



## ŽAIDIMŲ TEORIJOS TAIKYMAS *IEEE* 802.11 TINKLUOSE

Tomas CUZANAUSKAS<sup>1</sup>, Aurimas ANSKAITIS<sup>2</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas*

*El. paštas: <sup>1</sup>tomas.cuzanauskas@vgtu.lt; <sup>2</sup>aurimas.anskaitis@vgtu.lt*

**Santrauka.** Lengvai pritaikoma ir panaudojama įvairiuose sprendimuose *IEEE* 802.11 technologija tapo viena populiariausių bevielų technologijų. *IEEE* 802.11 įrenginiai veikia nelicencijuotais 5 GHz ir 2,4 GHz dažniais – pramonės, mokslo ir medicinos dažnių ruože (angl. *Industrial, scientific and medical (ISM) radio bands*). Šiam dažnių ruožui taikomos supaprastintos taisyklės, nurodančios, kad įrenginiai, veikiantys ISM dažniais, turi atitikti tik maksimalią signalo perdavimo galią ir interferencijos triukšmus bei neviršyti triukšmo normos už dažnių ruožo ribų. Tobulėjant *IEEE* 802.11 protokolo įrangai, šios taisyklės tapo nelanksčios ir neatitinka dabartinių įrenginių galimybių. Straipsnyje pristatomas naujas *IEEE* 802.11 įrenginių kanalo prieigos metodas, pagrįstas žaidimų teorija. Parodoma, kad taikant šį metodą galima pagerinti spektro panaudojimo efektyvumą bei kartu iš dalies atsakyti dabar egzistuojančio *CSMA/CA* mechanizmo *IEEE* 802.11 įrenginiuose. Taikant efektyvesnį kanalo prieigos metodą atsiranda galimybė laikytis lankstesnių siųstuvo galių taisyklių ir taip padidinti skvarbą uždaroje patalpose bei įrangos veikimo nuotolį.

**Reikšminiai žodžiai:** *IEEE* 802.11, *WiFi*, interferencija, kognityvusis radijas, žaidimų teorija.

### Įvadas

*IEEE* 802.11 yra viena populiariausių duomenų perdavimo bevielų technologijų. Jos populiarumas pritaikant įvairiuose technologiniuose sprendimuose per pastaruosius metus vis didėja. Dėl mažos kainos ir pakankamai didelės perdavimo spartos *IEEE* 802.11 bevieliai įrenginiai yra labiausiai paplitę tarp namų vartotojų ir interneto paslaugų teikėjų. Tai nulėmė eksponentinį šios įrangos paplitimo didėjimą. Tačiau dėl didėjančios įrangos paklausos ir vis platesnio jos taikymo įvairiose srityse naudojamas nelicencijuotas *ISM* (angl. *Industrial Scientific and Medical Radio Bands*) spektro ruožas yra perpildytas, tai lėmė perdavimo spartos sumažėjimą ir ryšio stabilumo problemas. Siekiant spręsti įrenginių tarpusavio interferencijos problemą buvo atlikti tyrimai ir eksperimentai akademinėje aplinkoje bei privačiose įmonėse, gaminančiose *IEEE* 802.11 bevelius įrenginius. Kai kurių tyrimų metu problemą bandyta išspręsti jau egzistuojančio protokolo modifikacijomis, keičiant *MAC* (angl. *Media Access Control*) lygmens parametrus. Kiti tyrėjai keitė *IEEE* 802.11 protokolą savais metodais, tik iš dalies grindžiamais *IEEE* 802.11 gairėmis. Dauguma patobulinimų dėl pakeistų protokolo ypatumų tik dar labiau padidino interferencijos poveikį. Rinkoje pasirodęs naujasis *IEEE* 802.11ac protokolas pranoko egzistavusį ir beveik nekitusį *IEEE* 802.11 protokolą daugeliu naujovių.

Dėl naujame protokole padidintų moduliacijos galimybių ir patobulinto *CSMA/CA* fizinio kanalo prieigos algoritmo veikimo išaugo duomenų perdavimo sparta. Kartu su naujovėmis *IEEE* 802.11ac sudarė galimybes naudoti didesnius 80 MHz ir 160 MHz dažnių juostos plotčius. Pagal *IEEE* 802.11n protokolą jie tesiekia tik 20 MHz ir 40 MHz. Taigi padidėję dažnių juostos plotčiai dar labiau padidina jau dabar egzistuojančiuose įrenginiuose interferencijos poveikį.

Įrangai, veikiančiai nelicencijuotu *ISM* diapazonu, taikomos paprastos taisyklės. Jose vienintelis ribojimas – siųstuvo perdavimo galia, ji yra perdavimo spartos problemų diegiant ilgo nuotolio įrangą priežastis bei turi įtakos skvarbai uždaroje patalpose. Todėl, siekiant pagerinti duomenų perdavimo spartą *IEEE* 802.11 tinkluose, atsirado lankstesnių perdavimo galios taisyklių poreikis, tačiau, turint tikslą padidinti galią, dabar kuriami ir jau egzistuojantys įrenginiai turi gebėti efektyviau panaudoti turimus spektro išteklius pagal vieną iš galimų kognityviojo radijo koncepcijų. Tai galimybė pagerinti šios įrangos veikimą. Dėl didelio dinamiškumo spektre įprastiniai tiesiniai interferencijos sprendimo metodai dažnai nėra pakankami. Todėl sparčiai kintančiais aplinkai, kurioje veikia *IEEE* 802.11 įrenginiai, tikslinga taikyti žaidimų teorijos modelį. Galios ir perdavimo spartos kitimas plačiai nagrinėjamas kodi-

nio atskyrimo sistemose – *CDMA* (angl. *Code Division Multiple Access*), todėl atliktais šių tinklų tyrimais galima remtis tobulinant *IEEE 802.11* protokolo savybes – jas keičiant pagal žaidimų teorijos modelį (Zhiming, Jianying 2003; Jui Teng Wang 2002; Pal Singh *et al.* 2005; Deek *et al.* 2013; Popovic 2005).

Darbe aptariamas jungtinis *IEEE 802.11* protokolo galios ir perdavimo spartos modelis yra pagrįstas žaidimų teorija. Žaidimų teorijos pavyzdžiu galima įvertinti kiekvieno žaidėjo – *IEEE 802.11* įrenginio, poveikį vieno kitam, t. y. įvertinti skirtingų įrenginių sąsajas ir perdavimo spartos kitimą. Žaidimų teorija paremta galios paskirstymo ir perdavimo spartos modelis grįstas paplitusiomis *CDMA* tinklų koncepcijomis ir papildomais *IEEE 802.11* protokolo patobulinimais.

Naudojant žaidimų teorija pagrįstą modelį galima rasti galimybę padidinti *IEEE 802.11* tinklų perdavimo spartą ir iš dalies atsisakyti paplitusio *CSMA/CA* protokolo, ribojančio duomenų perdavimo spartą (Vindašius 2010).

### Žaidimų teorijos modelis

*IEEE 802.11* įrenginiai veikia greitai kintančiomis sąlygomis. Standartiniai analitiniai algoritmai neįvertina interferencijos poveikio įrenginiams, veikiantiems tuo pačiu dažniu. Todėl reikalinga interferencijos poveikio įvertinimo metodika. Taikydami kelias kognityviojo radijo koncepcijas realizuosime žaidimų teorijos modelį. Tai galimybė efektyviau panaudoti turimus spektro išteklius priklausomai nuo reikalaujamų perdavimo kokybės parametrų. Spektro išteklių paskirstymas tarp *IEEE 802.11* įrenginių vyks decentralizuotai, t. y. kiekvieno įrenginio veikimas turės įtakos kito *IEEE 802.11* įrenginio parametrų pasirinkimui be tiesioginės tarpusavio sąsajos.

Žaidimų teorijos modelis – tai sistema, sudaryta iš  $N$  žaidėjų, kurioje  $j$  žaidėjas yra viena *IEEE 802.11* įrenginių pora. Kiekvienas žaidėjas, remiantis *QoS* (angl. *Quality Of Service*) parametrais, bando didinti savąją perdavimo spartą. Žaidėjų sprendimai ar pasiekta pageidaujama perdavimo sparta priklauso nuo radijo aplinkos statistinių duomenų. Dėl šios priežasties kiekvienam žaidėjui priskiriamas veikos ciklo koeficientas (angl. *Duty Cycle*)  $d_j$ , kuris, remiantis reikiama perdavimo sparta, apibrėžia leidžiamosios siųstuvo galios ribas. Kiekvieno žaidėjo  $j$  signalo ir interferencijos triukšmo santykis *SINR* išreiškiamas taip (Zhiming, Jianying 2003):

$$\gamma_j = \frac{h_j p_j}{\sum_{i \neq j} h_{ij} d_i p_i + n_0}, \quad (1)$$

čia  $j$  – žaidėjo numeris;  $\gamma_j$  – signalo interferencijos ir triukš-

mo santykis;  $p_j$  – žaidėjo galia;  $h_j$  – antenos stiprinimas;  $p_i$  – kitų žaidimo žaidėjų *Tx* galia;  $n_0$  – aplinkos triukšmas;  $d_i$  – veikos ciklo koeficientas, rodantis, kokią laiko dalį žaidėjas  $i$  užima perdavimo kanale.  $d_i$  vertė kinta nuo 0 iki 1 ir priklauso nuo  $i$  žaidėjo duomenų srauto bei *QoS* reikalavimų.

Žaidėjo  $j$  perdavimo sparta nusakoma Šenono (*Shannon*) talpos formule:

$$C = B \log(1 + \gamma_j), \quad (2)$$

čia  $C$  – kanalo pralaida;  $B$  – dažnių juostos plotis;  $\gamma_j$  – signalo interferencijos ir triukšmo santykis.

Žaidėjo  $j$  perdavimo sparta apibrėžiama naudingumo funkcija, kuri nurodo ribą tarp pageidaujamos ir gautos pralaidos:

$$u_j = u_j(\tau), \quad (3)$$

čia  $\tau = r_j f(\gamma)$ ;  $r_j$  – duomenų perdavimo sparta;  $f(\gamma)$  – didėjanti *SINR* funkcija, pagrįsta perdavimo spartos parametru.

Didesnė duomenų perdavimo sparta pasiekama tik esant aukštesniam moduliacijos lygiui. Tam būtinas (21–28) dB *SINR*. Bendrai sistemos naudingumo funkcijai maksimizuoti (Medeisis *et al.* 2014) –

$$\max \sum_{j=1}^N u_j, \quad (4)$$

turi būti taikomi perdavimo galios reguliavimo apribojimai, kurie kiekvienam žaidėjui  $j$  apibrėžiami taip:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{\max} \\ p_j, r_j \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

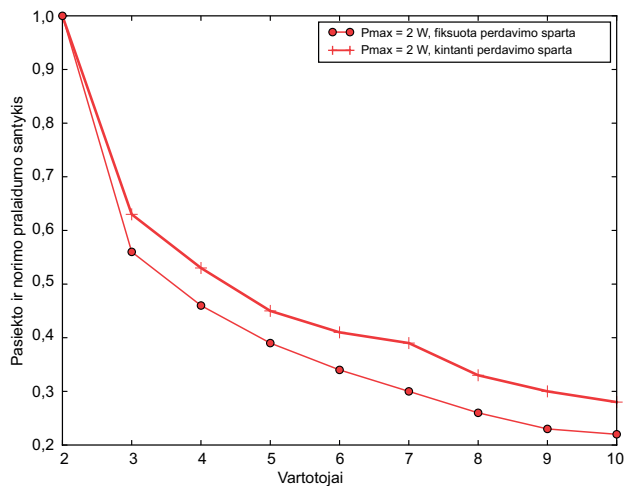
Sistema, sudaryta iš  $N$  žaidėjų, apibūdinama kaip jungtinė galios ir perdavimo spartos valdymo sistema. Tokioje sistemoje kiekvienas žaidėjas, remiantis pralaidumo reikalavimu  $r_j$  (Kazemi *et al.* 2011; Kazemi *et al.* 2012), turi priskirtą galios valdymo strategiją. Kiekvieno žaidėjo  $j$  naudingumo funkcija nusakoma taip:

$$u_j = \log(1 + \gamma_j), \quad (6)$$

čia žaidėjas  $j$  yra siųstuvo ir imtuvo pora. Remiantis perdavimo spartos reikalavimais, kiekvienas iš įrenginių turi pradinę *SINR* vertę, kuri apskaičiuojama pagal Šenono kanalo talpos formulę. Nustačius reikiamą *SINR* vertę, žaidėjo  $j$  galia nusakoma

$$P_j = p_j \left( 1 + \frac{SINR_{\text{target}} - SINR_{\text{current}}}{SINR_{\text{target}}} \right), \quad (7)$$

čia  $P_j$  yra siųstuvo *Tx* galia;  $p_j$  – dabar nustatyta įrenginio veikimo galia;  $SINR_{\text{target}}$  – numatyta *SINR* vertė, kuriai esant pasiekiamas norimas pralaidumas;  $SINR_{\text{current}}$  – dabartinė vertė, apskaičiuojama iš įrenginio registrų.



1 pav. 802.11 tinklo vartotojų pralaidumo patenkinimo charakteristika

Fig. 1. User satisfaction based on duty cycle modes

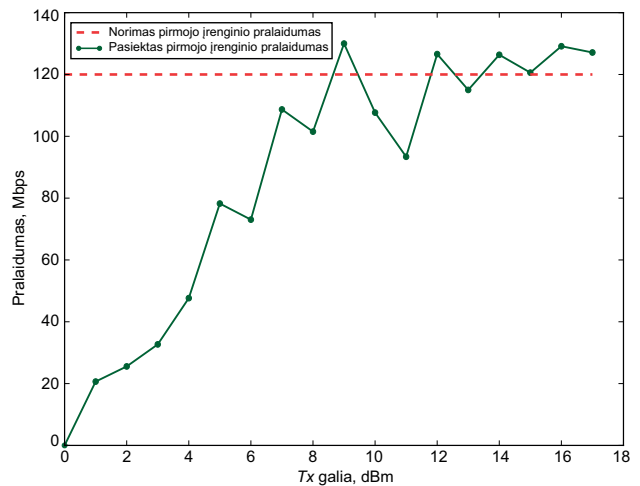
Algoritmo patikrai buvo sukurtas testavimo modelis, grįstas *python* programavimo kalba (Python... 2015). Siekiant modeliuoti gautų duomenų pralaidumo pasiskirstymą, esant fiksuotajai ir kintamai veikos ciklo  $d_i$  koeficiento vėrtėms, buvo modifikuotas simulatoriaus kodas.

1 pav. pateiktos charakteristikos apibūdina norimo ir pasiekto pralaidumo santykį augant vartotojų skaičiui. Iš šių charakteristikų matyti, kad, kai norima, perdavimo visiems žaidėjams sparta yra pastovi, vartotojų norimo ir pasiekto pralaidumo santykis mažėja greičiau, palyginti nei esant kintamai perdavimo spartai, kuri generuojama kiekvienam žaidėjui pagal tuo metu reikalaujamą perdavimo spartą.

### Eksperimentinis algoritmo tyrimas

Eksperimento metu algoritmas buvo įdiegtas standartinėje *IEEE 802.11n* 5 GHz įrangoje, kurioje galimas *CSMA/CA* mechanizmo išjungimas ir pritaikomas aptartasis žaidimų teorijos modelis. Eksperimentuojant naudotų įrenginių specifikacijos: *Ralink RT3662* lustų rinkinys, palaikantis 5 GHz diapazoną,  $T_x$  galia iki 30 dBm, kryptinės antenos 23 dBi, kanalo pločiai 20/40 MHz, *IEEE 802.11n/802.11a* ir modifikuoto *IEEE 802.11* protokolo standartai. Kadangi pagal modifikuotąjį protokolą galimas *CSMA/CA* mechanizmo išjungimas, matavimai eksperimento metu atliekami tiksliau.

Eksperimentas vyko lauko sąlygomis, jo metu tuo pačiu dažniu veikė ir kiti *IEEE 802.11* įrenginiai. Šiuo atveju veikimo dažnis buvo 5,5 GHz, o *CSMA/CA* apsaugos mechanizmas išjungtas. Atstumas tarp įrenginių 600 m. Pirmojo eksperimento metu buvo nustatyta, kad sukurto algoritmo siųstuvo galios didinimo žingsnis nėra pakankamas, todėl reikiamai siųstuvo  $T_x$  galiai pasiekti reikėjo didesnio skaičiaus iteracijų. Kadangi įrenginiai palaiko tik 1 dBm



2 pav. 802.11 pralaidumo grafikas

Fig 2. 802.11 throughput graph

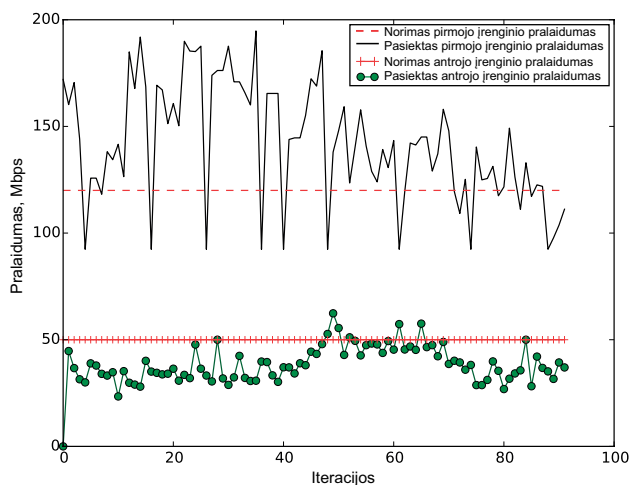
$T_x$  galios didinimo žingsnį, protokolas buvo modifikuotas pritaikant pagal testuojamos įrangos specifikacijas ir iš-tirtas pakartotinai. Eksperimento rezultatai pateikti 2 pav. Akivaizdu, kad, padidinus siųstuvo galios kitimo žingsnį, įrenginys geba pasiekti norimą perdavimo spartą.

Antro eksperimento metu lygiagrečiai su pirmąja įrenginių pora buvo instaliuota antroji *IEEE 802.11* įrenginių pora. Eksperimentuojant pastebėta, kad mažas atstumas tarp kartu veikiančių *IEEE* įrenginių poros aktyvina automatinį moduliacijos mechanizmą, šis reaguoja į interferencijos poveikį ir mažina perdavimo spartą. Išsiaiškinus, kad automatinis moduliacijos valdymo mechanizmas neleidžia tinkamai ištirti žaidimų teorijos modelio, kituose eksperimentuose šis mechanizmas buvo išjungtas.

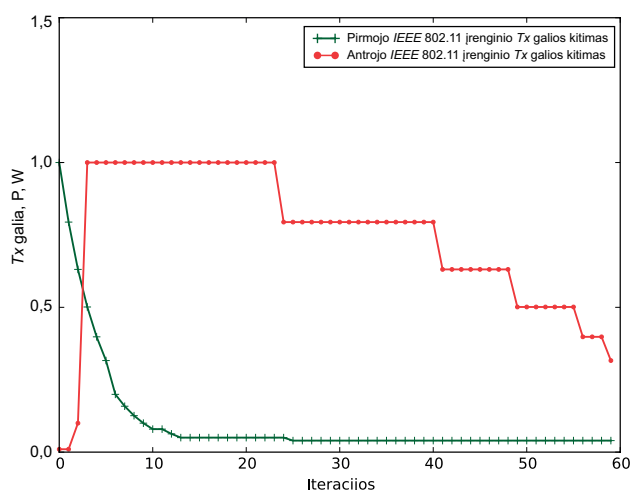
Testų metu pastebėta, jog *RSSI* (angl. *Received Signal Strength Indication*) pasiekus žemesnę vėrtę nei 66 dBm *PER* kiekis padidėja. Siekiant sumažinti *PER* buvo nustatyta minimali *SINR* vėrtė, kuri būtų pakankama 64 *QAM* moduliacijai. Minimalus *SINR*, esant 64 *QAM* moduliacijai, priklauso nuo interferencijos lygio ir yra (21–28) dB. Jei šios vėrtės mažesnės už nurodytas, įrenginių sparta mažėja.

Nustačius pralaidos parametrus algoritmo tyrimo testas buvo pakartotas. Pralaidumui matuoti buvo naudojamas *pktgen* paketų generatorius, kuris generuodavo kiekvienos įrenginių poros duomenis. Kaip matyti iš 3 pav., pralaidumo tikslai buvo pasiekti abiejose *IEEE 802.11* įrenginių porose, tačiau dėl interferencijos poveikio atsirado fluktuacijų.

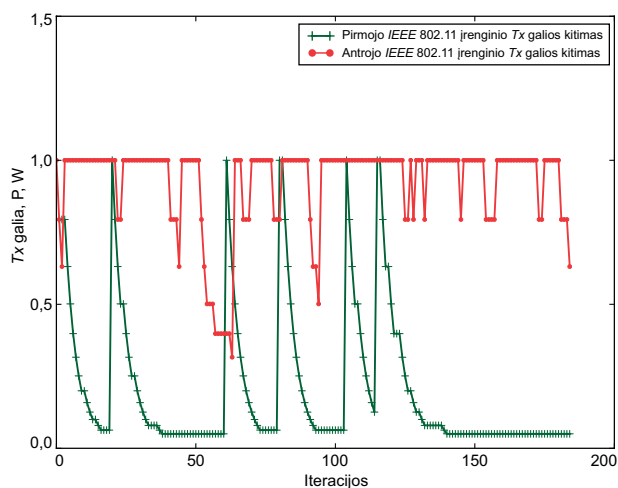
Antros įrenginių poros pasiekta 50 Mbps pralaidumas patvirtina, kad algoritmas realiuoju laiku keičia radijo įrangos parametrus pagal reikalaujamą duomenų perdavimo spartą. Atitinkamai 4 pav., esant skirtingiems perdavimo spartos tikslams, matome siųstuvo galios pasiskirstymą tarp dviejų įrenginių. Šiuo atveju įrenginio, kurio pralaidumą reikėjo padidinti, buvo nustatyta didesnė siųstuvo galia.



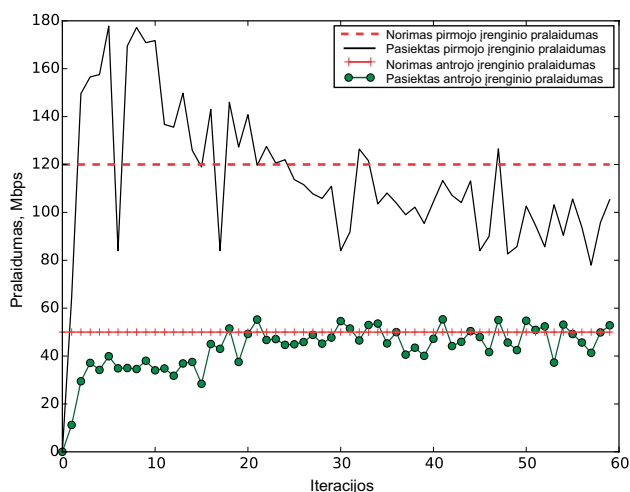
3 pav. Įrenginių pralaidumo pasiskirstymas per iteracijas  
Fig. 3. Device 1 and Device 2 target throughput over iterations graph



6 pav. Įrenginių Tx galios kitimas  
Fig. 6. Device 1 and Device 2 Tx power allocation



4 pav. Įrenginių Tx galios kitimas  
Fig. 4. Device 1 and Device 2 Tx power allocation



5 pav. Įrenginių pralaidumo pasiskirstymas per iteracijas  
Fig. 5. Device 1 and Device 2 target throughput over iterations graph

Algoritmas buvo panaudotas esant skirtingam kanalo užimtumui, kai aplinkoje padidėja interferencija iš kitų vartotojų esamos įrangos. Iš 5 pav. matyti, kad labai kintančioje radijo aplinkoje tik antroji įrenginių pora geba pasiekti norimą perdavimo spartą, o pirmoji įrenginių pora norimos perdavimo spartos reikalavimą atitinka tik matavimo pradžioje.

Pirmoji įrenginių pora testo metu pasiekė 180 Mbps duomenų pralaidumą, tačiau pradėjus veikti algoritmui, siekiant apriboti perdavimo spartą iki 120 Mbps, įrenginio siųstuvo galia buvo sumažinta (6 pav.). Antrosios įrenginių poros siųstuvo galia buvo padidinta, nes pradinė siųstuvo galia nebuvo pakankama 50 Mbps perdavimo spartai užtikrinti.

## Išvados

1. Žaidimų teorija pagrįstas galios ir duomenų pralaidumo valdymo modelis teikia galimybę 802.11 tinkluose keisti galios parametrus pagal nurodytus pralaidumo tikslus.
2. Žaidimų teorijos modelis leidžia naudotis lankstesne galios perdavimo schema, taip padidinamas 802.11 įrenginių veikimo nuotolis.
3. Keičiant siųstuvo galios parametrus realioju laiku ir įvedus įrenginių veikos ciklo koeficientą  $d_i$  galima garantuoti vienodą kanalo išteklių pasiskirstymą tarp IEEE 802.11 įrenginių, veikiančių tuo pačiu dažniu.
4. Nustatyta, kad algoritmas geba prisitaikyti prie aplinkoje jau veikiančių IEEE 802.11 įrenginių, kurie nėra žaidimo dalyviai, tačiau dėl interferencijos trukdžių atsiranda perdavimo spartos fluktuacijų.



## Literatūra

- Deek, L.; Garcia-Villegas, E.; Belding, E.; Sung-Ju Lee; Almeroth, K. 2013. Joint rate and channel width adaptation for 802.11 MIMO wireless networks, in *Proceedings of Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2013 10th Annual IEEE Communications Society Conference*, 24–27 June 2013, New Orleans, USA, 167–175. <http://dx.doi.org/10.1109/SAHCN.2013.6644975>
- Kazemi, R.; Vesilo, R.; Dutkiewicz, E.; Ren Liu. 2011. Dynamic power control in wireless body area networks using reinforcement learning with approximation, in *Proceedings of Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium*, 11–14 September 2011, Toronto, Canada, 2203–2208. <http://dx.doi.org/10.1109/PIMRC.2011.6139908>
- Kazemi, R.; Vesilo, R.; Dutkiewicz, E.; Ren Ping Liu. 2012. Reinforcement learning in power control games for internetwork interference mitigation in Wireless Body Area Networks, in *Proceedings of Communications and Information Technologies (ISCIT), 2012 International Symposium*, 2–5 October 2012, Gold Coast, Australia, 256–262. <http://dx.doi.org/10.1109/ISCIT.2012.6380902>
- Medeisis, A.; Sydor, J.; Cremene, L. C.; Holland, O.; Anskaitis, A.; Wiecek, D.; Haddad, Y.; Cuzanauskas, T. 2014. ISM-advanced: improved access rules for unlicensed spectrum, in *Proceedings of 7th IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2014*, 1–4 April 2014, McLean, VA, USA, 194–205. <http://dx.doi.org/10.1109/DySPAN.2014.6817796>
- Pal Singh, J. P.; Yan Li; Bambos, N. 2005. Channel state awareness based transmission power adaptation for efficient TCP dynamics in wireless networks communications, in *Proceedings of Communications 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference*, 16–20 May 2005, Seoul, Korea, 5: 3553–3559. <http://dx.doi.org/10.1109/ICC.2005.1495080>
- Popovic, B. M. 2005. General formula for transmit power rise in CDMA systems with fast power control, *Communications, IEEE Transactions* 53(8): 1248–1251. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2005.852821>
- Python language programme used for simulation of power control game* [online], [cited 5 March 2015]. Available from Internet: <http://www.cost-terra.org/our-publications>
- Vindašius, A. 2010. Tinklų modeliavimas ir emuliacijos NCTUNS aplinkoje, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(1): 73–76. <http://dx.doi.org/10.3846/mla.2010.016>
- Wang, J. T. 2002. Power adjustment and allocation for multimedia CDMA wireless networks, *Electronics Letters* 38(1): 54–55. <http://dx.doi.org/10.1049/el:20020020>
- Zhiming Yin; Jianying Xie. 2003. Joint power and rate allocation for the downlink in wireless CDMA data networks, in *Proceedings of 14th IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication*, 7–10 September 2003, Beijing, China, 1: 326–330. <http://dx.doi.org/10.1109/PIMRC.2003.1264287>

## APPLYING GAME THEORY IN 802.11 WIRELESS NETWORKS

T. Cuzanauskas, A. Anskaitis

### Abstract

IEEE 802.11 is one of the most popular wireless technologies in recent days. Due to easiness of adaption and relatively low cost the demand for IEEE 802.11 devices is increasing exponentially. IEEE works in two bands 2.4 GHz and 5 GHz, these bands are known as ISM band. The unlicensed bands are managed by authority which set simple rules to follow when using unlicensed bands, the rules includes requirements as maximum power, out-of-band emissions control as well as interference mitigation. However these rules became outdated as IEEE 802.11 technology is emerging and evolving in hours the rules aren't well suited for current capabilities of IEEE 802.11 devices. In this article we present game theory based algorithm for IEEE 802.11 wireless devices, we will show that by using game theory it's possible to achieve better usage of unlicensed spectrum as well as partially decline CSMA/CA. Finally by using this approach we might relax the currently applied maximum power rules for ISM bands, which enable IEEE 802.11 to work on longer distance and have better propagation characteristics.

**Keywords:** IEEE 802.11, WiFi, interference, cognitive radio, game theory.