

FT8 - komunikacija IoT z dosegom na tisoče kilometrov

Andrej Štern

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: andrej.stern@fe.uni-lj.si

FT8 - IoT communication ranging thousands of kilometers

Abstract. FT8 is a digital protocol designed for robust communication over long distances using weak signals. While developed primarily for amateur radio use for establishing connectivity to locations on far continents by ionospheric HF propagation, the protocol has evolved to carry up to 71 telemetry bits during the 12.64 s transmission in a 50 Hz bandwidth. The source and channel coding provide up to 31 dB improvement over SSB voice modes and even 6 dB over the traditional telegraphy. Numerous optimizations have made the FT8 to be the most frequent reported mode among the radio amateur society and set the foundation to further enhancements towards robust long distance IoT.

1 Uvod

V sodobnih mobilnih komunikacijah 5G stremimo k zadoščanju komunikacijskih potreb na vsaj treh različnih področjih. Širokopasovnost povezav eMBB (angl. enhanced Mobile Broadband) s hitrostmi prek 1 Gbit/s prevladuje pri glavnini uporabnikov, kjer se prenašajo napredne multimedijske vsebine. Nizke zakasnitve z visoko stopnjo zanesljivosti URLLC (angl. Ultra Reliable, Low-Latency Communications) so namenjene bolj zahtevnim uporabnikom, npr. borznim posrednikom, interaktivnim igralcem in avtonomnim vozilom, kjer so potrebni odzivi v skoraj realnem času (pod 1 ms). Tretje uporabno področje mMTC (angl. Massive Machine-Type Communications) predstavlja množica naprav v okviru Interneta stvari, kjer širokopasovnost in nizke zakasnitve niso v ospredju, pač pa veliko število hkratnih sej, visoka energijska avtonomnost, nizki obratovalni stroški in daljši komunikacijski doseg.

Za povezovanje senzorjev v oblak so uveljavljene tudi ne-operaterske tehnologije, kot je LoRa (angl. Long Range), ki je v obliki komunikacijskega koncentradorja za omrežje TTN (angl. The Things Network) postavljena tudi na matični UL FE. LoRa z inovativno rabo modulacijskih tehnik širitve spektra CSS (angl. Chirp Spread Spectrum) s prilagodljivim faktorjem širitve SF (angl. Spreading Factor) na različnih širinah kanalov omogoča dinamičen sistem optimizacije hitrosti do 11 kbit/s (SF7/250 kHz) ali radijskega dosega do 45 km na prostem, pa tudi dlje ob izjemnih radijskih pogojih in antenskih sklopih. Izhodna izsevna moč LoRe je na evropskih 868 MHz dovoljena v odvisnosti od podpodročij (g, g1, g2, g3, g4) do (UL/DL) 25/500 mW, pri čemer je zelo omejen tudi čas zasedanja kanala (angl. duty cycle) na največ 1% po ETSI EN300.220 in

specifikaciji LoRaWAN [1]. Posamezne prosto dostopne platforme v oblaku, kot je TTN [2], v smislu pravične uporabe spektra (angl. Fair Use Policy) dodatno omejujejo še skupni čas oddajanja senzorja v 24 urah na skupnih 30 s.

Poleg komercialnih in rešitev v okviru skupnosti pa obstaja še področje komunikacij, ki v splošni strokovni ali znanstveni literaturi ni velikokrat obravnavano. To so radioamaterske storitve, katere ZEKom-1 [3] v 3. členu opredeljuje kot radio-komunikacijske storitve za samoizobraževanje, medsebojno komuniciranje in tehnične raziskave, ki jo izvajajo radioamaterji, to so pravilno pooblaščen osebe, ki jih zanima radijska tehnika samo iz osebnih nagibov in brez gmotnih koristi. Na tem mestu velja poudariti, da lahko posameznik uporablja radioamaterske radijske frekvence le na podlagi veljavnega radijskega dovoljenja, sicer lahko po 236. členu sledijo tudi sankcije. Ker je namen prispevka tudi približati radioamatersko dejavnost vpisanim na matično fakulteto, lahko za več informacij zainteresirani kontaktirajo avtorja, lokalni radioamaterski klub ali Zvezo radioamaterjev Slovenije, kjer po opravljenem izobraževanju pridobijo mednarodno veljaven klicni znak v formatu S5<številka><1-3 črke>, npr. S56AAA.

2 Radioamaterski načini dela

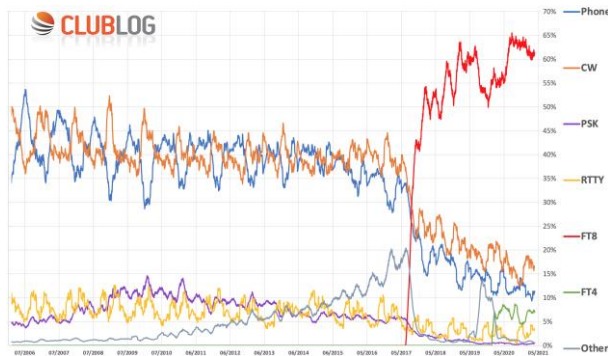
Načini radioamaterskega dela (angl. amateur radio modes) opredeljujejo procesne in oddajne lastnosti komunikacije. Prvi način se je v obliki telegrafije (CW) z uporabo Morsejeve kode širše pojavil v začetku 20. stoletja. Temu je sledil analogni prenos govora oz. fonija z različnimi modulacijami, od klasičnih AM in FM do učinkovitih enobočnih prenosov (SSB), ter digitalne modulacije za prenos informacij RTTY in PSK31.

V analogni tehniki so se najprej prenašale mirujoče slike (SSTV), nato amaterska gibljiva televizija (ATV), prek govornih kanalov pa so se z razširjenostjo računalnikov vzpostavila prva paketna radijska omrežja AX.25 (Packet Radio) z dostopom do svetovnega Interneta. Danes predstavlja amatersko paketno omrežje s cca. 35 radijskimi vstopnimi točkami oz. vozlišči z megabitno hitrostjo in večjim dosegom po zaslugi prof. Vidmarja z matične UL FE alternativo podatkovnim omrežjem bolj ranljivih komercialnih ponudnikov.

Sodobne radioamaterske dejavnosti tako obsegajo avtonomna govorna in podatkovna omrežja z relejnimi postajami oz. repetitorji po hribih in priklopi v internetno hrbenico. Tu se poleg analognih FM odvijajo tudi digitalne govorne komunikacije DMR, D-STAR in Fusion, ki zasedejo pomembno vlogo v primeru naravnih nesreč ali večjih nevarnostih v obliki aktivnosti ARON (Amatersko Radijsko Omrežje za Nevarnost). Ob tem pa

se radioamaterji vedno oziramo tudi v vesolje za lastnimi sateliti ali gostujočimi oddajniki, odboji od Lune (EME) in od repov meteoritov.

Kot prikazuje naslednja statistika sporočanja vzpostavljenih zvez v platformo ClubLog [4], se od leta 2017 močno vzpenja nov način digitalnega načina dela s kratico FT8, ki v marsičem spominja kar na tehnologije IoT, saj večino dejanske komunikacije s kompleksnimi postopki modulacije in demodulacije opravi računalnik, hitrosti prenosa so nizke, komunikacijski doseg na kratko-valovnem področju z manjšimi močmi od drugih načinov dela pa lahko dosega tisoče kilometrov.



Slika 1: Drseče povprečje načinov dela v bazi ClubLog [4]

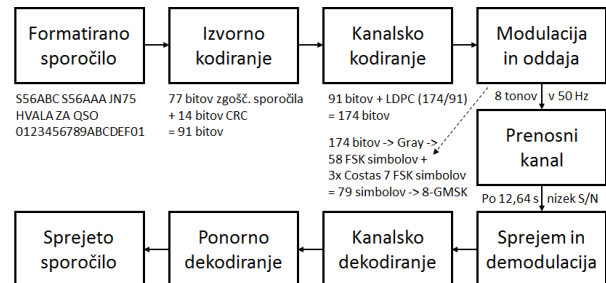
Zaradi tako visoke priljubljenosti, ki privablja v radioamaterstvo mlajše, računalniškega sveta željne generacije, pa tudi znova aktivira že zaprašene radijske postaje starejših in bolj izkušenih operaterjev, bo v nadaljevanju opisanih nekaj tehnoloških osnov ter praktičnih razlag, ki lahko bralca vodijo k nadaljnjemu raziskovanju komunikacij s šibkimi signali.

3 Tehnološke osnove FT8

Način dela FT8 sta razvila radioamaterja in profesorja na univerzah v ZDA - elektrotehnik Steven Franke (K9AN) ter nobelovec in astrofizik Joe Taylor (K1JT) [5]. Ime izhaja iz začetnic priimkov (F-T), številka 8 pa uporabo dobro znane modulacije 8-FSK v prvi izdaji. FT8 je, skupaj z nekoliko hitrejšo različico FT4, nadaljevanje vrste uspešnih digitalnih načinov dela v zadnjih 20 letih (JT4, JT9, JT65 itd.), saj združuje kompromise glede dolžine sporočil, bitnih prenosnih hitrosti, pasovnih širin, vnaprejšnjega popravljanja napak, optimizacije modulacije, zahtevnosti dekodiranja na sprejemniku in minimalnih zahtev po razmerju signal/šum [5].

Osnovno orodje za uporabo FT8 predstavlja odprtokodni program WSJT-X [6] za komunikacijo s šibkimi signali. Program se neprestano nadgrajuje, pri čemer nastajajo s prejšnjimi različicami združljive in nezdržljive spremembe. FT8 se je pridružil ostalim načinom dela šele v različici 1.8.0, nato pa do današnje 2.5.0 dosegel optimizacijo delovanja na domala vseh področjih, od tipov generiranih sporočil in uvedbe modulacije GMSK do povečanja občutljivosti na sprejemu in manjšega odstotka napačnih prepoznav [6].

V nadaljevanju bo FT8 predstavljen po korakih od sestave formatiranih sporočil na oddajnem računalniku preko verige optimizacijskih in zaščitnih mehanizmov do končne modulacije in oddaje na prenosni kanal s svojevrstnimi lastnostmi.



Slika 2: Prenosna pot sporočila FT8 po korakih

3.1 Formati sporočil

Vsaka radioamaterska zveza v teku mora biti opremljena s klicnima znakoma prejemnika in oddajnika, npr. S56ABC (prejemnik) in S56AAA (oddajnik). Ta znaka v trenutku nastajanja prispevka s strani agencije AKOS še nista podeljena, a vseeno njihova uporaba po zakonodaji ni dovoljena! V primeru, da se zveza šele vzpostavlja, se na mestu prejemnika uporabi uveljavljeno oznako za razpršen klic CQ, npr. CQ S56ABC. Temu sledijo podatkovna polja, kot so grobe ocene lokacije po lokatorjih QTH, sporočanja slišnosti signala in zaključevanje zveze s pozdravno kodo »73«.

UTC	Sporočilo	Razlaga
04:57:45	CQ S56ABC JN76	ABC kliče vse iz JN76 in čaka na odgovor
04:58:00	S56ABC S56AAA JN75	Odzove se AAA in sporoči grobo lokacijo
04:58:15	S56AAA S56ABC -03	ABC pošlje AAAju oceno signala (3 dB pod šumom)
04:58:30	S56ABC S56AAA R-05	AAA potrdi prejem (R) in poda oceno sprejema ABC
04:58:45	S56AAA S56ABC RR73	ABC potrdi sprejem (RR) in se prijazno poslovil (73)
04:58:00	S56ABC S56AAA 73	AAA pozdravi nazaj in zveza je s tem končana

Slika 3: Priporočeni potek izmenjave sporočil med zvezo FT8

FT8 pa poleg klasičnih zvez z izmenjavo signala slišnosti podpira tudi prenose prostih kratkih besedil ali binarnih telemetrijskih podatkov v skupni dolžini do 71 bitov [5].

3.2 Izvirno kodiranje

Izvirno kodiranje predstavlja pretvorbo podatkov iz človeku berljive vsebine v bitno zgoščene zapise. Pri FT8 se vsako sporočilo, npr. splošen poziv CQ, prevede v 77 izhodnih bitov, kamor je všteti tudi tip sporočila. Posamezna polja se po kodirni tabeli [5] brezizgubno pretvorijo v njihovo bitno enačico, npr. enostaven do 6-mestni klicni znak S56ABC tako zasede le 28 bitov oz. manj kot štiri zapisane znake ASCII s po 7 ali 8 bitov.

Primer pretvorbe S56ABC v 28 bitov po tabelah [7], ki upoštevajo možne obsege črk in številka na posameznih mestih zapisanega znaka (37, 36, 10, 27, 27, 27):

- S (29), 5 (5), 6 (6), A (1), B (2), C (3),
- $((((29*36 + 5)*10 + 6)*27 + 1)*27 + 2)*27 + 3 = 206593554$,

- navadni znaki se začnejo šele po 6257896 rezerviranih, zato premik,
- $206593554 + 6257896 = 212851450$,
- binarno: 1100 10101111 11011010 11111010.

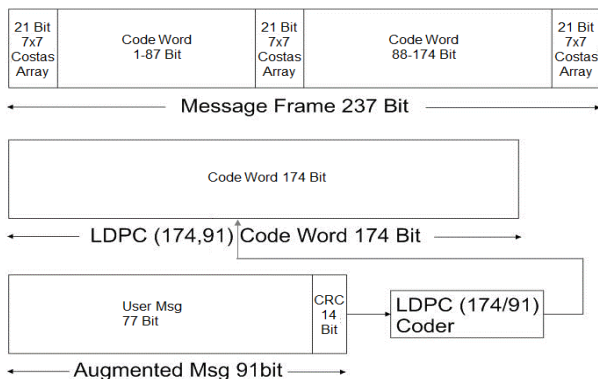
Za 4-znakovni lokator QTH z ločljivostjo 1° za zemljepisno širino in 2° za dolžino se uporablja možen obseg (18, 18, 10, 10) znakov, zato JN76 postane J (9), N (13), 7 (7), 6 (6) oz. $9*18*10*10 + 13*10*10 + 7*10 + 6 = 17576$ oz. v 15 bitih zapisano 1000100 10101000.

Ko se vsa polja v sporočilu sestavijo (npr. 2 klicna znaka, potrditev, signal), dobimo iz vsakega sporočila na koncu 77 bitov, ki že vsebujejo oznake tipov po [5].

3.3 Kanalsko kodiranje, modulacija in oddaja

Vhodnih 77 bitov se najprej opremi s 14-bitno varnostno vsoto (CRC) s polinomom $0x6757$ in začetno vrednostjo 0, da dobimo skupno 91 bitov. K temu se doda naslednjih 83 bitov, ki predstavljajo postopek vnaprejšnjega popravljanja napak FEC (angl. Forward Error Correction). FEC uporablja namensko kodo (174, 91) LDPC (angl. Low-Density Parity-Check), določeno z dvema matrikama - z generatorsko, ki vhodnim 91 bitom določi dodatnih 83 paritetnih bitov, ter paritetno za preverjanje ustreznosti dobljene 174 bitne matrike.

Za frekvenčno in časovno sinhronizacijo pri sprejemu se na začetku, v sredini in na koncu oddaje doda še Costasov niz 7 tonov (3, 1, 4, 0, 6, 5, 2) iz matrike 7×7 , skupno 21 kanalskih simbolov oz. 63 bitov. Tako na bitnem nivoju dobimo skupno 237 bitov, sestavljenih iz sinhronizacijskih delov in zaščitene vsebine sporočila.



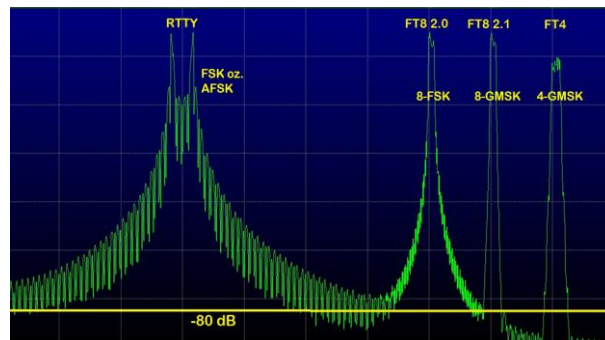
Slika 4: Priprava okvirjev FT8 za oddajo [9]

Teh 237 bitov se od različice WSJT-X 2.1.0 pretvarja v posamezne simbole oz. tone z glajeno modulacijo 8-GMSK z zvezno fazo, kar omogoča nizko zasedenost spektra vse do -80 dB, kot prikazuje slika 5. 8-stopenjska modulacija v enem kanalskem simbolu nosi 3 bite, ki se iz 174-bitne osnove zapišejo z mapiranjem čez Grayevo kodo [5]. Zanj je značilno, da se sosednji simboli oz. toni v FSK ločijo le v enem bitu, zato se poveča uspešnost dekodiranja pri Dopplerjevih pojavih.

Tako pripravljenih 79 8-GMSK simbolov zaseda pasovno širino 50 Hz z razdaljo med posameznimi toni 6,25 Hz. Pri oddaji na kratkovalovnem področju z načinom USB (angl. Upper Side-Band) se posamezne oddaje razvrstijo po avdio spektru v enem govornem kanalu širine do 3 kHz. Ker se pri načinu USB prenaša na radijski spekter le osnovni avdio pas, pregled sprejema

na sliki 6 kaže množico ne-prekrivajočih se oddaj različnih operaterjev v enem samem govornem kanalu. Pri tem vsi oddajajo na isti nosilni frekvenci, npr. 3,573 MHz, vsak pa uporablja svoj 50 Hz pas znotraj 3 kHz.

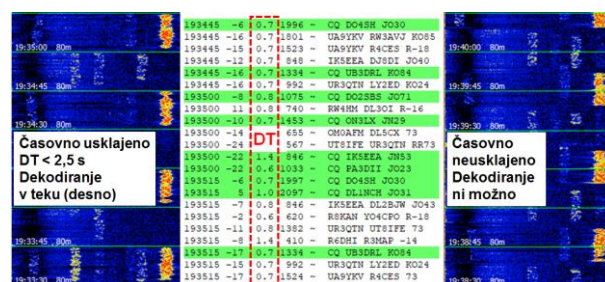
Trajanje enega tona je 0,16 s, kar predstavlja oddajo celotnega sporočila dolžine 237 bitov v času 12,64 s. Simbolna oz. baudna hitrost torej znaša 6,25 simbola/s, učinkovita oz. uporabniška hitrost prenosa izvornih 77 bitov v 12,64 s pa zaokroženih 6,01 bit/s.



Slika 5: Primerjava spektrov različnih modulacij [8]

Cikel oddaje in sprejema znaša točno 15 s. Začetek je določen vsako minuto ob sodih (0 s, 30 s) in lihih (15 s, 45 s) intervalih, zato je nujno imeti računalnike časovno sinhronizirane. Program WSJT-X časovna odstopanja prikazuje pod parametrom DT (angl. delta-time oz. time differential), lahko pa se preverijo tudi na spletni strani <https://time.is/>.

Posamezne časovno pravilne oddaje zaradi namerno nastavljenega napačnega časa za cca. 7 sekund na sprejemnem računalniku v desnem delu slike 6 prečkajo vodoravne časovne ločnice po 15 s, zato računalnik v času zadnjih 2,5 sekund pred novim sprejemom ali oddajo ne more opraviti dekodiranja. Osrednji del slike 6 prikazuje izpisane vrednosti DT pri usklajenem sprejemu v levem delu, kjer je največji časovni odmik 1,4 s.



Slika 6: Prikaz različnih časovnih uskladitev sprejema

3.4 Radijske propagacije FT8

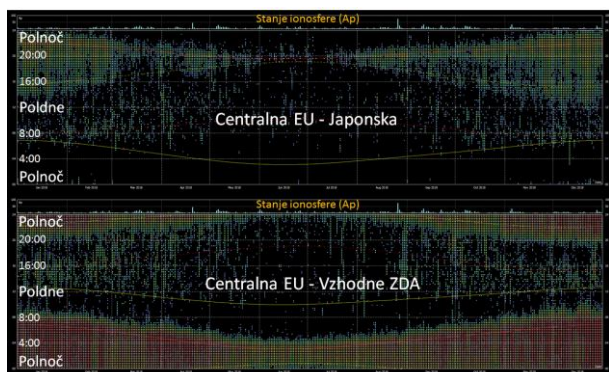
Komunikacija na velike razdalje je, razen v primeru satelitov, možna le z uporabo kratkih valov v območju nekaj MHz, ki se od različno visokih plasti ionosfere do 400 km (sloj F) odbijajo pod kotom in tako pridobijo na razdalji. Za višje frekvence, npr. nad 30 MHz, je ionosfera praktično prozorna in valovanja se na površje Zemlje z odbojem od nje ne morejo vrniti [10].

Stanje ionosfere se hitro spreminja glede na del dneva, letni čas in počasi tudi s fazo Sončevega cikla. Sonce z ionizacijo molekul v zgornjih plasteh ionosfere

povzročajo uklon in končni odboj valovanja nazaj proti površju, kar je močno odvisno tudi od frekvence signala.

Trenutno smo na pragu 25. Sončevega cikla s periodo okrog 11 let in s prvimi močnejšimi izbruhi se je gostota nabitih delcev povečala dovolj, da so dolge zveze mogoče tudi na višjih kratko-valovnih območjih 15, 12 in 10 m, kot s celoštevilsko valovno dolžino označujemo frekvence okoli 21, 24 in 28 MHz. Prepustnost pasov 80 in 40 m je nekoliko manj odvisna od Sončevih ciklov, je pa komunikacija tu zelo dušena v primerih izrednih Sončevih izbruhov, t.i. bliščev [10]. Vseeno so komunikacije na 40 in 80 m vsakodnevno uspešne le med točkami v polmraku, mraku ali temi, saj močna ionizacija preko dneva signale v spodnjih plasteh ionosfere (sloj D) tudi slabi [10].

Slika 7 [11] prikazuje zapise vzpostavljenih povezav FT8 na 3,5 MHz v letu 2018 med osrednjo Evropo in Japonsko ter vzhodno obalo ZDA. Podobna časovna okna lahko opazimo tudi danes v praksi, npr. komunikacija FT8 z Japonsko na 80 m področju bo v poletnih mesecih stekla le okoli 20. ure, ko je tam ura 3 zjutraj, na področju med nami v Aziji pa je pretežno noč. Enako se je za povezave z ZDA potrebno potruditi v nočnih in zgodnjih jutranjih urah.



Slika 7: Časovna statistika vzpostavljanja FT8 v letu 2018 glede na uro v dnevu in letni čas iz Evrope za 80 m pas

Kljub določenim omejitvam v propagaciji pa FT8 ponuja dobre možnosti za doseganje številnih lokacij na Zemlji, označenih z namenskimi lokatorji [12], kamor zveze v telegrafiji ali foniji ne sežejo. Za primerjavo: komunikacija FT8 je možno uspešno dekodirati pri signalih, ki so 31 dB nižje od razumljivosti analognih govornih prenosov pri preslikavi na pasovno širino 2500 Hz, kar pomeni, da se oddaja FT8 z 1 W lahko po uspešnosti komunikacije primerja z več kot 1000 W enobočne oddajne moči govora. Tako so priporočene najvišje oddajne moči pri FT8 do 20 W, čeprav lahko nekaj znakov prenesemo tisoče kilometrov daleč tudi s 5 ali 10 W. Razlog pa je tudi ta, da je med 12,64 sekundnim aktivnim intervalom oddajnik neprestano polno v pogonu, kar lahko vodi v pregrevanje izhodne stopnje in okvare oddajnika. Npr. pri telegrafiji oddajnik deluje le v času oddaje črte in pike, ob vmesnih presledkih pa se lahko hladi.

4 Sklep

Radioamaterski način dela FT8 je na področje pokrivanja zemeljskega površja s kratkimi digitalnimi informacijami vnesel številne novosti. Ker poleg klasičnih povezav z izmenjavo poročil o slišnosti in lokaciji podpira še prenos telemetrijskih podatkov, je primeren tudi za prenose parametrov IoT na velike razdalje. Poleg FT8 sicer obstajajo še drugi načini, ki ga po občutljivosti prekašajo, npr. JT65 za 4 dB, JT9 za 6 dB in WSPR za 10 dB [10], zaradi odlično sprejetih kompromisov v kodiranjih, trajanju oddaje in sprejemnih zmožnostih pa je FT8 postal tudi osnova za nove, višje ležeče protokole. Tak način v vzponu je JS8, ki z aplikacijo JS8Call sloni na prenosu FT8 in podpira t.i. usmerjena sporočila (angl. directed messages), izmenjavo prostega teksta in celo avtomatsko sporočanje lokacije v radioamaterski sistem sledenja APRS (angl. Automatic Position Reporting System), dosegljiv na <https://aprs.fi/>.

Uporaba FT8 ni omejena samo na kratkovalovno področje do 30 MHz. Po svetu radioamaterji uporabljajo tudi višja področja, npr. 144 in 432 MHz, kjer pa je radijski doseg odvisen od številnih posebnosti v troposferi. Pri 50 W izhodne moči v praksi znaša do nekaj 100 km, v izjemnih pogojih pa je bil s posebno opremo in 100 W moči na 432 MHz premagan tudi že Atlantik [13]. Splošna raba na področjih ISM (angl. Industrial, Scientific, Medical), npr. na 868 MHz, kjer se nahaja LoRa, brez potrebe po radijskih dovoljenjih zaenkrat ni predvidena. Razlogi za to so striktno omejitve izhodnih moči na mW območja, zahtevna komunikacijska oprema z enobočnimi učinkovitimi prenosi USB ter velika slabljenja na prenosni poti.

Literatura

- [1] LoRa dokumentacija, <https://lorareadthedocs.io/en/latest>
- [2] The Things Network dokumentacija, <https://www.thingsnetwork.org/docs/lorawan/>
- [3] Zakon o elektronskih komunikacijah, <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO6405>
- [4] Statistika vzpostavljenih zvez v sistemu ClubLog, <https://g7vjr.org/>
- [5] S. Franke, B. Somerville, J. Taylor: The FT4 and FT8 Communication Protocols, QEX July/August 2020, https://physics.princeton.edu/pulsar/k1jt/FT4_FT8_QEX.pdf
- [6] Izhodiščna stran WSJT-X, <https://physics.princeton.edu/pulsar>
- [7] Tabele za izvorno kodiranje klicnih znakov, <https://bit.ly/3B3IrWy>
- [8] J. Taylor, predstavitev iz Hamradio Friedrichshafen, 2019: <https://bit.ly/3eoCmu5>
- [9] Spletna stran J. Clark: WSJT-X FT8 Modulator – Scicos Simulation, <https://bit.ly/3knWKPF>
- [10] IPS Radio and Space Services, Introduction to HF Radio Propagation: <https://bit.ly/36Clz2e>
- [11] Spletna stran: Real Propagation Visualized with FT8 Data, <https://www.voacap.com/visualprop/>
- [12] Zemljevid QTH-lokatorjev, https://www.egloff.eu/googlemap_v3/cartto.php
- [13] FT8 čez ocean, <https://ei7gl.blogspot.com/2020/04/first-trans-atlantic-contact-made-on.html>