

Numerične metode končnih razlik za modeliranje telekomunikacijskih kanalov: pristopi in izzivi

Roman Novak

Inštitut Jožef Stefan, Odsek za komunikacijske sisteme, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: roman.novak@ijs.si

Povzetek. Brezžična omrežja naslednjih generacij se bodo za zagotavljanje bistveno višjih prenosnih zmogljivosti ob manjši porabi energije in bolj učinkoviti rabi radijskih virov morala natančneje zavedati radijskega okolja, v katerem bodo obratovala in se mu prilagajala. Današnje metode modeliranja radijskega okolja še niso dovolj natančne, da bi to omogočile v polni meri. Starejše empirične metode so šibke pri prostorsko-časovni karakterizaciji kanalov. Prevladujoče deterministične metode na osnovi geometrijske optike znatneje odstopajo od realnosti v primeru modeliranja uklonskega pojava in sipanja. Na drugi strani numerične metode končnih razlik, ki slonijo na temeljnih Maxwellovih parcialnih diferencialnih enačbah elektrodinamike, zagotavljajo iskano natančnost, a so omejene na bistveno manjše računске domene. Trend večanja gostote dostopnih točk in manjšega dosega brezžičnih celic odpira vrata numeričnim metodam končnih razlik kot alternativni metodam sledenja žarkom. Prispevek je pregled trenutnih pristopov in izzivov na področju numeričnih metod končnih razlik, ko so te uporabljene za modeliranje telekomunikacijskih kanalov. Identificiramo osnovne težave in nakažemo potencialne smeri njihovega reševanja. Predlagano še sprejemljivo zmanjšanje natančnosti numeričnih metod v povezavi s strojnimi pospeševanjem algoritmov za njihovo večjo uporabnost pri modeliranju telekomunikacijskih kanalov je alternativa izboljševanju natančnosti trenutno bolj razširjenih determinističnih modelov.

Ključne besede: radijsko razširjanje, račun oddaljenega polja, predikcija signala, metode končnih razlik, numerične metode

Numerical Finite-Difference Techniques in Telecommunication Channel Modelling - Approaches and Challenges

Wireless networks of the next generation should optimally adapt themselves to the operating environment in order to meet the requirements of a significantly higher throughput at a lower energy consumption and at increased utilization of radio resources. The current methods used for the radio environment modelling are insufficiently accurate. Older empirical models can no longer be used to model channel spatial and temporal characteristics because of their inadequacy. The widespread deterministic modelling based on geometric optics significantly deviates from the radio frequency diffraction and scattering behavior. On the other hand, the numerical finite-difference techniques based on the Maxwell's partial differential equations of electrodynamics do provide the required level of details but are limited to rather small computation domains. However, the increasing number of the access points and the associated reduction in the wireless cell reach suggest to use numerical techniques as a viable alternative to the ray optical modelling of the telecommunication channels. The paper reviews the current challenges and approaches to solving the large-scale telecommunication problems by using the numerical finite-difference techniques and proposes to adapt them because of their considerable acceptability. The techniques complemented with the use of hardware accelerators can become an efficient accuracy-improved alternative of the deterministic models.

Keywords: radio wave propagation, far-field computation, signal prediction, finite-difference methods, numerical methods

1 UVOD

Modeliranje telekomunikacijskih kanalov sloni na fizikalnih zakonitostih interakcije elektromagnetnega valovanja s snovjo ter se prilagaja zahtevam današnje in prihajajoče komunikacijske tehnologije. Vsestransko razumevanje razširjenja radijskih valov je ključnega pomena za nadaljnji razvoj brezžičnih omrežij. Ultra-zanesljiva in ultragosta omrežja kratkih prehodnih časov v viziji pete generacije (5G), masivni antenski sistemi, visokodinamični mobilni scenariji, lokacijsko zavedajoče komunikacije, pospešeno vključevanje metod umetne inteligence in premik v višje frekvenčne pasove je le nekaj dejavnikov in konceptov, ki zahtevajo natančnejše poznavanje razširjenja radijskih valov.

Čiste empirične metode s preslikavo meritev na podobna okolja že dolgo ne zagotavljajo potrebne natančnosti za karakterizacijo telekomunikacijskega kanala, ki zahteva prostorsko-časovni opis. Na drugi strani najdemo modele, ki že upoštevajo konkretno geometrijo prostora. V zadnjih letih se tako vse bolj uveljavljajo deterministični modeli na osnovi geometrijske optike oziroma sledenja žarkom, ki jih že lahko okarakteriziramo.

ziramo kot numerične metode pod pogojem, da algoritmi ne zahtevajo prilagajanja na meritve. Visokofrekvenčni približek, pri katerem obnašanje žarka posnema obnašanje ozkega snopa svetlobe, je problematičen pri modeliranju uklonskega pojava in sipanja. Geometrijska teorija uklona le delno reši prvo težavo. Sipanje, ki je še zlasti relevantno za modeliranje kanalov v zaprtih prostorih, nima zadovoljive rešitve. V splošnem velja, da vsaka razširitev algoritmov na osnovi geometrijske optike prinese hiter porast računske obremenitve, ki omeji uporabo take razširitve na zelo majhne geometrije ali pa prinese dvodimenzionalne poenostavitve. Tudi čisto analitični modeli, ki tipično upoštevajo podmnožico faktorjev realnega okolja, so vse manj uporabni ter ne zagotavljajo večanja hitrosti in zanesljivosti komunikacij.

Pod izrazom metode končnih razlik razumemo predvsem numerične metode reševanja temeljnih Maxwellovih enačb. Metode so osnova širokega področja računske elektrodinamike in so najbolj primerne za modeliranje interakcij električnega polja s fizičnimi objekti v problemih s karakterističnimi dimenzijami računske domene nekaj valovnih dolžin. Za telekomunikacijske probleme, v katerih je valovna dolžina bistveno manjša od podrobnosti računske geometrije, še vedno velja, da je sledenje žarkom primernejši način reševanja, predvsem z vidika hitrosti oziroma izračunljivosti v razpoložljivem času. Zahteve za ekstremne prenosne hitrosti v kombinaciji z zgoščevanjem celic omrežij naslednjih generacij omenjeno pravilo postavljajo pod vprašaj. Modelirane podrobnosti geometrije so vse manjše, še posebej v zaprtih prostorih, hkrati pa se tudi manjšajo dimenzije celic v smeri tako imenovanih pico in femto celic, ki tipično predstavljajo računsko domeno. Rast računske moči in zahteve po vse boljši karakterizaciji komunikacijskega kanala tako odpirajo potencialne možnosti za uporabo metod končnih razlik tudi na obsežnejših komunikacijskih problemih.

V tem prispevku naredimo pregled pomembnejših numeričnih metod končnih razlik in analiziramo osnovne težave, do katerih pride ob uporabi teh metod na problemu radijskega razširjanja. Nakažemo potencialne smeri reševanja teh težav za večjo sprejemljivost numeričnih metod v postopkih modeliranja, v katerih sicer prevladujejo modeli geometrijske optike. Predlagamo pristop še sprejemljivega zmanjšanja natančnosti metod, ki v osnovi upoštevajo celotni fizikalni spekter pojavov razširjenja elektromagnetnega valovanja, ob pogojih njihove izvedljivosti in uporabo namenskih strojnih arhitektur kot alternativo izboljševanju natančnosti bolj razširjenih determinističnih modelov.

Preostanek prispevka ima naslednjo strukturo. V drugem poglavju podamo nekaj konkurenčnih metod, ki jih želimo delno nadomestiti z numeričnimi pristopi. Osnovni pregled numeričnih metod končnih razlik je v tretjem poglavju. V četrtem poglavju analiziramo ovire, ki preprečujejo uporabo numeričnih metod na večjih problemih, ter potencialne smeri prilagajanja nu-

meričnih metod telekomunikacijskim problemom. Peto poglavje obravnava specifično problematiko strojnega pospeševanja računov na nivoju logičnih vrat ter uporabnosti večnamenskih grafičnih pospeševalnikov in podatkovno-pretočnih arhitektur. Pospešitev računa namreč omogoči povečanje velikostnega reda še sprejemljivih računskih domen. Prispevek zaključimo s sklenimi ugotovitvami v šestem poglavju.

2 KONKURENČNE METODE

Prvotni cilj modeliranja radijskega razširjanja je bil formalizirati načine razširjenja radijskega valovanja v čim širših okoljskih kategorijah. Statistični in empirični modeli so omogočili načrtovanje prvih mobilnih radijskih sistemov, niso pa zagotovili dovolj natančnega vpogleda v fizikalne mehanizme razširjenja, kot so ga omogočili poznejši modeli. V nadaljevanju naštejemo nekaj modelov, ki jih uvrščamo v omenjene skupine.

2.1 Statistični in empirični modeli

Obširen pregled modeliranja razširjanja radijskega valovanja podaja poročilo COST 273 [1]. Statistični modeli opisujejo kanal zelo približno v smislu povprečja in ne zahtevajo natančnega poznavanja okoljske geometrije. Empirični modeli so specifični za izbrani razred geometrije [2], [3] in jih že prištevamo med deterministične modele. Določeni so eksperimentalno s povprečjem velikega števila meritev in običajno vključujejo eksponent izgube poti [4]. Med empiričnimi modeli so bolj znani modeli Ikegami, Wallfish in Hata, katerih cilj je predvsem ovrednotenje izgub na poti. Časovne karakteristike kanala v obliki časovne razpršitve RMS (angl. Root Mean Square) in kota dospetja zajemajo modeli Saleh in Valenzuela [5]. Kratek računski čas empiričnih modelov pogojuje majhno natančnost napovedi, kar pride še zlasti do izraza v heterogenih okoljih.

2.2 Geometrijsko optični modeli

V nasprotju z empiričnimi modeli, v katerih je radijski kanal opisan s približnimi funkcijami nekaj parametrov na osnovi meritev v specifičnem okolju, metoda sledenja žarkom izkorišča geometrijskooptične principe za natančnejše modeliranje fizikalnih pojavov. Sledenje žarkom omogoča izračun naprednih karakteristik radijskega kanala, kot je razpršitev zakasnitev in vpadnih kotov na račun daljšega procesiranja. Običajno zahteva definicijo sprejemne sfere za detekcijo žarkov v bližini sprejemnika [6], [7], [8]. Algoritmi v tej skupini so v literaturi znani z različnimi imeni, kot so pošiljanje žarkov [9], streljanje in odbijanje žarkov SBR (angl. Shooting and Bouncing Rays) [10], metoda blazinice za bucike [11] ali pa bolj dovršene žarkovne cevi [12] ter sledenje snopom žarkov [13]. Zadnja dva pristopa v enem koraku združita obravnavo več žarkov, in tako konvergirata proti metodi slik [14], ki je pogost algoritmični pristop združevanja žarkov. Hibridne metode [15] in

pristop sledenja Gaussovimi snopom [16] so razširitve metode slik.

Vsem algoritmom za sledenje žarkom je skupen visokofrekvenčni približek razširjenja valovanja, kjer je obnašanje žarka prilagojeno obnašanju ozkega snopa svetlobe. Poenostavitev je še zlasti problematična v primeru modeliranja uklonskega pojava, ki je za optične frekvence običajno zanemarljiv [17]. Geometrijska teorija uklona GTD (angl. Geometrical Theory of Diffraction) prevede rešitev Maxwellovih enačb v žarkovni opis polja za uklon na robu dveh polravnin pri predpostavki prevodnosti uklonskega objekta [18], a prehod izračunanega električnega polja med področjem z odbitimi žarki in senco ni zvezen. Kouyoumjian in Pathak [19] sta razširila geometrijsko teorijo uklona s prehodno funkcijo, ki delno odpravi to pomanjkljivost. Račun uklonskega pojava je bil naknadno razširjen s približnimi metodami za delno prevodne materiale robov [20], [21].

Uporaba sledenja žarkom v zaprtih prostorih zahteva modeliranje sipanja za nadaljnje izboljšanje natančnosti [7], [22], [23], [24], [25]. Geometrijska optika ne zagotovi zadovoljive rešitve, zato je bilo predlaganih nekaj novih pristopov [22], [24]. Skupno vsem je nadaljnje večanje računske obremenitve in daljšanje časov izvajanja [7]. Algoritme sledenja žarkom prištevamo med metode v frekvenčni domeni. Pristop v časovni domeni, ki v enem prehodu modelira razširjanje širokopasovnega sistema, je bil predlagan pod imenom TDGO (angl. Time Domain Geometrical Optics) [26] in je trenutno še v začetni fazi raziskovanja.

3 NUMERIČNE METODE KONČNIH RAZLIK

Med numeričnimi metodami je konceptualno najenostavnejša metoda končnih razlik v časovni domeni FDTD (angl. Finite-Difference Time-Domain). Za avtorja velja Kane Yee, ki je leta 1966 predlagal numerični algoritem na osnovi centralnih razlik drugega reda, s katerim je diskretiziral Amperov in Faradayev zakon v času in prostoru [27]. Metoda še zdaleč ni edina, a kljub častitljivi starosti še vedno najpogosteje uporabljena, saj je imela že ob nastanku vrsto prednosti pred takratnim analitičnimi rešitvami v zaprti obliki ali rešitvami na osnovi neskončnih vrst. Metoda v celoti pokrije temeljne interakcije s snovjo, kot so uklon, odboj, lom in razpršitev, pri čemer je računska zahtevnost neodvisna od pojava, smeri ali števila zaporednih interakcij. Tega ne moremo trditi za druge analitične pristope, vključno za nekatere numerične metode. Tako integralne metode ne upoštevajo atmosferskih dejavnikov ali urbane arhitekture [28], [29], [30]. Uporabo paraboličnih enačb omejuje geometrijski kot s paraksialno smerjo [31]. Atmosferski pogoji prav tako niso upoštevani v že omenjenih metodah sledenja žarkom, ki imajo še težave z ukrivljenimi površinami, neravnim terenom in neobvladljivim večanjem števila žarkov v primeru zaporednih uklonskih interakcij.

V nasprotju z metodami v frekvenčni domeni je ena od prednosti računanja v časovni domeni neposreden izračun impulznega odziva z eno simulacijo, saj časovno modeliranje deluje nad signalom v celotnem frekvenčnem prostoru. V najenostavnejši različici račun električnega in magnetnega polja v dani točki zahteva le poznavanje vrednosti polja v sosednjih točkah prostora. Metoda FDTD sloni na eksplicitnem pristopu reševanja Maxwellovih enačb v diferencialnem zapisu. Vzrok velikega računskega bremena je omejitev resolucije vzorčenja prostora in časa CFL (angl. Courant-Friedrich-Levy). Metoda je bila zato sprva primerna le za električno manj obsežne probleme. Računsko enostavno formulacijo, ki zahteva le vrednosti polja v sosednjih točkah, poruši kompleksnejša obravnava robnih pogojev, s katero se zameji izračun v končnem prostoru. Osnovna formulacija robnih pogojev ABC (angl. Absorbing Boundary Conditions) temelji na polnem impedančnem ujemanju in vpelje nekaj slojev specializiranih točk prostora [32], [33], [34], [35], [36]. Robni pogoji so bili v zadnjih desetletjih predmet aktivnih raziskav s številnimi predlaganimi izboljšavami [37].

Izboljšanje natančnosti FDTD z odpravo vodilnega kvadratnega člena ocene napake je mogoče doseči s končnimi razlikami višjega reda [38] in/ali z menjavo prostorske geometrije točk, kot so heksagonalne mreže [39]. V pristopu s končnimi razlikami višjega reda se pojavijo težave z diskontinuiteto materialov. V [40] so jih reševali z menjavo prehodov v materialih z gladkimi zveznimi funkcijami. Zasledimo tudi nekaj poskusov brez mrežnih pristopov z adaptivno razporejenimi računskimi točkami [41], [42], [43], ki pa so še na nivoju dokazovanja koncepta.

Omejitev CFL odpravlja ADI FDTD (angl. Alternating-Direction-Implicit FDTD) [44], [45], [46], [47] za specifičen razred problemov in s tem odpira možnost uporabe metod končne razlike na obsežnejših problemih, a pri tem opusti lokalnost izvajanja računa. Podoben pristop je LOD-FDTD (angl. Locally One-Direction FDTD) [48], [49]. Uporaba FDTD za telekomunikacijske probleme je trenutno bolj ali manj še omejena na dvodimenzionalne pristope z nekaj poskusi tridimenzionalnega modeliranja [47], [50], [51]. Eden od takih pristopov je tudi R-FDTD (angl. Reduced FDTD), ki nekoliko zmanjša pomnilne zahteve algoritma [52], a žal na račun dodatnega časa procesiranja.

Kljub vsebovani frekvenčni analizi med metode računa v časovni domeni prištevamo tudi psevdospektralni pristop PSTD (angl. Pseudo Spectral Time-Domain), ki temelji na Fourierovi transformaciji predstavitev prostorskih odvodov [53]. Prostorski odvodi so eksaktni za vsaj dve točki na valovno dolžino, časovni pa še vedno vsebujejo napako drugega reda klasičnega algoritma. Težava diskretne transformacije je njena periodičnost, ki zahteva polno prilagojen absorpcijski sloj na robovih področja računanja. Zaradi zahteve po zveznosti

tangencialnih polj metoda ni primerna v scenarijih z vsebovanimi kovinskimi materiali.

Numerične metode na osnovi integralnega zapisa Maxwellovih enačb so že bile aplicirane na zaprta okolja zelo omejenih dimenzij [54], [55]. V tem primeru absorpcijski robni pogoji niso potrebni. Geometrije s homogenimi dielektričnimi ali prevodnimi materiali se rešujejo s površinskimi integrali [56], medtem ko nehomogeni materiali zahtevajo volumensko integriranje [57]. Enačbe so diskretizirane z uporabo metode MoM (angl. Method of Moments) [56] ali hibridne FE-BI (angl. Finite-Element Boundary-Integral) [57]. Pospešitev računa za večje ponavljajoče geometrije je mogoča z AD-FMM (angl. Array Decomposition-Fast Multipole Method) [58]. V tridimenzionalnih geometrijah je bila predlagana metoda VEFIE (angl. Volume Electric Field Integral Equation), ki jo je mogoče pospešiti s približnim algoritmom MLFMA (angl. Multi-Level Fast Multipole Algorithm) ali z eksaktnim CG-FFT (angl. Conjugate Gradient-Fast Fourier Transform) [54].

Razširitev diferencialnega zapisa enačb FDTD v prostoru z baznimi funkcijami, kot je biortogonalna funkcija sedmega reda Deslauriers-Dubuc, pripelje do večeresolucijske metode S-MRTD (angl. Scaling Multi-Resolution Time Domain) [59], [60], [61]. Metoda generira primerljive rezultate FDTD pri zmanjšanem prostorskem vzorčenju, kar vodi tudi do 8-kratne pohitritve [60]. V dosedanjih raziskavah je bila metoda omejena na dve dimenziji.

Posplošitev metode za načrtovanje vezij TLM (angl. Transmission Line Matrix) na modeliranje razširjenja valovanja v urbanem okolju prinese novo časovno metodo končne razlike [62]. Modeliranje pretoka implicitno vsebuje pojava odboja in uklona. Visoko računsko zahtevnost nekoliko zmanjša večeresolucijska frekvenčna različica pristopa MR-FDPF (angl. Multi-Resolution Frequency Domain Parallel Flow) [63]. Poenostavitve tridimenzionalnega računa z odpravo določenih načinov razširjenja [64] ali s kombinacijo dvodimenzionalnih računov [65] vodijo v približne rešitve, ki zahtevajo kalibracijo. Rešitev je približna tudi zaradi simulacij pri nižji frekvenci, s čimer se sicer zmanjša računsko zahtevnost pristopa.

Osnovna predpostavka metode parabolične enačbe je, da ima elektromagnetno valovanje preferenčno smer razširjenja, pri čemer se fizikalni pojavi razširjenja ne pojavljajo več kot 15 stopinj od osi razširjenja. Uporaba je primerna za specializirane geometrije, kot so tuneli [66]. Širšo uporabnost omogočajo razširitve dovoljenega kota odstopanja od osi razširjenja [67], [68]. Numerična rešitev, podobno kot v FDTD, temelji na zapisu s končnimi razlikami in zaporednih časovnih premikih. V ozkih geometrijah metoda generira rezultate, primerljive algoritmom sledenja žarkom, kar pa ne velja za splošnejša okolja, kjer se po natančnosti približa izkustvenim modelom [69].

4 KLJUČNE TEŽAVE NUMERIČNIH METOD

Numerične metode končnih razlik vsekakor niso idealne in imajo nekaj dobro poznanih slabosti, ki pomenijo resne ovire za obsežnejše telekomunikacijske probleme. Zlasti pereča problema sta numerična razpršitev in nestabilnost, ki nista posledici končne preciznosti računalnikov, temveč sta pogosto lastnosti algoritmov. Večja ovira je tudi porast računske zahtevnosti, ki zahteva nerealne čase izvajanja algoritmov. V nadaljevanju podrobneje obravnavamo tri ključne omejitve in mogoče smeri njihovega premagovanja.

4.1 Numerična razpršitev

Numerična razpršitev in s tem povezano progresivno večanje numeričnih napak sta osnovna slabost metod ob povečevanju računske domene. Viri napak numeričnih metod končnih razlik so sicer dobro razumljeni in matematično utemeljeni. Numerični pristop zaradi iterativne narave računa namreč vodi do akumulacije časovnih in faznih napak. Te napake privedejo do pojavov, ki jih v realnem svetu ne srečamo, kot so širitev in zvonjenje impulznih signalov, nepopolno izničenje razpršenih valovnih front, anizotropija razširjenja in navidezni ukloni. Izjema je enodimenzionalna različica problema, kjer je pod določenimi pogoji mogoč eksaktni račun. Napake je sicer mogoče poljubno zmanjšati z zgoščevanjem mreže računanja, a hitro naletimo na časovne omejitve, ko simulacija ni več izvedljiva v sprejemljivem času. Pospešitev numeričnih izračunov in zamejitev računskih napak sta tako ključna izziva uporabe metod končne razlike na velikosti problemov, ki se pojavljajo ob zagotavljanju telekomunikacijskih storitev.

V preteklosti je bila predlagana vrsta rešitev za zmanjšanje problema numerične razpršitve. Na primer, povečanje dielektričnih in magnetnih konstant omogoči premik faznih hitrosti tako, da je povprečna hitrost razširjanja bližja pravi, s čimer se problem razpršitve v primeru ozkopasovnih simulacij nekoliko zmanjša. Numerična razpršitev je namreč tudi frekvenčno, in ne le smerno odvisna (anizotropnost) ter v osnovi le zmanjšuje fazne hitrosti. Prehod na končne razlike četrtega reda za račun prvega prostorskega odvoda občutno zmanjša razpršitev, a se zato povečajo računske zahteve. Pojavijo se tudi nove težave zaradi diskontinuitete materialov. Alternativa omenjenim pristopom je menjava prostorske geometrije točk. Znano je, da se anizotropičnost močno zmanjša, če račun poteka v heksagonalni mreži v dvodimenzionalnem problemu oziroma na robovih in vozliščih tetradekaedrov in dualnih piramid v zahtevnejši tridimenzionalni različici problema. Heksagonalna mreža izniči vodilni kvadratni člen ocene napake, kar metodo po napaki uvrsti v razred končnih razlik četrtega reda, istočasno pa ohrani odvisnost računa le od neposrednih sosedov in odpravi že omenjeno težavo diskontinuitete materialov. Uporaba heksagonalnih mrež za telekomunikacijske geometrije je eden od odprtih

problemov.

4.2 Nestabilnost

Nestabilnost je naslednja ovira, ki preprečuje bolj grobo časovno diskretizacijo s ciljem uporabnosti metod za velike geometrije. V praksi se nestabilna rešitev kaže kot pojav hitrih oscilacij z eksponentno rastjo amplitude. Stabilnost klasičnega algoritma Yee je v osnovi pogojena z razmerjem med časovnim in prostorskim korakom, to je z mejo CFL. Prostorski korak določi geometrija problema, ta pa prek meje CFL največji časovni korak. Število simulacijskih korakov sledi iz zahtevanega časa opazovanja sistema in hitro naraste prek mej, ki bi bile še realno sprejemljive.

Algoritem ADI FDTD iz 80. let prejšnjega stoletja je ponudil mogočo smer odprave omejitve in s tem pospešitev simulacij, a le za probleme, ki zahtevajo velikost celic precej pod velikostjo opazovane valovne dolžine. Časovni korak sicer ni več strogo vezan na prostorski korak oziroma na velikost detajlov prostorske geometrije, mora pa biti dovolj majhen, relativno vezan na najmanjšo periodo pomembnih spektralnih komponent. Učinkovit pristop odprave nestabilnosti v večjih telekomunikacijskih problemih je aktivno področje raziskovanja.

4.3 Računska zahtevnost

Računska zahtevnost numeričnih metod je že v osnovi velika, z večanjem računske domene pa hitro postane neobvladljiva. V literaturi zasledimo nekaj pristopov, ki potencialno lahko zmanjšajo procesne zahteve v večjih geometrijah.

Adaptivno razporejene računske točke so alternativa pristopu reševanja diferencialnih enačb z regularnimi mrežami. Pristop s prilagodljivo mrežo omogoči zgostitev računskih točk v področjih s kompleksno geometrijo, s čimer se izognemo nepotrebnemu računanju v manj problematičnih delih geometrije. Področje je zelo razvito za vrsto fizikalnih simulacij, kot so simulacije konvekcije toplote ali pa hidrodinamičnih pojavov. Metoda je že bila poskusno aplicirana tudi na področje elektromagnetnega valovanja. Osnovni koncept temelji na zapisu dane funkcije kot integrala produkta te funkcije in Dirakovega delta impulza. V približku lahko nadomestimo Dirakovo delta funkcijo z jedrno funkcijo. Če je jedrna funkcija liha, njena integralna enota v limiti konvergira proti Dirakovemu delta impulzu in je kompaktna, potem je približek drugega reda natančnosti glede na velikost področja kompaktne podpore. Prednost integralnega zapisa funkcije se pokaže pri poenostavitvi računa prostorskega odvoda, torej ene od osnovnih operacij v izpeljavi enačb klasičnega algoritma Yee. Z zamenjavo integrala z vsoto infinitezimalni volumen zamenja diskretni volumen. Omenjeni pristop se lahko uporabi za numerični račun prostorskih razlik, medtem ko se časovne razlike še vedno računajo s centralnimi razlikami, kot to poteka v klasičnem algoritmu. Zaradi višje računske zahtevnosti

ovrednotenja jedrne funkcije in upoštevanja tudi bolj oddaljenih sosedov je možnost pospešitve simulacij za večje geometrije predmet aktivnih raziskav.

Kombinacija različice brezpogojno stabilnega računa, razlik višjega reda in drsečega okna je že bila uporabljena za dvodimenzionalno modeliranje urbane radijske celice s polmerom 550 m [40]. Uporaba drsečega okna, pri kateri račun poteka le v področju elektromagnetnega vala z največ energije, je obetaven način pospeševanja simulacij na velikih področjih, s primeri uporabe v tunelih [70], pri modeliranju razširjenja valovanja nad oceanom (v treh dimenzijah, razdalja 40 m) [71] in simulaciji razširjenja Gaussovega impulza 100-kHz signala navigacijskega sistema Loran-C na razdalji 400 km [72].

Kompromis med visokim računskim bremenom natančnejših metod končne razlike in hitrejšim, a manj natančnim pristopom z geometrijsko optiko so hibridne metode, v katerih se področja z velikostjo detajlov blizu simuliranim valovnim dolžinam pokrijejo z numerično metodo, v preostalem delu geometrije pa se uporabi sledenje žarkom. Težava takega pristopa so prehodi med področji različnega računa, ki pogosto zahtevajo interaktivne posege [73], [74], [54]. V treh dimenzijah zasledimo le nekaj hibridnih metod [75], [76].

5 STROJNE POHITRITVE

Numerični račun, ki je odvisen le od sosednjih vrednosti polja, je primeren za vzporedno izvajanje in odpira strojne možnosti za pohitritve. V splošnem velja, da je numerično reševanje Maxwellovih enačb primerno za vzporedne računalniške arhitekture, pri čemer še zlasti izstopa izvajanje FDTD na grafičnih pospeševalnikih GPU (angl. Graphics Processing Unit). Zaradi visoke regularnosti in lokalnosti osnovnega algoritma FDTD je bil ta večkrat implementiran tudi neposredno na nivoju logičnih vrat, kot so programirljiva logična vezja FPGA (angl. Field-Programmable Gate Array) ali aplikacijsko specifična integrirana vezja ASIC (angl. Application-Specific Integrated Circuit). Visokim pomnilnim zahtevam in ozkemu grlu med procesnimi sredicami in pomnilnikom se poskuša izogniti z namenskimi podatkovno-pretočnimi arhitekturami. Uporabnost grafičnih pospeševalnikov, implementacij na nivoju logičnih vrat in podatkovno pretočnih pristopov za sprejemljivost večjih računskih domen obravnavamo v nadaljevanju.

5.1 Grafični pospeševalniki

Pospeševanje metod končnih razlik z namensko računalniško arhitekturo je dobilo zagon z arhitekturo CUDA (angl. Compute Unified Device Architecture) [77]. V 2009 zasledimo uporabo FDTD za problem radijskega pokritja z uporabo skupka računalnikov s karticami CUDA [78]. GPU-hitrosti dosegajo tudi 13 G celic na sekundo za probleme do velikosti 3 G celic. Skupek 16 računalnikov Acceleware G80 GPU je tako

po ocenah raziskovalcev do 29-krat hitrejši od primerljivega skupka CPU (angl. Central Processing Unit). V študiji pohitritve večresolucijske metode S-MRTD je pokazano, da je izvajanje na GPU za to metodo še zlasti primerno [61]. Doseženi faktor pospešitve je bil 30, medtem ko je referenčni FDTD dosegel le faktor 10. Kompleksnost zapisa enačb z baznimi funkcijami in omejitev na dve dimenziji sta potencialna vzroka, da metoda v literaturi ni bolj raziskana. Izboljšanje natančnosti računa na GPU z optimizacijo časovnega koraka v bližini meje stabilnosti obravnava [79].

Med preostalimi netelekomunikacijskimi problemi, ki so bili pospešeni z vzporednim računanjem, naj omenimo račun TEz-FDTD (angl. Transverse Electric FDTD) za disperzivne materiale [80], 3D FDTD obravnavo modela človeka v biomedicinskih raziskavah [81] in pa hibridni implicitno-eksplicitni FDTD v analizi zaščite tiskanih vezij [82]. Algoritem ADI FDTD, ki odpravlja omejitve CFL in je zato izrednega pomena za obsežnejše probleme, je bil prav tako prenesen na GPU [83]. Učinkovitost GPU-implementacije ADI-FDTD kakor tudi že omenjenega LOD-FDTD je obravnavana v [84]. Tudi tehnika brez uporabe regularne mreže celic za obsežnejši problem ukrivljenega valovoda je bila uspešno realizirana na GPU [85].

Iz literature je tako mogoče sklepati, da GPU-hitrosti nekaj 10-krat presegajo hitrosti, ki jih dosežemo v splošni računalniški arhitekturi. Konkretno pospešitve so odvisne od algoritma in uporabljene strojne opreme. Trenutno je le malo primerov večjih problemov, ki bi bili simulirani v več dimenzijah. Vzroke lahko iščemo v visokih pomnilnih zahtevah teh problemov in ozkem grlu med procesnimi sredicami in pomnilnikom. Poleg tega maksimalna pospešitev algoritma na GPU v splošnem zahteva precizno uskladitev parametrov za konkretno arhitekturo.

5.2 Programirljiva vezja

Realizacija FDTD na nivoju logičnih vrat za enodimenzionalno različico problema se pojavi že leta 2002 [86], tridimenzionalna konceptualna različica algoritma Yee za enostaven primer resonančne votline v velikosti nekaj celic pa leta 2003 [87]. V zadnjem primeru je bila dosežena hitrost izvajanja nižja od hitrosti osebnega računalnika, a je raziskava nakazala nekaj specifičnih omejitev implementacij na nivoju logičnih vrat, kot sta zmanjšana natančnost zaradi uporabe realnih števil s fiksno vejico in ozko grlo pri dostopu do pomnilnika. Bolj poglobljena študija uporabe števil v zapisu s fiksno vejico zaključuje, da je potrebna vsaj 28-bitna predstavitev števil za še sprejemljivo napako [88]. Uporabo plavajoče vejice z enojno natančnostjo analizira [89]. Zagotovitev ustrezne natančnosti terja obilo razpoložljivih logičnih vrat.

Zaradi omejitev velikosti integriranih vezij so konkretni predlogi večinoma še omejeni na konceptualne implementacije in majhne probleme oziroma na poe-

nostavljene različice algoritma FDTD. Uporaba realnih števil s fiksno vejico v programirljivih vezjih prinese zmanjšanje natančnosti, prav tako ostaja problem ozkega grla pri dostopu do pomnilnika. Raziskav navzkrižnih povezav več integriranih vezij, ki bi omogočile učinkovitejšo preslikavo večjih računskih domen na razpoložljive računske vire oziroma porazdeljene pomnilne kapacitete, še ni. Obstajajo le poskusi poenostavitve kodiranja z uporabo OpenCL (angl. Open Computing Language) ali s preslikavo na vgrajena polja procesorjev. Tu se predvsem poskuša izkoristiti prednosti pristopa SIMD (angl. Single Instruction, Multiple Data).

5.3 Podatkovno pretočne arhitekture

Podatkovno pretočni pristop je predlagan v [90], [91], [92], [93] s ciljem odprave pomnilnih omejitev. Med podatkovno pretočne pristope spada še implementacija na razširjenih karticah Maxeler [94], ki daje več poudarka implementaciji absorpcijskih, periodičnih in Dirichletovih robnih pogojev. OpenCL-preslikava FDTD v treh dimenzijah na arhitekturo FPGA omogoči hitrosti do 114 GFLOPS [95], [96], kar je po avtorjevih trditvah 4-krat hitreje od implementacije na GPU. V programirljivih vezjih vgrajeni večjedrni procesor je bil uporabljen kot osnova za implementacijo FDTD z zmanjšano porabo energije v [97]. Na drugi strani sinhroni premiki podatkov vgrajenega polja procesorjev SIMD v nasprotju z asinhronimi prenosi arhitektur GPU poenostavijo breme prenosa podatkov in prav tako pospešijo izvajanje računa [98]. Iz literature lahko sklepamo, da se je težavi ozkega grla pri dostopu do pomnilnika mogoče izogniti s podatkovno pretočnim pristopom, a so tudi na tem področju raziskave v začetni fazi.

6 ZAKLJUČEK

V velikostnem razredu do nekaj deset valovnih dolžin že dolgo prevladujejo natančne metode končnih razlik. Metode temeljijo na Maxwellovih enačbah, ki so eden od najvidnejših fizikalnih dosežkov 19. stoletja. Poenoteenje električnega in magnetnega polja ter napoved obstoja elektromagnetnih valov velja za prelomno odkritje v znanosti. Numerično reševanje enačb je danes ključno orodje v razvoju elektronike, komunikacijskih naprav, računalnikov, laserjev, antenskih sistemov in drugih področij s problemi podobnega velikostnega razreda.

Numerične metode končnih razlik so v zadnjem desetletju začele prodirati tudi v klasične telekomunikacijske probleme, kot je modeliranje komunikacijskih kanalov v zaprtih in odprtih okoljih, kjer računske geometrije dosežejo velikosti tudi več sto valovnih dolžin. V korist uporabi metod sta vsekakor vse večja gostota oddajnikov in s tem povezano manjše geografsko pokritje celic oziroma dostopnih točk.

Zaradi izredno velike računske zahtevnosti so poskusi uporabe numeričnih metod pretežno omejeni na dvodimenzionalne prostorske geometrije s številnimi poeno-

stavitvami. Ni pa le računski zahtevnost tista, ki omejuje uporabnost tovrstnega modeliranja v obsežnejših telekomunikacijskih problemih. Pereča problema sta tudi progresivna numerična razpršitev in nestabilnost algoritmov. Za večjo sprejemljivost pristopa bo treba zamejiti vire napak v večjih računskih geometrijah pod napake današnjih determinističnih modelov v okviru razpoložljivega računskega časa.

V prispevku smo identificirali nekaj mogočih smeri prilaganja osnovnih numeričnih metod: uporabo heksagonalnih mrež, brezpogojno stabilne algoritme, brez-mrežni pristop in strojne pohitritve. Med možnostmi pohitritve računa je tudi uporaba hibridnega pristopa, v katerem večja področja homogenega prostora računamo z alternativnimi metodami, ali pa drsečega okna, kjer račun poteka le v področju elektromagnetnega vala z največ energije. Področje je zanimivo za nadaljnje raziskave in je alternativa prevladujočim determinističnim modelom.

ZAHVALA

Raziskovalni program št. P2-0016 Komunikacijska omrežja in storitve je iz državnega proračuna sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

LITERATURA

- [1] L. M. Correia, Ur., *COST Action 273, Mobile Broadband Multimedia Networks Techniques, Models and Tools for 4G*. Academic Press, 2006.
- [2] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, E. Tanghe, in L. Martens, "Simple indoor path loss prediction algorithm and validation in living lab setting," *Wireless Personal Communications*, zv. 68, št. 3, str. 535–552, 2013. doi: 10.1007/s11277-011-0467-4
- [3] V. Degli-Esposti, G. Falciaesecca, F. Fuschini, in E. M. Vitucci, "A meaningful indoor path-loss formula," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, zv. 12, str. 872–875, 2013. doi: 10.1109/LAWP.2013.2271532
- [4] T. S. Rappaport, *Wireless communications: Principles and practice*. Prentice Hall, 2002.
- [5] A. A. M. Saleh in R. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, zv. 5, št. 2, str. 128–137, februar 1987. doi: 10.1109/JSAC.1987.1146527
- [6] G. Durgin, N. Patwari, in T. S. Rappaport, "An advanced 3D ray launching method for wireless propagation prediction," *IEEE 47th Vehicular Technology Conference, Technology in Motion*, zv. 2, Phoenix, AZ, USA, 1997, str. 785–789. doi: 10.1109/VETEC.1997.600436
- [7] F. Fuschini, E. M. Vitucci, M. Barbiroli, G. Falciaesecca, in V. Degli-Esposti, "Ray tracing propagation modeling for future small-cell and indoor applications: A review of current techniques," *Radio Science*, zv. 50, št. 6, str. 469–485, junij 2015. doi: 10.1002/2015RS005659
- [8] R. Novak, "Bloom filter for double-counting avoidance in radio frequency ray tracing," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 67, št. 4, str. 2176–2190, april 2019. doi: 10.1109/TAP.2019.2905780
- [9] N. Noori, A. A. Shishegar, in E. Jedari, "A new double counting cancellation technique for three-dimensional ray launching method," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, NM*, 2006, str. 2185–2188. doi: 10.1109/APS.2006.1711020
- [10] Y. Tao, H. Lin, in H. Bao, "GPU-based shooting and bouncing ray method for fast RCS prediction," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 58, št. 2, str. 494–502, februar 2010. doi: 10.1109/TAP.2009.2037694
- [11] Z. Chen, H. L. Bertoni, in A. Delis, "Progressive and approximate techniques in ray-tracing-based radio wave propagation prediction models," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 52, št. 1, str. 240–251, januar 2004. doi: 10.1109/TAP.2003.822446
- [12] H. Suzuki in A. S. Mohan, "Ray tube tracing method for predicting indoor channel characteristics map," *Electronics Letters*, zv. 33, št. 17, str. 1495–1496, avgust 1997. doi: 10.1049/el:19970962
- [13] A. Schmitz, T. Rick, T. Karolski, T. Kuhlen, in L. Kobbelt, "Efficient rasterization for outdoor radio wave propagation," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, zv. 17, št. 2, str. 159–170, februar 2011. doi: 10.1109/TVCG.2010.96
- [14] J. W. McKown in R. L. Hamilton, "Ray tracing as a design tool for radio networks," *IEEE Network*, zv. 5, št. 6, str. 27–30, november 1991. doi: 10.1109/65.103807
- [15] F. Villanese, W. G. Scanlon, N. E. Evans, in E. Gambi, "Hybrid image/ray-shooting UHF radio propagation predictor for populated indoor environments," *Electronics Letters*, zv. 35, št. 21, str. 1804–1805, oktober 1999. doi: 10.1049/el:19991247
- [16] R. Tahri, D. Fournier, S. Collonge, G. Zaharia, in G. E. Zein, "Efficient and fast Gaussian beam-tracking approach for indoor-propagation modeling," *Microwave and Optical Technology Letters*, zv. 45, št. 5, str. 378–381, 2005. doi: 10.1002/mop.20829
- [17] K. A. Remley, H. R. Anderson, in A. Weissnar, "Improving the accuracy of ray-tracing techniques for indoor propagation modeling," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, zv. 49, št. 6, str. 2350–2358, november 2000. doi: 10.1109/25.901903
- [18] J. B. Keller, "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt. Soc. Am.*, zv. 52, str. 116–130, 1962. doi: 10.1364/JOSA.52.000116
- [19] R. G. Kouyoumjian in P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proceedings of the IEEE*, zv. 62, št. 11, november 1974, str. 1448–1461. doi: 10.1109/PROC.1974.9651
- [20] R. Luebbers, "Finite conductivity uniform GTD versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 32, št. 1, str. 70–76, januar 1984. doi: 10.1109/TAP.1984.1143189
- [21] R. J. Luebbers, "Comparison of lossy wedge diffraction coefficients with application to mixed path propagation loss prediction," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 36, št. 7, str. 1031–1034, julij 1988. doi: 10.1109/8.7210
- [22] V. Degli-Esposti, F. Fuschini, E. M. Vitucci, in G. Falciaesecca, "Measurement and modelling of scattering from buildings," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 55, št. 1, str. 143–153, januar 2007. doi: 10.1109/TAP.2006.888422
- [23] J. Jürveläinen in K. Haneda, "Sixty gigahertz indoor radio wave propagation prediction method based on full scattering model," *Radio Science*, zv. 49, št. 4, str. 293–305, april 2014. doi: 10.1002/2013RS005290
- [24] J. Pascual-García, J. Molina-García-Pardo, M. Martínez-Inglés, J. Rodríguez, in N. Saurín-Serrano, "On the importance of diffuse scattering model parameterization in indoor wireless channels at mm-wave frequencies," *IEEE Access*, zv. 4, str. 688–701, 2016. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2526600
- [25] L. Azpilicueta, F. Falcone, in R. Janaswamy, "A hybrid ray launching-diffusion equation approach for propagation prediction in complex indoor environments," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, zv. 16, str. 214–217, 2017. doi: 10.1109/LAWP.2016.2570126
- [26] P. Lyu, X. Xu, S. Yan, in Z. Ren, "60 GHz indoor propagation with time-domain geometric-optics," *IEEE Transactions on Magnetics*, zv. 52, št. 3, str. 1–4, marec 2016. doi: 10.1109/TMAG.2015.2491858
- [27] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 14, št. 3, str. 302–307, maj 1966. doi: 10.1109/TAP.1966.1138693

- [28] R. F. Harrington, *Field computation by moment methods*. Wiley, 1993.
- [29] K. R. Umashankar, "Numerical analysis of electromagnetic wave scattering and interaction based on frequency-domain integral equation and method of moments techniques," *Wave Motion*, zv. 10, št. 6, str. 493–525, 1988. doi: 10.1016/0165-2125(88)90010-8
- [30] C. G. Batista in C. G. Rego, "An integral equation model for radiowave propagation over inhomogeneous smoothly irregular terrain," *Microwave and Optical Technology Letters*, zv. 54, št. 1, str. 26–31, 2012. doi: 10.1002/mop.26473
- [31] O. Ozgun, G. Apaydin, M. Kuzuoglu, in L. Sevgi, "Two-way Fourier split step algorithm over variable terrain with narrow and wide angle propagators," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Toronto, ON, 2010, str. 1–4. doi: 10.1109/APS.2010.5560904
- [32] J. Zhou in W. Hong, "Construction of the absorbing boundary conditions for the FDTD method with transfer functions," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, zv. 46, št. 11, str. 1807–1809, november 1998. doi: 10.1109/22.734591
- [33] V. Betz in R. Mittra, "Comparison and evaluation of boundary conditions for the absorption of guided waves in an FDTD simulation," *IEEE Microw. Guided Wave Lett.*, zv. MGWL-2, št. 12, str. 499–501, 1992. doi: 10.1109/75.173408
- [34] B. Wei, S. Zhang, F. Wang, in G. D., "A novel UPML FDTD absorbing boundary condition for dispersive media," *Waves in Random and Complex Media*, zv. 20, št. 3, str. 511–527, 2010. doi: 10.1080/17455030.2010.496005
- [35] B. Abdulkareem, J. Bérenger, F. Costen, R. Himeno, in H. Yokota, "An operator absorbing boundary condition for the absorption of electromagnetic waves in dispersive media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 66, št. 4, str. 2147–2150, april 2018. doi: 10.1109/TAP.2018.2796386
- [36] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *Journal of Computational Physics*, zv. 114, št. 2, str. 185–200, 1994. doi: 10.1006/jcph.1994.1159
- [37] A. J. Roden in S. D. Gedney, "Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media," *Microwave and Optical Technology Letters*, zv. 27, št. 5, str. 334–339, 2000. doi: 10.1002/1098-2760(20001205)27:5<334::AID-MOP14>3.0.CO;2-A
- [38] A. Taflove, *Advances in Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, A. Taflove, Ur. Norwood, MA: Artech House, 1998.
- [39] Y. Liu, "Fourier analysis of numerical algorithms for the Maxwell equations," *Journal of Computational Physics*, zv. 124, št. 2, str. 396–416, 1996. doi: 10.1006/jcph.1996.0068
- [40] C. G. Batista, C. G. do Rego, M. L. Nunes, in F. F. Neves, "Improved high-order FDTD parallel propagator for realistic urban scenarios and atmospheric conditions," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, zv. 15, str. 1779–1782, 2016. doi: 10.1109/LAWP.2016.2535177
- [41] G. Ala, E. Francomano, A. Tortorici, E. Toscano, in F. Viola, "Smoothed particle electromagnetics: A mesh-free solver for transients," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, zv. 191, št. 2, str. 194–205, 2006. doi: 10.1016/j.cam.2005.06.036
- [42] —, "A smoothed particle interpolation scheme for transient electromagnetic simulation," *IEEE Transactions on Magnetics*, zv. 42, št. 4, str. 647–650, april 2006. doi: 10.1109/TMAG.2006.871387
- [43] —, "A mesh-free particle method for transient full-wave simulation," *IEEE Transactions on Magnetics*, zv. 43, št. 4, str. 1333–1336, april 2007. doi: 10.1109/TMAG.2007.892411
- [44] T. Namiki, "A new FDTD algorithm based on alternating-direction implicit method," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, zv. 47, št. 10, str. 2003–2007, 1999. doi: 10.1109/22.795075
- [45] F. Zhen, Z. Chen, in J. Zhang, "Toward the development of a three-dimensional unconditionally stable finite-difference time-domain method," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, zv. 48, št. 9, str. 1550–1558, september 2000. doi: 10.1109/22.869007
- [46] F. Zheng in Z. Chen, "Numerical dispersion analysis of the unconditionally stable 3-D ADI-FDTD method," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, zv. 49, št. 5, str. 1006–1009, maj 2001. doi: 10.1109/22.920165
- [47] M. L. Zhai, W. Y. Yin, Z. Chen, H. Nie, in X. H. Wan, "Modeling of ultra-wideband indoor channels with the modified leapfrog ADI-FDTD method," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, zv. 28, št. 1, str. 50–64, 2015. doi: 10.1002/jnm.1983
- [48] J. Shibayama, M. Muraki, J. Yamauchi, in H. Nakano, "Efficient implicit FDTD algorithm based on locally one-dimensional scheme," *Electronics Letters*, zv. 41, št. 19, str. 1046–1047, september 2005. doi: 10.1049/el:20052381
- [49] E. L. Tan, "Unconditionally stable LOD-FDTD method for 3-D Maxwell's equations," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, zv. 17, št. 2, str. 85–87, februar 2007. doi: 10.1109/LMWC.2006.890166
- [50] A. C. M. Austin, M. J. Neve, in G. B. Rowe, "Modeling propagation in multifloor buildings using the FDTD method," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 59, št. 11, str. 4239–4246, november 2011. doi: 10.1109/TAP.2011.2164181
- [51] L. R. Harris, T. Hikage, in T. Nojima, "Using large-scale FDTD method to obtain precise numerical estimation of indoor wireless local area network office environment," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, zv. E92.A, št. 9, str. 2177–2183, 2009. doi: 10.1587/transfun.E92.A.2177
- [52] G. D. Kondylis, F. D. Flaviis, G. J. Pottie, in T. Itoh, "A memory-efficient formulation of the finite-difference time-domain method for the solution of Maxwell equations," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, zv. 49, št. 7, str. 1310–1320, julij 2001. doi: 10.1109/22.932252
- [53] Q. H. Liu, "Finite-difference and pseudospectral time-domain methods for subsurface radar applications," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, zv. 2, Montreal, Quebec, Canada, 1997, str. 990–993. doi: 10.1109/APS.1997.631694
- [54] C. C. Lu, "Indoor radio-wave propagation modeling by multilevel fast multipole algorithm," *Microwave and Optical Technology Letters*, zv. 29, št. 3, str. 168–175, 2001. doi: 10.1002/mop.1119
- [55] G. Y. Delisle in L. Talbi, "Multipath impulse response modelling for indoor channel using TD-BEM," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, zv. 22, št. 2, str. 55–61, april 1997. doi: 10.1109/CJECE.1997.7101979
- [56] B. D. Backer, F. Olyslager, in D. D. Zutter, "An integral equation approach to the prediction of indoor wave propagation," *Radio Science*, zv. 32, št. 5, str. 1833–1850, september-oktober 1997. doi: 10.1029/97RS01400
- [57] C. P. Lim, J. L. Volakis, K. Sertel, R. W. Kindt, in A. Anastasopoulos, "Indoor propagation models based on rigorous methods for site-specific multipath environments," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 54, št. 6, str. 1718–1725, junij 2006. doi: 10.1109/TAP.2006.875493
- [58] R. W. Kindt in J. L. Volakis, "Array decomposition-fast multipole method for finite array analysis," *Radio Science*, zv. 39, št. 2, str. 1–9, april 2004. doi: 10.1029/2003RS002887
- [59] M. Krumpholtz in L. P. B. Katehi, "MRTD: new time-domain schemes based on multiresolution analysis," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, zv. 44, št. 4, str. 555–571, april 1996. doi: 10.1109/22.491023
- [60] A. Alighanbari in C. D. Sarris, "Rigorous and efficient time-domain modeling of electromagnetic wave propagation and fading statistics in indoor wireless channels," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 55, št. 8, str. 2373–2381, avgust 2007. doi: 10.1109/TAP.2007.901992
- [61] G. S. Baron, E. Fiume, in C. D. Sarris, "Graphics hardware accelerated multiresolution time-domain technique: Development, evaluation and applications," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, zv. 2, št. 3, str. 288–301, april 2008. doi: 10.1049/iet-map:20070118
- [62] B. Chopard, P. O. Luthi, in J. Wagen, "Lattice Boltzmann method for wave propagation in urban microcells," *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, zv. 144, št. 4, 1997, str. 251–255. doi: 10.1049/ip-map:19971197
- [63] J. Gorce, K. Jaffres-Runser, in G. de la Roche, "Deterministic approach for fast simulations of indoor radio wave propagation,"

- IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 55, št. 3, str. 938–948, marec 2007. doi: 10.1109/TAP.2007.891811
- [64] G. de la Roche, J. Gorcery, in J. Zhang, "Optimized implementation of the 3D MR-FDPF method for indoor radio propagation predictions," *3rd European Conference on Antennas and Propagation*, Berlin, 2009, str. 2241–2245.
- [65] G. de la Roche, X. Gallon, J. Gorcery, in G. Villemaud, "2.5D extensions of the frequency domain ParFlow algorithm for simulating 802.11b/g radio coverage in multifloored buildings," *IEEE Vehicular Technology Conference*, Montreal, Quebec, Canada, 2006, str. 1–5. doi: 10.1109/VTTCF.2006.25
- [66] N. Noori in H. Oraizi, "Evaluation of MIMO channel capacity in indoor environments using vector parabolic equation method," *Progress in Electromagnetics Research B*, zv. 4, str. 13–25, 2008. doi: 10.2528/PIERB07121903
- [67] A. Hrovat, G. Kandus, in T. Javornik, "A survey of radio propagation modeling for tunnels," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, zv. 16, št. 2, str. 658–669, 2014. doi: 10.1109/SURV.2013.091213.00175
- [68] G. R. Hadley, "Wide-angle beam propagation using Padé approximant operators," *Opt. Lett.*, zv. 17, št. 20, str. 1426–1428, 1992. doi: 10.1364/OL.17.001426
- [69] F. N. B. Magno, J. F. de Souza, K. Cozzolino, J. C. Costa, in G. P. d. S. Cavalcante, "A model for radio propagation loss prediction in buildings using wide-angle parabolic equations," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Belem, 2009, str. 491–495. doi: 10.1109/IMOC.2009.5427538
- [70] X. Yang, C. Bin, Z. Bihua, X. Run, in Y. Qin, "Application of MW-FDTD to simulate the electromagnetic pulse (EMP) propagation in tunnel," *5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, Xian, 2009, str. 200–203. doi: 10.1109/CEEM.2009.5305407
- [71] H. Duan, Z. S. Y. Zhao, in T. Jiang, "Application of MW-FDTD to simulate the EM wave propagation over ocean with OpenCL," *IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES)*, Honolulu, HI, 2016, str. 1–2. doi: 10.1109/ROPACES.2016.7465400
- [72] L. Zhou, Z. Mu, Y. Pu, in X. Xi, "Long-range Loran-C ground-wave propagation prediction based on adaptive moving window finite-difference time-domain method with compute unified device architecture parallel computing techniques," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, zv. 9, št. 5, str. 413–422, 2015. doi: 10.1049/iet-map.2014.0312
- [73] M. Thiel in K. Sarabandi, "A hybrid method for indoor wave propagation modeling," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 56, št. 8, str. 2703–2709, avgust 2008. doi: 10.1109/TAP.2008.927548
- [74] J. Leung in C. D. Sarris, "Hybrid FDTD/waveguide theory for indoor hallway propagation modeling," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Charleston, SC, 2009, str. 1–4. doi: 10.1109/APS.2009.5172259
- [75] Y. Wang, S. Safavi-Naeini, in S. K. Chaudhuri, "A hybrid technique based on combining ray tracing and FDTD methods for site-specific modeling of indoor radio wave propagation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, zv. 48, št. 5, str. 743–754, maj 2000. doi: 10.1109/8.855493
- [76] M. Porebska, T. Kayser, in W. Wiesbeck, "Verification of a hybrid ray-tracing/FDTD model for indoor ultra-wideband channels," *European Conference on Wireless Technologies*, Munich, 2007, str. 169–172. doi: 10.1109/ECWT.2007.4403973
- [77] A. Valcarce, G. D. L. Roche, in J. Zhang, "A GPU approach to FDTD for radio coverage prediction," *11th IEEE International Conference on Communication Systems*, Guangzhou, 2008, str. 1585–1590. doi: 10.1109/ICCS.2008.4737450
- [78] C. Ong, M. Weldon, D. Cyca, in M. Okoniewski, "Acceleration of large-scale FDTD simulations on high performance GPU clusters," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Charleston, SC, 2009, str. 1–4. doi: 10.1109/APS.2009.5171722
- [79] T. T. Zygidis, N. V. Kantartzis, in T. D. Tsiboukis, "GPU-accelerated efficient implementation of FDTD methods with optimum time-step selection," *IEEE Transactions on Magnetics*, zv. 50, št. 2, str. 477–480, februar 2014. doi: 10.1109/TMAG.2013.2282531
- [80] M. R. Zunoubi, J. Payne, in W. P. Roach, "CUDA implementation of TEz-FDTD solution of Maxwell's equations in dispersive media," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, zv. 9, str. 756–759, 2010. doi: 10.1109/LAWP.2010.2060181
- [81] T. Nagaoka in S. Watanabe, "Multi-GPU accelerated three-dimensional FDTD method for electromagnetic simulation," *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Boston, MA, 2011, str. 401–404. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6090128
- [82] M. Unno, S. Aono, in H. Asai, "GPU-based massively parallel 3-D HIE-FDTD method for high-speed electromagnetic field simulation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, zv. 54, št. 4, str. 912–921, avgust 2012. doi: 10.1109/TEMC.2011.2173938
- [83] Y. Inoue, M. Unno, S. Aono, in H. Asai, "GPGPU-based ADE-FDTD method for fast electromagnetic field simulation and its estimation," *Asia-Pacific Microwave Conference*, Melbourne, VIC, 2011, str. 733–736.
- [84] D. Y. Heh, E. L. Tan, in W. C. Tay, "Some recent developments in fundamental implicit FDTD schemes," *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, 2012, str. 153–156. doi: 10.1109/APEMC.2012.6237920
- [85] S. Ikuno, Y. Fujita, Y. Hirokawa, T. Itoh, S. Nakata, in A. Kamitani, "Large-scale simulation of electromagnetic wave propagation using meshless time domain method with parallel processing," *IEEE Transactions on Magnetics*, zv. 49, št. 5, str. 1613–1616, maj 2013. doi: 10.1109/TMAG.2013.2245410
- [86] R. N. Schneider, L. E. Turner, in M. M. Okoniewski, "Application of FPGA technology to accelerate the finite-difference time-domain (FDTD) method," *Proceedings of the ACM/SIGDA 10th international symposium on Field-programmable gate arrays (FPGA'02)*, ACM, New York, NY, USA, 2002, str. 97–105. doi: 10.1145/503048.503063
- [87] J. P. Durbano, F. E. Ortiz, J. R. Humphrey, M. S. Mirotnik, in D. W. Prather, "Hardware implementation of a three-dimensional finite-difference time-domain algorithm," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, zv. 2, št. 1, str. 54–57, 2003. doi: 10.1109/LAWP.2003.812245
- [88] H. Suzuki, Y. Takagi, R. Yamaguchi, in S. Uebayashi, "FPGA implementation of FDTD algorithm," *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, 2005, str. 1–4. doi: 10.1109/APMC.2005.1607106
- [89] R. Culley, A. Desai, S. Gandhi, S. Wu, in K. Tomko, "A prototype FPGA finite-difference time-domain engine for electromagnetics simulation," *48th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, zv. 1, 2005, str. 663–666. doi: 10.1109/MWSCAS.2005.1594188
- [90] H. Kawaguchi in S. S. Matsuoka, "Conceptual design of 3-D FDTD dedicated computer with dataflow architecture for high performance microwave simulation," *IEEE Transactions on Magnetics*, zv. 51, št. 3, str. 1–4, marec 2015. doi: 10.1109/TMAG.2014.2355251
- [91] H. Kawaguchi, "Improved architecture of FDTD dataflow machine for higher performance electromagnetic wave simulation," *IEEE Transactions on Magnetics*, zv. 52, št. 3, str. 1–4, marec 2016. doi: 10.1109/TMAG.2015.2483200
- [92] Y. Fujita in H. Kawaguchi, "Full-custom PCB implementation of the FDTD/FIT dedicated computer," *IEEE Transactions on Magnetics*, zv. 45, št. 3, str. 1100–1103, marec 2009. doi: 10.1109/TMAG.2009.2012633
- [93] S. Matsuoka in H. Kawaguchi, "FPGA implementation of the FDTD data flow machine," *IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology*, 2003, str. 418–419. doi: 10.1109/WCT.2003.1321585
- [94] H. Gieffers, C. Plessl, in J. Förstner, "Accelerating finite difference time domain simulations with reconfigurable dataflow computers," *SIGARCH Comput. Archit. News*, zv. 41, št. 5, str. 65–70, 2014. doi: 10.1145/2641361.2641372
- [95] H. M. Waidyasoorya, M. Hariyama, in Y. Ohtera, "FPGA architecture for 3-D FDTD acceleration using open CL," *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai, 2016, str. 4719–4719. doi: 10.1109/PIERS.2016.7735734

- [96] H. M. Waidyasooriya in M. Hariyama, "FPGA-based deep-pipelined architecture for FDTD acceleration using OpenCL," *IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, Okayama, 2016, str. 1–6. doi: 10.1109/ICIS.2016.7550742
- [97] K. Hayakawa in R. Yamano, "Multi-core FPGA execution for electromagnetic simulation by FDTD," *2nd International Conference on Information Science and Control Engineering*, Shanghai, 2015, str. 829–833. doi: 10.1109/ICISCE.2015.189
- [98] Y. Ishigaki, Y. Tomioka, T. Shibata, in H. Kitazawa, "An FPGA implementation of 3D numerical simulations on a 2D SIMD array processor," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Lisbon, 2015, str. 938–941. doi: 10.1109/ISCAS.2015.7168789

Roman Novak je na Odseku za komunikacijske sisteme Inštituta Jožef Stefan zaposlen od leta 1992, v zadnjih letih na mestu višjega znanstvenega sodelavca. Na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana je bil izvoljen v naziv docenta za področje telekomunikacij. V letih 1992 in 1995 je diplomiral in magistriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, doktoriral pa je leta 1998 na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Kot gostujoči znanstvenik je deloval na inštitutu Joanneum Research in tehnični univerzi v avstrijskem Gradcu. V preteklem obdobju je sodeloval pri številnih znanstveno-raziskovalnih in aplikativnih projektih, tudi v vodstveni funkciji, na področjih razvoja telekomunikacijskih omrežij, varnosti v komunikacijskih omrežjih in obdelave signalov v jedrski instrumentaciji. V zadnjih letih se raziskovalno ukvarja z razširjanjem radijskih valov in modeliranjem komunikacijskih kanalov.