

Opportunistiset skedulointialgoritmit mobiileissa langattomissa järjestelmissä

Juha Vuorinen

Espoo 17.9.2013

Pro gradu-tutkielma

HELSINGIN YLIOPISTO

Tietojenkäsittelytieteen laitos

Tiedekunta/Osasto – Fakultet/Sektion – Faculty/Section Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Laitos – Institution – Department Tietojenkäsittelytieteen laitos	
Tekijä – Författare – Author Juha Tapani Vuorinen			
Oppiaine – Arbetets titel - Title Tietojenkäsittely tiede			
Työn laji – Arbetets art - Level Pro Gradu - tutkielma		Aika – Datum – Month and year 17.09.2013	Sivumäärä 71 sivua + 8 liitesivua
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tutkielmassa käsiteltiin opportunistista skedulointia mobiilissa langattomassa radioverkossa. Opportunistinen skedulointi pyrkii valitsemaan aina käyttäjän, jolla on parhaat tiedonsiirtokanavaolosuhteet kullakin valinnan hetkellä, jolloin saavutetaan parempi järjestelmän tiedonsiirtokapasiteetti verrattuna kiinteästi ennalta määritellyyn skedulointijärjestykseen.</p> <p>Opportunistisen skeduloinnin haasteita ovat käyttäjien välisen reiluuden saavuttaminen sekä käyttäjä- ja palvelukohtaisten laatuvaatimusten huomioiminen. Skedulointi voidaan tehdä keskitetysti ja hajautetusti. Hajautetuissa skeduloinnin algoritmeissa voidaan luontevasti hyödyntää peliteorian tarjoamia formaaleja malleja. Myös kognitiiviset radiot ja LTE:n pienten solujen järjestelmät voivat hyödyntää vaihtelevia radiokanavaolosuhteita käyttämällä opportunistista skedulointia ja hajauttamalla skeduloinnin päätöksentekoa peliteoreettisia malleja hyödyntäen.</p> <p>Tutkielma sisältää kirjallisuuskatsauksen opportunistisesta skeduloinnista sekä kahden opportunistisen ja yhden ei-opportunistisen skedulointialgoritmin simulointitestit Matlab-ohjelmalla. Kirjallisuuskatsauksesta nähdään, että ilman opportunistista skedulointia ilmara-japinnan tiedonsiirtokapasiteetin hyödyntäminen jää huomattavan vajavaiseksi. Peliteorian soveltaminen tuo uusia mahdollisuuksia hajautettujen skedulointien ratkaisujen toteutuksille. Simulointitestit osoittivat kahden opportunistisen skedulointialgoritmin erot suorituskyvyssä ja reiluudessa sekä opportunistisen skeduloinnin paremman suorituskyvyn vaihtelevissa kanavaolosuhteissa verrattuna ei-opportunistiseen skedulointiin.</p> <p>ACM Computing Classification System (CCS 2012):</p> <p><i>Networks</i> → Packet scheduling; Mobile networks;</p>			
Avainsanat Skedulointi, mobiili langaton tiedonsiirto, peliteoria, LTE, CDMA, UMTS			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Laajakaistaisen mobiiliverkon resurssienhallinnan haaste	4
2.1	Radiokanavien muuttuvat kapasiteetit.....	4
2.1.1	Radiokanavan dynaamisten olosuhteiden matemaattinen mallinnus	8
2.2	Monipalveluverkko ja resurssien hallinta	9
2.3	Skeduloinnin periaate mobiilissa laajakaistaverkossa	11
3	Opportunistinen skedulointi	14
3.1	Opportunistisen skeduloinnin toimintaperiaate	14
3.2	Opportunistinen skedulointi vs. ei-opportunistinen skedulointi	17
3.3	Reiluus opportunistisessa skeduloinnissa	18
3.4	Tiedonsiirtosuunnan vaikutus skedulointiin.....	19
3.5	Kanavatiilojen keinotekoinen stimulointi	23
3.6	Skedulointiolosuhteiden mallintaminen	25
4	Hajautettu opportunistinen skedulointi	28
4.1	Hajautettu vs. keskitetty skedulointi	28
4.2	Peliteoria	30
4.3	Peliteoria hajautetussa skeduloinnissa.....	32
4.3.1	Peliteorian soveltaminen hajautettuun tehonsäätöön	33
4.3.2	Peliteorian sovellus Aloha järjestelmässä	35
4.3.3	Peliteoria ja kognitiiviset radiot.....	36
4.4	Käyttäjakohtainen tiedonsiirron hinta ei-lineaarisen Lagrange-kertoimenä	36
4.5	Hajautettu skedulointi kaksitasoisessa langattomassa järjestelmässä.....	39
4.5.1	Stackelberg-Nashin peliteorian soveltaminen femtojärjestelmän vuorovaikutushäiriön minimoimiseksi	40
4.5.2	Koalitiopelin ja korreloituneen tasapainomallin soveltaminen femtojärjestelmän vuorovaikutushäiriön minimoimiseksi	41
5	Simulaatio.....	44
5.1	PFS-skedulointi	44
5.2	DFS-skedulointi	45
5.3	Yleinen simulointiympäristö ja käytetyt parametrit	46
5.4	Kahden käyttäjän simulaatiot	49
5.4.1	PFS-simulointi, kahden käyttäjän keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet	50
5.4.2	PFS, kaksi käyttäjää, siirtoaikojen vertailu	51
5.4.3	PFS, kaksi käyttäjää, viiveen mittaus	52
5.4.4	DFS, kaksi käyttäjää, keskimääräinen tiedonsiirtonopeus	54
5.4.5	DFS, kaksi käyttäjää, siirtoaikojen vertailu.....	55
5.4.6	DFS, kaksi käyttäjää, viiveen mittaus	57
5.5	10 käyttäjän simulaatiot.....	58
5.5.1	10 käyttäjää, muistiton Rayleigh-kanavamalli, $K=1$	59

6 Yhteenveto.....	62
Lähteet.....	65
Liite A Matlab skriptit	

1 Johdanto

Langattomien tiedonsiirtopalveluiden kysyntä on kasvanut viime vuosina räjähdysmäisesti ympäri maailmaa ja sen oletetaan lisääntyvän yhä kiihtyvällä vauhdilla myös lähivuosina. Globaalin mobiilin dataliikenteen ennustetaan kasvavan 18-kertaiseksi vuosien 2011 ja 2016 välillä [TZS12]. Pääasiallisina syinä tähän kehitykseen ovat langattomien järjestelmien tiedonsiirtonopeuksien merkittävä kasvu, langattoman teknologian käyttöönoton edullisuus verrattuna kiinteän kaapeliverkon rakentamiseen, suuri valikoima käyttäjäystävällisiä, laadukkaita ja edullisia langattomia päätelaitteita ja internetpohjaisten multimediaspalveluiden lisääntynyt kysyntä.

Langattomat tiedonsiirtojärjestelmät käyttävät tiedonsiirtomediaanaan radiotaajuuksia ilmarajapinnassa, johon järjestelmä muodostaa tiedonsiirtoväylän tukiaseman ja langattoman päätelaitteen välille. Koska radiotaajuudet ovat rajallinen luonnonvara ja niiden käyttö on määritelty tarkasti lainsäädännössä, radiotaajuuksien tarjoama tiedonsiirtokapasiteetti pyritään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Langattomissa järjestelmissä skedulointialgoritmeilla on äärimmäisen tärkeä rooli radiotaajuuksien hyödyntämisessä, koska ne ohjaavat järjestelmiä siinä, miten radioverkon kapasiteetti jaetaan sen käyttäjien kesken. Jotta rajallinen kapasiteetti voidaan hyödyntää maksimaalisesti ja optimaalisesti, järjestelmän pitää huomioida suorituskyvylliset seikat sekä yksittäisen käyttäjän että koko radioverkkojärjestelmän näkökulmasta.

Langattoman verkon kapasiteetti jaetaan käyttäjien kesken siten, että järjestelmä valitsee eli skeduloi yhden käyttäjän tai joukon käyttäjiä kerrallaan siirtämään tietoa. Tiedonsiirtoväylinä toimivat radiokanavat ilmarajapinnassa, joita pitkin käyttäjien ja tukiaseman välinen tiedonsiirto tapahtuu.

Langattomien järjestelmien erikoispiirre verrattuna kiinteisiin suljettujen tilojen tiedonsiirtojärjestelmiin on radiokanavan tilojen ja kapasiteetin jatkuva vaihtelevuus, joka on lisäksi satunnaista ja käyttäjäkohtaista. Merkittävimpiä syitä tähän vaihtelevuuteen ovat käyttäjien liikkuvuus ja radiokanavan altistuminen erilaisille ympäristön ominaisuuksille kanavan siirtotiellä tukiaseman ja loppukäyttäjän välillä [Lin00].

Loppukäyttäjä kokee järjestelmän laadun pääasiallisesti tiedonsiirron nopeutena tai viiveenä. Jos siirtokanava on hyvä, käyttäjä pääsee nauttimaan nopeasta tiedonsiirrosta ja

pienistä viiveistä. Koska langattomissa järjestelmissä kanavien tilat vaihtelevat jatkuvasti ja käyttäjäkohtaisesti, skedulointialgoritmien pitäisi välttää valitsemasta siirtämään sellaisia käyttäjiä, joilla on huono kanava. Jos järjestelmä ei kykene priorisoimaan hyviä kanavia huonojen kanavien edelle skedulointipäätöksenteossa, seurauksena on käyttäjien tiedonsiirron laadun laskeminen ja tätä kautta koko järjestelmän suorituskyvyn heikentyminen. Skedulointimenetelmää, jossa skedulointi perustuu käyttäjien kanavalaadun arviointiin, kutsutaan opportunistiseksi skeduloinniksi.

Skeduloinnin koordinointi tapahtuu joko keskitetysti, jolloin tukiasema ohjaa skedulointia, tai hajautetusti, jolloin päätelaitteet osallistuvat skedulointipäätöksentekoon. Neljännen sukupolven matkapuhelinverkon LTE:n (Long Term Evolution) [GSK10] pienten solujen radiojärjestelmät [AnP12] sekä kognitiivisten radioiden [NRG04] tukiasemat voivat hyödyntää sekä keskitetyn että hajautetun opportunistisen skeduloinnin periaatteita, koska niissä vaaditaan keskitettyä koordinointia, mutta niiden verkkoarkkitehtuuri ja toiminnallisuus mahdollistavat myös hajautetun skeduloinnin ratkaisujen hyödyntämisen. Koska hajautettujen skedulointialgoritmien tarkoituksena on delegoida päätöksentekoa lukuisille päätelaitteille ja pienten solujen tukiasemille, peliteorian tarjoamia formaaleja matemaattisia malleja järjestelmien tasapainotilojen arvioimiseksi voidaan hyödyntää luontevasti.

Tässä pro gradu -tutkielmassa käsitellään mobiilin radioverkon skedulointialgoritmeja, joissa keskitytään erityisesti opportunististen skedulointialgoritmien kuvaukseen. Tutkielmassa arvioidaan opportunistisen ja ei-opportunistisen skeduloinnin eroavaisuuksia toiminnallisuuden ja suorituskyvyn suhteen, joista jälkimmäistä arvioidaan myös simulaatiotestein. Lisäksi tutkielmassa käsitellään radiokanavien yleistä toiminnallisuutta ja dynamiikkaa, hajautetun ja keskitetyn skedulointialgoritmien eroavaisuuksia ja hajautettuja skedulointiratkaisuja, joissa sovelletaan peliteorian malleja. Työ jakaantuu kahteen osaan: kirjallisuuskatsaukseen skedulointialgoritmeista (kappaleet 2–4) ja skedulointialgoritmien simulointiin (kappale 5). Kappaleessa 2 kuvataan syitä radiokanavien vaihteleviin olosuhteisiin ja nykyaikaisen mobiilin laajakaistaisen verkon resurssien hallinnan haasteita skeduloinnin kannalta katsottuna. Kappaleessa 3 esitellään opportunistinen skedulointi ja kappaleessa 4 käsitellään hajautettua opportunistista skedulointia, jossa peliteoriaa on hyödynnetty paljon algoritmien kehittämisessä. Kappale 5 esittää simulaatiotulokset kahden opportunistisen skedulointialgoritmin ja yhden ei-opportunistisen

skeduloinnin suorituskyvyistä, kappale 6 sisältää yhteenvedon ja ehdotuksen, mitä jatkosimulointitestejä voitaisiin tehdä pro gradu -tutkielman jatkoksi. Lisäksi tutkielma sisältää liitteen, jossa on listattu käytettyjen Matlab -simulaatioskriptien koodit.

2 Laajakaistaisen mobiiliverkon resurssienhallinnan haaste

Laajakaistaisen mobiiliverkon resurssienhallinnan yksi suurimmista haasteista on radiokanavien tilojen dynaaminen, ennakoimaton ja jatkuva muuttuminen. Saman haasteen eteen joutuu jokainen langaton tiedonsiirtojärjestelmä, ja kun mobiilista 3G-laajakaistaverkosta siirrytään vähitellen seuraavan sukupolven 4G- eli LTE -järjestelmiin, sama tilanne jatkuu ja myös monimutkaistuu entisestään. Uusien mobiiliteknologioiden jatkuvasti kasvavat tiedonsiirtonopeudet mahdollistamat yhä suuremman kirjon erilaisia digitaalisia palveluita, jotka ovat jokaisen loppukäyttäjän saatavilla. Eri palveluilla on erilaisia vaatimuksia tiedonsiirron nopeudelle ja laadulle. Lisäksi kuluttajilla on erilaisia palvelupaketteja, jotka edellyttävät loppukäyttäjäkohtaista resurssienhallintaa mobiililta laajakaistaverkolta. Kuten jo aiemmin todettu, radiotaajuuksien määrä on rajallinen ja radiokanavien tilat vaihtelevat dynaamisesti ja satunnaisesti. Kun edellä mainittuihin seikkoihin lisätään se tosiasia, että mobiiliverkoissa on samaan aikaan käytössä useamman eri sukupolven mobiililaajakaistateknologiaa [TZS12], vaaditaan mobiilin laajakaistan resurssienhallinnalta paljon, jotta loppukäyttäjät olisivat tyytyväisiä saamaansa palvelulaatuun ja mobiilioperaattorit voisivat investoida uuteen radioverkkokapasiteettiin ennakoidusti ja suunnitelmallisesti.

2.1 Radiokanavien muuttuvat kapasiteetit

Yleisesti ottaen missä tahansa tiedonsiirtojärjestelmässä alkuperäisen lähetetyn signaalin teho muuttuu määränpäässä, kun signaali matkaa läpi tiedonsiirtokanavan. Normaalisti erilaiset häiriöt ja kohinavaikutukset vaikuttavat signaalin tasoon siirtotiellä siten, että sen teho laskee sen saapuessa vastaanottopäähän. Tiedonsiirtokapasiteetti tiedonsiirtokanavassa riippuu signaalin tehostasosta vastaanottopäähän, jolloin signaalin tiedonsiirtokapasiteettiin vaikuttavat lähetystehon voimakkuuden lisäksi häiriöt ja kohina siirtotiellä. Shannonin mukaan [Sha48] tiedonsiirtokanavan kapasiteetti vastaa logaritmisesti lähetystehon ja häiriöiden ja kohinan välistä suhdetta eli ns. SINR-arvoa (Signal to Interference and Noise Ratio) [Sha48], jolloin se voidaan kuvata kaavan 1 mukaisesti.

Tiedonsiirron kapasiteettia kuvataan usein tiedonsiirtonopeutena, eli kuinka monta bittiä kanavassa siirtyy aikayksikköä kohden; kuten kaavasta 1 nähdään.

$$R = \text{Log}_2(1 + \text{SINR}) \quad (\text{kaava 1}),$$

jossa R = tiedonsiirtonopeus (siirtyvien bittien määrä), $\text{SINR} = \frac{P}{G}$, P = signaalin lähetysteho ja G = kohina ja häiriöt siirtotiellä.

Kaavasta 1 nähdään, että tiedonsiirtonopeus R on sitä suurempi, mitä suurempi lähetystehon P arvo on ja mitä pienemmät ovat häiriöt ja kohina. Viimeksimainittuja kuvataan yhteisesti parametrilla G . Vastaavasti, mitä pienempi on lähetystehon P arvo ja mitä suuremmat ovat häiriöt ja kohina siirtotiellä (parametri G), sitä pienempi tiedonsiirtonopeus R saavutetaan.

Kiinteän suljetun verkon tiedonsiirtojärjestelmässä, jossa siirtomedia toimii jokin kaapeliteknologia, kuten kupari, valokuitu tai yleiskaapelointi (EN 50174), tapahtuu signaalin vaimenemista lähinnä kaapelien materiaalin ominaisuuksista johtuen. Tämä vaimeneminen on helppo laskea etukäteen, koska kaapelien materiaaliset ominaisuudet ovat käytännössä pysyviä. Häiriöt ja kohina ovat tällöin muuttumattomia, joten, jos lähetysteho pysyy myös vakiona, tiedonsiirtonopeuskaan ei muutu.

Koska tiedonsiirtoväylän kapasiteetti suljetussa kaapelipohjaisessa tiedonsiirtojärjestelmässä on käytännössä vakio ja ennustettavissa, opportunistinen skedulointimenetelmä ei tuota lisää kapasiteettia järjestelmään.

Mobiilin laajakaistaverkon olosuhteet ovat täysin erilaiset kuin langallisen tiedonsiirtojärjestelmän. Tähän on pääsyinä seuraavat neljä seikkaa [LCS01]: 1) langattomassa järjestelmässä kanavien olosuhteet vaihtelevat jatkuvasti (nopea monitie-vaimeneminen ja log-normaali varjostuminen erilaisine aikaskaaloineen aiheuttavat jatkuvaa muutosta signaalin tehotasoon, 2) kanavien olosuhteet muuttuvat käyttäjän fyysisen sijainnin mukaan, 3) kaistanleveyden rajoitteet ilmarajapinnassa ja 4) suorituskykyrajoitukset ajallisesti muuttuvista ja sijaintiriippuvista kanava tiloista.

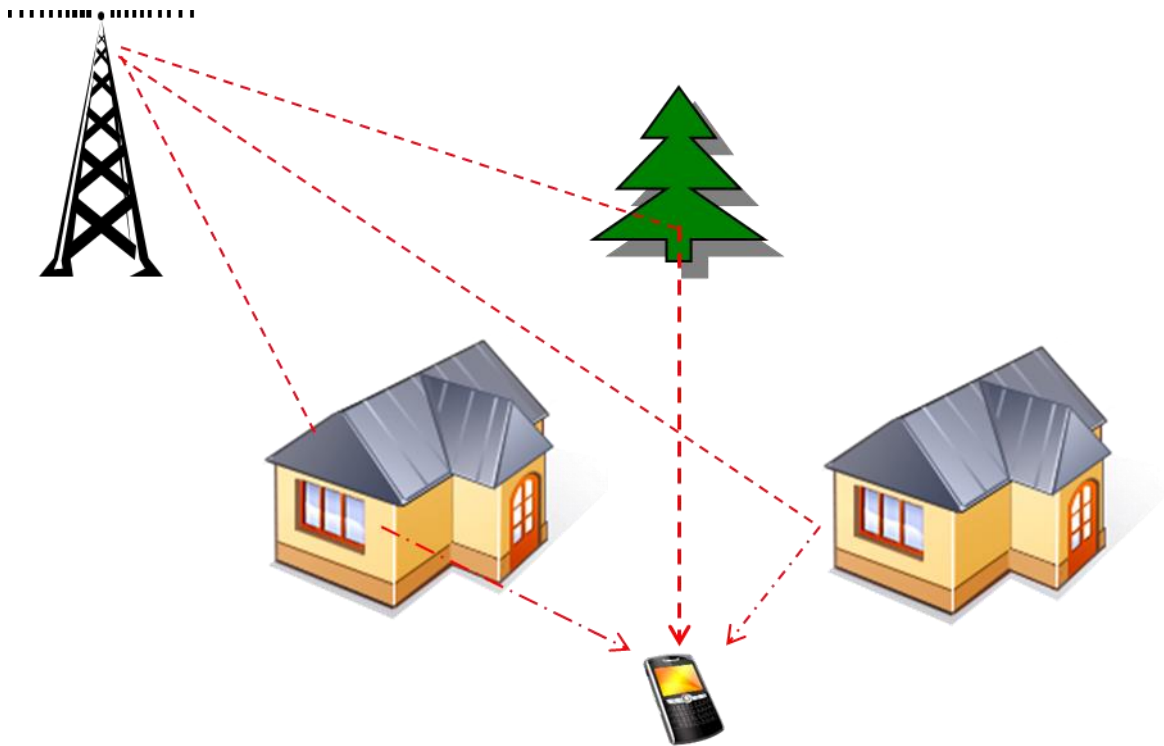
Täten myös mobiilin laajakaistaverkon käyttäjien tiedonsiirtokanavien kapasiteetit vaihtelevat jatkuvasti olosuhteissa, joissa varjostuminen, monitie-eteneminen, Doppler-ilmiö ja käyttäjän ja tukiaseman etäisyyden muuttuminen aiheuttavat jatkuvaa signaalitason muuttumista. Käyttäjät liikkuvat jatkuvasti tukiaseman ympärillä, jolloin heidän etäi-

syys tukiasemasta vaihtelee jatkuvasti. Tällöin käyttäjän ja tukiaseman välisessä tiedonsiirtokanavassa siirtyvä signaali joko vahvistuu tai vaimenee riippuen siitä, lähestyykö käyttäjä tukiasemaa vai loittoneeko tämä siitä; kanavan tiedonsiirtonopeus vastavasti joko laskee tai kasvaa. Radiosignaalin varjostuminen, mikä tapahtuu radiosignaalille sen kulkiessa suuren esineen, esimerkiksi rakennuksen, läpi [SaS08], aiheuttaa signaalin vaimenemista sen etenemistiellä. Koska radioverkkojärjestelmän siirtokanavat käyttävät tiedonsiirtomediaanaan taajuuskaistoja, joiden tiedonsiirtokapasiteetit riippuvat niiden taajuusalueista, siirtokaistan leveys on näin rajoitettu ilma-rajapinnassa [LCS01]. Mitä korkeampaa taajuutta radioverkkojärjestelmä käyttää, sitä suuremman tiedonsiirtokapasiteetin se tarjoaa, mutta toisaalta sitä pienemmän peiton sen pystyy antamaan käyttäjilleen.

Lisäksi radiosignaalin etenemistiellä olevat esineet ja maaston muodot aiheuttavat radiosignaalin monitie-etenemistä, joka näkyy signaalitason eli tiedonsiirron laadun muuttumisena. Radiosignaalit heijastuvat erilaisista pinnoista, kuten taloista ja kasveista, ja tämä heijastuminen aiheuttaa signaalin jakautumisen useaan osaan sen etenemistiellä [Lin00]. Käyttäjän päätelaite (tai vastaavasti tukiasema) kokoaa nämä jakaantuneet signaalit, ja muodostaa jälleen yhden signaalin. Tällöin lähetetyn signaalin ominaisuudet, joita ovat pääasiassa teho, viive ja vaihe, ovat saattaneet muuttua huomattavasti vastaanottopäässä. Tämä monitie-eteneminen saattaa aiheuttaa myös signaalitason voimistumista, mikä merkitsee tiedonsiirtonopeuden kasvamista [SaS08].

Yleisesti ottaen radiosignaalin tason satunnaista vaihtelua kutsutaan häipymiseksi [Lin00], joka on radioverkkojärjestelmissä aika- ja paikkariippuvaista.

Kuvassa 1 esitetään, kuinka radiosignaalit heijastuvat esineistä ja maastosta ja varjostuvat matkalla esineiden läpi aiheuttaen näin monitie-etenemistä signaalin kulkiessa tukiasemalta käyttäjän päätelaitteeseen.



Kuva 1: Radiosignaalin monitie-eteneminen tukiasemalta päätelaitteeseen.

Doppler-ilmiö vaikuttaa radiosignaaleihin käyttäjien liikkuessa nopeasti tukiaseman kantamalla, esimerkiksi autolla ajaen. Ilmiö aiheuttaa lähetetyn signaalin taajuuden siirtymän vastaanottajalla ja näin ollen tuottaa radiosignaalin ominaisuuksien häipymistä. Häipymisestä johtuen signaalin voimakkuus kasvaa tai pienenee ja täten siis radiokanavan kapasiteetti vastaavasti suurenee tai vähenee.

Varjostumisen ja monitie-etenemisen lisäksi käyttäjäkohtaisten käyttäjän ja tukiaseman etäisyyksien vaihtelemisen aiheuttama häipyminen vaikuttaa radiokanavan laatuun. Mitä lähempänä käyttäjä on tukiasemaa, sitä voimakkaampi radiokanavan signaali on ja sitä parempi on myös tiedonsiirtokapasiteetti.

Käyttäjän ilmarajapinnan tiedonsiirron suorituskykyä rajoittavat siis ajallisesti muuttuvat ja sijaintiriippuvaiset kanavatilat.

2.1.1 Radiokanavan dynaamisten olosuhteiden matemaattinen mallinnus

Kuten todettua, radiosignaalin häipyminen eli jatkuva dynaaminen muuttuminen johtuu siirtotiellä olevista esineistä ja niiden aiheuttamasta monitie-etenemisestä, varjostumisesta ja käyttäjien liikkumisesta. Varjostuminen sekä käyttäjän ja tukiaseman etäisyyden hidas muuttuminen aiheuttavat radiokanavan tiloille hitaampaa häipymistä kuin mitä monitie-eteneminen ja Doppler-ilmiö.

Häipyminen voidaan siis jakaa hitaaseen ja nopeaan häipymiseen. Yleisesti ottaen hidas häipyminen johtuu erityisesti siirtotien suurista muutoksista, kuten meteorologisista muutoksista [Lin00], suurista fyysisistä esteistä radiotiellä [Räl11] sekä käyttäjän ja tukiaseman etäisyyden suhteellisen hitaasta muuttumisesta. Signaalin nopea häipyminen taas johtuu monitie-etenemisestä [Räl11] ja Doppler-ilmiön aiheuttamista muutoksista signaalin ominaisuuksiin. Tällöin muutokset voivat olla todella nopeita. Tätä tapahtuu erityisesti kaupunkialueilla, joissa signaalin lähettäjä ja vastaanottaja eivät ole näköyhteyden päässä toisistaan, vaan signaali saavuttaa kohteensa lukuisten heijastusten kautta. Lisäksi käyttäjä voi liikkua suurella nopeudella, jolloin radiosignaali on altis Doppler-ilmiölle, joka edelleen edesauttaa signaalin häipymistä.

Koska radiokanavan tilan muutokset ovat aika- ja paikkariippuvaisia, kuvataan edellä mainittua tilaa keskimääräisillä todennäköisyysmalleilla, eikä siis pyritä eksakteihin absoluuttisiin arvioihin. Esimerkiksi radiosignaalin voimakkuus saattaa vaihdella voimakkaasti jopa yhden metrin pituisella matkalla, kun sitä mitataan mittauslaitteella, joka on signaalin lähetyspisteestä useamman kilometrin päässä [Lin00]. Signaalin taso vaihtelee joka tapauksessa vastaanottimen pysyessä paikoillaankin, kun tasoa mitataan pidemmän aikaa [Lin00].

Hidasta häipymistä mallinnetaan matemaattisesti log-normaalijakaumalla, joka kuvaa sitä signaalin voimakkuuden logaritmisena funktiona, ja on normaalijakauma signaalin voimakkuuden keskimääräisen arvon ympärillä [Lin00].

Hitaan häipymisen tärkeimmät ominaisuudet voidaan esittää todennäköisyystiheysfunktion $f(x)$ avulla, jossa $f(x)$ kuvaa kanavavahvistuksen x (SNR (Signal to Noise Ratio)) todennäköisyysjaukaman tiheysfunktion, kuten kaavassa 2 on esitetty.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2} \quad (\text{Kaava 2}),$$

jossa x = hetkellinen kanavavahvistus, σ = standardi poikkeama logaritmisesta kanavavahvistuksesta $\ln x$, ja μ = keskimääräinen kanavavahvistus. [Kar11].

Rayleigh – jakaumaa käytetään vastaavasti kuvaamaan edellä mainituissa olosuhteissa syntyvää nopeaa häipymistä. Rayleigh-jakauman todennäköisyysfunktio $f(x)$ kanavavahvistukselle x kuvataan kaavassa 3.

$$f(x) = \left(\frac{x}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Kaava 3}),$$

jossa x = hetkellinen kanavavahvistus ja σ = kanavavahvistuksen odotusarvo. [Lin00], [JoF08].

Kun radiokanavien tiloja simuloidaan tietokoneella skedulointialgoritmien suorituskyvyn testaamiseksi, voidaan hidasta ja nopeaa häipymistä simuloida ja mallintaa matemaattisesti edellä mainituilla jakaumilla. Simulointityökalut, kuten Matlab [JoF08], sisältävät nämä todennäköisyyslaskukaavat valmiina funktioina, joihin valitaan sopivat parametrit simulointitehtävästä riippuen.

2.2 Monipalveluverkko ja resurssien hallinta

Nykyaikaisen mobiilin laajakaistaisen tiedonsiirtomedian, jossa kaikki liikenne on IP-pohjaista, tulee kyetä siirtämään hyvin monentyyppistä dataliikennettä. Älypuhelimella voidaan soittaa internetpohjaisia puheluita (VOIP [Voice Over IP]), selata internetsivuja (http-liikenne), käyttää erilaisia palveluita ja sovelluksia, siirtää kuvia, videoita ja P2P (peer to peer)-tiedostoja ja olla aktiivinen sosiaalisessa mediassa [XEG11], [HLP12]. Kaikki nämä palvelutyyppit asettavat omat vaatimuksensa IP-pakettien siirtämiselle radioverkossa loppukäyttäjän ja tukiaseman välillä. Kullakin näistä on omat laatuvaatimuksensa (QoS [Quality of Service]) [PRR11] tiedonsiirrolle. Tyypillisiä QoS-parametreja ovat tiedonsiirron nopeus (bittejä per sekunti), viive (kuinka kauan IP-paketin siirtyminen kestää kahden osapuolen välillä) ja viiveen vaihtelu [PRR11]. VOIP

vaatii reaaliaikaista tiedonsiirtoa, jossa puhepakettien viive ei saa olla suuri [WCJ05], jotta puheen laatu ei kärsisi [XMM13]. VOIP toisaalta generoi pienikokoisia IP-paketteja [WCJ05] ja vain pienen määrän siirrettävää dataa, koska puheen koodaukseen ei tarvita paljoa bittejä. Täten VOIP-liikenteen vaatimukset tiedonsiirron nopeudelle eivät ole suuria, mutta toisaalta viiveen sen sijaan täytyy olla mahdollisimman pientä. http-liikenteen taas ei tarvitse olla reaaliaikaista, mutta toisaalta pitkät viiveet heikentävät palvelukokemusta (QoE [Quality Of Experience]) [ScE11] ja voivat näin vähentää kuluttajien kiinnostusta käyttää internetpohjaisia palveluja mobiilissa laajakaistaverkossa [WIH11]. Kuva-, video- ja P2P-tiedostojen siirrossa voidaan siis sallia suurempia viiveitä, mutta toisaalta niiden sisältämät tietomäärät ovat normaalisti huomattavasti suurempia kuin VOIP- ja http-liikenteessä. Lisäksi internet-sivustot sisältävät yhä enenevässä määrin teksti-informaation lisäksi kuvia ja videoita, joiden tulisi olla käytettävissä päätelaitteissa suurin piirtein samaan aikaan kuin itse teksti-informaatio. Kuva-, video- ja P2P-tiedostojen siirtoon vaaditaan suurta tiedonsiirtonopeutta, mutta sallitaan suurempaa viivettä kuin esimerkiksi VOIP-palvelussa.

Loppukäyttäjillä voi olla erilaisia tilattuja palveluluokkia, kuten premium-, gold-, silver- ja bronze-luokat [LCD03], [LWT08], jotka takaavat tietyn minimipalvelutason käyttäjilleen riippuen siitä, paljonko he ovat valmiita maksamaan lisäpalvelutasosta [LCD03]. Toisaalta kaikkien käyttäjien on kyettävä siirtämään edes jonkin verran dataa yli langattoman laajakaistan, jotta kaikkien verkossa olevien käyttäjien tiedonsiirtotarpeet tulisivat tyydytettyä riittävän hyvin. Tyytymättömyys operaattorin tarjoamaan tiedonsiirron laatuun voi johtaa käyttäjien siirtymiseen kilpailevan operaattorin asiakkaaksi [LCD03]. Täten sekä käyttäjäkohtaisten rajoitusten ja lisäpalvelutasojen että jonkin tasoisen reilun käyttäjien välillä on toteuduttava.

Huolimatta siitä, että käyttäjien kanavien kapasiteetit vaihtelevat jatkuvasti mobiilissa dataverkossa, järjestelmän tulee mahdollistaa maksimaalinen suorituskyky, jota voidaan mitata järjestelmän tiedonsiirtonopeutena [LCD03].

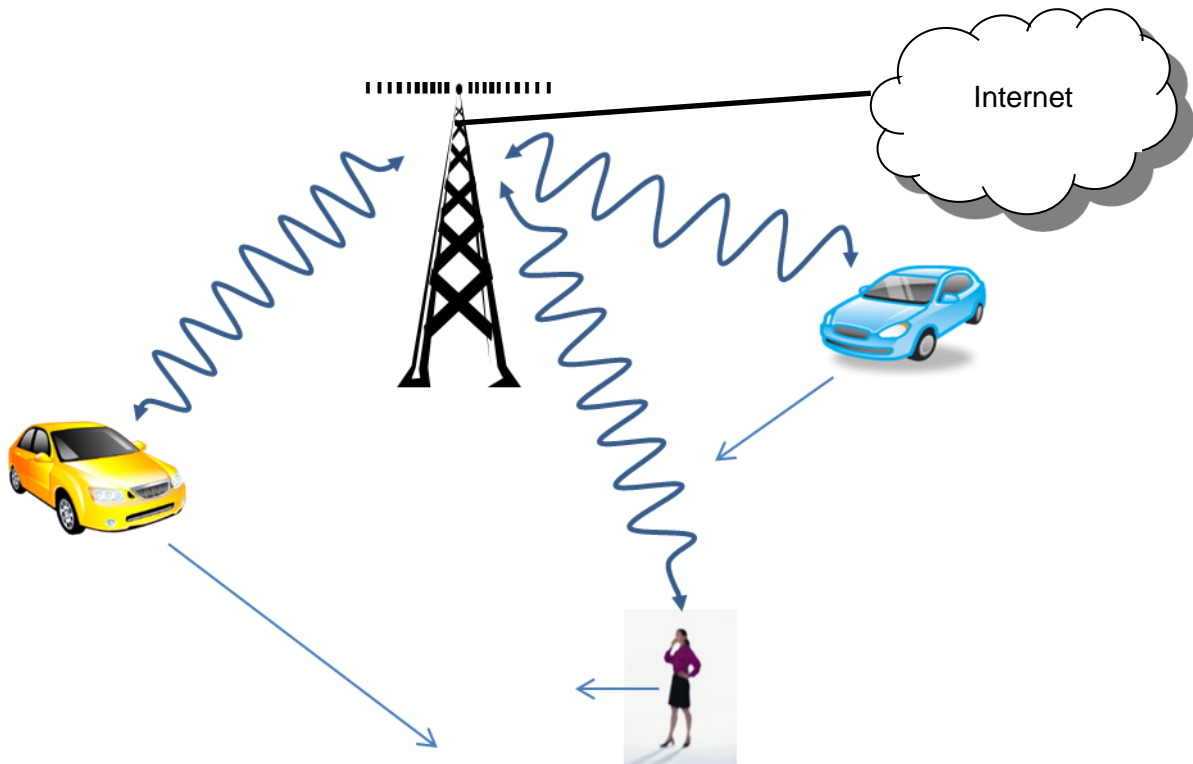
Koska eri palveluilla ja käyttäjillä on erilaiset QoS-vaatimukset, tarvitaan synkronointia eli skedulointia siitä, kuka käyttäjistä pääsee siirtämään ja milloin ja missä tilanteessa [LCD03]. Skeduloinnin pitää siis huomioida myös eri palveluiden vaatimat QoS-vaatimukset, käyttäjien palveluluokat ja reiluus, jotta verkko toimii optimaalisesti ja tarkoituksen mukaisesti. Lisäksi suurkäyttäjien, jotka lukumääräisesti muodostavat vain

pienen osuuden kaikista verkon käyttäjistä, mutta jotka kuluttavat huomattavan osan datasiirtoresursseista langattomassa mobiilissa verkossa, liikennettä pitäisi pystyä rajoittamaan ja hallitsemaan eri tavoin, jotta he eivät kuluttaisi suhteellisesti liian suurta osuutta siirtokapasiteetista [JDG12].

Mobiilin laajakaistaverkon suunnittelussa ja kehittämisessä on huomioitava kaikki nämä edellä mainitut seikat, jotta käyttäjät saavat odottamansa palvelukohtaisen laatutason ja toisaalta riittävän reiluuden muihin käyttäjiin nähden.

2.3 Skeduloinnin periaate mobiilissa laajakaistaverkossa

Langattoman mobiiliverkon skedulointitilannetta voidaan havainnollistaa yksinkertaisella yksisoluisella usean käyttäjän langattomalla järjestelmällä, jota kuva 2 esittää. Yksisoluisessa järjestelmässä on yksi tukiasema, joka toimii yhdellä taajuusalueella. Käyttäjät liikkuvat vapaasti eri suuntiin vaihtelevilla nopeuksilla tukiaseman kantama-alueen sisäpuolella ja lähettävät dataa tukiasemalle ja vastaanottaen sitä tiedonsiirtokanavansa kautta. Tukiasema on yhteydessä runkoverkkoon, josta on yhteys internetiin. Käyttäjät voivat poistua vapaasti milloin vain tukiaseman kantaman ulkopuolelle, jolloin tukiasema ei voi enää palvella heitä. Vastaavasti uusi käyttäjä voi milloin vain ilmestyä kantama-alueen sisäpuolelle, jolloin tukiaseman täytyy tarjota palvelua myös tälle.



Kuva 2: Mobiililaajakaistaverkko, jossa verkon käyttäjät liikkuvat eri suuntiin erilaisilla nopeuksilla.

Mikäli järjestelmä toimisi siten, että vain yksi käyttäjä kerrallaan päättää siirtää dataa, ei skedulointia tarvittaisi. Järjestelmä yksinkertaisesti vain hyväksyisi käyttäjän lähetyspyynnön ja päästäisi tämän lähettämään dataa tukiasemalle. Vastaavasti, jos tukiasemalla olisi dataa lähetettävänä kerrallaan vain yhdelle ja ainoalle käyttäjälle, tukiaseman ei tarvitsisi koskaan asettaa käyttäjiä vuorojärjestykseen datan vastaanottoa varten; tällöinkään skeduloinnista ei olisi hyötyä. Tilanne muuttuu, jos useampi kuin yksi käyttäjä haluaa siirtää dataa samanaikaisesti, ja jos tukiasemalla on useammalle kuin yhdelle käyttäjälle dataa lähetettävänä, koska käyttäjien kanavat käyttävät samaa yhteistä taajuusaluetta eli tiedonsiirtomediaa. Tällöin langattoman järjestelmän täytyy tehdä skedulointipäätös siitä, kuka tai ketkä käyttäjistä pääsevät siirtämään ja joille vastaavasti lähetetään dataa.

Kun skedulointipäätös on tehty ja käyttäjä tai käyttäjät on valittu siirtämään dataa, järjestelmä valitsee uuden käyttäjän tai käyttäjät jälleen seuraavassa skedulointipäätöshet-

kessä. Skedulointipäätösten välinen aika on normaalisti hyvin pieni. Esim. UMTS-järjestelmän (Universal Mobile Telecommunication System) HSDPA-palvelussa (High-Speed Downlink Packet Access) aikaväli on 2 ms [MäS07], [ALT10].

Nykyisissä langattomissa järjestelmissä skedulointipäätöksen tekee normaalisti tukiasema. Se voi tehdä skedulointipäätöksen ennalta määritetyssä järjestyksessä, kuten round-robin -periaatteella, tai huomioimalla käyttäjien kanavien tilat. Jälkimmäistä skedulointitapaa kutsutaan opportunistiseksi skeduloinniksi. Opportunistisessa skeduloinnissa tukiaseman on tiedettävä käyttäjien tiedonsiirtokanavien tilatiedot jatkuvasti tehdäksään skedulointipäätöksen. Erityisesti käyttäjien päätelaitteiden käyttämät lähetystehot sekä niiden mittaamat SINR-arvot ovat tärkeää tietoa skedulointipäätöstä tehtäessä. Siirtokanavien tiedot voidaan lähettää joko omaa ohjauskanavaa pitkin käyttäjän ja tukiaseman välillä [AND05] tai ne voivat olla upotettuna normaaliin datakanavaan edellä mainittujen osapuolten välillä [VTL02].

Keskitetyn skeduloinnin, jossa skedulointipäätöksen tekee tukiasema tarkkailtuaan käyttäjien kanavien tiloja, vaihtoehtona on hajautettu skedulointimalli. Hajautetussa skedulointimallissa tukiasema ei tee skedulointipäätöstä yksin, vaan käyttäjät tai kaksitasoisten verkkojen tapauksessa toissijaiset solut tekevät itsenäisesti päätöksiä siitä, haluavatko ne siirtää dataa skedulointipäätöksen hetkellä. Kaksitasoinen verkko on LTE-verkko, jossa on sekä makrotukiasema että toissijaisia tukiasemia (femtocells ja picocells) eli se on niin sanottu pienten solujen järjestelmä [AKG11], [XYJ12] [SuS09].

3 Opportunistinen skedulointi

Opportunistinen skedulointi hyödyntää langattomalle tiedonsiirrolle ominaista kanavien tilojen jatkuvaa vaihtelua [LCS01]. Ei-opportunistisessa skeduloinnissa käyttäjien valinta perustuu etukäteen määriteltyihin valintajärjestyksiin, jotka eivät ota huomioon sitä, että käyttäjien radiokanavien tiedonsiirtokapasiteetit vaihtelevat dynaamisesti [MäS07]. Opportunistisessa skeduloinnissa pyritään maksimoimaan langattoman tiedonsiirtojärjestelmän suorituskyky, jota useimmiten kuvataan tiedonsiirtonopeutena. Tällöin pyritään valitsemaan käyttäjä, jolla on paras tiedonsiirtokanava skedulointihetkellä [KuR05]. Koska langattomien tiedonsiirtopalveluiden tarjoajat haluavat tarjota tietyn minimitiedonsiirtokapasiteetin jokaiselle käyttäjälle, opportunistisen skeduloinnin täytyy luopua jossain määrin periaatteesta, että vain ja ainoastaan parhaimman siirtokanavan omaava käyttäjä pääsee siirtämään dataa. Mikäli vain paras käyttäjä pääsee siirtämään, osa käyttäjistä ei saisi koskaan siirtovuoroa tai vuoron saisi liian harvoin [LCS01]. Tällöin opportunistisen skeduloinnin täytyy huolehtia myös siitä, että reiluus käyttäjien kesken toteutuu [LCS01].

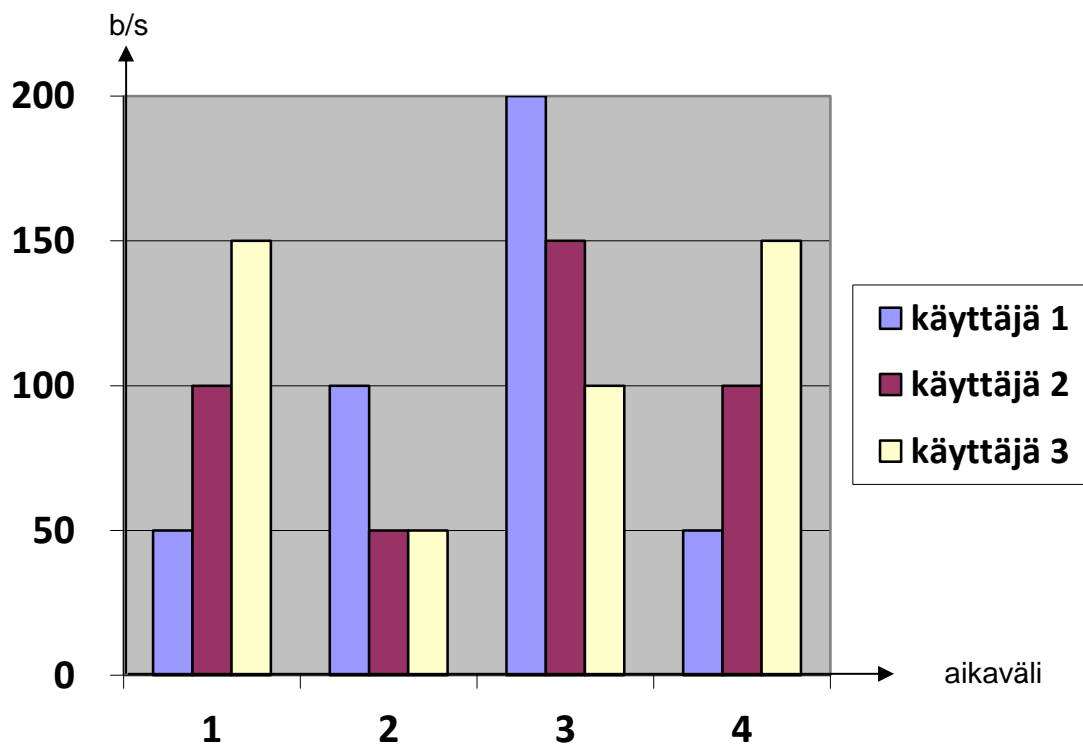
Hatautetut skedulointijärjestelmät ja kognitiivisten radioverkkojärjestelmien resurssienhallinta perustuvat opportunistiseen skedulointiin, koska niissä skedulointipäätökset pohjautuvat järjestelmän tiedonsiirtokanavien tilatietoihin.

3.1 Opportunistisen skeduloinnin toimintaperiaate

Kuten aiemmin todettua, käyttäjien SINR-arvot ja tiedonsiirtokapasiteetit vaihtelevat käyttäjäkohtaisesta, dynaamisesta ja satunnaisesti mobiilissa langattomassa tiedonsiirrossa. Kun tällaisissa muuttuvissa olosuhteissa mobiiliverkon halutaan hyödyntää maksimaalisesti radiotaajuusalueen tarjoama tiedonsiirtokapasiteetti, kannattaa järjestelmän valita dataa siirtämään kaikista käyttäjistä se käyttäjä, jolla on valintahetkellä suurin kanavakapasiteetti [KuR05]. Kuvassa 3 on esimerkinomaisesti kuvattuna kolmen eri käyttäjän radiokanavakapasiteettien arvojen vaihtelevuus aikavälillä. Opportunistista skedulointia käyttäen aikavälillä 1 kannattaa valita siirtämään käyttäjä 3, koska tällä

on paras kanava (150 b/s) kyseisellä hetkellä. Vastaavasti aikavälillä 2 siirtoon kannattaa valita käyttäjä 1 (100 b/s), aikavälillä 3 jälleen käyttäjä 1 (200 b/s) ja aikavälillä 4 käyttäjä 3 (150 b/s). Näin suoritettuna skedulointina järjestelmän keskimääräiseksi tiedonsiirtonopeudeksi saadaan $150 + 100 + 200 + 150 / 4 = 150$ b/s per aikaväli.

Round-robin -periaatteella [MäS05] suoritettulla skeduloinnilla aikavälillä 1 valitaan käyttäjä 1 siirtämään, aikavälillä 2 käyttäjä 2, aikavälillä 3 käyttäjä 3 ja aikavälillä 4 jälleen käyttäjä 1 jne. Toisin sanoen käyttäjän valinta ei perustu käyttäjien kanavakapasiteettien vertailemiseen, vaan skedulointijärjestys on ennalta määrätty. Näin laskettuna järjestelmän keskimääräiseksi tiedonsiirtonopeudeksi saadaan $50 + 50 + 100 + 50 / 4 = 62,5$ b/s per aikaväli. Opportunistinen skedulointi antaisi kyseisessä esimerkkitapauksessa mobiilille langattomalle järjestelmälle lähes kolme kertaa paremman keskimääräisen tiedonsiirtokapasiteetin kuin round-robin -periaatteella toimiva skedulointi. Toisaalta opportunistinen skedulointi huolehtii huonommin reiluudesta kuin esimerkiksi round-robin -skedulointi. Mikäli reiluutta ei huomioida mitenkään oportunistisessa skeduloinnissa, kuvan 3 mukaisessa esimerkissä käyttäjä 2 ei pääsisi siirtämään ollenkaan neljäsässä ensimmäisessä aikavälissä, vaikka käyttäjän 2 ja käyttäjän 1 keskimääräiset kanavakapasiteetit ovat yhtä suuret ($400 / 4 = 100$ b/s per aikaväli).



Kuva 3: Esimerkki kolmen käyttäjän vaihtelevista tiedonsiirtokanavien kapasiteeteista.

Tehdäkseen opportunistisen skedulointipäätöksen täytyy järjestelmän tietää käyttäjien kanavien kapasiteetit, jotta se pystyy valitsemaan parhaan tiedonsiirtokapasiteetin omaavan käyttäjä siirtoa varten. Parhaalle kanavalle voi olla erilaisia kriteereitä, kuten lähetysteho, SINR [VTL02] tai HSPA-palvelun CQI-parametri (Channel Quality Indicator) [MäS05].

Kun SINR on parhaan kanavan kriteerinä, voidaan se määrittää yhdelle käyttäjälle monen käyttäjän järjestelmässä uplink-suunnassa kaavan 4 mukaisesti [HKH08], [XSC01], jossa $SINR_i$ kuvaa käyttäjän i SINR-arvoa skedulointipäätöksentekohetkellä. Käyttäjän i kanavavahvistus- ja lähetystehoparametrit kuvaavat käyttäjän i kanavavahvistusta, joka voi olla signaalitasoa heikentävää tai vahvistavaa, ja käyttäjän i käyttämää lähetystehoa uplink-suunnassa. Muiden käyttäjien kanavavahvistusten vaikutus käyttäjälle i - ja muiden käyttäjien lähetystehot -parametri, siis parametrit G_{ij} ja P_j , taas kuvaavat yhdessä muiden käyttäjien radiokanavien aiheuttamaa häiriötä käyttäjän i kanavalle. Lämpökohinaparametri on häiriö käyttäjän i kanavalla, minkä aiheuttaa käyttäjän oman päätelaitteen laitteisto.

$$SINR_i = \frac{G_i * P_i}{G_{ij} * P_j + N} \quad (\text{kaava 4}),$$

jossa $SINR_i$ = käyttäjän i SINR monen käyttäjän langattomassa järjestelmässä, G_i = käyttäjän i kanavavahvistus skedulointihetkellä, P_i = käyttäjän i lähetysteho, G_{ij} = muiden käyttäjien aiheuttama kanavavahvistus käyttäjälle i , P_j = muiden käyttäjien lähetystehot ja N = lämpökohina. Kaavasta 4 nähdään siis, että monen käyttäjän järjestelmässä yhden käyttäjän uplink-suunnan tiedonsiirtokanavan signaalintason vaikuttavat ensinnäkin käyttäjän oman kanavan vahvistus, toiseksi järjestelmän muiden käyttäjien lähetystehot ja kolmanneksi käyttäjän päätelaitteen aiheuttama lämpökohina.

Skedulointipäätöksen hetkellä langaton mobiilijärjestelmä arvioi kunkin käyttäjän SINR-arvon ja valitsee siirtämään sen käyttäjän, jolla on paras SINR-arvo. Seuraavilla skedulointikierröksillä tehdään jälleen samanlainen valintaprosessi.

3.2 Opportunistinen skedulointi vs. ei-opportunainen skedulointi

On osoitettu informaatioteoreettisesta näkökulmasta, että järjestelmän tiedonsiirtokyky saadaan maksimoitua hyödyntämällä kanavien olosuhteiden vaihtelua monen käyttäjän järjestelmässä, kun vain yksi käyttäjä, jolla on paras kanava, valitaan siirtämään dataa kerrallaan [ZMC09], [KnH95]. Lisäksi opportunistisen skedulointi voi pienentää käyttäjien kanavien välisiä häiriöitä ja parantaa taajuusalueen käyttötehokkuutta [KuR05].

Sen sijaan, että opportunistinen skedulointialgoritmi valitsisi käyttäjät keskimääräistä kanavatilaa kuvaavan Gaussian-kanavamallin mukaisesti, ajasta riippuvaiset kanavaolosuhteet tulee ottaa huomioon, jotta järjestelmän tiedonsiirtokapasiteettia saadaan nostetuksi. Lisäksi käyttämällä ei-lineaarista Lagrange-kerrointa kuvaamaan tehon säädön rajoituksia, saadaan optimaalinen tehonsäätö aikaiseksi [KnH95].

Opportunististen skedulointialgoritmien skedulointikriteerien tulee kuitenkin olla riittävän hyviä, jotta ne kykenevät tuottamaan paremman suorituskyvyn kuin ei-opportunainen skedulointi. Eräässä simulointitutkimuksessa [MäS05] verrattiin kolmen eri skedulointialgoritmin, PFS (Proportional Fair Scheduling), MaxTBS (Maximum Transport Block Size) ja round-robin, joista kaksi ensi mainittua ovat opportunistisia skedulointialgoritmeja, suorituskykyä keskenään HSPA-palvelussa. PFS, joka huomioi kanavan vaihtelevat olosuhteet pidemmältä ajanjaksolta skedulointipäätöstä tehdessään ja tarjoaa lisäksi melko hyvän reiluuden käyttäjien kesken, tuotti simulaatiossa kaikille käyttäjille hyviä keskimääräisiä tiedonsiirtonopeuksia. MaxTBS taas skekuloi siirtämään dataa sen käyttäjän, jolla on suurin TBS:n (Transmission Block Size) arvo kyseisellä aikavälillä. TBS on suurin mahdollinen bittien määrä, joka voidaan siirtää HSPA-palvelussa yhdessä aikavälissä. Bittien määrä riippuu kanavaolosuhteista. MaxTBS antaa siis siirtovuoron aina parhaimman kanavan – TBS:n arvolla mitattuna – omaavalle käyttäjille, eikä huomioi reiluutta, jolloin osa käyttäjistä kohtaa nääntymisen. Simuloinnissa huomioitiin myös käyttäjien kanavien toisilleen aiheuttamat häiriöt. Simuloinnin tulos oli se, että keskimääräinen tiedonsiirtonopeus oli paras PFS:llä ja heikon MaxTBS:llä. MaxTBS:n toisena heikkoutena reiluuden puuttumisen lisäksi on se, että TBS:n suuruuteen vaikuttavat myös muiden käyttäjien kanavien aiheuttama negatiivi-

nen kanavavahvistus. MaxTBS ei siis huomioi vain käyttäjän omaa sijaintia tukiasemaan nähden, vaan lisäksi myös muiden käyttäjien sijainnit, toisin sanoen niiden häiriövaikutukset käyttäjään, vaikuttavat skedulointipäätökseen [MäS05]. Häiriötekijöiden huomioiminen on sinänsä tärkeä seikka radioresurssien hallinnassa, mutta jos skedulointialgoritmi huomioi ne väärällä tavalla tai puutteellisesti, tuloksena saattaakin olla suorituskyvyn lasku. Simulointitutkimus osoittaa, että opportunistinen skedulointi ei ole automaattisesti ei-opportunistista skedulointia parempi.

Arvioidaan, että kun kanavaolosuhteet otetaan huomioon, kuten opportunistisessa skeduloinnissa tehdään, voidaan saavuttaa yli 100 % suorituskyvyn kasvu verrattuna ei-opportunistiseen skedulointimenetelmään [LCS01], [KuR05].

3.3 Reiluus opportunistisessa skeduloinnissa

Koska vain yksi käyttäjä, vahvimman kanavan omaava, voi siirtää, jotta langattoman järjestelmän suorituskyvystä saadaan kaikki irti, on haasteena taata kaikille käyttäjille ainakin jonkin verran siirtovuoroja, jotta kukaan ei näänny odottaessaan omaansa [KuR05], [LCS01]. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi silloin, kun toinen käyttäjä on jatkuvasti huomattavasti lähempänä tukiasemaa kuin toinen [LCS01], mutta molempien radiokanavilla on samanlaiset maaston muodot ja esteet käyttäjän ja tukiaseman välillä. Tällöin skedulointialgoritmin pitää löytää tasapaino järjestelmän kokonaissuorituskyvyn ja reiluuden välillä, jotta molemmat käyttäjät saavat riittävästi tiedonsiirtovuoroja ja vaadittua käyttäjäkohtaista palvelutasoa kyetään ylläpitämään [KuR05], [LCS01]. Yksi tähän tasapainoon pyrkivistä usein viitatuista opportunistista skedulointialgoritmeista on Proportional Fair Scheduling (PFS) [MäS07]. PFS huomioi reiluuksivaatimuksen, mutta kykenee edelleen hyödyntämään ajassa muuttuvat kanavaolosuhteet [MäS07].

Toinen reiluuteen liittyvä tilanne on se, jossa suurkäyttäjät vievät suhteettoman suuren osuuden verkkokapasiteetista. Nämä suurkäyttäjät eivät välttämättä maksa enempää siirtokanavastaan kuin muutkaan käyttäjät, mutta voivat vähentää toisten liikennettä varaamalla taajuuskaistaa suhteettoman usein. Tilanne on erittäin haitallinen käyttäjille,

jotka käyttävät reaaliaikapalveluita, kuten VOIP:ia, joka vaatii tietyn minimitason tiedonsiirron laadulle. Suurkäyttäjien liikennettä voidaan tällöin rajoittaa esimerkiksi säännöstelemällä tiettyjen, suurta tiedonsiirtovolumia vaativien palveluiden käyttöä, kuten video- tai P2P -liikennettä. Skedulointialgoritmeissa tämä voidaan huomioida esimerkiksi siten, että ei-reaaliaikaisiin palveluihin liittyvät datapaketit skeduloidaan pienemmälle prioriteetille tukiasemassa ja näin hidastetaan niiden siirtämistä yli radio-kanavan ja toisaalta mahdollistetaan parempi laatu reaaliaikaisille palveluille [Øst11].

3.4 Tiedonsiirtosuunnan vaikutus skedulointiin

Mobiilit laajakaistajärjestelmät vaativat normaalisti skedulointia sekä uplink- että downlink-siirtosuunnissa. Downlink-suunta tarkoittaa tiedonsiirtoa tukiasemalta käyttäjälle ja uplink-suunta taas päinvastaista siirtoa. Useimmissa mobiileissa dataverkoissa downlink-suuntaan on allokoitu enemmän siirtokapasiteettia kuin uplink-suuntaan. Tähän on syynä se, että verkkosuunnittelijat ovat olettaneet, että downlink-suunnassa on enemmän dataa siirrettävänä. On ajateltu, että esimerkiksi web-selailu ja tiedostojen lataaminen serveriltä käyttäjille ovat eniten käytettyjä internetin käyttömuotoja ja tuottavat näin ollen eniten tiedonsiirtovolyymia [KuQ03]. Uplink-suunnassa taas ei ole nähty tarvetta niin suuriin tiedonsiirron volyymeihin, mutta tämä oletus on vähitellen muuttumassa [KuQ03]. Kun ajatellaan esimerkiksi P2P-palveluita, joissa käyttäjät jakavat suoraan edelleen muille käyttäjille äänitetiedostoja ja muita vastaavia. Jos P2P-palvelut yleistyvät myös mobiileissa laajakaistaverkoissa, merkitsee tämä uplink-suunnan liikennevolyymien kasvua. Toinen merkittävä uplink-suunnan datavolyymien kasvuun vaikuttava tekijä on erilaisten älykkäiden päätelaitteiden käytön lisääntyminen, jossa päätelaitteiden käyttäjät ottavat valokuvia ja nauhoittavat videokuvaa päätelaitteella itsellään ja jakavat kuva- ja videotiedostot välittömästi internetiin suoraan päätelaitteelta langattoman tiedonsiirtokanavan kautta. Täten skedulointialgoritmien pitää huomioida paremmin uplink-suunta [KuQ03], jotta mobiilit langattomat järjestelmät kykynevät välittämään myös käyttäjältä tukiasemalle siirtyvän tiedon mahdollisimman optimaalisesti.

Kumar et al. artikkelissa [KuQ03] vertailtiin simulaation avulla eräiden uplink-suunnan skedulointialgoritmien suorituskykyä monen käyttäjän yksisoluisessa verkossa. Kysei-

sen simulointityön pohjana on eräs downlink-suunnan skedulointitutkimuksen lähestymistapa, jossa skedulointipäätökset perustuvat käyttäjien painotettuihin tiedonsiirtonopeuksiin. Tämä lähestymistapa on todistetusti lisännyt tasapaino-ominaisuuksia datan skedulointiin ja ylipäättänsä radioverkon resurssienhallintaan [KuQ03]. Painotuksilla optimoidaan erilaisia suorituskykytekijöitä, kuten keskimääräisiä jonojen pituuksia ja viiveitä [KuQ03]. Jonolla tarkoitetaan lähettämätöntä dataa, jota tukiasema ei ole vielä kyennyt lähettämään käyttäjälle tai päinvastoin johtuen tiedonsiirtokanavan kapasiteetin rajoituksista.

Simulaatiossa käytettiin aikajakoista skedulointia, jossa jokaisessa aikavälissä valitaan käyttäjä tai käyttäjät siirtämään. Lisäksi simuloinnissa oletettiin, että tukiasema lähettää ohjaussignaaleja käyttäjille kontrolloidakseen näiden tiedonsiirtonopeuksia. Skedulointialgoritmeina olivat 1) PFS, jota normaalisti käytetään nimenomaan downlink-suunnan skedulointiin, koska uplink-suunnassa heikon kanavan omaavien käyttäjien pitäisi siirtää samanaikaisesti ja tätä taas ei ole huomioitu PFS:ssä, 2) suurin jono- ja nopeusvektoreiden tulo (MaxQR [Maximum Queue and Rate vectors product]), 3) Uplink Proportional Fair Scheduling (UPF), joka on PFS:n muunnos uplink-suuntaan, ja se siis parantaa PFS:n tehottomuutta uplink-suunnassa, 4) keskimääräinen signaali-häiriö-suhde (Average-SIR [Average Signal to Interface Ratio]), 5) käyttäjien keskinäiset häiriöt huomioonottava QRP (Queue, Rate and Power) ja 6) optimaalinen uplink-suunnan skedulointi (OPT [Optimal uplink scheduling algorithm]).

MaxQR-skedulointialgoritmi pyrkii ylläpitämään käyttäjien jonojen stabiilisuutta, jossa siis jonon pituudet pyritään pitämään hallittuina. MaxQR-skedulointialgoritmi valitsee dataa siirtämään käyttäjän, jolla on suurin jonon pituuden ja tiedonsiirron nopeuden tulo. Toisin sanoen MaxRQ pyrkii valitsemaan käyttäjän, joka toisaalta on ehkä joutunut odottamaan siirtovuoroaan jo kauan ja jonka siirrettävän datan jono on kasvanut suureksi, mutta jolla on toisaalta hyvä kanava valintatilanteessa, jolloin käyttäjän pitkä jono voidaan myös purkaa tehokkaimmin.

Artikkelin [KuQ03] mukaan optimaalinen skedulointialgoritmi on sellainen, jossa kukin käyttäjä siirtää vain täydellä teholla tai sitten ei ollenkaan. Lisäksi optimaalinen skedulointi valitsee vain yhden käyttäjän kerrallaan siirtoa varten, mikäli näiden tehonkäytölle ei ole rajoituksia. OPT-algoritmi perustuu käyttäjien ylimpien ja alimpien hyväksyttävien tiedonsiirtonopeuksien määrittämiseen, joiden perusteella OPT valitsee kussakin

aikavälissä ne käyttäjät, jotka voivat siirtää maksimiteholla. Alimman sallitun nopeuden määrittäminen voi perustua reaaliaikapalveluiden vaatimuksiin tiedonsiirron nopeudelle sekä laadulle ja ylin nopeusraja voi perustua käyttäjän päätelaitteen lähettimen ominaisuuksiin tai sen hetkisiin jonojen pituuksiin. Toisin sanoen OPT pyrkii toimimaan tehonkäyttöisesti rajoitetun optimaalisen skedulointialgoritmin periaatteiden mukaan.

QRP-algoritmin pohjana on OPT, jossa vain täydellä teholla siirtävät käyttäjät valitaan siirtämään. QRP-algoritmi pyrkii valitsemaan käyttäjät siirtämään kussakin aikavälissä siten, että vain yksi vahva käyttäjä siirtää kerrallaan, kun taas useat heikot käyttäjät, joilla on lisäksi usein pisimmät jonot, siirtävät ryhmänä.

Average-SIR -algoritmissa lasketaan keskimääräinen SIR (Signal to Interface Ratio) [KuQ03] niiden käyttäjien joukosta, joilla jonon koko on suurempi kuin nolla. Näin valitut käyttäjät voivat siirtävät dataa yhtäaikaan. Average-SIR jakaa näin valitut käyttäjät kahteen ryhmään, jossa toisessa ryhmässä on ne, joiden SIR on alle keskimääräisen SIR:n, ja toisessa ryhmässä ne, joiden SIR ylittää keskimääräisen SIR:n. Tämän jälkeen MaxQR-algoritmia käytetään alle keskimääräisen SIR:n käyttäjien ryhmään ryhmänä ja yli keskimääräiseen SIR-käyttäjien ryhmään kullekin käyttäjälle erikseen. Mikäli alle keskimääräisen SIR-ryhmän käyttäjien yhteenlaskettu jonojen ja tiedonsiirtonopeuksien tulo on suurempi kuin kenenkään yli keskimääräisen SIR-ryhmän käyttäjän käyttäjäkohtainen jonon pituuden ja tiedonsiirron nopeuden tulo, valitaan kaikki keskimääräistä SIR:iä alemmalla tasolla olevat käyttäjät siirtämään. Muussa tapauksessa valitaan keskimääräistä SIR:iä ylempällä tasolla oleva käyttäjä, jolla on suurin jonon pituuden ja nopeuden tulo tästä käyttäjäryhmästä.

Algoritmien väliset suorituskykyerot kuvataan pääasiassa toteutuneiden jonojen koossa (kokonais-keskimääräinen jonon koko), vahvojen käyttäjien jonojen koossa sekä heikkojen käyttäjien jonojen koossa. Vahvoilla käyttäjillä tarkoitetaan tässä yhteydessä käyttäjiä, joilla on hyvä kanavakapasiteetti ja vastaavasti heikoilla käyttäjillä niitä, joilla skedulointihetkellä on heikko kanavakapasiteetti.

Simulaatiossa huomioitiin käyttäjien etäisyydet tukiasemasta, lognormaali hajautettu stokastinen prosessi (varjostuminen) ja nopea monitie-vaimentumistekijä (Rayleigh-hajonta), kiinteä tiedonsiirtokuorma ja 40 käyttäjää. Simulaatioissa tukiasema tekee aina skedulointipäätöksen, joten skedulointi on siis keskitettyä. Algoritmista riippuen tu-

kiasema tarvitsee erilaisia tietoja käyttäjistä (tiedot saadaan uplink-suunnan merkinantokanavaa pitkin) ja tukiasema lähettää erilaisia tietoja käyttäjälle (tiedot siirretään downlink-suunnan merkinantokanavaa pitkin).

Kuudesta eri algoritmista OPT antoi parhaimman suorituskyvyn järjestelmälle [KuQ03] ja sen nähdään olevan yksi parhaimman suorituskyvyn omaavista uplink-suunnan skedulointialgoritmeista [HKH08]. QRP:n suorituskyky kokonais-keskimääräisten jonojen pituuden hallinnassa jäi jonkin verran alle OPT:n, mutta oli 50 % tehokkaampi kuin MaxQR. UPF:n suorituskyky on taas huomattavasti parempi kuin PF:n, ollen hieman alle 50 % parempi. Average-SIR oli yli 40 % tehokkaampi verrattuna MaxQR:ään. QRP, joka siis valitsee joko yhden vahvan käyttäjän tai monta heikkoa käyttäjää siirtämään, oli kaikista tehokkain purkamaan heikkojen käyttäjien jonoja.

Merkittävä havainto simulaatioanalyysistä oli se, että uplink-suunnassa kannattaa skeduloida vahvan kanavan omaavat käyttäjät siirtämään yksi kerrallaan, kun taas heikon kanavan omaavien käyttäjien pitäisi siirtää ryhmänä [KuQ03]. Tämä on todettu myös intuitiivisesti CDMA-järjestelmään (Code Division Multiple Access) liittyvässä skedulointialgoritmitutkimuksessa jo aiemmin [KuQ03]. Koska käyttäjän vahva kanava saattaa aiheuttaa merkittäviä häiriöitä myös muiden käyttäjien kanaville, tällöin mitä useampi vahvan kanavan käyttäjä siirtää yhtäaikaan, sitä enemmän häiriöitä aiheutuu kaikille käyttäjille ja järjestelmän kokonaissuorituskyky laskee. Heikot kanavat vastaavasti aiheuttavat vähemmän häiriöitä muissa kanavissa, joten heikon kanavan omaavia käyttäjiä voidaan päästää siirtämään samaan aikaan tämän aiheuttamatta merkittävää järjestelmän suorituskyvyn laskua [KuQ03].

Simulaatiotulokset näyttävät myös, että UPF toimii pienillä kuormilla erittäin hyvin, mutta isommilla taas sen suorituskyky heikkenee huomattavasti. Koska UPF tarvitsee vain vähän tietoja käyttäjältä skedulointipäätöstä varten, sen etuna on kevyt implementaatio sekä tukiasemassa että käyttäjän päätelaitteessa. UPF toimii siten, että vain vahvin käyttäjä kussakin aikavälissä siirtää, mutta monta heikkoa käyttäjää siirtävät samanaikaisesti. PFS:n perusversiossa heikkojen käyttäjien samanaikaista siirtoa ei huomioida lainkaan, vaan se keskittyy vain vahvimman käyttäjän valitsemiseen. Käyttäjän valintakriteeri on kuitenkin sama PFS:n ja UPF:n tapauksissa: vahvin käyttäjä on sellainen,

jonka hetkellisen siirtonopeuden (R_i) suhde keskimääräiseen siirtonopeuteen (R_{av}) on suurin (R_i/R_{av}).

Downlink-suunnan skeduloinnissa tukiaseman tulee päättää, mille käyttäjälle se ensimmäiseksi lähettää verkosta saapunutta dataa. Downlink-suunnassa paras järjestelmän suorituskyky saavutetaan valitsemalla dataa vastaanottavaksi käyttäjäksi sellainen, jolla on parhaat kanavaolosuhteet päätöksentekohetkellä, toisin sanoen käytössä on vahva kanava. Lisäksi downlink-suunnassa saadaan paras suorituskyky, kun vain ja ainoastaan yksi käyttäjä siirtää kerrallaan, mikä siis poikkeaa uplink-suunnan simulaatioiden tulosten mukaan kaikkein optimaalisimmasta uplink-suunnan skeduloinnin periaatteesta [KuQ03], jossa heikon kanavan omaavat siirtävät ryhmänä. Tästä seuraa se, että uplink- ja downlink-suuntien skedulointialgoritmit eivät voi olla identtisiä, vaan niille täytyy valita erilaiset toteutusstrategiat, jotta järjestelmän kokonaissuorituskyky saadaan mahdollisimman optimaaliseksi.

3.5 Kanavatiilojen keinotekoinen stimulointi

Koska kanavien tilat vaihtelevat paljon langattomassa ympäristössä, on todennäköistä, että löytyy aina yksi kanava, jonka kapasiteetti saavuttaa huippuarvon. Mikäli järjestelmä pystyy aina valitsemaan käyttäjän, jonka kanavalla on huippuarvo, järjestelmän kokonaissuorituskyky tulee olemaan myös erittäin korkea. Toisaalta, mikäli ympäristö onkin melko vakaa, jolloin esimerkiksi kaikki käyttäjät ovat näköyhteyden päässä tukiasemasta eivätkä liiku juurikaan, häipyminen voi olla hidasta. Tällaisessa vakaassa ympäristössä kanavien kapasiteettien vaihtelevuus ei siis ole välttämättä kovin suurta, jolloin järjestelmän suorituskyky voi jäädä alle odotustason. Mikäli kanavien häipyminen tapahtuu erittäin hitaasti, mutta toisaalta päätelaitteiden sovellukset vaativat verkolta nopeaa datan siirtämistä, järjestelmä ei voi odottaa kovin kauaa, että käyttäjän kanava saavuttaisi vahvimman mahdollisen tilan. Järjestelmän on tällöin välittömästi annettava käyttäjälle siirtovuoro, jolloin kanavan kapasiteetti ja koko järjestelmän suorituskyky eivät välttämättä ole parhaat mahdolliset [VTL02]. Hitaan häipymisen ympäristö tuottaa siis erilaisia haasteita langattoman järjestelmän suorituskyvyn kannalta.

Vakaan ympäristön heikkoa suorituskykyä voidaan parantaa keinotekoisella radiosignaalien stimuloinnilla, jonka ansiosta kanavien tilat vaihtelevat voimakkaammin ja saaden näin aikaiseksi kanavien nopeaa häipymistä hitaan häipymisen sijaan [VTL02]. Yksi tällainen keinotekoista stimulointia hyödyntävä menetelmä on opportunistinen keilamuotoskedulointimalli [LCS01], joka perustuu usean antennin käyttöön tukiasemassa. Kukin antenni lähettää samaa dataa tai signaalia samalla taajuudella, mutta eri voimakkuuksilla ja eri vaiheissa. Näin saadaan aikaiseksi keinotekoista signaalin – ja siis kanavatiilojen – nopeaa häipymistä, joka jälleen mahdollistaa järjestelmän suorituskyvyn kasvun [VTL02]. Jotta nopean häipymisen lisääntyminen voidaan realisoida nopeampina tiedonsiirtonopeuksina, tarvitaan opportunistista skedulointia valitsemaan näin keinotekoisesti saadut vahvat kanavat siirtoa varten. Keinotekoisesta stimuloinnin huonona puolena on se, että käyttäjäkohtaisia laatuvaatimuksia on vaikea ottaa huomioon stimuloinnin käyttäjäkohtaisuudettoman luonteen vuoksi [VTL02]. Stimulointi koskee aina kaikkia käyttäjiä, jolloin nopean häipymisen vaikutuksen kohdentaminen yksittäiseen käyttäjään ei ole mahdollista.

Opportunistinen keilamuotoskedulointimalli siis aiheuttaa keinotekoisesti satunnaisvaihtelua tilanteessa, jossa on vain vähän luonnollista häipymistä. Malli perustuu monen antennin tukiasemaan, jossa keinotekoinen satunnaisvaihtelu koskee vain downlink-suuntaa. Mallissa kukin antenni lähettää samaa signaalia, mutta signaalien vaihe ja vahvistus vaihtelevat keinotekoisesti sekä satunnaisesti antennittain. Näin saadaan aikaiseksi kanavien vaihtelevuuden nopeutumista ja suurenemista, jotka voidaan hyödyntää suurempina tiedonsiirtonopeuksina. Opportunistisessa keilamuotoskedulointimallissa käyttäjillä on vain yksi antenni, joka vastaanottaa useasta tukiaseman antennista eri voimakkuuksilla ja vaiheilla lähetetyn signaalin. Käyttäjät mittaavat kanaviensa ominaisuuksien arvoja, laskevat mittaustulosten perusteella SINR-arvot, ja lähettävät tulokset tukiasemalle erityisillä pilottisignaaleilla. Seuraavassa vaiheessa tukiasema vertaa lähetetyn signaalin vaihetta ja tehoa käyttäjän mittaamaan kanavan voimakkuuteen (tai vahvistukseen). Ideaalisessa tilanteessa käyttäjän SINR-arvo vastaa arvoa, joka saadaan siirretyn signaalin vaiheesta ja tehosta. Käyttäen tätä tietoa hyödyksi on mahdollista maksimoida siirretyn signaalin SINR. Kun järjestelmässä on paljon käyttäjiä, on todennäköisempää löytää käyttäjä, jonka kanavavahvistus vastaa voimakkuutta ja vaihetta, joka aikaansaatii signaalille useista antennista. Tällöin järjestelmä kykenee siirtämään aina optimaalisella suorituskyvyllä, vaikka signaalin voimakkuus ja vaihe muuttuu sa-

tunnaisesti (opportunistinen keilamuoto), käyttäen hyväksi opportunistista skedulointia valitsemaan vahvin kanava.

Yksi suuri etu opportunistisella keilamuotomallilla verrattuna moniin muihin usean antennin järjestelmiin on se, ettei mobiilipäätelaitteisiin tarvita minkäänlaisia muutoksia, ei laitteisto- eikä ohjelmistotasolla. Ainoa järjestelmään tehtävä muutos on lisäantennien lisääminen tukiasemaan [VTL02]. Monissa muissa monen antennin järjestelmissä suorituskyvyn kasvu toteutetaan signaalien älykkäällä koodauksella ja erilaisten signaaliprosessien lisäämisellä sekä lähetin- että vastaanotinpäissä, jolloin sekä tukiasemien että päätelaitteiden toteutuksista voi tulla raskaita [VTL02].

Opportunistinen keilamuotomalli siis yhdistää useiden antennien käytön aiheuttaman tiedonsiirtokanavien nopean häipymisen ja monikäyttäjaverkon opportunistisen skeduloinnin hyödyt. Monikäyttäjaverkon opportunistisena skedulointialgoritmina käytetään PFS-algoritmia, jota hyödynnetään reiluuden saavuttamiseksi käyttäjien kesken. Opportunistinen keilamuotoskedulointi-ratkaisu keskittyy ainoastaan monikäyttäjäympäristöön, eikä huomioi p2p (point-to-point) tiedonsiirron tapausta [VTL02].

3.6 Skedulointiolosuhteiden mallintaminen

Skedulointialgoritmeja voidaan tutkia erilaisilla siirtokanavamalleilla, jotka kuvaavat siirtokanavan yleisiä olosuhteita. Yksi tapa mallintaa näitä olosuhteita on jakaa skedulointiongelma kahteen osaan: saapumismalliin (arrival model) ja kanavaprosessimalliin (channel process model) tukiaseman ja käyttäjän välillä [AND05].

Saapumismallin tapauksessa skedulointiongelma keskittyy viiveeseen ja jonoon, joita syntyy siirtokanavalla radiorajapinnassa. Saapumismalli voidaan jakaa edelleen kahteen alamalliin: loputtomaan datavarastoon (infinite backlog data) sekä ulkoiseen saapumisprosessiin (external arrival process).

Loputon datavarasto on saapumismallin alamalli, jossa käyttäjillä on aina dataa siirrettävänä. Tässä mallissa käyttäjät siirtävät jatkuvasti ja tauoitta, dataa nopeudella, joka vastaa tai on pienempi kuin heidän siirtokanavansa kaistanleveys eli kapasiteetti. Toisin

sanoen datavirta on jatkuva ja siirtotien ei tarvitse puskuroida dataa missään vaiheessa, eikä tällöin viiveitä ja jonoja ilmaannu milloinkaan. Loputon datavarasto -malli on yksinkertainen malli, jonka avulla on nopeaa ja helppoa tutkia skedulointialgoritmin ominaisuuksia.

Ulkoinen saapumisprosessi on toinen saapumismallin alamalli, joka taas huomioi viiveet ja jonot skedulointipäätöksissä. Käyttäjät voivat joutua puskuroimaan dataa, mikäli siirtokanavan kaistanleveys on pienempi kuin mitä datan lähettäminen edellyttää. Tällöin dataa täytyy puskuroida jonoon viiveitä aiheuttaen. Toisaalta käyttäjällä ei välttämättä edes ole dataa siirrettävänä skedulointipäätöksen hetkellä, jolloin skedulointialgoritmin pitää huolehtia myös siitä, ettei tällaista käyttäjää skeduloida siirtämään lainkaan. Tällöin valitaan sen sijaan siirtämään toinen käyttäjä, jolla on todellinen datan siirron tarve. Ulkoinen saapumisprosessi kuvaa realistisempaa mallia siirtokanavasta kuin loputon datavarasto -malli, mutta sen matemaattinen ja formaalinen kuvaaminen on monimutkaisempaa kuin loputtoman datavarasto -mallin ja sen käyttäminen skedulointialgoritmin simuloinnissa vaatii enemmän työtä.

Kanavaprosessimallilla mallinnetaan siirtokanavan tilan vaihtelujen vaikutusta skedulointiin ja se huomioi käyttäjien liikkuvuuden ja muut aikariippuvaiset tekijät, jotka vaikuttavat siirtokanavan tiloihin. Kanavaprosessimallilla mallinnetaan nimenomaan sitä, mitä tapahtuu käyttäjän ja tukiaseman välisessä siirtokanavassa ja se voidaan myös jakaa kahteen alamalliin:

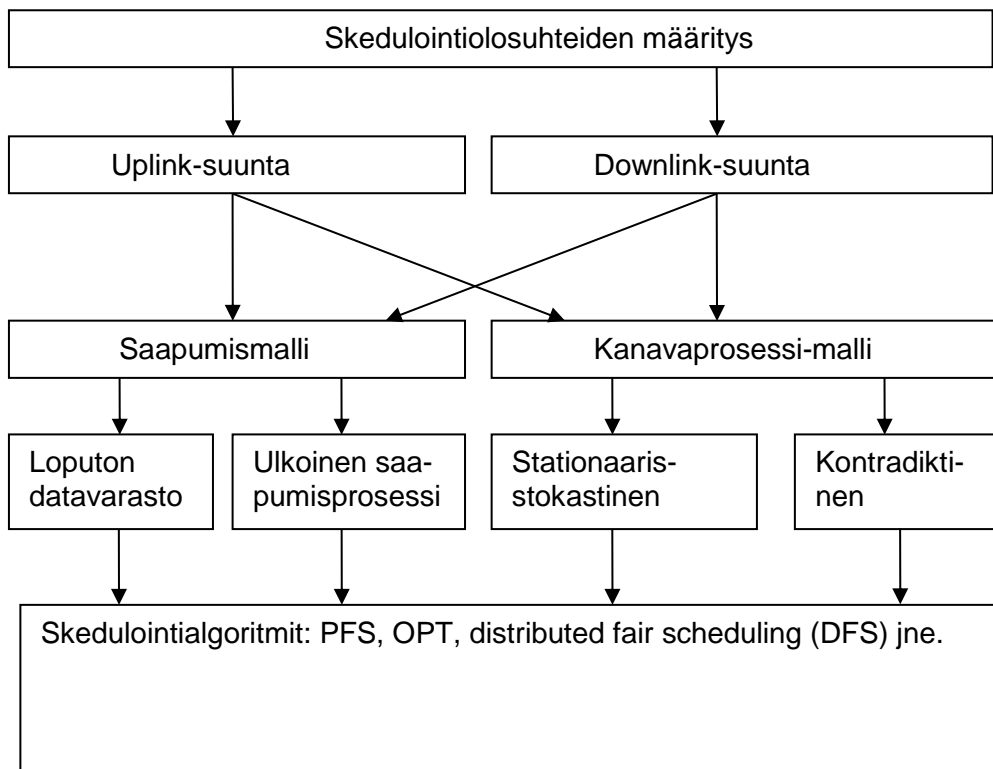
1) Stationaaris-stokastinen alamalli, jossa käyttäjät eivät liiku, joten sitä voidaan käyttää kuvaamaan kanavien hidasta häipymistä. Vahvin kanava valitaan stokastisella eli satunnaisella prosessilla käyttäjien keskuudesta. Se on yksinkertainen malli ja sillä on helppo tutkia skedulointiongelmia ilman suuria mallintamistöitä.

2) Kontradiktista (Adversarial) alamallia käytetään, kun halutaan tutkia nopean häipymisen vaikutusta skeduloinnin suorituskykyyn. Mallissa huomioidaan kanavan aika-muuttuvat tekijät, jolloin kullakin ajan hetkellä kanavatilat ja näin muodoin tiedonsiirtonopeudet voivat muuttua satunnaisesti. Kontradiktinen alamalli mallintaa haasteellisinta mahdollista tilannetta ja luo luonnollisesti suuria paineita skedulointialgoritmile, johtuen satunnaisesta ja jatkuvasta muutoksesta. Kontradiktinen kanavaprosessimalli on

pohja realistiselle skedulointialgoritmillemme, koska se mallintaa käyttäjien liikkuvuuden, signaalin varjostuminen ja monitie-etenemisen vaikutusta siirtokanavaan.

Kun skedulointialgoritmeja kehitetään ja arvioidaan, täytyy päättää mitä neljästä yllä mainitusta alammalleista käytetään mallintamaan sekä jono- että ja viivetilanteita ja siirtokanavan tilaa. Jos arvioinnin halutaan olevan nopeaa ja yksinkertaista, loputon datavara-asto -saapumismalli ja stationaaris-stokastinen kanavaprosessimalli ovat vahvoja vaihtoehtoja. Mikäli halutaan mallintaa ja simuloida realistisempia langattoman tiedonsiirtojärjestelmä tilanteita, tulee valita ulkoinen saapumisprosessimalli ja kontradiktinen kanavaprosessimalli.

Kuva 4 esittää yllämainitut skedulointimallit kaaviokuvana. Kun jonkin skedulointialgoritmin, kuten PFS:n tai OPT:n, suorituskykyä halutaan tutkia simuloimalla, valitaan kaavion mukaisesti tiedonsiirtosuunta, sopiva saapumismalli ja kanavaprosessimalli kuvastamaan tiedonsiirron olosuhteita, ja luodaan vastaava skedulointialgoritmisimulointiympäristö.



Kuva 4: Skedulointiolosuhteiden mallintaminen.

4 Hajautettu opportunistinen skedulointi

Hajautettu skedulointi tarkoittaa sitä, ettei järjestelmässä ole keskitettyä skeduloinnin päätöksentekopistettä, kuten tukiasemaa, vaan kukin käyttäjä päättää itsenäisesti siirtämisestä. Käyttäjillä on jokin hajautettu skedulointialgoritmi, jonka perusteella nämä päättävät paikallisesti kenen siirtovuoro on kyseisellä hetkellä. Myös paikallisesti suoritettujen skedulointialgoritmien täytyy huomioida koko järjestelmän suorituskyky ja käyttäjien välinen reiluus; tällöin käyttäjien dynaamisesti muuttuvat kanavaolosuhteet pitää huomioida.

Pelien matemaattinen teoria eli peliteoria tutkii erilaisia kilpailutilanteita ja sitä voidaan soveltaa hajautetun skeduloinnin algoritmeissa. Kilpailutilanteita on paljon ja ne vaihtelevat tavallisten pelien, kuten shakin ja pokerin [Mor94], pelaamisesta aina yhteiskunnallisesti merkittäviin alueisiin, kuten taloudelliseen ja sotilaalliseen toimintaan, joissa päätöksenteko on usein peliin rinnastettava tilanne. Peliteoria kehitettiin alun perin mallintamaan konfliktitilanteita kylmän sodan aikana [LuR57], kuten ydinsodan vaaratilanteita, mutta sen soveltaminen on laajentunut monille muille yhteiskunnallisille alueille.

Koska hajautetuissa skedulointimalleissa suuri joukko käyttäjiä tekee itsenäisesti ja näin myös paikallisesti päätöksensä tiedonsiirron aloittamisesta ilman keskitettyä koordinaointia, peliteorian formaalit mallit ovat sovellettavissa myös hajautetuissa skedulointialgoritmeissa. Hajautettua skedulointia ja peliteoriaa voidaan soveltaa myös LTE:n pienten solujen järjestelmissä, joissa vallitsee toisaalta kilpailu ja toisaalta hierarkia makro- ja mikrosolujen välillä skedulointipäätöksenteossa.

4.1 Hajautettu vs. keskitetty skedulointi

Keskitetyssä skeduloinnissa tukiasema siis päättää aina, kuka käyttäjistä valitaan siirtämään näiden kanavatilamittaustietojen vertailun perusteella. Keskitetyssä skeduloinnissa tukiasema saattaa lisäksi ohjata käyttäjien lähetystehojen voimakkuuksia, jotta käyttäjien lähetystehojen tasot olisivat mahdollisimman optimaalisesti jakautuneina käyttäji-

en kesken. Tällöin tukiaseman ja käyttäjien päätelaitteiden skedulointialgoritmien toteutusten täytyy olla yhteensopivia ja niiden täytyy kyetä jakamaan skedulointiin liittyvää informaatiota keskenään. Hajautetussa opportunistisessa skeduloinnissa taas käyttäjät päättävät itsenäisesti datan siirtämisestä ja lähetystehonsa säädöstä. Tällöin päätökset perustuvat kunkin käyttäjän omiin paikallisiin mittaustietoihin sekä skedulointialgoritmiin, joka hyödyntää tätä mittaustietoa. Keskitetty skedulointi lisää signaalintuottoa käyttäjän ja tukiaseman välillä, koska tukiaseman täytyy lähettää ohjaussignaaleja käyttäjille (esim. lähetystehon säätämisohjeita) sekä vastaanottaa mittaustietoja käyttäjien kanavien tiloista. Hajautetun skeduloinnin etuna on tämän ylimääräisen signaalintuoton puuttuminen tukiaseman ja käyttäjien väliltä sekä tukiaseman skedulointialgoritmin implementaation yksinkertaisuus tai puuttuminen kokonaan. Hajautetussa skeduloinnissa käyttäjillä on taas monimutkaisempi skedulointialgoritmi käytössään kuin keskitetyn skeduloinnin tapauksessa, mikä lisää käyttäjien päätelaitteiden kuormitusta. Keskitetyn skeduloinnin on toistaiseksi nähty tuovan yleisesti paremman tiedonsiirtokapasiteetin verrattuna hajautettuun skedulointiin.

Langattomat tiedonsiirtojärjestelmät sisältävät suuren määrän parametreja, joita järjestelmän täytyy jatkuvasti säätää kanavissa tapahtuvien jatkuvien muutosten tähden, jotta järjestelmä saavuttaisi mahdollisimman optimaalisen toimintakyvyn [MaW01]. Mikäli parametrien säädöt tehdään pelkästään tukiasemassa, on tämä aikaa vievää ja operointi saattaa lisäksi vaatia operaattorin henkilökunnan manuaalista työpanosta. Eräs lähestymistapa ongelmaan on sallia yksittäisten käyttäjien tekemät autonomiset parametrien säädöt, jotka perustuvat käyttäjien paikallisiin parametritietoihin. Näin voidaan saavuttaa järjestelmä, jossa raskas keskitetty kontrolli korvataan kevyemmällä ja skaalautuvammalla tavalla langattoman verkon operoimiseksi. Peliteoria tarjoaa työkaluja tällaiseen hajautettuun radioparametrien säätöön [MaW01]. Peliteorian mukaan monen pelaajan pelissä on saavutettu tasapaino, kun kenenkään pelaajan omaa etua ei voida enää kasvattaa aiheuttamatta kustannuksia, jotka kumoavat lisäedun hyödyt.

Yksinkertaistaen, peliteoreettisia termejä käyttäen, pelin pelaajan etu ja kustannukset vastaavat radioverkossa käyttäjän tiedonsiirron nopeutta ja tehon kulutusta [XSC01]. Toisin sanoen, mobiilin radioverkon käyttäjän saavuttama hyöty on sitä suurempi, mitä suurempi on tiedonsiirron nopeus. Ja toisaalta, mitä suurempi tiedonsiirron nopeus on,

sitä enemmän vaaditaan tehoa, jolloin käyttäjän päätelaitteen patterit kuluvat nopeammin loppuun ja muiden käyttäjien tiedonsiirtokanavien häiriöt lisääntyvät.

4.2 Peliteoria

Peliteoria tutkii tilanteita, joissa usean jäsenen järjestelmässä kukin jäsen (pelin pelaaja) tekee itsenäisiä päätöksiä omasta strategiastaan sen perusteella, miten ne hyödyntävät tätä yksittäistä jäsentä. Toisin sanoen pelaajat pyrkivät toimimaan pelissä itsekkäistä lähtökohdista maksimoidakseen oman etunsa muista pelaajista välittämättä. Mikäli pelaajien välillä ei käydy minkäänlaista keskustelua tai neuvottelua ennen pelaajien tekemiä itsenäisiä päätöksiä, Nashin peliteorian mukaan peliä kutsutaan ei-yhteistoiminnalliseksi peliksi. Jos pelaajien välillä on yhteistyötä ennen pelaajan tekemää päätöstä, peliä kutsutaan yhteistoiminnalliseksi [Sie08].

Peli voi olla myös nollasummapeli, jolloin yhden pelaajan hyöty nähdään toisen (tai muiden) pelaajan tappiona, tai ei-nollasummapeli, jolloin pelaajien tekemät ratkaisut voivat hyödyttää kaikkia pelaajia [LuR57].

Peliteoria tarjoaa formaaleja malleja siitä, miten pelaajien joukko kuvataan, mitä strategivaihtoehtoja pelaajilla on pelissä ja kuinka pelaajan kohtaamat hyödyt ja haitat mallinnetaan erilaisin hyöty- ja kustannusfunktioin.

Nashin tasapaino

Yksi tärkeimmistä peliteorian malleista on Nashin tasapainoyhtälö: pelissä on olemassa strategioiden joukko, joissa kukaan pelaajista ei muuttaisi strategiaansa edes siihen pystyessään, samalla kun muut pelaajat pysyvät omissa strategioissaan. Toisin sanoen strategiaansa muuttamalla pelaajat eivät laske saavuttavansa enää lisähyötyä itselleen [Sie08]. Pelaajien pitää siis laskea hyödyt ja haitat ennen strategiansa muuttamista Nashin tasapainoyhtälön mukaisessa tasapainotilanteessa.

Vangin dilemma on klassinen esimerkki peliteoriasta ja Nashin tasapainoyhtälöstä, jossa kyse on ei-yhteistoiminnallisesta pelistä. Siinä poliisi vangitsee kaksi rikollista ja

kuulustele näitä erikseen. Poliisilla on lisäksi todisteet tuomita molemmat rikolliset pienemmästä rikoksesta, mutta se haluaa heidän tunnustavan vakavamman rikoksen. Pidätys tapahtuu ennakkoon varoittamatta, jolloin vangit eivät ehdi sopia keskenään vastauksiaan kuulusteluissa vakavamman rikoksen tapauksessa. Jos kumpikaan vankeista ei lavertele toisistaan kuulusteluissa, toisin sanoen kumpikaan ei tunnusta toisen syyllisyyttä vakavampaan rikokseen, saavat molemmat vangit 1 vuoden vankeusrangaistuksen. Poliisi tarjoaa kuitenkin vangeille palkinnon, mikäli vanki tunnustaa toisen vangin syyllisyyden vakavampaan rikokseen. Jos vanki lavertelee toisesta vangista, hän pääsee vapaaksi ja toinen vanki taas tuomitaan viiden vuoden vankeuteen. Jos molemmat vangit lavertelevat toisistaan, kummatkin saavat kolmen vuoden tuomion.

Vankeja siis kuulustellaan erikseen ja heidän on päätettävä kuulustelutilanteessa itsenäisesti, mitä he päättävät tehdä. Matriisi kuvassa 5 esittää vankien vaihtoehdot. Jos vangit eivät luota toisiinsa, on todennäköistä, että syytetyt valitsevat vaihtoehdon, jossa molemmat lavertelevat. Vanki A tietää vangin B itsekkääksi ja suulaaksi henkilöksi ja voi näin pitää todennäköisenä, että B lavertelee tästä, mikä taas saa A:n päätymään siihen, että haluaa itsekin laverrella B:stä, jottei B pääsisi helpommalla. Näin molemmat vangit valitsisivat vaihtoehdon, jossa molemmat lavertelevat ja saisivat koken vuoden rangaistuksen, koska se lyhentäisi heidän tuomiotaan kahdella vuodella. Tämä vaihtoehto on tilanne, jossa kumpikaan ei voi lisätä hyötyään eli vähentää rangaistustaan muuttamalla strategiaansa [MaW01], [Sie08], ja näin on saavutettu Nashin tasapainoyhtälön mukainen tasapainotila. Nashin tasapainoyhtälön määritelmää voidaan hyödyntää hajautetussa skedoloinnissa käyttäjien välillä esimerkiksi siten, että käyttäjien päätelaiteiden tehonsäädön käytölle määritellään jokin optimiarvo, jossa koko järjestelmä on tasapainossa.

	Vanki B		
		Vaikene	lavertele
Vanki A	vaikene	1,1	5,0
	lavertele	0,5	3,3

Kuva 5: Vangin dilemma.

Stackelbergin ja Stackelberg-Nash -kilpailumallit

Stackelberg- ja Stackelberg-Nash -kilpailumallit ovat strategisia pelejä, joita käytetään erityisesti talouselämässä duopoli-markkinatilanteen mallintamisessa. Duopoli on tilanne, jossa markkinaa hallitsevat ainoastaan kaksi yhtä vahvaa osapuolta. Stackelbergin kilpailussa duopolitilannetta on muutettu siten, että osapuolina ovat markkinajohtaja ja seuraaja [Ste08]. Toisin sanoen osapuolet eivät olekaan enää yhtä vahvoja. Stackelbergin kilpailussa markkinajohtaja tekee aina ensimmäisenä siirron, joka voi olla esimerkiksi uuden tuotteen lanseeraus ja seuraaja tekee oman vastasiirtonsa markkinajohtajan toimenpiteisiin perustuen [Ste08]. Stackelbergin kilpailu on taas osa Stackelberg-Nash -kilpailumallia, jossa on yksi johtaja, mutta useampi kuin yksi seuraaja [Ste08]. Stackelberg-Nash -mallissa on kahden tason kilpailuja: johtaja vastaan seuraajat ja seuraajien välinen keskinäinen kilpailu. Markkinajohtajan pitää ymmärtää mahdollisimman hyvin toimenpiteidensä vaikutukset kilpailijoihinsa eli seuraajiinsa, jotta se itse saavuttaisi mahdollisimman suuren hyödyn. Tämän lisäksi seuraajat kilpailevat keskenään siitä, kuka saavuttaisi suurimman hyödyn uudesta tilanteesta, joka on käynnistynyt markkinajohtajan aloittamista toimenpiteistä.

Stackelberg-Nash -kilpailumalli muistuttaa pienten solujen radioverkkojärjestelmien tilannetta, jossa on kaksi verkon osapuolta, makrosolut sekä sekundaarisolut ja jotka kilpailevat tiedonsiirtoressurssien käytöstä omien käyttäjiensä hyödyksi. Tilanne on samankaltainen Stackelberg-Nashin -kilpailumallin kanssa siinä mielessä, että makrosolut päättävät ensisijaisesti resurssien käytöstä ja sekundaarisolut tekevät toimenpiteensä makrosolujen päätösten perusteella.

4.3 Peliteoria hajautetussa skeduloinnissa

Peliteorian tarjoamia formaalisia eli matemaattisia malleja voidaan hyödyntää luontevasti erityisesti hajautetuissa skedulointialgoritmeissa. Hajautetussa langattomassa järjestelmässä käyttäjät kilpailevat keskenään rajallisista tiedonsiirtoressurseista eli radiotaajuuksien käytöstä. Pienten solujen järjestelmä taas koostuu makrotukiasemasta ja useista sekundaaritukiasemista, jotka kilpailevat keskenään radiotaajuuksien käytöstä,

aivan kuten langattoman verkon käyttäjätkin, mutta joissa makrotukiasemalla on vahvempi valta päättää resurssien käytöstä kuin sekundaarisoluilla [XYJ12].

Hajautetussa käyttäjäkohtaisessa skeduloinnissa voidaan hyödyntää esimerkiksi Nashin tasapainoteoriaa, koska tällaisessa järjestelmässä on joukko keskenään kilpailevia samanveroisia jäseniä. Tässä tapauksessa keskenään kilpailevat jäsenet ovat langattoman verkon käyttäjiä, jotka pyrkivät itsekkäästi maksimoimaan vain oman hyötynsä eli päästä siirtämään dataa mahdollisimman paljon muista käyttäjistä välittämättä. Tällöin Nashin tasapainoteorian kuvaama tilanne vastaa hyvin hajautetun skeduloinnin tilannetta ja sen matemaattisia malleja voidaan vastaavasti hyödyntää skedulointialgoritmeissa. On osoitettu, että peliteorian periaatteita soveltaen on mahdollista saavuttaa käyttökelpoisia tuloksia hajautetulle satunnaiselle siirtovuoron saannille ja tehon säädölle [MaW01].

Pienten solujen järjestelmissä taas Stackelberg-Nash -peli, joka perustuu siihen, että pelissä on johtaja ja seuraajat [Ste08], voi olla hyödyllinen tapa soveltaa peliteoriaa skedulointialgoritmeissa. Pienten solujen järjestelmissä skedulointipäätös voidaan hajauttaa makrosolun ja sekundaarisolujen kesken, mutta makrosolu päättää aina ennen sekundaarisoluja skeduloinnista [XYJ12]. Toisin sanoen, skedulointipäätösten suhteen makrosolu on johtaja ja sekundaarisolut seuraavat sitä. Tällöin Stackelberg-Nash -pelin mukainen kilpailutilanne vastaa hyvin pienten solujen järjestelmien skedulointipäätösten hierarkiaa ja kilpailutilannetta makro- ja sekundaarisolujen kesken, jolloin sen formaaleja malleja voidaan hyödyntää tukiasemien skedulointialgoritmien toteutuksien kehittämisessä.

4.3.1 Peliteorian soveltaminen hajautettuun tehonsäätöön

Tehonsäätö on tärkeä työkalu radiorajapinnan resurssien hallinnassa, koska se vaikuttaa sekä käyttäjien ja tukiasemien välisiin häiriöihin että järjestelmän kokonaiskapasiteettiin. Lisäksi tehonsäädöllä on kriittinen rooli riittävän SIR-tason ylläpidossa [HKH08].

Nashin tasapainoyhtälöä voidaan soveltaa hajautetuissa järjestelmissä opportunistisessa skeduloinnissa, koska tällaisessa järjestelmässä kukin käyttäjä pyrkii saamaan itsekkäas-

ti mahdollisimman paljon datan siirtovuoroja lisäämällä omaa lähetystehoaan verrattuna muihin järjestelmän käyttäjiin. Mikäli yksi käyttäjä lisää jatkuvasti lähetystehoaan ja muut taas pysyisivät jatkuvasti pienemmällä lähetysteholla, yksi käyttäjä saisi kaiken siirtokapasiteetin omaan käyttöönsä ja tällöin esimerkiksi reiluus ei voisi toteutua. Jotta tätä ei tapahtuisi, kullekin käyttäjälle täytyy määrittää myös kustannus lähetystehon lisäykselle. Tietystä vaiheesta kustannuksen haitta ylittää lähetystehon lisäyksen tuoman hyödyn, jolloin käyttäjän ei enää kannata lisätä lähetystehoaan. Kun kaikki käyttäjät ovat samassa tilanteessa, toisin sanoen, kun yhdenkään käyttäjän ei kannata lisätä lähetystehoaan enempää, hajautetun järjestelmän voidaan ajatella saavuttaneen Nashin tasapainoyhtälön mukaisen tasapainon [HKH08].

Seurauksena suuresta tehon käytöstä verrattuna muihin käyttäjiin, käyttäjän kohtaama kustannus voi olla siirtokanavan laadun heikkeneminen. SIR-parametri on käyttökelpoinen parametri kuvaamaan siirtokanavan laatua tässä tapauksessa, koska se sisältää sekä tehontason että kanavavahvistuksen komponentteinaan. SIR toimii tässä tapauksessa hyötyfunktion kuvaajana ja tehonkäyttö taas kustannuksena, jolloin peliteorian mallien avulla voidaan kehittää ratkaisu, jossa määritellään SIR:n ja tehonkäytön arvoille rajat, joiden puitteissa järjestelmä toimii mahdollisimman optimaalisesti. SIR:iä ei saa päästää laskemaan alle tietyn rajoitetun arvon, koska tällöin tiedonsiirtokanavan laatu (QoS) putoaa kelvottomaksi eli käyttäjän kokema hyöty laskee. Käyttäjä välttää SIR:n laskeamisen alle hyväksytyin tason lisäämällä lähetystehoa ja saaden näin lisää kaistaa itselleen. Samalla kuitenkin lisäteho saattaa häiritä muita käyttäjiä aiheuttaen lisäkustannuksia järjestelmälle. Tuloksena liiallisesta tehonkäytöstä on tällöin se, että järjestelmä kokonaisuutena ei ole enää tasapainossa. Tämä merkitsee sitä, että käyttäjät eivät voi kasvattaa omaa lähetystehoaan rajattomasti tällaisessa järjestelmässä [XSC01]. Näin ollen käyttäjän pitääkin laskea tehotasoaan, mutta kuitenkin niin että SIR-arvo pysyy edelleen riittävän hyvänä. Tällainen tehonsäätökontrolli toisaalta siis mahdollistaa käyttäjien itsekään lähetystehon käytön, mutta toisaalta sen rajat tulevat vastaan järjestelmän kokonaistasapainon järkkyyssä.

4.3.2 Peliteorian sovellus Aloha järjestelmässä

Aloha [Abr70] on yksi tunnetuimmista olemassa olevista käyttäjien satunnaiseen järjestelmään pääsyyn perustuvista protokollista. Alohan järjestelmään pääsyratkaisu perustuu peräkkäisiin aikaviipaleisiin, joiden kautta käyttäjät pääsevät käyttämään järjestelmän resursseja. Kuitenkin vain yksi käyttäjä kerrallaan voi varata yhden aikaviipaleen ja päästä näin siirtämään dataa. Alohan skedulointi ei siis perustu opportunistiseen skedulointiin, mutta käyttäjät tekevät itsenäisiä ja siis hajautettuja päätöksiä siirtovuoron saannista.

Mikäli kaksi käyttäjää varaa samanaikaisesti aikaviipaleen Aloha-järjestelmässä, kumpikaan ei pääse siirtämään vaan ne joutuvat odottamaan seuraavaa aikaviipaletta. Tämän seurauksena Aloha-järjestelmässä tapahtuu paljon uudelleenlähetyksiä, jotka taas kuluttavat turhaan järjestelmän resursseja. Aloha-järjestelmässä käyttäjät ovat luonteeltaan itsekkäitä ja jokainen käyttäjä pyrkii saamaan mahdollisimman monta siirtovuoroa eli varaamaan aikaviipaleita niin monta kuin mahdollista. Täten järjestelmässä pitää olla sääntö, jonka perusteella päätetään siirtäjä ja ajankohta aikaviipaleen varaukselle.

Kun ongelmaa lähestytään peliteoreettisesta näkökulmasta ja järjestelmään lisätään hyöty- ja kustannustekijät aikaviipaleiden varaamistilanteille, saavutetaan hyvä esimerkki siitä, kuinka peliteoriaa voidaan soveltaa hajautetussa järjestelmässä [MaW01].

Kun käyttäjät tietävät varaamisen hyöty- ja kustannustekijät, ne voivat päättää itsenäisesti kannattaako niiden varata aikaviipale vai ei. Alohan satunnaisen järjestelmään pääsyn ongelma (samanaikainen varaus) voidaan ratkaista luomalla sääntö, jossa käyttäjää rangaistaan siirtonsa jälkeisellä aikaviipaleella. Toisin sanoen käyttäjä ei siirrä seuraavalla vuorolla, koska se maksaisi sille liian paljon [MaW01].

Toinen ongelma Aloha-järjestelmässä on se, kuinka hallita käyttäjien tehon säätöä. Aloha-järjestelmän täytyy säätää kunkin käyttäjän tehotasoja. Kaikki käyttäjät haluavat ylläpitää mahdollisimman korkeaa tehotasoa, jotta niiden signaali olisi voimakkain ja ne saisivat suurimman siirtokaistan. Käyttäjien välille tarvitaan yhteistyötä päättämään kunkin käyttäjän optimaalinen tehotaso. Peliteoriaa soveltaen voidaan luoda tehonsäädön algoritmi jokaiselle käyttäjälle, jotka kykenevät tällöin laskemaan itsenäisesti hyö-

dyn ja kustannuksen käyttämälleen tehotasolle [MaW01]. Ylläpitääkseen korkeaa tehon kulutusta käyttäjä kohtaa kustannuksia ja näin ollen tämän kannattaa laskea tehotasoaan.

4.3.3 Peliteoria ja kognitiiviset radiot

Kognitiiviset radiojärjestelmät kykenevät kohdistamaan radioresurssiensa käytön uudelleen itsenäisesti, automaattisesti ja dynaamisesti tilanteen mukaan. Toisin kuin monoliittinen perinteinen tukiasema, jolla on pysyvä peitto, teho jaettuna tietyllä tavalla pysyvästi yli tämän peiton eikä tätä konfiguraatiota voi muuttaa ilman ihmisen väliintuloa, kognitiiviset radiojärjestelmät oppivat itsenäisesti ympäristön muutoksista ja kohdentavat resurssejaan uudelleen vastaamaan uutta tilannetta [NRG04]. Kognitiivisen radioteknologian hyödyntäminen pienten solujen järjestelmien, kuten femtosolujärjestelmien, resurssien hallinnassa on tuottanut lupaavia tutkimustuloksia, joissa hyödynnetään myös peliteorian tarjoamia formaaleja malleja [AKG11], XYJ12]. Vaikka tutkimustulokset ovat lupaavia kognitiivisen radion tuottaman hyödyn suhteen, käytännössä kognitiivisen radion toteutuksia ei ole toistaiseksi vielä nähty toimivissa mobiileissa laajakaistaverkoissa [AKG11].

4.4 Käyttäjakohtainen tiedonsiirron hinta ei-lineaarisen Lagrange-kertoimen avulla

Lagrange-kerroin eli Lagrangian-menetelmä on matemaattinen menetelmä, jonka avulla voidaan ratkaista optimointiongelma, jossa halutaan selvittää funktion minimi- ja maksimiarvot, kun funktiota rajoittavat ulkopuolelta ei-lineaariset rajoitteet [Ber82] [Pie69]. Ulkoiset rajoitteet voidaan selvittää eksplisiittisestikin, mutta tällöin optimointiongelman ratkaisusta tulee matemaattisesti vaivalloista. Lagrange-kertoimen avulla ulkoisia rajoitteita ei tarvitse laskea eksplisiittisesti, jolloin ratkaisusta tulee laskennallisesti helpompaa [Pie69]. Lagrange-kerroin liitetään kuhunkin ulkoiseen rajoiteparametriin, mutta se on riippumaton niistä [GuT68]. Tällöin ratkaisussa voidaan keskittyä Lagrange-

kertoimen käsittelyyn, jolloin optimointiongelma yksinkertaistuu huomattavasti laskennallisen käsittelyn kannalta.

Soveltamalla Lagrange-kerroin -menetelmää hajautettuun uplink-suunnan skedulointialgoritmiin DS-CMDA-järjestelmässä (Direct Sequence - Code Division Multiple Access) [BaB97], on eräässä simulaatiotutkimuksessa [HKH08] saatu erittäin hyviä tuloksia. Kyseinen skedulointialgoritmi keskittyy tehonsäätöön kanavavahvistuksen ja käyttäjien SINR-arvojen tarkkailun sijaan. Simulaatiotulosten perusteella tällä ei-lineaarisen kustannuksen laskemiseen perustuvalla skedulointialgoritmilla saavutetaan lähes 95 % taso OPT-algoritmiin verrattuna ja se on huomattavasti parempi kuin lineaariseen hintaan perustuvat hajautetut algoritmit [HKH08].

Lagrange-kerrointa käytetään siis kuvaamaan jokaisen käyttäjän kohtaama kustannusvaikutus eli hinta, mikäli käyttäjä päättää siirtää dataa. Useat hajautetut tehonsäätöalgoritmien ovat ei-yhteistoiminnallisia peliteorian kannalta katsottuna. Nämä algoritmit esittävät tehon kulutuksen kustannuksen lineaarisena muuttujana. Koska radiokanavan olosuhteet muuttuvat kuitenkin jatkuvasti, kustannus ei todellisuudessa voi olla lineaarinen. Jotkut algoritmit käsittelevät kustannusta heuristisesti, mutta tällöin järjestelmän kokonaissuorituskyky ei ole välttämättä paras mahdollinen [HKH08]. Eräät tehonsäätöalgoritmeista taas esittävät hyödyn yksinkertaisena SINR:n kasvuna ja toiset algoritmit taas käsittelevät käyttäjän saavuttamaa hyötyä kokonaan ilman kustannustekijöitä [HKH08].

Lagrangian-menetelmää hyödyntävä tehonsäätöskedulointialgoritmi toimii siten, että järjestelmän hyödyn laskenta on tiukasti sidoksissa kustannukseen [HKH08]. Kustannus perustuu ei-lineaariseen kertoimeen, joka määrittää käyttäjäkohtaisten tehonsäätörajoitusten perusteella [HKH08]. Algoritmi tuottaa tuloksen, jonka mukaan käyttäjä joko siirtää dataa maksimitehollaan tai ei siirrä ollenkaan [HKH08]. Algoritmi hyödyntää näin ollen todella hyvin opportunistisen skeduloinnin periaatetta, jossa siirtovuoro pyritään aina antamaan hyvän kanavan omaavalle käyttäjälle.

Algoritmin matemaattisessa perustelussa oletetaan, että kanavavahvistus vastaanottajan ja lähettäjän välillä on vakio koko aikavälin ajan. Koska kanavavahvistus (kanavavaimennus) on vakio tiedonsiirron aikana, vain teho voi muuttua SINR:iä laskettaessa ja tällöin SINR on tehon funktio [HKH08]. Käyttäjän saama hyöty on tällöin monotonisesti kasvava funktio SINR:stä, toisin sanoen käyttäjän saavuttama tiedonsiirtonopeus

$\log_2(1+\text{SINR})$ [HKH08]. Toisaalta, koska SINR on lähetystehon funktio ja lähetysteho on taas käyttäjien päätelaitteiden säädettävissä [HKH08], jokainen käyttäjä pyrkii käyttämään suurinta mahdollista lähetystehoa maksimoidakseen oman hyötynsä eli saavuttamaan mahdollisimman suuren tiedonsiirtonopeuden. Lagrange-kerrointa käytetään tässä tilanteessa määrittämään niin kutsuttu varjohinta, joka tulee käyttäjien maksettavaksi lähetystehon käytöstä [HKH08].

Lagrange-muuttujan avulla lasketaan myös käyttäjäkohtaiset maksimilähetystehojen arvot, joita ei voida ylittää [HKH08]. Toisaalta, käyttäjät siirtävät vain ja ainoastaan maksimilähetystehoillaan, jolloin järjestelmän kokonaistiedonsiirtokapasiteetti saadaan lähestymään optimaalista tilaa.

Algoritmi tuottaa siis hyviä tuloksia: kun käyttäjä haluaa siirtää korkealla tehotasolla, mikä toisaalta aiheuttaa häiriöitä järjestelmässä, käyttäjän pitää maksaa hinta korkeasta tehotasosta algoritmin mukaisesti. Tällöin käyttäjän täytyy alentaa tehotasoa ja järjestelmä pysyy tasapainossa [HKH08]. Simulaatiot ovat osoittaneet, että käyttäjän käyttämä teho ja siitä maksettava hinta kohtaavat toisensa. Mikäli käyttäjä, jolla täytyy olla ylipäättensä vahva kanava siirtohetkellä päästäkseen siirtämään, ylittäisikin maksimitehoarvon rajan, järjestelmä menettäisi tasapainonsa ja tehokkuutensa. Algoritmi vähentää tällöin lähetystehotason takaisin enintään maksimitehoarvoonsa. Jos taas kanava ei ole hyvä, lähetysteho asetetaan 0:ksi [HKH08]. Toisin sanoen ennen skedulointipäätöstä algoritmi tarkistaa, onko kanava riittävän hyvä siirtoa varten ja näin varmistaa, että dataa siirretään tietyssä maksimitehoarvossa vain maksimaalisissa kanavaolosuhteissa ja näin koko järjestelmän suorituskyky saadaan pysymään erittäin hyvänä.

Simulaatiotulokset osoittavat myös, että parhaat kanavaolosuhteet ja samalla parhaan vahvistuksen omaavat käyttäjät maksavat toisaalta myös korkeimman hinnan tiedonsiirrosta [HKH08]. Tämä johtuu näiden käyttäjien hyödyntämien korkeiden lähetystehojen vuoksi järjestelmälle aiheutetuista suuremmista häiriöistä. Näin hyöty ja kustannukset saadaan kohtaamaan toisensa ja järjestelmä pysymään tasapainossa.

Simulaatiot osoittavat algoritmin olevan ylivoimainen verrattuna lineaariseen hintaan perustuviin tehonsäätöalgoritmeihin. Tämä johtuu Lagrange-kertoimen käytöstä, joka kontrolloi tehokkaasti käyttäjien tehon rajoituksia tavalla, joka mahdollistaa järjestel-

män erittäin hyvän suorituskyvyn verrattuna lineaarisiin tehonsäätökontrollimekanismeihin [HKH08].

4.5 Hajautettu skedulointi kaksitasoisessa langattomassa järjestelmässä

LTE:n myötä päästään yhä suurempiin tiedonsiirtosiirtonopeuksiin, mutta samalla yhden tukiaseman kantama-alue pienenee, koska suuremmat nopeudet perustuvat korkeampien taajuusalueiden käyttöön [AKG11]. Kaksitasoisella femtosolu-järjestelmällä voidaan lisätä verkon kantamaa ja kapasiteettia tilanteessa, jossa solujen koko on pieni, mutta järjestelmän tiedonsiirtokapasiteetti on suuri [XYJ12]. Femtotukiasemat on suunniteltu erityisesti sisätilojen tiedonsiirron tarpeisiin, koska niiden yhtenä päätarkoituksena on ollut olla vaihtoehto WLAN-tukiasemille kodeissa ja toimistoissa [CAG08]. Tällaisessa ympäristössä, jossa sisätiloissa oleskelevia käyttäjiä on paljon, voi pelkästään makrosoluilla olla vaikea hoitaa kattavuus ja kapasiteetti riittävän hyvin, erityisesti tiheän asutuksen kaupunkiympäristössä [CPG12].

Koska makrosolun kantama-alue on suurempi kuin femtosolujen, kantama-alueet voivat mennä päällekkäin tai lähelle toisiaan. Tällöin femtosolut saattavat häiritä makrosolun liikennettä ja päinvastoin silloin, kun ne käyttävät samaa taajuusaluetta [AKG11]. Normaalisti operaattori ostaa vain yhden LTE-taajuuskaistan, jota ei kuitenkaan voida osittaa siten, että makro- ja femtosolut käyttäisivät eri taajuuskaistan osia [AKG11]. Tällainen osittaminen, jota käytetään nykyisissä 2G - ja 3G-mobiiliverkoissa, vähentäisi häiriöitä merkittävästi [AKG11]. Lisäksi, koska femtosolut saattavat sijaita lähellä toisiaan, myös niiden välille syntyy haitallisia vuorovaikutushäiriöitä, koska kaikki femtosolutkin käyttävät samaa LTE:n taajuusaluetta datan siirtoon kuin makrosolu. Tämä solujen toisilleen aiheuttama vuorovaikutushäiriö on merkittävä haitta femtosoluverkkojen suorituskyvylle [AKG11], [XYJ12].

Femtotukiasemien sijoituksen on tarkoitus olla vapaata ja helppoa. Yksi merkittävä syyhän femtosolujärjestelmien olemassaololle on ollut saada kilpailija WLAN-verkoille, joissa tukiasemat ovat hyvin vapaasti sijoitettavissa ja asennettavissa ilman syvällistä teknistä osaamista. Koska femtotukiasemat viedään koteihin ja yritysten toi-

mitiloihin, keskitetty radioverkkosuunnittelu tulee hankalammaksi, koska operaattori ei enää yksinpäätä, toisin kuin makrosolujen tapauksessa, mihin paikkoihin tukiasema asennetaan [CAG08]. Täten operaattorin on siis vaikea ennakoida, milloin ja mihin uusi femtotukiasema tuodaan [CAG08]. Näin ollen perinteisellä radioverkkosuunnittelulla ei voida enää varmistaa, etteivät tukiasemien kantamat menisi toistensa päälle eikä vuorovaikutushäiriöt pystytä täten minimoimaan etukäteissuunnittelulla [AKG11]. Lisäksi ihmiset voivat siirtää tukiaseman sijaintia kodeissa ja toimistoissa milloin vain [CAG08]. Radioverkon suunnittelun kannalta tilanne poikkeaa siis nykyisestä tilanteesta, jossa operaattori itse sijoittaa tukiasemat kiinteästi useimmiten rakennusten ulkopuolelle ja maastoon. Tukiasemien järkevällä sijoituksella on saatu aikaiseksi mahdollisimman optimaaliset kantama-alueet ja näin tukiasemien väliset häiriötekijät minimoitua [AKG11].

Kuten aiemmin todettu, femtojärjestelmässä radioresurssien hallinta perinteisen radioverkkosuunnittelun menetelmin tulee vaikeammaksi. Tällöin olisi eduksi, mikäli tukiasemat kykenisivät ohjaamaan radioresurssejaan autonomisesti ympäröivät ja jatkuvasti muuttuvat radio-olosuhteet huomioon ottaen. Tällöin solut, toimiessaan siis kognitiivisen radion ominaisuuksien mukaisesti, seuraavat ja mittaavat siirtokanaviensa olosuhteita ja ohjaavat mittaustietojen perusteella itsenäisesti ja dynaamisesti radioresurssiensa käyttöä käyttäjiensä kesken [AKG11]. Myös femtosolujärjestelmän tukiasemien toisilleen aiheuttamia häiriöitä voidaan näin pienentää ja samalla lisätä järjestelmän suorituskykyä hyödyntämällä kognitiivisen radion ominaisuuksia, hajottamalla radioresurssien hallintaa makro- ja femtosolujen kesken ja soveltamalla peliteoreettisia malleja skedulointialgoritmeissa ja tehonsäädössä [AKG11], [XYJ12].

4.5.1 Stackelberg-Nashin peliteorian soveltaminen femtojärjestelmän vuorovaikutushäiriön minimoimiseksi

Femtosolujärjestelmässä makro- ja femtosolut siis häiritsevät toisiaan merkittävästi, koska ne jakavat yhteisen radioresurssin. Toisaalta femtosolujärjestelmän radioverkkosuunnittelulla ei voida enää minimoida häiriöitä siten kuin puhtaassa makrosolujärjes-

telmässä. Soveltamalla kognitiivista radiota ja Stackelberg-Nashin peliteoriaa, voidaan kuitenkin häiriövaikutusta pienentää [XYJ12] näissä haastavissa olosuhteissa.

Kun femtosolujärjestelmä toimii kognitiivisena radiona, makrosolut ovat tietoisia femtosoluista ja femtosolut kykenevät vastaavasti monitoroimaan ympäröiviä radioolosuhteita [XYJ12]. Peliteoreettisena pohjana voidaan käyttää tässä yhteydessä Stackelbergin kilpailun tasapainoratkaisua, jossa seuraaja tekee ratkaisunsa perustuen järjestelmän johtavan jäsenen toimintaan. Toisin sanoen femtosolujärjestelmässä makrosolut tietävät femtosolujen resurssien käytöstä ja voivat näin ohjata femtosolujen tehonkäyttöä lähettämällä sopivan kustannusparametrin arvon femtosolulle, jonka perusteella femtosolut säätävät omaa lähetystehoaan [XYJ12], [SuS09]. Kun siis femtosolut häiritsevät makrosolun käyttäjien kanavien laatua ja varausta, makrosolut voivat pienentää tätä häiriötä asettamalla vuorovaikutuskustannusparametrin femtosoluille. Mikäli kustannus kasvaa liian suureksi eli femtosolu häiritsee makrosolun käyttäjien tiedonsiirtoa liikaa, femtosolu pienentää lähetystehoaan ja näin antaa enemmän datan siirtovuoroja makrosolun käyttäjille.

Lisäksi femtosolujen täytyy löytää tasapaino tehonsäädöilleen niiden keskinäisten vuorovaikutushäiriöiden minimoimiseksi. Femtosolujen keskinäisessä kilpailussa ja tasapainotilanteen saavuttamisessa voidaan ottaa käyttöön Nashin tasapainoteorian mukainen malli luomaan algoritmi, joilla ao. tasapaino saavutetaan [XYJ12].

4.5.2 Koalitiopelin ja korreloituneen tasapainomallin soveltaminen femtojärjestelmän vuorovaikutushäiriön minimoimiseksi

Femtojärjestelmän vuorovaikutushäiriöiden minimoimiseksi tutkitaan muitakin peliteoreettisia malleja kuin Stackelbergin ja Nashin mallit, kuten koalitiot sekä korreloitunut tasapainopeli [AKG11].

Koalitiopelissä makro- ja femtotukiasemat sekä niiden käyttäjät muodostavat koalitioita sen mukaan, mikä on parasta niiden ja koko järjestelmän suorituskyvyn kannalta. Koalitiomallin mukaan kaikki pelaajat eivät osallistu samoihin koalitioihin, vaan ne päättävät osallistumisestaan sen mukaan, miten koalition kaikkien pelaajien summahyöty olisi

mahdollisimman optimaalinen. Koalitiopeli soveltuu hyvin sellaisissa olosuhteissa, jossa pelikenttä jakaantuu erilaisiin ja olosuhteistaan toisista poikkeaviin osiin, joilla ei ole tiukkaa keskitettyä kontrollia. Tällöin pelin eri osissa tarvitaan erilaisia joustavia strategioita.

Radio-olosuhteet vaihtelevat maantieteellisesti ja dynaamisesti mobiisissa radioverkoissa, erityisesti LTE-verkoissa, joissa ei ole enää keskitettyä tukiasemien ohjausyksikköä RNC:tä (Radio Network Controller) [BaB97] tasapainottamassa tukiasemien kuormitusta kuten 3G-verkoissa [AKG11]. Toisin sanoen käyttäjien saama palvelutaso riippuu maantieteellisestä sijainnista, alue- ja aikakohtaisesta käyttäjien määrästä ja hetkellisistä tiedonsiirto-olosuhteiden vaihteluista. Koska olosuhteet ovat erilaisia ja muuttuvat ajallisesti eri tavoin verkon eri osissa, on tällöin järkevää tehdä optimointi kyseisen alueen olosuhteiden perusteella eikä jonkin yleisen koko verkon kattavan globaalin optimointistrategian pohjalta.

Koalitio voi perustua esimerkiksi LTE:n kunkin OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing)-aliskanavan [RBT11] ympärille, joka siis on makrosolujen ja femtosolujen yhteistä omaisuutta, ja jota kukin solu haluaisi käyttöönsä palvellakseen käyttäjiään [AKG11]. Hyöty, jonka pelaajat – makro- ja femtosolut sekä niiden käyttäjät – saavat liittymällä koalitioon, voi olla käyttäjien tiedonsiirtonopeuksien tai vastaanotettujen signaalien SINR-arvojen summa. Koalitioihin perustuvan strategian sanotaan antavan paremman suorituskyvyn kuin opportunistinen skedulointi [AKG11]. Tällaisen järjestelmän haittapuolena on pelaajilta vaadittava koalitioiden muodostamiseen liittyvä keskinäinen signaali, mikä vaatii lisätehoa järjestelmältä.

Korreloituneessa tasapainopelissä taas kukin pelaaja – LTE-tukiasemat – valitsee toimenpiteensä monitoroimalla oman radiokanavansa tilaa. Tällöin strategia määrittelee toimenpiteen jokaista mahdollista radiokanavan tilaa koskevaa havaintoa kohti, joiden perusteella pelaaja voi tehdä jonkin toimenpiteen. Jos kukaan pelaajista ei poikkeaa suositeltavista strategioista, kutsutaan strategiaa korreloiduksi tasapainoksi. Korreloitunut tasapaino eroaa Nashin tasapainoteoriasta siten, että se tarjoaa monia konseptuaalisia ja laskennallisia hyötyjä ja lähestyy käsitteenä useita luonnollisen oppimisen algoritmeja [AKG11]. Minimi skedulointiyksikkö LTE:ssä on RB (resource block), joka on mahdollista siirtää yhdessä aikavälissä [AKG11]. eNB:t, LTE:n makrotukiasemat, ovat itsekkäitä pelureita, jotka pyrkivät varaamaan tiettyjä RB:itä itselleen, jotta ne voivat an-

taa mahdollisimman hyvän QoS:n käyttäjilleen. Tällöin eNB:iden välistä vuorovaikutusta syntyy kahdesta syystä: kun eNB siirtää dataa RB:ssä, voi se aiheuttaa häiriötä naapuri-eNB:eissä, ja lisäksi saatavilla olevien RB:den lukumäärä on rajoittunut. Kun vuorovaikutushäiriölle määritellään tietty taso, joka määrää hyväksyttävän häiriötason, korreloituneella tasapainopelillä voidaan muotoilla strategia RB:den valinnalle (skeduloinnille) eNB:den kesken downlink-suunnassa [AKG11]. Koska jokainen eNB tarkkailee vain oman radiokanavansa tilaa, korreloitunut tasapainopelin mukainen skedulointialgoritmi saadaan hajautettua hyvin nimenomaan LTE-verkossa, jossa tukisemat (eNB:t) eivät ole enää RNC ohjauksen alla [AKG11].

5 Simulaatio

Simulaatiossa verrattiin kahden opportunistisen skedulointialgoritmin keskinäistä tehokkuutta monen käyttäjän yksisoluisessa radioverkossa. Työssä verrattiin saatuja simulaatiotuloksia Qin et al. artikkelissa [QIB04] esitettyihin tuloksiin. Artikkelin tutkimuksessa toteutettiin vastaavat simulaatiot. Tutkimus käsittelee vain kahden käyttäjän simulaatiota, kun taas tässä pro gradu -työssä simuloitiin myös kymmenen käyttäjän tapaukset kahdelle skedulointialgoritmille. Lisäksi round-robin -skedulointi otettiin mukaan kymmenen käyttäjän testeihin, jolloin kyettiin simuloimalla vertaamaan opportunistisen ja ei-opportunistisen skeduloinnin suorituskykyeroja.

Qin et al. artikkelin mukaisesti opportunistisiksi skedulointialgoritmeiksi valittiin PFS ja DFS (Distribution Fair Scheduling), joista erityisesti PFS:ään skedulointialgoritmitutkimusartikkelit usein viittaavat [LCS01], [QIB04], [VTL02], [KuQ03], [AND05]. Molemmat ovat keskitettyjä opportunistisia skedulointialgoritmejä downlink-suunnassa myös reiluiden huomioiden.

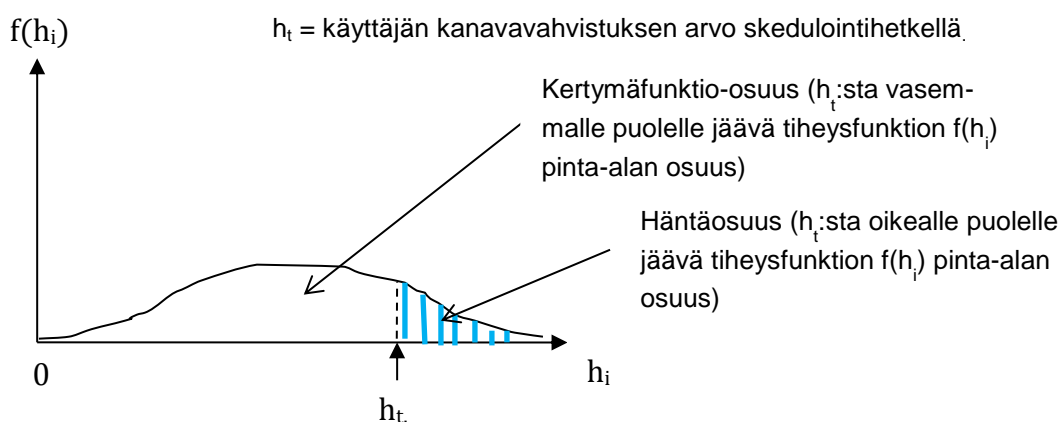
5.1 PFS-skedulointi

PFS:ssä siirtämään valitaan käyttäjä, jolla on suhteellisesti korkein siirtonopeus skedulointihetkellä. Toisin sanoen siirtämään valitaan se käyttäjä, jonka hetkellisen siirtonopeuden suhde keskimääräiseen siirtonopeuteen on suurin. PFS:ssä keskitetty skeduloija (tukiasema) kerää tilastoja jokaisen käyttäjän siirtonopeuksista ja päivittää käyttäjien keskimääräiset siirtonopeusarvot jokaisella uudella aikavälillä. Tukiasema mittaa kunkin käyttäjän hetkelliset siirtonopeudet, laskee samalla keskimääräiset siirtonopeusarvot ja skedulointipäätöksentekohetkellä jakaa hetkellisen mitatun nopeusarvon keskimääräisellä nopeudella. Koska skedulointipäätös perustuu kunkin käyttäjän omiin arvoihin ja perustuu siis suhteellisiin arvioihin, PFS antaa melko hyvän reiluiden käyttäjien kesken [LCS01], [QIB04].

5.2 DFS-skedulointi

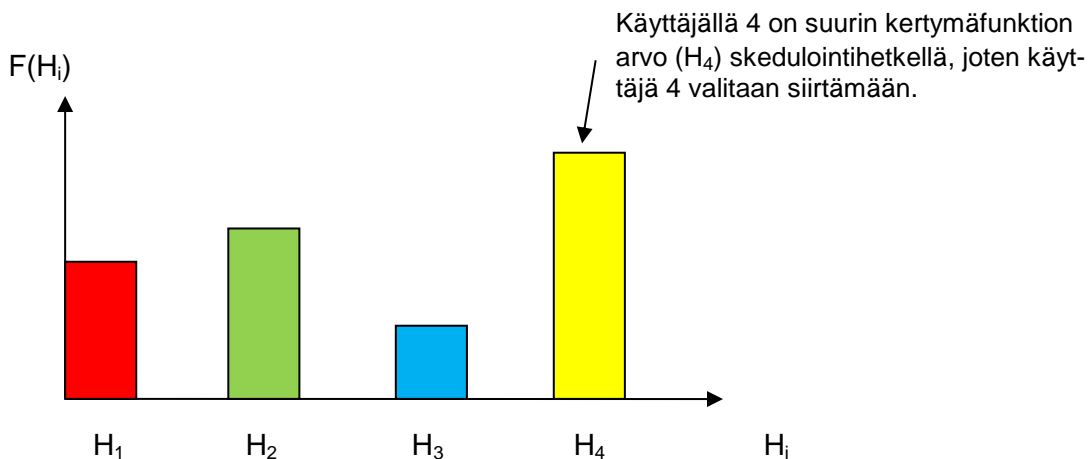
DFS-skedulointialgoritmin periaate perustuu malliin, jossa kanavavahvistuksen oletetaan olevan itsenäinen satunnainen muuttuja. Koska kanavavahvistus on itsenäinen ja satunnaisesti arvoaan muuttava muuttuja, käyttäjien kanavat eivät vaikuta toisiinsa. Käyttäjien kanavavahvistusten kertymäfunktioita, joiden avulla voidaan päätellä, millä todennäköisyydellä kanavat voisivat saada vielä suurempia arvoja kuin mitä niillä skedulointihetkellä on, verrataan keskenään jokaisessa aikavälissä. Käyttäjä, jolla on suurin kertymäfunktion arvo asianomaisessa aikavälissä, valitaan siirtämään [QIB04].

Käyttäjien kanavavahvistusten kertymäfunktioiden arvot saadaan laskemalla integraalisesti käyttäjien kanavavahvistusten tiheysfunktioista pinta-ala, joka kattaa kanavavahvistuksen arvosta 0 aina aikavälissä mitattuun arvoon h_t , kuten kuva 6 esittää. Paras kanava voidaan päätellä myös tiheysfunktion pinta-alan ns. häntäosuuden suuruudesta, kuten kuva 6 esittää, koska sen arvo kertoo käänteisesti kertymäfunktion suuruuden. Toisin sanoen käyttäjä, jonka häntäosuus tiheysfunktion kokonaispinta-alasta on pienin valintahetkellä, valitaan siirtämään [QIB04]. Näin valitulla käyttäjällä on siis pienin todennäköisyys sille, että käyttäjän kanavavahvistuksen arvoksi voisi tulla suurempi kuin mitä se on. Kuvassa 6 on käyttäjän i kanavavahvistuksen tiheysfunktio ja kanavavahvistuksen arvo skedulointihetkellä.



Kuva 6: Käyttäjän i kanavavahvistuksen tiheysfunktio $f(h_i)$.

Kanavavahvistuksen kertymäfunktion arvo kuvaa siis todennäköisyyttä, jolla käyttäjän signaalin voimakkuus ei voi olla suurempi kuin mitä se on. Mikäli kertymäfunktion arvo on suuri eli on suuri todennäköisyys sille, ettei käyttäjä voisi saavuttaa suurempaa signaalin voimakkuutta kuin mitä se on, tarkoittaa tämä sitä, että käyttäjällä on todennäköisesti hyvä kanava. Siirtämään valitaan siis käyttäjä, jonka kanavavahvistuksen kertymäfunktion arvo on suurin, jolloin käyttäjän kanava on tilastollisesti vahvin verrattuna muiden käyttäjien kanaviin [QIB04]. Tämä on esitetty kuvassa 7, jossa on neljän käyttäjän kertymäfunktioarvot skedulointihetkellä ja jossa käyttäjällä 4 on suurin kertymäfunktion arvo kyseisellä skedulointihetkellä.



Kuva 7: Neljän käyttäjän kanavavahvistusten kertymäfunktioiden arvot skedulointihetkellä.

5.3 Yleinen simulointiympäristö ja käytetyt parametriarvot

Molemmilla skedulointialgoritmeilla, PFS:llä ja DFS:llä, simuloitiin sekä kahden että 10 käyttäjän tapaukset ja mitattiin jokaisen käyttäjän ja koko järjestelmän keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet. Ei-oppportunistinen round-robin -skedulointi otettiin mukaan vain 10 käyttäjän testeihin, koska kahden käyttäjän testissä keskityttiin Qin et al. artikkelin mukaisiin simulointeihin. Käyttäjillä oli siis yhteinen tiedonsiirtokaista, jota jaet-

tiin näille vuorotellen algoritmien mukaisella skeduloinnilla jokaisessa aikavälissä. Kahden käyttäjän testeissä mitattiin myös näiden kohtaamaa viivettä, joka johtuu siitä, että he jakavat siirtokaistan keskenään. Koska vain yksi käyttäjistä kykenee siirtämään kerrallaan skedulointialgoritmin mukaisessa järjestyksessä, toisen pitää odottaa siirtovuoroaan ja kohdata näin ollen viivettä tiedonsiirrossaan.

Simulaatioissa käytettiin stationaaris-stokastista kanavaprosessimallia, toisin sanoen käyttäjät eivät liiku eikä monitie-etenemistä tapahdu, jolloin kanavan muuttuvia olosuhteita kuvattiin lognormaalina satunnaisjakautumana eli hitaana häipymisenä. Simulaatioissa siirtokanavalla oli jatkuvasti riittävästi kapasiteettia siirtämään kaikki saapunut data heti eikä viivettä ja jonoja näin ollen huomioitu saapumismallin kannalta. Saapumismallina täten oli loputon backlog data. Simuloinneissa käytettiin 3000 aikavälin otosta, jotta pidemmän aikavälin keskimääräisten tulosten saaminen mahdollistui.

Simuloinnit tehtiin Matlab-työkalulla. Matlabissa luotiin skedulointialgoritmiskriptit, jotka ajamalla testit suoritettiin ja testitulokset tallennettiin samalla tekstitiedostoon tulosten analysoimista varten. Jokainen skriptikoodi sisältää sekä skedulointialgoritmin että kanavamallin simuloinnin. Liite A sisältää käytettyjen skriptien kooditulosteet.

Kahden käyttäjän simulaatiossa toiselle käyttäjälle määriteltiin tilastollisesti vahvempi kanavavahvistus ja toiselle taas heikompi, jotta voidaan nähdä, kuinka hyvin PFS- ja DFS-skedulointialgoritmit realisoivat käyttäjien pysyvästi eritasoisten kanavien voimakkuuksien erot parempana järjestelmän suorituskykyä. Simulaatioissa käytettiin Matlabin **exprnd**-funktiota generoimaan realisoituneita, satunnaisia ja oletusarvojen ympärille eksponentiaalisesti hajaantuneita kanavavahvistuksia kullakin aikavälillä siten, että vahvemman käyttäjän kanavavahvistuksen oletusarvo oli 1 ja heikomman käyttäjän 0.5. Näin vahvemman kanavavahvistuksen oletusarvon omaava käyttäjä saa tilastollisesti parempia kanavavahvistusarvoja ja siis tilastollisesti paremman tiedonsiirtonopeuden. Skedulointialgoritmien pitäisi tällöin pitkällä aikavälillä antaa enemmän siirtovuoroja paremman kanavavahvistuksen oletusarvon omaavalle käyttäjälle ja näin parantaa koko järjestelmän suorituskykyä eli kokonaistiedonsiirtokapasiteettia. Kahden käyttäjän testeissä suoritettiin yksi ajokerta oletuskanavavahvistusten ollessa vakioita kaikissa 3000 aikavälissä.

10 käyttäjän simulaatiossa näiden oletuskanavavahvistukset määriteltiin siten, että niiden arvot olivat tasaisesti jakautuneita käyttäjien kesken. Jatkuvien ja tasaisesti jakautuneiden kanavavahvistusten oletusarvot generoitiin Matlabissa **unifrnd**-funktiolla. Oletusarvon mukainen realisoitunut kanavavahvistus generoitiin samalla tavoin kuin kahden käyttäjän ympäristössä eli **exprnd**-funktion avulla. Tällöin käyttäjien realisoituneiden kanavavahvistusten tasot eroavat toisistaan siten, että suuremman oletusarvoisen kanavavahvistuksen saanut käyttäjä saa todennäköisemmin myös paremman realisoituneen kanavavahvistuksen. Myös 10 käyttäjän testeissä suoritettiin yksi ajokerta 3000 aikaväliltä.

Taulukko 1 kokoaa yhteen simulaatioissa käytetyt yleiset parametrit ja Matlab-funktiot.

Aikavälien määrä	Aikavälien ajokertojen lukumäärä (K)	Kanavavahvistusten oletusarvot (kaksi käyttäjää)	Kanavavahvistusten oletusarvot (10 käyttäjää)	Realisoitunut kanavavahvistus (h)
3000	1	0,5 ja 1	Tasainen ja-kauma 0 ja 1 väliltä; unifrnd (0,1,1,1 0)	exprnd (kanava-vahvistuksen oletusarvo)

Taulukko 1: Simulaatiossa käytetyt yleiset parametrit ja Matlab-funktiot.

PFS-simuloinneissa käytettiin lisäksi Matlabin **mean**-funktiota määrittämään käyttäjien keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet. DFS-simuloinneissa taas käytettiin Matlabin **cdf**-funktiota määrittämään käyttäjien kanavavahvistusten tiheysfunktioiden arvot. Nämä ovat kuvattuna myös taulukossa 2, joka sisältää lisäksi käyttäjän tiedonsiirtonopeuden laskukaavion.

PFS: käyttäjän keskimääräinen tiedonsiirtonopeus	DFS: käyttäjän tiheysfunktion hännän arvo	Tiedonsiirtonopeus (b/s)
mean (käyttäjän realisoituneet tiedonsiirtonopeudet)	cdf (exp, kanavavahvistuksen realisaatio, kanavavahvistuksen oletusarvo)	log2 (1+realisoitunut kanavavahvistus)

Taulukko 2: PFS- ja DFS-spesifiset sekä yleistä tiedonsiirron nopeutta kuvaavat Matlab-funktiot.

5.4 Kahden käyttäjän simulaatiot

Kahden käyttäjän testissä simuloitiin ja verrattiin PFS- ja DFS-skedulointeja. Simulaatioissa pyrittiin samaan testiin, joka kuvataan Qin et al. artikkelissa ja jonka tulokset esitetään artikkelin kuvassa 2. PFS skeduloi siirtämään käyttäjän, jonka siirtohetkellä mitattu kanavan voimakkuus suhteessa käyttäjän kanavan keskimääräiseen voimakkuuteen on suurin. DFS taas skeduloi siirtämään käyttäjän, jonka kanava on tilastollisesti paras skedulointihetkellä.

Kanavavahvistus (parametri h Matlab-skriptissä) kussakin aikavälissä lasketaan Matlabin `expnd(0.5 tai 1)`-funktiolla. Käyttäjän 1 oletuskanavavahvistuksen arvona on 1 ja käyttäjällä 2 taas 0.5. Näin ollen käyttäjän 1 pitäisi siis saada suurempi keskimääräinen tiedonsiirtonopeus kuin käyttäjän 2.

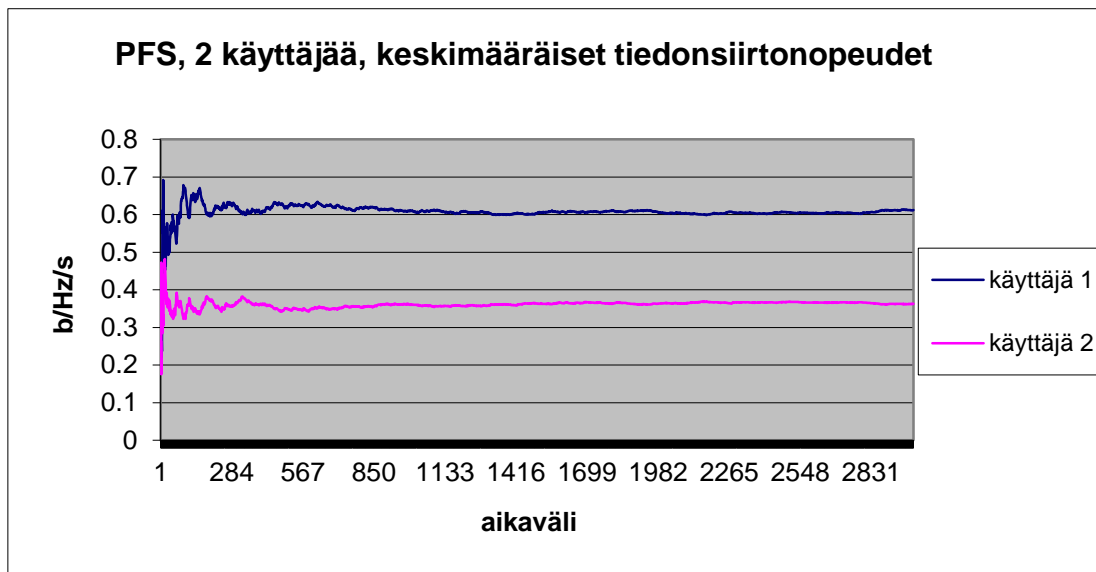
Simuloinneissa mitattiin käyttäjien keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet, siirtoajat ja viiveet siirrossa. Seuraavissa alikappaleissa (5.4.1 - 5.4.6) kuvataan PFS-skeduloinnin ja DFS-skeduloinnin tulokset erikseen sekä vertaillaan algoritmien suorituskykyä ja tuloksia Qin et al. artikkelin esittämiin tuloksiin vastaavasti simulaatioista.

5.4.1 PFS-simulointi, kahden käyttäjän keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet

Tässä simulointitapauksessa mitattiin käyttäjien keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet. Simulaation tulos on kuvattuna kuvassa 8. Kuvan x-akseli kuvaa aikaa, toisin sanoen aikavälejä, ja y-akseli tiedonsiirron nopeutta. Kuvassa näkyvät kaksi käyrää, joista sininen esittää käyttäjän 1 ja liila käyttäjän 2 keskimääräisiä simulaatiossa mitattuja tiedonsiirtonopeuksia. Kuvasta nähdään, että käyttäjä 1, jolla on siis suurempi oletuskanavavahvistuksen arvo kaikissa 3000 aikavälissä kuin käyttäjällä 2, pääsee keskimäärin tiedonsiirtonopeuteen 0.61 b/s. Käyttäjä 2, jolla on pienempi oletuskanavavahvistus, pääsee vain noin 0.36 b/s suuruiseen keskimääräiseen tiedonsiirtonopeuteen. Käyttäjä 1 saavuttaa siis noin 1,7 kertaisen keskimääräisen tiedonsiirtonopeuden verrattuna käyttäjään 2. Vaikka käyttäjällä 1 on kaksi kertaa suurempi oletuskanavavahvistus ja saavuttaa näin ollen keskimäärin kaksi kertaa suurempia tiedonsiirtonopeuksia siirtovuoroillaan verrattuna käyttäjään 2, siirtovuorot jaetaan kuitenkin tasaisemmin johtuen PFS:n reiluuden huomioon. Tästä johtuen käyttäjän 1 keskimääräinen tiedonsiirtonopeus ei olekaan tasan kaksi kertaa käyttäjän 2 keskimääräistä tiedonsiirtonopeutta suurempi vaan ainoastaan 1,7 kertaa suurempi. Kappaleessa 5.4.3 on kuvattu tarkemmin siirtovuorojen hajontaa käyttäjien kesken.

Kuvasta 8 nähdään, että aikavälin 850 jälkeen molempien käyttäjien siirtonopeudet asettuvat tasoihin, jotka eivät muutu enää merkittävästi. Ennen aikaväliä 850 molempien käyttäjien keskimääräiset tiedonsiirtonopeuksien tasot heittelevät voimakkaasti, varsinkin aivan alussa, ensimmäisten 250 aikavälin aikana, kuten kuvasta 8 nähdään. Tämä johtuu siitä, ettei skedulointiskripti ole kerännyt riittävästi näytteitä tiedonsiirtonopeuksista, jolloin muutokset hetkittäisissä siirtonopeuksissa vaikuttavat selvästi myös laskettuun keskimääräiseen tiedonsiirtonopeuteen. Kyseessä on ns. alkulämmittelyvaihe, jonka aikana mittaustulosten arvot heittelevät voimakkaasti, ennen kuin ne alkavat saada stabiileja arvoja.

Tulos on samaa tasoa Qin et al. artikkelin kuvan 2 kanssa, jossa tosin samassa kuvassa on sekä PFS- että DFS-tulokset. Tässä pro gradu -tutkielmassa esitetään PFS- ja DFS-tulokset erillisissä kuvissa.



Kuva 8: PFS-simulaation tulos, kaksi käyttäjää, keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet.

5.4.2 PFS, kaksi käyttäjää, siirtoaikojen vertailu

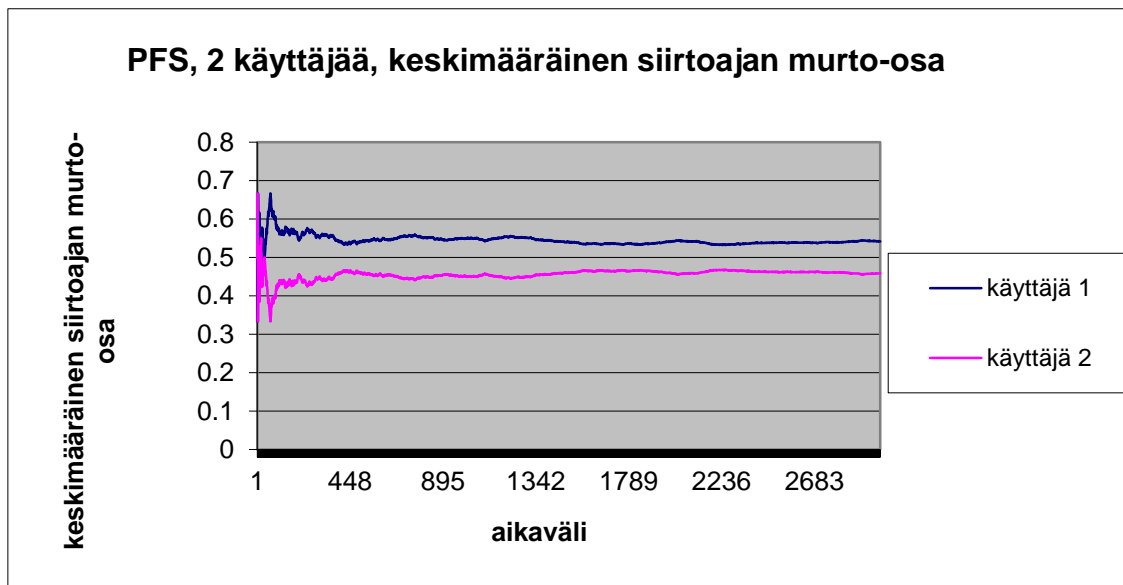
Tässä simulaatiotapauksessa mitattiin kuinka paljon PFS jakaa siirtoaikaa kahden käyttäjän kesken, kun niillä on erilaiset kanavaolosuhteet. Alkuasetelma on sama kuin kapaleen 5.4.1 simulaatiossa eli käyttäjän 1 oletuskanavavahvistus on 1 ja käyttäjän 2 taas 0.5. PFS:n pitäisi siis antaa enemmän siirtovuoroa käyttäjälle 1.

Skripti kirjasi ylös jokaisen aikavälin kohdalta sen käyttäjän, jolle skeduloitiin siirtovuoro. Kun tulos laskettiin kaikkien 3000 aikavälin osalta, käyttäjä 1 sai kokonaisuudessaan 1626 siirtovuoroa ja käyttäjä 2 1374 siirtovuoroa. Prosentuaalisesti siis paremman kanavan omaava käyttäjä 1 sai noin 54 % kaikista aikaväleistä käyttöönsä ja käyttäjä 2 vastaavasti 46 %. Tämä mittaustulos osoittaa PFS:n opportunistisen skeduloinnin luonteen eli vahvemman siirtokanavan omaava käyttäjä saa enemmän siirtovuoroja kuin heikomman kanavan käyttäjä. Tulos on linjassa keskimääräisten tiedonsiirtonopeuksien ja tiedonsiirtoaikojen simulaatiotulosten kanssa.

Kuva 9 esittää simulaation tuloksen graafisena esityksenä. Kuvasta nähdään, että käyttäjä 1 saa enemmän ajan murto-osia tiedonsiirtoon kuin käyttäjä 2. Alkulämmittelyvaiheen jälkeen käyttäjä 1 (sininen käyrä) alkaa saada keskimäärin 0.54 ajan murto-osaa

aikaväliä kohden tiedonsiirtoa varten ja käyttäjä 2 (liila käyrä) keskimäärin 0.46 ajan murto-osaa aikaväliä kohden. Käyttäjä 1 saa siis enemmän siirtoaikaa paremmista kanavolosuhteistaan johtuen. Tulos vahvistaa jälleen sen, että PFS skeduloi opportunistisesti. Toisaalta siirtovuorojen määrissä on vain 10 %:n ero, joten PFS huomioi myös reiluuden hyvin.

Tulos on yhteneväinen Qin et al. artikkelin kuvan 3 kanssa.



Kuva 9: PFS-simulaation tulos, kaksi käyttäjää, keskimääräinen siirtoajan murto-osa.

5.4.3 PFS, kaksi käyttäjää, viiveen mittaus

Tätä simulaatiota ei tehty Qin et al. artikkelissa, vaan se oli ylimääräinen pro gradu -tutkielmaan liittyvä mittausta. Viiveet vaikuttavat QoS:iin merkittävästi ja erityisesti reaaliaikapalveluissa QoS:ille on erittäin tiukat vaatimukset. Myös ei-reaaliaikaisten palveluiden, kuten web browsingin, käyttäjäkokemus luonnollisesti kärsii, mikäli tiedonsiirrossa on pitkiä viiveitä. Siksi on erittäin tärkeää tutkia myös QoS:ia skedulointialgoritmien tutkimuksessa suorituskyvyn ja reiluuden tutkimisen lisäksi. Tässä simulaatiota-pauksessa mitattiin kahden käyttäjän välillä olevia siirtoviiveitä, jotka johtuvat siitä, että vain toinen käyttäjistä pääsee siirtämään kerrallaan.

Taulukko 3 kuvaa mittaustulokset käyttäjien viiveiden keskimääräisistä, mediaani-, hajonta- ja maksimiarvoista aikavälien lukumäärinä mitattuna.

	Keskiarvo (aikavälien lkm)	Hajonta (aikavälien lkm)	Mediaani (aikavälien lkm)	Maksimiviive (aikavälien lkm)
Käyttäjä 1	1.82	1.15	1	8
Käyttäjä 2	2.156	1.56	2	12

Taulukko 3: PFS: käyttäjien keskimääräiset, mediaani-, hajonta- ja maksimiviiveet.

Taulukosta 3 nähdään, että käyttäjällä 1 on pienempi keskimääräinen viiveen kesto, viiveen hajonta, viiveen mediaani ja maksimiviive kuin käyttäjällä 2. Tulos osoittaa, että PFS antaa selvästi laadukkaampaa kaistaa voimakkaamman kanavan omaavalle käyttäjälle.

Oletetaan, että yhden aikavälin pituus on 2 ms, kuten UTMS-järjestelmässä, ja koska VOIP-palvelussa sallitaan maksimissaan vain pieni viive datapakettien välillä (esim. 20 ms [WCJ05]), tällöin käyttäjän 2 kohtaama maksimiviive 24 ms (12x2ms) voisi tehdä skeduloinnin riittämättömäksi VOIP-palvelulle. Käyttäjä 1 sitä vastoin kohtaisi maksimissaan 16 ms:n (8x2ms) viiveen, mikä olisi vielä hyväksyttävää VOIP-palvelussa. Käytännössä viiveen laskussa tulee huomioida kokonais- eli e2e-viive (end to end), jolloin myös yhteyden toisen osapuolen aiheuttama viive sekä viive, joka aiheutuu paketin matkatessa läpi internetin linkkien ja solmukohtien, täytyy laskea mukaan. Tämä merkitsee sitä, että käyttäjän ja tukiaseman väliselle tiedonsiirron viiveelle VOIP-palvelussa on käytännössä tiukemmat vaatimukset kuin 20 ms.

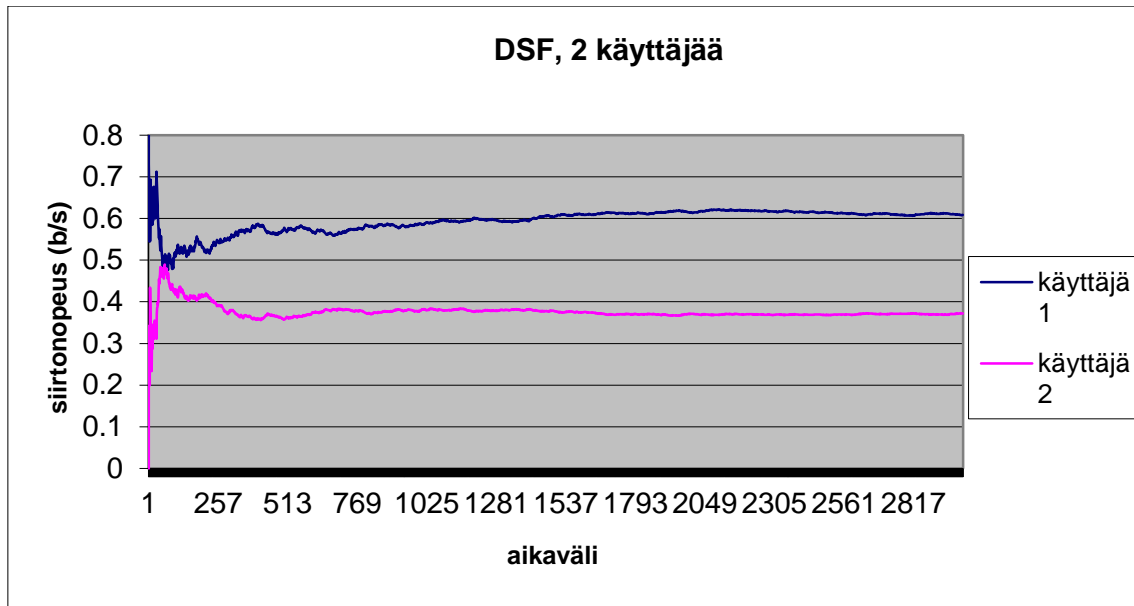
Jotta VOIP-palvelua tai muuta palvelutyyppiä, jolla on tiukat Qos-vaatimukset, voitaisiin tarjota kaikille käyttäjille, skeduloinnin pitäisi huomioida myös palvelutyyppikohtaiset QoS-vaatimukset. Toisin sanoen, PFS:n pitääkin antaa siirtovuoro sille käyttäjälle, jonka palvelutaso uhkaa madaltua epätydyttävälle tasolle, ja jättää tällöin huomioimatta opportunistisuus- ja reiluussäännöt.

5.4.4 DFS, kaksi käyttäjää, keskimääräinen tiedonsiirtonopeus

Tässä simulaatiotapauksessa mitattiin kahden käyttäjän keskimääräisiä tiedonsiirtonopeuksia 3000 aikavälillä DFS-skedulointialgoritmillä. Kuten aiemmin tehtiin PFS:n kohdalla, käyttäjille generoitiin jokaisessa aikavälissä realisoitunut kanavavahvistus $\text{exprnd}(1 \text{ tai } 0.5)$ -funktiolla siten, että käyttäjä 1 sai aina vahvemman oletuskanavavahvistuksen arvolla 1 ja käyttäjä 2 taas heikomman vahvistuksen arvolla 0.5. Kuva 10 esittää simulaation tulokset.

Kuvasta 10 nähdään, että käyttäjä 1 (sininen käyrä), jolla on jatkuvasti suurempi oletuskanavavahvistus, saa suurempia tiedonsiirtonopeuksia kuin käyttäjä 2 (liila käyrä), jolla on pienempi oletuskanavavahvistusarvo. Käyttäjän 1 keskimääräinen tiedonsiirtonopeus on 0.59 b/s kohdalle ja käyttäjän 2 vastaavasti 0.38 b/s.

Tuloksen vertaaminen PFS:n vastaavaan simulaatioon kappaleessa 5.4.1 osoittaa käyttäjien keskimääräisten tiedonsiirtonopeuksien olevan lähes samalla tasolla PFS:n kanssa. Kun lasketaan keskimääräiset siirtonopeudet aikavälin 850 jälkeen, jolloin lämmittelyvaihe on ohi, PFS:llä käyttäjä 1 saavuttaa keskimäärin 0.606 b/s ja käyttäjä 2 taas 0.363 b/s tiedonsiirtonopeuden. Vastaavat luvut DFS:llä ovat 0.607 bit/sec ja 0.373 bit/sec. DFS näyttäisi siis antavan hieman parempaa keskimääräistä tiedonsiirtokapasiteettia molemmille käyttäjilleen kun algoritmit pääsevät stabiiliin tilaan, mutta ero on niin pieni, että käytännössä molemmat algoritmit toimivat yhtä tehokkaasti. Myös Qin et al. artikkelin johtopäätös oli, että algoritmit ovat yhtä tehokkaita. Jos lämmittelyvaihe otetaan huomioon mittaustuloksissa (siis myös ensimmäiset 850 aikaväliä) PFS:ssä käyttäjä 1 saa hieman paremman keskimääräisen tiedonsiirtonopeuden kuin DFS:n tapauksessa, jossa saavutetaan tässä tapauksessa 0.59 b/s, (ero 0.2 b/s PFS:n eduksi), ja vastaavasti DFS:ssä käyttäjä 2 saa hieman paremman keskimääräisen tiedonsiirtonopeuden, siis 0.37 b/s, kuin PFS:ssä (ero 0.02 b/s). DFS:n tiedonsiirron tarkempi hajonta-analyysi on esitetty kappaleessa 5.4.5.



Kuva 10: DFS-simulaatio tulos, kaksi käyttäjää, keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet.

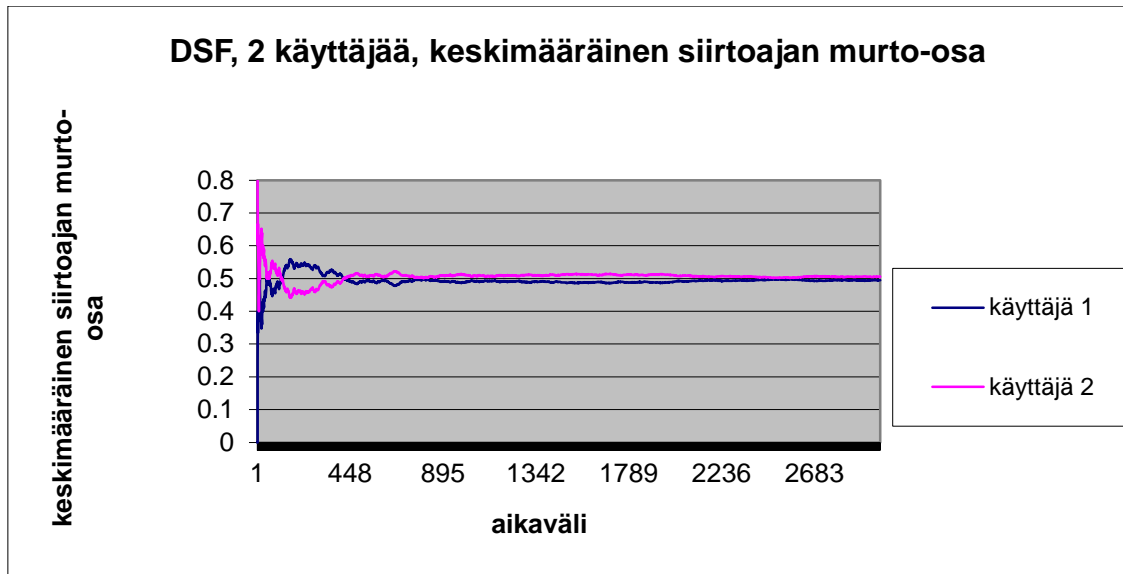
5.4.5 DFS, kaksi käyttäjää, siirtoaikojen vertailu

Tässä simulaatiossa DFS:lle tehtiin vastaava mittaus kuin mitä PFS:lle kappaleessa 5.4.2. Matlab-skripti kirjaa jokaiselta aikaväliltä siirtämään valitun ja vuoroaan odottamaan jätetyn käyttäjän. Simulaatiodatasta laskemalla saadaan selville, että käyttäjä 1 sai tarkalleen ottaen 1485 siirtovuoroa ja käyttäjä 2 1515 siirtovuoroa 3000 aikavälin aikana. Prosentuaalisesti ilmaistuna käyttäjä 1 sai 49,5 % ja käyttäjä 2 50,5 % aikaväleistä käyttöönsä. DFS siis jakaa siirtovuorot erittäin tasapuolisesti käyttäjien kesken, mikä on osoitus DFS:n suuresta reiluudesta.

Kuva 11 esittää simulaation tulokset graafisena esityksenä. Kuvasta nähdään DFS:n alkavan jakaa siirtoaikaa tasaisesti molemmille käyttäjille lämmittelyvaiheen jälkeenkavälin 800 paikkeilla. DFS siis antaa selvästi paremman reiluuden käyttäjien välille kuin PFS. Kun DFS:n ja PFS:n keskimääräisiä tiedonsiirtonopeuksia verrataan, ei algoritmien erilaisella reiluuden painottamisella ollut kovin suurta merkitystä. Käyttäjällä 2 on DFS:ssä vain hieman suurempi keskimääräinen tiedonsiirtonopeus kuin PFS:ssä, mikä voisi johtua paremmasta reiluuden huomioimisesta. Toisaalta DFS:ssä, kun lämmittelyvaihe jätetään huomioimatta, päästään mittaustulosten perusteella myös hieman

parempaan suorituskykyyn laadukkaamman kanavan omaavan käyttäjän 1 tapauksessa. Koska PFS huomioi huonommin reiluuden ja antaen enemmän siirtovuoroja paremman kanavan omaavalle käyttäjälle hyödyntämällä vaihtelevat kanavaolosuhteet DFS:ää paremmin, voitaisiin olettaa, että käyttäjä 1 saisi PFS:llä myös paremman keskimääräisen tiedonsiirtonopeuden ja tätä kautta koko järjestelmän suorituskyvyn paremmuuden. Asia kuvataan myös Qin et al. artikkelissa, jossa PFS tuotti hivenen suuremman keskimääräisen tiedonsiirtonopeuden koko järjestelmälle. Toisaalta myös artikkelin johtopäätös oli se, että algoritmit ovat keskimääräisellä tiedonsiirtonopeudella mitattuna suorituskyvyltään käytännössä samanlaisia. Tämän simulaation ja artikkelin tuloksen ero keskimääräisten nopeuksien suhteen käyttäjien välillä voidaan selittää simulaatiotilanteen mahdollisilla eroavaisuuksilla. Ensinnäkin realisoitunut kanavavahvistus generoidaan satunnaisella eksponentiaalisella hajonnalla, joten tämä satunnaisuus on voinut myös vaikuttaa testin tulokseen jonkin verran. Tässä simulaatiotyössä DFS-käyttäjät ovatkin saaneet suhteessa hivenen parempia realisoituneita kanavavahvistuksia kuin PFS:ssä verrattuna artikkelin simulaatioon ja näin keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet ovat olleet myös hieman suurempia. Tosin 3000 aikavälin otoksella on pyritty pääsemään juuri tästä satunnaisuudesta aiheutuvasta tekijästä eroon. Toinen ero artikkelin simulaatioon on se, että artikkelissa käytettiin 5000 aikavälin otosta, ja PFS:n parempi tiedonsiirtonopeus alkaakin näkyä selvemmin vasta aikavälin 3000 jälkeen (kuva 2 Qin et al. artikkelissa). Lisäksi artikkelin simulaatioympäristö ja käytetyt parametrit ovat todennäköisesti poikenneet jonkin verran tässä työssä käytetyistä. Joka tapauksessa simulaatiotulokset eivät eroa juurikaan toisista. Artikkelin kuvasta 2 nähdään, että sekä PFS:n ja DFS:n vahvat käyttäjät saavat noin 0.6 b/s:n siirtonopeutta ja heikot taas hieman alle 0.4 b/s:n nopeuksia.

Kahden käyttäjän tapaus on lisäksi melko rajoittunut simulaatio tilastollisen tiedon keruun kannalta, ja kuten kappaleessa 5.5 nähdään, 10 käyttäjän simulaatiossa saadaan jo selvää tilastollista eroa PFS:n eduksi, kun pyritään parempaan järjestelmän suorituskykyyn.



Kuva 11: DFS-simulaation tulos, kaksi käyttäjää, keskimääräinen siirtoajan murto-osa.

5.4.6 DFS, kaksi käyttäjää, viiveen mittaus

Tässä simulaatiotapauksessa DFS:lle tehtiin vastaava mittaus kuin PFS:lle kappaleessa 4.5.3. Taulukko 4 kuvaa mittaustulokset käyttäjien viiveiden keskimääräisistä, mediaani-, hajonta- ja maksimiarvoista aikavälien lukumäärinä mitattuna.

	Keskiarvo (aikavälien lkm)	Hajonta (aikavälien lkm)	Mediaani (aikavälien lkm)	Maksimiviive (aikavälien lkm)
Käyttäjä 1	2.03	1.5	2	11
Käyttäjä 2	1.99	1.36	2	11

Taulukko 4: DFS: käyttäjien keskimääräiset, mediaani-, hajonta- ja maksimiviiveet.

Taulukosta 4 nähdään, että molemmat käyttäjät kohtaavat saman maksimiviiveen ja viiveen mediaanin. Käyttäjällä 1 on vain hieman korkeampi keskimääräinen viive sekä

viiveen hajonta kuin käyttäjällä 2, joten tuloksen perusteella nähdään, että DFS tuottaa hyvän reiluuden käyttäjien kesken myös tiedonsiirron laadulla mitattuna. Huonomman kanavan omaava käyttäjä 2 saa laadullisesti vähintään yhtä hyvää tiedonsiirtoa kuin käyttäjä 1. PFS:n tapauksessa, käyttäjä 1 saa myös selvästi parempilaatuista tiedonsiirtoa, mikä osoittaa DFS:n PFS:ää paremman reiluuden käyttäjien kesken.

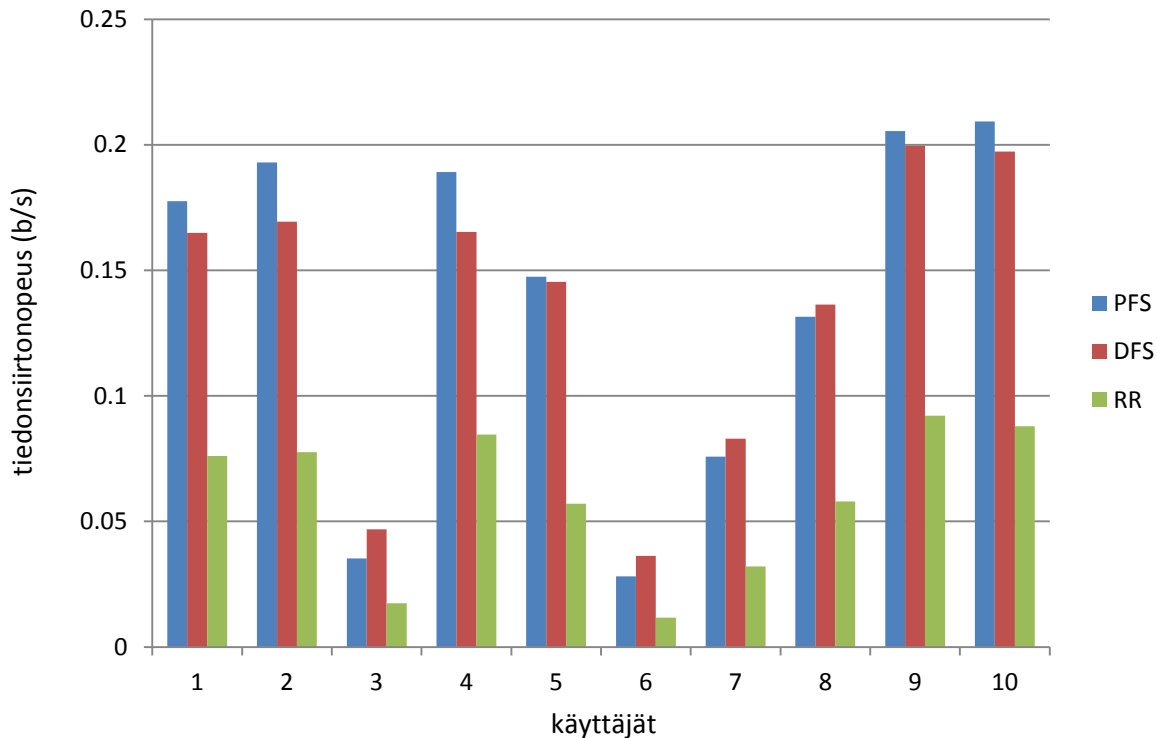
DFS:n hyvän reiluuden huonona puolena on se, että molemmat käyttäjät saavat yhtä huonon kanavan VOIP-palvelua ajatellen. Mittaustuloksen perusteella molempien käyttäjien kohtaama maksimiviive olisi 22 ms (11x2 ms), mikä voisi vaarantaa VOIP-palvelun vaatiman tiedonsiirron laadun. DFS:ää pitäisi tällöin parantaa siten, että siihen lisätään palvelutyypin laatuvaatimustarpeet, eli mikäli viive tulisi liian suureksi, DFS:n pitäisi jossain määrin luopua reiluudesta skedulointikriteerinä ja huomioida skedulointipäätöksissään myös palvelutyypin erilaiset laatuvaatimukset. Tällöin, mikäli käyttäjällä 2 olisi VOIP-palvelu aktiivisena, DFS:n pitäisi tarjota enemmän aikavälejä käyttäjän 2 käytettäväksi ja näin skeduloida käyttäjän 2 eduksi kumoten reiluuden periaatetta.

5.5 10 käyttäjän simulaatiot

10 käyttäjän simulaatiot tehtiin PFS-, DFS- ja round-robin -skedulointialgoritmeilla. Round-robin -skedulointi otettiin mukaan, jotta voidaan verrata myös opportunistisen ja ei-opportunistisen skeduloinnin keskinäisiä suorituskykyeroja. Simulaatioissa käytettiin muistitonta Rayleigh-kanavamallia, joka olettaa, että käyttäjien odotetut kanavavahvistukset ovat tasaisesti jakaantuneita. Näin saadaan luotua simulaatiotilanne käyttäjäkohdaisista keskimääräisten etäisyyksien eroista tukiasemaan nähden. 10 käyttäjän simulaatioissa testattiin yhden ($K=1$) ajokerran tapaukset ja mitattiin keskimääräiset käyttäjien tiedonsiirtonopeudet 3000 aikavälin ajalta. Monitie-etenemistä eikä Doppler-ilmiötä ei tässä tapauksessa huomioitu.

5.5.1 10 käyttäjää, muistiton Rayleigh-kanavamalli, $K=1$

Kuva 12 esittää 10 käyttäjän keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet PFS-, DFS- ja round-robin -algoritmeilla 3000 aikavälin mittausperiodilta.

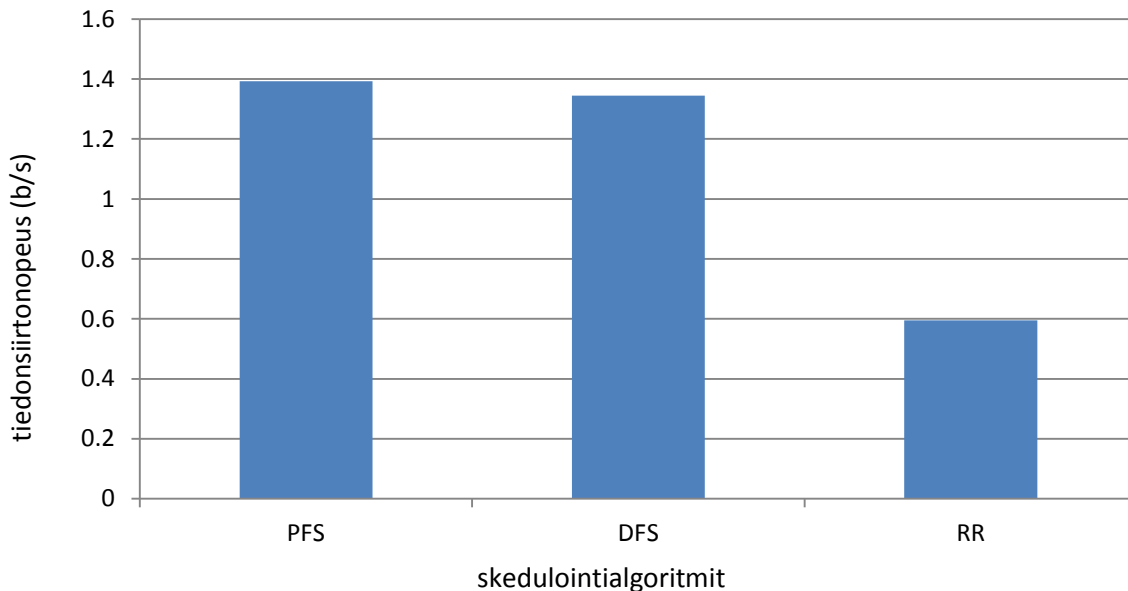


Kuva 12: 10 käyttäjää, $K=1$, käyttäjien keskimääräiset nopeudet PFS-, DFS- ja RR (round-robin) -algoritmeilla.

Kuvasta 12 nähdään, että viisi vahvimman kanavan käyttäjää (K1, K2, K4, K9 ja K10) saavat suurimmat keskimääräiset nopeutensa PFS:llä. Vastaavasti neljän heikoimman kanavan käyttäjää (K3, K6, K7 ja K8) saavat suurimmat nopeutensa DFS:llä. Tulos osoittaa selvästi PFS:n suuremman opportunistisen luonteen, toisin sanoen se antaa etusijan paremman kanavan omaaville käyttäjille ja toisaalta taas syrjii huonomman kanavien käyttäjiä. Tuloksen perustella nähdään myös, että DFS vastaavasti huomioi paremmin reilouden kuin PFS, jolloin huonompien ja parempien kanavien käyttäjien keskimääräisissä nopeuksien ero on pienempi kuin PFS:n tapauksessa.

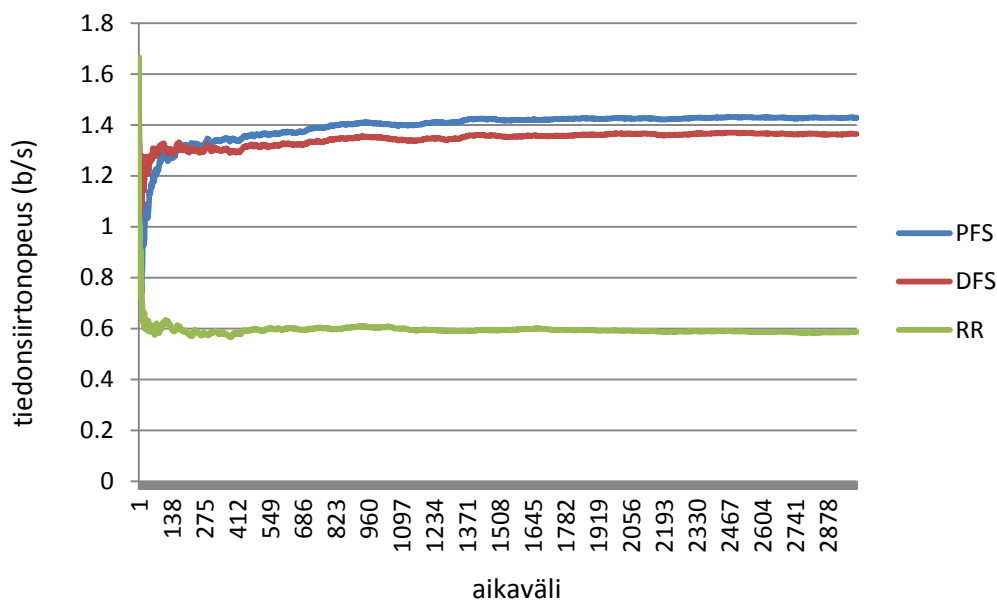
Kuvasta nähdään myös, että round-robinilla kaikkien käyttäjien keskimääräiset nopeudet jäävät huomattavasti alle PFS:n ja DFS:n tuottaman tason. Esimerkiksi parhaan kanavan omaava käyttäjä K10 saa PFS:llä 0.21 b/s, DFS:llä 0.19 b/s ja round-robinilla 0.09 b/s, eli PFS ja DFS tuottavat yli kaksinkertaisen keskimääräisen tiedonsiirtonopeuden verrattuna round-robiniin. Tulos osoittaa, että opportunistisella skeduloinnilla voidaan kasvattaa kaikkien käyttäjien suorituskykyä, kunhan reiluus on otettu riittävästi huomioon.

Kuva 13 esittää PFS-, DFS- ja round-robin -skedulointialgoritmien suorituskyvyt järjestelmän keskimääräisen kokonaistiedonsiirtokapasiteetin kannalta. Järjestelmän keskimääräinen kokonaistiedonsiirtokapasiteetti saadaan siten, että käyttäjien keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet lasketaan kumulatiivisesti yhteen ja näin saadaan koko järjestelmän keskimääräinen kumulatiivinen suorituskyky. Jo 3000 aikavälin näytteellä havaitaan, että PFS antaa paremman kokonaissuorituskyvyn (1.39 b/s) kuin DFS (1.34 b/s). Ero ei ole suuri, mutta selvästi havaittavissa mittaustuloksen perusteella. Round-robinilla järjestelmän kokonaissuorituskyky taas jää huomattavasti alle PFS:n ja DFS:n, ollen alle puolet PFS:n ja DFS:n suorituskyvystä, vain 0.6 b/s



Kuva 13: 10 käyttäjää, $K=1$, järjestelmän kumulatiivinen kokonaisnopeus PFS-, DFS- ja RR (round-robin) -menetelmillä.

Kuva 14 näyttää, miten kumulatiivisten keskimääräisten nopeuksien tasot kehittyvät skedulointialgoritmeilla 3000 aikavälin aikana. Kuvasta nähdään, että PFS:llä nopeus nousee alkulämmittelyn jälkeen (noin aikavälin 1300 jälkeen) hieman yli 1.4 b/s:n tasolle, jossa se pysyy mittauksen loppuun asti. DFS:llä nopeus taas saavuttaa hieman alle 1.4 b/s:n tason ja round-robinilla jäädyään vaatimattomaan 0,6 b/s:n tasoon. Kuvasta nähdään myös, että round-robinin nopeus ensimmäisten aikavälien aikana hypähtää korkealle (1.68 b/s). Tämä johtuu puhtaasta satunnaisuudesta: muutama käyttäjä saavuttaa alussa suuren nopeuden round-robin -skeduloinnin tapauksessa aiheuttaen kumulatiivisen nopeuden suuren arvon. Kun näytteitä kerätään yhä enemmän kaikista käyttäjistä, joita ei siis valita siirtämään hyvän kanavan perusteella, round-robinin kumulatiivinen keskimääräinen suorituskyky laskee hyvin nopeasti 0.6 b/s:n tasolle.



Kuva 14: 10 käyttäjää, $K=1$, kumulatiiviset keskimääräiset tiedonsiirtonopeudet PFS-, DFS- ja RR (round-robin) -menetelmillä.

6 Yhteenveto

Opportunistiset skedulointialgoritmit hyödyntävät tiedonsiirtokanavien olosuhteiden vaihtelevuutta mobiilissa laajakaistaverkossa. Tämä tapahtuu siten, että dataa siirtämään pyritään valitsemaan sellainen käyttäjä, jolla on paras kanava skedulointihetkellä. Järjestelmä pyrkii siis siirtämään dataa parhainta mahdollista kanavaa pitkin ja tuloksena on tällöin järjestelmän tiedonsiirtokapasiteetin kasvaminen ja optimaalinen hyödyntäminen. Tämä on hyvin nähtävissä myös simulaatioiden tuloksissa kappaleessa 5.5, jossa PFS- ja DFS-skedulointialgoritmien avulla tiedonsiirtokapasiteetti kasvaa sitä enemmän mitä kanavaolosuhteita muutetaan, kun taas ei-oppportunistisen skeduloinnin suorituskyky jää todella huonoksi. Jotta kukaan käyttäjästä ei näänny siirtovuoroaan odottaessaan, opportunistisen skedulointialgoritmin pitää huomioida reiluuden periaate. Tällöin siirtovuoroja tulee jakaa myös kanaville, joilla on huonot olosuhteet. Simulaatio osoitti, että sekä PFS että DFS huomioivat reiluuden ja erityisesti DFS huomioi sen todella hyvin. DFS:ssä skedulointi perustuu tilastolliseen analyysiin, jolloin reiluus on helpommin huomioitavissa. PFS taas skeduloi hetkellisen mittaustuloksen perusteella, eikä tällöin reiluuden huomioiminen ole niin helppoa. Toisaalta, mitä enemmän reiluus huomioidaan, sitä enemmän se laskee kokonaistiedonsiirtokapasiteettia. Tämä nähdään sekä kahden käyttäjän että 10 käyttäjän simulaatiotuloksissa PFS:n ja DFS:n välillä kappaleissa 5.4 ja 5.5.

Nykyisin käytössä olevissa mobiileissa langattomissa verkoissa skedulointi on normaalisti keskitettyä eli tukiasema tekee skedulointipäätöksen. Tiedonsiirtosuunta vaikuttaa myös skedulointiratkaisuun, koska downlink- ja uplink-suunnilla on erilaiset tiedonsiirtovaatimukset. Normaalisti downlink-suunnassa oletetaan kulkevan suurempia datamääriä kuin uplink-suunnassa, mutta loppukäyttäjien datansiirtomahdollisuuksien monipuolistumisen myötä myös uplink-suunnan kapasiteettiin täytyy kiinnittää yhä enemmän huomioita.

Keskitetyn skeduloinnin vaihtoehtona on hajautettu skedulointi. Hajautetussa skeduloinnissa kukin käyttäjä päättää itsenäisesti siirtämisestä hajautetun skedulointialgoritmin mukaisesti. Peliteoriaa voidaan hyödyntää luontevasti hajautetussa skedulointialgoritmeissa, koska peliteoria tutkii monen käyttäjän järjestelmiä, joissa käyttäjät pyrkivät saavuttamaan mahdollisimman suuren hyödyn itselleen. Hajautettua skedulointia tutki-

taan paljon, ja esimerkiksi Langrange-kertoimeen perustuva hajautettu skedulointialgoritmi antaa jo todella hyvätuloksen uplink-suunnassa. Hajautettu skedulointi vaatii kuitenkin muutoksia päätelaitteisiin sekä luonnollisesti myös tukiasemiin ja täten vaikuttaa koko langattoman järjestelmän arkkitehtuuriin vaatien lisäinvestointeja. Jotta laitevalmistajat ja operaattorit alkaisivat toteuttaa hajautettuun skedulointiin perustuvia ratkaisuja enemmän, vaaditaan lisää tutkimusta, joka osoittaisi vielä selkeämmin hajautetun skeduloinnin hyödyn.

Hajautettua skedulointia voidaan hyödyntää myös LTE:n pienten solujen järjestelmissä, joissa makrosolu delegoi skedulointipäätöksen tekoa sekundaarisoluille. Makro- ja sekundaarisolujen täytyy synkronisoida yhteisten taajuusresurssiensa käyttöä, jotta resurssit voidaan hyödyntää mahdollisimman hyvin. Ylipäätänsä tarve yhä joustavampiin ja itsekonfiguroituvampiin radioverkkoratkaisuihin lisääntyy. Tällöin tarvitaan dynaamisempaa radiokanavaresurssien ohjausta, jotta ilmarajapinta voidaan hyödyntää mahdollisimman hyvin.

Useissa lähteissä käsitellään myös peliteorian soveltamista hajautetussa skeduloinnissa, joten peliteorian formaalisten mallien hyödyntäminen päätelaitteiden ja tukiasemien skedulointialgoritmien toteutuksissa ei ole välttämättä enää kaukaista tulevaisuutta. Klassisen Nashin peliteorian matemaattisten mallien hyödyntämisen lisäksi tutkitaan yhä enenevässä määrin myös muita pelitereettisiä malleja mahdollistamaan yhä tehokkaampia automaattisia radioverkkojen resurssiensääätöjärjestelmiä, kuten koalitiot ja korreloituneet tasapainopelit.

Langaton tiedonsiirto kehittyy koko ajan ja uusia verkko- ja päätelaiteratkaisuja tutkitaan ja kehitetään. Langaton tiedonsiirto ei ole puhtaasti tekninen ongelma, vaan myös poliittinen, sosiaalinen ja taloudellinen, koska radiotaajuudet ovat luonnonvara, jonka käytöstä ja jakamisesta täytyy päättää yhteiskunnallisesti. Yksi tällainen ongelma-alue on käyttäjille vapaapääsyisten lisensioimattomien taajuusalueiden käyttö. Lisensioimattomat radioverkot voisivat luoda hyötyjä käyttäjille ja tuoda jopa uutta dynaamisuutta langattoman tiedonsiirron markkinoille mikäli ne sallittaisiin, mutta ne asettavat myös erilaisia teknisiä vaatimuksia järjestelmille [LeC05] ja tällöin skedulointiasiat pitää myös ottaa huomioon. Koska periaatteessa lisensioimattomiin radioverkkoihin olisi kaikilla käyttäjillä vapaa pääsy, seurauksena voisi olla taajuuksien mielivaltainen käyttö, mikäli jonkinlaista kontrollimekanismia ei käytettäisi. Tällöin vaaditaan säännöt, joiden

puitteissa käyttäjät pääsevät sisään tällaisiin radioverkkojärjestelmiin ja käyttävät hallitusti yhteisiä tiedonsiirtoresursseja niin, että järjestelmän pysyy tasapainossa ja toimii optimaalisesti ja käyttäjät ovat tyytyväisiä sen tarjoamaan tiedonsiirtoväylään. Sääntöjen implementaatio suoritetaan skedulointialgoritmien avulla, jotka, joko hajautetusti tai keskitetysti, ohjaavat käyttäjien tiedonsiirtoa ja pääsyä järjestelmään.

Päätelaitepuolen kehitys luo myös uusia tarpeita tarkentaa radioverkkojen resurssien mahdollisimman optimaalista hyödyntämistä ja jakamista käyttäjien kesken. Älypuhelin, tablettien ja M2M-päätelaitteiden (Machine to Machine) lisäksi hyvänä esimerkkinä aivan uusista päätelaiteratkaisuista on Googlen kehitteillä oleva silmälasipuhelin, joka voi luoda edelleen tarpeita kehittää uusia ratkaisuja käyttäjien väliseen skedulointiin.

Simulointityötä voisi jatkaa ensinnäkin simuloimalla PFS:lle ja DFS:lle aikaskaalautuvat Rayleigh-kanavaolosuhteet 10 käyttäjän tapauksessa, siis nopean häipymisen olosuhteet, joissa Doppler-ilmiö ja monitie-eteneminen huomioidaan. Toiseksi, simuloimalla lisäksi kahden hajautetun skedulointialgoritmin tapaukset kahden ja 10 käyttäjän tapauksissa, voisimme verrata keskitetyn ja hajautetun skedulointialgoritmien suorituskykyä keskenään kokeellisesti. Lagrange-kertoimeen perustuva menetelmä on eräs mielenkiintoinen vaihtoehto hajautetuksi skedulointialgoritmiksi, lupaavien tuloksiensa vuoksi [KuQ03]. Kolmanneksi, mielenkiintoista olisi myös simuloida hajautetun skeduloinnin suorituskykyä femtosolujärjestelmänä, koska oletettavasti pienten solujen järjestelmät lisääntyvät LTE:n käyttöönoton myötä.

Lähteet

- Abr70 Abramson Norman, THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications. *AFIPS '70 (Fall): Proc. Of fall joint computer conference*, 17.-19. marraskuuta 1970, sivut 281 - 285.
- AKG11 Attar, Alireza, Krishnamurthy, Vikram, Gharehsiran, Omid, Interferencemanagement using cognitive base-stations for UMTS LTE. *Communication magazine, IEEE*, volyymi 49, numero 8, elokuu 2011, sivut 152 - 159.
- ALT10 Al-Zubaidy, Hussein, Lambadaris, Ioannis, Talim, Jerome, Optimal scheduling in high-speed downlink packet access networks. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS) journal*, volyymi 21, numero 1, artikkeli no. 3, joulukuu 2010.
- AND05 Andrews, Matthew, A survey in scheduling theory in wireless data networks. *The IMA Volumes in Mathematics and its Applications, Wireless Communications*, volyymi 143, 2007, sivut 1 - 17.
- AnP12 An, Xueli, Pianese, Fabio, Understanding co-channel interference in LTE-based multi-tier cellular networks. *Proc. of the 9th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks (PE-WASUN '12)*, 2012, sivut 107 - 112.
- BaB97 Barberis, Sergio, Berruto, Ermanno, A CDMA-based radio interface for third generation mobile systems. *Mobile Networks and Applications - Special issue on channel access in wireless networks*, volyymi 2, numero 1, kesäkuu 1997, sivut 19 - 29.
- Ber82 Bertsekas, Dimitri, *Constrained optimization and Lagrange multiplier methods*. Academic press, 1982, USA.

- CAG08 Chandrasekhar, Vikram, Andrews, Jeffrey, Gatherer, Alan, Femtocell networks: a survey. *Communications Magazine, IEEE*, volyymi 46 , numero 9, 2008, sivut 59 - 67.
- CPG12 Capozzi, F., Piro, G., Grieco, L., Boggia, G., Camarda, P., A system-level simulation framework for LTE femtocells. *Proc. of the 5th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTOOLS '12)*, 2012, sivut 211 - 213.
- GSK10 Goetz, Reiner, Stephan, Anne, Kottmamp, Meik, LTE in focus. *EDN (Electronics Design Networks)* 55.7, 4. elokuuta 2010 , sivut 17 - 23.
- GuT68 Gue, Ronald, Thomas, Michael, Mathematical methods in operations research. The Macmillan Company, 1968, USA.
- HKH08 Han, Sang-wook, Kim, Hoon, Han, Youngnam, Utility maximization using resource pricing power control in uplink DS-CDMA. *IEEE Communication Letters* 12(4), 2008, sivut 286 - 288.
- HLP12 He, Xiuqiang, Lee, Patrick, Pan, Lujia, He, Cheng, Lui, John, A panoramic view of 3g data/control-plane traffic: mobile device perspective. *Proc. of the 11th international IFIP TC 6 conference on Networking*, volyymi osa I, toukokuu 2012, sivut 318 - 330.
- JDG12 Jin, Yu, Duffield, Nick, Gerber, Alexandre, Haffner, Patrick, Hsu, Wen-Ling, Jacobson, Guy, Sen, Subhabrata, Venkataraman, Shobha, Zhang, Zhi-Li, Characterizing data usage patterns in a large cellular network. *Proc. of the 2012 ACM SIGCOMM workshop on Cellular networks: operations, challenges, and future design (CellNet '12)*, 2012, sivut 7 - 12.
- JoF08 Jovanovic-Dolecek, Gordana, Fernandez-Vazquez, Alfonso, Use of MATLAB in teaching the fundamentals of random variables. *ACM SIGCSE Bulletin*, volyymi 40, numero 4, 2008, sivut 46 - 51.
- Kar11 Karmeshu, Khandelwal Vineet, MGF and high order moment of channel capacity in log-normal fading environment. *Proc. of the 1st International*

Conference on Wireless Technologies for Humanitarian Relief (ACWR '11), 2011, sivut 99 - 106.

- KnH95 Knopp, Raymond., Humblet, Pierre, Information capacity and power control in single-cell multiuser communications. *IEEE International Conference on Communications*, Seattle, 1995, volyymi 1, sivut 331 - 333.
- KuQ03 Kumaran, Krishnan, Qian, Lijun, Uplink scheduling in CDMA Packet-Data Systems. *IEEE INFOCOM, 2003, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*, volyymi 1, 2003, sivut 292 - 300.
- KuR05 Kulkarni, Sunil Suresh, Rosenberg, Catherine, Opportunistic scheduling: generalizations to include multiple constraints, multiple interfaces, and short term fairness. *Wireless Networks journal*, volyymi 11, numero 5, syyskuu 2005, sivut 557 - 569.
- LCD03 Lin, Haitao, Chatterjee, Mainak, Das, Sajal, Basu, Kalyan, ARC: an integrated admission and rate control framework for CDMA data networks based on non-cooperative games. *Proc. of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '03)*, 2003, sivut 326 - 338.
- LCS01 Liu, Xin, Chong, Edwin, Shroff, Ness, Opportunistic transmission scheduling with resource-sharing constraints in wireless networks. *IEEE, Journal on selected areas in communications*, volyymi 19, numero 10, lokakuu 2001.
- LeC05 Lehr, William, Corwcroft, Jon, Managing shared access to a spectrum commons. *IEEE conference publications, New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (Dyspan)*, 2005, 8.-11. lokakuuta 2005, sivut 420 - 444.
- Lin00 Lindell, Ismo, Radioaaltojen eteneminen. *Otatieto*, viides muuttumaton painos, 2000, Helsinki.
- LuR57 Luce, Duncan, Raiffa, Howard, Games and decisions. *John Wiley & Sons, Inc.*, 1957, USA.

- LWT08 Leung, Victor, Wong, Terrence, TalebiFard, Peyman, Breaking the silos: access and service convergence over the mobile internet. *Proc. of the 11th international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM '08)*, 2008, sivut 286 - 293.
- MaW01 MacKenzie, Allen, Wicker, Stephen, Game theory and the design of self-configuring, adaptive wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, volyymi 39, no. 11, marraskuu 2001, sivut 126 - 131.
- Mor94 Morris, Peter, Introduction to game theory. *Springer-Verlag*, New York Inc., 1994, USA.
- MäS07 Mäder, Andreas, Staehle, Dirk, A flow-level simulation framework for hsdpa-enabled umts networks. *Proc. of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM '07)*, 2007, sivut 269 - 278.
- NRG04 Neel, James, Reed, Jeffrey, Gilles, Robert, Game models for cognitive radio algorithm analysis. *Proc. on Software Defined Radio (SDR) forum technical conference*, marraskuu 2004.
- QiB04 Qin, Xiangping, Berry, Randal, Opportunistic splitting algorithms for wireless networks with heterogeneous users. *Proc. on The Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, 2004, Princeton, USA.
- Øst11 Østerbø, Olav, Scheduling and capacity estimation in LTE. *Proc. of the 23rd International Teletraffic Congress (ITC '11)*, 2011, sivut 63 - 70.
- Pie69 Pierre, Donald, Optimization theory with applications. *John Wiley & sons*, 1969, USA.
- PRR11 Parra, Octavio, Rios, Angela, Rubio, Gustavo, IPV6 and IPV4 QoS mechanisms. *Proc. of the 13th International Conference on Information Integration and Web-based Applications and Services (iiWAS '11)*, joulukuu 2011, sivut 463 - 466.

- RBT11 Rajeswari, K., Bruntha, K., Thiruvengadam, S.J., Robust minimum mean square error channel estimation for LTE downlink OFDM system. *Proc. of the 1st International Conference on Wireless Technologies for Humanitarian (Relief ACWR '11)*, 2011, sivut 41 - 48.
- Räl11 Räisänen, Antti, Lehto, Arto, Radiotekniikan perusteet. *Otatieto*, 2011, 13. painos, Helsinki.
- SaS08 Sager, Alhloul, Sufian, Yousef, Real time simulation model to test small scale fading effect for wideband systems. *Proc. of the 11th Communications and Networking Simulation (CNS) Symposium*, 2008.
- ScE11 Schatz, Raimund, Egger, Sebastian: Vienna surfing: assessing mobile broadband quality in the field. *W-MUST'11: proc. of the first ACM SIGCOMM workshop on Measurement up the stack*, elokuu 2011, sivut 7 - 12.
- Sha48 Shannon, Claude, A mathematical theory of communication. Reprinted with corrections *The Bell System Technical Journal*, volyymi 27, sivut 379 – 423 ja 623 – 656, heinäkuu ja lokakuu, 1948.
- Sie08 Siegfried, Tom, John Nash, peliteoria ja luonnon koodi. *Terra Cognita Oy*, 2008, Helsinki.
- Ste08 Steiner, Winfried, A Stackelberg-Nash model for new product design. *Springer-Verlag, Online-julkaisu*: 20. kesäkuuta 2008.
- SuS09 Su, Yi, Van der Schaar, Mihaela, From competition to cooperation: Stackelberg Equilibrium in multi-user power control games. *IEEE conference publications, Game Theory for Networks*, 2009 (GameNets '09), 13.-15. toukokuuta 2009.
- TZS12 Tsompanidis, Ilias, Zahran, Ahmed, Sreenan, Cormac, Towards utility-based resource management in heterogeneous wireless networks. *Proc. of the seventh ACM international workshop on Mobility in the evolving internet architecture (MobiArch'12)*, 22. elokuuta 2012, sivut 23 – 28, Istanbul, Turkki.

- VTL02 Viswanath, Pramod, Tse, David, Laroia, Rajiv, Opportunistic beam forming using dumb antennas. *Proc. on IEEE, Transactions on information theory*, volyymi 48, numero 6, kesäkuu 2002.
- WCJ05 Wang, Xinyuan, Chen, Shiping, Jajodia, Sushil, Tracking anonymous peer-to-peer VoIP calls on the internet. *Proc. of the 12th ACM conference on Computer and communications security (CCS '05)*, marraskuu 2005, sivut 81 - 91.
- WIH11 Wac, Katarzyna, Ickin, Selim, Hong, Jin-Hyuk, Janowski, Lucjan, Fiedler, Markus, Dey, Anind, Studying the experience of mobile applications used in different contexts of daily life. *W-MUST'11: proc. of the first ACM SIGCOMM workshop on Measurement up the stack*, 2011, sivut 7-12.
- XEG11 Xu, Qiang, Erman, Jeffrey, Gerber, Alexandre, Mao, Zhuoqing, Pang, Jeffrey, Venkataraman, Shobha, Identifying diverse usage behaviors of smartphone apps. *Proc. of the 2011 ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference (IMC '11)*, marraskuu 2011, sivut 329 - 344.
- XMM13 Xu, Qiang, Mehrotra, Sanjeev, Mao, Zhuoqing, Li, Jin, PROTEUS: network performance forecast for real-time, interactive mobile applications. *Proc. of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '13)*, kesäkuu 2013, sivut 347 - 360.
- XSC01 Xiao, Mingbo, Shroff, Ness, Chong, Edwin, Utility based power control in cellular systems. *IEEE conference publications, INFOCOM 2001*, Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, volyymi 1, 2001, sivut 412 - 421.
- XYJ12 Xie, Renchao, Yu, Fei, Ji, Hong, Spectrum sharing and resource allocation for energy-efficient heterogeneous cognitive radio networks with femtocells. *IEEE conference publications, Communications (ICC), 2012 IEEE International conference*, 10.-15. kesäkuuta 2012, sivut 1661 - 1665.

ZMC09 Zhang, Zhi, Moola, Sudhir, Chong, Edwin, Opportunistic fair scheduling in wireless networks: an approximate dynamic programming approach. *Online-julkaisu: 4. elokuuta 2009* © Springer Science + Business Media, LLC 200

Liite A: Matlab-skriptit

A.1 PFS, kaksi käyttäjää, keskimääräinen tiedonsiirron nopeus (prop fairh1h05.m)

```
timeslots = 3000;
ch1=zeros(1,timeslots);
ch05=zeros(1,timeslots);

for i = 1:timeslots
    d1 = exprnd(1);
    d05 = exprnd(0.5);
    p1(i) = log2(1+d1)/mean(log2(1+ch1));
    p05(i) = log2(1+d05)/mean(log2(1+ch05));
    if p1(i) > p05(i)
        ch1(i) = log2(1+d1);
    else
        ch05(i) = log2(1+d05);
    end
end

avch1 = zeros(1,timeslots);
avch1(1) = ch1(1);
totalch1 = ch1(1);

avch05 = zeros(1,timeslots);
avch05(1) = ch05(1);
totalch05 = ch05(1);
fileId = fopen('tiedostopropfairh1h05.txt', 'w');
for j = 2:timeslots
    totalch1 = totalch1 + ch1(j);
    avch1(j) = totalch1/j;

    totalch05 = totalch05 + ch05(j);
    avch05(j) = totalch05/j;
    fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\n', avch1(j), avch05(j), ch1(j), ch05(j));
end
fclose(fileId);
```

A.2 PFS, kaksi käyttäjää, tiedonsiirtoaika ja -viiveet (propfairfracoftimeh1h05.m)

```

timeslots = 3000;
ch1=zeros(1,timeslots);
ch05=zeros(1,timeslots);
ch1transmitted=zeros(1,timeslots);
ch05transmitted=zeros(1,timeslots);

for i = 1:timeslots
    d1 = exprnd(1);
    d05 = exprnd(0.5);
    p1(i) = log2(1+d1)/mean(log2(1+ch1));
    p05(i) = log2(1+d05)/mean(log2(1+ch05));
    if p1(i) > p05(i)
        ch1(i) = log2(1+d1);
        ch1transmitted(i) = 1;
    else
        ch05(i) = log2(1+d05);
        ch05transmitted(i) = 1;
    end
end

avch1transmitted = zeros(1,timeslots);
avch1transmitted(1) = ch1transmitted(1);
totalch1transmitted = ch1transmitted(1);

avch05transmitted = zeros(1,timeslots);
avch05transmitted(1) = ch05transmitted(1);
totalch05transmitted = ch05transmitted(1);
fileId = fopen('tiedostopropfairfracoftime1h05.txt', 'w');
for j = 2:timeslots
    totalch1transmitted = totalch1transmitted + ch1transmitted(j);
    avch1transmitted(j) = totalch1transmitted/j;

    totalch05transmitted = totalch05transmitted + ch05transmitted(j);
    avch05transmitted(j) = totalch05transmitted/j;
    fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\n', avch1transmitted(j), avch05transmitted(j), ch1transmitted(j),
ch05transmitted(j));
end
fclose(fileId);

```

A.3 PFS, 10 käyttäjää, muistiton Rayleigh-kanava, $K = 1$ (propfairmultiuser_unifrnd_withoutK.m)

```

timeslots = 3000;

numb_of_users = 10;

Channel_realization = zeros(1,numb_of_users);

kfhanta = zeros(1,numb_of_users);

totalch = zeros(1,numb_of_users);

for j = 1:numb_of_users

    for i = 1:timeslots

        ch(j,[i])= 0;

        avch(j,[i]) = 0;

    end

end

Gain_values = unifrnd(0,1,1,10);

for i = 1:timeslots

    for j = 1:numb_of_users

        Channel_realization(j)= exprnd(Gain_values(j));

        Proportional_value(j,i) = log2(1+Channel_realization(j))/mean(log2(1+ch(j,:)));

    end

    [C,I] = max(Proportional_value(:,i));

    ch(I,[i]) = log2(1+Channel_realization(I));

end

for j = 1:numb_of_users

    totalch(j) = ch(j,[1]);

    for i = 2:timeslots

        totalch(j) = totalch(j) + ch(j,[i]);

        avch(j,[i]) = totalch(j)/i;

    end

end

```

```

end

fileId = fopen('tiedostopropfairmultiuser1withoutK1.txt', 'w');

for k = 2:timeslots

    fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n', avch(1,[k]), avch(2,[k]), avch(3,[k]), avch(4,[k]), avch(5,[k]));

end

fclose(fileId);

fileId = fopen('tiedostopropfairmultiuser2withoutK2.txt', 'w');

for k = 2:timeslots

    fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n', avch(6,[k]), avch(7,[k]), avch(8,[k]), avch(9,[k]), avch(10,[k]));

end

fclose(fileId);

```

A.4 DFS, kaksi käyttäjää, keskimääräinen tiedonsiirron nopeus (distfairh1h05.m)

```

timeslots = 3000;
ch1=zeros(1,timeslots);
ch05=zeros(1,timeslots);

for i = 1:timeslots
    d1 = exprnd(1);
    d05 = exprnd(0.5);
    kf1hanta = 1 - cdf('exp', d1, 1);
    kf05hanta = 1 - cdf('exp', d05, 0.5);
    if kf1hanta < kf05hanta
        ch1(i) = log2(1+d1);
    else
        ch05(i) = log2(1+d05);
    end
end

avch1 = zeros(1,timeslots);
avch1(1) = ch1(1);
totalch1 = ch1(1);

avch05 = zeros(1,timeslots);
avch05(1) = ch05(1);

```

```

totalch05 = ch05(1);
fileId = fopen('tiedostodistfairh1h05.txt', 'w');
for j = 2:timeslots
    totalch1 = totalch1 + ch1(j);
    avch1(j) = totalch1/j;

    totalch05 = totalch05 + ch05(j);
    avch05(j) = totalch05/j;
    fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\n', avch1(j), avch05(j), ch1(j), ch05(j));
end
fclose(fileId);

```

A.5 DFS, kaksi käyttäjää, tiedonsiirtoaika ja -viiveet (distfairfracoftimeh1h05.m)

```

timeslots = 3000;
ch1transmitted=zeros(1,timeslots);
ch05transmitted=zeros(1,timeslots);

for i = 1:timeslots
    d1 = exprnd(1);
    d05 = exprnd(0.5);
    kf1hanta = 1 - cdf('exp', d1, 1);
    kf05hanta = 1 - cdf('exp', d05, 0.5);
    if kf1hanta < kf05hanta
        ch1transmitted(i) = 1;
    else
        ch05transmitted(i) = 1;
    end
end

avch1transmitted = zeros(1,timeslots);
avch1transmitted(1) = ch1transmitted(1);
totalch1transmitted = ch1transmitted(1);

avch05transmitted = zeros(1,timeslots);
avch05transmitted(1) = ch05transmitted(1);
totalch05transmitted = ch05transmitted(1);
fileId = fopen('tiedostodistfairhfracoftime1h05.txt', 'w');
for j = 2:timeslots
    totalch1transmitted = totalch1transmitted + ch1transmitted(j);

```



```

avch1transmitted(j) = totalch1transmitted/j;

totalch05transmitted = totalch05transmitted + ch05transmitted(j);
avch05transmitted(j) = totalch05transmitted/j;
fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\n', avch1transmitted(j), avch05transmitted(j), ch1transmitted(j),
ch05transmitted(j));
end
fclose(fileId);

```

A.6 DFS, 10 käyttäjää, muistiton Rayleigh-kanava, $K = 1$ (distfairmultiuser_withoutK.m)

```

timeslots = 3000;
numb_of_users = 10;
Channel_realization = zeros(1,numb_of_users);
kfhanta = zeros(1,numb_of_users);
totalch = zeros(1,numb_of_users);
for j = 1:numb_of_users
    for i = 1:numb_of_users
        ch(j,[i])= 0;
        avch(j,[i]) = 0;
    end
end
end

Gain_values = unifrnd(0,1,1,10);
for i = 1:timeslots
    for j = 1:numb_of_users
        Channel_realization(j)= exprnd(Gain_values(j));
        kfhanta(j) = 1 - cdf('exp', Channel_realization(j), Gain_values(j));
    end
    [C,I] = min(kfhanta);
    Selected_channel = I;
    ch(Selected_channel,[i]) = log2(1+Channel_realization(I));
end

for j = 1:numb_of_users
    totalch(j) = ch(j,[1]);
    for i = 2:timeslots
        totalch(j) = totalch(j) + ch(j,[i]);
        avch(j,[i]) = totalch(j)/i;
    end
end
end

```

```

fileId = fopen('tiedostodistfairmultiuser1withoutK1.txt', 'w');
for k = 2:timeslots
    fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n', avch(1,[k]), avch(2,[k]), avch(3,[k]), avch(4,[k]), avch(5,[k]));
end
fclose(fileId);
fileId = fopen('tiedostodistfairmultiuser2withoutK2.txt', 'w');
for k = 2:timeslots
    fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n', avch(6,[k]), avch(7,[k]), avch(8,[k]), avch(9,[k]), avch(10,[k]));
end
fclose(fileId);

```

A.7 Round-robin, 10 käyttäjää, muistiton Rayleigh-kanava, $K = 1$ (roundrobinmultiuserwithoutK.m)

```

timeslots = 3000;

numb_of_users = 10;

Channel_realization = zeros(1,numb_of_users);

kfhanta = zeros(1,numb_of_users);

totalch = zeros(1,numb_of_users);

Selected_channel = 1;

for j = 1:numb_of_users

    for i = 1:numb_of_users

        ch(j,[i])= 0;

        avch(j,[i]) = 0;

    end

end

Gain_values = unifrnd(0,1,1,10);

for i = 1:timeslots

    for j = 1:numb_of_users

        Channel_realization(j)= exprnd(Gain_values(j));

    end

    ch(Selected_channel,[i]) = log2(1+Channel_realization(Selected_channel));

```

```

    Selected_channel = Selected_channel + 1;

    if (Selected_channel == 11)

        Selected_channel = 1;

    end

end

for j = 1:numb_of_users

    totalch(j) = ch(j,[1]);

    for i = 2:timeslots

        totalch(j) = totalch(j) + ch(j,[i]);

        avch(j,[i]) = totalch(j)/i;

    end

end

end

fileId = fopen('tiedostoroundrobinmultiuser1withoutK1.txt', 'w');

for k = 2:timeslots

    fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n', avch(1,[k]), avch(2,[k]), avch(3,[k]), avch(4,[k]), avch(5,[k]));

end

fclose(fileId);

fileId = fopen('tiedostoroundrobinmultiuser2withoutK2.txt', 'w');

for k = 2:timeslots

    fprintf(fileId, '%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n', avch(6,[k]), avch(7,[k]), avch(8,[k]), avch(9,[k]), avch(10,[k]));

end

fclose(fileId);

```