



РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ
МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО
И НАУКАТА

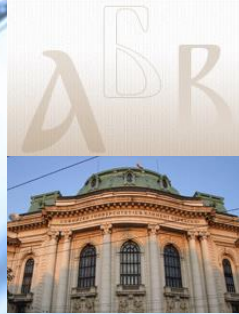
18 88



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“



Природни науки



Лятно училище за учители „Физика за и със смартфон“,
11-15 юли, ФзФ на СУ „Св. Климент Охридски“



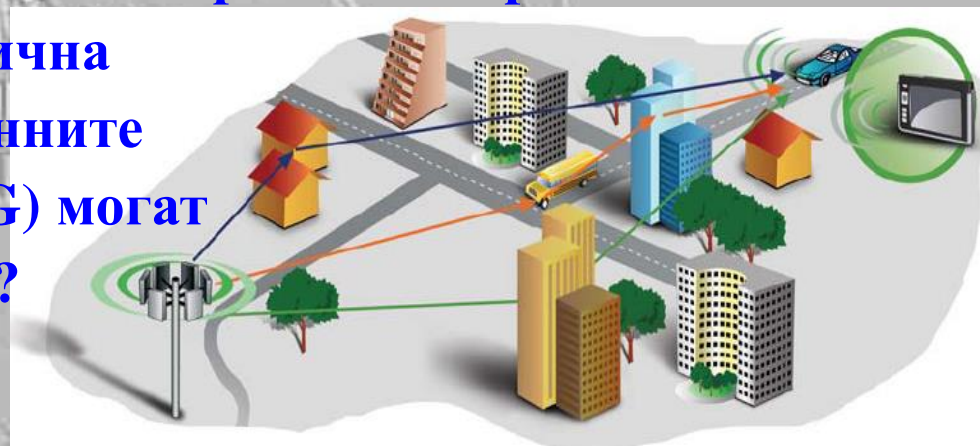
Пламен Данков



„Как работи GSM-а и Смартфона“

Теми в лекцията

- 2G GSM мрежата – най-успешната мрежа досега в целия свят?
- Какво постигна 2G GSM мрежата; какво се случи с поколенията след това: 3G GSM и новият 4G LTE? Каква е разликата?
- Какво определя скоростта при безжичните комуникации?
- Мобилен Интернет. Защо GSM и GSM+ мрежите са толкова успешни – физично обяснение за този успех.
- Клетъчни комуникации, архитектура на GSM мрежата и трафик
- Сигнали, канали, модуляции и кодиране в GSM и GSM+ мрежите или защо всичко може да бъде толкова качествено?
- Основни методи за повишаване на скоростта за предаване на данни и на капацитета от физична гледна точка или как съвременните безжични комуникации (4G/5G) могат да дадат максимума от себе си?
- Заключение





Как работи GSM мрежата?

Как работи GSM мрежата?

от Пламен И. Данков

Софийски Университет "Св. Климент Охридски", Физически факултет
email: dankov@phys.uni-sofia.bg

Статия в 3 части, публикувана в списание „Физика“ (кн. 2, 3 и 4/2009)

Кн. 2/2009: 1. Възникване на GSM (или как станаха възможни цифровите клетъчни мобилни телефони); **2.** Архитектура на GSM мрежата (или какво представляват “клетките”)

Кн. 3/2009: 3. Сигнали, канали и достъп до GSM мрежата (или защо всички могат да говорят); **4.** Функциониране на GSM мрежата (как мрежата знае къде си)

Кн. 4/2009: 5. Вреден ли е GSM? (или как да се пазим от мобилните телефони и базовите станции)

Google+ Търсене Изображения Карти YouTube Новини Gmail Диск Още ▾

Google как работи gsm мрежата

Всичко Изображения Видеоклипове Новини Карти Книги

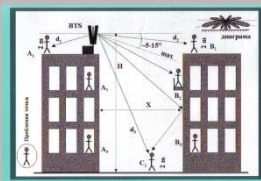
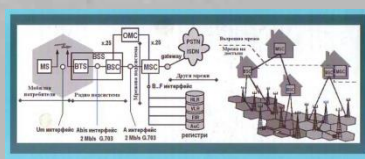
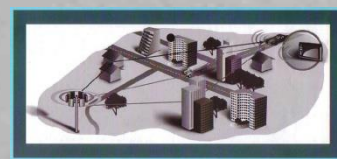
Около 77 900 резултата

Всички държави [PDF] **Как работи GSM мрежата? - Физически факултет**
Държава: България
www.phys.uni-sofia.bg/.../GSMnetwork/GSM%20network_part1.pdf ▾
чак толкова, как работи GSM-а, а дали е вреден. Най-често ме ... Функциониране на GSM мрежата (как мрежата знае къде си) и накрая, 5. Вярно ли е, че ...

Всички езици
Страници, написани на български
[PDF] **Как работи GSM мрежата?**
www.phys.uni-sofia.bg/.../GSMnetwork/GSM%20network_part2.pdf ▾
Сигнали, канали и достъп до GSM мрежата (или защо всички могат да говорят) ... в мрежата, какви честотните канали се използват и как отделните .

Независимо кога
Последния час
Последните 24 часа
Последната седмица
Последния месец
Последната година
[PDF] **Как работи GSM мрежата?**
www.phys.uni-sofia.bg/.../GSMnetwork/GSM%20network_part3.pdf ▾
апарата – Фиг. 36 в. Целта е да се покаже нагледно топлинното действие на GSM сигнала. Как се извършва подобен експеримент? Двата апарата се ...

Как работи GSM - GSM
gsm.zazz.info/?cat=223 ▾
История на gsm, как работи и какво представлява gsm. ... В момента, в който HLR регистрира свързването Ви в мрежата, се отбелязва в обхвата на коя ...



GSM (Global System for Mobile Communications; originally *Groupe Spécial Mobile*)



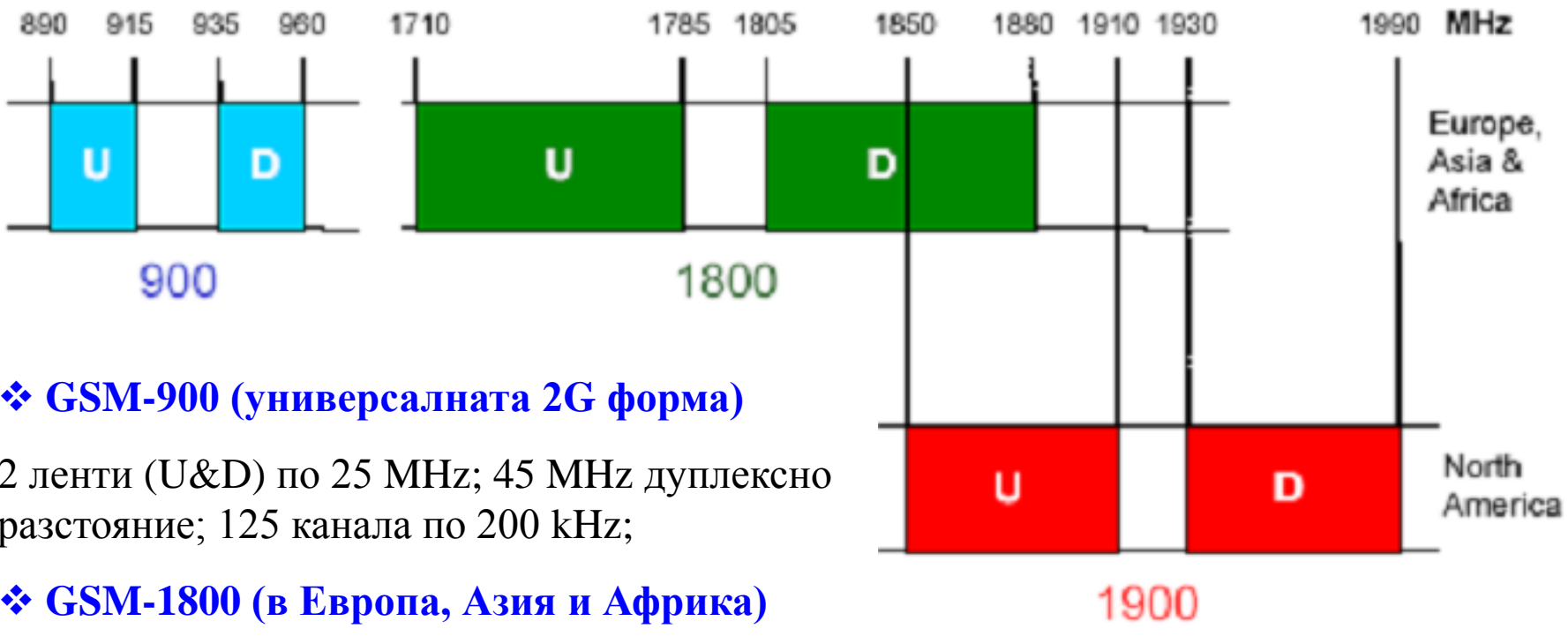
GSM е най-разпространеният в момента световен комуникационен стандарт, разработен от европейската организация ETSI (European Telecommunications Standards Institute) (ETSI) за мобилни цифрови клетъчни комуникации. Стандартът е публикуван през 1990 г., а стартира през юли 1991 г. във Финландия, т.е. точно преди 25 години.

През 2016 г. GSM мрежата с нейните 3G и 4G варианти имат над 90% (!) пазарен дял в 219 стани в целия свят и е напълно наложил се глобален комуникационен стандарт. GSM е запазена марка на GSM Association. 2G GSM стандартът е разработен да замени старият аналогов 1G стандарт с цел по-голям трафик. От него са развити и по-висши стандарти: 2.5G за пакетно предаване на данни GPRS (General Packet Radio Services) и EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution or EGPRS). 3GPP: 3G UMTS стандарт за по-голяма скорост на предаване на данни и следващият 4G стандарт: LTE и LTE Advanced със скорост над 100 MB/s (над 1 GB/s)



Честотни ленти и канали за GSM мрежата

GSM-900; GSM-1800; GSM-1900



❖ **GSM-900 (универсалната 2G форма)**

2 ленти (U&D) по 25 MHz; 45 MHz дуплексно разстояние; 125 канала по 200 kHz;

❖ **GSM-1800 (в Европа, Азия и Африка)**

2 ленти (U&D) по 75 MHz; 95 MHz дуплексно разстояние; 375 канала по 200 kHz;

❖ **GSM-1900 (в Северна Америка)**

2 ленти (U&D) по 60 MHz; 80 MHz дуплексно разстояние; 300 канала по 200 kHz;

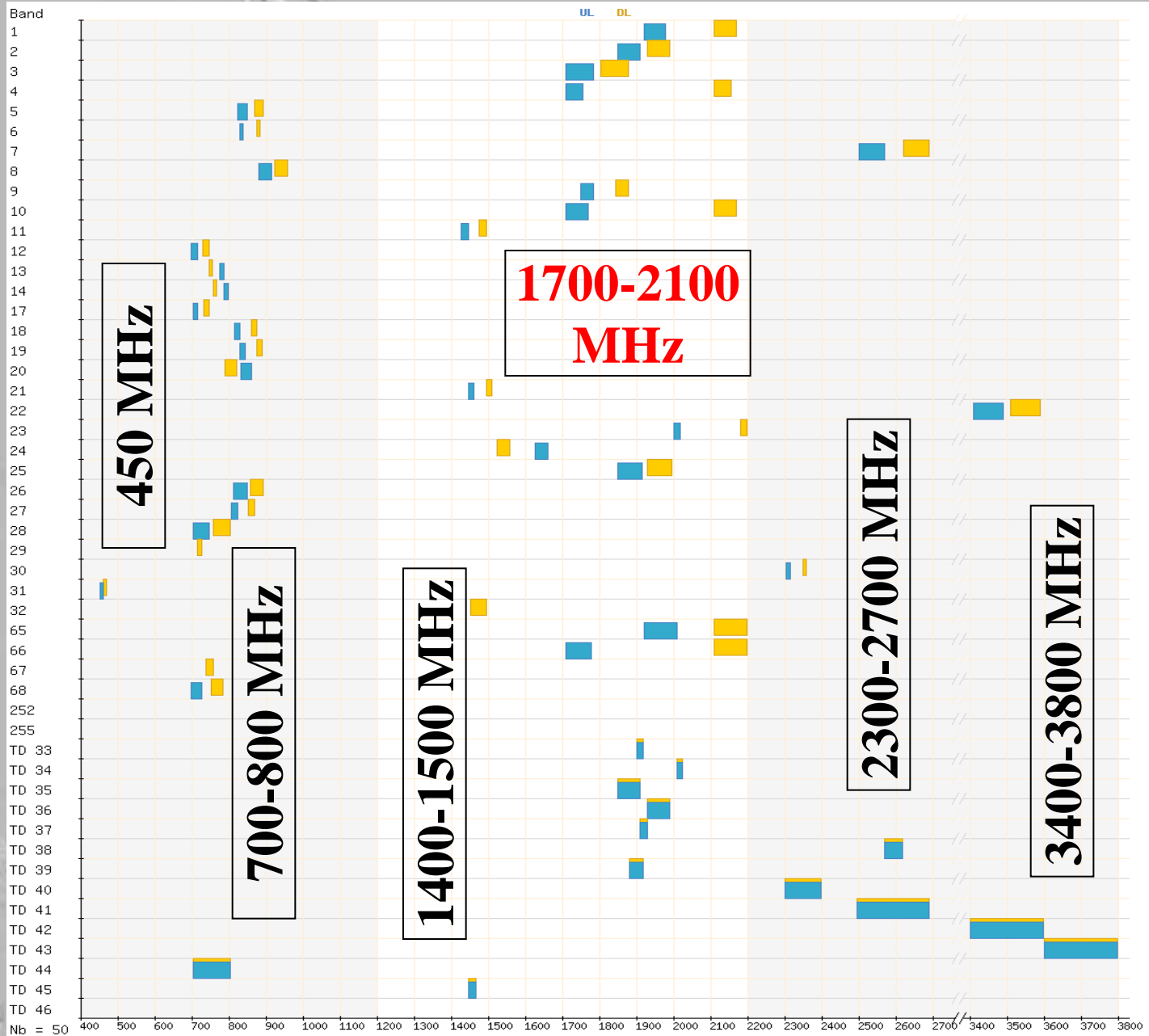
Uplink канал: MS ⇒ BS
Downlink канал: BS ⇒ MS





Честотни ленти и канали за 4G мрежата

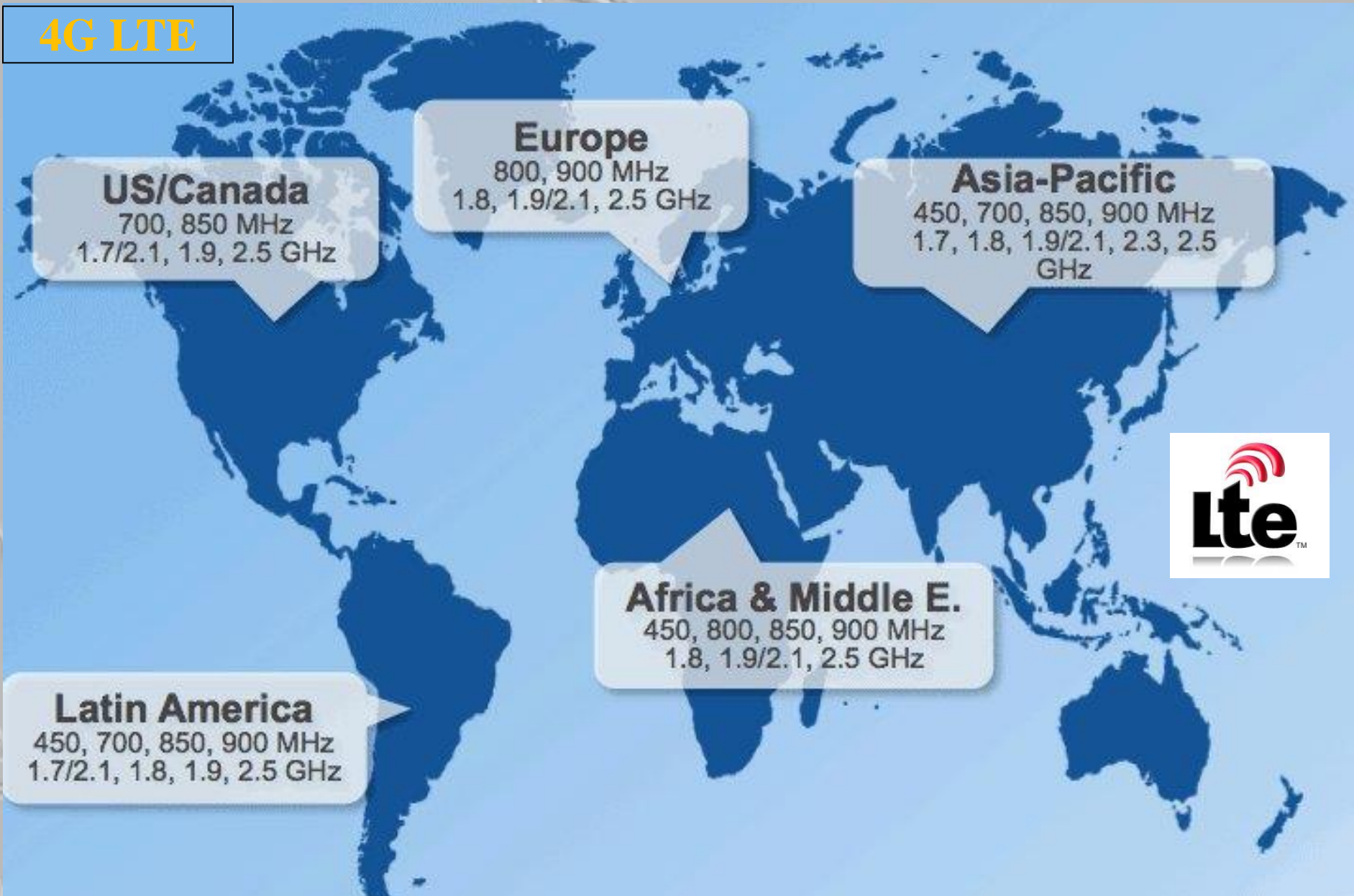
4G LTE





Честотни обхвати за 4G LTE мрежата в света

4G LTE



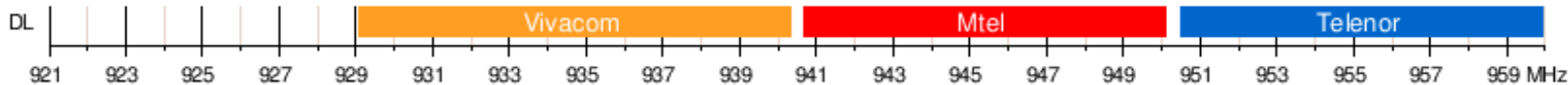
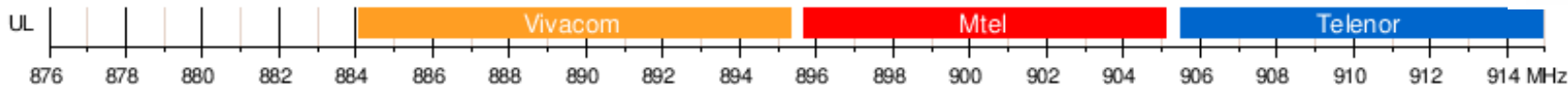


Честотни ленти за 4G LTE мрежа в България

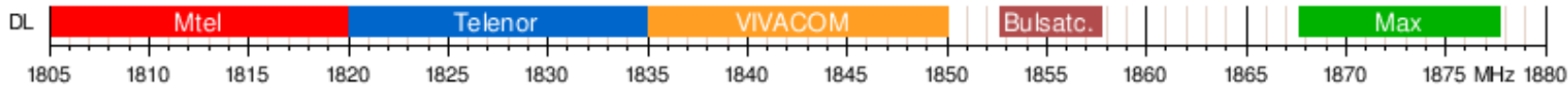
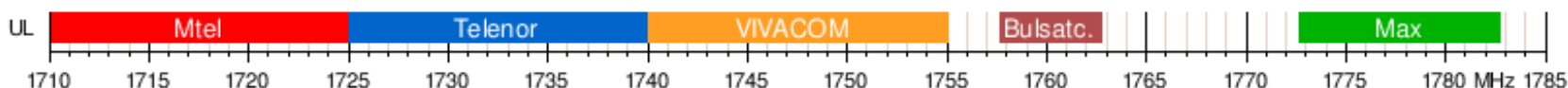


FDD

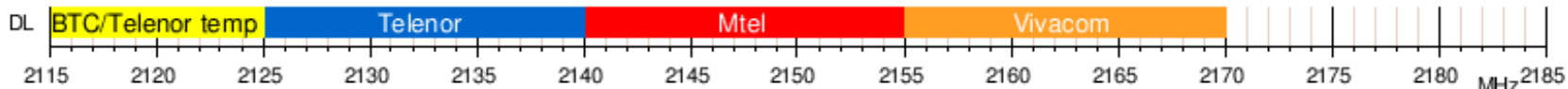
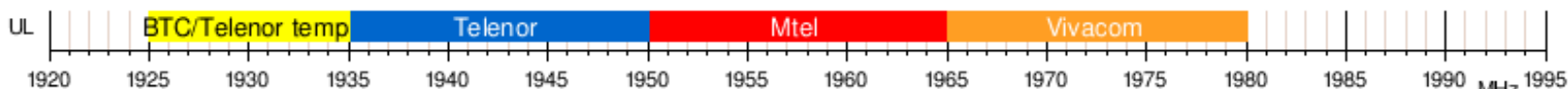
900 MHz



1800 MHz



2100 MHz



TDD

2GHz

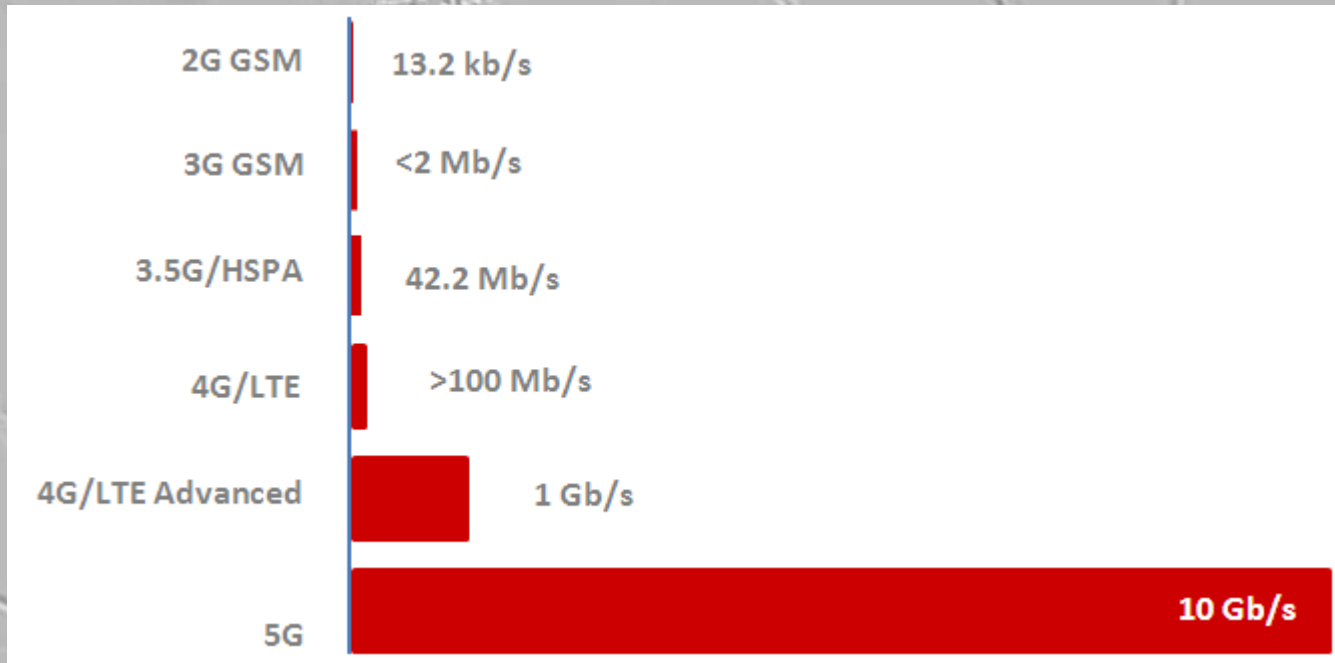
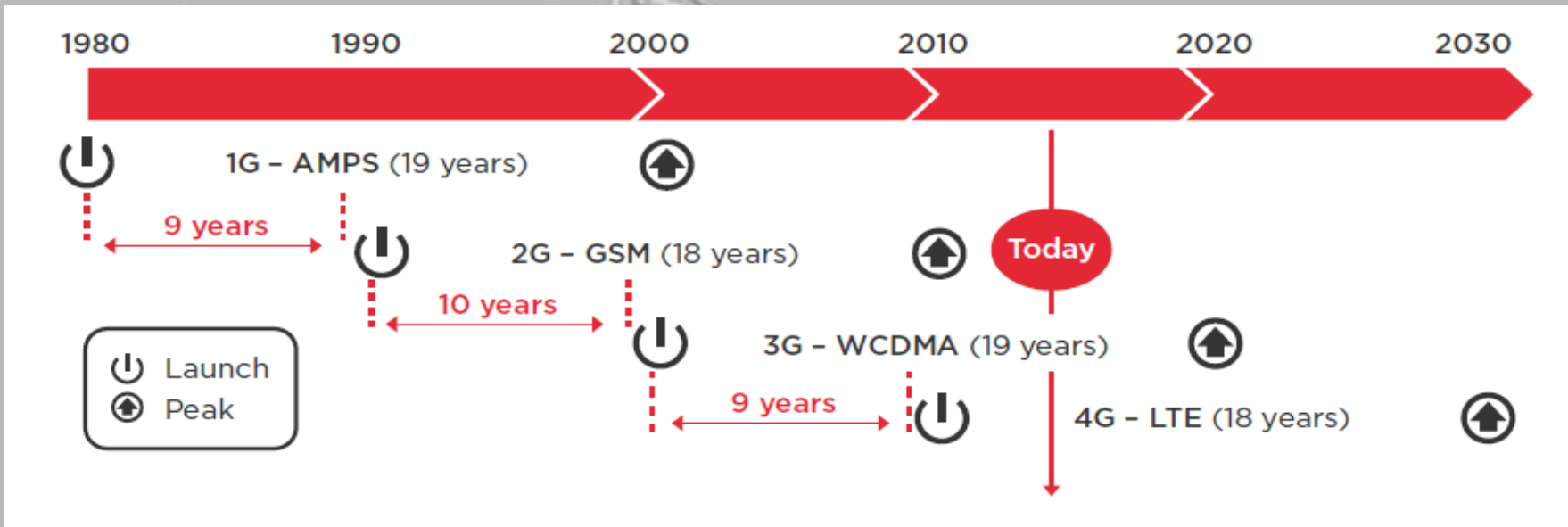


Генерации в мобилните мрежи

1G ⇒ 2G ⇒ 3G ⇒ 4G ⇒ 5G

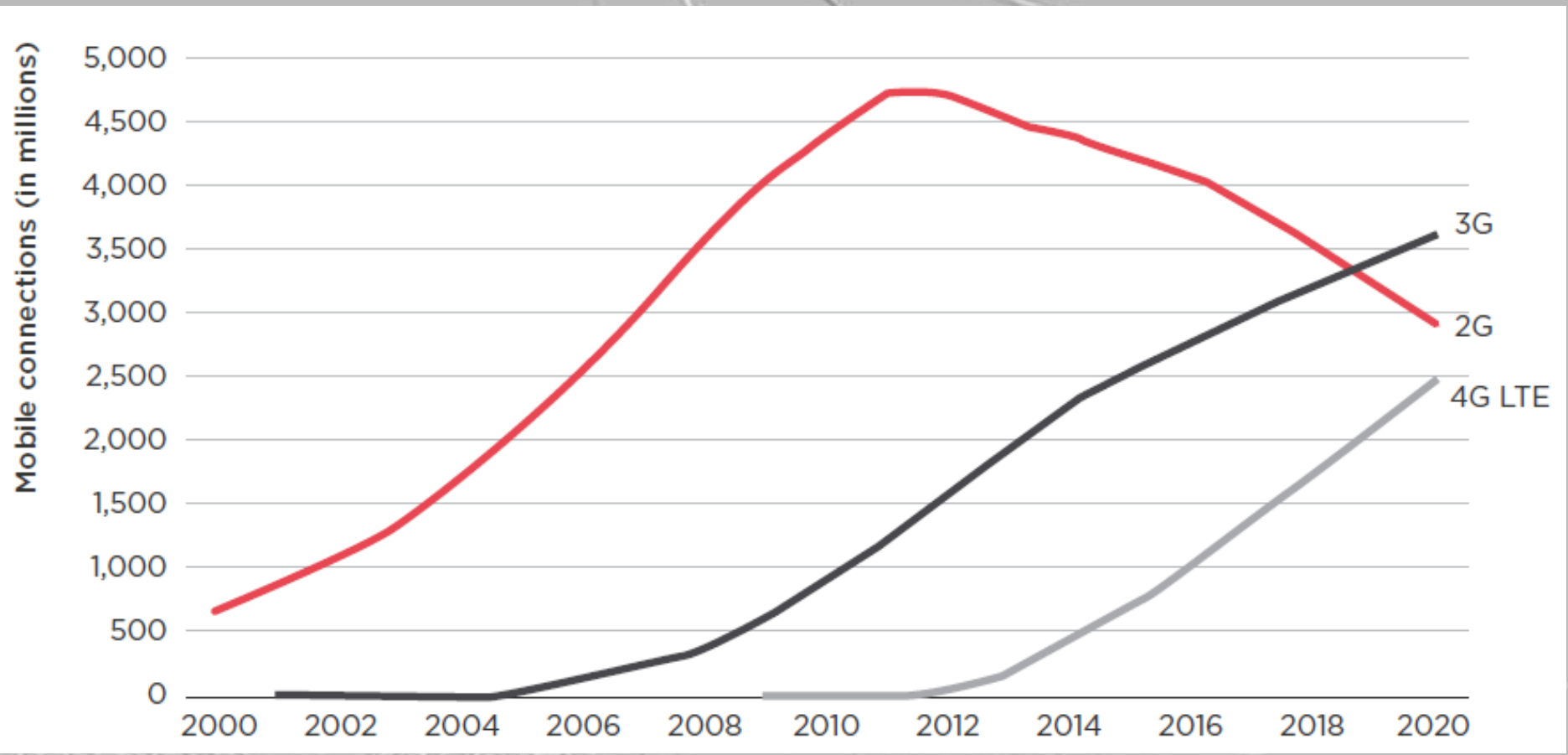
Поколени	Основни услуги в мрежата	Ключови свойства и предимства	Слабости (спрямо следващото поколение)
0G	Аналогови телефонни разговори (AM)	Телефони в коли (неклетъчни мрежи)	Малко потребители, ограничена мобилност, лошо качество
1G	Аналогови телефонни разговори (FM)	Истинска мобилност (клетъчни мрежи)	Неефективно използване на спектъра, незащитеност, несигурност на връзките
2G	Цифрови телефонни разговори и съобщения	Сигурност, защитеност, масово усвояване в целия свят; голям капацитет	Ограничена скорост (13.2 kb/s реч, 9.6 kb/s данни; трудно поддържа Интернет/е-мейл
3G	Телефонни разговори, съобщения, данни	По-добра Интернет връзка и много услуги (до 2 Mb/s)	Провал на Wireless Application Protocol (WAP) за Интернет
3.5G	Разговори, съобщения, широколентови данни	Широколентов Интернет, много приложения	Наследена специфична архитектура и протоколи
4G LTE	Всички IP-базирани услуги (+ реч, данни)	Много по-бърз Интернет, ниска латентност (< 10 ms) скорост над 10 Mb/s; HDTV; online игри	
5G	Ново поколение безжични мрежи (част от 4-та индустриална революция, 2020)	Скорост 1-10 Gb/s за до 10 едновременни потребители, бърз отклик (под 1 ms); висока сигнална ефективност, подобро покритие на офис и градски зони; 10-год. батерии без презареждане; 100-1000 едновр. връзки, хиляди сензорни връзки	

1G ⇒ 2G ⇒ 3G ⇒ 4G ⇒ 5G (във времето)





Потребители в целия свят в GSM мрежите (2G; 3G и 4G LTE)



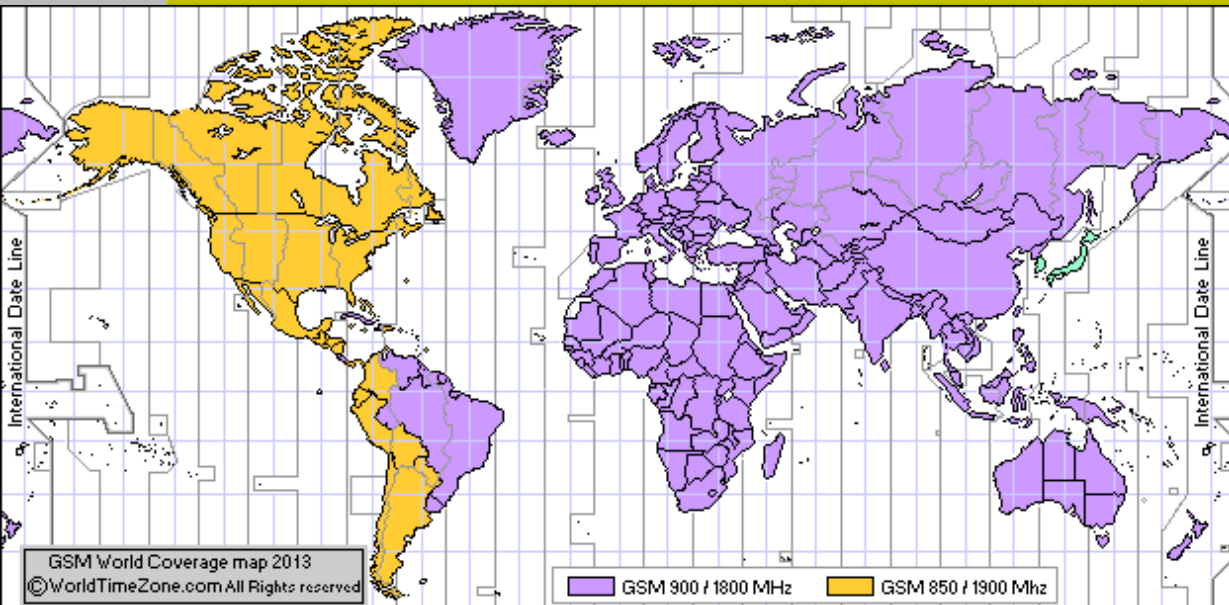


Световна карта на разпространението на GSM стандарта в целия свят (2015 г.)



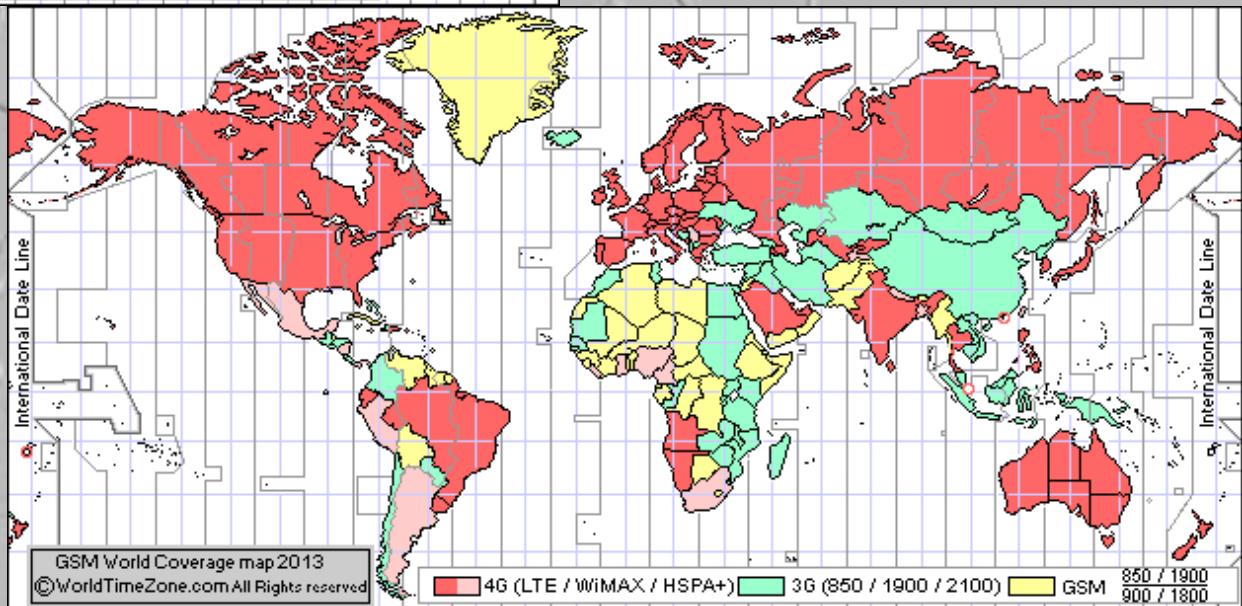


Световна карта на разпространението на варианти на GSM в целия свят (2013 г.)



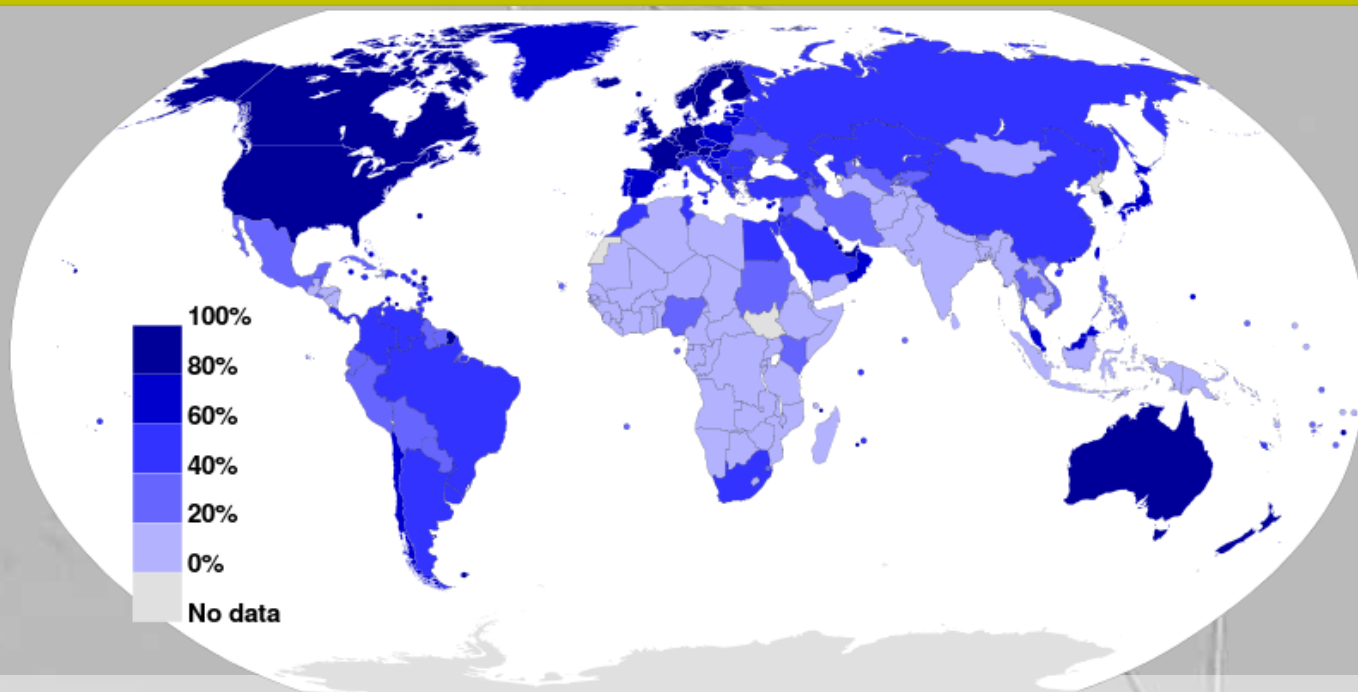
Разпространение на 2G формите на GSM: GSM900/1800 (Европа, Азия, Африка, Австралия) и GSM850/1900 (Северна и част от Южна Америка)

Разпространение на новите поколение на GSM:
 2G: GSM900/1800 и GSM850/1900
 3G/UMTS: 850/1900/2100
 4G: LTE/ WiMAX





Световна карта на разпространението на Интернет сред населението в целия свят (2015)



До 2003 г. доставката на Интернет става главно по жични мрежи (Intranet);
От 2003 г. безжичният Интернет (чрез Wi-Fi мрежи) надхвърля жичния;
От 2014 г. насам най-голям е трафикът на мобилен Интернет (главно чрез устройствата в GSM мрежата). След 2020 г. се очаква реална поява на Giga-bit Wireless (1-10 Gb/s), осъществен от базови станции с пряка видимост на носещи честоти ~десетки/стотици GHz (вкл. THz обхват). Очаква се част от бъдещият интернет да е от космоса (IoS, Интернет чрез спътници). Очаква се Интернет в офиса да се осъществява чрез оптични Li-Fi мрежи от няколко m

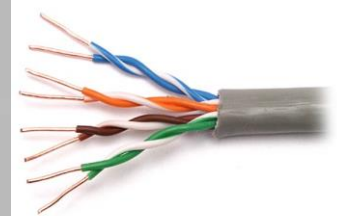
С какви физически носители се доставя Интернет за потребители? (изкл. Mobile/WiFi Wireless)

- Чрез жична връзка:

Усукана двойка: Скорост – (1950 – 110 b/s; 1990 – 64 kb/s.

Сега: при сим. връзка SDSL ~150 b/s; асиметрична връзка ADSL: до 4 Mb/s; 2015 (FCC) – “Basic Broadband”: 25 Mb/s downstream; 3 Mb/s upstream

Коаксиален кабел: 250 Mb/s downstream; 20 Mb/s upstream



- Чрез оптична връзка (фибро-оптика)

Единични влакна: до 40 km, с повторители – 1.7 Gb/s; до 50-100 km, с усилватели – 25 Gb/s; до 20 000 km, солитонно влакно – 50 Gb/s; Многомодово влакно + WDM мулти-плексиране: типично ~2-3 Tb/s; постижения: за 50 до 200 km – от 15 до 1000 Tb/s (зависи от дисперсията)



- Чрез кабелите на енергийната мрежа (VPL – до 2.7 Mb/s)

- Чрез сателитна връзка (Скорост от 2 kb/s до 1 Gb/s downstream и от 2 kb/s до 10 Mbit/s upstream; HTS)



Gigabit Wireless – възможно ли е да се постигне скорост 1-10 Gb/s при безжично предаване на данни и висок капацитет?



За да се постигне висока скорост при висок капацитет в безжичните мрежи са необходими специални мерки и технологии, които са разгледани в лекцията:

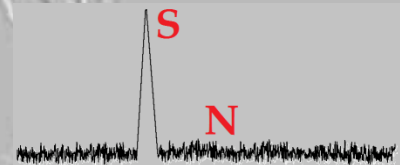
- Клетъчна мрежа; преизползване на честотата. Интензивни методи за увеличаване на капацитета.
- Хендовер.
- Ефективност на покритието.
- Ефективни методи за достъп на много потребители до канала.
- Кодиране на речта, канала и интерливинг.
- Модулации в безжичните комуникации.
- Ортогонални канали.
- Адаптивни модулации.
- Влияние на различни физични процеси: затихване, отражение, дифракция, разсейване, засенчване, Доплеров ефект и др.
- Многолъчево разпространение; статистически ефекти.
- MIMO технологии.
- Умни антени.
- Спектрална ефективност.

Защо GSM+ стандартите са толкова успешни? ⇒

Какво ограничава скоростта на предаване на данни при безжичните връзки?

Съществува теорема на Shannon–Hartley за капацитета на комуникационен канал с шум, която свързва максималната скорост на предаване на данни C , b/s с честотната лента на канала BW и отношението „сигнал-шум“ S/N :

$$C = BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$



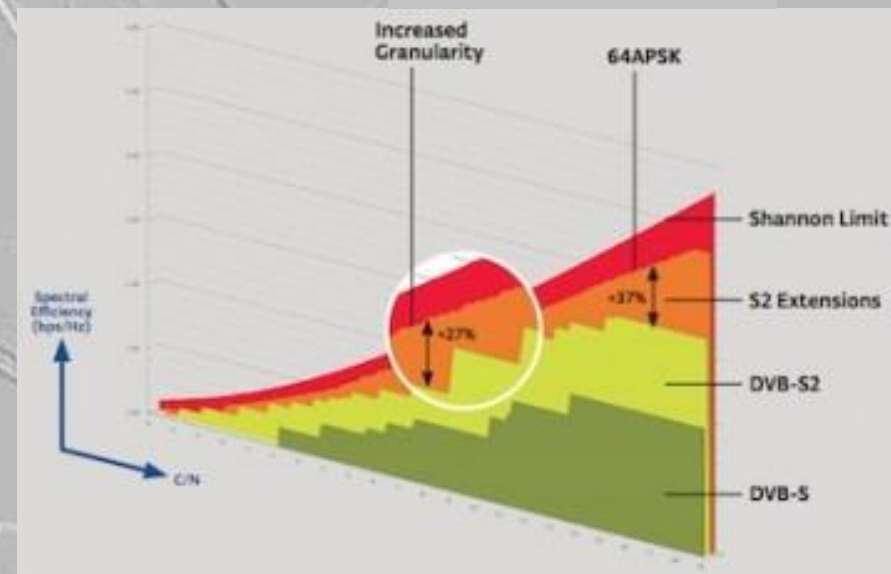
Реалната битова скорост $R = 1/t_B$ в канала (t_B е продължителността на 1 бит) винаги е

$$R < C$$

и при тези условия съществува система от кодове, така че чрез кодиране информацията да се предава с произволно малка вероятност за грешка.

Обратно, ако $R > C$, има различна от нула вероятност за предаване на информацията, но винаги с грешки.

Много реални системи се създават да работят близо до границата на Shannon.



Пример: нова широколентова сателитна технология **DVB S2** за разпръскване на цифров видео/TV сигнал с висока ефективност на използване на спектъра.

Ефективност на използване на спектъра

Важен параметър за характеризиране на безжичното предаване на информация е ефективността на използване на спектъра (spectral efficiency, bits/s/Hz):

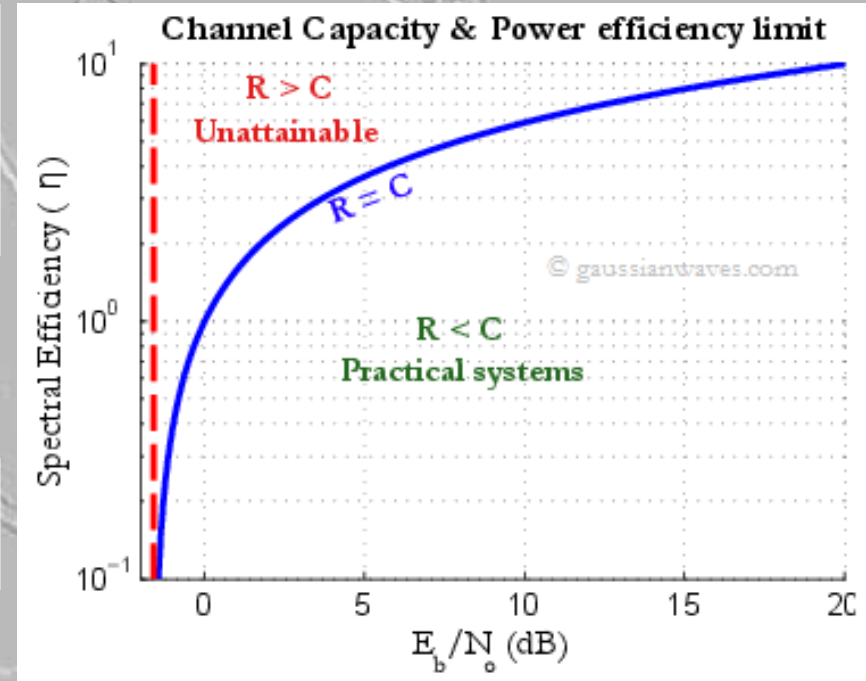
$$\eta = \frac{C}{BW}, \text{ bits/s/Hz}$$

Спектралната ефективност η определя и какво трябва да бъде отношението на средната енергия E_B за пренасяне в канала на 1 бит към спектралния шум N_0 : (вж. Фиг. \Rightarrow)

$$\frac{E_B}{N_0} = \frac{2^\eta - 1}{\eta}$$

Асимптотата (прекъснатата червена линия) се отнася за $\lim(E_B/N_0)$ при $BW \rightarrow \infty$. Стойността е

$$\frac{E_B}{N_0} = \ln(2) = 0.6931 = 1.59 \text{ dB}$$

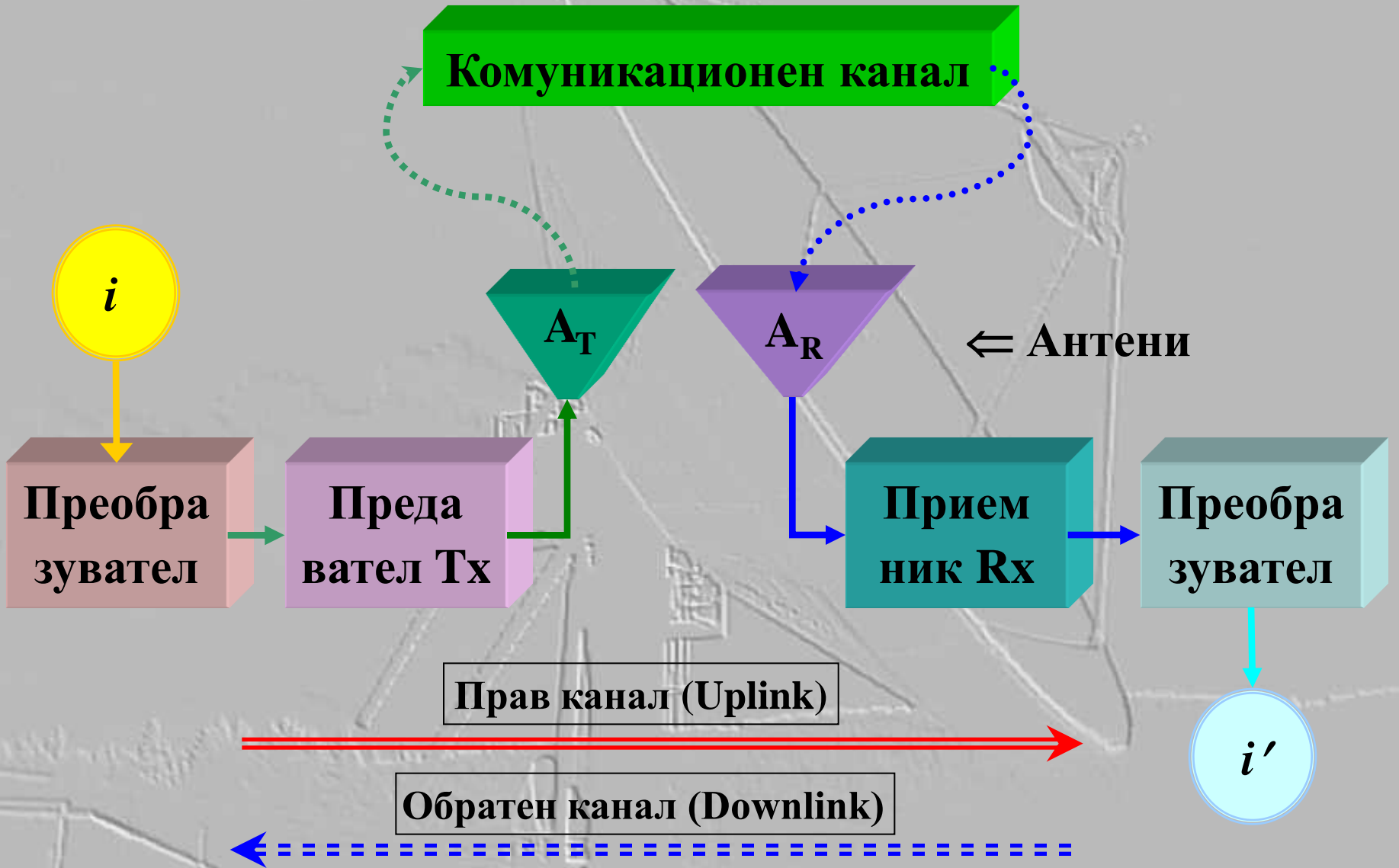


Това е т. нар. Граница на Shannon за *енергийната ефективност* при безжично предаване на информация по комуникационен канал с шум в безкрайна честотна лента.

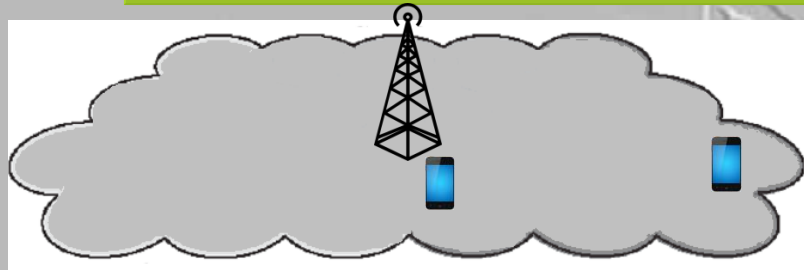


Как работят GSM и GSM+ мрежите, за да са толкова успешни?

Блокова схема на комуникационен канал

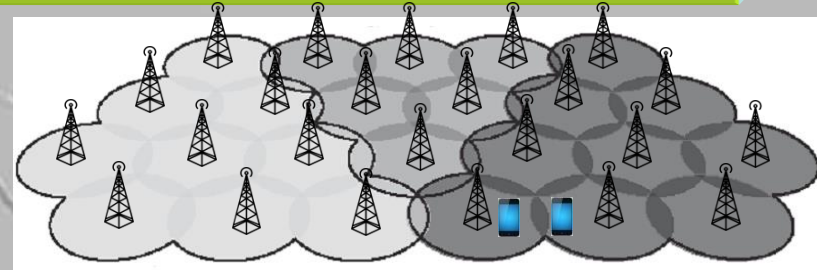


Клетъчни мрежи



Неклетъчни мрежи

Покриването на дадена географска област с достатъчно високо ниво на излъчен сигнал винаги е било проблем при мобилните комуникации. При неклетъчни мрежи има два основни проблема. Първият е, че трябва да се покрие много голяма площ (с диаметър до десетки km). Понеже нивото пада с разстоянието както $1/d^2$ (за градски условия дори $\sim 1/d^{(3-5)}$), мощността на предавателя трябва да е голяма; появява се ефект “близо-далече” (близките станции получават много силен сигнал, далечните – много слаб. За да се избегне интерференцията, в такива системи даден честотен канал се използва *само веднъж* в цялата зона. Това е вторият съществен проблем – мрежата има много нисък капацитет.



Клетъчни мрежи

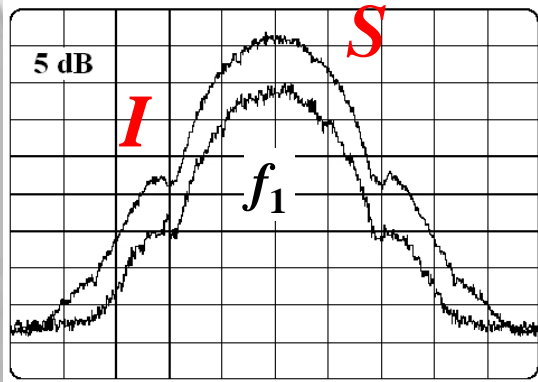
При клетъчните системи, поради архитектурата на мрежата и начина на използване на спектъра, и двата проблема се решават успешно:

- 1) Клетката е част от областта на покритие с относително малки размери (~ 100 m до 35-40 km). Използват се по-ниски нива на излъчвана мощност от базовите станции и така съществено се намалява вероятността за интерференция между потребители с еднакви и близки честоти.
- 2) Така се появява нова възможност, която в неклетъчните системи е недопустима – в рамките на дадената област да се прилага многократно използване на еднакви честотни канали в различни клетки, които се намират на определено разстояние една от друга. Това разстояние е различно за различните типове мрежи и от зависи от размера на клетката и излъчената мощност

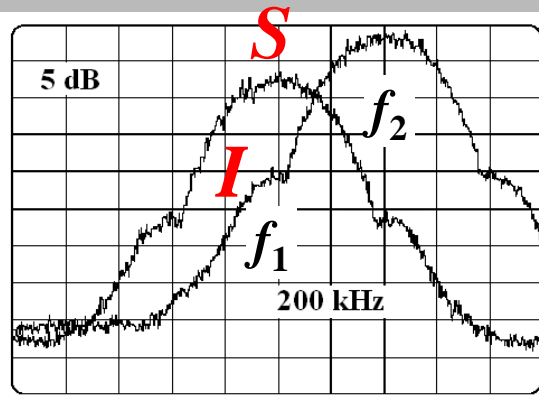
Преизползване на честотата

Показан е нагледен пример за преизползване на честотни канали в достатъчно отдалечени клетки, наречени “съклетки”, между които интерференцията на сигнали е приемлива ($S/I \sim 18-20$ dB в аналогови мрежи и $S/I \sim 9-10$ dB – в цифрови мрежи – GSM).

Съклетъчни нива

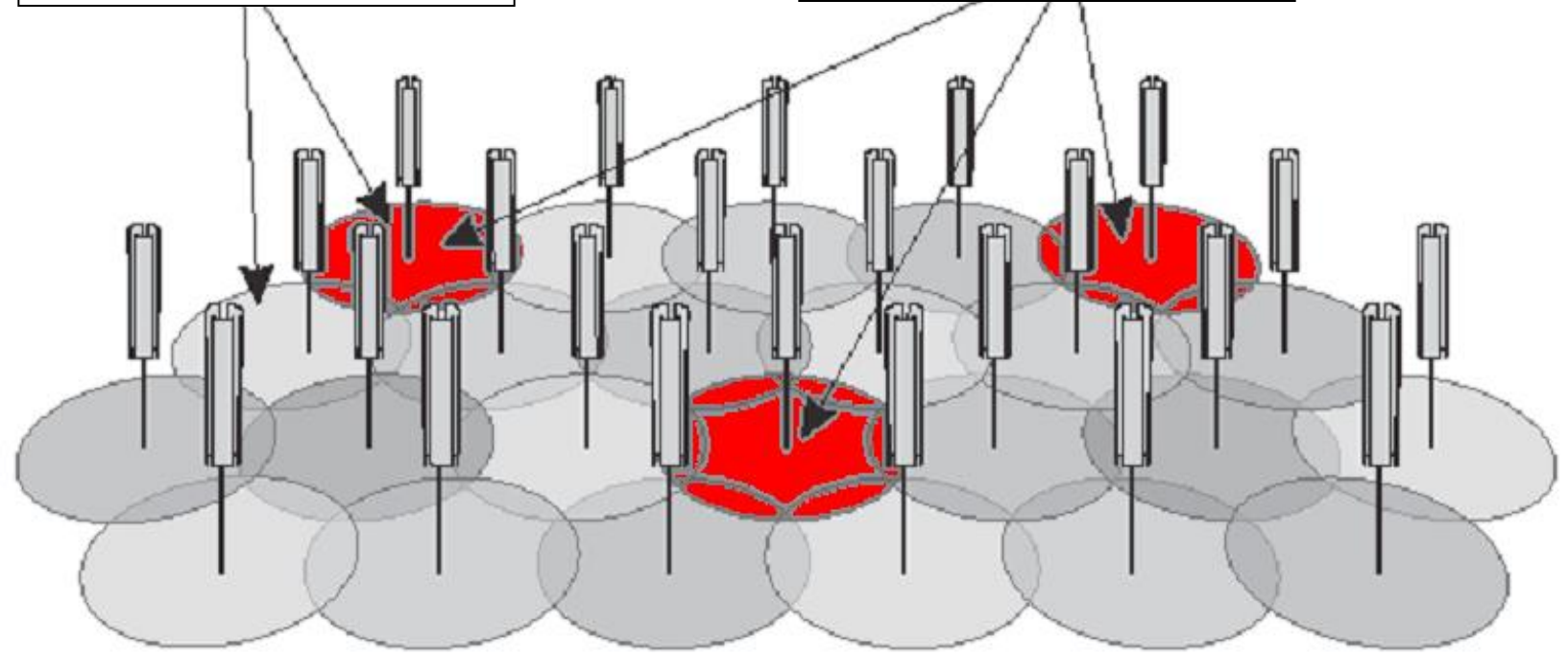


Нива от съседни клетки



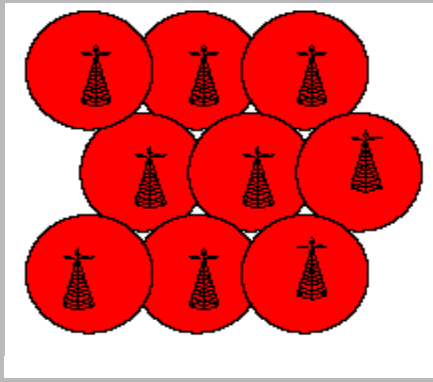
Съседни клетки

Съклетки

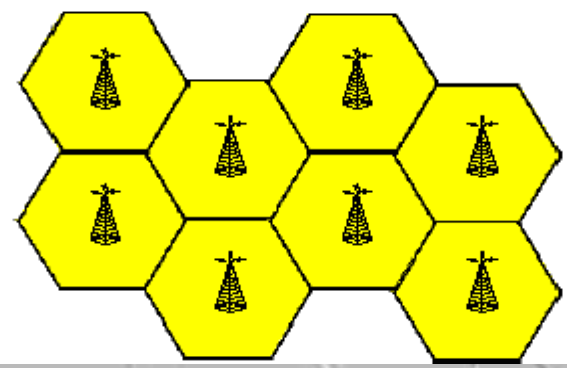




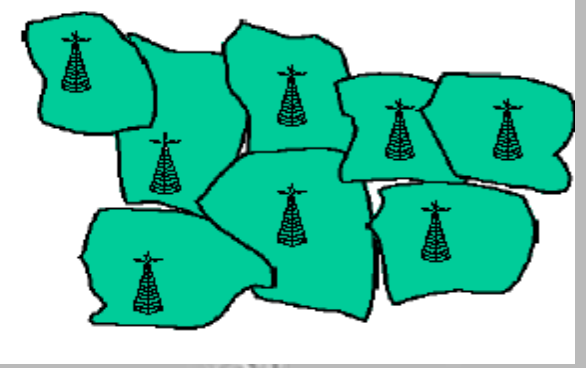
Модели на клетки



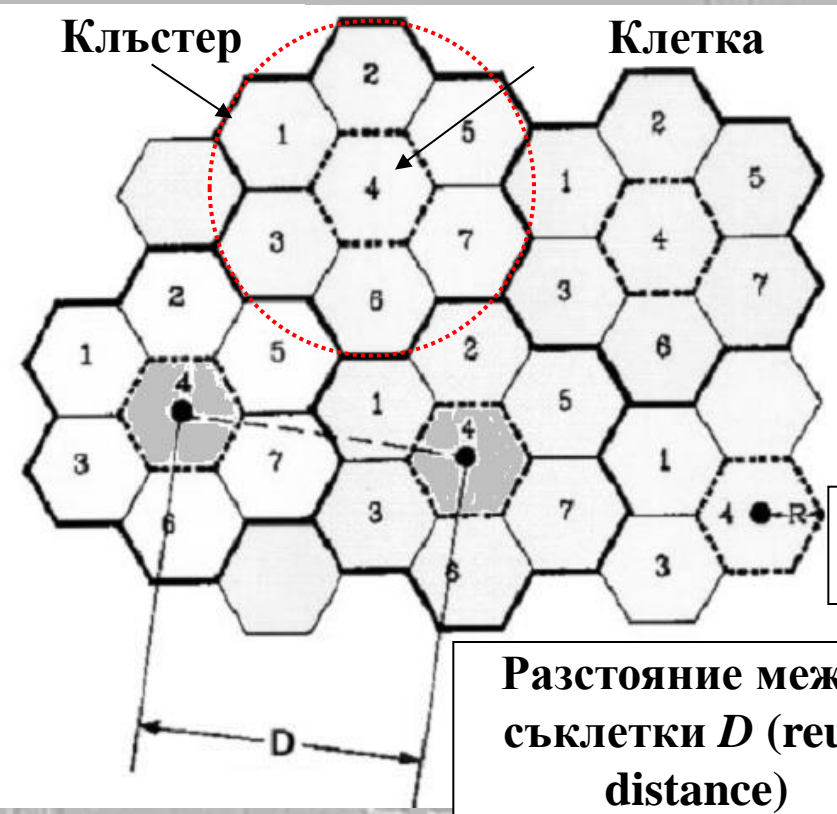
Теоретично покритие



Модел на клетките



Реално покритие



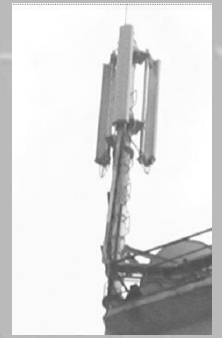
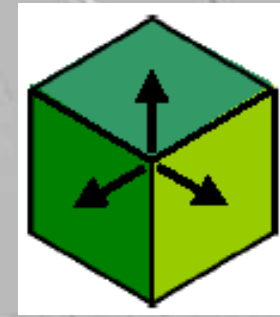
Радиус на една клетка R

Разстояние между съклетки D (reuse distance)

Клъстери от N съседни клетки с еднакъв радиус R ; D – разстоянието между “съклетките”.

Клъстерите могат да се повтарят мащабирано с различни радиуси на клетката, като отношението D/R се запазва.

Оптималното отношение е: $D/R = \sqrt{3N} \approx 4.6$



Оценка на трафика в клетъчна мрежа

Нека A е общият брой абонати в дадената географска област, а ширината на канала е $F_{ch} = 200$ kHz. Тогава броят на активни абонати A_a , които едновременно ползват мрежата е

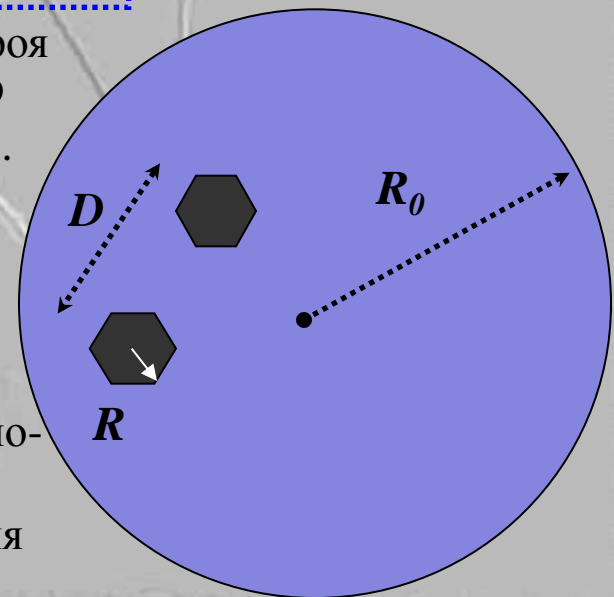
$$A_a = L_{cell} \cdot I \cdot A_{ch} \cong 1.21 I \cdot A_{ch} \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 = 3.63 I \cdot A_{ch} \cdot N \left(\frac{R_0}{D} \right)^2$$

Вижда се, че броят на активните абонати A_a расте, когато расте броят на каналите I в една клетка, броят на клетките N в един клъстер, броят абонати A_{ch} , които ползват един канал и когато намалява радиуса R на клетките (или разстоянието D между съ-клетките). Спектралната ефективност е

$$\eta_s = \frac{R A_a}{F_{band}} = 1.21 \frac{R R_0^2}{F_{ch} N R^2} \cong 3.63 \frac{R}{F_{ch}} \left(\frac{R_0}{D} \right)^2$$

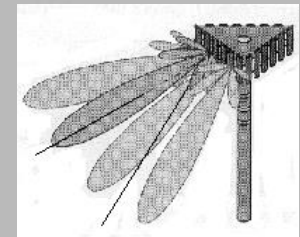
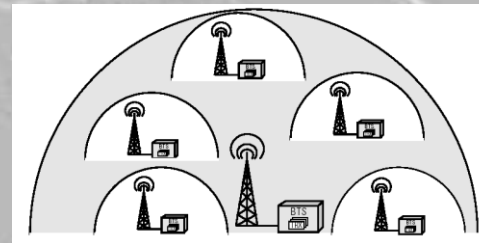
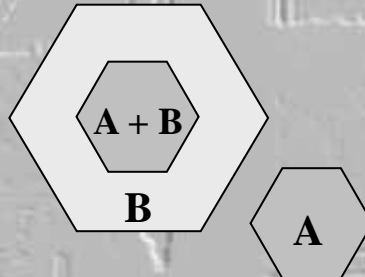
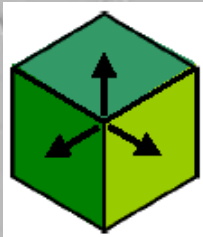
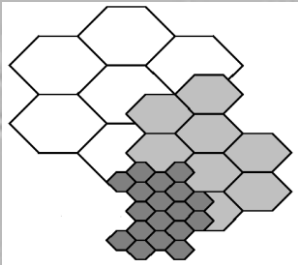
Този параметър не зависи от броя на каналите в една клетка и от броя на клетките в един клъстер и расте с намаляване на разстоянието D между центровете на съклетките ($R \sim 13.2$ kb/s в 2G GSM мрежата).

Пример: Нека да разгледаме град с население от 3 млн. жители, 1/3 от които са абонати на даден оператор, т. е. $A \sim 1000000$ абонати на дадена мрежа. Нека $R_0 \sim 25$ km. Избираме клъстер с $N = 7$ клетки със среден радиус $R = 1$ km и средно разстояние между съклетките ~ 4.6 km. При тези условия в 2G мрежата могат да се обслужват едновременно $A_a \sim 6000$ активни едновременни абонати, като броят на клетките е $L_{cell} \sim 760$ с $I \sim 10-15$ канала на клетка и по 8 потребителя в канал. Ефективността на използване на спектъра е ~ 7.1 bits/s/Hz





- ✓ Добавяне на нови честотни канали в клетките, ако са налични (при старта на мрежата).
- ✓ Заимстване на свободни честотни канали от съседни ненатоварени клетки (динамично разделяне на каналите). Спазва се условието за допустима съ-клетъчна интерференция.
- ✓ Намаляване на броя на клетките в клъстера (но се увеличава интерференцията).
- ✓ Мащабно (модулно) делене на клетките. Редукцията на радиуса на клетките с коефициент K води до увеличаване на броя на BS с K^2 . Този метод се използва след началния период, когато има по-висок трафик, повече финансови средства и увеличаването на броя на BS е икономически изгодно. Намаляването на радиуса на клетката се придружава със задължително намаляване на излъчваната мощност на BS, за да се избегне съ-клетъчната интерференция.
- ✓ Секторизация на клетка. Това е по-евтина и много изгодна алтернатива на мащабното делене; секторите на клетката се разглеждат като отделни клетки, но се обслужват от една BS
- ✓ Облицоване на клетки. Във вътрешността се използват честотни канали, които се използват и в по-близки клетки (на разстояние, по-малко от оптималното)
- ✓ Използване на клетки-чадър за по-бързи потребители. Тя е по-голяма и се използва за обслужване на по-бързите потребители, за да се намали сигнализацията на handover-a
- ✓ Използване на клетки с умни антени. Това е много ефективен метод (увеличаване на трафика от 3 до 5 пъти), но интелигентността на системата е много висока и тя е доста по-сложна.



Пример: максимален трафик в секторни клетки



Пример: Нека M_{cell} е максималният трафик на дадена единична клетка в една клетъчна система. В много-клетъчните системи с различни методи на достъп формулата за M се модифицира с допълнителни коефициенти, а именно:

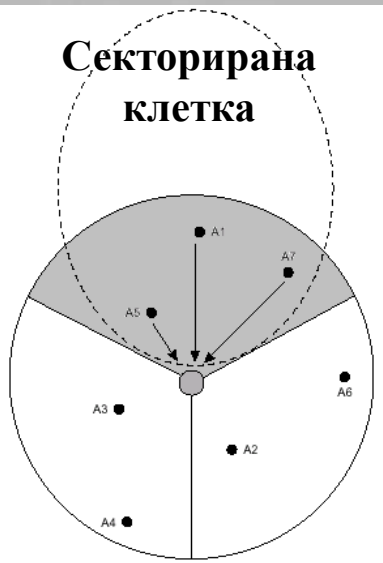
$$M = \frac{BW}{R_b} = M_{cell} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \Lambda \left(\frac{1}{\upsilon} \right) = \frac{P_r / N_0}{R_b (E_b / N_0)_{req.}} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \Lambda \left(\frac{1}{\upsilon} \right)$$

На първо място тук се появява множител, свързан с фактор на натоварването $\eta \in (0 - 1)$ на клетката. Това е частта на потребители в дадената клетка, идващи от съседни натоварени клетки. Типично тази стойност е $\eta \sim 0.5$. Величината $F = 1/(1+\eta)$ се нарича фактор на преизползване на честотата (frequency reusing factor); за $\eta = 0.5$ $F = 0.67$. Следователно, нарастването на фактора на натовареност води до намаляване на капацитета. Друг фактор е коефициентът на усилване от секторизация на клетката Λ , покривана от дадена базова станция. Причината е следната:

Ако дадена антена е сектор от цяла антена, той покрива само част от клетката – това намалява интерференцията с потребители от другите части и така се появява еквивалентен ефект на “усилване”, който компенсира ефекта на натоварване. За секторна антена $3 \times 120^\circ$ $\Lambda \sim 2.5$; за $6 \times 60^\circ$ $\Lambda \sim 5$. Последният фактор е свързан с активността на речта $\upsilon \sim 0.4 - 0.5$ (voice activity factor). Това се определя от работата на VAD на вокодера на речта и е много ефективен фактор за увеличаване на капацитета. Така, при $F \sim 0.67$, $\Lambda \sim 2.5$ и $\upsilon \sim 0.5$ се получава:

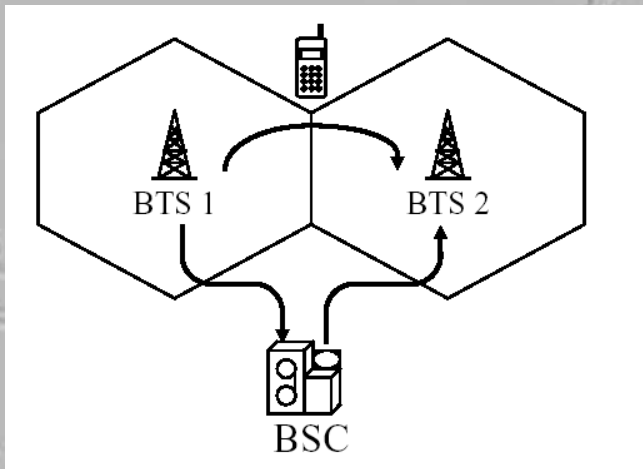
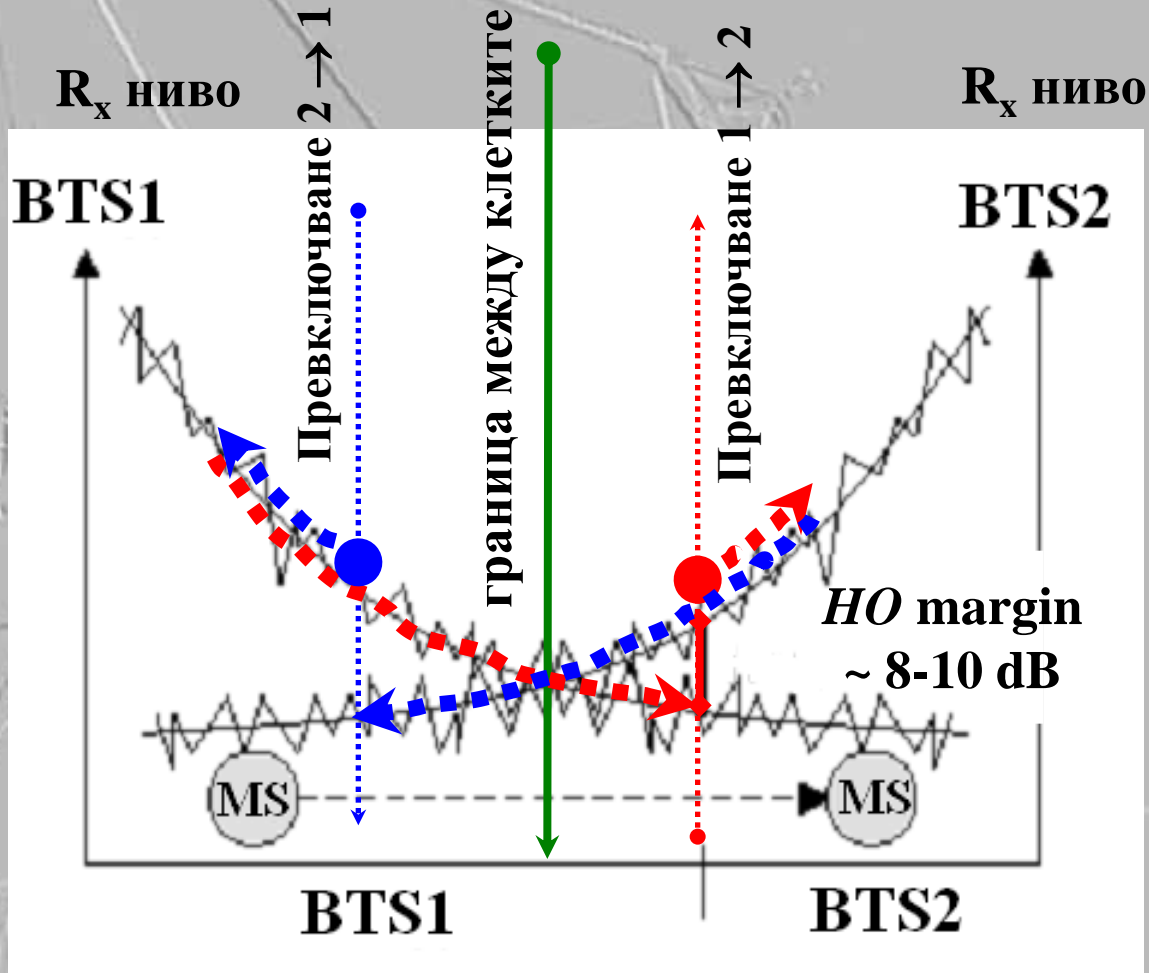
$$M \cong 3.35 M_{cell}$$

Секторизирана
клетка



Преминаване от клетка в клетка при разговор – “Handover”

Истинската “мобилност” при клетъчните мобилни системи по време на разговор се постига чрез “хендовър” (handover, HO) при преминаване от клетка в клетка. Този процес се реализира от контролера на базовите станции BSC и се подпомага от MS. Тук е по-казан „handover“ с *хистерезис* на превключването от една към друга BS. Типичният интервал *HO margin* на “handover”-а е ~8-10 dB.

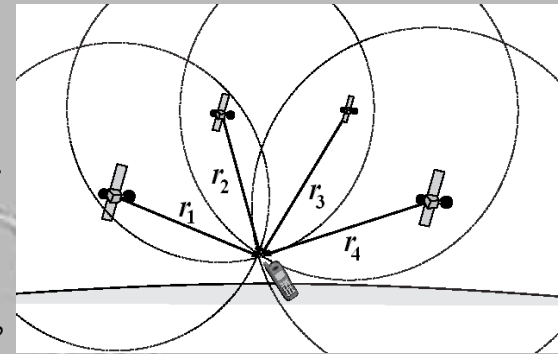


Пример за хистерезис при реализация на “handover”-а

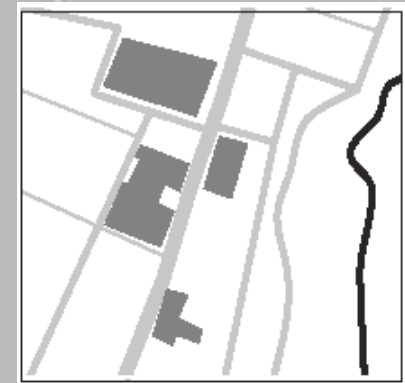


Локализация и позициониране в комуникациите

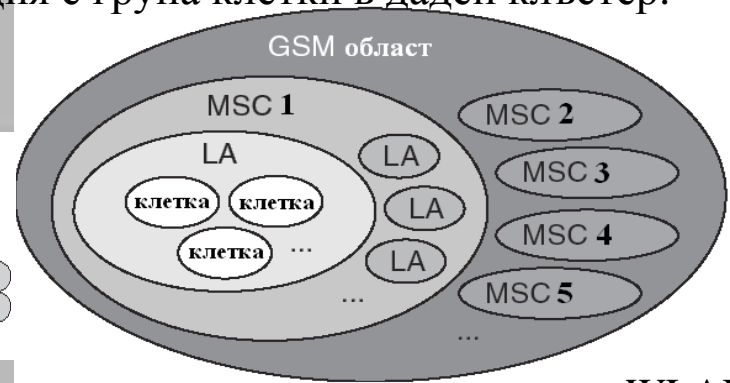
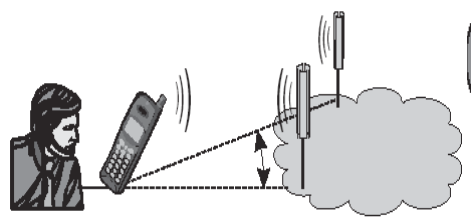
В съвременните комуникации изключително важен въпрос е локализацията на мобилния потребител. Тя има два аспекта: физичен, т. е. позиционирането (напр. в дадена клетка в клетъчните мрежи), или “виртуален”, т. е. в кибер-пространството, напр. WEB адрес или chat-room в Internet). За безжичните комуникации по-важен е физичният. Различават 3 категории позициониране. Най-употребяваното в реалния живот от хората е *описателното* (държава, град, улица, номер...), и се използва от пощите. Другото е *пространственото*, т.е. координатното позициониране на обекта (x, y, z; t). Днес най-използваното on-line позициониране е чрез GPS спътници. Третата категория е най-важна за комуникациите – това е локализация в мрежа. Базира се на известната архитектура на дадена мрежа, състояща се от множество йерархични подмрежи. Мрежовата локализация означава позициониране чрез мрежова адресация (маршрутизиране, идентификационни номера и др. (напр. IP адреса е мрежова локализация в Internet). В мобилните мрежи (GSM, UMTS) локализацията се свързва с базовата станция, където се намира мобилния потребител (по метода Cell-ID). Областта на локализация е група клетки в даден клъстер.



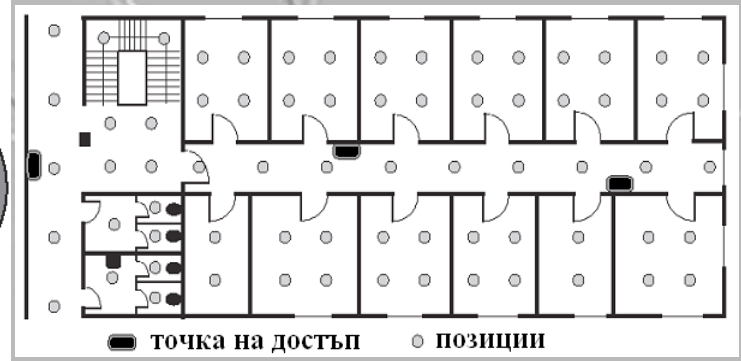
Позициониране чрез GPS



Позициониране по карта

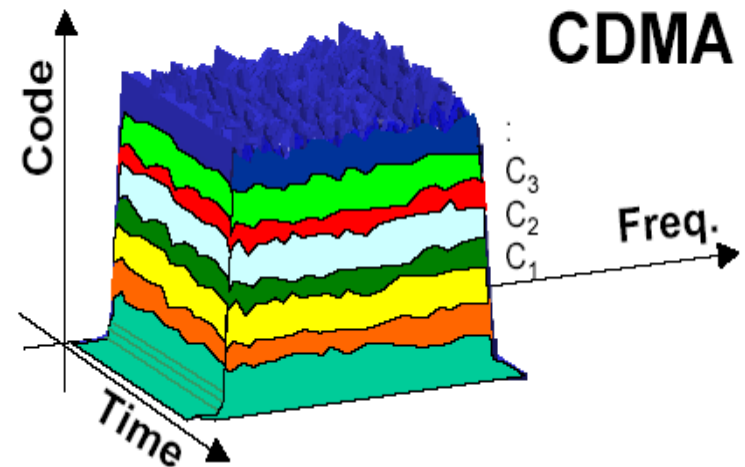
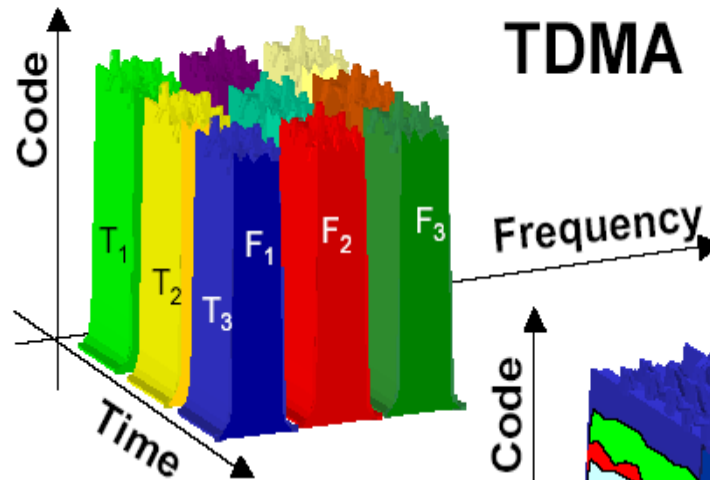
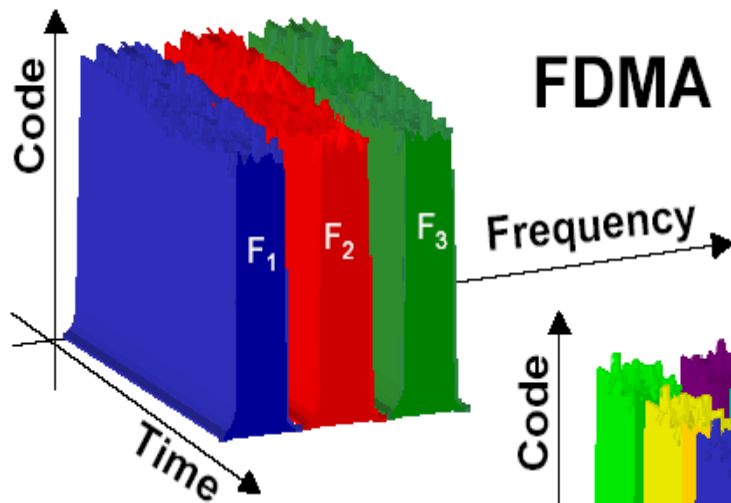


Области на локализация LA в GSM мрежата



WLAN позициониране и точки на достъп AP

Повишаване на капацитета чрез различни методи за потребителски достъп до комуникационния канал



Три различни метода за споделен достъп на много потребители в един и същи комуникационен канал:

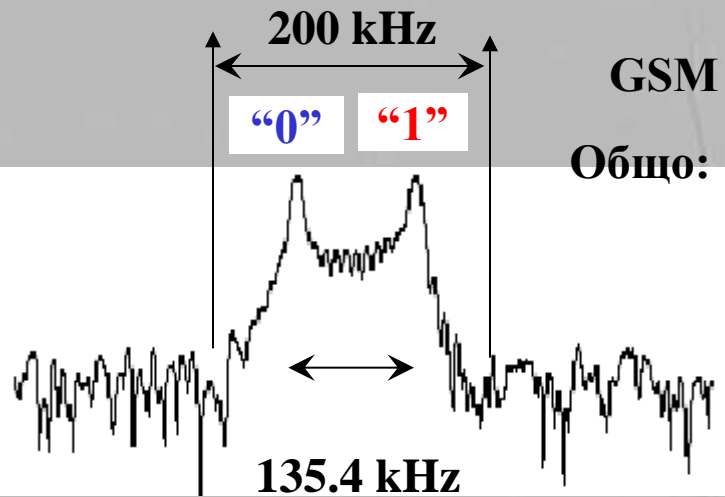
1. FDMA - разделяне по честота;
2. TDMA - разделяне по време;
3. CDMA - разделяне чрез код

FDMA: Frequency Division Multiple Access

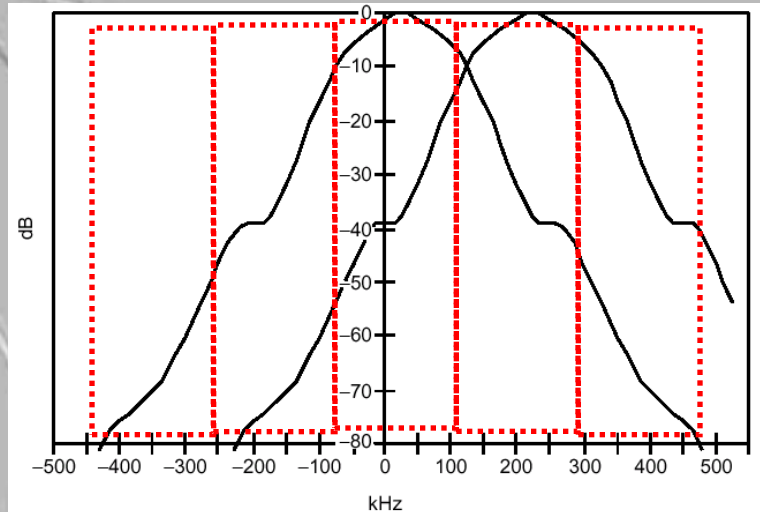
TDMA: Time Division Multiple Access

CDMA: Code Division Multiple Access

Стандартен GSM канал с ширина 200 kHz и универсално номериране на каналите



GSM канали
Общо: $1024 = 2^{10}$



GSM-900

No. на канала	Uplink	Downlink
975	880.2	925.2
976	880.4	925.4
...
1023	889,8	934.8
0	890.0	935.0
1	890.2	935.2
...
124	914.8	959.8

125 канала 49 канала
Extra-GSM

GSM-1800 GSM-1900

No. на канала	Uplink	Downlink
512	1710.2	1805.2
513	1710.4	1805.4
...
885	1784.8	1879.8

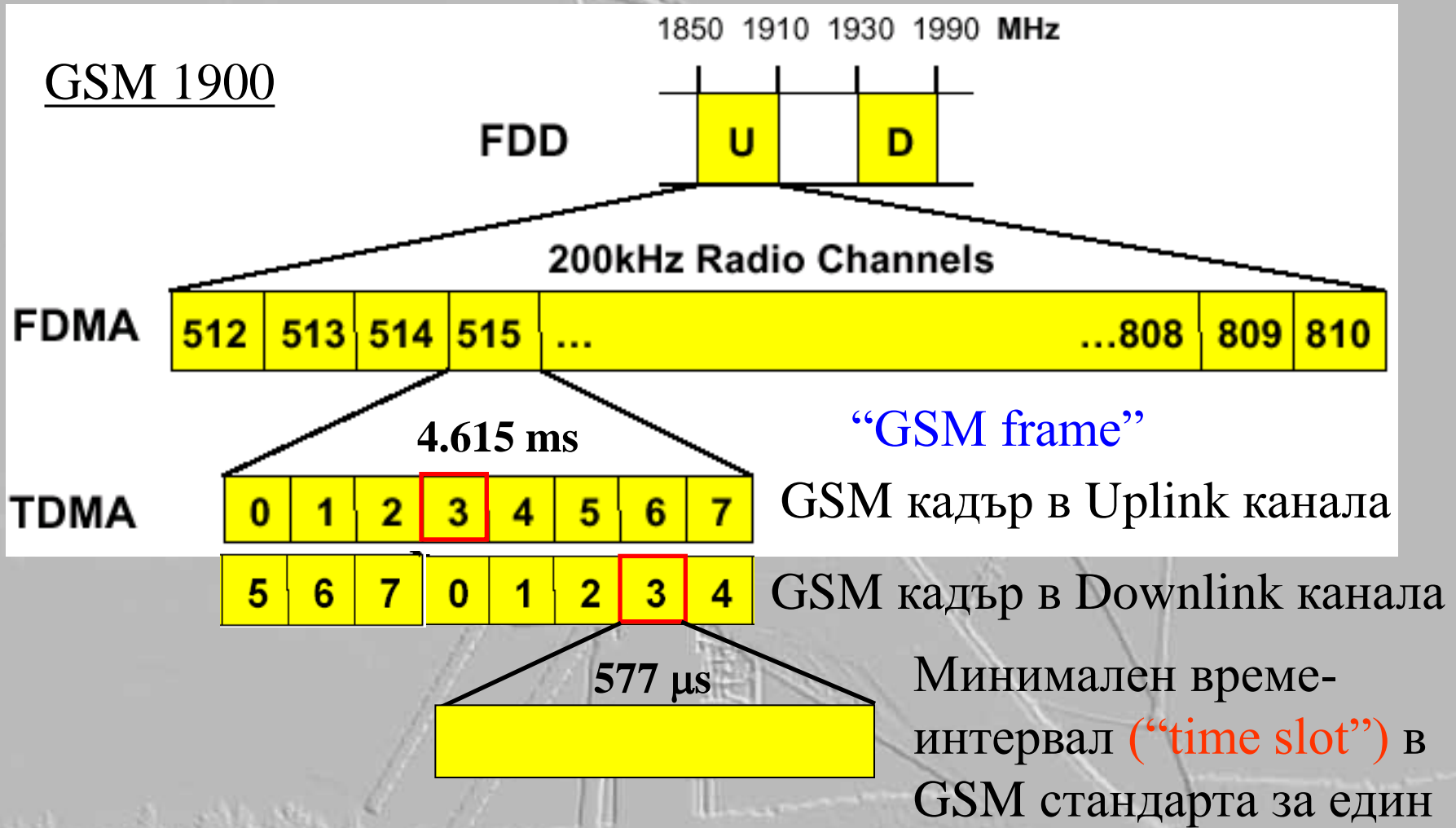
375 канала

No. на канала	Uplink	Downlink
512	1850.2	1930.2
513	1850.4	1930.4
...
810	1901.8	1989.8

300 канала



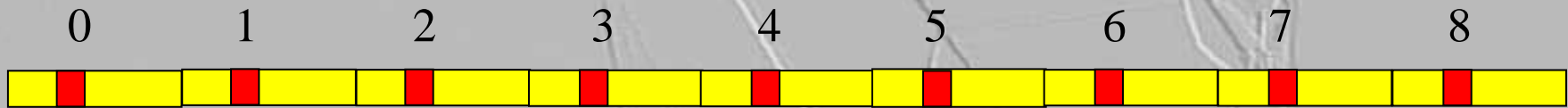
Пример: TDMA в GSM – основни характеристики



Извод: MS никога не приема и излъчва сигнал едновременно! Работи (Rx/Tx) за 1/4 от времето

Използване на времеинтервалите в GSM

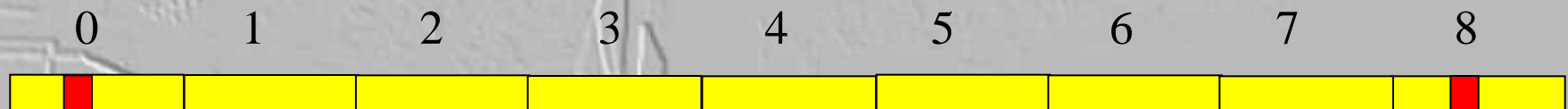
Пълно-скоростен GSM (1 потребител използва $1/4$ от времето и $3/4$ от него е свободен; скорост 22.8 kb/s, но поради служебни съобщения скоростта намалява до 13 kb/s за реч и до 9.6 kb/s – за данни)



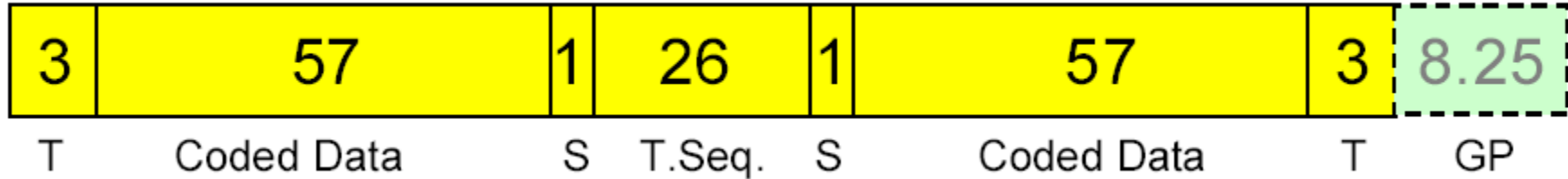
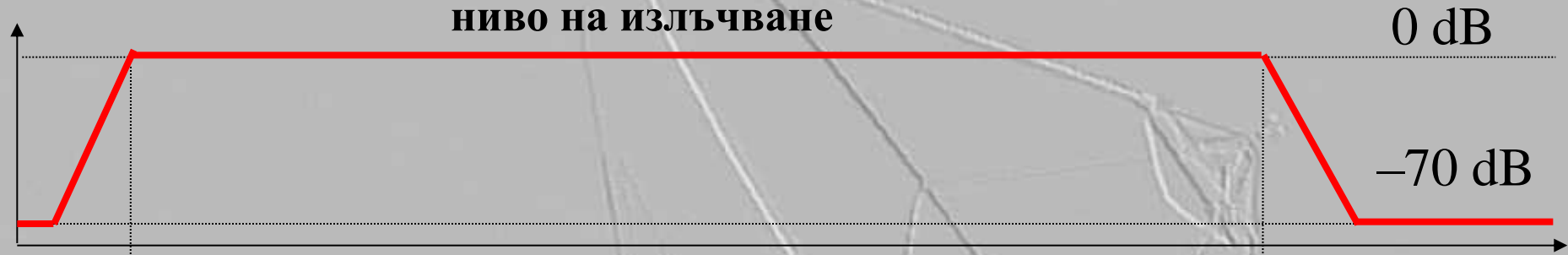
Полу-скоростен GSM (1 потребител използва $1/8$ от времето и $7/8$ от него е свободен; обща скорост 11.4 kb/s)



Предаване по бавен асоцииран канал (за SMS съобщения: 1 съобщение се предава през 8 кадъра – това е минималната скорост за предаване на данни в GSM мрежата)



Съдържание на един времеинтервал в GSM (нормална серия)



T (2×3 bits) – ограничаващи битове (111); за включване/изключване на предавателя (0; -70dB)

Coded data – кодирана информация (реч или данни) на две порции по 57 бита

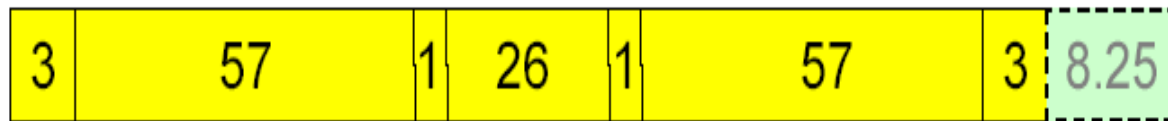
T. Sec. – обучаваща редица от 26 бита за оптимална настройка на приемниците

Бит-флаг: S = 1 (следва тренираща редица); S = 0 (следва неотложна служебна информация, която отхвърля блок с реч с цел да се предотврати прекъсване)

GP = 8.25 – защитен интервал, за да се изравни закъснението на сигналите в мрежата, идващи от много далечни потребители

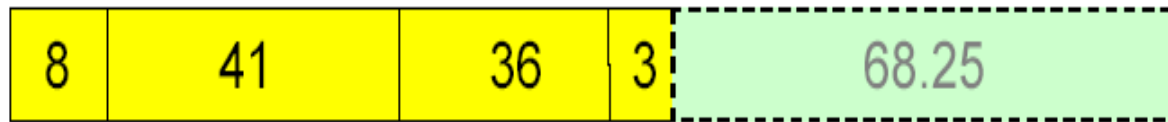


Структура на други времеинтервали (серии)



T Coded Data S T.Seq. S Coded Data T GP

Нормална серия



T Synchronization Seq. Coded Data T GP

Случайна (скъсена) серия (за достъп)



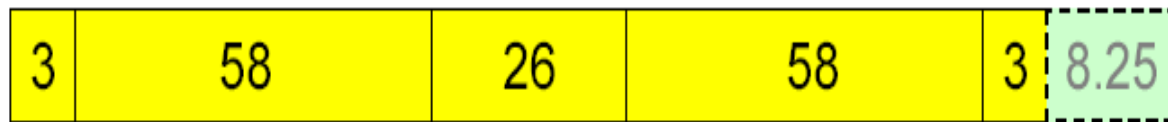
T Fixed Bit Sequence T GP

Серия за корекция на честотата



T Coded Data Synchronization Seq. Coded Data T GP

Серия за синхронизация

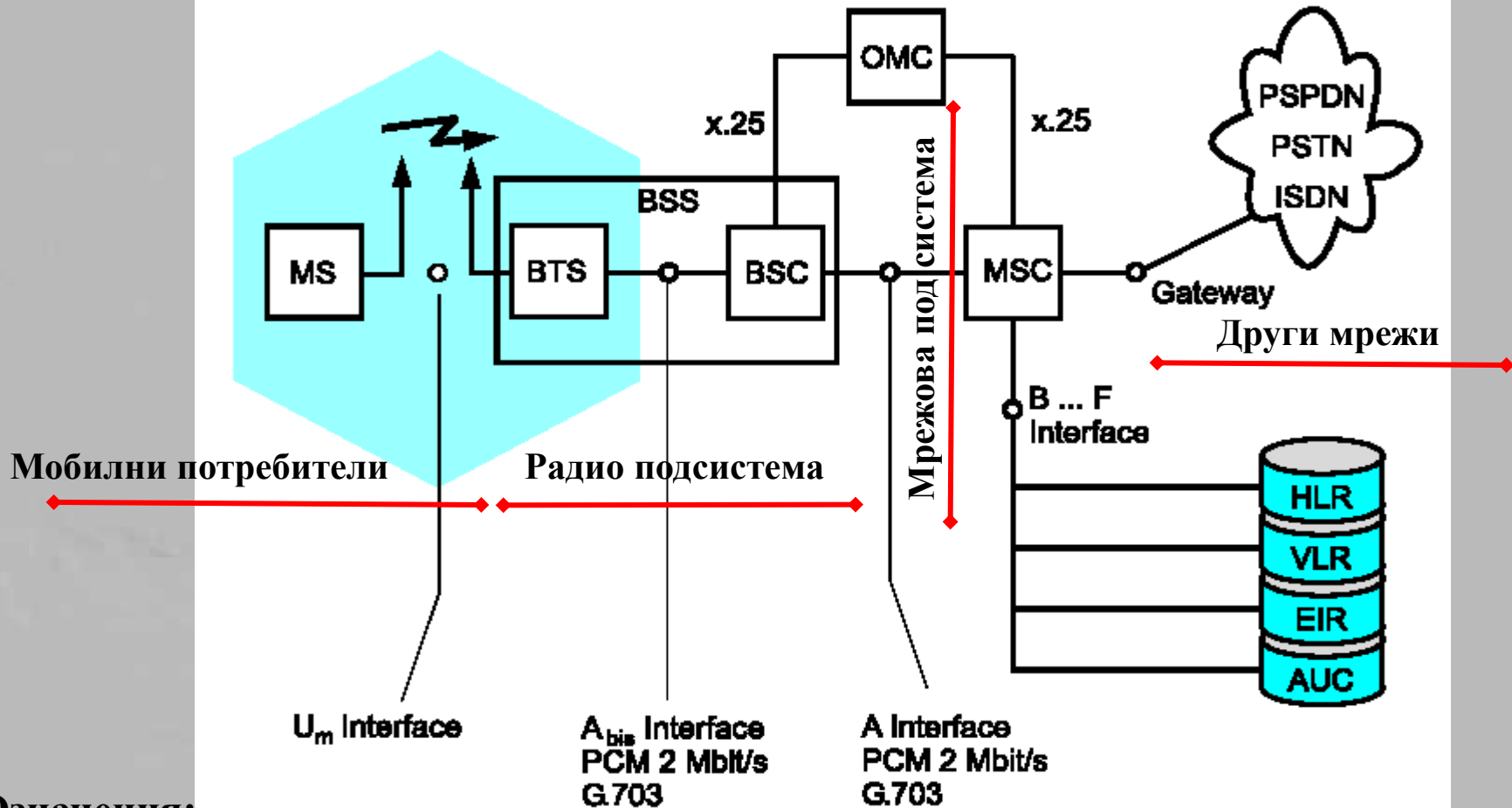


T Mixed Bits T. Seq. Mixed Bits T GP

Фалшива серия (без данни)



Архитектура на GSM мрежата



Означения:

MS – мобилна станция (терминал); BTS – базова приемно-предавателна (transceivers) станция; BSC – контролер на базови станции; MSC – мобилен превключващ център; OMC – център за организация и поддръжка на мрежата; Регистри: HLR – регистър за домашни абонати; VLR – регистър за временни абонати; EIR – регистър за оборудването (мобилни-те терминали); AuC – център за автентичност

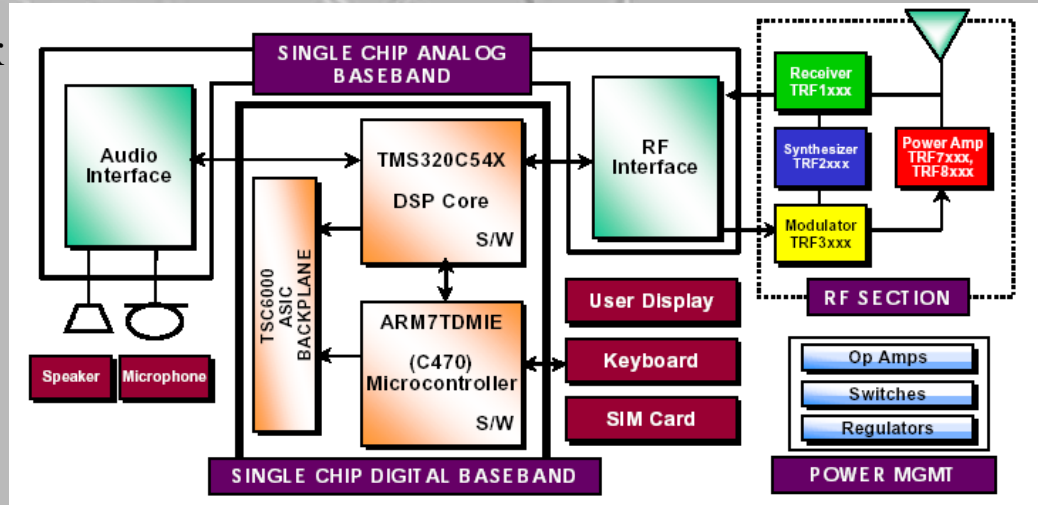
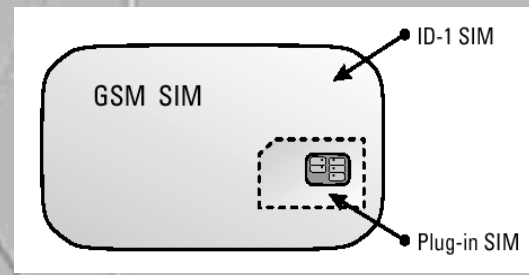
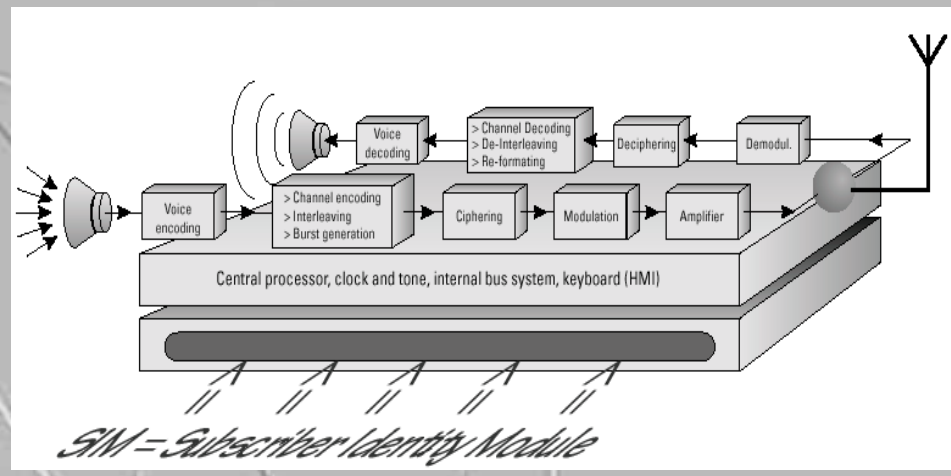
Мобилна станция (MS)



MS (Mobile Station) е интерфейсът на всеки мобилен абонат за безжична връзка с мрежата (за глас и данни) чрез близка BTS. Всяка комуникационна сесия е свързана с идентификация на абоната (GSM SIM). MS има две основни части:

- 1) Телефон
- 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 на честота) (изх. мощност: ~1 W), PIFA антена (усилване ~2 dB), RIKE приемник. Предавателят и приемникът използват една антена, като сигналите на Uplink и Downlink каналите се разделят с дуплексер. Контролният модел е логика с процесор. Той организира: влизане в мрежата (инициализация), запитване, достъп, регистрация, контролира съобщенията и "handover"-а.





Базова станция (BTS)

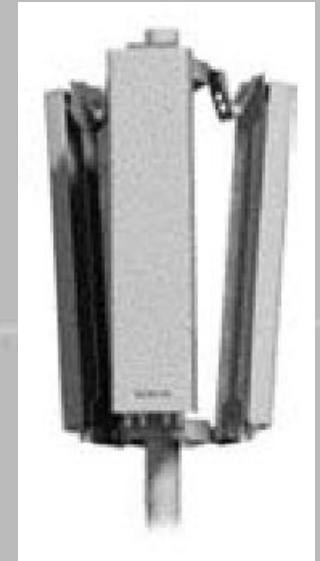
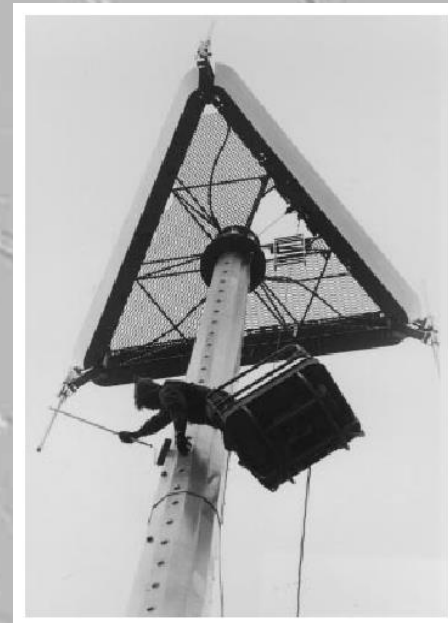
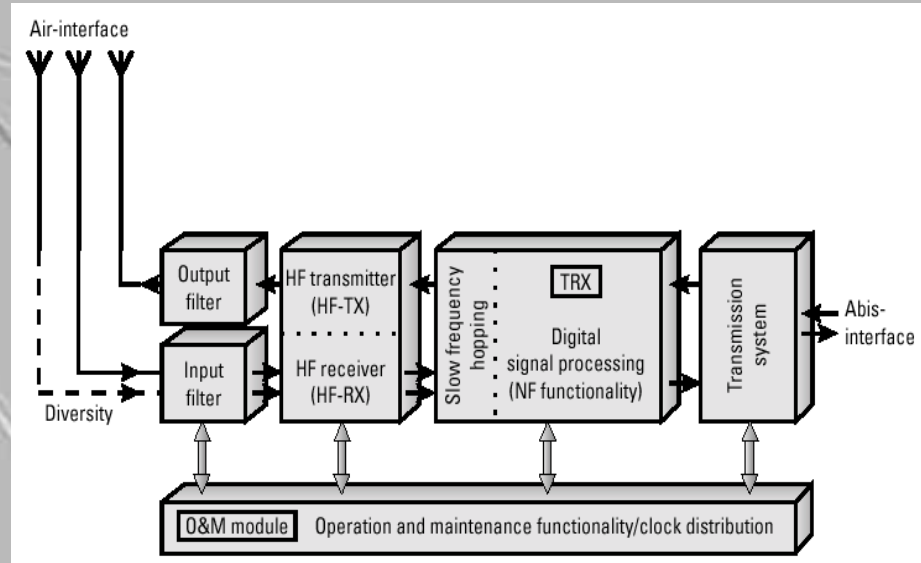


BTS (Base Transceiver Station) е частта за достъп до мобилната мрежа, отговорна за покритието на клетката с радио-сигнал и обслужването на всички абонати, намиращи се в дадена област (клетка). Състои от система от йерархични модеми в две групи:

- 1) Радиомодем;
- 2) Контролен модем.

Радиомодемът включва относително интелигентна суб-система от предавател, приемник, кула и антена, обслужващи до 8 едновременни сесии на канал. Реалното радио-покритие на клетката се изменя при всяка промяна на хардуера и трябва да се контролира често. Честотният план на BTS е разпределението на честотните канали, използвани в дадена клетка. Ако е статично, не се променя. Използва динамично разпределение на канали, заимствани от съседни клетки.

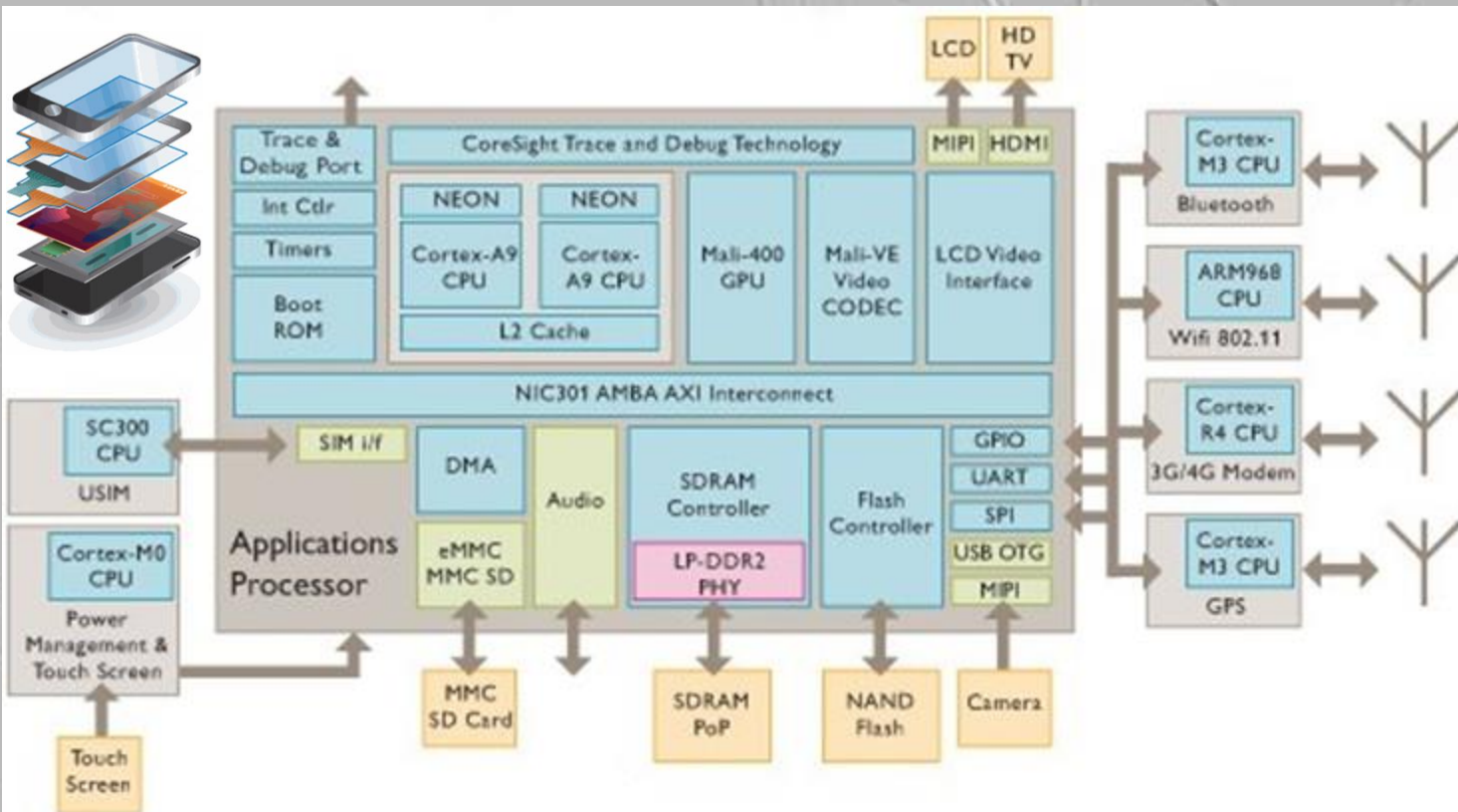
Контролната част управлява радиомодема. BTS се свързва със собствения си контролер обикновено чрез коаксиален кабел.





Блок-диаграма на умен телефон (смартфон)

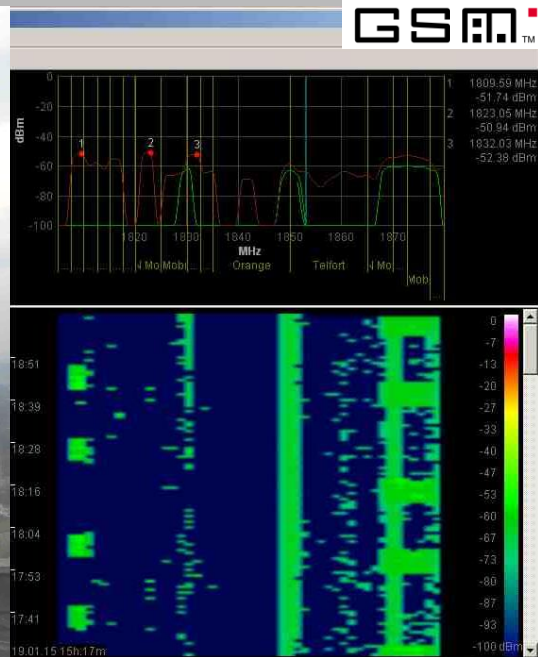
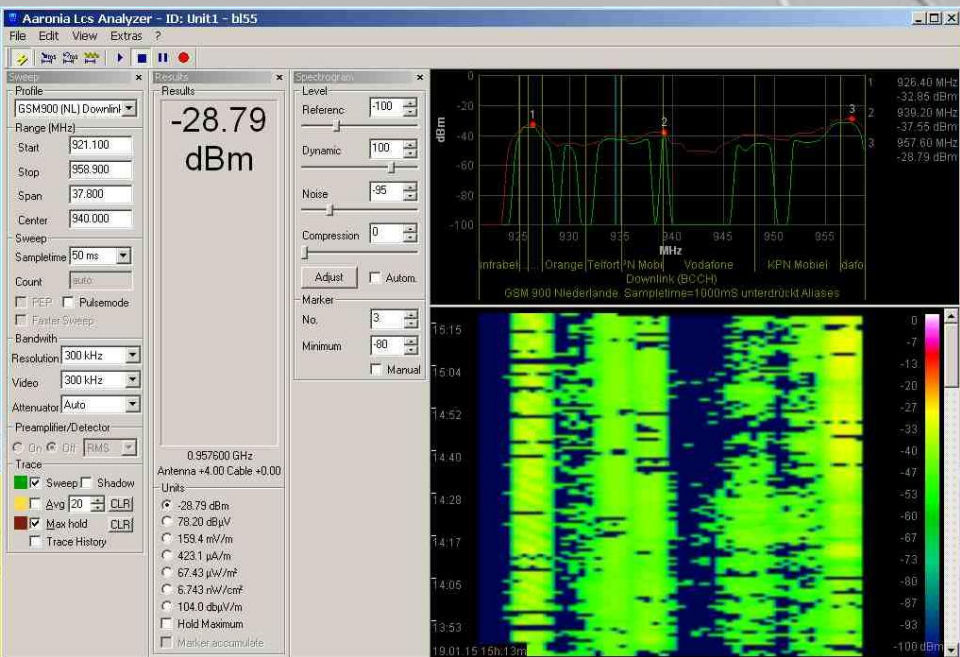
Умният телефон е повече компютър с микропроцесор от висок клас, отколкото телефон. Има своя операционна система, памет, сензорен екран, виртуална клавиатура, управляващ софтуер, много софтуерни приложения, повече интерфейси (LCD, HDTV, външни памети, фотокамера, видеокамера, радиоприемник, различни входове и изходи за други периферни устройства, микрофон, високоговорител и пр.), има специални модеми за мобилен интернет (3G/4G), за безжичен интернет (WiFi 802.11), Bluetooth, GPS система за навигация и др. Радио-частта е доста по-сериозна – по-чувствителен приемник, широколентов излъчвател, по-сложни модеми, MIMO антени и др. Батерията е по-дългоживуща и по-мощна.



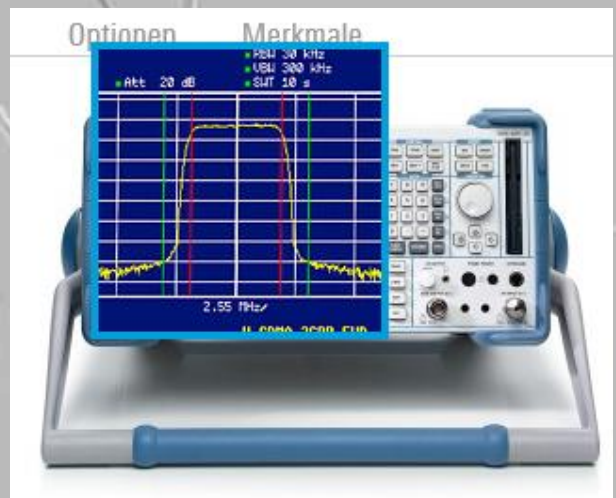
Тесно-лентови сигнали в 2G GSM мрежата

GSM-900

GSM-1800

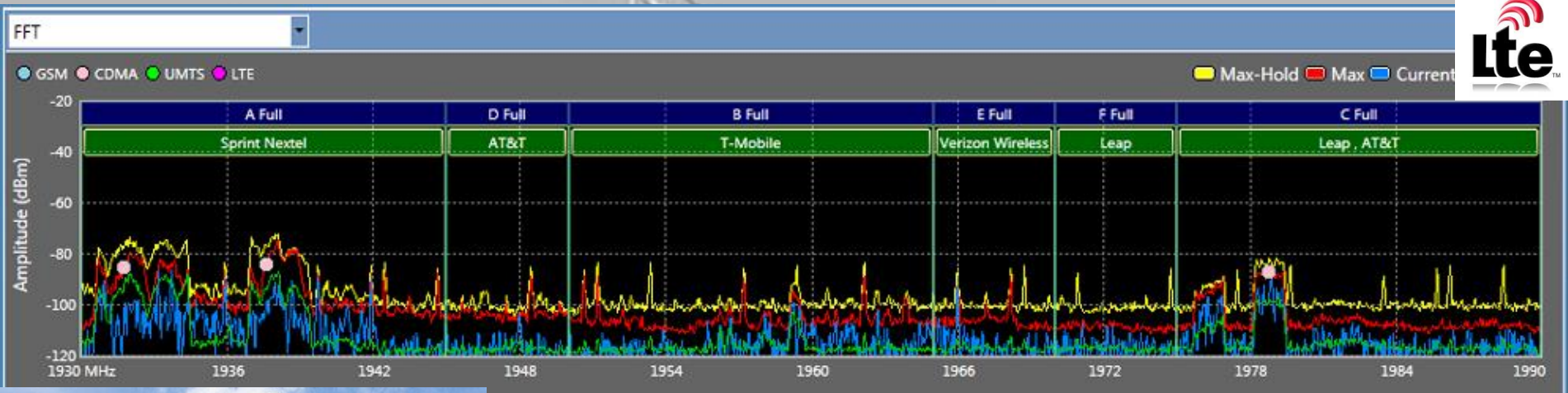


Показани са Downlink канали в 2G GSM мрежа (на покрива на блок 17 в Студентски град). Ясно се виждат непрекъснато излъчваните тесно-лентовите Beacon честотните канали от отделни базови станции, както и случайните трафични канали за разговори на потребители (на 900 MHz). На 1800 MHz се забелязват и станции, които излъчват прекъснато пакети от сигнали, каквито са технологиите за предаване на данни в 3G и 4G мрежите.

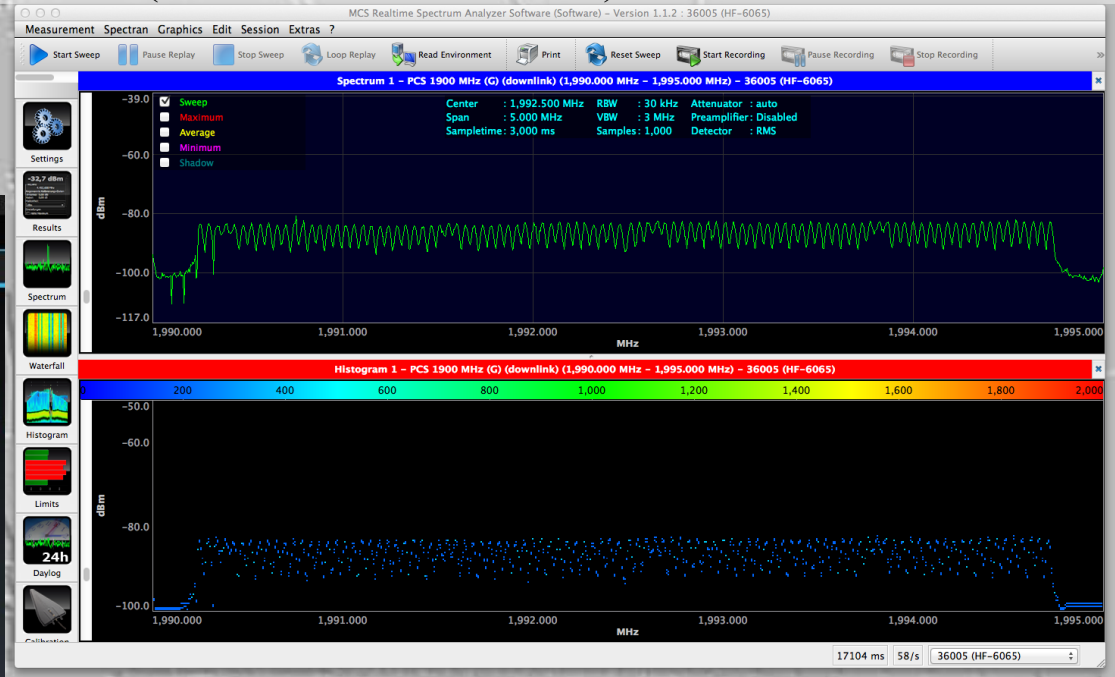
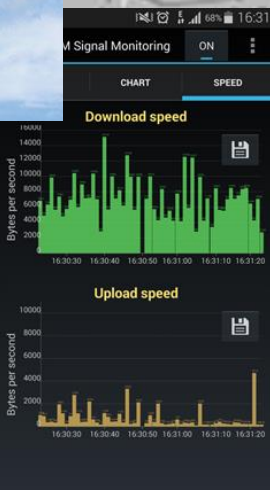


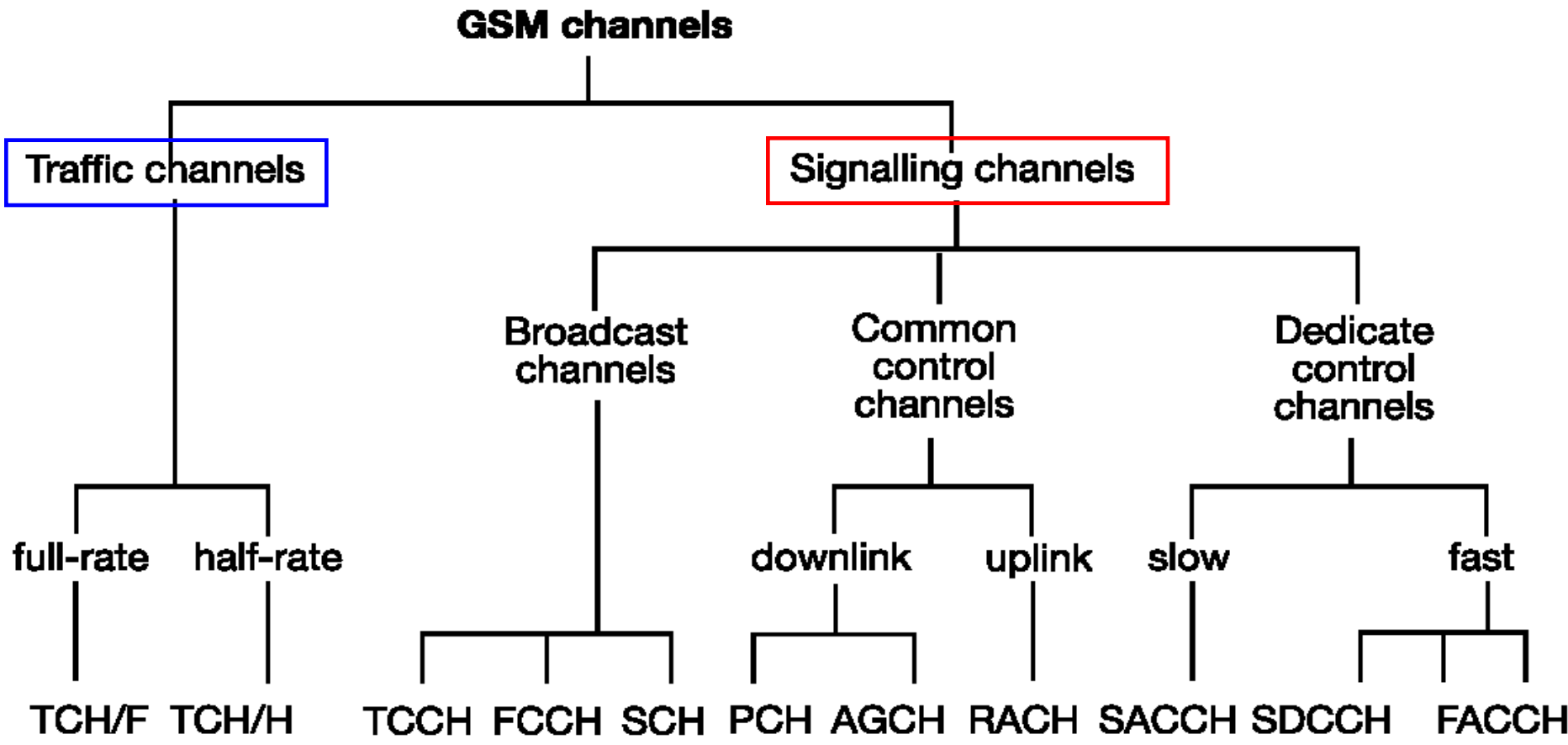


Широколентови сигнали в 4G LTE мрежата



В LTE мрежите каналите са широколентови с ортогонални носещи честоти (обяснение по-нататък)





Трафични канали
Разпръсквателни канали за контрол на ниво, честота, синхронизация

Общи канали за търсене (paging), случаен достъп и разрешение за достъп

Предназначени канали за бавен или бърз служебен контрол на мрежата

Структура на циклите в GSM мрежата

0.577 ms; минимален **времеинтервал** (time slot) *за един потребител*

$8 \times 0.577 = 4.616 \text{ ms}$; общ споделен **кадър** (frame) за 8 потребителя

$26 \times 4.616 = 120 \text{ ms}$; **мултицикъл₂₆** за разпределение на времеинтервалите по време на разговор

$51 \times 4.616 = 235.4 \text{ ms}$; **мултицикъл₅₁** за планиране на канали за контрол във времеинтервал 0 на излъчваната (Beacon) честота

$= 6.12 \text{ s}$; **суперцикъл** (26×51 или 51×26) MS сканира нивото на сигнала в съседни клетки 1 път в мултицикъл₂₆ \Rightarrow 51 пъти в суперцикъла, с което подпомага handover

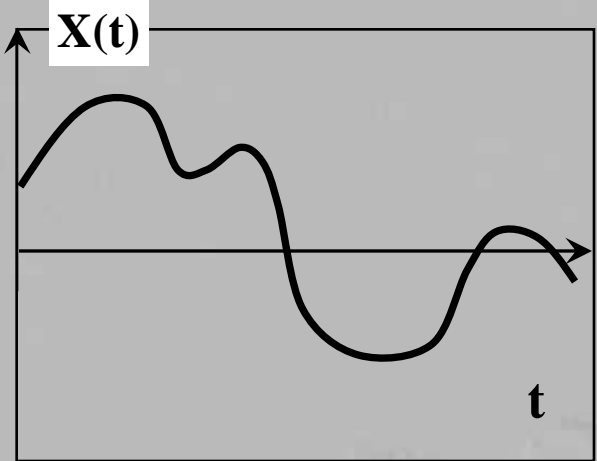
хиперцикъл = 2048 суперцикъла = 3h, 28 min и 53.76 s; най-дългият интервал в GSM мрежата, за който всеки времеинтервал има уникален номер; \Rightarrow нулиране



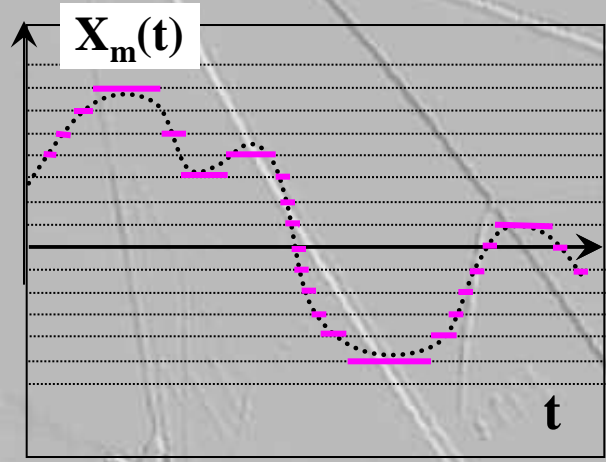


Аналогови и цифрови сигнали в TD форма

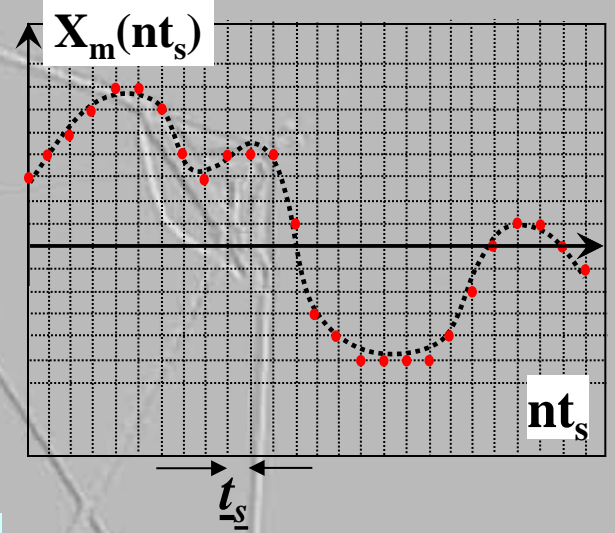
Аналогов сигнал



Дискретен по ниво



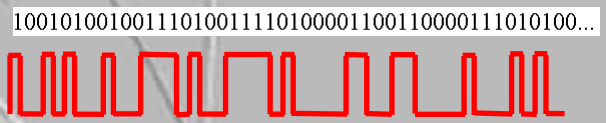
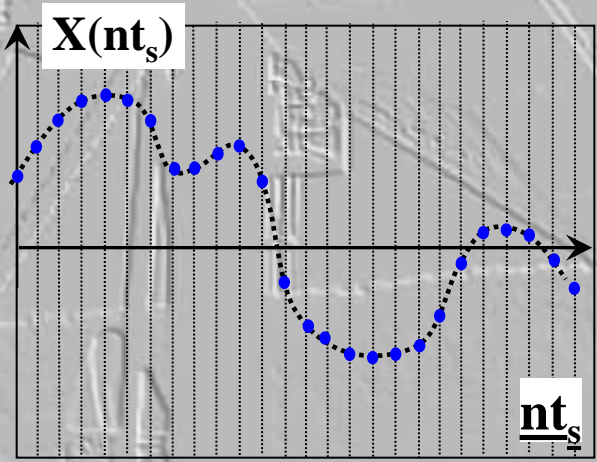
Цифров сигнал



1111
1110
1101
1100
1011
1010
1001
1000
0000
0001
0010
0011
0101
0110
0111

Комуникационните сигнали са аналогови, дискретни и цифрови. Аналоговият сигнал може да се описва с произволно ниво във всеки момент. Дискретните сигнали се дефинират или в точно определени моменти (но с произволни нива), или имат квантувани нива, но за произволни времеви интервали. Цифровият сигнал е квантуван по време и нива, на които се съпоставя двоичен код.

Дискретен по време



Цифрова редица (sequence)

Примери за някои известни сигнали

Звуков сигнал (говор; музика):

- ❖ Като сигнал в основна лента: **0.015–20 kHz**; в канала: **0.03–15 kHz**
- ❖ Като модулиран сигнал (FM в УКВ): **200 kHz** лента; 100 kHz защитна лента
- ❖ Като цифрово радио: **272 kHz** лента, **544 kbit/s**, честота на дискретизация 32 kHz; 16-bit дума

Телефонен сигнал (реч):

- ❖ Като сигнал в основна лента: **0.08–12 kHz**; в канала: **0.3–3.4 kHz**
- ❖ Като модулиран сигнал (FM в 1G клетъчни телефони): **25 kHz** лента
- ❖ Като цифров сигнал в GSM: GMSK модулация **200 kHz** лента (или 22 kbit/s, като се отчете служебната информация **13.2 kbit/s**)

Телевизионен сигнал (подвижно изображение и звук):

- ❖ Като модулиран аналогов сигнал: само за видео сигнал **4.2 MHz**
- ❖ Като цифров tv сигнал: **13.5 MHz**
- ❖ Като модулиран цифров tv сигнал: **108 MHz**; скорост **~216 Mb/s**, след силна компресия – **2-8 Mb/s**. Днес предаването на HDTV сигнал е напълно по възможностите на 3G и 4G мрежите.

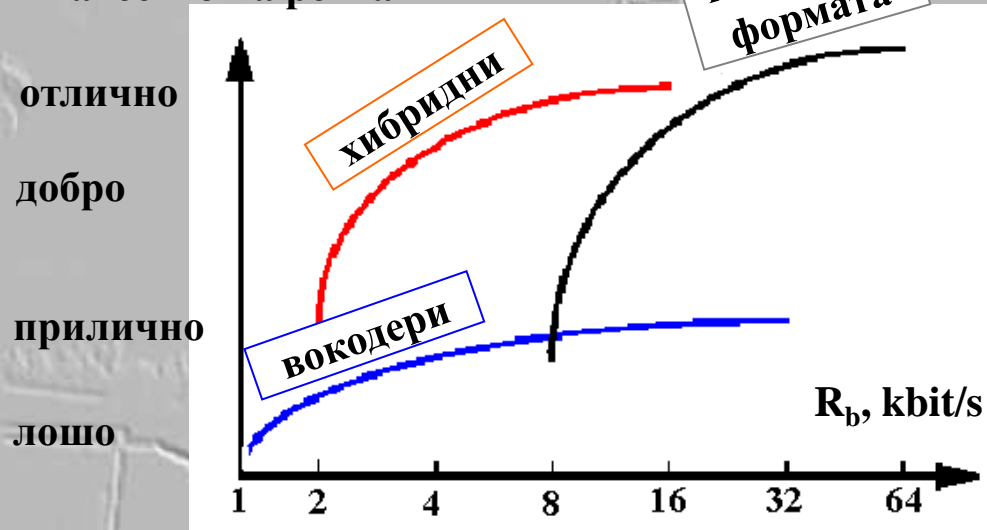
Компютърен PC сигнал (ASCII):

- ❖ Първият компютърен код ASCII (American Standard Code for Information Interchange)
- ❖ **10 бита** (1 за старт, 7 за данни, 1 за четност и 1 за стоп)
- ❖ Данни $2^7 = 128$ знака, **8 бита** (или **16, 32, 64, 128** и т. н.)
- ❖ Бит за четност: “1” ако 1-те са четен брой или “0” ако 1-те са нечетен брой

Преобразуване на аналогов в цифров сигнал (пример: кодиране на човешка реч)

В съвременните цифрови комуникации аналоговите сигнали (напр. реч) трябва да се преобразуват в цифрови сигнали като редици от импулсни комбинации (1, 0) – “кодиране” на речта. От една страна, аналоговата реч трябва да се преобразува с малки изкривявания или смущения в комуникационната система, но от друга страна цифровата информация трябва да се редуцира до минимум, за да се използва най-ефективно информационния капацитет на каналите. Устройствата за това преобразуване – кодери на речта, се делят на два главни типа: 1) кодери на вълновата форма (PCM, pulse code modulation); 2) вокодери (voice coder); но 3) има и хибридни кодери, които комбинират предимствата на двата типа и са най-използваните днес.

Качество на речта



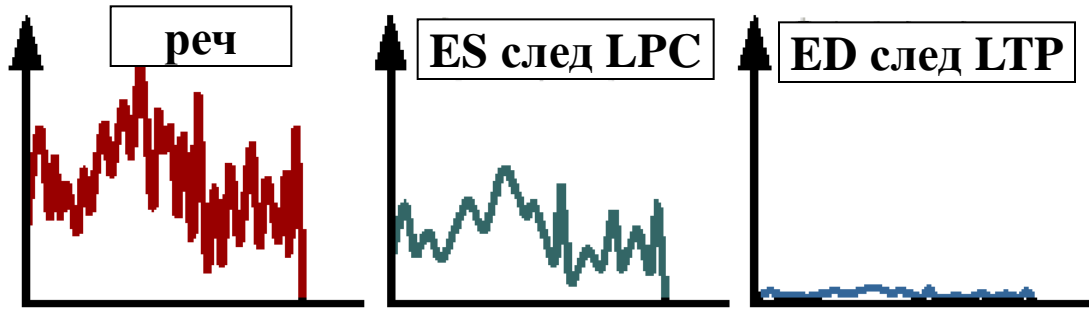
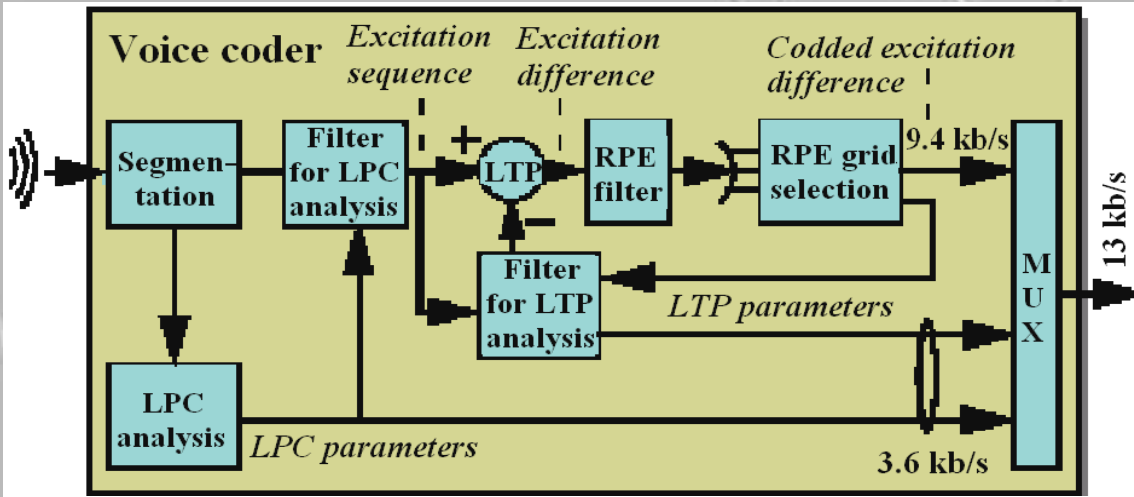
При първите се кодира пълната форма на аналоговия сигнал на речта (вж. примера надолу), а вторите са параметрични – въвеждат се група параметри, които описват кривата на формата на сигнала (не самата форма). Метафора: не се предава самата музика, а нотните листове на музиканта). В този случай речта е “синтезирана”. Хибридните кодери са компромис между високо качество на речта и ефективност на кодирането.



Пример: кодер на реч в GSM мрежата (Speech Coding)

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 сравняват актуалната реч и речта-реплика и се определя грешката. Тя се минимизира и така се пренастроят 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:

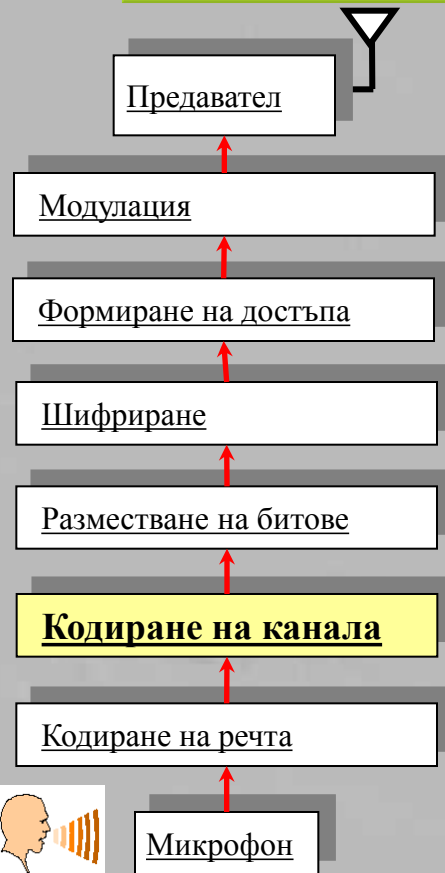
Схема на RPE-LTP кодер на реч в GSM



Първо се извършва LPC (Linear Predictive Coding) на 20-ms отрязък от речта и се изработва ES (филтърът работи инверсно на гласните струни). Така 2 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). Кодиране се извършва на всеки 3-ти отчет (sample), и така се предава до приемника, където речта се възстановява по обратния път. Скорост: 13 kb/s, т.е. 260 bits за 20 ms



Кодиране на комуникационния канал (Channel Coding)



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 шумоустойчивостта на сигнала в условията на шум и паразитна интерференция или “файдинг”. Последният параметър се определя от отношението 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) (определя се за достатъчно малък интервал от време) или вероятността p_e за грешно приемане на един бит (определя се при достатъчно много приети битове) по следните две формули:

$$BER = \frac{n_e}{n_\Sigma}$$

$$p_e = \lim_{n_\Sigma \rightarrow \infty} \frac{n_e}{n_\Sigma}$$

където n_e и n_Σ са количествата на грешно и сумарно приетите битове. BER (респ. p_e) отчитат сумарното въздействие на смущенията върху цифровия сигнал в канала. И двете величини са случайни и имат статистическо разпределение в определена комуникационна среда. Ако в дадена система в даден канал се измерва $p_e \sim 10^{-6}$ (до 10^{-5}) се счита, че каналът работи нормално. При $p_e \sim 10^{-3}$ (1 грешно възприет бит на 1000) се счита, че смущенията са недопустимо големи и каналът може да блокира.

Пример 1: Тип (7, 4) блоково кодиране (Hamming code)

$$\boxed{(i_1, i_2, i_3, i_4)} \quad \underline{\underline{+}} \quad \begin{matrix} r_1 = i_1 + i_2 + i_3 \\ r_2 = i_2 + i_3 + i_4 \\ r_3 = i_1 + i_2 + i_4 \end{matrix} \quad \underline{\underline{=}} \quad \boxed{(i_1, i_2, i_3, i_4, r_1, r_2, r_3)}$$

В горната изрази символът “+” означава бинарно сумиране: $1+1 = 0$; $1+0 = 1$, $0+1 = 1$; $0+0 = 0$.

Пример: Редица: (1 0 1 0). Излишни битове: $r_1 = 1 + 0 + 1 = 0$; $r_2 = 0 + 1 + 0 = 1$; $r_3 = 1 + 0 + 0 = 1$;
 Кодирана редица: (1 0 1 0 0 1 1). Вж. Таблицата за всички (7, 4) кодове.

Дори чисто интуитивно е ясно, че блоковото кодиране намалява BER на системата, ако всички други параметри се запазват. За характеризирани на този ефект се въвежда концепцията за разстояние на Hamming d_H между две редици – броят на местата, където битовете в двете редици се различават. Пример: $d_H = 3$ за редиците (1111111) и (1110100). Минимално разстояние d^* е минималното Hamming разстояние d_H , което се оказва критичен параметър. Напр. $d^* = 3$ е min разлика между всички кодове на Hamming (вж Табл.). Този параметър определя min брой грешни битове, които с това кодиране могат да се детектират ($q \leq d^* - 1$) или да се коригират ($t \leq 0.5d^* - 1$). Пример: за (7, 4) кодиране $d^* = 3$, $q = 2$ и $t = 1$. Тук се приема, че актуално излъчената редица е най-близката до приетата редица, дадена в Таблицата. Пример: ако е приета редица (0001111) (няма го в Табл., т.е. има грешка). Най-близкият код от верните е (0001011). Следователно, вярно излъчената редица е (0001).

Таблица на (7, 4) кодове

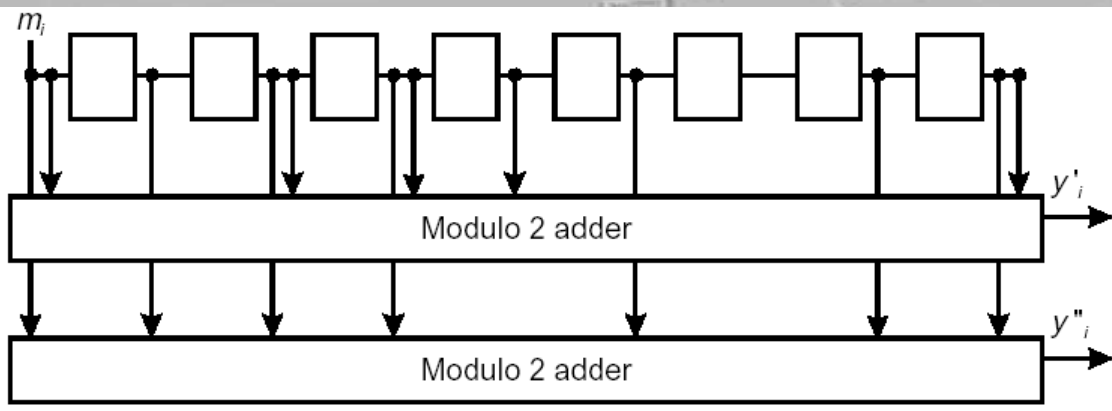
информационна редица	добавени битове	кодирана редица
0000	000	0000000
0001	011	0001011
0010	110	0010110
0011	101	0011101
0100	111	0100111
0101	100	0101100
0110	001	0110001
0111	010	0111010
1000	101	1000101
1001	110	1001110
1010	011	1010011
1011	000	1011000
1100	010	1100010
1101	001	1101001
1110	100	1110100
1111	111	1111111



Пример 2: Конволюционално кодиране с памет!

За разлика от блоковото кодиране, конволюционалното кодиране използва част от битовете от предшестваща информация, която оставя следа във следващите битове. С други думи, този тип кодиране има памет. На Фиг. е показана схема на кодиране на ниво $(1/2)$ с редица от 9 бита памет. Как работи тя? Първоначално, всички регистри са нулирани и към тях отляво-надясно се превключват битовете на информационната редица m_i . Две устройства с генериращи функции $g'(x)$ и $g''(x)$ по принципа на бинарно сумиране произвеждат два изходни бита y'_i и y''_i във всеки момент (всяко превключване на информационен бит). Специален комутатор превключва към изхода всеки бит y'_i или y''_i , следователно, изходният брой битове е ефективно 2 пъти по-голям от входния (информационния). Декодирането е сложен процес (напр. Viterbi decoding), но възможността за поправяне 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 S/N отношение

“сигнал-шум”, намалено със стойността на “усилването от кодиране”, като при това се запази заложената по стандарт вероятност p_e за грешно предаване на битове. “Цената” на това 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.

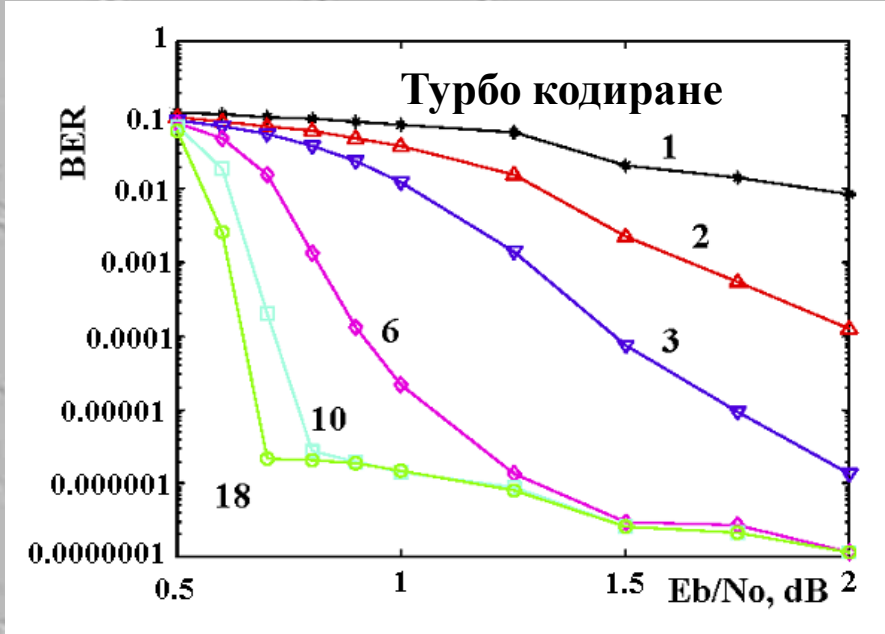
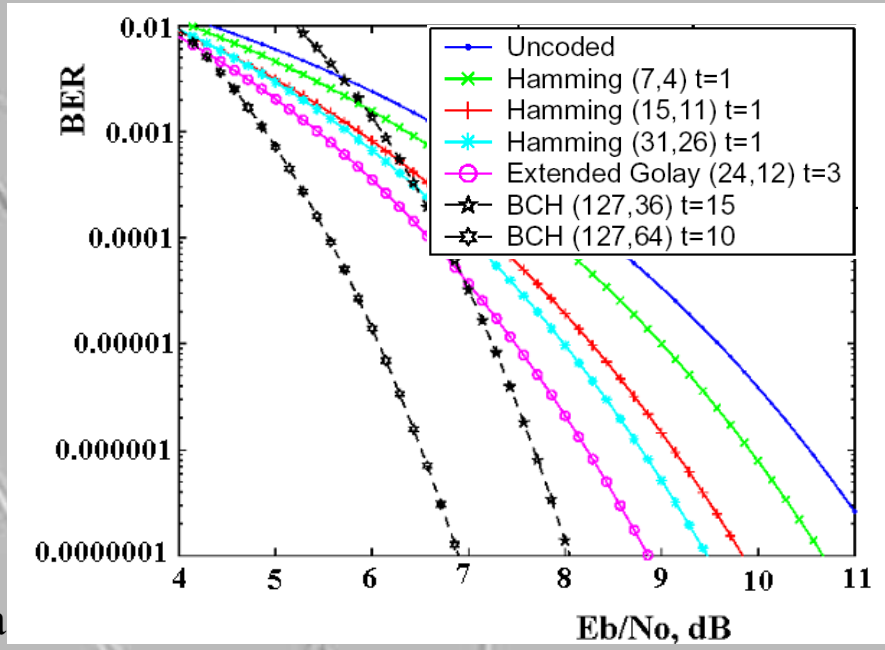
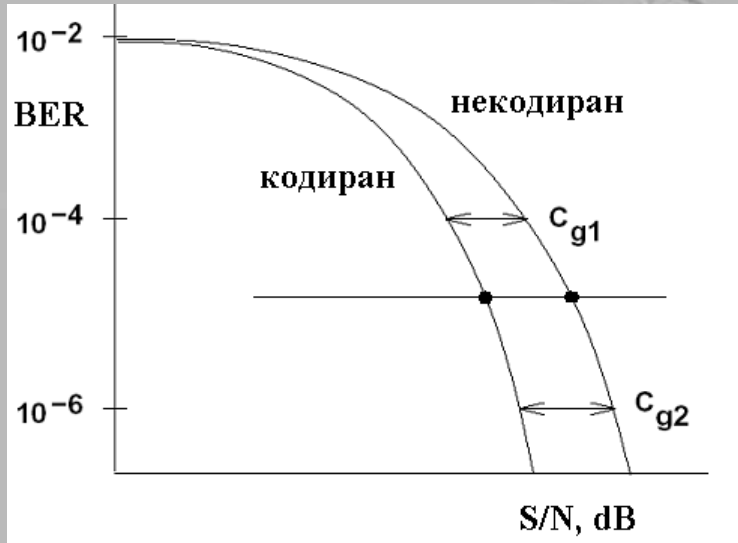


$$g'(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$$

$$g''(x) = x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$



Усилване от кодиране с памет (coding gain)

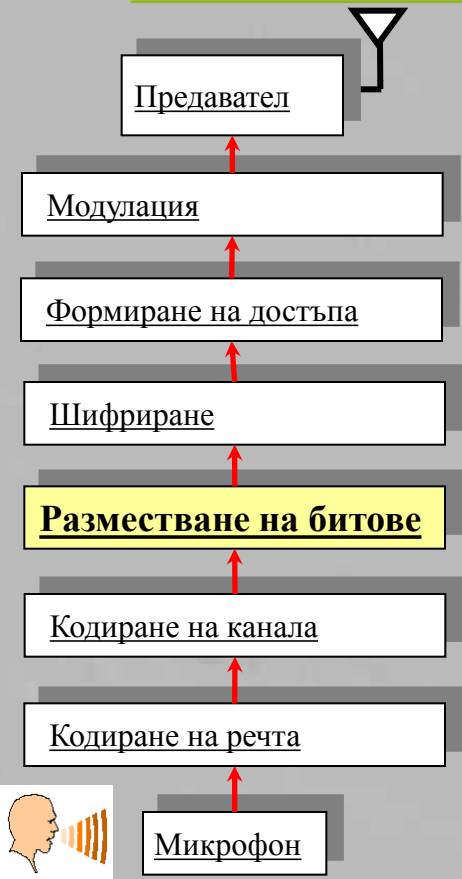


На графиките е показан ефектът “усилване от кодиране”. При големи стойности на BER (10^{-2} - 10^{-3}) има пренебрежимо слаб ефект. Всъщност, забележимо усилване от кодиране се проявява при по-малки стойности на BER $\sim 10^{-4}$ - 10^{-6} (качествена връзка). Вижда се, че стандартният (7, 4) Hamming код има едва ~ 0.5 dB усилване, но при някои типове кодиране то стига до 3-4 dB. Наблюдава се и “отрицателно усилване” при някои кодове. Силен ефект дава турбокодирането, при което има два ключови момента: паралелно свързано кодиране и итеративно “турбо” декодиране. Графиките показват силен ефект на подобряване на BER при увеличаване на броя итерации при турбо декодирането.

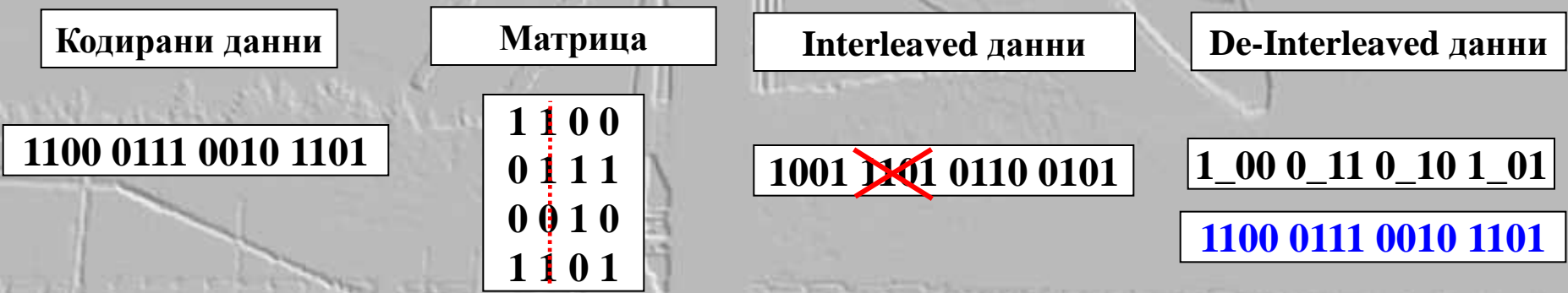


Разместване на битове (Interleaving)

Кодирането на канала е много ефективно при наличие на шум и при бавен (слаб) фадинг (вж. Лекция 4), но при бърз (дълбок) фадинг, много дълги съобщения или при грешки в достъпа до канала, тази техника не е приложима. В този случай може да се използва техниката на разместване на битове (interleaving). Това е вид разнасяне на сигнала във времето (time diversity), без добавяне на излишни (redundant) битове. Долу следва пример:



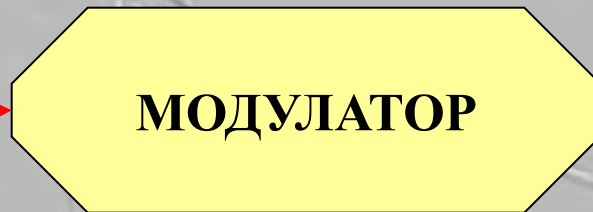
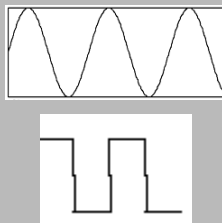
Разместването на битовете на дълги редици се извършва най-често по матричен път: на входа информацията постъпва по редове, а на изхода се чете по стълбове. Друг пример:



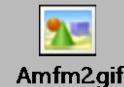
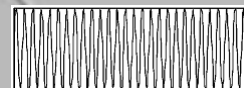


Основна схема на модулация

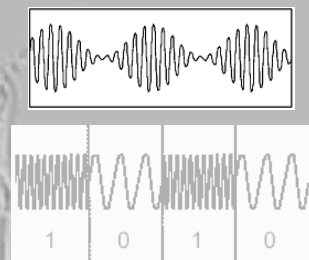
Сигнал в основна лента



Носещ сигнал



Модулиран сигнал



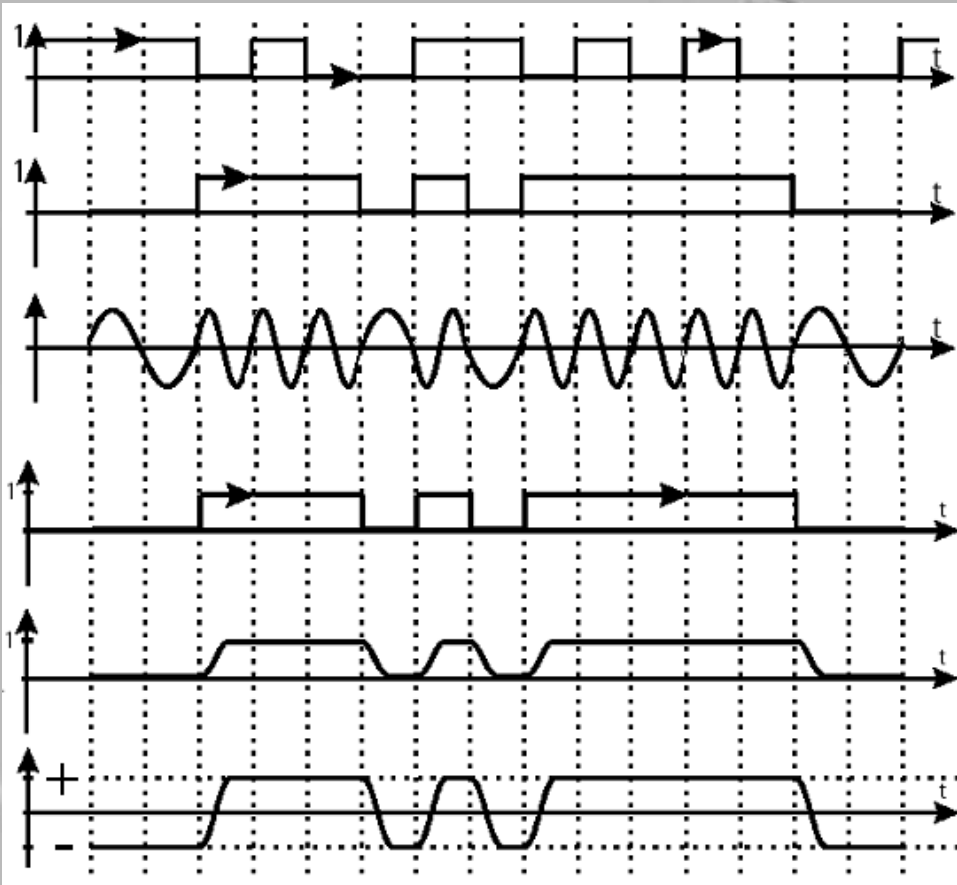
Модулираният сигнал (PBS, Pass-Band Signal) се получава при нелинейно смесване на сигнал в основна лента с носещ сигнал (на високи честоти това е най-често аналогов хармоничен сигнал $C(t) = C_m \cos(2\pi f_c \cdot t + \varphi_c)$). Модулациите се делят на *аналогова* и *цифрова* (манипулация) в зависимост от вида на BBS сигнала. Информацията от BBS може да се носи от всеки от трите основни параметъра на носещия сигнал: амплитуда C_m , честота f_c или фаза φ_c .

Аналогова модулация

Цифрова манипулация (SK)

- ❖ Амплитудна (AM) модулация: C_m
- ❖ Честотна (FM) модулация: f_c
- ❖ Фазова (PM) модулация: φ_c
- ❖ ASK (Amplitude Shift Keying): C_m
- ❖ FSK (Frequency Shift Keying) : f_c
- ❖ PSK (Phase Shift Keying) : φ_c

Пример за GMSK модулация в GSM стандарта



Оригинална
цифрова редица

Цифрова редица
след XOR операция

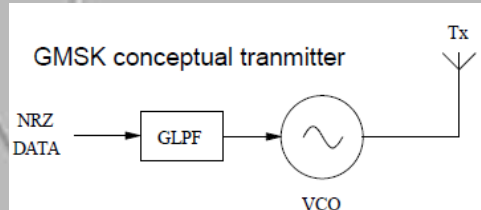
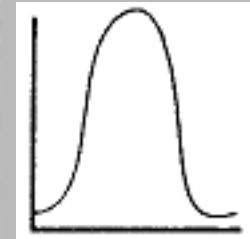
Модулиран сигнал

Цифрова редица
след XOR операция

Цифрова редица
след Гаусов филтър

Промяна на честот-
ното състояние

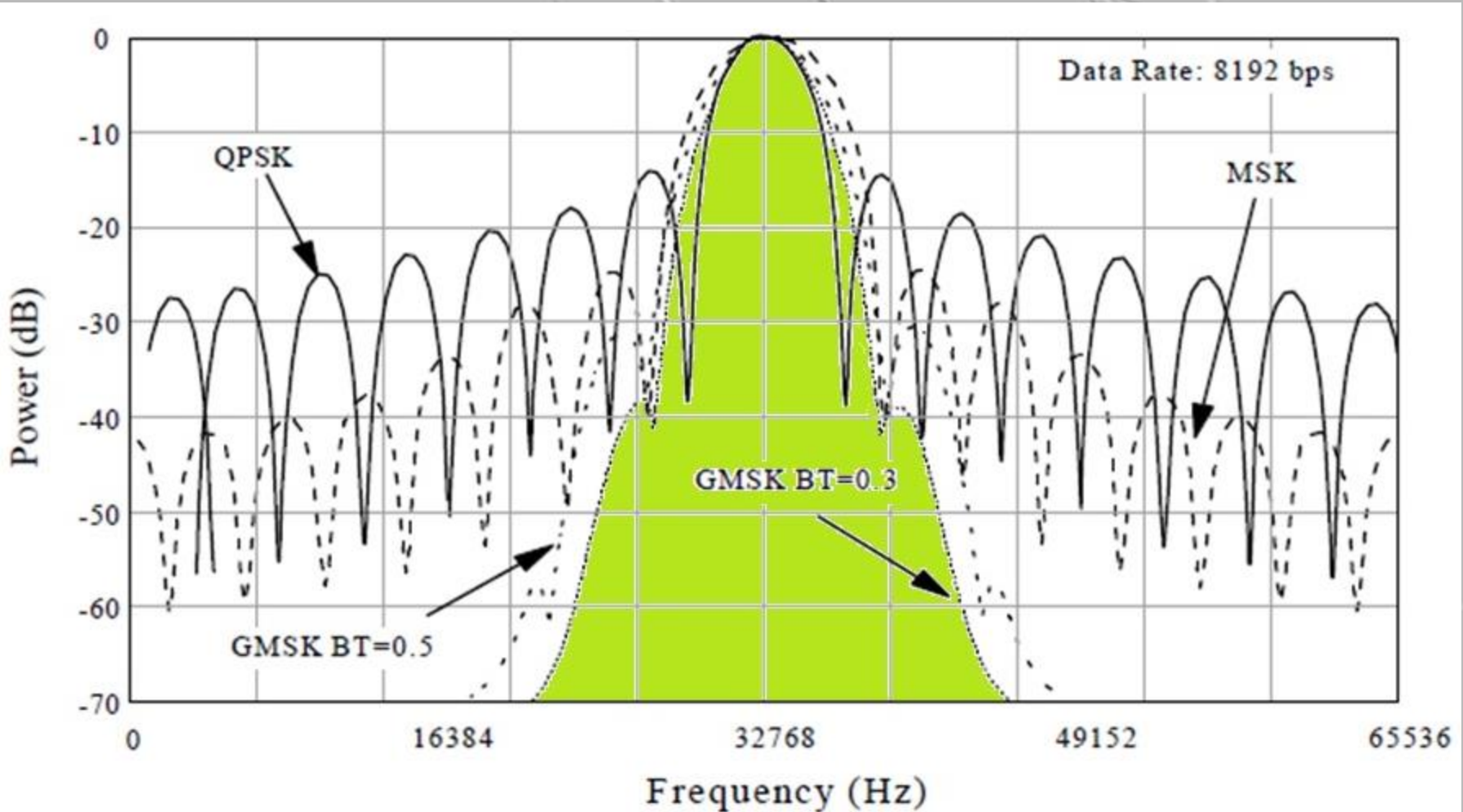
N-1	N	XOR	f
0	0	0	$f_C - f_T$
0	1	1	$f_C + f_T$
1	0	1	$f_C + f_T$
1	1	0	$f_C - f_T$



GMSK модулацията, която се използва във всички GSM стандарти (900, 1800, 1900) е разновидност на FSK (по-специално – MSK (Minimum SK) модулацията). При нея битовете “0” и “1” се предават с две честотни състояния около носещата честота f_C : $f_C \pm f_T$ (няма значение с коя честота кое състояние би могло да се предава). Преди модулацията с редицата се извършва логическата операция XOR (вж. таблицата горе) с цел да се намали броя на преходите между 0 и 1. След това се използва филтър с Гаусова форма за изглаждане на фронтите на импулсите на битовете. Така спектърът на модулираният сигнал се стеснява.

Пример: Минимизиран теснолентов спектър на GSM канал с GMSK модулация

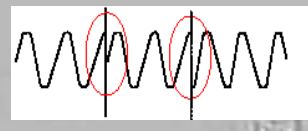
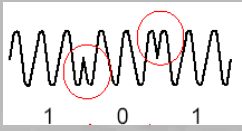
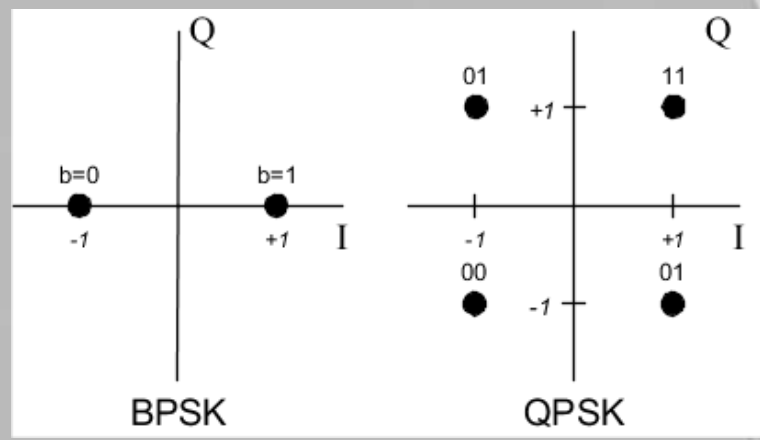
В резултат на Гаусовото филтриране съществено намалява ширината на честотния канал с **GMSK модулация**, и тя е значително по-тясна от канали с други модуляции (напр. QPSK).





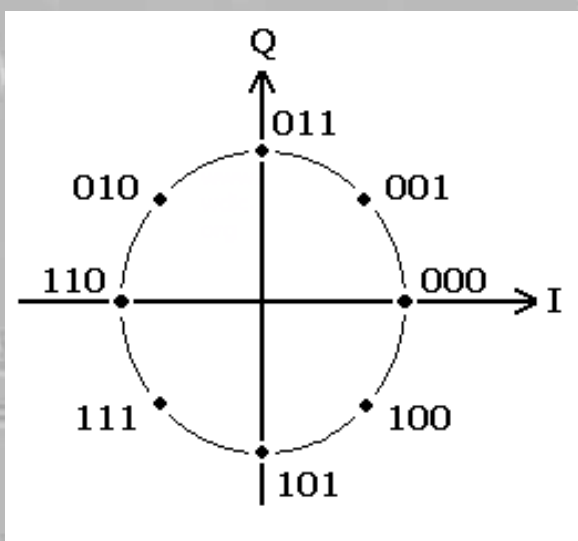
Фазови (PSK) модуляции

BPSK модуляция **QPSK модуляция**

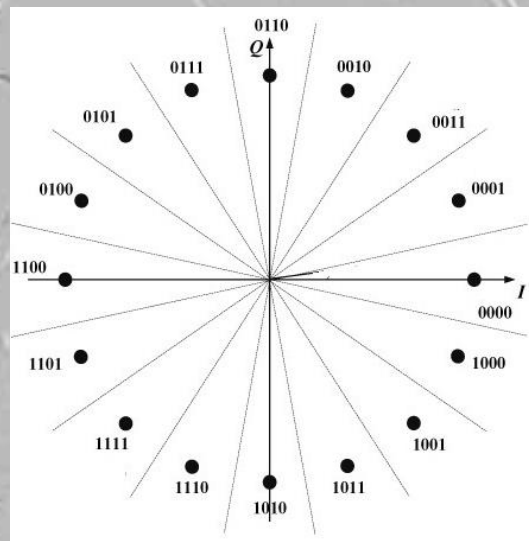


Най-простият тип фазова модуляция е BPSK (Binary PSK), при която битовете "0" и "1" се предават с две фазови състояния на носещия сигнал на 180° . Двойно по-бързо предаване на данни може да се осъществи при QPSK модулацията, където битовете се предават по двойки (00, 01, 10, 11) с 4 фазови състояния на носещата на 90° и т. н. (8PSK, 16PSK, 32PSK...). За съжаление, фазовите състояния започват да стават все по-неразличими при висшите типове модуляции и е необходимо отделните фазови състояния да се комбинират с амплитудни (напр. 16APSK вм. 16PSK).

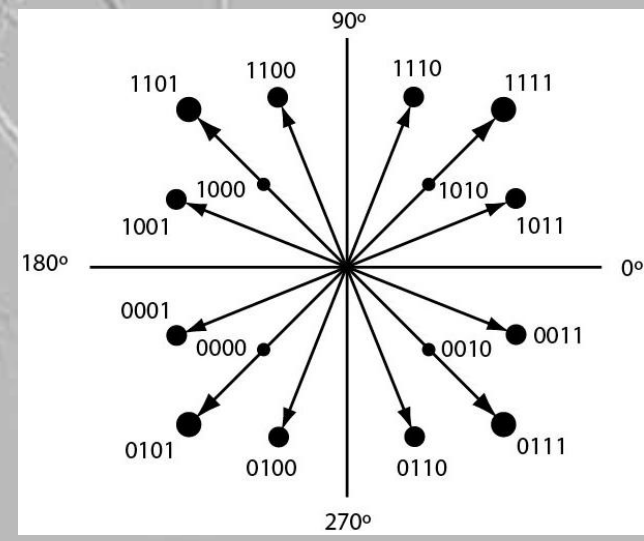
8PSK модуляция



16PSK модуляция

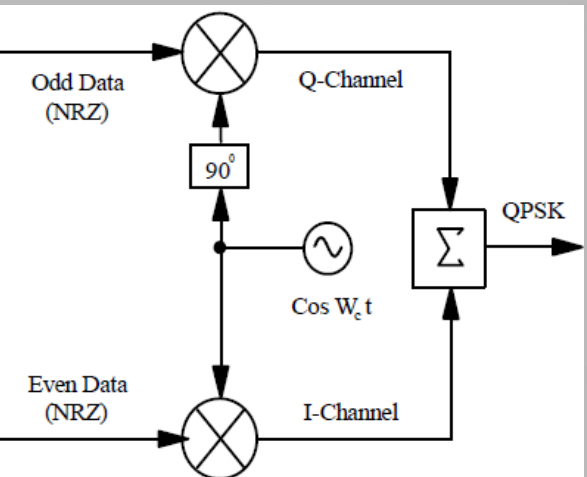


16APSK модуляция



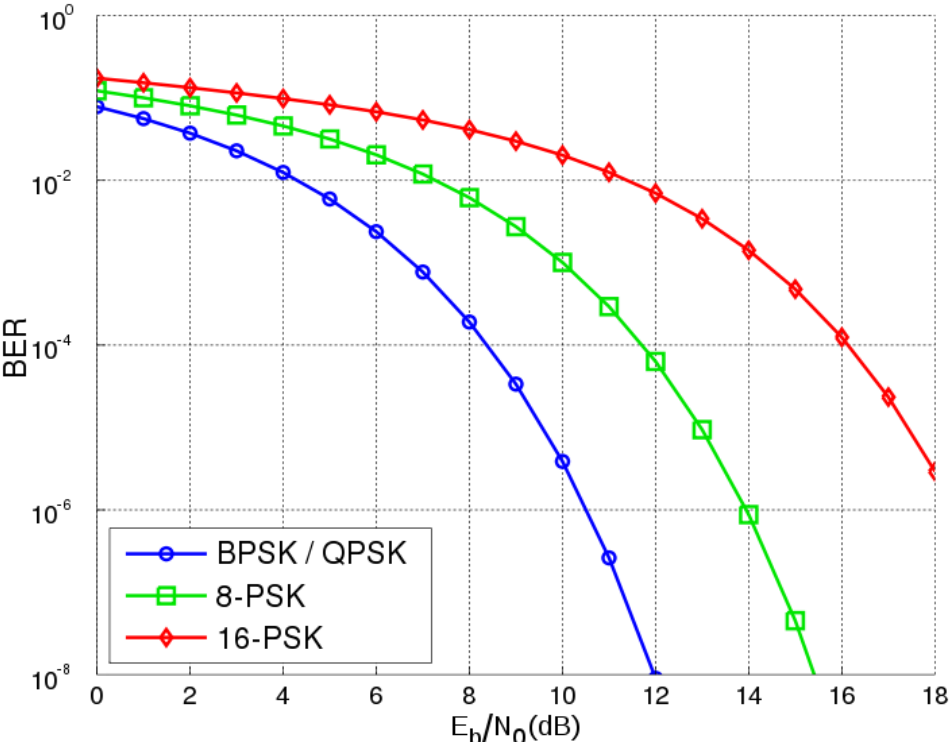


Сравнение между простите фазови модулации

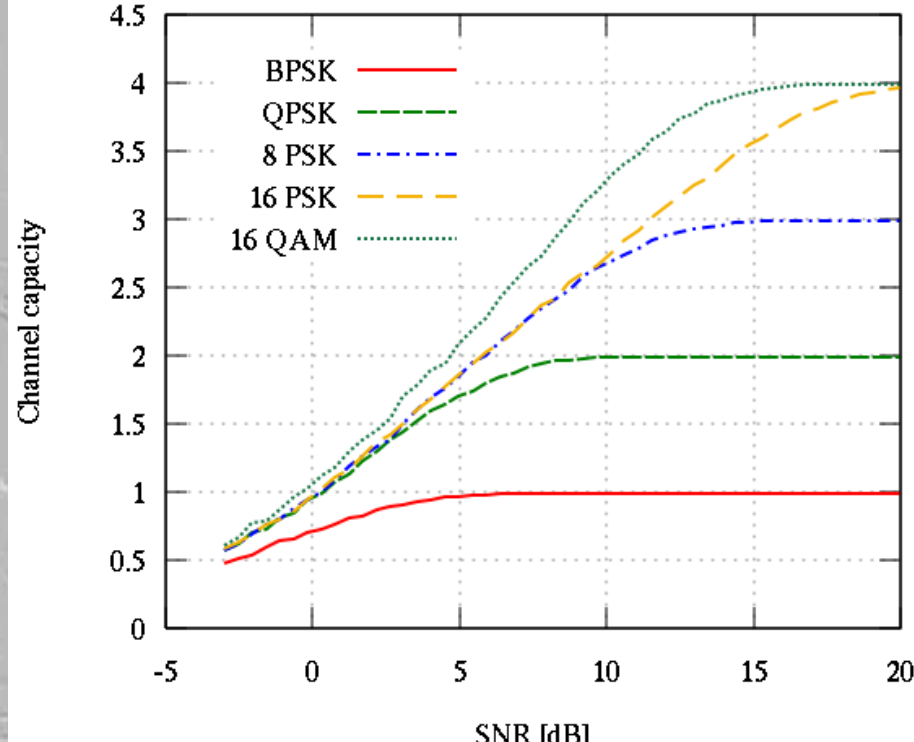


QPSK модулацията се състои от две прости независими BPSK модулации и следователно, има два пъти по-висока ефективност на използване на спектъра (капацитет). С нарастване на класа на модулацията, обаче, расте и необходимото отношение E_b/N_0 за един бит, да се постигне определен BER, както и отношението „сигнал-шум“ S/N за да се постигне определен капацитет на канала (вж. двете фигури по-долу).

BER v/s E_b/N_0 за прости фазови модулации



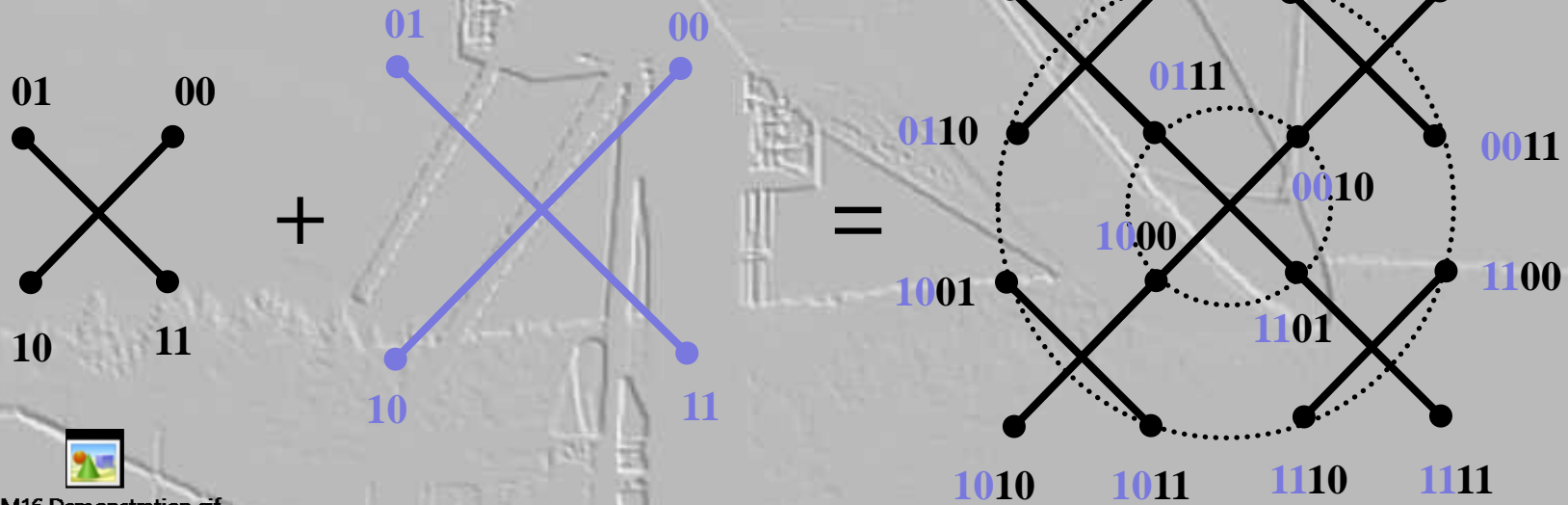
Channel capacity v/s SNR [dB] за прости фазови модулации



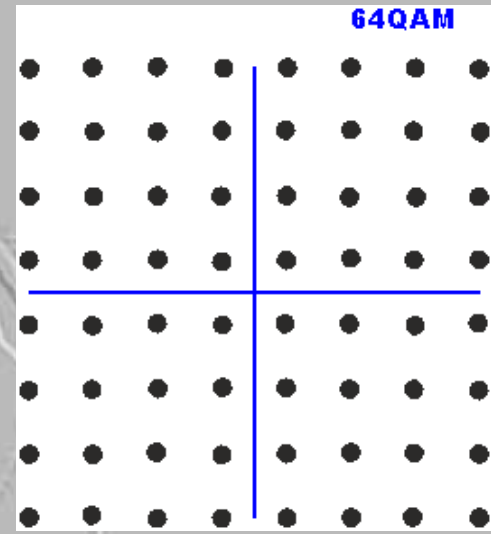
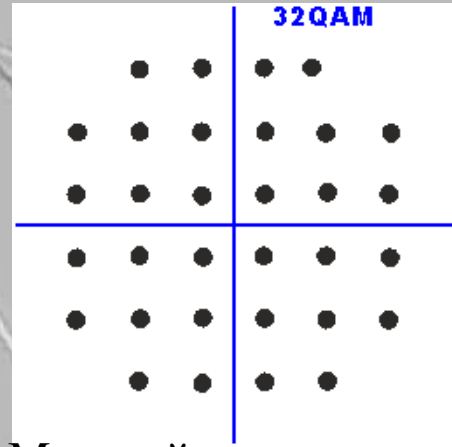
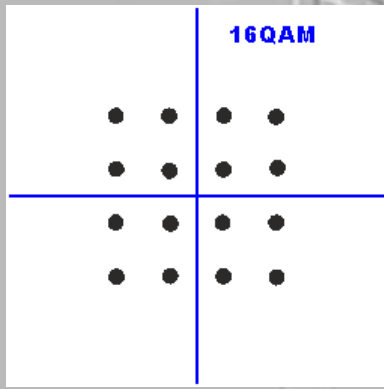
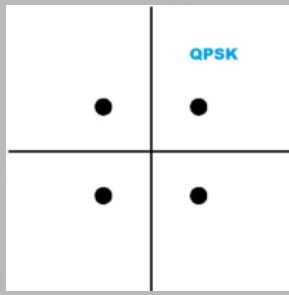


Формиране на 16QAM модулация

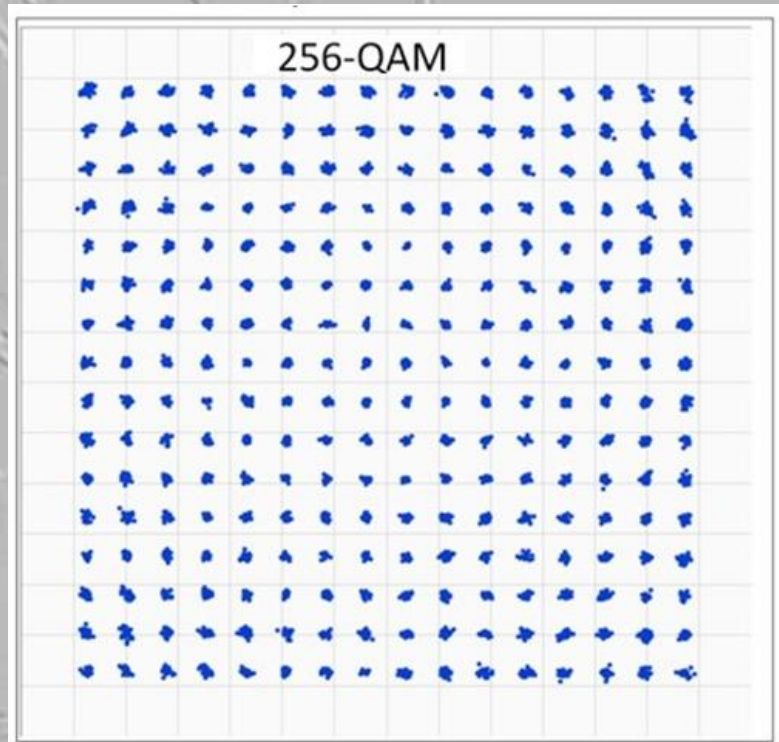
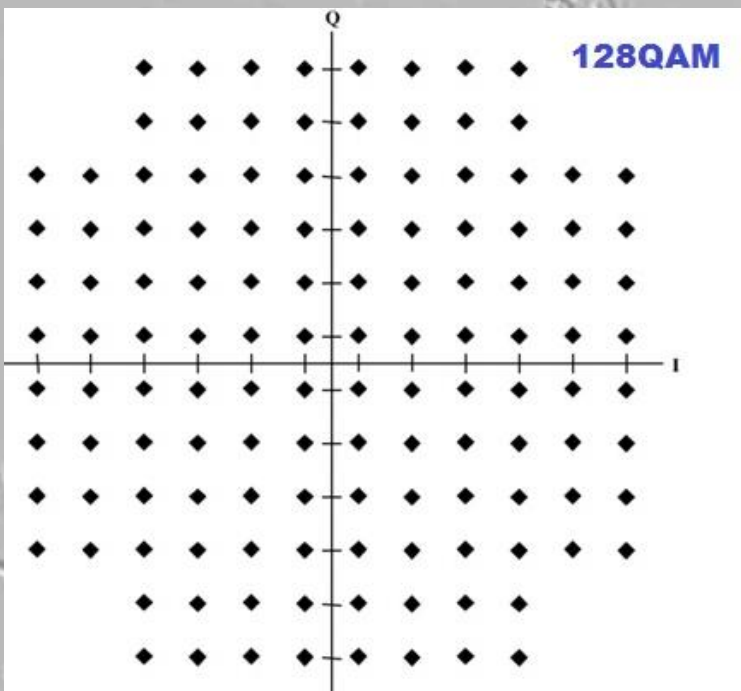
Значително повишаване на шумоустойчивостта на комуникационните сигнали се получава при едновременно въздействие на амплитудата и фазата на носещия сигнал. Така се получава т. нар. m-QAM (m – цяло число; броят на различните амплитудни и фазови състояния на сигнала), при което се предават едновременно $\log_2 m$ бита. На фигурата долу е показан пример за 16-QAM модулация за едновременно предаване на 4 бита в 16 различни състояния (12 фазови състояния на 3 амплитудни нива: 1, 0.745 и 0.33 от максималното. Този тип модулация има подобни характеристики на 16-PSK модулация, но показва по-добра шумозащитеност, защото съседните фазови състояния се различават и по амплитуда. 16-QAM модулацията се използва в жичните мрежи по DSL технологията (HDSL и ADSL), но също и в съвременните 4G LTE, WiMAX и др. системи, когато нивото на сигнала е високо.



Съзвездие на фазовите състояния в m-QAM модулации

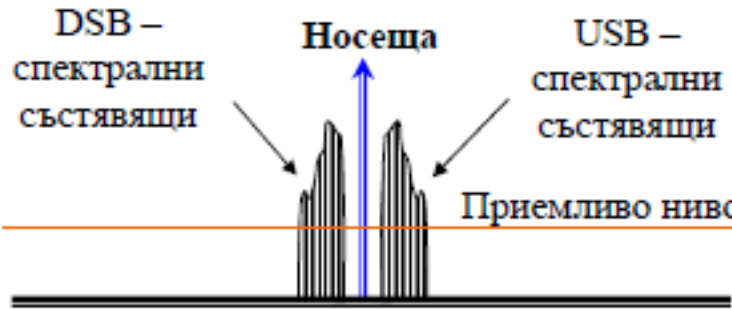


Модулациите от тип QPSK, 16QAM и 64QAM са най-използвани днес в 3G/4G комуникационните безжични стандарти.

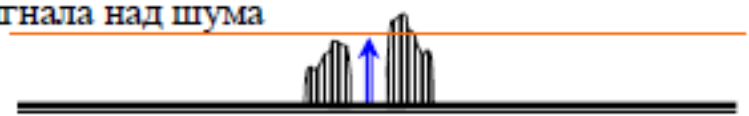




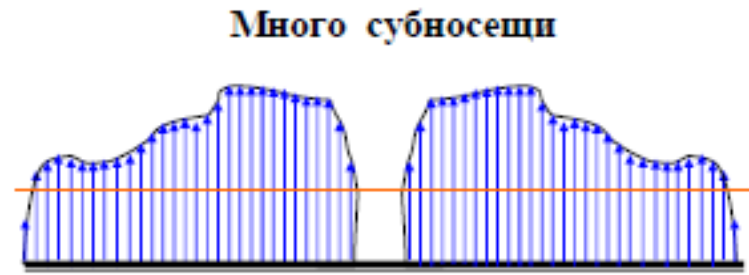
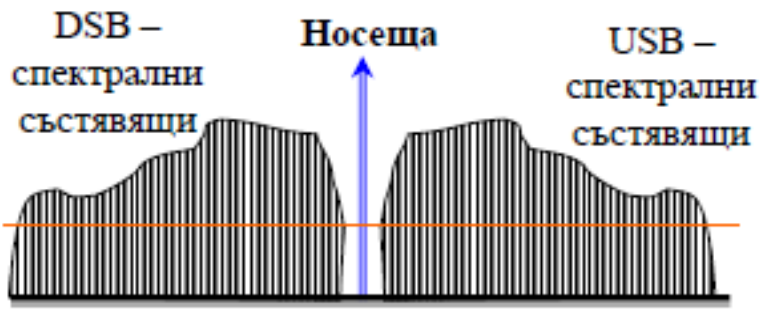
Проблеми при модулациите с една носеща честота. Решение: модулация с много носещи честоти



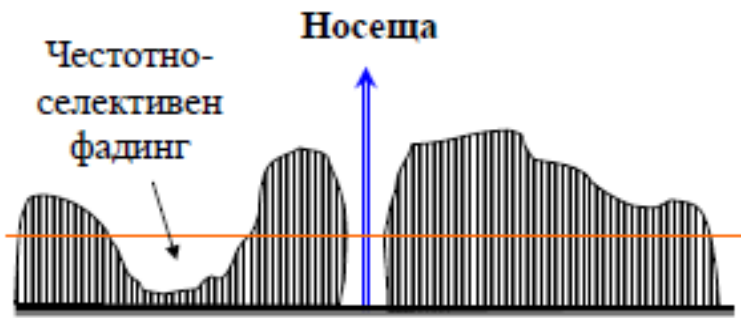
При паразитна интерференция със сигнал на същата или близка честота може да се наблюдава силен фединг и нивото на сигнала спада неприемливо много



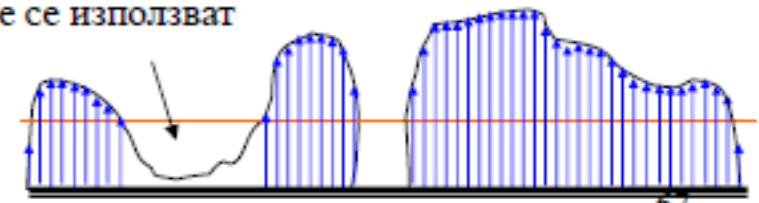
Теснолентова модулация с една носеща



Много субносещи



При фединг тези субносещи просто не се използват



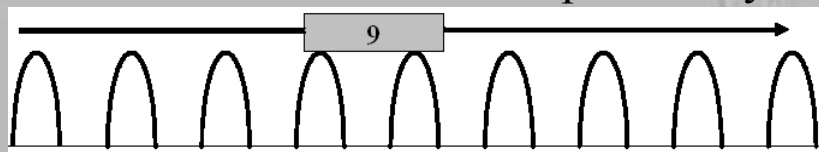
Широколентова модулация с една носеща

Модулация с много носещи (субносещи)

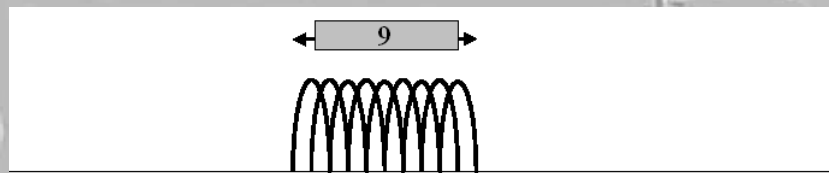
Неортогонални и ортогонални носещи честоти

Досега разгледахме модулационни техники, базирани на една носеща честота. При теснолентови сигнали с еднакви или близки по честота носещи могат да интерферират и това се оказва сериозен проблем в повечето комуникационни системи. При широколентовите комуникации се наблюдава честотно-селективен фединг.

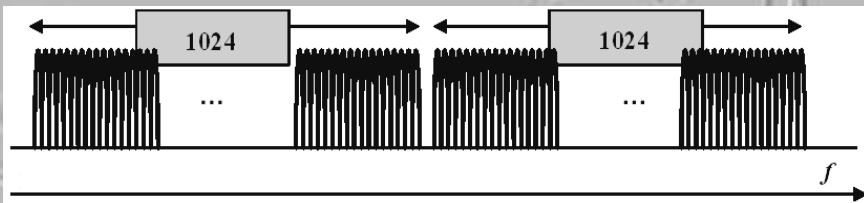
Идеята за модулация на цифров сигнал с помощта на много носещи е излъчваният поток от битове да се раздели на субпотоци и да се “носи” от много субносещи. Битовата скорост на всеки субканал е много по-ниска от общата; съответно честотната лента на всеки субканал е много по-тясна от общата. Броят на субносещите се избира така, че всеки субканал да има



9 субносещи със защитен интервал



9 ортогонални субносещи с припокриващи се спектри (измислен пример)



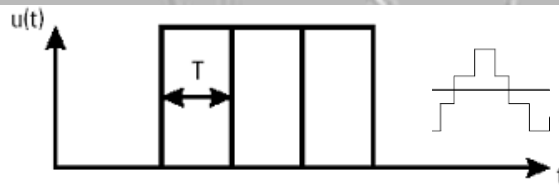
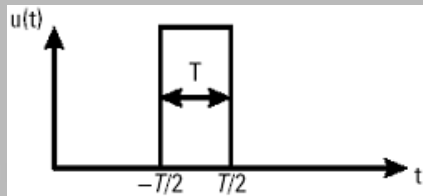
Реален пример: 1024 ортогонални субносещи във WiMax стандарта IEEE 802.16

честотна лента, която е по-малка от кохерентната лента и се може да се наблюдава само “плосък фединг” и силно подтисната междусимволна интерференция ISI. На фигурата е показан пример с 9 теснолентови субносещи, между които има защитен интервал за да се избегне взаимното влияние между тях. Много по-ефективно използване на спектъра се постига с “ортогонални” субносещи, чиито спектри се припокриват, но поради ортогоналността си сигналите си влияят минимално. За ефективна модулация броят на субносещите трябва да е голям – напр. във WiMax и LTE стандарта те могат да са от 512 до 2048 канала (например 1024 по 11 kHz) (препоръчва се броят им N да е кратен на 2^n).

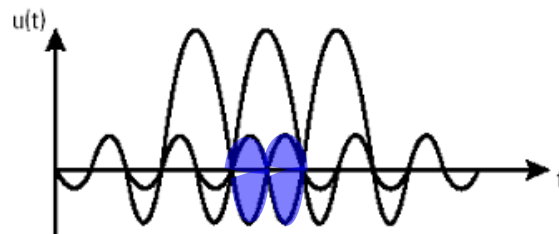
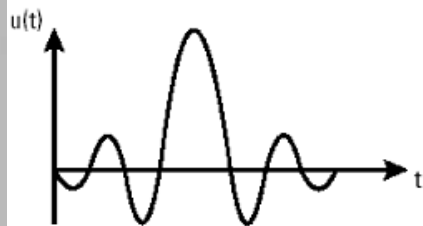


Междусимволна интерференция (ISI)

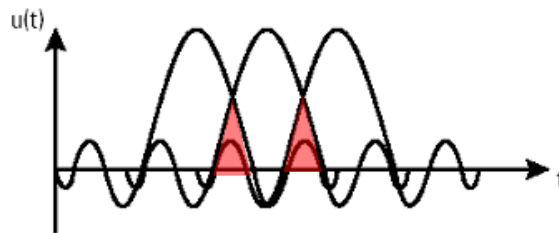
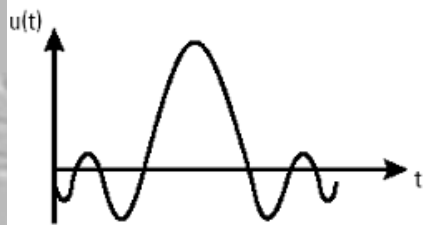
Междусимволната интерференция ISI е паразитен ефект при предаване на цифрови редици вследствие на разширяване на спектъра на сигналите след филтриране, при многолъчево разпространение, закъснение и др. Това е взаимно влияние между спектрите на съседни битове (вж. илюстрацията). Ако спектрите не са разширени, “опашките” на спектрите на съседните импулси (битове) се компенсират взаимно и ISI не се наблюдава. Ако, обаче, спектрите са разширени, главните части на спектрите започват да се припокриват и се появява ISI. Това може да доведе до грешно възприемане на битовете.



Идеален сигнал на 1 или 3 бита



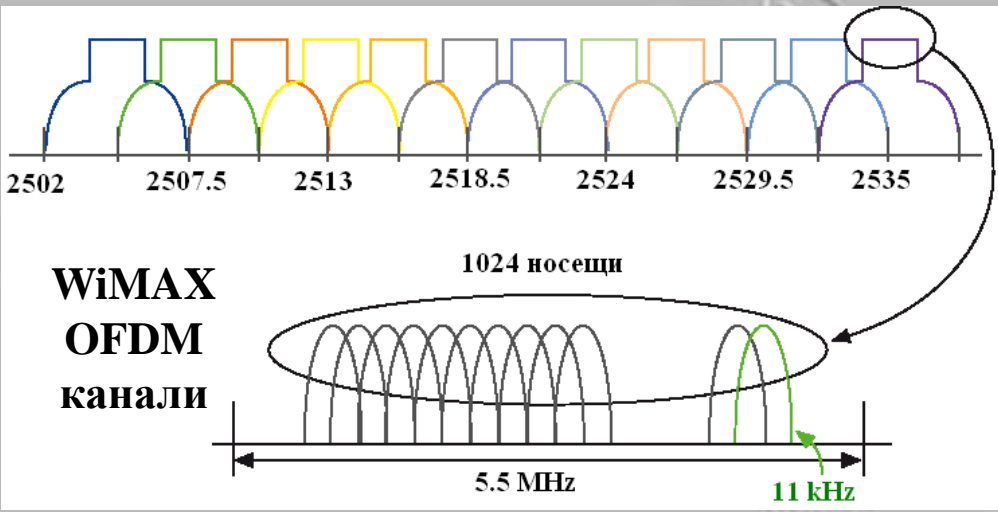
Реален сигнал в ограничена честотна лента (не се наблюдава ISI)



Приет разширен сигнал вследствие на филтриране, закъснение, фединг, Доплеров ефект и др. (наблюдава се ISI)



Ортогонални канали в LTE и WiMAX стандартите

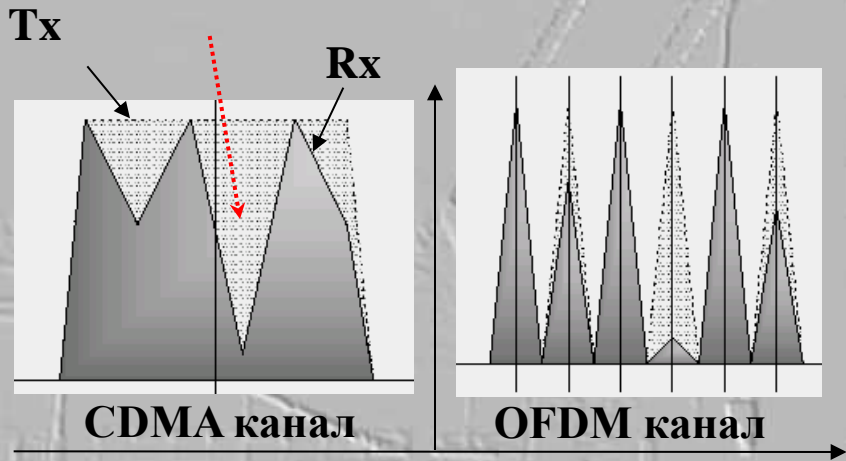


Много важна характеристика на 4G LTE и WiMAX стандартите е използването на т. нар. “ортогонални” честотни канали: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). WiMAX използва от 5 до 20 MHz широколентови канали, всеки с от 512 до 2048 теснолентови ортогонални подносещи, с които се обезпечават до 75 Mb/s споделена скорост (виж примера).

Горе е показан пример за 5 MHz WiMAX канали и 0.5 MHz защитна лента, или общо 5.5 MHz и 1024 подносещи по 11 kHz.

Широколентови сигнали има и в CDMA системите, но при тях може да се получи ефект на честотно-селективен фадинг (виж долу). Това изисква нивото на сигнала да се изравнява чрез сложен адаптивен изравнител.

Честотно-селективен фадинг



При OFDM каналите вълновата форма на общия сигнал се формира от множеството теснолентови ортогонални носещи. Ефектът на селективен фадинг се локализира около тясна област на от подносещи и така процесът на изравняване значително се опростява. Така ефекти на междусимволна интерференция и многолъчев сигнал се минимизират съществено.



Широколентов достъп чрез ортогонални теснолентови канали



В 3G/4G мрежите се използва един много ефективен метод за широколентов достъп, подобен на CDMA, но се реализира с помощта на множество теснолентови субканални, подобно на FDMA. Методът е известен като OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) и е разширение на т. нар. ортогонална модулация OFDM в технология на достъп на потребители до канала.

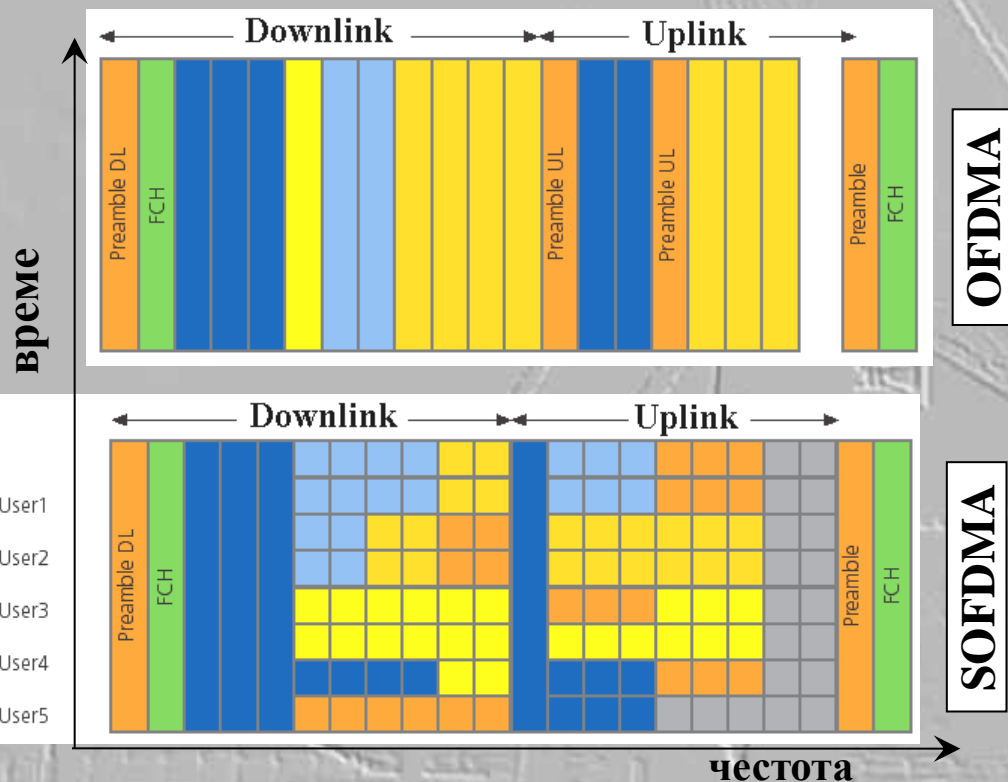
OFDMA е много гъвкава технология за достъп. По-долу е показана типична диаграма на разпределение на каналите за достъп при OFDM. Външно тя прилича на FDMA диаграма, но се различава от нея. OFDM поддържа достъп на специфични групи от субносеци за определен тип потребители. Всяка група представлява специфичен субканал и може да съдържа 1 или повече ортогонални субносеци. Даден потребител може да получи специфичен субканал в зависимост

от специфични условия на неговия трафик и използваната модулация.

Вариант е S-OFDMA методът (Scalable OFDMA), който осигурява допълнителна възможност за настройка на достъпа в зависимост от честотната лента на канала, който ще се ползва.

Така няколко потребителя могат да излъчват едновременно в еднакви субносеци, но без да възниква интерференция между тях, известна като MAI (multiple access interference).

Освен това може да се концентрира повече мощност само върху някои субносеци и така да се увеличи покритието.



OFDMA

SOFDMA



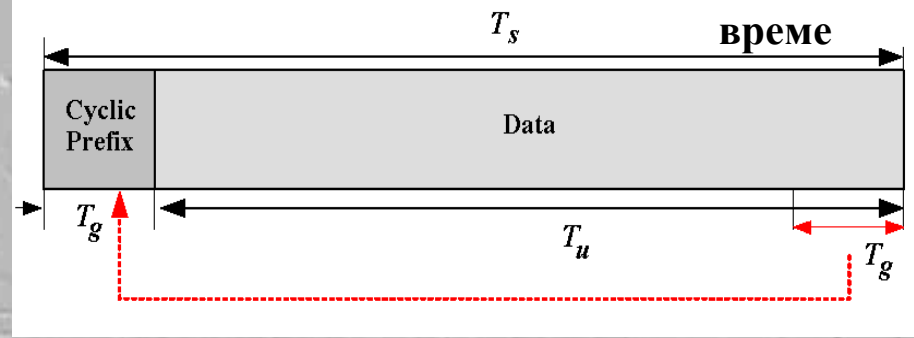
Субканалы и времеинтервали в OFDMA

Тук е илюстрирано разпределението на 3-те типа субносеци при OFDMA. Най-много са тези за данни, разделени от единични субносеци за пилотен сигнал, използван за синхронизация. Те формират субканалите. Има и субносеци за защитни ленти без излъчване на сигнал или за контролни цели.



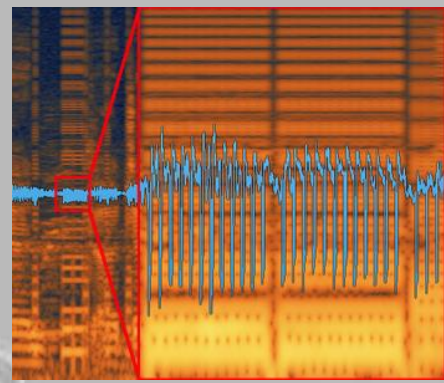
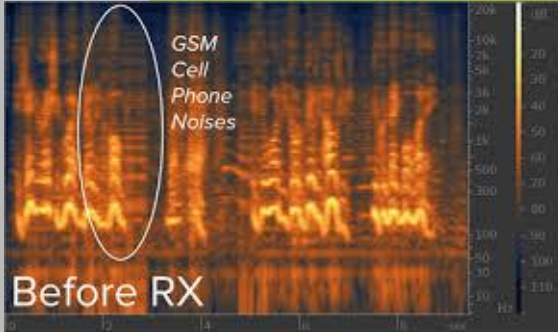
Това е характерно и за двата дуплексни канала downlink и uplink. Минималният честотно-времеви ресурс във всеки субканал е един времеинтервал = 48 тона данни (субносеци). Как се разпределят субносеците по субканалы? Има 3 начина: 1) чрез псевдо-случайно разнасяне по целия честотен обхват (FUSC); 2) чрез разнасяне по отделни групи от субносеци (PUSC) и 3) чрез групи от съседни субносеци. Първите 2 начина се използват в мобилния WiMax/LTE. Начин 3 се използва при неподвижни потребители, използващи адаптивна модулация (AMC). Долу е показана структурата на един времеинтервал. При OFDMA системите потокът от данни се разделя на субпоточи с намалена битова скорост, които се модулират отделно на ортогонални носещи. Тогава продължителността на 1 бит расте, а това минимизира ефектите на закъснение и многолъчевост на сигнала. Освен това, тук се въвежда техниката CP (Cyclic prefix), чрез която напълно се елиминира междусимволната интерференция. CP (вж. долу) е повторение на последния образец от порцията данни в даден блок, който се "прикачва" в началото на блока данни (вж).

Така се преодолява междублоковата интерференция, чиито източник е многолъчевия сигнал. В градска среда закъснението е ~5 μ s. Ако продължителността на 1 бит се избере 100 μ s, а CP интервалът T_g ~10 μ s, методът OFDMA може да елиминира паразитните ефекти на многолъчевия сигнал в града.





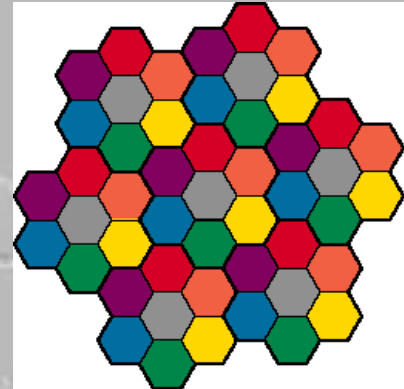
OFDMA достъпът увеличава ефективността на преизползване на честотата (frequency reuse)



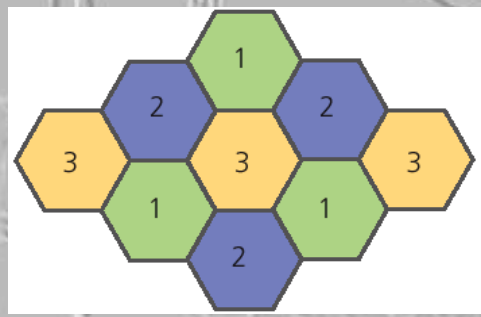
GSM сигнали, повлияни от интерференция

комуникационни мрежи с теснолентови канали се влияят силно от интерференцията. Затова в клетъчните системи се използва понятието „Reuse factor” D/R, което при GSM е ~4.6. Но и това е доста неефективно, особено за новите поколения 3G/4G мрежи. При тях съществено нарастват изискванията за ефективно използване на спектъра и противодействие на многолъчевостта и междусимволната интерференция. Решение на проблема е използването на OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) метод за достъп който не се нуждае от “преизползване” на честотата, както в GSM (reuse factor ~1-3 вместо 4.6, както е в GSM). Най-често клетката се дели на 3 части, като във всяка 120° област се ползват различни честотни канали.

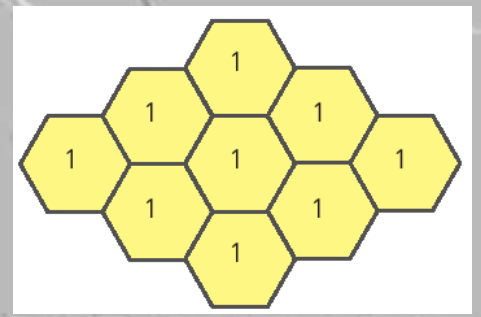
D/R ~4.6 при 2G GSM TDMA



D/R ~1/3 при 3G GSM WCDMA



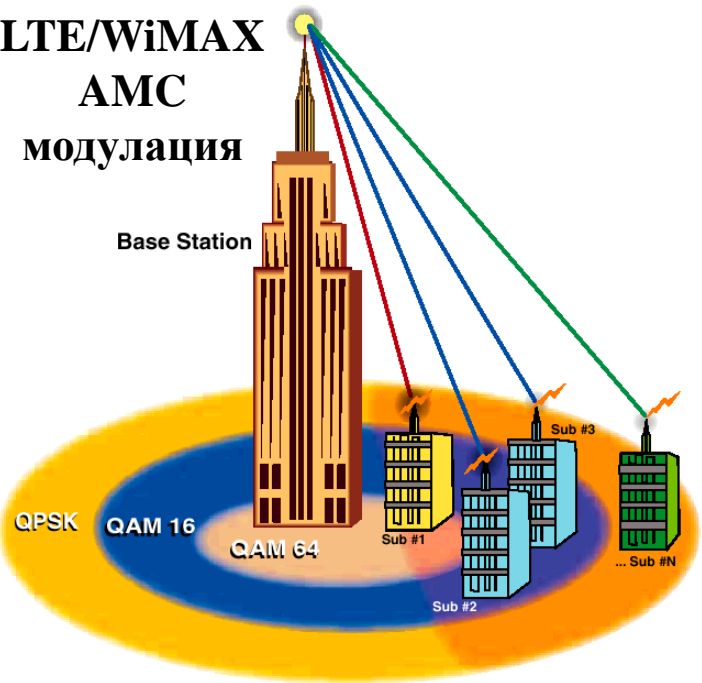
D/R ~1 при 4G LTE/WiMAX OFDMA





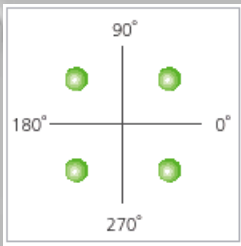
Адаптивна модулация в LTE/ WiMAX мрежите

LTE/WiMAX AMC модулация

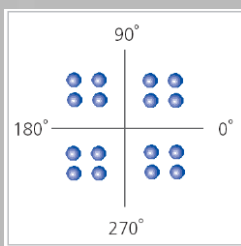


Друга важна характеристика на 4G LTE/WiMAX е прилагането на специален тип адаптивна модулация на сигнала AMC (Adaptive Modulation and Coding) с цел да се оптимизира скоростта в Mb/s от условията на многолъчево разпространение на сигнала, интерференция и шум (вж. фигурата). Голяма скорост се постига с модулации от висш тип – на-пример 64-QAM или 16-QAM. Те, обаче, мога да се използват на по-близки разстояния до антената, където има пряка видимост и отношението сигнал-шум S/N е достатъчно високо. На далечни разстояния, където S/N се влошава, се използва по-нисш тип модулация, напр. Стандартната QPSK, но скоростта намалява. Комбинацията OFDMA достъп до канала с адаптивна AMC модулация дава предимства пред обикновената WCDMA 3G-технология.

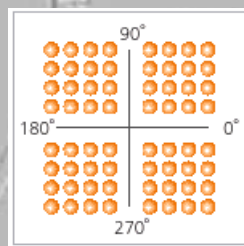
Пример за OFDMA достъп



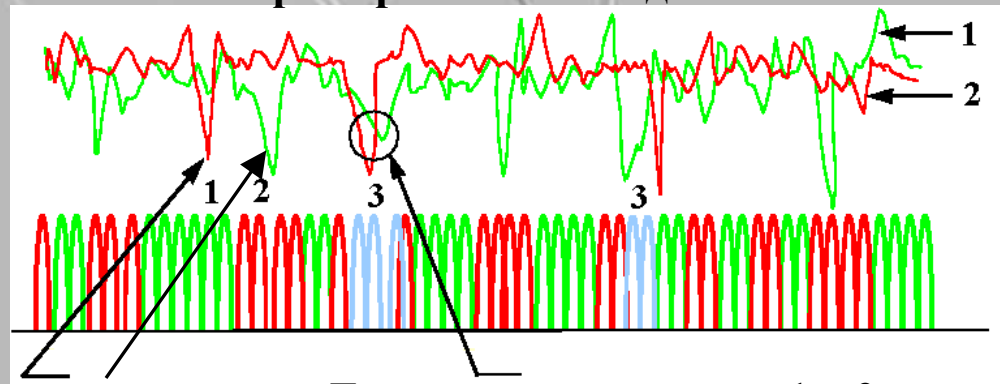
QPSK



16 QAM



64 QAM



Тук сигналът на потребител 2 има дълбок фединг и той избягва канала; подобно и за потребител 1

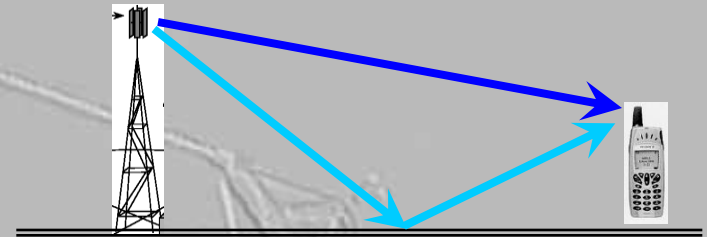
Тук и двата сигнала на 1 и 2 имат дълбок фединг и каналът се използва от трети потребител 3



Основни физични явления при разпространение на сигнала

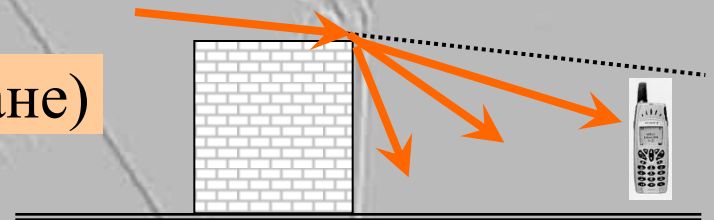


1. Затихване от разстоянието както $1/d^2$

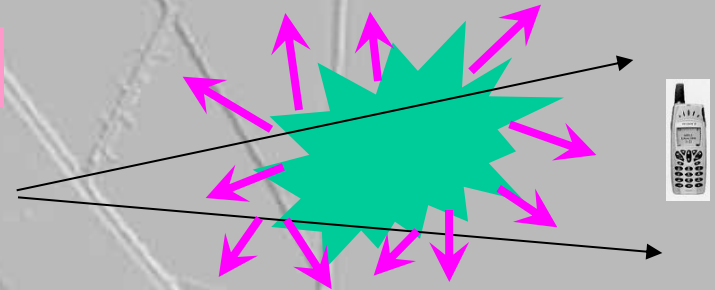


2. Отражение

3. Дифракция от остри ръбове (засенчване)

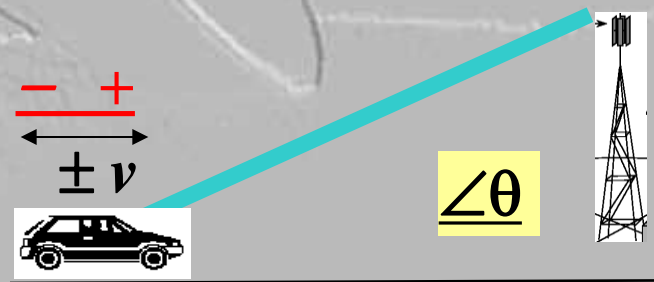


4. Многолъчево отражение (разсейване)



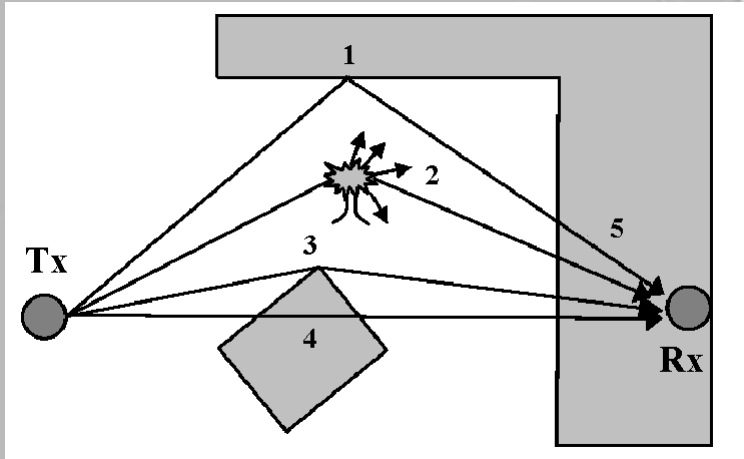
5. Доплеров ефект при движение

$$f_D = \pm v/\lambda \cos\theta$$



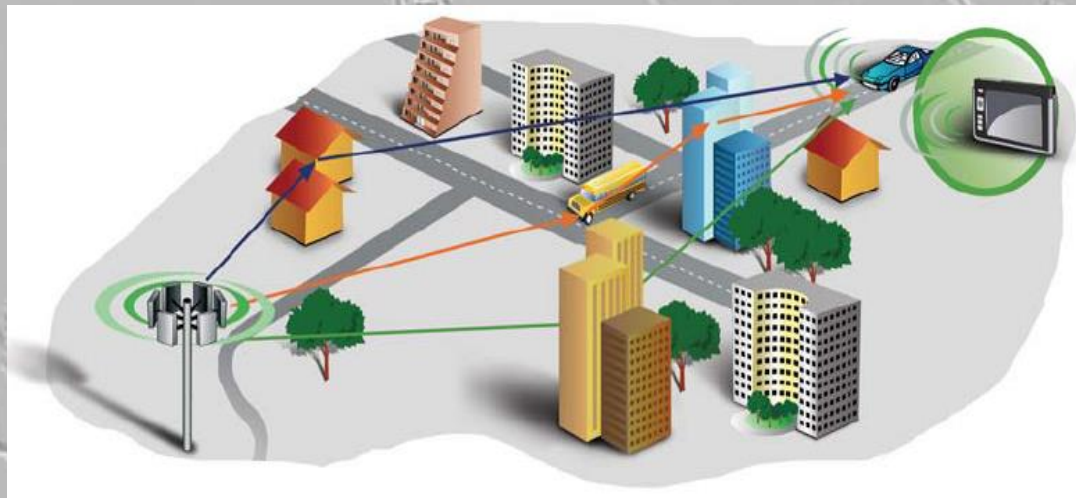


Какви ефекти се наблюдават в мобилните комуникационни мрежи при разпространението на сигнал?



Типична мобилна комуникационна среда

В мобилните мрежи се наблюдава най-сложната възможна комуникационна среда, наречена “мобилен радио-канал”. Тя включва директни и отразени лъчи, дифракция от остри и загладени ръбове, “бърз” и “бавен” фединг, разсейване и многолъчево разпространение, закъснение на сигналите и разширяване на честотния спектър и др. Предавателите и приемниците, които работят в такава среда, трябва да имат специални характеристики, които да минимизират влиянието на тази сложна среда.



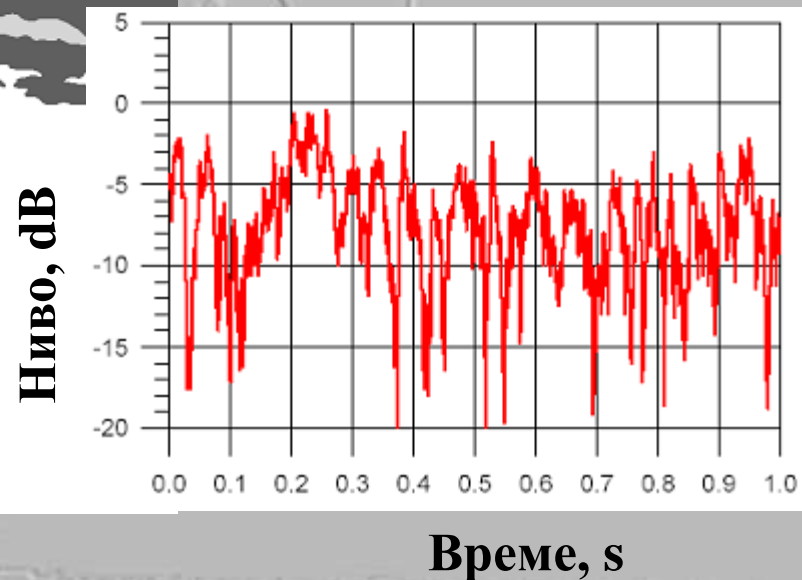
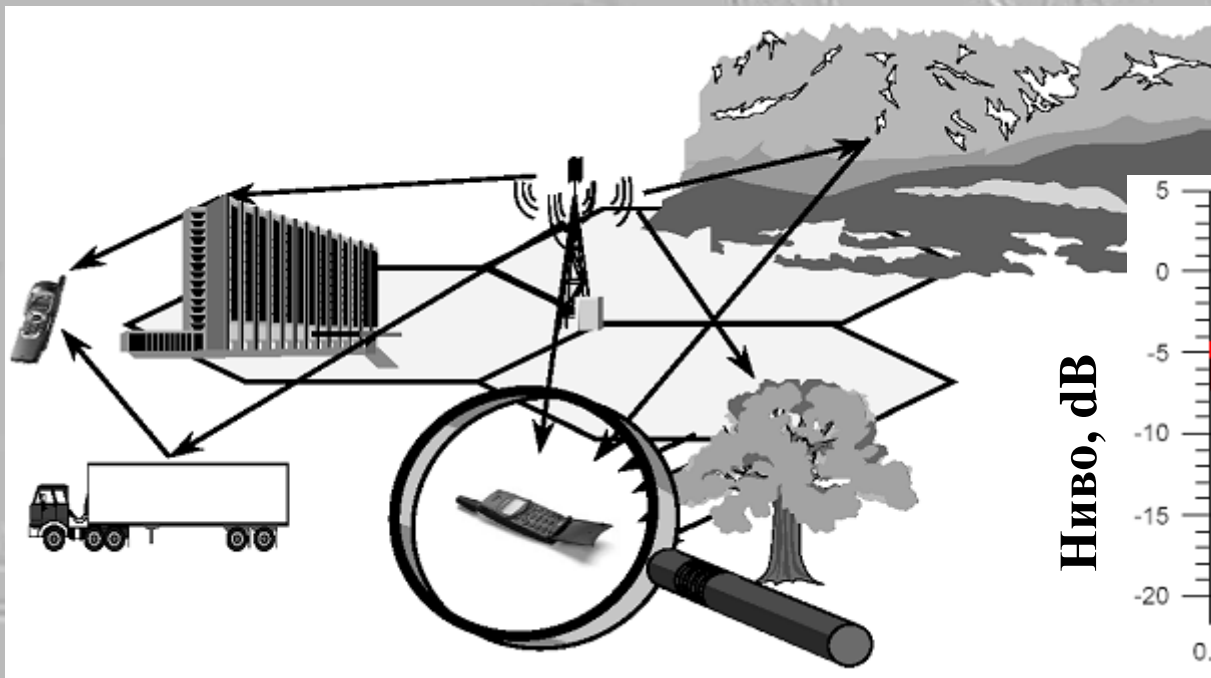
urban radio propagation.exe

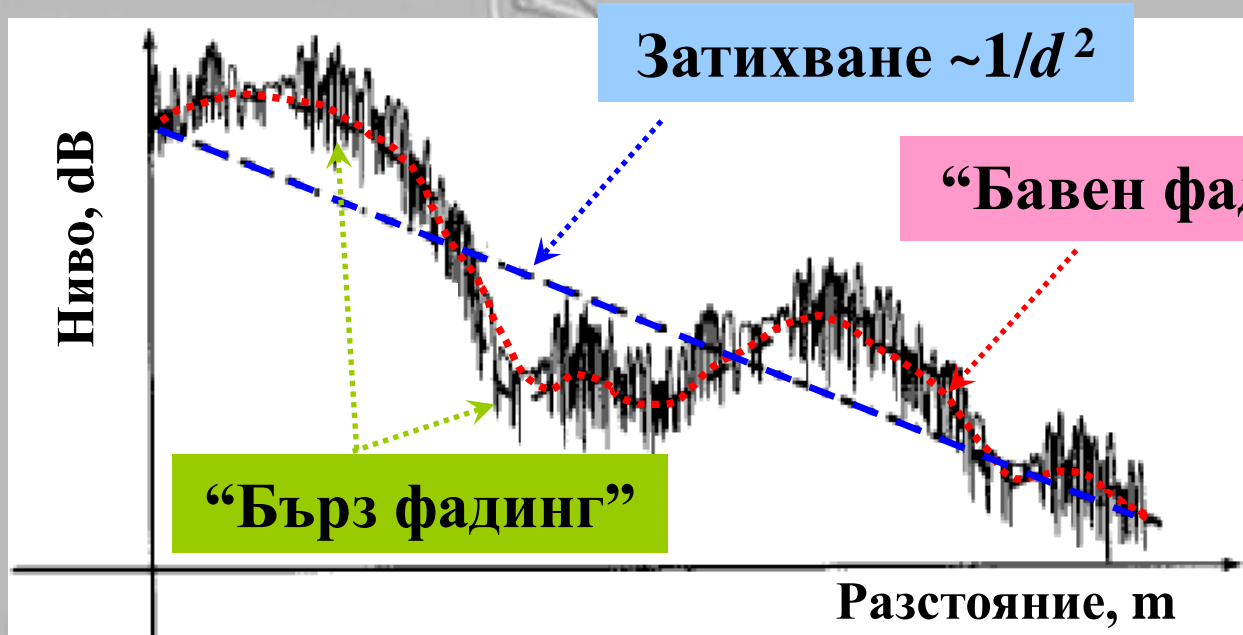
Кратка анимация за разпространение на сигнали в градска среда

Среда с неподвижни и подвижни обекти, които влияят на сигналите

Основни наблюдавани ефекти в мобилните радиоканали?

- ❖ По-бавно или по-бързо изменение на нивото на сигнала вследствие на интерференчни и дифракционни явления – “бърз” и “бавен” фединг
- ❖ Случайни честотни модуляции в резултат на бързо движение
- ❖ Случайно закъснение (ехо) при пристигане на голяма серия от многолъчеви сигнали
- ❖ Статистическо поведение на характеристиките на радиоканала





- ❖ Затихване от разстоянието (6 dB или 4 пъти на всяко удвояване на разстоянието). Това затихване е неизбежно и е свързано с разширението на фронта на вълната.
- ❖ Бавен фединг (засенчване): максимуми през 10-100 m и затихване от максимум до минимум $\sim 4-10$ dB; свързан е с дифракция от ръбовете на големи препятствия с размери $D \gg \lambda$ (сгради, хълмове и други теренни препятствия).
- ❖ Бърз фединг: максимуми през $\lambda/2$ (т. е. ~ 17 cm при 900 MHz) и голямо затихване от максимум до минимум до 30-40 dB; свързан е с разсейването на сигнала от малки обекти с размери $D \sim \lambda$ и възникването на “многолъчевост”.

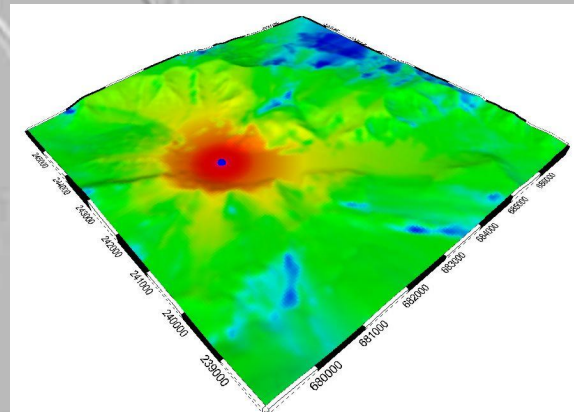
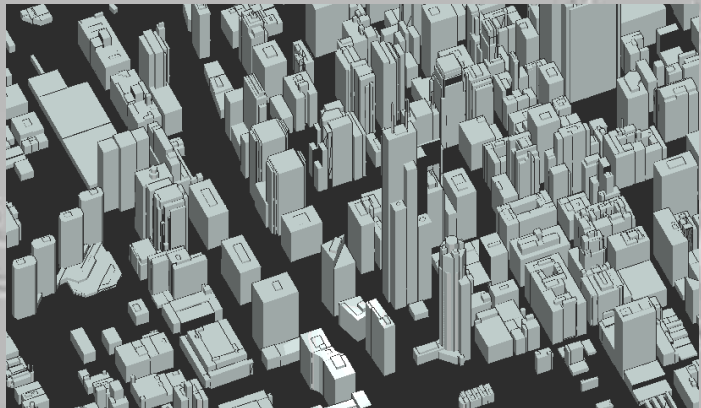
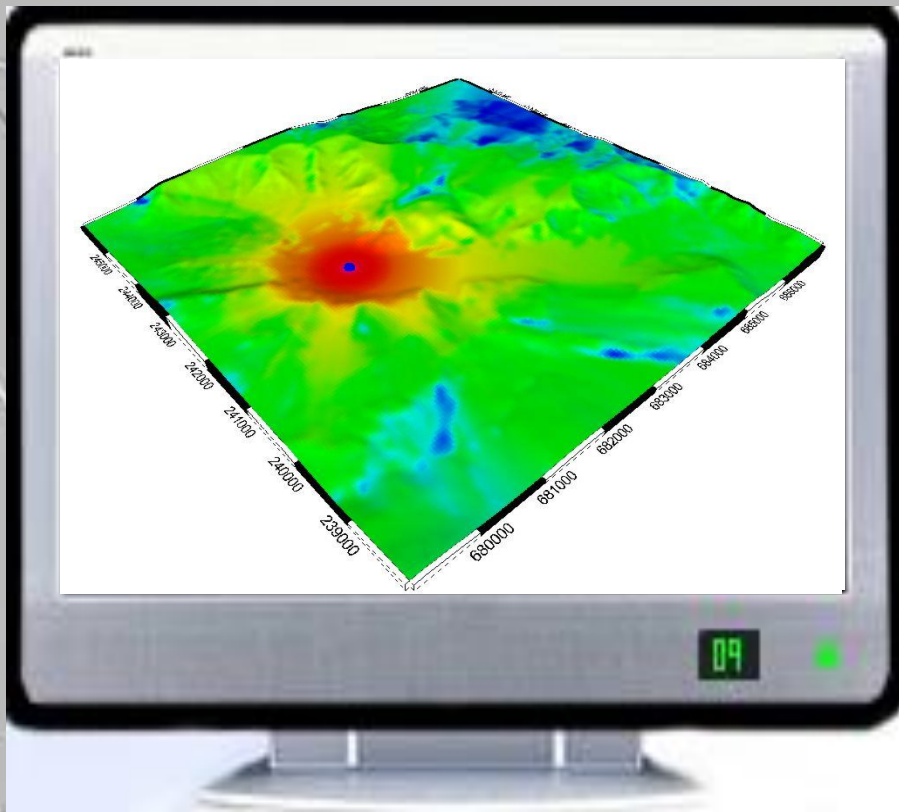


Илюстрация на различни типове мобилни радиосреди

Градска среда

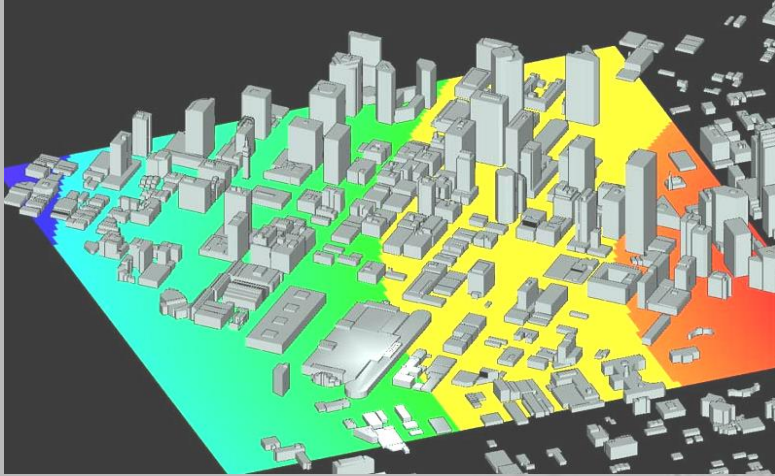
Офис среда

Извънградска среда

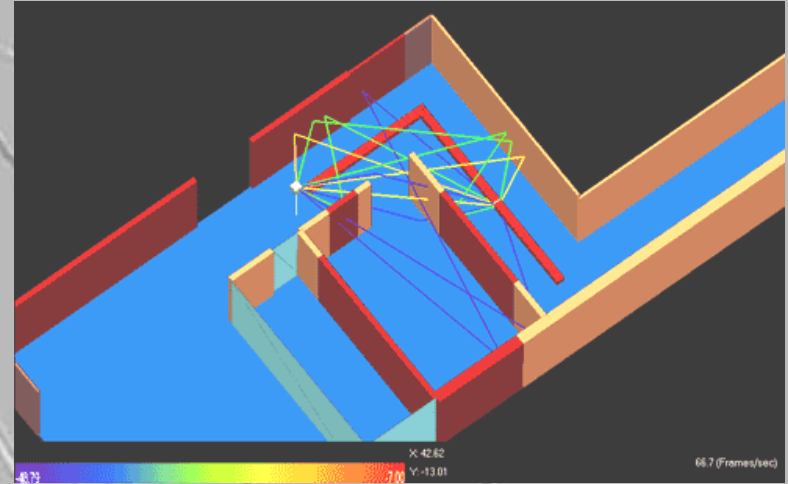




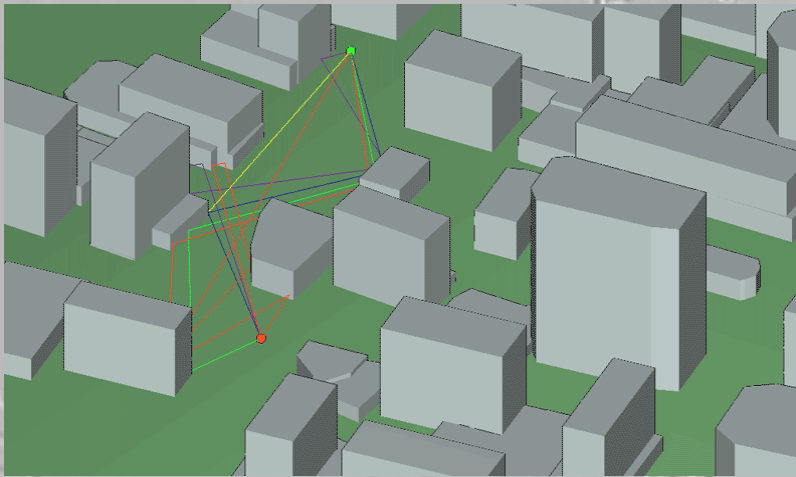
Примери за модели на радио-среди



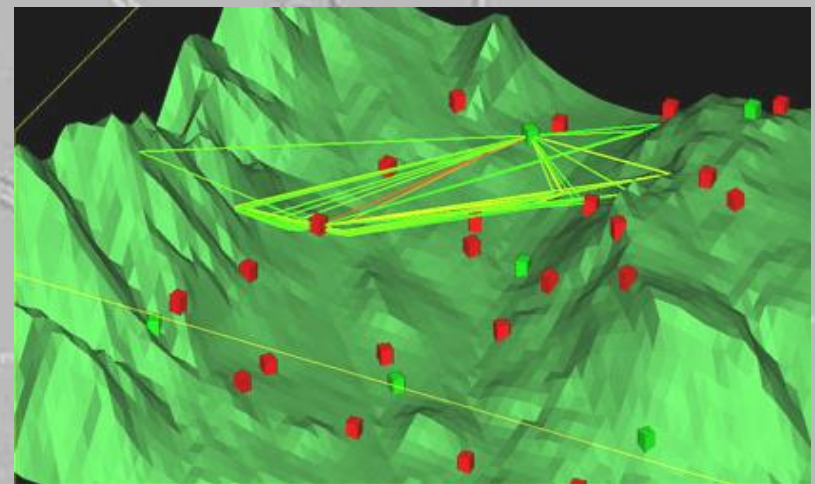
Емпирични модели



Офис среда



Ray-Tracing модели: Градска среда

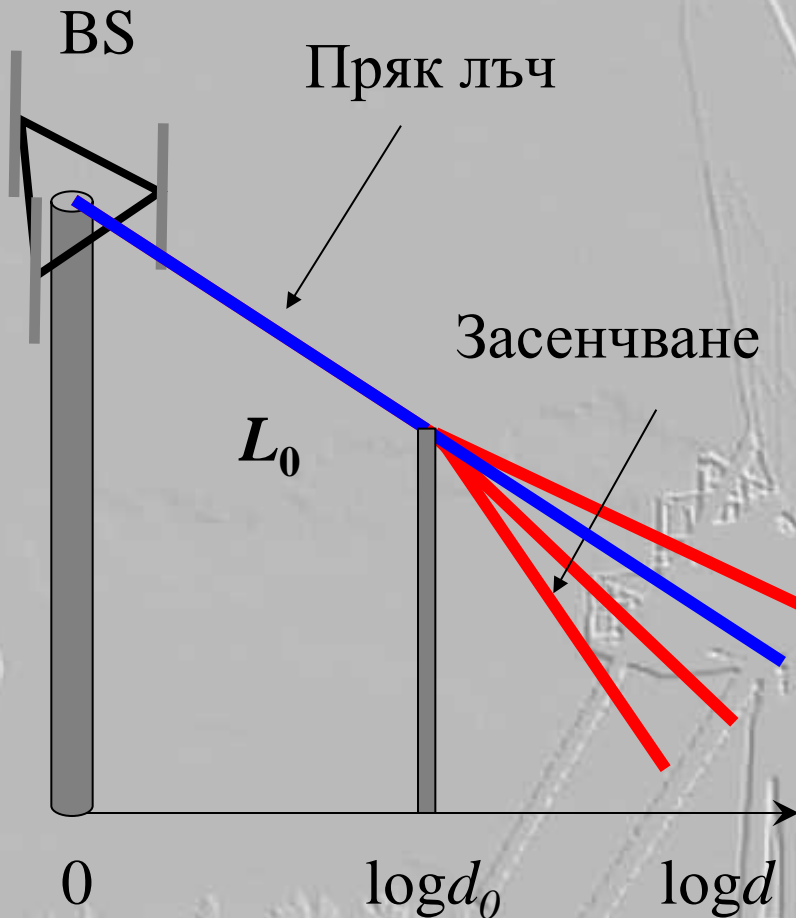


Планинска среда

Най-лесната емпирична оценка

Емпирична формула за затихването L на сигнала при $d > d_0$:

$$L = L_0 / (d/d_0)^\gamma$$



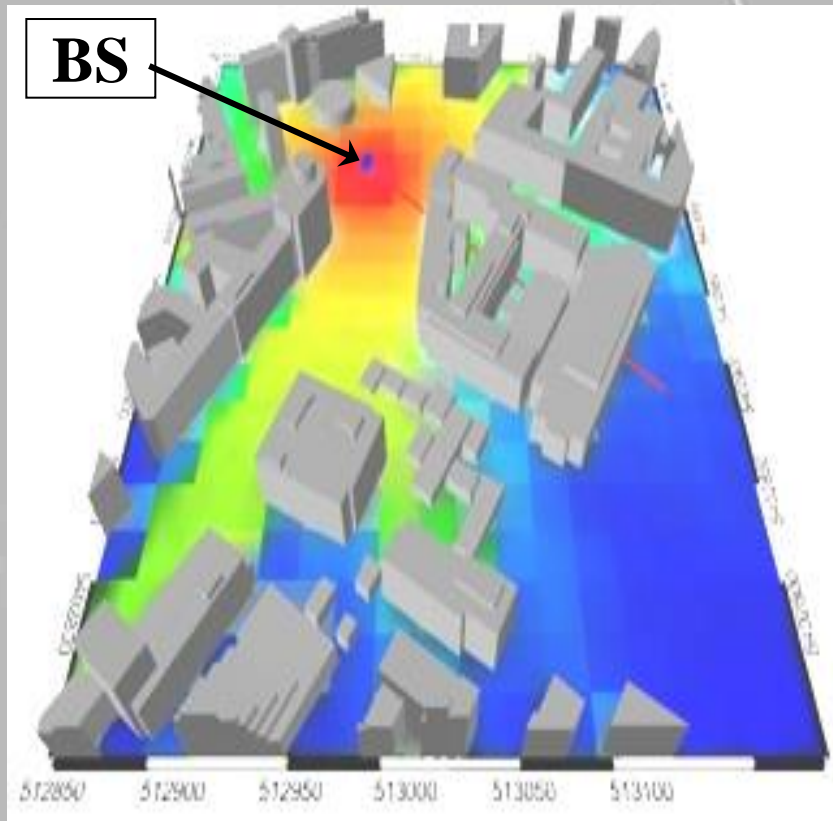
където разстоянието $d_0 \cong (h_{BS}h_{MS})/\lambda$ се мени от десетки до стотици метри в зависимост от височината на антените, L_0 е затихването при $d = d_0$, а коефициентът на затихване γ има различни стойност в зависимост от типа на средата:

- $\gamma = 2$ 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 “тиха зона”;
- $\gamma = 4 - 6.5$ в офиси извън “тихата зона”;
- $\gamma = 2 - 3$ в големи халета

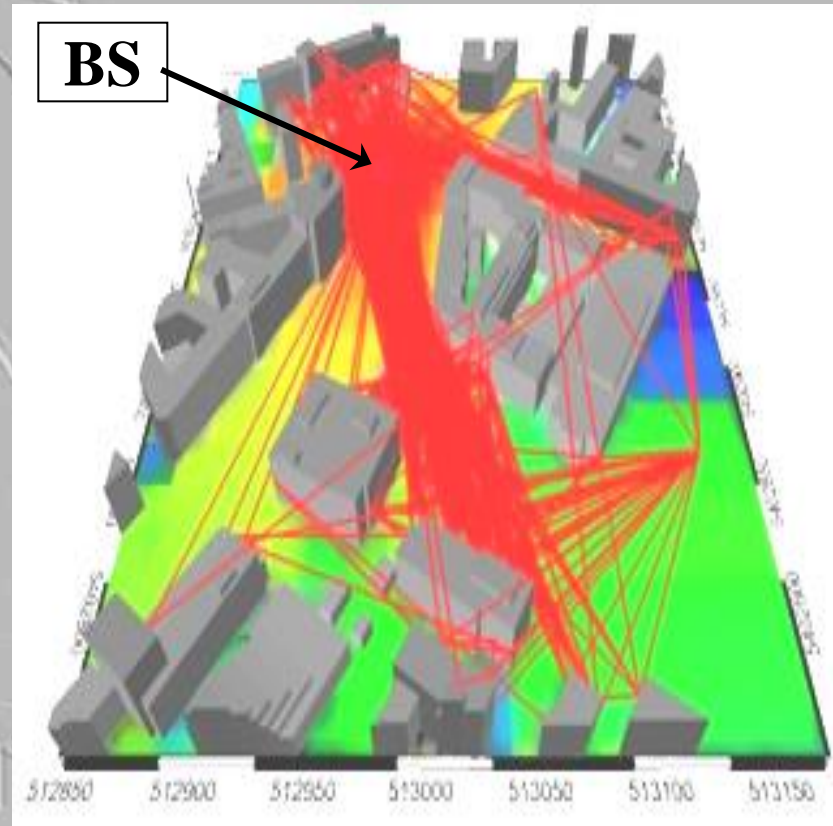
Предложената тук формула за оценка е доста груба и дава само най-обща представа какво ниво може да се очаква далече от антената на базовата станция. В конкретни случаи отклонението от действително измереното ниво може да се окаже значително.



Модел на Okumura-Hata



Модел на лъчево трасиране



Емпиричният модел дава само принципна оценка за загубите в дадена област (обикновено резултатите за загубите са завишени). Софтуерният модел се базира на конкретни ефекти в средата, която е представена реалистично чрез картата на района и характеристиките на сградите и другите постоянни обекти в него. Методът е приложим за градски и плътни градски области, за извънградски и планински области, както и вътре в сгради и офиси. Този метод дава много близки до действително измерените данни за нивото.



Съвременен подход: 3D модели на покритието



BS

Съвременното 3D проектиране на “покритието” със сигнал на всяка клетка на дадена мрежа в специфични условия е много важно предварително условие за стартирането на работата на мрежата. Разпределението на конкретното ниво на сигнала се дава както в хоризонтални равнини, така и във вертикална равнини (по височината на сградите). Така много бързо могат да се отчитат промени и да се реструктурира мрежата, да се разделят клетки на по-малки и да се променя режимът ежедневно или в зависимост от часовете-пик.

Случайни закъснения при многолъчев сигнал

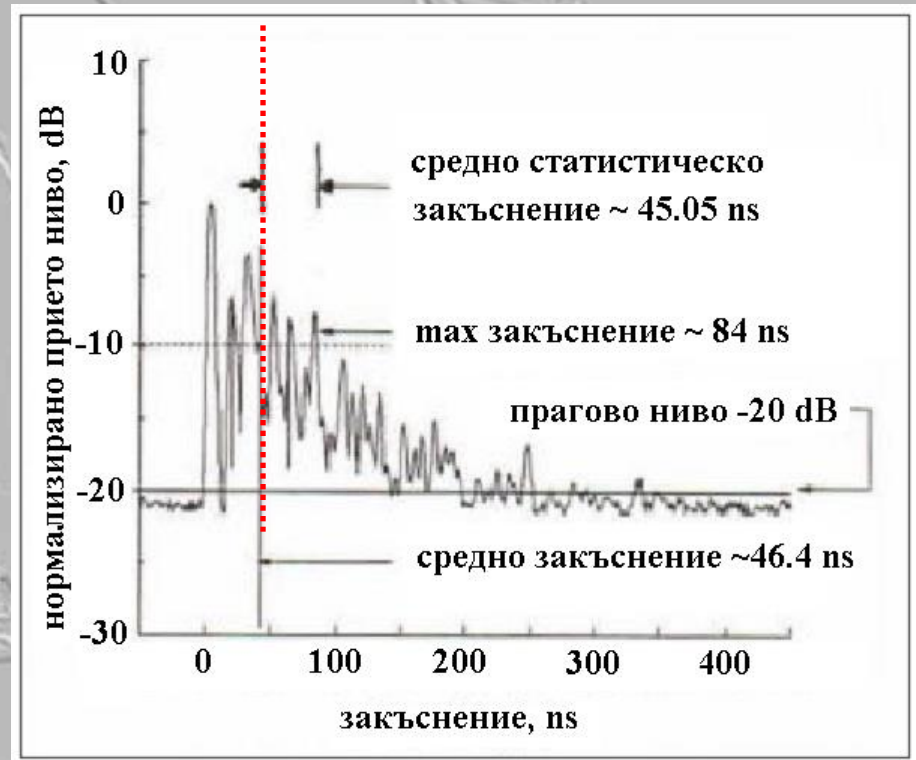
Случайните закъснения (ехо) в се свързват с различното време на пристигане на сигналите в приемника в многолъчевия комуникационен канал (вж. фигурата). Дефинира се средно време за закъснение τ_m и средно квадратично отклонение от средното време за закъснение σ_τ . В различните среди параметърът σ_τ е различен, както е показано в таблицата по-долу:

- ❖ в равнинна среда σ_τ до $\sim 0.2 \mu\text{s}$;
- ❖ в извънградска среда $\sigma_\tau \sim 0.2\text{-}2 \mu\text{s}$;
- ❖ в градска среда $\sigma_\tau \sim 1\text{-}3 \mu\text{m}$

Ако σ_τ е по-голямо от продължителността на един бит T_b , възниква междусимволна интерференция (ISI). В такъв случай, битовете могат да пристигат по-рано или по-късно и така да се изкриви съществено информацията от/към мобилната станция. Статистическа мярка за това кога един комуникационен канал може да се разглежда постоянен във времето (“flat channel”), е т. нар.

кохерентна честотна лента BW_C . Тази величина обикновено се измерва, но приближителна оценка се получава от израза $BW_C \sim 1/5 \sigma_\tau$ (при амплитудна корелация 0.5). Така,

ако честотната лента на даден канал е по-малка от кохерентната честотна лента $BW < BW_C$, каналът се разглежда като постоянен (с плосък фадинг). В противен случай в него се появява честотно-селективен фадинг (различен ефект за различни честоти).

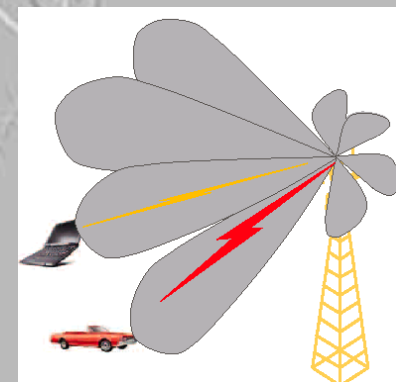




Адаптивна антенна система (AAS) (Умни антени)

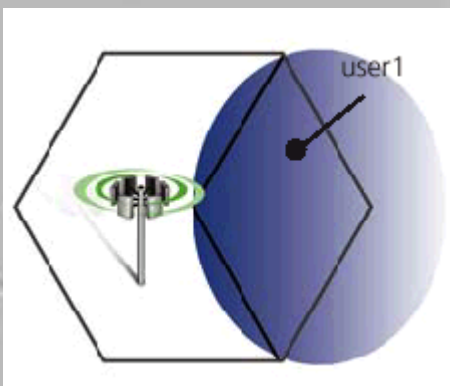
Малко стандарти, вкл. WiMAX, могат да използват адаптивни антенни системи AAS (“умни антени”, виж Лекция 3) в базовите станции (downlink канал). Тези системи позволяват да се фокусират единични лъчи, да се сканират и да имат по-голямо усилване с цел да се предава сигнал на по-големи разстояния, което е ключова характеристика на WiMAX. Фокусирайки се върху даден потребител, системата позволява да се изключат непредвидими интерференции и паразитен шум, т.е. да се повиши нивото C/I (Carrier/Interference).

WiMAX стандартът поддържа няколко технологии на “умни антени”, между които MIMO (multiple-input, multiple-output) и AAS (advanced/adaptive antenna systems). MIMO технологията използва няколко Tx/Rx антени, докато AAS се базира на други две модерни техники: STC (space-time coding) или на формиране на тесен лъч в антенна решетка. Понеже OFDMA технологията за достъп използва широколентови канали, но с теснолентови под-носещи, AAS се поддържа много по-лесно в устройствата и мрежата на WiMAX, отколкото в CDMA мрежите.

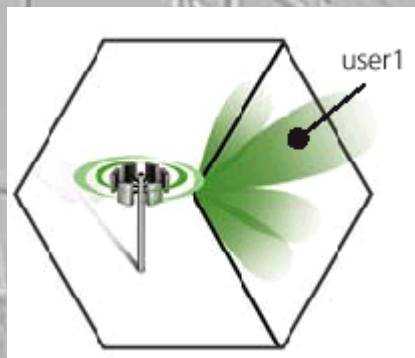


AAS, Downlink, SDMA достъп

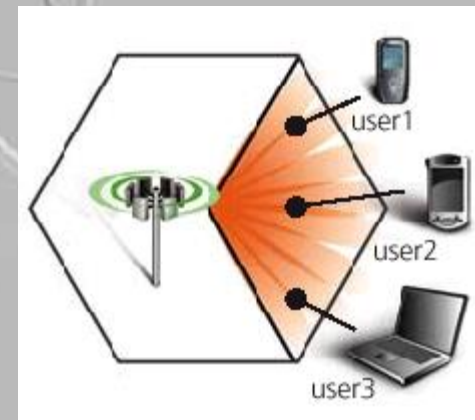
Обикновена секторна клетка



Секторна клетка с въртящ се лъч



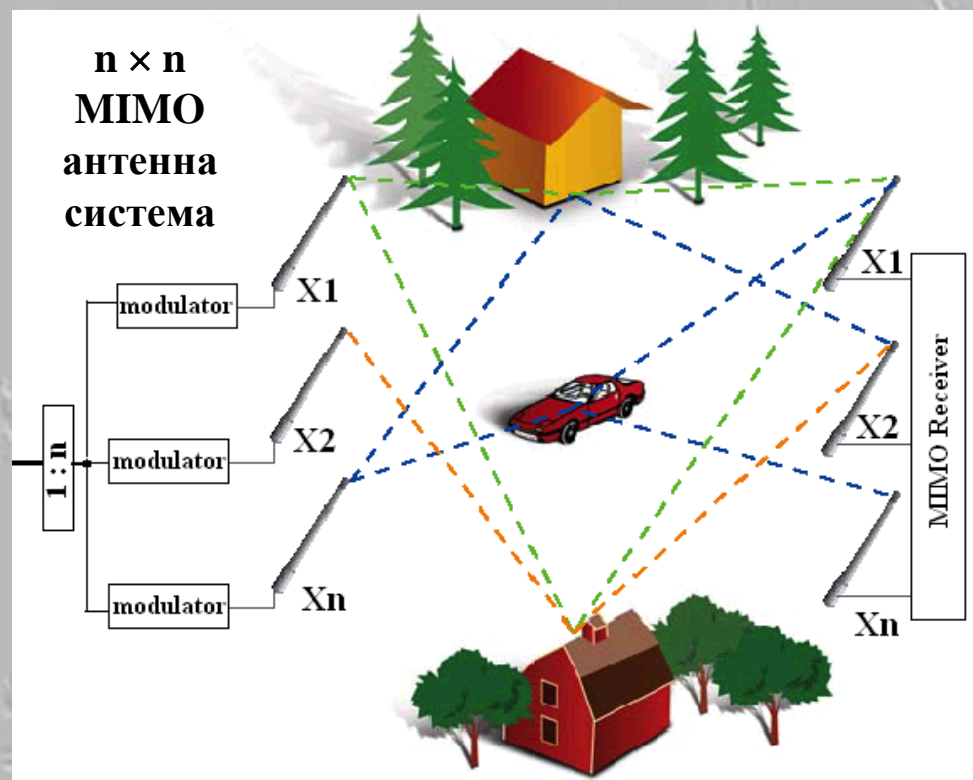
Секторна клетка с превключване на много лъчи





MIMO технология

MIMO (multiple-input, multiple-output) технологията, която се поддържа от WiMAX, използва множество приемни и/или излъчващи антени за т.нар. пространствено мултиплексиране. Тя използва повече от една радио- и антенни системи на всеки край на безжичната мрежа – базовата станция BTS и потребителската станция SS. Тази технология (space diversity) е известна отдавна, но едва съвременните миниатюрни Tx/Rx блокове и антени позволяват подобна технология да е лесно изпълнима и евтина. При MIMO n приети сигнала се комбинират така, че съществено се подобрява нивото и качеството на общия сигнал. Освен тази опция, MIMO позволява пренос на данни в паралел, с което да се увеличи битовата скорост. Например 2×2 MIMO ($2T_x / 2R_x$) с двойна поляризация в системи “point-to-point” носещите честоти се използват по 2 пъти и скоростта на пренос на данни расте двойно. В “point-to-multipoint” системите с MIMO технология всяка BTS излъчва различни потоци от данни, а SS приема различни части от излъчените сигнали с различни свои антени и като използва подходящ алгоритъм може да отдели и декодира паралелните потоци от данни. За пример, мобилният WiMAX стандарт използва 4×4 MIMO технология.

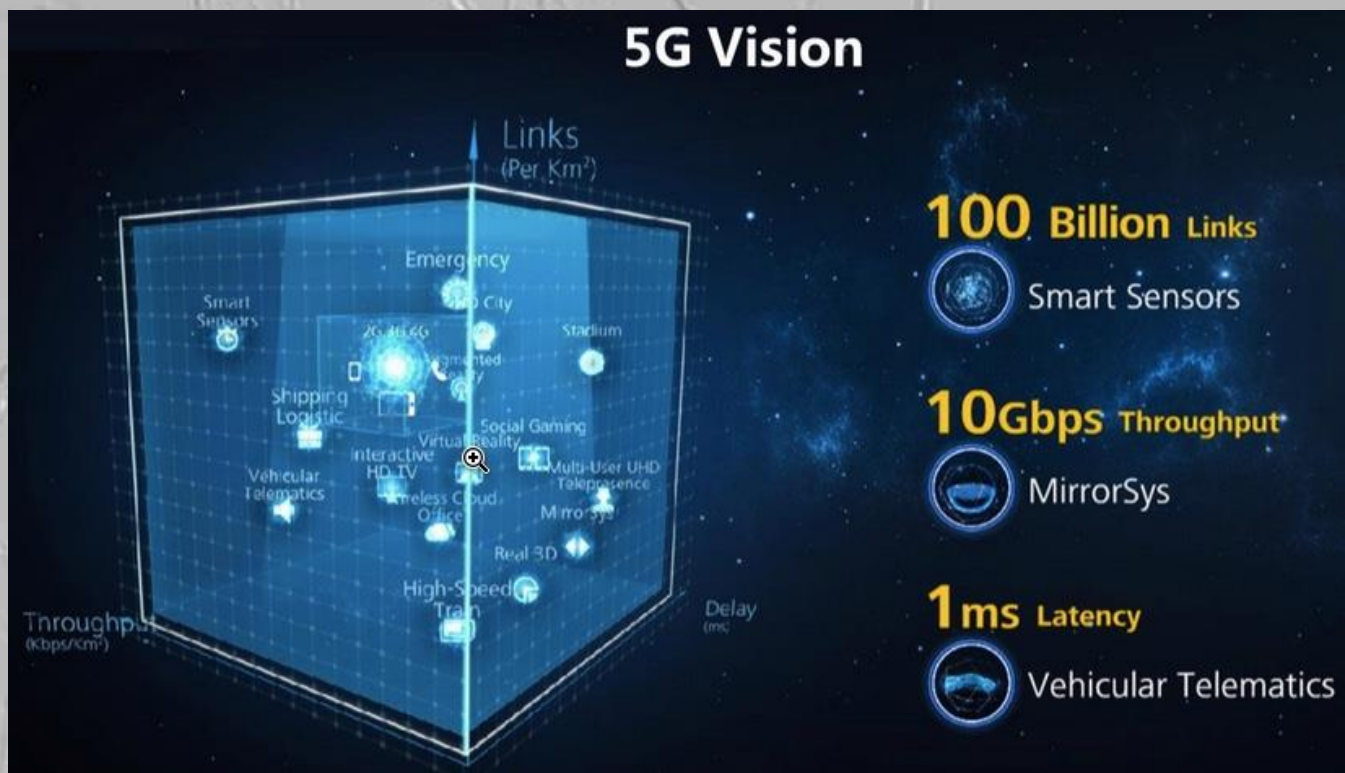


Даден е пример за MIMO технология за пространствено разнасяне на приет/излъчен сигнал и пренос на паралелни потоци данни. Приетият сигнал е $R(t) = h_1X_1 + h_2X_2 + \dots + h_nX_n$.

Даден е пример за MIMO технология за пространствено разнасяне на приет/излъчен сигнал и пренос на паралелни потоци данни. Приетият сигнал е $R(t) = h_1X_1 + h_2X_2 + \dots + h_nX_n$.

Заклучение

- Бъдещето е ясно: след 2020 ще имаме 5G мрежи със значително по-висока скорост на предаване на данни – 10 Gb/s (!), което 10 пъти над тази в 4G LTE Advanced, 100 пъти над тази в 4G LTE (и над 10^5 пъти по-бърза от мрежата ми в къщи в неделя).



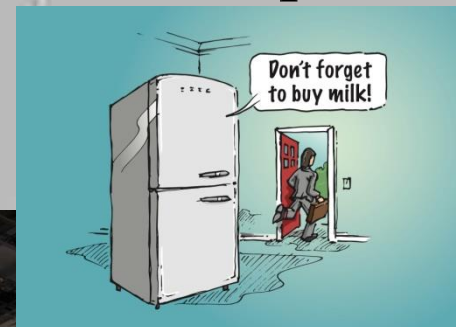
Заклучение

- Много ниска латентност на мрежите (т. е. нищожно време за изпращане на един пакет от данни): 1 ms срещу 50 ms в 4G мрежите. Това е важно за много индустриални приложения, които изискват бърза реакция и реално онлайн управление, напр. коли без шофьори (driverless cars).



Заклучение

- Много „по-свързан“ свят: **Internet of Things** (умни къщи, умни домакински уреди, умни дрехи, свързани коли – всички те ще се нуждаят от мрежа, която може да побере и обслужи милиарди свързани устройства. Част от предизвикателствата на 5G е да осигури този огромен капацитет, а също да бъде в състояние гъвкаво да задели необходимата честотна лента в зависимост от нуждите на потребителя и приложенията.



Enter Keywords

Entire Site

FIND

Recent Searches rf microwave engineer number / engineer number / enineer number / cambridge consultants / bessemer venture partners

Home » Nokia demonstrates world's first 5G-ready network

5G/Massive MIMO Channel / Industry News / European Industry News Nokia demonstrates world's first 5G-ready network

Nokia

June 28, 2016

No Comments

EMAIL / PRINT / REPRINTS / f t in | MORE / TEXT SIZE+

Related Articles

Nokia Networks, NYU WIRELESS host Brooklyn 5G Summit

NSN and NYU WIRELESS bring first-ever 5G Summit to Brooklyn

Related Events

COMSOL Training Courses

WindEnergy

Nokia is to make the first ever demonstration of a 5G network running on commercial platforms as part of its showcase at 5G World that will underline the momentum of bringing 5G to commercial reality. Following the successful launch in February of the industry-first 5G-ready AirScale Radio Access technology Nokia will demonstrate AirScale working together with its Cloud Packet Core, running on a Nokia AirFrame data center platform, the foundation of a commercial 5G architecture.

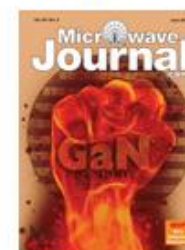
This demonstration will be one of a number of activities at 5G World that Nokia will conduct to update the industry on its progress in realizing the potential of 5G and the creation of a seamless fabric of dynamic networks serving a multi-connected world. Via product and technology demonstrations as well as keynote sessions, Nokia will explain how it is accelerating the development and standardization of 5G and providing the technological means for operators to prepare and unlock the full potential of their

Advertisement

For fundamentals –
Click [here!](#)



In Print



Digital Edition
Online Edition

Featured

Get Your GaN Here: RF GaN Foundry Survey

**Благодаря за
вниманието**

