



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“**



18 88

Пламен Данков



**“Антени за мобилни и сателитни
комуникации, приложения за установяване
на местоположение, GPS-системи”**

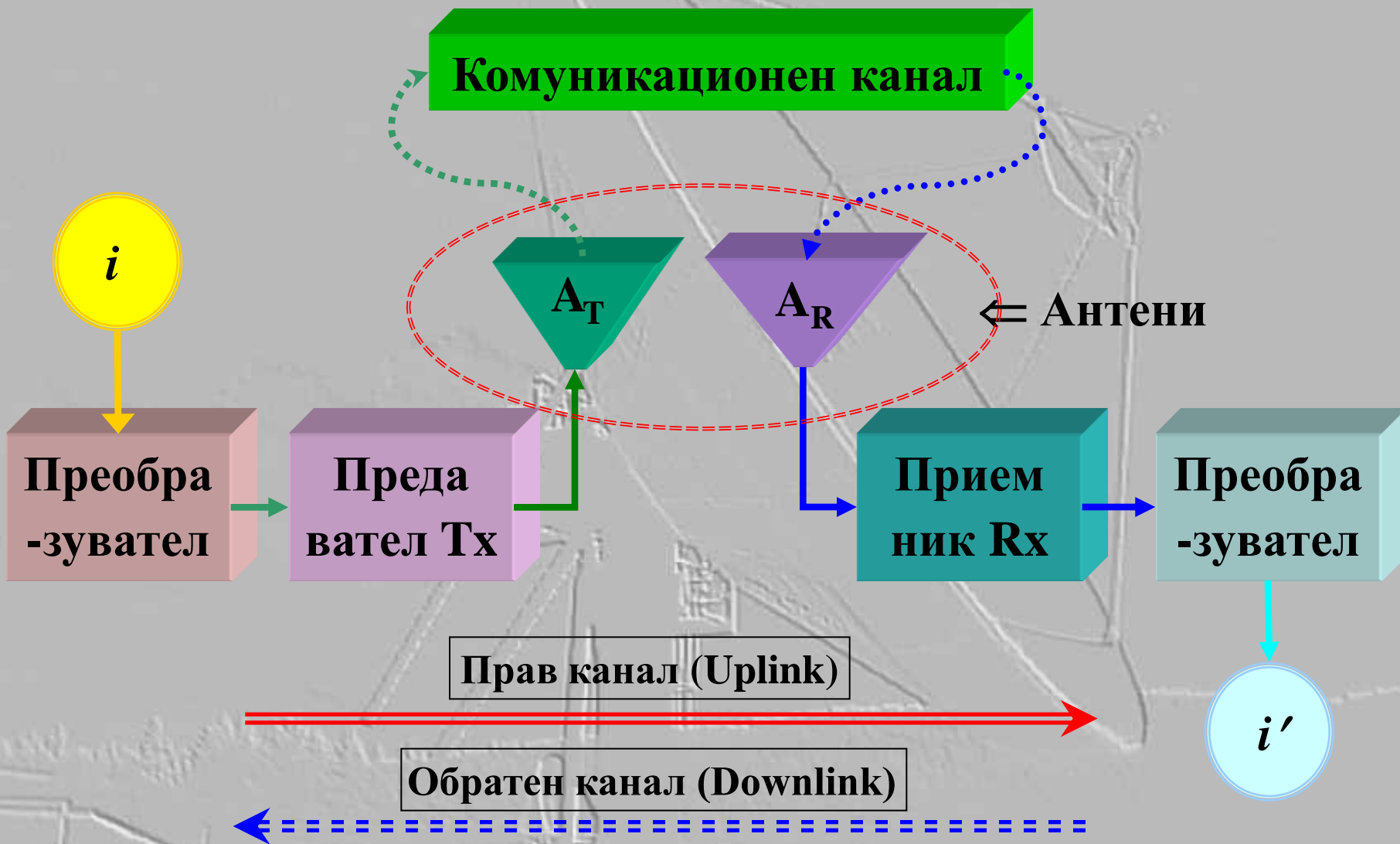
Теми в лекцията

- Антената – устройство, което превръща всяко друго устройство в безжично!
- Основни параметри на антените – диаграма на излъчване, ширина на лъча, усилване, насоченост, поляризация и др.
- Видове антени. Антенни решетки.
- Технология за подобряване на характеристиките на антените – по-широколентови, поминиатюрни, реконфигурируеми, активни.
- Специфични антени за мобилни мрежи – RIFA, MIMO, UWB, текстилни, антени, изработени с 3D принтери и др.
- Сателитни комуникации и сателитни антени.
- GPS система за глобална навигация. Приложения в мобилните мрежи.

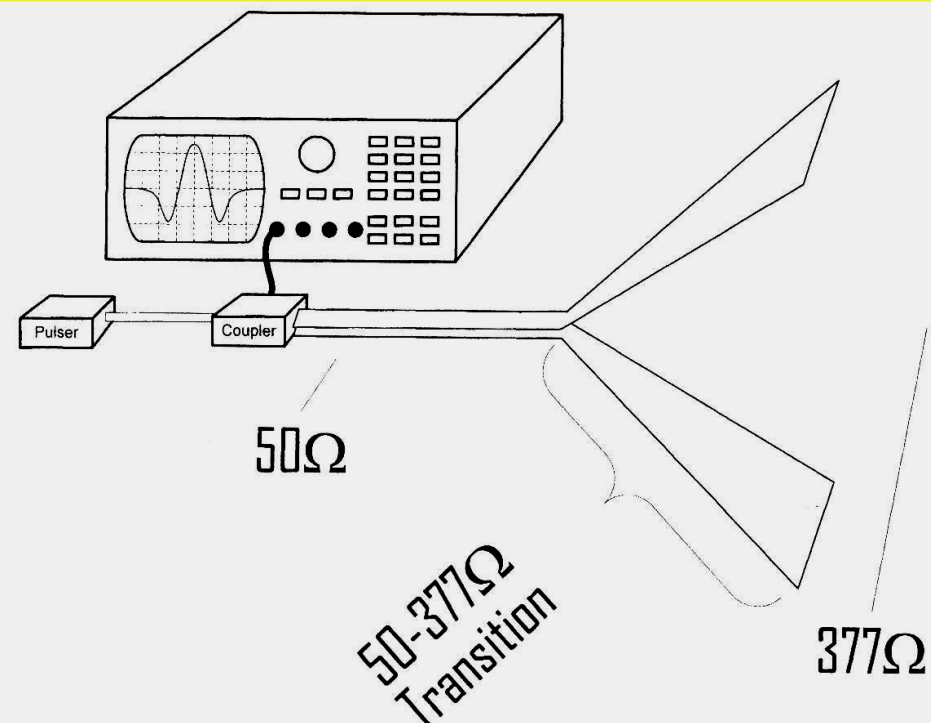
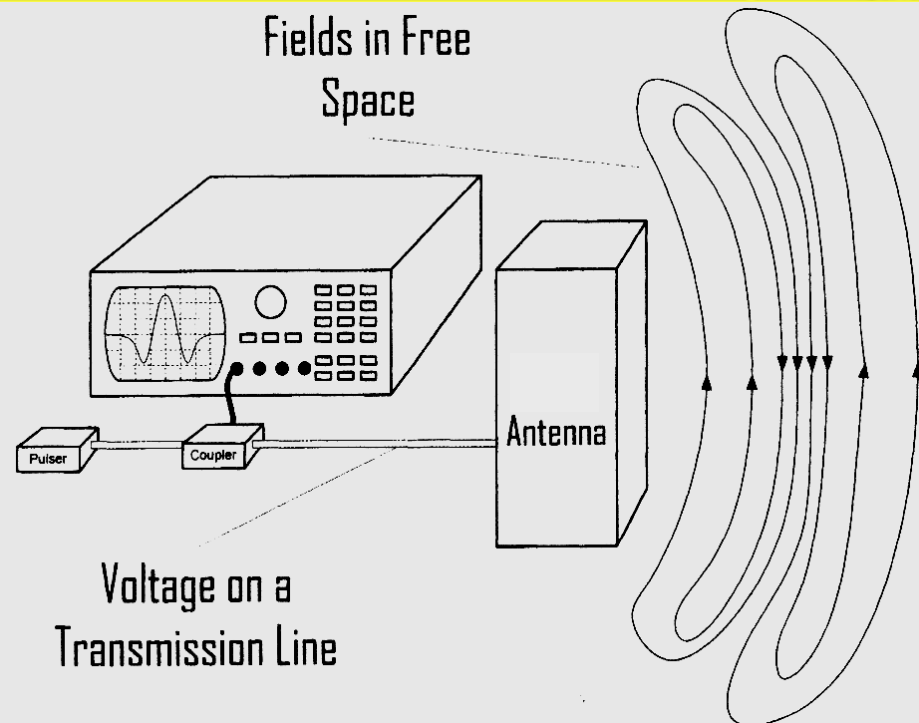




Мястото на антените в блоковата схема на безжичния комуникационен канал



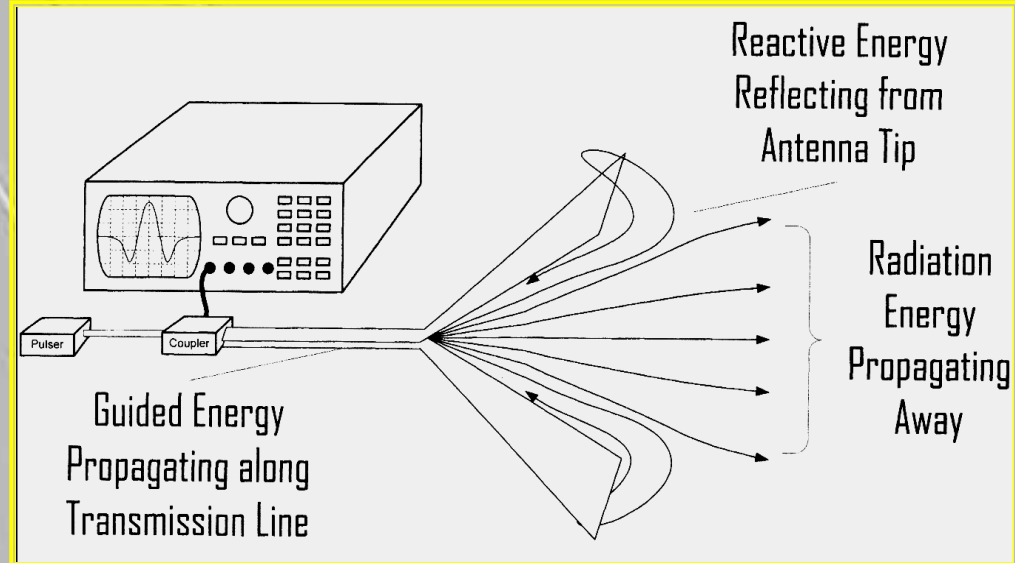
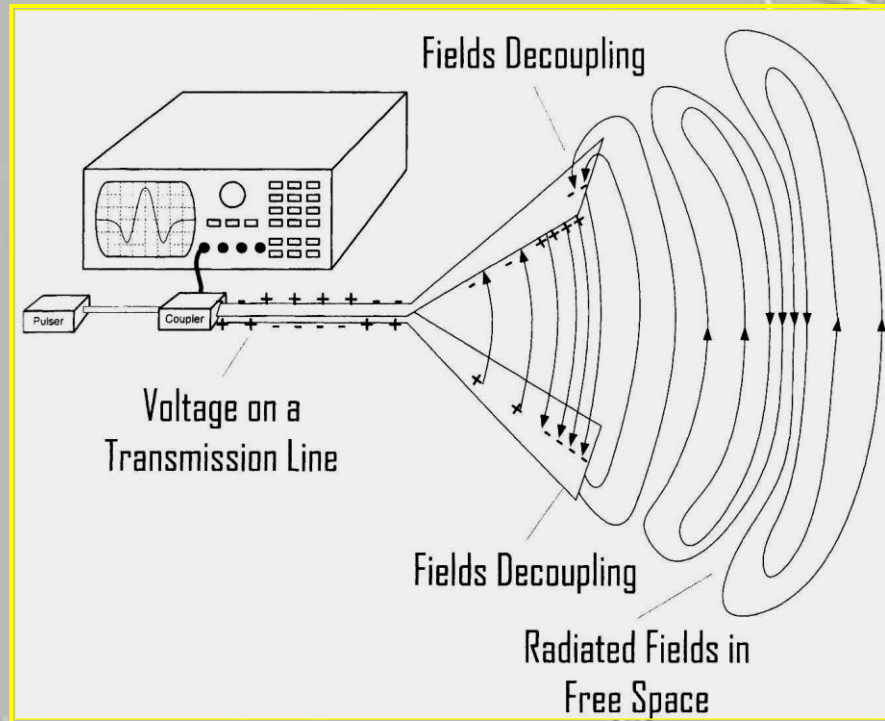
Антената като Преобразовател, Трансформатор, Излъчвател и Енергиен конвертор на сигнали (1)



Transducer: разглеждаме антената като комуникационно устройство (преобразовател) във вид на „черна кутия“, което се характеризира с определени параметри: усилване, радиационна диаграма, честотна лента, поляризация, съгласуване, дисперсия, и др.

Transformer: Разглеждаме антената като “трансформатор на импеданси” между предавателната линия (вълновод), която захранва антената (50Ω) и свободното пространство (377Ω) – т. е. съгласува по импеданс източника/приемника на сигнал и околната безжична среда

Антената като Преобразовател, Трансформатор, Излъчвател и Енергиен конвертор на сигнали (2)



Radiator: това е класическата интерпретация за антената като *излъчвател* – променливи във времето токове и напрежения *генерират* излъчващи се ЕМ полета в свободното пространство чрез отделяне от антената (*fields decoupling*).

Energy converter: устройство (конвертор), което *преобразува енергията на канализираните вълни* в предавателната линия (вълновода) в *излъчена енергия* в свободното пространство с минимална излъчена паразитна реактивна енергия като страничен ефект.



Формиране на антенното поле; близка и далечна зони

$$F(\theta, \varphi) = E(\theta, \varphi) / E_{\max}(\theta, \varphi)$$



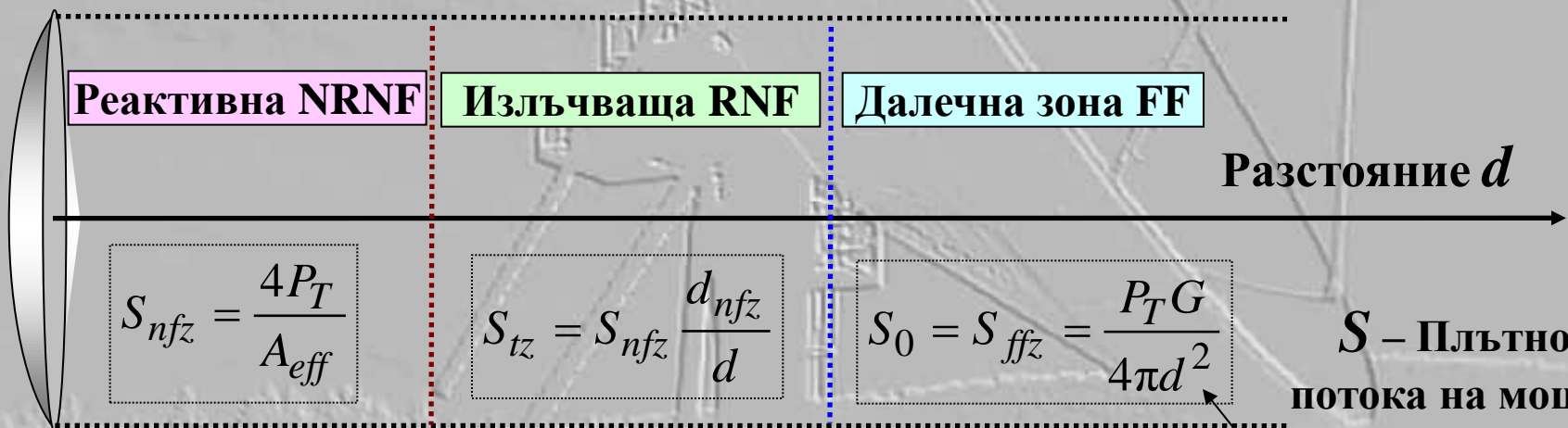
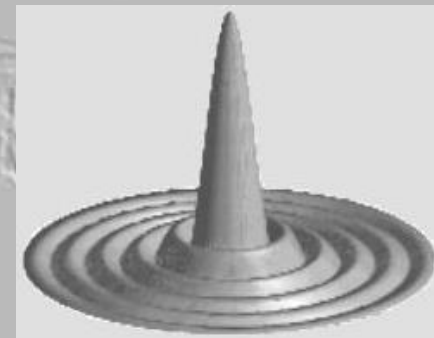
NNF



RNF



FF



$$S_{nfz} = \frac{4P_T}{A_{eff}}$$

$$S_{tz} = S_{nfz} \frac{d_{nfz}}{d}$$

$$S_0 = S_{ffz} = \frac{P_T G}{4\pi d^2}$$

S – Плътност на потока на мощността (Вектор на Пойнтинг)

антена

$$R_{nf} \cong 0.63 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda}$$

$$S \sim 1/d^2$$



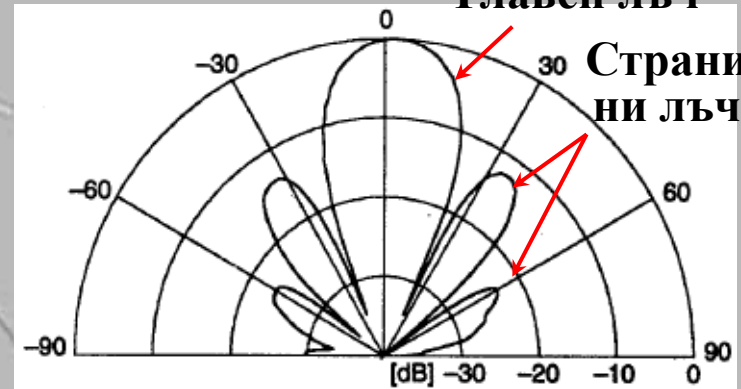
Основни параметри на антените (1)

Радиационна диаграма

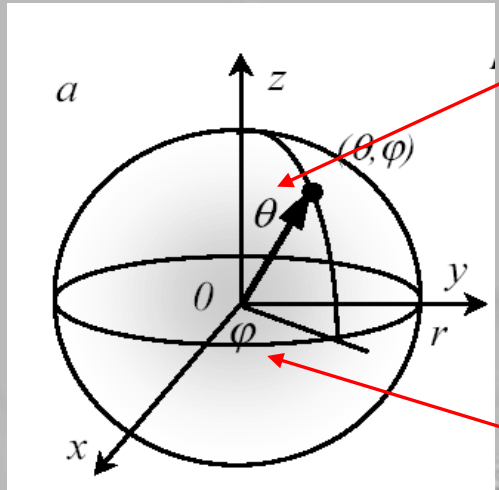
$$F(\theta, \varphi) = E(\theta, \varphi) / E_{\max}(\theta, \varphi) \Big|_{r=\text{const} > R_{ffz}}$$

Главен лъч

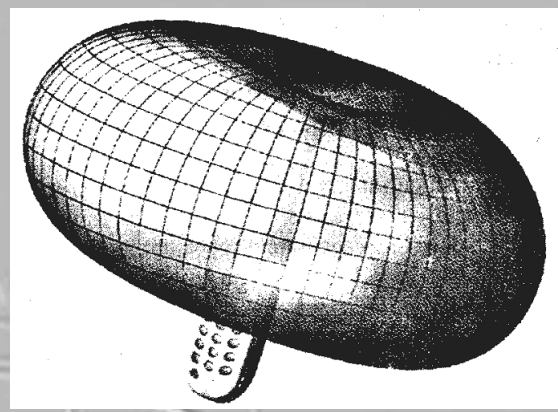
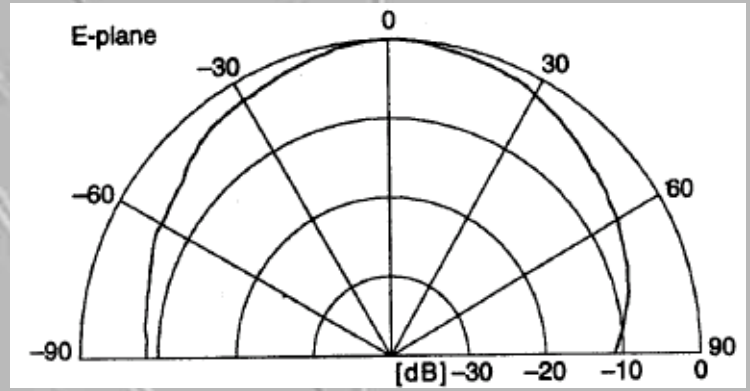
Странични лъчи



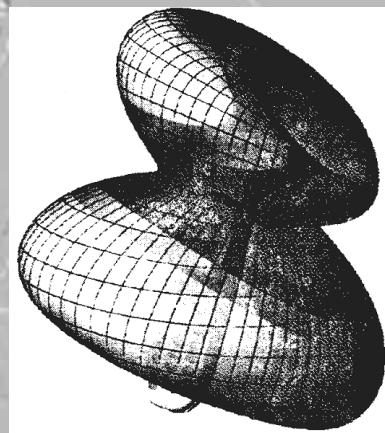
Елевационен ъгъл



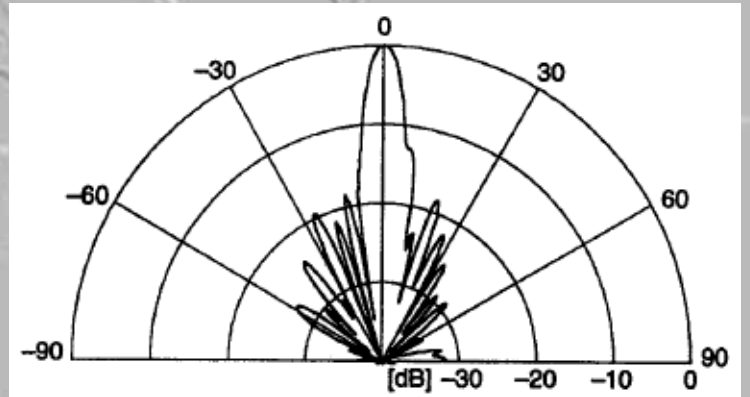
Азимутален ъгъл



GSM 900



GSM 1800



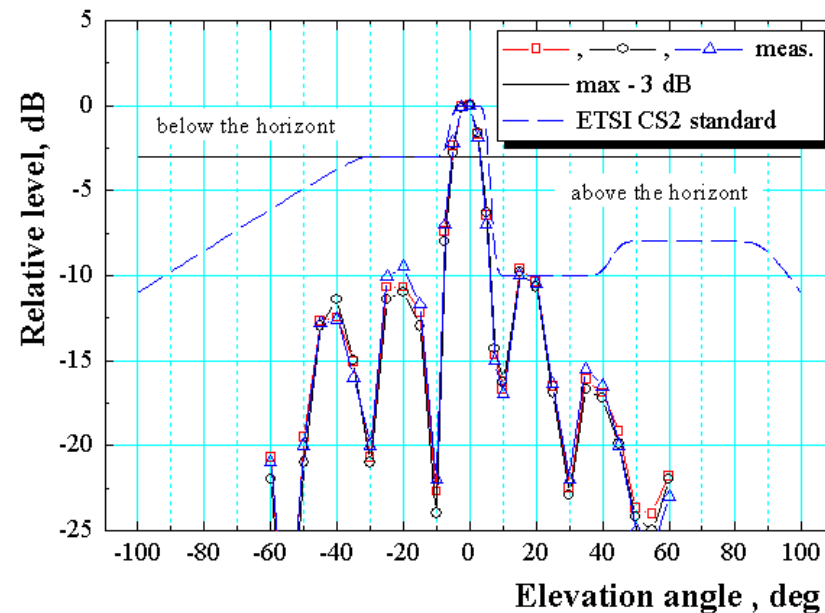
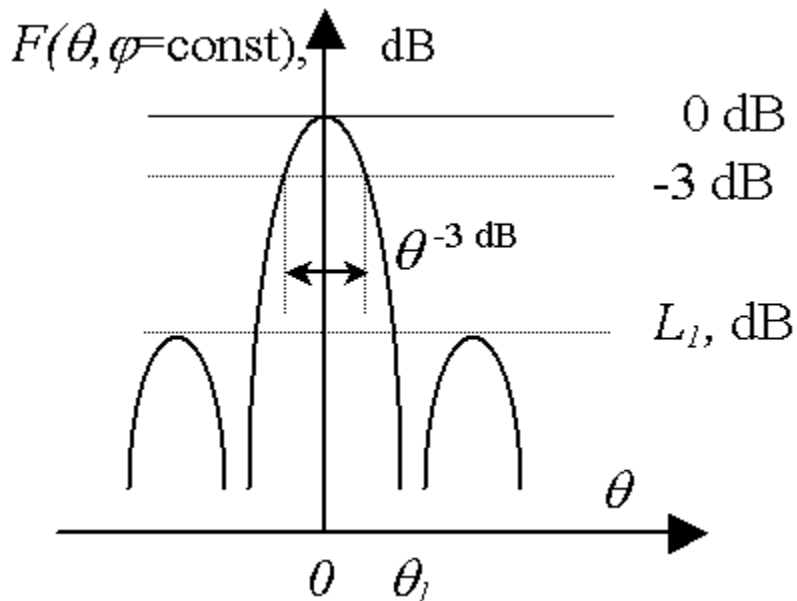
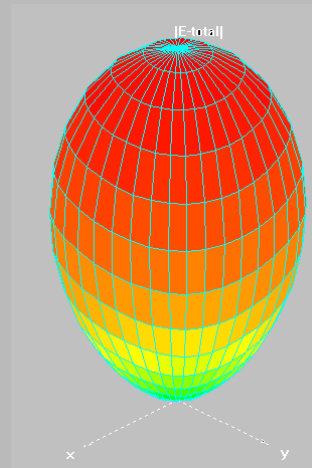
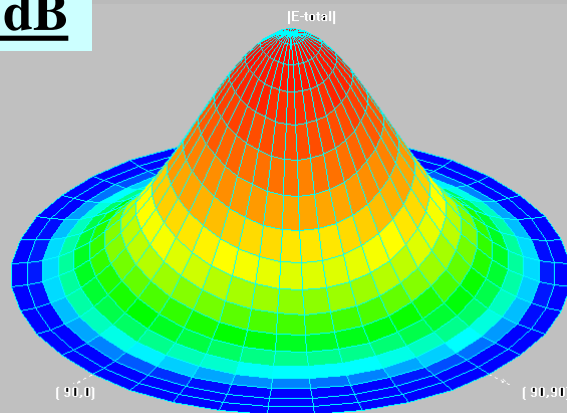
Основни параметри на антените (2)

Ширина на главния лъч на ниво -3 dB

$$\theta^{-3 \text{ dB}}; \varphi^{-3 \text{ dB}}$$

Ниво на страничните листове

$$L_i; i = 1, 2, \dots$$



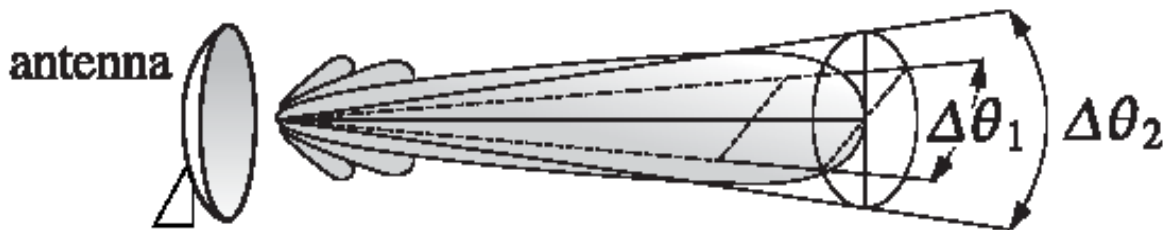
Основни параметри на антените (3)

Насоченост на главния лъч D

Насочеността на главния лъч (коэффициент на насочено действие D) изразява степента на енергетичната изгода от използване на антена с по-остронасочен лъч, вместо напълно изотропна антена

Усилване $G = \eta D$

Ефективност η



Ако ширината на главния лъч на антената на ниво -3dB стане по-тясна, насочеността (усилването) на антената става по-голямо и обратно

$$D = S_{\max}(\theta, \varphi) / S_{\text{isotropic}} |_{P_T = \text{const}} ; \text{dBi}$$

$$D \cong \frac{4\pi}{\Omega_{\text{beam}}} = \frac{41253}{\Delta\theta^{-3\text{dB}} \Delta\varphi^{-3\text{dB}}, \text{deg}^2}$$

$$G = \frac{4\pi A_{\text{eff}}}{\lambda^2}$$

$$\eta = \frac{G}{D}$$

G – Усилване на антената,

D – Коэффициент на насочено действие на антената;

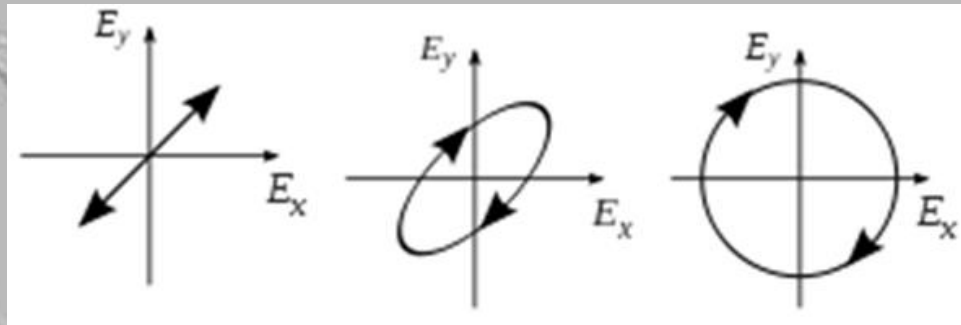
A_{eff} – Ефективна апертура на излъчване;

λ – дължина на вълната

Основни параметри на антените (4)

Поляризация на антена

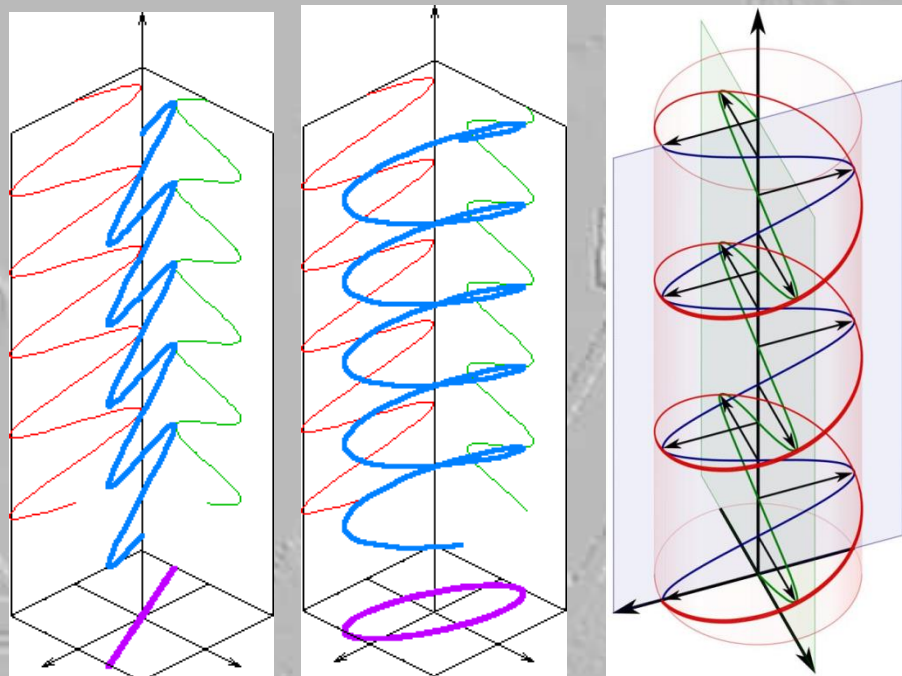
Поляризацията на антената се свързва с ориентацията на излъченото електрическо поле E в далечната зона (за TEM вълни E и H полето са перпендикулярни помежду си и напречни на посоката на разпространение)



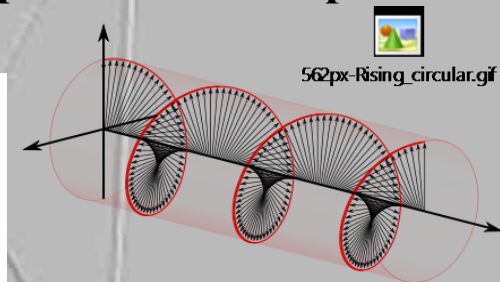
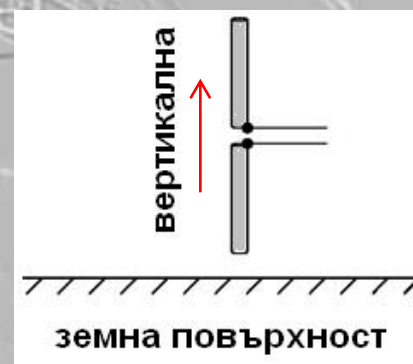
Линейна поляризация

Елиптична поляризация

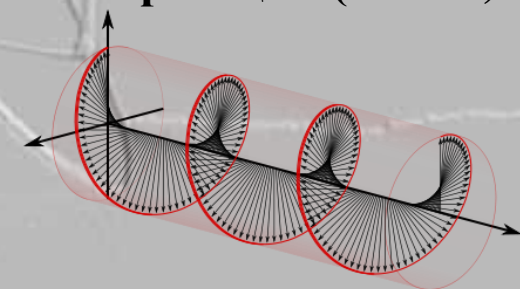
Кръгова поляризация



Всяка поляризация се разпада на две линейни независими поляризации

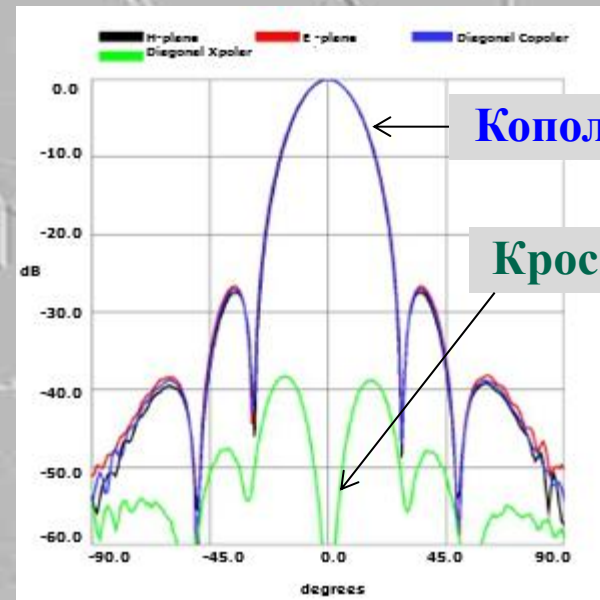
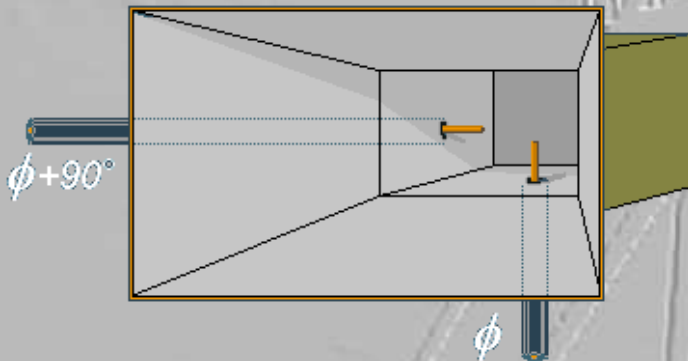
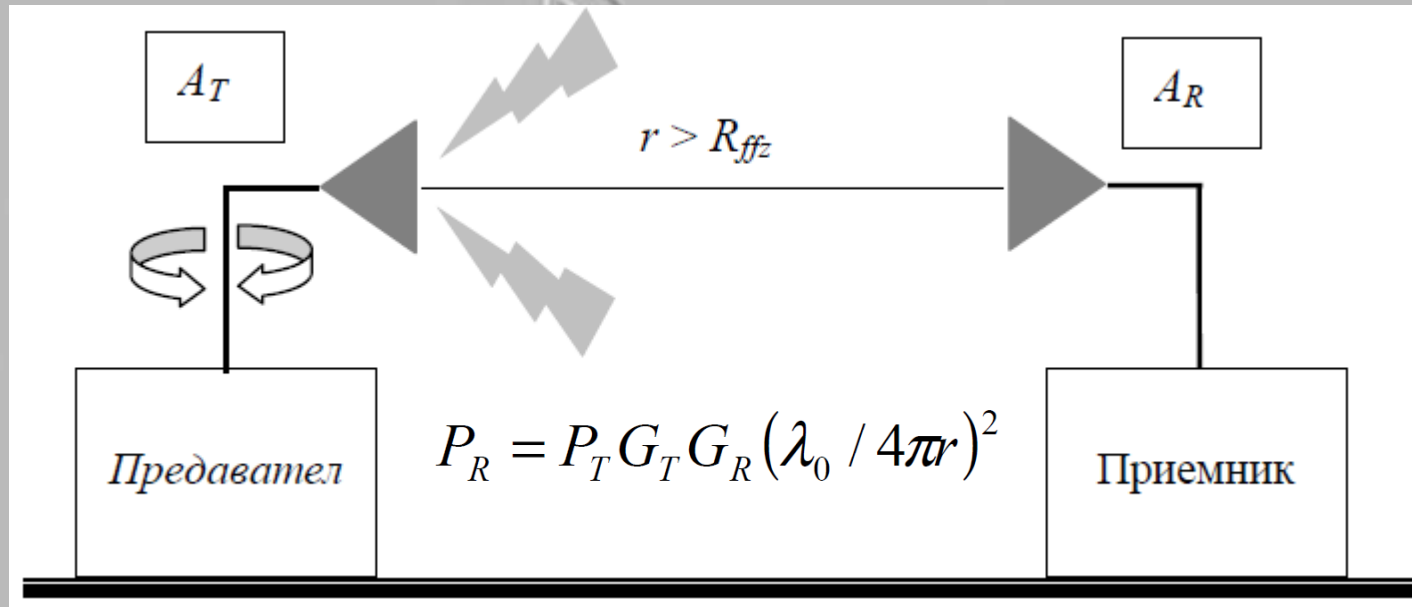


Дясна кръгова поляризация (RHCP)



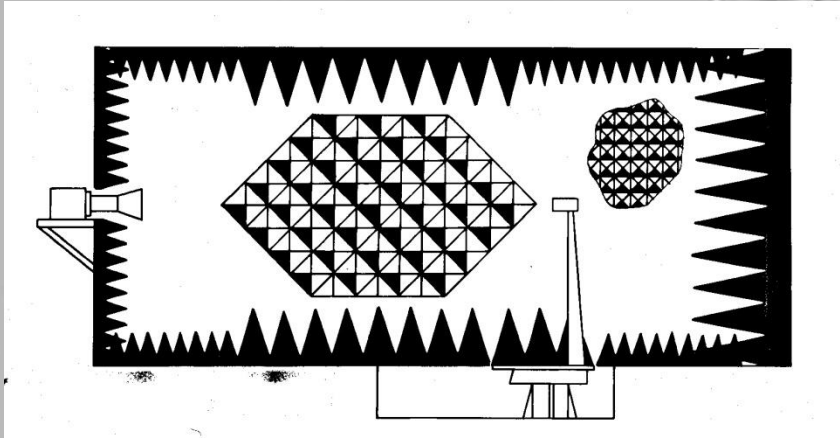
Лява кръгова поляризация (LHCP)

Измерване на антени

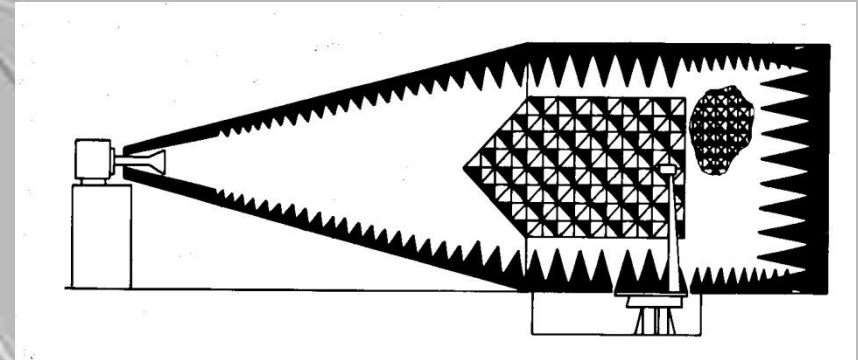


Ако поляризацията на двете антени е едно-типна (V-V; H-H, RHCP-RHCP; LHCP-LHCP), се измерва ко-поляризационна диаграма (истинската); в противен случай – крос-поляризационна диаграма

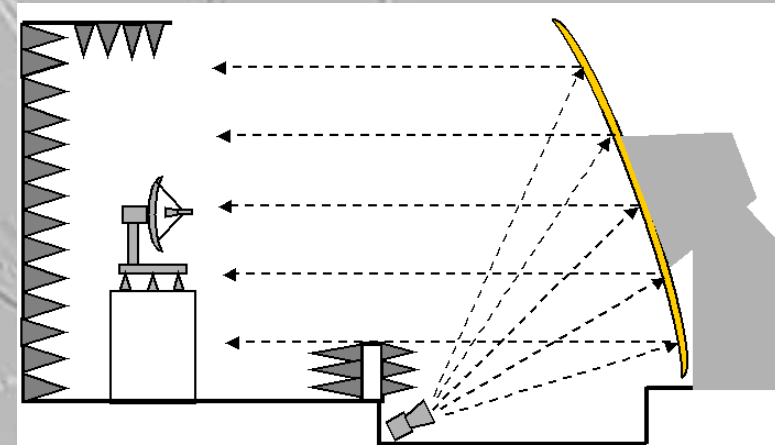
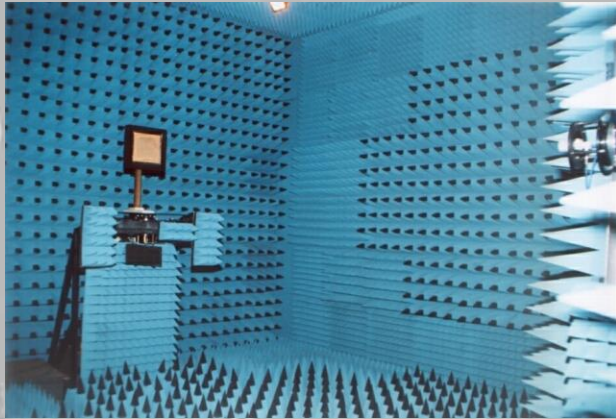
Измервания в далечната зона



Безехова камера

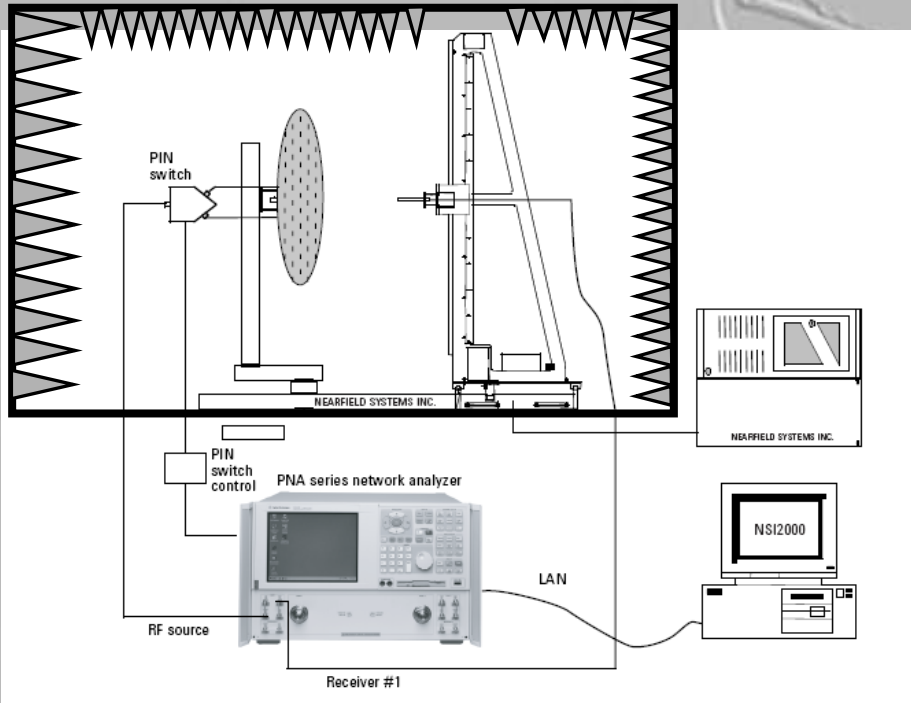


Скосена безехова камера

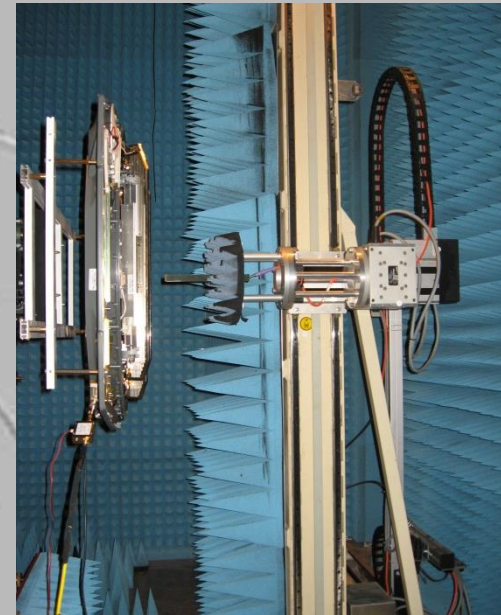


CTR (Compact Test Range)

Измервания в близката зона



Измерителна постановка



**Пример:
Сканирани 8
антенни панела с
един неработещ**

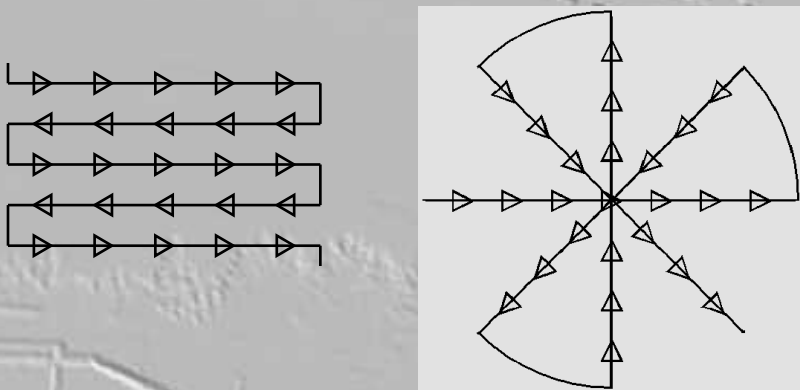
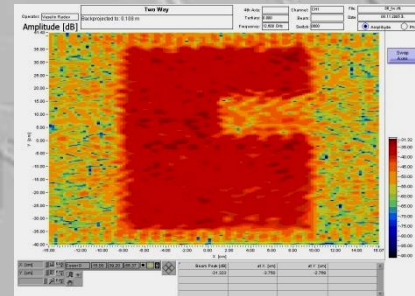
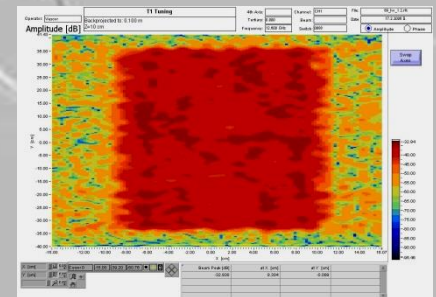


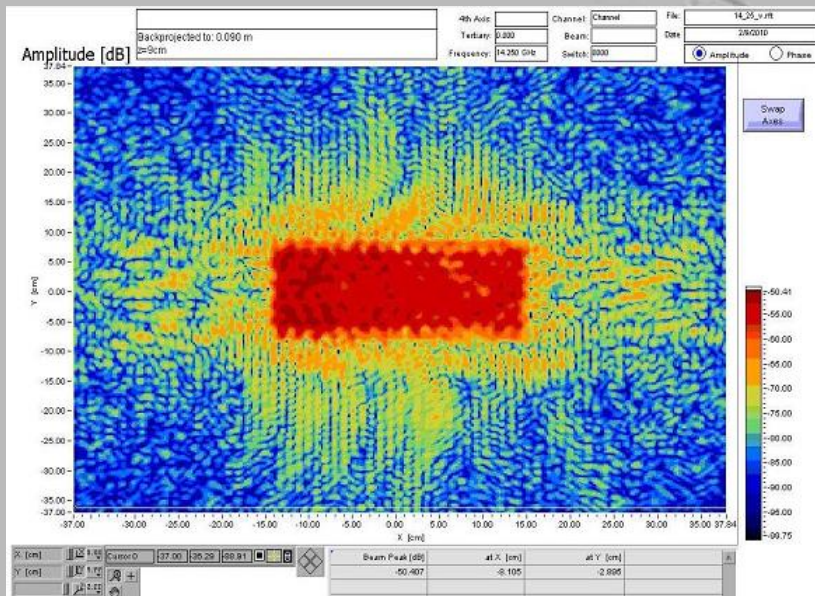
Схема на сканиране



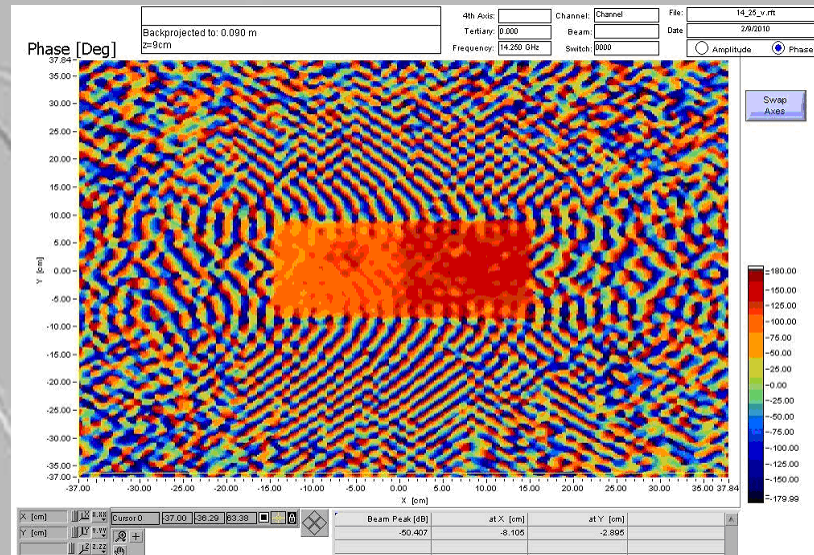
**Пример:
Сканирани 8
антенни панела,
всички работещи**



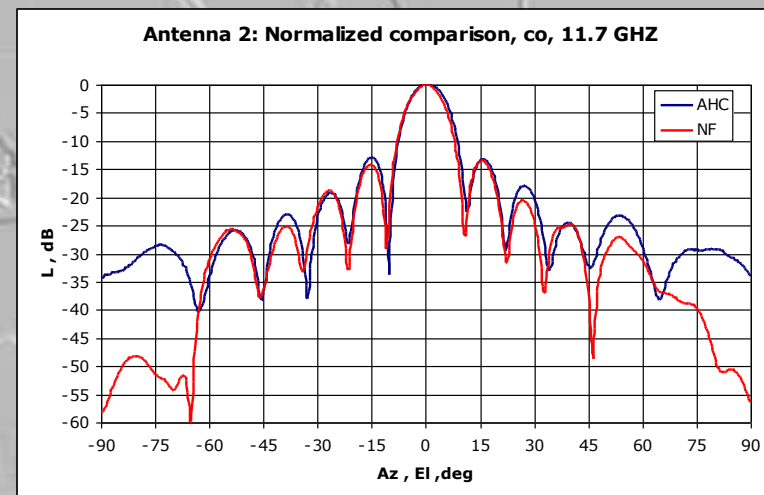
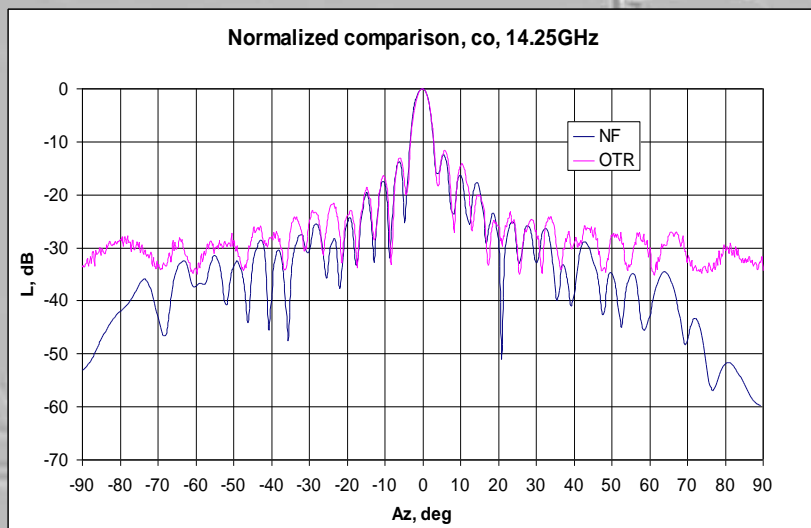
Диаграми в близката зона



Амплитудна NF диаграма



Фазова NF диаграма



Преобразуване: NF във FF диаграма на излъчване чрез бърза Фурие трансформация



Методи за проектиране на антени

Electromagnetic analysis

Analytical techniques

Numerical techniques

**Integral
methods**

**Differential
methods**

**Optical
methods**

**Method of
Moments**

**Method of Finite
Differences**

**Method of Finite
Elements**

FDTD

closed
form

iterative

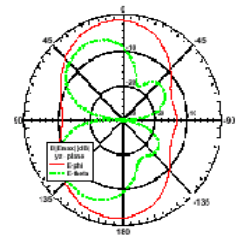
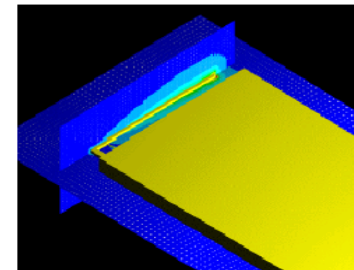
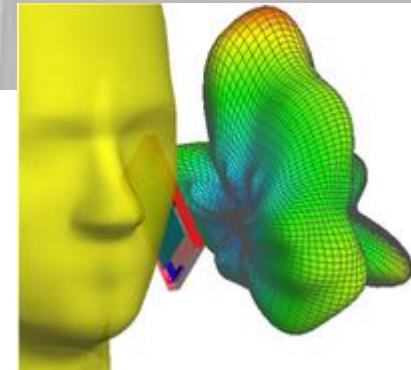
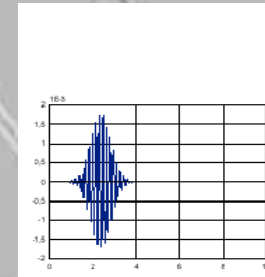
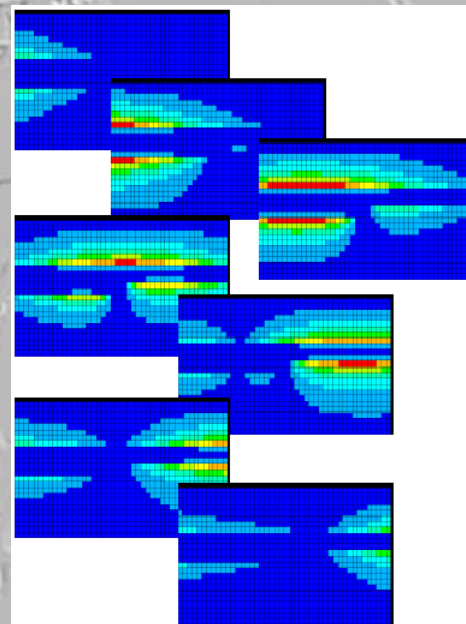
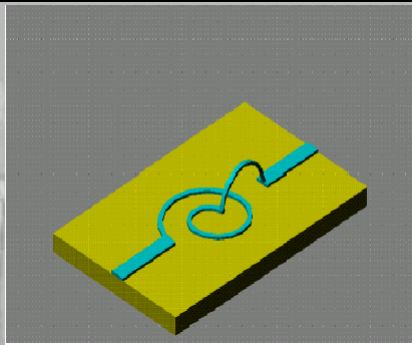
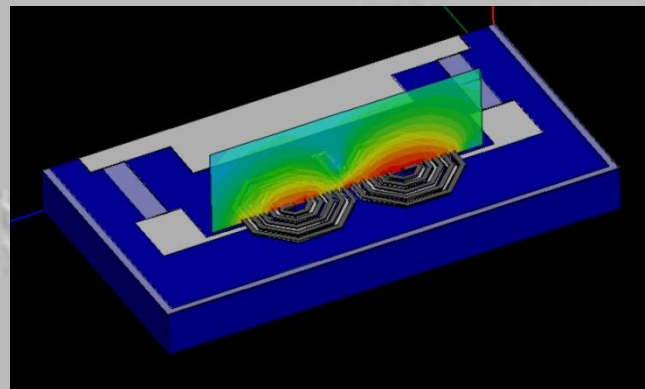
GMD

MoM

FEM

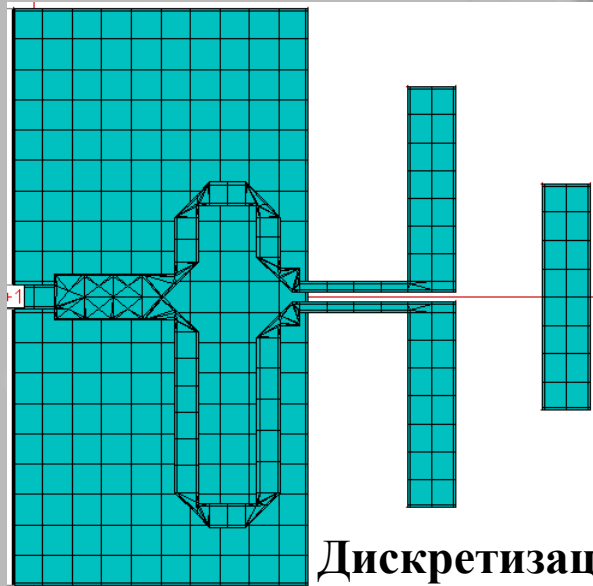
Електромагнитни 3D симулатори

Днес антените се проектират главно чрез ЕМ 3D симулатори. Те генерират собствена софтуерна среда, в която потребителите могат с големи подробности да създадат модел на антената и да я изследват. Числената симулация се осъществява **чрез 3 стъпки:**

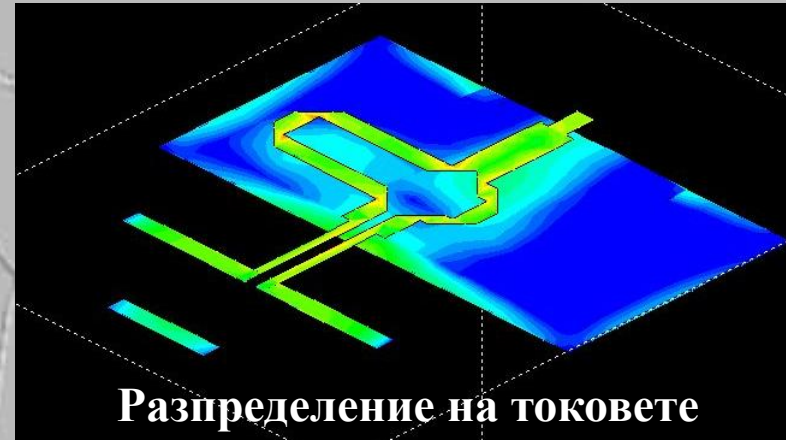




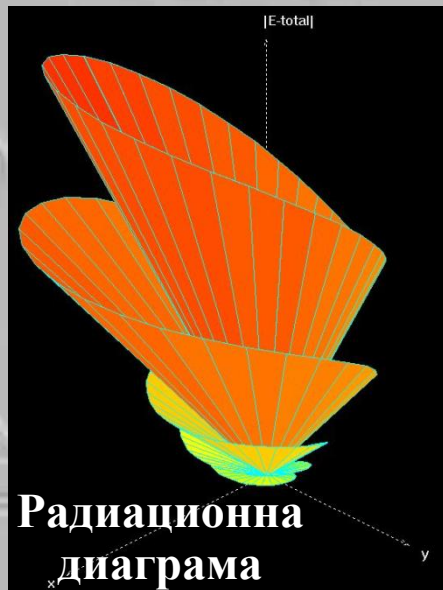
Примери с MoM (IE3D®Zeland): Yadi-Uda антена 9.5 GHz



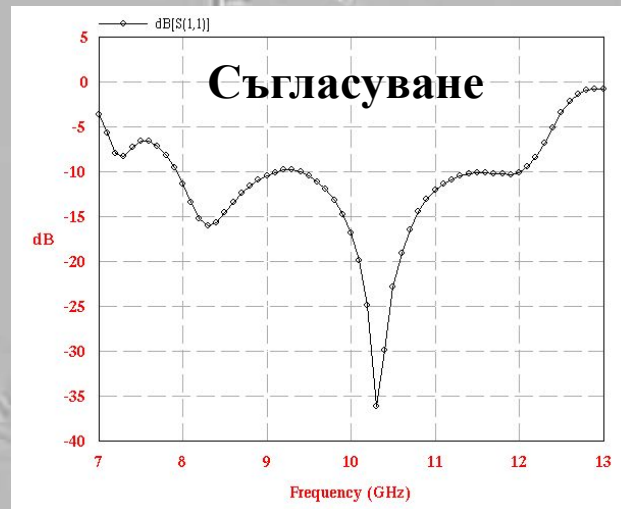
Дискретизация



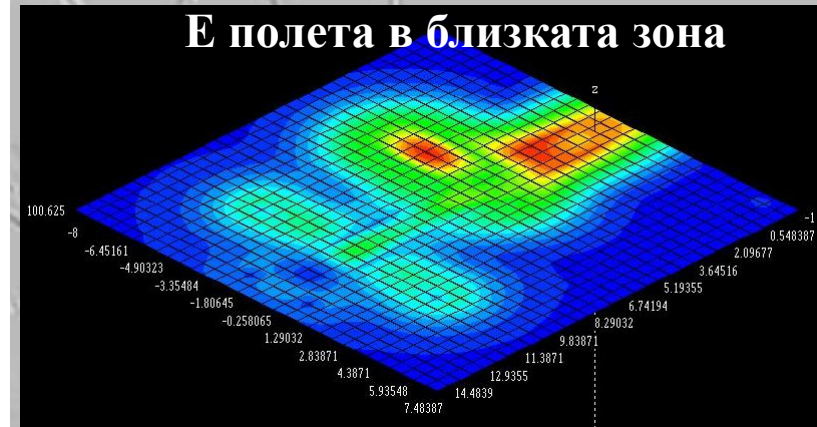
Разпределение на токовете



Радиационна диаграма



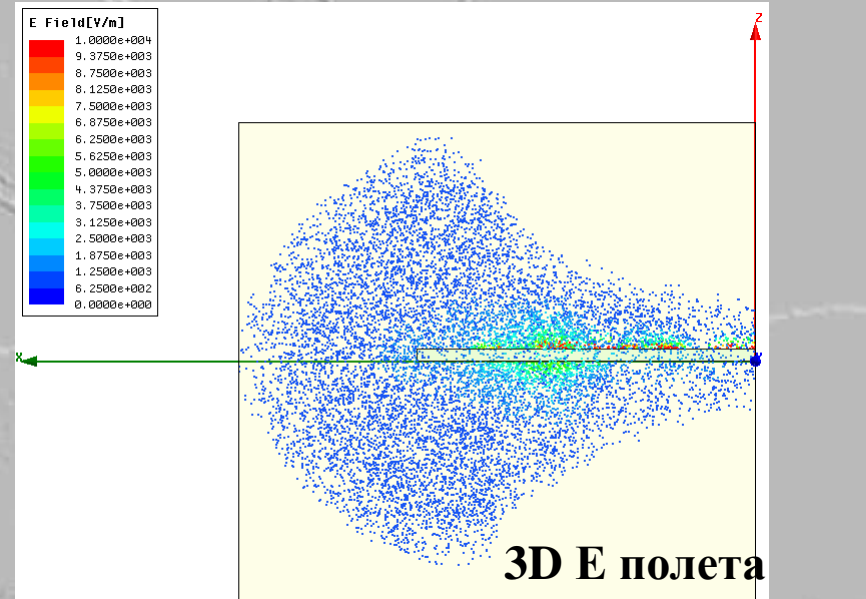
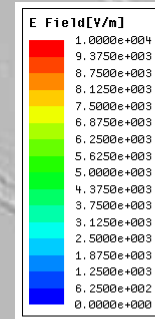
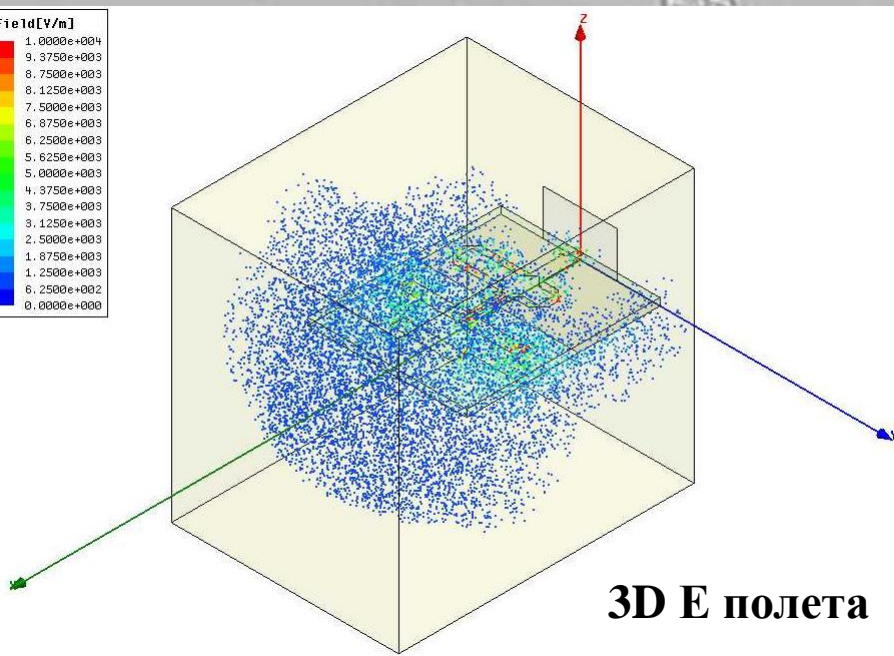
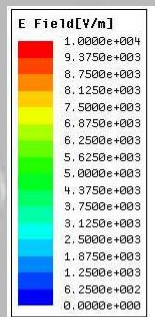
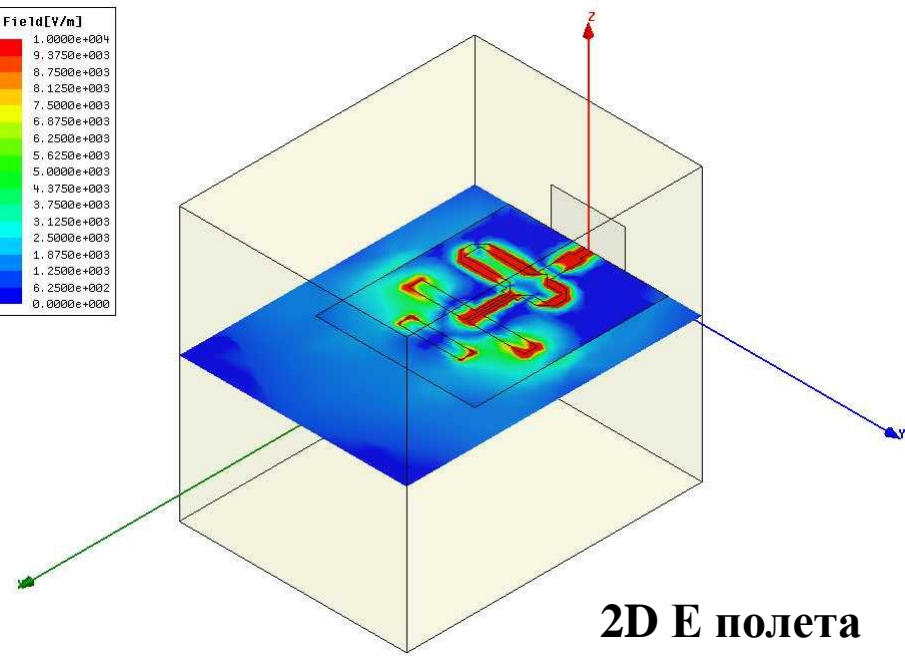
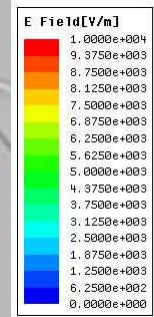
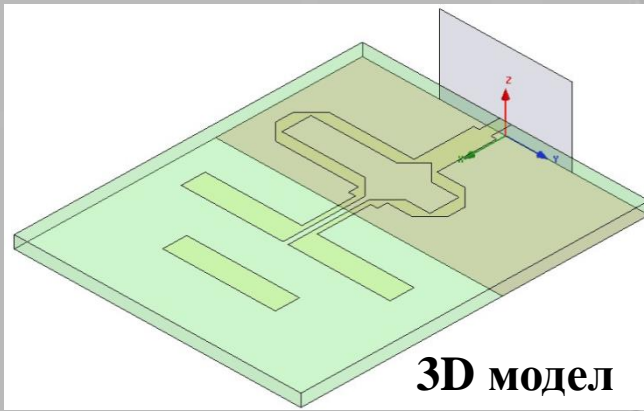
Съгласуване



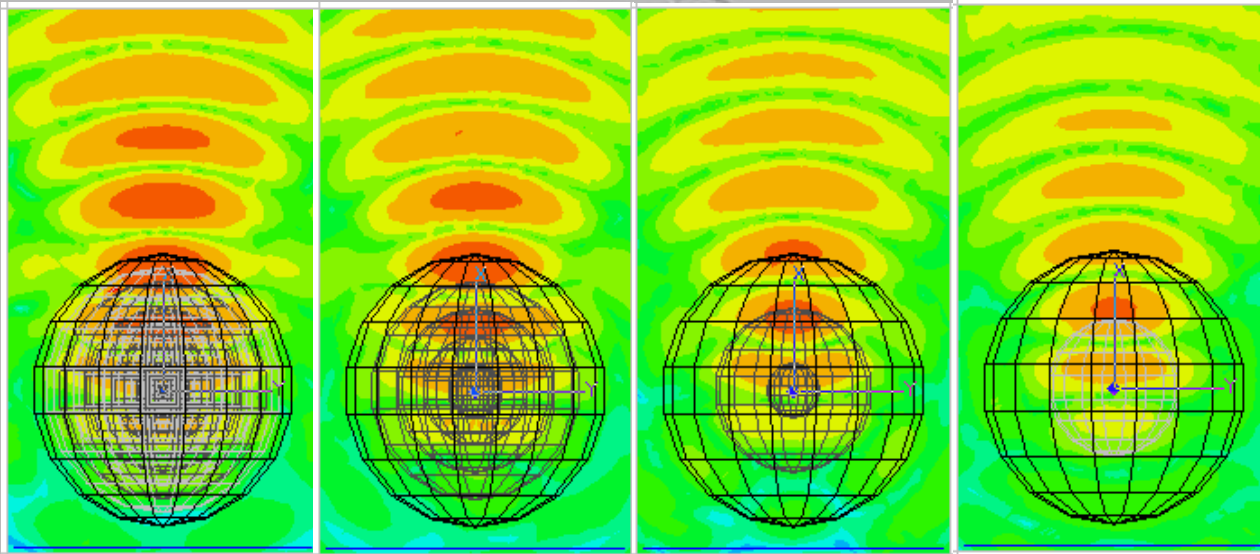
E полета в близката зона



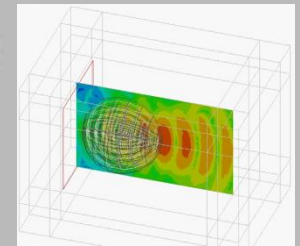
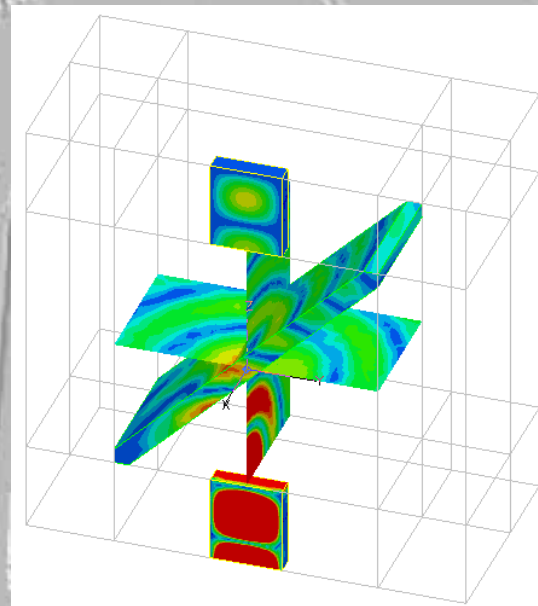
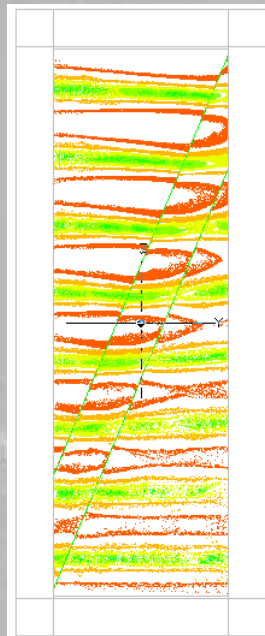
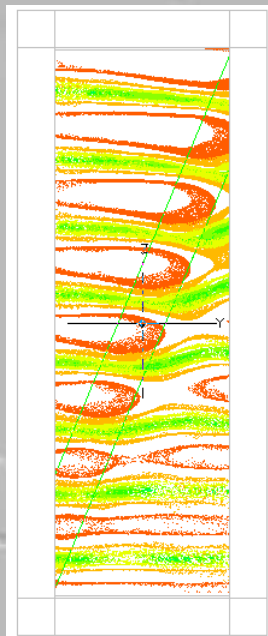
Примери с FEM (HFSS®ANSYS): Yadi-Uda антена 9.5 GHz



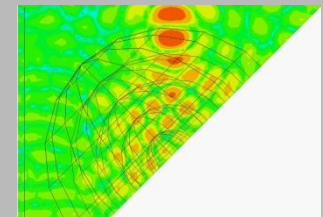
ЕМ анимации на излъчените полета



Леща на Люнеберг

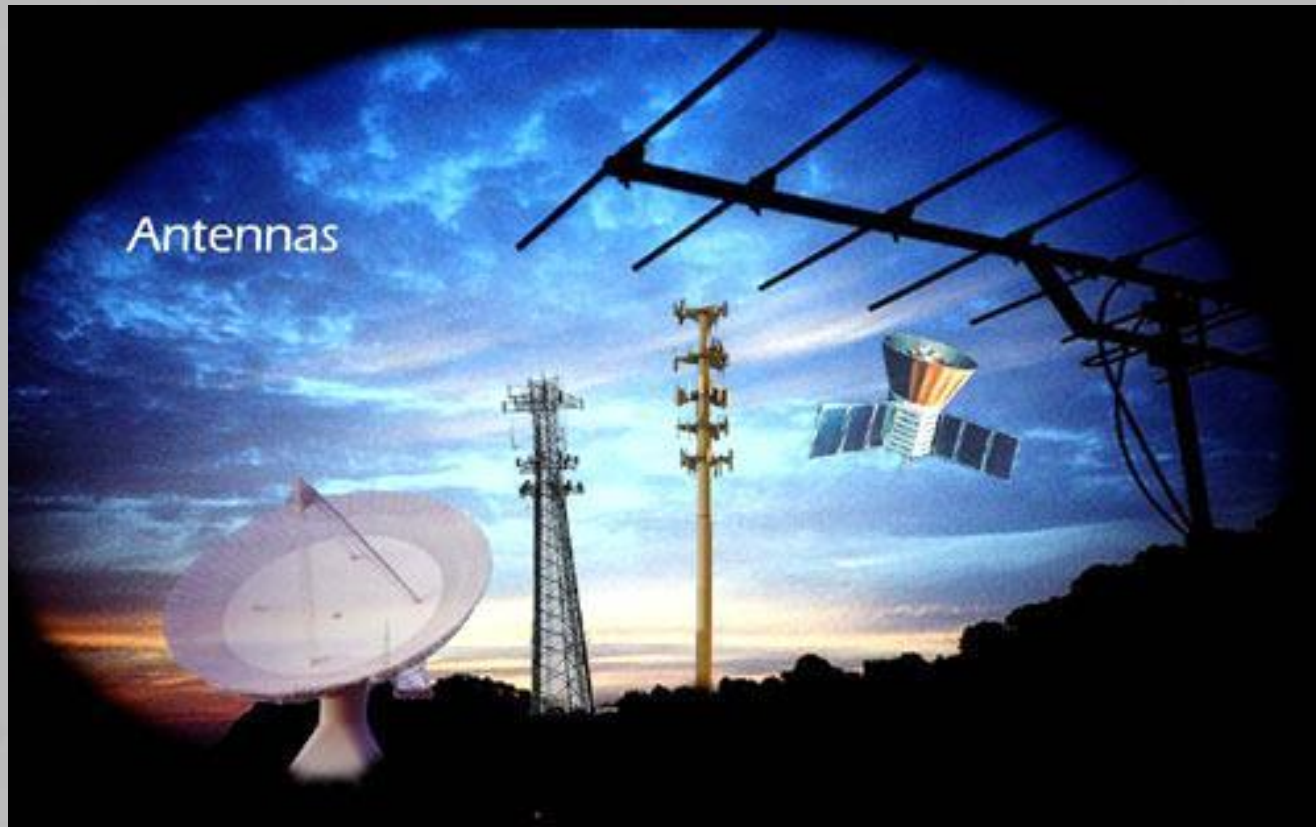


40GHz.avi



10ghz_pol_lin.avi

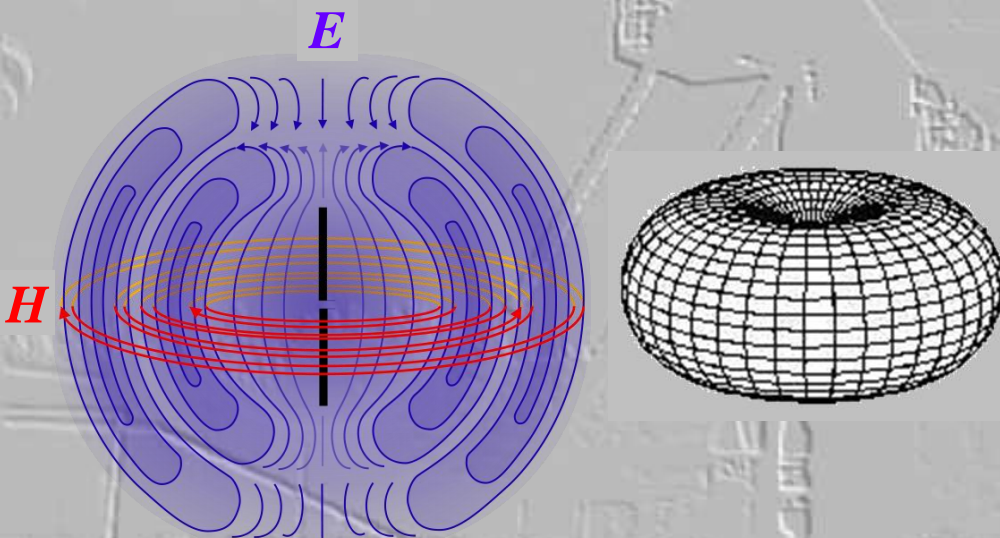
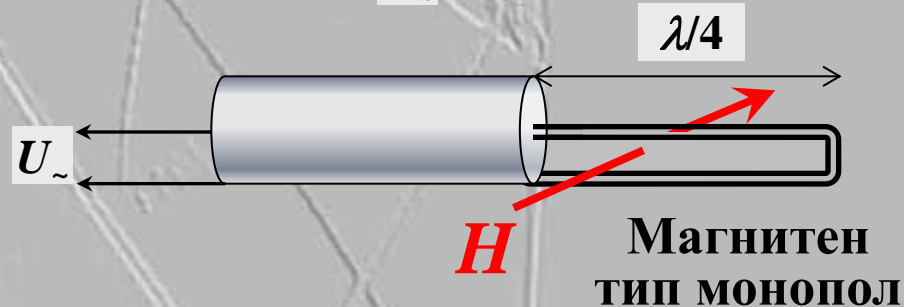
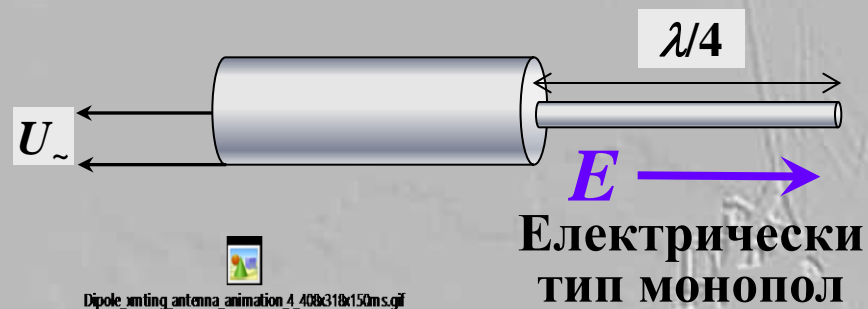
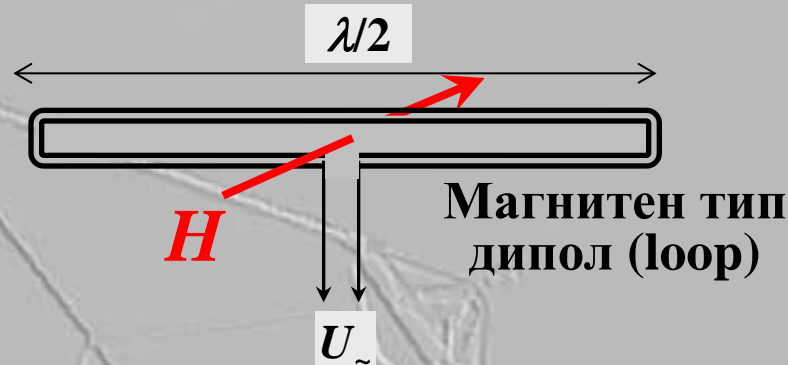
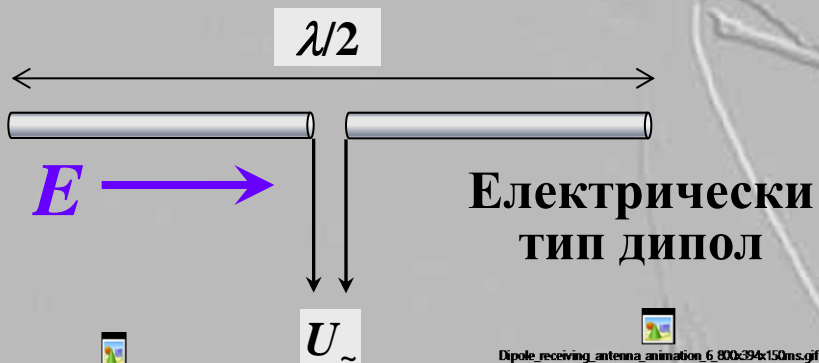
Преминаване на плоска вълна през антенен радом (покрытие)



Видове антени



Жични антени – диполи и монополи



Диполните и монополните антени са много разпространени, вкл. и в мобилните комуникации. Технологично са много прости за реализация, но имат широка диаграма и не са ефективни

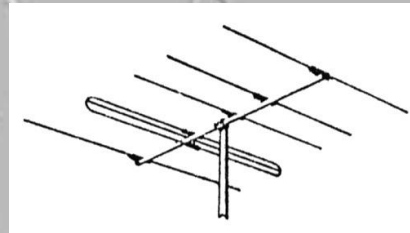
Използване на диполни и монополни антени



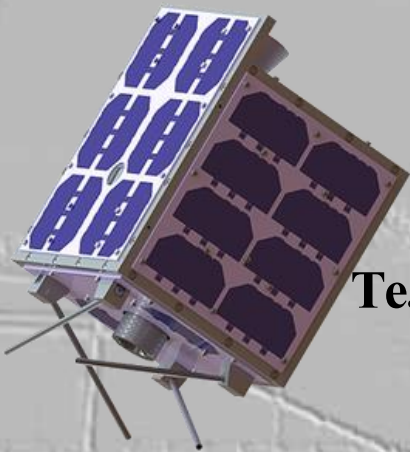
Wi-Fi антени (2.45 GHz)



UHF и TV антени



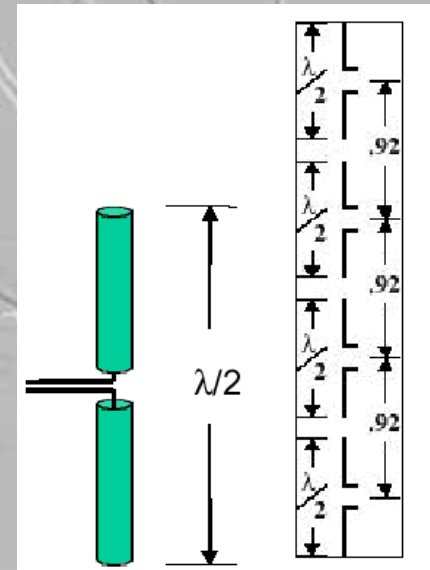
Антени за коли



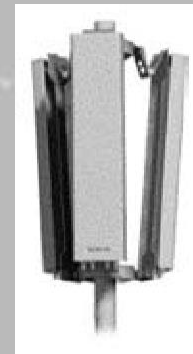
Телеметрични антени за малки спътници



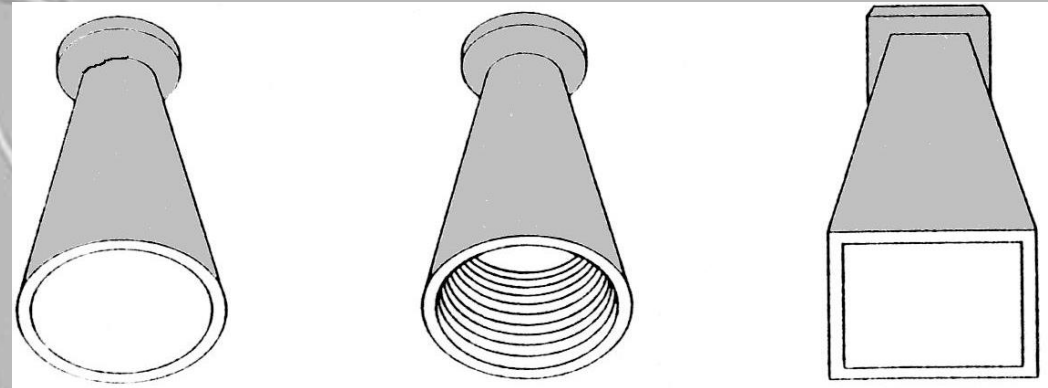
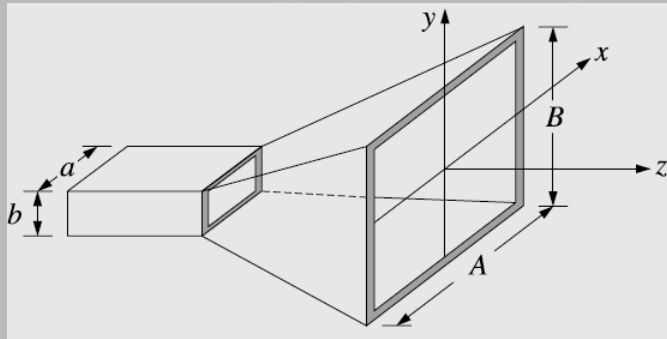
Гъвкави диполни антени върху текстил



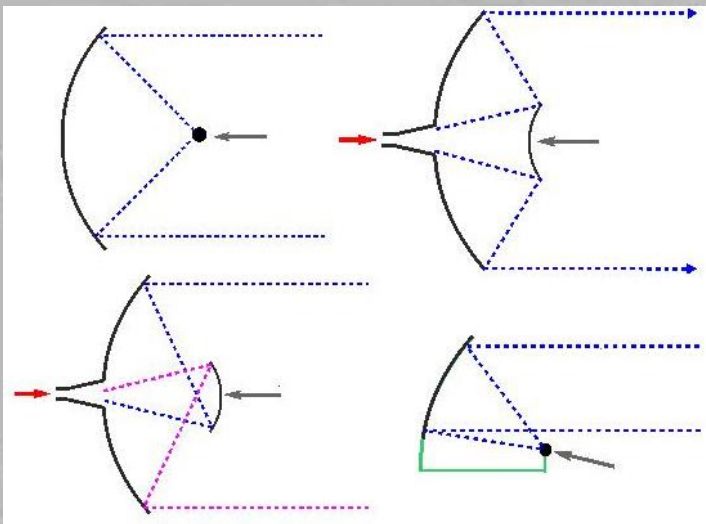
Секторни антени за базови станции



Апертурни антени – рупори и рефлектори (огледални чинии)



Рупорни (horn) антени



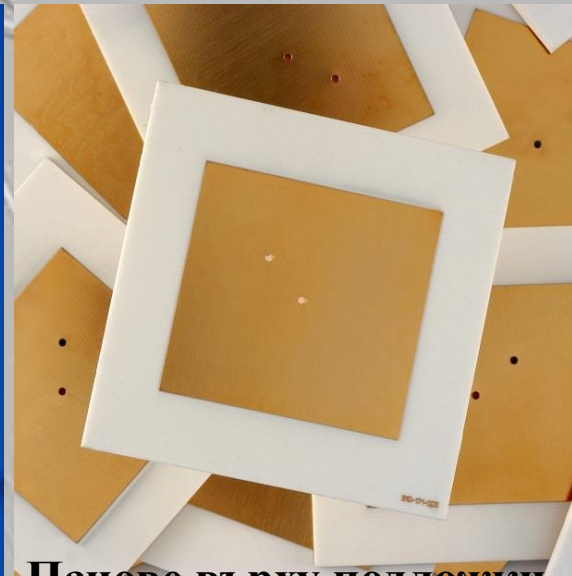
Рефлекторни (огледални) антени



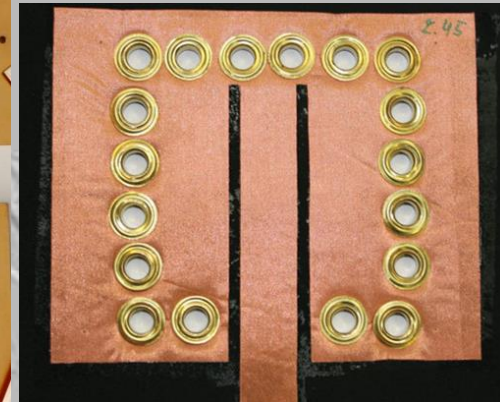
Микролентови излъчватели; пачове (patches)



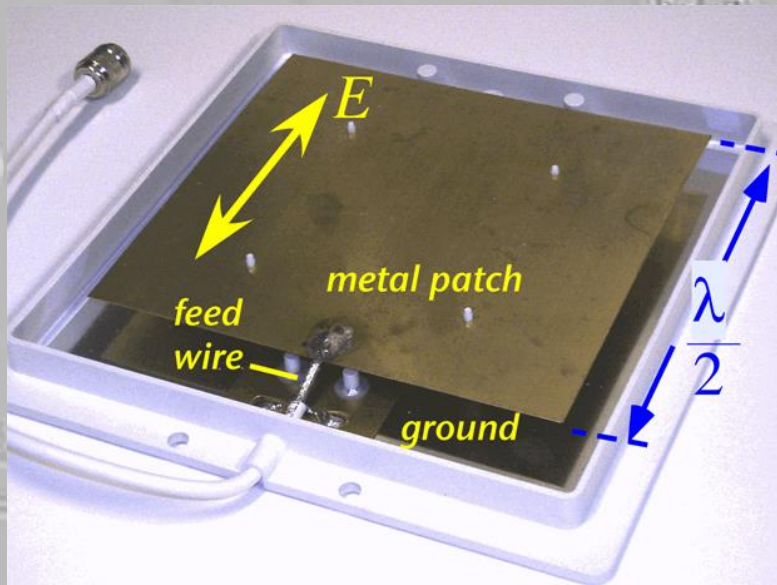
Пачове за GPS



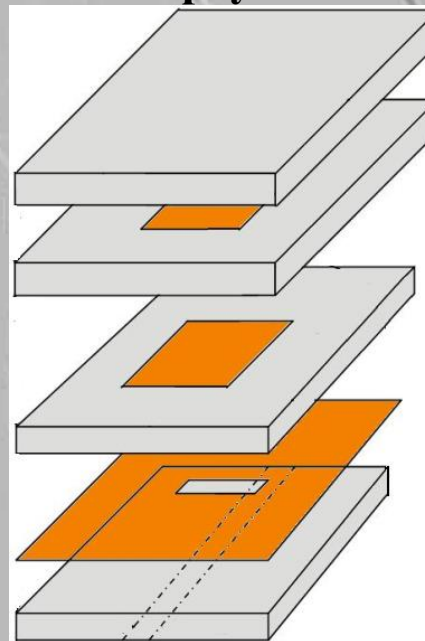
Пачове върху подложки



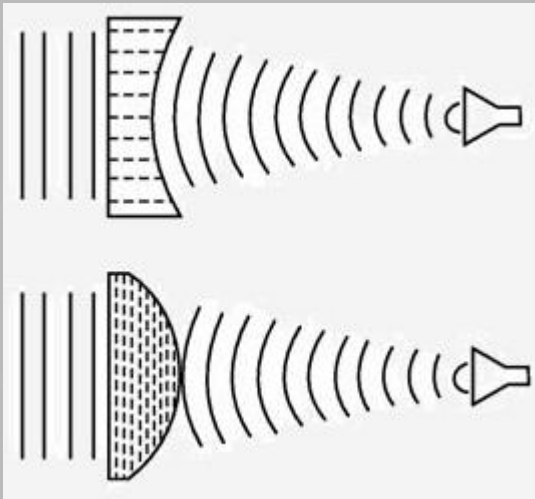
Пачове върху
текстил



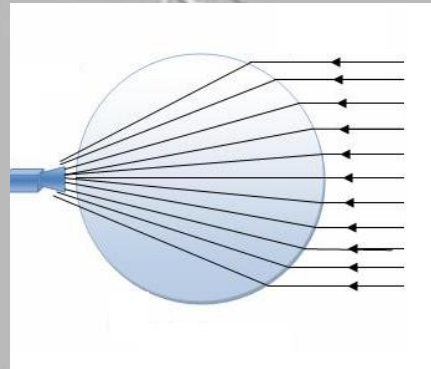
Пачове с въдушно запълване



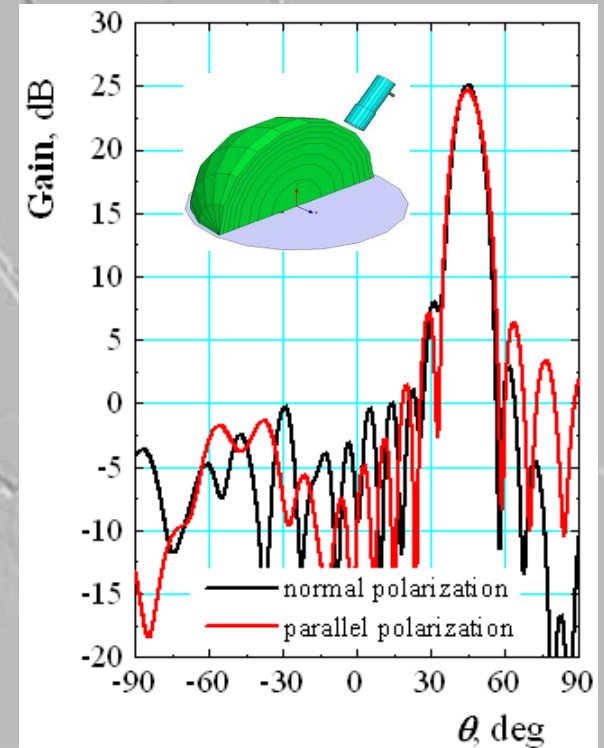
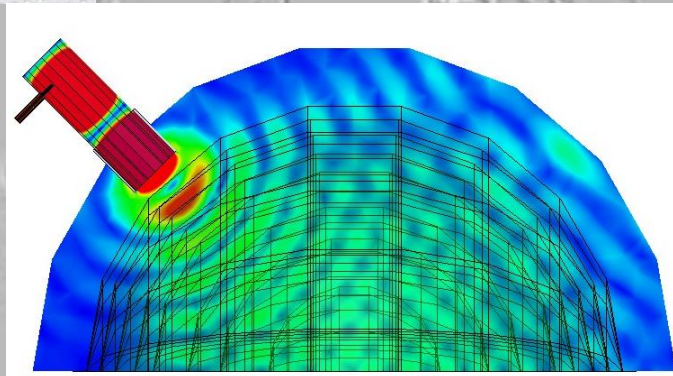
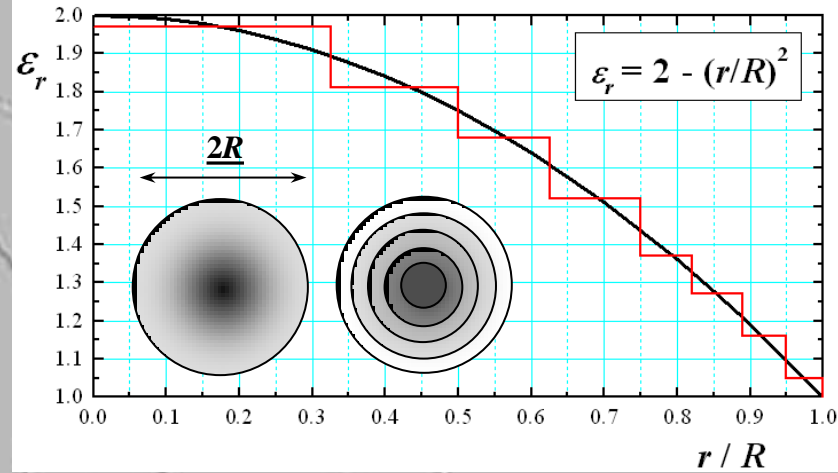
Лещови антени



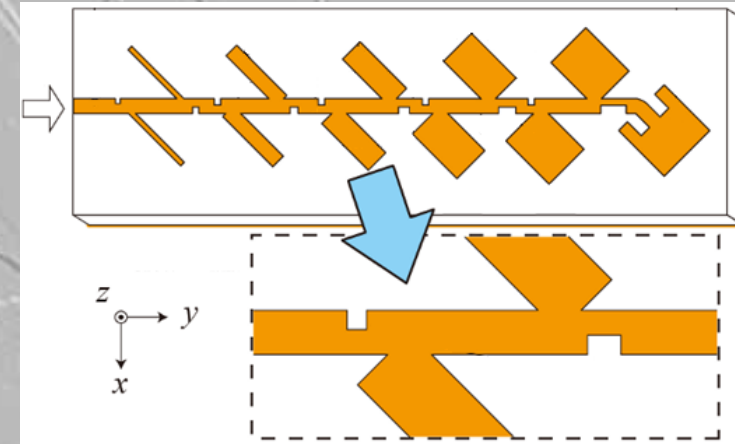
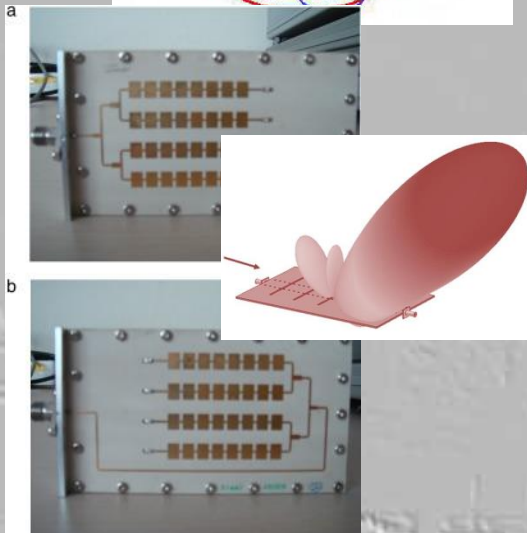
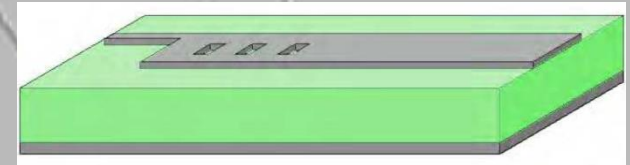
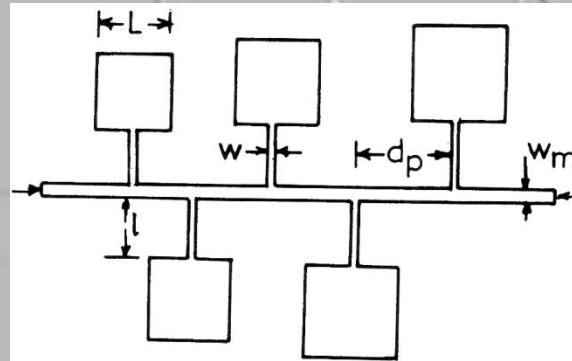
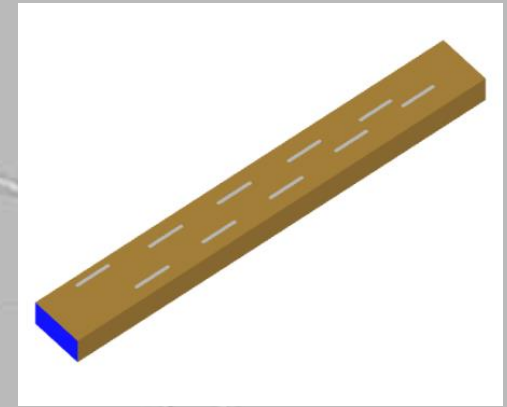
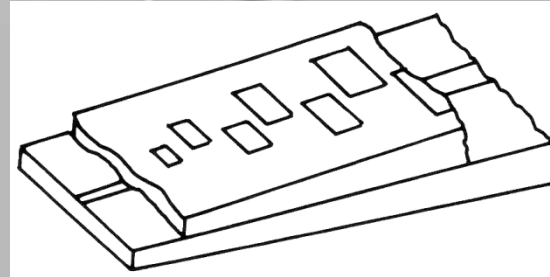
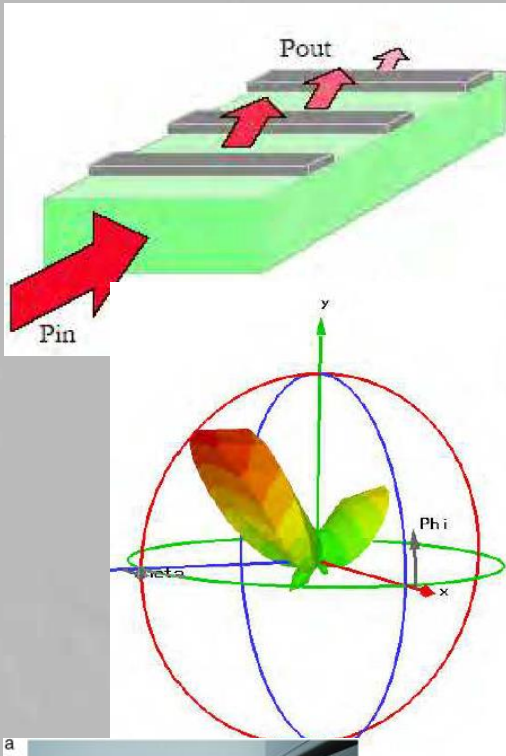
Диелектрични лещи



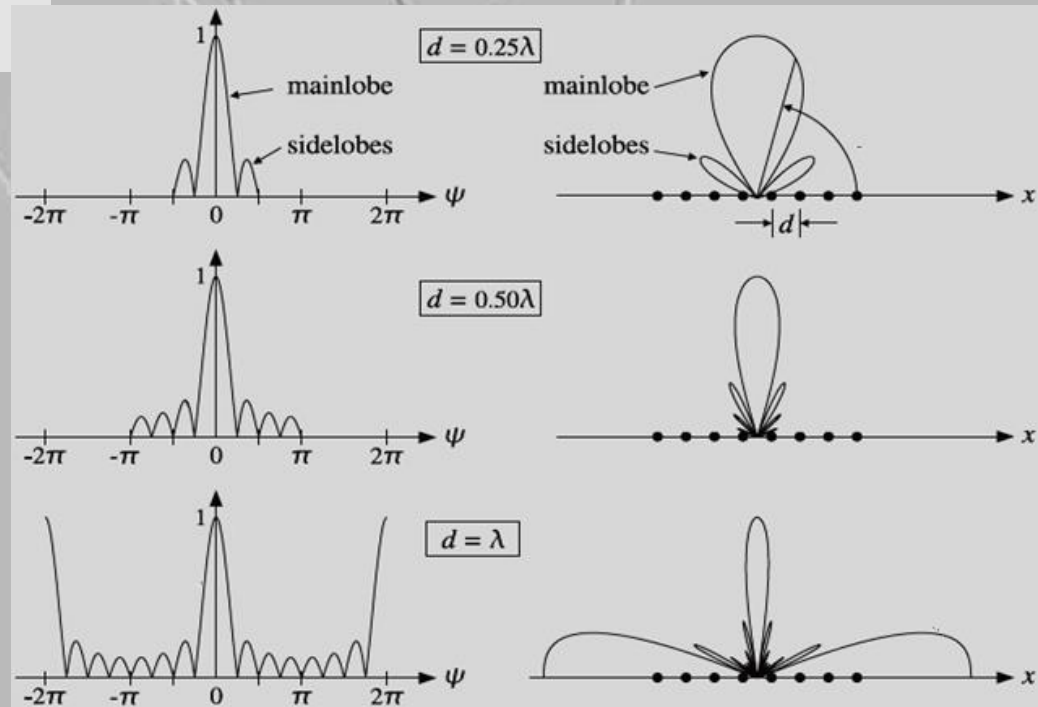
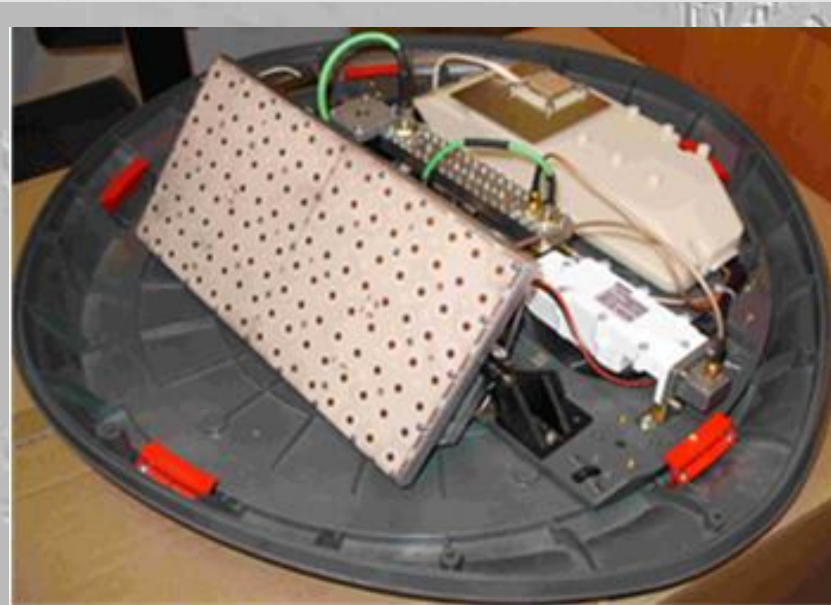
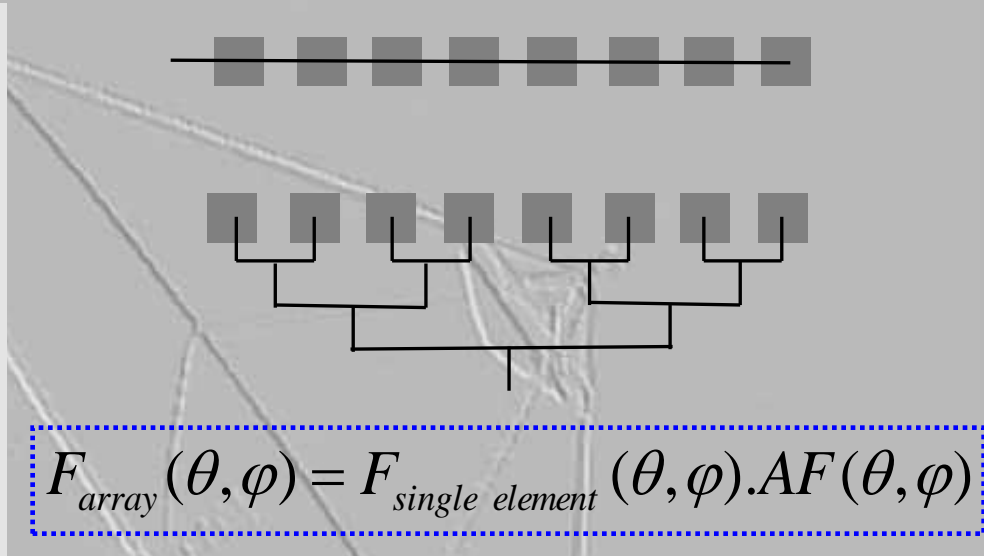
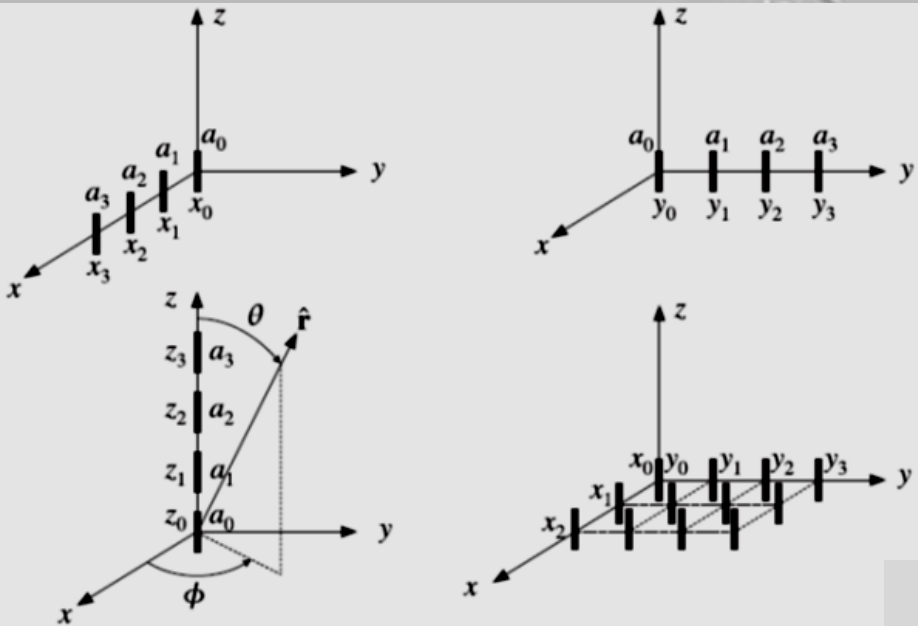
Леща на Луненберг



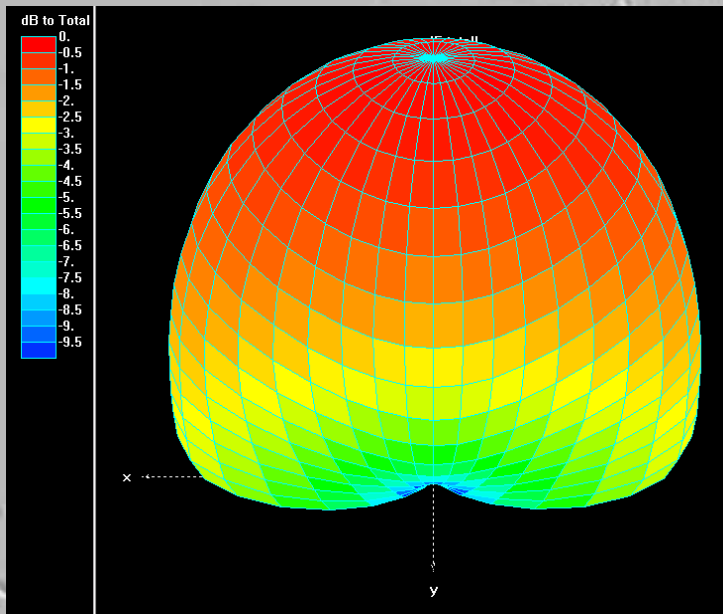
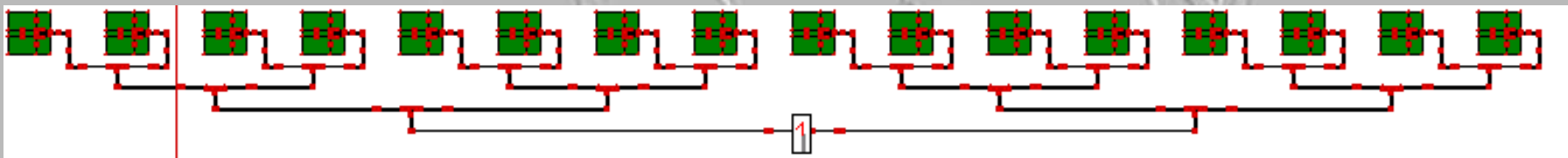
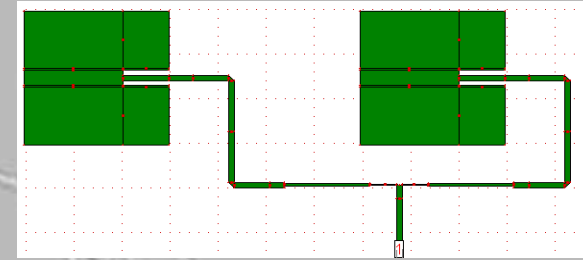
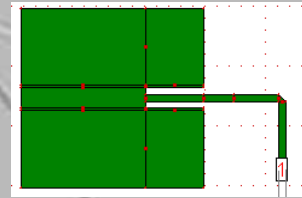
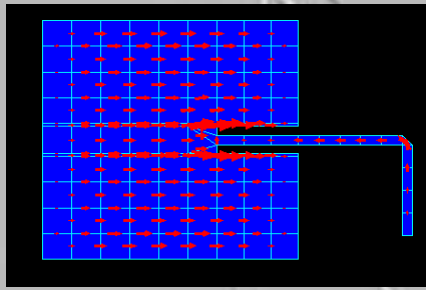
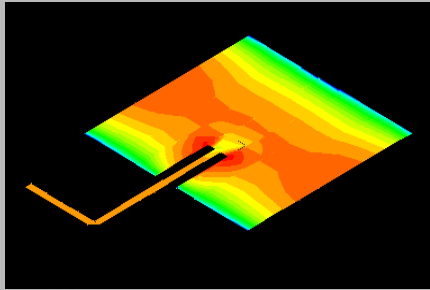
Антени с бягаща вълна



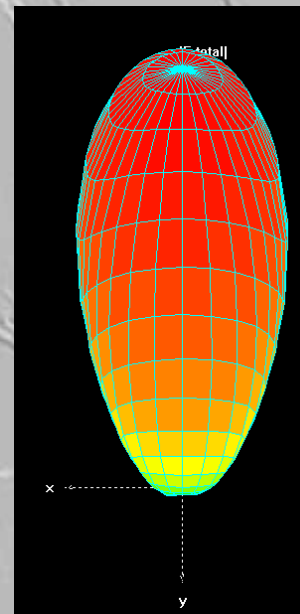
Антенни решетки



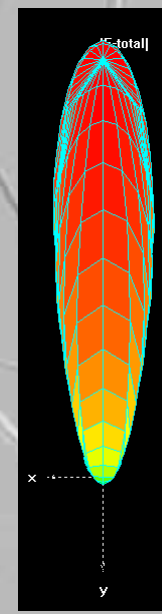
Антенния лъч става по-тънък с увеличаване на броя елементи



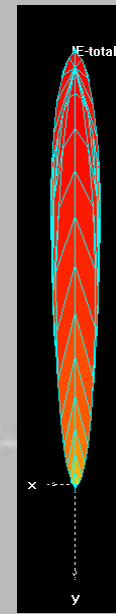
1 базов елемент



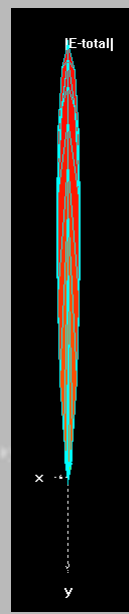
2 елемента



4

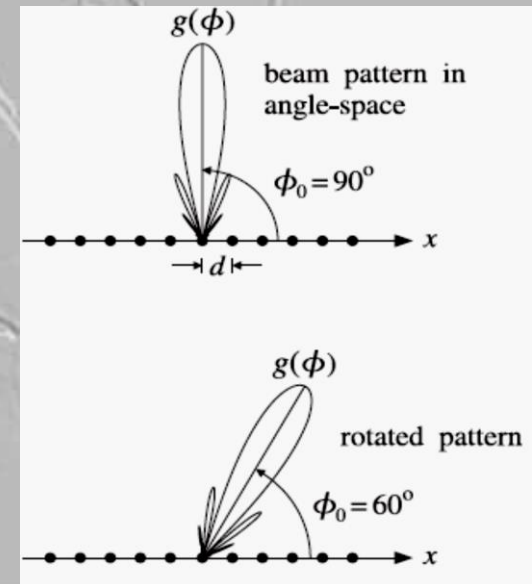
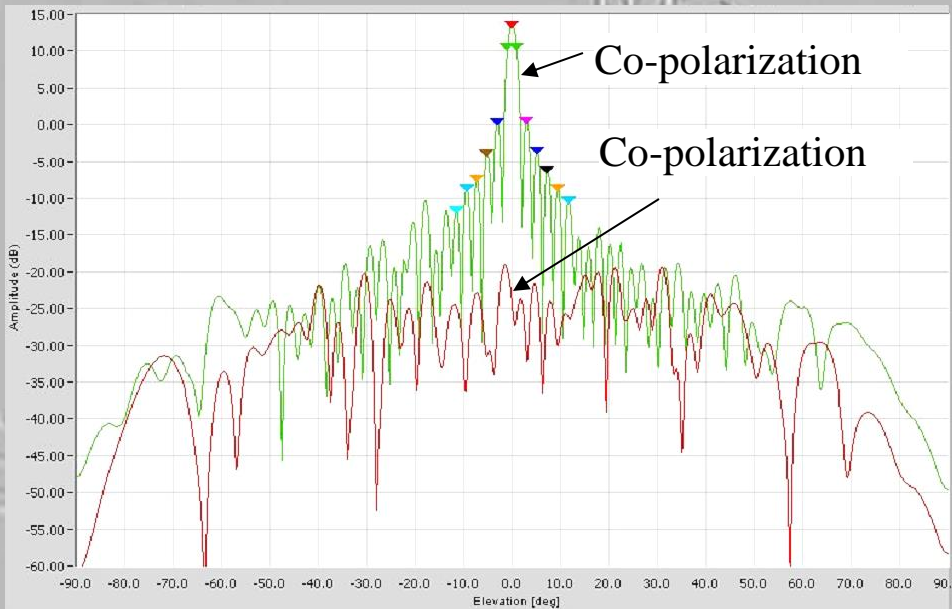
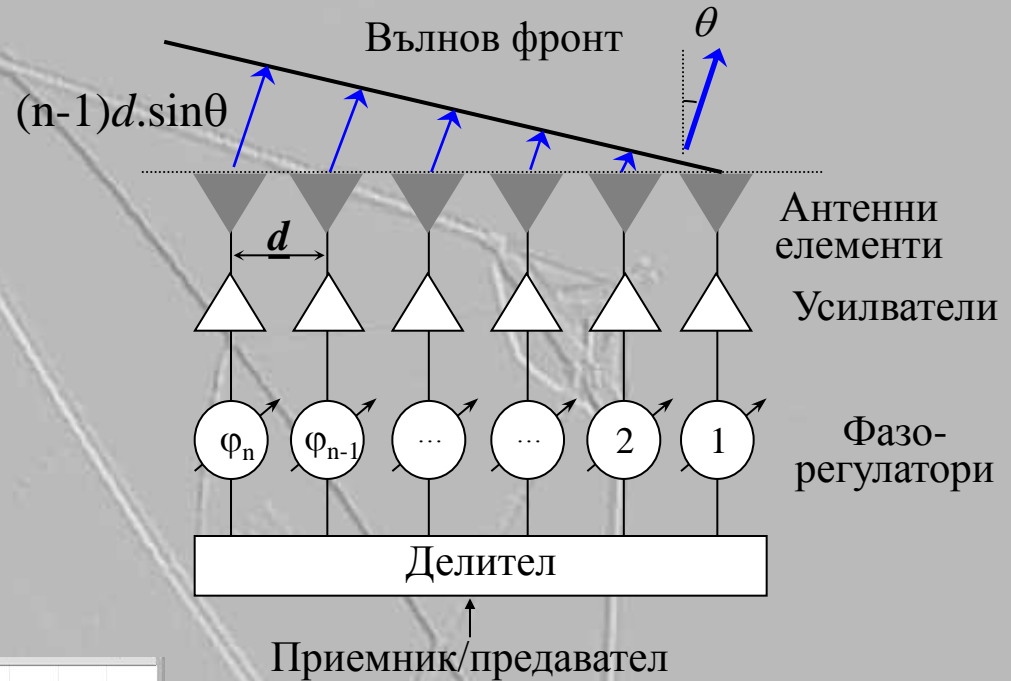
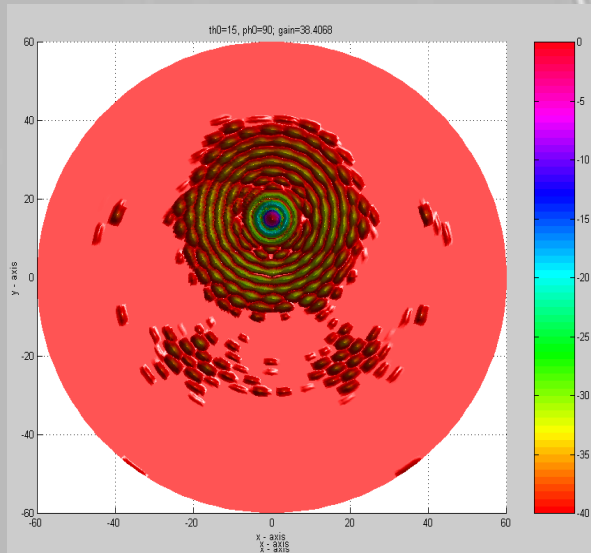


8



16

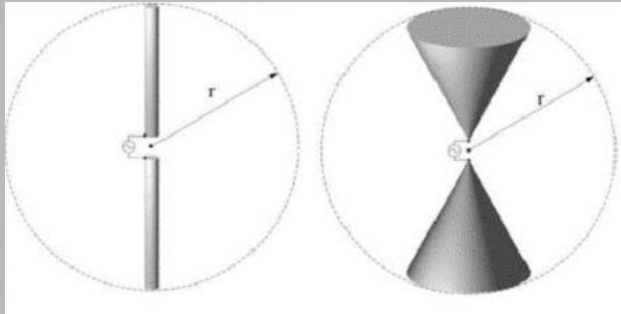
Формиране и сканиране на лъча





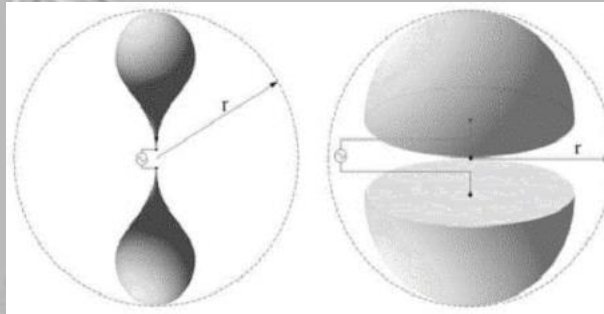
Оптимизация на антените

Широколентови диполи и монополи



Типичен дипол
(тясна BW)

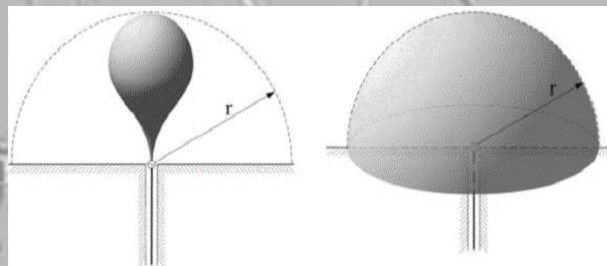
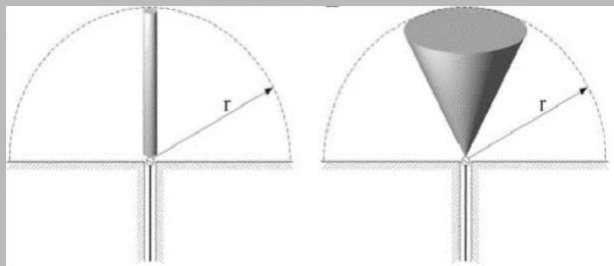
Би-коничен дипол
(средна BW)



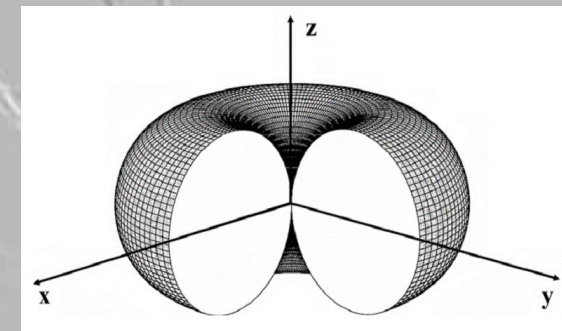
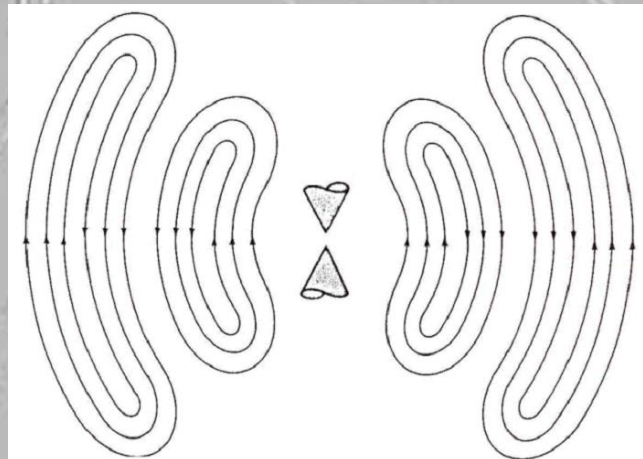
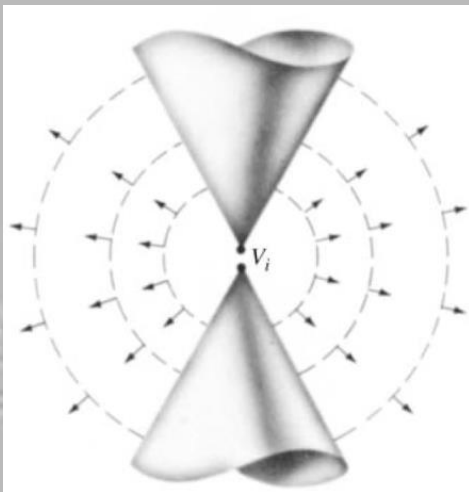
Скосен дипол
(средна BW)

Хемисферичен
дипол (широка BW)

**Широколентови
диполи (BW –
честотна лента)**

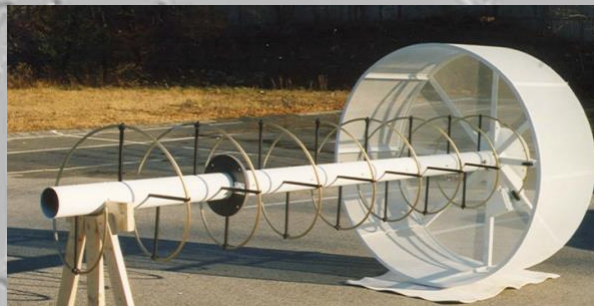
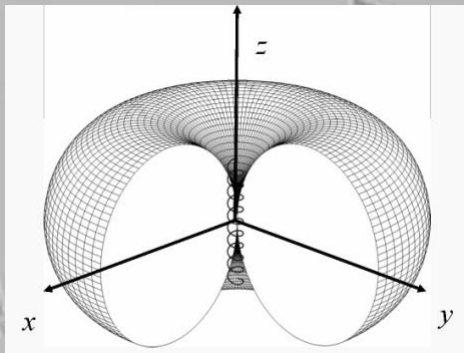
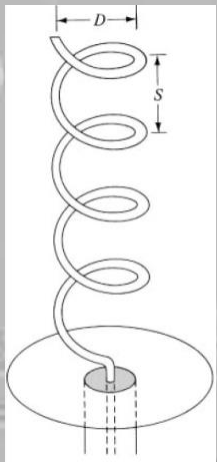
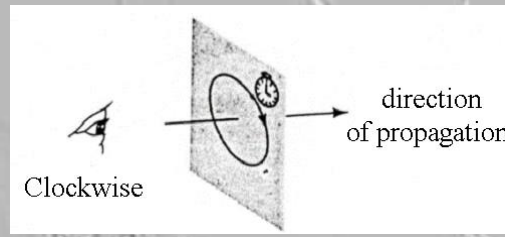
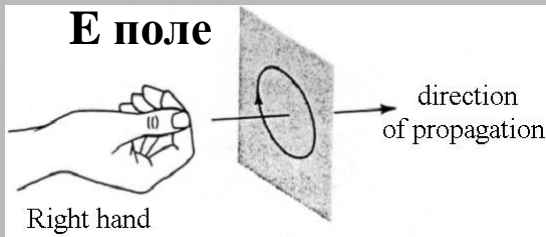
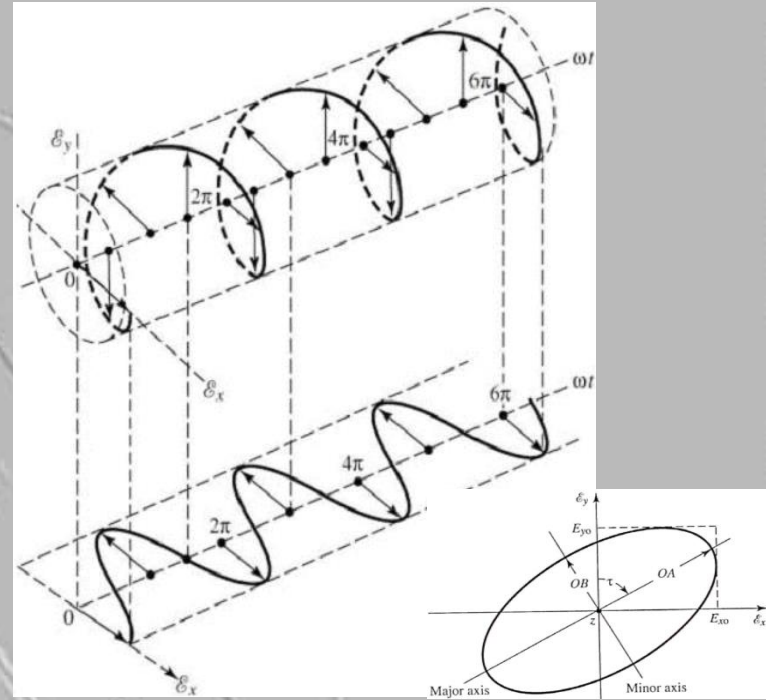
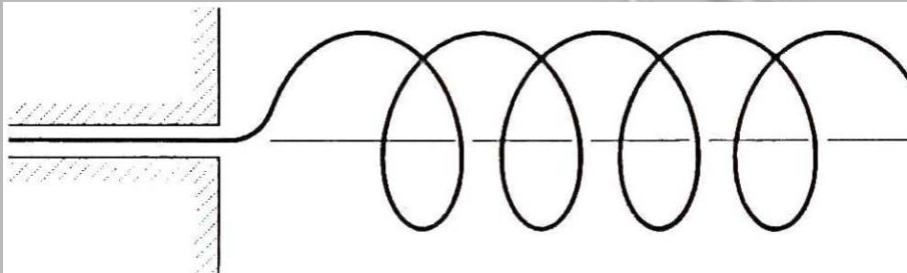


**Широколентови
монополи**



**Оmnі-насочена
диаграма**

Кръгово поляризирани диполи и монополи



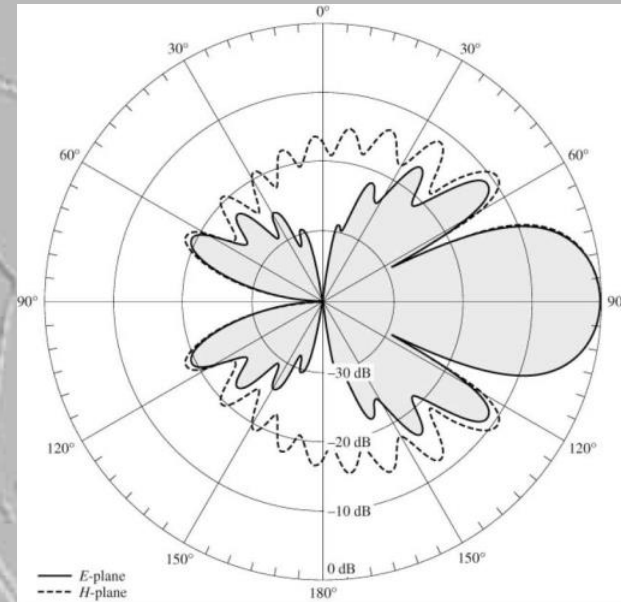
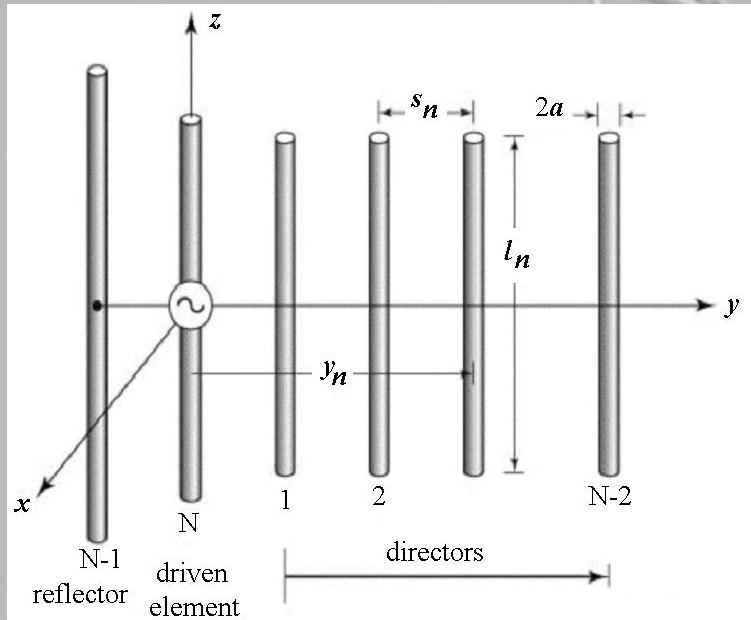
Нискочестотна спирална антена (100-160 MHz)



GPS спирална антена за спътник

Прост спирален монопол

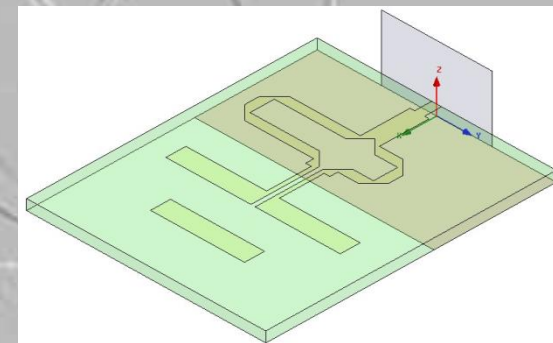
Антени с бягаща вълна – Yagi-Uda антени



Диаграма на излъчване

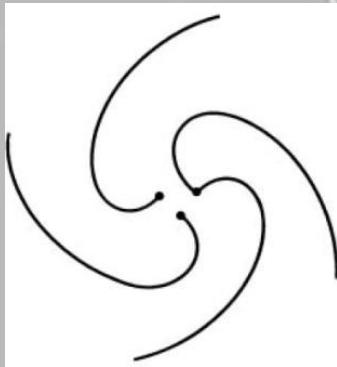
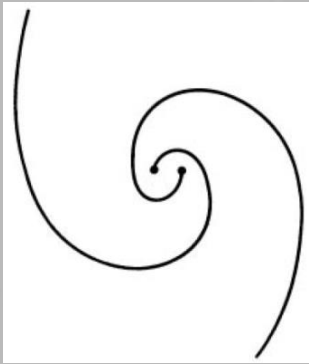


Типична TV Yagi-Uda антена

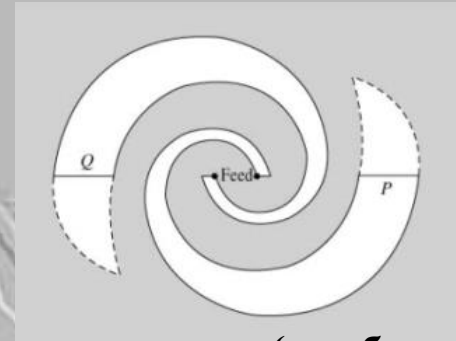
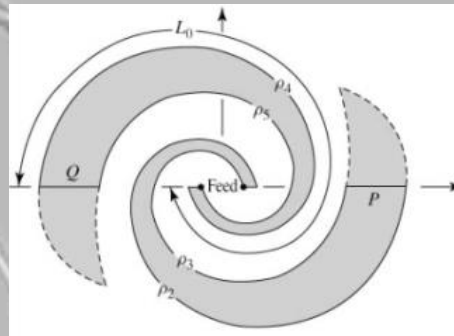


Планарна quasi-Yagi антена за 9-10 GHz (антена за повърхнинни вълни)

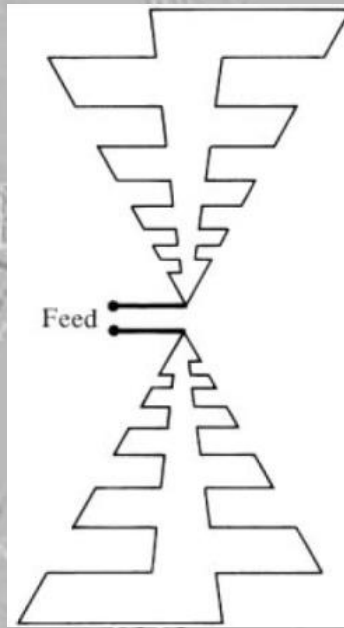
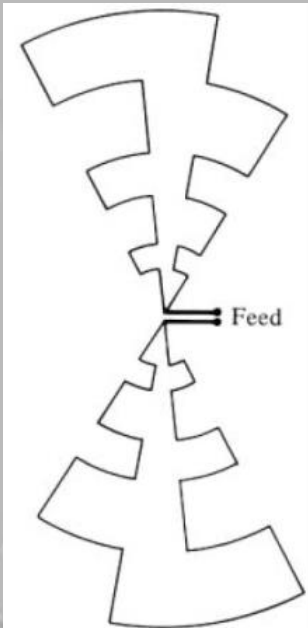
Ултрашироколентори (UWB) и log-периодични антени



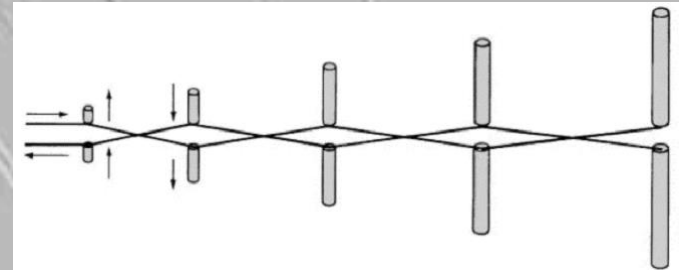
Честотно-независими антени – двойни или множество спирали



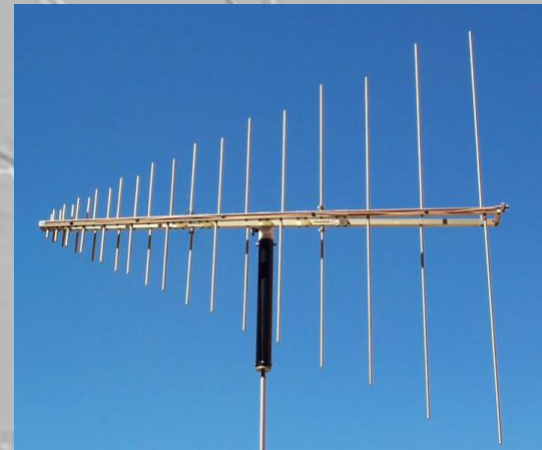
Спирални и спирално-процепни антени (за обща дължина $> \lambda$ радиационната диграма и импеданса са честотно независими)



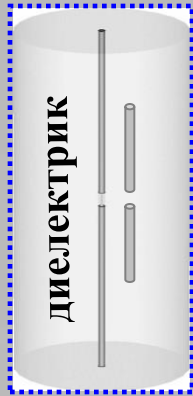
Log-периодични антени – честотна независимост се появява над определена ниско-честотна гранична честота (за която дължината на най-големия зъб е $= \lambda/4$)



Log-периодичен диполи свързани на кръст

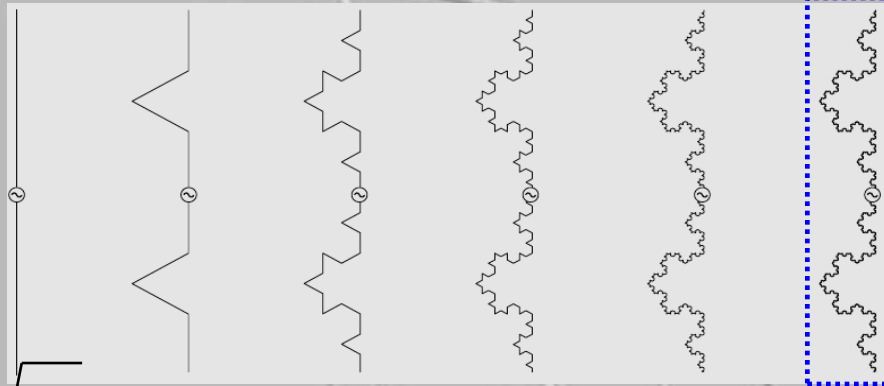


Миниатюрни фрактални антени

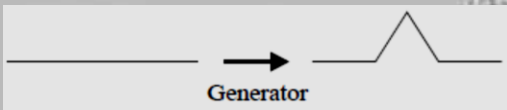
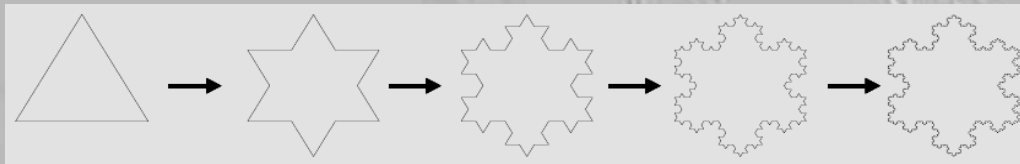
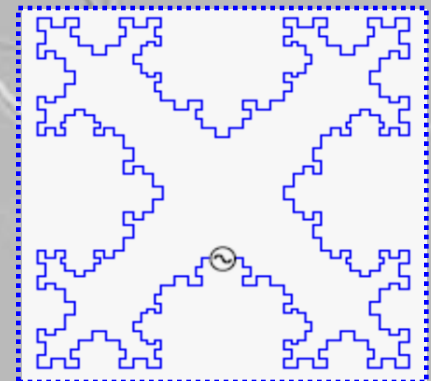
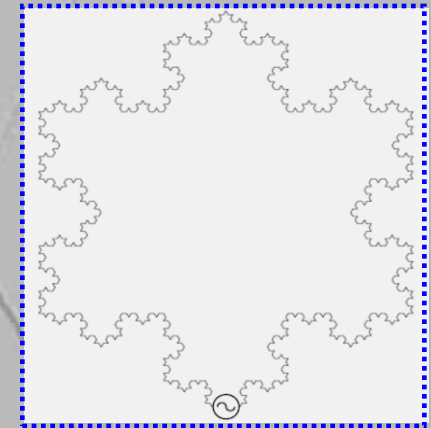


Дипол е диелектрично
запълване

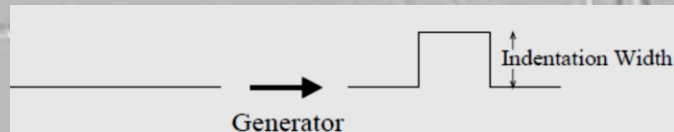
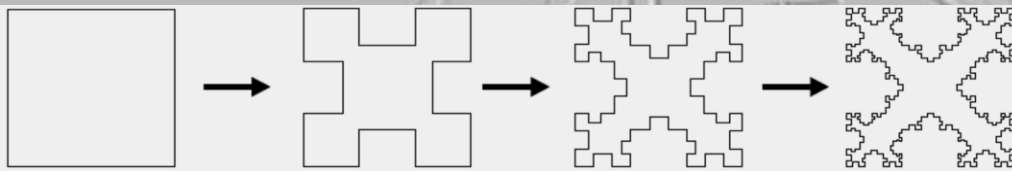
$$\sim 1/\sqrt{\epsilon_r}$$



**Фрактален дипол на
Minkowski**

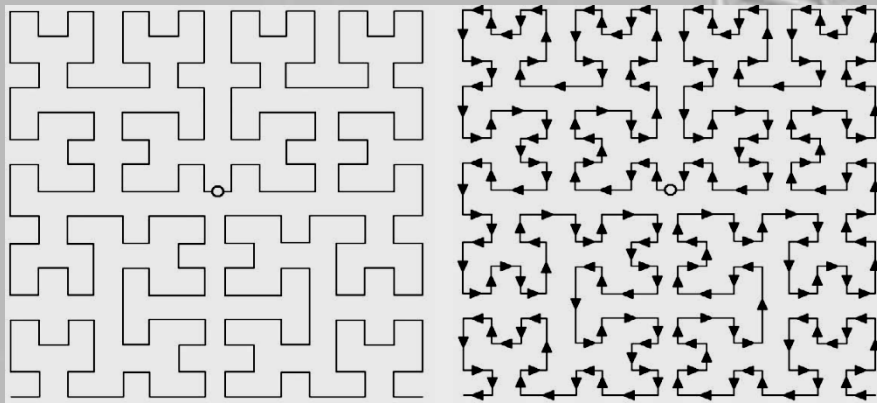


**Фрактален контур (loop)
на Minkowski**

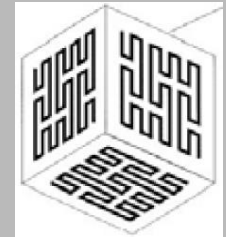
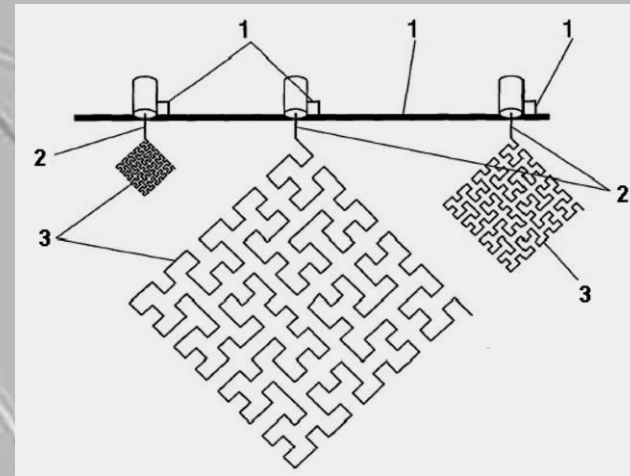


**Фрактален контур (loop)
на Koch**

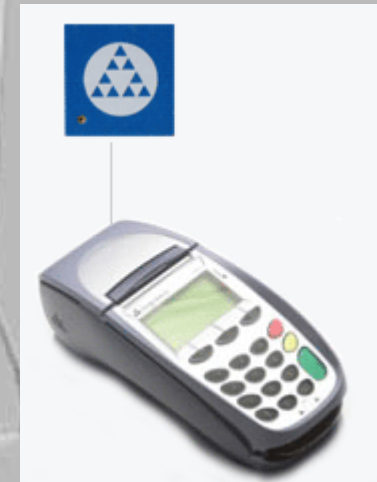
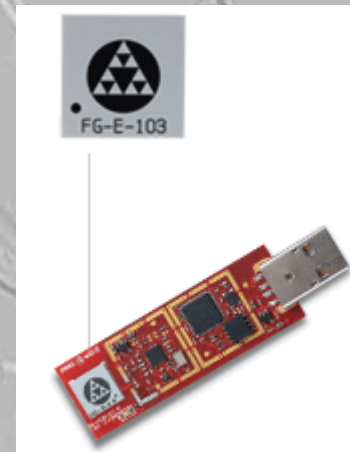
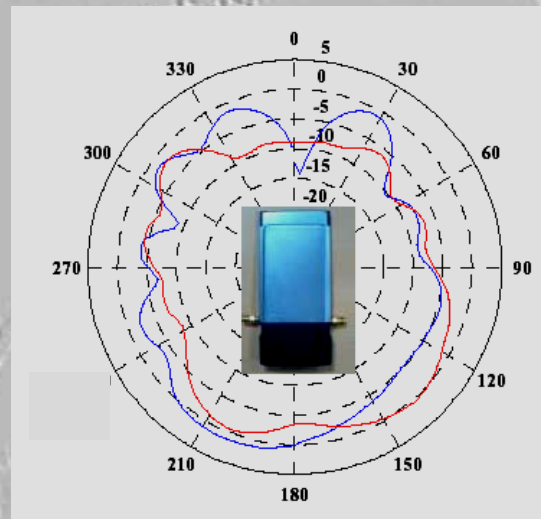
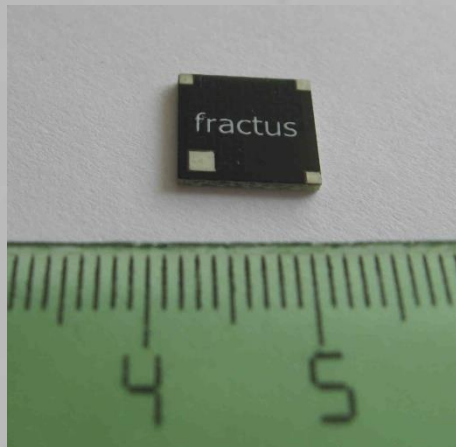
Миниатюрни фрактални антени за GPS приложения



Изображение на дипол от самонепресичаща се Hilbert крива

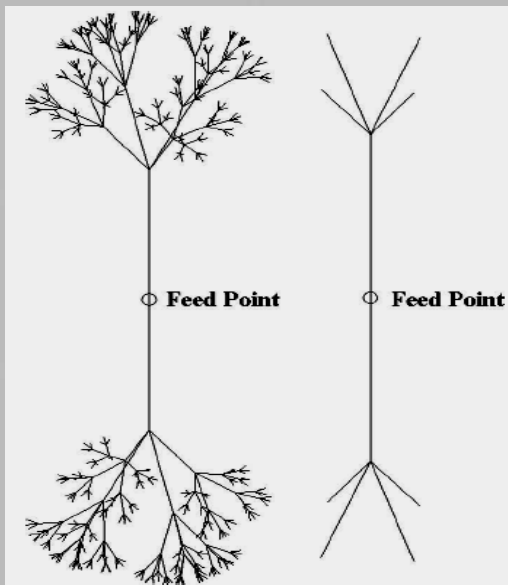


2D и 3D фрактални монополи на Hilbert

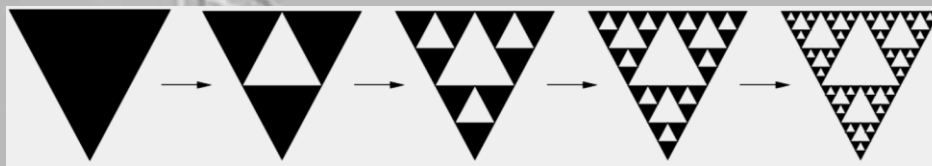


Субминиатюрна GPS антена на приемник на основата на миниатюрен фрактален дипол

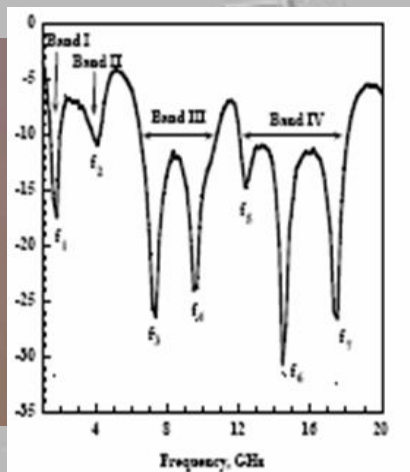
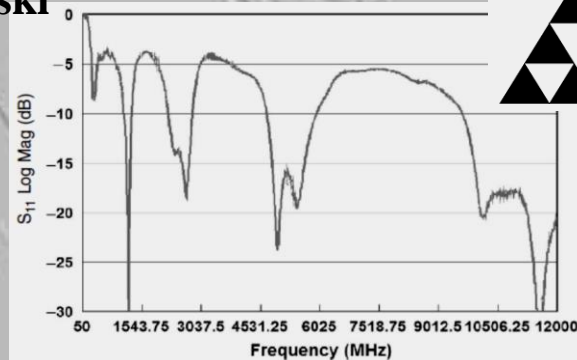
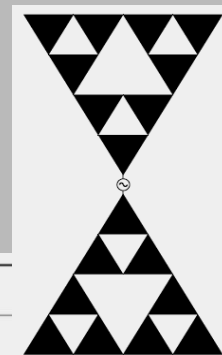
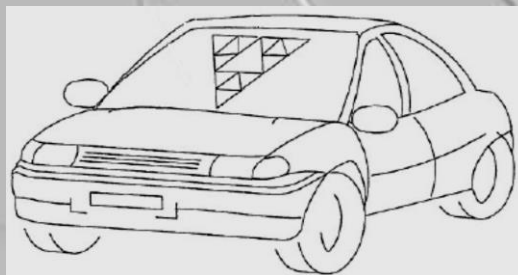
Много-лентови фрактални антени „дървета“ и „килими“



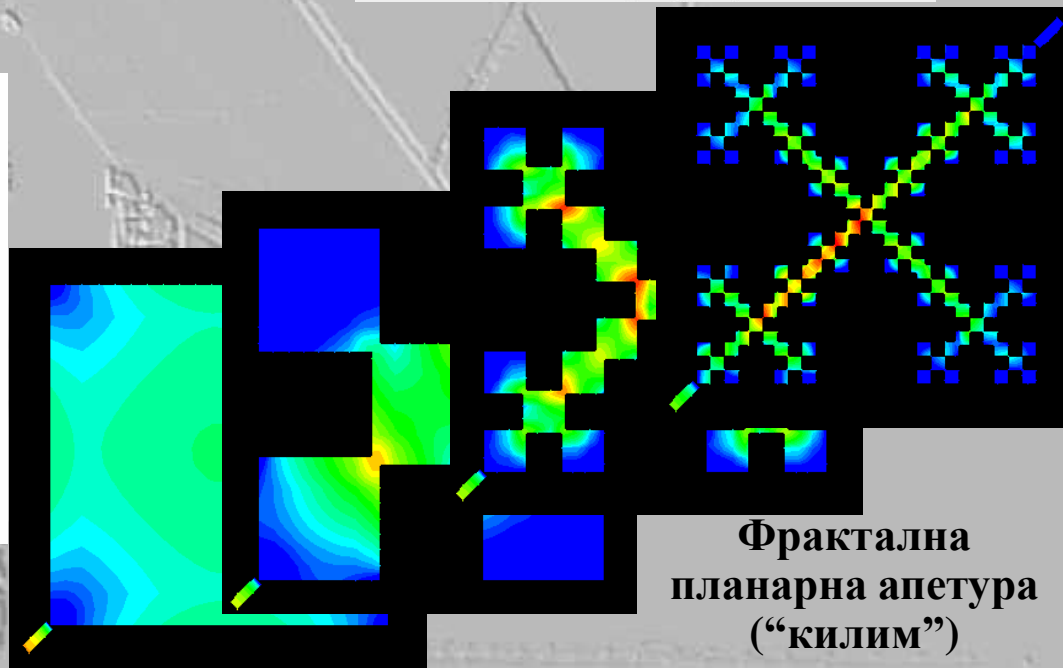
Фрактален дървовиден дипол



Фрактални много-лентови диполи и монополи на Sierpinski

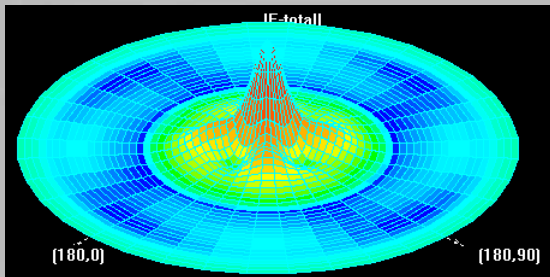
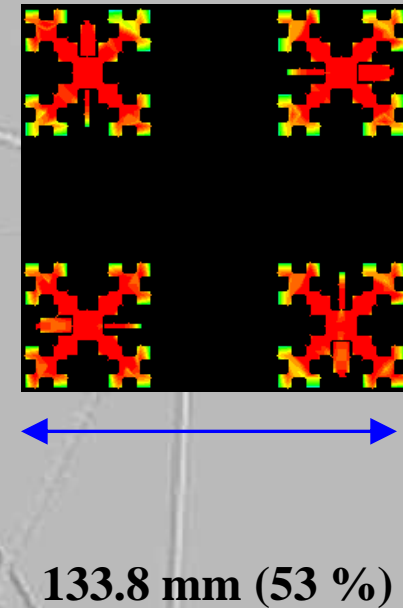
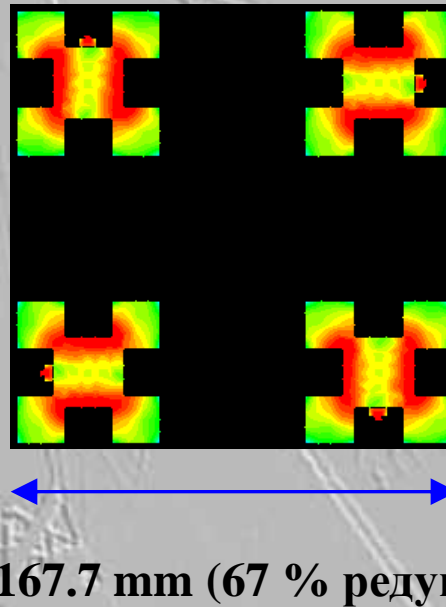
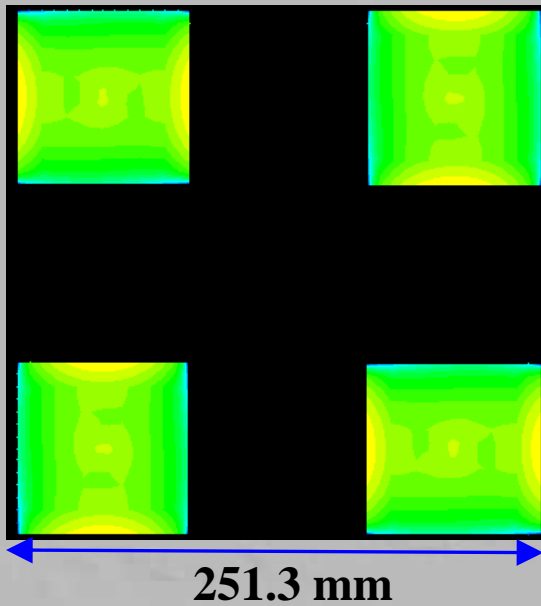


Екзотично фрактално „дърво“ 2-18 GHz

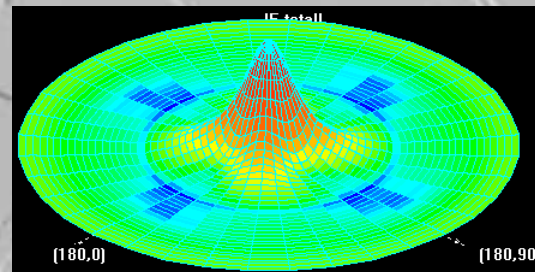


Фрактална планарна апетура („килим“)

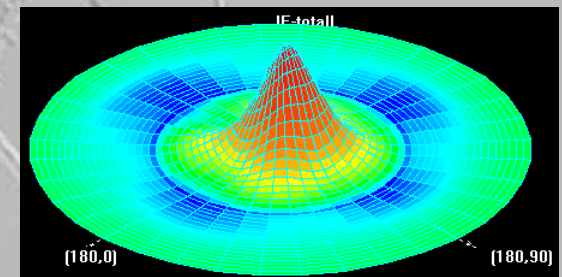
Пример: как намалява площта на миниатюрни фрактални антенни решетки?



3-dB width = 31 degree
Directivity = 13.0 dBi
Efficiency = 82 %
Frequency = 1500 MHz

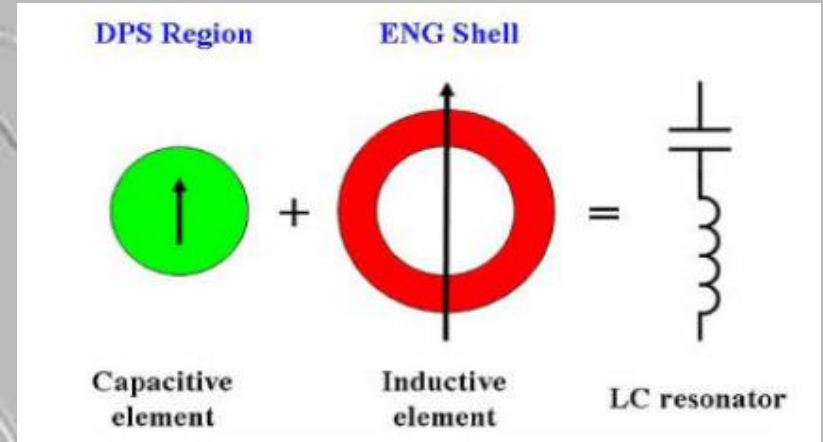
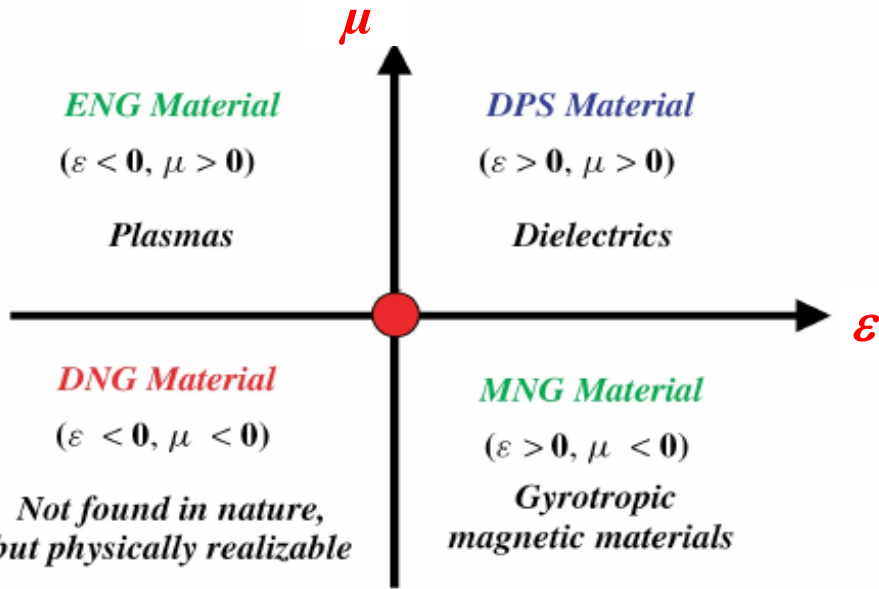


3-dB width = 30 degree
Directivity = 11.8 dBi
Efficiency = 29 %
Frequency = 1500 MHz

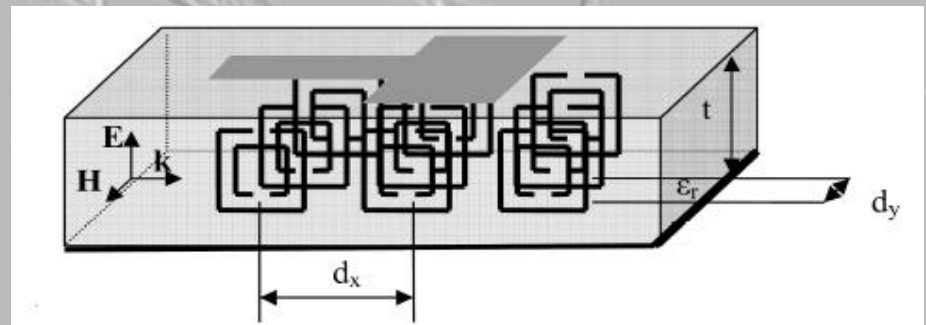
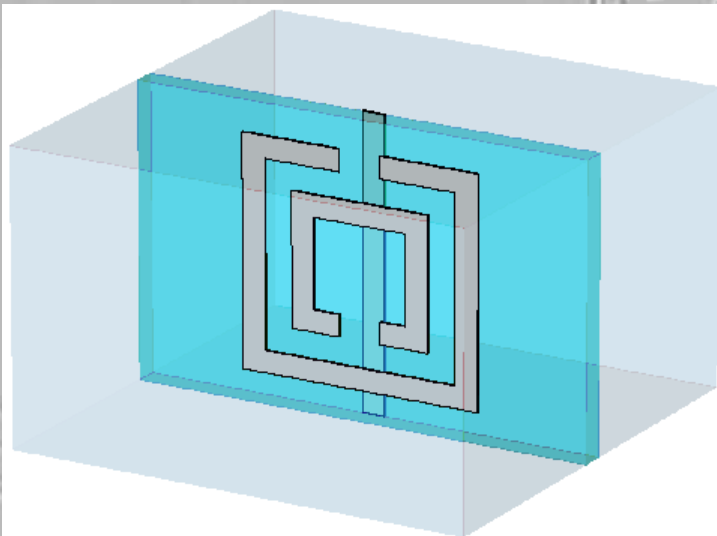
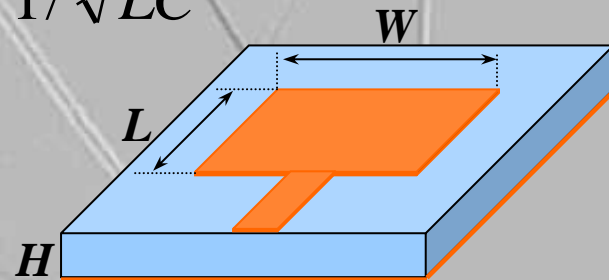


3-dB width = 30 degree
Directivity = 10.7 dBi
Efficiency = 26 %
Frequency = 1500 MHz

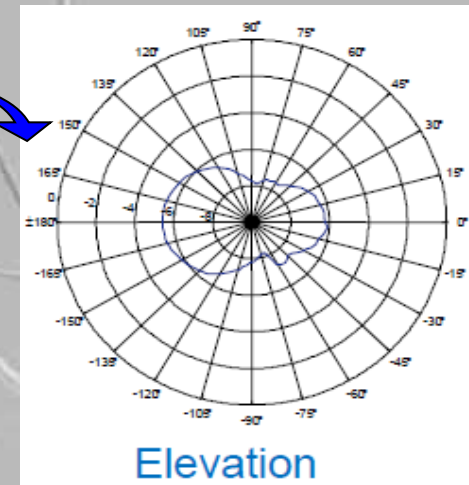
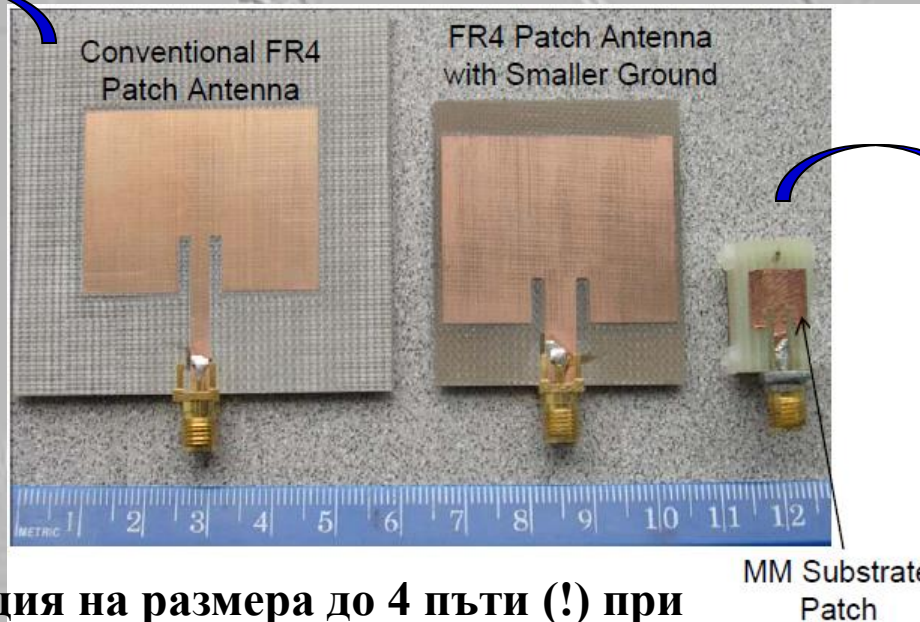
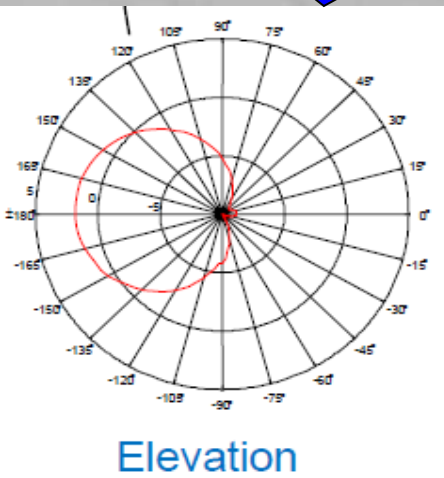
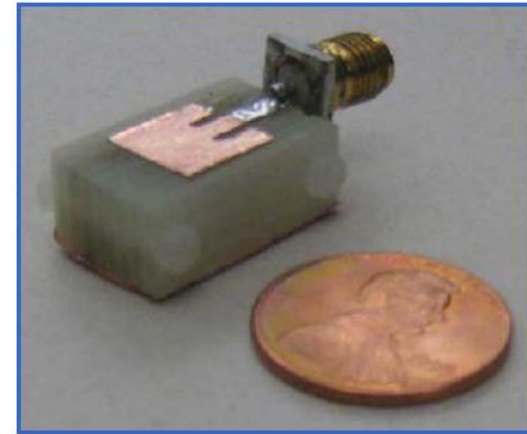
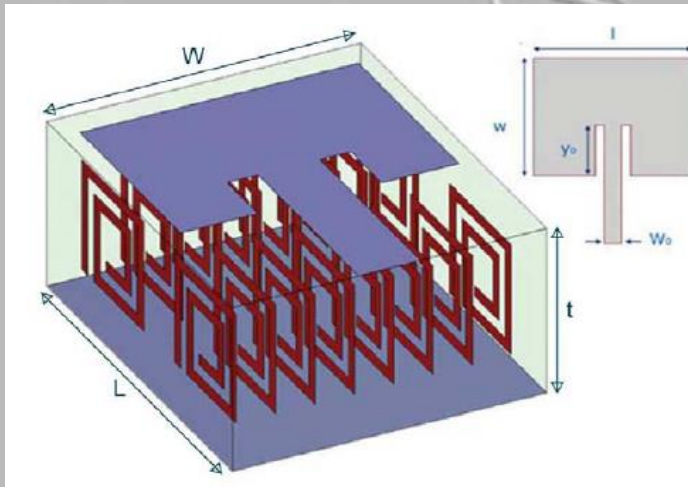
Миниатюрни излъчватели с метаматериали - принципи



$$f \sim 1/\sqrt{LC}$$

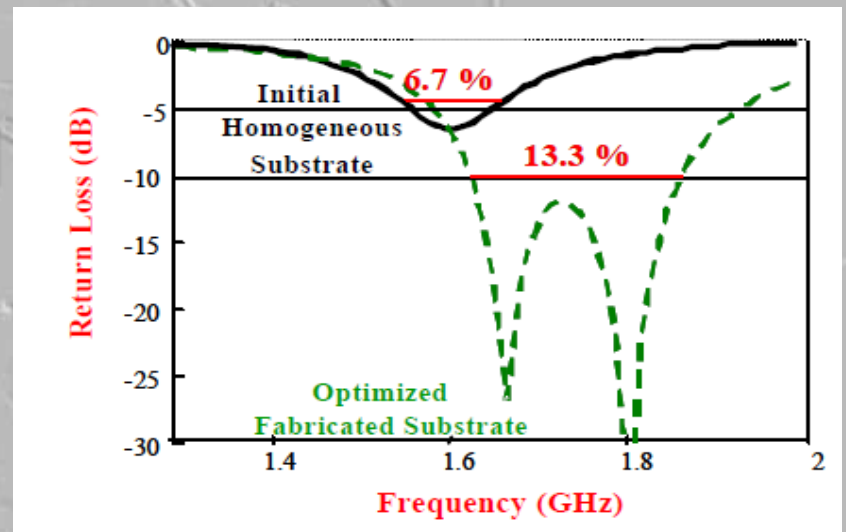
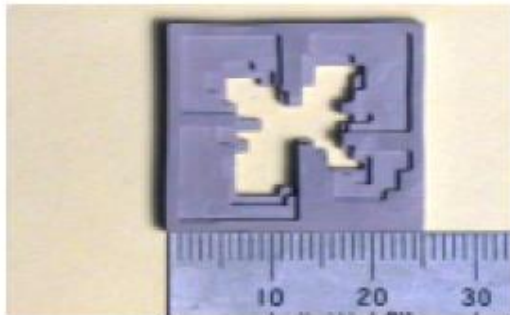
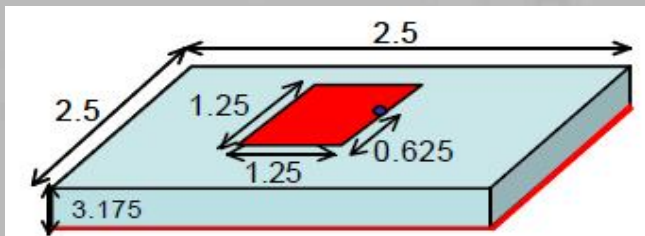
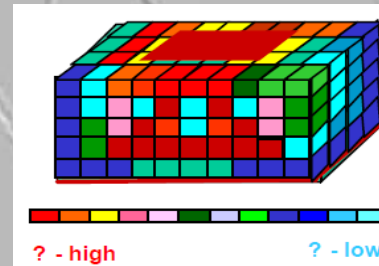
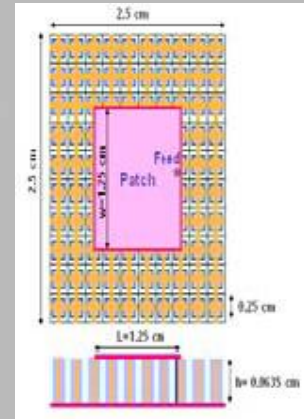
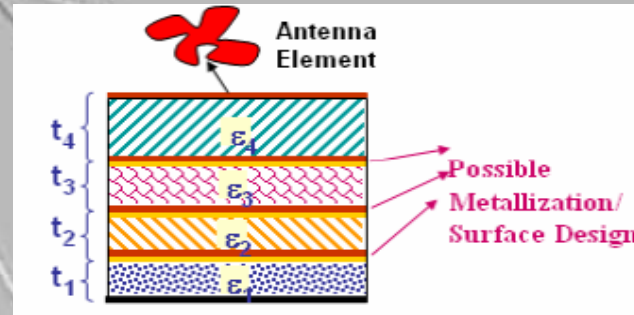
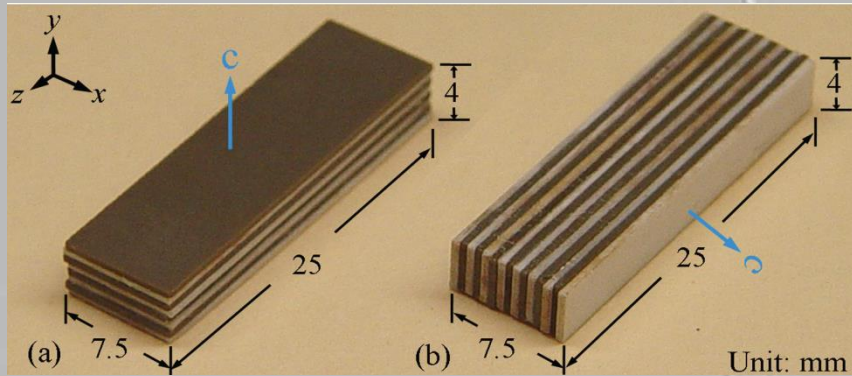


Миниатюрни излъчватели върху подложки от метаматериали

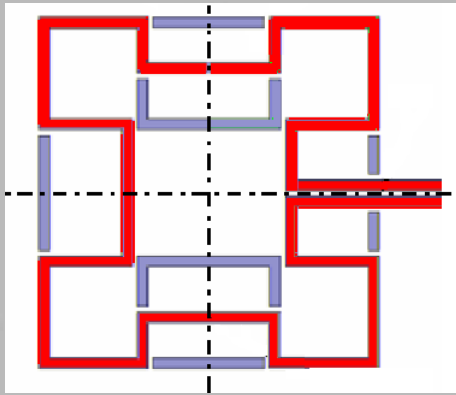


Редукция на размера до 4 пъти (!) при запазване на характеристиките

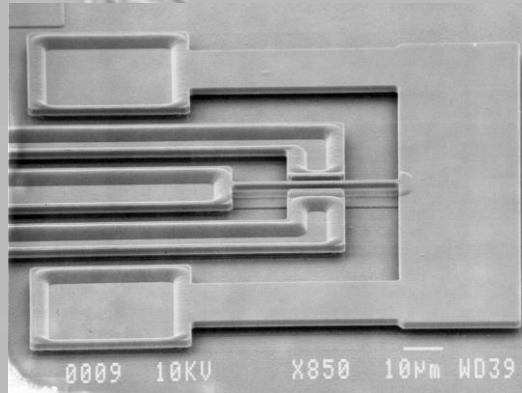
Миниатюрни излъчватели върху подложки от композитни метаматериали



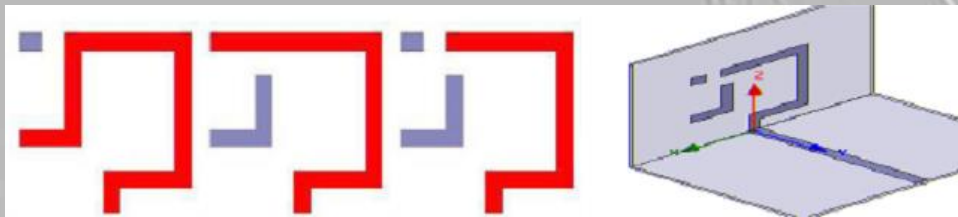
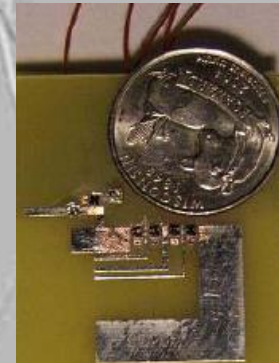
Реконфигурируеми диполи на база на MEMS ключове



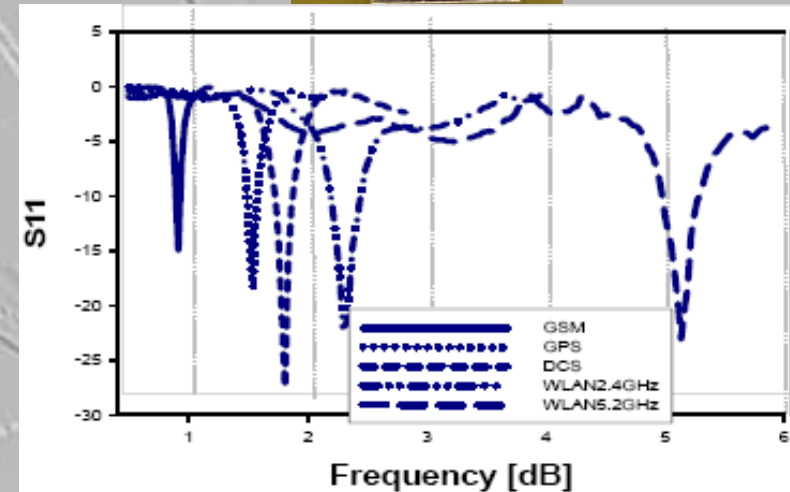
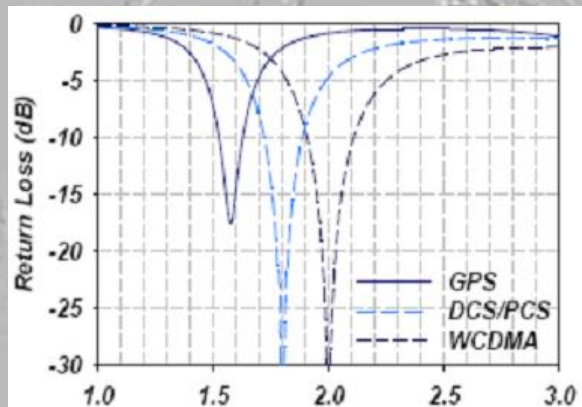
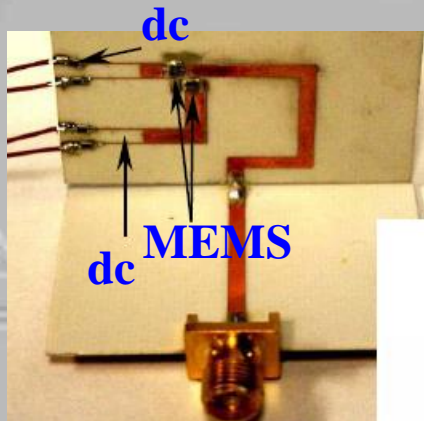
Реконфигурируем дипол



⇐ MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) – миниатюрни бързи ключове, управлявани от dc напрежение

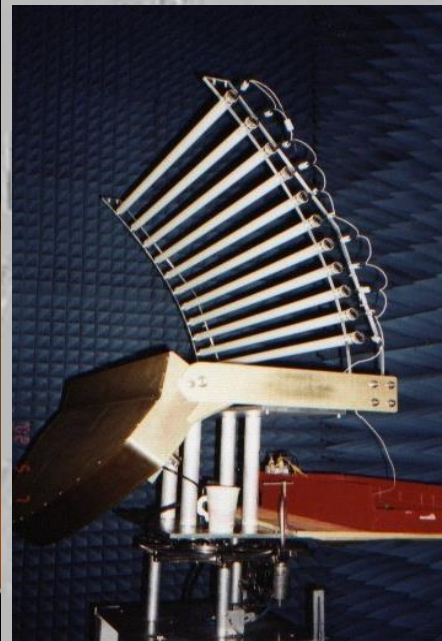
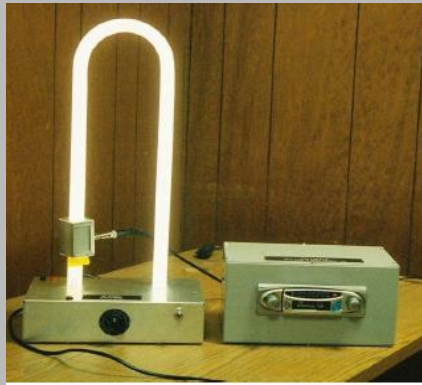


Пример: планарен дипол с два MEMS, който показва как могат да се „покрият“ 3 канала

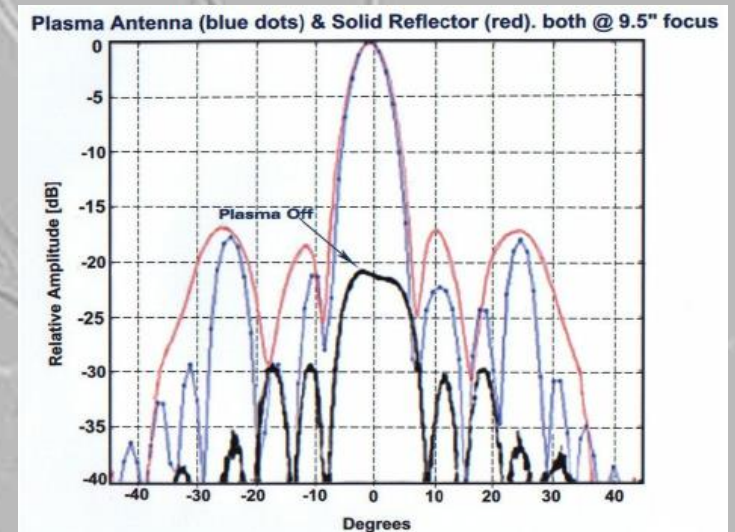


Работеща комуникационна антена с 4 MEMS ключа: покрива GSM900, GPS (1500MHz), GSM1800, WLAN2.4GHz; WLAN5.2GHz

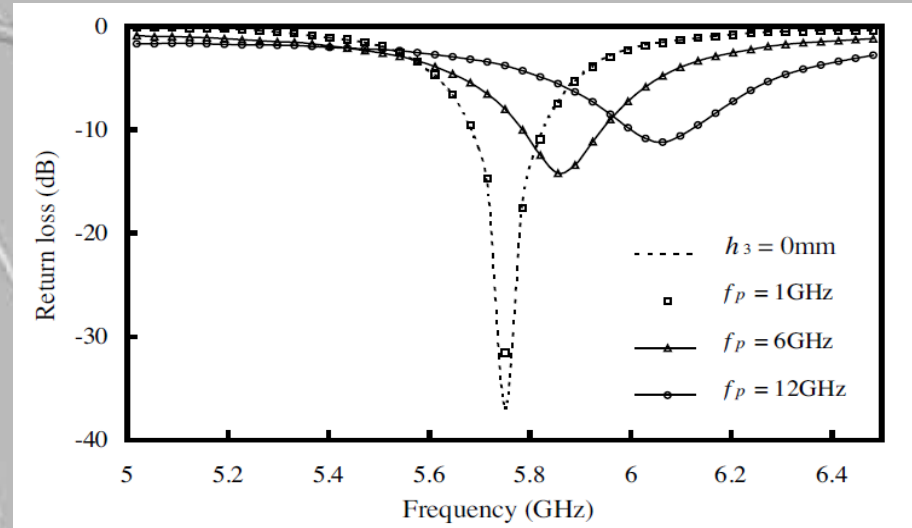
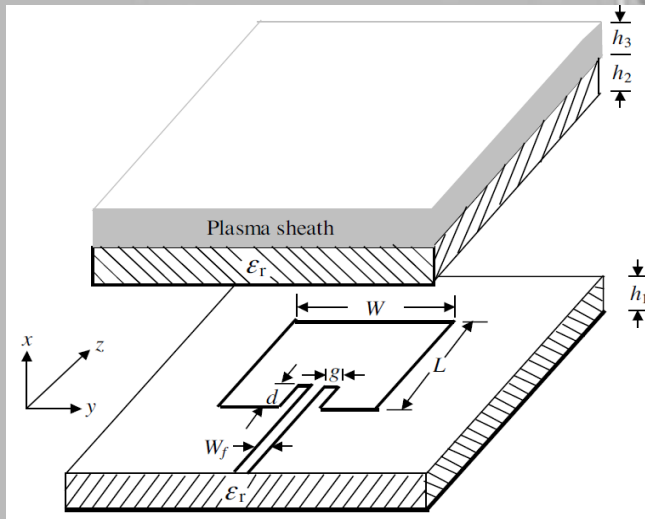
Плазмени диполи и отражателни антени



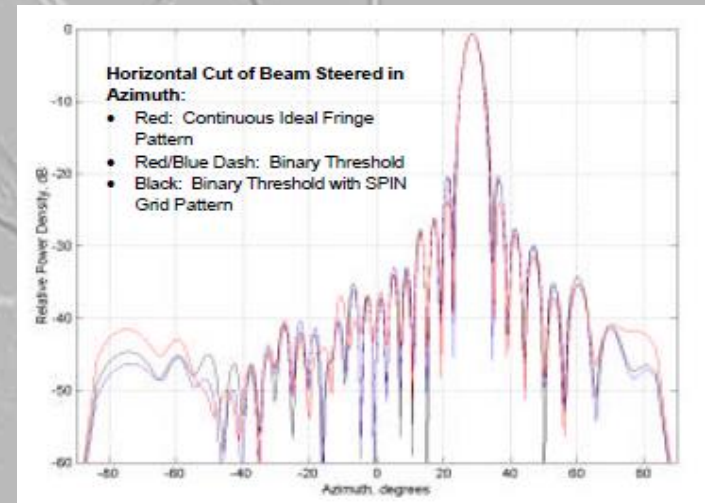
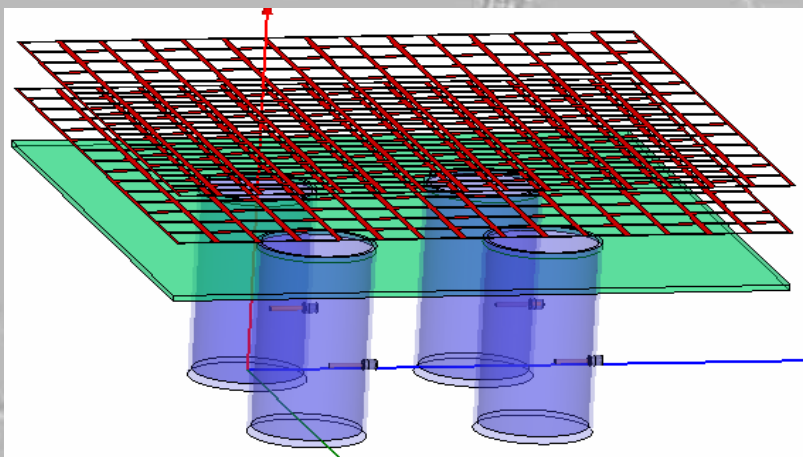
В тези приложения плазмата замества метала на диполите и огледалата



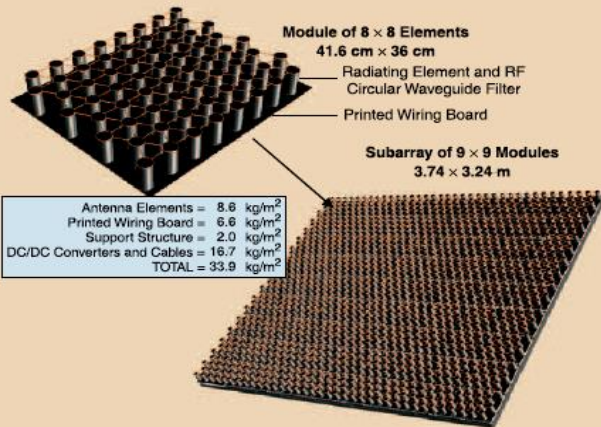
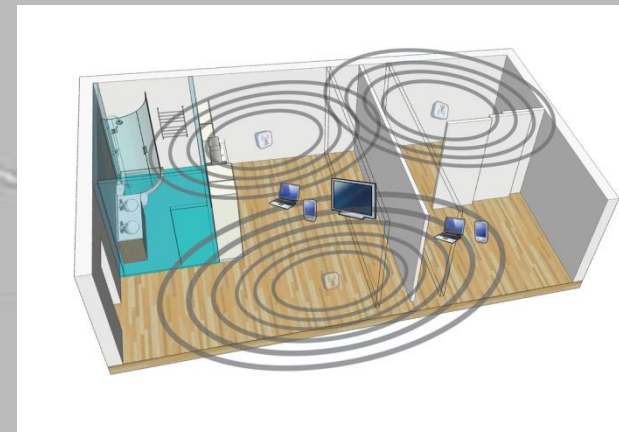
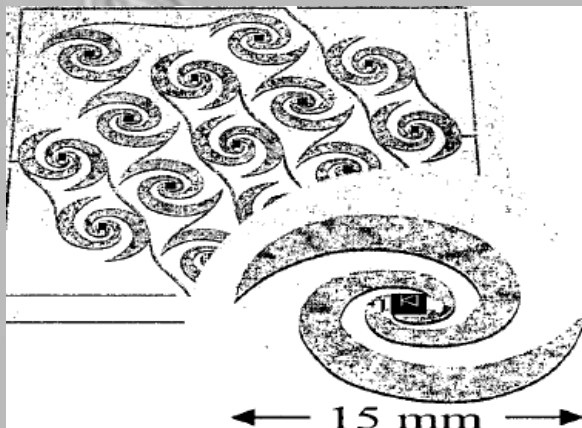
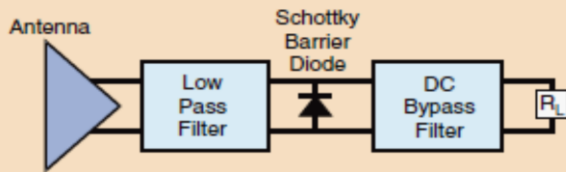
Плазмени планарни излъчватели



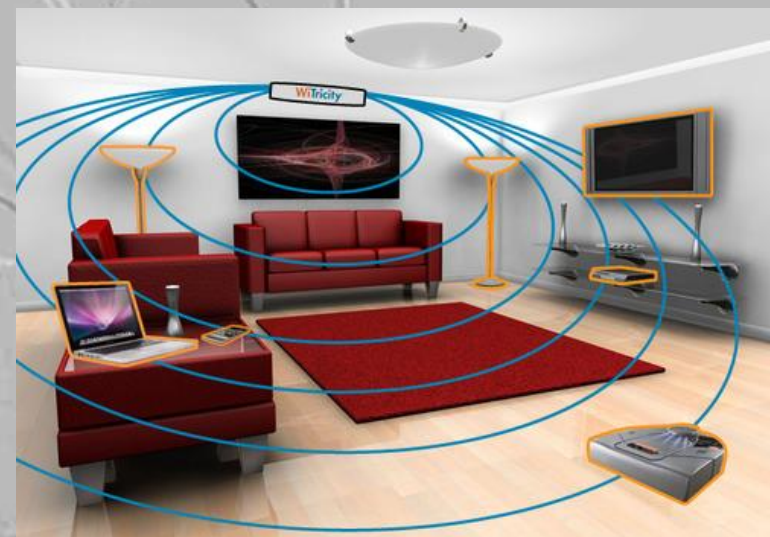
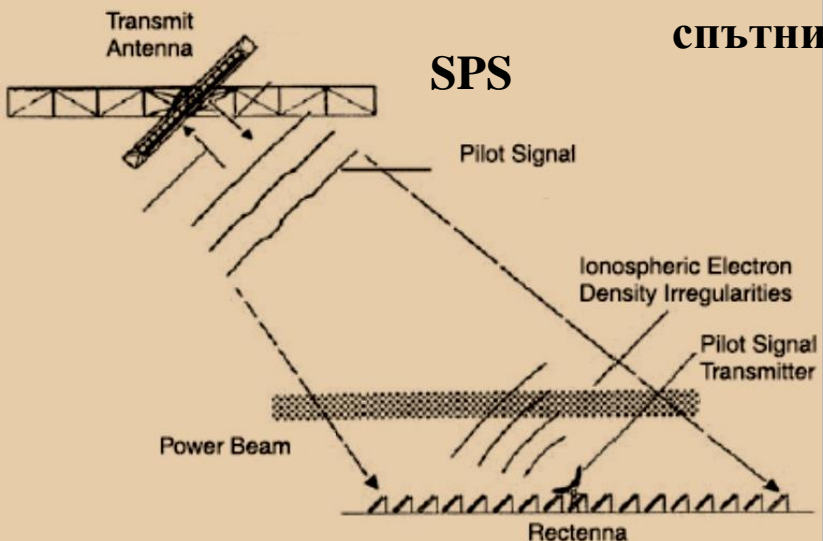
В тези приложения плазмата се разглежда като диелектрик с променлива диелектрична проникваемост (метаматериал)



Активна антена: антена + диод (ректена)



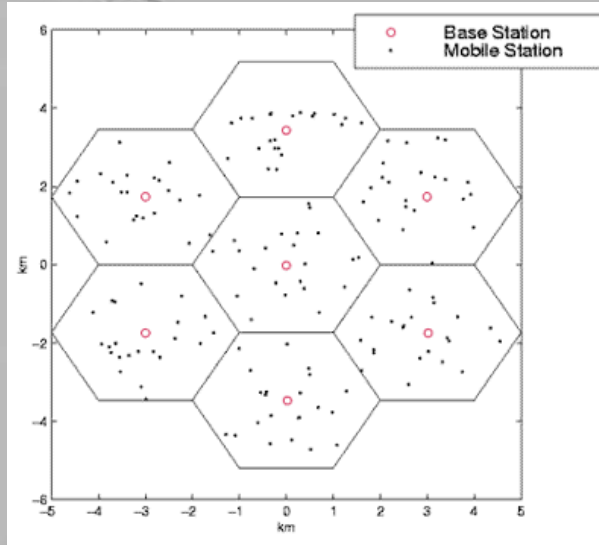
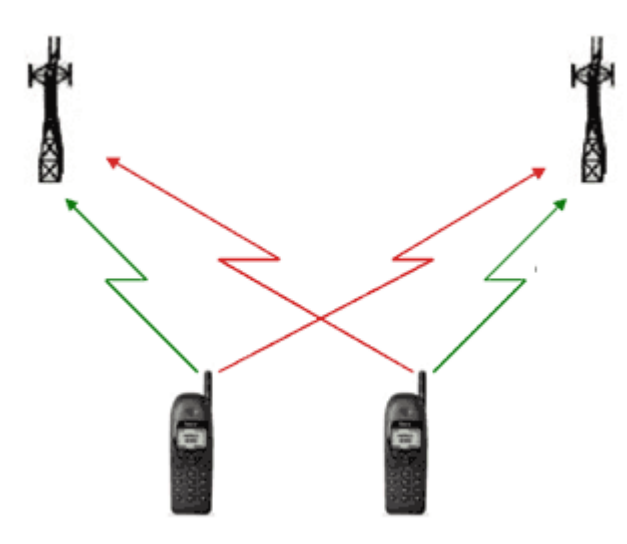
Това е устройство за директно преобразуване на микро-вълнова мощност в dc. Например, може да се използва в системите за трансформация на безжична енергия за зареждане на батерии и в проектите за SPS (Solar Power Satellites) за доставка на слънчева енергия от спътници в Космоса.





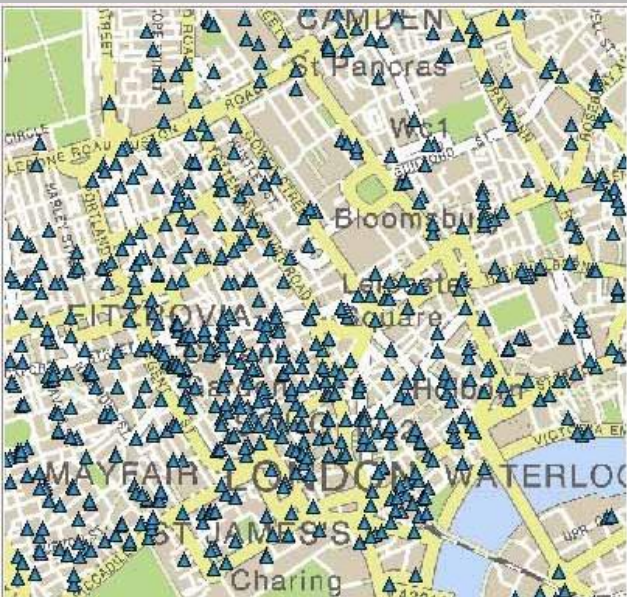
Антени в мобилните мрежи

Анени за мобилни мрежи



В мобилните мрежи са необходими две устройства за реализация на мобилна безжична връзка: 1) Базова станция, покриваща клетката със сигнал и 2) мобилна станция на отделния потребител.

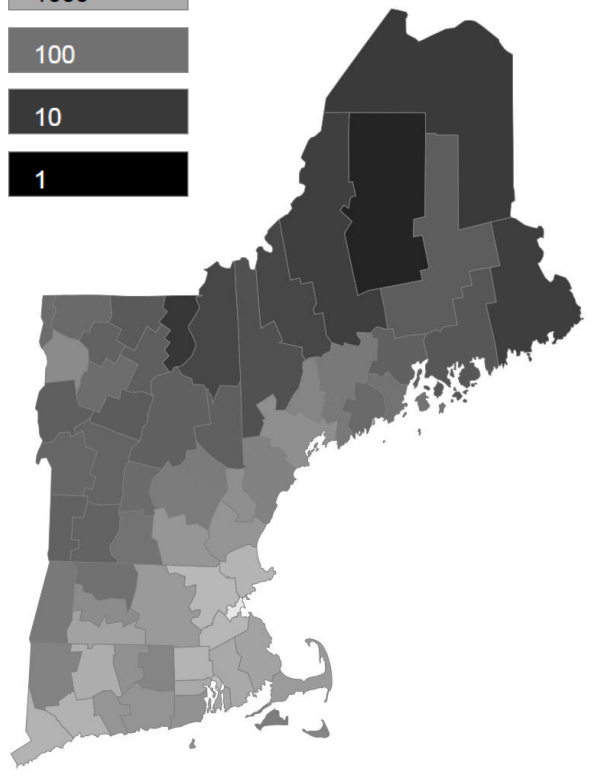
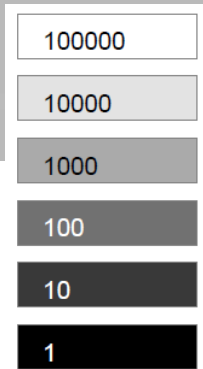
Д-р Мартин Купър от Motorola е човекът, осъществил първият частен телефонен разговор от мобилен телефон (с показания прототипа от 1973 г.)



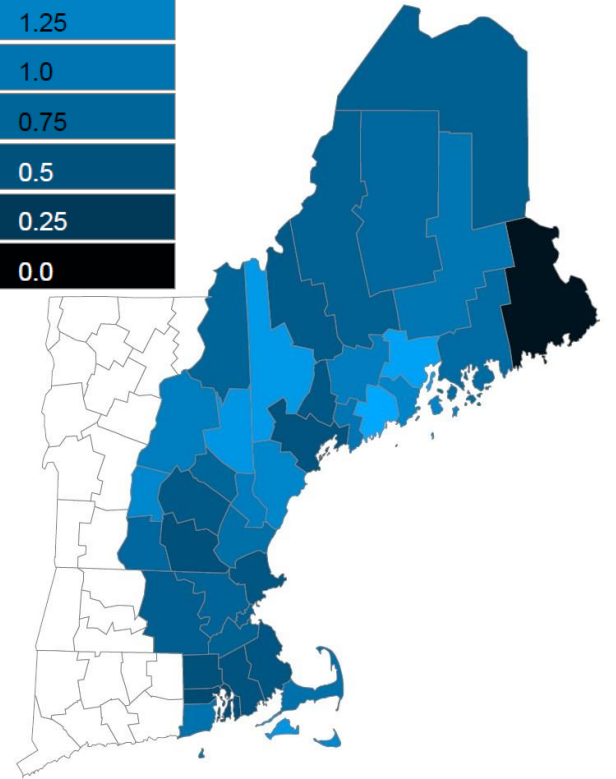
Гъстота на базовите станции в центъра на Лондон

Ще разгледаме поотделно антените за тези системи.

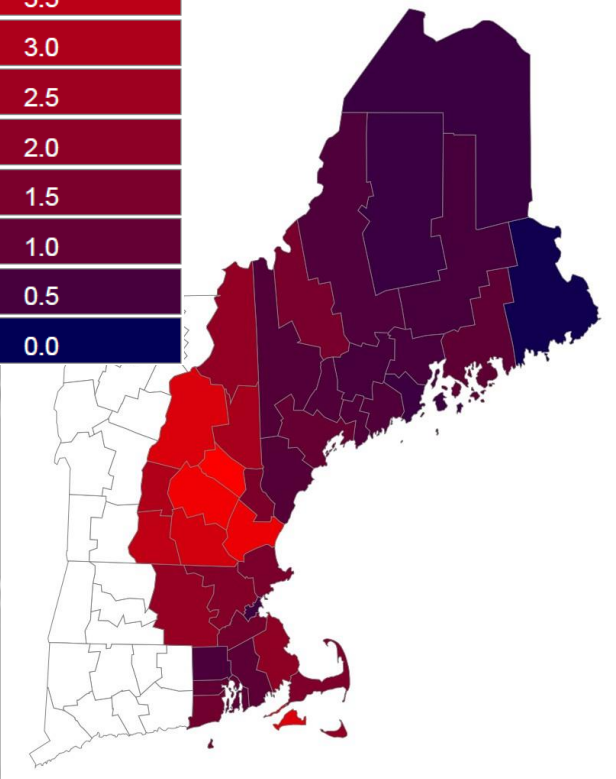
Връзка: гъстота на населението и на базовите станции



Брой хора на кв. миля
(пример за New England area)

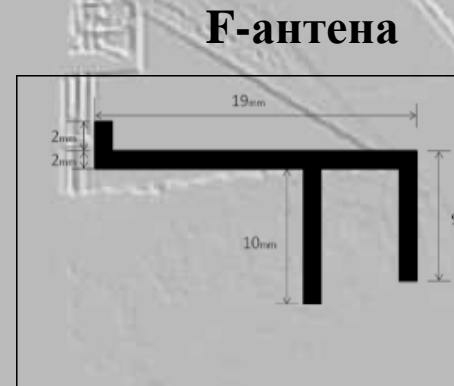


Брой базови станции на кв. миля
(пример за New England area)



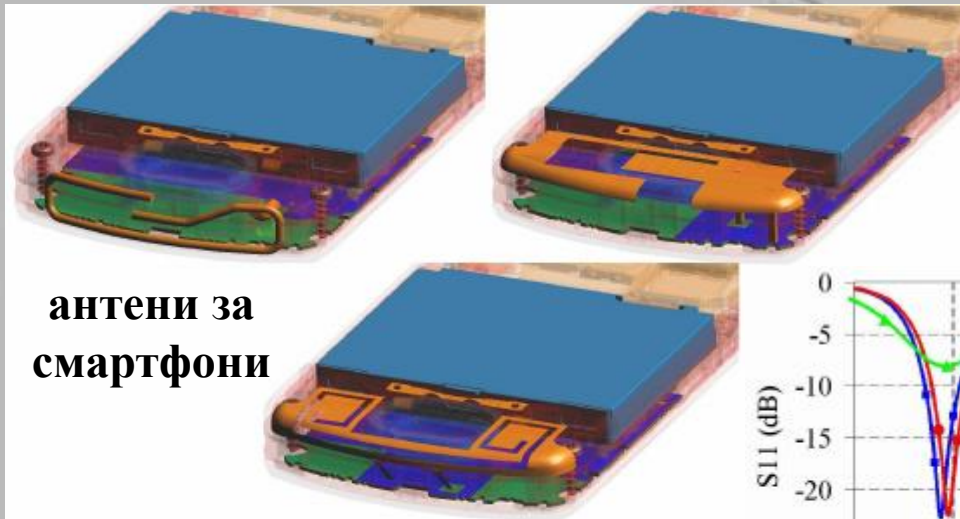
Брой фемтоклетки на кв. миля
(пример за New England area)

Антени за първите мобилни телефони



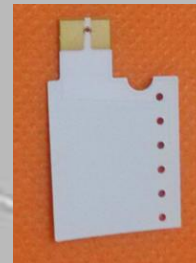


Анени за по-новите клетъчни телефони и смартфони

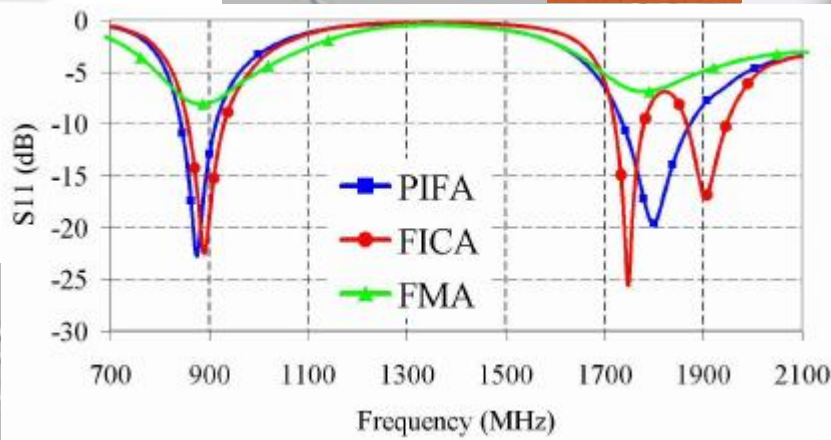


анени за смартфони

Bluetooth анени за смартфон



Wi-Fi анени за смартфони

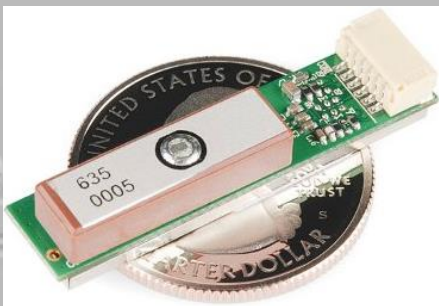


Текстилни анени за смартфони на военни и полицаи

walkie-talkie стил



Външна TV антена за смартфон

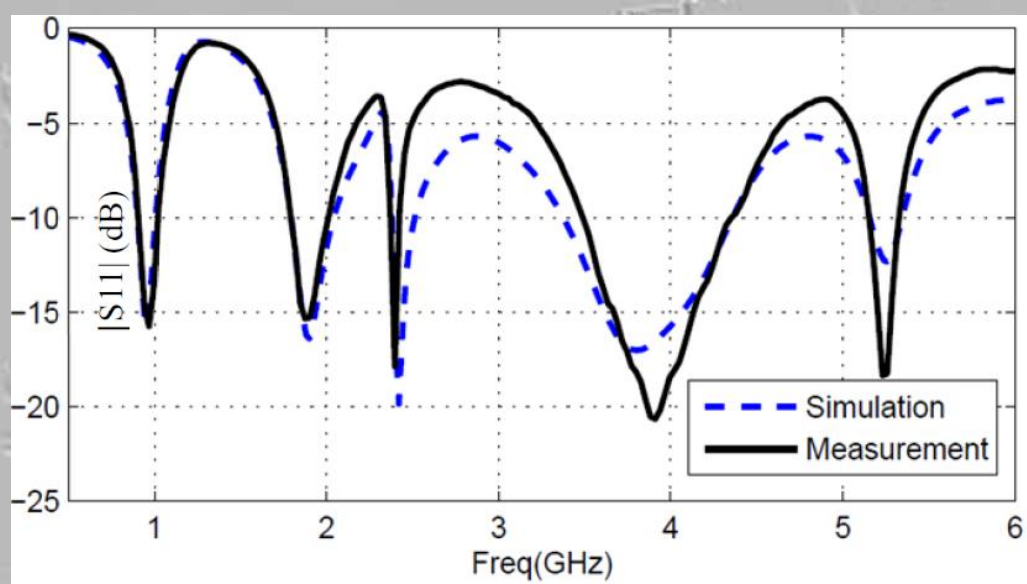
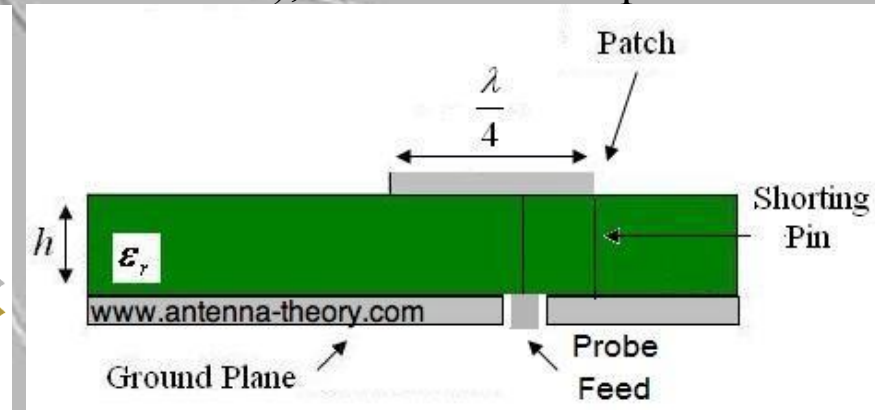
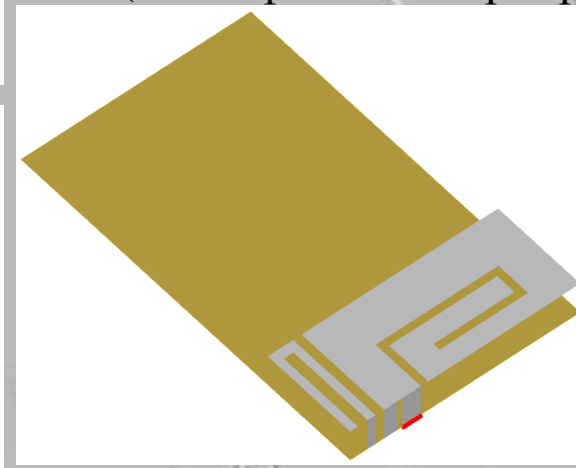
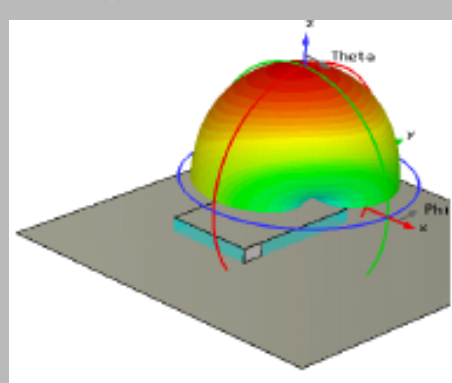
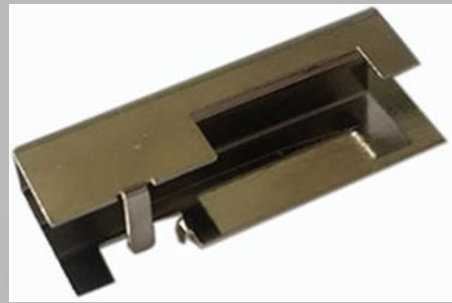


GPS анени за смартфон

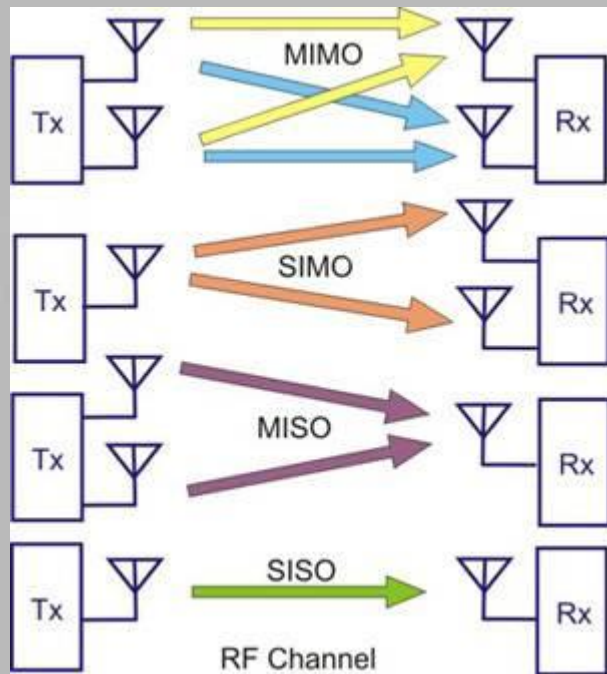


PIFA антени за смартфони – най-разпространените

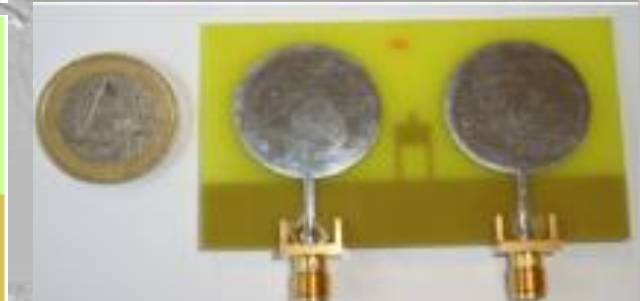
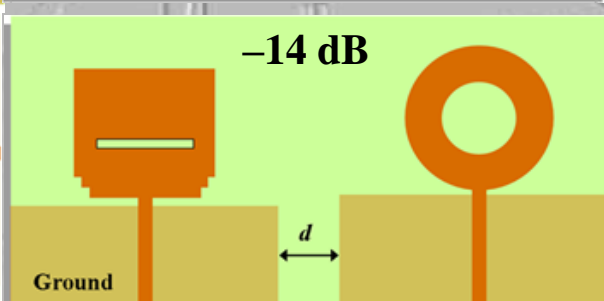
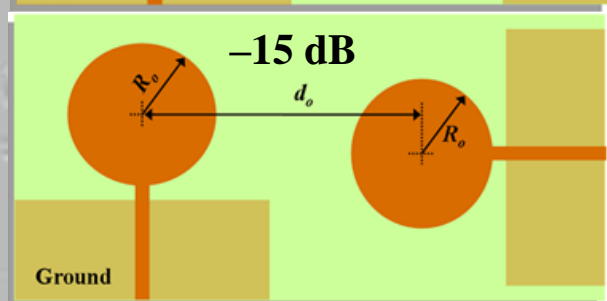
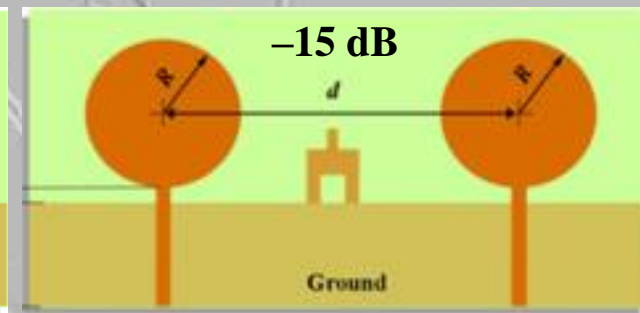
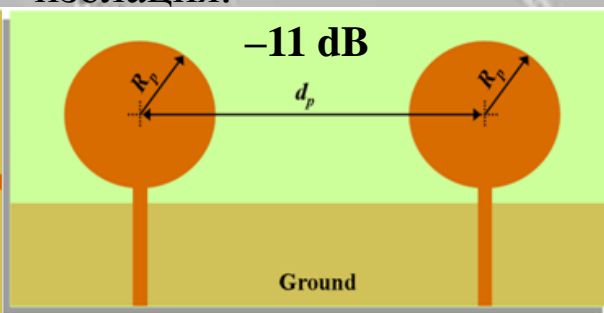
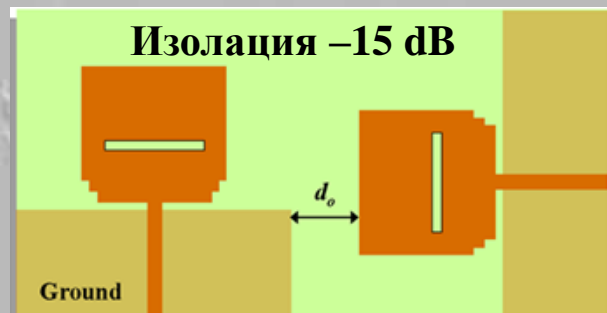
Planar Inverted-F antenna (PIFA). Това е закъсена в единия си край на четвърт-вълнова антена (2 пъти по-къса от дипола) с малки размери. Има подобна диаграма, но предизвиква в главата по-ниско ниво на SAR (специфична абсорбирана мощност), т. е. по-малко вредна.



MIMO антени за смартфони

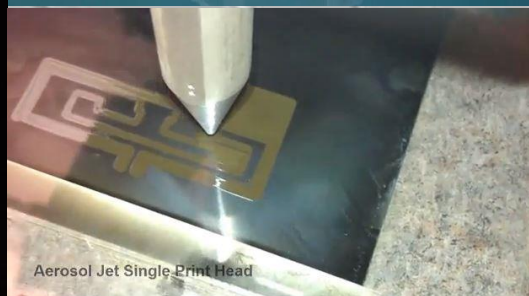
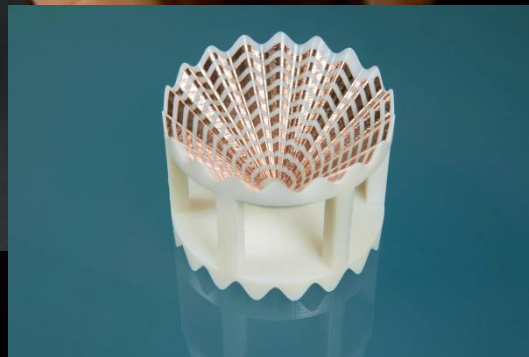
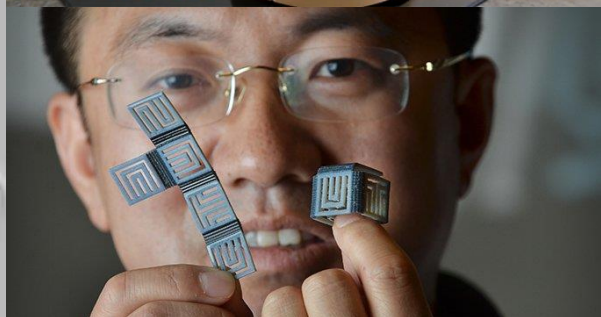
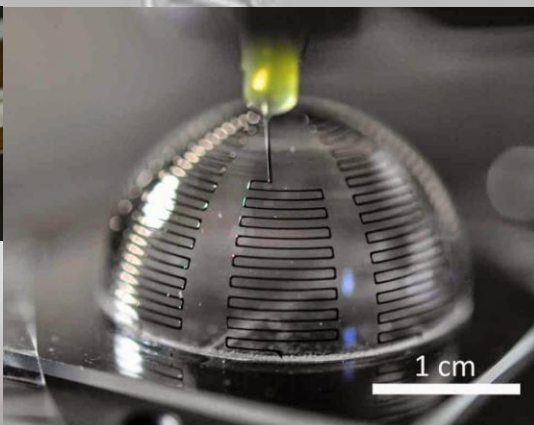


Multiple Input Multiple Output (MIMO) технологията е метод за пространствено кодиране на сигнал за увеличаване на пропускателната способност на канала, при който предаване и приемане на данни става със система от антени (напр. 2x2, 4x4), които взаимодействат слабо – с различна ориентация или с различна поляризация. Това е една от най-ефективните технологии на 4G и 5G комуникационните стандарти за повишаване на скоростта на предаване на данни по безжичен път. На фигурата са показани различни двойка широко-лентови планарни антени за MIMO технология: паралелни, перпендикулярни, паралелни различни, еднакви паралелни с изолация.



Антени, изработени с 3D принтер

Аntenите, произведени с 3D принтери, са важно решение за новите 4G/5G мрежи. Използва се капково нанасяне или чрез фотополимери.



Мрежи върху човешкото тяло (BAN, Body Area Networks)

Wireless body area network (WBAN) или *body sensor network (BSN)*, е нов тип безжични мрежи, състоящи се от преносими компютърни устройства, които могат да бъдат вградени вътре в тялото, имплантирани или повърхностно монтирани върху тялото във фиксирано положение. BAN устройства могат да бъдат пренасяни и в джобове, на ръка или в различни чанти. Макар, че съществува тенденция към миниатюризация на BAN устройствата и сензорите, могат да се използват и по-големи интелигентни устройства (таблети, ipads, смартфони), които събират, концентрират и предават данни за различни BAN приложения през интернет. Технологията стартира от 1995, главно за медицински приложения, но сега обхваща и други области. Сега "BAN" се използва за означаване на комуникации изцяло във или в близка околност до човешкото тяло.

WBAN системите използват WPAN технологиите (Wireless Personal Area Networks) (напр. Bluetooth или дори Wi-Fi) за да достигнат по-големи разстояния и да свържат преносимите устройства върху тялото на съвременния човек директно към Интернет. Например, в медицинските приложения това означава професионалните медицински лица да имат постоянен достъп до данните за пациента чрез интернет независимо къде се намира пациента в даден момент.

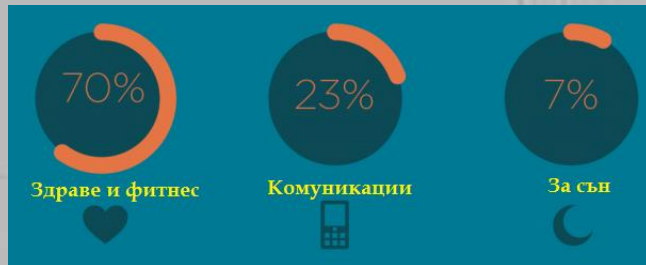


Wearable technology

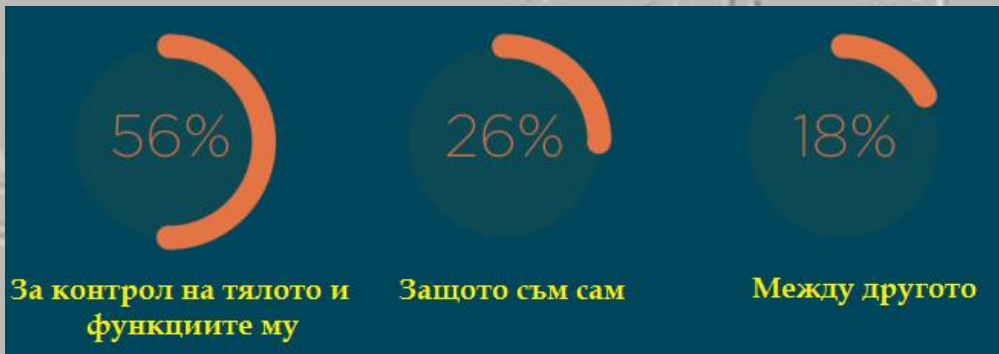
Къде се носят преносимите устройства/аксесоари?



Функционалност



Защо се носят?

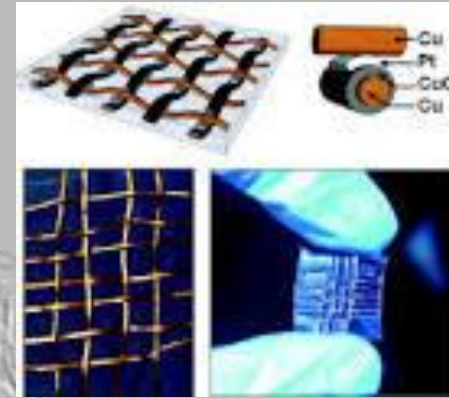
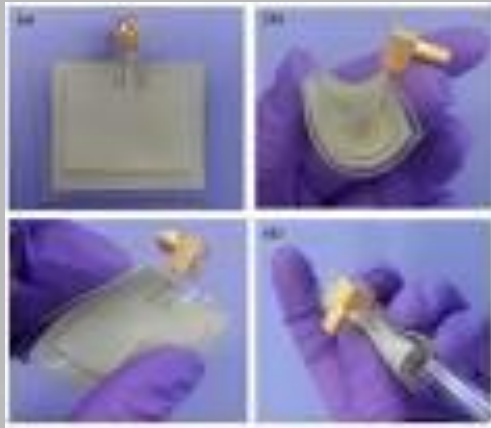


Преносими „джаджи“

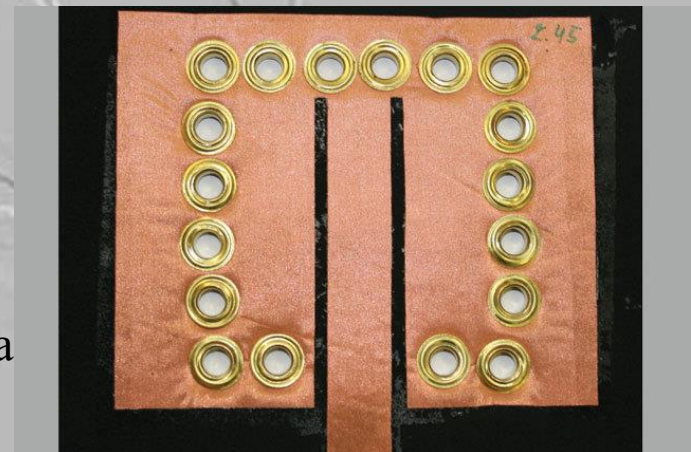


Технологии за носене, преносимите устройства (джаджи), модните облекла и аксесоари, високо-технологични дрехи, или модерната електроника са облекла и аксесоари, включващи компютри (смартфони, таблети, органайзери, iPads, iPods) и други устройства по усъвършенствани електронни технологии. Причините за носене често включват практически функции и характеристики, но също могат да имат чисто критична или естетическа роля.

Текстилни антени за преносими върху тялото устройства



Аntenите трябва да са гъвкави, да са безвредни, да се перат.



Съвременна концепция за Натовския войник

THE TADEUSZ KOSCIUSZKO
MILITARY ACADEMY OF LAND FORCES

THE 21st CENTURY SOLDIER



INSTITUTE OF COMMAND



Body Wearable Antennas reduce the load that soldiers carry and can transmit and receive a high level of battlefield information



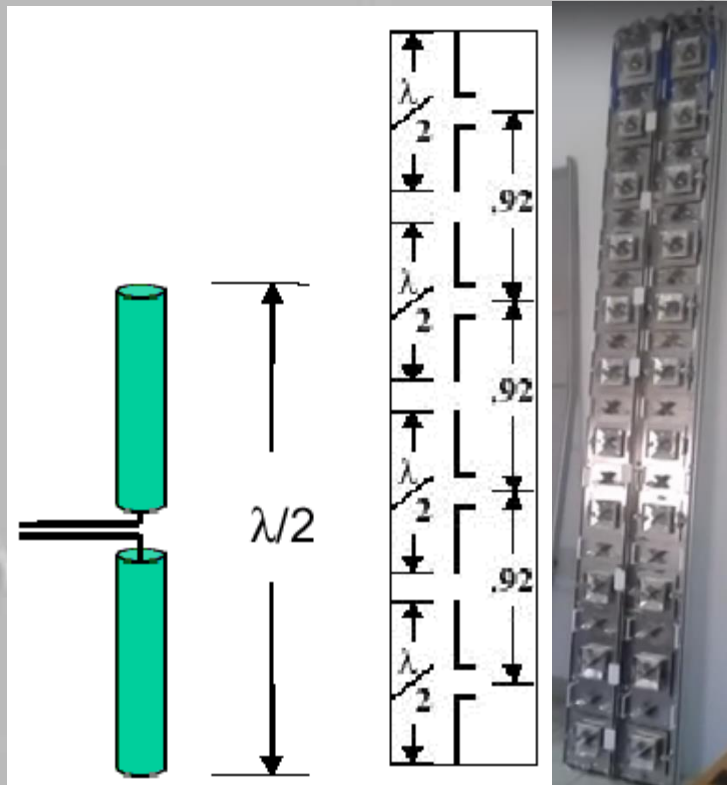
Since each smart phone contains a GPS, the positions of the team members could be overlaid on a moving map providing a holistic view of their locations



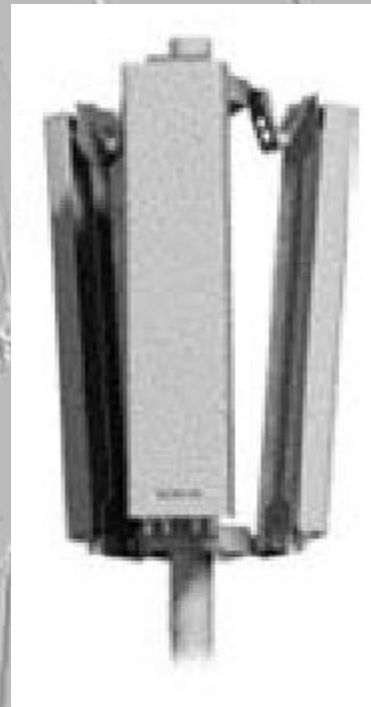
Video from a helmet-mounted camera can be transmitted via Body Wearable Antennas to other members of the unit, improving their situational awareness

Анени за базови станции

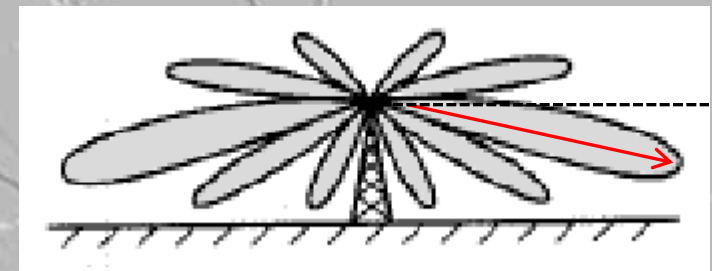
Съвременните базови GSM станции са секторни (типично 120° на ниво -10 dB от максималното) по азимут, но с относително тесен лъч по елевация (типично $\sim 15^\circ$) и с наклон по елевация (типично $\sim 4-15^\circ$). Усилването на всеки панел (антенна решетка) е $\sim 15-17$ dBi.



Най-прост тип диполна антена и антенна решетка с 4 диполни елемента и антена за базова станция с 3 сектора



Диаграма с 3 панела

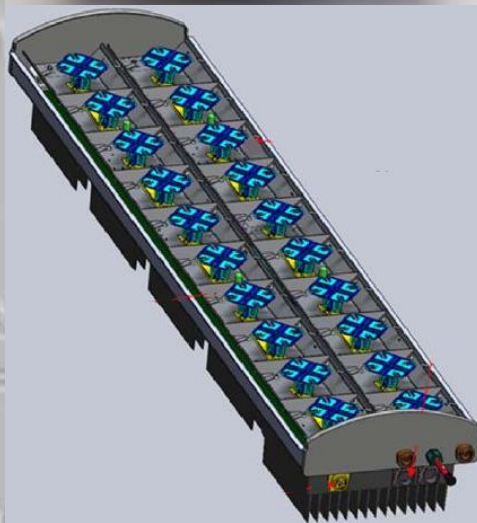


Насочена антенна решетка за BTS с наклон на лъча (tilt)

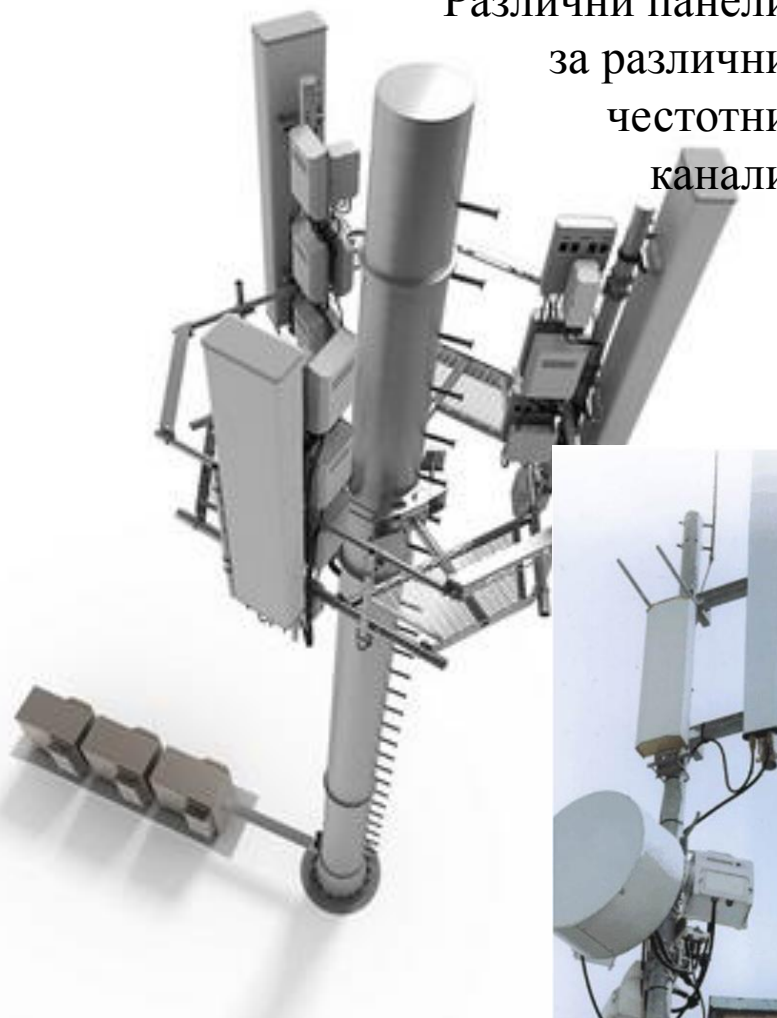
Анени за базови станции за 3G и 4G мрежи

Днес базовите станции работят на различни честоти и антените трябва да покриват тези обхвати. Има панели за различни честоти или различни панели за различни честотни обхвати. Обикновено Веасон каналът е на 900 MHz, но 3G и 4G каналите се реализират на високи честоти по съответните панели.

Един панел за
различни честотни
канални



Различни панели
за различни
честотни
канални



Анени за
LTE пико-
клетки



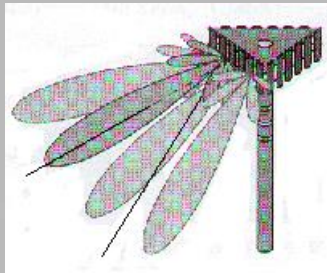
MIMO
анени за
базови
станции



Анени за
повторители
(repeaters)

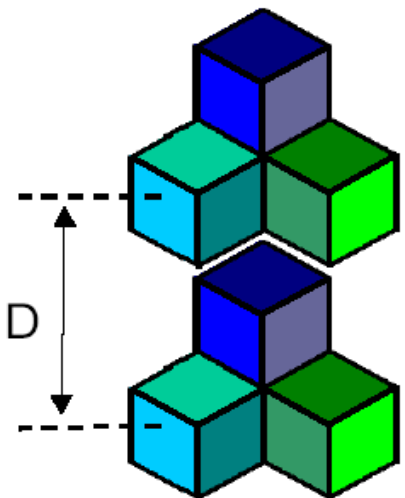


SDMA – основни концепции

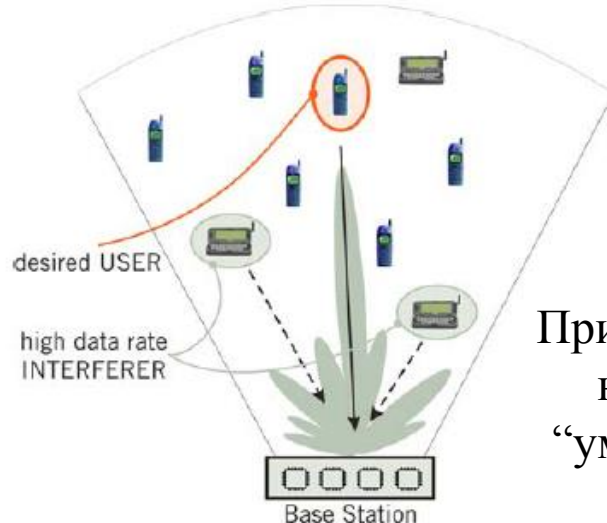


SDMA е метод за достъп до комуникационния канал чрез пространствено разделяне на потребителите и може да се ползва само в комбинация с други методи (по честота, време и код). При този метод се базира на различното местоположение на потребителите спрямо базовата станция и един спрямо друг. Увеличава силно капацитета (до 3 пъти в TDMA, до 5 пъти в CDMA системи). Съществуват два основни метода за SDMA:

- ❖ Във всички клетъчни мобилни мрежи се използва принципът на многократно преизползване на едни и същи честотни канали в пространствени области (съ-клетки), които се намират на достатъчно голямо разстояние D . Така се избягва силната интерференция между близки потребители и остава само “съ-клетъчната” интерференция.
- ❖ Интерференцията дори с много близко разположени потребители може да се избегне чрез използване на остронасочени антени (превключващи и/или адаптивни антени) вместо ненаасочени, с което близките източници на силна интерференция се игнорират напълно.



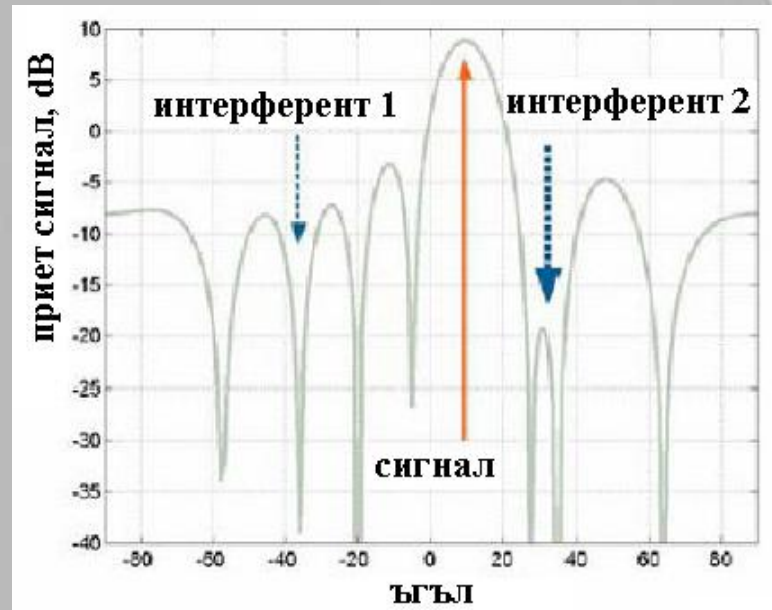
Принцип на преизползване на честотни канали в “съ-клетки”



Принцип на използване на остронасочени “умни” антени вместо ненаасочени

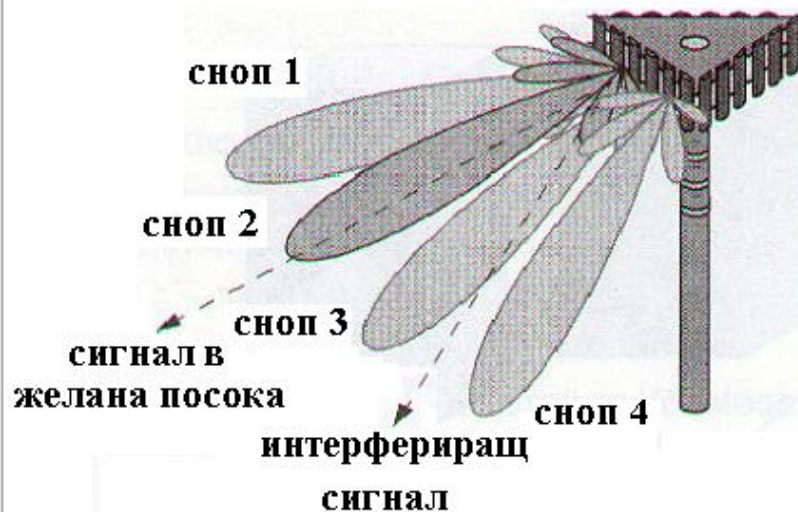
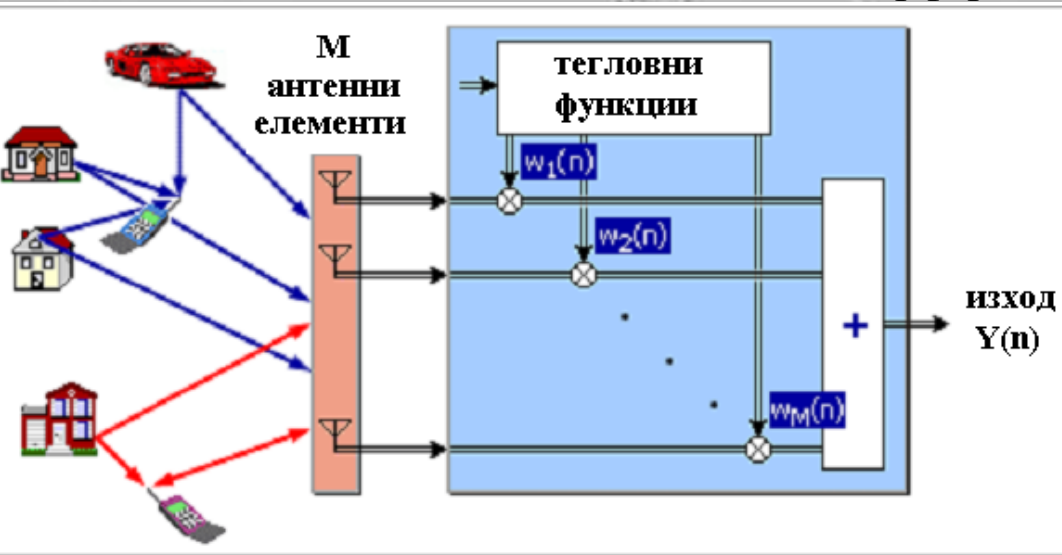
Технологията на “умните” (smart) антени за SDMA достъп

Антена с 8 елемента



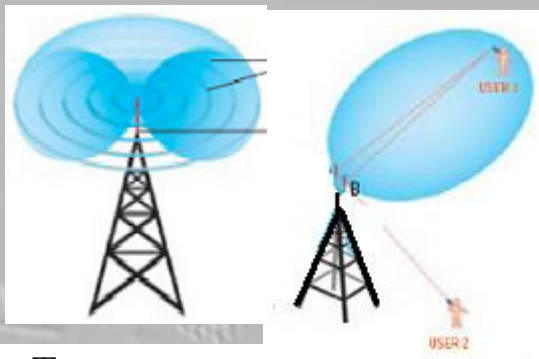
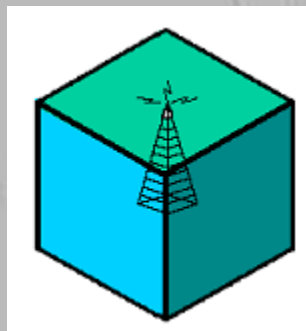
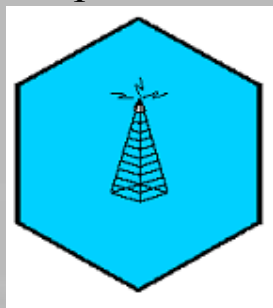
Идеята на “интелигентните” (smart) антени е възможността да се проследи чрез отделен антенен лъч даден потребител. Тук интелигентността има два аспекта:

- 1) Антената се състои от множество подредени елементи (антенна решетка), която може да се управлява и да формира специфични лъчи;
- 2) Системата използва адаптивен много-входов (RIKE) приемник с бърз цифрово-сигнален процесор DSP. Общият сигнал се формира като сума от сигналите от отделните елементи с адаптивно изменящи се комплексни теглови функции $w_i(t)$. Тези елементи се актуализират непрекъснато чрез обратна връзка с цел да се оптимизира сигнала с потребителя и да се минимизира интерференцията.



Формиране на лъча в smart антените

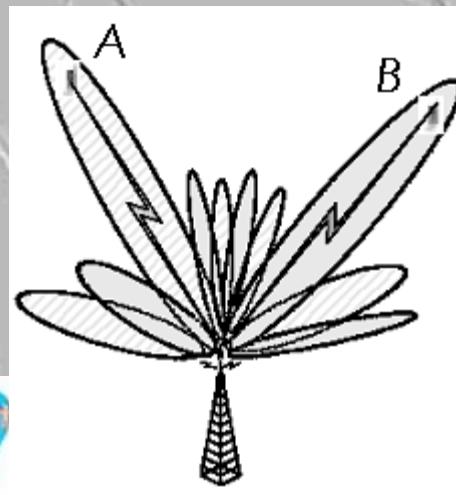
Съществуват различни техники за оформяне на по-тесен антенен лъч в системите със SDMA достъп. Най-простият начин е чрез секторизиране; в дадена клетка се използват 3, 4 или повече антенни сектора с по-тесни диаграми. Друг начин е използването на разнесени антени (две или повече антени, разположени на разстояния $n\lambda/2$). Разнесените антени се използват много ефективно като противодействие на фадинга и паразитна интерференция. Трети начин е използване на switched-beam антени, които могат да формират няколко десетки различни фиксирани лъчи, като за даден потребител се превключва лъча с най-близка посока. Най-ефективни са адаптивните антени, които оформят специфичен лъч за всеки потребител, но тези системи са най-сложните и се използват по-рядко.



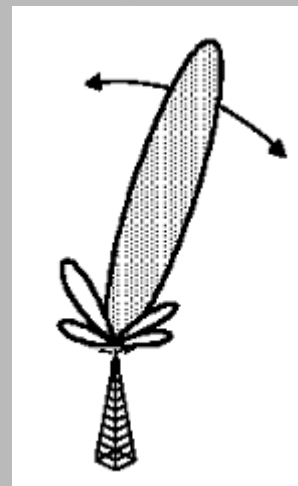
Традиционна
ненасочена (omni-
directional) антена



Секторизирани антени (на ъгли
от 120° , 90° или 65°)



Остронасочена антена с
превключване на лъча
(switched-beam antennas)



Остронасочена
антена с адаптивен
(въртящ се) лъч

Сравнение на
работата на
превключваема и
адаптивна антена



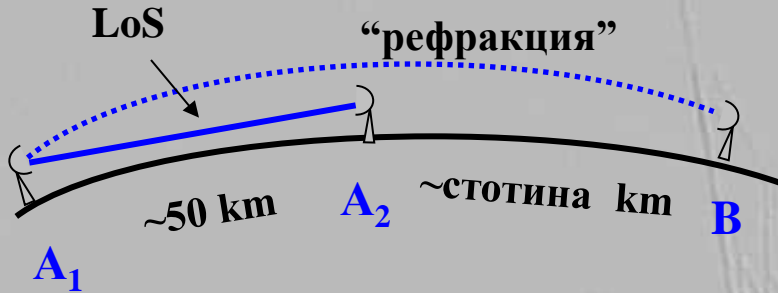


Антени за сателитните комуникации

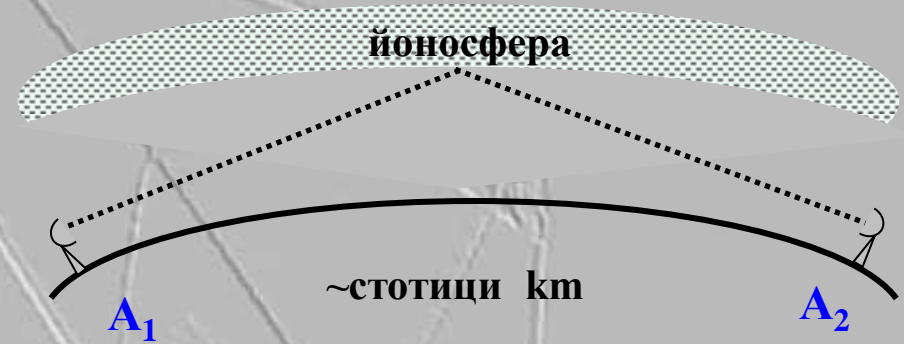


Принцип на сателитните (спътникови) комуникации

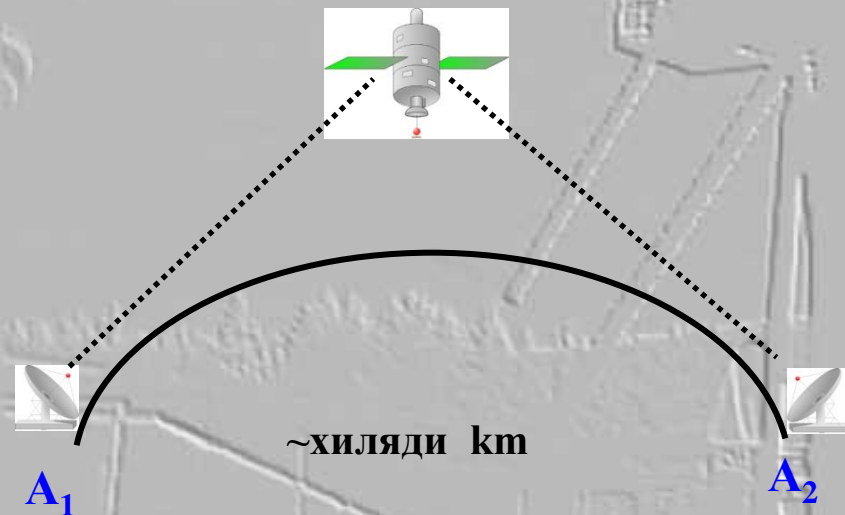
Земни радиорелейни връзки с
пряка видимост



Земни връзки “зад хоризонта” с
отражение от йоносферата

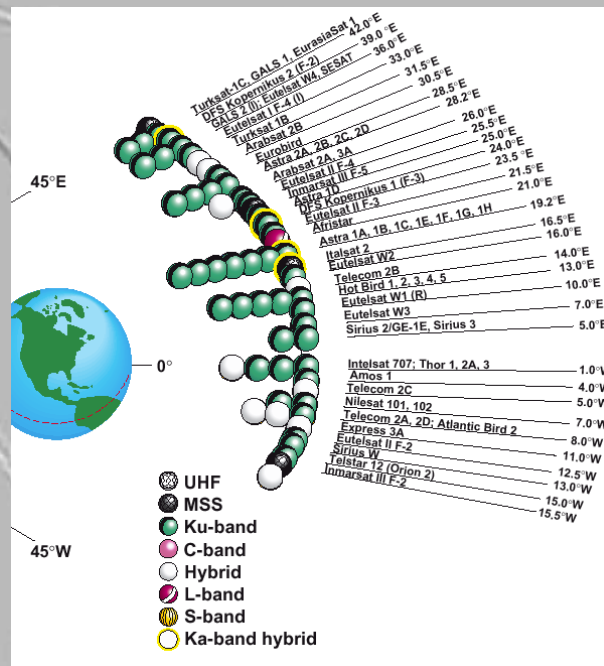
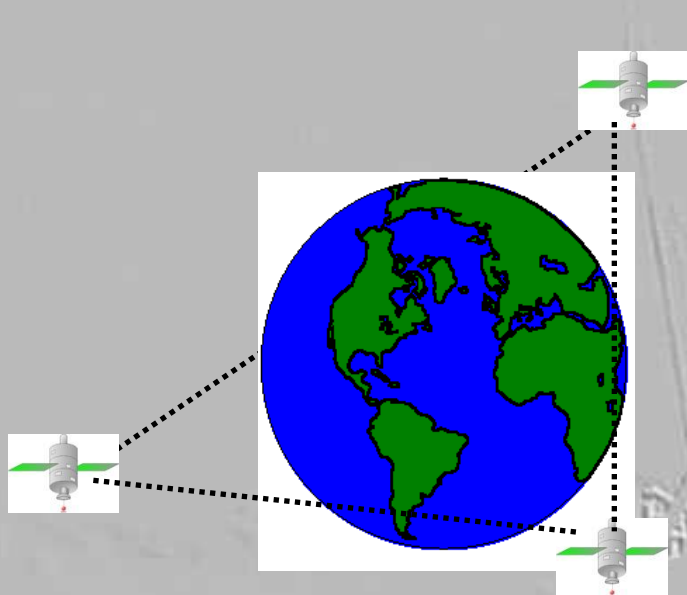


Сателитни връзки



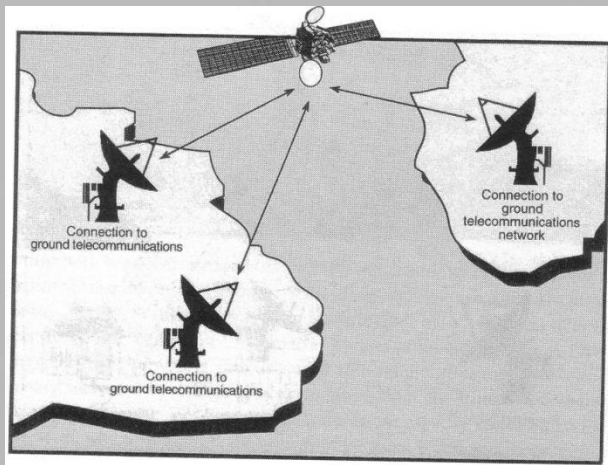
Връзките с пряка видимост LoS (point-to-point) са много разпространени. Напр. такива са земните радиорелейни връзки. Тук пряката видимост се ограничава от кривината на земната повърхност (до ~50 km). След рефракция сигнал може да се появи и “зад хоризонта”, но това зависи от влажността на въздуха. Много ефективно е използването на отражението на сигнала от земната йоносфера (пасивен ретранслатор), но явлението е силно непредсказуемо. Най-добро решение за силно отдалечени (long-distance) връзки зад хоризонта (~хиляди km) е използването на “активен” ретранслатор (сателитна приемно-предавателна станция).

Три геостационарни сателита покриват цялата земна повърхност по екватора

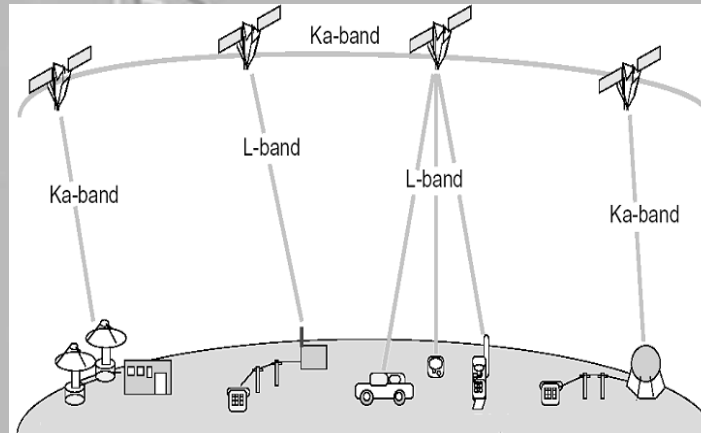


Отдалечаването на спътника от земната повърхност съществено увеличава площта на обзор над земната повърхност и той покрива все по-голяма площ от нея. Най-ясно този ефект се наблюдава при геостационарните спътници (GEO, височина ~36000 km над екватора). На тази орбита те остават да “висят” над фиксирана точка на земната повърхност, което ги прави много удобни за фиксирани сателитни комуникационни системи, въпреки движението на Земята. Три GEO спътника от дадена система са достатъчни да покриват цялата земна повърхност. По тази причина, съгласно международните споразумения, всяка държава има право на 3 GEO сателита, с които може да изгради собствена спътникова мрежа (вж. пример за всички GEO сателити, разположени над Европа).

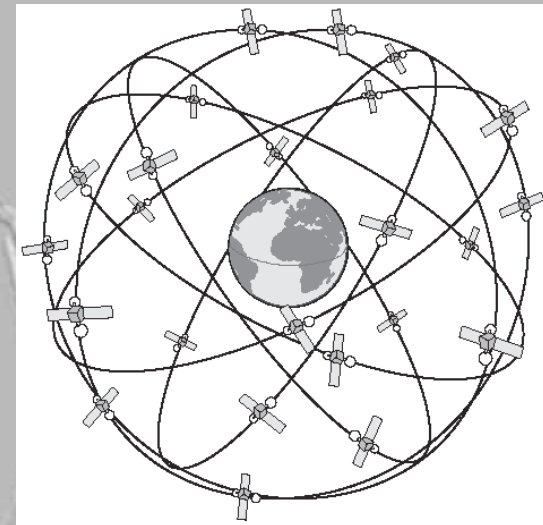
Основни приложения на сателитните системи



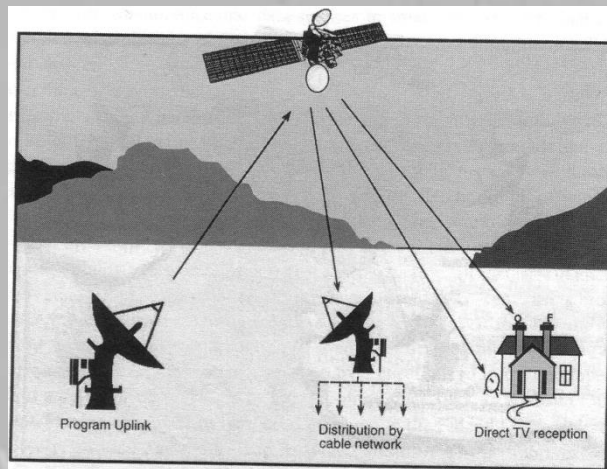
Фиксирани сателитни системи (FSS)



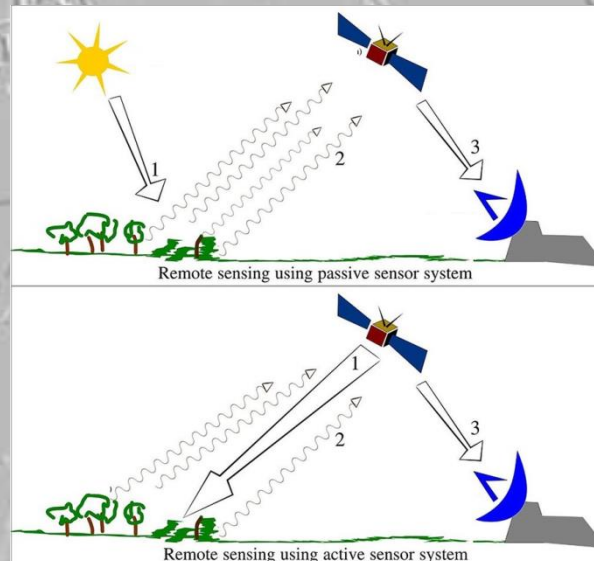
Клетъчни спътникови телефони



GPS – глобална навигация



Директно спътниково радиоразпръскване DBS



Дистанционно сондиране



Радиоастрономия

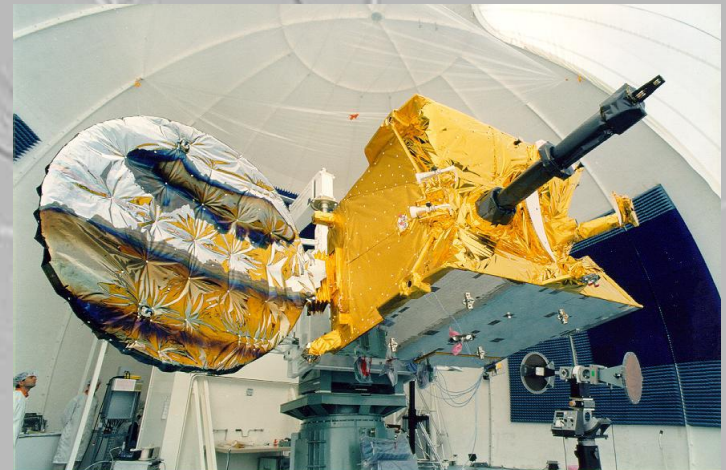
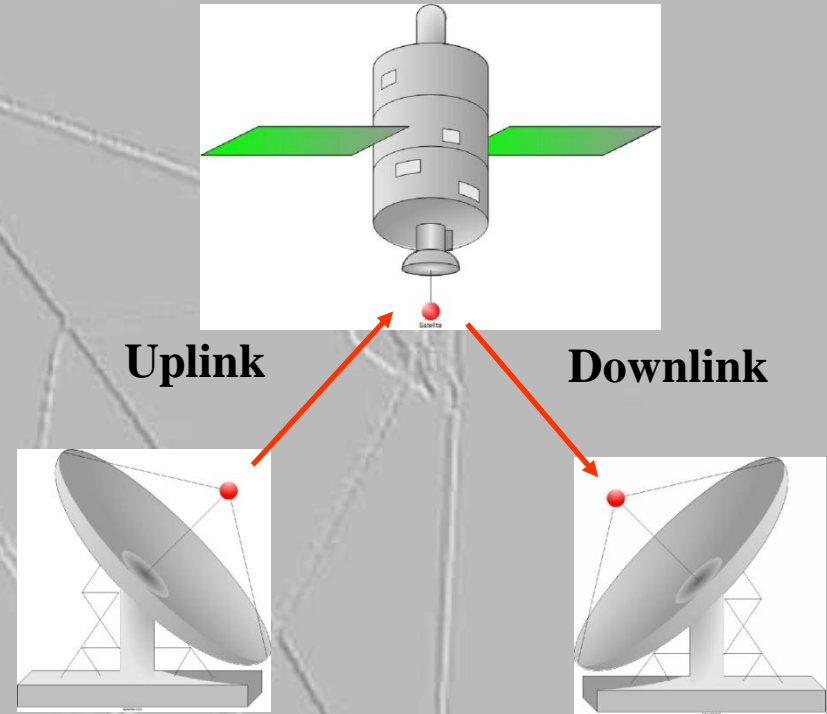
Основни компоненти на сателитна комуникационна система

❖ Сателитен сегмент – съдържа две части:

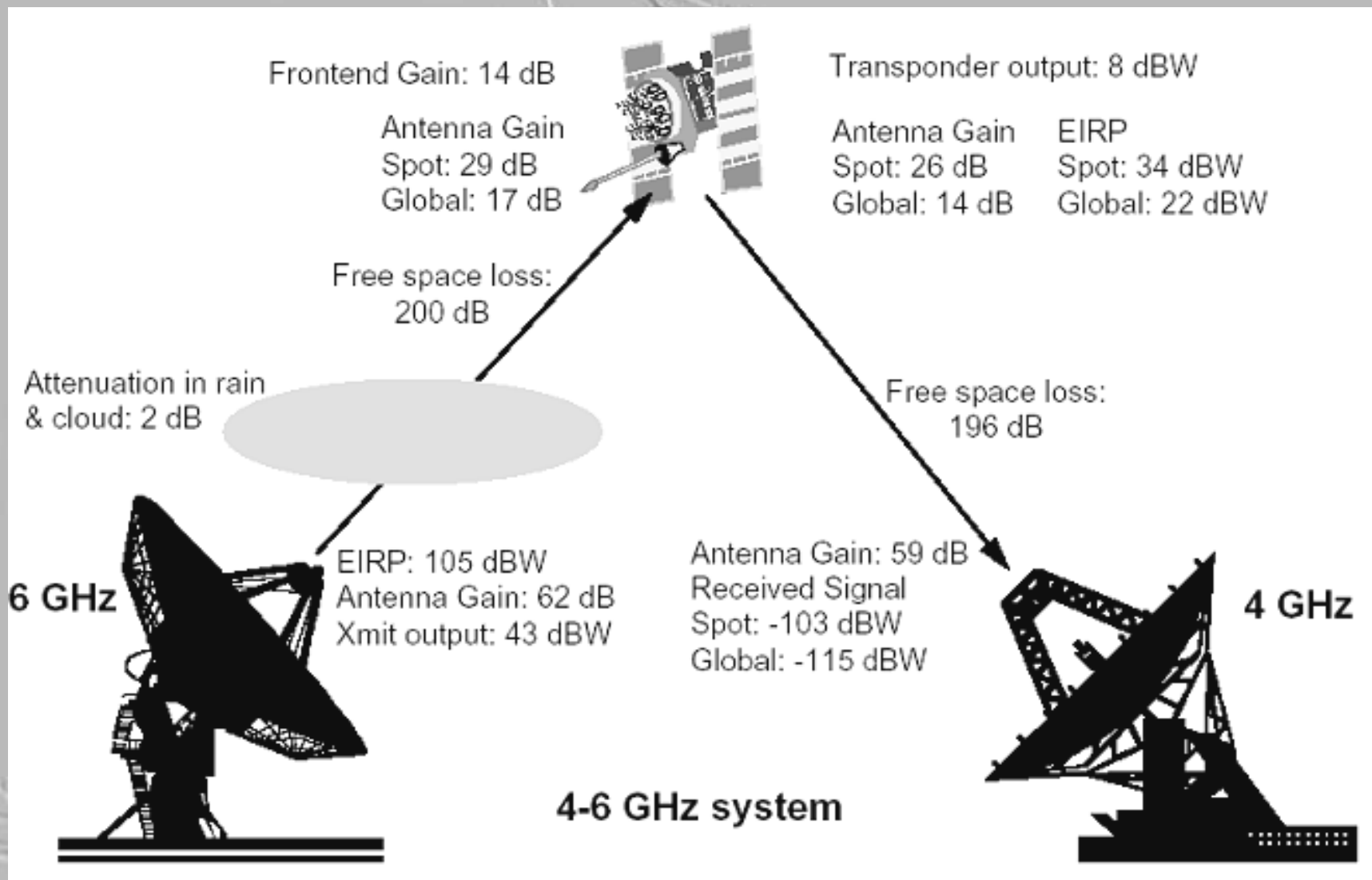
- Комуникационен спътник: Главните системи на спътника са енергийните източници, системите за контрол на височината, системите за контрол на орбитата, температурен контрол, телеметрия и дистанционно управление. Комуникационна апаратура е базирана на т. нар. “транспондер”.
- Наземни съоръжения: за следене на сателита на орбита, за телеметрия и дистанционен контрол.

❖ Наземен сегмент:

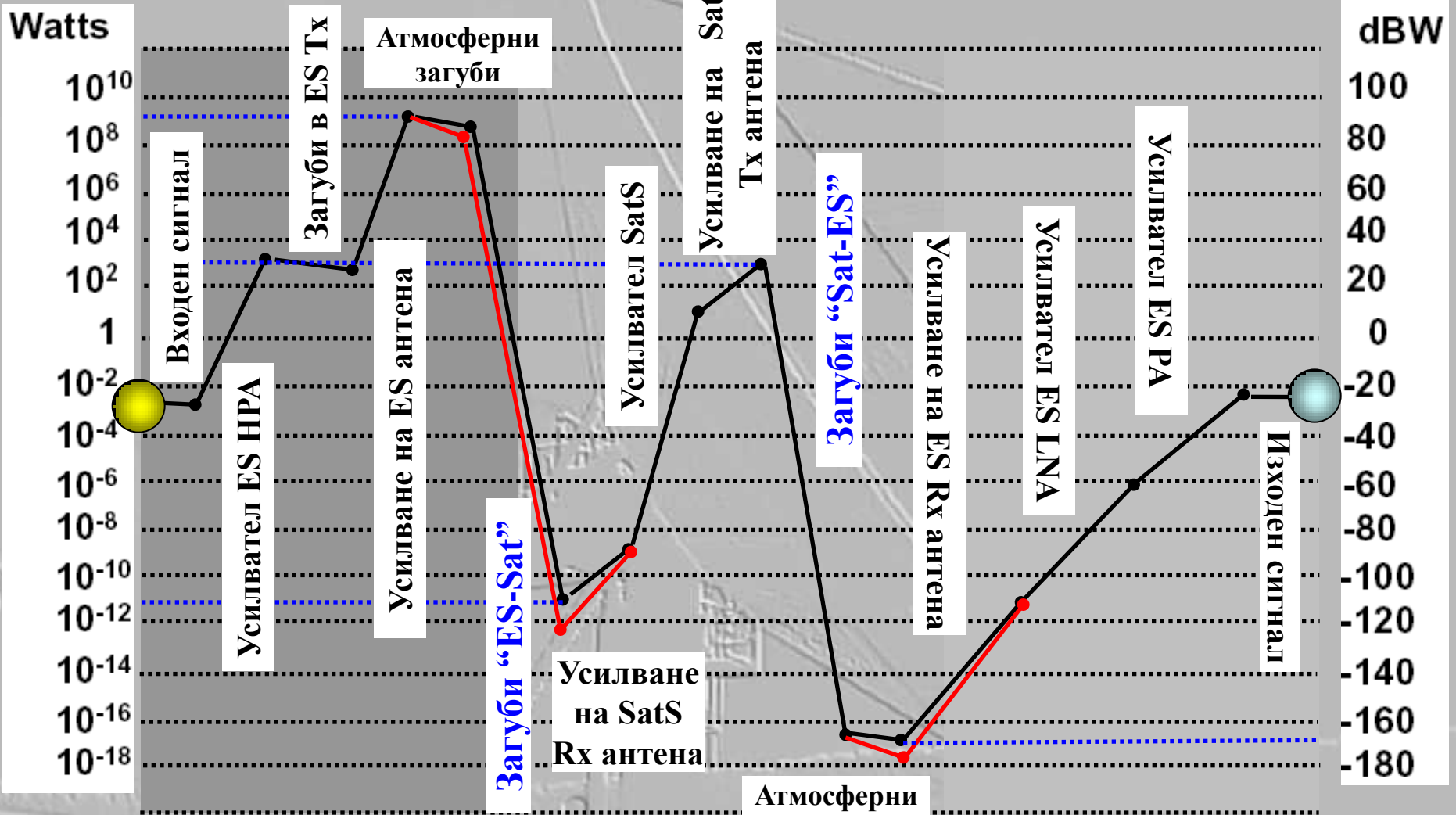
- Съдържа наземни комуникационни станции от различен тип, снабдени с приемна или приемно-предавателна антена, приемник, предавател, модем и интерфейс към други наземни комуникационни мрежи.



Пример: 4-6 GHz фиксирана сателитна система



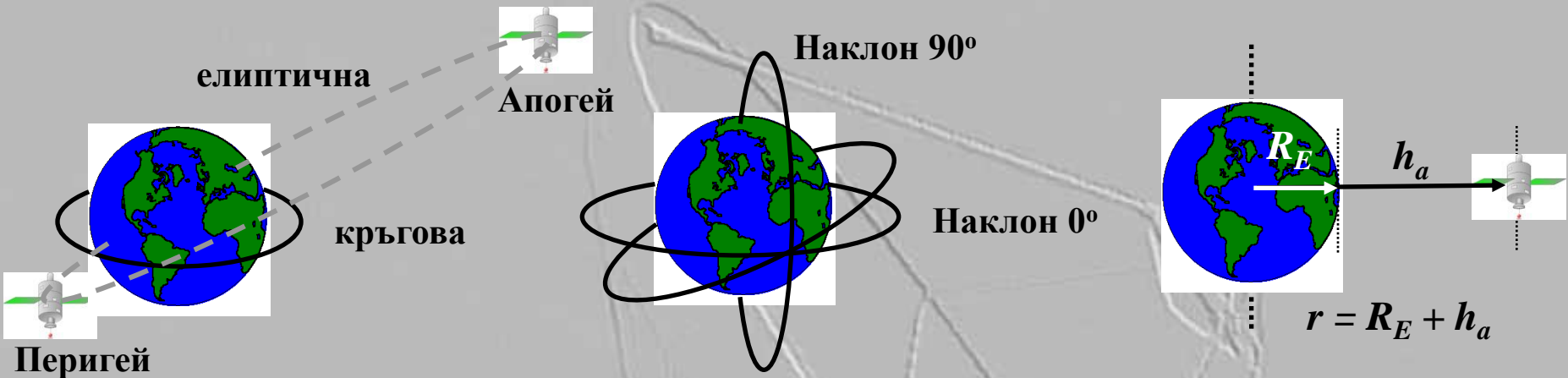
Типични загуби в сателитна комуникационна система



В червено – Загуби при силен дъжд (най-тежък случай)

Означения: LNA (Low-noise amplifier); PA (Power amplifier); ES (Earth Station); SatS (Satellite Station)

Движение на спътниците около Земята



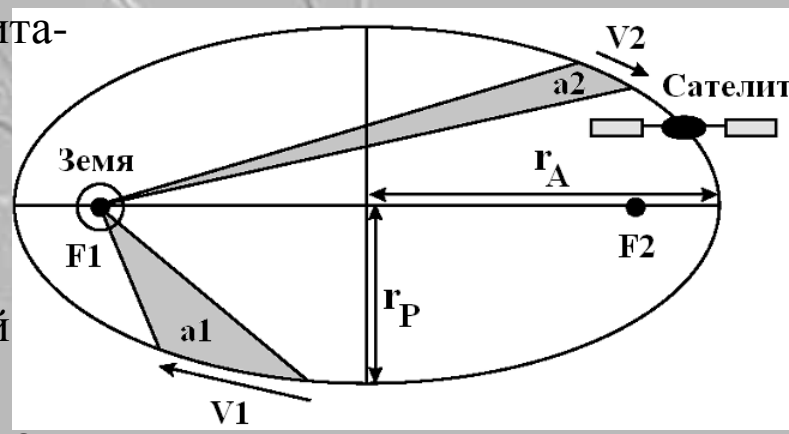
Най-просто движението на спътниците се определя от емпиричните закони на Кеплер:

1. Първият закон на Кеплер определя формата на орбитата: елипса с ексцентрицитет e ,

$$e = \sqrt{r_A^2 - r_P^2} / r_A; \quad e = 0 \Rightarrow r_A = r_P = r$$

в единия полюс на която се намира земята (Earth). Най-близката до Земята точка се нарича “перигей”, а най-далечната – “апогей”. При $e = 0$ орбитата е кръгова. Тя може да има различен наклон спрямо екваториалната равнина (вж. фигурите горе).

2. Вторият закон на Кеплер постулира, че за равни интервали от време спътникът изминава еднакви площи от орбитата си. Следователно, в перигея си той има по-голяма скорост от тази в апогея, $v_P > v_A$. При кръгова орбита линейната му скорост остава постоянна.



Движение на спътниците около Земята (2)

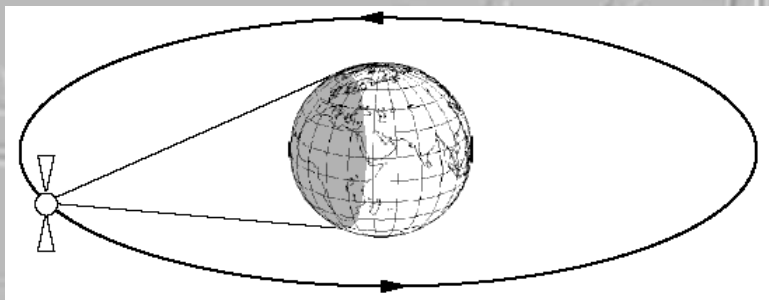
3. Третият закон на Кеплер определя средният радиус на орбитата, в случая r_A :

$$r_A, \text{ km} = AP_0^{2/3}; A = \text{const} = 42241.0979; P_0 = 1.0027379$$

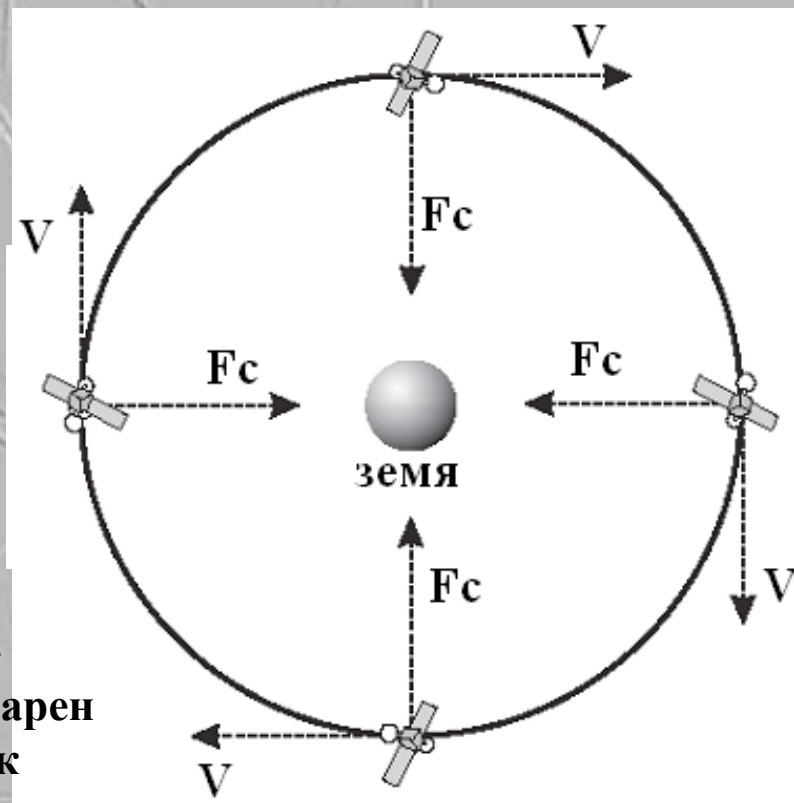
където P_0 е средният Слънчев ден ($1.0027379 \times$ земен ден). Този закон е по-известен във формата за ъгловата скорост ω_S от средния радиус на орбитата r , изведена от Нютон:

$$\omega_S = (gM_E)^{1/2} \times r^{-3/2}$$

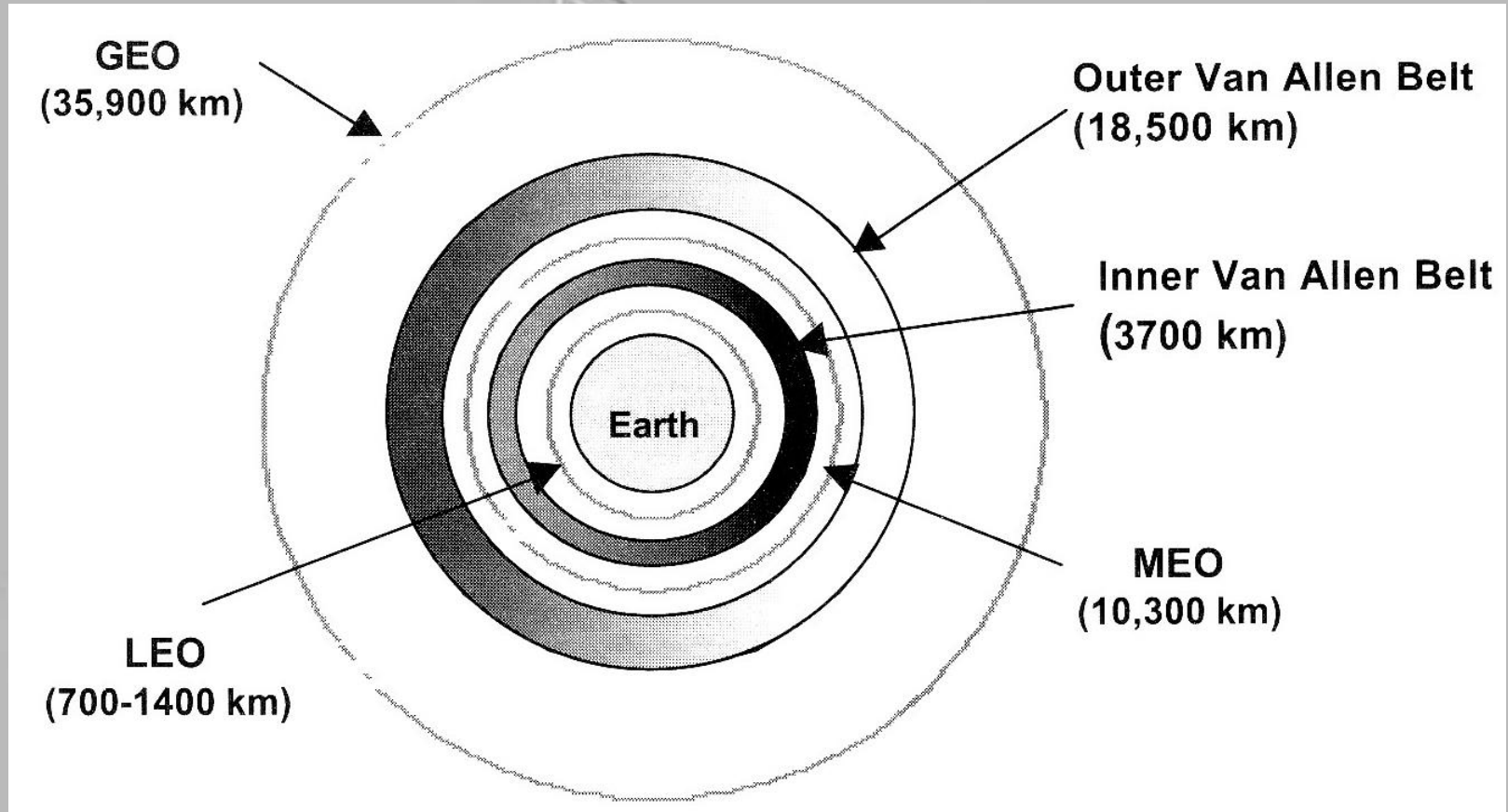
където g е земното ускорение, а M_E е масата на Земята, а средният орбитален радиус $r = R_E + h_a$ е сума от екваториалния радиус R_E на Земята и височината h_a на спътника над земната повърхност (altitude). При $r = r_{GEO}$ ъгловите скорости на Земята и спътника съвпадат $\omega_S = \omega_E$ и така той остава да “виси” в дадена точка над земната повърхност (GEO). Височината на орбитата на GEO спътника е $h_a = 35768$ km.



**GEO –
геостационарен
спътник**



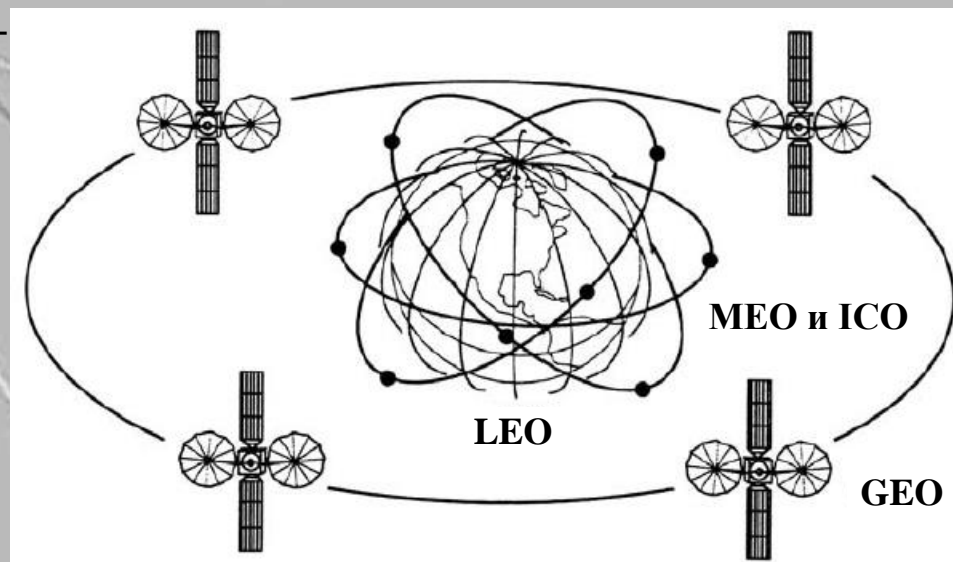
Типове сателитни орбити според височината им



Спътниците не могат да се разполагат на орбити на всякаква височина h_a над земната повърхност. Причина за това са двата радиационни пояса около Земята – вътрешният и външният пояс на Van Allen, където има силна радиация на заредени частици (вж. следващата страница) и силно влияе на времето на живот на слънчевите клетки и електрониката. Тези пояси имат следните височини 1500-5000 km и 13000-20000 km. Спътници могат да се разполагат извън тези области: над външния под вътрешния и между двата пояса на Van Allen. Вътре в тези пояси животът им рязко се скъсява.

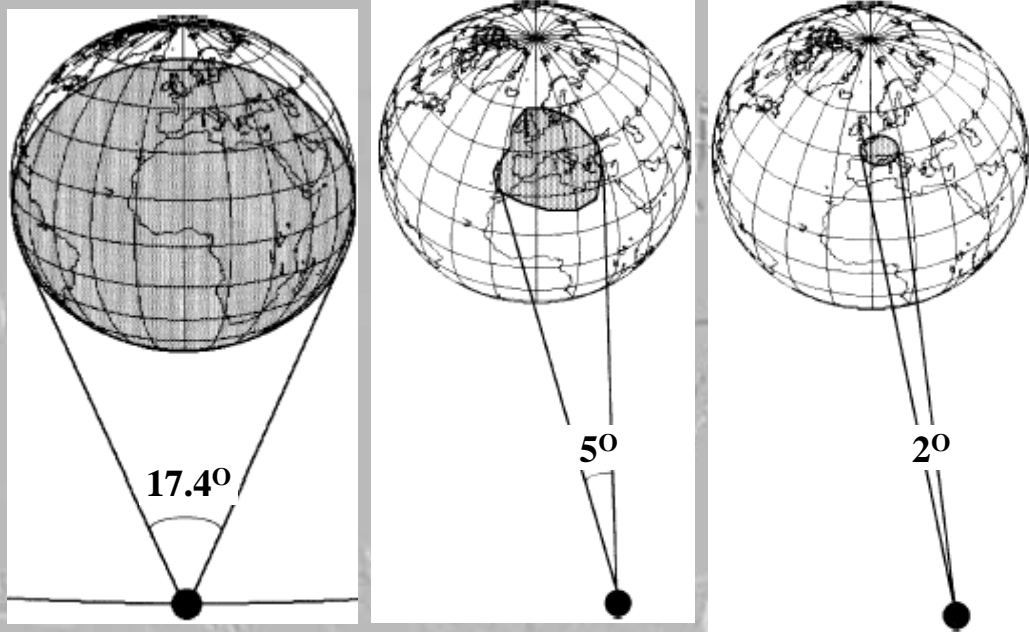
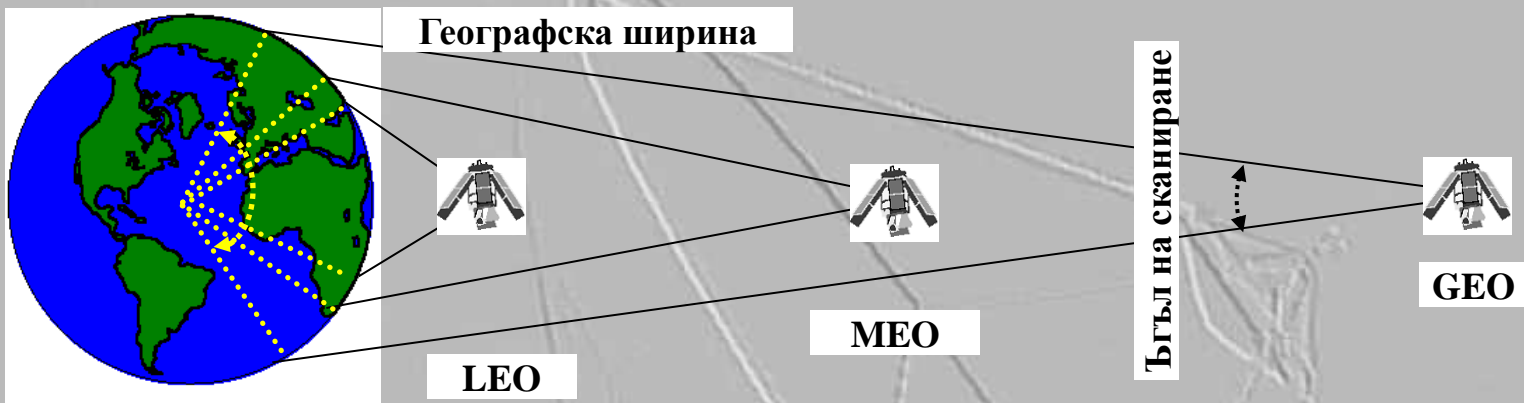
GEO, MEO и LEO спътници

Най-често за комуникационни цели се използват геостационарни спътници (GEO), спътници на средна орбита (MEO) и междинни кръгови орбити (ICO) и ниско-летящи спътници (LEO) – вж. Таблицата долу. Използват се още геосинхронизирани спътници (GSO), които са подобни на GEO, но могат да имат наклон спрямо Екватора, както и спътници с високи елиптични орбити (HEO, 1000 – 40000 km)



Орбита	Височина, km	Период на една обиколка	LoS период (пряка видимост с ES)	Закъснение за еднопосочна връзка, ms	Брой необходими спътници и време на живот
GEO	~36000	Точно 24 h	24 h	250 (“ехо-ефекти“)	3-6 (10-15 год.) висока цена
MEO (ICO)	5000 - 10000	3-6 (5-12) h	2-5 h	100	10-20 (10-15 год.) междинна цена
LEO	150 - 1000	~1.5 h	~15 min	20	30-80 (3-7 год.) ниска цена

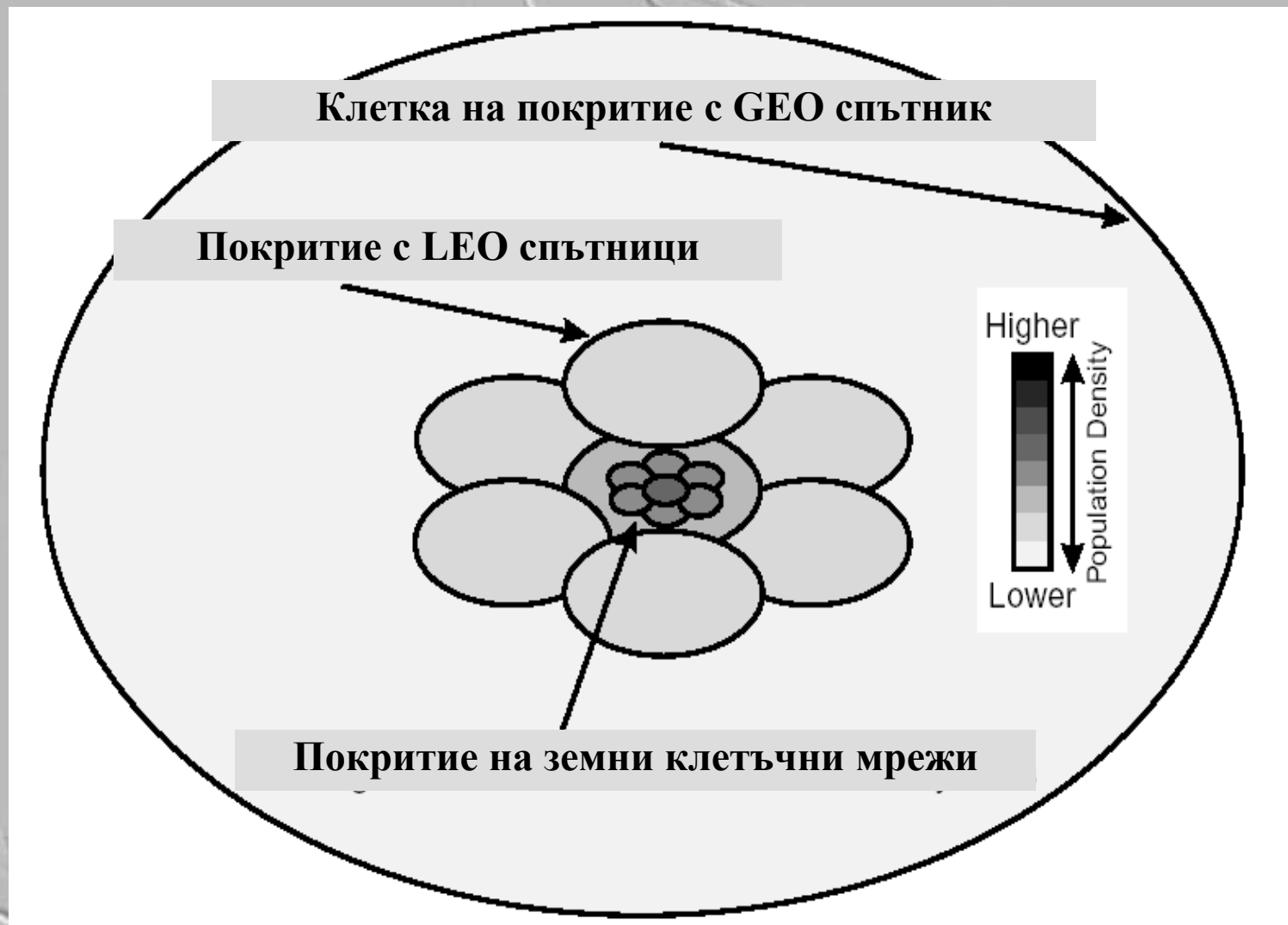
Покритие на земната повърхност с различни сателити



Размерът на областта на покритие със сигнал на земната повърхност зависи от типа на спътника и на антената му. За орбити с наклон = 0° спрямо екватора, най-големи географски ширини до $\pm 61.8^{\circ}$ се покриват от GEO спътници с минимален сканиращ ъгъл едва $\pm 8.25^{\circ}$. За MEO спътници тези ъгли са съответно: географски ширини $\pm 48.5/52.9^{\circ}$ и сканиращ ъгъл в интервал $\pm 21.5/17.1^{\circ}$. За LEO спътници: географски ширини $\pm 12.8/22.9^{\circ}$ и сканиращ ъгъл $\pm 57.2/47.1^{\circ}$. В последния случай се използват фазирани антенни решетки.

Пример: размер на “петното” на покритие от GEO спътник с различна ширина на снопа на антената

Типове спътникови мрежи с в зависимост от покритието



Основни особености на комуникациите с GEO сателити

❖ Основни предимства:

- Те имат най-широката зона на покритие с най-малък брой спътници (3) и най-тясна диаграма на антената (1 спътник покрива $\sim 42.4\%$ от повърхността на Земята);
- Те предлагат висококачествени и широколентови комуникации и са най-силната конкуренция на трансокеанските оптични връзки.
- Те са стационарни; “следене” на спътника от земната антена най-често не се налага. Не е нужна връзка между спътниците. Няма необходимост от “handover”. Няма Доплер ефект.
- GEO комуникациите са икономични; спътниците имат висока цена, но са малко на брой и имат най-дълго време на живот на орбита.

❖ Основни недостатъци:

- Поради голямото разстояние има силно закъснение на сигнала (за еднопосочна връзка – 240-270 ms; за дуплексна връзка – до 540 ms). Появяват се “ехо-ефекти” при разговори; необходими са специални устройства (“echo suppressers”). За данни те са без значение.
- Работят в условия на големи загуби на сигнала и ниски нива, поради което е необходима висока мощност на излъчените сигнали. Правило: 2 пъти увеличение на разстоянието – 4 пъти по-висока мощност. Има проблем с устройствата на батерии.
- Има трудности при покритие на райони с големи северни ширини (до $\sim 80^\circ$ за равнинни области и до $\sim 40^\circ$ за градски области).
- GEO комуникационните системи имат по принцип по-нисък капацитет (широка област на покритие с неголям брой честотни канали. Има методи за увеличение на капацитета.

Основни особености на комуникациите с LEO сателити

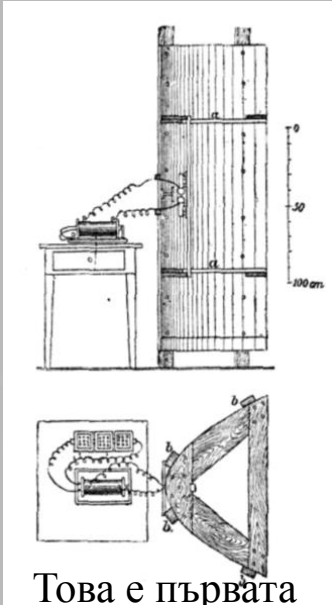
❖ Основни предимства:

- Силно се редуцира закъснението на сигнала до стойности под 20 ms, при които влиянието му е слабо;
- Съществено се намаляват загубите при разпространение на сигнала. Така намалява необходимата мощност на комуникационните устройства (поне 20 dB в сравнение с GEO), а следователно и техният размер (пример, мобилната станция при GEO (INMARSAT) системи е ~2.5 kg с формат А4; за LEO системи е достатъчен обикновен мобилен телефон
- Намалява радиуса на клетките на LEO системите, увеличава се техният брой и благодарение на ефекта на преизползване на честотата, съществено нараства капацитета на системите (напр., при еднакви условия LEO система със 70 спътника има около 20 пъти по-висок капацитет от GEO система с 3 спътника)

■ Основни недостатъци:

- Макар, че съществено се редуцира цената на един спътник, цената на цялата LEO система не е ниска (min 4 млрд \$ за стартиране). Времето на живот на LEO спътник е малко, средно ~5 години (при височини на орбитата под 300 km – до 1-3 месеца).
- Къс период на пряка видимост между LEO спътника и земната станция (типично ~15 min с малко петно на покритие върху земната повърхност.
- Наблюдава се силен ефект на радиация от заредени частици в областите на LEO и особено на MEO сателити. Това намалява времето на живот на слънчевите батерии и на електрониката.
- 3/4 от LEO сателитите са над океана в даден момент; неефективност на връзките

Антени за земни станции



Това е първата
параболична
антена, създадена
от Hertz в 1888 г.



Типични сателитни параболични антени (чини)

Други сателитни антени за земни станции

Спирални

Антенни решетки



Рупори

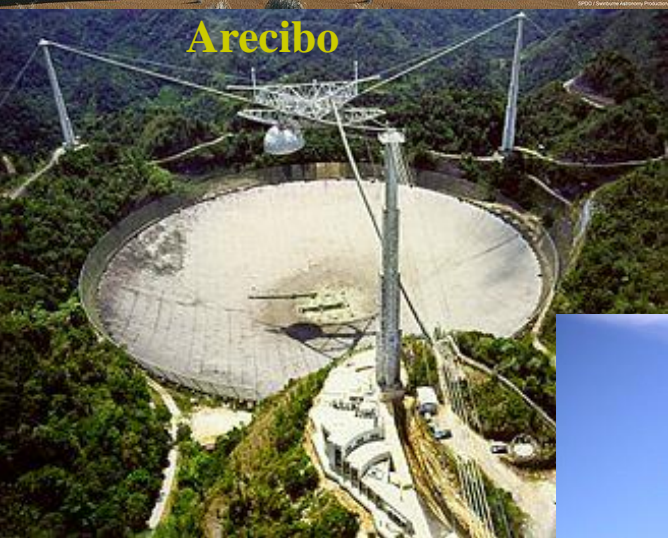




Антени за радиотелескопи на земната повърхност



SKA



Arecibo



ASTRON



Dense Aperture Arrays

SKA Central Region

Dishes

Sparse Aperture Arrays

5 km

Антенни решетки и отделни антени за земни радиотелескопи

SPDO / Swinburne Astronomy Productions

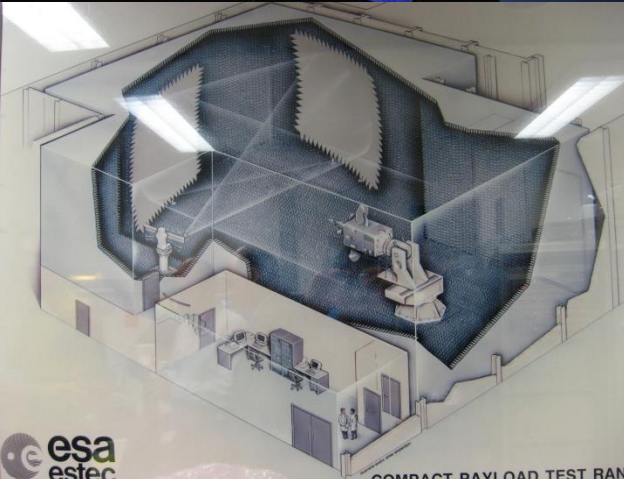
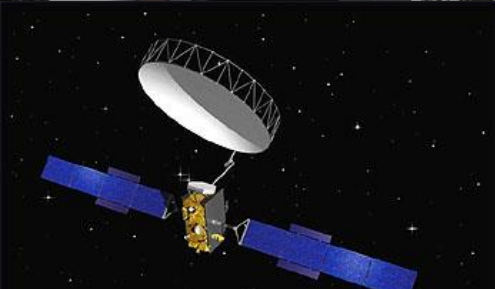
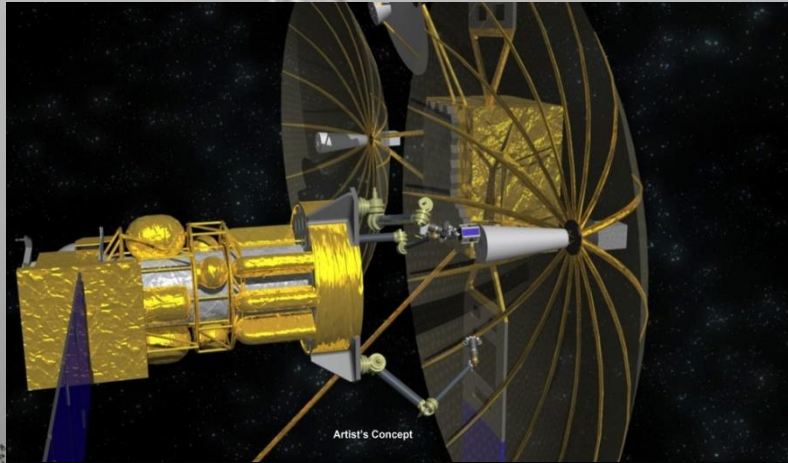


VLA



Green Bank Telescope

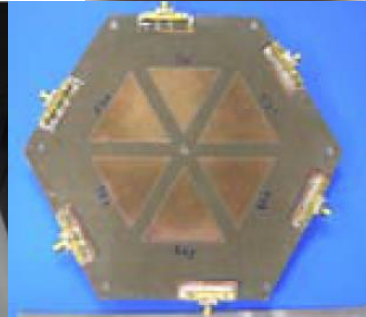
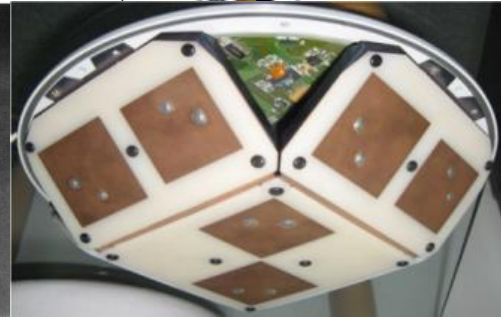
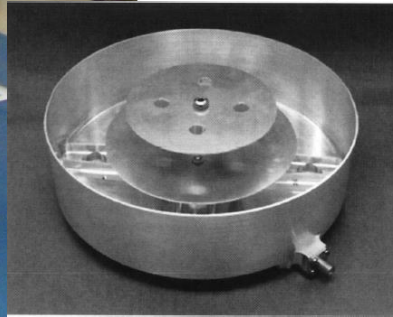
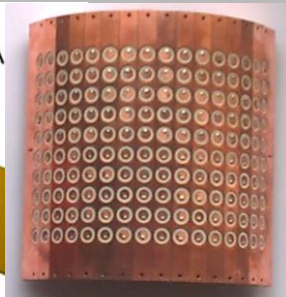
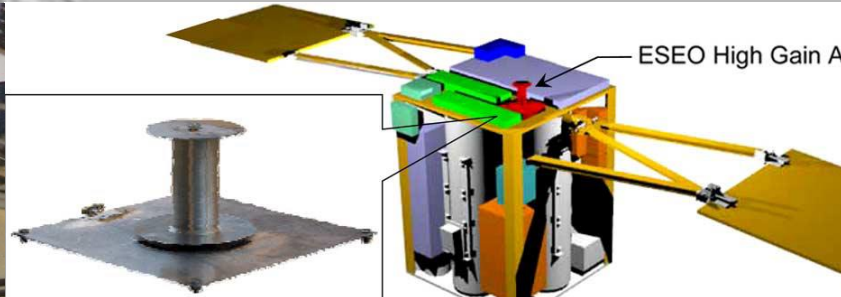
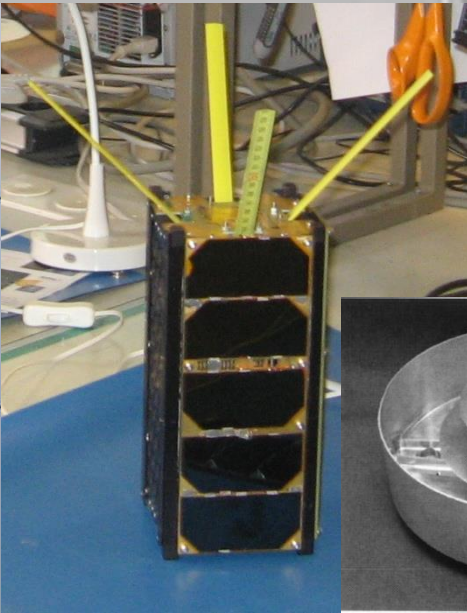
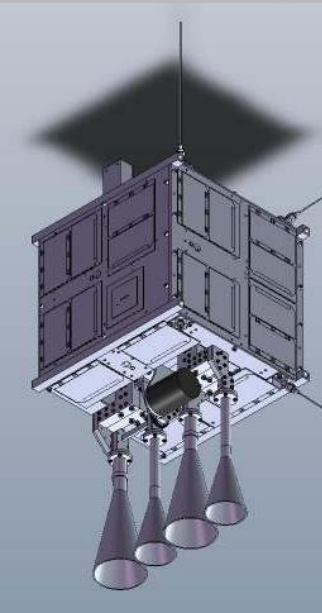
Антени за спътници



Антени за спътници и радиотелескопи на орбита

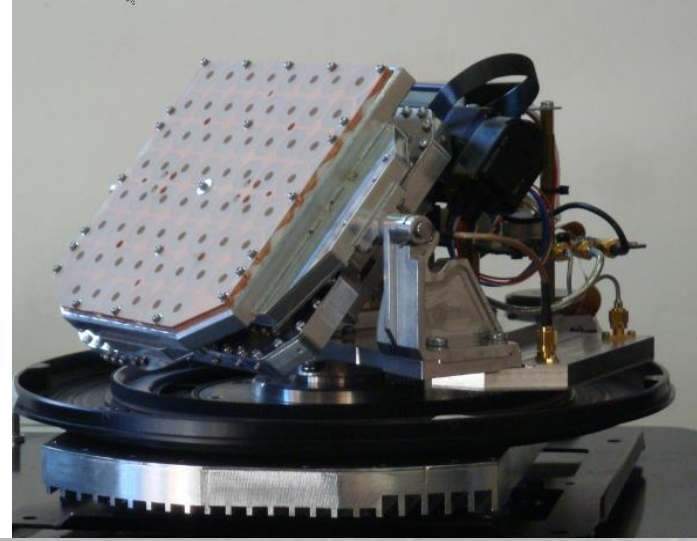
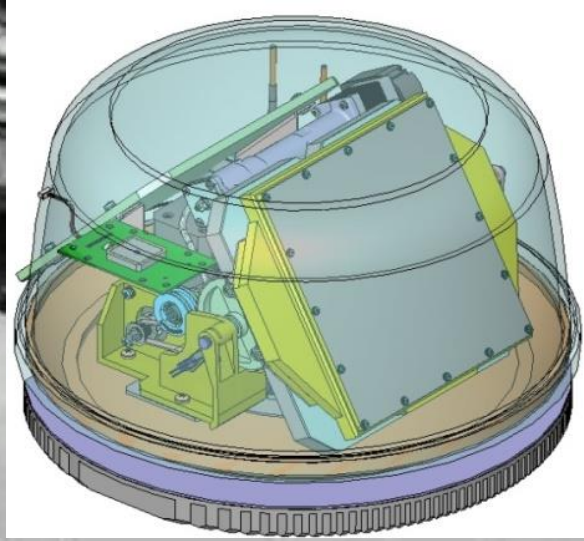


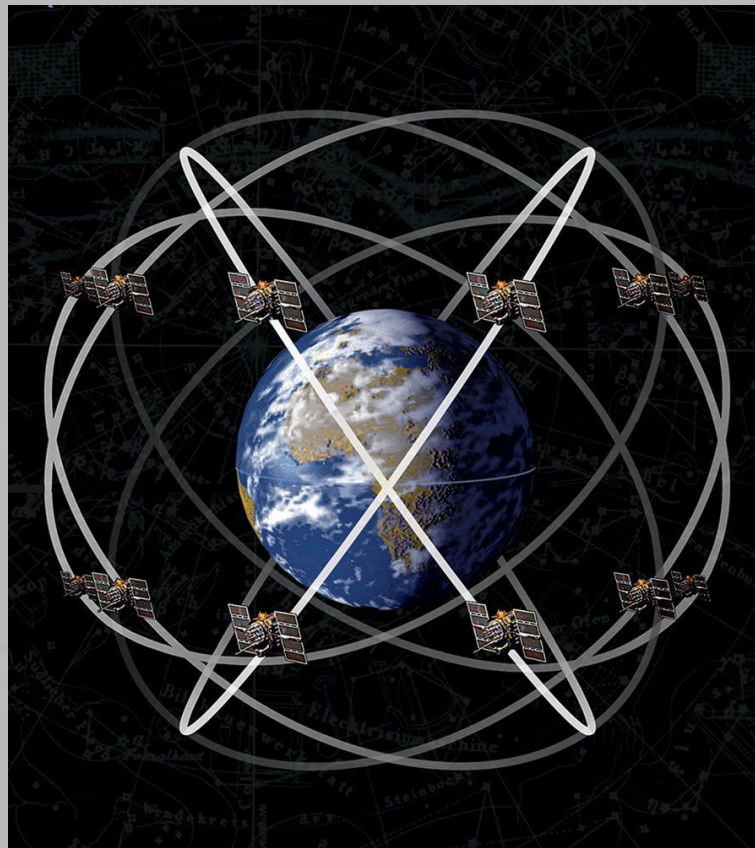
Антени за малки спътници и сканиращи антени



Антени за малки спътници и CubeSat's

Сканиращи и мобилни антени за земни превозни средства и самолети





GPS позициониране

Глобална навигационна система GPS – същност

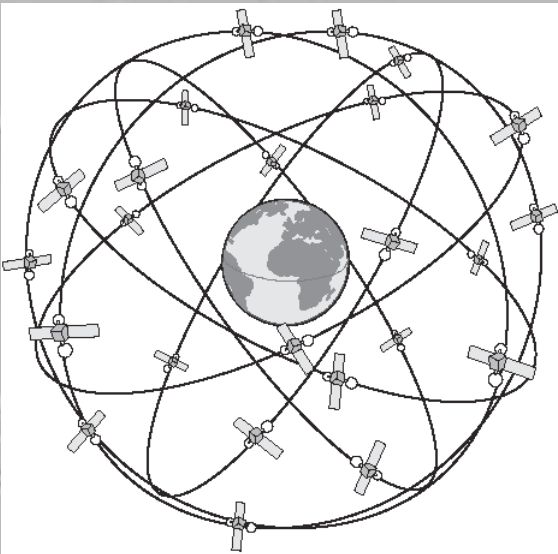
Системата за глобално позициониране (GPS – Global Positioning System) е сателитно-базирана система за определяне на местоположението на обекти навсякъде по земната повърхност. Системата работи под управлението на Министерството на отбраната на САЩ (U.S. Department of Defense) като NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging). GPS осигурява непрекъсната 24-часова услуга в реално време за 3-мерно позициониране, навигация и синхронизиране на времето в световен мащаб. Всеки, който разполага с GPS приемник, има достъп до системата и може да я използва безплатно за различни приложения, при които се изисква локализация и определяне на координатите. Всъщност системата стартира в началото на 70-те години на 20 век като чисто военна сателитна навигационна система, която непрекъснато се развива и от февруари 1978 г. започва да работи с 24 GPS спътника. Използвана е и за невоенни цели (напр. навигация на американските космически совалки) и след 1990 г. започва да се “отваря” за цивилни нужди. Официално GPS системата е напълно свободна за граждански цели от Май 2000 г. В момента GPS е една от най-използваните сателитни системи с две отделни опции за военни и за цивилни нужди, но не е единствената от този род. От октомври 1982 г. СССР стартира системата GLONASS, подобна на GPS, с 24 спътника в 3 орбити на 64.8° наклон спрямо екватора. Системата работи и до днес, но само с 12 работоспособни спътника, като има потребители, които могат да използват и двете системи. Счита се, че двете системи ще се обединят в бъдеще. В Европейския съюз през 2010 г. трябва да стартира изцяло гражданската навигационна система от ново поколение GALILEO с подобрени характеристики спрямо тези на GPS. Тя ще разполага с 30 спътника и освен свободно позициониране ще позволява и много други навигационни услуги, свързани с по-доброто приемане на сигнал, повишена точност и всеобхватност.

GPS спътници

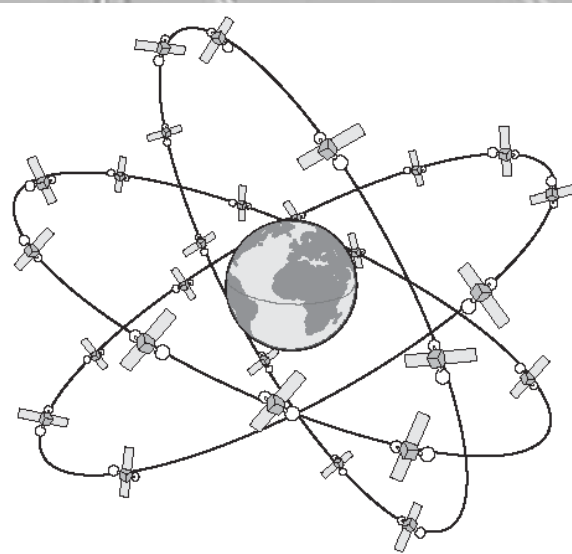
GPS системата се състои от 3 различни подсистеми: 1) GPS спътници; 2) Система за контрол и 3) Приемни устройства на отделните потребители (GPS приемник).

“Съзвездието” на GPS спътниците създава реален пространствен базис, необходим за определяне на местоположението на обектите спрямо него. За тази цел са необходими минимум 21 спътника, но GPS системата работи с 24, като 3 от тях могат веднага да заменят излязъл от употреба или повреден спътник. GPS спътниците са типични МЕО спътници със средна височина на орбитата ~ 20200 km спрямо морската повърхност. Те са разположени в 6 орбити с наклон 55° наклон по 4 спътника на 60° един от друг (за Galileo: 27 от общо 30 спътника в 3 орбити с наклон наклон 65° на средна височина 23616 km). Височината на орбитата на GPS спътниците е избрана така, че те да обикалят Земята за половин земен (не слънчев) ден, който е $23\text{ h. }56\text{ min}$ и 4.09 s и отговаря точно на обиколка от 360° на Земята около оста

й. Така всеки ден GPS спътниците изгряват с $\sim 4\text{ min.}$ по-рано, за да следват точно движението на Земята около оста й. Така се гарантира, че произволен GPS приемник ще получава сигнали поне от 4 (минимален брой) до 11 (максимален брой) спътника, което е достатъчно точно определяне на 3D местоположението на всеки обект.



GPS спътници



Galileo спътници

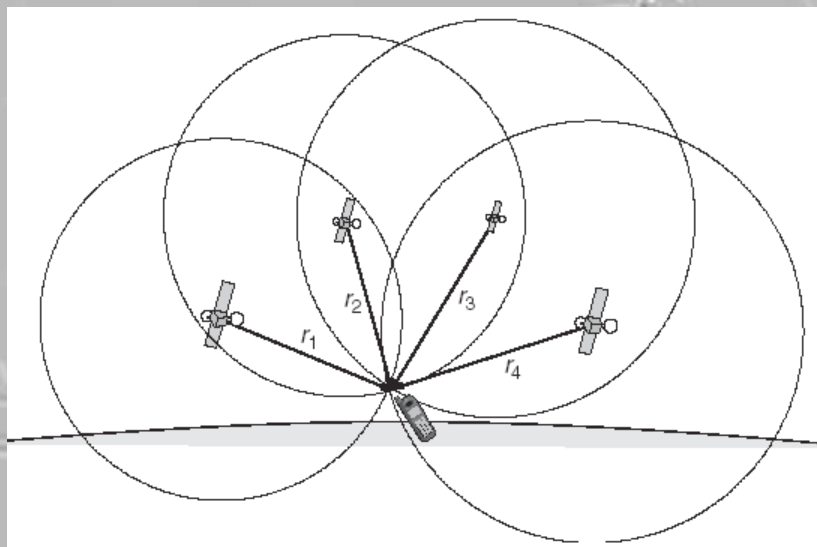
GPS контролни станции

Контролните земни GPS станции са отговорни за наблюдението и коригиране на орбитите на GPS спътниците. Това са 5 земни станции, разположени сравнително равномерно по земната повърхност, 4 от които не много далече от Екватора: Colorado Springs, Hawaii, Ascension Island, Diego Garcia и Kwajalein. Това разположение позволява всеки GPS спътник да се контролира около 95 % от времето. Всички контролни станции имат специални GPS приемници за наблюдение на сигналите и проследяване на спътниците, за контрол на “здравето” им на орбита, точността на позициониране и синхронизиране на часовниците им. Тези данни се предават по земни канали до Главната контролна станция на Falcon Air Force Base в Colorado Springs, CO, USA. След съгласуване на данните за всички GPS спътници се изработва специално съобщение, предназначено за всеки спътник според номера му (SVN, Space Vehicle Number), изпраща се до три Uplink станции (Ascension Island, Diego Garcia и Kwajalein) и оттам се предава на всеки GPS спътник за изпълнение.

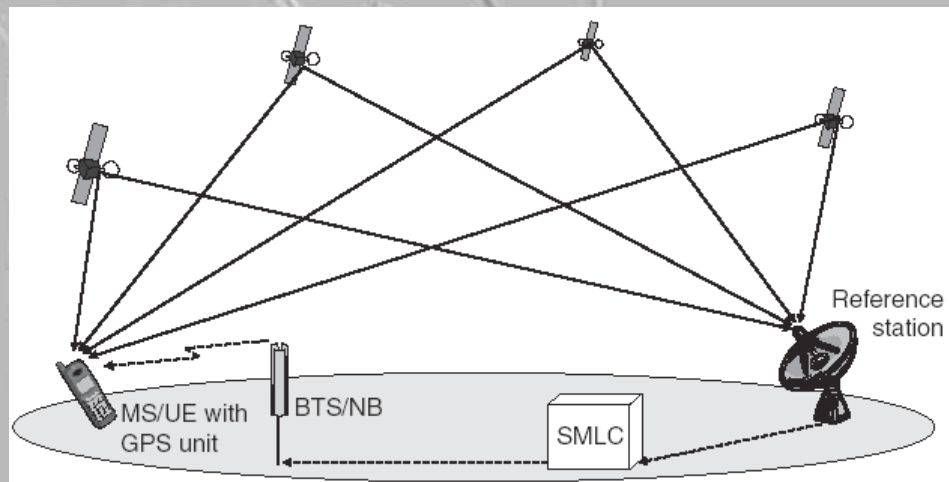


GPS приемници

GPS приемникът е най-важната част от оборудването на потребителя на GPS услугите на земната повърхност с помощта на който той може да определи своето местоположение и надморска височина, скоростта си, времето за движение от начален момент и пр. Структурата на целия потребителски терминал зависи от приложението му. За граждански цели съществуват 4 основни типа услуги: навигация по море, суша и въздух; топографски проучвания, картография и синхронизация на часовниците. Напоследък има тенденция за използване на GPS системата за локализация на мобилни потребители в различни безжични мрежи. Най-разпространените приложения на GPS са: земеделско картографиране на земи, посеви, почви и пр., навигация на движещи се обекти – полиция, пожарна, бърза помощ, доставки на стоки, публичен транспорт, охранителни системи за коли и пр., съставяне на карти за различни цели, планиране на строежи на големи обекти и инфраструктура, добив на полезни изкопаеми, метеорологично време, природни бедствия и др.



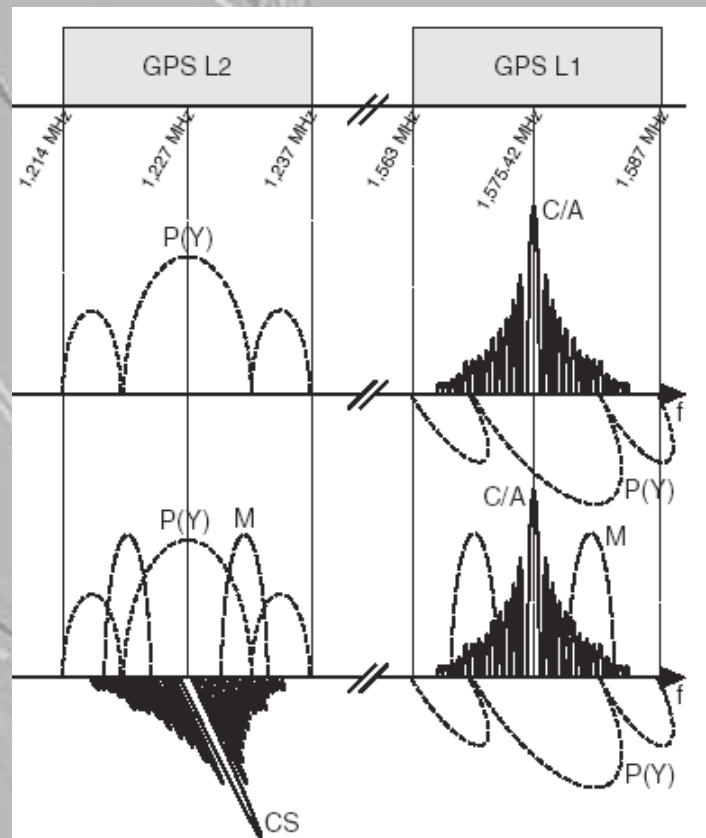
GPS приемник за позициониране



Локализация на MS в GSM/UMTS чрез GPS

GPS сигнали

GPS спътниците непрекъснато излъчват радио-разпръскващ се (пилотен сигнал) сигнал за позицията си и текущото време в две честотни ленти L1 и L2, като излъченият сигнал достига земната повърхност за ~ 0.06 s. Сигналът е слаб (с поставяне на ръката над приемника затихва напълно) и може да се приема на открито, но не и под вода, почва, дебели стени и пр. Пример: в гъсти гори и в плътна градска среда сигналът е силно затихва или интерферира, което затруднява определянето на позицията на GPS приемника. GPS е система със CDMA достъп и спътниците излъчват два типа разширени псевдослучайни PN кодове (C/A и P код) в лентата L1 и едно навигационно съобщение (navigation message) със системна информация. C/A кодът (Coarse Acquisition) се използва за грубо определяне на координати (SPS, Standard Positioning Service) с грешка до 100 m хоризонтално и 150 m вертикално през 95 % от времето (в най-тежкия случай). P кодът (PPS, Precise Positioning Service) е достъпен само за военни цели (излъчва се на честоти L1 и L2). Той се използва за 10 пъти по-прецизно позициониране с грешка до 15-20 m хоризонтално и 27.7 m вертикално. Съществува и допълнителна техника за увеличаване на точността на позициониране и за двата кода (напр. до 15 m хоризонтално за цивилни цели с C/A код). P-кодът е с 10^4 бита с честота на повторение 10.23 MHz, PSK модулация.



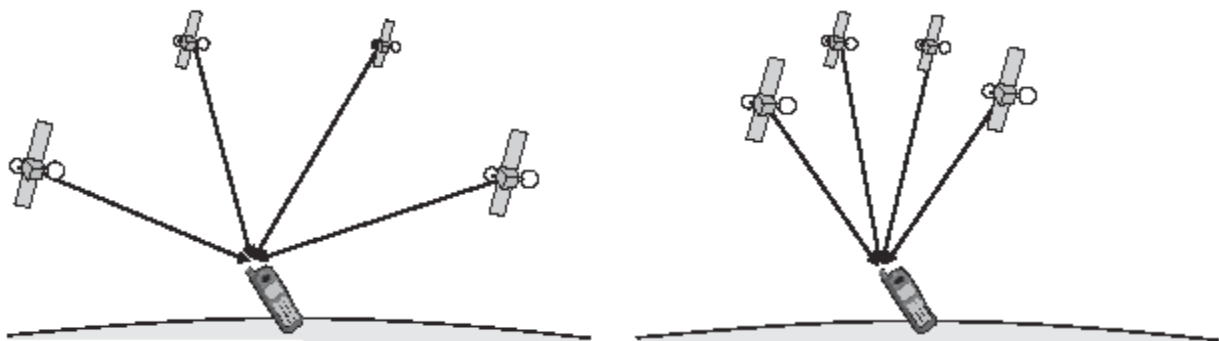
Две GPS честотни ленти L1 и L2

Как се определят координатите на GPS приемника?

GPS позиционирането се извършва на 3 етапа:

✓ Идентификация на спътника. Приемникът трябва да разпознае видимите на хоризонта GPS спътници (обикновено 5-10). Процедурата зависи от състоянието на приемника. Ако той се включва за първи път, трябва да сравни приетия C/A код с оригиналния по принципа на автокорелацията (“студена” идентификация”). Процесът се ускорява, ако приемникът има информация за последната си позиция (“топла” идентификация). Най-лесно е, когато приемникът работи непрекъснато – “гореща” идентификация без C/A код. Времената за трите вида идентификация са приблизително 40-60 s, 30-40 s и 5-15 s. Приемникът избира поне 4 сателита с добро разположение (вж. фигурата долу).

✓ Определяне на разстоянията до спътниците. Процедурата се нарича “satellite ranging”. Позицията на всеки спътник е известна, но на приемника – не. Така, за да определи разстоянията, приемникът трябва да измери времето за разпространение на сигнала от всеки спътник, т. е. кога сигналът се излъчва от спътника и кога се приема от приемника. Последното е лесно, понеже приемникът получава информация за текущото време в системата и само



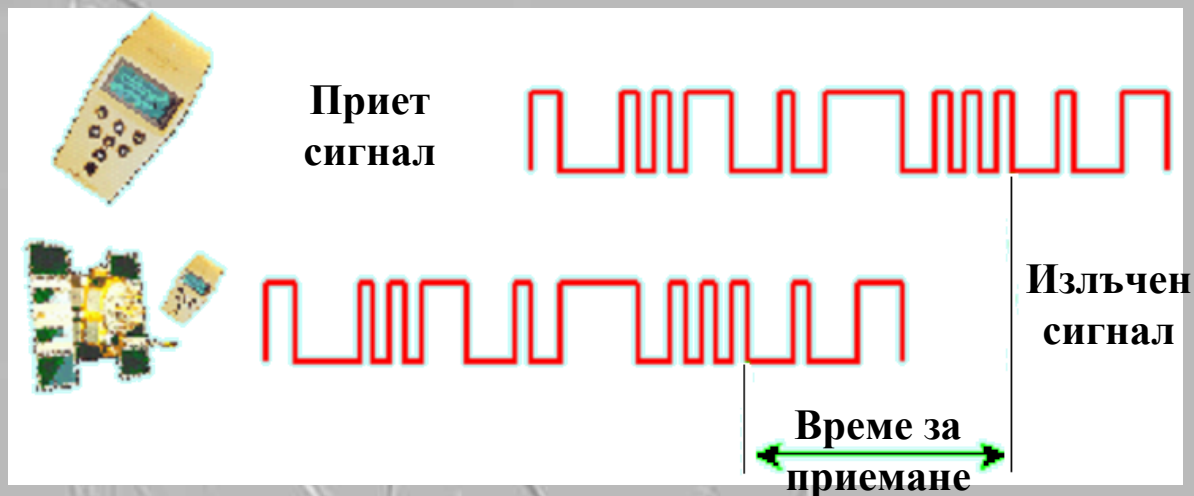
Добро разположение

Лошо разположение

трябва да “провери” часовника си. Проблемът е да се определи кога приетият сигнал е “бил излъчен” от всеки от спътниците? (вж. информацията и на следващата страница)

Как се определят координатите на GPS приемника? (2)

Всички GPS приемници са времево синхронизирани със спътниците, които едновременно излъчват един и същи PN код. Той се повтаря примерно 1 път седмично. Когато GPS приемникът получи даден код, той трябва да “провери” в паметта си, кога този код е бил “изпратен”.



✓ Изчисляване на координатите. Позициите на видимите GPS спътници, определени от GPS приемника не са точните геометрични разстояния, а са псевдо-случайни поради грешката. Има различни източници на грешка, но най-силен е ефектът от пречупване на сигнала от йоносферата (грешка до ± 5 m). За да се минимизира грешката, спътниците изпращат и съответните коригиращи коефициенти. Така, GPS приемникът може да определи координатите си, като реши система от уравнения от типа

$$p_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} + c\Delta t$$

$$r_i = p_i + \epsilon$$

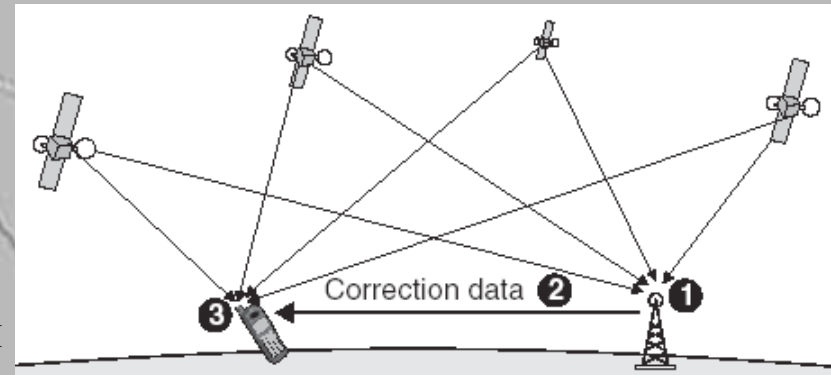
където p_i е измереното случайно отклонение от истинската позиция r_i (x, y, z) на приемника, ϵ е грешката (намалява с увеличаване на броя на наблюдаваните спътници), (X_i, Y_i, Z_i) са точните координати на i -тия спътник, c – скорост на светлината, Δt – средното времево закъснение на GPS сигнала. Окончателната позиция се определя по метода на най-малките квадрати от измерените отклонения p_i , $i = 1, 2, 3, 4$ (min), ... 11 (max).

Диференциален GPS – подобрена точност

Възможно ли е GPS приемниците да осигурят грешка 1-5 m или дори под 1 m? Оказва се, че това може да стане чрез т. нар. диференциален GPS и в зависимост от оборудването? *Диференциалната корекция* е метод за редуциране на грешките от ефектите на атмосферата и други грешки от GPS позиционирането, но не и индивидуалните грешки на приемниците и многолъчево разпространение. Методът се базира на два различни приемника: мобилен и референтен (GPS базова станция) (вж.)

Референтната приемна станция е с известно разположение върху земната повърхност и често се нарича GPS базова станция BS. Следователно, GPS BS може много точно да определи грешките в своето положение, ако използва същите GPS спътници, както и мобилните GPS приемници в същия регион и по същото време. Има два начина за GPS корекция:

- 1) Корекция в реално време (D-GPS): при него GPS BS излъчва (обикновено по безжичен канал) до всички мобилни GPS приемници в региона специално съобщение (correction message). Така, всеки мобилен приемник коригира координатите си заедно с приемане на сигналите от GPS спътниците.
- 2) Корекция след допълнителна обработка (post processing): Сега мобилният приемник приемане на сигналите от GPS спътниците, но в момента показва некоригирани данни. Корекцията може да стане по-късно на компютър, като се използват файловете от мобилния приемник (ако той може да съхранява данните си), файла с корекциите от GPS BS и специален софтуер за диференциална корекция.



Мобилен GPS приемник

Референтна станция



**Благодаря за
вниманието**

