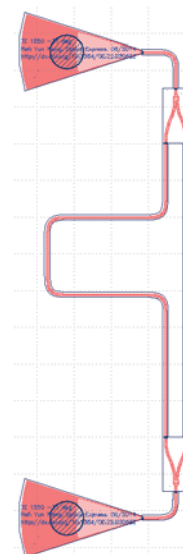
$$E_{o1} = \frac{E_i}{\sqrt{2}} e^{-j\beta_1 L_1} \text{ in } E_{o2} = \frac{E_i}{\sqrt{2}} e^{-j\beta_2 L_2}$$

$$T_{MZI}(\lambda) = \frac{1}{4} \left| 1 + e^{-j\beta(\lambda)\Delta L} \right|^2$$

$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi n_{eff}(\lambda)}{\lambda}$$

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g \Delta L}$$

$$\Delta L = 57,48 \mu\text{m}$$



5 / 11

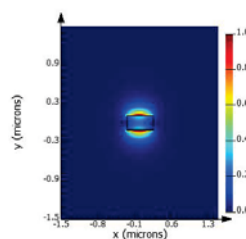
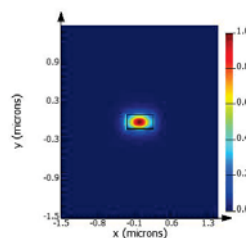
Efektivni lomni količnik

$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi n_{eff}(\lambda)}{\lambda}$$

$$n_{eff}(\lambda) = n_1 + n_2(\lambda - \lambda_0) + n_3(\lambda - \lambda_0)^2$$

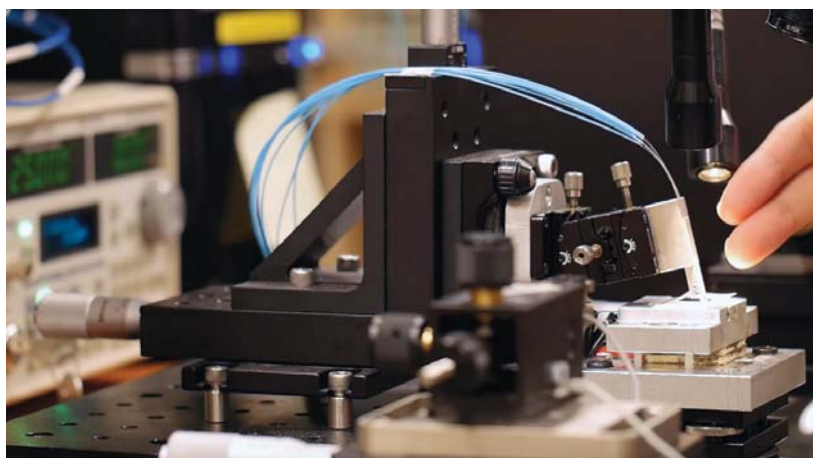
$$n_g(\lambda) = n_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{eff}(\lambda)}{d\lambda}$$

	n_1	n_2	n_3	n_g
TE	2,4453	-1,1295	-0,0421	4,1960
TM	1,7727	-1,2795	1,8131	3,7559



6 / 11

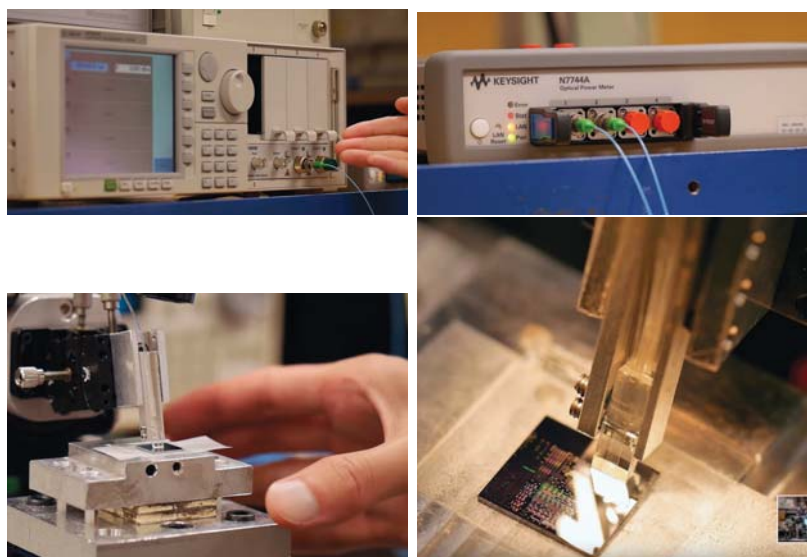
Merilna postavitve



https://youtu.be/R0Tbjth_d-Y

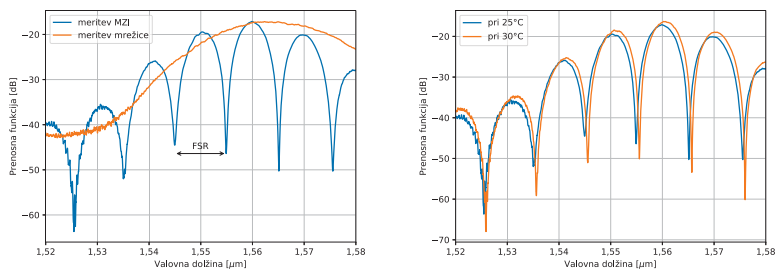
7 / 11

Merilna postavitve



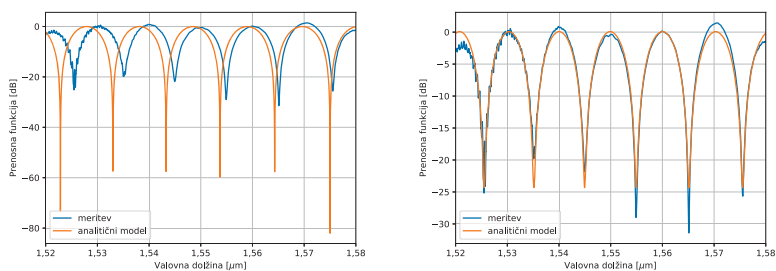
8 / 11

Rezultati meritev



9 / 11

Analiza meritev



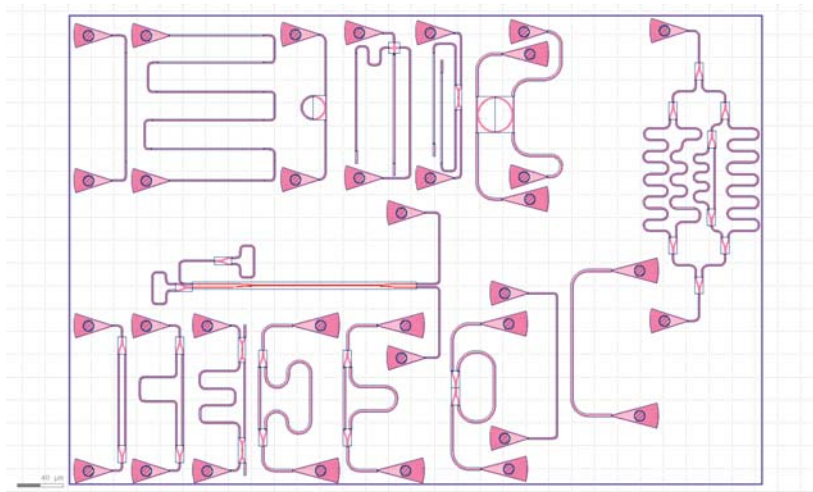
$$T_{MZI}(\lambda) = \frac{1}{4} |1 + e^{-j\beta(\lambda)\Delta L}|^2$$

$$n_{eff}(\lambda) = n_1 + n_2(\lambda - \lambda_0) + n_3(\lambda - \lambda_0)^2$$

	načrtovan	dejanski	abs. napaka	rel. napaka
n_{eff}	2,4453	2,4537	0,0084	0,34
n_g	4,2044	4,1819	-0,0225	-0,54

10 / 11

Vprašanja?



Premostitev presihanja moči v optični komunikacijski zvezi z uporabo integrirane mikrovalovne fotonike

Overcoming the power fading in optical communication link with the use of integrated microwave photonics

Kristjan Vuk Baliž in Boštjan Batagelj

UL FE, Laboratorij za sevanje in optiko

Andraž Debevc in Janez Krč

UL FE, Laboratorij za fotovoltaike in optoelektroniko

kristjan.vuk-baliz@fe.uni-lj.si

Povzetek

Prispevek proučuje ukrep dušenja stranskega boka pri optični intenzitetni modulaciji v milimetrskem področju z uporabo rešitve integrirane mikrovalovne fotonike na osnovi obročnega resonatorja. Za ta namen je bila v laboratorijskem okolju vzpostavljena merilna konfiguracija, s pomočjo katere je bil uporabljen pristop tudi kvantitativno ovrednoten. Dosežena je bila izravnava prevajalne funkcije optične (vlakenske) zveze v širokem pasu modulacijskih frekvenc (34-44 GHz).

Abstract

This paper examines a side-band suppression approach in optical intensity modulation in the mm-wave region based on the integrated microwave photonic application, i.e. integrated micro-ring resonator. For this purpose, an experimental setup was established in a laboratory environment, and used for quantitative evaluation of the applied approach. The conducted transfer function of optical fiber link was equalized for a wide range of modulation frequencies (between 34-44 GHz).

Biografija predavatelja

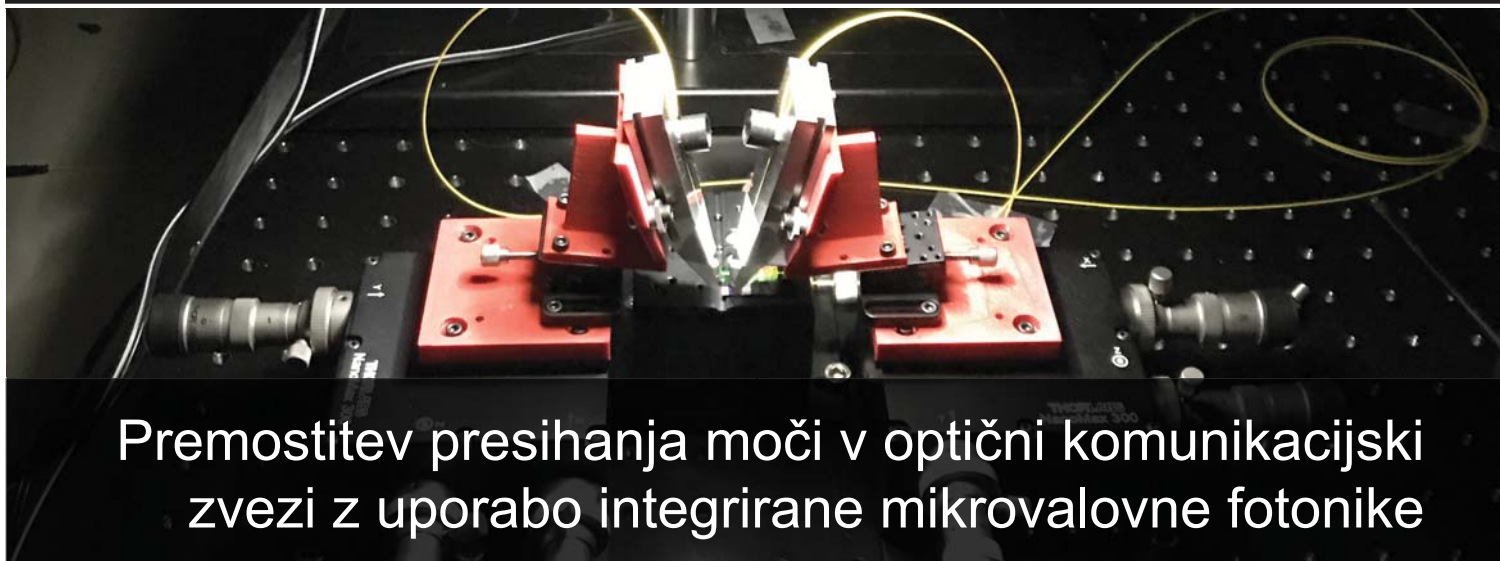
Kristjan Vuk Baliž je leta 2019 magistriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen na delovnem mestu (pedagoškega) asistenta na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Interesna področja njegovega raziskovanja vključujejo mikrovalovno fotoniko, elektromagnetno sevanje in razširjanje valov v telekomunikacijah ter numerično analizo elektromagnetnih pojavov v valovodnih strukturah.

Lecturer's biography

Kristjan Vuk Baliž received his master's degree from the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, in 2019. He is currently employed as an assistant teacher at the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana. His research interests include microwave photonics, electromagnetic radiation and wave propagation in telecommunications and numerical analysis of electromagnetic phenomena inside waveguide structures.



LSO Laboratorij za
sevanje in optiko



Premostitev presihanja moči v optični komunikacijski zvezi z uporabo integrirane mikrovalovne fotonike

Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj
Laboratorij za sevanje in optiko
kristjan.vuk@fe.uni-lj.si

Andraž Debevc, Janez Krč
Laboratorij za fotovoltaike in
optoelektroniko



Pregled

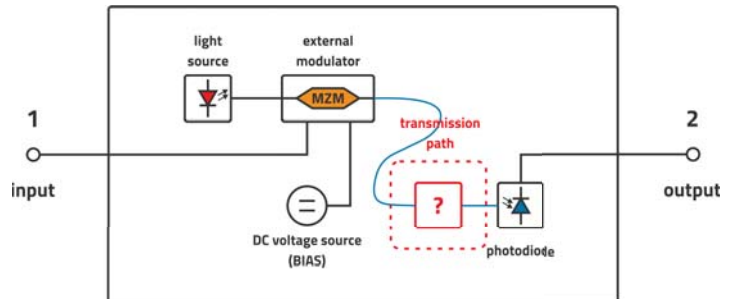
- Uvod
- Presihanje moči
- Premostitev pojava
- PIC: obročni resonator
- Merilna konfiguracija
- Merilni rezultati

MWP signal processing, i.e., filtering

A system for generation, detection and/or **processing** of microwave signals by means of photonic technologies.

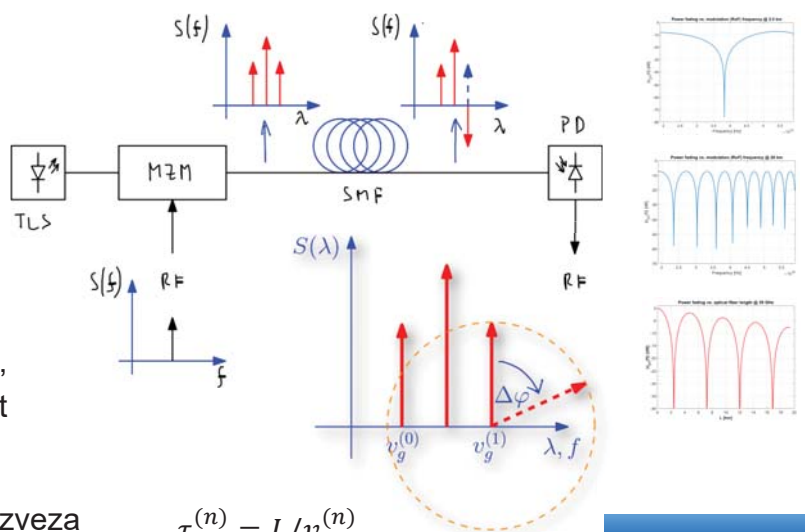
MWP Filter:

1. Laser source
2. External modulator (e.g. MZM)
3. DC voltage supply for BIAS
4. Transmission path (e.g. Optical fiber, free space)
5. Photodetector (e.g. Photodiode)



Presihanje moči

- Intenzitetna (dvobočna) modulacija
 - tritonski optični signal!
- Krivec: barvna razpršitev; valovno-dolžinsko odvisna skupinska hitrost
- Pojav odvisen od parametrov optične zveze: dolžina prenosne poti (vlakna), modulacijska frekvenca, disperzivnost medija, lomni količnik
- Protiukrepi: kompenzacija disperzije, zveza v II. Valovnem oknu, nizek produkt $B \cdot L$, prenos z dvotonskim signalom



$$\tau_g^{(n)} = L/v_g^{(n)}$$

$$\Delta\tau_g = \tau_g^{(1)} - \tau_g^{(0)} = 2D|\Delta\lambda|L$$

$$\Delta\varphi = 2\pi f_{RF} \Delta T_g$$

Presihanje moči (frekvenčno)

- Demonstracija pojava v odvisnosti od modulacijske frekvence (~0-59 GHz) oz. dolžine prenosne poti (0-20 km).
- Analitičen izračun ter izris funkcijskih odvisnosti pojava
- Meroslovni prikaz pojava

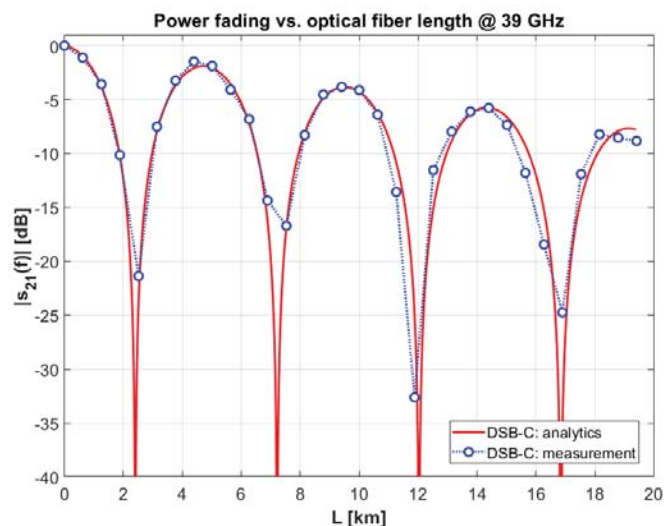
$$PP[\text{dB}] = 10 \log \cos^2(\pi f_{\text{RF}} D 2\Delta\lambda L) - 2aL$$

$\Delta\lambda$ - premik bokov glede na nosilec

f_{RF} - frekvenca modulacijskega signala

L - dolžina (optične) prenosne poti

a - slabljenje optičnega vlakna



Presihanje moči (dolžinsko)

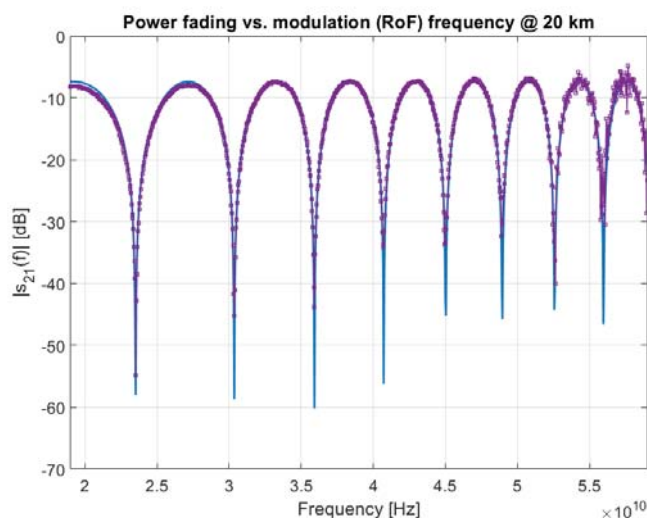
- Demonstracija pojava v odvisnosti od modulacijske frekvence (~0-59 GHz) oz. dolžine prenosne poti (0-20 km).
- Analitičen izračun ter izris funkcijskih odvisnosti pojava
- Meroslovni prikaz pojava

$$PP[\text{dB}] = 10 \log \cos^2(\pi f_{\text{RF}} D 2\Delta\lambda L)$$

$\Delta\lambda$ - premik bokov glede na nosilec

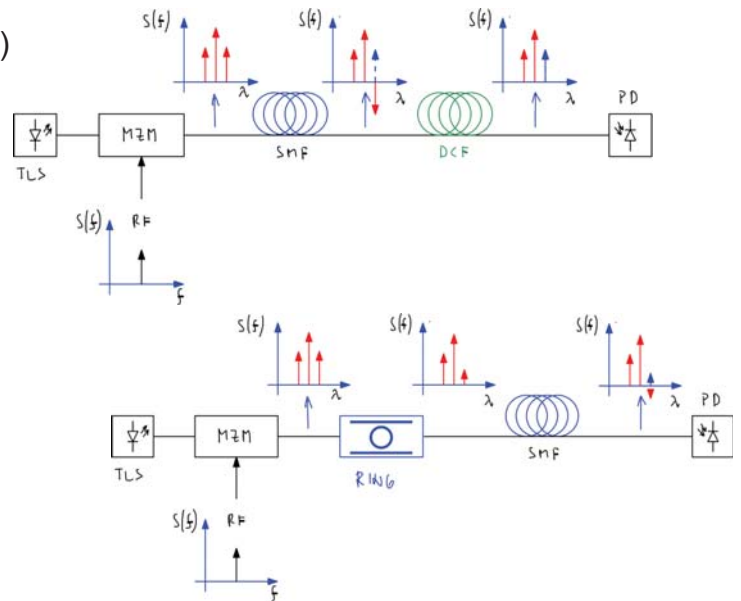
f_{RF} - frekvenca modulacijskega signala

L - dolžina (optične) prenosne poti



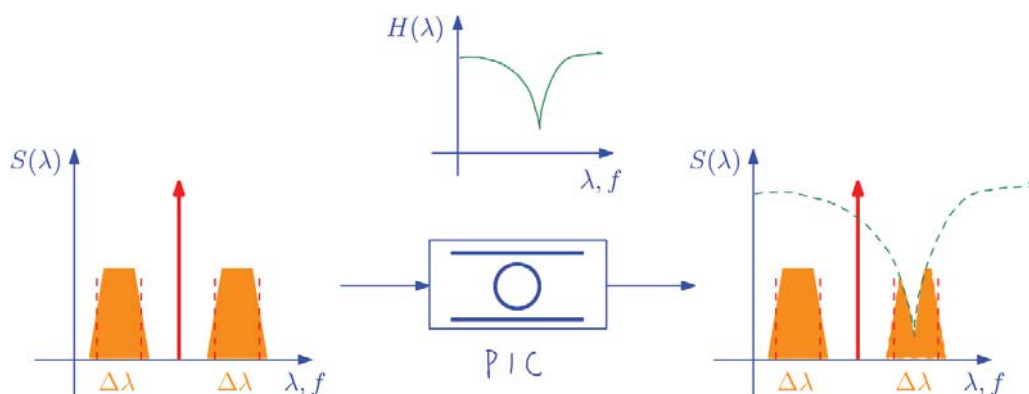
Premostitev pojava

- Kompenzacija disperzije (odvisno od dolžine)
 - Vlakno za kompenzacijo disperzije
 - Zveza v II. valovnem oknu (izničenje snovne in barvne razpršitve)
 - Nastavljiv modul za kompenzacijo disperzije
- Prenos v “dvotonskem” načinu (pogojno odvisno od frekvence, pasovne širine)
 - Dušenje boka z uporabo optičnih sit
 - Obročni resonator na PIC-u



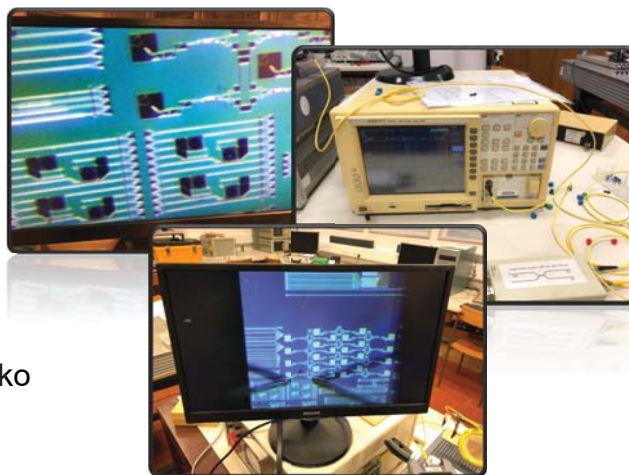
Premostitev pojava

- Od nič različna pasovna širina modulatorskega signala

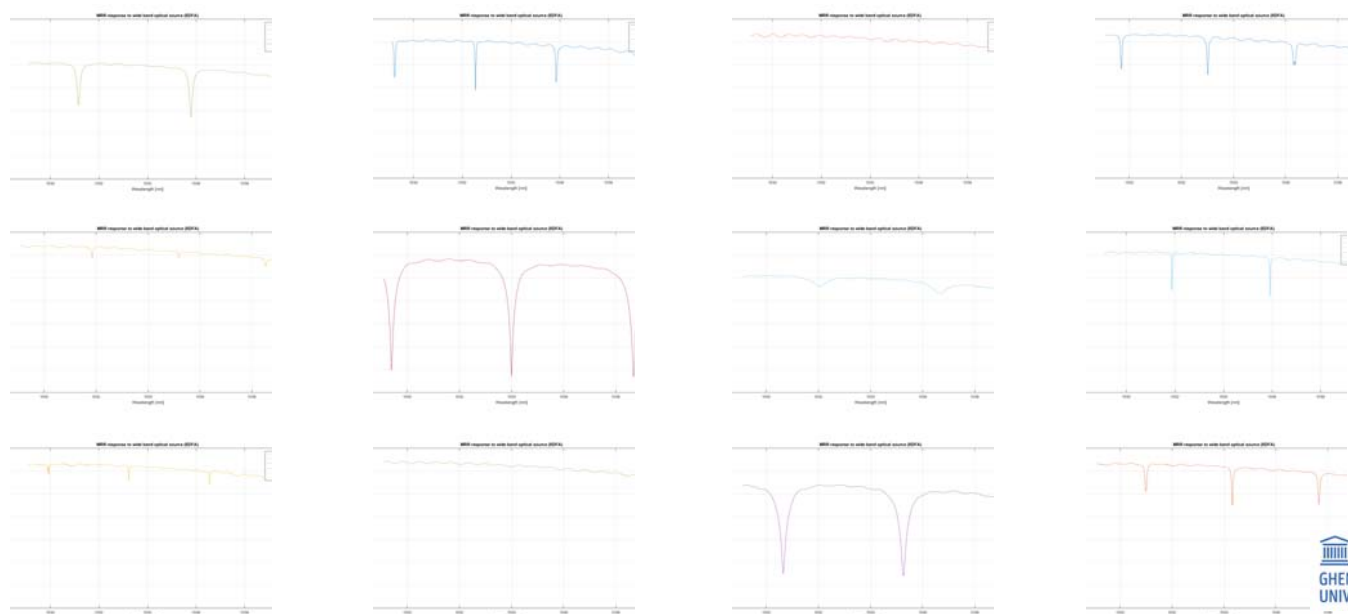


Premostitev pojava

- Uporabljen pristop: dušenje stranskega boka z obročnim resonatorjem na integriranem fotonskem vezju (PIC)
- Vzpostavitev merilne konfiguracije za ovrednotenje učinkovitosti pristopa
- Izzivi:
 - identifikacija primerne strukture na dostopnem PIC-u
 - ovrednotenje karakterističnih parametrov potencialnih struktur
 - sklop svetlobe iz SM vlaken v PIC preko grabličastih sklopnikov

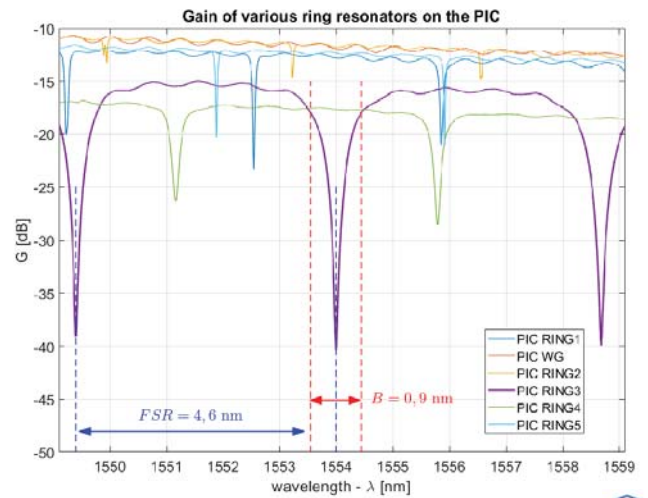
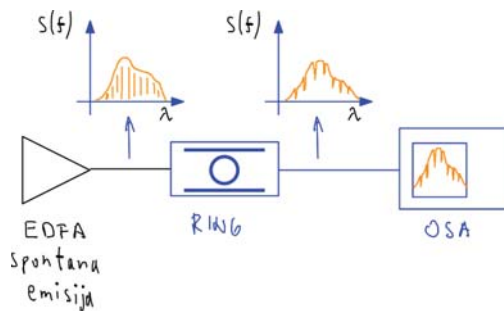


Obročni resonator

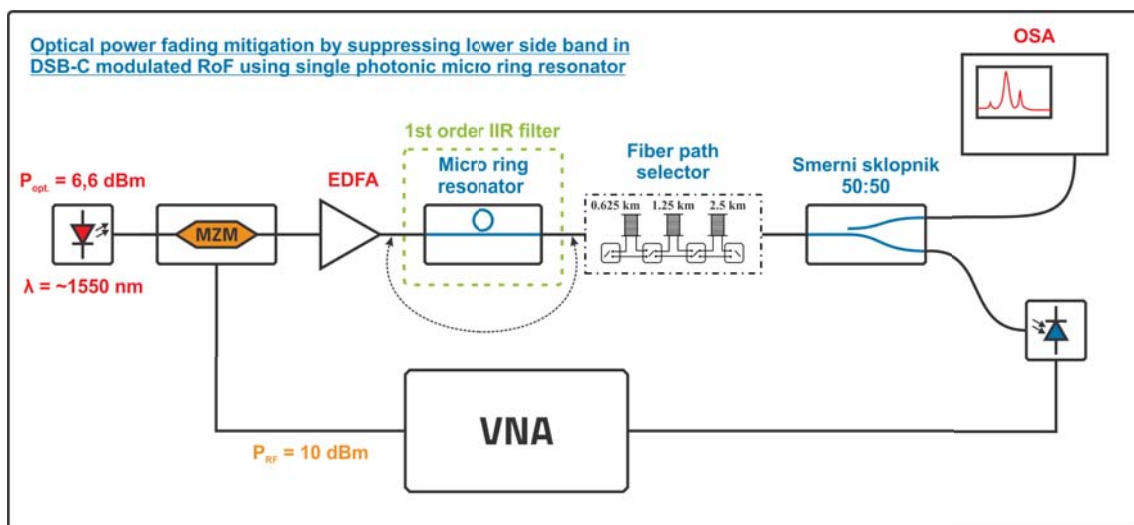


Ovrednotenje

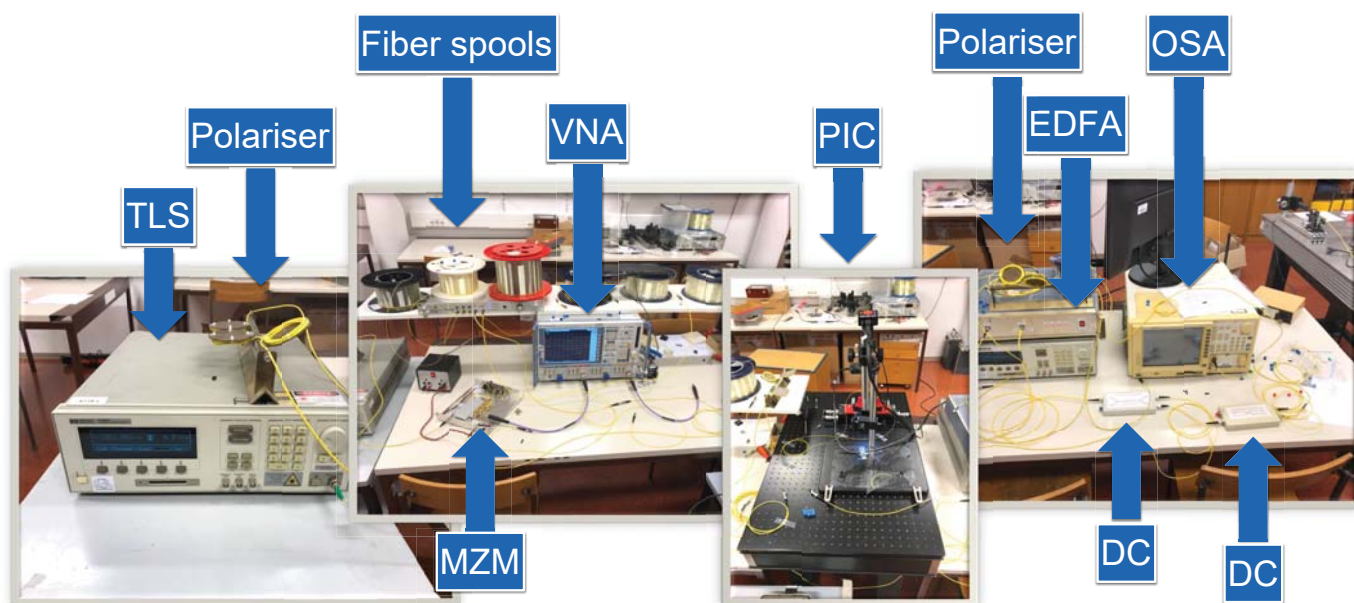
- Vzbujanje s širokopasovnim optičnim virom (EDFA)
- Meritev sprejete optične moči z OSA
- Ocena ugasnega razmerja
- Ocena periode sita



Merilna konfiguracija

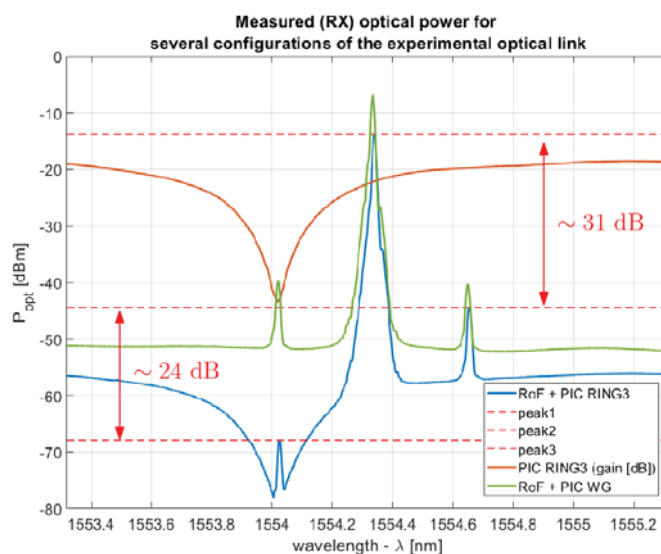
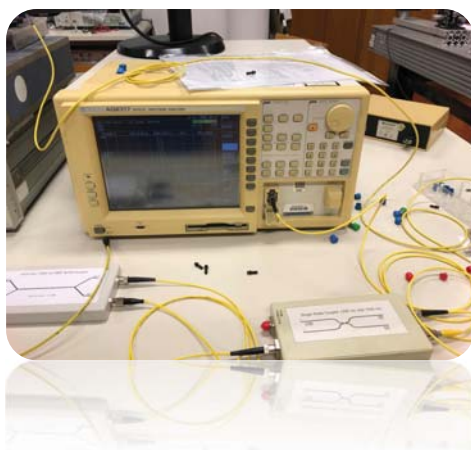


Merilna konfiguracija



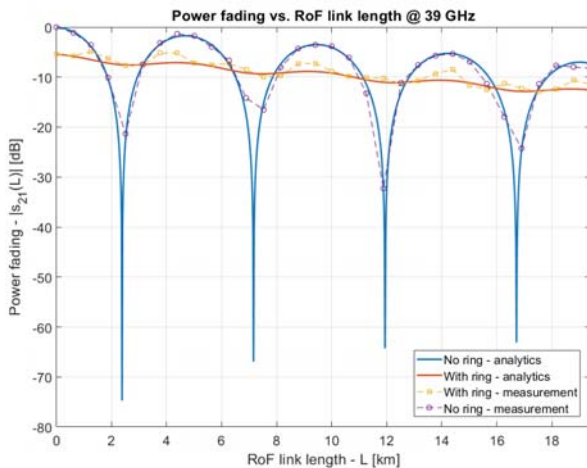
Merilni rezultati

- Optični spekter signala RoF

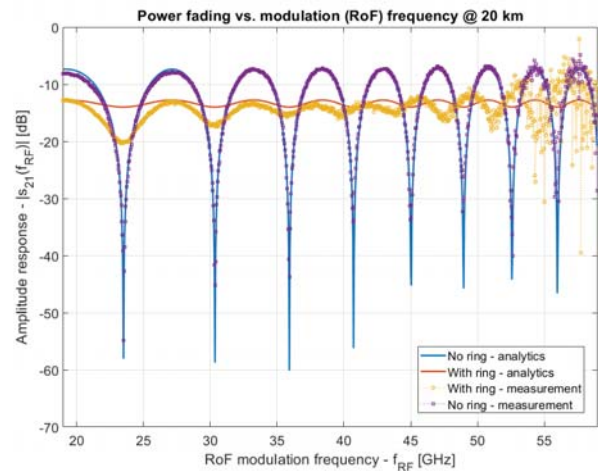


Merilni rezultati

Presihanje v odvisnosti od dolžine vlakna pri fiksni modulaciji ($f_m = 39$ GHz)

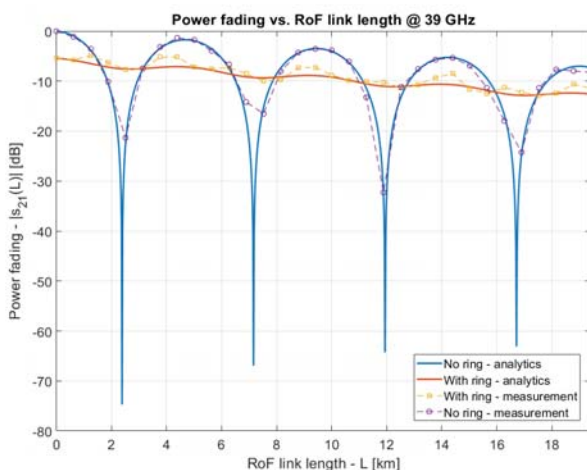


Prevajalna funkcija sistema: amp. odziv pri fiksni dolžini ($L = 20$ km)

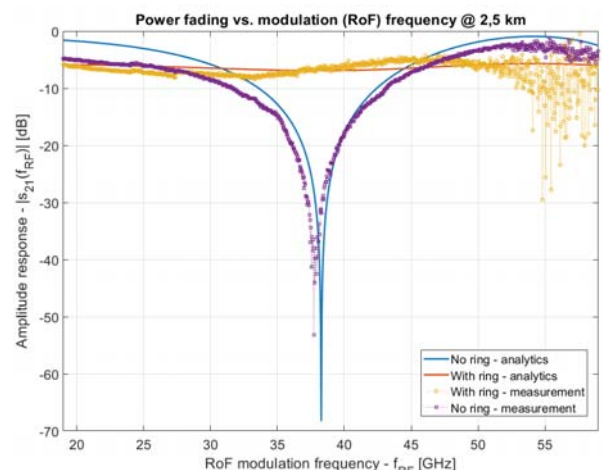


Merilni rezultati

Presihanje v odvisnosti od dolžine vlakna pri fiksni modulaciji ($f_m = 39$ GHz)



Prevajalna funkcija sistema: amp. odziv pri fiksni dolžini ($L = 2,5$ km)



Svetlobno vlakno: primerjava, fizikalne osnove, omejitve in protiukrepi

Optical fiber: comparison, physical background, limitations and countermeasures

Matjaž Vidmar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Katedra za informacijsko komunikacijske tehnologije, Laboratorij za sevanje in optiko

matjaz.vidmar@fe.uni-lj.si

Povzetek

Prispevek obdeluje naslednjo vsebino: vrvične in brezvrvične zveze, slabljenje koaksialnega kabla, načrtovanje koaksialnega kabla, primerjava slabljenja zvez, stekleno svetlobno vlakno, tuneliranje na krivinah, nadomestno vezje dielektrika, kompleksni lomni količnik, Rayleighjevo sipanje, slabljenje kremenovega stekla, OTDR, numerična apertura, razpršitev večpotja, zvezni lomni lik, prečna fazna resonanca, 1D valovodni rodovi, polje 1D rodov, valovodni rodovi v vlaknu, hitrost svetlobe v steklu, barvna razpršitev vlakna, vlakna s premaknjeno razpršitvijo, kompenzacija barvne razpršitve, polarizacijska razpršitev, obremenitev materialov vlakna, elektrostrikcija v steklu, Brillouinovo in Ramanovo sipanje, spekter Brillouinovega sipanja, štirivalovno mešanje, prekooceanski kabel in neuspehi optike.

“AMSAT-Phase-3D”, ki je bil uspešno izstreljen v novembru 2000. Profesor Vidmar trenutno poučuje dodiplomske in podiplomske predmete s področja telekomunikacij na Fakulteti za elektrotehniko. Njegovo področje dela je mikrovalovna elektronika, ki obsega področja od letalske industrije do optičnih komunikacij.

Author's biography

Matjaž Vidmar received his PhD in 1992 from the University of Ljubljana, for developing a single frequency GPS ionospheric correction receiver. Mr. Vidmar is currently teaching undergraduate and postgraduate courses in Electrical Engineering at the University of Ljubljana, where he serves as head of the Radiation and Optics Laboratory (LSO) at the department for Electrical Engineering (FE). His current research interests include microwave and high speed electronics ranging from avionics to optical-fiber communications. Under his leadership, the LSO developed most of the 10Gbps electronics (pulse modulator, clock recovery) used in the Ester (ACTS 063) project and many 40Gbps circuits used in the ATLAS (IST 10626) project: EAM drivers, transmitter clock distribution, 40Gbps and 80Gbps clock-recovery circuits and 40Gbps PMD compensation receiver electronics. Mr. Vidmar also developed and built satellite hardware flown in space in 1990 on the Microsat mission and in 2000 on the AMSAT-P3D satellite.)

Biografija avtorja

Matjaž Vidmar je doktoriral leta 1992 z naslovom teme »Metoda korekcije ionosferskih pogreškov pri satelitski navigaciji in prenosu časa«. V ZDA je razvijal satelitske oddajnike za organizacijo AMSAT. V sklopu sodelovanja z AMSAT-om je sodeloval pri razvoju komunikacijske in navigacijske opreme za satelit

25. seminar optične komunikacije 4-5.2.2021

Svetlobno vlakno: primerjava, fizikalne osnove, omejitve in protiukrepi

Matjaž Vidmar

----- Seznam slik -----

- | | |
|--|--|
| Slika 1 – Vrvične in brezvrvične zveze | Slika 21 – Vlakna s premaknjeno razpršitvijo |
| Slika 2 – Slabljenje koaksialnega kabla | Slika 22 – Kompenzacija barvne razpršitve |
| Slika 3 – Načrtovanje koaksialnega kabla | Slika 23 – Polarizacijska razpršitev |
| Slika 4 – Primerjava slabljenja zvez | Slika 24 – Obremenitev materialov vlakna |
| Slika 5 – Stekleno svetlobno vlakno | Slika 25 – Elektrostrikcija v steklu |
| Slika 6 – Tuneliranje na krivinah | Slika 26 – Brillouinovo in Ramanovo sipanje |
| Slika 7 – Nadomestno vezje dielektrika | Slika 27 – Spekter Brillouinovega sipanja |
| Slika 8 – Kompleksni lomni količnik | Slika 28 – Štirivalovno mešanje |
| Slika 9 – Rayleighjevo sipanje | Slika 29 – Prekooceanski kabel |
| Slika 10 – Slabljenje kremenovega stekla | Slika 30 – Neuspehi optike |
| Slika 11 – OTDR | |
| Slika 12 – Numerična apertura | |
| Slika 13 – Razpršitev večpotja | |
| Slika 14 – Zvezni lomni lik | |
| Slika 15 – Prečna fazna rezonanca | |
| Slika 16 – 1D valovodni rodovi | |
| Slika 17 – Polje 1D rodov | |
| Slika 18 – Valovodni rodovi v vlaknu | |
| Slika 19 – Hitrost svetlobe v steklu | |
| Slika 20 – Barvna razpršitev vlakna | |

Domet in zmogljivost vrvične zveze

Slabljenje: $P_{RX} = P_{TX} \cdot e^{-2\alpha r} = P_{TX} \cdot 10^{-\frac{a/l}{10} \cdot r}$

α [Np/m] \equiv konstanta slabljenja voda

r [m] \equiv razdalja

a/l [dB/m] \equiv slabljenje na enoto dolžine

B [Hz] \equiv pasovna širina (izvedba?)

N \equiv število vrvic (presluh?)

$B_{eff} = N \cdot B$

Domet in zmogljivost brezvrvične zveze

Razširjanje: $P_{RX} = P_{TX} \cdot \frac{A_{TX} A_{RX}}{\lambda_0^2 r^2}$

A_{TX} [m²] $\approx d_{TX}^2 \equiv$ velikost oddajnika

A_{RX} [m²] $\approx d_{RX}^2 \equiv$ velikost sprejemnika

λ_0 [m] \equiv valovna dolžina r [m] \equiv razdalja

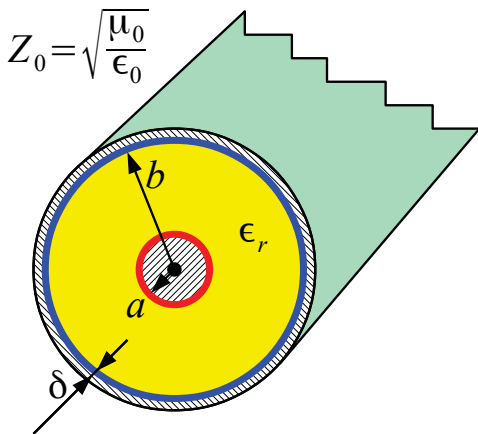
Pasovna širina $\equiv B$ [Hz] $\ll 10\% f_0$

N \equiv število rodov (motnje?)

Fraunhofer: $r \gg \frac{2 d_{TX} d_{RX}}{\lambda_0} \rightarrow N \leq 2$

Fresnel: $r \ll \frac{2 d_{TX} d_{RX}}{\lambda_0} \rightarrow N \rightarrow \infty$

1 - Vrvične in brezvrvične zveze



$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$

$Z_K = \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \approx \frac{60\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \equiv$ karakteristična impedanca

Zgled: $f = 100\text{MHz}$ Baker: $\mu \approx \mu_0$ $\gamma = 56 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$

$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\gamma}} \approx 6.73 \mu\text{m} \equiv$ vdorna globina v baker

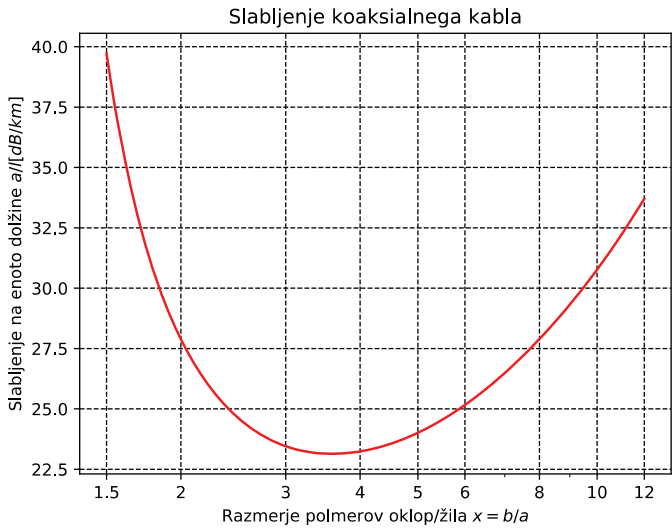
$R/l = R_{zile}/l + R_{oklopa}/l = \frac{1}{2\pi a \delta \gamma} + \frac{1}{2\pi b \delta \gamma} = \frac{1}{2\pi \delta \gamma} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$

$\alpha \left[\frac{\text{Np}}{\text{m}} \right] = \frac{R/l}{2 Z_K} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{2 b \delta \gamma Z_0} \left(\frac{b}{a} + 1 \right) / \ln \frac{b}{a}$ $x = \frac{b}{a}$

$a/l \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right] = \frac{20}{\ln 10} \alpha = \left(\frac{10 \sqrt{\pi \epsilon_0}}{\ln 10} \right) \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\epsilon_r f}{\gamma}} \left(\frac{x+1}{\ln x} \right)$

$x = 3.6$	ϵ_r	Z_{Kopt}
zrak	1	76.9Ω
pena	1.5	62.8Ω
teflon	2.1	53.0Ω
polietilen	2.3	50.7Ω

2 - Slabljenje koaksialnega kabla



$$a/l \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right] = \left(\frac{10 \sqrt{\pi \epsilon_0}}{\ln 10} \right) \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\epsilon_r f}{\gamma}} \left(\frac{x+1}{\ln x} \right)$$

Zgled: $a=2\text{mm}$ $b=7.2\text{mm}$
 $\epsilon_r=2.3$ $f=100\text{MHz}$ $\gamma=56 \cdot 10^6 \text{ S/m}$

$x=3.6$

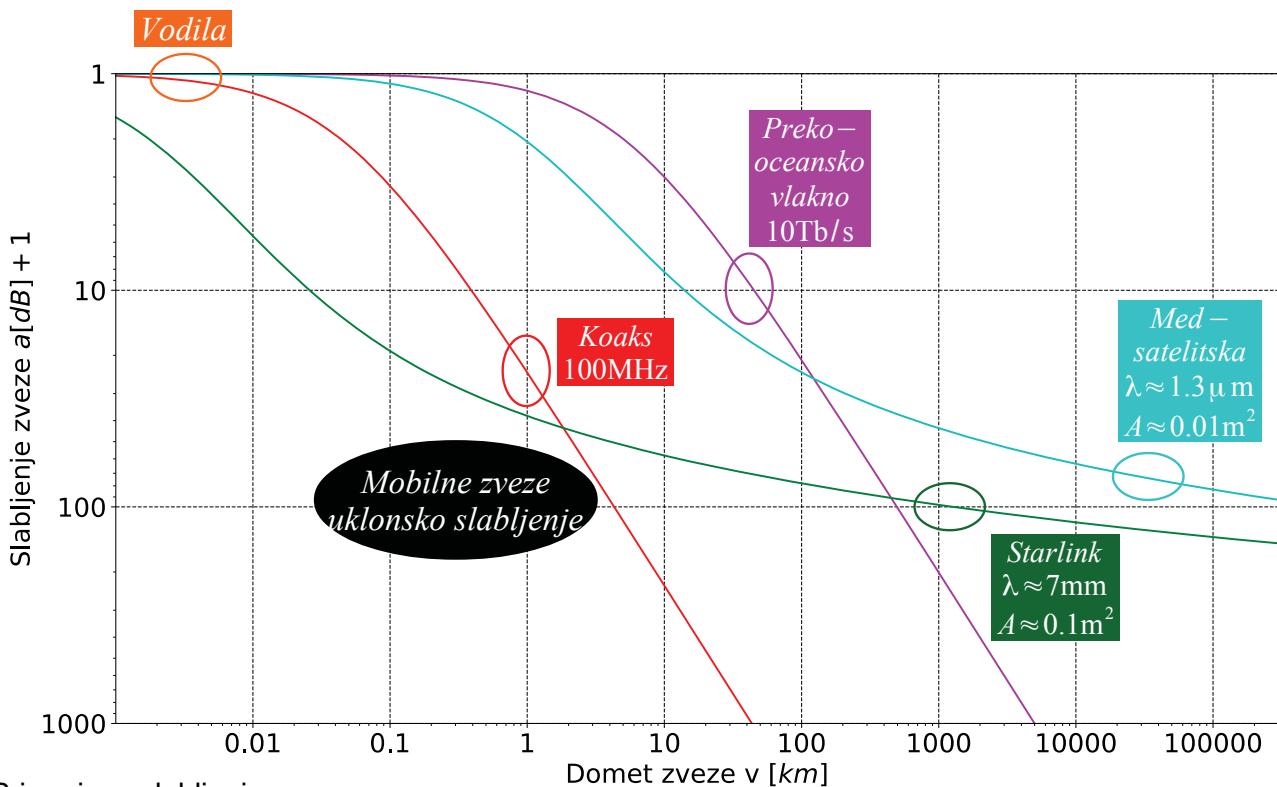
$$a/l \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right] \approx 0.023 \text{ dB/m} = 23 \text{ dB/km}$$

Pojav višjih valovodnih rodov:

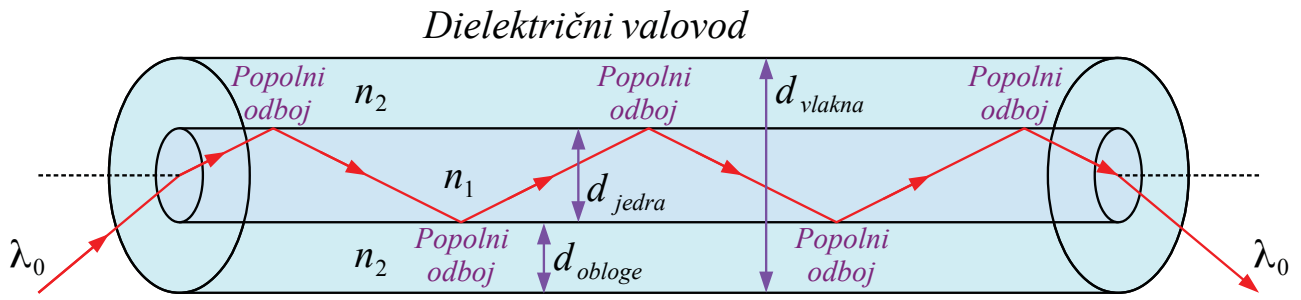
$$f_{MAX} \approx \frac{c_0}{\pi(a+b)\sqrt{\epsilon_r}} \approx 6.84 \text{ GHz}$$

$x_{MIN} = 3.591121476668622 \approx 3.6$

3 – Načrtovanje koaksialnega kabla



4 – Primerjava slabljenja zvez



Popolni odboj: $n_1(\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2) > n_2(\text{SiO}_2)$

TK standard: $d_{\text{vlakna}} = 125 \mu\text{m}$

$3 \mu\text{m} < d_{\text{jedra}} < 63 \mu\text{m}$

$d_{\text{obloge}} \gg \lambda_0$

$780\text{nm} < \lambda_0 < 1630\text{nm} \Leftrightarrow 385\text{THz} > f_0 > 184\text{THz}$

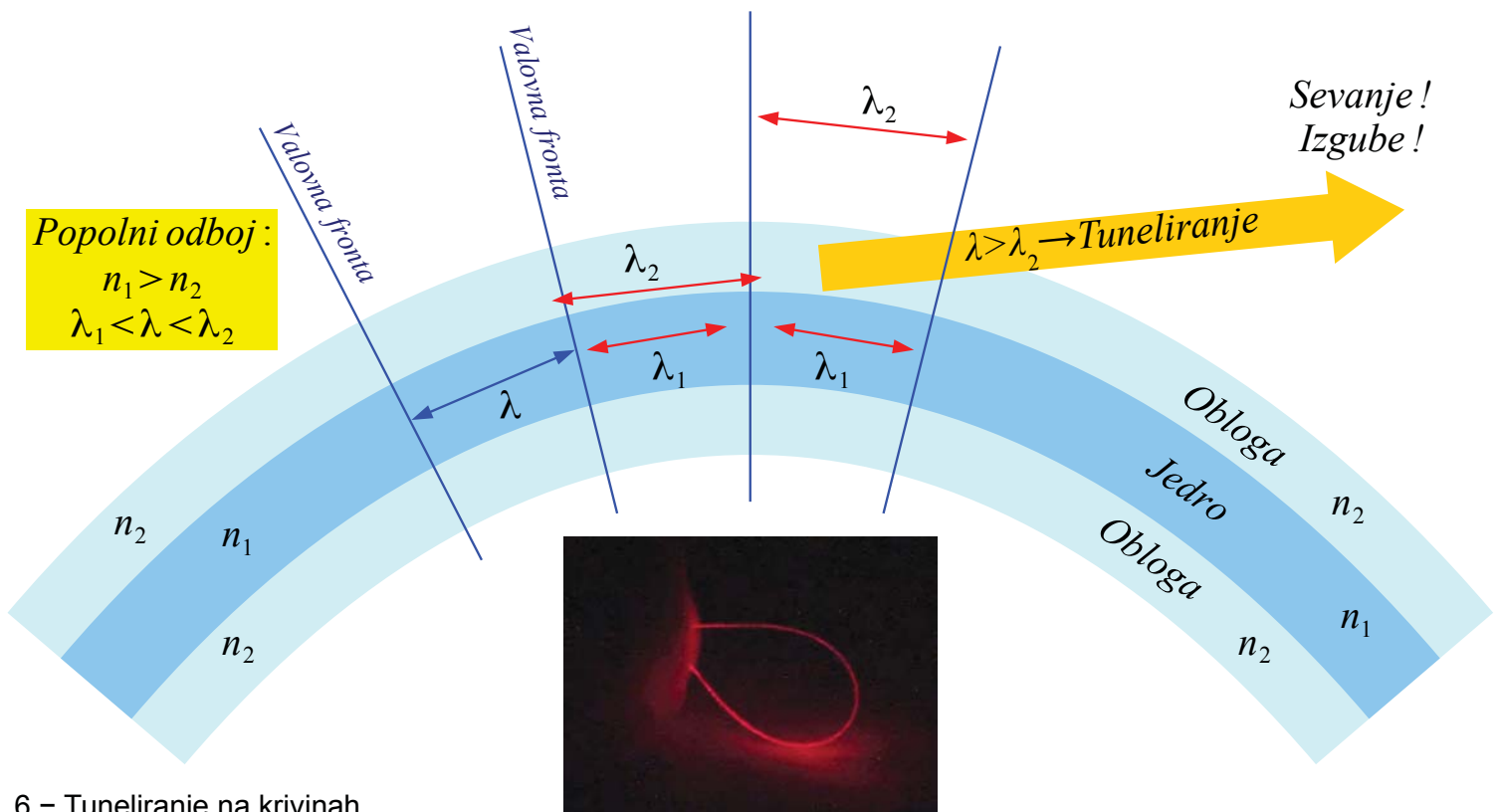
Prednosti v komunikacijah:

- (1) Slabljenje: $a/l = 0.15 \dots 0.5 \text{dB/km}$
- (2) Pasovna širina: $B > 4 \text{THz}$
- (3) Galvanska ločitev!

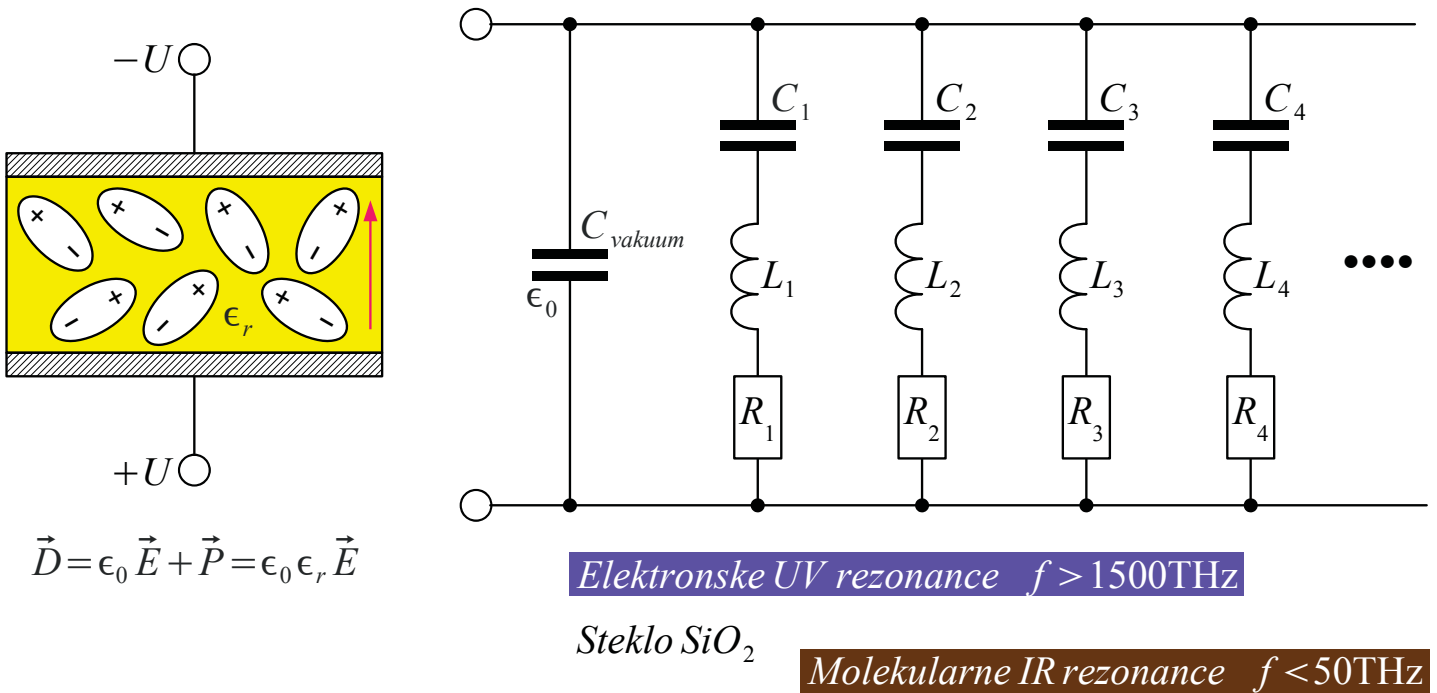
Pomanjkljivosti pri obdelavi:

- (1) Enosmerni ojačevalnik za svetlobne frekvence (optični tranzistor) NE obstaja!
- (2) Pasivni gradniki preveliki $d \gg \lambda$ za integracijo!

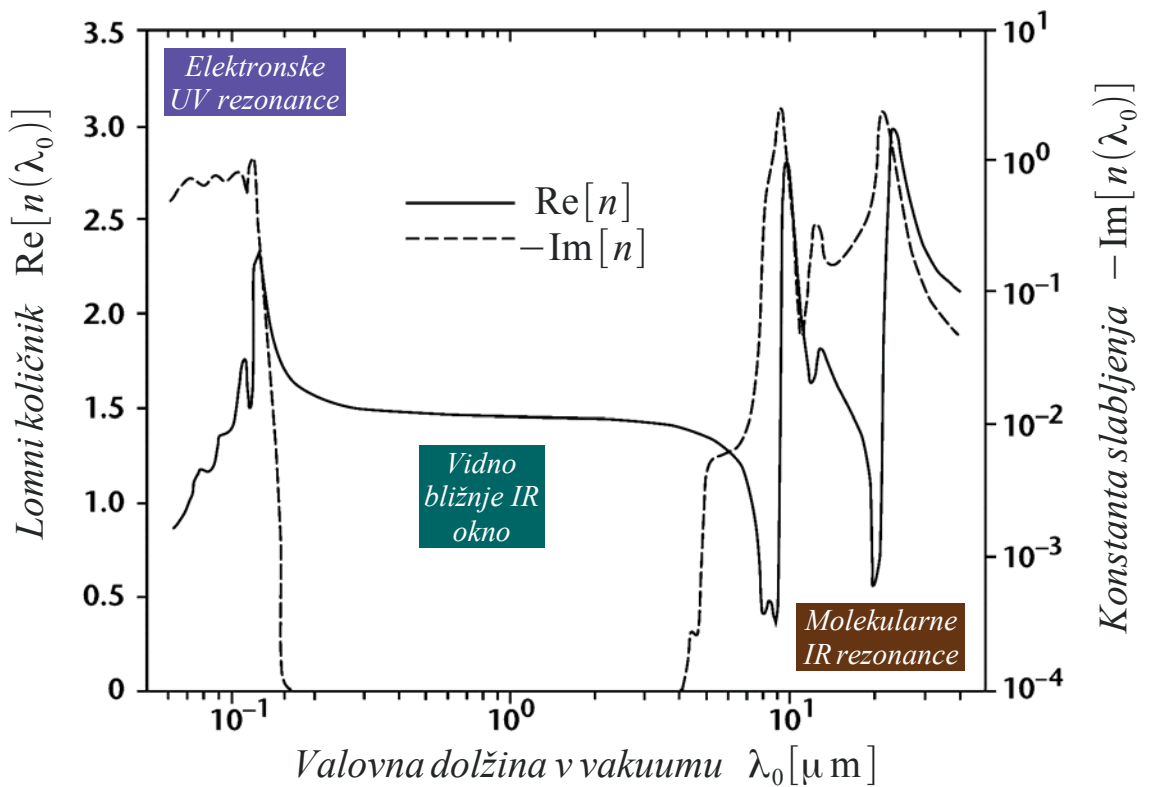
5 – Stekлено svetlobno vlakno



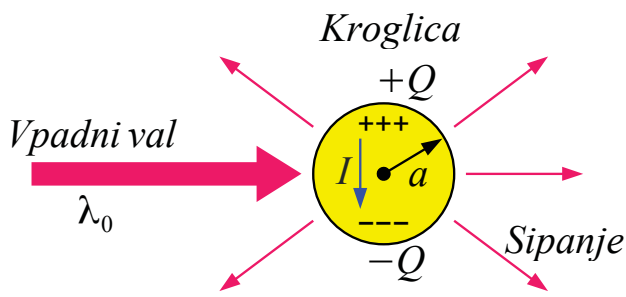
6 – Tuneliranje na krivinah



7 – Nadomestno vezje dielektrika



8 – Kompleksni lomni količnik



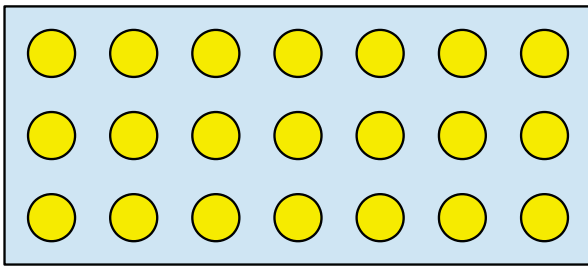
Zveznost toka + elektrine: $j\omega Q = I \rightarrow$ sevanje!

Rayleigh
 $a \ll \lambda_0$

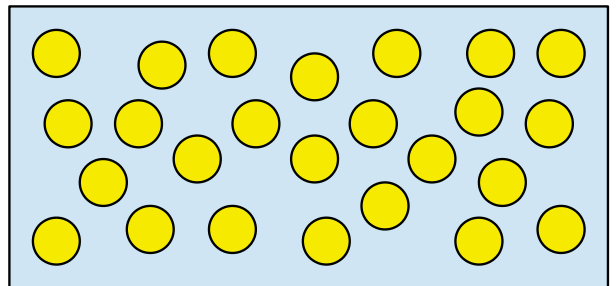
Odmevna površina kovinske kroglice
 $\sigma = 64\pi^5 \frac{a^6}{\lambda_0^4}$

Odmevna površina dielektrične kroglice
 $\sigma = 64\pi^5 \frac{a^6}{\lambda_0^4} \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right|^2$

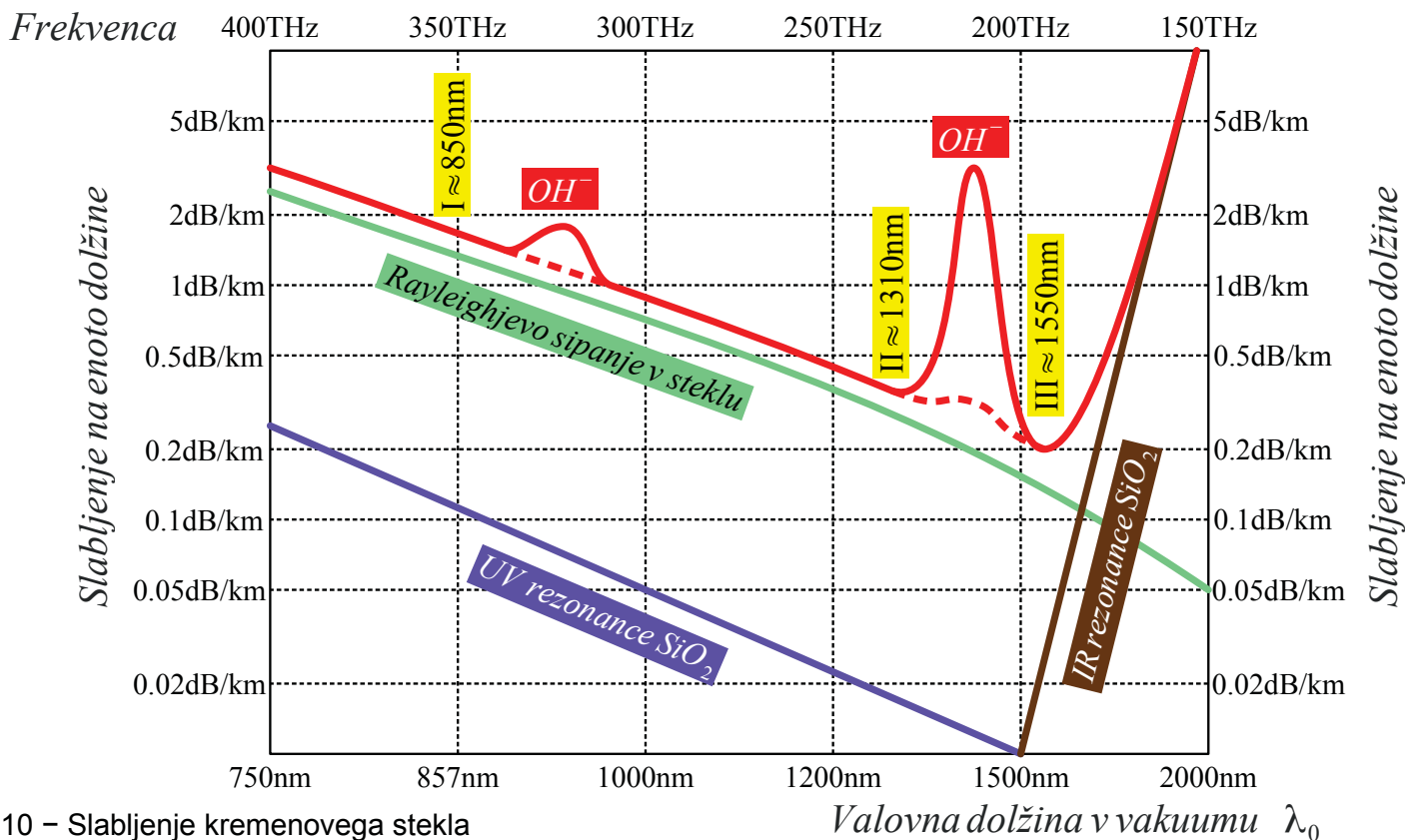
Kristal $\text{SiO}_2 \rightarrow$ Braggov uklon



Steklo $\text{SiO}_2 \rightarrow$ Rayleighjevo sipanje



9 – Rayleighjevo sipanje



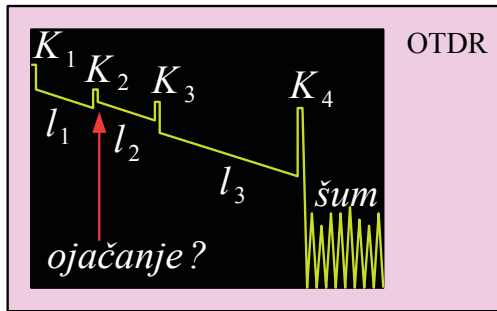
10 – Slabljenje kremenovega stekla

Vlakno \ λ_0	850nm	1310nm	1550nm	1625nm
G.652 9/125		-77dB	-82dB	-83dB
NZDSF LEAF		-75dB	-81dB	-82dB
G.651 50/125	-68dB	-76dB	Γ_{1ns}	
"H" 62.5/125	-68dB	-76dB		

$\Gamma_{staklo/zrak} \approx -14dB$
 $\Gamma_{PC/PC} \approx -40dB$
 $\Gamma_{APC/APC} \approx -70dB$

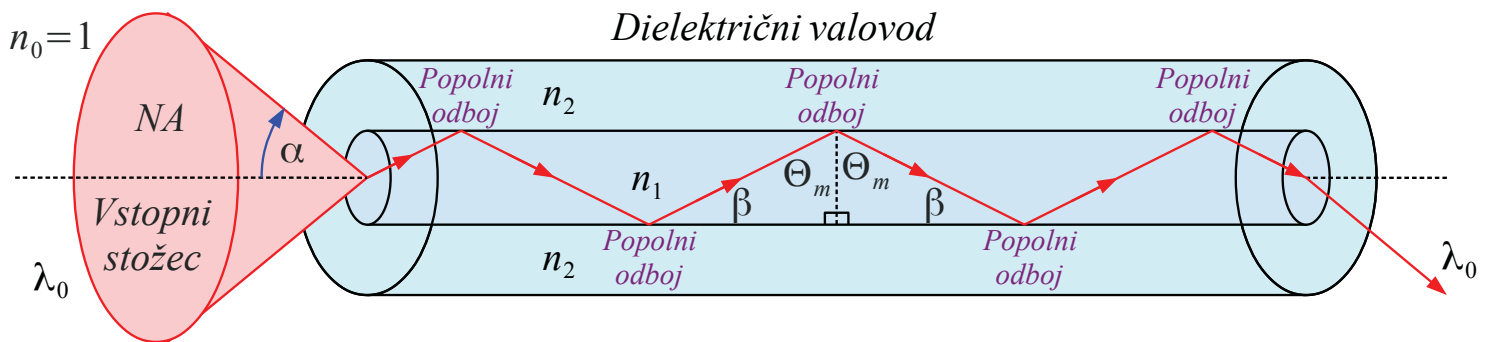
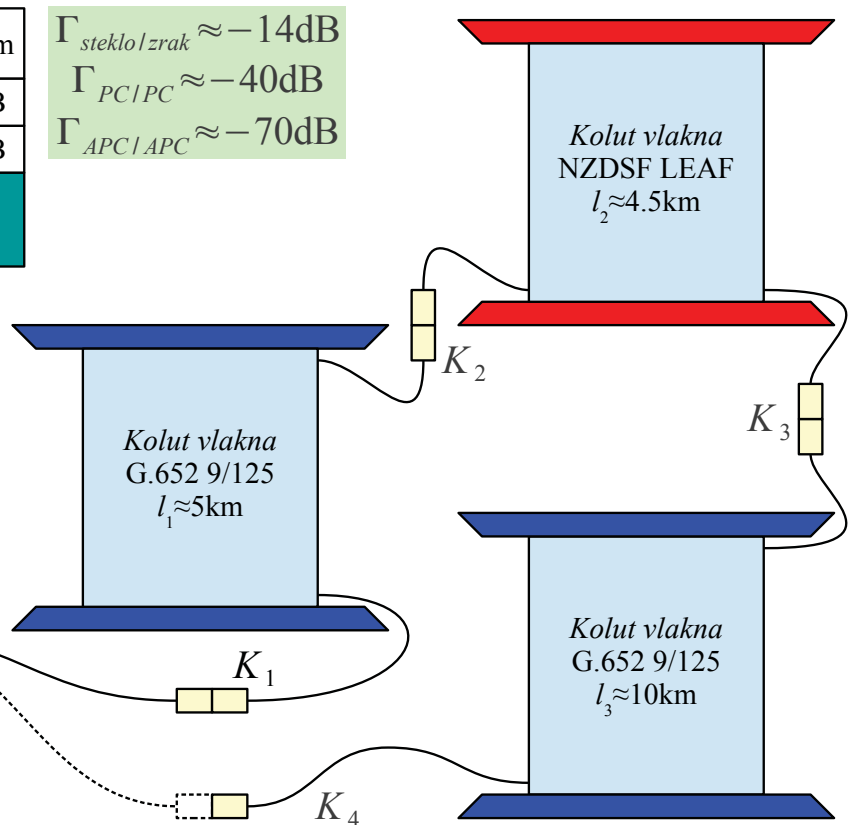
$\Gamma_p = \Gamma_{1ns} + 10 \log_{10}(t_p/1ns)$

$t_p = 50ns/200ns/1\mu s/5\mu s$



$\lambda_0 = 1.31\mu m/1.55\mu m$

11 - OTDR



Relativna razlika lomnih količnikov $\equiv \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

Šibkolomno vlakno: $\Delta \ll 1$

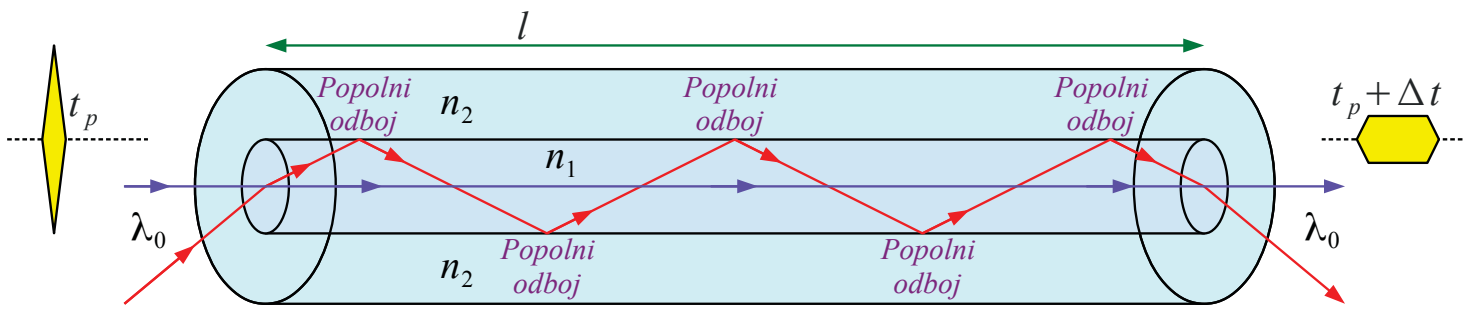
Popolni odboj: $\sin \Theta \geq \sin \Theta_m = \frac{n_2}{n_1} = \cos \beta$

Numerična apertura $\equiv \sin \alpha = n_1 \sin \beta = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \beta} = n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA$

Približek $\Delta \ll 1 \rightarrow \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)} \approx \sqrt{2n_1(n_1 - n_2)} = n_1 \sqrt{2\Delta} \approx NA \quad \Delta \approx \frac{NA^2}{2n_1^2}$

12 - Numerična apertura

Steklena vlakna: (Krivine?) $0.1 \leq NA \leq 0.2$ (Rayleigh?)



Ravni žarek : $t_1 = \frac{n_1 l}{c_0}$

Cikcakajoči žarek : $t_2 = \frac{n_1 l}{c_0 \sin \Theta_m} = \frac{n_1^2 l}{n_2 c_0}$

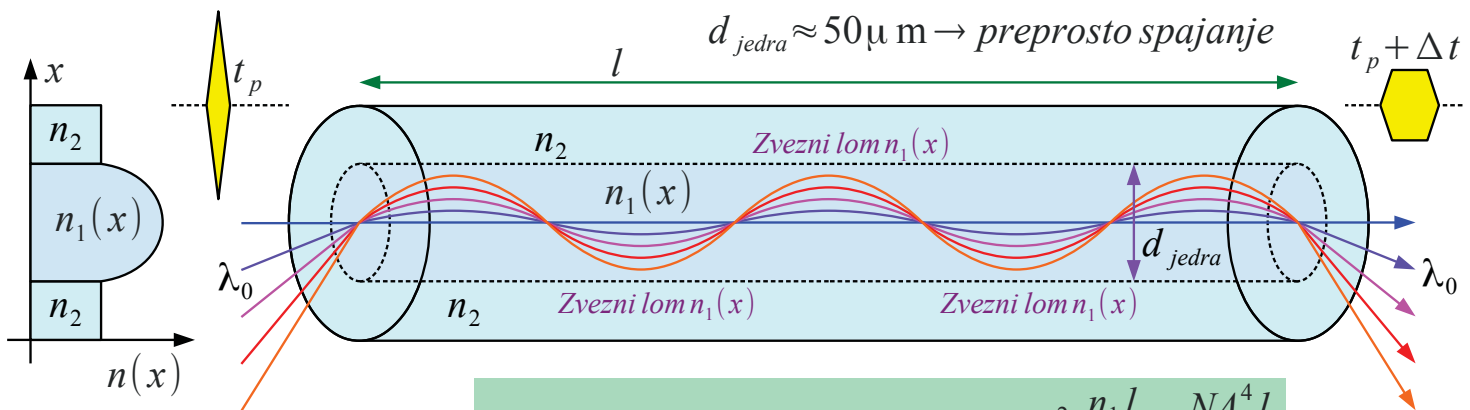
Razpršitev večpotja : $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{n_1 l}{c_0} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \approx \Delta \cdot \frac{n_1 l}{c_0} \approx \frac{NA^2 l}{2 n_1 c_0}$

Zgled : $NA = 0.2 \quad l = 10\text{km} \quad n_1 = 1.46 \rightarrow \Delta t \approx 0.46 \mu\text{s} \rightarrow C \approx \frac{1}{3 \Delta t} \approx 730\text{kb/s}$

Sklopni izkoristek vira : $\eta_{LED} \approx \frac{NA^2}{4} = 0.01 = 1\%$

Neuporabno !

13 – Razpršitev večpotja



$NA = \sqrt{n_{1MAX}^2 - n_2^2}$

Razširitev večpotja : $\Delta t = t_2 - t_1 \approx \Delta^2 \cdot \frac{n_1 l}{c_0} \approx \frac{NA^4 l}{4 n_1^3 c_0}$

Zgled : $NA = 0.2 \quad l = 10\text{km} \quad n_1 = 1.46 \rightarrow \Delta t \approx 4.3\text{ns} \rightarrow C \approx \frac{1}{3 \Delta t} \approx 78\text{Mb/s}$

$\Delta \approx \frac{NA^2}{2 n_1^2} \approx 0.0094$

Standardizirano vlakno GI 50/125 ≡ ITU G.651

Prve medkrajevne zveze ~ 1980 $C \sim 8\text{Mb/s}$ LED ~ 850nm

Uporaba ~ 2020 : najcenejši SFP moduli $C \leq 1\text{Gb/s}$ @ $l \leq 100\text{m}$

14 – Zvezni lomni lik

Popolni odboj: $\Gamma = \frac{a - jb}{a + jb} = e^{j\phi}$

$a_{TE} = \cos \Theta$ $a_{TM} = (n_2/n_1)^2 \cos \Theta$

$b = \pm \sqrt{\sin^2 \Theta - (n_2/n_1)^2}$

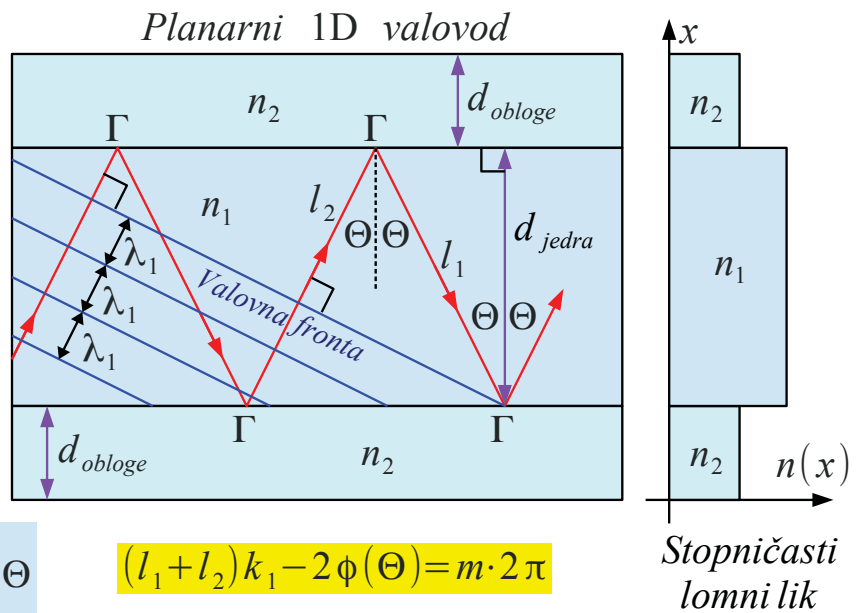
$\phi(\Theta) = 2 \arctan(b/a)$ $0 \leq \phi < \pi$

$l_1 = \frac{d_{jedra}}{\cos \Theta}$ $l_2 = l_1 \cdot \cos 2\Theta$

$l_1 + l_2 = \frac{d_{jedra}}{\cos \Theta} (1 + \cos 2\Theta) = 2 d_{jedra} \cos \Theta$

$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1}$ $k_1 = k_0 n_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_1 = \frac{\omega}{c_0} n_1$

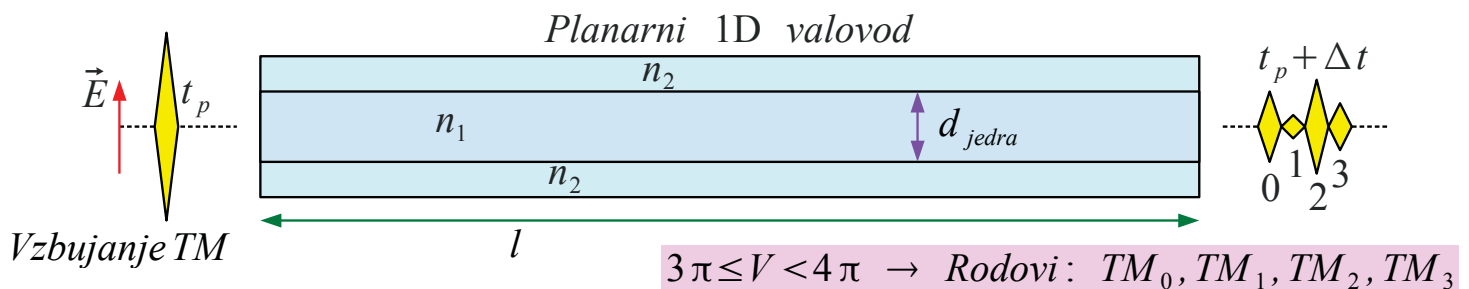
15 – Prečna fazna rezonanca



$(l_1 + l_2) k_1 - 2\phi(\Theta) = m \cdot 2\pi$

$m = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \dots \equiv$ celo število

$d_{jedra} \frac{\omega}{c_0} n_1 \cos \Theta - \phi(\Theta) = m \cdot \pi \rightarrow \Theta = ?$
TE ali TM?

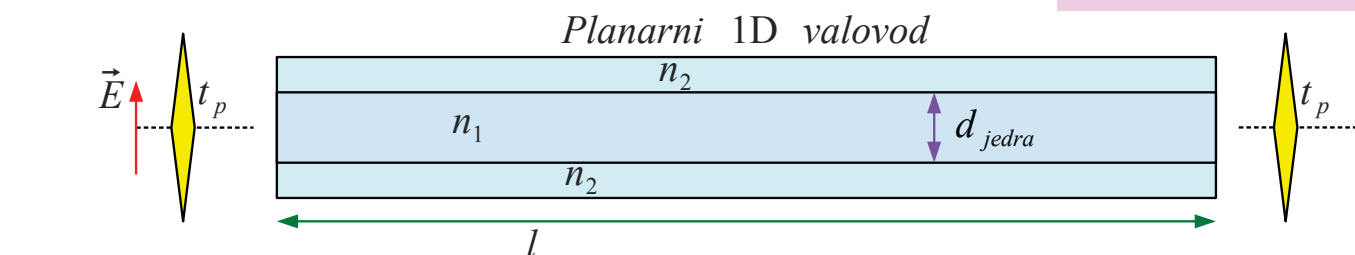


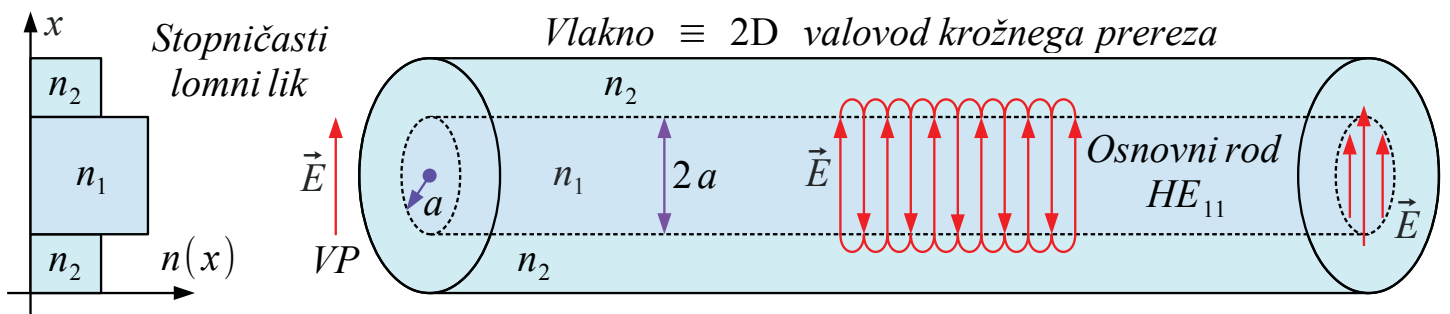
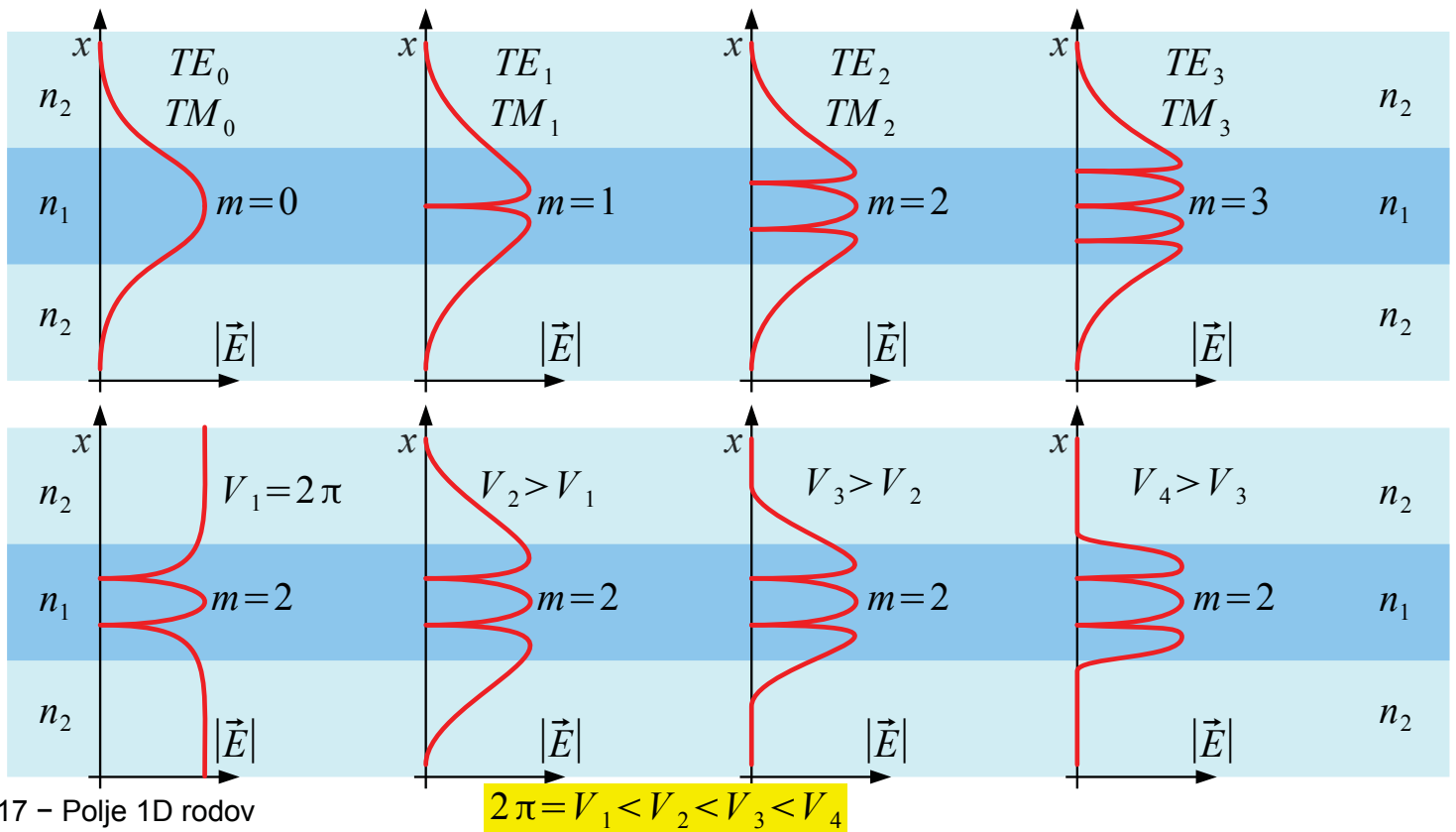
$0 < n_1 \cos \Theta < n_1 \cos \Theta_m = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_m} = n_1 \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA$

Normirana frekvenca $\equiv V = d_{jedra} \frac{\omega}{c_0} n_1 \cos \Theta = d_{jedra} \frac{\omega}{c_0} NA$

$V < 1 \rightarrow$ Uhajanje polja v oblogo

$0 \leq V < \pi \rightarrow$ Rod: TM_0





Normirana frekvenca $\equiv V = a \frac{2\pi}{\lambda_0} NA = a \frac{\omega}{c_0} NA$

HE_{11} ima dve različici HP + VP!

Standardizirano enorodovno vlakno 9/125 ali 10/125 \equiv ITU G.652*

- $0 \leq V < 2.4049 \rightarrow$ Samo HE_{11}
- $V < 1.8 \rightarrow$ Uhajanje polja v oblogo
- $2.4049 \leq V < 3.8318 \rightarrow$ 4 rodovi
- $3.8318 \leq V \rightarrow \geq 7$ rodov

$2a \approx 9 \dots 10 \mu m \quad NA \approx 0.1$

$V(1.31 \mu m) \approx 2.16 \dots 2.40$

$V(1.55 \mu m) \approx 1.82 \dots 2.03$

Bessel: $J_0(2.4049) = 0 \quad J_1(3.8318) = 0$

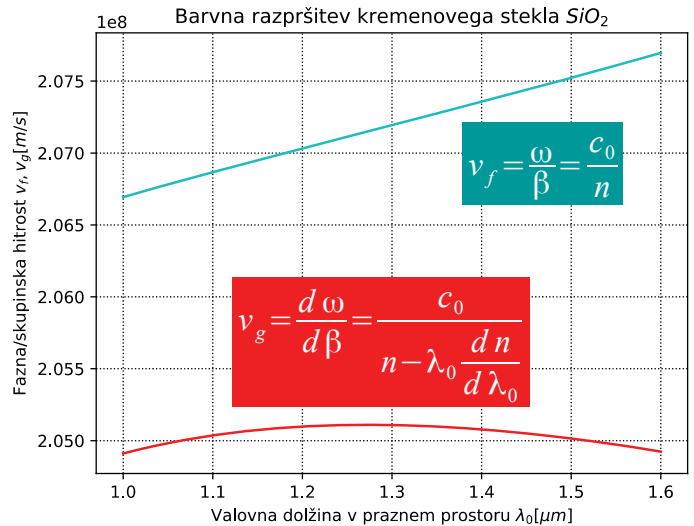
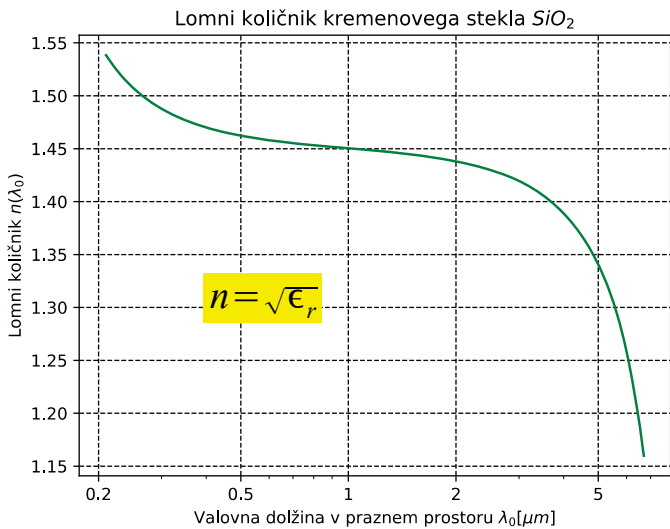
G.652* v uporabi od 1984 naprej
Ožanje dovoljenih odstopanj*!

18 - Valvodni rodovi v vlaknu

Sellmeier za steklo SiO₂ λ₀=0.21 ... 6.7 μm Velja brez izgub!

$$\epsilon_r = 1 + \frac{0.6961663 \cdot \lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.00467914826} + \frac{0.4079426 \cdot \lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.0135120631} + \frac{0.8974794 \cdot \lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 97.9340025}$$

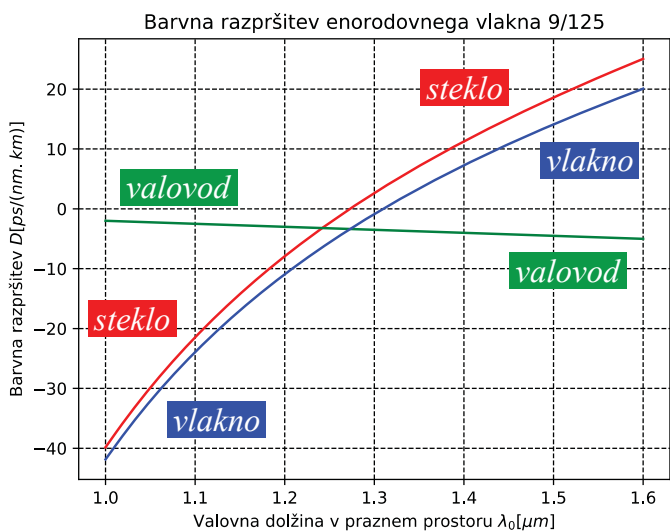
Skupinsko hitrost v_g upočasnjuje jalova moč (energija) nihanja elektronov / molekul SiO₂



19 – Hitrost svetlobe v steklu

$t_g = \frac{l}{v_g}$ Barvna razpršitev: $\Delta t = D \cdot l \cdot \Delta \lambda_0$

Skupinsko hitrost v_g upočasnjuje jalova moč (energija) nihanj:
 (1) elektronov oziroma molekul SiO₂
 (2) prečne fazne rezonance valovoda



Zgled cenen FP laser: $\Delta \lambda_0 = 3 \text{ nm}$ $l = 50 \text{ km}$ $C \approx \frac{1}{3 \Delta t}$

$|D(1.31 \mu\text{m})| < 2 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \rightarrow \Delta t < 300 \text{ ps} \rightarrow C > 1.1 \text{ Gb/s}$
 $D(1.55 \mu\text{m}) \approx 17 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \rightarrow \Delta t \approx 2.55 \text{ ns} \rightarrow C \approx 130 \text{ Mb/s}$

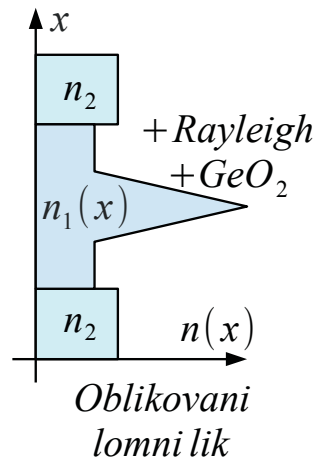
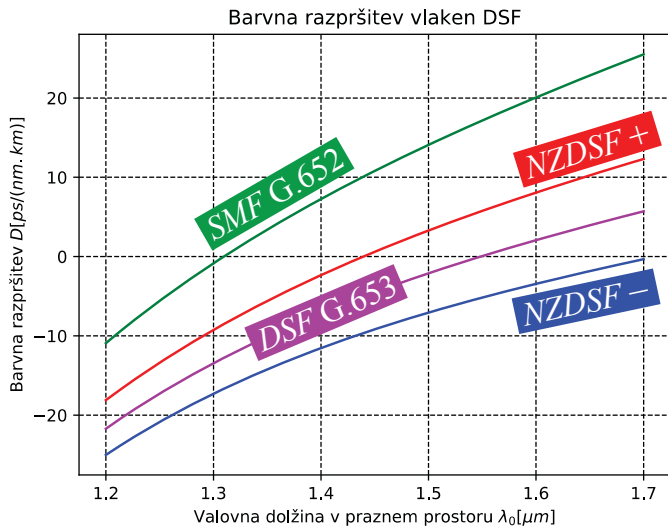
DFB laser + LiNbO₃ EOM $\rightarrow \frac{1}{\Delta t} \approx C \approx \Delta f = \Delta \lambda_0 \frac{c_0}{\lambda_0^2}$

$l = \frac{\Delta t}{D \cdot \Delta \lambda_0} \approx \frac{c_0}{D \lambda_0^2 C^2}$ $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$
 $D \approx 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$

C	2.5Gb/s	10Gb/s	40Gb/s	100Gb/s
l	1175km	73km	4.59km	0.73km

$D \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} = 10^{-6} \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \right] = \frac{1}{l} \frac{dt_g}{d\lambda_0} = -\frac{1}{v_g^2} \frac{dv_g}{d\lambda_0}$

20 – Barvna razpršitev vlakna



Vlakno z neničelno premaknjeno razpršitvijo
 NZDSF ≡ Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber

NZDSF + oziroma ITU G.655
 $D(1550nm) \approx +4 \dots +7 \frac{ps}{nm.km}$
 $A_{jedra} \rightarrow 80 \mu m^2 (LEAF)$

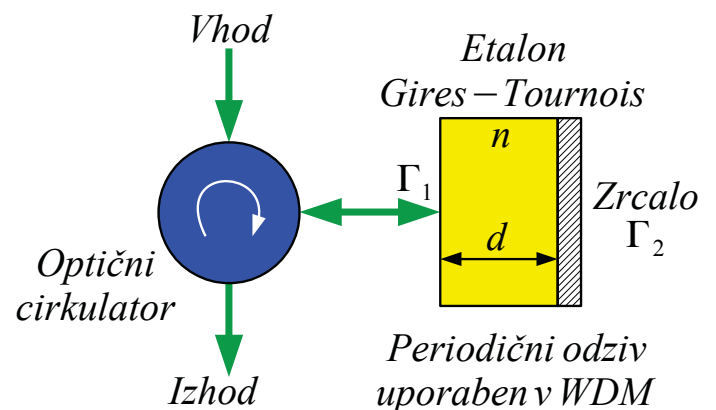
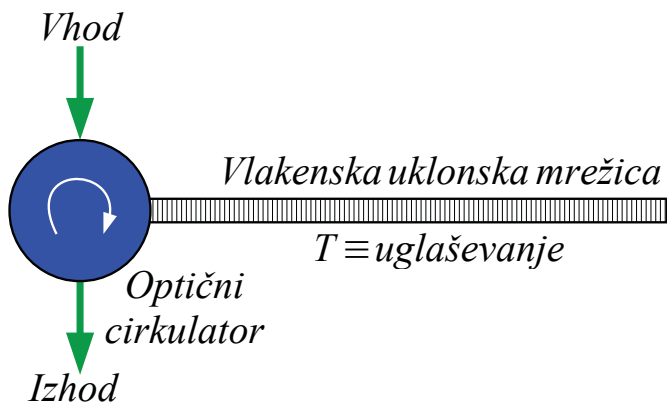
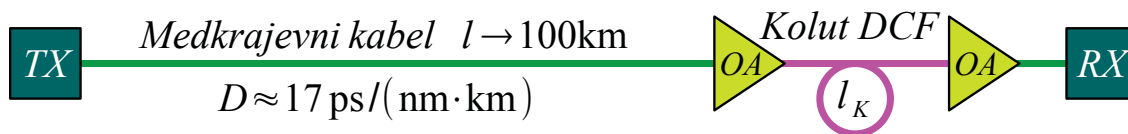
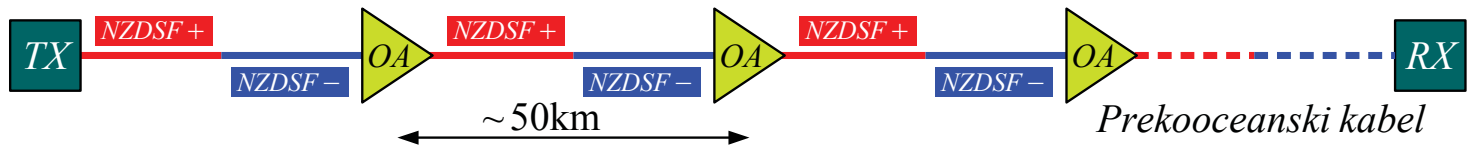
NZDSF -
 $D(1550nm) \approx -4 \dots -7 \frac{ps}{nm.km}$

Kompensacijsko vlakno DCF
 $D(1550nm) \approx -80 \frac{ps}{nm.km}$
 $a/l \approx 1dB/km$

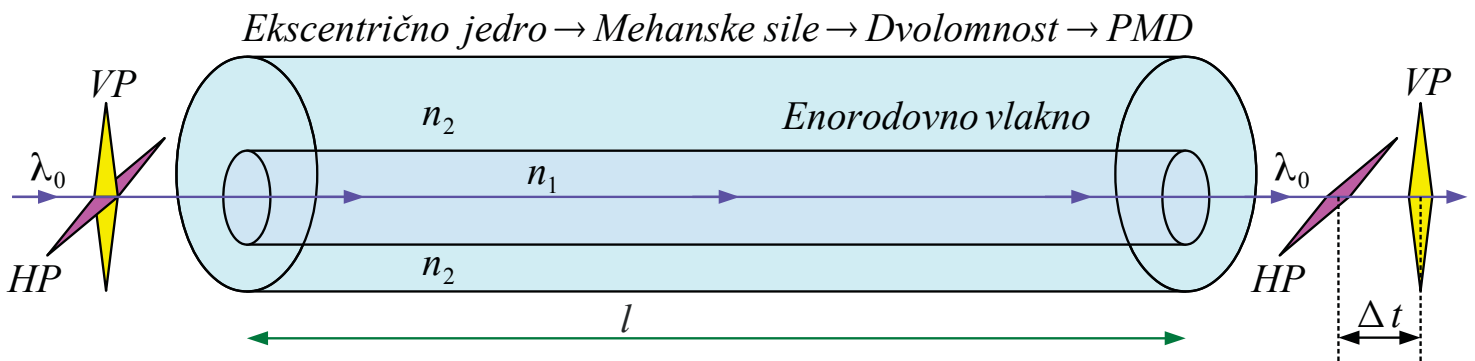
9/125 ali 10/125 ≡ ITU G.652
 $D(1550nm) \approx +17 \frac{ps}{nm.km}$
 $a/l \approx 0.2dB/km \rightarrow 0.15dB/km$
 $A_{jedra} \approx 70 \mu m^2$

DSF ali 8/125 ali ITU G.653
 $D(1550nm) \approx 0 \frac{ps}{nm.km}$
 $a/l \approx 0.5dB/km \rightarrow 0.25dB/km$
 $A_{jedra} \approx 30 \mu m^2$
 Neuporabno zaradi nelinearnosti

21 - Vlakna s premaknjeno razpršitvijo



22 - Kompensacija barvne razpršitve



HE_{11} ima dve različici HP + VP, ki zaradi majhnih odstopanj nista popolnoma enaki med sabo!

$PMD \equiv$ Polarization Mode Dispersion

Dvolomnost je naključno porazdeljena!
Vlakno ne ohranja polarizacije!

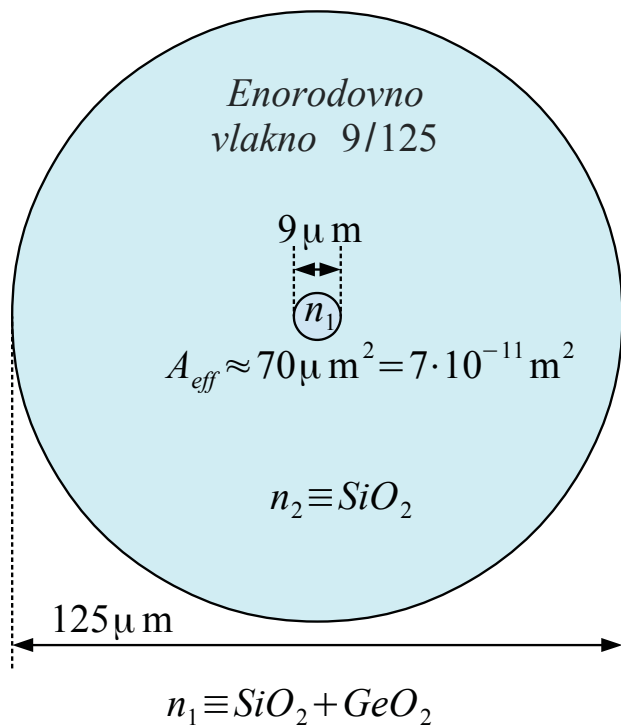
$\Delta t \approx D_{PMD} \cdot \sqrt{l}$ @ $l > 1\text{km}$

	D_{PMD}	$\Delta t(100\text{km})$	$\Delta t(10000\text{km})$
Stara vlakna <2000	$\sim 10\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	$\sim 100\text{ps}$	$\sim 1\text{ns}$
Sukana vlakna >2000	$\sim 0.1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	$\sim 1\text{ps}$	$\sim 10\text{ps}$

$\Delta t \equiv$ naključen!
V položenem kablu se spreminja počasi: tedni, meseci...

23 – Polarizacijska razpršitev

Sukanje vlakna med vlečenjem ~ 5 obratov/m



Zgled: $P \approx 100\text{mW}$ $n_1 \approx 1.46$ $Z_0 \approx 377 \Omega$

$S = \frac{P}{A_{eff}} \approx \frac{100\text{mW}}{7 \cdot 10^{-11} \text{m}^2} \approx 1.4\text{GW}/\text{m}^2 = 140\text{kW}/\text{cm}^2$

$|\vec{E}| = \sqrt{\frac{2 Z_0 S}{n_1}} \approx 850\text{kV}/\text{m} = 8.5\text{kV}/\text{cm}$

P	Učinek
1mW	Nelinearni pojavi!
10mW	Zažig vtičnic!
100mW	Max P na vtičnici!
1W	Max P v vlaknu!
10W	Taljenje jedra vlakna!

24 – Obremenitev materialov vlakna

Elektrostrikcija → povečanje $n = \sqrt{\epsilon_r} \uparrow$

$$n(E) = n_0 + n_1' \cdot E + n_2' \cdot E^2 + n_3' \cdot E^3 + \dots$$

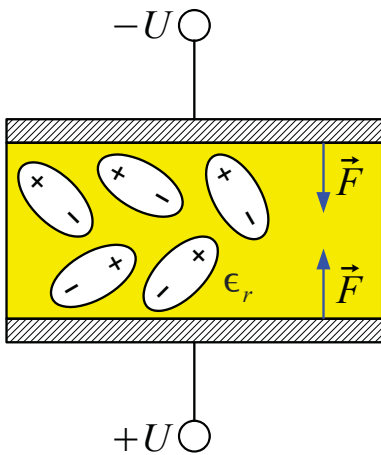
$n_2' \equiv$ Kerrov pojav (elektrostrikcija)

$n_1' \equiv$ Pockelsov pojav (elektrostrikcija + vgrajeni E_0)

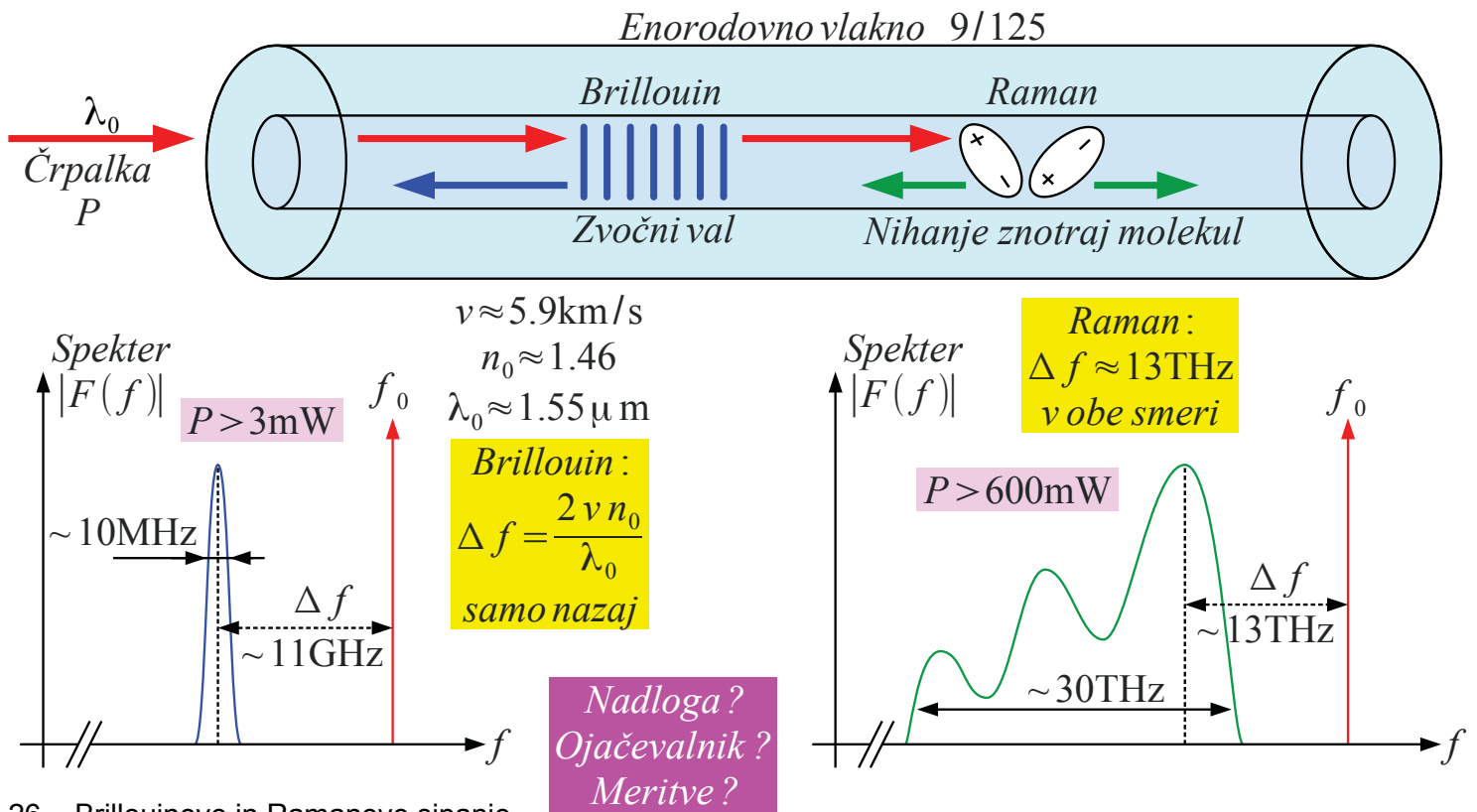
Steklo $\text{SiO}_2(+\text{GeO}_2)$ → vgrajeni $E_0 = 0 \rightarrow n_1' = 0$

$$S = \frac{E^2}{2Z} \rightarrow n(S) = n_0 + n_2 \cdot S$$

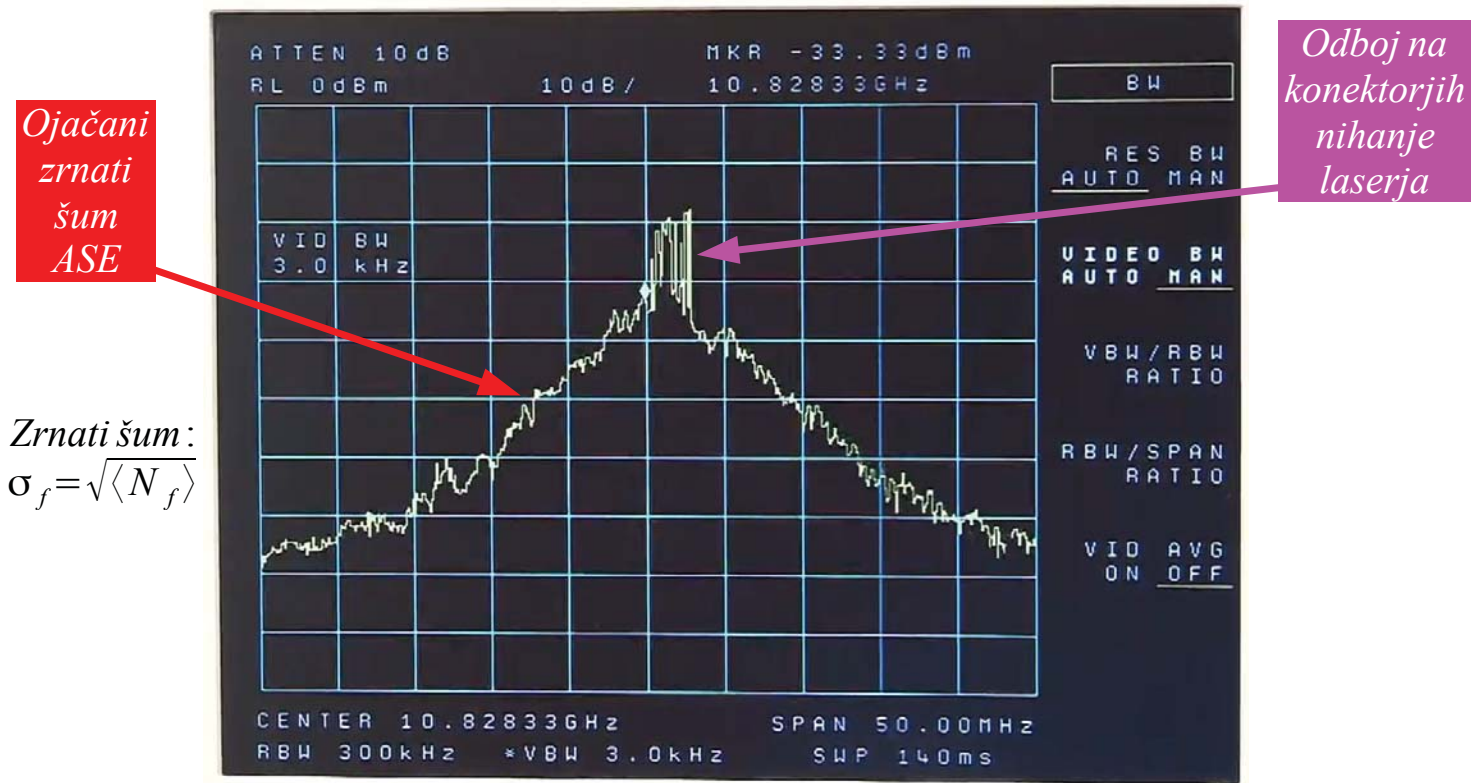
$$\text{Steklo } \text{SiO}_2(+\text{GeO}_2): n_0 \approx 1.46 \quad n_2 \approx 2.5 \cdot 10^{-20} \frac{\text{m}^2}{\text{W}} \dots 3.2 \cdot 10^{-20} \frac{\text{m}^2}{\text{W}}$$



25 – Elektrostrikcija v steklu



26 – Brillouinovo in Ramanovo sipanje



27 – Spekter Brillouinovega sipanja

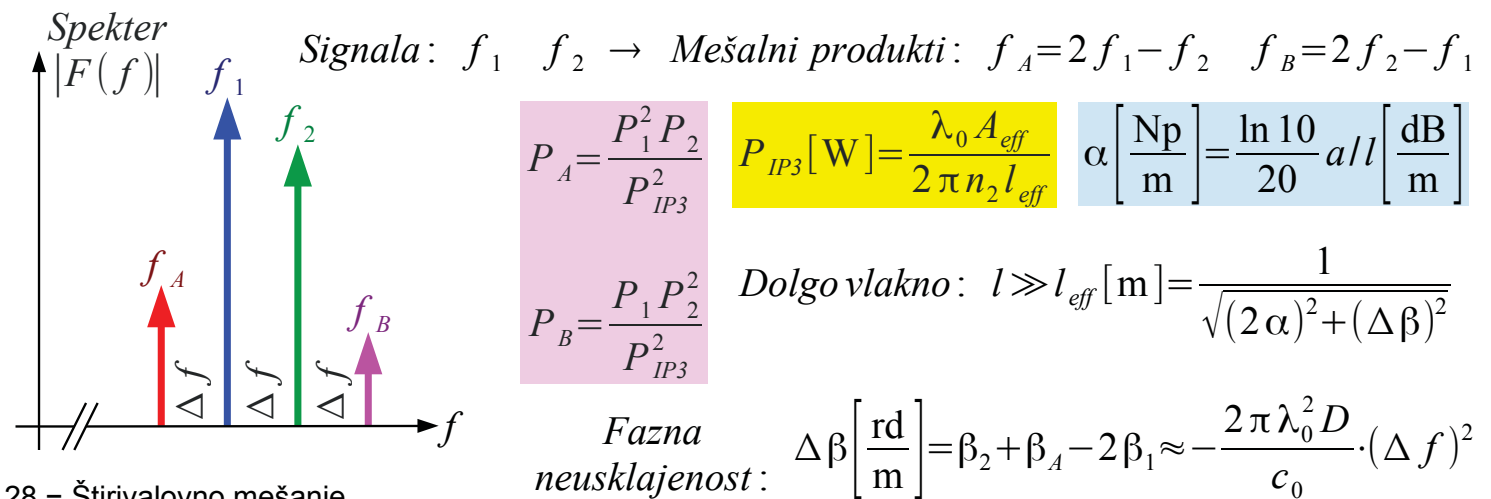
Lastna fazna modulacija: $\Delta\phi = \Delta k \cdot l = \frac{2\pi n_2 P}{\lambda_0 A_{eff}} \cdot l \approx 0.15\text{rd}$ $P = 100\text{mW}$ $A_{eff} = 70\mu\text{m}^2$
 $n_2 \approx 2.5 \cdot 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$

Linearni D – Nelinearni n → Solitonski prenos ~ 1995?

$\lambda_0 = 1550\text{nm}$ $l = 1\text{km}$

Križna fazna modulacija → Štirivalovno mešanje FWM (Four – Wave Mixing)

Radijski inženirji 50 let pred optiki: Intermodulacijsko popačenje IMD

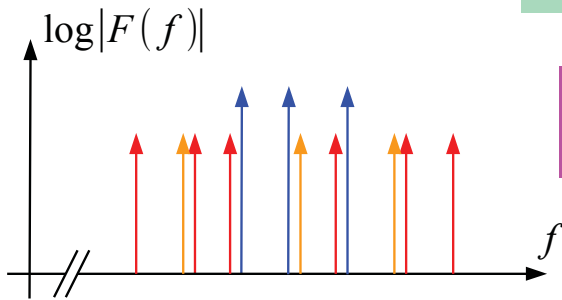


28 – Štirivalovno mešanje

~1995 → *Vlakno DSF G.653*
 $a/l \approx 0.3 \text{ dB/km}$ $A_{\text{eff}} \approx 30 \mu\text{m}^2$
 $D \approx 0 \rightarrow \Delta\beta \approx 0$

$$l_{\text{eff}} \approx \frac{1}{2\alpha} \approx 14.5 \text{ km}$$

$$P_{IP3} \approx 20 \text{ mW} = +13 \text{ dBm}$$



4 kanali WDM $\times 2.5 \text{ Gb/s} = 10 \text{ Gb/s}$

$$\lambda_0 \approx 1550 \text{ nm}$$

$$n_2 = 2.5 \cdot 10^{-20} \frac{\text{m}^2}{\text{W}}$$

$$B \approx 4 \text{ THz}$$

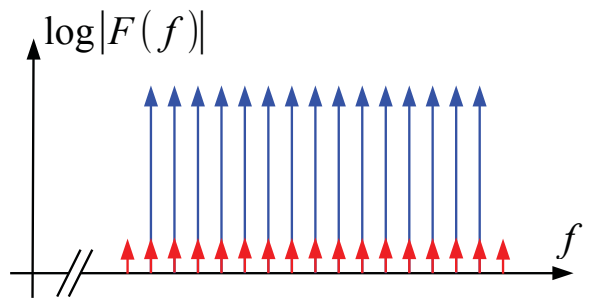
$$P_{\text{FWM}} = \frac{P^3}{P_{IP3}^2}$$

~2015 → *Vlakno NZDSF G.655*
 $a/l \approx 0.2 \text{ dB/km}$ $A_{\text{eff}} \approx 80 \mu\text{m}^2$
 $D \approx +5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ $\Delta f = 100 \text{ GHz}$

$$\Delta\beta \approx -2.52 \text{ rd/km} \quad |\Delta\beta| \gg 2\alpha$$

$$l_{\text{eff}} \approx \frac{1}{|\Delta\beta|} \approx 0.4 \text{ km}$$

$$P_{IP3} \approx 2 \text{ W} = +33 \text{ dBm}$$



40 kanalov WDM $\times 100 \text{ Gb/s} = 4 \text{ Tb/s}$

29 – Prekoceanski kabel

(1) *Optični tranzistor (enosmerni ojačevalnik za svetlobne frekvence) ne obstaja!*

Ne poznamo niti fizikalnih osnov enosmernega ojačevalnika $B \approx 300 \text{ THz}$?

Brez tranzistorja ni optičnega računalnika!

Nobelova nagrada čaka izumitelja!

(2) *Optični gradniki so preveliki za integracijo?*

Fotolitografija v mikroelektroniki

1970 ~ $10 \mu\text{m}$ → 2020 ~ 10 nm

$B \approx 1 \text{ GHz}$ → $B \approx 1 \text{ THz}$

Svetlobni valovod ~ $10\lambda \equiv \sim 10 \mu\text{m}$

Uklonska mrežica ~ $1000\lambda \equiv \sim 1 \text{ mm}$

~~Fotonična integrirana vezja~~
 pasivna

(3) *Optični gradniki (p) ostajajo predragi?*

~1990 *Erbijev vlakenski ojačevalnik za velikostni razred cenejši od SDH regeneracija.*

~2020 *SFP modul (TX + RX) za velikostni razred cenejši od erbijevega ojačevalnika.*

~2020 *Cenena elektronika popravlja barvno razpršitev ter PMD.*

30 – Neuspehi optike

Optična transportna omrežja z linijskimi kapacitetami za mobilna omrežja 5G

Optical transport networks with line capacities for 5G mobile networks

Klaus Samardžić

Smart Com

klaus.samardzic@smart-com.si

Povzetek

Mobilno omrežje 5G bo omogočilo nič manj kot povezovanje vsega z vsem ostalim. Razvoj komunikacijskih storitev za industrijo 4.0 ni mogoč brez mobilnega omrežja 5G. Uresničitev takšnega omrežja z obvladljivimi naložbami zahteva uporabo sodobnih tehnologij in rešitev, kot so zagotavljanje storitev v oblaku, virtualizacija funkcionalnosti v omrežju in učinkovita uporaba radijskih frekvenčnih pasov. V tem prispevku bomo podali pregled novih arhitektur za transportna omrežja Forehaul, Midhaul in Backhaul, ki omogočajo uporabo odprtega radijskega dostopnega omrežja (O-RAN) 5G.

Abstract

A 5G mobile network will allow for nothing less than connecting everything to everything else. The development of communication services for the Industry 4.0 is not possible without the 5G mobile network. Industry 4.0 is about the significant transformation taking place in the way goods are produced and delivered. The realization of such a network with manageable investments requires the implementation of modern technologies and solutions, such as the provision of cloud services, virtualization of functionality in the network and efficient use of radio frequency bands. In this paper, we will provide an overview of new

architectures for the Forehaul, Midhaul and Backhaul transport networks enabling the implementation of 5G Open Radio Access Network (O-RAN).

Biografija avtorja

Klaus Samardžić ima tridesetletne izkušnje pri razvoju in implementaciji komunikacijskih sistemov. Prvih deset let je sodeloval ali vodil razvoj komunikacijskih sistemov. V podjetju Fotona, takrat uveljavljenemu podjetju na področju optičnih sistemov, je sodeloval pri razvoju komunikacijskega sistema za prenos po optičnih vlaknih, ki je bil uspešno implementiran v Sloveniji in Sovjetski zvezi. V podjetju Smart Com, vodilnem sistemskem integratorju, že dvajset let sodeluje pri realizaciji komunikacijskih omrežij, z implementacijo optičnih in radijskih komunikacijskih sistemov v Sloveniji in na območju Jadranske regije. Kot pooblaščen inženir Inženirske Zbornice Slovenije, z izkušnjami pri realizaciji projektov, ima vpogled v vse faze življenjskega cikla projekta, od načrtovanja, izvedbe in preizkusa sprejemljivosti do prehoda v operativno fazo. Takšne izkušnje mu omogočajo razumevanje potreb operaterjev komunikacijskih omrežij in želja uporabnikov komunikacijskih storitev. Razumevanje potreb vseh vpletenih strani mu pride prav pri sodelovanju v tržnih dejavnostih ali pri evalvaciji prihodnjega razvoja komunikacijskih storitev.

Author's biography

Klaus Samardžić has thirty years of experience in the development and implementation of communication systems. The first ten years he has participated or led the development of communication systems. In Fotona, at that time an established vendor of optical systems he collaborated in development of an optical fiber communication system and its successful implementation in Slovenia and the Soviet Union. In Smart Com, a leading system integrator he has been involved in the realization of communication networks, implementing optical and radio communication systems in Slovenia and the Adriatic region for twenty years. As a Certified and Authorized Engineer for electrical engineering in civil works at Engineering Chamber of Slovenia with experience in the realization of communication networks projects he has insight into all phases of the project life cycle, from planning, implementation and acceptance testing to the transition into the operational phase. Such experiences allows him to understand the demands of communication networks operators and wishes of communication services users. When participating in marketing activities or evaluating the future development of provisioning communication services such understanding of the demands and wishes gives him the opportunity to offer solutions of mutual benefits for all involved parties.



Optična transportna omrežja za mobilna omrežja 5G

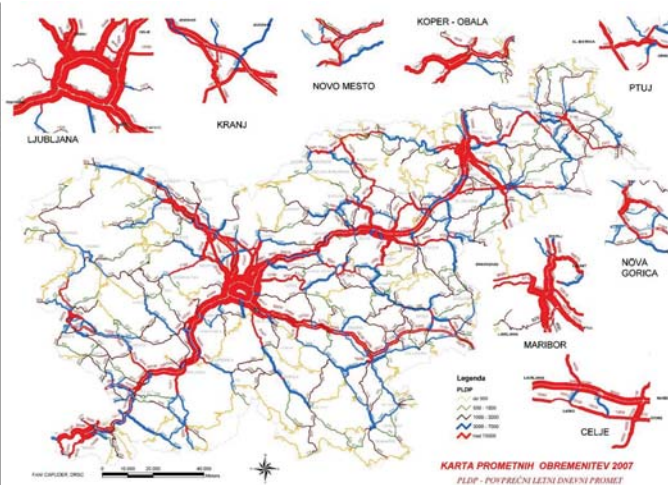
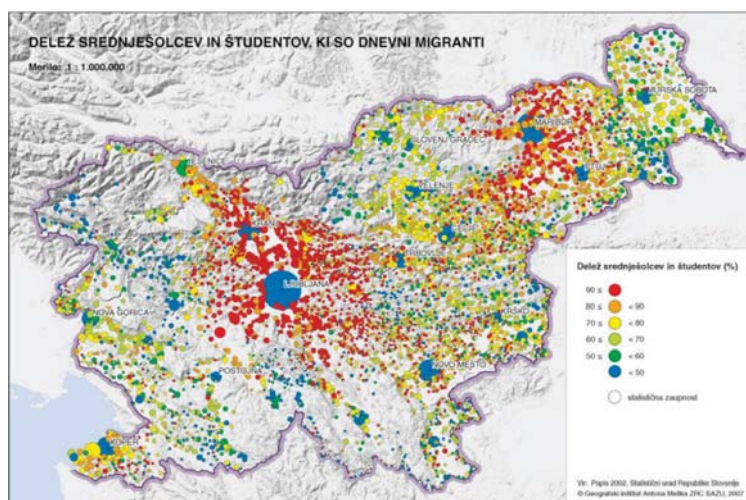
Klaus Samardžić

Mobilna omrežja 5G kot rešitev komunikacijskih potreb v Sloveniji

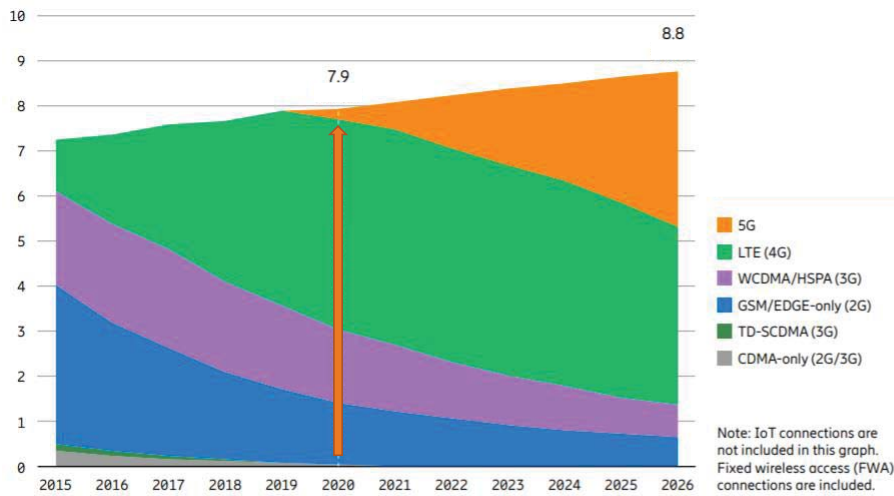


Stockholm 2012

Kdo potrebuje sodobne komunikacijske storitve v Sloveniji ?



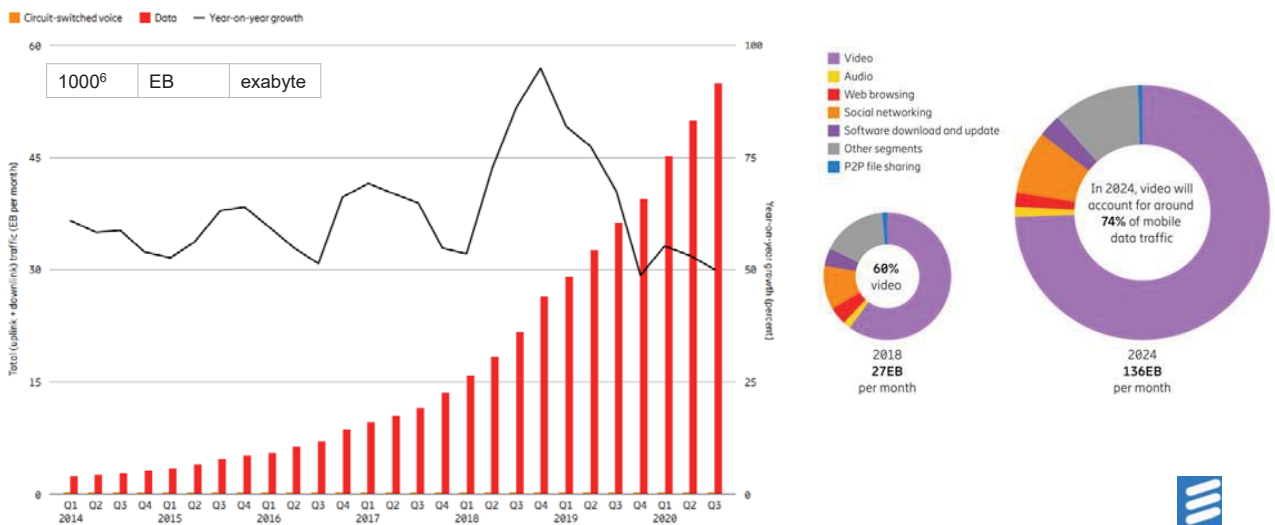
Rast povpraševanja po storitvah mobilnih omrežij



¹ Ericsson and GSA (October 2020).
² A 5G subscription is counted as such when associated with a device that supports New Radio (NR), as specified in 3GPP Release 15, and is connected to a 5G-enabled network.



Podatkovni promet globalnega mobilnega omrežja in medletna rast (EB na mesec)

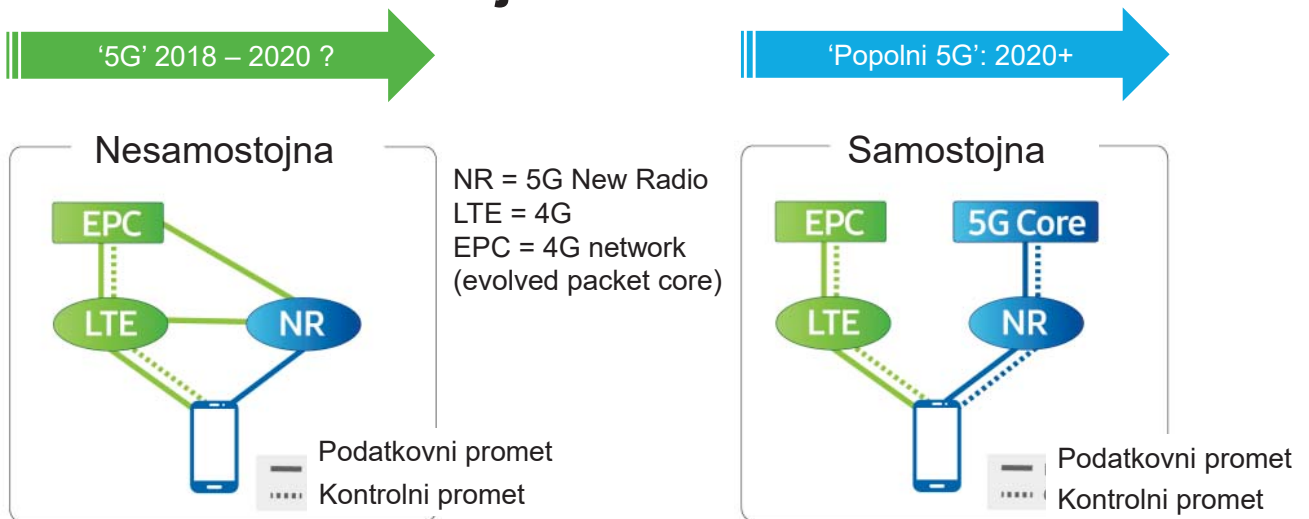




Koncepti 5G mobilnega omrežja pomembni pri načrtovanju transportnega omrežja

Stockholm 2012

5G mobilna omrežja – Dve arhitekturi



enhanced Mobile Broadband (eMBB)

Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC)
massive Machine Type Communications (mMTC)

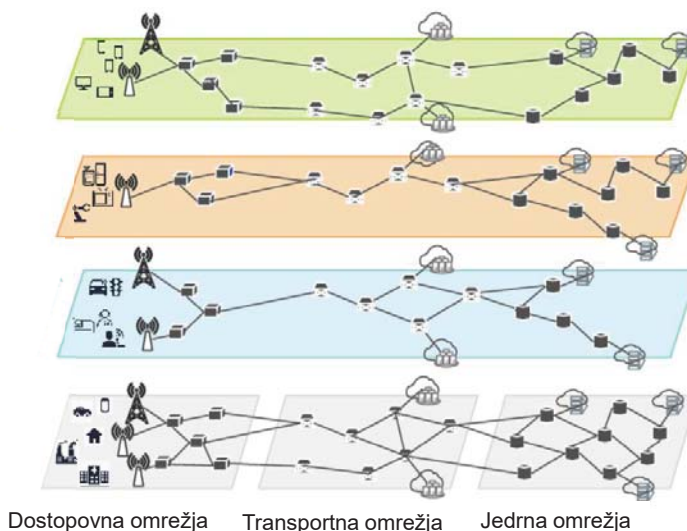
5G mobilna omrežja – Network slicing

enhanced Mobile Broadband (eMBB)

massive Machine Type Communications (mMTC)

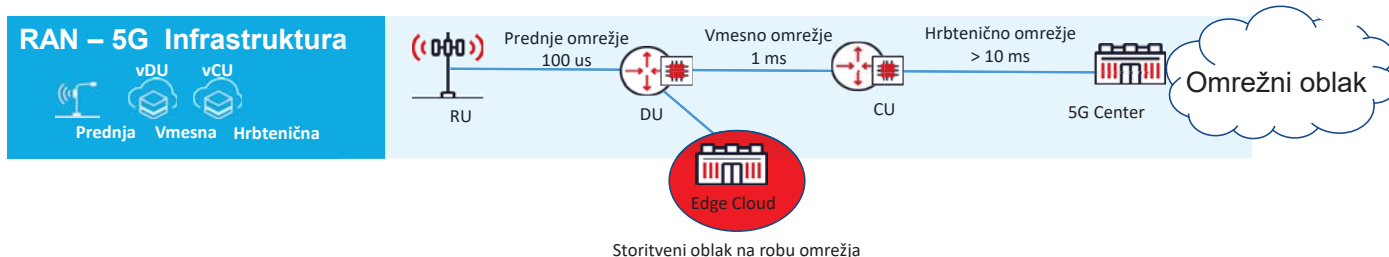
Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC)

Arhitektura omrežja



5G mobilna omrežja – Storitveni oblak na robu omrežja

- MEC - Multi Access Edge Computing
- CORD - Centralna lokacija je načrtovana kot podatkovni center
- V-RAN – Virtualni RAN (Radio Access Network)

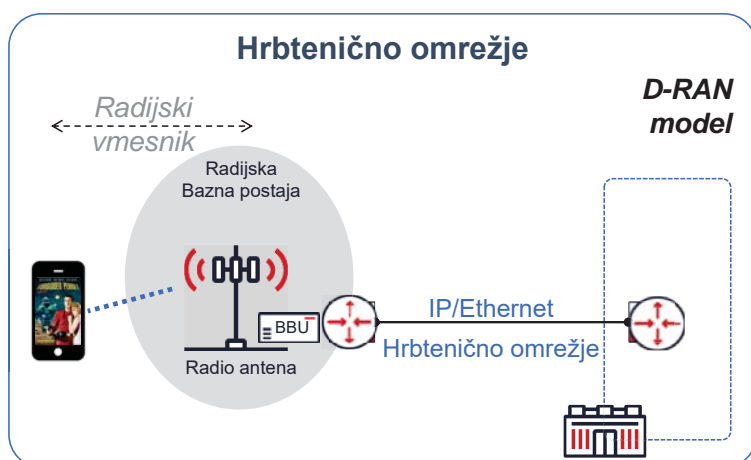


D-RAN, C-RAN ...



Stockholm 2012

Razvoj 4G -> 5G Realizacija makrocelic



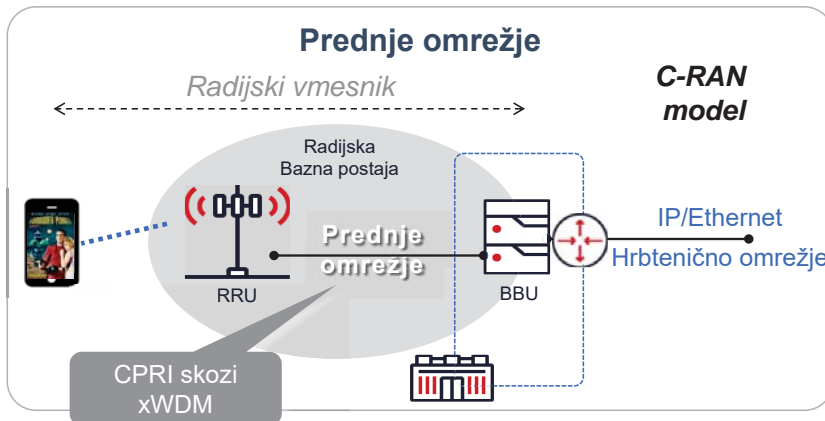
Omrežne zahteve:

- 10G linijski signali.
- Migracija od radijskih povezav proti infrastrukturi optičnih vlaken zaradi zahtevane kapacitete in zanesljivosti povezav.

D-RAN = Distributed RAN Radio Access Network

BBU = BaseBand Unit

Razvoj 4G -> 5G Prednje omrežje <-> Hrbtenično omrežje



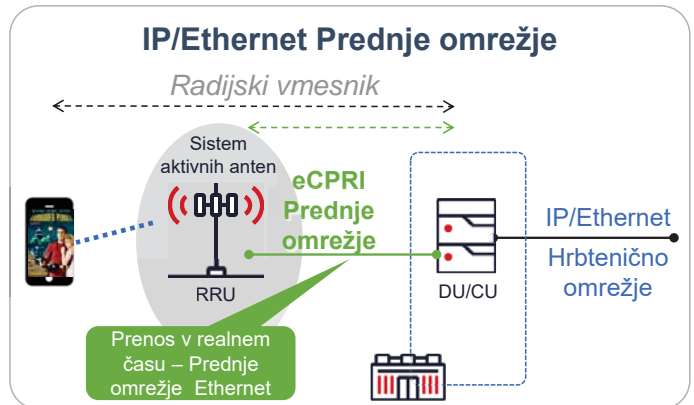
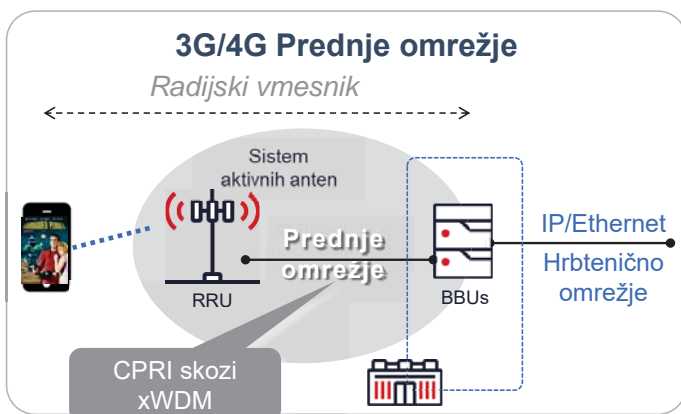
- 4G in 5G omrežja ni možno realizirati brez velikega števila radijskih enot z veliko pasovno širino radijskega kanala.
- Prednje omrežje omogoča, da so te radijske enote majhne in številne.

RAN = Radio Access Network
 C-RAN = Cloud RAN, Centralized RAN
 BBU = BaseBand Units co-located
 RRU = Remote Radio Unit
 CPRI = Common Public Radio Interface



Ali je eCPRI potreben za 5G omrežja

DU: 5G Distributed Unit
 CU: 5G Centralised Unit
 RRU: Remote Radio Unit

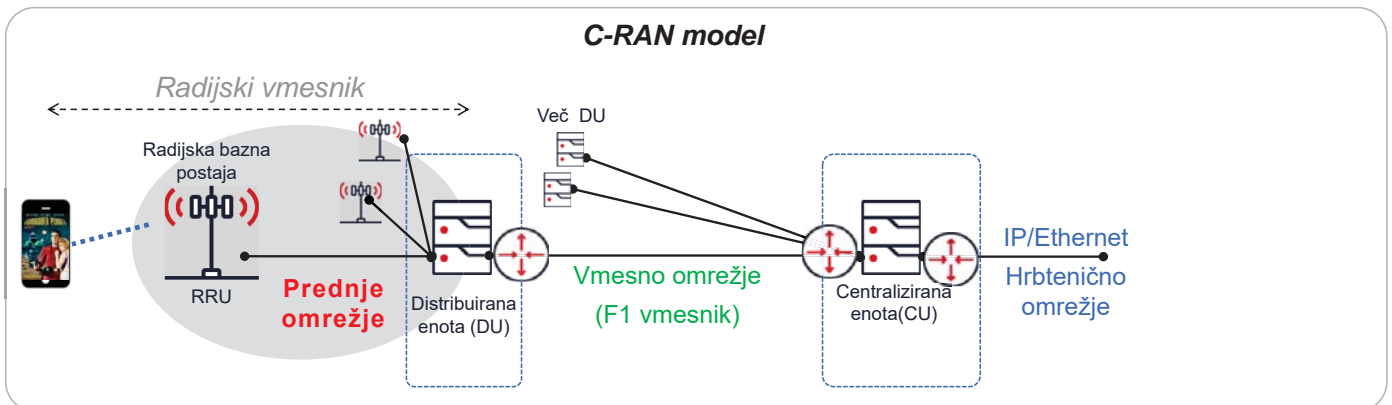


Radijski vmesnik / Prednje omrežje	4G Storitev
5 Gb/s	300 Mb/s >
5 Gb/s	150 Mb/s <

Radijski vmesnik	Prednje omrežje	5G Storitev
236 Gb/s	20 Gb/s	3 Gb/s >
236 Gb/s	10 Gb/s	1.5 Gb/s <

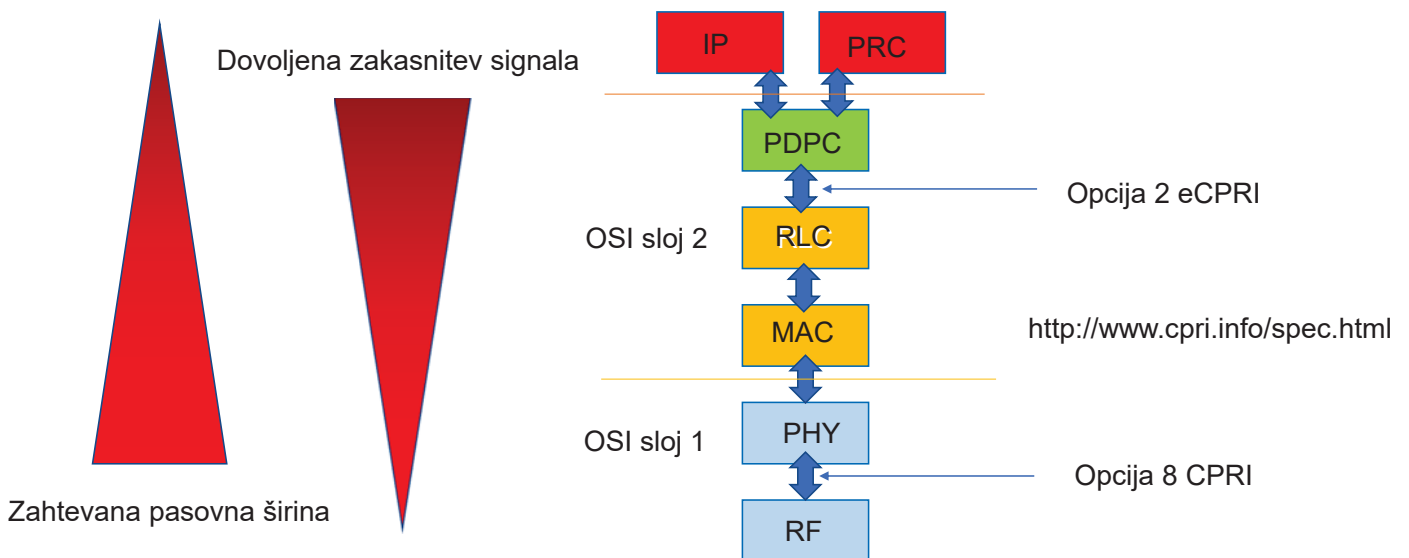


Zakaj Vmesno omrežje?

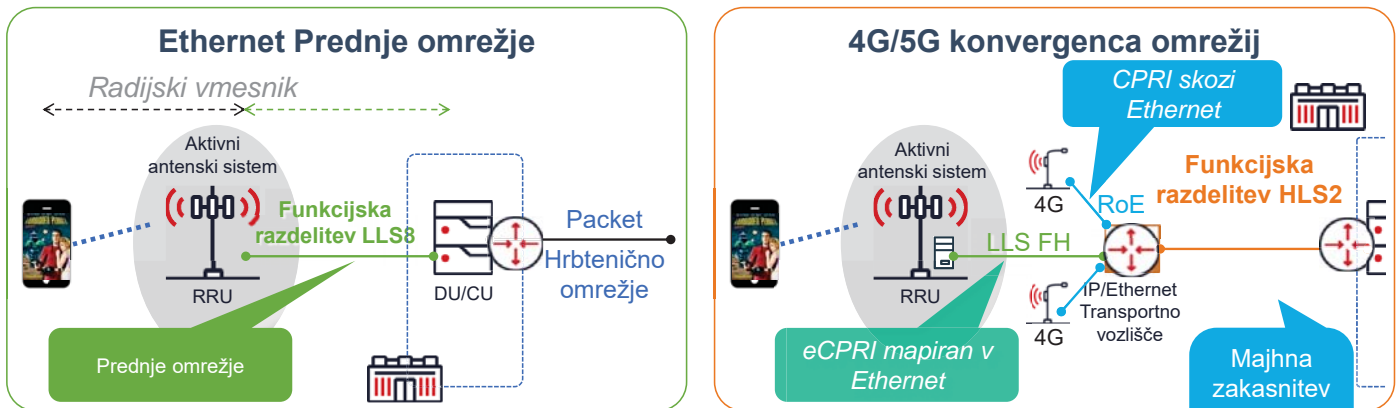


- Centralizirani RAN omogoča enostavnejše koordinacijske funkcije celic.
- Omogoča zmanjšanje stroškov z uporabo delno navideznega (V) RAN.
- Vmesno omrežje je realiziran z navadnimi Ethernet protokoli.

eCPRI evolved - Common Public Radio Interface



Konvergenca omrežji



Funkcijska razdelitev (split) LL :

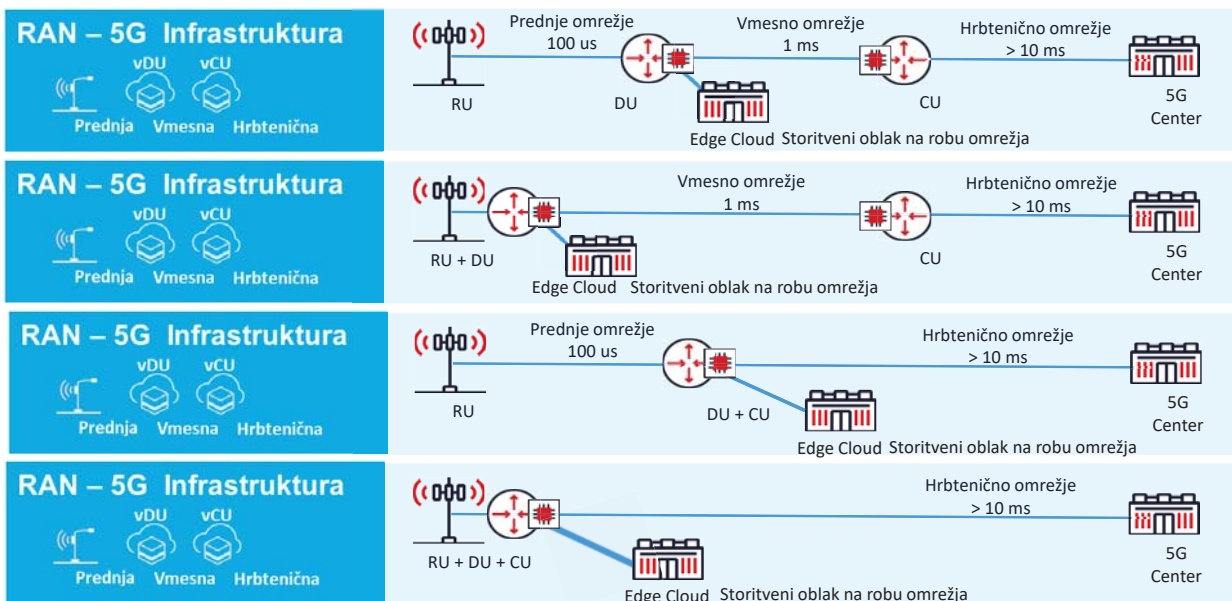
- eCPRI 1.1
- xRAN Fronthaul 1.0
- IEEE 1914.3 RoE

Funkcijska razdelitev (split) HL (IP ali Ethernet):

- 5G: 3GPP F1 (3GPP Rel-15)
- ng-LTE: 3GPP V1 (3GPP Rel-16)



Planiranje IP/Transporta in radijskega omrežja

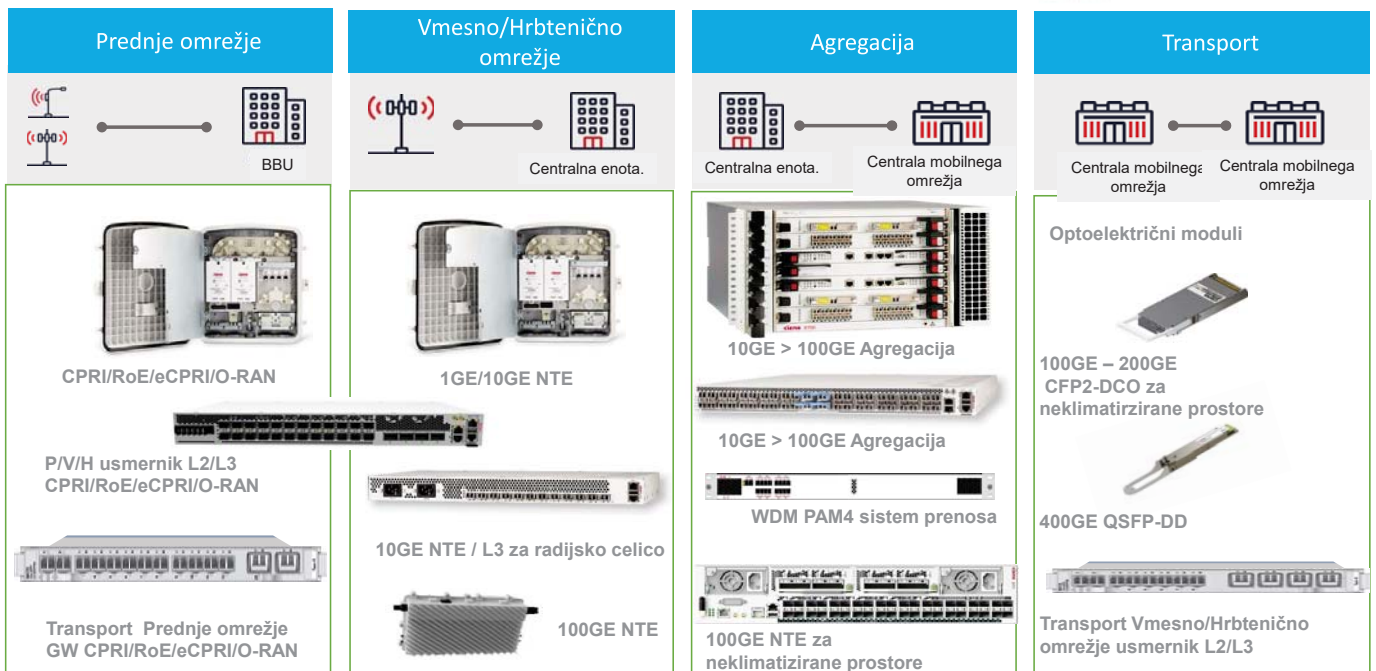




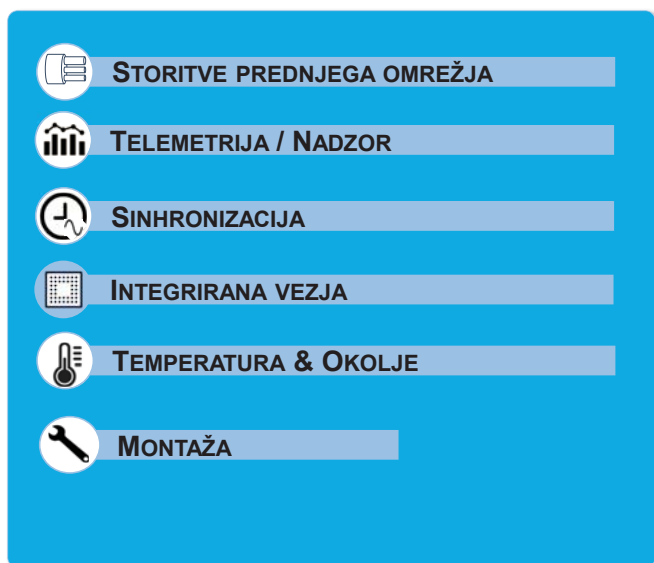
Implementacija sodobnega RAN dostopovnega omrežja

Stockholm 2012

Implementacija 4G/5G



Paketni 4G/5G sistem za prednje omrežje

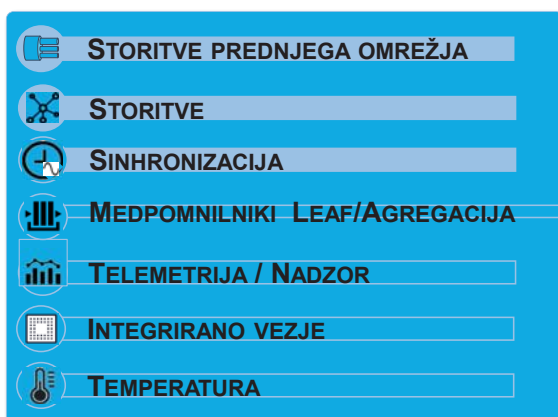


(2) 100G QSFP28

(12) 25G/10G SFP28



Usmerjevalnik za kreiranje P/V/H omrežnih rezin



GNSS/ Časovni signali in nadzor

(2) QSFP-DD
(100G/200G/400G)(32) SFP28
(25G/10G/1G)

(12-16) CPRI



WDM PAM-4 Linijski sistem

- Realizacija $N \times 100$ Gbit/s povezav za razdalje do 80 km z minimalnimi investicijami.. Bilo je potrebno nekaj inovativnosti za razvoj **linijskega sistema, ki omogoča prenos do 8×100 Gbit/s Ethernet signalov** na razdaljo do 80 km z uporabo signalov z modulacijo **PAM-4 (Pulse-Amplitude Modulation 4-Level)**.
- Če omrežni operater razpolaga s sodobnimi komunikacijskimi Ethernet stikali ali usmerniki, ki vsebujejo QSFP28 vmesnike za WAN (Wide Area Network) omrežja je do večjih linijskih kapacitet en enostaven korak. Postavitev linijskega sistema s PAM-4 linijskim signalom in uporaba ustreznih QSFP28 optoelektričnih modulov.



- Optoelektrični pretvorniki za 100 Gbit/s signale skozi čas: CFP, CFP2, CFP4, QSFP28



Stockholm 2012

Orkestracija– popolni pregled nad kreiranjem storitev v omrežju in zagotavljanje QoE končnega uporabnika

- https://www.youtube.com/watch?v=IJtX_mPiOCw



OpenFlow
NETCONF/YANG
SNMP
CLI



RESTful API
GET PUT POST DELETE

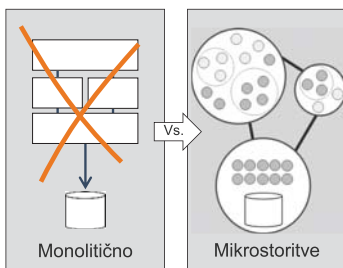


blueplanet

Inteligentna
Avtomatizacija

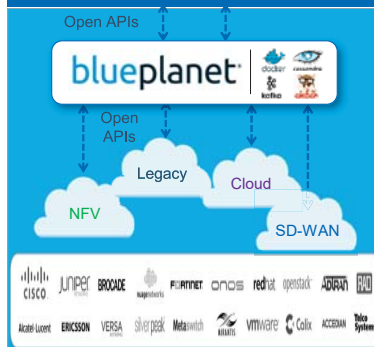
Adaptivna
Omrežja

Platforma zasnovana na
mikrostoritvah (containers)



Modularnost in nadgradljivost
ter možnost hitrih sprememb

Koncept dostopnosti in
odprtokodna orodja



Programiranje v različnih
tehnoloških okoljih
in omrežna fleksibilnost

DevOps
Programabilnost



Operativna agilnost
In celovito razvojno
in uporabniško okolje



Potek dela z Blue Planet DevOps orodji



Bistvo

- 5G Mobilna omrežja za sodobne komunikacijske storitve.
- Skupina <https://open-ran.org> si je postavila za cilj: odpreti tradicionalne RAN sisteme proizvajalcev z določitvijo enotnih protokolov in dezintegracijo kompleksnih sistemov ter vpeljati nova programska orodja za dinamično konfiguracijo storitev.
- Enotno transportno omrežje z možnostjo določanja rezin (slice) omrežja za določeno storitev.
- 5G RAN Prednje, Vmesno in Hrbtenično omrežje.
- Celovita orkestracijska platforma za zagotovitev kreiranja in ponujanja storitev v omrežju.





email: klaus.samardzic@smart-com

twitter: @KlausSamardzic

tel: 040 882594

www.smart-com.si

Uporaba 200 Gbps prenosnih sistemov DWDM na jedrnem omrežju RUNE in priklop prvih rezidenčnih uporabnikov na 10 Gbps simetričnem dostopovnem omrežju XGS-PON

Use of 200 Gbps DWDM transmission systems on the RUNE core network and connection of the first resident users on a 10 Gbps symmetric XGS-PON access network

Goran Živec

RUNE – Rural Networks

goran@vahta.eu

Povzetek

Uvodoma je predstavljen kratek povzetek izvedbene dinamike projekta RUNE. Prikazana je geografska umestitev projektov in njihov trenutni status. Nadaljevanju predstavitve je osredotočeno na agregacijsko/jedrno omrežje, s poudarkom na spremembi izhodišč določanja potrebnih zmogljivosti teh nivojev pri ultra-hitrih širokopasovnih omrežjih. V zadnjem delu je ob priklučitvi prvih testnih gospodinjstev uporabnikov na veleprodajno storitev 10Gbit/s podano še razmišljanje o primerjavi infrastrukturnih zmogljivosti s tistimi, ki jih maloprodajni trg ponuja končnim uporabnikom.

Abstract

Initially a short overview of the deployment dynamics of the RUNE project is given, showing the geographical extension and current status. A focus is given to the aggregation/core network, with emphasis on challenges related to shifts in the capacity planning in ultra-fast broadband networks. As the first residential test users were connected to a 10Gbps, XGS-PON supported wholesale service, a reflection on how to compare infrastructural capacities to retail offerings over same infrastructure is given.

Biografija avtorja

Goran Živec se je rodil leta 1973. Diplomiral je iz ekonomije na Univerzi v Trstu, ima MBA iz mednarodnega poslovanja na MIB School of Management in diplomo iz informacijske tehnologije na Univerzi v Liverpoolu. Ima dolgoletne izkušnje iz vodenja v kovinski industriji, gradbenih materialov, potrošniškem blagu in v prosveti. V sektorju TK je začel delati leta 2007, ko je ustanovil svoje podjetje. Od takrat se posveča problematiki širokopasovnega pokrivanja podeželja. Sodeloval je v mnogih projektih pokrivanja podeželja v Sloveniji. Trenutno je lastnik infrastrukturnega ponudnika na jugozahodnem delu Slovenije, ki ponuja dostopovno omrežje. Dela na več ravneh, organizira bodoča širokopasovna omrežja na slovenskem podeželju, sosednjih državah in širše v Centralni in Vzhodni Evropi.

Author's biography

Goran Živec was born in 1973. He holds MA from Economics at University of Trieste, MBA in International Business at MIB School of Management, Graduate degree in Information technology at University of Liverpool. After experiences on leading positions in metalworking, building materials, fast moving consumer goods and teaching, he landed in ICT sector by founding his own company in 2007. He has

been working since then on issues related to broadband coverage in rural areas. He participated in the preparation and execution of several rural projects in Slovenija. He now owns and runs an infrastructure provider, that operates an open access network in the south-western part of Slovenija. He is currently working on multiple levels, organizing future broadband projects in rural areas in Slovenija, neighbouring countries and in a broader Central and Easter Europe.

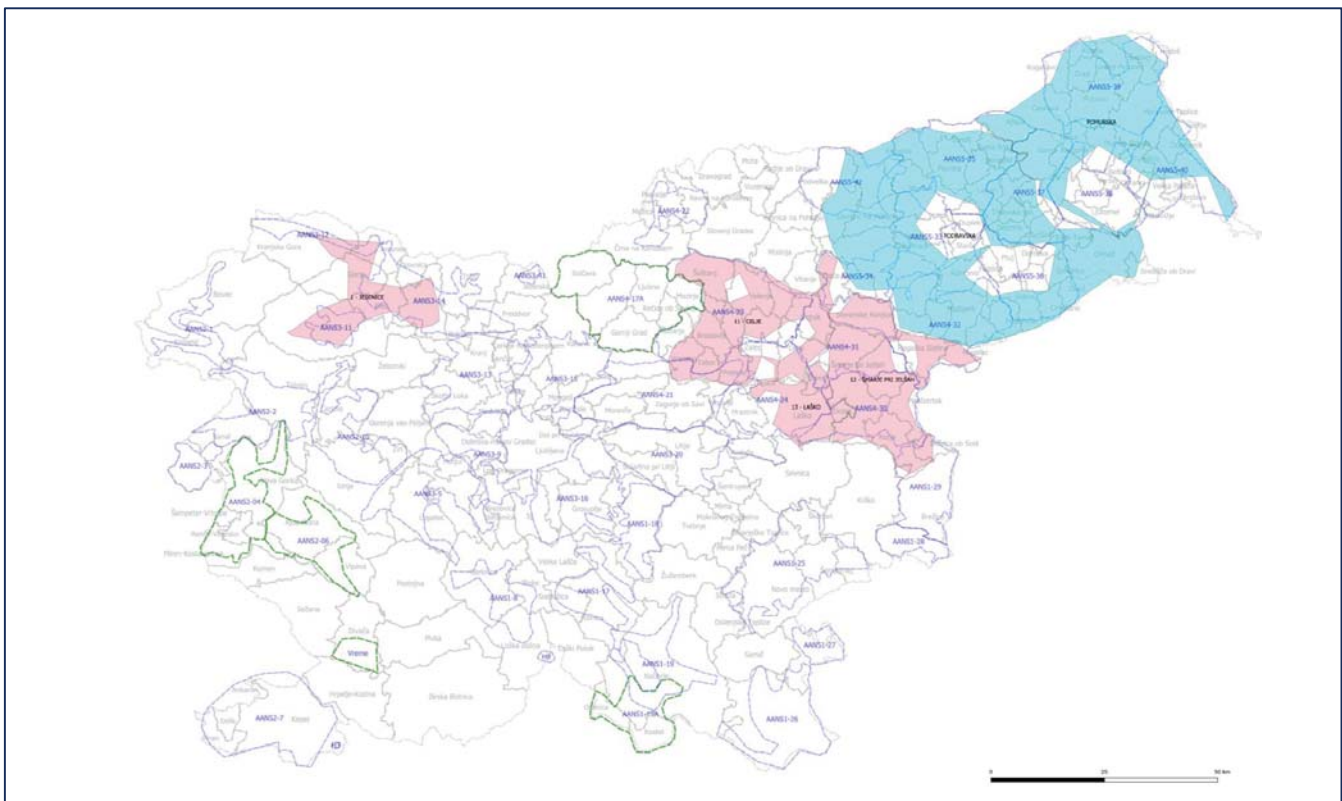


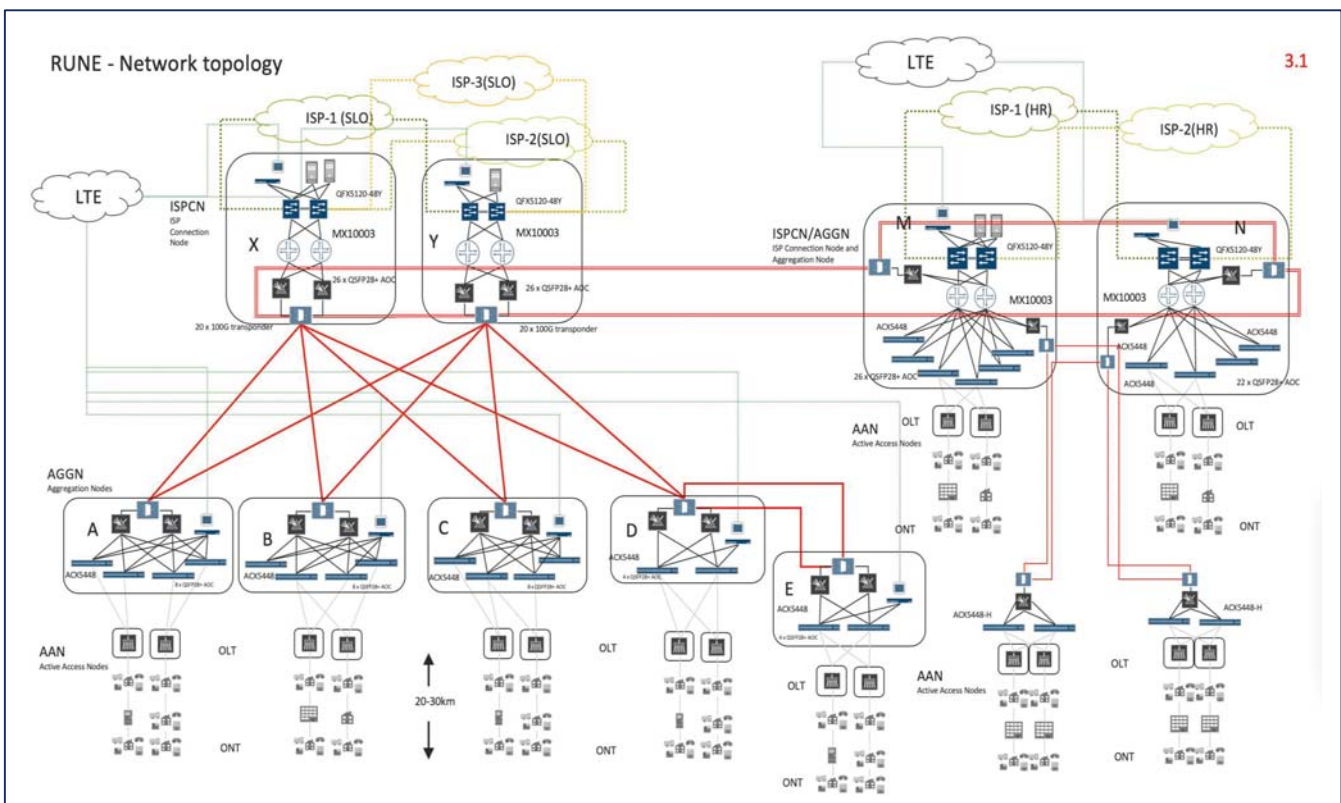
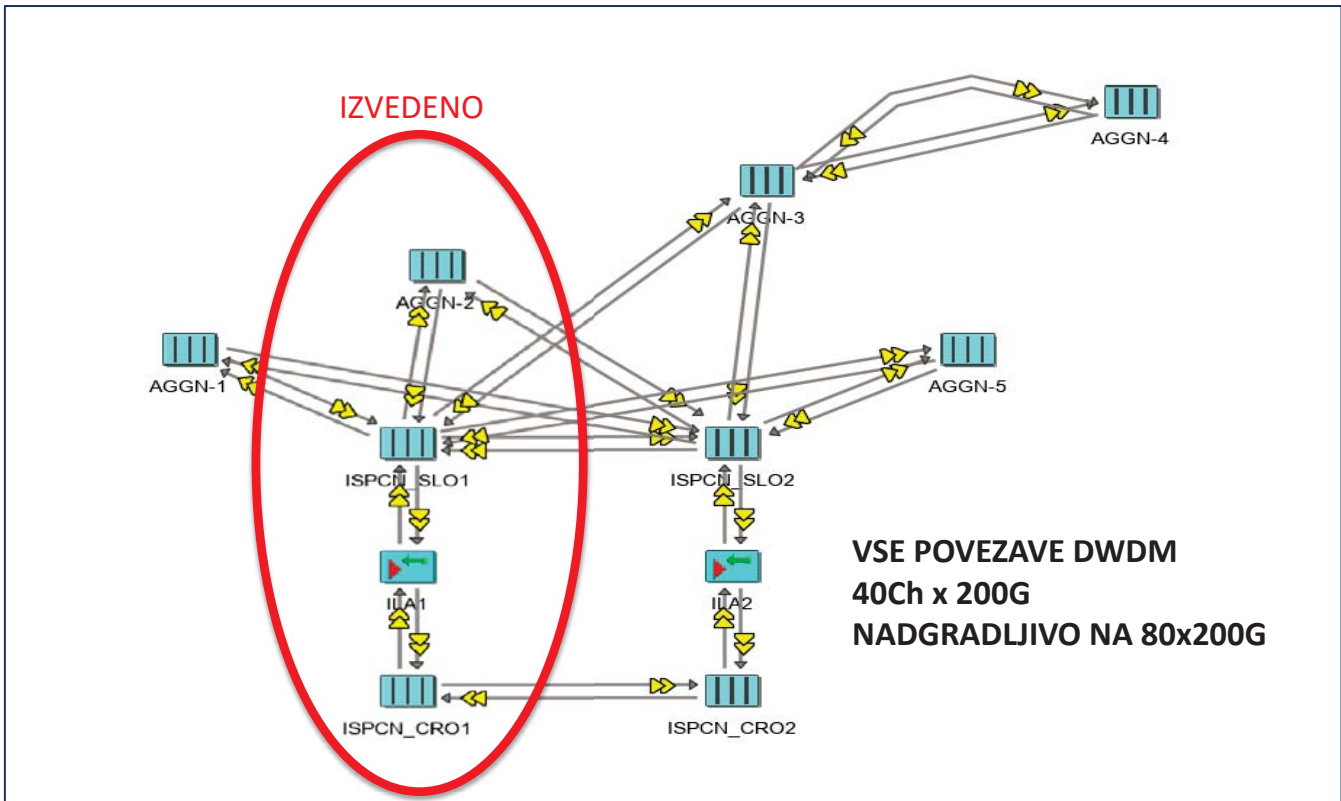
SOK 2021 RUNE

februar 2021



Introduction





▪ ZARADI:

- Spremembe v načinu uporabe omrežij/vsebin
- Always-on storitev
- XGS-PON (tudi sicer PON) topologije
- Koncepta wholesale-only infrastrukturni operater

JE POTREBNA SPREMEMBA KONCEPTA PROJEKTIRANJA!

- Pri PON tehnologijah povezujemo na isti fizični dostopovni vmesnik (preko pasivnih optičnih spliterjev) večje število uporabnikov (odvisno od delilnega razmerja, tipično do 64);
- Zmogljivost dostopovnega vmesnika se dinamično deli med uporabnike, ki v določenem trenutku rabijo pasovno širino;
- PON dostopovni vmesnik je dejanska točka v infrastrukturi, kjer se ista zagotovljena zmogljivost deli med več uporabniki, torej točka, kjer se zgodi oversubscription.
- Primer (zagotovljena hitrost):
 - Pri P2P Ethernet se je tipično 24x100Mbps uporabniških vmesnikov povežalo na 1G uplink ($1G/24=41Mbps$)
 - Pri GPONU 2,5G na do 64 uporabnikov ($2,5/64=39Mbps$)
 - Pri XGS-PON $10G/64=156Mbps$

- Pri PON omrežju bi morali govoriti o obeh hitrostih, najvišji in zagotovljeni;
- Ob pogoju, da v topologiji nimamo (poleg samega dostopovnega vmesnika) nobene druge točke, ki bi predstavljala ozko grlo, je možno zagotoviti hitrost end-to-end (od UNI do NNI);
- Dejanska razpoložljiva zmogljivost pri končnem uporabniku ob navedenem pogoju je v praksi vedno nad 2/3 najvišje možne hitrosti.

ŠPEKULIRANJE S STATISTIČNIMI MULTIPLEKSI VIŠJE V OMREŽJU DEGRADIRA STORITEV PRENOSA PODATKOV. NOVA OMREŽJA JE POTREBNO PROJEKTIRATI BREZ OZKIH GRL OD DOSTOPOVNEGA VMESNIKA DO JEDRA.



- goran.zivec@ruralnetwork.eu

Prostozačne optične zveze

Free-space optical communications

Luka Mustafa

IRNAS

musti@irnas.si

Povzetek

Prispevek se osredotoča na brezžični optični sistem KORUZA. KORUZA Pro je prvi cenovno ugodni in odprtokodni prostozačni optični komunikacijski sistem, ki omogoča naslednjo generacijo »last-mile« povezljivosti ter vsestranske možnosti namestitve. Podatki se varno prenašajo od točke do točke (»point-to-point«) preko okolju varnega kolimiranega žarka svetlobe, s prepustnostjo 1 Gbit/s ali 10 Gbit/s na razdalji do 150 m. Ta sistem, ki ne potrebuje licence, je odporen na radijske frekvence ali prenatrpanost pasov in je 10-krat cenejši v primerjavi z obstoječimi rešitvami na osnovi optičnih vlaken. Sistem KORUZA Pro je zasnovan za profesionalne uporabnike, a njegova odprta zasnova omogoča vsestranske možnosti za prilagoditve, eksperimentiranje in raziskovanje. Projekt KORUZA je leta 2020 prejel sredstva v okviru razpisa NGI Pointer (”Next Generation Internet Pointer”), namenjena nadaljnjemu razvoju sistema v sledečem letu, ter sodeluje pri pobudi COST Action NEWFOCUS.

Abstract

Presentation focuses on the KORUZA wireless optical system. KORUZA Pro is the first affordable and open source free-space optical communication system, enabling next generation last-mile connectivity and versatile installation options. Data is securely transmitted point-to-point over an

eye-safe collimated beam of light with 1 Gbps or 10 Gbps throughput at distances up to 150 m. This license-free internet access system is immune to RF or band over-crowdeness and is 10-times cheaper compared to existing fiber-based solutions. KORUZA Pro is designed for professional users, but not only – its open design enables versatile options for modifications, experimentation and research. KORUZA project has been granted “Next Generation Internet Pointer” (NGI Pointer) funding in 2020, to take the technology further over the course of the next year, and is participating in the COST Action NEWFOCUS call.

Biografija avtorja

Luka Mustafa je izvršni direktor in tehnični vodja Inštituta IRNAS, ki ga je ustanovil leta 2014 v Sloveniji, ter alumni fundacije Shuttleworth Foundation. V IRNAS-u vodi multidisciplinarno ekipo inženirjev, ki razvijajo odprtokodne in odprtostrojne sisteme, od CNC strojev, do elektronike in optičnih sistemov (FSO), kot je brezžični optični sistem KORUZA, promovira in uporablja odprta brezžična omrežja v okviru projekta *WLAN Slovenija*, ter upravlja tako nacionalne kot mednarodne brezžične hrbtenice (»backbones«). Sodelovanje z mednarodnimi partnerji je njega in njegovo ekipo uveljavilo kot razvojnega partnerja na področju interneta stvari (IoT), zlasti na področju naprav za varovanje živali (npr. sledilnikov divjih

živali), industrije, senzorike okolja in celo tehnologije IoT za veselje.

Author's biography

Luka Mustafa is the CEO and tech lead of Institute IRNAS, which he founded in 2014 in Slovenia, and a Shuttleworth Foundation alumni. At IRNAS, he leads a multidisciplinary team of engineers, developing open-source and open-hardware systems ranging from CNC machines, to electronics and fibre optic systems (FSO) like wireless optical system KORUZA, promotes and deploys open wireless networks in WLAN Slovenija project, and manages national as well as international wireless backbones. Collaboration with international partners has made him and his team a well-known development partner in the IoT field, especially in the field of animal conservation tech (e.g. wild animal trackers), industry, environmental sensing and even IoT technology for space.



KORUZA

Wireless free space optical communication system

Luka Mustafa, IRNAS Founder & CEO

www.irnas.eu

The Story of IRNAS.

2013

Interest in exploring **KORUZA FSO** & new ideas, lacking a development partner.

2014

**FOUNDED
INSTITUTE
IRNAS**



2016

**STARTED
IRNAS
INNOVATION
LAB**

TODAY

Crossdisciplinary team of 16, taking your idea to a finished product.



KORUZA

First affordable **5g** light-speed wireless optical communication system for urban environments.

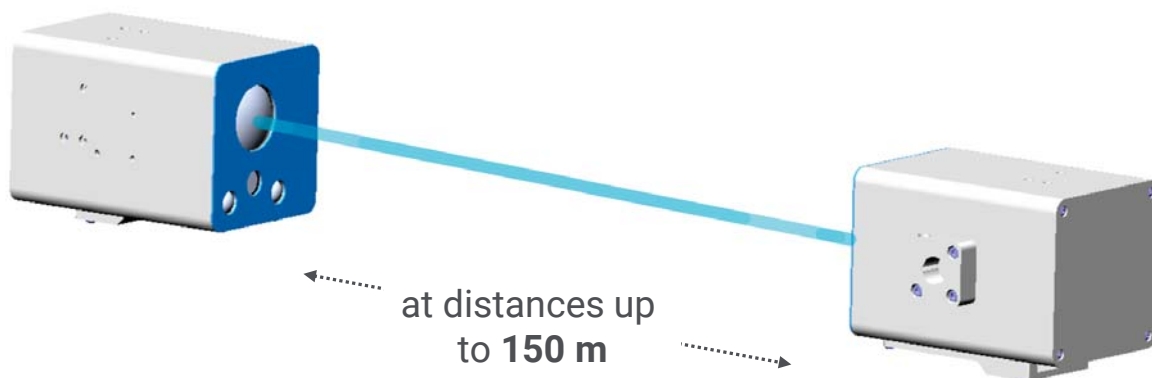
1. Secure point-to-point bridging
2. Increasing the capacity of WiFi and VDSL networks
3. Expanding the reach of FTTH
4. Last-mile mesh network
5. Open-source



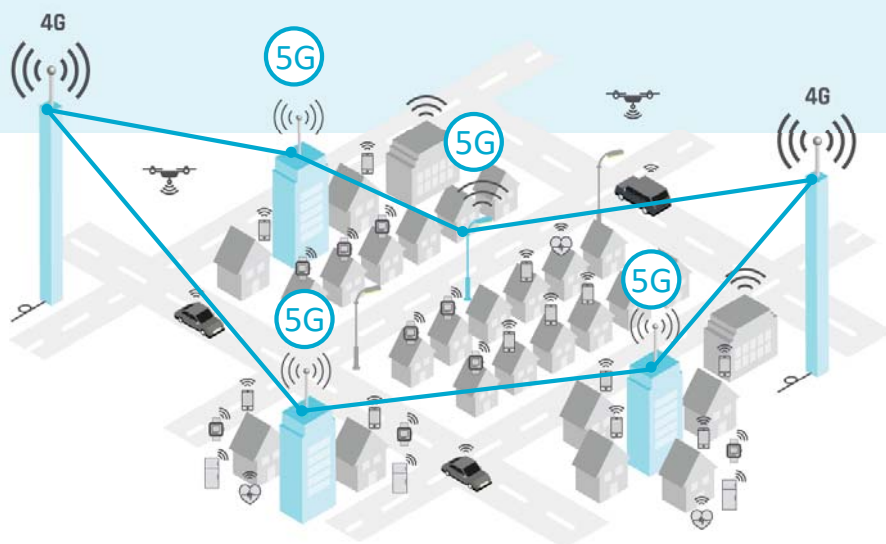
KORUZA offers **secure** point-to-point transmission over an **eye-safe** collimated beam of **infra-red** light.

1
Gbps

10
Gbps



APPLICATIONS - 5G NETWORKING



Healthcare monitoring systems



Driverless cars navigation



Drones/robotics applications



Connected consumers devices

Applications with custom KORUZA integration

✓ Smart cities

an alternative internet access infrastructure.



✓ Radio astronomical observatories

management of radio telescopes.

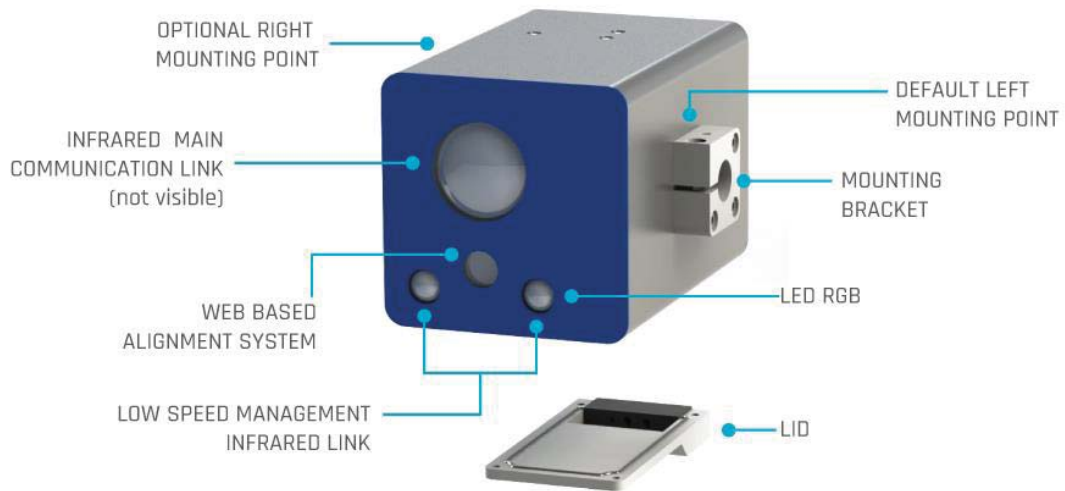


✓ Transportation and logistics

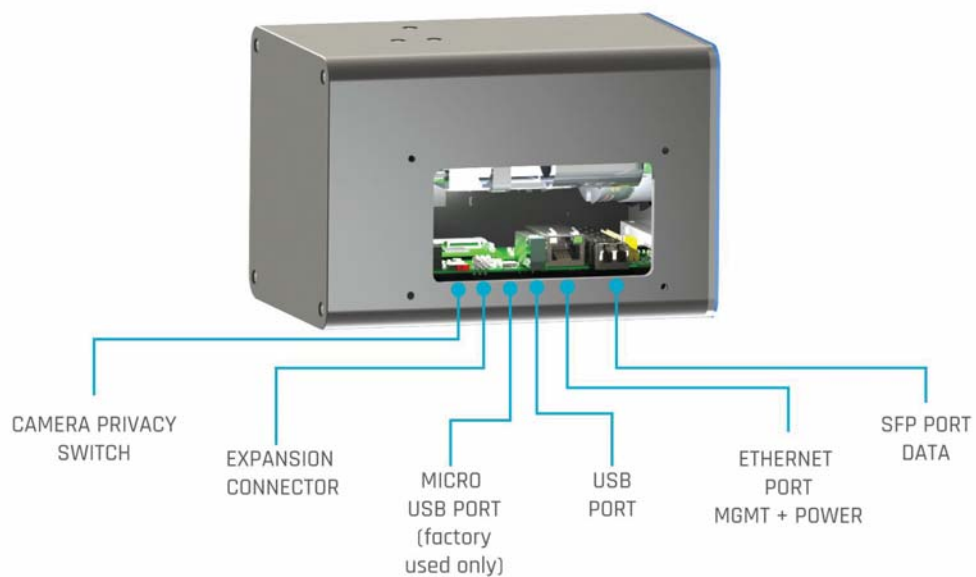
management of communication between harbour cranes, trains etc.



Unit Description

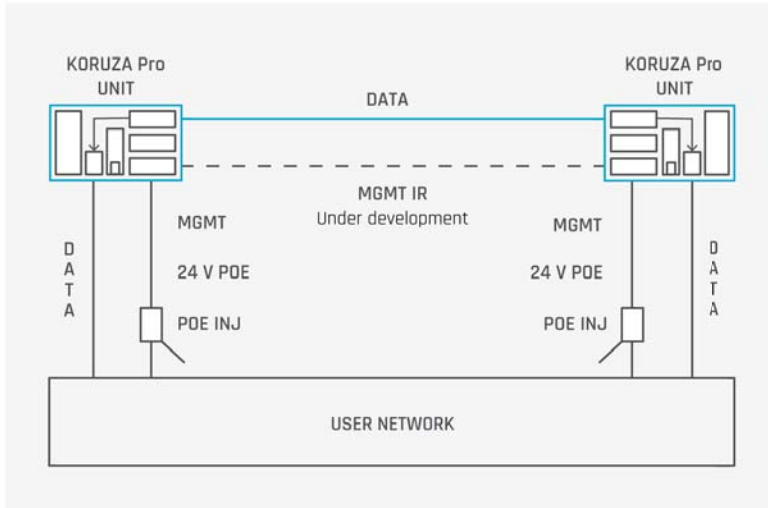


Unit Description

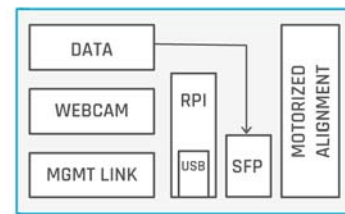


Link Diagram

KORUZA Pro NETWORK DIAGRAM

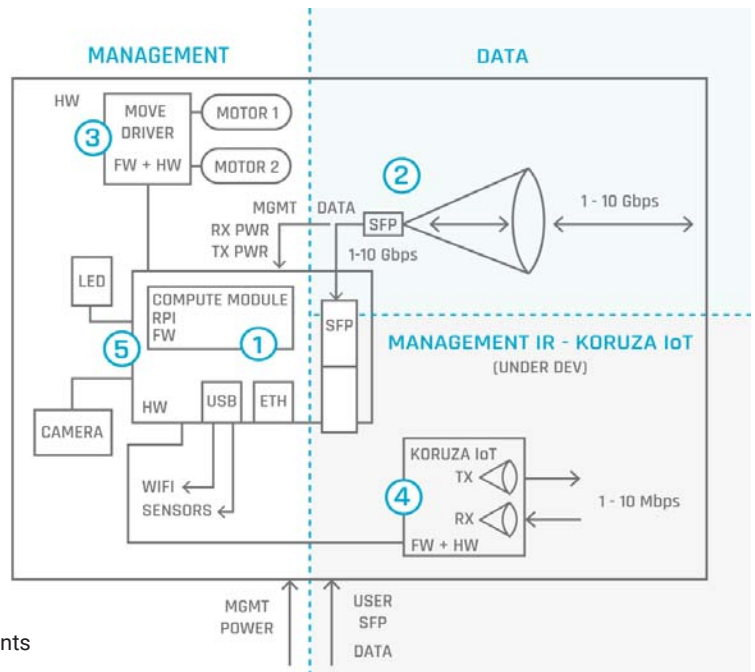


KORUZA Pro UNIT DIAGRAM



Block Diagram

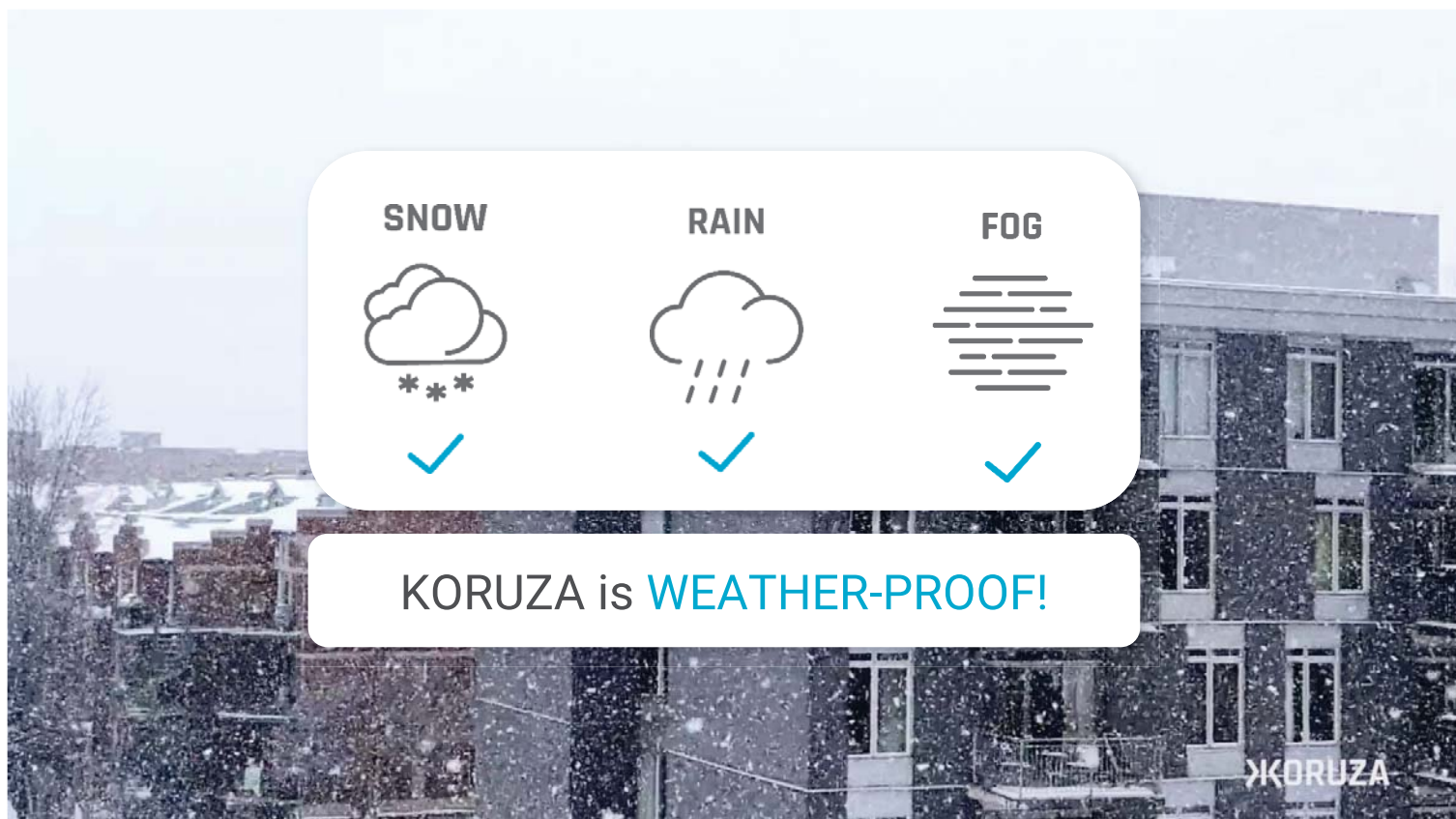
1. **COMPUTE MODULE**
 - Main processor with RPi compute module – Linux
 - High-speed data transmission
 - Alignment algorithms + management
 - FW +HW
2. **OPTICAL ARM**
 - Lens to SFP transceiver
 - Alignment webcam
 - HW
3. **MOVE DRIVER**
 - Controls two motors for alignment
 - FW+ HW
4. **KORUZA IoT**
 - Unit-unit management communication
 - Under development
 - FW+HW
5. **ENCLOSURE AND MAIN STRUCTURE**
 - IP57 enclosure with mounting options and cable entry points
 - HW





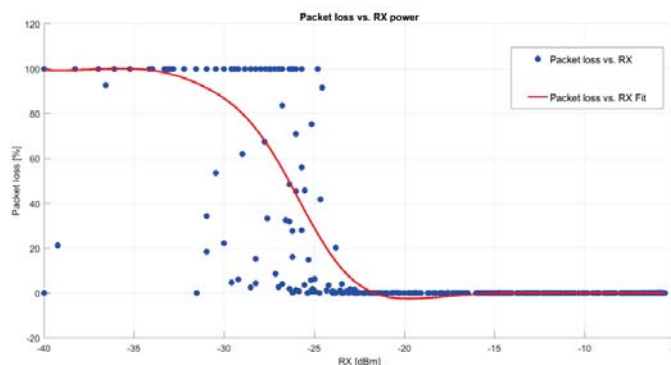
✓ **Immune** to RF or band over-crowdedness.

✓ **License regulation and permission-free.**



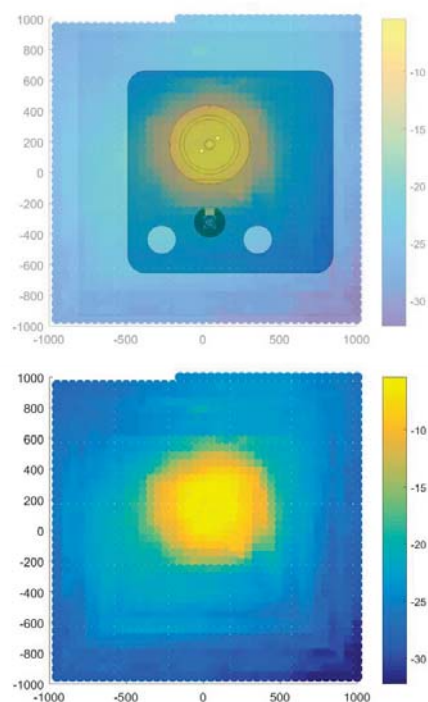
Packet Loss as a Function of Optical Power

- 40km SFP transceiver (now used)
 - Max RX power -3dBm
 - LOS de-assert -24dBm
 - LOS assert -35dBm
 - Margin: 21dB
- 120km SFP transceiver (available)
 - Max RX power +5dBm
 - LOS de-assert -31dBm
 - LOS assert -35dBm
 - Margin: 36dB



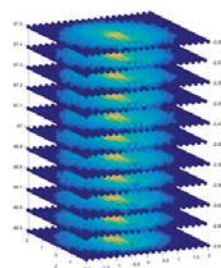
Misalignment Evaluation

- Received local optical power as a function of remote unit movement (x,y in motor steps, power in dBm)
- @50 m 1 step = 0.093 mm movement.
- Movement for 1000 steps (~0.1deg) from center causes complete signal loss, equal to 93 mm displacement on the unit.
- **Rule of thumb, beam must not move off the face of the unit.**



Beam Analysis

- Analyzing an optical beam in 3D
- Evaluation of beam divergence
- Profiling optical power distribution
- Automatically optimize the placement of optical receivers and transmitters behind the lens or other optical elements



KORUZA & NGI Pointer

- NGI (Next Generation Internet) Pointer grant received in 2020
- Next generation system with **optimized** user experience
- **Custom applications** for industry and privacy
- **Hardware upgrade** and open-source release
- **Testbed** and networking demonstration
- **KORUZA technology** as a set of **open modules** for next gen development



NGI POINTER

KORUZA & NEWFOCUS WG4 call

Collaboration topics:

- 1) Data-collection, analysis and experimental roll-out of the KORUZA Pro system and ingestion of data for channel modelling.
- 2) 10 Gbps long-range link design based on off-the-shelf components, focus:
 - a. Using EDFA or other readily available amplification sources at 1550 nm as a source for FSO transmission.
 - b. Determining price-performance ratio of available telescopes for 1 km app.
 - c. Experimentally evaluating coupling efficiency of SFP and other transceivers as FSO receivers.
- 3) Next gen test-bed for FSO validation and setup in SLO with multi-hop architecture.



Need engineering expertise for
your next challenge?

Let's connect.

info@irnas.eu
@institute_irnas

Komunikacije z vidno svetlobo

Visible Light Communications

Žiga Pušcl in Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

zigapusecl@gmail.com

Povzetek

V prispevku so predstavljene komunikacije z vidno svetlobo (ang. visible light communications - VLC) in njihova uporaba. Komunikacija z vidno svetlobo je različica podatkovne brezvrvične komunikacije, ki za prenos informacij uporablja vidno svetlobo. V širšem pomenu spada VLC med tehnologije optične brezvrvične komunikacije (angl. optical wireless communications – OWC). Predstavljene bodo naslednje teme: kaj je VLC, značilnosti VLC, koncept VLC, Li-Fi, splošna uporaba VLC in uporaba VLC v 5G omrežjih.

Abstract

The presentation explains visible light communication - VLC and its use. Visible light communication is a version of wireless data communication that uses visible light to transmit information. In a broader sense, VLC is one of the optical wireless communications – OWC technologies. The following topics will be presented: what is VLC, VLC features, VLC concept, Li-Fi, VLC applications in a broader sense, applying VLC in 5G networks.

Zaposlen je v Šolskem centru Celje, na Srednji šoli za kemijo, elektrotehniko in računalništvo, kot profesor informatike in elektrotehnike. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo mobilna omrežja in brezvrvične optične komunikacije. Trenutno pod mentorstvom izr. prof. dr. Boštjana Batagelja pripravlja zaključno nalogo z naslovom »Komunikacije z vidno svetlobo in njihove uporabe«.

Lecturer's biography

Žiga Pušcl is a graduate of the study program "applied electrical engineering" at the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana, University of Ljubljana. He is employed at the School Center Celje, at the Secondary School of Chemistry, Electrical Engineering and Computer Science as a professor of informatics and electrical engineering. His research interest includes mobile networks and wireless optical communications. He is currently under the mentorship of prof. dr. Boštjan Batagelj preparing a research project entitled "Visible light communications and their use".

Biografija predavatelja

Žiga Pušcl je absolvent prvostopenjskega visokošolskega strokovnega študijskega programa Aplikativna elektrotehnika na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani Univerze v Ljubljani.

Komunikacije z vidno svetlobo

Žiga Pušelj, Boštjan Batagelj

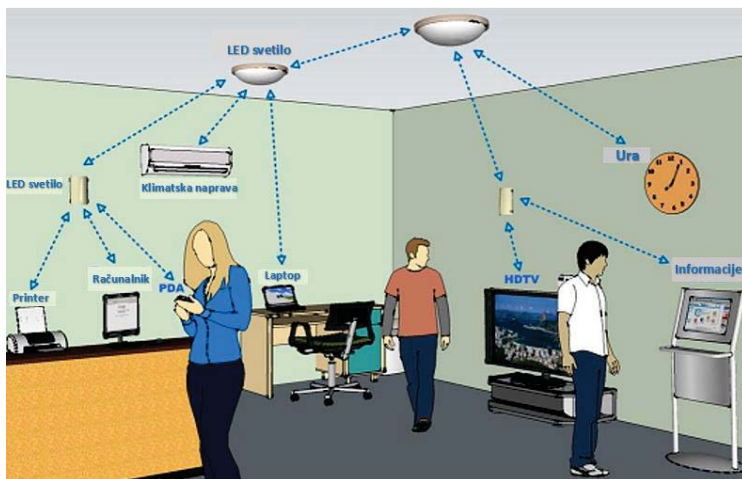
5. februar 2021

Pregled vsebine

- VLC
 - Kaj so komunikacije z vidno svetlobo
 - Značilnosti VLC
 - Delovanje VLC
 - Li-Fi
 - Komunikacijska arhitektura v VLC
 - Oddajniki
 - Sprejemniki
 - Uporaba VLC
- **Uporaba VLC v 5G omrežjih**

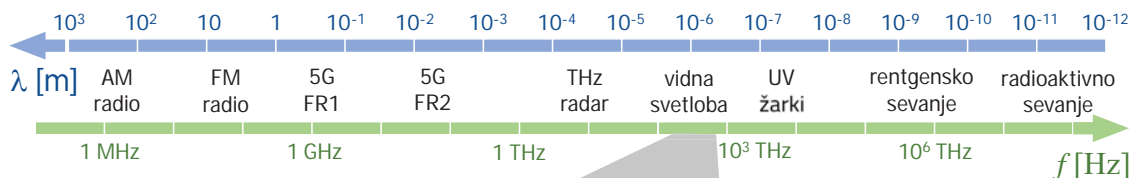
Kaj je VLC?

- Visible light communication
- Uporaba vidne svetlobe za prenos informacij
- Združitev osvetlitve in optične komunikacije
- Svetila LED bi naj do leta 2030 v celoti prevzela osvetlitev notranjih prostorov
- VLC tehnološki kandidat za 5G



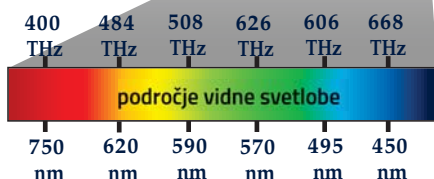
Značilnosti VLC

- Velik razpoložljiv spekter
- 10.000 – krat večji od radiofrekvenčnega in mikrovalovnega spektra
- Rešitev omejitve pasovne širine
- Li-Fi ima na razpolago milijonkrat večji spekter kot Wi-Fi



$$f = \frac{c_0}{\lambda_0}$$

$c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s



vir: Žiga Pušelj, Boštjan Batagelj, "Kaj nam prinaša komunikacija z vidno svetlobo?". Avtomatika: revija za avtomatizacijo procesov, profesionalno elektroniko in telekomunikacije. 2020, št. 187, str. 11-16.
<http://avtomatika.com/ARHIV-AVTOMATIKA/A187.pdf>

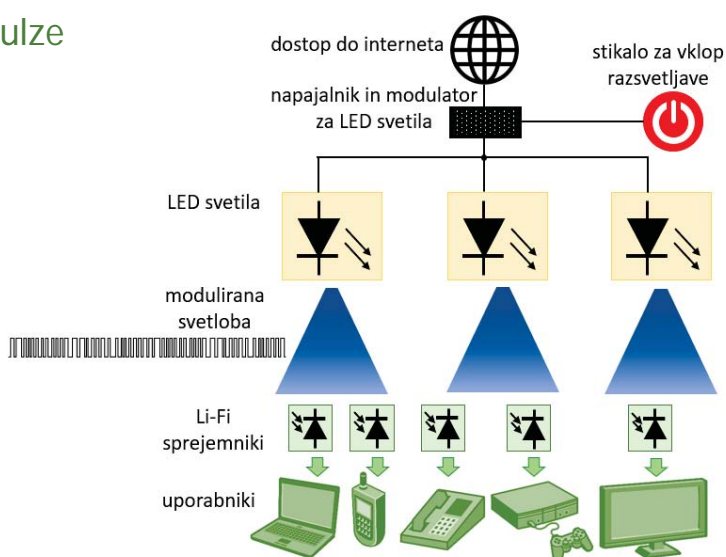
- **Ponovna uporaba spektra**
- Omejitev komunikacije v zaprtih prostorih
- Prostorska večkratna uporaba optičnega spektra

- **Brezplačen spekter**
- Nereguliran del elektromagnetnega spektra
- Nelicenčni spekter

Delovanje VLC

- Preprostejša oprema za komunikacijo
- Neposredne modulacije
- Svetlobni vir proizvaja kratke svetlobne impulze
- Spreminjanje jakosti električnega toka
- Signal sprejemajo detektorji

vir: Žiga Pušcel, Boštjan Batagelj, "Kaj nam prinaša komunikacija z vidno svetlobo?". Avtomatika: revija za avtomatizacijo procesov, profesionalno elektroniko in telekomunikacije. 2020, št. 187, str. 11-16.
<http://avtomatika.com/ARHIV-AVTOMATIKA/A187.pdf>



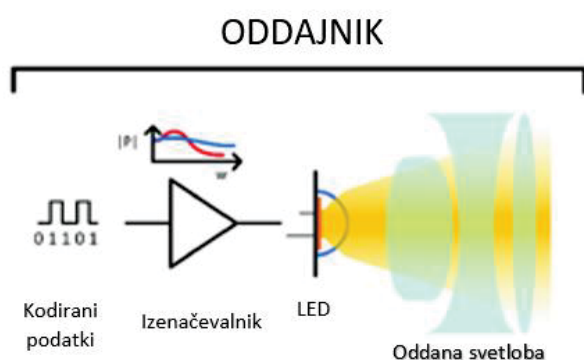
Li-Fi

- Uporaba svetlobnega valovanja
- Proizvajanje hitrih svetlobnih impulzov
- Tvorjenje brezžičnega omrežja s pomočjo več svetil
- Brezhibno delovanje tako kot pri drugih radijskih sistemih
- Večja kibernetska varnost kot pri Wi-Fi



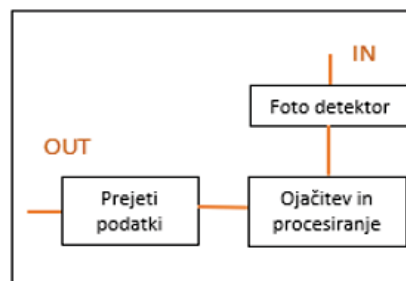
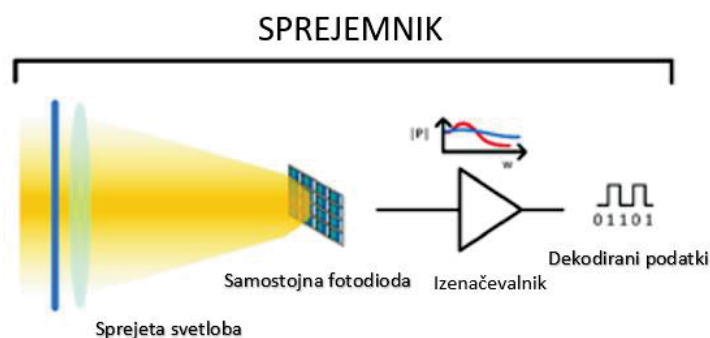
Oddajniki

- Splošni viri oddajanja svetlobe
- svetila LED
- Električni tok
- Prednosti uporabe svetil LED



Sprejemniki

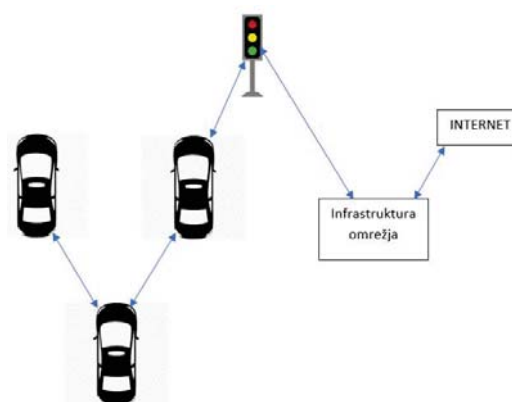
- Splošni viri sprejemanja svetlobe
- Pretvorba svetlobe v električni tok
- Fotodiode
- LED diode



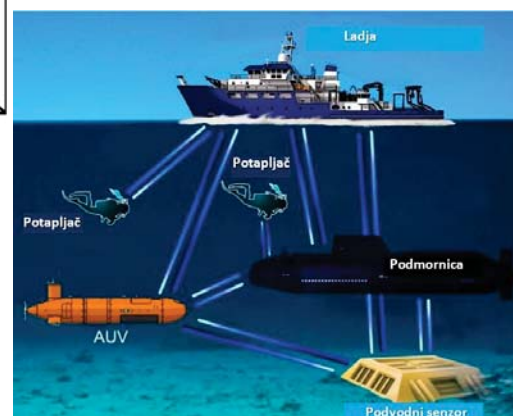
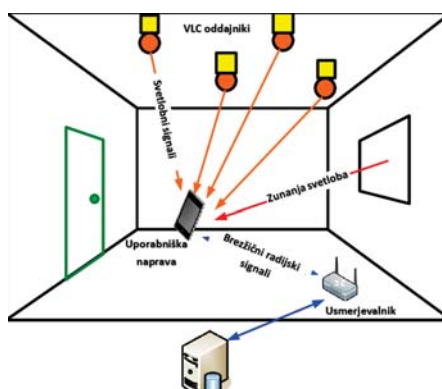
Notranjost Li-Fi sprejemnikov

Uporaba VLC

- Široka uporabnost na različnih področjih
- Tridimenzionalni sistem za določanje položaja
- **Komunikacija med vozili**
- Nizki stroški
- Dinamično okolje
- Komunikacija med avtomobili
- Bogat ekosistem sestavnih delov in virov svetlobe



- VLC notranji sistemi
 - Uporaba osvetlitve
 - Izzivi VLC
 - Obetavna prihodnost
-
- Podvodna komunikacija



Uporaba VLC v 5G omrežjih

- mmW
- Naslednja generacija v mobilnih telekomunikacijah
- Boljša uporabniška izkušnja
- 80 % uporabe omrežja znotraj zaprtih prostorov
- Primerjava mmW in VLC



	spekter	licenca	varnost	poraba energije	cena	domet
mmW	30 – 300 GHz	delno brezplačno	srednja	visoka	visoka	100 – 200 m
VLC	385 – 790 THz	povsem brezplačno	visoka	nizka	nizka	< 10 m

Zelena tehnologija

- VLC je obetaven kandidat za zeleno komunikacijo
- Nižji stroški kot pri radijski komunikaciji
- Uporaba obstoječe infrastrukture
- Poraba električne energije pri VLC za 60 % nižja v primerjavi z radijskimi rešitvami

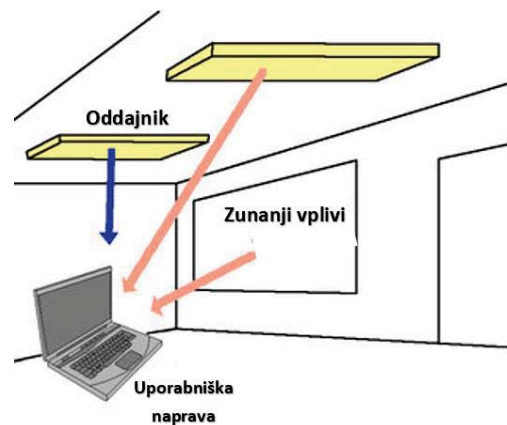


Zdravstveni vidiki

- VLC je alternativa infrardečim komunikacijskim sistemom
- Elektromagnetni spekter VLC sistema je povsem varen za človeške oči
- Odpravljanje oziroma blaženje utripanja svetlobe
- Utripanje hitrejše od 200 Hz

Odperti izzivi

- Omejena mobilnost
- Vzdrževanje neposredne vidljivosti
- Občutljivost na motnje
- Uporaba svetlobnih sit za zmanjšanje motenj



Optične tehnologije na sodobnih ladjah

Optical technologies on modern ships

Mladen Radovanović in Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

mlaki@yahoo.com

Povzetek

V prispevku so predstavljeni izzivi optičnih tehnologij na potniških ladjah, kjer je bil avtor nekaj let zaposlen kot vodilni elektroinženir. Obdelani so izzivi z optičnimi elementi, ki so vključeni v različne ladijske sklope. To so pogonski sklop, optični žiroskop, optične zanke v porazdeljenem sistemu avtomatizacije, kamor spadajo tudi meritve napetosti trupa in temperature ladijskega pogonskega elektromotorja z uporabo Bragg-ovega rešetkastega svetlobnega vlakna (FBG - Fiber Bragg Granting).

Abstract

This article discusses the challenges of optical technologies on passenger ships where author was employed several years as a Chief electrical engineer. Issues of optical technologies on propulsion, optical gyroscopes, optical loops in a distributed automation system and measurements of hull stress and temperature of a ship's propulsion electric motor using FBG Bragg optical lattice fiber are presented.

Biografija predavatelja

Mladen Radovanović je bil po končanem študiju elektrotehnike v Ljubljani 20 let zaposlen na potniških ladjah, kot glavni inženir elektrotehnike. Na ladjah je bil zadolžen za različne tehnologije, od klasičnega motornega pogona na zadnji potniški ladji na parni

pogon, zadolžen pa je bil tudi za razne tehnologije na ladjah z dizelskimi pogoni. Pri svojem delu se je srečal z mnogimi tehnološkimi izzivi. Vodil je projekte za posodobitev avtomatike pogonskih sistemov, varnostnih, navigacijskih in komunikacijskih sistemov ter izpeljal projekt vgradnje in integracije prvega "solid state" radarja na komercialnih ladjah. Na ladjah se je srečal s pomanjkljivo načrtovanimi in izvedenimi sistemi. Leta 2019 se je vpisal na doktorski študij na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer v Laboratoriju za sevanje in optiko raziskuje področje implementacije milimetrskih radarjev na ladje.

Lecturer's biography

Mladen Radovanović was employed on passenger ships for 20 years as a chief electrical engineer. He worked on various technologies, from conventional motor drives, the last steam-powered passenger ship and worked for years on diesel-powered ships and faced various technical challenges. He led projects for modernization of propulsion systems, automation, security, navigation and communication systems, and carried out a project for integration of the first solid state radar on commercial ship. On ships, he encountered poorly designed and implemented systems. In 2019, he enrolled in a doctoral study at the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana. His research topic in the Laboratory of radiation and optics is related to the implementation of millimeter radars on vessels.



Optične tehnologije na sodobnih ladjah

Mladen Radovanović
5.2.2021.

Izzivi optičnih tehnologij na potniški ladji

Zanesljivost delovanja pogona ladje : povratna informacija pozicije rotorja sinhronnega motorja v kontroler ciklokonverterja

Triosni optični giroskop na principu Sagnacovog efekta: vpliv staranja SLD (Ang.SuperLuminiscentn Diod) na delovanje giroskopa

Optična zanka v porazdeljenem sistemu avtomatike

Merjenje temperature sinhronskega motorja električnega pogona ladje z uporabo FBG Braggovog optičnoga rešetkastog vlakna (Ang. Fiber Bragg Grating)

Meritve napreznosti trupa z uporabo FBG Braggovog optičnoga rešetkastog vlakna

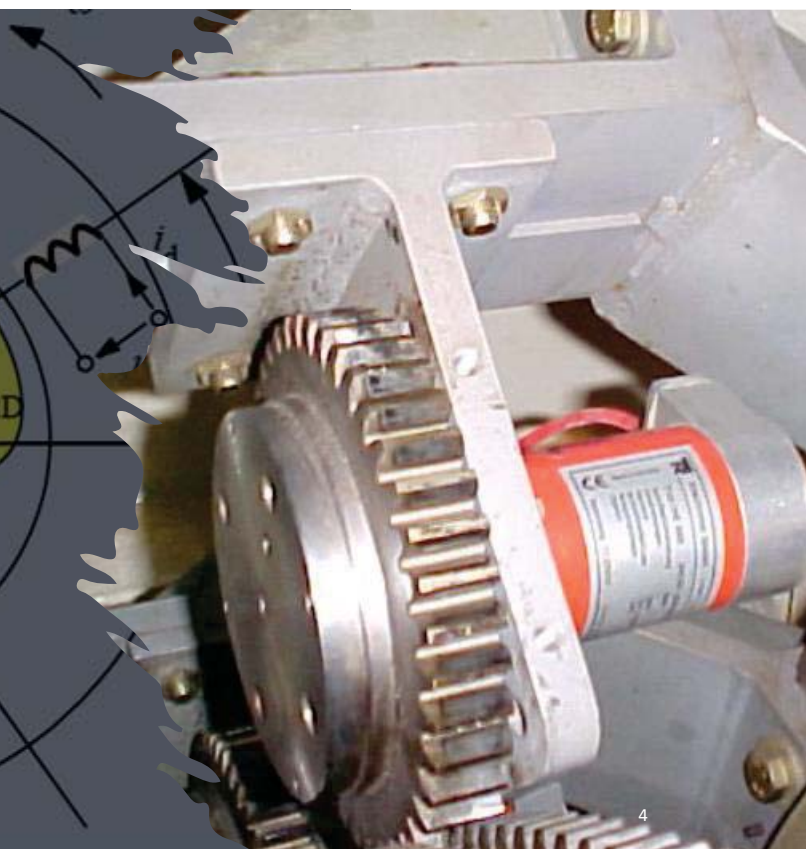
Uporaba optike na sistemu propulzorjev

- Slika tri 15 MW POD propulzora, dva se obračajo 360° in enega fiksnega (v sredini)
- Sinhroni motorje poganja PSR (Programmierbar Schnell Rechner) ciklokonverter proizvajalca ABB
- deluje v področju 0..1570 V, 0..15Hz, z delovnim območjem -150..150 obrtov/min, nazivnim tokom 2x2626A in vodnim hlajenjem močnostne elektronike z iskoristkom 96,7%.
- Vsak propulzor ima šest polni sinhroni motor z dvojno armaturo, dve trifazni navitji sta mehansko zamaknjena za 60°, poganjata jih dva električna pogona z električnim zamikom 120°



Povratna informacija pozicije rotorja

- Povratna informacija pozicije, kota λ rotorja elektromotorja propelerja v ciklokonverterju se uporablja za transformacijo koordinatnih sistemov iz 3 osnega R,S,T statorskega v dvoosni rotorski d,q vektorski sistem. Rezolucija 13 bitnega Gray code encoderja TR HE-65-S LWL je 0.044°. Greyev kod se uporablja ker so spremembe med dvema koti prisotne samo na enem bitu tako da se zmanjša možnost napake pri prenosu kota.

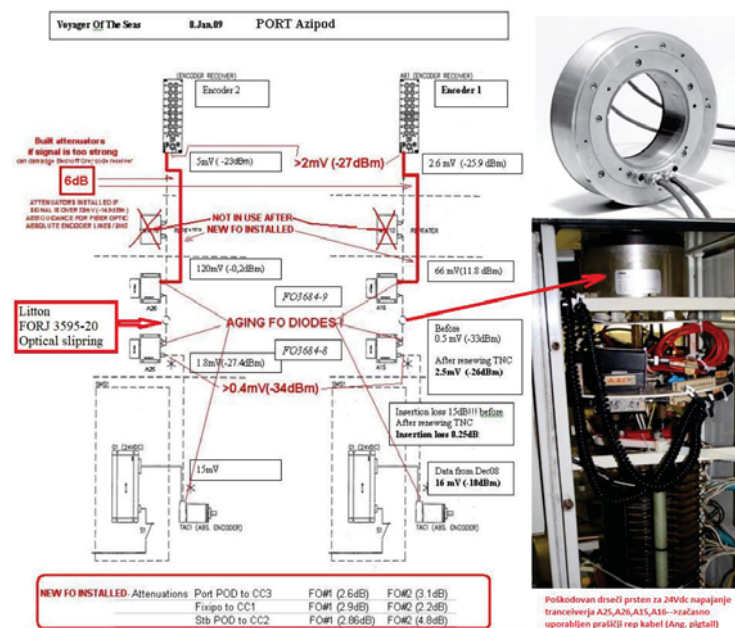




Izpad propulzorja zaradi napake na prenosni poti

- Če je informacija o kotu rotorja nedostopna, pride do izklopa propulzije. Največkrat se to zgodi zaradi napake na prenosni poti od enkodjerja rotorja do Beckhoff M110 dekoderja v ciklokonverterju. Izklop pogona je izredno nevaren navigacijski dogodek, posebej če je ladja v manovri (navigacija v rekah, prekopih, vstop ali iztop v luko, ozki navigacijski koridorji z veliko prometa).

Optična pot od pozicijskog koderja do dekoderja v kontrolerju električnega pogona ciklokonverterja





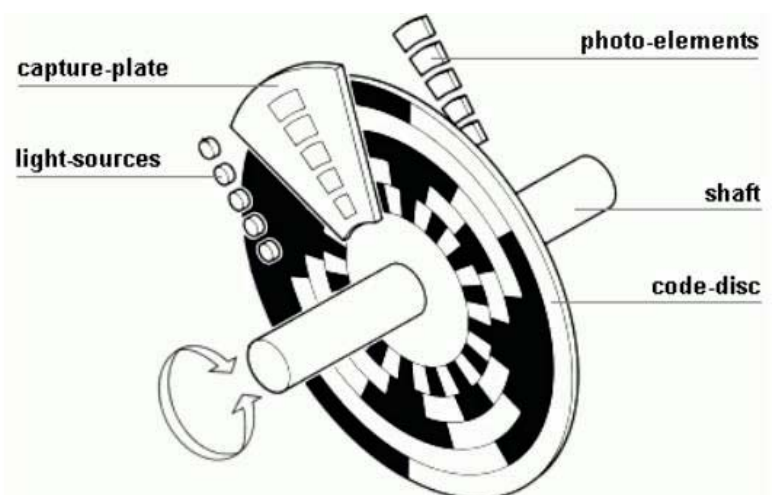
Vzrok napake

- Modulacija optičnega signala enkoderja se zgubila zaradi napake na drsečih prsteh (izguba napajanja 24Vdc za tranceiverje A25,A26,A16,A16 ki se uporabljajo za spremembo valovne dolžine optičnega signala zaradi prilagajanja optičnemu vrtečem prstenu). Za ugotavljanje vzroka napake predelan tranceiver in na osciloskopu opazovana on/off modulacija.

7

Kotni enkoder zgradba

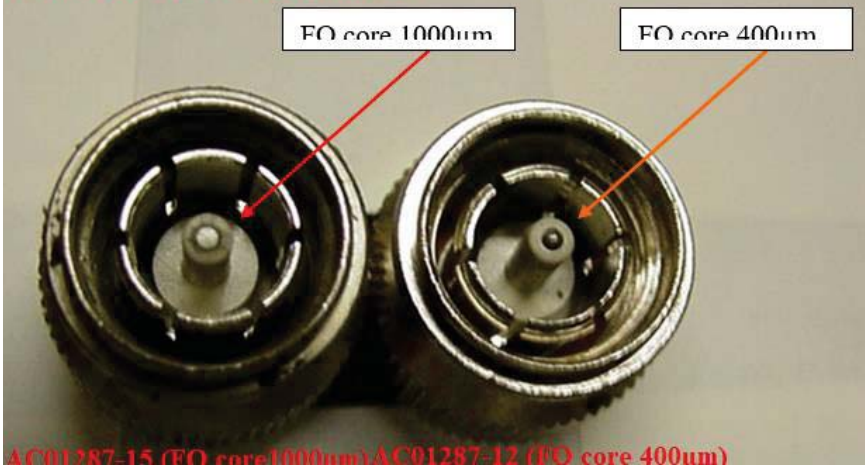
- Napaka meritve kota je lahko tudi posledica staranja ležajev ali vibracij enkoderja, ki je izveden kot optični disk z 13 Grey kodnimi obroči.



(<https://tams-www.informatik.uni-hamburg.de>)

8

Harting F-TNC connectors



AC01287-15 (FO core 1000um) AC01287-12 (FO core 400um)

Postavljeno narobno optično vlakno z jedrom 400 μm namesto 1000 μm

Optična vlakna so bila postavljena skozi isti prostor. V primeru požara ali mehanske poškodbe (trka ladje), lahko istočasno izpadejo vsi trije propulzorji. Na spodnji sliki optični kabli od STB (desneg če se gleda proti premcu ladje) in fixipoda grejo skozi tehnično sobo PS propulzorja (levega če se gleda proti premcu ladje).



Trilosni optični giroskop na principu Sagnacovog efekta

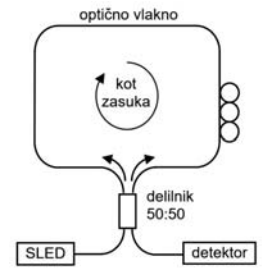
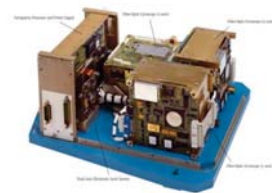
- Trilosni giroskop Sperry Navigat 2100
- Starejše mehanske žiroskope, ki so sestavljeni iz vrtečega se kolesa v girokopski tekočini, izrabljajo načelo ohranitve vrtilne količine, so že pred leti začeli zamenjevati moderni optični žiroskopi, ki merijo spremembo faze svetlobnega signala zaradi potovanja svetlobe v smeri vrtenja ali nasprotni smeri vrtenja iz česar se izračuna kot zasuka. Optični žiroskopi ne rabijo letnega servisiranja kot mehanski, menjavo girokopske tekočine in umerjanju giroskopa.

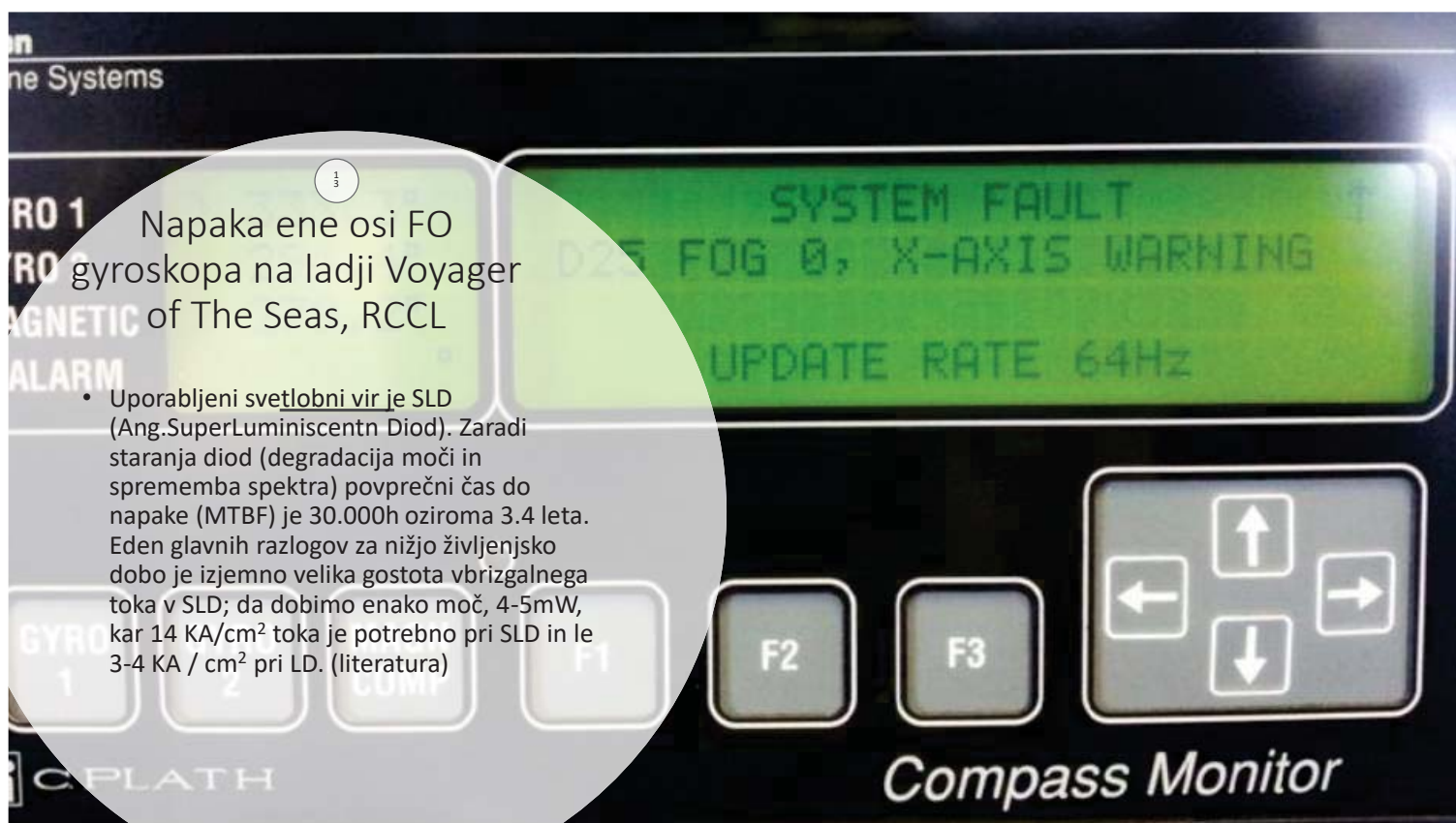
$$t_{\text{cw}} = \frac{R(\pi N^2 L)}{c} \quad t_{\text{ccw}} = \frac{2\pi RN}{c - R \cdot \Omega}$$

$$t_{\text{cw}} = \frac{R(\pi N^2 L)}{c} \quad t_{\text{ccw}} = \frac{2\pi RN}{c + R \cdot \Omega}$$

$$\Delta t = t_{\text{ccw}} - t_{\text{cw}} = \frac{2\pi RN}{c - R \cdot \Omega} - \frac{2\pi RN}{c + R \cdot \Omega} = \frac{2\pi RN(c + R \cdot \Omega - c - R \cdot \Omega)}{c^2 - R^2 \Omega^2} = \frac{4\pi R^2 N \Omega}{c^2 - R^2 \Omega^2}$$

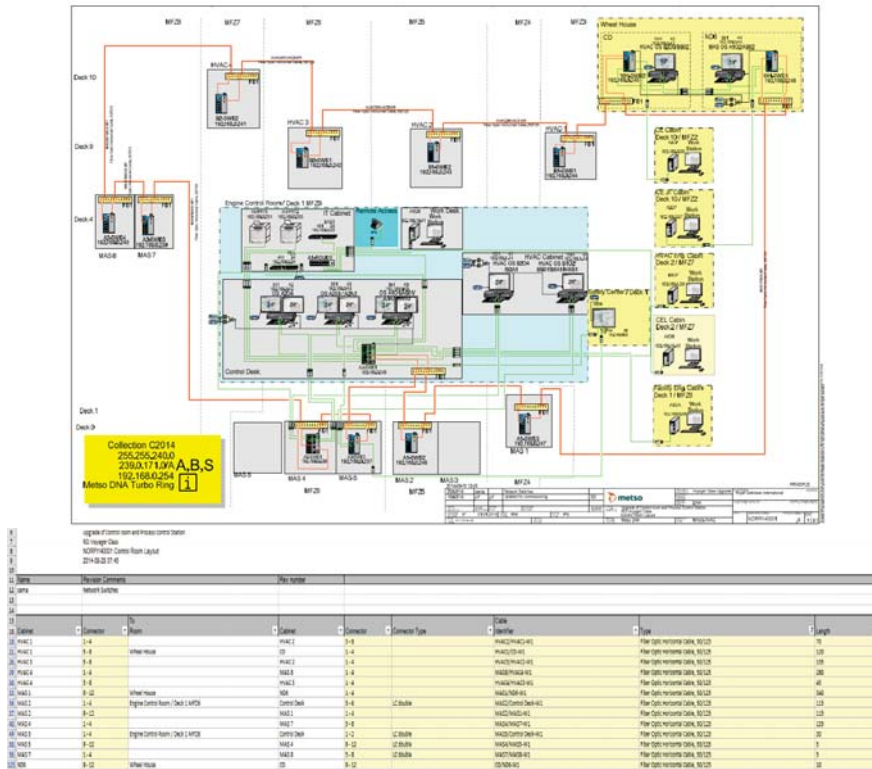
$$\Delta t \approx \frac{4\pi R^2 N \Omega}{c^2}$$





Optična zanka v porazdeljenom sistemu avtomatike

- Na ladji Voyager of The Seas, porazdeljen sistem avtomatike Valmarine Damatic XD z 15200 vhodno/izhodnih kanalov je bil leta 2014 zamenjan z sistemom proizvajalca Metso. Avtor je vodil projekt v vseh fazah. Zamenjano je jedro sistema, oziroma prenosne poti, industrijski računalniki, in industrijski usmerjevalniki, delovne postaje in programska oprema. Preklop med dvema sistemi je narejen brez izpada pogona (Angl.blackout)



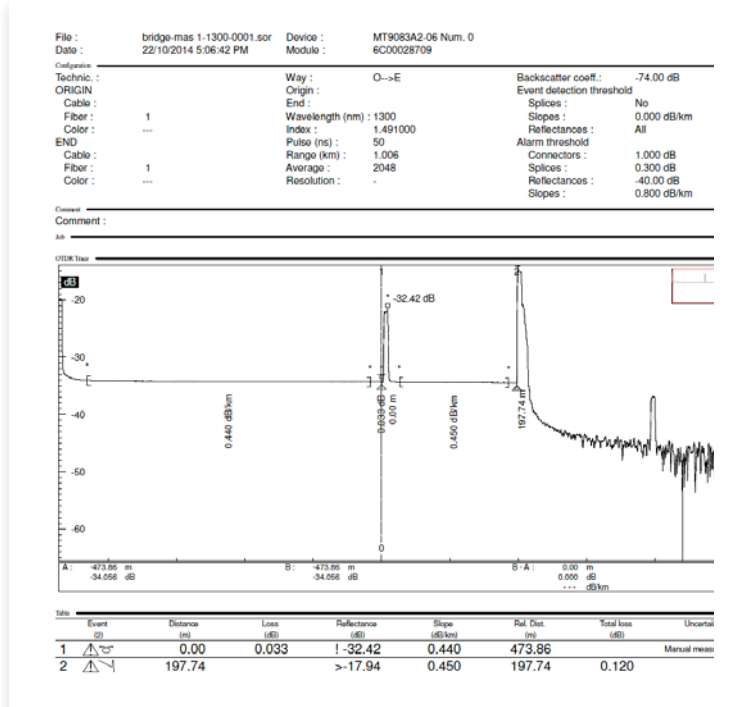
- shema optične zanke sestavljene iz 13 sekcij optičnega kabla z štirimi multi mode vlakni (Tx/Rx +2 vlakna rezerve) proizvajalca Drake G4-50/125 AICI-I/O/RM-W skupne dolžine 1405m



- najbolj pomembni procesi kot so PMS (Ang. Power Management) upravljajo redundančni računalniki. Porazdeljenih fieldbus vhodno/izhodnimi kabinetih, kje je povezana večina analogno/digitalnih vhodno/izhodnih kanalov, so prek industrijskega ethernet povezani z procesnimi računalniki, oz. jedrom sistema. Prek serijskih vodila so industrijski računalniki povezani dodatno z: kontrolerji 3 propulzorja, Navigacijskim sistemom, AWP sistemom za čiščenje odpadne vode (Angl. Advance Waste Treatment plant), incineratorjem, Računalnikom za stabilitet ladje, VDR črnom škatlom (Angl. Voyage Data Recorder), Kontrolerjem za meritve vibracij propelerjev

OTDR meritve (Angl. Optical Time Domain Reflectometer)

- Kritična faza projekta je po polaganju kablov in montaži konektorjev OTDR meritve (Angl. Optical Time Domain Reflectometer): Meritve dušenja, disperzije, numeričke aperture, mesta eventualnih poškodb ali prekinitve vlakna so bile opravljene z inštrumentom Anritsu MT9083A2-06 na dveh valovnih dolžinah 850nm in 1300nm.
- Izmerjene vrednosti se uporabljajo kot referenca v nadaljnih meritvah pri zagonu sistema in bodočim vzdrževalnim delom.



17

Vgrajene meritve v industrijskih stikalih Moxa

Monitor SFP

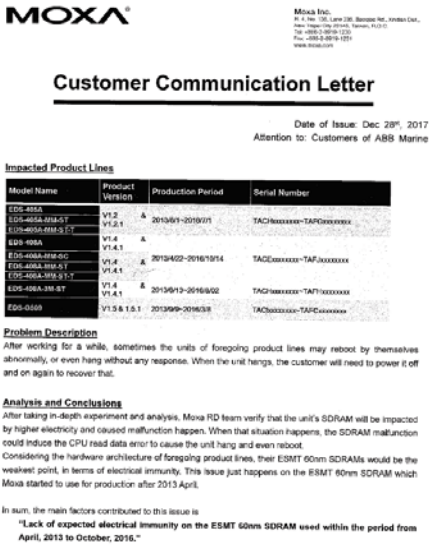
SFP Status

Port No.	Model Name	Temperature (°C)	Voltage (V)	Tx Power (dBm)	Rx Power (dBm)
G1	SFP-1GEZXC-120	51.3	3.3	-6.6	-0.9

Parameter	Description
Port No.	Switch port number with SFP plugged in
Model Name	Moxa SFP model name
Temperature (°C)	SFP casing temperature
Voltage (V)	Voltage supply to the SFP
Tx power (dBm)	The amount of light being transmitted into the fiber optic cable
Rx power (dBm)	The amount of light being received from the fiber optic cable

- Zaradi izkušenj z staranjem laserskih virov, je pomembno spremljati moči v vlaknu. Za to se uporablja vgrajena SFP opcija meritve nivoja signala Rx/Tx (dBm) v industrijskih stikalih Moxa

18



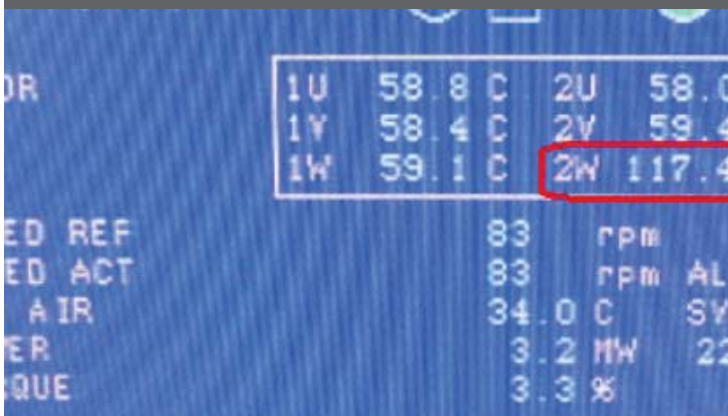
Nezanesljivost MOXA stikala zaradi 60nm SDRAMA

- ▶ MOXA stikala izdelana v periodu od Aprila 2013 do Oktobra 2016 lahko sama naključno izklopljajo vhode/izhode stikal, nenadoma znova zaženejo ali se celo obesijo brez kakršnega koli odziva. Vzrok so interne EM motnje na 60nm SDRAMu ki pripeljejo do napake ciklov branja/pisanja Centralne Procesne enote.
- ▶ Avtor je doživel ispade ladijske komande propulzorja, nezanesljivo delovanje in izpade varnostnih sistemov (sistema protupožarnih vrat, naključno vkapljanje sistema za gašenje požara <Angl. Sprinkler sistema>), integriranega navigacijskega sistema ECDIS, blackout izpade PMS sistema (Ang. Power Management System)
- ▶ Na eni ladji je zamenjal več kot 130 industrijskih stikal v različnih sistemih



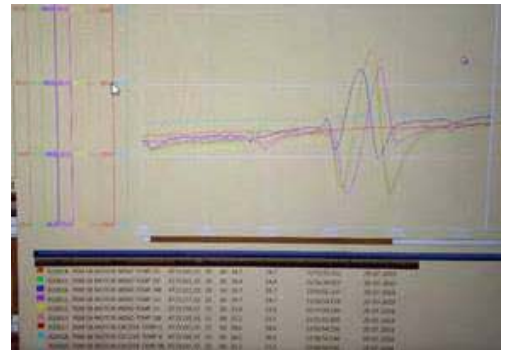
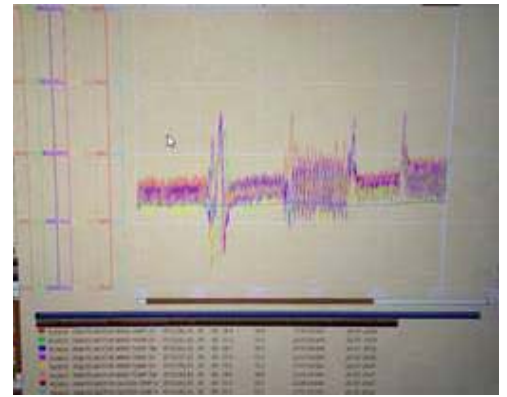
Merjenje temperature sinhronskega motorja električnega pogona ladje

- Zanesljivost nadzora temperaturje sinhronskega motorja električnega propulzorja je pomembna zaradi informacije o termalnem stanju pogona ladje in pravočasnim navigacijskim ukrepom v primeru bližanja temperaturah navitja proboju izolacije ko se pogon izklopi.
- Napačne meritve temperature so izredno nevarne. Avtor je doživel dvig meritev temperature zaradi nezanesljivega ZMC-MIL konektorja v ABB POD propulzorju in preprečil ispad pogona z aktivacijom blokad varnostnega izklopa (Angl. Safety Override) v reki Jang Ceng Jang v oskern navigacijskem koridorju. Izpad enega od propulzorjev zamakne ladjo z načrtovane poti zaradi izgube potiska propelerja.



Nihanje temperaturje na 8.5MW pogonu SAM electronics

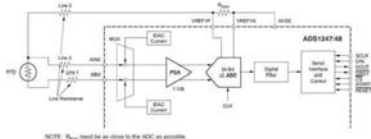
- Na pogonu SAM electronics/Wartzila je zaznano nihanje temperature PEM električnega motorja (Ang. Propulsion Electrical Motor) $\pm 30^{\circ}\text{C}$ z periodo nekaj minut ki je posledica sistemske napake zaradi recalibracije modula WAGO 750-461 ki se pojavlja pri spremembi hitrosti električnega motorja in vpliva EM motenj v PT100 tri žičnih meritvah
- Na sliki Nihanje temperature motorja in nihanje temperature z implementiranim digitalnim filterjem 60 s v kontrolerju pogona



21

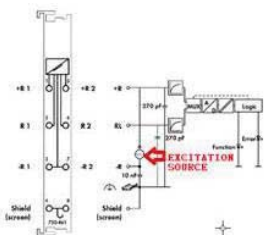
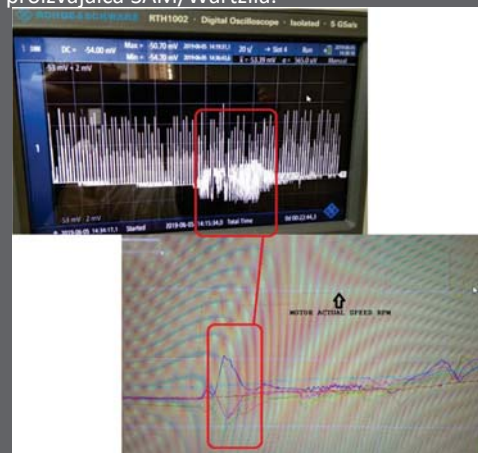
Izvedba tri žične meritve z TI ADS1247

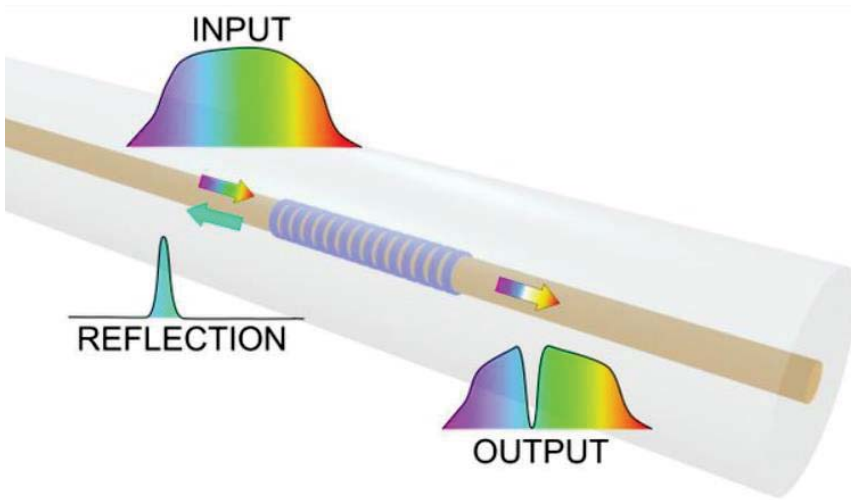
22



modul WAGO 750-461

Z meritvijo padca napetosti na terminalih 2/3 se pokaže da se kontroler modula recalibrira ob spremembi hitrosti rotorja in vpliva EM motenj. Žal se recalibracija ne more isklopiti, tako da je problem še vedno prisoten na nizu propulzorjev proizvajalca SAM/Wartzila.





Braggovo vlakno

- Da se izognemo EM motnjam v sinhronskem stroju, se lahko uporabi meritev temperaturje z optičnimi meritvami na osnovi FBG Braggovog optičnoga rešetkastog vlakna (Ang. Fiber Bragg Grating).
- Fibre Bragg rešetka (FBG) je vrsta porazdeljenega Bragg reflektorja, izdelanega v kratkem segmentu optičnih vlaken, ki odseva določene valovne dolžine svetlobe in prenaša vse ostale. To dosežemo z dodajanjem periodične spremembe indeksa loma jedra vlakna, ki ustvarja dielektrično ogledalo, specifično za valovno dolžino

23

Braggovo vlakno

- Vlaknasto Braggovo rešetko lahko zato uporabimo kot vgrajeni optični filter za blokiranje določenih valovnih dolžin ali kot odsevník, specifičen za valovno dolžino. Z spremembo periodičnih lastnosti jedra zaradi temperature ali skrčitve/natega se lahko optično vlakno z Braggovo strukturo uporablja kot senzor za meritev temperature, npr navitja sinhronskega stroja ali naprežanja trupa ladje
- V primerjavi z PT100 senzorji klase AA [$\pm (0,1+0,0017 * t)$, $\pm 0,1$ °C (0 °C), $\pm 0,27$ °C (100 °C), definiran v območju -50...+250 °C (upor z žičnim navitjem), 0...+150 °C (tankoslojni upor)] imajo FBG vlakna dvakrat temperaturno rezolucijo $\pm 0,05$ °C in širše merilno območje -270 ÷ 300 °C

Specifications

Parameter	Standard	Options
Centre Wavelength	1528 to 1568 nm	Alternative wavelength range
FBG Length	1 mm 2 mm 5 mm 10 mm	
Peak Reflectivity	>=50 % >=50 % >=70 % >=80 %	
3 dB Bandwidth	+1.5 nm -1.2 nm +0.7 nm -0.3 nm	
ILSR Single Sensor	15 dB	>15 dB
Strain Range	+ 9,000 µstrain	> + 9,000 µstrain
Strain Sensitivity	1.7 pm/µstrain	
Strain Resolution ¹	0.4 µstrain	

Temperature Sensitivity ¹	11 pm/°C
Temperature Resolution ¹	0.05 °C
Fibre Type	Single Mode SMF-28, 9/125 µm
Fibre Coating and FBG Recasting Options ²	Acrylate Polyimide High temperature acrylate Other custom coatings
Temperature Range ¹	-270 to +85 °C -270 to +300 °C
Cable and Connectors	To suit application

¹With 10 pm resolution interrogator. ²Minimum temperature available is 100 °C. ³Acrylate coating available for strain applications. ⁴See Fibre Optics for change optical cables.



FBG Sensor in Acrylate Coated Fibre

24

Naprezanje trupa ladje in digitalni dvojček

- Naprezanje trupa ladje posledica
- Koncept digitalnega dvojčka ladje se uporablja za spremljanje stanja ladje v realnem času
- Vhod v model so lahko stanje Sistema za upravljanje napajanja na ladji (Angl. Power Management Sistem), 3D stanje morja okrog ladje (uporaba mmwave radarjev) in strukturnega odziva oziroma naprezanja trupa ladje, stanja varnostnih sistemov (protupožarnega sistema, vodonepropusnih vrat), stabilneta ladje, vremenskih pogojev, trenutne hitrosti, smeri vetra, dinamike nihanja ladje in podobno. Z upoštevanjem dinamičnog modela ladje, stanja morja (pred ladjo z obdelavo odbojev od površja mora X band radarja čas lahko zamaknemo vnaprej in predvidimo obnašanje ladje v bližnji prihodnosti, tako se pravočasno izognemo nevarnostim kot so poškodbe ali zlom trupa zaradi prevelikih obremenitvah ladij, nevarna ekstremna nihanja levo desno (Angl. Parametric roll), in podobno

Image Credits: fiveoceansalvage / Hasan Saad

25



Meritev valov z optičnimi vlakni

- lahko uporablja tudi optično vlakno z distribuirani FBS senzorji okrog ladje ki merijo silo potiska vzgona morja na optično vlakno ki je odvisna od višine vala, informacijo uporabimo kot vhod v model digitalnega dvojčka
- pogosti pojav parametarskega nihanja ladij, v zadnjem dogotku v Decembru 2020 je zgubljenih 1900 kontenerjev od tega 40 z nevarnim tovorom
- Spremljanje naprezanja trupa ladje v realnem času doprinese bolj varni plovbi, hkrati z zajetimi informacijami o stanju morja, podatke lahko uporabijo za izboljšave pri načrtovanju ladij, ter pravočasnih ukrepov ob velikih naprezanjih trupa (inšpekcije ter popravila).



POVZETEK

- ▶ Spremljanje naprežanja trupa ladje v realnem času doprinese bolj varni plovidbi, hkrati z zajetimi informacijami o stanju morja, podatke lahko uporabijo za izboljšave pri načrtovanju ladij, ter pravočasnih ukrepov ob velikih naprežanjih trupa (inšpekcije ter popravila).
- ▶ Predstavljena uporaba optičnih vlaken za meritve temperature v okolju s močnim EM motnjam, kjer se nove tehnologije iskažejo za nezanesljive
- ▶ Staranje laserskih virov je glavna omejitev zanesljivosti delovanja sodobnih offshore sistemih, neinformiranost klasifikacijskih društev (DNV GL, RINA, etc.), proizvajalcev sistemov, lastnikov in posadke je še večji problem
- ▶ Nezadostno testiranje komponent in sistemov pred vgraditvijo (primer MOXA stikal), hitro zastaranje komponent, omejena potpora zaradi pritiska trga
- ▶ Rešitev je standardizacija strojnih in programskih vmesnikov podobno kot v avto industriji, ki omogoča hitre nadgradnje zastarelih komponent in sistemov
- ▶ Za dvig varnosti na morju je pomembno boljše deljenje informacij o tehničnih napakah in incidentih, obstoječi AIRTS (Angl. Accident Incident Reporting System) je nezadosten oziroma ni zaživel

LIDAR

Lidar

Jernej Mušič in Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

music.jernej@gmail.com

Povzetek

V sklopu predavanja o sistemu LIDAR bodo predstavljeni nekateri vidiki njegove uporabe, in sicer na področju avtonomnih vozil in varnosti. Predstavljene bodo možnosti združevanja oz. souporabe LIDAR-ja z drugimi senzorji, kar omogoča bolj učinkovito rabo, zmanjšuje stroške izdelave in v primeru avtonomnih sistemov podaljša njihovo avtonomijo. Predavanje bomo sklenili z ogledom izzivov s katerimi se soočamo v primeru združevanja senzorjev v primeru LIDAR-ja.

Abstract

The lecture will include the possibilities to use LIDAR in the field of autonomous vehicle design and some security applications. The focus will include sensor fusion and the challenges which we will be facing when fusing LIDAR with other sensors. The possibilities of fusing LIDAR with other sensors are limitless because they enable a more reliable sensing system which is reduced in size and cost with an improved autonomy.

Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od leta 2015 je zaposlen v Slovenski vojski kot častnik specialist s činom poročnika, kjer je poveljnik centra in deluje na področju vojaških zvez in informatike.

Lecturer's biography

Jernej Mušič obtained his bachelors and master's degree at the Faculty of Computer Science and Electrical Engineering of the University of Maribor in the field of informatics and communications technologies. He is currently a doctoral student at the Faculty of Electrical Engineering of the University of Ljubljana. Since 2015, he has been employed in the Slovenian Army as an officer specialist with the rank of 2nd lieutenant, where he holds the position as a center commander in the field of military signals and information systems.

Biografija avtorja

Jernej Mušič je diplomiral in magistriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru na področju informatike in tehnologij komuniciranja. Trenutno je doktorski študent na doktorskem študiju tretje stopnje elektrotehnika na

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

LIDAR

25. Seminar optične komunikacije
5. februar 2021

Jernej Mušič, Boštjan Batagelj

Vsebina

- ▶ Tipi LiDAR
- ▶ Uporaba LiDAR na področju avtonomnih vozil
- ▶ Souporaba LiDAR z drugimi senzorji
- ▶ Izzivi

LiDAR

- ▶ LiDAR lahko razdelimo na štiri kategorije po principu delovanja, in sicer:
 - ▶ **Princip optičnega prožnega sipanja**, kjer se ohranja energija in valovna dolžina fotona v procesu medtem ko se spremeni le njegova smer. Uporabljajo se za izvajanje meritev aerosolov in oblakov v atmosferi in določanju razdalje.
 - ▶ **Princip neprožnega optičnega sipanja**, ki omogočajo določanje kemičnega sestava medija oz. objekta na podlagi spremembe valovne dolžine od oddajane.
 - ▶ **Diferencialni absorpcijski LiDAR (DIAL)**, ki oddaja svetlobni snop na dveh valovnih dolžinah, kjer je eden od teh snopov v veliki meri absorbiran v tarčno kompozicijo. Razmerje energije med sprejetima svetlobnima snopoma sorazmerno molekularni koncentraciji tarčnega objekta.
 - ▶ **Dopplerjev LiDAR**, ki se uporablja za merjenje hitrosti gibanja aerosolov v atmosferi. Zaradi gibanja aerosolov od katerih se odbija snop pride pri sprejemu povratnega snopa do frekvenčnega zamika, ki je sorazmeren hitrosti premikajočih se aerosolov.

Uporaba LiDAR na področju avtonomnih vozil - Navdih

- ▶ Uporaba v namene zagotavljanja pomoči vozniku/potniku med vožnjo v neznanih okoliščinah,
- ▶ Izboljšanje situacijskega zavedanja za uporabnika z namenom zagotavljanja večje varnosti uporabnika vozila in drugih udeležencev,
- ▶ Omogočiti starejšim ali invalidnim osebam varno uporabo vozila
- ▶ Medsebojno povezovanje vozil v prometu z namenom stremenja k skupni varnosti.
- ▶ Namen je izničiti negativne vplive človeka med vožnjo.

Cilj

- ▶ Cilj je seveda vzpostaviti čim višjo stopnjo avtonomnosti.
- ▶ 5 stopenjska lestvica avtonomije vozil objavljena s strani „The Society of Automotive Engineers“
- ▶ Proizvajalci avtonomnih vozil se v vedno večji meri spogledujejo z uporabo LiDAR, ki pa je trenutno omejena s ceno.

Souporaba LiDAR z drugimi senzorji

- ▶ Potreba bo integraciji več tehnologij, in sicer:
 - ▶ Umetna inteligenca -
 - ▶ LiDAR - izmeri razdaljo in oriše okolico (prepoznavanje objektov) - DRAG
 - ▶ RADAR - merjenje hitrosti in razdalje vendar ima nizko resolucijo
 - ▶ Kamere - prikaz okolice, ki je vozniku nevidna (mrtvi koti...itd)
 - ▶ Ultrazvočni senzorji - kratek doseg (bolj primeren za zaznavanje bližnjih objektov)
 - ▶ Termalne kamere - komplementarne optičnim kameram v okolju s slabšo svetlobo

SWOT Umetna inteligenca

Prednosti <ul style="list-style-type: none"> • Generiranje ustreznih odločitev/predlogov med vožnjo, ki pomagajo vozniku, 	Slabosti <ul style="list-style-type: none"> • Algoritmi globokega učenja niso primerni za generiranje odločitev ampak za zaznavanje • Veliko število drugačnih omrežnih struktur, ki so namenjene za različne aplikacije pri avtomatizacije vozil
Priložnosti <ul style="list-style-type: none"> • Razvoj rešitev za popolnoma avtomatizirano vožnjo in s tem posledično zmanjšanje negativnega vpliva človeškega faktorja. 	Grožnje <ul style="list-style-type: none"> • Pomanjkanje standardov in interoperabilnosti • Nezadovoljiva zanesljivost

SWOT LiDAR

Prednosti <ul style="list-style-type: none"> • Oriše okolico do 200 metrov od vozila • Kot komplementarni senzor optični kameri pri prepoznavanju objektov in RADAR-ju pri merjenju razdalje 	Slabosti <ul style="list-style-type: none"> • Visoka cena rotacijskih LiDAR senzorjev • Drage komponente
Priložnosti <ul style="list-style-type: none"> • Razvoj kompaktnih modulov in solid-state LiDAR za namene avtonomnosti vozil 	Grožnje <ul style="list-style-type: none"> • Ločena strojna oprema za procesiranje signalov, ki lahko vpliva na avtonomnost izključno baterijskih sistemov • Pri manjši valovni dolžini 905 nm in veliki impulzni moči ogroža očesno mrežnico

SWOT RADAR

Prednosti <ul style="list-style-type: none"> • Merjenje hitrosti in razdalje ostalih udeležencev v prometu • Kot komplementarni senzor LiDAR-ju pri merjenju razdalje 	Slabosti <ul style="list-style-type: none"> • Nizka resolucija
Priložnosti	Grožnje <ul style="list-style-type: none"> • Nevarnost frekvenčnih motenj (medfrekvenčni konflikti)

SWOT Optične kamere

Prednosti <ul style="list-style-type: none"> • Zagotavlja sliko območij okoli vozila, ki so zaradi mrtvih kotov nedostopni uporabniku • Omogoča prepoznavanje prometne signalizacije 	Slabosti <ul style="list-style-type: none"> • Kratek doseg
Priložnosti <ul style="list-style-type: none"> • Možnost razvoja algoritmov za prepoznavanje vzorcev, ki omogočajo zaznavanje prometne signalizacije 	Grožnje <ul style="list-style-type: none"> • Napake pri prepoznavanju vzorcev, lahko vodijo do napačnih odločitev.

SWOT Ultrazvočni senzorji

Prednosti

- Zaznavanje bližnjih objektov in oseb kot pomoč pri parkiranju oz. vožnjo v tesnem urbanem okolju.

Slabosti

- Kratek doseg
- Odvisnost hitrosti zvoka od temperature.

Priložnosti

- Razvoj zmogljivosti, ki avtomatizirajo manevre vozila v omejenem prostoru.

Grožnje

- Napačne meritve zaradi odvisnosti hitrosti zvoka od temperature.

SWOT integracija senzorjev

Prednosti

- Redundančnost
- Večja natančnost pri zaznavanju okolja
- Izboljšanje situacijskega zavedanja

Slabosti

- Nezadostna natančnost nekaterih senzorjev
- Velike količine podatkov, ki jih je potrebno obdelati v realnem času.

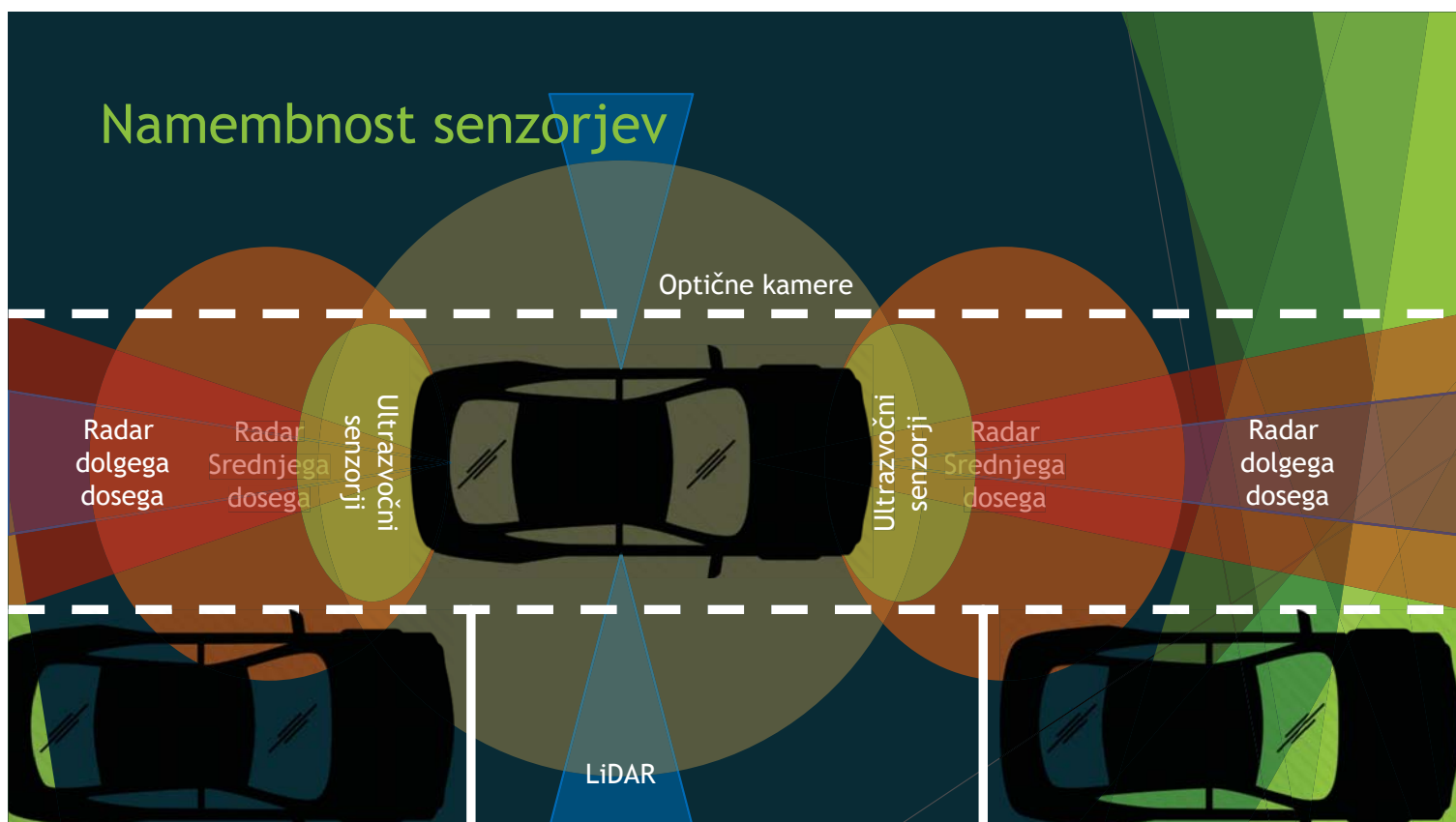
Priložnosti

- Vzpodbujanje razvoja učinkovitejših senzorjev in pripadajočih algoritmov za prepoznavanje vzorcev in analizo signalov

Grožnje

- Nevarnost elektromagnetnih motenj
- Ni enotnega oz. standardiziranega pristopa

Namembnost senzorjev



Omejitve

- ▶ Uporaba cenejših laserskih diod z valovno dolžino 905 nm,
- ▶ Omejevanje impulzne moči z namenom preprečevanja poškodb mrežnice,
- ▶ Posledično zmanjšamo doseg med 30 in 100 metrov (odvisno od odbojnosti objekta),
- ▶ Visoka cena rotacijskega LiDAR-ja Velodyne.

Rešitve

- ▶ Uporaba večjega števila stacionarnih LiDAR na vozilu z omejenim lokom (solid state LiDAR),
- ▶ Sestavljena skupna slika okolica in možnost merjenja razdalje z izračunom časa potovanja žarka od trenutka oddajanja in sprejema.
- ▶ Manjša cena od rotacijskega LiDAR, in sicer iz okoli 60.000 Dolarjev na <1.000 Dolarjev na enoto,
- ▶ Uporaba LiDAR-ja z valovno dolžino 1550 nm.

Delitev različnih konceptov LiDAR

- ▶ Skenirani LiDAR
 - ▶ Rotacijski z
 - ▶ Premičnimi ogledali in prizmami
 - ▶ Rotacijska/oscilacijska makro-ogledala/prizme
 - ▶ Oscilacijska MEMs ogledala
 - ▶ Faznega antenskega niza
- ▶ Staring LiDAR
 - ▶ Fixed - Multibeam
 - ▶ Difuse light cone

FMCW LiDAR

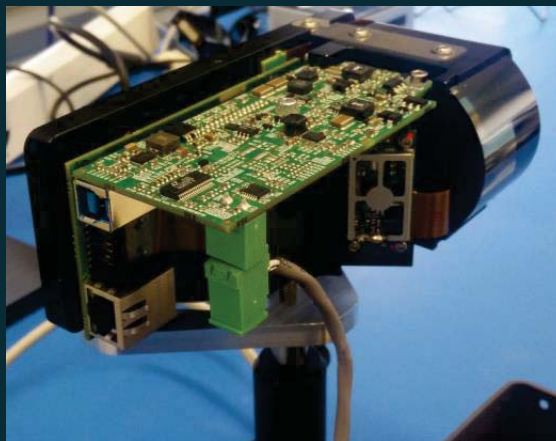
- ▶ Izboljšana resolucija dosega omogoča ločevanje ploskev, ki so si prostorsko blizu,
- ▶ Izboljšan dinamični razpon, ki omogoča istočasno merjenje svetlih in zatemnjenih objektov,
- ▶ Omogoča zaznavanje gibanja objektov (hitrost) in izboljša doseg delovanja.
- ▶ Implementacija LiDAR-ja na čipu lahko zmanjša ceno posameznega modula za 99 %

LiDAR z uporabo faznega antenskega niza

- ▶ Souporaba MEMS stikal in optičnih valovodov razporejenih v niz, ki usmerjajo žarke v prostor (na podlagi območja interesa).
- ▶ Implementacija različice kratkega (905 nm) in dolgega (1550 nm) dosega.
- ▶ Različica s kratkim dosegom bi omogočala skeniranje 170° horizontalno in 60° vertikalno, ki bi bila namenjena nadzoru bližnjih objektov,
- ▶ Različica za dolgim dosegom pa bi omogočala skeniranje 50° horizontalno in 20° vertikalno, z namenom nadziranja okolja do 200 m

MEMs LiDAR

- ▶ Quasi solid-state implementacija LiDAR senzorja (mehanični skenirni LiDAR),
- ▶ Ogledala velikosti $\sim 2 \times 2$ mm, ki usmerjajo laserski žarek v željeno smer so edini premični del sistema,



MEMS LiDAR [2]

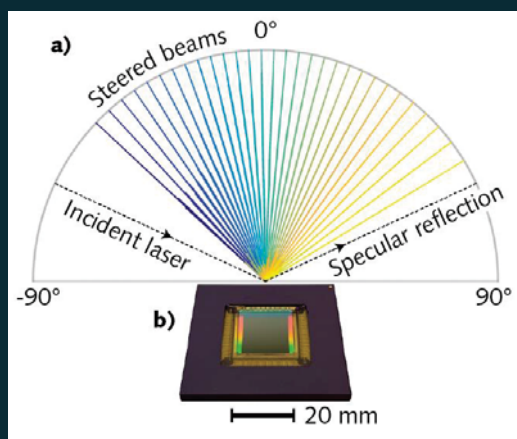
- ▶ Tipična velikost MEMS LiDAR, ki je v uporabi na brezpilotnih letalih je $70 \times 60 \times 60$ mm pri teži okoli 45 gramov.
- ▶ Potrebna imuniteta pred tresljaji, ki so tipični med vožnjo. Resonanca MEMS ogledala višja od 0,8 kHz



Mitsubishi MEMS LiDAR [3]

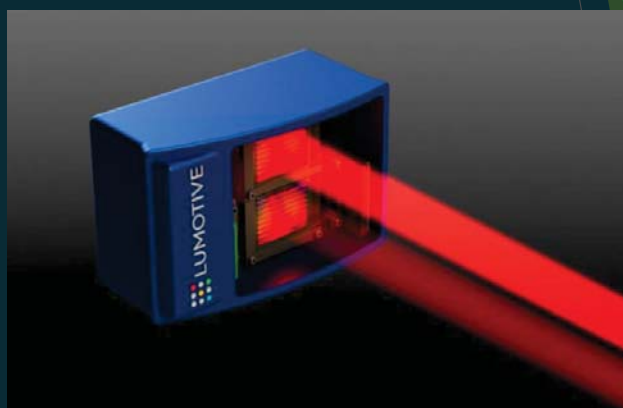
Meta-površine z uporabo tekočih kristalov

- ▶ Arhitektura je podobna principu MEMS vendar je namesto ogledala uporabljena meta-površina, ki usmerja laserske žarke s pomočjo tekočih kristalov.
- ▶ Fazni zamik je sorazmeren napetosti, ki je dovajana resonatorju kjer ta posledično rotira lokalni tekoči kristal in s tem povzroči zamik



Princip meta-površin z uporabo tekočih kristalov [4]

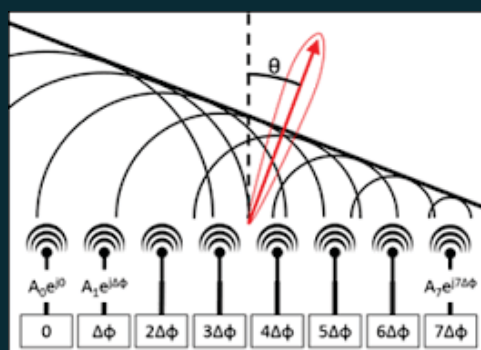
- ▶ Usmerjanje žarkov na meta-površini se izvaja na eni osi, medtem ko se na pravokotni osi omenjena površina uporablja kot ogledalo.
- ▶ Lumotive Lidar sistem uporablja dve metapovršini in sicer eno za oddajanje in eno za sprejemanje laserskih žarkov.



LiDAR z uporabo metapovršin proizvajalca LUMOTIVE [5]

Optični valovodi razporejeni v niz

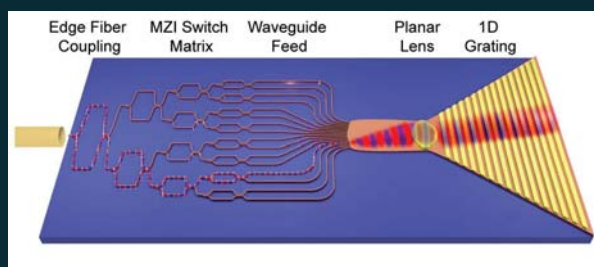
- ▶ Uporabljen je niz optičnih anten, pri katerih se krmili fazni zamik laserskega signala z namenom usmerjanja.



Optical Phased Array LiDAR [6]

LiDAR na vezju

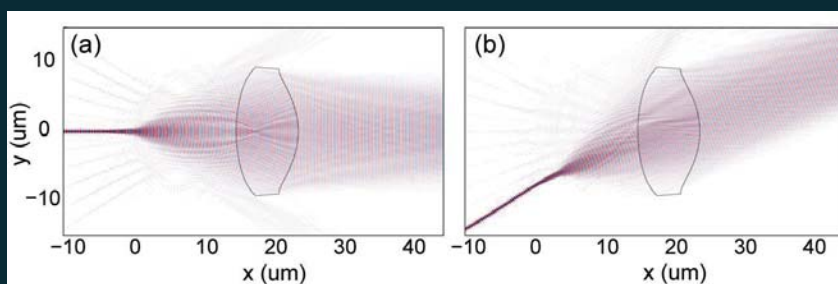
- ▶ Ob prenosu željenega signala v valovod na vezju, ki usmerja svetlobo po željeni optični poti. Ta se nato usmeri v stikalno matrico v obliki vzorca drevesa, ki je sestavljen iz Mach-Zehner interferometrov. Ta ustvari več valovodov, ki se pretakajo v lečo pod različnimi koti ki se nato s pomočjo leče tudi usmeri. Horizontalna smer žarka je odvisna od tega, pod katerim kotom je ta oz. s katerega valovoda je ta prispel v lečo.



Arhitektura usmerjanja žarka, ki temelji na Rotmanovi leči [1]

Vertikalna smer

- ▶ Vertikalna smer se krmili s pomočjo uklonske mreže kjer je vertikalni uklonski kot odvisen od valovne dolžine žarka.
- ▶ Torej z uravnavanjem frekvence laserja lahko določamo vertikalni kot žarka.



Odvisnost smeri izhodnega žarka na podlagi vhodnega valovoda [1]

Doseg

- ▶ Kompleksnost sistema se zmanjša za dvakratnik v primerjavi z OPA arhitekturo. Medtem se horizontalni FoV (Field of view) poveča za dvakratnik.
- ▶ LiDAR na čipu potrebuje le 10 valovodov za usmerjanje žarka, medtem ko OPA arhitektura potrebuje okoli 100 aktivnih komponent za fazni zamik, ki delujejo istočasno.
- ▶ Za doseganje pogoja v avtomobilski industriji, kjer kot zahtevan doseg določa 200 metrov je bila določena shema zaznavanja, ki temelji na FMCW saj naj bi bila bolj učinkovita od ToF (time of flight).

Projekt CLARIFIER

- ▶ Hibridni RADAR-LiDAR senzor implementiran s pomočjo fotoničnega integriranega vezja.
- ▶ Namen je zmanjšati velikost, težo in porabo, kar zviša avtonomijo gostujoče platforme.
- ▶ Souporaba obeh senzorjev omogoča končnemu uporabniku večjo situacijsko zavedanje.
- ▶ Optimizacija energijske porabe z namenom večanja baterijske avtonomije sistema

Vprašanja?

Literatura

- [1] J. J. López, T. Mahony and S. Kim, *MIT Spinoff Building New Solid-State Lidar-on-a-Chip System*, 01 December 2020, IEEE Spectrum, dostopno na: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/design/kyber-photonics-solid-state-lidar-on-a-chip-system>, Dostopano: 31. 1. 2021.
- [2] N. Druml, I. Maksymova, T. Thurner, D. van Lierop, M. Hennecke, A. Foroutan, *1D MEMS Micro-Scanning LiDAR*, The Ninth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, dostopno na: https://www.researchgate.net/publication/326632441_1D_MEMS_Micro-Scanning_LiDAR, Dostopano: 31. 1. 2021.
- [3] *Mitsubishi Electric introduces MEMS LiDAR solution for autonomous vehicles*, Green Car Congress, dostopno na: <https://www.greencarcongress.com/2020/03/20200312-mec.html>, Dostopano: 31. 1. 2021.

- ▶ [4] G. M. Akselrod, *Optics for Automotive Lidar: Metasurface beam steering enables solid-state, high-performance lidar*, Laser Focus World, dostopno na: <https://www.laserfocusworld.com/optics/article/14036818/metasurface-beam-steering-enables-solidstate-highperformance-lidar>, Dostopano: 31. 1. 2021.
- ▶ [5] *Lumotive unveils LiDAR with LCM beam-steering technology for autonomous vehicles*, Green Car Congress, dostopno na: <https://www.greencarcongress.com/2019/03/20190321-lumotive.html>, Dostopano: 31. 1. 2021.
- ▶ [6] M. Dahlem, *OPTICAL PHASED ARRAYS FOR AUTOMOTIVE SOLID-STATE LIDAR SYSTEMS*, IMEC, dostopno na: http://epic-events.eu/epic/2019/lidar2019/191030_EPIC_LIDAR2019_P46.pdf, Dostopano: 31. 1. 2021.

Uporaba optičnih kasnilnih linij

Use of optical delay lines

Uroš Dragonja^{1,2}, Boštjan Batagelj¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

²Instrumentation Technologies

uros.dragonja@gmail.com

Povzetek

V prispevku so predstavljeni osnovni koncepti zakasnitev v optičnih vlaknih. Nadalje so predstavljeni praktični koncepti za spremembo in kontrolo (regulacijo) zakasnitev ter pogosti primeri uporabe, kot so: sita in resonatorji, sistemi za prenos časovno kritičnih signalov in oscilatorji.

Abstract

In the presentation the basic mechanism behind delay and delay change in optical fibers is presented. Furthermore the practical concepts for changing and controlling delay are presented together with common usage which spans from resonators and filters to oscillators and systems for transferring time-critical signals.

Usage of Optical Delay Uporaba optičnih kasnilnih linij

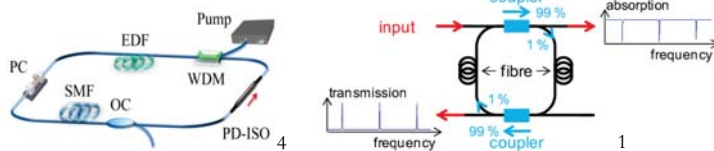
Uroš Dragonja^{1,2}, doc. dr. Boštjan Batagelj¹

PhD student @ Faculty of Electrotechnics, University of Ljubljana¹
Head of Product Implementation & Quality @ Instrumentation Technologies^{1,2}

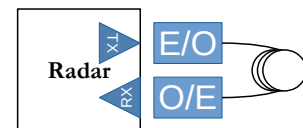
Basics of usage – all optical & RoF

Cavities & Resonators

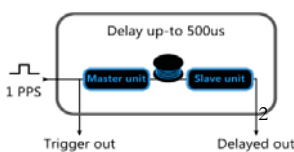
(Filtering, RF & Optical signal generators (lasers))



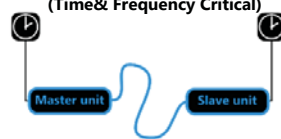
Radar Testing



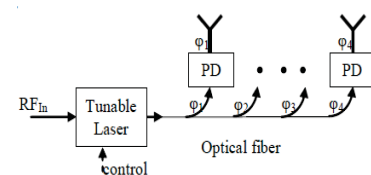
Stable delay line



Signal Distribution (Time & Frequency Critical)



Tunable phase-delay antenna arrays



1: Merrer, P.: High-Q Optical Resonators for Stabilization of High Spectral Purity Microwave Oscillators, Frequency Control Symposium, 2009 Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. IEEE International

2: More info: https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?tx_eurametctp_project%5bproject%5d=1064

3: Udvary E., Kobor D.: Photonic Approaches to Millimeter Wave True Time Delay line, Budapest University of Technology and Economics

4_ Song Hu: Gain-guided soliton fiber laser with high-quality rectangle spectrum for ultrafast time-stretch microscopy, Optics Express Vol. 24, Issue 10, pp. 10786-10796 (2016)

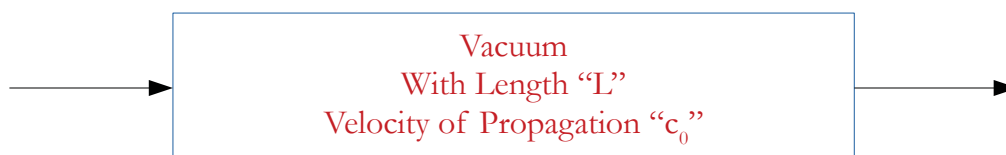
RF over Fiber (RoF) Delay Lines

Main Benefits of RoF (Radio over Fiber) delay implementation:

- Real radio channel (in contrast with digital delay lines)
- Very broadband (in terms of RF – 1nm ~ 100 GHz (@ cca 1550nm)
(easily available O/E components with 10GHz+)
- Almost “True Time Delay” = Group delay almost 0:
 - 17ps/nm/km @ 0.1nm (10 GHz channel) ~1ps/km = ~0.2ps/us
- Low attenuation (<0.3 dB/km) <-> (COAX > 1dB/100m→10dB/km)

3

Delay in Optics (Electromagnetics)

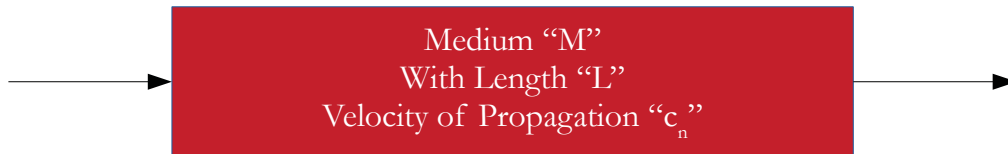


Propagation Delay in vacuum:

$$t_{dv} = \frac{L}{c_0}$$

4

Delay in Optics

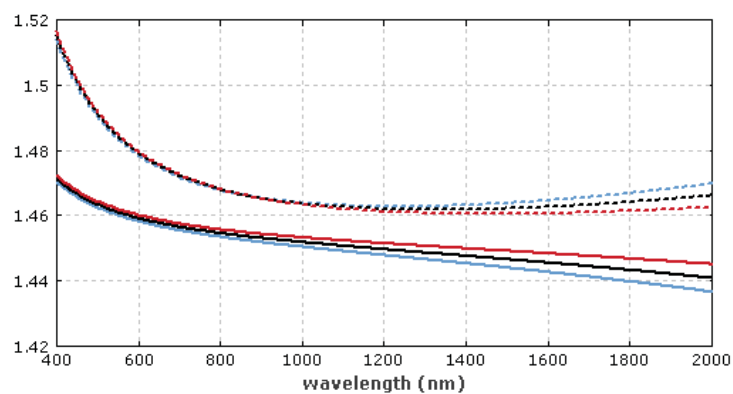


Propagation Delay in "simple" linear medium:

$$t_{dv} = \frac{L \cdot n}{c_0}$$

5

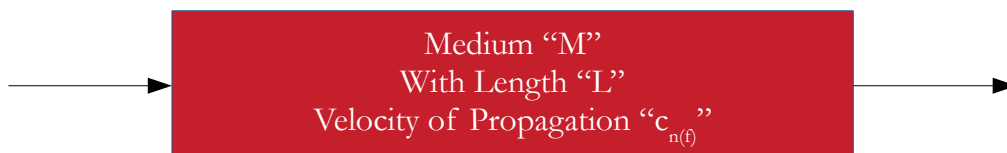
Is Propagation Velocity Constant ?



Refractive index (solid lines) and group index (dotted lines) of silica versus wavelength at temperatures of 0 C (blue), 100 C (black) and 200 C (red). Source: www.rp-photonics.com

6

Delay in Optics



Propagation Delay in linear medium:

$$t_{dv} = \frac{L \cdot n(f)}{c_0}$$

Refraction index change with frequency = Velocity change with frequency !!
=> Delay change with frequency

7

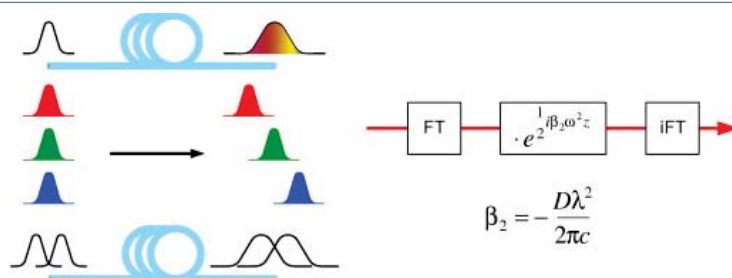
Phase & Group Delay in Optical Fibers

Phase velocity:

$$V_{PH} = \frac{\omega}{k} = \frac{c_0}{n}$$

Group velocity:

$$V_G = \frac{\Delta \omega}{\Delta k}$$



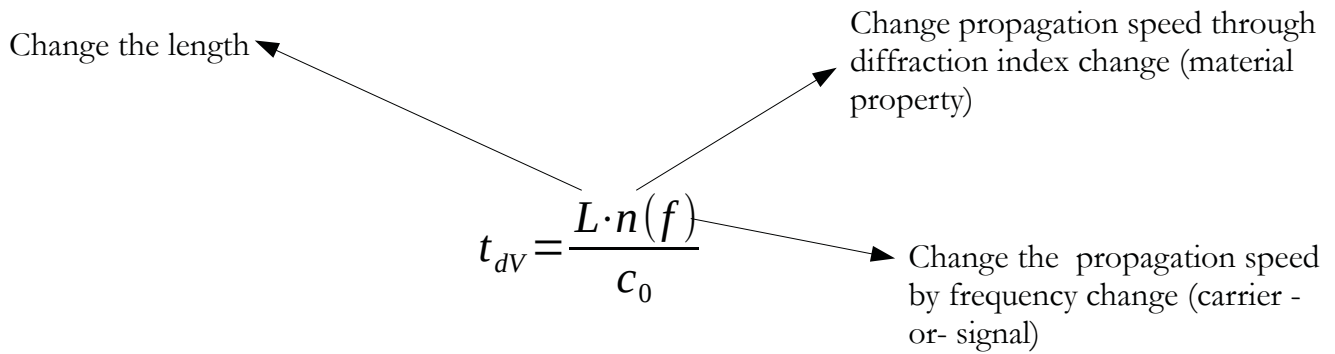
Pulse broadening due to group velocity dispersion and dispersion compensation in the Fourier domain. β_2 is the group velocity dispersion parameter, ω is the angular frequency of the carrier, z is the fiber length, λ is the wavelength of the carrier, D is the dispersion parameter and c is the speed of light.

True time delay (TTD) = time delay (velocity) is independent of the frequency!

Jin-xing Cai, Georg Mohs: Modern Undersea Transmission Technology, in Optical Fiber Telecommunications (Sixth Edition), 2013

8

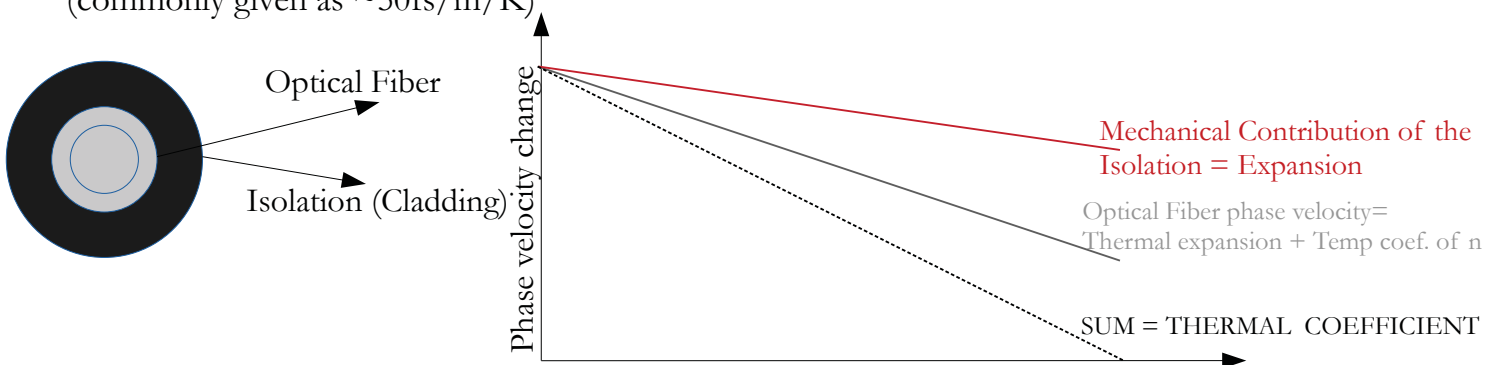
Practical Mechanisms for the Change of Delay (propagation delay – phase delay) I.



Polarization mode dispersion and modal dispersion also influences propagation speed, but it is hard to control or predict in optical fibers (or other media).

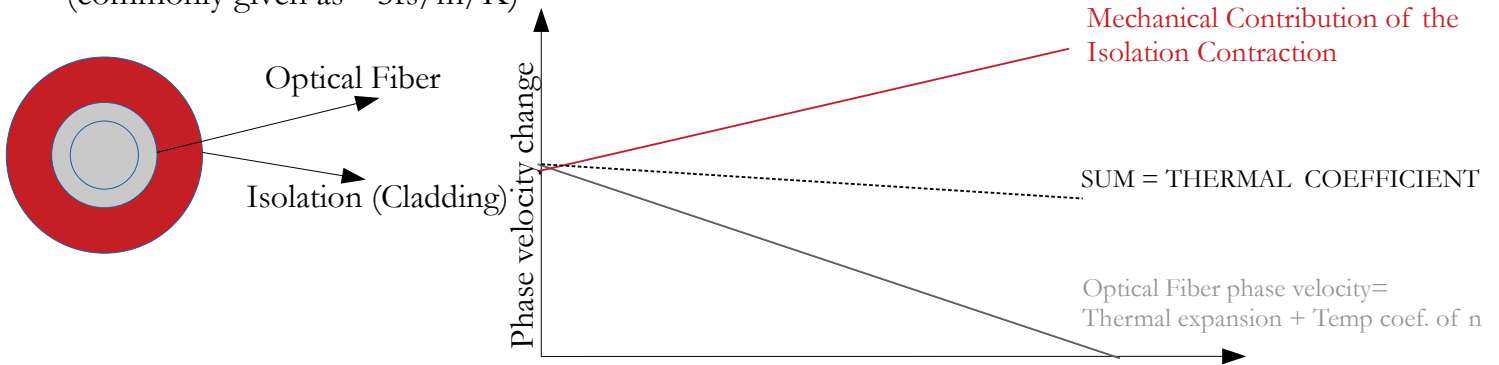
Thermal Coefficient of the Delay in Uncompensated Fiber

- Thermal expansion coefficient of silica glass: ~1 ppm/K
- Temperature coefficient of the effective refractive index: ~10 ppm/K
- => Uncompensated fibers have thermal coefficient of the delay: **~10 ppm/K**
(commonly given as ~50fs/m/K)



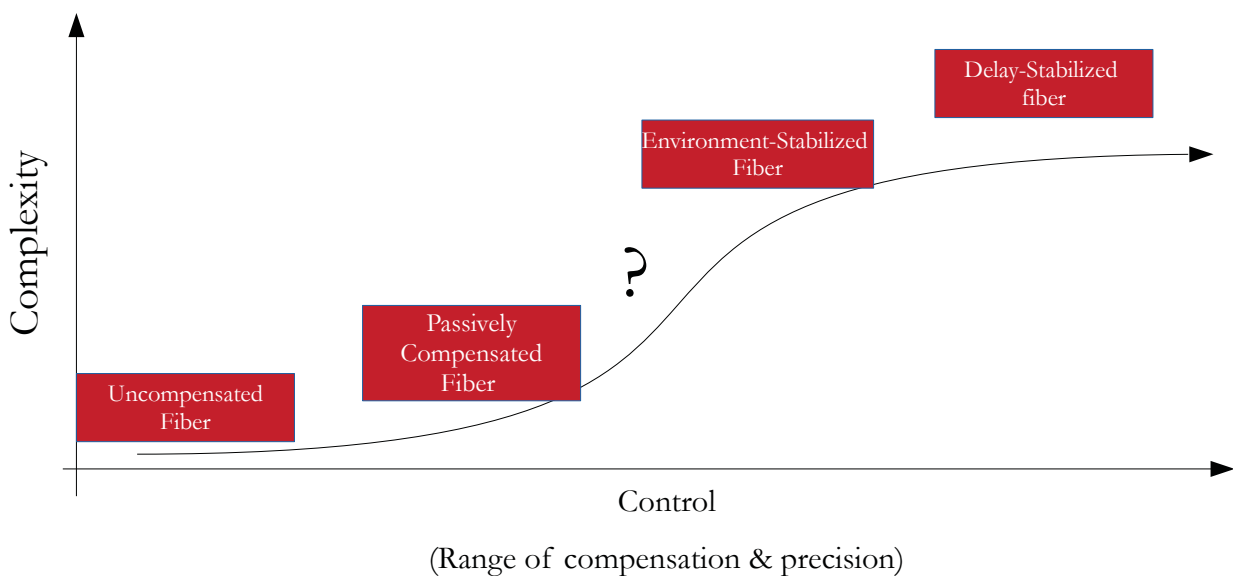
Thermal Coefficient of the Delay in Compensated Fiber

- Thermal expansion coefficient of the isolation: $\sim (-) 9 \text{ ppm/K}$
- Temperature coefficient of the effective refractive index: $\sim 10 \text{ ppm/K}$
- => Uncompensated fibers have thermal coefficient of the delay: $\sim 1 \text{ ppm/K}$
(commonly given as $\sim 5 \text{ fs/m/K}$)



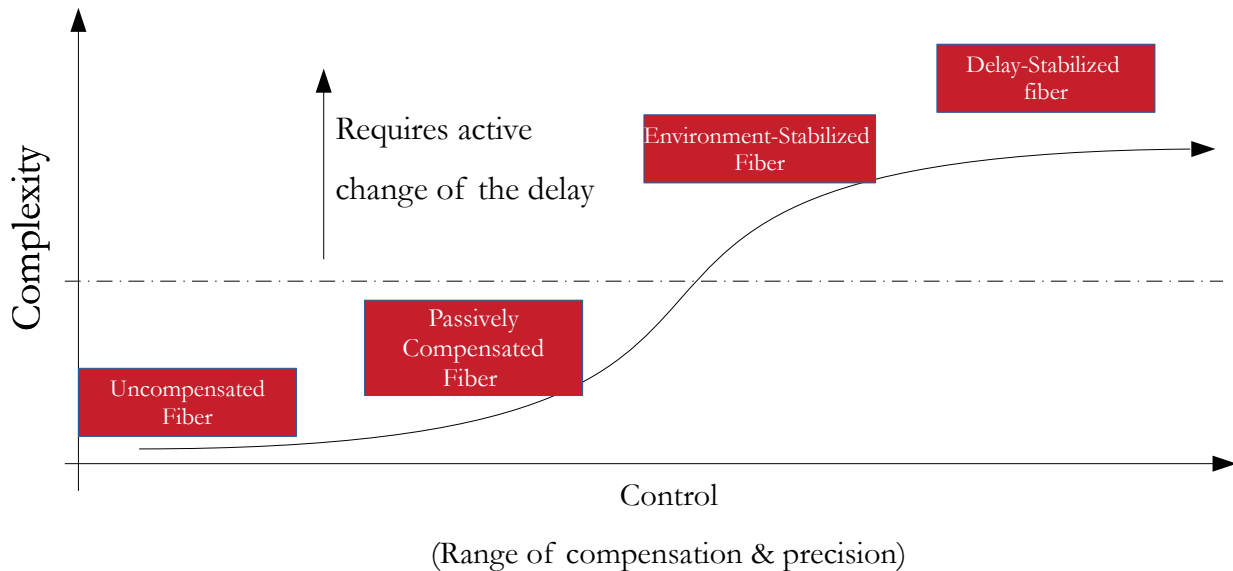
11

Control & Compensation of the Delay



12

Control & Compensation of the Delay



13

Practical Mechanisms for the Change of Delay (propagation delay – phase delay) II.

Change the length:

- Stretching (Mechanical expansion)
- Thermal expansion
- Discrete

Refractive index change in material:

- Temperature
- Thermal expansion

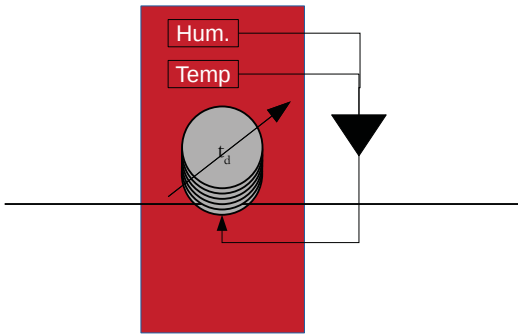
$$t_{dV} = \frac{L \cdot n(f)}{c_0}$$

Signal based refractive index change:

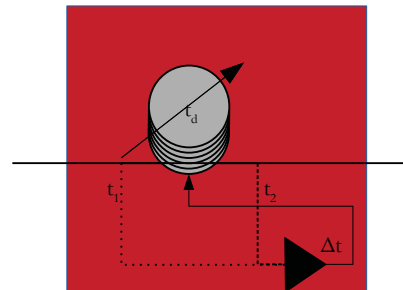
- Changing the carrier (f or λ)
- Changing the signal (f or λ)

14

Environment-stabilized vs. Delay-stabilized optical path



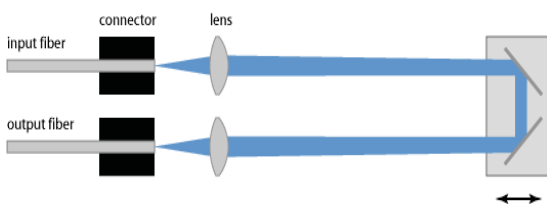
The environment stabilized to provide constant (1) Length, (2) Refraction Index, (3) Wavelength, etc.



Delay measured and corrected based on the error (Regulation).

15

Practical implementation of changeable delay in optics – Mechanical



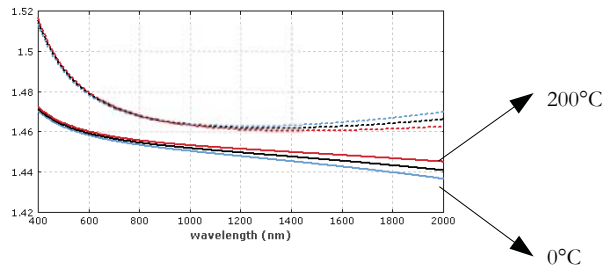
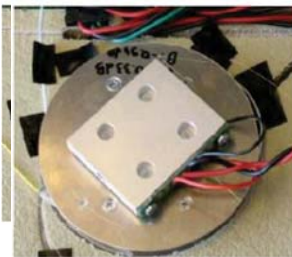
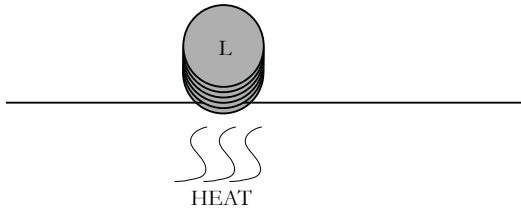
Range of Delay	Tuning Range	BW*
~ 1 ps – 1 ns	“100 %”	< 10 Hz

* Small signal BW (~10%)

Usually has high insertion loss

16

Practical implementation of changeable delay in optics

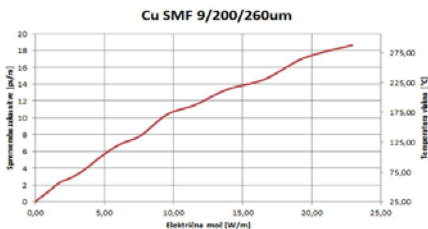
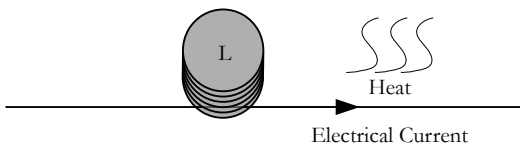


Refractive index (solid lines) and group index (dotted lines) of silica versus wavelength at temperatures of 0 C (blue), 100 C (black) and 200 C (red). Source: www.rp-photonics.com

Range of Delay	Tuning Range	BW*
~ 10ns – 100 us	< 0.1 %	< 100 mHz

* Small signal BW (~10%)

Practical implementation of changeable delay in optics – Copper-coated fiber



Range of Delay	Tuning Range	BW*
~ 10ns – 1 us	< 0.5 %	< 10 Hz

Higher thermal expansion coefficient (dominated by copper cladding) (17 ppm/K)
Higher temperature resistance (up to 400°C)

* Small signal BW (~10%)

U. Dragonja, J. Tratnik, B. Batagelj, »Use of copper-coated fiber as a tunable optical time-delay line in precise timing systems«, Opt Quant Electron 45, 1229–1235 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11082-013-9743-8>

Practical implementation of changeable delay in optics – Piezo Stretcher



Range of Delay	Tuning Range	BW*
~ 10ns – 10 us	< 0.1 %	< 1 kHz

* Small signal BW (~10%)

Stretching the fiber
Radial stretching increases insertion loss

19

Practical implementation of changeable delay in optics – Wavelength tuning (RoF)

Type	Range of Delay	Tuning Range	BW*
Laser Temperature $\lambda(T)$	N/A	~100ps/km* ~20ppm	< 10 Hz
Laser Current $\lambda(I)$	N/A	~20ps/km** ~5ppm	< 10 kHz

Assuming chromatic dispersion of a Single-mode optical fiber 17ps/nm/km

*cca. ~5nm change (~100K)

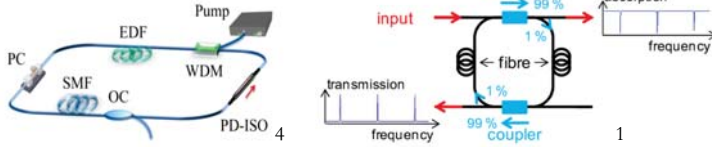
**cca. ~0.5nm change (~30mA)

* Small signal BW (~10%)

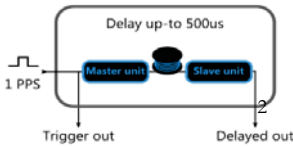
20

Selected Applications

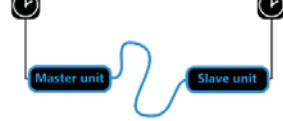
Cavities & Resonators (Filtering, RF & Optical signal generators (lasers))



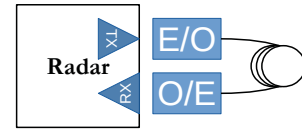
Stable delay line



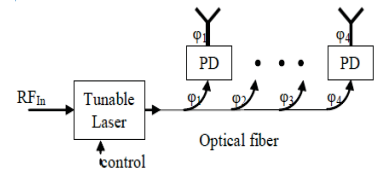
Signal Distribution (Time & Frequency Critical)



Radar Testing



Tunable phase-delay antenna arrays

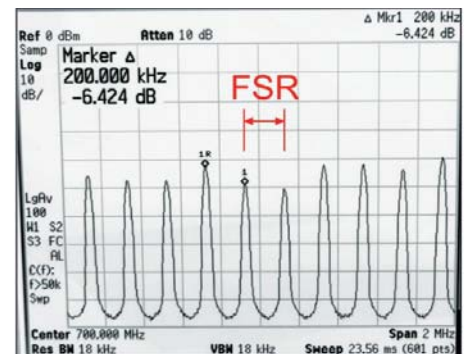
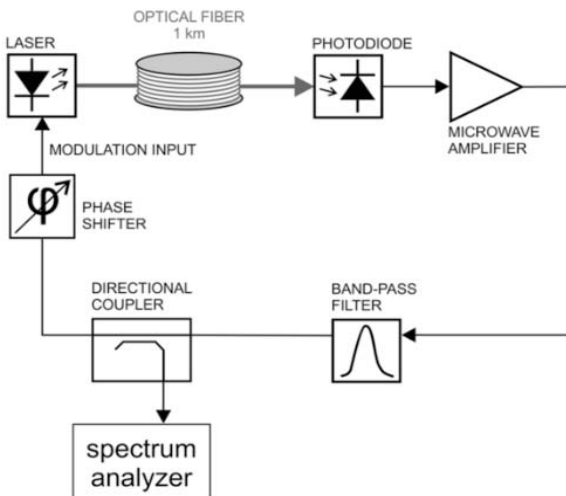


- 1: Merrer, P.: High-Q Optical Resonators for Stabilization of High Spectral Purity Microwave Oscillators, Frequency Control Symposium, 2009 Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. IEEE International
- 2: More info: https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?tx_eurametctp_project%5bproject%5d=1064
- 3: Udvary E., Kobor D.: Photonic Approaches to Millimeter Wave True Time Delay line, Budapest University of Technology and Economics
- 4_ Song Hu: Gain-guided soliton fiber laser with high-quality rectangle spectrum for ultrafast time-stretch microscopy, Optics Express Vol. 24, Issue 10, pp. 10786-10796 (2016)

3

21

Opto-electronic Oscillator

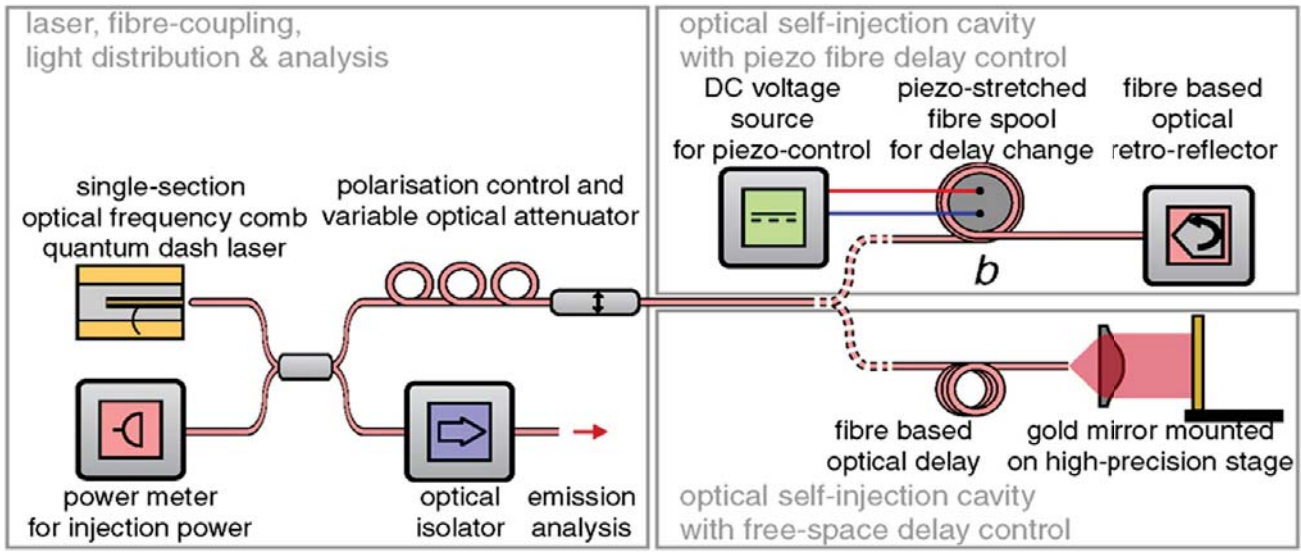


$$FSR = \frac{1}{\Delta t_{\Sigma}}$$

- 1 Bogataj L., Vidmar M., Batagelj B.: "A Feedback Control Loop for Frequency Stabilization in an Opto-Electronic Oscillator", Journal of Lightwave Technology, Vol.32, No.20, OCT.15. 2014.
- 2 L. Bogataj, J. Tratnik, B. Batagelj and U. Dragonja, "A highly stable OEO using a multi-purpose optical-delay stabilization system," 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Besancon, 2017, pp. 486-488, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8088935>

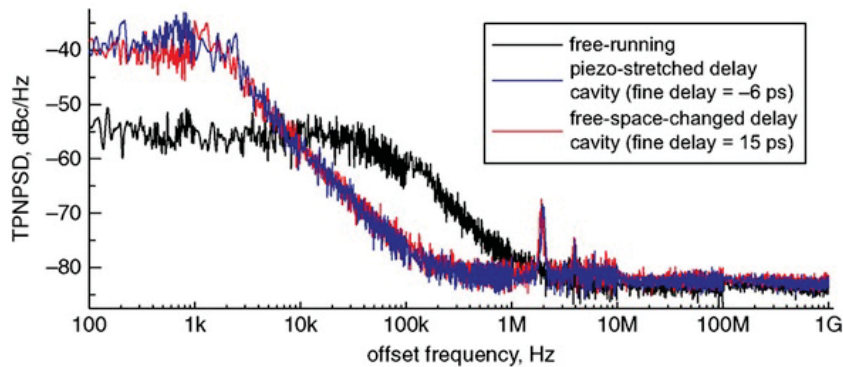
22

External Cavity – I.



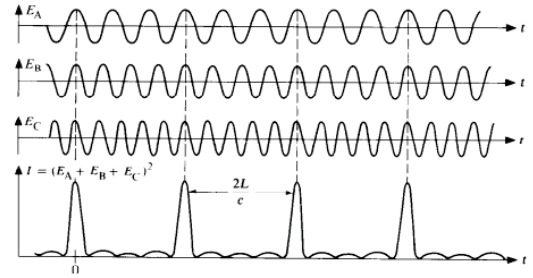
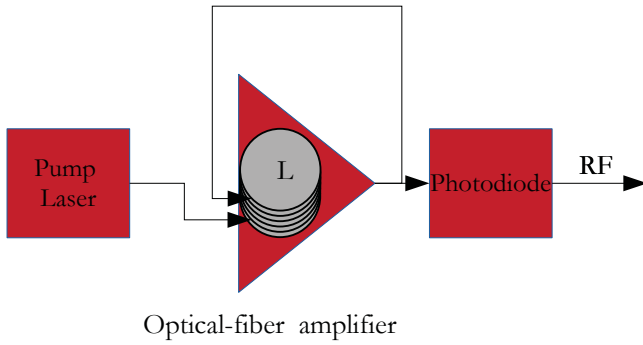
C. Weber, B. Batagelj, P. Fiala, D. Auth, U. Dragonja, Q. Gaimard, A. Ramdane, S. Breuer
 »Quantum dash frequency comb laser stabilisation by optical self-injection provided by an all-fibre based delay-controlled passive external cavity«, Electronics Letters, 01 September 2019, <https://doi.org/10.1049/el.2019.2016>

External Cavity – II.



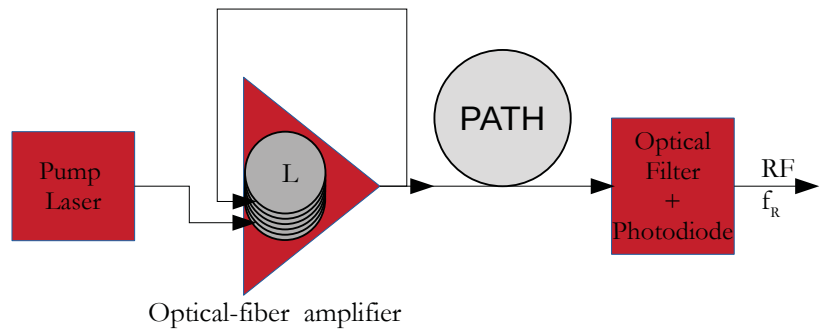
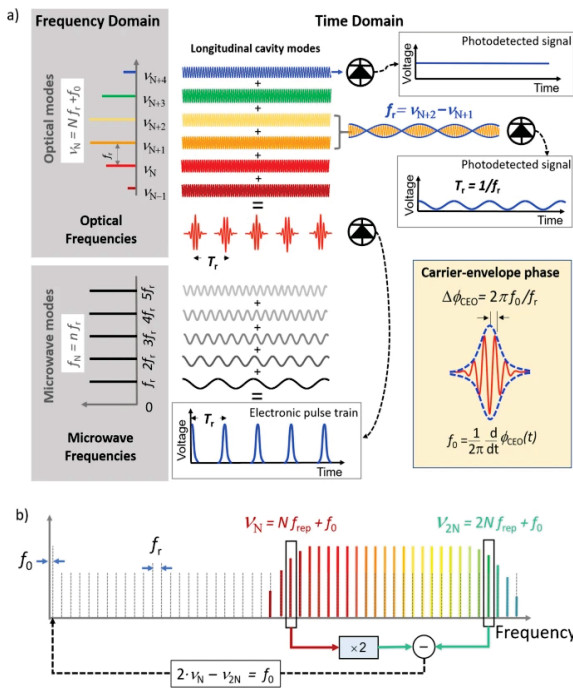
C. Weber, B. Batagelj, P. Fiala, D. Auth, U. Dragonja, Q. Gaimard, A. Ramdane, S. Breuer
 »Quantum dash frequency comb laser stabilisation by optical self-injection provided by an all-fibre based delay-controlled passive external cavity«, Electronics Letters, 01 September 2019, <https://doi.org/10.1049/el.2019.2016>

Mode-locked Laser



25

Fig. 1

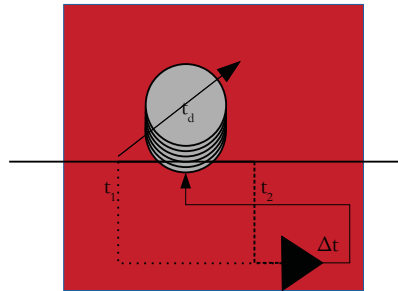


- Stability of the delay is critical for repetition frequency!
- Once generated, change of delay does not critically influence the repetition frequency (provided chromatic dispersion is low!)

Source: Fortier Tara, Baumann Esther: 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications, Communications Physics volume 2, Article number: 153 (2019)

26

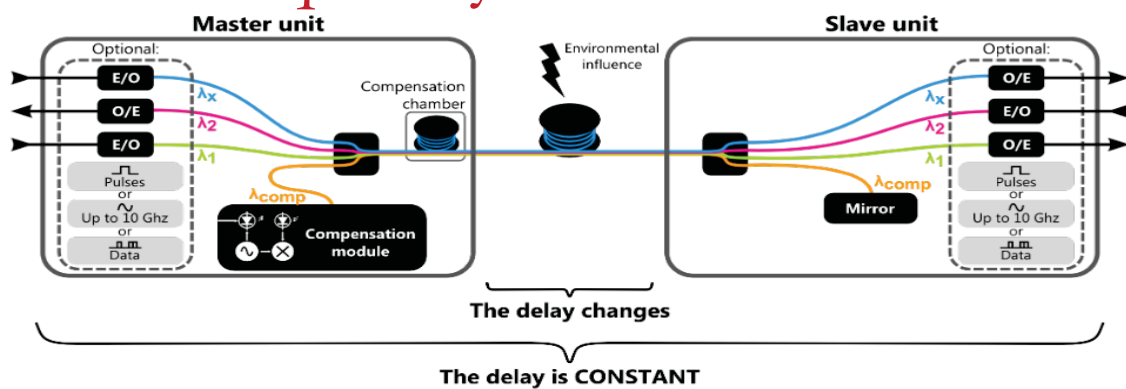
Signal Distribution Time & Frequency Transfer



Delay-stabilized optical path: Delay measured and corrected based on the error (Regulation).

27

Signal Distribution Time & Frequency Transfer



Absolute stabilization of delay $<1\text{ps}$ @ 1km over 48 hours
Useful transfer of time and frequency reference signals in research facilities (atomic clocks)

Strokovni seminar Optične komunikacije se je razvil iz izobraževalne dejavnosti, ki jo je pod okriljem projekta TEMPUS JEN-04202 v letih 1993 do 1997 izvajala Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Seminar je namenjen strokovnemu izpopolnjevanju strokovnjakov optičnih komunikacij in drugih, ki jih to področje zanima. Vključen je v program izvajanja vseživljenjskega izobraževanja na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegov namen je osveževanje, razširjanje izpopolnjevanje in poglobljanje znanja ter dvig strokovnosti zaposlenih strokovnjakov na področju optičnih komunikacij. Seminar obsega uvodni del, namenjen obnavljanju in razširjanju znanja, ter strokovni del, namenjen seznanjanju in poglobljanju v strokovna vprašanja o sistemih in njihovih sestavnih delih. Izvedenski del seminarja, ki ga izvajajo priznani vabljeni strokovnjaki, obsega nekatera pomembnejša razvojnna vprašanja.

Seminar on Optical Communications evolved from the activities running at the Faculty of Electrical Engineering University of Ljubljana, during the period from 1993 to 1997 under the auspices of the European project TEMPUS JEN-04202 granted for the same period. The seminar is intended to communication professionals and other involved into the field of optical communications. It is part of the continuing education programme at the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana. Its primer purpose is to enhance the expertise of professionals in the field of optical communications. The seminar consists of two parts: one part is dedicated to basic technical topics aiming to refresh fundamental knowledge in optical communications, and the second part is intended to the latest research and development achievements and trends from spectrum regulation, standardization, systems and solutions, all from international and national experts.

200 Gbit/s prenosni sistemi, 5G, 6G, digitalna družba, dostopovno omrežje, DWDM, fotonska integrirana vezja, FTTH, integrirana mikrovalovna fotonika, komunikacija z vidno svetlobo, Lidar, lomni količnik svetlovoda, metamateriali, optična infrastruktura, optična transportna omrežja, optične kasnilne linije, optične tehnologije na sodobnih ladjah, prostozračne optične zveze, svetlobno vlakno, VLC, XGS-PON

200 Gbps transport systems, 5G, 6G, access network, digital society, DWDM, fibre effective refractive index, fibre optics, fibre sensing, free-space optical communications, FTTH, integrated microwave photonics, Lidar, metamaterials, optical communications on modern ships, optical delay lines, optical infrastructure, optical transport networks, photonic integrated circuits, visible light communications, VLC, XGS-PON

Aleksander Sešek, Andraž Debevc, Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj, Bruno Cacovich, Eran Inbar, Goran Živec, Ioannis Tomkos, Janez Krč, Janez Trontelj, Jernej Mušič, Katja Mohar Bastar, Klaus Samardžić, Kristjan Vuk Baliž, Luka Mustafa, Marko Topič, Matjaž Vidmar, Miha Cacovich, Mitja Golja, Mladen Radovanović, Rok Čotič, Uroš Dragonja, Žan Knafelc, Žiga Pušelj

O seminarju The seminar

Ključna gesla Keywords

Avtorji Authors

