Brezžične komunikacijske tehnologije za MESI mTABLET medicinske naprave

Vladimir Pakrac[1], Tomaž Javornik[1,2]

[1]Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Jamova cesta 39, Ljubljana
[2]Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, Ljubljana
p.dovla@gmail.com

Wireless Communication Technologies for MESI mTABLET Medical Device

Abstract. *This article presents comparison of the suitability of four different wireless communication technologies for the MESI mTABLET, a medical tablet computer designed to operate with corresponding wireless diagnostic modules. The MESI mTABLET system operates in various healthcare environments where reliable and safe communication is critical for accurate diagnostics and patient care. We have identified and analyzed four potential communication technologies: Bluetooth, ANT+, Ultra-Wideband, and Wi-Fi. Each of these technologies offers distinct advantages and faces unique challenges, particularly when deployed in the complex environment of medical facilities. This study explores the pros and cons of each technology, assessing them against the specific needs of the MESI mTABLET system. By evaluating factors such as data transmission speed, delay, security, operating range and power consumption, we aim to determine which technology best supports requirements of four different measurements within MESI mTABLET system.*

1 Uvod

MESI mTABLET je medicinsko certificiran tablični računalnik, ki v klinični praksi pri izvajanju meritev nadomešča osebni računalnik. Sistem omogoča meritve nasičenja kisika v krvi, različnih načinov meritve krvnega tlaka, meritve gleženjskega indeksa, hitrosti pulznega vala in indeksa palec-nadlaht, merjenja temperature, izvajanja spirometrije in snemanja EKG-ja. Izvajanje posameznih meritev poteka z merilnimi moduli, ki so nameščeni na pacienta. Med meritvijo je tablica z njimi povezana brezžično. Uporabniki meritve poženejo s tabličnega računalnika in na njem spremljajo izvedbo, kar jim omogoča večjo mobilnost v delovnem okolju, izvajanje različnih vrst meritev z ene naprave ali celo izvajanje več meritev sočasno, po koncu meritve pa na tablici takoj pregledajo rezultate.

Sistem obsega sedem različnih diagnostičnih modulov, pri čemer, glede na naravo meritve, meritev opravlja en sam modul ali pa kombinacija več modulov naenkrat. Nabor meritvenih modulov je sestavljen iz modula za snemanje elektrokardiograma, modula za merjenje krvnega tlaka na nadlahti ali gležnju, modula za merjenje tlaka v prstih na nogi, modula za merjenje temperature, modula za merjenje nasičenja kisika v krvi in modula za izvajanje spirometrije. Namen članka je pregled možnih tehnologij za brezžično komunikacijo modulov s tabličnim računalnikom, ter primerjava njihovih prednosti in slabosti. [1]

2 Zahteve meritev v sistemu MESI mTABLET

Glede na vrsto meritve, ima sistem MESI mTABLET različne zahteve po hitrosti prenosa podatkov, zakasnitve, varnosti povezave in njene stabilnosti, pomembna pa sta tudi operativna razdalja in poraba energije. Najpogosteje uporabljane meritve sistema so snemanje elektrokardiograma in meritve krvnega tlaka, gleženjskega indeksa ter saturacije kisika v krvi, zato se bomo v nadaljevanju članka osredotočili na specifične zahteve teh merilnih modulov.

Komunikacijske zahteve merilnih modulov sistema MESI mTABLET so v veliki meri pogojene z načinom kako poteka posamezna meritev in od količine podatkov, ki jih morajo moduli med meritvijo izmenjati s tablico. Ne glede na vrsto meritve, so osnovni parametri sistema naslednji:

- hitra začetna povezava tablice z moduli pred začetkom meritev,
- pomnjenje modulov, v izogib vsakokratnemu seznanjanju tablice,
- stabilnost povezave med izvajanjem meritve,
- možnost takojšnje prekinitve meritve,
- varnost podatkov,
- minimalna zakasnitev pri meritvah, ki zahtevajo izrisovanje grafov v realnem času,
- potrditev prenosa paketa podatkov (da že sam protokol potrdi da so podatki pravilno preneseni),
- odpornost na motnje in
- komunikacija z več napravami hkrati.

Tablica z moduli komunicira v odnosu »master-slave«, kar ji omogoča tehnologija Bluetooth pri čemer mora biti v določenih scenarjih zmožna komunikacije z več moduli naenkrat. [2]

2.1 MESI mTABLET ECG

Elektrokardiografija (EKG) je preiskava, ki meri električno aktivnost srca. Snemanje 12-kanalnega elektrokardiograma poteka z 10 elektrodami, ki so nameščene na prsni koš, roke in noge. Nastali zapis, imenovan elektrokardiogram, na računalniku MESI mTABLET v živo prikazuje srčni ritem in električne

impulze, kar se uporabi za odkrivanje različnih zdravstvenih stanj, kot so aritmije, srčni napadi in druge srčne nepravilnosti. Gre za neinvazivno, hitro in pogosto uporabljeno diagnostično orodje pri rutinskih pregledih in v nujnih primerih. Elektrode so preko kabla povezane z merilnim modulom, ta pa mora v realnem času podatke pošiljati tablici. [3]

Klinične zahteve brezžičnega prenosa elektrokardiograma obsegajo neprekinjen prikaz elektrokardiograma na zaslonu v realnem času in dovolj kakovosten zajem signala, da ga lahko po opravljeni meritvi analizira tudi algoritem za interpretacijo elektrokardigrama.

Da bi izračunali potrebno hitrost prenosa podatkov, je treba poznati frekvenco vzorčenja signala in velikost posameznega paketa, ki ga modul pošilja tablici. Vsak paket EKG signala je velik 254 zlogov, pri čemer 4 zloge predstavljajo informacije o paketu oz. t.i. »overhead«, ostalo pa vsebina (»body«) paketa. Vsebino sestavlja 12 blokov podatkov (po en za vsak kanal), pri čemer vsak blok podatkov vsebuje 10 vzorcev pri signalu za izris grafa v realnem času in 5 vzorcev za analizo z interpretacijskim algoritmom. Frekvenca vzorčenja znaša 125 Hz za pakete namenjene izrisu elektrokardiografa v realnem času in 1000 Hz za pakete namenjene analizi signala z interpretacijo. Obe vrsti paketov se na tablico pošiljata sočasno. Pri tem imajo paketi namenjeni prikazu v realnem času prednost. To pomeni, da za komunikacijo s tablico potrebujemo hitrost prenosa 25.400 bps (t.i. »real-time data«) in dodatnih 406.400 bps za prenos t.i. »precison data«, kar skupaj pomeni 431.800 bps.

2.2 MESI mTABLET BP

Merjenje krvnega tlaka je postopek, ki se uporablja za določitev sile krvi na stene arterij, ko srce črpa kri. Krvni tlak se beleži z dvema številkama: sistolični tlak (tlak, ko srce bije) in diastolični (tlak, ko srce počiva). Spremljanje krvnega tlaka je ključno za diagnosticiranje in obvladovanje stanj, kot sta hipertenzija in srčne bolezni. Merjenje krvnega tlaka z merilnim modulom MESI mTABLET BP poteka na način, da je merilni modul z manšeto nameščen na pacienta, meritev (napihovanje in spuščanje manšete, z zajemanjem oscilometričnega signala) pa poteka avtomatsko. Uporabnik med meritvijo sicer spremlja delovanje manšete, a je za kakovostno diagnozo bistven rezultat po koncu izvedene meritve, ki je izračunan iz zajetega oscilometričnega signala. [4]

Tehnične zahteve brezžičnega prenosa obsegajo prikaz grafa v realnem času med izvedbo meritve in kakovosten signal za izračun krvnega tlaka iz osciclometričnih podatkov. Vsak paket pri meritvi krvnega tlaka je velik 114 zlogov. Tako kot pri EKG-ju 4 zloge predstavljajo informacije o paketu, srčnem utripu in stanju v katerem se nahaja meritev, preostalih 110 zlogov pa tvori blok podatkov o trenutnem tlaku v manšeti. Vsak blok podatkov vsebuje 25 vzorcev pri frekvenci vzorčenja 200 Hz. To pomeni, da modul za komunikacij s tablico porabi 7296 bps.

2.3 MESI mTABLET ABI

Meritev gleženjskega indeksa (ABI) je neinvazivna preiskava, ki se uporablja za zgodnje odkrivanje periferne arterijske bolezni (PAD). Princip meritve temelji na primerjavi krvnega tlaka v gležnjih z višjim od krvnih tlakov v nadlahteh. Vrednost količnika med tlakoma (indeks) pod 1.0 kaže na zmanjšan pretok krvi v nogah, kar običajno pomeni prisotnost periferne arterijske bolezni, stanja, pri katerem so arterije v nogah zožene oz. zamašene. Meritev MESI mTABLET ABI poteka na način, da uporabnik na pacienta namesti štiri module MESI mTABLET BP (dva na roki, dva na gležnja) in zažene meritev. Tehnično je meritev tlaka v posamezni okončni enaka merjenju krvnega tlaka na roki, le da v tem primeru tablica najprej požene meritev tlaka na obeh modulih na roki za določitev roke z višjim krvnim tlakom, takoj po tem pa zažene novo meritev, kjer je tlak sočasno izmerjen na roki in v obeh gležnjih. [5] Glavni izziv meritve predstavlja stabilna komunikacija s tremi merilnimi moduli naenkrat med meritvijo gleženejskega indeksa. Meritev ABI sočasno združuje tri module za meritev krvnega tlaka, kar pomeni, da mora tablica sočasno vzdrževati povezavo s tremi moduli, kjer vsak komunicira s hitrostjo 7296 bps – torej mora biti tablica vzdrževati hitrost prenosa skoraj 21.888 bps.

2.4 MESI mTABLET SpO2

Pulzna oksimetrija je neinvazivna meritev nasičenosti kisika v krvi (SpO2). Nasičenost se meri z napravo, imenovano oksimeter, s fotopletizmografsko sondo, ki se običajno namesti na prst na roki ali na ušesno mečico. Fotodetektor v sondi z zaznavanjem odbojev svetlobnih žarkov infrardeče svetlobe meri koliko kisika je vezanega na hemoglobin v rdečih krvničkah, oksimeter pa iz podatka izračuna odstotek nasičenosti kisika v krvi. Meritev se običajno uporablja za spremljanje bolnikov z boleznimi dihal, srčnimi obolenji in med operacijami.

Tabela 1. Komunikacijske zahteve merilnih modulov sistema MESI mTABLET

Modul	**Zahtevana hitrost prenosa [kbps]**	**Dovoljena zakasnitev informacije**	**Zahteva po enkripciji**
EKG	432	Ne	Da
BP	7,3	Pogojno	Da
ABI	21,9	Pogojno	Da
SpO2	1,4	Da	Da

Vsak paket pri meritvi MESI mTABLET SpO2 je velik 36 zlogov, pri čemer 4 zloge predstavljajo informacije o paketu, 32 zlogov pa vsebina paketa – to sestavljajo podatki o saturaciji, srčnem utripu, kakovosti signala,

jakosti signala, tipu nameščenega senzorja in pletizmograf (graf srčnega utripa). Vsak blok podatkov vsebuje 1 vzorec pri frekvenci 5 Hz, kar pomeni, da meritev zahteva hitrost prenosa 1440 bps.

3 Pregled brezžičnih komunikacijskih tehnologij

Tablični računalnik MESI mTABLET za komunikacijo z moduli uporablja Bluetooth povezavo, verzijo 2.1 s povečanim obsegom podatkov (t.i. EDR – Enhanced Data Rate). Ta različica Bluetooth tehnologije je bila predstavljena leta 2007 in je v primerjavi s predhodno generacijo prinesla nekaj novosti, kot so poenostavljeno povezovanje med napravami (Secure Simple Pairing), močnejše šifriranje in uporabo naključnih števil za boljšo zaščito pred t.i. brute force napadi, funkcijo »Sniff Subrating« za zmanjšanje porabe energije v načinu ohranjanja povezave, izboljšave na področju upravljanja motenj in višjo hitrost prenosa podatkov – do 3 Mbps, kar je več od zadnje verzije Bluetooth protokola, 5.4. [6] Čeprav Bluetooth 2.1 + EDR teoretično podpira hitrost prenosa do 3 Mbps, pa je hitrost v realnem svetu običajno nižja zaradi različnih omejitev, kot so motnje drugih naprav v pasu 2,4 GHz, antene, ki je kot del modula zaprta v aluminijasto ohišje, strojnih zmogljivosti uporabljenega Bluetooth čipa, razdalje med moduli in tablico ter gibanja uporabnika s tablico okrog pacienta. V nadaljevanju bomo pregledali možne alternative novejših različic protokola Bluetooth in drugih tehnologij brezžične komunikacije za komunikacijo med tablico MESI mTABLET in merilnimi moduli.

3.1 Bluetooth novejše različice

Novejše različice Bluetooth protokola ponujajo hitrosti prenosa podatkov do 2 Mbps (verzija 5.4, z dodatnimi 50 Mbps s povečanim obsegom podatkov), kar je več od potreb sistema MESI mTABLET z najvišjim zahtevanim prenosom 431.800 bps. To pomeni, da katerkoli novejša Bluetooth različica zadostuje zahtevani hitrosti prenosa podatkov. Izjemo predstavlja različica Bluetooth 4.0, znana tudi kot prva generacija z imenom Bluetooth Low Energy (BLE), ki je prinesla znatno nižjo porabo energije v primerjavi s prejšnjimi genracijami (velikokrat imenovanimi »Bluetooth Classic«), zavoljo znižane hitrosti podatkov – do 1 Mbps – kar bi ob upoštevanju zgoraj opisanih omejitev že utegnilo povzročati težave pri prenosu meritve EKG. Glede varnosti in stabilnosti povezave protokol Bluetooth zagotavlja varnostne funkcije, vključno z enkripcijo in avtentikacijo. Bluetooth deluje na 2,4 GHz ISM (Industrial, Scientific, Medical) pasu, ki je nagnjen k motnjam, vendar protokol odpornost izboljšuje s tehnologijo prilagodljivega frekvenčnega preskakovanja (AFH oz. Adaptive Frequency Hopping), kar zagotavlja razmeroma dobro odpornost na elektromagnetne motnje. Protokol vključuje tudi mehanizme za zaznavanje in popravljanje napak, da zagotovi celovitost in integriteto podatkov med prenosom. Glede dosega velja omeniti verzije Bluetootha od 5.0 naprej, ki teoretično lahko pokrivajo doseg do 240 m, kar je zanimivo za morebitne nove možnosti uporabe [7].

3.2 Wi-Fi

Wi-Fi ponuja zelo visoke hitrosti prenosa podatkov (zadnja generacija 802.11ax do 9.6 Gbps) [8], kar bistveno presega zahteve sistema MESI mTABLET. Višje hitrosti prenosa omogočajo razmišljanje o razvoju merilnih modulov, ki zahtevajo višji prenos podatkov, kot so npr. 3D kamera, ultrazvok ali digitalni dermatoskop. Wi-Fi ima velik doseg (do 100 ali več metrov na prostem), kar zagotavlja zanesljivejšo uporabo sistema v scenarijih, kjer je tablica oddaljena od merilnega modula, hkrati pa odpira nove možnosti uporabe. Uporaba Wi-Fi komunikacije med napravami, bi lahko uporabnikom denimo omogočila, da bolj oddaljeni od pacienta oz., da se pacient z napravo premika dlje, kot je npr. zahtevano pri izvajanju preiskave t.i. 6-minutnega testa hoje, kjer mora pacient v 6 minutah prehoditi maksimalno razdaljo z nameščenim modulom za merjenje saturacije kisika v krvi. Protokol te preiskave je v sistemu MESI mTABLET zavoljo omejenega dosega Bluetooth povezave trenutno definiran na način, da pacient meritev izvaja s hojo v krogu in na tak način ostaja v dometu, ki ga lahko pokrije Bluetooth. Wi-Fi, ki deluje na 2,4 GHz in 5 GHz pasovih, ima robustnejše mehanizme za zmanjšanje motenj, kar zagotavlja boljšo odpornost na elektromagnetne motnje v primerjavi z Bluetoothom, a za ceno večje porabe energije v primerjavi z ostalimi predstavljenimi tehnologijami, kar je v sistemu MESI mTABLET, ki se zanaša na avtonomijo releativno majhnih baterij (tablica 8800 mAh, moduli med 620 mAh – 1240 mAh) pomemben vidik. Wi-Fi ponuja tudi več možnosti enkripcije povezave od Bluetooth protokola.

3.3 Ultra-Wideband (UWB)

Ultra-Wideband (UWB oz. ultraširokopasovno) je tehnologija, ki se odlikuje po visokih hitrosti prenosa (več 100 Mbps) na podobnih razdaljah kot Bluetooth in ANT+ (10-30 m) ob zelo nizki porabi energije. UWB se razlikuje od ostalih radijskih prenosov, saj se informacije ne prenašajo z variiranjem ravni moči, frekvence ali faze sinusnega vala, temveč z generiranjem impulzov radijske energije. Posledično je frekvenčni spekter, povezan s to vrsto valovne oblike, izjemno širok (od 3,1 GHz do 10,6 GHz) [9], od koder tudi ime ultraširokopasovno. Ostale prednosti tehnologije UWB so visoka odpornost na motnje in nizka latenca. Zanimivo funkcionalnost predstavlja natančno sledenje lokaciji naprave, kar je koristno za optimiziran (hitrejši in natančnejši) prenos podatkov ter morebitno lociranje izgubljene naprave. Tehnologija je na splošno kompleksnejša za implementacijo in podvržena strožjim regulatornim zahtevam kot ostale predstavljene tehnologije, kar je pomemben dejavnik pri razvoju medicinskih pripomočkov. [10]

3.4 ANT+

ANT+ je tehnologija, ki je bila zasnovana za uporabo v baterijsko napajanih napravah, zato jo odlikuje nizka poraba energije. To je razširilo uporabo v napravah za spremljanje telesne pripravljenosti in zdravja, kot so športne ure, kolesarski računalniki in pripadajoči senzorji, npr. senzorji frekvence srčnega utripa, moči, kadence, frekvence korakov ipd. Majhna poraba energije je lastnost, ki bi utegnila biti zanimiva v scenarijih, kjer morajo moduli s tablico komunicirati daljši čas in v delovnem obtoku ostajati cel dan preden jih uporabnik zopet napolni. Primer takšnega scenarija je ambulatorna meritev povprečnega krvnega tlaka, kjer ima pacient nameščeno manšeto za merjenje krvnega tlaka, ta pa izvaja večje število meritev krvnega tlaka zapored, kar traja tudi več kot pol ure. ANT+ podpira bistveno nižje hitrosti prenosa podatkov v primerjavi z ostalimi predstavljenimi tehnologijami (do 60 kbps) kar je dovolj za informacije, ki jim je v prvi vrsti namenjena (frekvenca srčnega utripa, proizvedena moč, kadenca...), a ne zmore podpirati hitrosti, ki jo zahteva EKG modul v sistemu MESI mTABLET. ANT+ deluje v 2,4 GHz pasu kot Bluetooth [11], s katerim si deli enako strojno opremo, zato je lahko nagnjen k podobnim težavam, čeprav ima svoje mehanizme za zmanjšanje motenj in je lahko v določenih okoljih na njih bolj odporen od Bluetootha in Wi-Fija, ki prav tako deluje v tem pasu.

Tabela 2. Ključne lastnosti brezžičnih komunikacijskih tehnologij Bluetoot, Wi-Fi, Ultra-wideband, ANT+

Brezžična tehnologija	**Max. hitrost prenosa [Mbps]**	**Latenca**	**Odpornost na motnje**	**Poraba energije**
Bluetooth	2	30-100 ms (Classic) 10-50 (BLE)	Zmerna	Nizka
Wi-Fi	9600	1-10 ms	Zmerna	Visoka
Ultra-wideband	480	<1 ms	Zelo dobra	Nizka
ANT+	0,06	100-200 ms	Dobra	Nizka

4 Sklep

Po pregledu literature in tehničnih podatkov o opisanih tehnologijah lahko zaključimo, da vsaka izmed opisanih tehnologij prinaša določene prednosti in slabosti pri morebitni uporabi v sistemu MESI mTABLET. Najmanj izrazite prednosti prinaša tehnologija ANT+, ki v zameno za manjšo porabe energije nudi majhno hitrost prenosa podatkov in višjo latenco, kar je neprimerno vsaj za meritev EKG. Wi-Fi ponuja daleč najvišjo hitrost prenosa podatkov od vseh tehnologij, kar odpira možnosti za razvoj zahtevnejših modulov a za ceno višje porabe energije, kar je v sistemu, ki temelji na baterijskem napajanju pomemben dejavnik. Zanimivo alternativo trenutni komunikaciji s tehnologijo Bluetooth predstavlja še ne povsem uveljavljena tehnologija Ultra-wideband, ki ob majhni porabi energije in podobnem dometu kot Bluetooth, ponuja znatno višje hitrosti od Bluetootha, boljšo odpornost na motnje, nižjo latenco, hkrati pa zanimive funkcionalnosti kakršna je natančno lociranje naprave, kar prinaša nove možnosti uporabe naprav v sistemu MESI mTABLET.

Literatura

[1] MESI, “Measurements | MESI – Simplifying Diagnostics,” Measurements | MESI – Simplifying Diagnostics, 2024. https://www.mesimedical.com/measurements/ (accessed Aug. 25, 2024).

[2] T. Krivc and M. Banovec, “Data rate demands of MESI mTABLET modules,” Aug. 27, 2024.

[3] MESI, “MESI mTABLET ECG | MESI – Simplifying Diagnostics,” MESI mTABLET ECG | MESI – Simplifying Diagnostics, 2020. https://www.mesimedical.com/measurements/12-lead-ECG (accessed Aug. 26 2024).

[4] MESI, “MESI mTABLET BP | MESI – Simplifying Diagnostics,” MESI mTABLET BP | MESI – Simplifying Diagnostics, 2020. https://www.mesimedical.com/measurements/blood-pressure/ (accessed Aug. 26, 2024).

[5] MESI, “MESI mTABLET ABI | MESI – Simplifying Diagnostics,” MESI mTABLET ABI | MESI – Simplifying Diagnostics, 2020. https://www.mesimedical.com/measurements/ankle-brachial-index?d=abi (accessed Sep. 01, 2024).

[6] “Core Specification | Bluetooth® Technology Website,” Bluetooth® Technology Website, Jan. 08, 2021. https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-2-1-edr/ (accessed Aug. 28, 2024).

[7] Bluetooth, “Understanding Bluetooth Range,” Bluetooth® Technology Website, 2024. https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/range/

[8] “What Is Wi-Fi 6? - Next-Generation Wi-Fi,” Cisco. https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-wi-fi-6.html

[9] L. Kocjančič, “Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko Načrtovanje in izdelava Vivaldi-jeve antene z večoktavnim frekvenčnim področjem delovanja.” Accessed: Sep. 01, 2024. [Online]. Available: https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=80230

[10] I. Oppermann, Matti Hämäläinen, and Jari Iinatti, UWB. John Wiley & Sons, 2005.

[11] J. Tosi, F. Taffoni, M. Santacatterina, R. Sannino, and D. Formica, “Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review,” Sensors, vol. 17, no. 12, p. 2898, Dec. 2017, doi: https://doi.org/10.3390/s17122898.