

# Как работи GSM мрежата?

Пламен Данков, СУ „Св. Климент Охридски“

(2. част)

## 3. Сигнали, канали и достъп до GSM мрежата (или защо всички могат да говорят)

В първата част разгледах само клетъчната архитектура и комуникационния капацитет на GSM мрежата, без да става дума за това, какви са сигналите в мрежата, какви честотни канали се използват и как отделните потребители могат да „влязат“ в мрежата. В този раздел ще се дискутират именно тези въпроси, но без много подробности, защото материята е огромна. Описание на тези проблеми на достъпно ниво има в [1, 2, 4, 8].

### 3.1. Кои са най-подходящите честотни обхвати за мобилни комуникации и защо?

Сигналят в GSM мрежата е *цифров* – редица от битове, отговарящи на реч или данни (за това ще стане въпрос в 3.4-3.6). Както е за повечето нискочестотни комуникационни сигнали, той трябва „да се качи“ на по-високочестотен носещ сигнал (*модулация*) и така да се „пренесе“ в мрежата. Кои обхвати от електромагнитния спектър са най-подходящи за честотни канали, годни за „пренасяне“ на речта в мобилните мрежи? Тук следва едно твърдение, на което отначало някои може би ще се учудят. Оказва се, че е най-добре честотните канали за мобилни комуникации да се разполагат в един не особено широк интервал от 400-450 MHz до 2000-2100 MHz.

Защо носещите честоти *не трябва да са по-ниски* от 400-450 MHz? Един от аргументите е, че сигналите в безжичните мобилни мрежи се влияят силно от шума, особено от изкуствен произход, а той се увеличава с намаляване на честотата. По-важен е аргументът, че модулираните цифрови сигнали имат широк спектър и се нуждаят от по-широки честотни канали за пренасяне. Тук в действие влиза вторият „канон“ на безжичните комуникации – колкото по-висока е носещата честота, толкова по-широколентови канали могат да се ползват (или повече на брой канали с по-тясна лента). Третата важна причина е, че антените при ниски честоти са прекалено големи за мобилни комуникации (размерът на една антена е сравним с половин дължина на вълната).

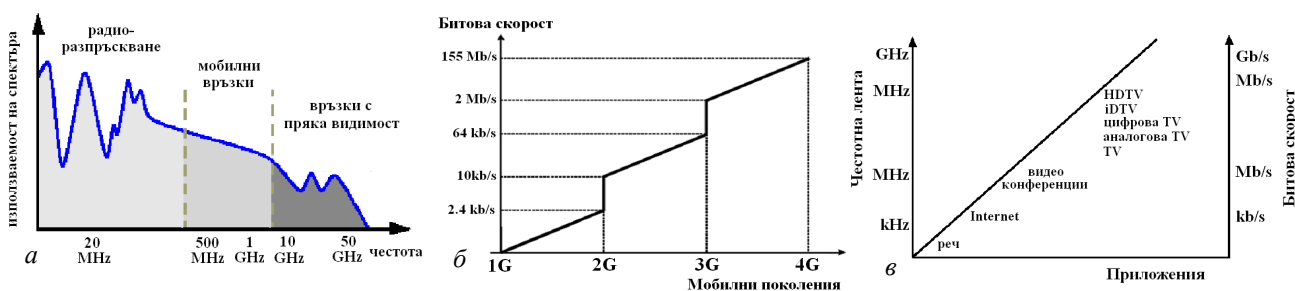
Обратно, защо носещите честоти *не трябва да са по-високи* от 2000-2100 MHz? Една от причините в тази връзка е квадратичното увеличаване на затихването при разпространение на сигнала с увеличаване на честотата ( $L \sim f^2$ ). С други думи, при еднакви условия на 200 и на 2000 MHz загубите нарастват с 20 dB (100 пъти). Затова на по-високи честоти са необходими по-чувствителни приемници. Друга причина за ограничаване на честотата отгоре е свързана с трудностите при покриване на клетките със сигнал. Колкото по-високочестотни са каналите в дадена мобилна мрежа, толкова разпространението на сигналите става все по-насочено (т.е. влиянието на дифракционните явления намалява и е необходима пряка видимост между BS и MS). Така при ниски честоти покритието на дадена област става с по-малко базови станции (има полезни ефекти на дифракцията), но с мощни предаватели - и обратно. Увеличеният брой BS в по-високочестотните мобилни мрежи, макар и с по-маломощни предаватели, може да се окаже икономически неизгодно. Още повече, че цената на устройствата (както в MS, така и в BS) расте с увеличаване на честотата. Това е свързано както с пазара, така и с техническите ограничения за електромагнитна съвместимост между устройствата на по-високи честоти.

На фиг. 20a е показана относителната използваемост на електромагнитния спектър. Вижда се, че нискочестотната област (под 300 MHz), където комуникационните канали са малко и теснолентови, се ползва главно за радиоразпръскване (радио, телевизия). Обратно - честотната област над 2 GHz се ползва главно от системи с пряка видимост между предавателя и приемника – радиорелейни, сателитни, безжични WLAN мрежи и др. Областта 400-2000 MHz, годна за мобилни комуникации, *се използва и най-ефективно*. Ще покажем,

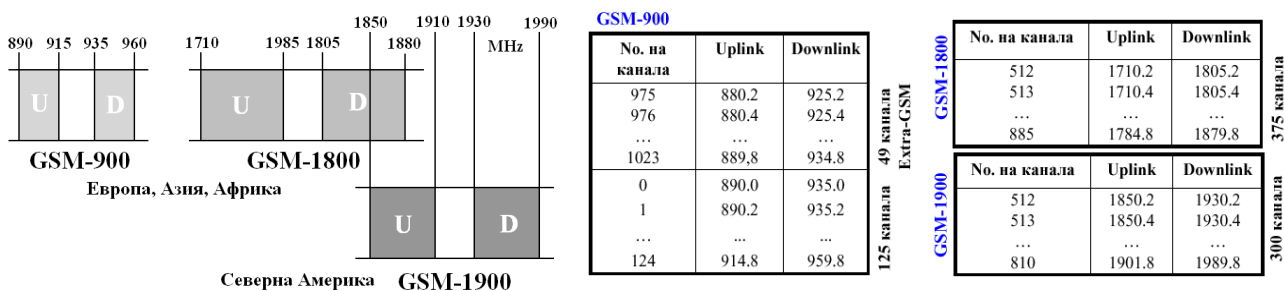
че скоростта на предаване на данни (в бит за секунда, b/s) е в пряка връзка с ширината на каналите (3.4). За да има ефективен и качествен комуникационен процес в мобилните мрежи с много потребители, сигналите трябва да се обработват така, че да се постигне максимална скорост при минимална ширина на спектъра –фиг. 20б, в.

### 3.2. Форми на GSM и честотни канали

Стандартът GSM е разработен по такъв начин, че независимо какви носещи честоти се използват, честотните канали да са еднакви – по 200 kHz без допълнителни защитни интервали между тях (вж. фиг. 3 и още 3.6). Както вече бе казано, основните форми на GSM са три, които днес носят названията GSM-900, GSM-1800 и GSM-1900 в зависимост от честотния обхват. GSM-900 е универсалната GSM форма. При нея има две



Фиг. 20. Относителна използваемост на спектъра (а); връзка „битова скорост-честотна лента-приложения” (б, в)



Фиг. 21. Форми на GSM стандарт с честотните обхвати Uplink/Downlink и универсална номерация на каналите ( $1024 = 2^{10}$ )

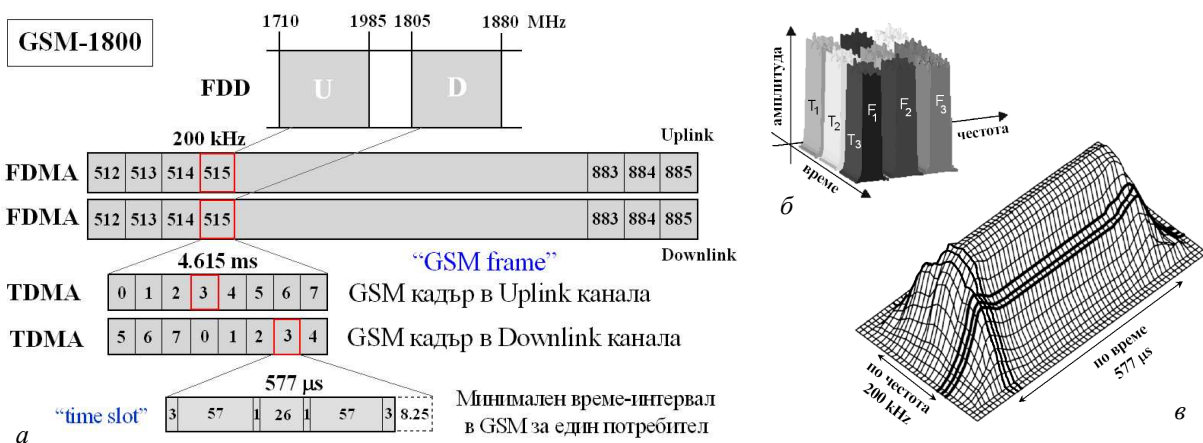
ленти (U&D) по 25 MHz с 20 MHz защитна лента между тях без GSM канали. В двете ленти са разположени по 125 дуплексни канала по 200 kHz плюс още 49 допълнителни (вж. фиг. 20 и таблицата). При всеки назначен дуплексен канал на даден абонат се осигурява 45 MHz дуплексно разстояние (това е честотната разлика между каналите на предаване (Tx) и приемане (Rx) на сигнала, което позволява Tx-сигналът в едно и също устройство да не влияе на Rx-сигнала и обратно). Стандартът GSM-1800 се използва в Европа, Азия и Африка, т.е. където не се ползва американският 2G стандарт CDMAone. Има две ленти по 75 MHz, 95 MHz дуплексно разстояние и 375 канала. Стандартът GSM-1900 се използва само в Северна Америка вместо GSM-1800, поради което повтаря номерацията на каналите му. Тук има две ленти по 60 MHz, 80 MHz дуплексно разстояние и 300 канала. В някои европейски страни се прилага и GSM-450 в честотния обхват на старата 1G NMT-450.

### 3.3. TDMA достъп до GSM мрежата

За да се използва ефективно честотният ресурс, GSM стандартът налага потребителите в мрежата да „споделят” едни и същи честотни канали, но в различен период от време. Такъв достъп до безжична мрежа е известен като *времеви* – TDMA (Time Division Multiple Accesses). В старите 1G мобилни мрежи се използва само честотен достъп FDMA (Frequency Division Multiple Accesses). При него на всеки потребител се назначава един дуплексен канал (FDD – Frequency Division Duplex), който той използва сам по време на целия разговор.

При TDMA достъп на потребителя се назначава двойка времеинтервали, в който той приема/предава сигнал в даден честотния канал. Тези времеви интервали се повтарят периодично, при което разговорът не се „накъсва” видимо. В GSM мрежата се използва всъщност комбинация от FDMA и TDMA достъп, принципите на който са илюстрирани на фиг. 22. При задаване на дуплексния честотен канал при FDMA достъп задължително се спазва минималното дуплексно за дадената форма на GSM (виж. 3.2), за да се избегне паразитно влияние между сигналите на предавателя и приемника на MS или BS. При всеки TDMA достъп (burst) също се задават едноименни (U&D) времеинтервали (в примера това е третият по ред от кадъра), но те са разместени. Така, освен че мобилната станция на даден потребител използва различни достатъчно отдалечени носещи честоти за U&D каналите, излъчването (по Uplink канала) и приемането (по Downlink канала) са *отместени по време*. Оттук следва изключително важният извод, че макар връзката в GSM мрежата да е реално двупосочна (т.е. при разговор страните не се изчакват по метода „push-to-talk”), една MS *никога не излъчва и приема едновременно!* Разбира се, това се отнася и за BS при връзката ѝ с всяка MS. Тази особеност на GSM апаратите е много важна, защото съществено опростява устройството и действието на техните приемно-предавателни блокове.

Конкретните времеви характеристики на TDMA достъп са дадени на фиг. 22а, в. Всеки 200 kHz канал в GSM може да се ползва от 8 отделни потребители, чиито отделни времеинтервали формират *кадър* (GSM frame) с продължителност 4,615 ms. *Времеинтервалът* (time slot) за даден потребител е 576,875  $\mu$ s и това е най-късият времеви интервал в GSM мрежата. Този „квант” време в мрежата се „запълва” с кодирана информация – определен брой битове, всеки с продължителност 3,692  $\mu$ s (как става това ще се дискутира в 4.2). В него се съдържат общо 148 бита (от тях само 114 са данни на потребителя, останалите са служебни битове). Остават 8,25 бита (или по-точно 30,459  $\mu$ s), които съставляват „защитен интервал” (GP, Guard Period), необходим да се отделят времеинтервалите на съседните потребители в кадъра (още в 4.2).



Фиг. 22. Илюстрация на FDMA и TDMA достъп на потребителите в GSM мрежата (а, б); 3D изображение на сигнала на единичен потребителски достъп (burst) по време и по честота (в)



Фиг. 23. а) Пълноскоростен GSM (всеки потребител има достъп на всеки GSM кадър); б) Полускоростен GSM (през кадър); в) Предаване на SMS съобщения по бавен предназначен канал (на всеки осми кадър)

Ако по време на комуникационна сесия (разговор) даден потребител получава времеинтервал във всеки следващ кадър, се говори за т.нар. „пълноскоростен“ GSM –фиг. 23а. При него всеки потребител използва 1/4 от времето (за да излъчва и приема неговата MS) и 3/4 от времето е свободен (изключен). Това е много важно обстоятелство от енергетична гледна точка – батериите на GSM апарата се натоварват само 25 % по време на разговор и могат да издържат по-дълго от апарати в други 2G мрежи. При пълноскоростния GSM се постига скорост на пренасяне на информацията 22,8 kb/s, но поради използване на допълнителни служебни съобщения, тя ефективно намалява до 13 kB/s за реч и до 9,6 kB/s – за данни. На по-късни етапи от въвеждане на GSM стандарта, когато има вече много абонати и се търси по-висок комуникационен трафик, може да се използва т. нар. „полускоростен“ GSM – фиг. 23б. При него 1 потребител е включен вече само 1/8 от времето и 7/8 от него е свободен; общата скорост за реч е 11,4 kb/s (а не двойно по-малка, защото намалява служебната информация). Най-бавната скорост за предаване на данни в GSM мрежата е по т. нар. бавен предназначен канал, използван главно за трансфер на SMS съобщения. При него всеки абонат се включва веднъж на 8 кадъра – фиг. 23в.

### 3.4. Цифрови комуникационни сигнали – величини, свойства, модулация

Досега използвах доста комуникационни или електрически понятия, без специално да ги уточнявам, разчитайки на техния популярен смисъл. Едно от тях е понятието „сигнал“. Под електрически сигнал ще разбираме времева или честотна зависимост на напрежението или тока в дадена електрическа верига, но и още, на електричното или магнитното поле на разпространяваща се вълна. Изобщо, сигналът в комуникациите се явява *електрическият носител* на информацията, съдържаща се в комуникационното съобщение. За сведение: под *информация* в комуникациите се разбира комплект от сведения (данни), които подлежат на преобразуване, предаване, приемане и съхранение; а под *комуникационно съобщение* – формата на предаване на информацията (говор, музика, текст, картина, цифрови данни и пр.). Така сигналът е носител на съобщението и като такъв той обикновено е нискочестотен (нарича се още *сигнал в основна лента*) – акустичен, оптичен, електрически и пр. Всички тези сигнали трябва да се преобразуват в електрически, освен ако не са вече такива.

Сигналът се характеризира с амплитуда, честота (период на повторение) и фаза (няма да пиша формули, вж. [1, 4]). Той може да носи информация чрез изменение на всяка от тези величини. Как става това, ще разберем постепенно. Първо ще разгледаме набързо няколко общи въпроси, свързани със сигналите.

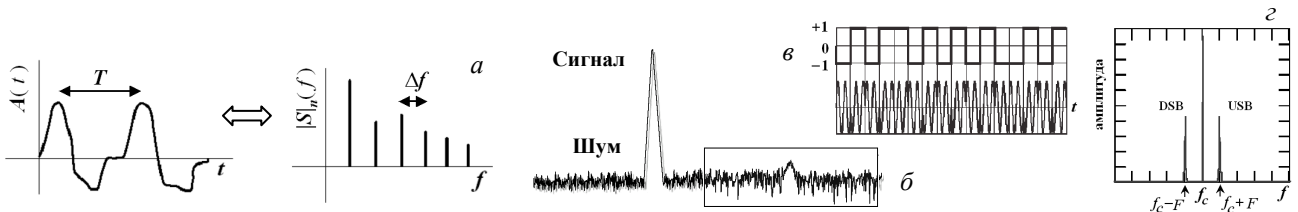
Зависимостта на амплитудата на сигнала от времето представлява неговата времева форма (TD, Time Domain), а зависимостта на амплитудата му от честотата – неговата честотна форма (FD, Frequency Domain) или спектър. Съществува еднозначна връзка между двете форми (TD и FD) на един и същ електрически сигнал (фиг. 24а) и най-често тя може да се осъществи софтуерно чрез т. нар. Фурие преобразуване. Времевата форма на сигнала може да се наблюдава с осцилоскоп, а честотната форма (спектър) – със спектроанализатор.

Сигналите се делят на детерминирани и случайни (шумови). Детерминираните сигнали могат да бъдат периодични (с период на повторение  $T$  на амплитудата и фазата) и единични. Сигналите, носители на информация, са по същество детерминирани. Шумовите сигнали се определят от случайни микроскопични ефекти от различен произход (например топлинно движение на носители на заряда, „топлинен шум“ и др.) и имат случайна амплитуда и фаза. Те не са комуникационни сигнали (не носят информация), но присъстват във всеки комуникационен процес. Те определят минималното ниво на полезния сигнал (фиг. 24б) (чрез отношението „сигнал-шум“), под което не може да се наблюдава реален комуникационен процес.

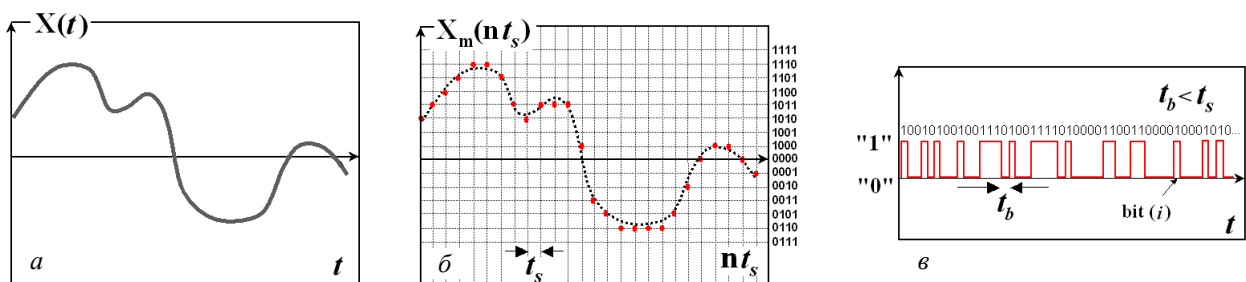
Детерминираните сигнали са аналогови, дискретни и цифрови. Аналоговият сигнал може да се описва с произволна амплитуда (ниво) във всеки момент – фиг. 25а. Дискретните (квантувани) сигнали се дефинират или в точно определени моменти  $nt_s$  ( $s$  от sampling) (но с произволни нива), или имат квантувани нива  $X_m(t)$ , но за произволни времеви интервали – фиг. 25б. Цифровият сигнал е квантуван и по време, и по ниво, като на всяко ниво се

съпоставя число в двоичен код (нула „0” или единица „1”). Така цифровият сигнал, макар че е преобразуван аналогов сигнал, се различава доста от него – той е редица от правоъгълни импулси с определена продължителност  $t_b < t_s$  (битове, bits) – фиг. 25в. Продължителността на 1 бит е важна величина, защото от това зависи ширината на използвания за цифрови комуникации спектър.

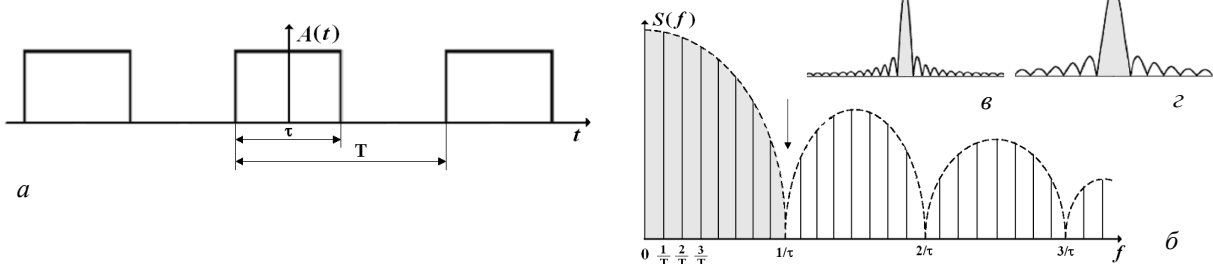
На фиг. 26а,б за илюстрация е показан класически периодичен правоъгълен импулс (подобен на цифровия) с продължителност  $\tau$  и период на повторение  $T$  и неговият спектър. Този спектър е също класически – състои се от спектрални съставлящи на честотна дистанция  $1/T$  една от друга и „обвивка” (с пунктир) съгласно



Фиг. 24. Примери за сигнали: а) Времева  $A(t)$  и честотна форма  $|S_n(f)|$  на сигнал; б) Сигнал и шум; в) Модулиран цифров сигнал във времева форма (фазова модулация); г) Спектър на амплитудно модулиран сигнал



Фиг. 25. а) Аналогов сигнал; б) Дискретен (квантуван) сигнал по време и амплитуда; в) Цифров сигнал



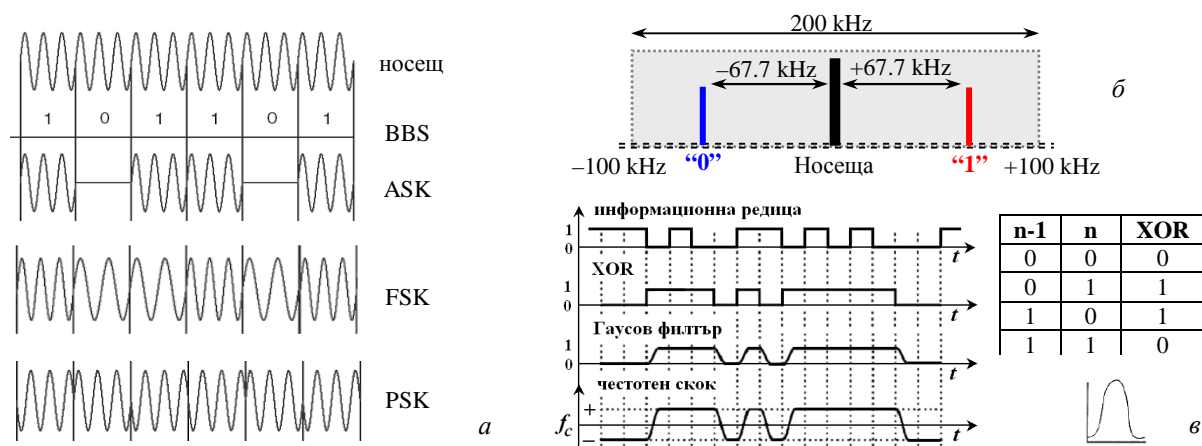
Фиг. 26. а) Периодичен правоъгълен импулс с продължителност  $\tau$  и период  $T$ ; б) Спектър на периодичния правоъгълен импулс; ефективна ширина на спектъра  $1/\tau$ , Спектър на модулиран правоъгълен импулс – по-дълъг (в) и по-къс (г)

с функцията  $\sin(x)/x$ , която описва изменението на амплитудата на спектралните линии с честотата. Тази функция има минимума при  $f = n/\tau$ . Тук възниква трети класически проблем: тъй като спектърът е безкраен, където практически той трябва да се ограничи (чрез филтриране), така че да е подходящ за реални комуникации и да е минимално „изкривен” по форма. Прието е, че ако спектърът на правоъгълния импулс има ефективна ширина  $BW_{eff} = 1/\tau$ , изкривяването е приемливо малко. Валидно е следното правило, което пряко засяга комуникациите – колкото по-къс е един импулс (бит), толкова по-широк ефективен спектър има и обратно – фиг. 26в, г.

Оригиналният носител на информацията в комуникациите (преди модулацията) са вече споменатите *сигнали в основна лента* (BBS, Base-Band Signals). Те са аналогови или цифрови електрически сигнали с относително ниска честотата, нивисока амплитуда и

относително тесен спектър. Такива са сигналите на звука (аудио), речта, изображенията (видео), числените данни (компютърните ASCII кодове) и пр. Човешката дейност произвежда BBS сигнали от всякакви видове. Те обаче имат един общ недостатък – не са подходящи за директно „пренасяне“ през комуникационната среда, особено в безжичните комуникации. Причините са много. Поради силно затихване и малка амплитуда те могат да се пренасят само на къси разстояния (например по т. нар. усукани двойки в ADSL фиксираните мрежи до максимум 4-6 km). Антените за такива нискочестотни сигнали, които са сравними с дължината на вълната, биха били неудобно големи (десетки и стотици m). В нискочестотната част на спектъра има отдавна извършено разпределение – използването на тези честоти е силно ограничено от международните и националните регулации за достъпния електромагнитен спектър.

Въпросът за „преноса“ на информационните сигнали в комуникационната среда е решен отдавна чрез използване на по-високочестотни „носещи“ сигнали (carrier). Така нискочестотният BBS се смесва с високо-честотен носещ (модулация) и се получава *модулиран сигнал* (или още PBS, Pass-Band Signal). В този вид сигналът се пренася в мрежата и накрая се възстановява като BBS сигнал (демодулация). Има много причини модулираните сигнали да се смятат по-подходящи за пренасяне на информация. По-високочестотните сигнали се разпространяват с по-малки загуби в т. нар. предавателни линии (кабели, оптични влакна и пр.). Освен това, на по-високи честоти има достъпни повече на брой и по-широки честотни комуникационни канали. Първото е



Фиг. 27. а) Цифрови модулирани сигнали (амплитудна модулация ASK; честотна модулация FSK; фазова модулация PSK (SK, Shift Keying); б) Схематично представяне на битове „0“ и „1“ в GSM канала; в) GMSK модулацията в GSM мрежата

свързано с осигуряване на по-висок трафик, а второто – на по-висококачествени комуникационни услуги и по-бърз трансфер на информацията в b/s. И накрая, при по-високи честоти антените са с по-малки размери, с по-висока насоченост, поради което могат да се използват предаватели с по-ниска изходна мощност, а тук съществуват и по-чувствителни нискошумящи приемници. На фиг. 27а са показани в TD форма цифров BBS сигнал, аналогов „носещ“ сигнал и три вида модулирани сигнали (ASK, FSK, PSK). Те носят информация за редицата от битове чрез изменение на амплитудата (on/off), честотата или фазата на модулирания сигнал. В безжичните комуникации се използват главно последните два.

От комуникационна гледна точка по-интересен е спектърът на модулирания сигнал. На фиг. 24 е показан пример. В общи линии той съдържа честотната съставяща  $f_c$  на носещия сигнал и две странични честоти (или честотни ленти, горна USB и долна DSB), които са свързани с модулацията BBS сигнал. Така модулираният сигнал има честотна лента, която е по-широка от тази на модулацията. За да се пренесе модулиран сигнал през

дадена комуникационна среда, трябва да се използва *честотен канал* – затова вече нееднократно стана дума. Честотният канал е част от електромагнитния спектър, отделен за разполагане на дадена носеща честота и страничните ленти на модулирания сигнал, така че той да не интерферира със съседните честотни ленти. Има някои задължителни правила за параметрите на сигнала и на канала, в който се пренася. Така ефективната ширина на спектъра на сигнала трябва да е по-малка от ширината на канала  $BW$  (за да не се ограничава спектъра му), а максималното ниво на сигнала трябва да е по-малко от максимално допустимото ниво в канала (за да се избегнат недопустими нелинейни изкривявания).

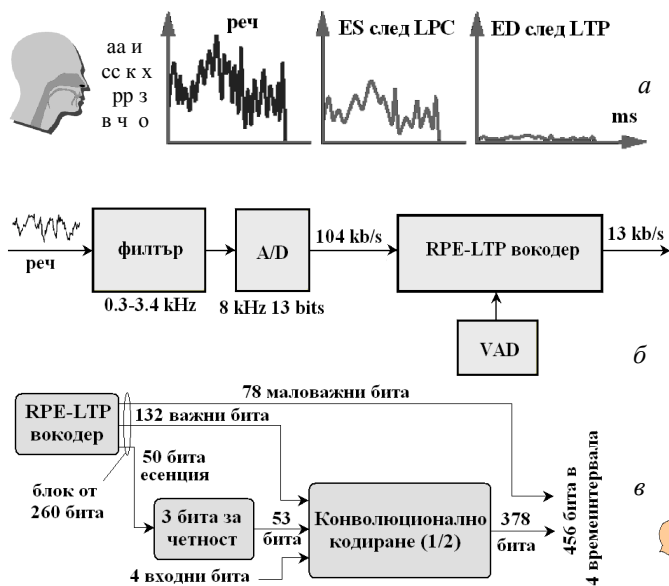
На фиг. 27б е показан схематично комуникационен канал в GSM мрежата (произволна носещата честота в средата на канала и лента от 200 kHz) и честотната девиация  $\pm 67,7$  kHz на носещата при модулирания цифров сигнал (предаване на бит „1” и бит „0” съответно). Този тип цифрова модулация е известен като FSK (Frequency Shift Keying). Проблемът е, че подобен тип модулация изисква лента на канала, по-широка от 200 kHz, свързано с резките скокове на честотата около носещата при предаване на често сменящи се битове ( $1 \leftrightarrow 0$ ) със стръмни фронтове. Как се решава той в GSM – вж. фиг. 27в? Първо, върху информационната редица се извършва логическата операция XOR („изключващо или”), при което се минимизира броят на скокове на битовете. След това импулсите на битовете с резки фронтове се изглаждат с помощта на т. нар. Гаусови филтри и по този начин необходимата честотна лента за модулация се свежда до споменатите 200 kHz. Този тип модулация в GSM е известна като GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying).

Накрая за пълнота следват някои важни определения и параметри на цифровите сигнали. На първо място, това е скоростта на предаване на информацията  $R_b$  (или битова скорост, bit rate). Това е количеството информация, изразено в двоичен код (0 или 1), което се предава по канала за единица време. Следователно  $R_b, \text{ b/s} = 1 \text{ bit}/T_b = 1 \text{ bit} \cdot f_T$ , където  $T_b$  е продължителността на 1 bit, а  $f_T$  е тактовата честота. Когато се предава редица от битове, се въвежда техническа скорост  $R_T$ , Baud (бод). Сега  $R_T = R_b / K = R_b / \log_2 M$  ( $K$  е броят на битове в една дума, а  $M$  е броят на състоянията на манипулирания параметър на сигнала). Вижда се, че  $R_T < R_b$ . По подобен начин може да се въведе и скорост на предаване на пакети от битове. Важен параметър е максималната пропускателна способност на идеален канал  $C_{ch}$ . Това е максималната скорост на предаване на информация в идеален канал без междусимволна интерференция. Съгласно с теоремата на Nyquist, за идеален канал  $C_{ch}, \text{ b/s} = BW \cdot \log_2 M$ . Когато в канала има шум, пропускателна способност намалява, т.е.  $C_{ch}, \text{ b/s} = BW \cdot \log_2(1 + S/N)$ . Това е известната теорема на Shannon за скоростта на предаване на информация в канал с отношение „сигнал-шум”  $S/N \neq \infty$ . Така се определя само горната граница на този параметър; реалните стойности са по-ниски.

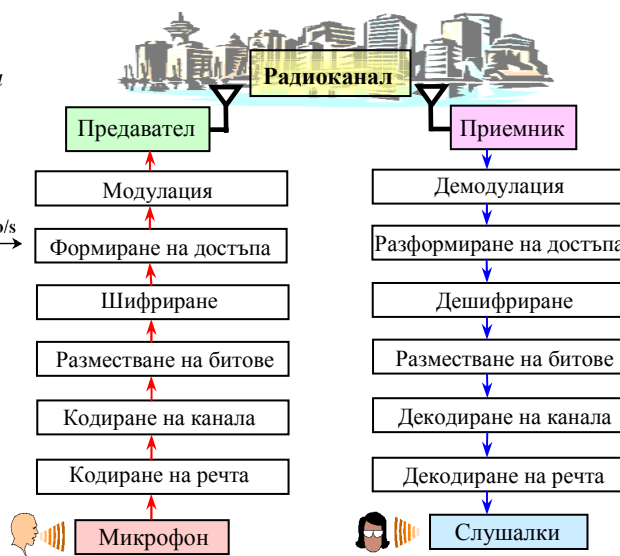
### 3.5. Кодиране на речта и кодиране на канала в GSM

В GSM мрежата се предава предимно реч. *Човешката реч* е звук с ограничен спектър (0,08–12 kHz), който съдържа доста излишна информация, затова в комуникациите този спектър се ограничава още (0,03–15 kHz) (за сравнение, звуковият сигнал например музика е с по-богат спектър – 0,015–20 kHz; в канала – 0,03–15 kHz). Въпреки ограничеността си, когато речта се кодира в цифров сигнал по пълната си вълнова форма (т.нар. РСМ метод, Pulse-Code Modulation), се получава сигнал с голяма битова скорост 64 kb/s (както е във фиксираната телефонна мрежа). В безжичните мобилни мрежи ширината на каналите е силно ограничена и се използват параметрични или хибридни методи за кодиране (чрез вокодери, voice coder). За да се редуцират излишни звукове и акустичният шум, сигналът на речта се анализира и обработва с линейни филтри с променливи във времето коефициенти, които непрекъснато се настройват в зависимост от съответния звук. Така се предава обработена (синтезирана) реч. Може да се направи една метафора – вместо да се предава музиката, все едно по мрежата се предават нотните листове на музиканта. Така с помощта на вокодерите излишната информация значително се редуцира и скоростта пада (например в GSM до 13 kb/s). Как става това?

Речта се формира във вокалната секция на устата; гласните струни вибрират с различна честота и спектър и органите на речта, работейки като филтър, формират различни звуци – гласни и съгласни. Всички гласни са квазипериодични сигнали, които съдържат определена фундаментална честота (основен тон). Съгласните (звучни и беззвучни) приличат повече или по-малко на „акустичен шум“, предизвикан от „турбулентен въздух“, който се получава във вокалната секция чрез свиване на органи в устната кухина и рязко изпускане навън. Тези два типа звуци се обработват от вокодера по различен начин. Важно обстоятелство е, че спектърът на звуците на речта остава практически постоянен за интервал 20-40 ms, което определя и минималният времеинтервал на един гласов блок – например 20 ms в GSM, което се равнява на 4 поредни времеинтервала при TDMA достъпа на даден потребител в GSM мрежата.



Фиг. 28. Кодиране на реч: а) обработка преди вокодера; б) илюстрация на сигналите при обработката на речта във RPE-LTP вокодер; в) схема на кодиране на речта и канала в GSM



Фиг. 29. Принципна схема на процесите на обработка на сигнала в GSM мрежата от приемането на аудио-сигнала до неговото възпроизвеждане

В мобилния GSM телефон най-често се използва *хибриден вокодер RPE-LTP* (Regular Pulse Excitation–Long Term Prediction), който се състои от няколко електронни филтъра. Те симулират работата на човешките органи на речта и извличат оригиналните честоти от гласовите струни (ES, Excitation Sequence) за гласни и съгласни. На всеки 20 ms се сравнява актуалната реч и реч-реплика и се определя грешката. Тя се минимизира и така се пренастройват конкретните стойности на коефициентите на филтрите. Заедно с ES те се предават служебно по канала до приемника, за да може там да се възпроизведе оригиналната реч от източника. Принципът е следният: Първо се извършва LPC (Linear Predictive Coding) на 20-ms отрязък от речта и се изработва ES (филтърът работи инверсно на гласните струни) – фиг. 28 а. Така два съседни 20-ms блока трябва да имат близка ES и по метода LTP се изчислява разликата между тях ED (Excitation Difference). Тази разлика се филтрира с нискочестотен филтър (изглаждане) и се извършва кодиране по вълновата форма на ED (чрез RPE кодер, вариант на PCM кодер). Кодирането се извършва на всеки трети отчет (sample) и така се предава до приемника, където речта се възстановява по обратния път. Скорост: 13 kb/s, т.е. 260 бита за 20 ms. На фиг. 28б е показан начин на включване на RPE-LTP кодера. Първо аналоговата реч се пропуска през лентово-пропускащ филтър 0,3-3,4 kHz за ограничаване на спектъра му и се извършва предварителна A/D конверсия на сигнала (честота на отчитане 8 kHz, 13-битова редица, скорост 104 kb/s). След това сигналът се обработва с описания RPE-LTP хибриден вокодер, чрез който скоростта се смъква на ниво 13 kb/s (9,6 kb/s за данните и 3,6 kb/s за служебна информация за коефициентите на LPC



филтъра). Когато в GSM мрежата се предават само данни, скоростта остава 9,6 kb/s. Така на всеки 20 ms от вокодера излизат 260 бита за реч, разделени в 3 категории: 50 особено важни (есенция на речта), 132 важни и 78 маловажни и се подлагат на по-нататъшна обработка (фиг. 28 в). Важно устройство към вокодера е VAD (Voice Activity Detector) – за регистриране на активността на речта. Обикновено при разговор говори само единият. Ако речта на даден абонат се прекрати за определен интервал (например след края и преди началото на всяка изречена дума), VAD-детекторът сработва и каналът се превключва в DTX мод (прекъснато излъчване, когато няма реч). Предимства: песте се енергия от батериите, намалява се паразитната интерференция, свободният канал се ползва служебно, но може да се „орежат“ началото и края на думите или да се игнорира тиха реч.

*Кодирането на канала* е задължителна стъпка при съвременните безжични комуникации след кодирането на източника (речта). То става с добавяне на излишни битове, с което се минимизират грешките при предаване на цифрови данни в силно променлива комуникационна среда, т. е. увеличаване на защитеността на сигнала в условията на шум и паразитна интерференция или „фадинг“. Последният параметър се определя от отношението „сигнал-шум“  $S/N$  на входа на приемника, при което се осигурява зададено ниво на достоверност на приетите битове. Количествена мярка за това е коефициентът на грешката  $BER$  (Bit-Error Rate), равен на отношението на броя грешно приети битове към сумарния брой битове (определя се за достатъчно малък интервал от време). Величината  $BER$  отчита сумарното въздействие на смущенията върху цифровия сигнал в канала. Тя е случайна и има статистическо разпределение в определена комуникационна среда. Ако в дадена система в даден канал се измерва  $BER \sim 10^{-6}$  (до  $10^{-5}$ ), се смята, че каналът работи нормално. При  $BER \sim 10^{-3}$  (1 грешно възприет бит на 1000) се смята, че смущенията са недопустимо големи и каналът може да блокира. Shannon е доказал, че  $BER \rightarrow 0$ , ако към информационната редица с данни се прибавят излишни битове (redundant bits) по някакво известно правило. Целта на добавянето на нови битове към информационните е, че ако част от последните се приемат грешно, то грешките да могат да се открият и коригират в приемника (error-correcting coding). Най-просто е даден информационен бит да се повтори (потрети и т.н.). Например, ако се предава бит „1“, вместо 1 се предава редицата 111. Ако в приемника се детектира комбинация 111, 110, 101 или 011 с преобладаващи единици, детекторът ще регистрира бит „1“, независимо от грешно възприетите битове. Той ще сбърка обаче, ако приетите сигнали са 100, 010, 001 или 000, т. е.  $BER$  е вече недопустимо голям и трябва да се увеличат излишните битове. В общия случай се дефинира  $(N, K)$ -кодиране където  $K$  е дължината (в битове) на информационната редица, а  $N$  е дължината на кодираната редица. Така горният пример е известен като  $(3, 1)$ -кодиране, но се използва рядко. Има два основни типа кодиране на канала:

- 1) Блоково кодиране – информацията се кодира по блокове без памет от блок към блок;
- 2) Конволюционално кодиране – информацията се кодира с памет от предишни битове.

Линейното блоково кодиране по правилото  $(N, K)$  се използва както за детекция, така и за корекция на грешно приета информация. Най-известен е методът  $(7, 4)$  (или Hamming code), при който битовете са в блокове по 4, добавят се като опашка 3 бита (parity bits), получени като линейна комбинация само от тези 4 информационни бита, а кодираната редица има общо 7 бита  $(4 + 3)$ . Така при блоковото кодиране се използват само битовете, които присъстват в момента в даден блок.

За разлика от блоковото кодиране, конволюционалното кодиране използва част от битовете от предшестваща информация, която остава следа в следващите битове. С други думи, този тип кодиране има памет (не представям конкретни схеми тук). Декодирането е сложен процес (например Viterbi decoding), но възможността за поправка на грешно приета информация е по-голяма в сравнение с метода на блоковото кодиране. Поради наличната памет на конволюционалното кодиране при предаване на информацията се постига

ефективно т. нар. „усилване от кодиране” (coding gain). Това означава, че комуникационната система, която използва такъв вид кодиране, може да работи и с по-ниско отношение „сигнал-шум”, намалено със стойността на „усилването от кодиране”, като при това се запази заложената по стандарт *BER* за грешно приети битове. „Цената” на такова предимство е необходимостта от по-широка честотна лента, за да се запази скоростта на предаване на информацията и двойно по-голям брой на предаваните битове.

В GSM мрежата се използва смесено кодиране на канала. 78 маловажни бита от вокодера постъпват директно за следващата обработка без добавяне на излишни битове. Обратно, към 50-те най-важни бита (есенцията на речта) се добавят 3 бита от блоково кодиране ( $50+3 = 53$  бита). Останалите 132 важни бита, 53-те особено важни и 4 служебни излишни бита като опашка постъпват в конволюционен кодер с ниво  $1/2$ , който произвежда 378 бита (от 189 на входа). Така получените общо 456 бита в рамките на един времеинтервал от 20 ms се подлагат на по-нататъшна обработка (interleaving и шифриране).

Кодирането на канала е много ефективно при наличие на шум и при бавен (слаб) фединг, но при бърз (дълбок) фединг, много дълги съобщения или при грешки в достъпа до канала, тази техника не е приложима. Експериментално е доказано, че битовете се „губят” в мрежата не един по един, а на групи (именно при дълбок фединг). Това означава, че проблемната група ще бъде безвъзвратно загубена. За да се предотврати това, се използва техниката на *разместване на битове* (interleaving). Това е вид разнасяне на сигнала във времето (time diversity), без добавяне на излишни (redundant) битове. Разместването на битовете на дълги редици се извършва най-често по матричен път - на входа информацията постъпва по редове, а на изхода се чете по стълбове. Пример: нека информационната редица е 101. Ако се използва блоково кодиране (3,1), се получава редицата 111 000 111. Ако от тази редица се изгубят последните 3 бита, оригиналната информационна редица не може да се възстанови, т.е. 10\_. Нека да се използва разместване, като редицата сега е 101 101 101. Допускаме, че отново са изгубени последните три бита; следователно, възстановената редица е 11\_ 00\_ 11\_. Като се използва принципът на кодиране, „решаващата схема” (decision scheme) на приемника ще възстанови истинската редица данни 101, въпреки „загубата” на битове в канала.

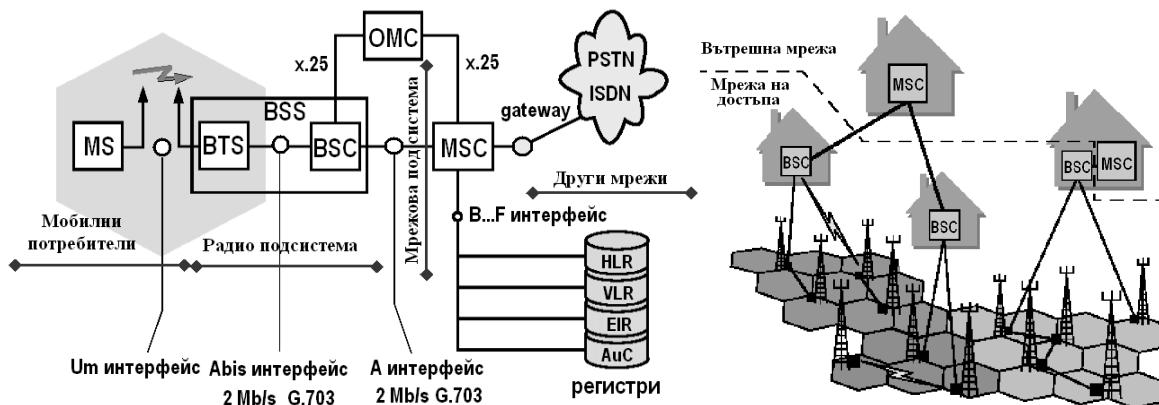
Трите етапа на обработката на сигнала се показани на фиг. 29. Там са показани и следващите етапи – шифриране на информацията, формиране на достъпа – разделяне на информацията по блокове, които се включват в минималния времеинтервал на потребителя, и накрая – модулация на цифровия сигнал.

Мрежите, които се базират на безжични радиоканали, са много по-чувствителни към подслушване и неправомерно използване на честотния канал, отколкото във фиксирани кабелни мрежи (без радио достъп). Това е особено съществено при мобилните телефони и безжичните мрежи както за отделния потребител, така и за оператора на мрежата. Защитата на персоналната информация може да се базира както на използване на допълнителни услуги (например смарт-карти с персонален защитен код), така и/или разнообразни функции на мрежата: доказване на автентичност на потребител срещу нерегламентирано използване на услуги в мрежата и достъп на външни потребители; шифриране (encryption) на реч и данни в безжичната мрежа за предпазване от подслушване; идентификация на терминалите (телефони, лаптопи и други устройства) срещу кражба; временни телефонни номера за защита срещу неправомерно използване на самоличността на даден потребител и др.

#### 4. Функциониране на GSM мрежата (как мрежата знае къде си)

##### 4.1. Архитектура на GSM мрежата и функции на отделните ѝ части

Досега разгледах много процеси в GSM мрежата, като използвах общата представа за някои важни нейни компоненти (мобилна станция, базова станция и др.), но досега не стана въпрос за цялостната ѝ архитектура. Няма да навлизам в подробности (има доста подробни описания в интернет). На фиг. 30 схематично е представена общата структура на мрежата с нейните основни компоненти, връзката между тях и използваните жични и безжични интерфейсни стандарти (повече подробности има в [2, 3]).



Фиг. 30 а, б. Архитектура на GSM мрежата. Означения: MS (Mobile Station); BTS (Base Transceiver Station); BSC (Base Station Controller); MSC (Mobile Switching Center); OMC (Operation & Maintenance Center); PSTN (Public Switching Telephone Network); ISDN (Integrated-Services Digital Network); регистри: HLR (Home Location Register); VLR (Visitor Location Register); EIR (Equipment Identity Register); AuC (Authentication Center)

Мобилните станции (терминали) MS в дадена клетка и базовата приемно-предавателна станция BTS са единствените компоненти в GSM мрежата, между които по стандарт се осъществява мобилна безжична връзка (Um интерфейс). Базовите станции се управляват от контролер BSC, който осъществява връзката между една или няколко BTS с мобилен превключващ (комутационен) център MSC. Връзката (Abis и A интерфейс; G.703) се осъществява по оптичен кабел или посредством радиорелейни линии. Една GSM мрежа може да има от един до няколко MSC, всеки обслужващ типично стотици хиляди абоната. Даден MSC има по 4 важни типа регистри с непрекъснато опресняващи се бази от данни за потребителите и мрежата. Управлението на мрежата и софтуерната поддръжка се реализира от центъра за организация и поддръжка на мрежата OMC. Накрая, един от мобилните комутационни центрове (GMSC, Gateway MSC) осъществява връзката на дадената GSM мрежа с останалите комуникационни мрежи (фиксираната телефонна и цифрова мрежа, други мобилни мрежи, интернет и т.н.). Това става посредством субсистемата IWF (Inter-Working Function), отговорна за трансфера и адаптирането на протоколите между различните мрежи. Чрез тази функция GSM абонатът се превръща в обикновен фиксиран абонат.

Да разгледаме по-подробно някои компоненти на мрежата и техните основни функции. *Мобилната станция MS* е интерфейсът на мобилния абонат за безжична връзка с мрежата (за глас и данни) чрез BTS. Всяка комуникационна сесия е свързана с идентификация на абоната (GSM SIM, Subscriber Identity Module). MS има две основни части: 1) Телефон и 2) Радиомодем (RF част). Телефонът включва: аудио интерфейс, тяло (handset), клавиатура, дисплей, схеми за сигнализация и батерия. RF частта съдържа излъчвател (на основата на синтезатор на честота) (изходна мощност ~1 W), диполна антена (усилване ~2 dB), RIKE многоканален приемник. Предавателят и приемникът използват една антена, като сигналите на uplink и downlink каналите се разделят чрез диплексер. Контролният модем е логика с процесор. Той организира инициализацията, запитването, достъпа, регистрацията, контролира съобщенията и хендоувъра. *Базовата станция BTS* е главният компонент за достъп до мобилната мрежа, отговорна за покритието на клетката с радиосигнал и обслужването на всички абонати, намиращи се в нея. Състои от система от йерархични модеми в две групи: 1) Радиомодем; 2) Контролен модем. Радиомодемът включва относително интелигентна субсистема от предавател, приемник, кула и антена, обслужващи до 8 едновременни сесии на канал. Реалното покритие на клетката се изменя при всяка смяна на хардуера и трябва да се контролира. Честотният план на BTS е разпределението на честотните канали, използвани в дадена клетка. Ако е статично, не се променя. Използва се и динамично разпределение на канали, заимствани от съседни клетки.

Контролната част управлява радиомодема. BTS се свързва със собствения си контролер обикновено чрез коаксиален кабел.

*Контролерът на базовите станции BSC* е отговорен за управлението, мониторинга и връзката с MSC на комуникационните сесии в няколко базови станции (например в един клъстер). Има следните комуникационни и експлоатационни функции: Като комуникационно устройство действа като концентратор на информационния поток за трафика, идващ от BTS, или като маршрутизатор – за обратния трафик от MSC. Като експлоатационно устройство предава алармени съобщения за проблеми и статистика на техническите характеристики на BTS; Действа като база данни за конфигурацията на софтуера, зареден от MSC през BSC. BSC управлява зоната, обхващаща няколко клетки, а именно: назначава честотните канали, които могат да се използват в тези клетки; управлява хендоувъра и ниво на сигнала, при което се препоръчва хендоувъра; контролира и информира HLR за движението на абонатите през наблюдаваните клетки. BSC е единственото устройство в GSM мрежата, което се командва дистанционно от MSC. Все повече функции на BSC се поемат от самите по-модерни BTS.

*Мобилният комуникационен център MSC* е централата за връзка с подвижните абонати. Така всички BTS в дадена сервисна област чрез своите BSC се свързват в един централен процесор (MSC), осигуряващ необходимия капацитет от услуги (обикновено обхваща  $\sim 10^6$  абонати – голям град или няколко по-малки селища). MSC има следните основни функции. 1) Управлява мобилността на GSM мрежата. Това включва общ контрол над хендоувъра, локализация и повикване на подвижни абонати (localization & paging), прехвърляне на услугите в GSM мрежата на даден абонат към други оператори (roaming) и др. 2) Осигурява идентификацията на абонатите и осигурява достъпа им до различни услуги в мрежата (service profile). Осигурява достъпа до базата данни за проверка на автентичност. 3) Управлява придвижването през мрежата на т.нар. домашни абонати (home subscribers) и временно пребиваващите абонати (visitors). 4) Свързва конкретната GSM мрежа с останалите комуникационни мрежи (PSTN, ISDN, други мобилни мрежи, Internet и пр.).

Много важна функция, от която съществено зависи работата на GSM мрежата, е *локализацията* (или отговор на въпроса къде в мрежата се намира даден мобилен абонат в даден момент?). Локализацията в GSM става чрез проследяване на движението на абоната с неговия телефон през клетките на мрежата. Ако не се извършва проследяване, когато даден абонат се търси от друг, мрежата трябва да изпраща съобщения за повикване (paging) до всички BTS, което е изключително неефективно. Обратно, ако се следи прехвърлянето на даден абонат всеки път, когато навлезе в нова клетка, също е неефективно, защото се изисква много служебна информация, а това намалява капацитета на мрежата. Най-ефективно е регистрацията на абоната при влизане в даден клъстер от клетки, като евентуално съобщение за повикване се изпраща само в тези BTS.

Друго важно предназначение на MSC е поддържането на регистри от данни. Най-важният е HLR – база данни с информация за домашните абонати в дадена мрежа, включващи постоянна информация (за абонамента, профил на услугите и пр.), променлива информация (последното регистрирано местоположение, работо-способност на MS, състояние на връзката и др.). HLR прави разлика между абоната (SIM) и неговата MS (EIR). AuC е център за проверка на автентичността. Тя става на два етапа: 1) (локално) При включване на MS се въвежда таен код, който се сравнява с този в SIM и след проверка абонатът може да ползва мрежата и 2) (в мрежата) MSC прави запитване до MSC за идентификация по таен алгоритъм, който не се предава по канала, а се съхранява в две идентични копия в MS и в AuC. VLR е регистър за временно пребиваващите абонати, които се придвижват през мрежата. Информацията непрекъснато се обновява, но при минимален диалог, за да не нараства частта на служебната сигнализация. Накрая, EIR е регистър за работоспособността на апаратите за MS. Станциите се разпределят в три списъка: „бял” – работоспособни; „черен” – изключени, откраднати и не-работоспособни и „сив” – частично работоспособни (например в зона с лошо покритие или с разредена батерия).

#### 4.2. Структура на времеинтервалите

Както изясних, TDMA достъп на потребителите в GSM мрежата означава, че всеки честотен канал „се споделя“ от много потребители (по 8 на канал). Сега се интересуваме каква информация може да съдържат тези времеинтервали (серии). На фиг. 31 а се дадени всички серии, използвани в GSM и типовете информация в тях. Очертават се 3 основни части на всеки тип серия: средна (информативна) от максимум 142 бита, „опашка“ от битове Т (3) и „защитен“ интервал (GP). Ще започнем с необходимостта от защитен интервал GP (8,25 бита или 30,459  $\mu\text{s}$ ). Понеже GMSK модулацията не съдържа амплитудно-модулирани сигнали, мощността по време на всяка серия трябва да е постоянна и стабилна – вж. фиг. 31 б. Смята се, че преди и след серията мощността трябва да спадне със 70 dB, за да не се предава сигнал (ще отбележим, че мобилната станция трябва да излъчва поне сигнал с поне 5 dBm мощност в GSM 900 или дори 0 dBm (1 mW) в GSM 1800). Това обяснява наличието на GP: да се отделят времеинтервалите от съседните потребители в кадъра (т.е. предоставя се достатъчно време за включване и изключване на предавателя на всеки потребител). После идва ред на „опашката“. Това са по 3 бита (обикновено „000“) в началото и края на блока от информация, необходими за синхронизация между реципиентите на сигналите. Оставашите битове са „полезна“ информация – различна в различните серии. *Нормалната* (трафична) серия съдържа два блока ( $2 \times 57 = 114$  бита) с потребителски данни, разделени с 26 бита TS и 2 бита „флаг“ F. „Трениращата редица“ TS са служебни битове (при флаг „1“), които са необходими за оптимална настройка на приемниците на MS и BTS с цел намаляване на грешно приетите битове поради междусимволна интерференция. Ако флагът се смени с „0“, следва неотложна служебна информация по т. нар бърз асоцииран канал, която отхвърля блоковете с реч (4.3). Това се прави, ако MS изпадне в дълбок фединг и се налага бърза смяна на честотния канал. Когато не се предава реч или данни, но е необходимо MS или BTS да са включени, нормалната серия се замества с *фалшива серия* от случайни битове.



Фиг. 31 а) Типове серии в GSM мрежата: нормална серия (за трафични канали в двете посоки); случайна серия (за достъп в uplink канала); серия за честотна корекция и за синхронизация (само в downlink канала); фалшива серия (замества нормалната при отсъствие на потребители в даден времеинтервал); б) Структура на нивото на сигнала по време на всяка излъчена серия (на този фон е показана е продължителността на нормалната серията); в) скъсена серия

Много особен статут има *серията за случаен достъп* (или скъсената серия). Тя се използва само от мобилната станция MS в следните случаи – при първоначално включване в мрежата, при всяко излизане от „режим на сън“ (празен ход) и при хендоувър (вж. още 4.4). В тези случаи MS „не знае“ разстоянието си до базовата станция и какво ще бъде евентуалното закъснение на сигнала. Ето защо, защитният интервал тук е с 60 бита по-дълъг от обикновено с цел да се изравни закъснението на сигналите в мрежата, идващи от много далечни потребители (~35-40 km) – фиг. 31в. Началните Т бита са повече (8) и са фиксирани „00111010“, последвани от синхронизираща редица. Тези общо 48 бита служат на BTS да „разпознае“ заявката на MS за достъп на фона на шумовите или интерференчни сигнали. От следващите 36 бита данни само 8 носят полезна информация за целта на включването на MS

(инициализация, изходящо или входящо повикване, хендоувър и др.) и 5-битов случаен идентификационен код TSMI, ползван при временната връзка. Разликата от 28 бита е поради силното кодиране на важните „полезни битове“. Това се налага, защото серията за достъп се излъчва еднократно и MS „чака да бъде забелязана“ от съответната BTS.

От своя страна BTS използва две серии, които MS не използва. Първата е т. нар. *синхронизираща серия*, която се използва в разпръскване към всички мобилни станции в мрежата на важна синхронизираща информация (SCH), разпределена в 2 пакета по 39 бита. Те са раздлени от дълга тренираща редица от 64 бита, идентична за всички BTS в мрежата. С тази серия всяка MS лесно може да разпознае най-достъпната за нея BTS в дадения момент и да установи „дали е в обхват“ (т.е. има ли наблизно достъпна GSM мрежа?). От тази серия MS може „да си свери часовника с текущото време“ в GSM мрежата (т.е. кой подред времеинтервал се излъчва в момента?). Друга серия, която се излъчва преди серията за синхронизация, е *серията за честотна корекция*. По структура тя е най-простата – в полезното поле се излъчват само битове „0“. Така повече от 0,5 ms дадена MS, която следи серията, получава еталон за фиксирана честота и може фино да настрои своя честотен синтезатор по този еталон. Тук има нещо важно, което трябва да се разбере. Всяка BTS трябва да излъчва непрекъснато в своята клетка серията за честотна корекция и синхронизиращата серия по некодиран канал, за да се „вижда“ от MS. Това става в нулевия времеинтервал на предварително определени GSM кадри на една строго фиксирана за всяка BTS служебна носеща честота, известна като „излъчвана“ или „beacon“ честота. Така всяка BTS „свети“ като радио-фар („lighthouse“) и позволява на всички MS да се ориентират в мрежата (подобно на корабите в морето от светлината на фаровете по брега).

#### 4.3. Логически канали и цикли в GSM мрежата

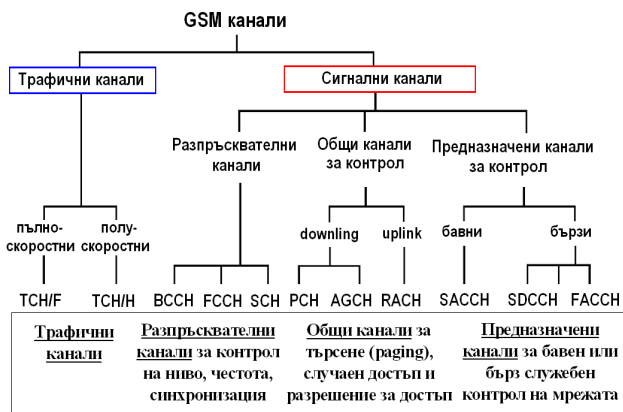
Вече стана дума, че в GSM мрежата тече информация за реч и данни и служебна информация. Тя се предава по т. нар. *логически канали*, във всеки от които се реализира определена логическа (комуникационна) операция. Те не трябва да се бъркат с физическите комуникационни канали, например честотните. В GSM мрежата има два типа логически канали – трафични и сигнални – вж. фиг. 32. Трафичните канали TCH са предназначени за предаване на реч и потребителски данни и са пълноскоростни TCH/F или полускоростни TCH/H. Те се използват както в Uplink, така и в Downlink каналите.

Към сигналните канали има три основни групи: разпръсквателни канали, общи и предназначени канали за контрол. *Разпръсквателните канали* (BCH, Broadcasting channels) се излъчват непрекъснато от всяка BTS по „beacon“ канала по определен план. Важен информационен канал е BCCH (Broadcast Control Channel). Всички MS, които в момента не провеждат разговор, търсят подобен разпръсквателен канал с най-благоприятно за тях ниво, следят информацията в него до момента, в който нивото падне и намират нов оптимален BCCH канал. Този канал включва следната информация: препоръчително ниво за връзка на MS с дадената BTS, код на конкретната клетка (BSIC), код за идентификация на мобилната система (MNC), както и код на географската област (LAC). Една от най-важните информации в него е разписанието на каналите за търсене на абонати (paging). Това е много важен енергоспестяващ подход в GSM мрежата. Той позволява на всяка неактивна в момента MS да „заспи“ (т.е. да изключи голяма част от електронните си вериги, с изключение на т.нар. „брояч на цикли“) и да черпи минимална енергия от батерията. Тя се „събужда“ само за да „чуе“ евентуалните повиквания и отново заспива (за период от 0,94 до 19 s). Другите два BCH са: канал за корекция на честотата FCCH (в който се излъчва честотната серия като еталон на честота) и канал за синхронизация SCH (в който се излъчва синхронизиращата серия, от която MS се информира за текущата стойност на брояча на цикли).

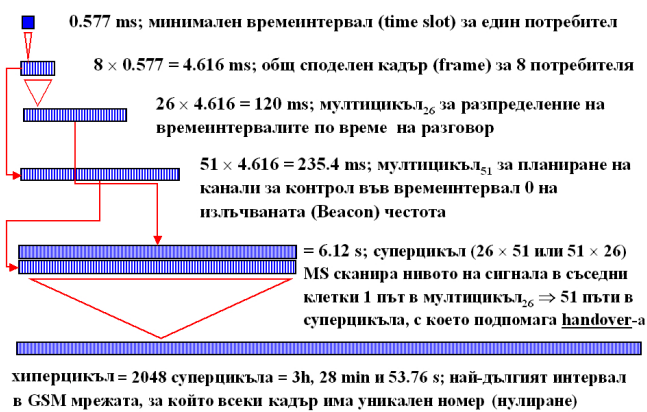
*Общите канали за контрол CCCH (Common Control Channels) са група от контролни логически канали, които подпомагат изграждането и поддържането на комуникационните връзки между MS и BTS. Те са разделени по Uplink и Downlink канали. Важен канал, който използват само BTS, е вече споменатият канал за търсене PCH (Paging Channel). В него по същество са събрани в списък временните идентификационни кодове TSMI на търсените в момента мобилни абонати. Всяка MS, която открие в списъка своя код, включва сигнализация за повикване (звънене). Каналът PCH присъства планирано в зададени предварително GSM кадри в „0” времеинтервал, излъчвани на „beacon” честотата, за да го „чуват” всички MS в клетката на дадена BTS (но може да се появи и на други честоти, ако трафикът е силен). Обратно, мобилните абонати използват канала за случаен достъп RACH (Random Access Channel), в който излъчват своята скъсена серия с определена цел, например заявка за разговор. Това е споделен канал от всички MS в дадена клетка. Всички те използват отново „0” времеинтервал на фиксирани GSM кадри, но на обратната „beacon” честота (т.е. по Uplink канала). Ако заявката на дадена MS е приета успешно, съответната BTS изпраща „потвърждение” по канала за разрешение за достъп AGCH (Access Grant Channel). Този канал също е планиран – отново на „0” времеинтервал на фиксирани GSM кадри по „beacon” честотата.*

Третата група са бързите и бавните *предназначените канали за контрол*. Един от тях е самостоятелният предназначен канал за контрол SDCCCH (Standalone Dedicated Control Channel). Този канал обменя служебна информация между MS и BTS след стартиращи процедури по каналите PCH, RACH и AGCH, но преди да се използват трафичните канали. И той е планиран поделен канал, но сега вече по 2, 4 и 6 времеинтервали на кадрите по „beacon” честотата. Друг канал, бавен асоцииран канал SACCH Slow Associated Control Channel), е специален канал за бавно непрекъснато предаване на силно кодирана цифрова информация (скорост 383 b/s). Третият канал е бърз, FACCH (Fast Associated Control Channel). Той се използва инцидентно за спешни съобщения при хендоувър, контрол на мощността, смяна на честотния канал и други непланирани дейности, за които бавните канали са много бавни, за да имат те успех. Този канал е бърз, защото се реализира по трафичните канали TCH след „отхвърляне на реч” в нормалната серия при смяна на флага. Това се прави за не повече от 8 последователни кадъра (~40 ms). Декодерът на реч не превръща липсата на реч в тишина или шум, а повтаря последният вярно приет времеинтервал от речта (получава се нещо като кратко ехо). Ако се налага много често използване на FACCH, речта търпи силни нелинейни изкривявания.

Малко хора знаят, че в GSM мрежата „тече собствено време”. Всъщност, това е доста естествено, поради използвания TDMA тип на достъп. Много операции в GSM мрежата (вкл. сигналните логически канали) са предварително планирани във времето и следователно, потребителите наистина трябва да знаят „точното време”, но не абсолютното, а това на мрежата, т.е. непрекъснато да се синхронизират към нея. Разбира се, GSM не е GPS, където се ползват атомни часовници. Тук е достатъчно да се знае кой подред GSM кадър (frame = 4,616 ms) тече в момента. Следователно, всеки кадър в честотните канали трябва да има свой актуален номер FN (frame number) и MS трябва да „знае” този номер, когато ѝ потрябва. На фиг. 33 е дадена структурата на всички времеви цикли в GSM мрежата: мултицикъл26 ( $26 \times 4,616 \text{ ms} = 120 \text{ ms}$ ), мултицикъл51 ( $51 \times 4,616 \text{ ms} = 235,4 \text{ ms}$ ), суперцикъл ( $26 \times 51 \times 4,616 \text{ ms} = 6,12 \text{ s}$ ) и хиперцикъл ( $26 \times 51 \times 2048 \times 4,616 \text{ ms} = 3\text{h}, 28 \text{ min}$  и  $53,76 \text{ s}$ ). Последният (хиперцикълът) съдържа 2 715 647 GSM кадъра, всеки със свой FN номер и представлява най-дългият период от време в GSM мрежата. След приключването му старите FN номера се нулират и започва ново отчитане. Нека накратко да видим каква необходимост налага наличието на изброените времеви цикли.



Фиг. 32. Логически канали в GSM мрежата



Фиг. 33. Структура на циклите в GSM мрежата

Когато между дадена MS и съответната BTS тече активна комуникационна сесия, те се съобразяват с т. нар. *мултицикъл26* с продължителност 120 ms. При пълноскоростен GSM всеки активен в момента потребител има свой времеви интервал във всеки пореден кадър по трафичните канали TCH. От тези 26 времеинтервала в мултицикъл26 обаче в един от тях не се предава или приема реч (празен интервал), а MS използва това време (0,577 ms на всеки 120 ms) за сканиране на нивото на излъчения сигнал от една съседна BTS по списък, даден от текущата BTS. По време на суперцикъла това става общо 51 пъти за 6,12 s. Това сканиране е важно; с получената информация за нивото на сигналите, излъчвани от съседните BTS, се подпомагат решенията на BSC за хендоувър на дадената MS при преминаване от една в друга клетка. Тази информация MS предава на BTS през друг кадър на мултицикъл26 (12-ия поред), по който се излъчва бавният асоцииран канал SACCH.

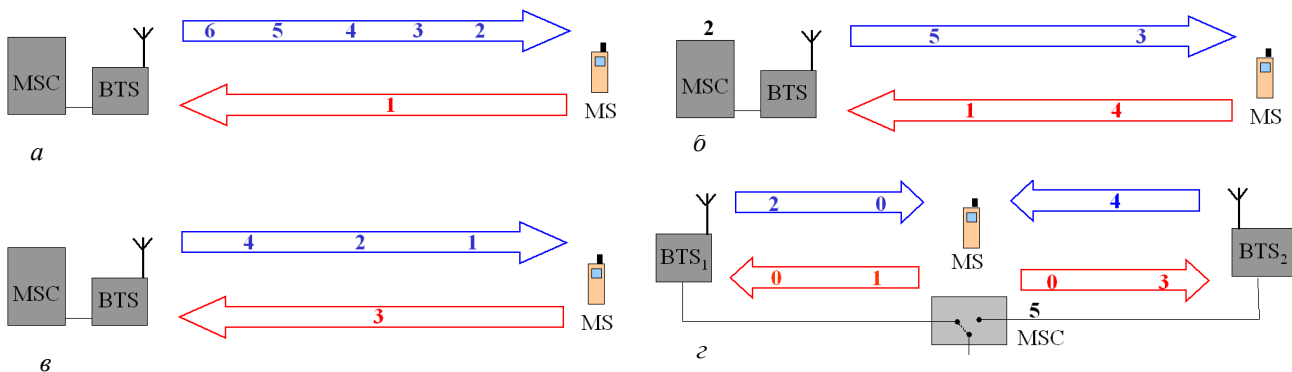
Когато MS е в „режим на сън” (т.е. когато не провежда комуникационна сесия), няма нужда от хендоувър, но тя трябва да се „събужда” периодично и да „слуша” разпръсквателните логически канали за контрол на нивото, честотна корекция и синхронизация. Това става по строго разписание в *мултицикъл 51*. Така честотната серия се излъчва на всеки 0, 10, 20 30 и 40-и кадър в мултицикъл 51, а серията за синхронизация – на всеки 1, 11, 21, 31 и 41-ви кадър от мултицикъл 51. Всички тези серии се излъчват по разпръсквателните канали винаги на нулевите времеинтервали на посочените кадри на „beacon” честотата на дадената BTS. Така в един празен кадър (50-и) на мултицикъл 51 MS има възможност да презареди своя вътрешен брояч на цикли с актуалния FN. По подобен начин се разпределят „по план” и останалите логически канали по мултицикъл 51.

От казаното става ясно, за да се изравнят периодите от време за активните (по мултицикъл 26) и пасивните (по мултицикъл 51) MS, трябва да се въведе суперцикълът (26 × 51 или 51 × 26).

#### 4.4. Основни операции в GSM мрежата (инициализация, изходящи и входящи повиквания и хендоувър

Накрая, за да се илюстрират по-добре описаните свойства на GSM мрежата, са дадени съвсем кратки примери за няколко основни операции в тази мрежа – фиг. 34.





Фиг. 34. Основни операции в GSM мрежата: а) Инициализация (включване в мрежата); б) Изходящо повикване (търсене на абонат; в) Входящо повикване (приемане на разговор); г) Непрекъсваемост на разговора (хендоувър). Номерацията отразява последователността на отделните етапи на всяка операция.

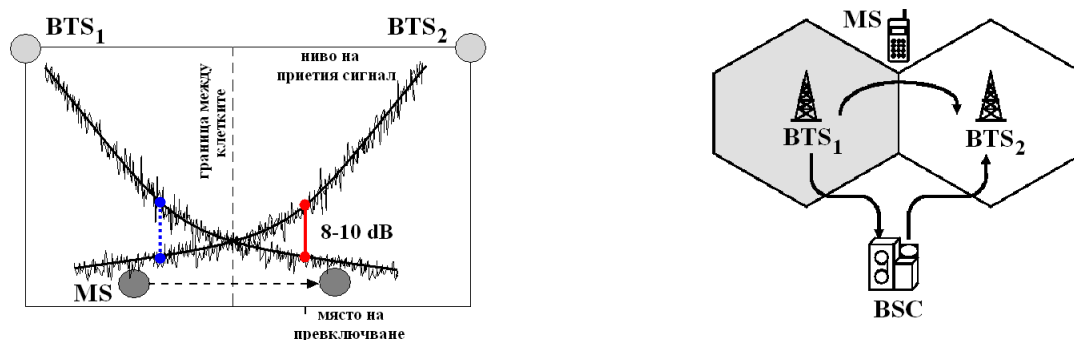
При първоначално включване на дадена MS в мрежата се извършва *инициализация* (регистриране) – фиг. 34а. Последователно се извършва следното: 1) MS сканира beacon радиоканалите на BTS и намира такъв, по който се излъчва информация за необходимото ниво на включване. Тогава изпраща скъсена серия със заявка за включване и започва да приема служебна информация от BTS. Тя включва: 2) Условия за претоварване в мрежата; 3) Списък на каналите за достъп, търсене и служебни съобщения; 4) Препоръчително ниво на мощността за достъп; 5) Тип на достъпа; 6) Идентификационен номер на системата SID. MS е вече в мрежата.

*Изходящото повикване* (търсене на абонат по набран номер) е просто и външно прилича на това във фиксираната мрежа – фиг. 34б. 1) След избора на цифрите на търсения номер, MS изпраща скъсена серия по Uplink канала на „beacon” честота, за да привлече вниманието на BTS. Серията се изпраща само веднъж и MS чака потвърждение; 2) MSC разпознава абоната в центъра за автентичност AuC, проверява правата за обслужване в мрежата и изпраща „paging” (PCH) съобщение за търсения номер; 3) По Downlink канала на „beacon” честота BTS назначава честотен канал и времеинтервал на MS, по който ще се проведе разговора; 4) MS се настройва на новия честотен канал; 5) BTS стартира разговора с търсения абонат.

*Входящото повикване* (приемане на разговор) е по различно – фиг. 34в. 1) Процесът стартира, когато друг абонат избере номера на търсената MS. MSC проверява в HLR дали търсеният абонат е в домашната BTS или е в посетена BTS (VLR). Назначава се канал за търсене (PCH) и достъп (RACH); 2) MSC маршрутизира повикването и изпраща съобщение за търсене (paging) с идентификационния номер (TMSI) на търсения абонат; 3) MS е в „режим на сън” и слуша канала за търсене по назначен времеви план от мултицикъл 51. Когато тя разпознае номера си – звъни и абонатът евентуално отговаря на повикването; 4) BTS назначава нов честотен канал и времеви интервал за разговора, който MS приема и така стартира разговора.

Най-сложен е процесът на *хендоувър* – фиг. 34г (преминаване от една клетка в друга по време на разговор, т.е. поддържане на непрекъсваемост на разговора) 0) Нека да тече комуникационна сесия, поддържана между дадена MS и BTS<sub>1</sub>. BTS<sub>1</sub> периодично изпраща списък до MS за „beacon” каналите на близкостоящи BTS с цел измерване на нивото им в свободните интервали на мултицикъл 21; 1) MS връща информацията за измерените канали (ниво и BER) по обратния „beacon” канал; 2) Ако нивото на текущата комуникационна сесия падне с 8-10 dB под нивото на сигнал, приет от MS от друга съседна BTS<sub>2</sub> (вж. фиг. 35), BTS<sub>1</sub> изпраща съобщение за хендоувър с инструкцията да се настрои на новия „beacon” канал на BTS<sub>2</sub>, която е показала най-високо ниво на сигнала при измерванията; 3) MS прекъсва досегашния разговор (чрез BTS<sub>1</sub>) и изпраща скъсена серия с най-висок приоритет по обратния нов „beacon” канал; 4) Новата BTS<sub>2</sub> изпраща на MS информация за синхронизация и нов трафичен канал; 5) MSC превключва разговора към новата BTS<sub>2</sub> и разговорът

продължава (0). Този тип хендоувър се нарича „мек”, понеже мобилният абонат изобщо не може да установи по външни белези, че е реализирал хендоувър. Ако сега MS започне да се връща по посока на BTS1 и нейният сигнал отново започне да расте, превключването няма да стане на предишното място, а по-нататък, когато отново нивото спадне с 8-10 dB под това на BTS2. Това е т. нар. „хистерезис” на хендоувъра и неговото наличие съществено намалява служебната сигнализация, свързана с непрекъсваемостта на разговора в GSM мрежата.



Фиг. 35. Принцип на реализация на хендоувъра

(Следва продължение за влиянието на GSM телефоните и базовите станции)

#### Литература

1. **Данков, П.** Увод в безжичните комуникации. Херон прес, 2007 .
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. **Данков, П.** Основни приложения на микровълните. - Физика, 1998, кн.1, с.7-15.

Благодаря на Фонд „Научни изследвания” на СУ „Св. Климент Охридски” за поддръжката.