

O značilnostih brezžičnih protokolov za pretakanje senzorskih podatkov: pod 3 GHz

Timotej Gruden, Peter Miklavčič, Matevž Hribernik, Sašo Tomažič

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

On the sensor-data-streaming wireless-protocol features: sub-3GHz

Abstract. *In this brief technology overview, we address various wireless protocols for streaming data from sensory peripherals to other devices. In particular we focus on technologies that can be used in biomechanical feedback applications. We consider well-known protocols from the IEEE 802.11 and 802.15 families, as well as possible future alternatives that serve the purpose of streaming data in real time and offer the possibility of concurrent feedback. For future protocols we consider different modulation schemes and present forward-correction codes suitable for real-time performance.*

1 Uvod

V današnjem svetu sodobnih brezžičnih komunikacij se velikokrat dozdeva, da so vsi načini komunikacij že raziskani, ter za komunikacijo med napravami ni potrebno raziskovati novih modulacijskih postopkov in protokolov. To verjetno za veliko aplikacij in namenov tudi velja, vendar se pojavljajo nišna področja, kjer obstoječe rešitve ne ponujajo potrebnih zmogljivosti. Biomehanska povratna vezava (BMPV) je področje, kjer s pomočjo sodobnih tehnologij uporabniku pomagamo pri izboljševanju ali učenju telesne aktivnosti oz. gibanja [1], [2]. V vsaki BMPV nastopajo senzorji, procesorska enota, aktuatorji in uporabnik. Senzorji zajemajo uporabnikovo gibanje, podatki iz senzorjev se v procesni enoti pretvorijo v uporabno informacijo, ta pa se preko aktuatorjev predstavi uporabniku. Uporabnik s spremembo gibanja glede na informacije iz aktuatorja zaključuje to povratno vezavo. Povratno informacijo lahko uporabniku predstavimo v različnih trenutkih [1]: po končanem gibanju (naknadno posredovanje, ang. *terminal feedback*), ob vsaki ponovitvi ponavljajoče aktivnosti (ciklično posredovanje, ang. *cyclic feedback*) ali ves čas fizične aktivnosti (sočasno posredovanje, ang. *concurrent feedback*), ki je za izvedbo najzahtevnejše. Pri sočasnem in cikličnem posredovanju mora sistem delovati v realnem času. Delovanje v realnem času moramo razumeti predvsem z vidika uporabnika sistema. Njegova zahteva je, da pri delovanju sistema ne zaznava motečega zamika med storjenim gibom in sprejeto povratno informacijo. Temu moramo prilagoditi delovanje sistema. Zagotavljanje zanesljive komunikacije z minimalnimi zakasnitvami je bila glavna motivacija pri pisanju tega preglednega prispevka.

Pri našem delu z biomehansko povratno vezavo v realnem času (ang. *real-time biomechanical feedback - RTBMF*) trenutno uporabljamo brezžične protokole

družin IEEE 802.11 in 802.15 [2]. Ti večinoma zadoščajo, vendar pa se občasno pojavljajo problemi, kot so prevelike zakasnitve, prekomerno trepetanje in izguba paketov.

Za rešitev problema komunikacije med nosljivimi napravami in procesno enoto smo se odločili raziskati različne možnosti brezžičnih protokolov in modulacijskih ter kodirnih postopkov za pretok senzorskih podatkov z majhnimi izgubami in zakasnitvami. Pri uporabi 9-DOF (ang. *Degrees of Freedom*) senzorjev s 16-bitno ločljivostjo in visoko vzorčevalno frekvenco 1 kHz skupaj z režijo potrebujemo bitni pretok vsaj 250 kb/s. V tem krajšem pregledu predstavljamo naše izsledke glede obstoječih tehnologij in možnosti razvoja novih pretočnih protokolov za sisteme z BMPV.

2 Pregled

Frekvenčni pas je ena osnovnih lastnost vsakega brezžičnega protokola in je temu primerno zasnovan. Izbira določenega frekvenčnega pasu pa prinaša različne fizikalne omejitve (lastnosti razširjanja valov, pasovna širina) kakor tudi tehnične omejitve pri izvedbi visokofrekvenčnih vezij. Pri zasnovi odprtega protokola se je smiselno omejiti na nelicenčne frekvenčne pasove, za katere so tudi visokofrekvenčne elektronske komponente dostopnejše. Prav tako je smiselno v čim večji meri uporabiti obstoječe protokole, ki se v praksi dobro obnesejo. V tabeli 1 so naštet standardi, ki ustrezajo našim kriterijem in njihove glavne lastnosti.

Glede na zastavljene kriterije so v Evropi primerni pasovi: 433 MHz ($B = 1,74$ MHz), 868 MHz ($B = 7$ MHz), 2,4 GHz ($B = 85\text{--}100$ MHz). V pasu 433 MHz, LPD433, je v Evropi dodatno omejena uporaba podpasov glede na namen uporabe in delovno obremenitev periode (ang. *duty cycle*) posameznega oddajnika. V tem pasu so primarni uporabniki govorne postaje, kot je to na primer podpas PMR446 za osebne mobilne postaje (ang. *walkie-talkie*). Zaradi dokaj enostavne izvedbe elektronike ter ugodnih lastnosti razširjanja valov pa je 433 MHz pas praktično povsod po svetu namenjen daljinskemu upravljanju – na primer za radijsko-vodene modele, daljinsko odklepanje vozil, upravljanje strojev in naprav. Tem sistemom je skupna relativno ozkopasovna ali pa vsaj zelo kratkočasna oziroma redka komunikacija. Za dolgotrajnejši stalen prenos pa ta pas ni primeren, tako da zanj tudi ni primernih standardnih širokopasovnih protokolov za paketno podatkovno komunikacijo.

Podobno je urejen pas na 868 MHz, SRD860, ki omejuje delovno periodo glede na tip naprave. V tem pasu že obstajajo možnosti za implementacijo širokopasovnega radijskega prenosa podatkov.

Tabela 1. Izbrani brezžični protokoli in primerjava njihovih glavnih lastnosti.

Standard	Pas 868 MHz	Pas 2,4 GHz	Pasovna širina B [MHz]	Bitna hitrost R [Mb/s]	Spektralna učinkovitost R/B [b/s/Hz]	Modulacija (pod)nosilca	Odpravljanje napak (ECC)
IEEE 802.15.4 + zigbee [3]		✓	2	0,25	0,13	O-QPSK	DSSS 1/8
IEEE 802.15.4-2006 [4]	✓	✓	2	0,25	0,13	O-QPSK	DSSS 1/8
Bluetooth 2.0+EDR [5]		✓	1	3,0	3,00	8-DPSK	Hamming 1/3, 2/3
Bluetooth 5.0 [6] LE		✓	2	2,0	1,00	GFSK	Hamming 1/3, 2/3
IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow) [7]	✓		2	7,8	3,90	256-QAM	LDPC 3/4
IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) [8]		✓	20	65	3,25	64-QAM	LDPC 5/6
IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) [9]		✓	20	135	6,75	1024-QAM	LDPC 5/6

Tabela 2. Pregled najpogostejših trenutno uveljavljenih digitalnih modulacijskih postopkov

Tip modulacije	Način		Značilnosti	Primeri uporabe	
	Skokoviti prehodi	Zvezni prehodi			
	+ lažja izvedba	+ spektralna učinkovitost			
amplitudna	n -ASK	n -CAM	+ najenostavnejši za implementacijo + cenovno ugodna oddajnik in sprejemnik - potrebna večja oddajna moč - slabši doseg - slaba odpornost na motnje	* hišna avtomatizacija (npr. garažna vrata) * RV modeli (krmiljenje)	
kotna	fazna	n -PSK n -DPSK	n -CPM	+ dobra odpornost na amplitudne motnje + enostavna izvedba - potrebna sinhronizacija nosilca - absolutna faza ni določena: potrebno diferencialno kodiranje (DPSK)	* Bluetooth 2.0+ * DVB-S * RFID * 802.11b
	frekvenčna s skokovito fazo	n -FSK	/	+ ni potrebna sinhronizacije nosilca + robustnost na račun pasovne širine + dobro delovanje v slabih razmerah - navadno potrebna večja pasovna širina	* Za-Re (POCSAG) * LTE (pov. ↑)
	frekvenčna z zvezno fazo	n -DCPM MSK	GMSK	+ ni potrebna sinhronizacije nosilca + robustnost na račun pasovne širine + MSK doseže tudi min. fazni zasuk - pri dobrih razmerah na kanalu se ostale tehnike izkažejo za učinkovitejše	* GSM * Bluetooth LE
kombinirana	n -APSK	n -QAM	+ doseganje najvišjih hitrosti pretoka + spektralno najučinkovitejši postopek + s QAM so izvedljivi vsi ostali postopki - slabša odpornost na šum	* 802.11n, ax * DVB-T, DVB-C * LTE (pov. ↓)	

* Kratice izhajajo iz angleškega jezika: ASK – Amplitude Shift Keying, CAM – Continuous Amplitude Modulation, PSK – Phase Shift Keying, DPSK – Differential Phase Shift Keying, CPM – Continuous Phase Modulation, FSK – Frequency Shift Keying, DCPM – Differential Continuous Phase Modulation, MSK – Minimum Shift Keying, GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying, APSK – Amplitude-Phase Shift Keying, QAM – Quadrature Amplitude Modulation

Tabela 3. Pregled trenutnega stanja kod za odpravljanje napak (ECC)

	Konvolucijske ECC	Blokovne ECC
Najpogosteje v rabi	Viterbi algoritem [10] Iznašel A. Viterbi (1967); dekodiranje na osnovi največje verjetnosti; uporaba: GSM, 802.11a, g	LDPC (low-density parity codes) - kode z nizko gostoto paritetne matrike [11] Iznašel Gallager (1960); sprva računsko prezahtevne, možnost implementacije po 1993, se asimptotično približujejo Shannonovi meji kapacitete kanala; uporaba: 10GBASE-T, DVB-S2, DVB-T2, 802.11n, ac, ax
Sodobne kode	Turbo kode [12] Iznašel C. Berrou (1991); približek dekodiranja na osnovi največje verjetnosti, se asimptotično približujejo Shannonovi meji kapacitete kanala; uporaba: UMTS, LTE	Polarne kode [13] Iznašel E. Arikan (2009); dokazano dosežejo Shannonovo mejo za binaren simetričen kanal, trenutno zelo malo implementacij, teoretično možna razširitev v konvolucijski način [14]; uporaba: 5G

2.1 Obstoječi brezžični protokoli

Standard IEEE 802.15.4-2003, ki je med drugim tudi osnova popularnega protokola zigbee [3], v pasu 433 MHz še ne določa dovolj hitrega radijskega vmesnika, ki bi zadoščal postavljenim kriterijem.

Razširitev standarda IEEE 802.15.4-2006 [4] načeloma že omogoča bitno hitrost 250 kb/s, vendar tega kriterija s praktičnimi izkoristki ne more doseči. Edini standard, ki naj bi to trenutno zmožgal z uporabo modulacij višjega reda v pasu 868 MHz, je IEEE 802.11ah s komercialnim nazivom Wi-Fi HaLow [7].

Poleg protokolov, temelječih na IEEE 802.15.4 in družine IEEE 802.11, je v pasu 2,4 GHz razširjena tudi družina Bluetooth. Ta se v osnovi deli na klasično in nizkoenergijsko izvedbo. Glavni frekvenčni pas za Wi-Fi naprave je 2400–2485 MHz, zaradi vsesplošne zasičenosti in potrebe po večji pasovni širini pa te naprave vedno bolj uporabljajo ISM (ang. *Industrial, Scientific, Medical*) pasove med 5 in 6 GHz. Pri teh frekvencah je razširjanje valov še bolj oteženo, prav tako se začnejo kazati trenutne omejitve cenene masovne izdelave elektronike. Zaradi naštetega pasovi nad 3 GHz niso najbolj ustrezni.

2.2 Algoritmi za nove brezžični protokole

Pri načrtovanju novega učinkovitega brezžičnega protokola za pretakanje senzorskih podatkov moramo preveriti različne možnosti uporabe modulatorskih postopkov in zagotavljanja zanesljivega prenosa.

Nabor vseh modulatorskih postopkov ter njihovih izpeljank je preobširen za obdelavo v tem prispevku, zato v tabeli 2 predstavljamo le nekaj osnovnih in pogosto uporabljenih postopkov, ki so ključni za naš namen uporabe. Predstavljene so tudi glavne značilnosti in praktični primeri.

Ena glavnih slabosti brezžičnega prenosa je manjša odpornost na motnje. Pogosto se zgodi, da vsi oddani simboli ne pridejo do sprejemnika v enaki obliki, kot so bili poslani. Razlogov za napake pri sprejemu je več, kot so to na primer šum na kanalu, impulzne motnje in odbiti signali. Ta problem lahko rešujemo z uporabo dveh načinov zagotavljanja zanesljivega prenosa: ponovno pošiljanje in sprotno odpravljanje napak.

2.2.1 Ponovno pošiljanje

Protokoli, ki vključujejo ponovno pošiljanje (ang. *automatic repeat-request* – ARQ), npr. RFC 3366, temeljijo na potrditvah in časovnikih. Za vsako poslano sporočilo ali na vsakih nekaj poslanih bitov oddajnik želi potrditev sprejema, v primeru izteka časovnika pred prejemom potrditve, pa je paket samodejno ponovno poslan.

Za biomehansko povratno vezavo v realnem času ponovno pošiljanje ne pride v poštev. V primeru izgube podatkov ali odkrite napake ponovno pošiljanje ni smiselno, saj bi povratna informacija do uporabnika prišla prepozno, ko je na primer že izvedel napačen gib, na katerega ga je želel aplikacija opozoriti in ga s tem preprečiti.

2.2.2 Sprotno odpravljanje napak

Nasprotje ponovnemu pošiljanju je tehnika kanalskega kodiranja s kodami za odpravljanje napak v sprejemniku (ang. *error-correcting codes* - ECC). Pri dekodiranju na osnovi največje verjetnosti ločimo med trdim in mehkim odločanjem. Pri trdem odločanju je dekodirnik na izhodu digitalnega kanala, torej za odločitvenim vezjem, pri mehkem odločanju pa je dekodirnik neposredno na izhodu diskretne kanala, kjer so sprejeti simboli zvezni po amplitudi, kar lahko predstavlja dodatno informacijo. Sprotno odpravljanje napak (ECC) je v uporabi predvsem v primerih, ko ponovno pošiljanje ni sprejemljivo ali izvedljivo (npr. v primeru strogo enosmerne komunikacije, daljših razdalj, ...).

Prvi primer sprotnega odpravljanja napak predstavlja Hammingova (7,4) koda, ki jo je v Bellovem laboratoriju leta 1950 iznašel Richard Hamming [15]. Glede na način izvedbe kode delimo na konvolucijske in blokove, trenutne možnosti obojih so predstavljene v tabeli 3.

Omeniti je potrebno še, da je prednost turbo kod v tem, da že v svoji zasnovi vključujejo mešalnik bitov (ang. *interleaver*) in so posledično bolj odporne na motnje v izbruhih (npr. algoritem Viterbi potrebuje ločen mešalnik). LDPC se s trenutnimi implementacijami pri visokih kodnih razmerjih (npr. 5/6, 7/8) izkažejo bolje od turbo kod. Pri nizkih kodnih razmerjih (npr. 1/2, 1/5, 1/8) pa so turbo kode še vedno najboljša izbira.

3 Razprava

Frekvenčni pas in pasovna širina sta ob tehnično dosegljivi modulaciji in kodiranju zgolj osnoven indikator, koliko kapacitete ponuja določen pas. Vsi pasovi so regionalno in lokalno podvrženi dodatnim zakonskim omejitvam, ki jih je treba pri načrtovanju upoštevati. Pasova 433 MHz in 868 MHz kljub uporabnim lastnostim ponujata relativno malo pasovne širine in posledično tudi dosegljive bitne hitrosti.

Zelo obetaven standard je IEEE 802.11ah, vendar se prve naprave šele pojavljajo na trgu in še ni dovolj opreme, da bi bil standard dobro preizkušen v praksi. Ta standard je izvedba popularnega Wi-Fi za IoT (internet stvari, ang. *Internet of Things* - IoT) naprave, kjer sta pomembna domet in poraba energije končnih naprav. Obljubljiva zapolnitev vrzeli med skupino ozkopasovnih protokolov z bitnim pretokom do 250 kb/s in širokopasovnih do nekaj Mb/s.

Ponujajo pa radijska omrežja po standardih IEEE 802.11 že na 2,4 GHz pasu, vsaj teoretično, več kot dovolj bitne hitrosti glede na postavljene kriterije in so zato zelo primeren kandidat, v praksi pa se pojavijo uvodoma opisani problemi. Bluetooth ponuja alternativo, kjer je zaradi želje po dometu bolj primerna klasična izvedba, z bitno hitrostjo do 3 Mb/s pa prav tako kot IEEE 802.11ah obljublja zapolnitev vrzeli. Žal pa je programska izvedba pri uporabi Bluetooth vmesnikov tipično bistveno zahtevnejša kot pri standardnih protokolih, na primer na Ethernetu osnovanem Wi-Fi. Zapleten aplikacijski nivo pomeni tudi večjo verjetnost programskih in drugih napak najrazličnejših, večinoma

cenenih izvedb vmesnika. Zaradi obojega Bluetooth tipično ni prva izbira, kot npr. v našem primeru.

Pri izbiri modulacijskih postopkov se zdi odločitev dokaj preprosta. Ker je naše glavno vodilo odpornost na šum in druge motnje na kanalu, je smiselno izbirati eno izmed frekvenčnih modulacij. Med njimi je spektralno najučinkovitejša GMSK, torej MSK (minimalni frekvenčni skoki) s faznim potekom, oblikovanim z Gaussovimi sitom. Če se v dotičnih primerih izkaže, da so razmere na kanalu dovolj dobre (določene vrste športa), je smiselno razmisliti tudi o uporabi večnivojskih modulacijskih postopkov, kot na primer n -CAM, n -DCPM ali n -QAM za večji podatkovni pretok.

Napake zaradi šuma in drugih motenj na kanalu je pri BMPV v realnem času smiselno popravljati z metodami za sprotno odpravljanje napak, ali pa jih zgolj zaznavati, saj ponovno pošiljanje tu ni smiselno. Aplikacije z BMPV delujejo v pretočnem načinu s sprotnim prenosom podatkov, torej se zdi smiselno izbirati med pretočnimi kodami. Ker ciljamo na nizka kodna razmerja (1/2, 1/5, tudi 1/10), ki nudijo večjo odpornost napake, se v trenutni dobi kot najprimernejše izkažejo turbo kode. V kolikor se izkaže potreba po hitrejših implementacijah, je kasneje smiselno razmisliti o konvolucijskem načinu polarnih kod.

Pri zasnovi namenskega protokola ostajata odprta še dva problema. Prvi je vezan na izgubo kanala za daljše časovno obdobje (nekaj sekund), npr. med plavanjem pod vodo. V primeru okvare podatkov ali izgube povezave predvidevamo, da bosta uporabljena mehanizem zaznavanja napak (ang. *error detection*) ter dodatna signalizacija končnemu uporabniku v primeru nedelovanja sistema. Drugi se nanaša na možnosti naknadne obdelave (ang. *post-processing*). Smiselno je, da bi protokol nadgradili tako, da bi poleg predstavljenega pretočnega pošiljanja podatkov omogočal tudi zanesljiv prenos vseh podatkov, četudi z zakasnitvijo. Tu predvidevamo, da bi bila smiselna uporaba hibridnega načina (ang. *hybrid automatic repeat request – HARQ*) [16] ali povsem ločenega kanala za zanesljiv prenos v ne-realnem času.

Glede na predstavljene izsledke sklepamo, da ni primernih protokolov za prenos senzorskih podatkov v aplikacijah z biomehansko povratno vezavo v realnem času, zato se zdi smiselni razvoj novega namenskega brezžičnega protokola v pasu 868 MHz ali 2,4 GHz.

Zahvala

Raziskavo je delno financirala ARRS v okviru raziskovalnega programa ICT4QoL – *Informacijsko komunikacijske tehnologije za kakovostno življenje* (P2-0246).

Literatura

- [1] A. Kos in A. Umek, *Biomechanical Biofeedback Systems and Applications*. Springer, 2018.
- [2] M. Hribnik, A. Umek, S. Tomažič, in A. Kos, „Review of Real-Time Biomechanical Feedback Systems

- in Sport and Rehabilitation“, *Sensors*, let. 22, št. 8, Art. št. 8, jan. 2022, doi: 10.3390/s22083006.
- [3] zigbee alliance, „ZigBee Specification“, str. 599, 2017.
- [4] „Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Std 802.15.4-2006“, 7. september 2006 Pridobljeno: 10. avgust 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/3582/>
- [5] Bluetooth Special Interest Group, „Core Specification 2.0+EDR – Bluetooth® Technology“, 4. november 2004 Pridobljeno: 10. avgust 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-2-0edr/>
- [6] Bluetooth Special Interest Group, „Core Specification 5.0 – Bluetooth® Technology“, 6. december 2016 Pridobljeno: 10. avgust 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5/>
- [7] „Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation, IEEE Std 802.11ah-2016“, 5. maj 2017 Pridobljeno: 10. avgust 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11ah/4960/>
- [8] „Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput“, *IEEE Std 802.11n-2009*, str. 1–565, okt. 2009, doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5307322.
- [9] „Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN“, *IEEE Std 802.11ax-2021*, str. 1–767, maj 2021, doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9442429.
- [10] A. Viterbi, „Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm“, *IEEE Transactions on Information Theory*, let. 13, št. 2, str. 260–269, apr. 1967, doi: 10.1109/TIT.1967.1054010.
- [11] R. Gallager, „Low-density parity-check codes“, *IRE Transactions on Information Theory*, let. 8, št. 1, str. 21–28, jan. 1962, doi: 10.1109/TIT.1962.1057683.
- [12] C. Berrou, A. Glavieux, in P. Thitimajshima, „Near Shannon limit error-correcting coding and decoding“, 1993, str. 1064–1070.
- [13] E. Arikan, „Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels“, *IEEE Transactions on Information Theory*, let. 55, št. 7, str. 3051–3073, jul. 2009, doi: 10.1109/TIT.2009.2021379.
- [14] M. Moradi, A. Mozammel, K. Qin, in E. Arikan, „Performance and Complexity of Sequential Decoding of PAC Codes“, dec. 2020, Pridobljeno: 9. avgust 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <http://128.84.4.18/abs/2012.04990>
- [15] R. W. Hamming, „Error Detecting and Error Correcting Codes“, *Bell System Technical Journal*, let. 29, št. 2, str. 147–160, 1950, doi: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x.
- [16] E. Soljanin, R. Liu, in P. Spasojevic, „Hybrid ARQ with Random Transmission Assignments“, 2003. doi: 10.1090/dimacs/066/19.