

Uporaba teorije iger za optimizacijo delovanja brezžičnih omrežij

Erik Pertovt, Tomaž Javornik, Mihael Mohorčič

Institut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: erik.pertovt@ijs.si

Povzetek. Teorija iger je orodje za opis strateških situacij, kjer se interesi posameznih entitet križajo oziroma vplivajo na interese drugih entitet. Čedalje pogosteje se teorija iger uporablja tudi v kooperativnih in porazdeljenih brezžičnih omrežjih kot orodje za njihovo modeliranje, analizo in optimizacijo. V članku prikažemo glavne principe teorije iger in primernost njene uporabe kot orodja za optimizacijo v brezžičnih omrežjih. Najprej predstavimo osnovne pojme, koncepte in komponente teorije iger. Nato opišemo povezavo med principi v teoriji iger in principi v brezžičnih omrežjih, podamo glavne zahteve pri uporabi teorije iger v brezžičnih omrežjih ter predstavimo uporabo teorije iger v brezžičnih omrežjih. Kot primer uporabe teorije iger v brezžičnih omrežjih razvijemo model potencialne igre za optimizacijo nastavitve oddajne moči porazdeljenih oddajnikov v relejnem brezžičnem omrežju zbirnih vozlišč brezžičnih senzorskih omrežij, s pomočjo katerega določimo Pareto učinkovito Nashevo ravnovesje, ki je optimalno stabilna točka delovanja omrežja.

Ključne besede: teorija iger, brezžična omrežja, relejno omrežje, potencialne igre, optimizacija

Game Theory for Performance Optimisation in Wireless Networks

Game theory has been recently introduced in wireless networking as a powerful modeling and analysing tool for competitive and completely distributed environments. It is a well-suited tool to describe mutual possibly conflicting situations of multiple devices which attempt to wirelessly communicate through the shared medium. In order to demonstrate the suitability of game-theoretic approach for the optimisation in wireless networks we first present the main ideas, concepts and components of game theory. We then provide the mapping of principles between the areas of game theory and wireless networks, and present some possible applications of game theory in wireless networks. Using the category of potential games we develop and implement a model for transmit power control optimisation in a wireless relay network consisting of wireless sensor network coordinator nodes, and determine the Pareto efficient Nash equilibrium, which represents the optimal stable operating point of the network.

1 UVOD

Brezžična komunikacijska omrežja postajajo čedalje obsežnejša in bolj kompleksna, zato optimizacija delovanja in upravljanje s klasičnimi determinističnimi metodami ni več mogoče. V ta namen se poleg heurističnih metod čedalje pogosteje uporablja tudi *teorija iger* [1] kot posebno področje uporabne matematike.

Teorija iger je orodje, s katerim modeliramo situacije, v katerih je uspeh odločitve entitete odvisen

od odločitev drugih entitet v sistemu. Uporablja se tam primerih, kjer se interesi ene entitete ali skupine entitet križajo ali vplivajo na interese drugih entitet. Vsakemu križanju interesov pravimo *konfliktna situacija* [2] in pomeni konflikt med posameznimi entitetami v sistemu. Obnašanje posameznikov v takšni situaciji je opisano s pomočjo *matematičnega modela*, pri katerem se oblikujejo *pravila igre*. Pri tem predvidevamo, da se udeleženci igre obnašajo *racionalno* [3]. To pomeni, da se igralec vedno odloča za poteze, ki mu prinašajo največjo korist, z upoštevanjem mogočih potez drugih udeležencev in zunanjih okoliščin.

Ker je teorija iger orodje za modeliranje situacij, v katerih nosilci odločanja pri sprejemanju odločitev medsebojno vplivajo drug na drugega, je primerna tudi za uporabo v brezžičnih komunikacijskih sistemih. V zadnjih zaradi souporabe radijskega kanala pride do medsebojnega vpliva med posameznimi napravami. S pomočjo teorije iger je v tem primeru mogoče postaviti omrežje v stabilno točko obratovanja, kjer vozlišča omrežja izvedejo svoje samostojne optimalne prilagoditve.

Namen tega prispevka je prikazati teorijo iger kot orodje za optimizacijo uporabe radijskih virov v brezžičnih omrežjih, ob tem pa predstaviti osnovne pojme, s katerimi se srečamo pri delu s teorijo iger. Opisana je uporaba teorije iger v brezžičnih omrežjih, kjer so različnim komponentam teorije iger pripisane ustrezne komponente brezžičnih omrežij. Prav tako je opisana povezava med principi v teoriji iger in principi

v brezžičnih omrežjih. Za kategorijo potencialnih iger, ki je še posebej primerna za uporabo v brezžičnih omrežjih, je razvit model za optimizacijo porazdeljene nastavitve oddajnih moči vozlišč v relejnem brezžičnem omrežju zbirnih vozlišč brezžičnih senzorskih omrežij.

2 OSNOVNI KONCEPTI TEORIJE IGER

Igre, katerih izid je razen od naključja odvisen tudi od spretnosti in strategije igralcev, imenujemo *strateške igre* [4]. Z njimi se ukvarja teorija iger. *Igra* je zbirka pravil in dogovorov, po katerih se ravnajo njeni udeleženci. Igro opišemo s pomočjo treh komponent: z množico igralcev, z množico strategij/akcij za vsakega igralca in z množico preferenc glede mogočih izidov igre.

Udeleženci igre so *igralci*, ki izbirajo med svojimi *akcijami* v vsaki *fazi* igre. Izbire igralcev vselej vplivajo na *izid* igre vsakega od igralcev in s tem pomenijo medsebojno interakcijo med vsemi igralci. Vsaki igračevi izbiri posamezne akcije pravimo *poteza*. *Strategija* igralca je zbirka pravil, ki opisuje, katere akcije mora igralec izbrati v vsakem trenutku ali fazi igre, v skladu: (i) s pravili (omejitvami) igre; (ii) z vsemi možnostmi, ki se lahko pokažejo v igri; (iii) s prejšnjimi potezami preostalih igralcev; (iv) z informacijami, ki postanejo dostopne med igro; (v) s preferencami igralca glede izidov igre. Preferenca igralca je predstavljena kot *donos*, ki ga igralec dobi pri posameznem izidu igre. Donosi ovrednotijo željnost posameznih izidov igre s strani igralcev. Večji donosi so bolj zaželeni kot manjši.

2.1 Predstavitev iger

Igro lahko podamo v različnih oblikah, pri čemer so za obravnavo različnih iger primerne različne oblike [5], kot so normalna, ekstenzivna, koalicijska itd. V nadaljevanju je podrobneje predstavljena normalna oblika zapisa igre, ki se uporablja tudi pri potencialnih igrah, katerih primer predstavljamo v zadnjem delu članka.

Igra je po navadi podana v normalni obliki, ko ima vsak od igralcev le eno potezo in nobene informacije o že izvedenih potezah preostalih igralcev, saj igralci izbirajo akcije sočasno. Strategija igralca je izbira akcije a in jo imenujemo *čista strategija* s . Izbrane akcije vseh igralcev pomenijo izid igre.

Igra v *normalni obliki* je podana kot $\Gamma = \langle N, A, U \rangle$, kjer je $N = \{1, 2, \dots, n\}$ množica n igralcev, $A = \times_{i \in N} A_i$ je *akcijski prostor* (tj. množica vseh akcijskih profilov vseh igralcev) in $U = \{u_i\}$ je *niz funkcij donosov* oz. *koristnosti* vseh igralcev. $A_i = \{a_i\}$ je končna množica *akcij* igralca i , u_i pa je *funkcija koristnosti* oz. *donosov* igralca i .

Profil *akcij* $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ je vektor akcij, kjer vsak element vektorja pomeni eno akcijo vsakega od igralcev. Profil akcij, ki so ga izbrali igralci v igri, imenujemo *izid* igre. Pogosto se uporablja zapis

$\mathbf{a} = (a_i, a_{-i})$, kjer je a_i izbrana akcija igralca i , a_{-i} pa so izbrane akcije preostalih igralcev. Funkcije koristnosti oz. donosov so funkcije različnih profilov akcij in opisujejo preference igralcev glede profilov akcij. Koristnost je pogosto kriterij za določanje donosa. Donose oz. koristnosti igralcev pri določenem izidu igre, označene z $\mathbf{u} = (u_1(\mathbf{a}), u_2(\mathbf{a}), \dots, u_n(\mathbf{a}))$, imenujemo *profil donosov* oz. *koristnosti*. Cilj igre je po navadi maksimirati donose oz. koristnosti igralcev.

V tabeli 1 je prikazana igra z dvema igralcema $N = \{1, 2\}$, označenima z I_1 in I_2 , v kateri ima vsak od igralcev po dve izbiri $(a_x(1), a_x(2))$. I_1 izbira vrstico, I_2 pa stolpec. Koristnosti igralca I_1 so predstavljene z u_{1x} , koristnosti igralca I_2 pa z u_{2x} . Tako pri profilu akcij $\mathbf{a} = (a_1, a_2) = (a_1(1), a_2(2))$ dobimo profil koristnosti $\mathbf{u} = (u_1(\mathbf{a}), u_2(\mathbf{a})) = (u_{12}, u_{22}) = (0, 3)$.

Tabela 1: Igra z dvema igralcema v strateški obliki

$I_2 \backslash I_1$	$a_2(1)$	$a_2(2)$
$a_1(1)$	$u_{11} = 2, u_{21} = 2$	$u_{12} = 0, u_{22} = 3$
$a_1(2)$	$u_{13} = 3, u_{23} = 0$	$u_{14} = 1, u_{24} = 1$

2.2 Tipi iger

Igre glede na različne lastnosti delimo v različne tipe. V nadaljevanju so na kratko predstavljeni nekateri osnovni tipi iger.

2.2.1 Kooperativne in nekooperativne igre

V kooperativnih igrah lahko igralci med seboj sodelujejo, medtem ko v nekooperativnih ne morejo.

2.2.2 Igre s popolno in nepopolno informacijo

Pri igrah s popolno informacijo igralci poznajo vse igralce, množice akcij igralcev in vse mogoče funkcije donosov in koristnosti igralcev. Vse druge igre spadajo med igre z nepopolno informacijo.

2.2.3 Statične ali strateške igre

Statične igre ustrezajo opisu iz poglavja 2.1. Ko igralec vedno izbira isto akcijo oz. čisto strategijo, pravimo, da igra čisto strategijo. Če pa igralec izbira različne akcije oz. čiste strategije z različnimi verjetnostmi, pravimo, da igra *mešano strategijo*. Mešano strategijo za igralca i označujemo z $\sigma_i \in \sigma(A_i)$, kjer je $\sigma_i(a_i)$ verjetnost izbire akcije a_i pri igranju σ_i , ter $\sum_{a_i \in A_i} \sigma_i(a_i) = 1$ in $\sigma_i(a_i) \geq 0$. Profil σ je *profil mešanih strategij* vseh igralcev. V primeru $\sigma_i(a_i) = 0$ za vse akcije a_i razen ene dobimo čisto strategijo.

2.2.4 Dinamične ali ekstenzivne ali sekvenčne igre

Pri dinamičnih igrah ima vsaj eden od igralcev več kot eno potezo in nekaj informacije o izvedenih potezah preostalih igralcev. Igralci akcij ne izbirajo sočasno, temveč sekvenčno, in poznajo akcije, ki so jih že izbrali drugi igralci. Zaporedje potez je tukaj zelo pomembno.

Igralec v določeni fazi igre izbere akcijo glede na svojo prejšnjo izbiro in izbiro drugih igralcev v predhodnih fazah igre, tj. glede na njegovo trenutno *pozicijo* v igri. Strategija igralca v takšni igri je zbirka pravil, ki opisuje, katere akcije mora igralec izbrati.

2.2.5 Igre s ponavljanjem

Igre s ponavljanjem so razred dinamičnih iger, pri katerih je ista odločitev igralcev izvedena večkrat zapovrstjo ob določenih intervalih.

2.2.6 Potencialne igre

Potencialna igra [6] je igra v normalni obliki, ki ima za funkcijo koristnosti *potencialno funkcijo*. Ta izraža spremembo v koristnosti, ki jo povzroči vsak od igralcev, ko enostransko spremeni svojo strategijo. Potencialne igre so zanimive, ker lahko z eno funkcijo predstavimo koristnosti in obnašanje vseh igralcev.

Predvsem so zanimivi primeri, ko se uporabljajo sebične strategije, saj imajo potencialne igre posebno lastnost, da pod vsemi sebičnimi strategijami zagotovo vodijo k Nashevemu ravnovesju [7] (opisanemu v poglavju 2.3), katerega praviloma dosegajo pri nekaterih lokalnih optimumih. Razred pogosto obravnavanih potencialnih iger so ordinalne potencialne igre [6].

Igra v normalni obliki, $\Gamma = \langle N, A, U \rangle$, je *ordinalna potencialna igra*, če obstaja funkcija $P: A \rightarrow \mathbb{R}$ (kjer \mathbb{R} pomeni realna števila), da velja $u_i(a_i, a_{-i}) - u_i(a'_i, a_{-i}) > 0 \Leftrightarrow P(a_i, a_{-i}) - P(a'_i, a_{-i}) > 0$, za vse $i \in N$, vse $a_{-i} \in A_{-i}$, ter vse $a_i, a'_i \in A_i$. To pomeni, da potencialna funkcija naraste (pade), če igralec pridobi večji (manjši) donos pri enostranski zamenjavi strategije. Zgornji algoritem ne zahteva, da je igra končna, kar je še ena dobra lastnost teh iger.

Poleg zgoraj naštetih se uporabljajo še drugi tipi iger, kot so: koalicijske, stohastične, kombinatorne, Bayesove, diferencialne, evolucijske, igre s pogajanjem itd.

2.3 Nashevo ravnovesje in učinkovitost Pareto

V teoriji iger obstajajo različni koncepti, ki določajo, katere strategije ali akcije naj igralci izberejo, da bodo uspešno končali igro. Koncept *najboljšega odgovora* igralca definira akcijo igralca a_i^* kot najboljši odgovor na akcije a_{-i} , ki so jih izbrali drugi igralci, če le-ta maksimira njegov donos oz. koristnost: $u_i(a_i^*, a_{-i}) \geq u_i(a'_i, a_{-i}) \forall a'_i \neq a_i^*$. Če za vsakega igralca i velja: $u_i(a_i^*, a_{-i}^*) \geq u_i(a'_i, a_{-i}^*) \forall a'_i$, potem profil akcij \mathbf{a}^* pomeni *Nashevo ravnovesje* (NR). To pomeni, da ne more noben igralec povečati svojega donosa tako, da bi enostransko spremenil svojo akcijo. Zato ni razloga, da bi igralec odstopil od svoje izbire, ob predpostavki, da tudi preostali igralci ne bodo odstopili od svojih.

Igra ima lahko več NR-jev. Prav tako ni zagotovljeno, da ustreza vsako NR zelenemu izidu igre. Zato obstajajo različne metode za določanje učinkovitosti profilov akcij. Ena teh je tudi učinkovitost

Pareto. Profil akcij \mathbf{a}^* je *Pareto učinkovit* (PU), če ne obstaja izid igre oziroma profil akcij \mathbf{a}' , ki bi pomenil za vse igralce vsaj enako dobro stanje ter bi vsaj enemu izmed igralcev izboljšal stanje, torej če velja $u_i(\mathbf{a}') \geq u_i(\mathbf{a}^*) \forall a'_i$. Pravimo, da je \mathbf{a}^* Pareto učinkovito Nashevo ravnovesje (PUNR).

Pri tabeli 1 pogojem za NR ustreza profil akcij $(a_1(1), a_2(2))$, pri katerem oba igralca dosežeta donos ena.

3 TEORIJA IGER V BREŽIČNIH OMREŽJIH

V brezžičnih omrežjih je frekvenčni spekter omejen prenosni vir, ki si ga delijo naprave znotraj omrežja. Z učinkovito uporabo tega vira je posredno ali neposredno povezanih veliko drugih virov in obratovalnih parametrov teh omrežij, prav tako potrebnih za uspešno komuniciranje. Med te spadajo moč oddajanja, pasovna širina, čas oddajanja, energija vozlišč itd. Teorija iger se uporablja kot eno mogočih orodij za optimizacijo rabe teh virov in parametrov, povezanih z viri v takšnem porazdeljenem brezžičnem sistemu.

3.1 Povezava med teorijo iger in brezžičnimi omrežji

Za uporabo teorije iger v brezžičnih omrežjih je treba pripisati različnim komponentam teorije iger ustrezne komponente brezžičnih omrežij. Igralce v brezžičnih omrežjih pomenijo posamezna vozlišča omrežja, operaterji, uporabniki itd. Akcija ali strategija je izbira ali odločitev igralca in se nanaša na dodelitev razpoložljivih virov (moči, spektra, pasovne širine) znotraj igre, kot so npr. nastavitev oddajne moči signala na vozliščih, odločanje, ali dostopati do prenosnega medija ali ne, itd. Funkcija koristnosti je funkcija, ki je določena za potrebe specifične aplikacije in pomeni metriko za določanje kakovosti delovanja omrežja ali storitev. Na podlagi zadnje se odločamo pri izbiri posamezne strategije oz. akcije. Funkcija koristnosti stremi k izboljšanju različnih omrežnih kriterijev, kot so npr. SINR, podatkovni pretok, izraba pasovne širine itd., ocena njene koristnosti pa se opravi s pomočjo donosa. Ocena temelji na metrikah kakovosti storitev.

Pri apliciranju teorije iger v brezžična omrežja je glavni izziv modeliranje ustrezne igre z upoštevanjem številnih omejitev brezžičnih omrežij. Temu pravimo *parametrizacija igre*. Pri uporabi teorije iger je treba upoštevati, da ni vsak optimizacijski problem že igra; za modeliranje igre je treba imeti več vozlišč, ki so vključena v odločanje. Igralce, akcije in cilje je treba določiti izjemno previdno. Izbira funkcije koristnosti oz. donosa je ključnega pomena in najbrž najtežji del parametrizacije. Z njimi je mogoče analizirati, kako spremembe strategij igralcev vplivajo na delovanje posameznega igralca ali sistema kot celote. Če je cilj igralcev maksimirati učinkovitost delovanja sistema, mora biti funkcija koristnosti določena tako, da sistem konvergira k optimalnim razmeram delovanja omrežja v

skladu z določenimi cilji. Na primer, kako pomembno je za uporabnika poslati paket, je odvisno od tega, ali vsebuje ključno informacijo ali ne. S takšnimi in podobnimi problemi se ukvarja *mehanizem oblikovanja* [8].

Komunikacijska vozlišča imajo načeloma omejeno količino energije. Pri teoriji iger v brezžičnih omrežjih pomeni v tem primeru poraba energije *ceno (strošek)* za igralca. Pri izbiri določene strategije se vozlišča odločajo glede na višino cene, ki jo morajo plačati. *Ceno* pomeni tudi zakasnitev ali porabljen pasovna širina itd. Pri modeliranju igre je treba prilagoditi uporabo omejenih virov ceni, čemur pravimo *cenitev*, in je odločilen faktor v funkciji koristnosti. To je izziv, saj morajo imeti npr. naprave s skoraj praznimi baterijami drugačen način vrednotenja cene kot naprave s polnimi baterijami, kar pa je mogoče le s spremenljivo mero cene. Različne sheme cenitev se uporabljajo za spodbujanje sodelovanja med vozlišči in preprečevanje sebičnega obnašanja vozlišč. Sebična vozlišča, ki nočejo sodelovati z drugimi vozlišči, namreč vodijo do neoptimalnega ravnovesja. Takšne sheme cenitev se imenujejo *mehanizmi spodbujanja* [9]. Obstajajo tudi drugi tipi spodbujevalnih mehanizmov, ki se na splošno delijo v dve kategoriji. Prva so *mehanizmi na podlagi izmenjave kreditov*, ki temeljijo na (i) nagrajevanju vozlišč s kreditom pri sodelovanju z drugimi vozlišči ter (ii) zaračunavanju kreditov pri povpraševanju po storitvah drugih vozlišč. Druga kategorija pa so *mehanizmi na osnovi ugleda*, ki temeljijo na (i) dajanju pozitivnega mnenja vozliščem pri sodelovanju z drugimi vozlišči in (ii) dajanju negativnega mnenja vozliščem, ki se obnašajo sebično, z namenom, da jih lahko sčasoma izvezemo iz omrežja.

Predpostavka o *racionalnosti* igralcev ni primerna za vsako situacijo, saj ta ne vodi vedno do optimalnega stabilnega stanja. To upoštevajo tudi tehnike mehanizmov spodbujanja in pomagajo pri doseganju le-tega. Prav tako tudi ni mogoče predpostaviti neskončnosti in popolne informacije znotraj igre v primerih, ko je treba upoštevati *dinamičnost* brezžičnih omrežij, npr. dinamičnost prenosnega medija, ki vnaša določeno popačenje med opazovane akcije s strani vozlišč. Pri predpostavki o popolni informaciji se lahko zgodi, da se določeno vozlišče moti, ko označi drugo vozlišče za sebično, saj je lahko takšen sklep posledica nepredvidljivega spreminjanja radijskega kanala pri brezžični komunikaciji. Prav tako je v nekaterih primerih pomembno, da se določeno vozlišče zaveda dejstva, da bo izključeno ali celo odstranjeno: interakcija z drugim igralcem se bo prekinila. V takem primeru, npr., možnost poslati paket takoj in ne šele pozneje, je izjemno pomembno in predpostavka o neskončnosti ni primerna. V takšnih primerih je treba v igro vpeljati *vidik končnosti* in *nepopolnosti informacije*.

Teorija iger se lahko uporabi za optimizacijo učinkovitosti na *ravni vozlišča* in tudi na *omrežni ravni* [10]. Z upoštevanjem tega se uporabijo različne

kooperativne in *nekooperativne* sheme tako za maksimiranje donosa vozlišč kot tudi omrežja kot celote. Zaradi narave brezžičnih omrežij, v katerih si morajo vozlišča deliti omejene skupne vire na porazdeljen način, veljajo nekooperativne sheme za obetavnejše od kooperativnih. Pogosto pa se izkaže, da sodelovanje med vozlišči prinaša boljše rezultate in je nenadomestljivo. To pa zahteva izmenjavo nujno potrebnih informacij med vozlišči za sodelovanje med njimi (signalizacija in sporazumi). Po zgledu iz socialnih omrežij govorimo o *pogajanjih* in *ustvarjanju koalicij*. Mogoče je kombinirati obe vrsti optimizacije, in sicer na ravni vozlišča in omrežja, pri čemer pa moramo biti izjemno previdni, kakšno kombinacijo shem tvoriti.

Pogosto vključuje optimizacijski proces več kot samo eno plast OSI-arhitekture in so potrebne različne medplastne tehnike načrtovanja in optimizacije. S pomočjo kombinacije različnih pristopov teorije iger na različnih plasteh v brezžičnih omrežjih in primerno izbranega akcijskega prostora v teoriji iger lahko v tem primeru izvedemo *medplastno optimizacijo* [11].

V prihodnosti pričakujemo, da bodo vozlišča avtonomni agenti in bodo sama sprejemala določene odločitve, kot so npr. zamenjava modulacijske sheme signala, neodvisno od porazdeljenega protokola, ki se bo izvajal na samih vozliščih. Tudi v tem primeru je lahko teorija iger uporabljena v optimizacijske namene takšnega obnašanja vozlišč.

3.2 Uporaba teorije iger v brezžičnih omrežjih

Brezžična omrežja prihodnjih generacij naj bi bila porazdeljena, samoorganizirajoča, dinamična omrežja, ki bodo za svoje izvajanje potrebovala različne mehanizme odločanja in optimizacijske tehnike, med katerimi bo zagotovo tudi teorija iger. S tem namenom so v nadaljevanju predstavljene nekatere uporabe teorije iger, ki jih že danes zasledimo v literaturi kot predmet raziskav različnih avtorjev.

3.2.1 Brezžična ad hoc/senzorska omrežja

V brezžičnih ad hoc omrežjih in brezžičnih senzorskih omrežjih je največji problem omejena količina energije vozlišč. Teorija iger se v tem primeru uporabi za optimizacijo porabe energije vozlišč.

Na plasti MAC je teorija iger uporabljena za izvajanje ALOHA in CSMA/CA protokolov dostopa do kanala.

Pri usmerjanju v več etapah morajo vozlišča posredovati pakete drugih vozlišč, zato morajo pri tem sodelovati med seboj. Teorija iger se uporabi kot orodje za odločanje vozlišč o sodelovanju pri posredovanju paketov in za osamitev/odstranitev sebičnih vozlišč, ki nočejo sodelovati pri posredovanju paketov, iz omrežja.

Usmerjanje prometa v brezžičnih ad hoc/senzorskih omrežjih je drugačno od usmerjanja prometa v navadnih omrežjih. Ker so vozlišča naprave z omejeno količino energije in ker je vloga vsakega vozlišča izjemnega pomena, je poraba energije najpomembnejši dejavnik

pri načrtovanju usmerjevalnih protokolov. Na podlagi količine energije vozlišč in koristi vozlišč od usmerjanja se s pomočjo teorije iger modelira igra, v kateri se odloča o usmerjanju prometa v omrežju.

3.2.2 Radijska dostopovna/celična omrežja

Nadzor nad močjo oddajanja je v brezžičnih omrežjih nujen za omejevanje interference med različnimi uporabniki. V tem primeru s pomočjo teorije iger oblikujemo igro, ki se uporabi za minimizacijo/dodeljevanje/zaračunavanje oddajnih moči vozlišč v OFDM in CDMA sistemih radijskih dostopovnih/celičnih omrežij.

V sistemih MIMO s pomočjo teorije iger opišemo in nadziramo so-kanalno interferenco različnih povezav glede na razmerje podatkovne prenosne hitrosti in potrebne oddajne moči.

Teorijo iger lahko prav tako uporabimo za krmiljenje dopuščanja zveze v različnih situacijah, kot so npr. doseganje zahtevane kakovosti storitve, izbira omrežnega operaterja, preprečevanje/izogibanje zamašitev, učinkovita izraba omejene pasovne širine itd.

Izbor celice oziroma najprimernejše bazne postaje je proces, ki zagotavlja storitve mobilnemu terminalu. Optimalen izbor lahko dosežemo tudi s pomočjo teorije iger.

3.2.3 Transportna/hrbtenična omrežja

Pri teh omrežjih je še posebej pomembna zmogljivost omrežja. V tem primeru je mogoče teorijo iger uporabiti za maksimiranje pretoka prometa. Prav tako lahko teorijo iger uporabimo za izbor najzanesljivejše poti za pretok/prenos prometa skozi brezžično zaledno omrežje.

3.2.4 Kognitivna (radijska) omrežja

Koncept kognitivnih komunikacij temelji na predpostavki, da se naprave zavedajo svoje okolice in temu ustrezno prilagajajo svoje obratovalne parametre. Koncept se uvaja v omrežja prihodnjih generacij na različnih segmentih, od posameznih naprav do dostopovnih in tudi transportnih omrežij, dejanska implementacija s strani različnih raziskovalnih skupin pa pogosto temelji prav na uporabi teorije iger.

Teorija iger se v kognitivnih radijskih omrežjih uporablja pri dinamičnem dodeljevanju frekvenčnega spektra sekundarnim uporabnikom, souporabi skupnega frekvenčnega spektra, nastavljanju oddajnih moči ali celo spreminjanju prenosnih parametrov in karakteristik, kot so npr. modulacija, tip kodiranja itd.

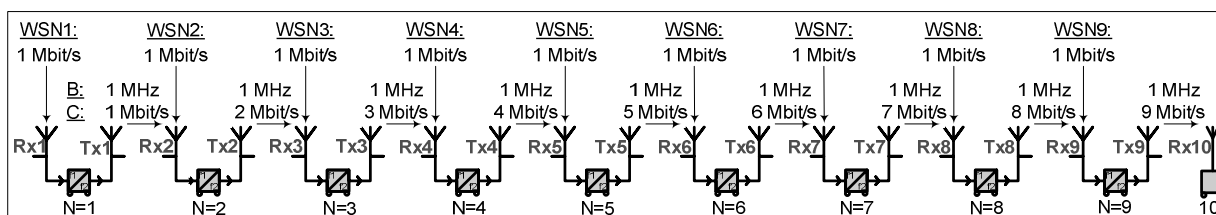
4 UPORABA POTENCIALNE IGRE ZA PORAZDELJENO NASTAVITEV ODDAJNIH MOČI

Pri inženirskih aplikacijah, med katere spada tudi optimizacija uporabe radijskih virov v brezžičnih omrežjih, se pogosto uporabljajo potencialne igre [12]. V nadaljevanju je predstavljen primer modela ordinalne potencialne igre s sebičnimi strategijami.

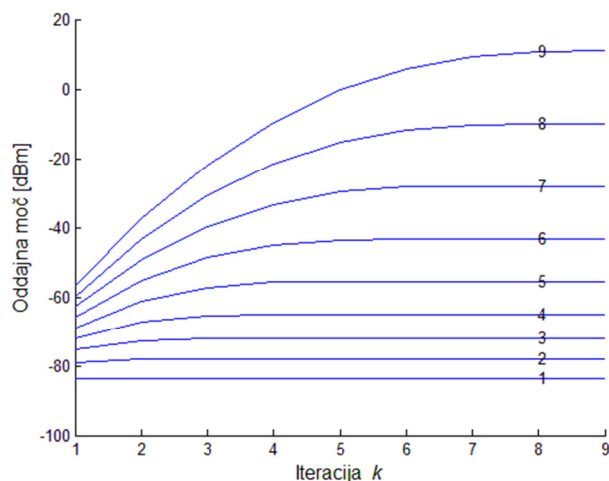
4.1 Krmiljenje oddajnih moči v relejnem brezžičnem omrežju

Uporabo modela ordinalne potencialne igre bomo pokazali na primeru krmiljenja oddajnih moči oddajnikov v relejnem (posredovalnem) brezžičnem omrežju, prikazanem na sliki 1. Vsako relejno vozlišče je hkrati zbirno vozlišče brezžičnega senzorskega omrežja v svoji bližini.

Po zgledu iz [7] smo v okolju Matlab modelirali potencialno igro $\Gamma = \langle N, A, U \rangle$. Relejni oddajniki/sprejemniki (Rx/Tx) $N = \{1, 2, \dots, 9\}$ v verigi posredujejo promet od $N = 1$ preko $N = 2$ vse do $N = 9$. Slednji posreduje promet do končnega sprejemnika (označen z 10), ki je prehodno vozlišče in v tem primeru ni igralec. A so oddajne moči oddajnikov, ki jih nastavljamo pri optimizaciji. U so potencialne funkcije igralcev. Vozlišča so med seboj oddaljena en kilometer. Ker so relejna vozlišča N hkrati tudi zbirna vozlišča brezžičnih senzorskih omrežij (WSN), se promet proti prehodnemu vozlišču povečuje. To pomeni, da relejna vozlišča, ki so bliže prehodnemu vozlišču, potrebujejo večje razmerje signal šum (S/N). Pasovna širina posameznih povezav med vozlišči znaša $B = 1 \text{ MHz}$. Za prometno obremenitev iz posameznih WSN smo privzeli 1 Mbit/s . Slika 2 prikazuje nastavljanje posameznih oddajnih moči vozlišč (označena na sliki s številkami od 1 do 9) prek več iteracij pri pritočni obremenitvi posameznih WSN 1 Mbit/s , ki zahteva zmogljivosti posameznih povezav $C = 1/2/3/4/5/6/7/8/9 \text{ Mbit/s}$. Potencialne funkcije igralcev odražajo minimalno zahtevano moč oddajanja posameznih oddajnikov, ki je potrebna za (i) premagovanje izgub poti, termičnega šuma in interference, ki jo povzročajo drugi oddajniki, in (ii) zadovoljevanje zahtevanega razmerja S/N . Pri tem predpostavimo, da imamo »idealno« usmerjene sprejemne antene tako, da oddajniki povzročajo interferenco samo na sprejemnikih, ki jim sledijo v verigi proti prehodnemu vozlišču. Oddajniki nastavljajo moči enostransko, brez poznavanja oddajnih moči



Slika 1: Krmiljenje oddajnih moči v relejnem brezžičnem omrežju s pomočjo potencialne igre



Slika 2: Moči na oddajnikih v posameznih iteracijah

drugih oddajnikov. To pomeni, da se ne ozirajo na strategije preostalih, kar ustreza definiciji sebičnih strategij. Moči oddajnikov so na začetku nastavljene na nič, nato pa se prek iteracij povečujejo v skladu z vplivom interferenc preostalih oddajnikov v verigi. Če moči na oddajnikih še ne dosežajo zelenih pogojev omrežja, je koristnost oddajnika, ki jo odraža potencialna funkcija oddajnika, negativna. Ko doseže koristnost vsakega vozlišča vrednost nič, se postavi omrežje v stabilno točko in oddajne moči vseh oddajnikov so optimalno nastavljene. Iz slike 2 vidimo, da doseže omrežje stabilno točko po devetih iteracijah nastavljanja moči oddajnikov, ki pomenijo PUNR [7]. Devet iteracij je potrebnih zaradi prilagajanja oddajnih moči premagovanju povečujočih se interferenc vseh oddajnikov, ki sledijo določenemu oddajniku v verigi.

5 SKLEP

V članku smo predstavili osnovne pojme in lastnosti teorije iger, ki smo jih v nadaljevanju razširili na uporabo teorije iger v brezžičnih omrežjih. Posebno kategorijo teorije iger, t.i. potencialne igre, smo uporabili pri zasnovi modela za porazdeljeno nastavitve oddajnih moči vozlišč v brezžičnem relejnem omrežju, pri čemer smo želeli moči optimalno nastaviti. Slednje dosežemo v Pareto učinkovitem Nashevem ravnovesju.

Z uvajanjem heterogenih omrežij in koncepta kognitivnih komunikacij dobiva teorija iger čedalje večjo veljavo tudi na področju brezžičnih omrežij, saj je učinkovito orodje za modeliranje, analizo in optimizacijo. Kot pa prikazujemo v članku, je za uporabo teorije iger v brezžičnih omrežjih ključnega pomena izbrati pravi tip igre za dani primer ter določiti primerne mehanizme spodbujanja sodelovanja in funkcije donosov posameznih igralcev.

LITERATURA

- [1] D.Fudenberg, J. Tirole: Game Theory. MIT Press, 1991.
- [2] R. B. Myerson: Game Theory – Analysis of conflict, Harvard University Press, 1991.
- [3] M. J. Osborne, A. Rubinstein: A course in game theory. The MIT Press, 1994.
- [4] S. Smith: The mathematics of games of pure chance and games of pure strategy. Department of mathematics, Saint Joseph's University, Philadelphia, USA, http://www.sju.edu/~smith/Current_Courses/games.pdf.
- [5] R. Gibbons: Game Theory For Applied Economists. Princeton University Press, 1992.
- [6] D. Monderer, L. S. Shapley: Potential games. Games and Economic Behavior, 14 (1), pp. 124–143, 1996.
- [7] R. W. Thomas: Cognitive networks, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, VA, USA, 2007.
- [8] D. Miller, S. Tilak, T. Fountain: "Token" equilibria in sensor networks with multiple sponsors. Proc. Workshop on Stochasticity in Distributed systems, 2005.
- [9] M. Felegyhazi, J. Hubaux, L. Buttyan: Nash Equilibria of Packet Forwarding Strategies in Wireless Ad Hoc Networks. IEEE Transaction on Mobile Computing 5 (5) (2006) 463–476.
- [10] R. Valli, P. Dananjayan: A Non-Cooperative Game Theoretical Approach For Power Control In Virtual MIMO Wireless Sensor Network. International Journal of UbiComp (IJU) 1 (3) (2010) 44–55.
- [11] X. Lin, N. B. Shroff, R. Srikant: A Tutorial on Cross-Layer Optimization in Wireless Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 24 (8) (2006) 1452–1463.
- [12] A. B. MacKenzie, L. A. DaSilva: Game Theory for Wireless Communications. Morgan and Claypool Publishers, 2006.

Erik Pertovt je diplomiral leta 2010 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot mladi raziskovalec na Institutu »Jožef Stefan«. Področji njegovega raziskovanja sta: mrežno kodiranje in teorija iger v brezžičnih omrežjih.

Tomaž Javornik je diplomiral leta 1987, magistriral leta 1990 in doktoriral leta 1993 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot višji raziskovalni sodelavec na Institutu »Jožef Stefan« v Ljubljani. Področja njegovega raziskovanja so: modeliranje radijskih kanalov, kodno modulacijski postopki, brezžična senzorska omrežja in večantenski telekomunikacijski sistemi.

Mihael Mohorčič je diplomiral leta 1994, magistriral leta 1998 in doktoriral leta 2002 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je na Institutu "Jožef Stefan" kot višji znanstveni sodelavec in vodja Odseka za komunikacijske sisteme, od leta 2006 pa je tudi docent na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. V zadnjem času se raziskovalno ukvarja predvsem z obsežnimi brezžičnimi senzorskimi omrežji, kognitivnimi radijskimi omrežji in dinamičnim sestavljanjem komunikacijskih storitev.