

Как работи GSM мрежата?

Пламен Ил. Данков

Мобилната мрежа GSM има вече над 2.1 млрд. абоната в целия свят. Това отскоро я направи *най-голямата телефонна мрежа в света* (по-голяма от доскорошния фаворит – фиксираната телефонна мрежа). Хората от всички възрасти свикнаха с GSM (няма как – съществува вече над 17 години). Малко хора, обаче, са наясно как точно функционира тази огромна комуникационна мрежа (всъщност, за да се провеждат разговори или да се изпращат SMS или MMS, това никак не е необходимо). Но пък от друга страна, физиците обичат да си обясняват *как* действат нещата. Затова реших да ви разкажа “*Как работи GSM мрежата?*”. Преди 4 години прочетох лекция със същото заглавие за Деня на отворени врати във Физически факултет и тогава обещах да публикувам по-подробен текст за читателите на списание “Физика”. Е, както се казва, по-добре късно, отколкото никога. Не си поставям кой знае какви особени цели с тази публикация. Като преподавател във Физическия факултет, където от няколко години чета курсове, свързани с модерните безжични комуникации, дори ръководя подобна магистърска програма, разбрах, че въпреки наличието на големия информатор Интернет, не са много студентите, които са *наясно с нещата* около GSM (поне по отношение на физичните и инженерните основи). Имам студенти, които дори работят в големите мобилни оператори, но и за тях не съм сигурен, *какво точно знаят*. Да не говорим за учениците. Има и още нещо. Всъщност, хората не се интересуват чак толкова, как работи GSM-а, а *дали е вреден*. Най-често ме питат *дали са вредни базовите станции*. Тук отговорът е най-труден, защото не е еднозначен. Най-накрая, като прецених всичко това, просто реших да разкажа, каквото знам, макар да не е чак толкова издържано от инженерна гледна точка. Физичните процеси в GSM мрежата, обаче, държа да представя достатъчно ясно, разбираемо и с малко формули. Повече информация може да се намери в [1-4]. Отсега ще предупредя, че тук няма да се отваря дискусия за новото поколение 3G мобилни системи, нито за появяващият се мобилен WiMAX [5, 6]. Няма да се разглежда GSM мрежата като начин на функциониране на ниво логически канали, протоколи и софтуерно управление, нито пък на ниво разнообразни и привлекателни комуникационни услуги (т. нар. killer applications) – това го има и в Интернет.

В съдържанието на настоящата публикация са включени следните въпроси: 1. Възникване на GSM (или как станаха възможни цифровите клетъчни мобилни телефони); 2. Архитектура на GSM мрежата (или какво представляват “клетките”); 3. Сигнали, канали и достъп до GSM мрежата (или защо всички могат да говорят); 4. Функциониране на GSM мрежата (как мрежата знае къде си) и накрая, 5. Вярно ли е, че GSM е вреден (или как трябва ли да се пазим от мобилните телефони и базовите станции).

1. Възникване на GSM (или как станаха възможни цифровите клетъчни мобилни телефони)

Първо ще разкажа как се появи GSM. Малко хора знаят, че комуникационният стандарт GSM е едно от “най-европейските неща”, реализирани в съвременния свят, и то какво! Дори нещо повече, разпространението на тази уникална телефонна мрежа по света, която коренно промени самия стил на комуникация между хората, допринесе много за утвърждаването на европейската кауза, според мен. Следва малко история, при това не съвсем кратка. Но с тази история определено има какво да се каже.

1.1 Мобилно радио. През 1921 г. в полицейския департамент в Detroit (САЩ) се появява първата радиосистема за комуникации с патрулни автомобили [7]. Това е еднопосочна (simplex) връзка (работи като pager) в посока от полицейското управление (базова станция) до патрулната кола, като повиканият полицай трябвало да се обади обратно в управлението от най-близкия обществен телефон. Системата работила лошо и на близки разстояния, но през 1928 г. се въвежда супер-хетеродинният приемник и чрез нея започва да покрива цял град. Въвежда се и двупосочна, но не едновременна връзка (half-duplex), която работи и до днес в подобни системи (“push-to-talk” – “натисни бутона, за да говориш”; ако като деца сте имали “уоки-токи”, знаете за какво става въпрос). През 1934 г. тази система се въвежда навсякъде полицейските департаменти в САЩ, като по-късно преминава изцяло на модерната тогава честотна FM модулация. Огромното за периода след края на II световна война производство на FM комуникационни системи води до масово въвеждане на мобилни радиосистеми за коли (PMR, Private Mobile Radio) не само в полицията, но и в пожарната, “Бърза помощ”, както и в големите компании (електрически, газови, водни и пр.), по-късно такситата, градския транспорт, вестниците и пр. Разказвам подробно за това, защото тази система е прототип на *съвременните радиостанции*. Подобни системи, които в зависимост от мощността на излъчвателя покриват типично до ~20 km наоколо, *не са точно телефони*. Дори напротив, повечето от тях нямат контакт с вече развитата фиксирана телефонна мрежа (PSTN, Public Switching Telephone Network). Те имат нисък капацитет (не повече от 1000 активни потребители), понеже са с ограничен честотен ресурс и малко двупосочни канали. При тях се проявява силно проблемът “близо-далече”. Последният е свързан с необходимост да се приемат или много силни сигнали (близо до базовата станция), или много слаби (далече от нея). Освен това, тук няма пълна “мобилност”, понеже връзката се разпада при излизане от “покритата със сигнал” област. Следователно, “мобилното радио” (*радиостанциите*) е относително консервативна система и днес почти няма промени в концепцията. Тя е почти изолирана от другите комуникационни системи, пазарът е наситен, мрежата е затворена и с малък капацитет. В тези условия не буди никакво учудване появата на мобилни телефони извън системата на мобилното радио.

1.2 Мобилни телефони. Първата мобилна телефонна система за коли е въведена през 1946 г. от AT&T (American Telephone & Telegraph) в St. Louis, Missouri (САЩ). В този период AT&T е оператор на фиксираната телефонна мрежа в САЩ, а тя функционира до този момент почти 70 г. Тази първа мобилна телефонна система е *не-клетъчна*, т. е. построена е на принципа на мобилното радио (радиостанциите). На високо място в града се разполага *базова станция* с мощен предавател (~250 W), който осъществява връзката с “мобилните” потребители (все още само в автомобили). “Мобилната” станция също е била доста мощна, защото за захранването ѝ в колата е била необходима допълнителна батерия и динамо. Покривала се е област до ~25 мили от базовата станция и при излизане от обхват връзката се е разпадала. Освен това първоначално не е имало автоматично избиране, но системата все пак е била свързана с фиксираната телефонна мрежа. Независимо от ниското качество на услугата, тя е въведена в 25 големи града на САЩ. През 1948 г. В Richmond, Indiana (САЩ) е въведено автоматично избиране и канали с пълен дуплекс (full duplex) и автоматичен избор на свободен канал. Системата е позволявала капацитет до 100 потребители/канал в часовете-пик, а по късно – 420. Търсенето на мобилни телефони в коли е било голямо за времето си и чак до наши дни, но истинско развитие на мобилните телефони настъпва с въвеждането на *клетъчни телефонни мрежи*.

Концепцията за *клетъчна мобилна телефонна система* е предложена (забележете) още през 1947 г. от Bell Laboratories (по-късно част от AT&T) и е била много напредничава за времето си. За съжаление, комерсиално работеща подобна система в САЩ стартира едва през 1983 г. Кой са причините за такова огромно закъснение? Още през 1947 г. AT&T демонстрира клетъчната концепция пред FCC (Federal Communication Commission), но искането за честотен спектър за клетъчни мобилни телефони е отхвърлено. През 1949 г. се прави нов опит, но и тогава FCC отказва, като разпределя подходящият обхват за мобилни комуникации (~470–890 MHz) само за TV радиоразпръскване (ще отбележим, че 1 TV канал от 6 MHz \equiv 200 гласови FM телефонни канала по 30 kHz). Силното TV лоби във FCC резервира в тази част на спектъра 70 TV канала и нито един (!) за клетъчни мобилни телефони. През 1962 г. Bell Laboratories демонстрират своя вътрешна експериментална клетъчна система и доказват нейните предимства и техническа реализуемост (автоматично избиране, транзисторни мобилни терминали и др.). През май 1970 г. след силен натиск FCC отпуска 40 MHz обща честотна лента за мобилни телефонни мрежи. В 1971 г. се публикува стандартът AMPS (Advanced Mobile Phone System), който се отнася за аналогови (1G, от първа генерация) системи, но стандартът е реализиран практически едва през 1983 г. в САЩ. Сега проблемът е в лицензирането на мобилните оператори. В периода 1970-1980 г. е наложено правилото, че единствен мобилен оператор може да бъде AT&T като единствен оператор на фиксираната мрежа (мобилните мрежи тогава се разглеждат като продължение на фиксираните). Но FCC, обединение на по-малки мобилни оператори, подлага FCC на силен натиск за отделен лиценз. Правилата се променят непрекъснато и накрая за първи път се въвежда състезателен принцип за отдаване на честотни лицензи за “мобилни” честотни ленти. Така през 1984 г. AT&T се разпада на малки компании и се определят 150 мобилни пазари. Сега става обратното – над 15 000 кандидати за лицензи. FCC предлага да се обединят в мобилни алианси (~1200). Едва през 1990 г. FCC решава да отдаде по 1 мобилен лиценз за 1 пазар (общо 150 лиценза); първите лицензи са получени едва през 1995!

Тук идва ред на *европейската част* на историята на мобилните телефони. В Европа мобилните комуникации се развиват при много по-ясни правила в сравнение със САЩ. Тук лидер са скандинавските страни и особено Швеция и фирмата Ericsson. За разлика от други европейски страни и САЩ, в скандинавските страни няма монополен оператор на фиксираната мрежа и не се появяват лицензионни пречки. Фирма Telia в Швеция стартира експериментално през 1950 г. не-клетъчна мобилна система с 2 дуплексни канала на 160 MHz. През 1956 в два града – Stockholm и Gothenburg работят комерсиални системи с по 100 потребителя. През 1965 г. в Stockholm и Malmö се въвежда и автоматична система за избиране в тях. През 1967 г. шведското правителство натоварва специална група да развие мобилните комуникации и така се предлагат нови *клетъчни системи*, но без да се използва термина “cell” (клетка). По-късно Nordic Council (обединение на Дания, Исландия, Норвегия, Финландия и Швеция), вижда в мобилните комуникации начин за сътрудничество между тези страни, и инициира създаване на мобилна клетъчна система NMT (Nordic Mobile Telephone) на честота 450 MHz. Около 10 години се разработва необходимата технология и компоненти и през 1975 г. се публикува стандартът NMT-450 (4 години след AMPS). Но още през 1978 г. системата се тества практически и на 1 октомври 1981 г. стартира официално. Това се счита за *първи световен старт на клетъчни системи от първо поколение* (1G). Американската система AMPS стартира едва през 1983 г., но пък впоследствие става най-развитата 1G мрежа с най-много потребители. След цифровизацията на сигнала преминава в DAMPS. Аналоговата системата NMT-450 (по-късно NMT-900 на 900 MHz) се оказва с повече технологични предимства пред американската AMPS. Тук се въвежда “handover”-а при преминаване от клетка в клетка, както и международният “roaming”. Базовите станции на NMT са по-интелигентни (управление с цифрови ключове), отколкото тези на AMPS. В Европа, обаче, се развиват още нови успешни аналогови системи (поне 5 системи с повече от 50 000 потребители) и наличието на много стандарти започва да затормозява развитието на 1G мобилните клетъчни системи като цяло. Освен стандарта NMT-450/900 в скандинавските страни, Австрия, Испания (през 1992-93 и в България) се въвеждат още: стандарт TACS (Total Access Communication System) в Англия (още Италия, Испания, Австрия, Ирландия) (най-разпространеният в Европа преди GSM), 2 стандарта в Германия, 3 във Франция и т. н. И така, повечето големи европейски държави развиват некоординирано различни национални 1G мрежи с различни честотни обхвати и стандарти. Един европеец, придвижвайки се по

територията на Европа, не е могъл тогава да използва *един и същи мобилен телефон*, докато в САЩ това е факт със стандарта AMPS и после DAMPS. Така назрява необходимостта от нов Пан-Европейски мобилен стандарт за територията на цяла Европа (разбира се, това е точно GSM). В същото време независимо, че 1G стандартът AMPS е практически “замразен” от 1971 до 1983, той се оказва доста успешен в Америка (за 6 години от старта има над 12 млн. потребители). Следователно, тук не се появява такава силна необходимост от 2G стандарт.

1.3 Възникване на GSM. Проблемът с големия брой 1G мобилните системи в Европа с *несъвместими комуникационни технологии* се оказва сериозен за развитието на съвременните комуникации и през 1982 г. френската CEPT (Conférence Européenne des Postes et des Télécommunications) взема *две важни решения*, които промениха облика на съвременните комуникации: 1) Създава работна група “GSM” (Groupe Spéciale Mobile), която да разработи нов единен клетъчен мобилен стандарт, еднакъв за всички страни в Европа и 2) Препоръчва на новосъздадената European Commission (EC) да се резервират два честотни блока (uplink/downlink) в обхвата 900 MHz за нов 2G цифров мобилен стандарт (условно наречен GSM). Разработките стартират веднага, защото се очаквало въведените 1980-84 г. в Европа 1G стандарти да достигнат своят максимален капацитет в началото на 1990 г. Поставени са 3 основни цели: да се въведе *единен клетъчен стандарт*, който да е технически съвместим за всички европейски страни и по-късно в световен мащаб (интернационален roaming); да се използват максимално *наличните и бъдещите авангардни комуникационни и хардуерни технологии* – мощен стимул на голяма част от научни и технически изследвания тогава, и накрая, цел е била и *изключването* на мощният до този момент *американски и японски мобилен пазар* поне до стадия на разработка и публикуване на стандарта (и наистина, разработките по GSM стандарта са запазени в тайна десетина години).

Отначало изследванията започват за аналогова система, но след това се приема цифровият стандарт за кодиране на речта, който не е бил все още развит. Това е било най-рисково начинание в такъв мащаб и се е разработвало съвместно в много университети и фирми. Създава се COST (Съвет за наука и технологии), който и до днес е най-важната институция за съвременни комуникационни технологии с поглед в бъдещето. Цифровият стандарт дава няколко важни предимства: много по-ефективно използване на спектъра, по-високо качество и защитеност на връзките, нови услуги (транспорт на данни, прехвърляне на разговори, идентификация на обаждането, разговори в група и пр.), по-интегрирани (VLSI, Very Large Scale of Integration) “джобни” устройства по авангардни технологии и др. Успоредно се развива и цифровата фиксирана мрежа ISDN (Integrated Services Digital Network). Втори важен момент в изследванията е нов TDMA (Time Division Multiple Access) за достъп до канала чрез времеразделяне. Спорът бил дали да бъде широколентов (единичен канал ~2 MHz) или теснолентов (~200-300 kHz). Дори са създадени 8 експериментални клетки (по 4 от тип). Широколентовият достъп дава по-висок капацитет в градски условия (както е в САЩ), но покритието в по-слабо населени градове и села, каквито има в Европа, е по-скъпо и трудно. Така през 1986 г. се взема *окончателно решение* за теснолентов TDMA достъп (8 потребителя на 200-kHz канал). Такъв днес е GSM.

На 7 септември 1987 г. в Copenhagen се подписва меморандум MoU (Memorandum of Understanding) между 13 мрежови оператора от 12-те европейски страни, за поддържане на новия GSM стандарт, който да стартира навсякъде в Европа на 1 юли 1991 г. Това е важна стъпка за развитие на GSM, която осигурява и инвестициите, необходими за въвеждане на новата мобилна мрежа. Създава се нова организация ETSI (European Telecommunication Standards Institute), отговорна за разработване на GSM стандарта. Сега GSM вече означава друго, Global System for Mobile communications. Реализацията на GSM стандарта става на *две фази*:

1 Фаза (реализация на необходимата базова функционалност на системата): устройствата за предаване на реч и данни; базова услуга SMS (Short Message Service), FAX, сервизни номера.

2 Фаза (допълнителни услуги и функционалност): полу-скоростен GSM, криптиращи алгоритми, групови комуникации, затворени потребителски групи, extra-GSM (нови честотни ленти), нови услуги при разговорите (изчакване, пренасочване, информация за параметрите на разговора и пр.), SMS до много потребители (Cell Broadcast);

2+ Фаза (Packed-switched комуникации на данни в GSM): GPRS (General Packed Radio Services), оптимизирано маршрутизиране, затворен индивидуален или фирмен план и пр.

Датата 1 юли 1991 г. за старт на GSM, обаче, не е спазена, понеже са налага да се разработят и включат няколко важни за стандарта модификации. Освен това се забавя и разработката на вече търсените “джобни” мобилни телефони, които днес всички познаваме. През 1990 г. се публикува се новият GSM стандарт за цифрови клетъчни телефони (GSM-900); въвежда се и стандартът DCS-1800 (по-късно GSM-1800) за Европа; през 1995 г се въвежда и стандарта PCS-1900 (по-късно GSM-1900) само в Северна Америка. Официално *GSM мрежата стартира в Европа* през 1992. Това предизвиква огромен интерес; през 1994 г. към MoU се присъединяват още 102 мрежи от 60 страни, включително и България. Преломен момент за развитието на GSM мрежата е 1996 г., когато потребителите в световен мащаб надхвърлят критичното число 100 милиона и вече няма връщане назад.

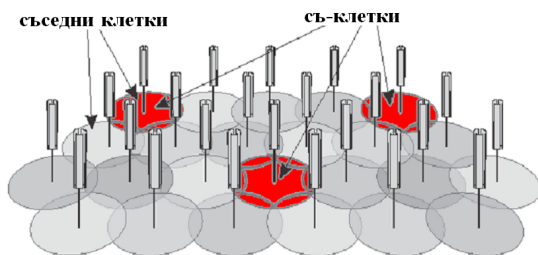
2. Архитектура на GSM мрежата (или какво представляват “клетките”)

2.1 Клетъчната концепция. “Покриването” на дадена географска област със достатъчно силен излъчен сигнал винаги е било сериозен проблем в безжичните комуникации (особено мобилните), понеже мощността на сигнала спада с разстоянието d като $1/d^2$ (ако няма препятствия). Както вече споменахме, първите мобилни телефонни мрежи са били *не-клетъчни*. Те са осъществявали връзка между мобилни абонати в коли чрез една

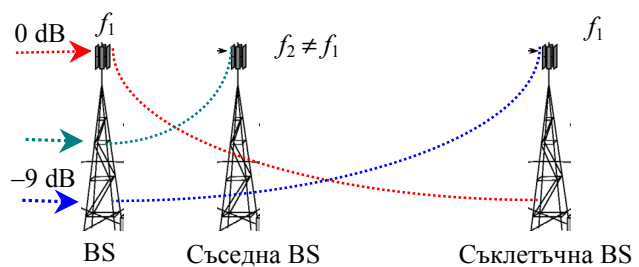
единствена базова станция, която покривала със сигнал целия град. Базовата станция се е разполагала на високо място и имала мощен предавател (няколкостотин W), за да осигурява покритие до няколко десетки km. Връзката се осъществявала по следния начин: Мобилната станция MS (телефон) се е свързвала по т. нар. uplink честотен канал с базовата станция BS (MS → BS), която след локализиране се е свързвала с търсената MS (телефон) по т. нар. downlink канал (BS → MS). С други думи, базовата станция се явява един посредник на комуникационната връзка между различните мобилни абонати, т. е. те не “комуникират” директно със сигнал една с друга като радиостанции, както някои си мислят. “Мобилността” на потребителя, обаче, се ограничавала до радиуса на покритие, след което се е разпадала. Причината за това е, че нивото на полезния сигнал за връзка затихвал до нивото на шума и ставал неразличим от него. За да няма интерференция между отделните станции, даден честотен канал се използвал само от един потребител в даден момент. Това е вторият съществен проблем, който означава, че е необходима или много широка честотна лента за подобен род комуникации, или капацитетът на мрежата се оказва ограничен като цяло (обикновено е второто). И така, в не-клетъчните мрежи са били налице два сериозни проблема – ограничена мобилност и ограничен капацитет, което превръщало системата в непривлекателна в сравнение с традиционните фиксирани (тогава все още аналогови) телефони.

Така по естествен начин се появи “клетъчната концепция” за мобилните телефонни мрежи. При нея дадена географска област се покрива със сигнал не от една, а от много на брой, но по-маломощни базови станции, обслужващи по-малки области (клетки) с възможност многократно използване на едни и същи честотни канали, но на достатъчно голямо разстояние една от друга, в т. нар. “съклетки” (виж. Фиг. 1). Както ще покажем по-надолу, това води до рязко повишаване на капацитета на клетъчната мрежа, дори осигурява най-естественият път за нейното разширяване чрез мащабно намаляване на размера на клетките, увеличаване на броя им и намаляване на излъчената мощност. Клетъчната комуникационна технология се оказва толкова ефективна, че днес е водеща за повечето безжичните комуникации с много потребители, осигурявайки висок капацитет дори при ограничен ресурс на честотния спектър. Успешно се решава и другият проблем – за истинската “мобилност” на потребителите. При клетъчните мрежи няма проблем с далечината на покритие и с шума – при слаб сигнал абонатът може да се “прехвърли” към друга клетка (handover), осигурявайки непрекъсваемостта на разговора. Тук, обаче, се появяват интерференчни проблеми, свързани с използване на еднакви честотни канали в близко-разположени клетки.

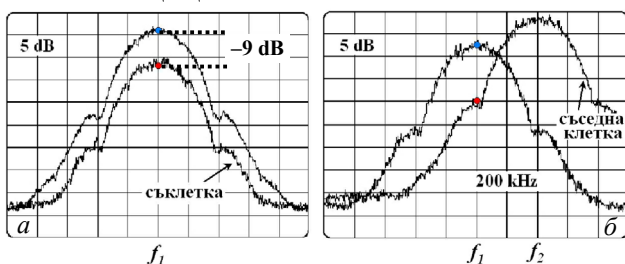
На езика на физиката интерференцията е процес на взаимодействие на два или повече кохерентни вълнови източника с еднакви честоти и постоянна фазова разлика. В резултат на това в пространствената област на взаимодействие се появява характерна картина на максимуми и минимуми на амплитудата на резултантната стояща вълна. Максимумите се получават на места, където се получава сумиране на отделните амплитуди, а минимумите – на местата, където амплитудите се изваждат. Друго, което знаем от физиката, е че разстоянието между два съседни максимума или минимума е равно на половин дължина на вълната. От комуникационна гледна точка класическа интерференция може да настъпи между сигналите от базовите станции или мобилни телефони в съклетките, където се използват еднакви честоти (Фиг. 2). Подобна интерференция не може да се избегне напълно, но може да се минимизира. За тази цел нивото на сигнала, идващ от дадена съклетка на същата честота f_1 , трябва да бъде достатъчно малко, за да не се получат паразитни минимуми и максимуми. При аналоговите 1G системи съ-клетъчният сигнал трябва да е с 18-20 dB под нивото на полезния сигнал (т. е. ~ 100 пъти по-слаб; $-1 \text{ dB} = 10 \lg 0.794$ пъти), но цифровата GSM мрежа е по-толерантна – допуска интерференчен сигнал едва 9-10 dB под нивото на полезния (~ 10 пъти) (Фиг. 3a). Интерференцията може да се получи и от съседни клетки, макар че честотите са различни ($f_2 \neq f_1$). Всъщност, честотните канали са широки 200 kHz и ако сигналът е от съседен честотен канал (например $f_2 - f_1 = 200 \text{ kHz}$), на честотата на полезния сигнал f_1 може да постъпи интерференчен сигнал, но той трябва отново да е поне 9-10 dB по-слаб (Фиг. 3б).



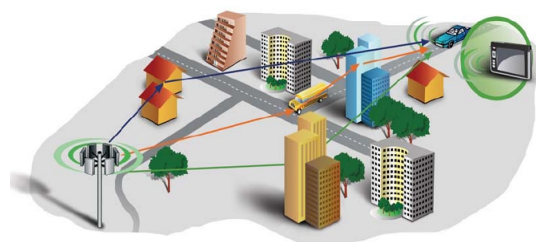
Фиг. 1. Концепция за клетъчна мобилна система



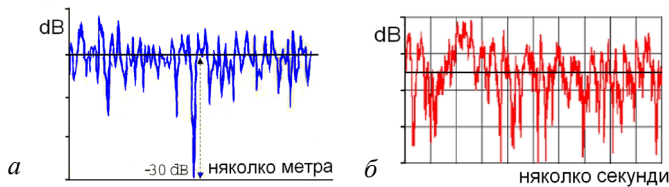
Фиг. 2. Ниво на сигналите от съседни клетки и от “съклетки”



Фиг. 3. Илюстрация на интерференцията от и съседни клетки на една и съща честота f_1



Фиг. 4. Сложна градска комуникационна среда



Фиг. 5. Измерен приет сигнал от мобилна станция на късо разстояние няколко метра (осреднен във времето) (а) и на едно и също място в течение на няколко секунди (б)

2.2. Основни физични явления в мобилните комуникации. Досега разгледахме влиянието само на един физичен процес – интерференцията от съклетки и съседни клетки. Всъщност, градската комуникационна среда е много по-сложна и в нея се наблюдават повече физични процеси, влияещи на разпространението на сигнала, който мобилната станция получава от базовата и обратно (Фиг. 4). Можем да направим експеримент. Нека да се придвижим на няколко метра разстояние, отдалечавайки се от базовата станция и да измерим нивото на сигнала, който мобилният телефон би приел, като използваме подходящ чувствителен прибор (напр. спектроанализатор) – Фиг. 5а. Резултатът е неочакван – амплитудата на осредненият във времето сигнал варира непрекъснато от място на място с около 15-20 dB, а на места – до 30 dB, като разстоянието между максимумите е типично около половин дължина на вълната (за 850 MHz това са ~ 17.6 cm) – т. е. наблюдава се интерференция. Нека сега да застанем на едно място и да измерим моментното ниво на сигнала (Фиг. 5б). Резултатът е още по-неочакван – вариациите остават и във времето с типичните отклонения ~ 20 dB. Възможно ли е всичко това да се обясни само с интерференцията? Разбира се, че не.

Най-важните физични процеси, които се влияят на разпространението на GSM сигнали в градска среда, са дадени на Фиг. 6 – отражения от земната повърхност и сградите, дифракция при преминаване близо до препятствия, разсейване от грапави повърхности, затихване в почва, сгради, зеленина и пр. [8]. Какво се случва вследствие на тези процеси? На Фиг. 7 е дадена обобщена илюстрация на затихването на сигнала при отдалечаване на мобилната станция от базовата. Разбира се, на първо място е вече споменатото *затихване на мощността на сигнала* от квадрата на разстоянието d по директния път (т.е. когато има пряка видимост между BS и MS), което е неизбежно. Приетата от мобилната станция мощност P_{MS} може да се определи от израза:

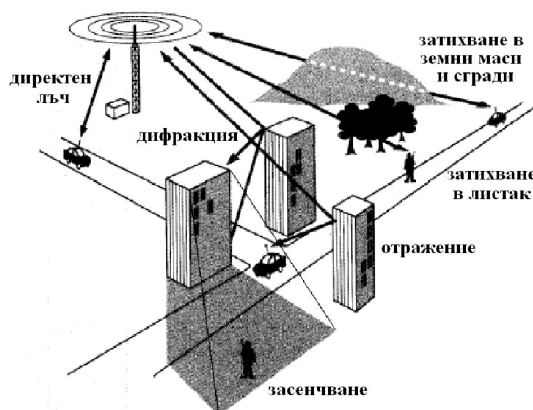
$$P_{MS} = P_{BS} G_{MS} G_{BS} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

където P_{BS} е излъчената от базовата станция мощност, G_{MS} и G_{BS} са коефициентите на усилване на антените на мобилната и базовата станции в тяхната далечна зона, а λ е дължина на вълната. Следователно, сигналът затихва 4 пъти по мощност на всяко удвояване на разстоянието между BS и MS; това правило е известно като един от двата "канона" на безжичните комуникации. Класическият израз (1) е валиден само при пряка видимост между BS и MS и в двете посоки на разпространение. Как, обаче, да си обясним наличието на бавен и бърз фединг? За целта ще разгледам и другите физични процеси, влияещи на разпространението на GSM сигнала.

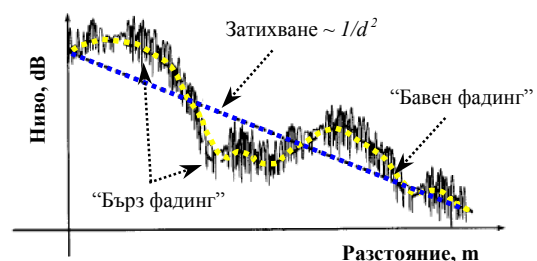
Много важен процес при всички безжични комуникации е *отражението* от различни повърхности (широки равнинни земни маси, водни повърхности, пътни настилки, широки покриви, вертикални стени на сгради и пр.). Наличието на един и повече отразени сигнали почти сигурно означава поява на интерференция с основния лъч и наблюдаване на интерференчна картина от редуващи се минимума и максимуми – "фединг". В GSM мрежата отражението е често явление и вече е валиден следният израз за приетата мощност P_{MS} :

$$P_{MS} = P_{BS} G_{MS} G_{BS} \left(\frac{h_{BS} h_{MS}}{d^2} \right)^2 \quad (2)$$

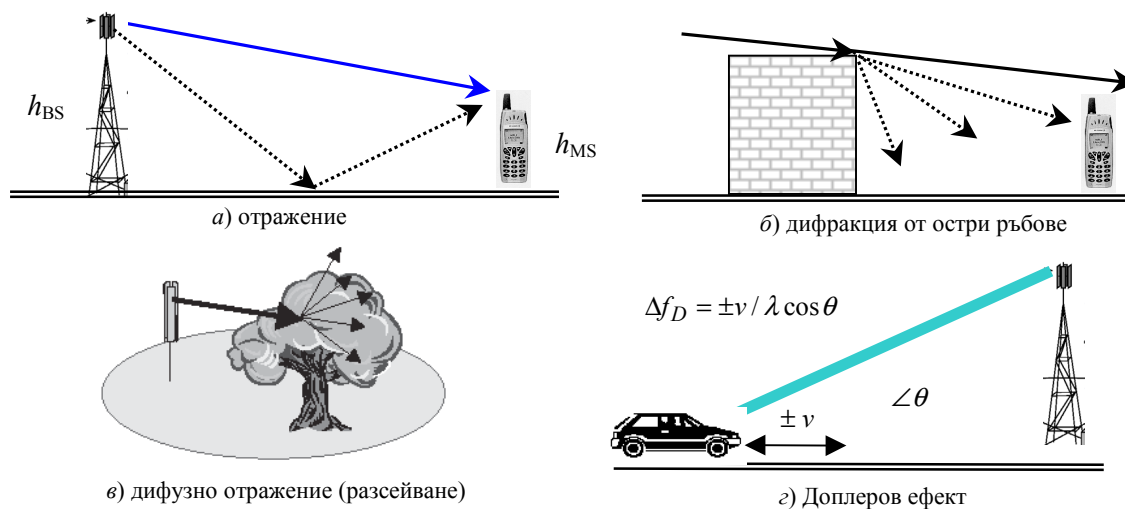
където новите величини h_{MS} и h_{BS} са височините на антените на мобилната и базовата станции (Фиг. 8а) (типично $h_{MS} \sim 2$ m, а $h_{BS} \sim 30-100$ m). Вижда се, че сигналът затихва по-бързо от разстоянието, но пък при увеличаване на височината на антените той остава по-силен. Това обяснява желанието на мобилните оператори да разполагат антените на своите базови станции по възможно най-високите сгради или специални кули.



Фиг. 6. Физични процеси при разпространение на сигнала в сложна градска среда



Фиг. 7. Илюстрация на трите основни ефекта при затихване на GSM сигнал в градска мобилна среда: 1) затихване (с пунктир) от разстоянието при директен лъч; 2) "бавен фединг" (с пунктир), свързан със засенчването от сгради и предмети с размери, по-големи от дължината на вълната λ и 3) "бърз фединг", причинен от дифракция с предмети с размери, сравними с λ



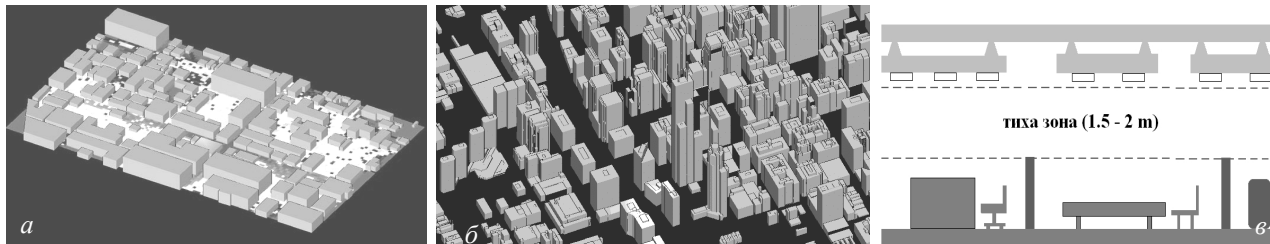
Фиг. 8. Илюстрация на основните физични процеси при разпространение на сигнала в мобилните комуникационни среди

При своето разпространение в градска или извънградска среда, комуникационният сигнал може да стигне до препятствия (сгради, хълмове, дървета, превозни средства и др.) и да претърпи *дифракция*. Ако ръбовете им са остри, се наблюдава т. нар. “твърда” дифракция (knife-edge diffraction). При нея, подобно на интерференцията, се появяват серия от минимума и максимуми на амплитудата на сигнала, но най-важното – в геометричната сянка зад препятствието, освен шум, се появява и достатъчно силен полезен сигнал (тук няма да давам сложните формули за дифракцията). При елементарната представа като за разпространяващ се лъч между базовата и мобилната станция, дифракцията означава, че близо до острия ръб на препятствието се появяват още няколко лъча освен главния, които са с по-слаба интензивност от него (Фиг. 8б), но помагат за “покриване” със сигнал дори на областта, която не се “вижда” директно от базовата станция (засенчена област). Следователно, заедно с процеса на *дифузното разсейване* (Фиг. 8в), дифракцията от остри ръбове е сериозен “производител” на допълнителни лъчи към основния и това прави разпространението на сигнала още по-сложно. Подобно разпространение е известно като “*многолъчево*” (multi-path propagation). Би могло да се спори, дали “многолъчевостта” в мобилните комуникации е полезна или вредна. Всъщност, верни са и двете твърдения. Полезният ефект е свързан с т.нар. “*засенчване*” (shadowing) на сигнала в градска среда. И наистина, как иначе една мобилна станция би получила сигнал от базовата (и обратно) без да има пряка видимост между двете, ако явления като дифракция, отражение и дифузно разсейване не водеха до поява на лъчи в геометричната сянка и нейното “просветляване” (виж. отново Фиг. 6). Освен това, засенчването е основната причина за “*бавния фадинг*” (Фиг. 7). Това е относително слаба пространствена вариация на сигнала (4-10 dB от максимум до минимум) с типично разстояние между максимумите, сравнимо с размера на теренните препятствия ~10-100 m. Бавният фадинг може и да не бъде забелязан, ако средата е равнинна и извън населено място. Вариациите се засилват в градска среда (ниски сгради, високи антени) и още повече – в плътна градска среда (високи сгради, ниски антени) – Фиг. 9 а,б. Когато в близост до MS се намират по-дребни предмети – пътни знаци, улични лампи, рекламни пана, автомобили и др. препятствия, се появяват по-интензивни интерференчни и дифракционни ефекти, обуславящи “*бързия фадинг*”, който се наслажда върху бавния (Фиг. 7). Това са доста по-изразени вариации на нивото на сигнала (до 30-40 dB от максимум до минимум), но на много по-къси разстояния, сравними с половин дължина на вълната (~15-20 cm). Ефектите на бърз фадинг се засилват особено във вътрешността на сгради с много предмети – т. нар. “офис” среда – Фиг. 9в.

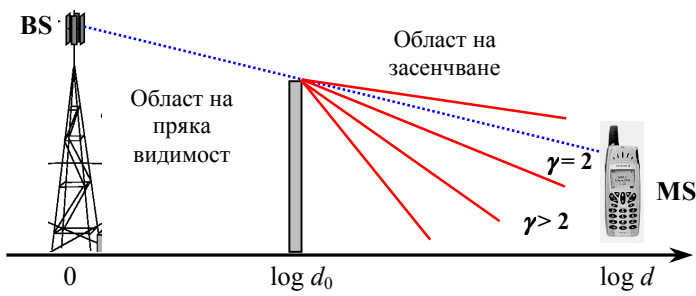
2.3 Модели на мобилни среди. Бърз фадинг и многолъчевост са нежелана комбинация в мобилните и безжичните комуникации, която определено води до по-бързо спадане на нивото на сигнала при отдалечаване на MS от BS, сравнено със затихването в при пряка видимост без препятствия. Затихване е толкова по-бързо, колкото по-сложна е дадената комуникационна среда. За да се илюстрира този важен ефект, ще приведа една проста емпирична формула за груба оценка на затихването $L = P_{BS}/P_{MS}$ от разстоянието d между BS и MS

$$L = L_0 (d / d_0)^{\gamma}, \quad \text{където } d_0 \cong (h_{BS} h_{MS}) / \lambda, \quad (3)$$

а L_0 е затихването на характерно разстояние d_0 . Разстоянието d_0 се мени от десетки до стотици m в зависимост от височината на антените и условно разделя областта на пряка видимост от областта на засенчване в клетката.



Фиг. 9. Модели на комуникационна градска среда (а); плътна градска среда (б) и “офис” среда с “тиха зона” (в)



Фиг. 10. Илюстрация на наклона на затихване от разстоянието в лог скала (ако $h_{BS} = 50$ m, $h_{MS} = 2$ m, $\lambda \sim 37$ mm, то $d_0 \sim 270$ m)

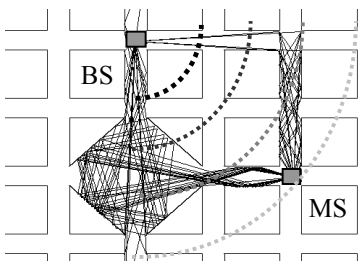
Затихване на нивото на сигнала от разстоянието d на степен γ

$$L \sim d^\gamma, \text{ където}$$

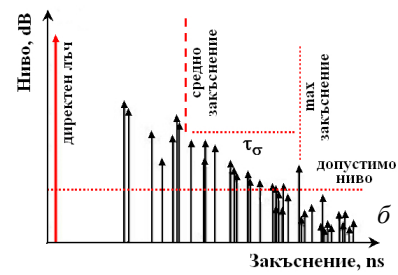
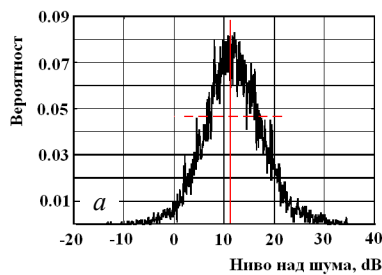
$\gamma = 2$	при свободно затихване;
$\gamma = 2.7 - 3.5$	в градска среда;
$\gamma = 3 - 5$	в плътна градска среда;
$\gamma = 1.6 - 1.8$	в офиси в "тихата зона" и при т. нар. "street" ефект;
$\gamma = 4 - 6.5$	в офиси извън "тихата зона";
$\gamma = 2 - 3$	в големи халета, гари, летища

На Фиг. 10 е показан ефектът на увеличаване на затихването на сигнала от разстоянието в различна степен γ за различни среди, описани в таблицата. Вижда се, че в градска среда степента нараства до 2.7-3.5, в плътна градска среда – 3-5, а в офис среда – дори до 6.5. Изненадващо е, но има и точно обратните случаи – намаляване на степента на затихване от разстоянието (1.6-1.8 вместо 2), т.е. сигналът затихва по-слабо на еднакво разстояние, отколкото в свободното пространство! Бързото затихване е обяснимо (дифракция, дифузно разсейване, затихване през стени, зеленина и пр.), но бавното затихване е по-трудно да се предвиди. Всъщност, това са ефекти на "канализиране" на сигнала по дължината на улици и коридори с добре отразяващи стени, където в резултат на многократни отражения затихването на мощността е по-слабо по посока на излъчването ("street" ефект в града – Фиг. 11 и "тиха зона" в затворени помещения на височина от 1.5 до 2 m – Фиг. 9 в).

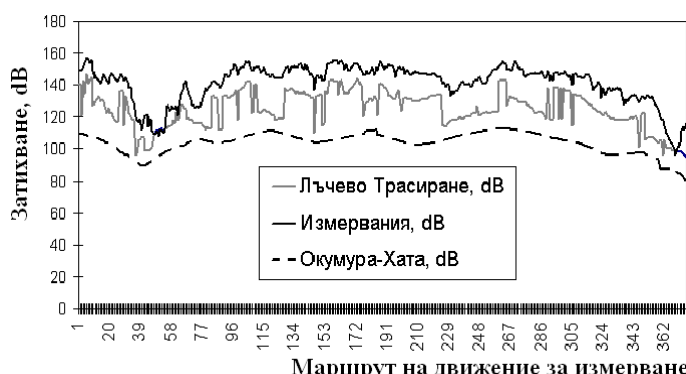
Отново ще се върна към *многолъчевостта*. Тя е неизбежна в градска среда и има както положителен, така и отрицателен ефект върху комуникационния процес. Например, има съвременни комуникационни мрежи (напр. мобилният WiMAX), където многолъчевостта се използва за повишаване на скоростта на предаване на данните чрез MIMO технология (Multiple Input, Multiple Output) [6]. В GSM мрежата, обаче, натрупването на много пътища, по които даден сигнал се разпространява, води до статистическо поведение на характеристиките на комуникационния канал. То се изразява освен с вероятностни ефекти при бавния и бързия фединг, така и със случайни закъснения при приемане на серия многолъчеви сигнали и случайни честотни модуляции, дължащи се на *Доплеровия ефект* при бързи движения (Фиг. 8з). Няма да разглеждам подробно тези сложни процеси, само ще приведа два примера. На Фиг. 12а е показана типична Гаусова крива на разпределение на вероятността да се приеме от мобилната станция на сигнал с определено ниво в градска среда със засенчване (бавен фединг). Вижда се, че има едно най-вероятно (средно) ниво и средно-статистическо отклонение от него точно по закона за Гаусовото разпределение. При бързия фединг разпределението е по-сложно [8]. На Фиг. 12б е показан друг важен статистически ефект – закъснението на сигнала в среда с многократни отражения и дифракции. След сигнал от директния лъч (ако го има), мобилната станция приема серия от "закъснели" сигнали, пристигнали по по-дълги пътища. И тук има средно закъснение и средно-статистическо отклонение τ_σ от средното закъснение. Проблеми настъпват когато τ_σ в градска среда става е сравнимо с продължителността на 1 бит и се получава междусимволна интерференция. Ще припомня този проблем малко по-късно.



Фиг. 11. Използване на модела на лъчево трасиране и "street" ефект



Фиг. 12. Статистически ефекти в мобилна среда: а) вероятност за разпределение на нивото на сигнала при засенчване; б) статистически ефекти на закъснение на сигнала

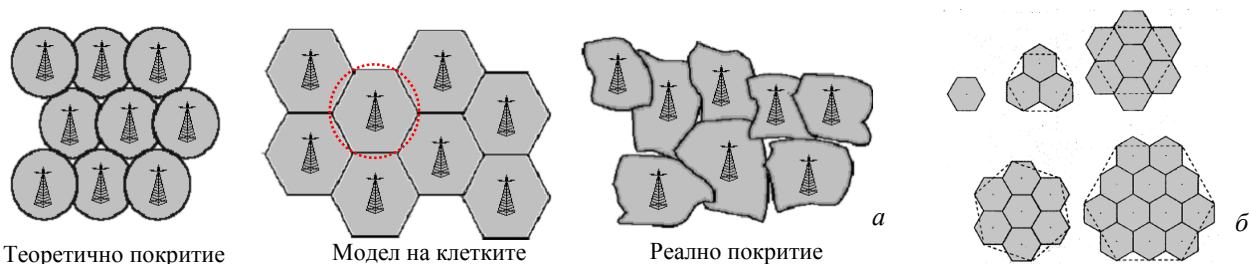


Фиг. 13. Сравнение на резултатите са затихване от 3D модел лъчево трасиране, емпиричен модел и измерване

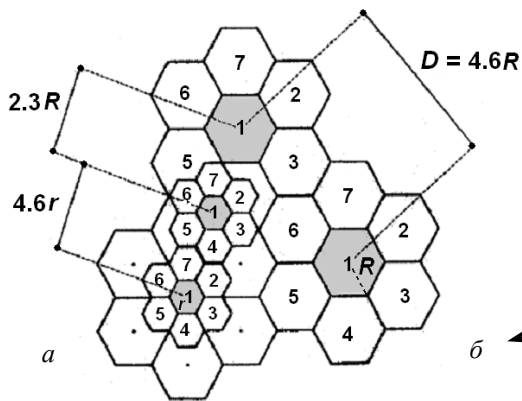
Представата за физични явления в мобилните комуникации е едно, но как инженерите извършват точни анализи на покритието в клетъчната мрежа, е съвсем друго нещо. Затихването на сигнала трябва да се оцени достатъчно точно, за да може да се балансира т. нар. енергетичен бюджет (link budget) на дуплексните uplink и downlink канали в GSM мрежата. Затова се говори за *модел на мобилните радиоканали*. Има три типа модели: емпирични, лъчеви и статистически. При *емпиричните модели* се ползват приближени формули за затихването, получени след обработка на голямо количество експериментални данни (например, най-известният модел на Okumura-Hata е получен след огромно количество измервания в продължение на 5 години в Токио). Основните параметри в такъв модел са малко: честота, разстояние до BS, височина на антените и тип на средата (градска или плътна градска среда, покрайнини и равнини). Днес по-разпространено е проектирането чрез софтуерно симулиране на радиоканалите по метода на *лъчевото трасиране* (ray tracing). Моделът се базира на законите на физичната оптика: отражения от стени, дифракции от остри ръбове, меко разсейване, поглъщане в бетонни стени и някои други ефекти, вградени в симулатора. Първоначално трябва да се построи 3D карта на местността и след това да се разиграят различни комбинации с положенията между BS и MS – вж. примера на Фиг. 13а (или още примери на www.remcom.com), за да се построи карта на нивото на покритие в дадения район. В зависимост от броя на отчитаните ефекти в модела (напр. до 10-15 последователни отражения на един и същи лъч, до 2-3 дифракции, комбинирани с отражения и пр.) могат да се постигнат много достоверни резултати, които след това да се проверят експериментално. Проверката най-често става с чувствителен прибор, качен на автомобил, който се движи по даден маршрут около BS и на 1-3 секунди отчита приетата средна мощност (Фиг. 13б). Статистическите модели на многолъчеви радиоканали са “висшият пилотаж” при проектиране на мобилни мрежи и се базират на статистическо разпределение на нивото на сигнала, случайното закъснение, разширението на спектъра, Доплеровите модуляции на честотата и др. параметри за много лъчи.

2.4 Топология на GSM клетките. Отново се връщам на GSM клетките, но този път ще разгледам тяхната топология, т.е. как се разпределят в даден географски район. Вече бе казано, че клетката (cell) (като част от клетъчната мрежа) е ограничена теренна област, чието покритие със сигнал се осигурява от една базова станция BS. Ако антената на BS е с ненасочена диаграма на излъчване и в областта няма препятствия, тя ще покрива с намаляващ по амплитуда сигнал кръг с радиус R – Фиг. 14а, докато този сигнал отслабне дотолкова на фона на шума, че стане негоден за надеждна комуникация с мобилните телефони. За да се моделира мрежата, обаче, от геометрична гледна точка е много по-добре да се работи с клетки във форма на правилни шестоъгълници с радиус R на описаната окръжност. Всъщност, като се отчете реалното затихване в градска среда, засенчването и други ефекти, покритието на клетката с някакво минимално ниво на сигнала се различава доста от кръг или шестоъгълник, но нека да запазим модела, подобен на пчелна клетка. Важен въпрос е колко големи могат да бъдат клетките? В съвременните GSM мрежи има клетки с най-различни радиуси – от десетки метри до 35-40 km. При равнинни и ненаселени терени се използват т. нар. големи GSM клетки (до 35-40 km) и макроклетки (3-5 km), използвайки мощни излъчватели на BS. Такива големи клетки могат да се използват и в населени места при стартирането на нова мрежа, когато капацитетът е ограничен. Максималният размер (40 km в GSM-900 и 35 km в GSM-1800) се определя от две главни причини – ограничения от кривината на земната повърхност, но по-важната причина е ограничаване на възможното закъснение на сигнала от много отдалечени MS. В населени места днес се използват главно миниклетки (0.5-3 km) и микроклетки (до 500 m за пешеходци и до 2 km за превозни средства) с по-маломощни предаватели. Вътре в сгради се използват най-малките клетки с най-ниска мощност на предавателите – наноклетки (10-200 m) и пикоклетки (до десетина m).

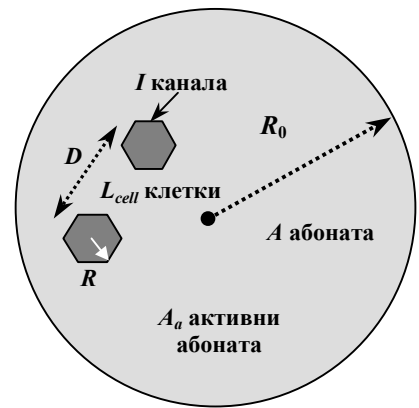
Да си припомним клетъчната терминологията. Досега вече стана въпрос за “съклетките” – клетки на разстояние D една от друга (co-cell reuse distance), в които могат да се използват еднакви честотни канали с ограничена (допустима) интерференция – Фиг. 1, и за съседните клетки, в които поради опасност от силна интерференция, задължително се използват различни канали. По-нататък, нека всички съседните клетки, в които не се използват едни и същи канали, да се обединят в “кълъстер” (cell cluster) и тази конфигурация да се повтаря в цялата мрежа. Броят на клетките в един кълъстер N може да е различен (виж Фиг. 14б) и това има важно значение за функционирането на GSM мрежата. Ако броят N е малък, това означава, че ще има много съклетки (и следователно, повече използвани честотни канали в цялата мрежа), но разстоянието между съклетките ще е малко и ще има прекалено силна интерференция. Обратно, ако N е голям, ще има по-малко на брой съклетки, но пък съклетъчната интерференция ще намалее рязко. Счита се, че при $N = 7$ се постига разумен компромис. На Фиг. 15а е показан пример за точно такава кълъстерна конфигурация със 7 хексагонални клетки във всеки кълъстер с фиксирано отношение D/R . Нека да оценим какво е значението на това отношение за комуникационния трафик в GSM мрежата и как може той да се управлява след изграждане на мрежата.



Фиг. 14. Модели на GSM клетки и тяхното реално покритие със сигнал (а); “кълъстери” от клетки (б)



Фиг. 15 а) Клъстерна конфигурация от по 7 GSM клетки с различни радиуси R и r ; б) секторизирана клетка и примерна диаграма на насоченост на антената на BS



Фиг. 16 Примерна зона в радиус R_0 , в която се прави оценка на трафика

2.5 Комуникационен трафик в клетъчната мрежа. На Фиг. 16 е изобразена условно една географска област (кръг с радиус R_0), върху която трябва да се изгради клетъчна GSM мрежа. Броят на честотните канали I , които могат да бъдат използвани в една клетка, е следният:

$$I = \Delta F_{band} / (f_{ch} \cdot N) \quad (4)$$

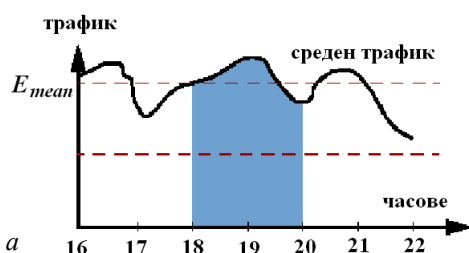
където ΔF_{band} е честотната лента, предоставена за използване от мобилния оператор, f_{ch} е ширината на един честотен канал (в GSM всеки честотен канал има ширина $f_{ch} = 200$ kHz и може да се ползва от 8 потребители едновременно). Вижда се, че I се увеличава при намаляване на N . Типично $I \sim 10-20$ канала/BS. Сега можем да определим и необходимият брой L_{cell} еднакви клетки с форма на правилни шестоъгълници с радиус R на описаната окръжност, с които трябва да се покрие кръг с радиус R_0 (като отношение на площите на фигурите):

$$L_{cell} \cong \frac{\pi R_0^2}{2.6R^2} = 1.21 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \quad (5)$$

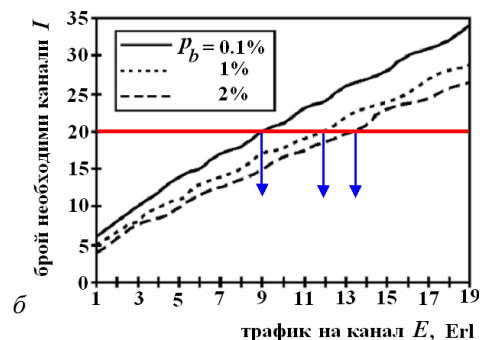
При еднакви хексагонални клетки разстоянието между центровете на съседните клетки е $R\sqrt{3} \sim 1.73R$. С чисто геометрични средства може да се докаже следната важна връзка между N , D и R в клетъчните мрежи:

$$D/R = \sqrt{3N}, \quad \text{където } N = 1, 3, 4, 7, 9, 12, \dots \quad (6)$$

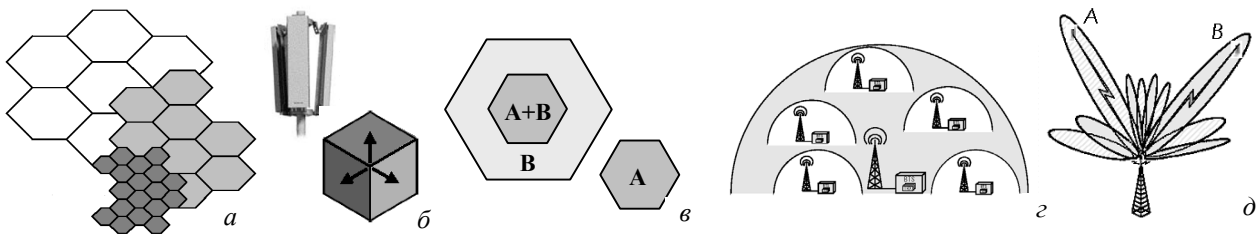
При $N = 7$ отношението $D/R \sim 4.58$ е оптимално. Сега да направим приближена оценка на комуникационния трафик в GSM мрежата. Първо, под интензивност на трафика E се разбира произведението на броя разговори в една мрежа за 1 час по средната продължителност на един разговор. Мерната единица за величината E е Erl (Ерланг); 1 Erl означава 1 канал в дадена мрежа, зает непрекъснато от 1 абонат за 1 час, или от 10 абоната за по 6 min или от 100 абоната за по 0.6 min и т. н. Може да се говори за среден трафик E_{mean} (Фиг. 17а), за час-пик на трафика (за GSM е 18-20 часа), както и за профил на трафика (напр. в скъпата все още GSM мрежа най-често се срещат разговори до 1-2 min, докато във фиксираната мрежа те са по-продължителни; разбира се, това се мени с времето). Накрая, може да се въведе и среден трафик за един потребител – в GSM той е $\sim 0.025-0.035$ до 0.1 Erl в час-пик. Друг важен параметър в една комуникационна мрежа е вероятността за блокировка p_b (или GoS, Grade of Service). Тази величина дава оптималният брой канали, които трябва да се използват в мрежата за постигане на определена интензивност на трафика в час-пик и обратно – Фиг. 17б. В безжичните WLAN мрежи се допуска малка вероятност за блокировка ($\sim 0.1\%$, т.е. 1 блокиране на достъпа до мрежата на 1000 случая) и трафикът при фиксиран брой канали (20) е слаб (9 Erl). В GSM мрежата се допуска $p_b \sim 2\%$ (2 блокирания на 100 случая) и реализираният трафик на канал е доста по-силен (13.5 Erl). Прост пример: в GSM-900 една клетка с 20 канала (общо 270 E трафик в клетката) с 0.1 Erl/абонат могат да поддържат ~ 2700 абоната (270/0.1). Следователно, в една голяма GSM мрежа от 2000 клетки \times 2700 абоната = 5.4 млн. абоната! Примерът е изключителен – той обяснява как само с няколко десетки безжични канала (по 200 kHz), преизползвани многократно в 2000 клетки, могат да обслужват милиони мобилни телефонни абонати. Това показва, че ефективността на използване на спектъра в GSM мрежата е много голяма.



$$P_b = GoS = \frac{E^I / I!}{\sum_{k=0}^I E^k / k!}$$



Фиг. 17. а) определяне на среден трафик (а); брой необходими канали за постигане на определен среден трафик



Фиг. 18. Методи за увеличаване на трафика в GSM мрежата: а) мащабно делене на клетките; б) секторизация на клетка; в) “облицоване” и фрагментиране на клетка; г) клетка-чадър за бързи потребители; д) използване на “умни” антени

Ще оценим максималният брой активни абонати A_a , които едновременно могат да ползват мрежата

$$A_a = A.E_a = L_{cell}.I \cong 1.21I \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 = 3.63I.N \left(\frac{R_0}{D} \right)^2 \quad (6)$$

където A е общият брой на очакваните абонати в дадената географска област, а E_a [Erl] е трафик/абонат. Вижда се, че броят на активните абонати A_a расте, когато расте броят на каналите в една клетка I , броят на клетките в един клъстер N и когато намалява радиуса на клетките R (респ. с разстоянието D между съклетките). Пример: Опитно е установено, че градове с население 1.5-3 млн. жители имат минимален първоначален потенциал от 1-1.5% потребители при стартиране на мрежата. Това означава $A \sim 30000-45000$ абонати със първоначален трафик $E \sim 0.01$ Erl/абонат. Нека $R_0 \sim 25$ km, $N = 7$ и $R = 5$ km; тогава броят на необходимите клетки е $L_{cell} \sim 30$ с $I \sim 10-15$ дуплексни честотни канала на клетка, всеки от които допуска до 8 едновременни потребителя. Така, при тези първоначални условия, в системата могат да се обслужват $8 \times A_a \sim 2800-3600$ едновременни потребители! Това е проста оценка, но ако се отчете и фактора на натоварване на мрежата, на активността на речта и секторизацията на клетката, стойността трябва да се умножи с коефициент 3-4. Всичко това показва сериозен потенциал на GSM мрежата още при старта ѝ, който непрекъснато расте при нейното разрастване.

2.6 Методи за увеличаване на капацитета на мрежата. От всичко дотук става ясно, че капацитетът на GSM мрежата (максималният брой активни потребители в даден момент) зависи не само от броя на каналите в лицензирания честотен обхват, предоставен на даден мобилен оператор, но и от броя на изградените от него клетки. Такава мрежа може да расте практически неограничено в сухоземните географски райони, ако към нея се добавят все нови и нови клетки. Как, обаче, може да се увеличава капацитетът, когато честотният ресурс е изчерпан (няма повече свободни канали), а дадената географска област вече има практически пълно покритие.

Досега примерите бяха само за еднакви клетки, в които честотните канали са разпределени равномерно и *статично* (т.е. без промяна при функциониране на мрежата). Оказва се, обаче, че някои клетки (на стадиони, магазини, летища, гари, и др.) се “натоварват” с потребители повече от съседни клетки. Един бърз метод да се увеличи капацитетът в тях е *динамичното разпределяне* на канали – временно заимстване на свободни честотни канали от съседни, по-слабо натоварени клетки. Задължително се спазва условието за максимално допустима съклетъчна интерференция. На Фиг. 18 са показани още методи за увеличаване на капацитета. Един от най-ефективните е *мащабното делене* на клетки (cell splitting) – Фиг. 18а, Фиг. 15а. Редукцията на радиуса на клетките с коефициент K води до увеличаване на броя на BS с K^2 , и следователно, до рязко нарастване на капацитета. Този метод се използва след началния период, когато в мрежата има условия за по-висок трафик, повече финансови средства за инвестиция и увеличаване на броя на BS е икономически изгодно. Намаляването на радиуса на клетката се придружава със задължително намаляване на излъчваната мощността на BS, за да се избегне съклетъчната интерференция. По-евтина и изгодна алтернатива на мащабното делене е *клетъчната секторизация* – Фиг. 18б, Фиг. 15б. При този метод клетката се дели на 3 сектора по 120° , които могат да се разглеждат като отделни клетки, но се обслужват от една BS. В този случай антената на BS се състои от 3 антенни панела, всеки работещ като отделна антена, която на ниво -10 dB под максималното “покрива” сектор с ъгъл 120° . При секторизацията трафикът се увеличава с коефициент ~ 2.5 ; това е сериозно увеличение и днес почти всички GSM клетки в населени места се състоят от сектори. Много подходящ метод е т.нар. “облицоване” на клетка – Фиг. 18в. Във вътрешната клетка се използва набор от честотни канали (условно A+B, като A каналите могат да се използват и в други, по-близки клетки). В периферията на облицованата клетка, обаче, се ползват само B канали. Подобен е и методът на “фрагментирано” преизползване на еднакви честотни канали. Всяка клетка има по-малък вътрешен кръг (фрагмент), в който могат да се ползват всички честотни канали на собствената и на съседните клетки при намалена мощност, без да се получава нежелана интерференция. Такъв метод се използва в мобилния WiMax. В някои GSM мрежи използват отделна по-голяма “клетка-чадър” за по-бързите потребители – Фиг. 18г, които не са ефективни за микроклетки, защото поради по-честия “handover” заемат повече служебни канали в мрежата. Има и един доста съвременен метод в 3G мрежите – използване на “умни антени” (smart antennas) в базовите станции. Идеята е проста – интерференцията с близки потребители, използващи еднакви честотни канали, но разположени под друг ъгъл в същата клетка, може да се преодолее, като се използват остросочени антени на BS. Това са антенни решетки, които могат да формират практически отделен лъч към всяка MS в клетката – Фиг. 18д (пример: лъч е насочен към даден абонат A, но към другия абонат B лъч отсъства и интерференция няма). Тесният лъч е или въртящ се, или един от много превключваеми

лъчи, формирани от “умната” антена. Описаният метод е много ефективен (позволява да се увеличи комуникационният капацитет от 3 до 5 пъти), но интелигентността на мрежата трябва да е значително висока, а антените на базовите станции – много по-сложни и скъпи.

Трафикът и качеството на комуникационните услуги зависят не само от архитектурата на клетъчната мрежа, но и от специфичната обработка на сигналите, начина на използване на честотните канали и метода за достъп на потребителите до GSM мрежата, които са разгледани в следващата част.

(следва продължение)

Литература

- [1] П. Данков, "Увод в безжичните комуникации", Херон прес, 2007 г.
- [2] "Understanding telecommunications 2" – Ericsson & Telia, (online източник: <http://www.studentlitteratur.se/>)
- [3] G. Heine, "GSM networks: protocols, terminology and implementation", Artech House Inc., 1999
- [4] R. Schmitt, "Electromagnetics Explained. A handbook for wireless/RF, EMC and high-speed electronics", Newnes 2002
- [5] H. Holma, A. Toskala, "WCDMA for UMTS. Radio Access for Third Generation Mobile Communications", J. Wiley, 2004
- [6] Z. Abate, "WiMAX RF Systems Engineering", Artech House Inc., 2008
- [7] R. Bekker, J. Smits, "Mobile Telecommunications: standards, regulation and applications", Artech House Inc., 1999
- [8] M. D. Yacoub, "Foundation of Mobile Radio Engineering", CRC Press, London, 1993
- [9] П. И. Данков, "Основни приложения на микровълните", сп. "Физика" бр. 1, 1998, стр.7-15

Благодаря на Фонд “Научни изследвания” на Софийски университет за поддръжката.