



ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА СПЕКТРАЛНАТА ЕФЕКТИВНОСТ ПРИ МОБИЛНИТЕ МРЕЖИ

Георги Димитров
g.dimitrov@nvna.eu

**ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, гр. Варна, ул. “Васил Друмев“ 73,
БЪЛГАРИЯ**

Ключови думи: *излъчвана мощност, спектрална ефективност, интерференция, пропускателна способност, GSM, CDMA, Wi-Fi, 4G LTE*

Резюме. *Спектралната ефективност при безжичните мрежи представлява средния брой битове информация получен след дискретизация, който може да бъде надеждно прехвърлен през радио канал. Тя може да бъде подобрена чрез техники за управление на радиоресурсите. Това могат да са ефективно фиксирано или динамично разпределение на каналите, контрол на мощността, адаптация на връзката и схеми за диверсификация. Други начини за подобряване на спектралната ефективност включват множествен достъп в права и обратна посока чрез пространствено разделяне и получаване на информация за реализациите на канала. В статията са посочени два начина за подобряване на спектралната ефективност - чрез увеличаване на излъчваната мощност или чрез използване на по-голям брой приемни антени. Увеличаването на предавателната мощност ще увеличи и сигнала, и интерференцията еднакво, което ще доведе до висока граница на спектралната ефективност. При еднородна линейна антенна решетка, която може да "разграничава" индивидуалните потребители с мобилни устройства, степента на интерференцията намалява значително и като цяло става малка с намаляването на броя на антените. Използването на повече антени намалява нивото на интерференция, стига ъглите на постъпване на сигналите от различните мобилни устройства да са достатъчно различни. Спектралната ефективност зависи от съотношението сигнал/шум на желаня сигнал и степента на междуклетъчна интерференция. За мобилното устройство тя е бавно нарастваща логаритмична функция на съотношението сигнал/шум. Подобрието е възможно в „скромни“ граници чрез увеличаване на това съотношение. На практика, каналите при които има пряка видимост съдържат случайни отражения и разсейване. Тези канали не следват определен модел. Каналите без пряка видимост могат да се състоят от различни многопътни компоненти, които пристигат под различни ъгли и с различни фазови изменения.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Предаванията в клетъчните мрежи като цяло, са подложени на интерферентни смущения от едновременни предавания в същата или от други клетки. Интерференцията не е задължително независима от входния сигнал и характеристиките

на канала. Точният капацитет на интерферентния канал е неизвестен, но могат да бъдат разглеждани за удобство по-ниски граници. Такава ниска граница в капацитета може да бъде интерференцията, ако се разглежда като допълнителен източник на шум в декодера. Ако смущаващият сигнал е много силен, тогава може потенциално да се декодира и да извади интерферентния сигнал, преди да се декодира желаният сигнал. Това е концептуално просто, но трудно за изпълнение на практика в мобилна клетъчна мрежа, където смущаващите сигнали се променят с течение на времето и клетките работят самостоятелно една спрямо друга.

ТЕОРЕТИЧЕН АНАЛИЗ НА ПРОБЛЕМА

Нека се разгледа комуникационен канал с честотна лента B [Hz]. Теоремата за дискретизиране на Найкуист-Шенън предполага че един честотно ограничен комуникационен сигнал, който се изпраща по един канал е изцяло определен от $2B$ реалната стойност на два симетрични еднакви отчета за секунда.[1] Когато се разглежда комплексното представяне на основната лента на сигнала, B - отчетите на сигнала за секунда представляват естественото очаквано количество. Тези B на брой отчети представляват степените на свобода на комуникационния сигнал. Спектралната ефективност представлява количеството информация, която може да бъде прехвърлена през отчетите. По-голяма спектрална ефективност означава повече на брой честотни канали в единица честотен обхват.

Спектралната ефективност на един процес, свързан с кодиране/декодиране представлява средния брой битове информация, получен от дискретизацията, който може надеждно да бъде прехвърлен през разглеждания канал. От дефинирането става ясно че спектралната ефективност е детерминирано число, което може да бъде измерено в битове според комплексните отчети. Тъй като са налице B на брой отчети в секунда, еквивалентната мерна единица ще бъде бит в секунда, на Херц [$bit/s/Hz$]. При канали където се наблюдава фединг и претърпяващи промени във времето, спектралната ефективност може да бъде разглеждана като средната стойност на величината в [$bit/s/Hz$]. За простота, може да се разглежда че спектралната ефективност на канала между мобилния апарат и базовата станция, за спектрална ефективност на мобилното устройство. Може да се разглежда сумарната спектрална ефективност на каналите от всички мобилни устройства свързани към съответна базова станция като величина измервана в $bit/s/Hz/cell$. Каналът между предавател и приемник може да има различни стойности на спектрална ефективност, според подбраната модулация или начин на кодиране. Най-високата спектрална ефективност която може да се постигне е от ключово значение при изграждане на комуникационните мрежи. Максималната спектрална ефективност се определя от капацитета на канала, дефиниран от Шенън още през 1948г. [2] Следствие на теоремата представлява следното. Ако е налице входен сигнал x и изходен сигнал y , разпределението на входния сигнал е ограничено по мощност и е налице очакван изходен сигнал, според характеристиките на канала. Такъв канал се счита за канал с един вход и един изход (SISO -single input single output). Практическото значение на капацитета на канала може да бъде описано, като се разглежда предаване на информационна последователност с N скалярни входни сигнала, генерирани от ергодичен стохастичен процес през дискретен канал. Капацитетът на канал с фединг изисква предаването да обхваща асимптотично много реализации на случайна променлива, която описва канала. Това е т.нар. ергодичен капацитет, тъй като е необходим стационарен случаен фединг-процес, ако статистическите свойства могат да се подразбират от една последователност на реализации на канала. Всяка реализация или всяко състояние на канала може да се използва за определен предварителен и ограничен брой входни сигнали, след което се

разглежда нова случайна реализация на процеса. Ако скаларният входен сигнал има спектрална ефективност равна на капацитета, информационната последователност може така да бъде кодирана, че приемникът да я декодира с произволно ниска вероятност за грешка. С други думи е необходимо безкрайно забавяне на декодирането за да се постигне съответния капацитет.

УВЕЛИЧАВАНЕ НА ИЗЛЪЧВАНАТА МОЩНОСТ

Спектралната ефективност естествено зависи от нивото на приетия сигнал. Параметърът съотношение сигнал/шум е определящ при тези зависимости. Излъчваният сигнал достига приемника по много различни пътища и полученият резултатен сигнал може да подсили или да отслаби приеманото ниво. Когато броят на отразените сигнали е голям, може да се приложи законът за Гаусовото разпределение. При този случай, наблюдаваният резултат се нарича маломерен фединг и притежава малък ефект (породен от малките промени в условията на разпространение, като промяна на местоположението на предавателя, приемника или другите обекти). Вариациите в нивото, свързани с пространствено зависимите загуби от отражение, засенчването, коефициента на усилване на антените, както и загубите при проникване в различна среда се възприемат като макроскопични. Спектралната ефективност изцяло се характеризира от съотношението сигнал/шум на желанния сигнал и относителната стойност на междуклетъчната интерференция. Спектралната ефективност може да се разглежда като нарастваща функция на съотношението сигнал/шум, което лесно се открива при условия на видима комуникация (по линия на пряка видимост LoS). Спектралната ефективност може да се подобри с увеличаване на излъчваната мощност, но не безкрайно. Ограничението всъщност е силата на интерферентните сигнали. В случаите на липса на пряка видимост (nLoS), спектралната ефективност се явява по-малка поради случайните флукутации в приетото ниво на изхода на канала, взети на квадрат [3]. Все пак, такава случайност при високи нива на съотношението сигнал/шум води до известни предимства поради факта че интерференцията може да бъде слаба при определени канални реализации.

$$(1) \quad SNR = \frac{p|h|^2}{\sigma^2}$$

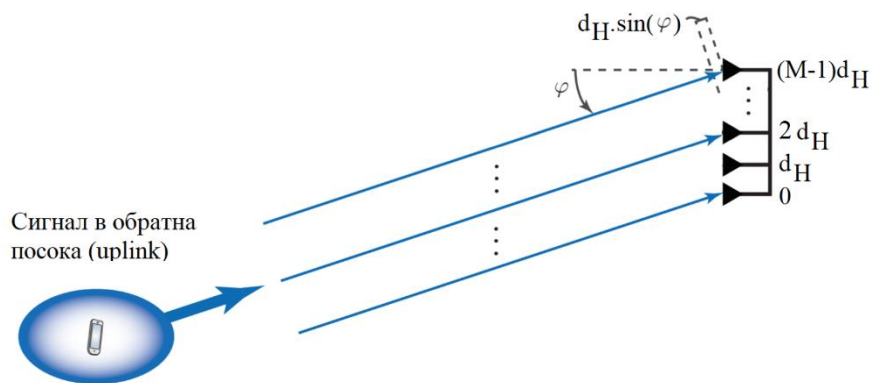
Увеличаването на съотношението сигнал/шум SNR чрез увеличаване на предавателната мощност подобрява спектралната ефективност, но положителният ефект достига до границата при която се получава интерферентно-ограничен режим. Това е в резултат на факта че липсват достатъчно степени на свобода за базовата станция, която не може да отдели лесно желанния сигнал от интерферентните. При съществуващите мобилни мрежи е налице такова състояние, докато при нивото с точките на достъп ситуацията зависи от разпределението на апаратурата (станциите) за достъп. В (1) е изразено съотношението на получената мощност на сигнала към мощността на шума, където $|h|^2$ са реализациите на канала в произведение с мощността, а σ е независимият шум.

Малките клетки обикновено осигуряват покритие на много ограничени зони, но от друга страна, те няма да имат толкова интерферентни смущения поради затихването на смущаващите сигнали от другите съседни клетки. Подходът с просто регулиране на мощностите не може да допринесе за увеличаване на спектралната ефективност при клетъчните мрежи. По отношение на фиксирани мощности, друг начин е да се увеличи съотношението сигнал/шум като се увеличи плътността на базовите станции. Когато се моделира канал, често се възприема че средното усилване по канала е обратно пропорционално на разстоянието на което се пренася сигнала, като се възприема експоненциална промяна на загубите. Мощността на приетия сигнал и

междуклетъчната интерференция се увеличават грубо по същия начин по който се увеличава плътността на покритието, тъй като дистанциите и до желана базова станция, и до смущаващата базова станция намаляват. Това налага ограничение на спектралната ефективност, когато се увеличава плътността на базовите станции. Увеличаването на плътността при случаи на близки дистанции е нежелано, поради факта че сумарната мощност на интерферентните сигнали се увеличава много по-бързо от желаната мощност на сигнала.

ПРИЛАГАНЕ НА РЕШЕТКА ПРИЕМНИ АНТЕНИ

Вместо да се увеличава изходящата мощност в обратна посока (uplink), базовите станции могат да използват множество антени, които да събират повече енергия от електромагнитните вълни. Тази концепция е известна още от тридесетте години на миналия век [3, 4] с уточнението да бъде изпълнена пространствената диверсификация. Предназначението на такава конфигурация е "борбата" за преодоляване на фединга на канала, при разпространение различно от пряката видимост. Антените са насочени в различни посоки и се ползват за различните реални ситуации на затихване или фединг. Използването на повече приемни антени също позволява на приемника да разграничи различно ориентираните в пространството сигнали, като се използва пространствено разделяне(филтриране) и допълнителна обработка.[5] Приложението на такива методи е известно като "адаптивни" или "смарт" антенни конфигурации [6,7]. Изобщо, по удобно е да се оборудват базовите станции с повече на брой антени отколкото потребителските мобилни станции, тъй като мобилните апарати са преносими, захранвани са от батерии и разчитат на компоненти с по-ниска цена. За да се анализира спектралната ефективност на канала в обратна посока(uplink) с конфигурация един входен - множество изходни сигнали (SIMO, single input - multiple output) с наличие на интерференция между клетките е необходимо да се разширят моделите на разпространение за случая на много приемни антени.

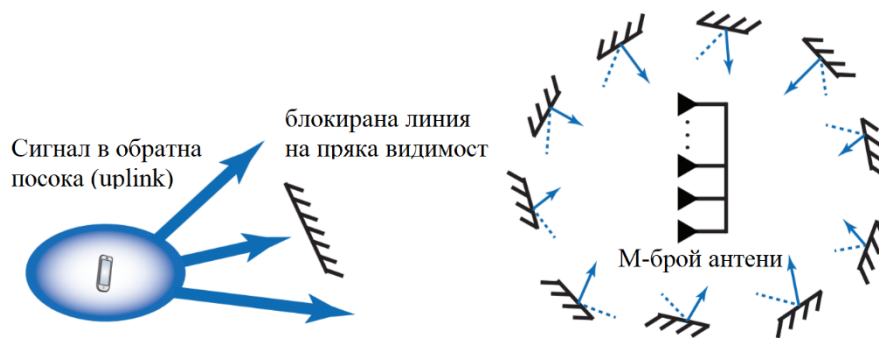


Фиг.1. Комуникация между мобилно устройство и базова станция с много приемни антени

На Фиг.1. е показано радио разпространение с наличие на пряка видимост между антената на мобилния потребител и базова станция, оборудвана с решетка състояща се от M антени. Разстоянието между антените е d_H пъти дължината на вълната, ъгълът на падане е ϕ . Ако се приеме вариант с пряка видимост, може да се разгледа еднородна линейна антенна решетка, която има определен брой дължини на вълната разстояние между съседните антени. Следователно, ако λ е дължината на вълната на носещата честота, а разстоянието между антените е d_H , разстоянието между антените е $\lambda \cdot d_H$ метра. Може да се приеме също че мобилните апарати са във фиксирани места на определена дистанция от антенната решетка на базовата станция. Постановката на

ситуация с пряка видимост е показана на фигурата по-долу. Вълните достигат до антенната решетка под ъгъл ϕ . Сравнявайки две съседни антени, едната получава сигнал, който пропътува $d_H \cdot \sin(\phi)$ повече от другата. Може да се твърди, че такъв модел е гъвкав по отношение на условията за разпръскване на сигнала, поради факта че около антенната решетка на базовата станция има много допълнителни обекти, които отразяват или разсейват сигнала.

На следващата фигура 2 е показана ситуация при която връзката между мобилните станции и базовата станция не е с пряка видимост. При такова разглеждане, средното усилване на канала с цел опростяване, може да се приеме за еднакво за всички антени на базовата станция. Това е подходяща апроксимация, когато разстоянието между мобилния апарат и базовата станция е много по-голямо от разстоянието между антените. На практика, промените в усилването между антените е от порядъка на няколко децибела. Това е от съществено значение за спектралната ефективност, когато броят на антените, означен с M е голямо число.



Фиг.2. Комуникация между мобилно устройство и базова станция без пряка видимост

Фиг.2. показва радио разпространение без пряка видимост с наличие на Фадинг на Релей между антената на мобилното устройство и базова станция с много приемни антени. Линията на пряка видимост е блокирана, но сигналът претърпява множество отражения, така че мястото на потребителското оборудване няма влияние върху пространственото разпръскване на сигнала. Определянето на характеристиките на канала представлява ключов аспект при многоантенните системи.

Спектралната ефективност се характеризира и зависи от съотношението сигнал/шум на желания сигнал, степента на междуклетъчна интерференция и броя на приемните антени при базовата станция. Когато се разполага с M -на брой приемни антени, решетката "събира" M -пъти повече енергия от желания сигнал, интерферентните сигнали и шумовете. В случаите на пряка видимост, усилването на полезния сигнал е пряко свързано с числото M . Тази линейна зависимост е известна като усилване на решетката. При комбинирането на няколко M антени, интерферентният сигнал "се отхвърля", поради факта че тези M -на брой антени осигуряват на базовата станция M -на брой степени на свобода. Така, полезният сигнал се разделя от интерферентния. Тъй като, $d_H \cdot M$ определя ъгловата разрешаваща способност, интерференцията може да се намали - или ако се увеличава броя на антените, и/или ако се използва по-голямо разстояние d_H . Това е в контраст по отношение на полезния сигнал, чието ниво е пропорционално само на броя на антените. За определена антенна решетка с апертюра, е по-добре да са налице много антени на едно място, отколкото много и отдалечени антени. Когато има мобилни станции излъчващи сигнал под един и същ ъгъл или под огледален ъгъл (30 градуса или 180-30 градуса) могат да се наблюдават "пикове" или върхови стойности на интерференцията.

ИЗВОДИ

Увеличаването на броя на антените подобрява спектралната ефективност. Това е така, защото базовата станция може да обработва получения сигнал през антенна решетка, като селективно избира сигналите, без събиране на допълнителни интерферентни смущения. За разлика от това, увеличаването на предавателната мощност ще увеличи и сигнала, и интерференцията еднакво, което ще доведе до висока граница на спектралната ефективност. Когато се променя ъгълът на сигнала от мобилното устройство, степента на интерференция осцилира, но е няколко пъти по-слаба отколкото в случаите на използване на една единствена приемна антена. Спектралната ефективност расте само логаритмично, което не може да осигури достатъчна гъвкавост по отношение на спектъра в бъдещите клетъчни мрежи. Колко и много антени да се използват, не е възможно да се приеме повече енергия от тази, която е излъчена. Това че броят на приемните антени клони към безкрайност, физически е неизпълнимо. Но е възможно да се направи асимптотичен анализ на поведението на системата при практически голям брой антени.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shannon, C. E. 1949. "Communication in the presence of noise". Proc. IRE. 37(1): 10–21.
- [2] Shannon, C. E. 1948. "A mathematical theory of communication". Bell System Technical Journal. 27: 379–423, 623–656.
- [3] Peterson, H. O., H. H. Beverage, and J. B. Moore. 1937. "Diversity telephone receiving system of R.C.A. communications, Inc." Proc. IRE. 19(4): 562–584.
- [4] Medard, M. 2000. "The effect upon channel capacity in wireless communications of perfect and imperfect knowledge of the channel". IEEE Trans. Inf. Theory. 46(3): 933–946
- [5] Biglieri, E., J. Proakis, and S. Shamai. 1998. "Fading channels: Information-theoretic and communications aspects". IEEE Trans. Inf. Theory. 44(6): 2619–2691
- [6] Anderson, S., B. Hagerman, H. Dam, U. Forssen, J. Karlsson, F. Kronestedt, S. Mazur, and K. J. Molnar. 1999. "Adaptive antennas for GSM and TDMA systems". IEEE Personal Commun. 6(3): p.74
- [7] Winters, J. H. 1998. "Smart antennas for wireless systems". IEEE Personal Commun. 5(1): 23–27.

SPECTRAL EFFICIENCY IMPROVEMENT IN MOBILE NETWORKS

Georgi Dimitrov
g.dimitrov@nvna.eu

**Nikola Vaptsarov Naval Academy73, Vasil Drumev str. Varna,
BULGARIA**

Key words: Spectral efficiency, linear receiving antenna array, interference, area throughput, GSM CDMA, Wi-Fi, 4G LTE

Abstract: Spectral efficiency in wireless networks is the average number of information bits obtained after sampling, which can be reliably transmitted over a radio channel. It could be improved using different techniques to control radio resources, output power, dynamic distribution of channels, adaptation of connections and different antenna diversification models. Other ways to improve spectral efficiency include uplink and downlink space-division multiple access as well as techniques to acquire channel state information. This article considers two ways for improvement of spectral efficiency – increase of transmit power and obtaining and array gain. Increasing the output power will increase both the signal strength and the interference, which will result in high rate of spectral efficiency. Using linear receiving antenna array, that could “recognize” individual user equipment, the rate of interference will decrease sufficiently and will become small with decreasing the number of the antennas. The utilization of more antennas will decrease the interference if the angles of the uplink signals from the user equipment are different enough. The spectral efficiency depends on the signal-to-noise ratio of the desired signal and the degree of intercellular interference. For a mobile device, it is a slowly increasing logarithmic function of the signal-to-noise ratio. Only modest gains of spectral efficiency are possible by increasing this ratio. The practical line-of-sight channels contain random reflections and scattering. These channels are not bound to follow a particular channel model. Non line-of-sight channels can consist of various multipath components that arrive from different angles and with different phase-rotations.