

LINEARNO PROGRAMIRANJE KAO METOD OPTIMIZACIJE POTROŠNJE ENERGIJE U BEŽIČNIM SENZORSKIM MREŽAMA KRATKOG DOMETA/LINEAR PROGRAMMING AS A METHOD OF OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN SHORT-RANGE WIRELESS SENSOR NETWORKS

Goran Popović¹

¹Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku, Politehnički fakultet Travnik, Katedra za elektrotehniku, Aleja konzula – Meljanac bb, 72270 Travnik, Bosna i Hercegovina, e-mail:goran.popovic@iu-travnik.com

UDK / UDC 621.3.018.3:004.021.5

Pregledni članak

Sažetak: Linearno programiranje je grana matematike koja se bavi problemima optimizacije sistema unutar zadatih ograničenja. Vrijednosti promenljivih se određuju tako da daju optimalnu vrijednost funkcije cilja (minimum ili maksimum). U ovom načinu optimizacije i funkcija cilja i ograničenja imaju linearnu formu. Primjena ove metode je pokazala dobre rezultate u širokom spektru srodnih problema. Ušteda energije senzorskih čvorova je jedan od osnovnih ciljeva koji se postavljaju pred projektante bežičnih senzorskih mreža. Tehnologije kratkog dometa realizovane na mrežama koje pokrivaju manje površine terena imaju dodatne specifičnosti kojima je potrebno posvetiti posebnu pažnju. U ovom radu posmatra se uticaj različitih kriterijuma na analizu problema kao i primjena nekoliko metoda karakterističnih za optimizaciju putem linearnog programiranja. Autor će posebnu pažnju posvetiti mogućnostima primjene dobijenih rezultata u WBAN mrežama kao tipičnom predstavniku WSN realizovanih na terenu relativno malih dimenzija.

Ključne riječi: Linearno programiranje, Tehnologije kratkog dometa, WBAN, WSN

Abstract: Linear programming is a branch of mathematics that deals with system optimization problems within given constraints. The values of the variables are determined to give the optimal value of the objective function (minimum or maximum). In this optimization mode, both the objective function and the constraints have a linear form. Application of this method has shown good results in a wide range of related problems. Energy saving of sensor nodes is one of the basic goals that are set before designers of wireless sensor networks. Short-range technologies implemented on networks that cover smaller areas of the field have additional specificities that require special attention. This paper examines the influence of different criteria on problem analysis as well as the application of several methods characteristic for optimization through linear programming. The author will pay special attention to the possibilities of applying the obtained results in WBAN networks as a typical representative of WSNs implemented in the field of relatively small dimensions.

Key words: Linear programming, Short range technologies, WBAN, WSN

1. UVOD

Bežične senzorske mreže WSN su jedan od najvažnijih segmenata IoT infrastrukture u svim njenim primjenama. Bilo kakva obrada podataka i djelovanje na bazi određenih zaključaka podrazumijeva prije svega akviziciju podataka sa terena. Pojedinačni senzori koji vrše mjerenja, identičnih veličina na različitim lokacijama ili različitih veličina shodno potrebama na terenu, se umrežavaju kako bi podatke dostavili do mjesta njihove obrade i dalje do željenih aplikacija. Upravljanje dostavom podataka kroz formiranu mrežu je moguće izvršiti na dva načina: centralizovano i distribuirano. Distribuirano upravljanje pruža nekoliko značajnih prednosti. Decentralizovani pristup omogućava svakom od senzora da samostalno donosi odluke o rutiranju podataka koje treba da prosljedi vodeći interesa o koristi čitave mreže [1]. Interes mreže se ogleda prvenstveno u optimizaciji potrošnje energije s obzirom da se čvorovi napajaju iz baterija koje obično nije moguće dopunjavati a često ih je teško i mijenjati, pogotovo ako su u pitanju implantirani senzori. Umrežavanjem čvorova se formira takva infrastruktura gdje svaki od njih pored sopstvenih podataka koje očitava na terenu prosleđuje i podatke drugih čvorova koji su ih prilikom rutiranja iskoristili za prolazne u smjeru ka konačnom odredištu. Čitav proces je potrebno organizovati na način koji će osigurati ravnomjernu potrošnju energije u mreži kako bi se izbjegle situacije u kojima neki čvorovi veoma brzo potroše raspoloživu energije a neki drugi funkcionišu još dugo poslije toga. Ovo je naročito važno u mrežama čiji se životni vijek definiše kao vrijeme do ispada iz aktivnog rada bilo kog od čvorova mreže. Jedna od važnih vrsta ovakvih mreža su WBAN mreže koje se koriste za očitavanje medicinskih podataka sa tijela pacijenta. S obzirom na veličinu senzorskog polja koje je ograničeno dimenzijama tijela ovdje se radi o mrežama kratkog dometa koje su u mnogo čemu specifične.

2. ENERGETSKI MODELI SISTEMA, TOPOLOGIJA WBAN MREŽE I OGRANIČENJA

Bežična senzorska mreža WSN se sastoji od N senzora, $S_1, S_2, \dots, S_N$, postavljenih unutar ograničenog regiona od interesa za posmatranje različitih fizičkih fenomena od interesa i to na pozicijama koje mogu biti slučajne ili shodno manjeni precizno definisane. U slučaju WBAN mreže ovaj region predstavlja površina ljudskog tijela a pozicije se određuju u skladu sa potrebama očitavanja zdravstvenih parametara [2]. Svaki od čvorova S_i ima koordinate (x_i, y_i) u definisanom koordinatnom sistemu. Senzori vrše očitavanje veličina u regularnim intervalima ili vođeni događajima a sve podatke je potrebno prenijeti do definisanog odredišta koje nazivamo bazna stanica BS ili sink i koja ima koordinate (x_{N+1}, y_{N+1}) . Podaci se rutiraju na način da se prosleđuju preko drugih čvorova u mreži koji na taj način dobijaju ulogu relejnih čvorova pa svaki od njih sem sopstvenih podataka prosleđuje i podatke još nekih od čvorova u mreži zavisno od mape rutiranja podataka i primjenjenog algoritma. Cilj je da radio predajnik prilikom predaje potroši minimalnu količinu energije neophodnu za dostizanje prijemnika.

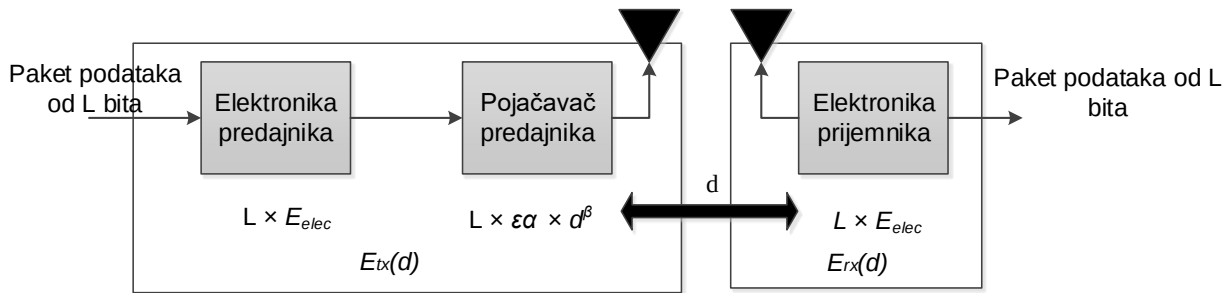
Radio modeli pokazuje koliko se energije troši u predajniku i prijemniku prilikom prenosa digitalne poruke. Klasični radio model prvog reda, za prenos u slobodnom prostoru, [3] omogućava računanje energije koja se troši u predajniku sistema E_{Tx} koja se troši u prijemniku i energije E_{Rx} koja se troši u prijemniku za prenos poruke od L bita. Ova formula se sastoji iz fiksno i promjenljivog dijela za slučaj predajnika gdje je fiksni dio LE_{elec} , pri čemu je L dužina poruke u bitima a E_{elec} energija koja se utroši u elektronskom kolu po bitu poruke izražena u J/bit u predajniku ili prijemniku dok je promjenljivi dio je $Le_{\alpha}d_{i,j}^{\beta}$ zavisno od

$$E_{Tx}(L, d) = \begin{cases} LE_{elec} + Le_{fs}d^2, & \text{ako je } d < d_0 \\ LE_{elec} + Le_{amp}xd^4, & \text{ako je } d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{Rx}(L) = LE_{elec} \quad (2)$$

$$E_{tot} = E_{Tx} + E_{Rx} \quad (3)$$

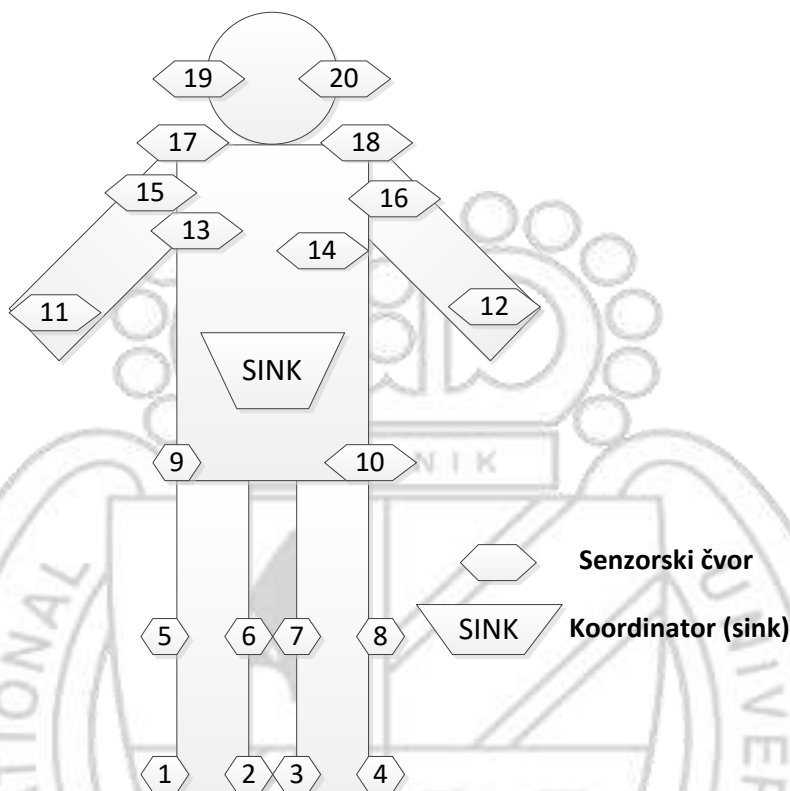
e_{fs} je pojačanje energije u modelu slobodnog prostora a e_{amp} je pojačanje u multipath modelu a d_0 je prag na osnovu kog se određuje dio modela koji se koristi u svakoj konkretnoj situaciji gdje je $d_0 = \sqrt{\frac{e_{fs}}{e_{mp}}}$, na kraju E_{tot} je ukupna energija koja se utroši u mreži za primopredaju poruke dužine L bita.



Slika 1. Radio model II reda za prenos u slobodnom prostoru

WBAN mreže su posebna vrsta WSN mreža koja se sastoji od senzora posavljenih na tijelo čovjeka u cilju očitavanja različitih medicinskih podataka u realnom vremenu. Senzori se montiraju u odjeću pacijenta, na površinu tijela ili se implantiraju unutar tijela. Dobijene podatke je potrebno poslati do lokacije gdje se vrši njihova obrada i gdje će se donositi odluke o zdravstvenom stanju

pacijenta i eventualnim intervencijama na korigovanju određenih parametara. Raspored čvorova zavisi od parametara koji se žele očitati. Primjer jedne mreže sa 20 čvorova je prikazan na Slici 2.



Slika 2. Tipična WBAN mreža

Svaki od čvorova svoje podatke šalje ka sinku koji ih dalje prosleđuje do konačnog odredišta. Pozicija sinka može biti van tijela, u situacijama gdje se očitavanje podataka vrši prilikom prolaska pacijenta kraj čitača npr. prilikom pandemija kao što je bio slučaj sa pandemijom COVID-19 i na taj način vrši detektovanje zaraženog pojedinca ili na površini tijela (kao što je prikazano na Slici 2) gdje se sink u funkciji kontrolera postavlja na abdomen pacijenta. Ovdje nam je zanimljiv drugi slučaj. Sink je uređaj koji nije energetski kritičan jer mu je jednostavno zamijeniti baterijsko napajanje. On vrši preuzimanje svih ostalih podataka iz mreže i šalje ih do konačne destinacije. Ovi podaci se nakon obrade dostavljaju nazad pacijentu na pametni telefon preko odgovarajuće aplikacije ili se šalju u nadležnu medicinsku ustanovu koja vodi računa o zdravlju pacijenta. Specifičnost pozicioniranja sinka na tijelo pacijenta je u veoma kratkim radio linkovima pripadajuće WBAN mreže pa tako i drugačijem radio modelu od onog predstavljenog izrazima 1-3 i Slikom 1.

Rutiranje podataka od svakog čvora mreže do sinka može se vršiti na različite načine shodno postojećim protokolima [4]. Svaki od senzora može da šalje podatke direktno ka pripadajućem sinku (zvjezdasta topologija), čvorovi mogu formirati klastere gdje svaki od klastera ima svog

vođu grupe a samo oni prenose podatke ka sinku, pri čemu se ta uloga periodično rotira [5]. Treći način podrazumijeva slanje poruka preko relejnih čvorova u pravcu sinka (multi-hop topologija) [6] koju ovdje i analiziramo.

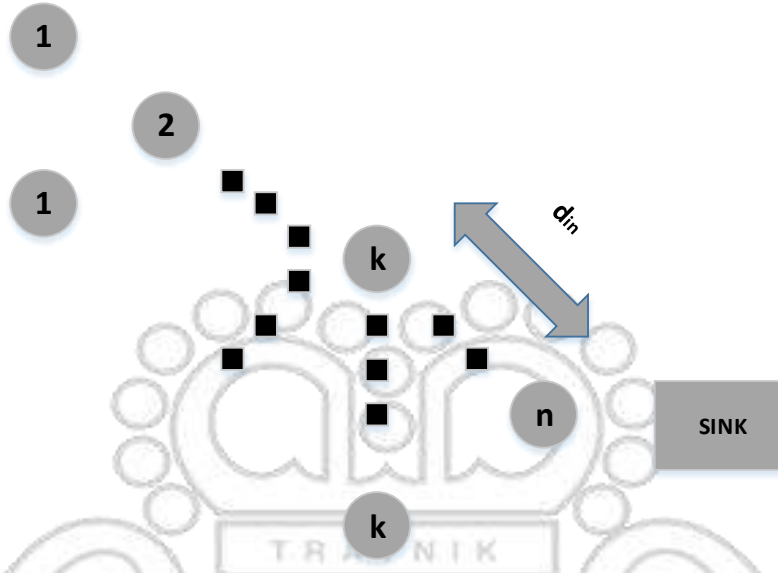
Gubici na trasi između predajnika i prijemnika direktno zavise od međusobne udaljenosti. Prijemna snaga na poziciji relejnog senzora udaljenog d od predajnog senzora može se izračunati uz pomoć poluempirijske formule zasnovane na frisovom izrazu [8]:

$$P_{dB}(d) = P_{0,dB} + 10n \log(d/d_0) = -|S_{21}|_{dB} \quad (4)$$

Gdje je dužina d izražena u cm, $P_{0,dB}$ je gubitak na referentnoj putanji čija se dužina postavlja na osnovu empirijskog iskustva (npr. 10 cm kao što je uzeto u [7]), n je eksponent gubitaka na putanji, obično 2 u slobodnom prostoru. WBAN mreže su mreže malih dimenzija ograničene na površinu ljudskog tijela, međutim senzori koji su postavljeni sa zadnje strane tijela, npr. na leđa nisu u zoni optičke vidljivosti LOS sa sinkom koji se postavlja na abdomen sa prednje strane tijela a ni sa potencijalno relejnim senzorima koji su postavljeni na istoj strani. Zbog efekata apsorpcije tj. upijanja dijela energije prilikom prolaska radio talasa kroz tijelo i difrakcije koja nastaje zbog prirodnih krivina na površini tijela gubici se povećavaju pa se u praksi za n u NLOS okruženju uzima dvostruka vrijednost u odnosu na LOS slučaj.

Dostava podataka od svakog senzora do sinka se može izvršiti u jednom hopu kroz direktnu komunikaciju gdje potrošnju energije po bitu na k -tom nivou računamo uz pomoć izraza:

$$E_{TSHx}(y, d_{in}) = E_{elec} + e_a((n - k + 1)d_{in})^n \text{ [J/bit]} \quad (5)$$



Slika 3. Binarna topologija stabla sa n nivoa i fiksnom udaljenošću d_{in}

Na Slici 3 je prikazan model distribucije poruka kroz n nivoa od senzorskog čvora do sinka kroz nekoliko hopova. Posmatra se regularno stablo tj. ζ -balansirano stablo gdje svaki čvor-dijete ima tačno ζ svojih čvorova-djece. Na Slici 3 je slučaj sa $\zeta=2$. U mreži postoji n nivoa numerisanih od 1 do n , gdje je n čvor koji je najbliži sinku. Scenario je pojednostavljen na način da se međusobna udaljenost susjednih čvorova uzima kao konstantna i iznosi d_{in} . Energija koja se potroši kroz multihop distribuciju može se izračunati kroz izraz:

$$E_{TMHx}(y, d_{in}) = \zeta \sum_{i=0}^{k-2} \zeta^i k E_{elec} + \sum_{i=0}^{k-1} \zeta^i k (E_{elec} + e_{\alpha} d_{in}^{\eta}) \text{ [J/bit]} \quad (6)$$

Ako posmatramo fizički sloj komunikacionog protokola odnos prijemne i predajne snage na komunikacionoj trasi dužine d se može predstaviti izrazom [9]:

$$\frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} = \frac{G_{Tx} G_{Rx} \lambda^2}{(4\pi)^2 d^{\alpha}} \quad (7)$$

Uzevši u obzir slabljenje signala na putanji duž ljudskog tijela a_b prijemna snaga u relejnom čvoru ili sinku se može izraziti sa:

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \lambda^2}{(4\pi)^2 d^{\alpha}} e^{-a_b d} \quad (8)$$

Gdje se vrijednosti a_b za LOS WBAN nalaze u intervalu [3,4] a za NLOS WBAN u intervalu [4,7] kako se navodi u [10].

S obzirom da u WBAN mrežama postoji i slabljenje uslijed apsorpcije unutar ljudskog tijela koeficijent slabljenja se dodaje u izraz (1) pa se dobija:

$$E_{Tx}(L, d) = \begin{cases} LE_{elec} + La_B e_{fs} d^2, & \text{ako je } d < d_0 \\ LE_{elec} + La_B e_{amp} x d^4, & \text{ako je } d \geq d_0 \end{cases} \quad (9)$$

Uzevši u obzir feding koji se pojavljuje u mrežama kratkog dometa koji se karakteriše sa multipath efektom $|h|$ prijemna snaga se može izraziti sa:

$$P_{Rx} = P_{Tx} \frac{K}{d^\alpha} |h|^2 \quad (10)$$

Pa je energija po bitu poruke koja se troši prilikom predaje izražena sa:

$$E_{Tx} = E_{elec} + \frac{SNR \cdot N_0 B}{R_b k |h|^2} d^\alpha a_B \quad (11)$$

Gdje je:

$$SNR = \frac{P_{Tx} K}{N_0 B d^\alpha} |h|^2 \quad (12)$$

Pri čemu je N_0 spektralna gustina snage šuma, B je propusni opseg filtra, R_b bitska brzina. Iz ovih izraza je jasno da potrošnja energije ne zavisi samo od udaljenosti prijemnog čvora već i od slabljenja na kanalu, multipath fedinga i apsorpcije u tijelu pacijenta.

U scenarijima dostave podataka u jednom hopu, prvi bez energije ostaju čvorovi koji su najudaljeniji od sinka pošto oni troše najviše energije zbog direktne srazmjeronosti potrošnje sa kvadratom udaljenosti između predajnika i prijemnika. U scenarijima gdje se za dostavu podataka koriste relejni čvorovi, prvi bez energije ostaju oni čvorovi koji su najbliži sinku, pošto se najviše saobraćaja rutira upravo preko njih.

Jedan od načina da se uštedi na energiji tako da mrež ostane duže funkcionalna u svojim primarnim zadacima ja da se u WBAN mrežu na određene pozicije postave specijalni čvorovi koji imaju samo ulogu prosleđivanja podataka a ne vrše nikakva očitavanja [7]. U tom slučaju više energije ostaje za rutiranje tj. komunikacioni dio koji je i najkritičniji u pogledu potrošnje.

Drugi način za produženje životnog vijeka mreže je kooperativno djelovanje u prosleđivanju podataka od čvorova ka zajedničkom sinku. Poređenjem energije koja se potroši u SH pristupu sa onom koja se potroši u MH pokazuje se da u svakom slučaju više preostale energije ostaje u čvorovima koji se nalaze bliže sinku. Ako relejna mreža sadrži n nivoa, podaci sa 1. i 2. nivoa se prosleđuju direktno na 4. i 5. nivo respektivno čime se postiže isti efekat kao onaj koji se dobija postavljanjem specijalnih relejnih čvorova ali bez dodatnih troškova. Broj čvorova koji čiji se podaci mogu prosleđivati preko čvorova na nivou k može se izraziti preko formule:

$$\#N = \left\lfloor \frac{E_{TSH}(l, d_{in}) - E_{TSH}(k, d_{in})}{E_R(1, (n-k+1) d_{in})} \right\rfloor \quad (13)$$

3. LINEARNO PROGRAMIRANJE U FUNKCIJI OPTIMIZACIJE WBAN MREŽA

Funkcija cilja kod linearnog programiranja kao jednom od klasičnih metoda optimizacije se u opštem slučaju zadaje u slijedećem obliku:

$$\max(\text{ili } \min)z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n = \sum_{j=1}^n c_jx_j \quad (14)$$

Uz postavljeni sistem ograničenja i uslov nenegativnosti. U praksi se često koristi linearna kombinacija normalizovanih funkcija cilja kako bi se izbjegle neusaglašenosti nastale zbog raznorodnih veličina koje se uzimaju za kriterijume optimizacije tj. rješava se problem:

$$\max(\text{ili } \min)f(x) = f^{MTK}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{k=1}^p w_k f_k^0(x) \quad (15)$$

Gdje su: $w_k \geq 0$, težinski koeficijent k-tog kriterijuma, $f_k^0(x)$ je normalizovana k-ta funkcija cilja $f_k(x)$. Na ovaj način se dobijaju linearne funkcije cilja čiji je zbir koeficijenata uz promjenljive x_j jednak jedinici.

Shodno postavljenim energetske modelima i mogućnostima ali i ograničenjima linearnog programiranja te specifičnostima WBAN mreža pokazuje se da postoji veliki broj scenarija gdje linearno programiranje daje dobre rezultate u optimizaciji potrošnje energije prilikom rutiranja podataka ka odredištu.

Prenoseći prikupljene podatke o zdravstvenom stanju pacijenta kroz WBAN mrežu tj. senzore postavljene na tijelo pacijenta u svakom koraku, prilikom izbora relejnog čvora na kome se određeni hop završava računa se normalizovana fitness funkcija prema izrazu:

$$f^0(s) = k_{11} \frac{E_{res}}{E_0} + k_{12} \frac{d_0}{d_{1,2}} + k_{13} \frac{d_0}{d_{2,3}} \quad (16)$$

Ili funkcija koštanja:

$$cost^0(s) = c_{11} \frac{E_0}{E_{res}} + c_{12} \frac{d_{1,2}}{d_0} + c_{13} \frac{d_{2,3}}{d_0} \quad (17)$$

Gdje su parametri: E_{res} preostala energija čvora kandidata u svakom koraku, $d_{2,3}$ je udaljenost od kandidata za relejni čvor do slijedeće destinacije (bilo da je to novi relejni čvor ili konačno odredište -sink), $d_{1,2}$ je udaljenost od ishodišnog čvora do potencijalno narednog relejnog čvora.

Normalizovani izraz za fitness funkciju predstavimo sa:

$$f^0(s) = k_{11} \frac{E_{res}}{E_0} + k_{12} \frac{d_0}{d_{1,2}} + k_{13} \frac{d_0}{d_{2,3}} \quad (18)$$

Gdje je E_0 početna energija baterije koja je ista za sve senzorske čvorove u mreži, d_0 je razdaljina između ishodišnog čvora i bazne stanice prema kojoj se podaci usmjeravaju. Analogno tome, za funkciju koštanja se koristi izraz:

$$cost^0(s) = c_{11} \frac{E_0}{E_{res}} + c_{12} \frac{d_{1,2}}{d_0} + c_{13} \frac{d_{2,3}}{d_0} \quad (19)$$

Koeficijenti se uvijek biraju tako da zadovolje uslov: $k_{11} + k_{12} + k_{13} + k_{14} = 1$ ili $c_{11} + c_{12} + c_{13} + c_{14} = 1$, zavisno od toga koji izraz za optimizaciju se koristi.

4. ZAKLJUČAK

U radu su predstavljeni energetske modeli koji se mogu koristiti u mrežama kratkog dometa kao što su Bluetooth, WiFi, ZigBee itd. Radi se o bežičnim protokolima koji se primjenjuju u WBAN mrežama. Energetski modeli u ovim mrežama se razlikuju od modela koji se primjenjuju u mrežama velikog dometa, kako zbog specifičnosti tehnologija koje se koriste tako i zbog posebnosti koje su vezane za mreže kao što je WBAN. Predstavljene su različite ideje kako da se ove specifičnosti uobzire na način da u modelima dobijemo što približniju sliku stvarnog stanja. Predstavljen je i sistem implementacije linearnog programiranja kao metoda optimizacije WBAN mreža. Metod se svodi na maksimizaciju fitness funkcije ili minimizaciju funkcije koštanja pri čemu se kao kriterijumi uzimaju promjenljive koje u najvećoj mjeri mogu uticati na balansiranje potrošnje. U praksi se značaj ovih promjenljivih može iskazati kroz različita vrednovanja putem težinskih koeficijenata, što zavisi od slučaja do slučaja. Prilikom planiranja optimizacije neophodno je voditi računa o obje stvari: izabrati odgovarajući energetske model i kriterijume za optimizaciju sa njihovim težinskim vrijednostima.

LITERATURA

- [1] Ling, Q., Zeng, F. and Tian, Z. (2010) 'Energy-efficient decentralized event detection in large-scale wireless sensor networks', Proceedings of ICASSP
- [2] Popović G., Đukanović G., (2021) „O uštedi energije u bežičnim senzorskim mrežama za praćenje zdravstvenog stanja pacijenta, primjenom ACO algoritma“, Naučna revija, Godina VI, Vol 1, Br. 8, 2021. Originalni naučni rad UDK 004.78:621.39]:614.2
- [3] Banerjee, J., Mitra, S.K., Naskar, M.K., (2011) "Comparative study of radio models for data gathering in wireless sensor network", Int. J. Comput. Appl. 27, 49–57.

- [4] Zekotić E., Popović G., (2022), „Optimizacija bežičnih senzorskih mreža-Izazovi i mogućnosti“, Proceedings of IUT, Godina VI, Broj: 13, ISSN: 2490-2268, Travnik, December 2022.
- [5] Popovic G., Djukanovic G., (2016), „Cluster formation techniques in hierarchial routing protocols for Wireless Sensor Networks“, Journal of Information Technology and Applications JITA, June 2016., 1:35-41
- [6] Ametspahić A., Popović G., (2023), „Smanjenje potrošnje energije WSN u funkciji fizičkog sloja pametnog parkinga na primjeru užeg gradskog područja Grada Sarajevo kao doprinos politici zaštite životne sredine“, Proceedings of IUT, Godina VII, Broj: 15, Travnik, December 2023.
- [7] Reusens E. et al, (2009), “Characterization of on-body communication channel and energy efficient topology design for wireless body area networks,” IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 13, no. 6, pp. 933–945
- [8] Balanis C.A.,(1982), *Antenna Theory, Analysis and Design*. New York, NY: 1st ed. Harper & Row, 1982, pp. 64-65, 365-367.
- [9] Nahali A. et al, (2019) “Energy Modeling of Wireless Body Area Networks with On-Body Communication Channel Characterization”. International Wireless Communications, Mobile Computing Conference (IWCMC), Jun 2019, Tanger, Morocco
- [10] Yazdandoost K.Y. et al, (2009) “Channel model for bodyarea network (BAN),” IEEE 802.15.6 technical contribution, document ID: 15-08-0780-09-0006, pp. 41–56
- [11] SaiSanathKumar K. et al, (2016), “Calculation of Path Losses at CM3 for Wireless Body Area Networks (WBAN) by using Different Types of Antennas,” International Journal of Applied Engineering Research, vol. 11, no. 7, pp. 5210–5217