

АНТЕНЕ



Увод

- Упознаћемо се са ЕМ зрачењем и основним принципима рада антена
 - Под зрачењем се подразумева стварање ЕМ таласа у слободном простору
 - Ти таласи су сферни
 - Простиру се од извора на све стране
 - Зрачење није подједнако у свим правцима
 - На великом одстојању од извора зрачења, сферни таласи, локално гледано, имају облик униформних раних таласа

Увод

- Практично сваки систем променљивих струја и наелектрисања зрачи
 - Није свако зрачење жељено и технички корисно
 - Зрачење из процесора рачунара постоји, али је непожељно
 - Може ометати друге електронске уређаје и омогућити одливање информација
 - Жељено (намерно) зрачење таласа се остварује антенама
- Антене су структуре начињене од метала и диелектрика
 - Када раде као предајне, њихов задатак је да што већи део енергије која долази од генератора (предајника) трансформише у енергију слободног таласа
 - Антене могу радити као предајне и као пријемне

Увод

- Антене се могу схватити као прелаз између система за вођење таласа (вода или таласовода) и слободног простора
- Назив “антене” потиче из зоологије, од латинског назива за пипке код инсеката (*antenna*), а најстарије антене потичу из Херцових огледа (1888)

Увод

- Помоћу слободних ЕМ таласа (радиоталаса) остварују се везе на даљину (бежичне везе) у циљу преноса разних сигнала
- Предајна антена зрачи енергију којом се напаја из генератора
 - Ствара ЕМ талас
- Пријемна антена из наилазећег ЕМ таласа извлачи енергију и прослеђује је пријемнику
 - Спрега између таласа и пријемника остварује се пријемном антенном
 - Пријемник даље обрађује информацију садржану у таласу
 - Некада је циљ само да се прикупи енергија из таласа (бежични пренос енергије – energy harvesting)
- Захваљујући реципрочности, свака антена може да ради и као предајна, и као пријемна

Увод

- Пренос сигнала радиоталасима не губи на актуелности већ више од 100 година
 - Користи се за дифузију радио и телевизијских сигнала, пренос података и других сигнала земаљским и сателитским везама, мобилну телефонију, бежичне рачунарске мреже и периферије, телеметрију и телекомуникације, радионавигацију (GPS систем), радиолокацију (радаре) и друго
- Анализу поља зрачења започећемо од закаснелих потенцијала, а онда посебно анализирати Херцов дипол (као најједноставнију антену)
 - Увешћемо основне параметре који карактеристишу антене (и као предајне, и као пријемне)
 - Приказаћемо неке од основних типова антена које су важне за инжењерску праксу

Основне једначине зрачења

- Временски променљиво побудно поље генератора ствара у проводницима временски променљиве струје, које су повезане са временски променљивим наелектрисањима
 - Ове струје и наелектрисања представљају извор временски променљивог ЕМ поља
 - У тачкама које су далеко од ових струја и наелектрисања, то поље има посебна својства (биће објашњено касније)
- Једноставности ради, у анализи која следи, сматраћемо да су струје и наелектрисања линијски расподељена у вакууму, што битно не умањује општост
 - Сматраћемо и да је режим простопериодичан

Основне једначине зрачења

- За постојање временски променљивих струја није неопходно постојање галвански затворених кола
 - Примера ради, ако се генератор наизменичне струје веже у просто коло са кондензатором, коло није галвански затворено, али у генератору постоји струја
 - Временски променљива струја постоји и у двопроводничком воду ако се генератор прикључи на један крај, док се други крај вода остави отвореним
 - Ако се на генератор временски променљиве побуде прикључе две жице произвољног облика, у тим проводницима такође ће постојати временски променљиве струје
- При томе се мора јавити и временски променљив вишак наелектрисања
 - Код кондензатора тај вишак је нагомилан на његовим електродама, док је код жичаних проводника вишак расподељен по површи проводника

Основне једначине зрачења

- Јачина струје и вишак наелектрисања повезани су једначином континуитета
 - За жичане проводнике у простопериодичном режиму та једначина гласи
$$\frac{dI}{dl} = -j\omega Q'$$
где је I јачина струје жице, l координата дуж жице, а Q' подужна густина наелектрисања жице
 - Из претходне једначине могуће је одредити Q' ако је позната јачина струје жице

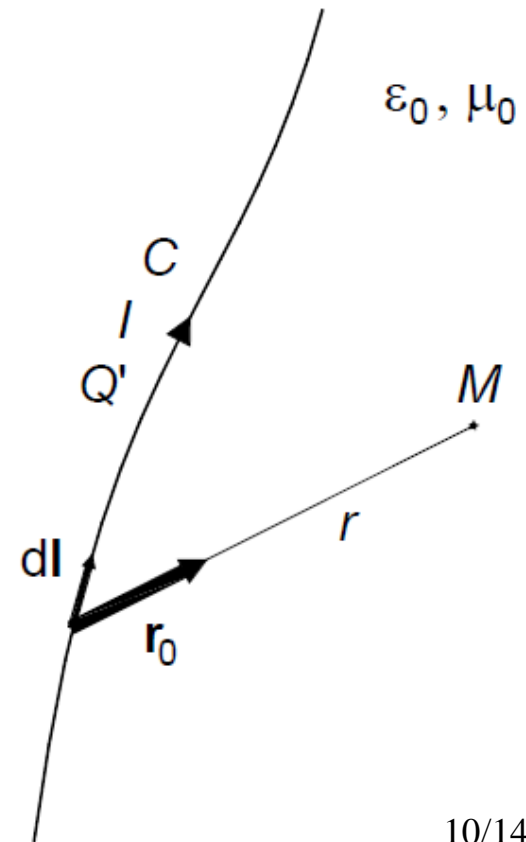
$$Q' = \frac{j}{\omega} \frac{dI}{dl}$$

Основне једначине зрачења

- Закаснили потенцијали који потичу од струја и наелектрисања жичаних проводника у вакууму дати су изразима

$$\underline{V} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_C \underline{Q}' dl \frac{e^{-j\beta r}}{r} \quad \underline{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \underline{I} dl \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

где је $d\mathbf{l}$ елемент жичаног проводника оријентисан исто као референтни смер струје \underline{I} , а $\beta = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ је фазни коефицијент



Основне једначине зрачења

- Знајући потенцијале, електрично и магнетско поље се могу одредити из једначина

$$\underline{\mathbf{E}} = -j\omega\underline{\mathbf{A}} - \text{grad } \underline{V}$$

$$\underline{\mathbf{H}} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \underline{\mathbf{A}}$$

Основне једначине зрачења

- Електрично поље се може изразити преко оба потенцијала или само преко магнетског вектор-потенцијала
 - У овом другом случају се електрични скалар-потенцијал елиминише на основу Лоренцовог услова

$$(\operatorname{div} \underline{\mathbf{A}} = -j\omega\varepsilon_0\mu_0\underline{V})$$

- Магнетско поље је одређено

магнетским вектор-потенцијалом

- Могуће је прво одредити потенцијале (интегралити), па онда диференцирати потенцијале по координатама
- Алтернативно, оператори просторног диференцирања могу се унети под интеграле у изразима за потенцијале (где делују само на r), диференцира се, па се онда интегралити

$$\underline{\mathbf{E}} = -j\omega\underline{\mathbf{A}} - \operatorname{grad} \underline{V} = -j\omega \left(\underline{\mathbf{A}} + \frac{1}{\beta^2} \operatorname{grad} \operatorname{div} \underline{\mathbf{A}} \right)$$

$$\underline{\mathbf{H}} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}}$$

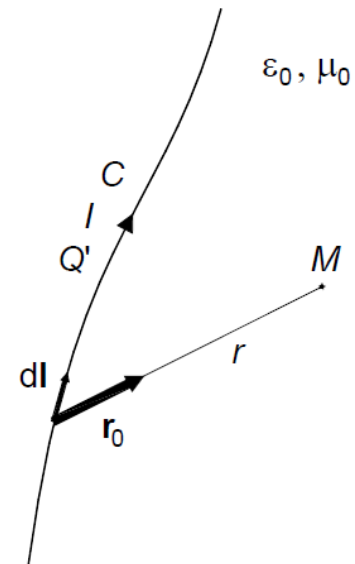
Основне једначине зрачења

- Ако се оператори просторних извода унесу под интеграле, добија се

$$\underline{\mathbf{E}} = -j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \underline{I} \, d\mathbf{l} \frac{e^{-j\beta r}}{r} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_C \underline{Q}' \, d\mathbf{l} \frac{(1 + j\beta r)e^{-j\beta r}}{r^2} \mathbf{r}_0$$

$$\underline{\mathbf{H}} = \frac{1}{4\pi} \int_C \underline{I} \, d\mathbf{l} \times \mathbf{r}_0 \frac{(1 + j\beta r)e^{-j\beta r}}{r^2}$$

где је \mathbf{r}_0 орт усмерен од елемента $d\mathbf{l}$ ка тачки M у којој се рачуна поље



Основне једначине зрачења

- Ако је позната расподела струје антене, из једначина

$$\underline{Q}' = \frac{j}{\omega} \frac{d\underline{I}}{dl} \quad \underline{\mathbf{E}} = -j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \underline{I} d\mathbf{l} \frac{e^{-j\beta r}}{r} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_C \underline{Q}' dl \frac{(1 + j\beta r)e^{-j\beta r}}{r^2} \mathbf{r}_0$$

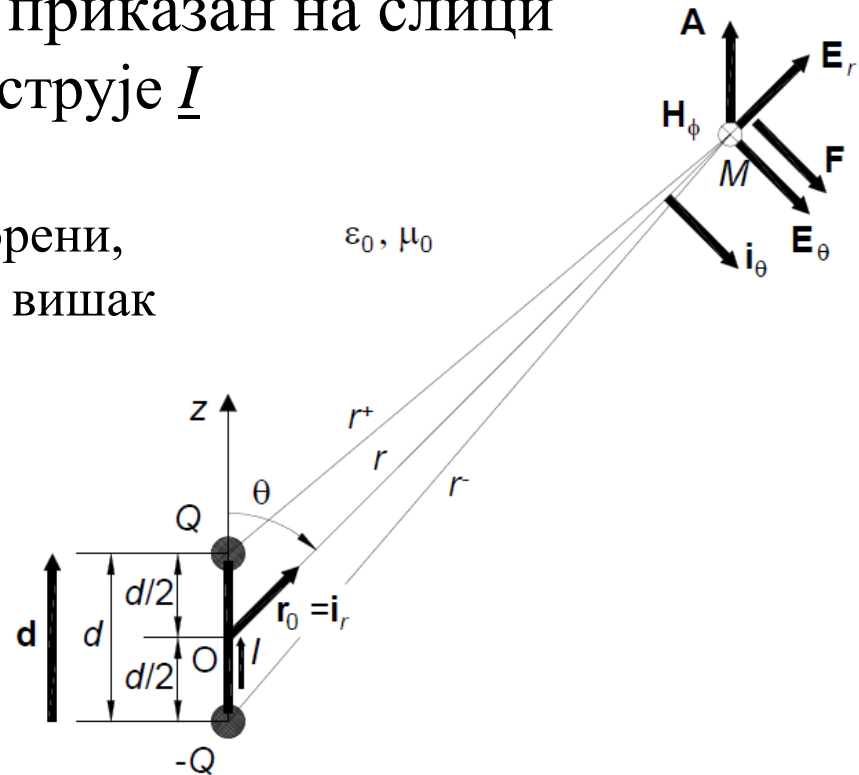
$$\underline{\mathbf{H}} = \frac{1}{4\pi} \int_C \underline{I} d\mathbf{l} \times \mathbf{r}_0 \frac{(1 + j\beta r)e^{-j\beta r}}{r^2}$$

могуће је израчунати електрично и магнетско поље у било којој тачки простора

- Нас ће посебно занимати тачке које су на великом растојању од антене (у зони зрачења антене)
- Прорачун је најједноставније спровести за Херцов дипол, а суперпозицијом поља Херцових дипола могуће је израчунати поље у зони зрачења произвољне антене (као што је описано у наставку)

Херцов дипол

- Анализираћемо поље које ствара усамљен праволинијски елемент проводника, мале дужине d ($d \ll \lambda$), са струјом јачине \underline{I} , приказан на слици
 - Претпоставимо да је јачина струје \underline{I} константна дуж елемента
 - Пошто су крајеви елемента отворени, на тим крајевима се мора јавити вишак наелектрисања у облику два тачкаста наелектрисања
 - Из једначине континуитета, наелектрисање на горњем елементу је $Q = -jI/\omega$, а на доњем је $-Q$



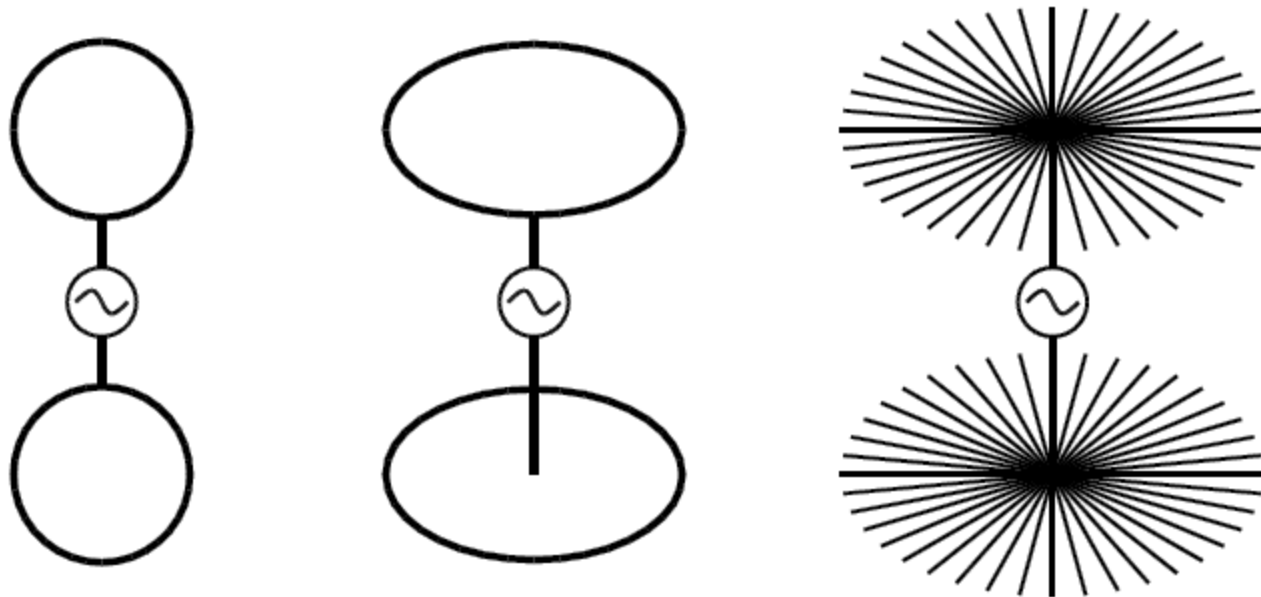
Слика 12.2. Херцов дипол.

Херцов дипол

- Ова два блиско постављена супротна (временски променљива) наелектрисања чине дипол, при чему струја I дренира та наелектрисања, односно омогућава да се та наелектрисања мењају у времену
- Описани **фиктивни** дипол назива се Херцовим диполом

Херцов дипол

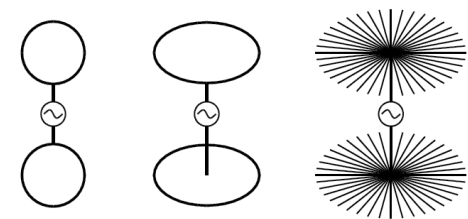
- У пракси,
Херцов дипол није могуће егзактно реализовати
– Паве се различите апроксимације



Слика 12.3. Практичне реализације Херцовог дипола.

Херцов дипол

- Да би у жици постојала временски променљива струја, у жицу се мора убацити генератор
 - На крајеве жице стављају се два метална тела (лопте, дискови, системи радијалних жица у облику кишобрана и слично)
 - На њима се нагомилава наелектрисање Q , односно $-Q$
- Описани систем користи се као кратка антена
 - Електрички кратке антене (чије су димензије много мање од таласне дужине) нису ефикасне
 - Имају релативно велике губитке у проводницима у односу на снагу зрачења
 - Када се прилагоде, веома су ускопојасне
- Због тога се, осим изузетно, користе антене чије су димензије бар реда величине $\lambda/10$



Слика 12.3. Практичне реализације Херцовог дипола.

Херцов дипол

- Магнетски вектор-потенцијал који ствара Херцов дипол на великом одстојању r ($r \gg d$) је

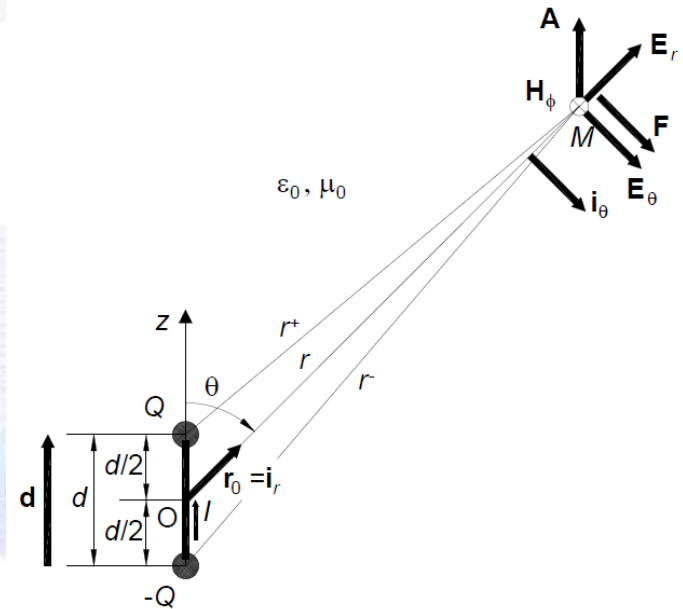
$$\underline{\mathbf{A}} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} \underline{I} \underline{\mathbf{d}} \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

где је $\underline{\mathbf{d}}$ оријентисан као и струја

- Претходни израз не би важио да није испуњен услов $d \ll \lambda$, јер се тада промена члана $e^{-j\beta r}$ дуж жице не би могле занемарити

- Електрични скалар-потенцијал тачкастих наелектрисања Q и $-Q$ је, респективно

$$\underline{V}^+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \underline{Q} \frac{e^{-j\beta r^+}}{r^+} \quad \underline{V}^- = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \underline{Q} \frac{e^{-j\beta r^-}}{r^-}$$



Слика 12.2. Херцов дипол.

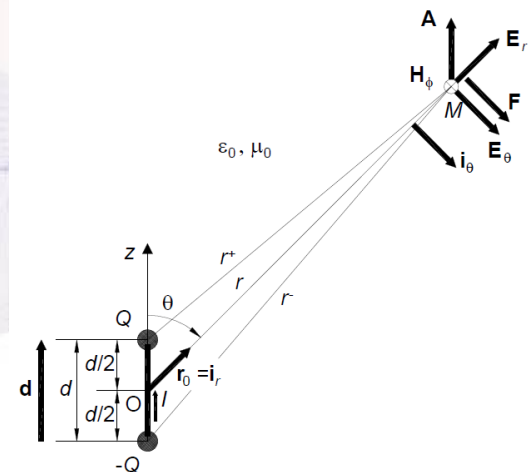
Херцов дипол

- Укупан потенцијал оба наелектрисања је

$$\underline{V} = \underline{V}^+ + \underline{V}^- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} Q \left(\frac{e^{-j\beta r^+}}{r^+} - \frac{e^{-j\beta r^-}}{r^-} \right)$$

– Иако је $r^+ \approx r^- \approx r$, не сме се ставити $r^+ = r^- = r$, јер би се за укупан потенцијал добио резултат 0

- Укупан потенцијал ћемо приближно израчунати на следећи начин
 - Израз у заградама представља прираштај члана $e^{-j\beta r}/r$ од доњег до горњег краја дипола (сматрајући да је тачка M у којој се рачуна потенцијал фиксирана)



Херцов дипол

- На основу свега овога, може се написати

$$\begin{aligned}\underline{V} &\approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \underline{Q} \text{grad}' \left(\frac{e^{-j\beta r}}{r} \right) \cdot \underline{\mathbf{d}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \underline{Q} \frac{(1+j\beta r)e^{-j\beta r}}{r^2} \mathbf{r}_0 \cdot \underline{\mathbf{d}} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(1+j\beta r)e^{-j\beta r}}{r^2} \underline{Qd} \cos\theta ,\end{aligned}$$

где grad' означава диференцирање по положају тачке на диполу, држећи фиксираним тачку M

– У претходном извођењу употребљена је релација

$$\text{grad}' \left(\frac{e^{-j\beta r}}{r} \right) = \frac{d}{dr} \left(\frac{e^{-j\beta r}}{r} \right) (-\mathbf{r}_0)$$

где је вектор \mathbf{r}_0 усмерен од Херцовог дипола ка тачки у којој се рачуна потенцијал

- Електрични момент дипола је $\underline{\mathbf{p}} = \underline{Qd}$, а $\mathbf{r}_0 = \mathbf{i}_r$ је радијални орт сферног координатног система

Херцов дипол

- Заменом израза $\underline{\mathbf{A}} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} \underline{\mathbf{I}} \underline{\mathbf{d}} \frac{e^{-j\beta r}}{r}$ и $\underline{\mathbf{V}} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(1+j\beta r)e^{-j\beta r}}{r^2} \underline{\mathbf{Q}} d \cos\theta$, у изразе

$$\underline{\mathbf{E}} = -j\omega \underline{\mathbf{A}} - \text{grad } \underline{\mathbf{V}} \quad \underline{\mathbf{H}} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \underline{\mathbf{A}}$$

диференцирањем у сферним координатама и заменом наелектрисања струје из једначине $\underline{\mathbf{Q}} = -j\underline{\mathbf{I}}/\omega$ добија се

$$\underline{\mathbf{E}}_r = \frac{\underline{\mathbf{I}} d \cos\theta}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{j}{\beta r^3} \right) e^{-j\beta r}$$

$$\underline{\mathbf{E}}_\theta = \frac{\underline{\mathbf{I}} d \sin\theta}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} - \frac{j}{\beta r^3} \right) e^{-j\beta r}$$

$$\underline{\mathbf{H}}_\phi = \frac{\underline{\mathbf{I}} d \sin\theta}{4\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-j\beta r}$$

– Остале компоненте поља су $\underline{\mathbf{E}}_\phi = 0$ и $\underline{\mathbf{H}}_r = \underline{\mathbf{H}}_\theta = 0$

– Производ $\underline{\mathbf{I}} \underline{\mathbf{d}}$ назива се **струјни момент Херцовог дипола**

Херцов дипол

- У тачкама за које важи $r \ll \lambda$ (али истовремено $r \gg d$), односно $\beta r \ll 1$, у претходним изразима за електрично поље доминирају чланови облика $1/r^3$, а за магнетско поље $1/r^2$, док је $e^{-j\beta r} \approx 1$, па добијамо

$$\underline{E}_r = -j \frac{Id \cos \theta}{2\pi\beta r^3} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad \underline{E}_\theta = -j \frac{Id \sin \theta}{4\pi\beta r^3} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad \underline{H}_\phi = \frac{Id \sin \theta}{4\pi r^2}$$

– Поље у овим тачкама је **квазистационарно** и назива се **блиским пољем**

- Упоредивањем претходних израза за електрично поље са пољем електростатичког дипола (чији је моменат $\underline{\mathbf{p}} = Q\underline{\mathbf{d}} = -j\underline{\mathbf{d}}/\omega$) види се да су то идентичне једначине
- Претходна једначина за магнетско поље се добија директно из Био-Саваровог закона (за стационарне струје) ако се стави $d\underline{\mathbf{l}} = \underline{\mathbf{d}}$

Херцов дипол

- Са порастом растојања r , постепено долазе до изражаја чланови са мањим експонентом уз r

– Ако је $r \gg \lambda$, односно $\beta r \gg 1$, у једначинама

$$\underline{E}_r = \frac{\underline{I}d \cos \theta}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{j}{\beta r^3} \right) e^{-j\beta r}$$
$$\underline{E}_\theta = \frac{\underline{I}d \sin \theta}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} - \frac{j}{\beta r^3} \right) e^{-j\beta r}$$
$$\underline{H}_\phi = \frac{\underline{I}d \sin \theta}{4\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-j\beta r}$$

доминирају чланови $1/r$, па добијамо $\underline{E}_r = 0$

$$\underline{E}_\theta = j \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \underline{I} \beta d \sin \theta \frac{e^{-j\beta r}}{r} = -j\omega \underline{A}_\theta$$
$$\underline{H}_\phi = j \frac{1}{4\pi} \underline{I} \beta d \sin \theta \frac{e^{-j\beta r}}{r} = \frac{\underline{E}_\theta}{Z_0}$$

где је $\underline{A}_\theta = -\underline{A} \sin \theta$ пројекција магнетског вектор-потенцијала на орт \mathbf{i}_θ , а $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} \approx 377 \Omega \approx 120\pi \Omega$ је таласна импеданса вакуума

Херцов дипол

- Тачке за које је $r \gg \lambda$ чине далеку зону или зону зрачења антене
 - У тој области електрично и магнетско поље су међусобно управни и управни на потег r , а однос њихових интензитета једнак је таласној импеданси вакуума
 - Локално гледано, у малом простору у коме се r и θ могу сматрати константним, односно за $r \in (r_1, r_2)$ и $\theta \in (\theta_1, \theta_2)$, где је $|r_2 - r_1| \ll r_1$ и $|\theta_2 - \theta_1| \ll \theta_1$, ово поље има особине униформног равног таласа који се простире од антене
 - Глобално гледано, поље описано једначинама

$$\underline{E}_\theta = j \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \underline{I} \beta d \sin \theta \frac{e^{-j\beta r}}{r} = -j\omega \underline{A}_\theta \quad \underline{H}_\phi = j \frac{1}{4\pi} \underline{I} \beta d \sin \theta \frac{e^{-j\beta r}}{r} = \frac{\underline{E}_\theta}{Z_0}$$

представља сферни талас који ствара антена

Херцов дипол

- Електрично и магнетско поље у зони зрачења опадају релативно споро, као $1/r$
- Поинтингов вектор

$$\underline{\mathbf{P}} = P_r \mathbf{i}_r = Z_0 |\underline{\mathbf{H}}|^2 \mathbf{i}_r = \frac{|\underline{\mathbf{E}}|^2}{Z_0} \mathbf{i}_r$$

је радијалан, чисто реалан, а интензитет му опада са квадратом одстојања

– При томе је флукс Поинтинговог вектора кроз сферу (S) полупречника r ,

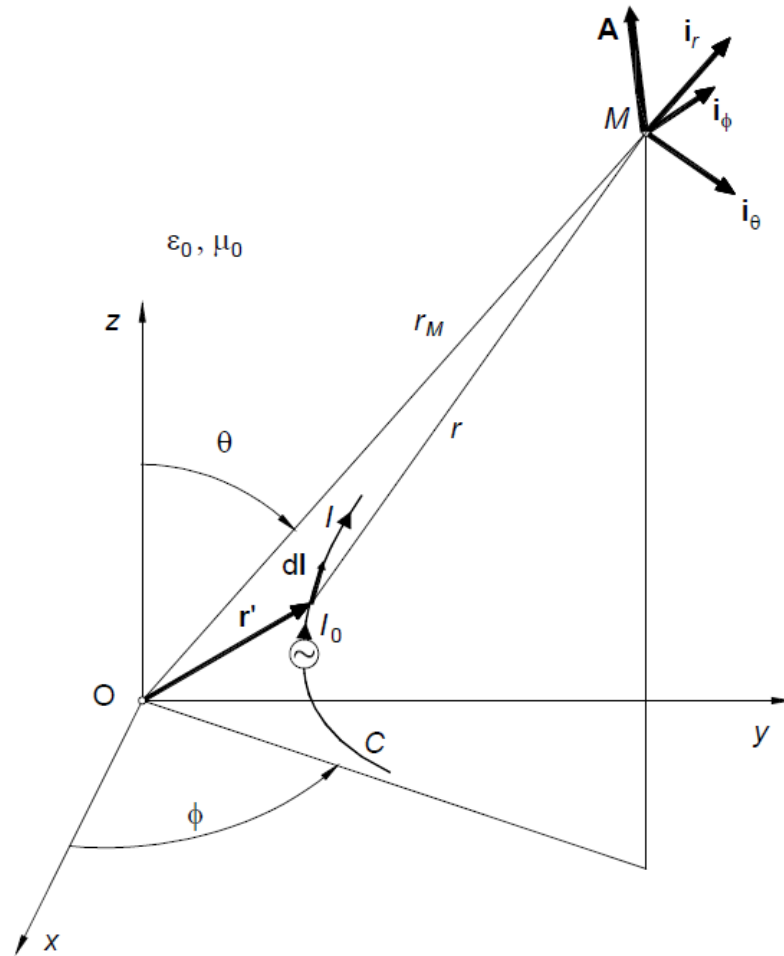
$$P_{\text{zr}} = \oint_S \underline{\mathbf{P}} \cdot d\mathbf{S}$$

константан (јер површина сфере расте сразмерно квадрату одстојања r) и представља средњу снагу зрачења антене (усредњену по времену)

Предајна антена

- Предајна антена служи да што ефикасније израчи енергију којом се напаја
 - Најтежи задатак у прорачуну поља које ствара предајна антена је одређивање расподеле струје антене
 - Расподела струје предајне антене у општем случају одређује се нумеричким методама
 - Само понекад је могуће направити адекватне апроксимације у затвореном облику
- У оквиру овог курса, претпоставићемо да је расподела струје антене позната

Предајна антена



Слика 12.4. Уз одређивање поља у зони зрачења жичане антене.

Предајна антена

- Посматрајмо жичану антену приказану на претходној слици
 - Расподела струје антене је $I(l)$,
где је l локална координата дуж жице
 - Координатни почетак (O) постављен је близу антене
 - Задатак је да се израчуна поље у далекој тачки M
чије су сферне координате $M(r_M, \theta, \phi)$
 - Сваки елемент жице, dl , може се схватити као један Херцов дипол
 - Низањем Херцових дипола може се апроксимирати посматрана антена
 - При томе се струје суседних дипола разликују у извесној мери,
јер се струја дуж жице мења
 - Поље жичане антене може се израчунати векторским сабирањем поља Херцових дипола
 - С обзиром на једначину $\underline{E}_\theta = -j\omega\underline{A}_\theta$, поље у зони зрачења одређено је компонентом магнетског вектор-потенцијала управном на потег r

Предајна антена

- Пошто је тачка M далеко, потези r и r_M су практично паралелни
 - Растојање r је скоро исто за све елементе dl
 - Увођење апроксимације $r \approx r_M$ практично не утиче на интензитет магнетског вектор-потенцијала струјног елемента $I dl$
 - Мале релативне разлике растојања r могу имати велики утицај на члан $e^{-j\beta r}$ у изразу
$$\underline{\mathbf{A}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \underline{I} dl \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$
 - Због тога је потребно водити рачуна о фазним разликама између доприноса струјних елемената (Херцових дипола)
 - Резултантни магнетски вектор-потенцијал рачуна се користећи се изразом

$$\underline{\mathbf{A}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-j\beta r_M}}{r_M} \int_C \underline{I} dl e^{j\beta \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r}$$

где је \mathbf{r}' вектор положаја елемента dl у односу на координатни почетак, а \mathbf{i}_r орт сферног координатног система, који је истовремено орт потега r и r_M

Предајна антена

- Електрично поље у зони зрачења произвољне антене нема компоненту \underline{E}_r , али има, у општем случају, обе трансверзалне компоненте, \underline{E}_θ и \underline{E}_ϕ
 - Исто важи и за магнетско поље
- Компоненте електричног поља се могу израчунати преко одговарајућих компоненти магнетског вектор-потенцијала, аналогно једначини $\underline{E}_\theta = -j\omega \underline{A}_\theta$, као

$$\underline{E}_\theta = -j\omega \underline{A}_\theta \quad \underline{E}_\phi = -j\omega \underline{A}_\phi$$

- Претходни резултат се може написати у векторском облику

$$\underline{E} = \underline{E}_\theta \mathbf{i}_\theta + \underline{E}_\phi \mathbf{i}_\phi = -j\omega (\underline{A}_\theta \mathbf{i}_\theta + \underline{A}_\phi \mathbf{i}_\phi) = -j\omega \underline{A}_\perp$$

где је $\underline{A}_\perp = -\mathbf{i}_r \times (\mathbf{i}_r \times \underline{A})$ трансверзална компонента магнетског вектор-потенцијала, тј. компонента управна на потег r_M

Предајна антена

- Магнетски вектор-потенцијал је сразмеран јачини струје на прикључцима антене, I_0
– Према једначини

$$\underline{\mathbf{A}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-j\beta r_M}}{r_M} \int_C \underline{I} d\mathbf{l} e^{j\beta \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r}$$

његов интензитет у зони зрачења опада као $1/r$

- По узору на једначину за Херцов дипол

$$\underline{\mathbf{A}} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} \underline{I} d \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

можемо писати

$$\underline{\mathbf{A}} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_0 \underline{\mathbf{l}}_{\text{eff}} \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

где је изостављен индекс M за потег r_M

Предајна антена

- Вектор

$$\underline{l}_{\text{eff}} = \frac{1}{I_0} \int_C \underline{I} dl e^{j\beta \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r}$$

назива се **ефективном дужином** (ефективном висином) антене

– Интеграл $\int_C \underline{I} dl e^{j\beta \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r}$ представља струјни момент антене

- За Херцов дипол (раније приказан) је $\underline{l}_{\text{eff}} = \mathbf{d}$, тј. ефективна дужина је једнака физичкој дужини антене
- За већину антена ефективна дужина није једнака физичкој дужини и зависи од сферних координата θ и ϕ (зависи од правца у коме се посматра зрачење)

Предајна антена

- Из једначина

$$\underline{\mathbf{E}} = \underline{E}_\theta \mathbf{i}_\theta + \underline{E}_\phi \mathbf{i}_\phi = -j\omega(\underline{A}_\theta \mathbf{i}_\theta + \underline{A}_\phi \mathbf{i}_\phi) = -j\omega \underline{\mathbf{A}}_\perp \quad \underline{\mathbf{A}} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_0 \mathbf{l}_{\text{eff}} \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

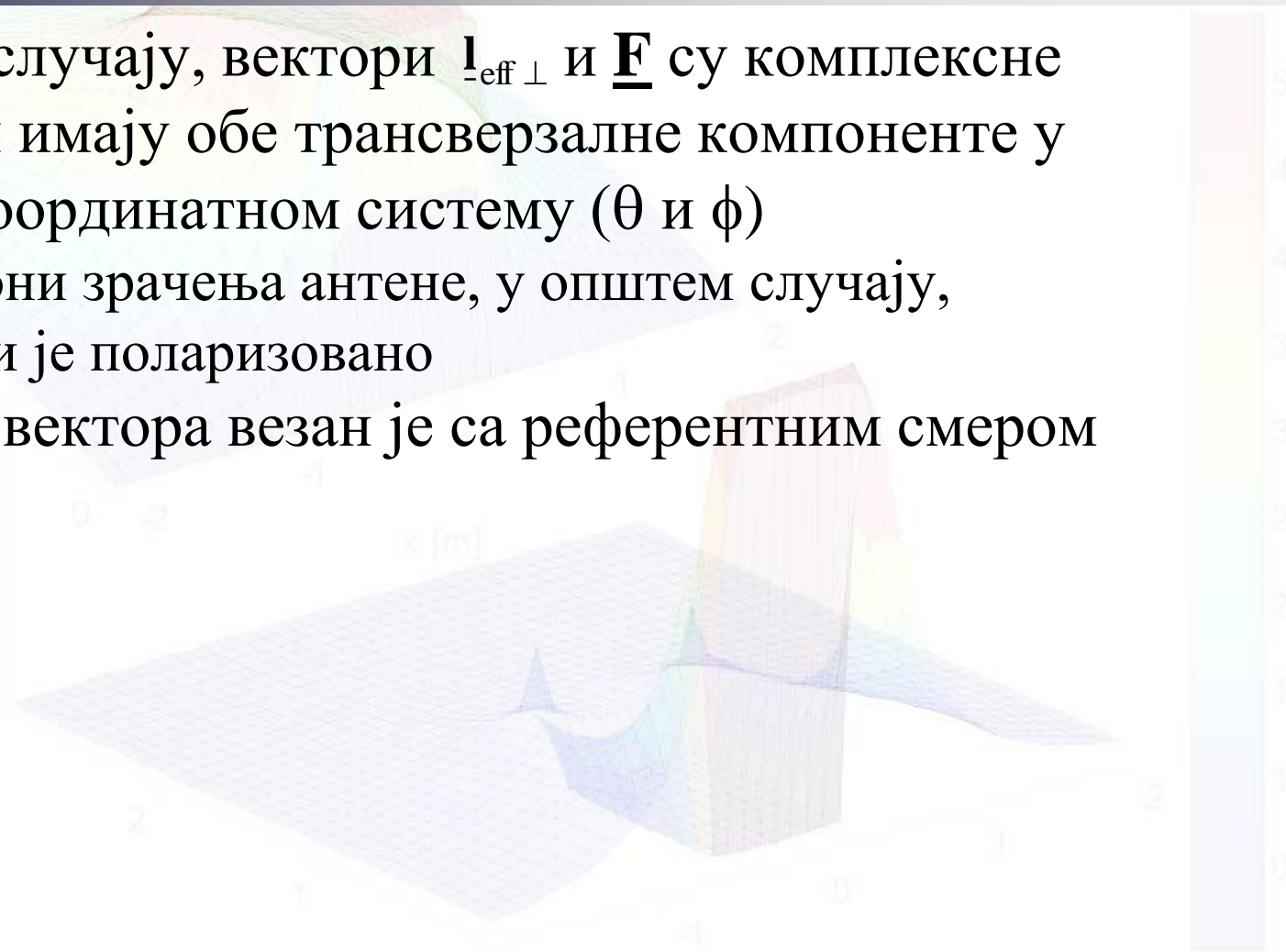
се добија

$$\underline{\mathbf{E}} = -j \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} I_0 \beta \mathbf{l}_{\text{eff} \perp} \frac{e^{-j\beta r}}{r} = j \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} I_0 \underline{\mathbf{F}} \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

где је $\mathbf{l}_{\text{eff} \perp} = -\mathbf{i}_r \times (\mathbf{i}_r \times \mathbf{l}_{\text{eff}})$ трансверзална компонента ефективне дужине антене, док је $\underline{\mathbf{F}} = -\beta \mathbf{l}_{\text{eff} \perp} / 2 = -\pi \mathbf{l}_{\text{eff} \perp} / \lambda$ вектор карактеристичне функције зрачења

Предајна антена

- У општем случају, вектори $\underline{I}_{\text{eff} \perp}$ и \underline{E} су комплексне величине и имају обе трансверзалне компоненте у сферном координатном систему (θ и ϕ)
 - Поље у зони зрачења антене, у општем случају, елиптички је поларизовано
- Смер ових вектора везан је са референтним смером струје \underline{I}_0



Предајна антена

- Вектори $\underline{\mathbf{E}}$ и $\underline{\mathbf{H}}$ су међусобно управни, нормални су на потег r (у зони зрачења)
 - Однос њихових интензитета је Z_0
 - Поинтингов вектор је усмерен од антене ка бесконачности
- Магнетско поље антене одређено је изразом

$$\underline{\mathbf{H}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \mathbf{i}_r \times \underline{\mathbf{E}}$$

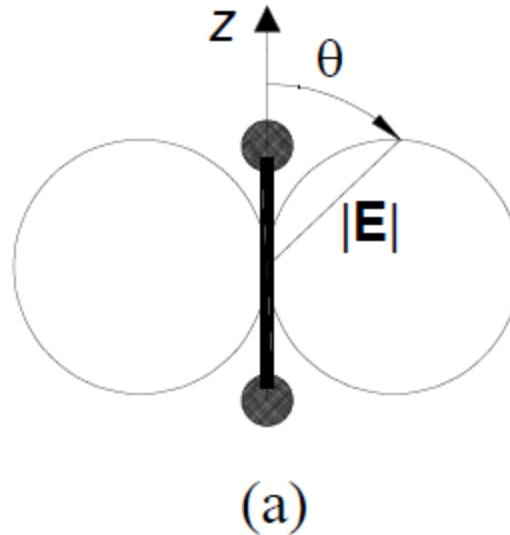
односно сферне компоненте тога поља су

$$\underline{H}_\theta = j\omega \underline{A}_\phi / Z_0, \underline{H}_\phi = -j\omega \underline{A}_\theta / Z_0$$

Дијаграм зрачења, усмереност и појачање

- Посматрано на сфери великог полупречника r , интензитет електричног поља у зони зрачења антене зависи само од сферних координата θ и ϕ
 - Поље Херцовог дипола постављеног дуж z -осе зависи само од угла θ
 - Та зависност представља просторни дијаграм зрачења антене (прецизније, дијаграм зрачења по пољу)
- Дијаграм зрачења се често црта само у појединим равнима (обично у екваторијалној и меридионалним)
 - На пример, дијаграм зрачења Херцовог дипола (постављеног дуж z -осе) у екваторијалној равни (хоризонтална раван, тј. раван управна на z -осу) је кружан
 - » Каже се да је у тој равни Херцов дипол омнидирекциона антена
 - У меридионалној равни (равни која садржи z -осу) дијаграм зрачења Херцовог дипола је двокружан, односно има облик положене осмице (као што је приказано на следећој слици)

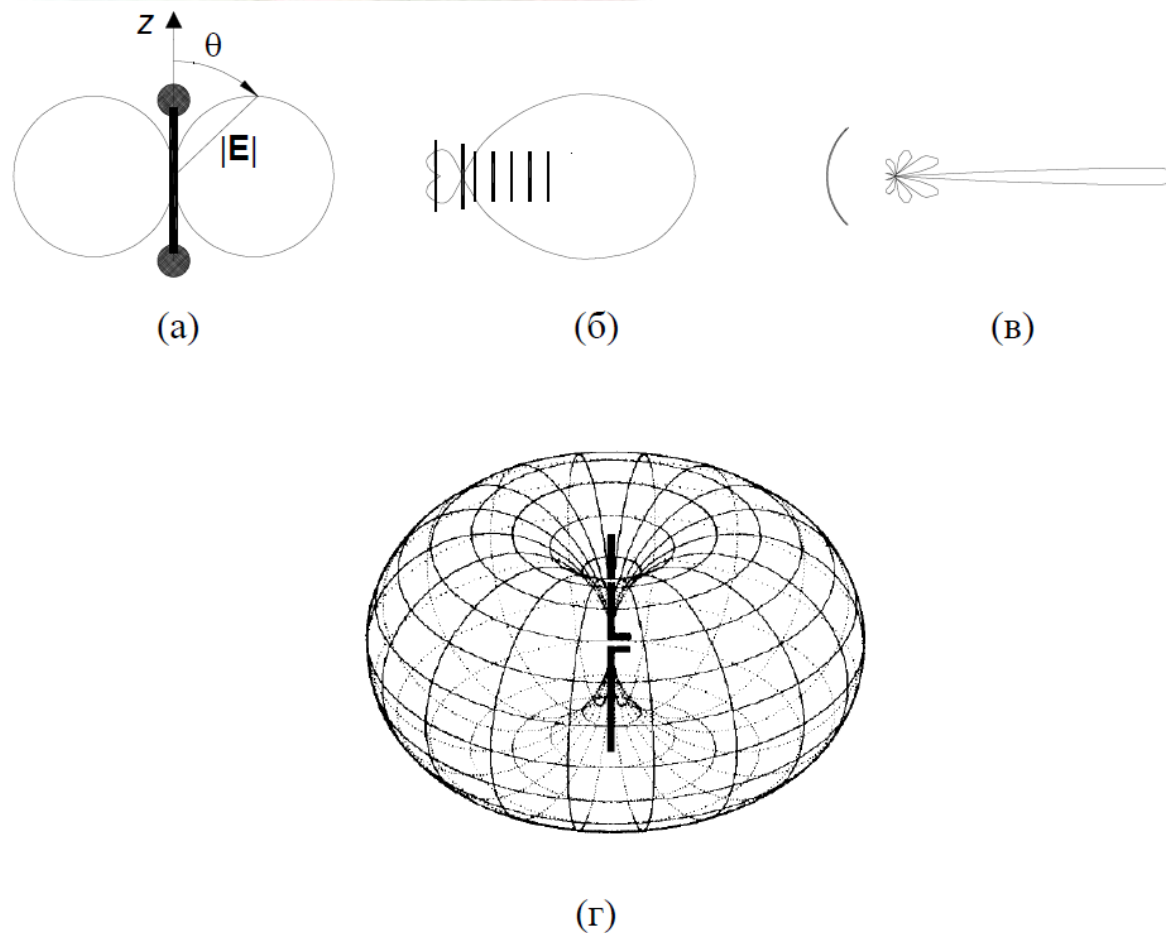
Дијаграм зрачења, усмереност и појачање



Слика 12.5. Дијаграм зрачења у равни (а) Херцовог дипола

- Неки од примера дијаграма зрачења антена приказани су на следећој слици

Дијаграм зрачења, усмереност и појачање



Слика 12.5. Дијаграм зрачења у равни (а) Херцовог дипола, (б) типичне јаги-антене и (в) микроталасне антене и (г) просторни дијаграм зрачења кратког жичаног дипола.

Дијаграм зрачења, усмереност и појачање

- Што је дијаграм зрачења ужи,
то је зрачење антене усмереније, и обрнуто
 - Код радиодифузних предајника
циљ је да се покрије што шири простор, па је
дијаграм зрачења обично неусмерен у хоризонталној равни
 - Да би се смањило непотребно зрачење увис, дијаграм зрачења је
усмерен у вертикалним равнима, тако да дијаграм зрачења има
максимум приближно у хоризонталним правцима
 - Код веза између две тачке
(на пример, код радиорелејних веза)
и код радара обично се користе антене
са врло узаним дијаграмом зрачења

Дијаграм зрачења, усмереност и појачање

- Величина која показује колико је зрачење антене усмерено, назива се **усмереношћу** (директивношћу) антене (directivity)
- Усмереност антене дефинише се релацијом

$$D = \frac{\max(|\underline{\mathbf{P}}|)}{\overline{|\underline{\mathbf{P}}|}}$$

где је $\max(|\underline{\mathbf{P}}|)$ највећи интензитет Поинтинговог вектора на сфери полупречника r , а $\overline{|\underline{\mathbf{P}}|}$ средња вредност интензитета Поинтинговог вектора на истој сфери која се рачуна као

$$\overline{|\underline{\mathbf{P}}|} = \frac{P_{\text{zr}}}{4\pi r^2}$$

где је P_{zr} средња снага зрачења антене (усредњавање је по времену, на нивоу једног периода)

Дијаграм зрачења, усмереност и појачање

- Замислимо антену која подједнако зрачи у свим правцима у простору
 - Таква антена (хипотетичка, не може се реализовати) назива се **изотропни радијатор**
 - За задату средњу снагу зрачења антене, P_{zt} , интензитет Поинтинговог вектора изотропног радијатора на сфери полупречника r је константан и једнак $|\mathbf{P}| = \frac{P_{\text{zt}}}{4\pi r^2}$
 - На основу овога, усмереност антене може се интерпретирати на следећи начин
 - Усмереност посматране антене показује колико је пута максимални интензитет Поинтинговог вектора те антене (на сфери полупречника r) већи од интензитета Поинтинговог вектора изотропног радијатора, ако је снага зрачења те две антене иста
 - Алтернативно, ако се зада интензитет Поинтинговог вектора, усмереност посматране антене показује колико је пута мања потребна снага зрачења те антене него да је антена изотропни радијатор

Дијаграм зрачења, усмереност и појачање

- Према закључцима са претходног слајда, усмереност изотропног радијатора је $D_i=1$
- Усмереност се обично даје у децибелима (у односу на изотропни радијатор) $g_d = 10 \log_{10} D/D_i = 10 \log_{10} D$ **dBi**
- Усмереност Херцовог дипола је 1,5 (1,75 dBi)
 - Тог реда величине је и усмереност других антена чија дужина не прелази око једне таласне дужине
- Усмереност типичне јаги-антене је око 10 dBi
- Усмереност микроталасних антена (на пример, рефлекторских антена) је обично између 20 dBi и 60 dBi

Дијаграм зрачења, усмереност и појачање

- У свакој реалној антени постоје одређени губици
 - У проводницима и диелектрицима од којих је антена начињена
 - Ако се антена напаја из генератора снагом P_0 , део те снаге се троши на покривање губитака (P_{gub}), док се остатак (P_{zr}) израчи
- Степен корисног дејства антене је количник снаге зрачења и снаге напајања

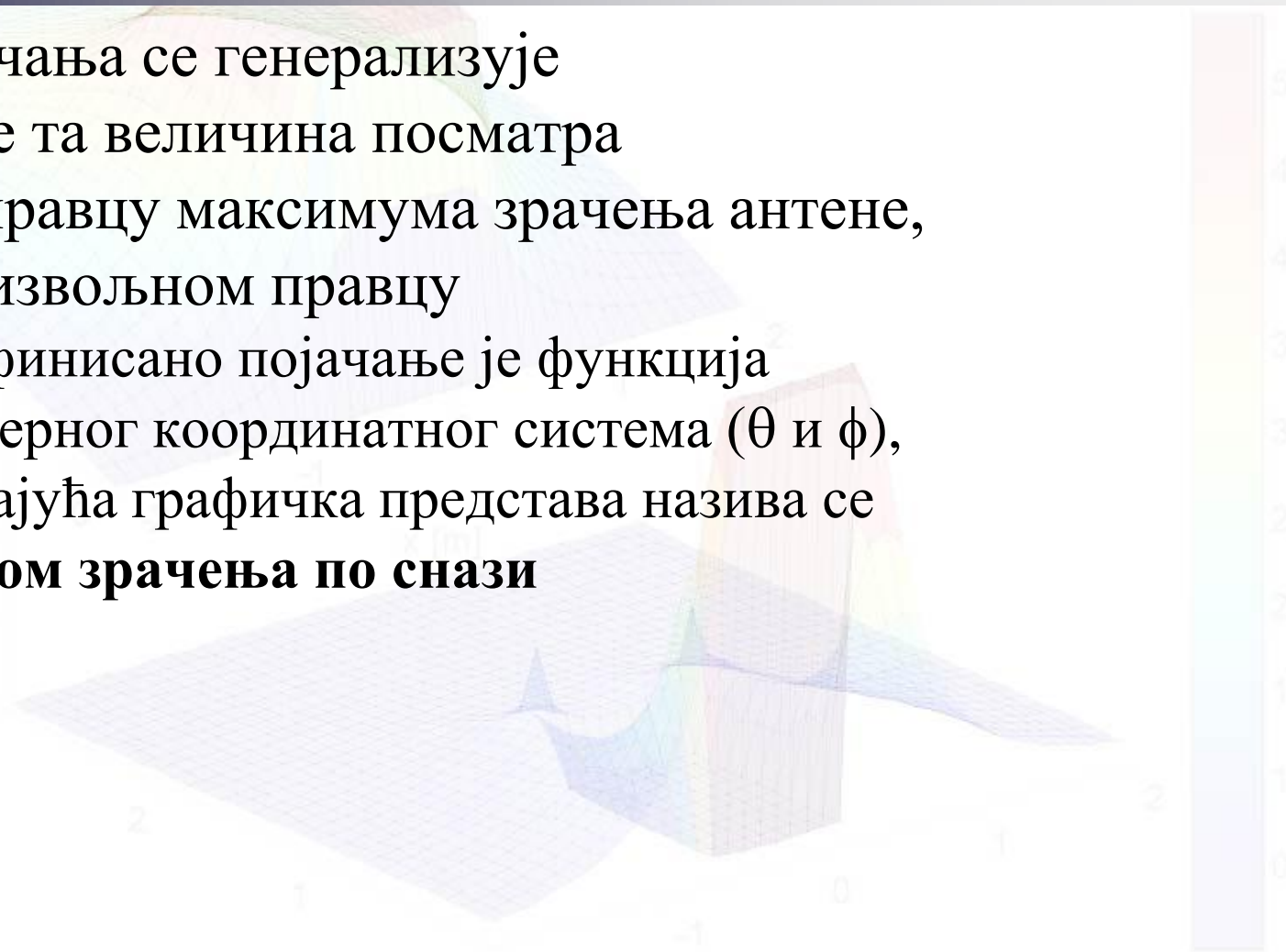
$$\eta = \frac{P_{\text{zr}}}{P_0}$$

Дијаграм зрачења, усмереност и појачање

- У пракси се тежи да степен корисног дејства буде што већи, односно што ближи 1
 - То се обично и постиже, осим код електрично малих антена
- Величина $G = \eta D$ назива се појачање антене (gain)
 - У децибелима, $g = 10 \log_{10} G$ **dB**
 - Да би се јасније и лакше разликовали G и g , тј. D и g_d
 G се назива и **нумеричким појачањем**,
а D **нумеричком усмереношћу**

Дијаграм зрачења, усмереност и појачање

- Појам појачања се генерализује тако што се та величина посматра не само у правцу максимума зрачења антене, него у произвољном правцу
 - Овако дефинисано појачање је функција углова сферног координатног система (θ и ϕ), а одговарајућа графичка представа назива се **дијаграмом зрачења по снази**



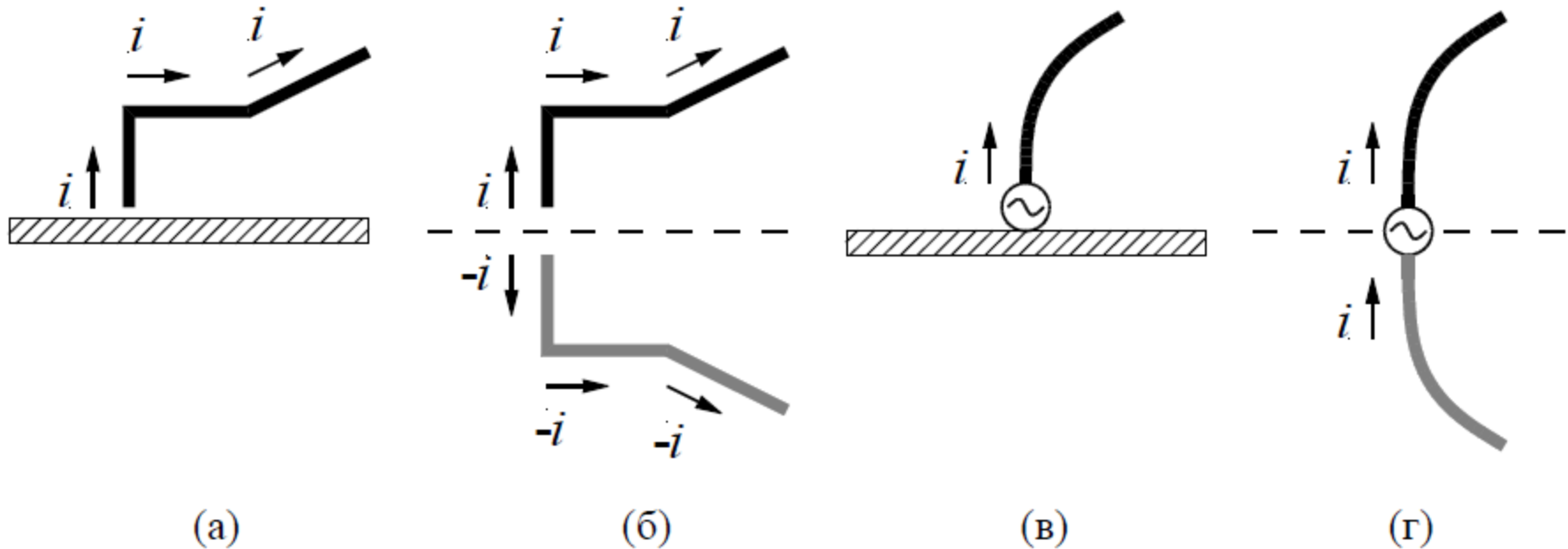
Дијаграм зрачења, усмереност и појачање

- Ако је $\underline{Z} = R + jX$ улазна импеданса антене, тада је снага напајања антене једнака $P_0 = R|\underline{I}_0|^2$
 - Како је $P_0 = P_{\text{gub}} + P_{\text{zr}}$, можемо писати $R = R_{\text{gub}} + R_{\text{zr}}$, где је $P_{\text{gub}} = R_{\text{gub}}|\underline{I}_0|^2$, R_{gub} отпорност губитака, $P_{\text{zr}} = R_{\text{zr}}|\underline{I}_0|^2$ и R_{zr} отпорност зрачења антене
- Ако се занемаре губици, тада је $R = R_{\text{zr}}$
- За Херцов дипол је

$$R_{\text{zr}} = \frac{1}{6\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} (\beta d)^2$$

Антене изнад проводне равни

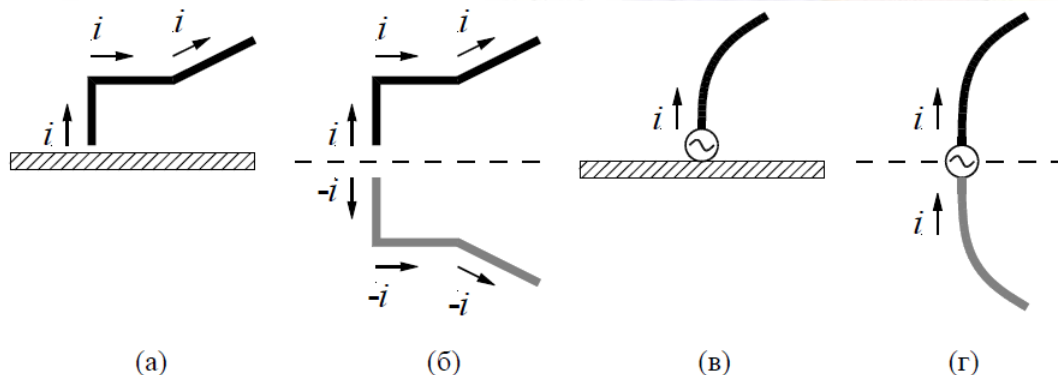
- Посматрајмо проводник са временски променљивом струјом постављен изнад савршено проводне равни



Слика 12.6. Уз теорему ликова у брзо променљивом пољу: (а) проводник изнад савршено проводне равни и (б) еквивалентан систем који се састоји од проводника и негативног lika; (в) монопол-антена и (г) њој еквивалентна дипол-антена. 48/145

Антене изнад проводне равни

- На основу граничних услова, на површи те равни тангенцијална компонента електричног поља мора бити једнака нули
- На површи равни индукују се струје и наелектрисања
 - Поље које они стварају може се заменити (изнад равни) пољем које ствара негативан лик проводника
 - » Лик је геометријски симетричан оригиналу
 - » У односу на геометријски симетричне референтне смерове, струје оригинала и лика су супротне



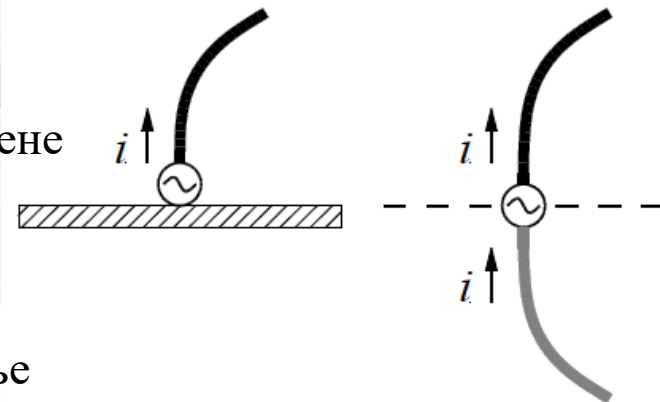
Слика 12.6. Уз теорему ликова у брзо променљивом пољу: (а) проводник изнад савршено проводне равни и (б) еквивалентан систем који се састоји од проводника и негативног лика; (в) монопол-антена и (г) њој еквивалентна дипол-антена.

Антене изнад проводне равни

- Доказ ове теореме ликова следи из симетрије, јер је у еквивалентном систему аутоматски задовољен услов да у симетралној равни нема тангенцијалних компоненти електричног поља
 - Користећи се теоремом ликова, утицај проводне равни на било какву антену постављену изнад проводне равни може се заменити ликом те антене

Антене изнад проводне равни

- Посебна класа антене су монопол-антене
 - То су антене постављене изнад проводне равни, код којих је генератор прикључен између проводне равни и базе антене
 - На основу теореме ликова, монопол-антена је еквивалентна симетричној дипол-антени
 - Расподела струје у монополу иста је као у горњем краку дипола
 - » Напон генератора код дипола је, међутим, два пута већи (због пресликавања), па је импеданса дипола два пута већа од импедансе монопола
 - » Дипол зрачи у цео простор, док монопол зрачи само у горњи полупростор
 - » При истим струјама напајања, поља обе антене у горњем полупростору су једнака
 - » Стога је снага зрачења монопола, за исте струје напајања, два пута мања од снаге зрачења дипола, па су усмереност и појачање монопола два пута већи (за око 3dB већи) него код дипола

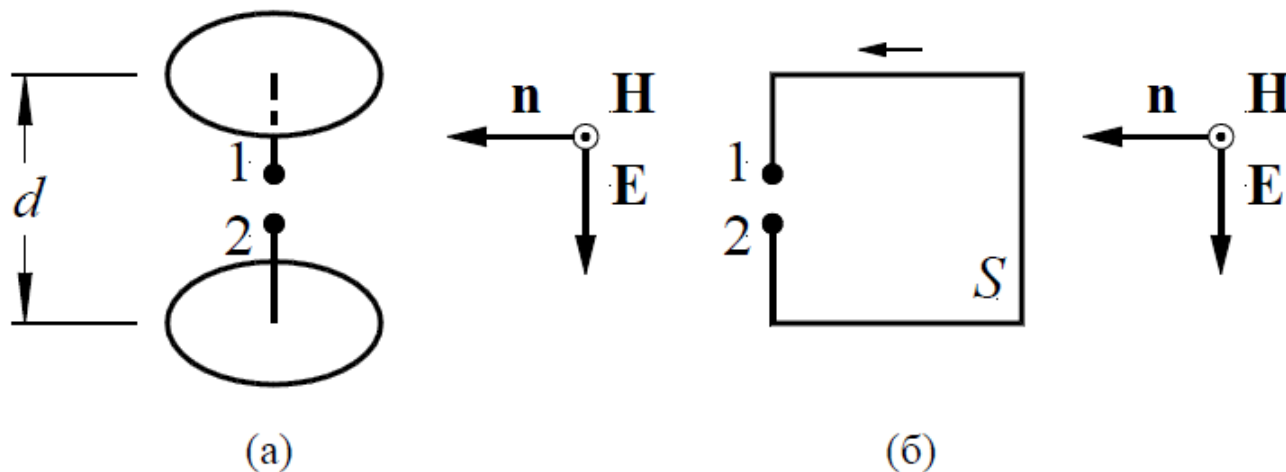


Пријемне антене

- Свака антена се може користити и као предајна, и као пријемна
 - Када се користи као предајна, антена се прикључује на генератор
 - Антена побуђује талас који се простире од антене, односно антена спреже генератор са слободним простором
 - Енергија генератора израчи се у виду ЕМ таласа
 - Задатак пријемне антене је обрнут
 - Да део енергије који собом носи ЕМ талас “извуче” из поља и преда је пријемнику

Пријемне антене

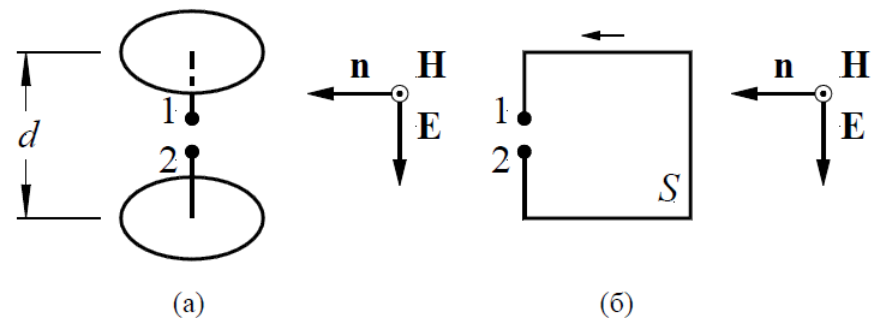
- На слици су приказане две пријемне антене чије су димензије мале у односу на таласну дужину
 - Херцов дипол (са капацитивним оптерећењима у облику кружних плоча)
 - Оквирна антена (рам антена)
- Овакве антене се понекад користе као сонде за мерење електричног, односно магнетског поља



Слика 12.7. (а) Херцов дипол и (б) оквирна антена као пријемне антене.

Пријемне антене

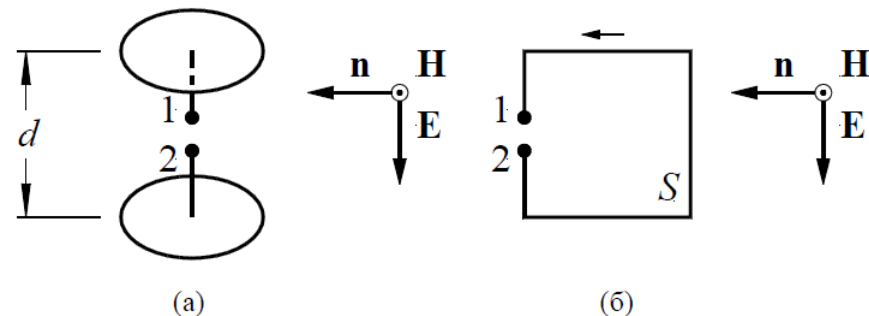
- Једноставности ради, посматраћемо случај када је електрично поље инцидентног таласа паралелно оси Херцовог дипола, а магнетско поље управно на раван оквирне антене – Вектори \underline{E} и \underline{H} су међусобно управни и управни су на орт \mathbf{n}



Слика 12.7. (а) Херцов дипол и (б) оквирна антена као пријемне антене.

Пријемне антене

- Поље у непосредној околини ових антена се може сматрати **квазистатичким**
 - Капацитивна оптерећења Херцовог дипола чине плочасти кондензатор
 - Свака електрода се налази у једној еквипотенцијалној површи
 - Ако су прикључци дипола отворени, напон између горње и доње електроде дипола једнак је стога $\underline{U}_{120} = \underline{E}d$
 - Толики исти напон празног хода је између прикључака дипола, па кажемо да се у диполу индукује електромоторна сила $\underline{e} = \underline{U}_{120}$



Слика 12.7. (а) Херцов дипол и (б) оквирна антена као пријемне антене.

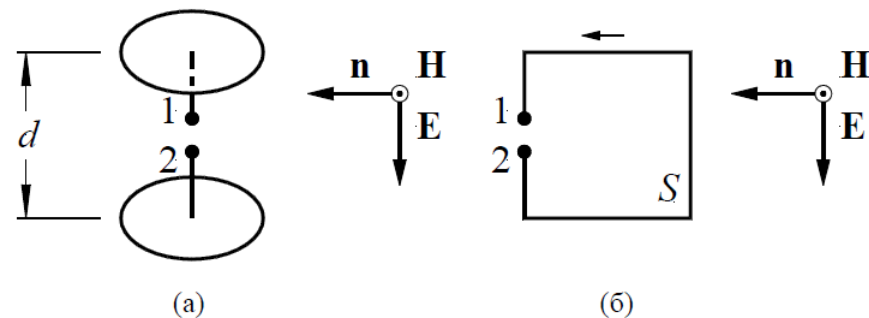
Пријемне антене

– У петљи се, такође, индукује електромоторна сила која се може израчунати користећи се

Фарадејевим законом ЕМ индукције

- Према референтним смеровима са слике,

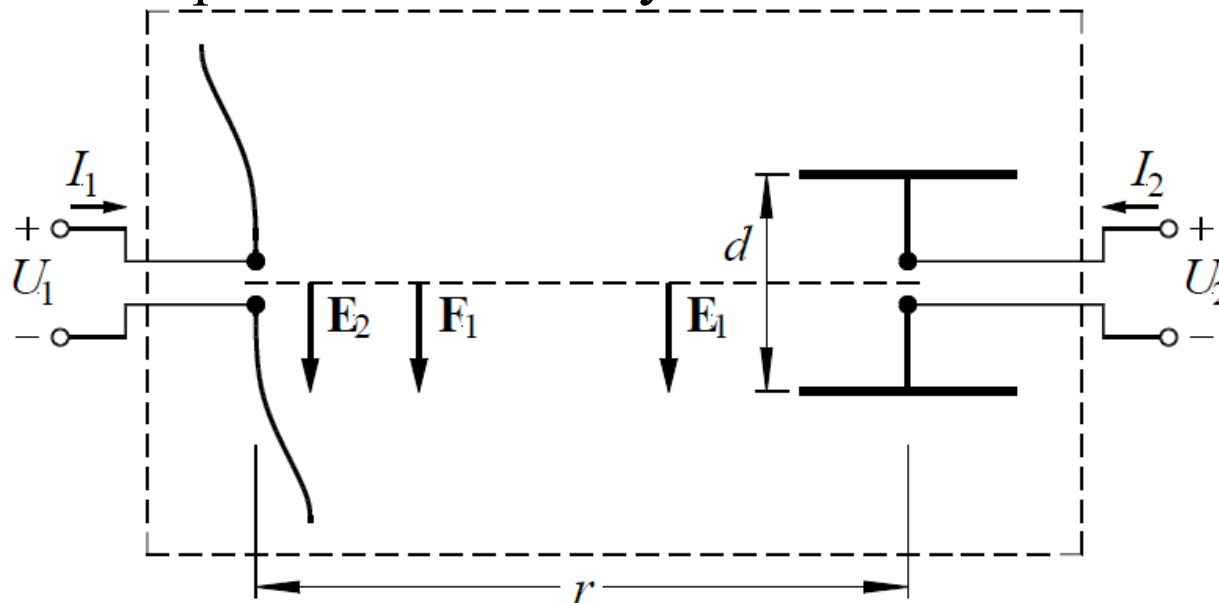
$$\underline{e}_{\text{ind}} = -j\omega\mu_0 \underline{H} S \text{ и } \underline{U}_{120} = \underline{e}_{\text{ind}}$$



Слика 12.7. (а) Херцов дипол и (б) оквирна антена као пријемне антене.

Пријемне антене

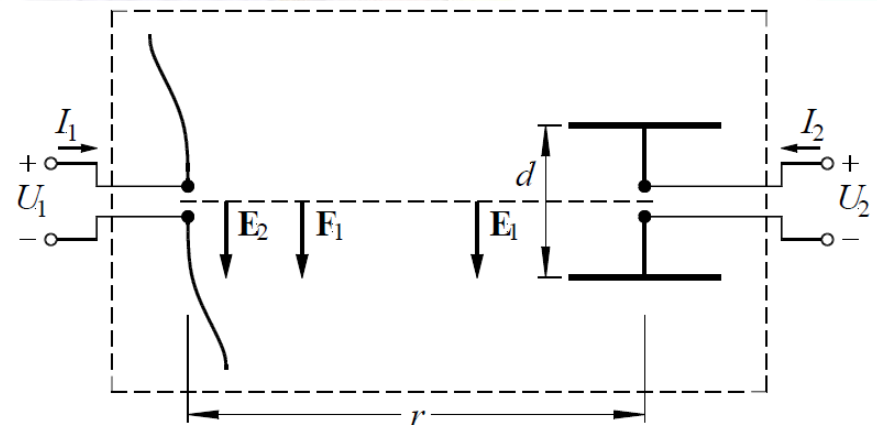
- Користећи се теоремом реципроцитета, показаћемо да се свака пријемна антена може еквивалентирати Тевененовим генератором и одредићемо његове параметре
– На слици је приказан систем који се састоји од посматране антене и Херцовог дипола дужине d



Слика 12.8. Уз извођење израза за електромоторну силу индуковану у пријемној антени.

Пријемне антене

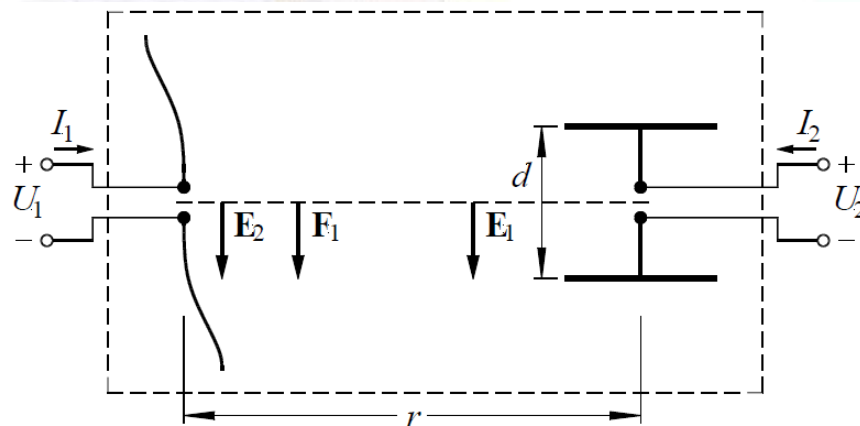
- Претпоставимо да су те две антене на веома великом међусобном растојању r , што има две последице
 - Када је једна антена предајна, друга антена се налази у зони зрачења прве антене
 - Присуство једне антене практично не утиче на улазну импедансу друге антене



Пријемне антене

- Претпоставимо да у антенама и на преносном путу нема материјала нити уређаја који доводе до нереципрочних ефеката (нити долази до Фарадејеве ротације у јоносфери)
 - Нема предмагнетисаних ферита,
 - нити су у антене уграђени активни елементи (појачавачи)
 - Ово је у пракси најчешћи случај
 - Тада се систем са слике може посматрати као пасивна реципрочна мрежа са два приступа (четворопол)
 - У својимо усаглашене референтне смерове напона и струје на приступима овог четворопола
 - » Напони и струје мреже су повезани матрицом импеданских параметара

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{11} & \underline{z}_{12} \\ \underline{z}_{21} & \underline{z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

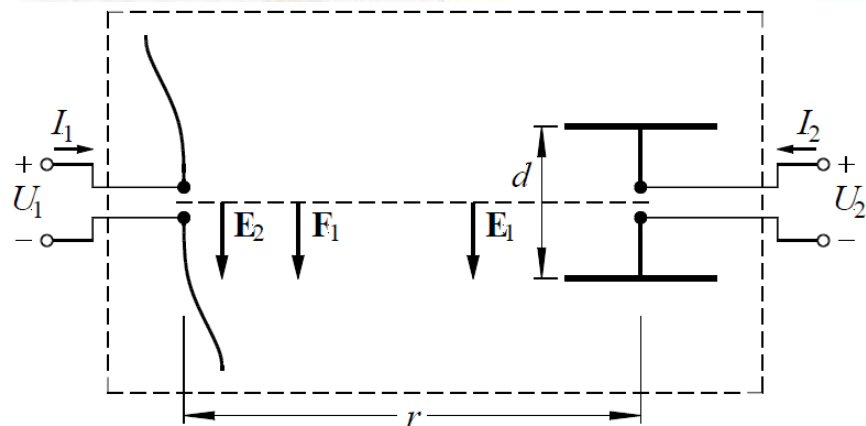


Слика 12.8. Уз извођење израза за електромоторну силу индуковану у пријемној антени.

Пријемне антене

- Претпоставимо најпре да посматрана антена ради као предајна, да се напаја идеалним струјним генератором струје $\underline{I}_g = \underline{I}_1^{(1)}$, а да су прикључци Херцовог дипола отворени
 - Параметар $\underline{z}_{11} = \underline{Z}$ очигледно представља улазну импедансу посматране антене
 - Та антена зрачи ЕМ талас, а њено поље на месту Херцовог дипола дато је једначином

$$\begin{aligned}\underline{\mathbf{E}}_1^{(1)} &= -j \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \underline{I}_g \beta \underline{\mathbf{l}}_{\text{eff} \perp} \frac{e^{-j\beta r}}{r} \\ &= j \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \underline{I}_g \underline{\mathbf{F}}_1 \frac{e^{-j\beta r}}{r}\end{aligned}$$



Пријемне антене

- Према ознакама са слике

$$\underline{\mathbf{E}}_1^{(1)} = j \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} I_g \underline{\mathbf{F}}_1 \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

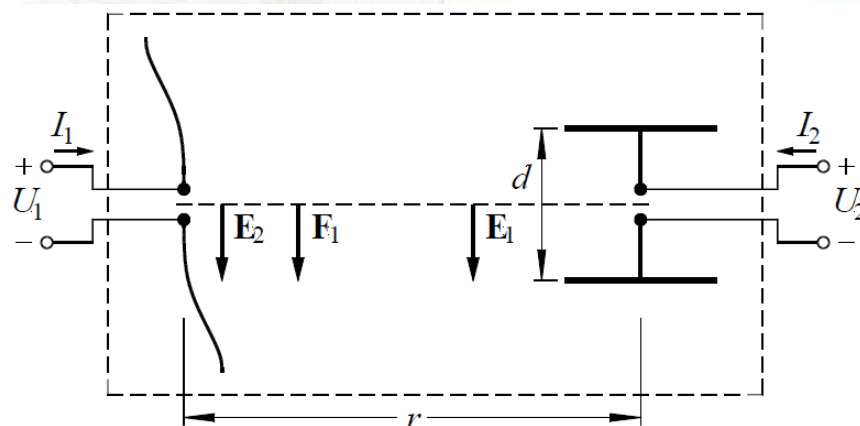
где је $\underline{\mathbf{F}}_1$ вектор карактеристичне функције зрачења посматране антене за правац према Херцовом диполу

- Једноставности ради, претпоставимо да је вектор $\underline{\mathbf{F}}_1$ линијски поларизован, а да је оса Херцовог дипола постављена паралелно том вектору, као на слици

- Напон између отворених прикључака пријемног Херцовог дипола је

$$\underline{U}_2^{(1)} = \underline{\mathbf{E}}_1^{(1)} d = j \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} I_g \underline{\mathbf{F}}_1 d \frac{e^{-j\beta r}}{r} = \underline{z}_{21} I_g$$

где је \underline{z}_{21} преносна импеданса четворопола



Пријемне антене

- Претпоставимо сада да Херцов дипол ради као предајна антена, а да је посматрана антена пријемна и да су јој прикључци отворени

– Нека се Херцов дипол напаја идеалним струјним генератором струје $\underline{I}_g = \underline{I}_2^{(2)}$

$$\underline{E}_\theta = j \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \underline{I} \beta d \sin \theta \frac{e^{-j\beta r}}{r} = -j\omega \underline{A}_\theta$$

- Према једначини

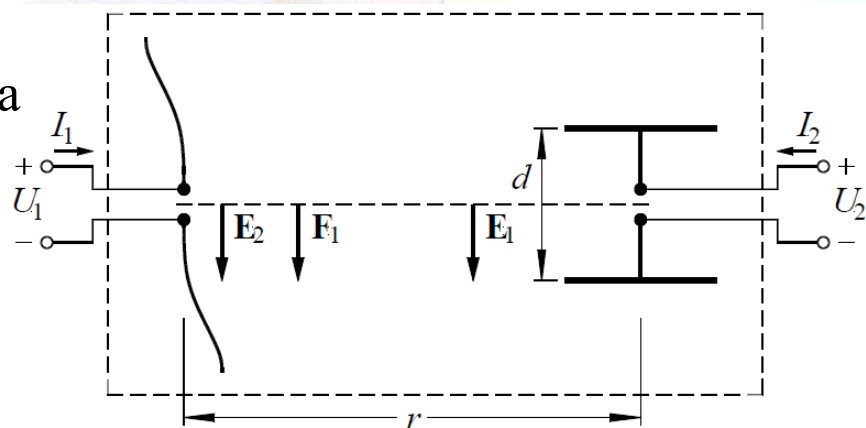
поље које Херцов дипол ствара на месту посматране антене је

$$\underline{E}_2^{(2)} = j \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \underline{I}_g \beta d \frac{e^{-j\beta r}}{r} \mathbf{i}$$

где је \mathbf{i} истовремено орт вектора \underline{F}_1 , $\underline{E}_1^{(1)}$ и $\underline{E}_2^{(2)}$

- Напон празног хода посматране антене је

$$\underline{U}_1^{(2)} = \underline{z}_{12} \underline{I}_g$$



Пријемне антене

- Због реципроцитета су преносни импедансни параметри једнаки, односно $\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21}$, па је $\underline{U}_2^{(1)} = \underline{U}_1^{(2)}$
- На основу једначина

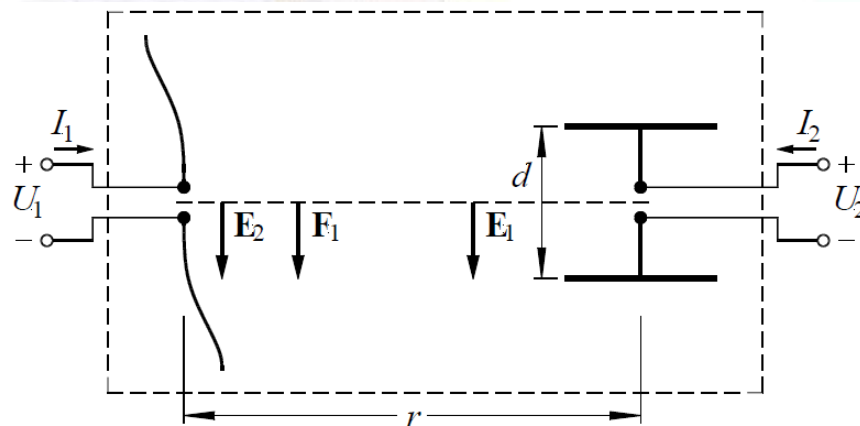
$$\underline{U}_2^{(1)} = \underline{E}_1^{(1)} d = j \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \underline{I}_g \underline{F}_1 d \frac{e^{-j\beta r}}{r} = \underline{z}_{21} \underline{I}_g \quad \underline{E}_2^{(2)} = j \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \underline{I}_g \beta d \frac{e^{-j\beta r}}{r} \mathbf{i}$$

добиамо $\underline{U}_1^{(2)} = \frac{2}{\beta} \underline{E}_2^{(2)} \underline{F}_1 = \frac{\lambda}{\pi} \underline{E}_2^{(2)} \underline{F}_1$

– Разматрањем општег случаја, када Херцов дипол није паралелан вектору \underline{F}_1 и када је тај вектор елиптички поларизован, долази се до закључка да у претходном

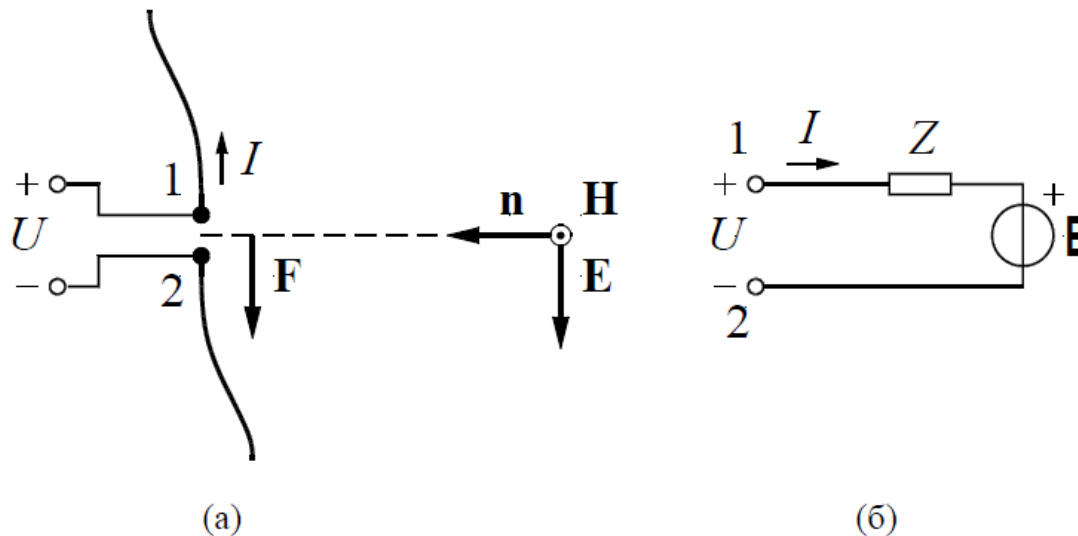
изразу уместо производа $\underline{E}_2^{(2)} \underline{F}_1$, треба да фигурише скаларни производ

$$\underline{E}_2^{(2)} \cdot \underline{F}_1$$



Пријемне антене

- На основу ове анализе, користећи се Тевененовом теоремом, посматрана пријемна антена се може заменити еквивалентним генератором, као на слици – На слици су изостављени индекси, због једноставности



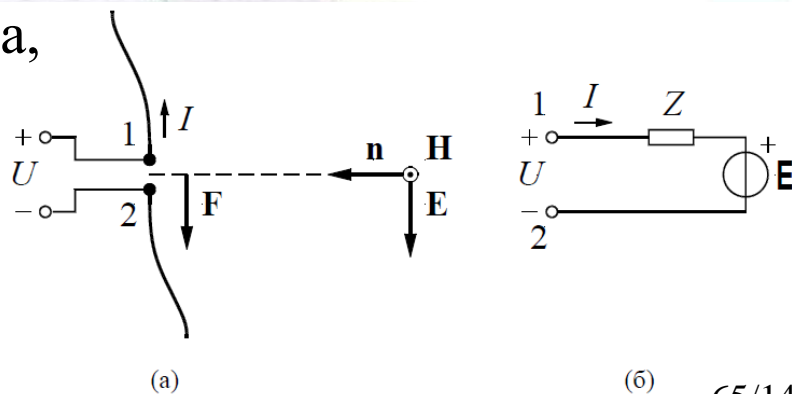
Слика 12.9. (а) Пријемна антена и (б) њој еквивалентан Тевененов генератор.

Пријемне антене

- Импеданса Тевененовог генератора је иста као улазна импеданса антене када она ради као предајна (\underline{Z})
 - Електромоторна сила Тевененовог генератора (напон празног хода антене, односно електромоторна сила индукована у антени) је дата изразом

$$\underline{e} = \underline{U}_{120} = \frac{\lambda}{\pi} \underline{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{F}} = -\underline{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{l}}_{\text{eff}}$$

где је $\underline{\mathbf{E}}$ вектор јачине електричног поља униформног равног прогресивног таласа који наилази на антену (рачунат у почетку координатног система везаног за пријемну антену), $\underline{\mathbf{F}}$ је карактеристична функција зрачења, а $\underline{\mathbf{l}}_{\text{eff}}$ ефективна дужина антене



Пријемне антене

– Вектори $\underline{\mathbf{E}}$ и $\underline{\mathbf{l}}_{\text{eff}}$ су исти као када би посматрана пријемна антена радила као предајна $\underline{\mathbf{l}}_{\text{eff}} = \frac{1}{I_0} \int_C \underline{\mathbf{l}} d\mathbf{l} e^{j\beta \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r}$

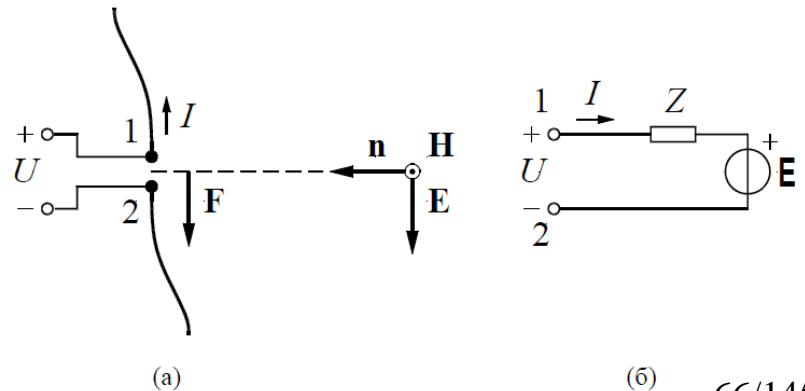
- Ти вектори се рачунају према изразима

за правац из кога наилази инцидентни талас

$$\underline{\mathbf{F}} = -\beta \underline{\mathbf{l}}_{\text{eff} \perp} / 2 = -\pi \underline{\mathbf{l}}_{\text{eff} \perp} / \lambda$$

- У вези са формулом $e = U_{120} = \frac{\lambda}{\pi} \underline{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{F}} = -\underline{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{l}}_{\text{eff}}$

и приказаном сликом, треба уочити да су референтни смер струје антене и референтни смер електромоторне силе Тевененовог генератора супротни



Слика 12.9. (а) Пријемна антена и (б) њој еквивалентан Тевененов генератор.

Пријемне антене

- На основу једначине $\underline{e} = \underline{U}_{120} = \frac{\lambda}{\pi} \underline{E} \cdot \underline{F} = -\underline{E} \cdot \underline{I}_{\text{eff}}$ јасно је да антена не прима енергију подједнако из свих праваца, али је дијаграм “пријема” антене исти као њен дијаграм зрачења (мада је расподела струје код предајне и пријемне антене различита)
 - Карактеристична функција зрачења антене зависи од правца из кога наилази ЕМ талас
 - Да би се максимизирала ефективна вредност индуковане електромоторне силе, пријемну антену треба тако поставити да максимум њеног дијаграма зрачења буде уперен у правцу из кога талас наилази
 - Осим тога, поларизације вектора \underline{E} и \underline{F} морају бити усклађене
 - » На пример, ако је поларизација оба вектора линијска, онда ти вектори морају бити колинеарни
 - » Конкретно, ако се Херцов дипол користи као пријемна антена за линијски поларизован ЕМ талас, оса дипола треба да буде постављена паралелно вектору електричног поља инцидентног таласа

Ефективна површина

- Ако се пријемна антена постави тако да је **ефективна вредност индуковане електромоторне силе максимална**, и ако је при томе **пријемник прилагођен по снази на ту антену**, средња снага пријемника (P_p) је максимална

– Тада се количник

$$S_{\text{eff}} = \frac{P_p}{|\underline{\mathbf{P}}|}$$

назива **ефективном површином антене**

- $|\underline{\mathbf{P}}| = |\underline{\mathbf{E}}|^2 / Z_0$ је интензитет Поинтинговог вектора таласа који наилази на пријемну антену
- Веза између ефективне површине и појачања антене је

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

Ефективна површина

- Код добро пројектованих антена које имају дефинисану зрачећу површ (планарни низови, левак-антене, параболичне антене) ефективна површина је блиска геометријској површини зрачења

–Из једначине

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

се види да је за добијање велике усмерености потребно да димензије антене буду много веће од таласне дужине

Фриисова формула

- Посматрајмо предајну и пријемну антену
 - Налазе се у слободном простору на растојању r
 - Антене су окренуте тако да је **максимум дијаграма зрачења сваке антене усмерен један ка другој**
 - **Поларизације антена су усклађене**
- На основу једначина

$$D = \frac{\max(\underline{\mathbf{P}})}{\underline{\mathbf{P}}} \quad \underline{\mathbf{P}} = \frac{P_{\text{zr}}}{4\pi r^2} \quad g_d = 10 \log_{10} D \text{ dBi} \quad \eta = \frac{P_{\text{zr}}}{P_0} \quad G = \eta D$$

интензитет Поинтинговог вектора који предајна антена ствара на месту пријемне антене је $|\underline{\mathbf{P}}| = \frac{P_0 G_1}{4\pi r^2}$

где је G_1 појачање предајне антене, а P_0 снага предата предајној антени

Фриисова формула

- На основу једначина $S_{\text{eff}} = \frac{P_p}{|\underline{\mathbf{P}}|} \quad |\underline{\mathbf{P}}| = \frac{P_0 G_1}{4\pi r^2}$

може се израчунати снага **прилагођеног пријемника** (прикљученог на пријемну антену), P_p

– Количник те снаге и снаге којом се напаја предајна антена је

$$\frac{P_p}{P_0} = \frac{G_1 S_{\text{eff}2}}{4\pi r^2}$$

где је $S_{\text{eff}2}$ ефективна површина пријемне антене

– На основу једначине

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

ефективна површина пријемне антене се може изразити преко њеног појачања

Фриисова формула

- Када се однос P_p/P_0 изрази у децибелима, добија се Фриисова формула

$$10 \log_{10} \frac{P_p}{P_0} = -22 \text{ dB} - 20 \log_{10} \frac{r}{\lambda} \text{ dB} + g_1 [\text{dBi}] + g_2 [\text{dBi}]$$

где су

g_1 и g_2 појачања предајне и пријемне антене у dBi

– Фриисова формула се користи код прорачуна веза у радиокомуникацијама

– Ако се предајна и пријемна антена посматрају као мреже са два приступа, онда је

$$10 \log_{10} \frac{P_p}{P_0} = 20 \log_{10} |s_{21}|$$

под условом да је $s_{11} = s_{22} = 0$

– Одавде је

$$P_p = |s_{21}|^2 P_0$$

Фриисова формула

- Фриисова формула се обично записује и у следећем облику

$$\frac{P_p}{P_0} = \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} G_1 G_2 = |\underline{s}_{21}|^2$$

–И овде се подразумева $\underline{s}_{11} = \underline{s}_{22} = 0$

- Ако није испуњено $\underline{s}_{11} = \underline{s}_{22} = 0$, Фриисова формула постаје

$$\frac{P_p}{P_{ASP}} = \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} G_1 (1 - |\underline{s}_{11}|^2) G_2 (1 - |\underline{s}_{22}|^2) = |\underline{s}_{21}|^2$$

где је P_{ASP} расположива снага генератора (available source power) којим се напаја предајна антена,

$G_1(1 - |\underline{s}_{11}|^2)$ је погонско појачање предајне антене,

а $G_2(1 - |\underline{s}_{22}|^2)$ је погонско појачање пријемне антене

- Погонско појачање = *Realized gain*

Радарски домет

- Антена радара израчи импулс енергије (који ствара генератор) у релативно мали просторни угао
 - Нека је снага тога импулса једнака P_0 , а појачање антене G
 - Електромагнетски талас стиже до удаљеног циља, који је на растојању r
 - Интензитет Поинтинговог вектора ЕМ таласа који наилази на циљ рачуна се из једначине

$$|\underline{\mathbf{P}}| = \frac{P_0 G_1}{4\pi r^2}$$

односно једнак је

$$|\underline{\mathbf{P}}_{\text{inc}}| = \frac{P_0 G}{4\pi r^2}$$

Радарски домет

- Радарски циљ је објекат који је (по правилу) начињен од проводника и диелектрика
 - У њему се, под дејством инцидентног таласа, индукују наелектрисања и струје (везана наелектрисања и поларизационе струје у диелектрику), који постају секундарни извори ЕМ таласа
 - Интензитет Поинтинговог вектора расејаног таласа сразмеран је интензитету Поинтинговог вектора инцидентног таласа

Радарски домет

- Расејани талас је сферни талас, исте врсте као што зрачи било која предајна антена
 - Расејање није подједнако у свим правцима
 - У пракси је најбитније расејање у правцу према радарској антени јер се, најчешће, иста антена користи и као предајна, и као пријемна
 - Интензитет Поинтинговог вектора расејаног таласа опада са квадратом растојања
 - Стога се тај интензитет може написати у облику

$$|\underline{\mathbf{P}}_{\text{ras}}| = \frac{|\underline{\mathbf{P}}_{\text{inc}}| S_{\text{rad}}}{4\pi r^2}$$

где је S_{rad} коефицијент пропорционалности који се назива **радарском површином** (моностатичким попречним пресеком) циља

- Ова површина зависи од облика и оријентације циља, материјала од кога је циљ начињен, као и од учестаности

Радарски домет

- Иста радарска антена која је емитовала инцидентни талас, сада се понаша као пријемна и део енергије расејаног ЕМ таласа приводи радарском пријемнику

– Снага прилагођеног пријемника се може израчунати из

једначина $S_{\text{eff}} = \frac{P_p}{|\underline{\mathbf{P}}|}$ $S_{\text{eff}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$ $|\underline{\mathbf{P}}_{\text{inc}}| = \frac{P_0 G}{4\pi r^2}$ $|\underline{\mathbf{P}}_{\text{ras}}| = \frac{|\underline{\mathbf{P}}_{\text{inc}}| S_{\text{rad}}}{4\pi r^2}$

– Однос те снаге и снаге емитованог импулса је

$$\frac{P_p}{P_0} = \frac{\lambda^2 G^2 S_{\text{rad}}}{64\pi^3 r^4}$$

- Пријемник одређује одстојање циља на основу времена кашњења од тренутка емитовања импулса до тренутка пријема расејаног таласа
 - Правац у коме се налази циљ је у просторном углу главног листа дијаграма зрачења антене

Радарски домет

- Минимална потребна снага пријемника ($P_{p,\min}$) одређена је нивоом шума
– Знајући ту снагу, из једначине

$$\frac{P_p}{P_0} = \frac{\lambda^2 G^2 S_{\text{rad}}}{64\pi^3 r^4}$$

се може израчунати максимално растојање циља при коме се циљ још увек може открити

- То максимално растојање назива се **радарским дометом**

$$r_{\max} = \sqrt[4]{\frac{\lambda^2 G^2 S_{\text{rad}} P_0}{64\pi^3 P_{p,\min}}}$$

Примери антена

- Антене се праве за разне опсеге учестаности
 - Од испод ELF (*extremely low frequency*)
(неколико херца код детекције Шуманових резонанција Земље)
 - До инфрацрвеног подручја (300 GHz)
- Због тога су разноврсних облика и конструишу се на разне начине
 - Могу бити издвојене од основног електронског уређаја
 - Тада су за уређај везане водом или таласоводом
 - Пример је антена за пријем TV сигнала монтирана на кров (лог-периодична или јаги антена за VHF и UHF опсеге, или рефлекторска антена за сателитски програм)
 - Антене могу бити и у саставу електронског уређаја
 - Тада антене могу бити монтиране на кућиште уређаја (на пример, штап антена преносног FM радиодифузног пријемника) или лоциране у кућишту уређаја (на пример, феритна антена преносног AM радиодифузног пријемника)
 - Антене се могу направити на штампаној плочи уређаја (као код неких мобилних телефона) или произвести у техници интегрисаних кола

Примери антена

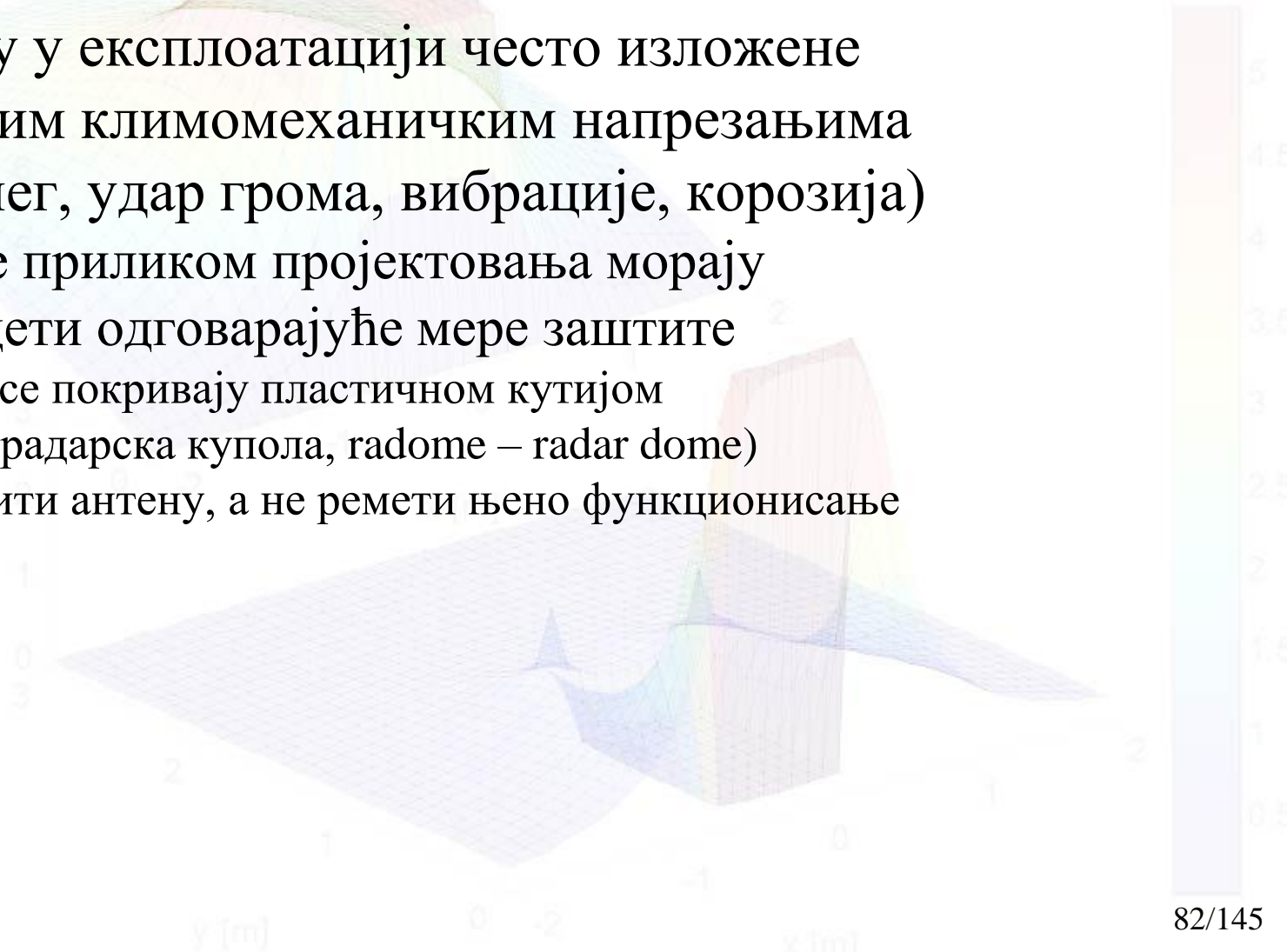
- Антене могу бити различитих облика и конструкција
 - Жичане антене су начињене од издужених проводника чије су попречне димензије много мање од таласне дужине
 - Дипол, монопол, стуб, ромб, јаги, лог-периодична, рам, хеликоидална и друге антене
 - Прорезне антене су разни зрачећи отвори на таласоводима и резонаторима
 - Левак антене су проширење отвореног краја таласовода
 - Рефлекторске антене се састоје од примарног извора и параболичког (или неког другог) металног рефлектора, при чему рефлектор фокусира зрачење слично као у оптици
- Неке антене имају диелектрично сочиво за фокусирање ЕМ зрачења

Примери антена

- Антене се могу поделити на разне начине (мада границе нису јасно постављене)
 - Према дијаграму зрачења, деле се на неусмерене (омнидирекционе, зраче на све стране) и усмерене
 - По ширини радног опсега, деле се на ускопојасне (радни опсег до 10 % централне учестаности) и широкопојасне
 - Према поларизацији поља у зони зрачења, разликују се антене са линијском и кружном поларизацијом
 - Антене се могу поделити и према радном опсегу учестаности (краткоталасне, микроталасне, ...), применама (радио, телевизијске, радиорелејне, радарске ...) итд

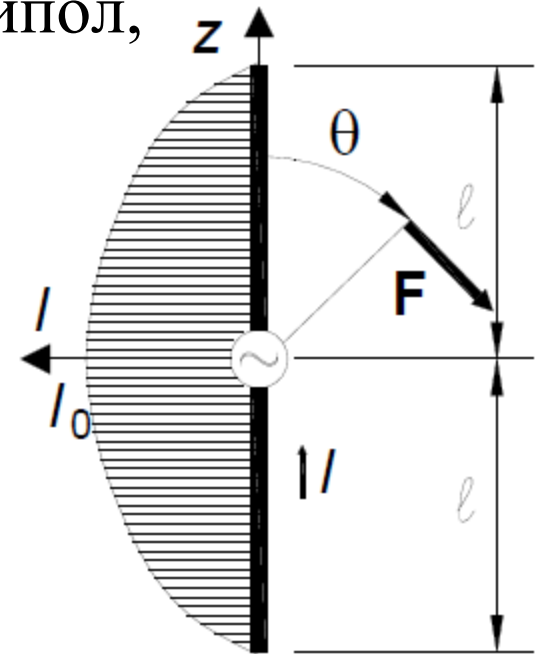
Примери антена

- Антене су у експлоатацији често изложене екстремним климомеханичким напрезањима (ветар, снег, удар грома, вибрације, корозија)
 - Стога се приликом пројектовања морају предвидети одговарајуће мере заштите
 - Антене се покривају пластичном кутијом (радом, радарска купола, radome – radar dome) која штити антену, а не ремети њено функционисање



Симетрични дипол

- Најједноставнија жичана антена је симетрични дипол
 - Краци леже на истој правој
 - Дужина једног крака дипола је l , а прикључци су у центру
- На слици је приказан полуталасни дипол, код кога је дужина крака једнака $l = \lambda/4$, када је дужина целе антене једнака половини таласне дужине
 - Полуталасни дипол је најчешће коришћен од свих симетричних дипола



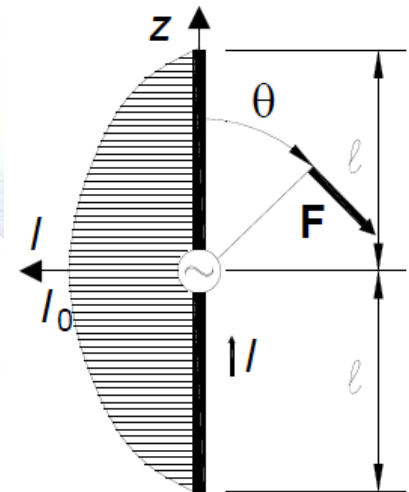
Слика 12.10. Полуталасни дипол са синусном расподелом струје.

Симетрични дипол

- Јачина струје на крајевима дипола мора бити једнака нули јер, за разлику од Херцовог дипола, на крајевима не постоје метална тела на којима би се акумулирала наелектрисања
- Дуж проводника дипола, у првој апроксимацији, расподела струје има исти облик стојећег таласа као код отвореног вода дужине l , тј

$$\underline{I}(z) = \underline{I}_0 \frac{\sin(\beta(l - |z|))}{\sin \beta l}$$

где је \underline{I}_0 јачина струје на прикључцима антене



Симетрични дипол

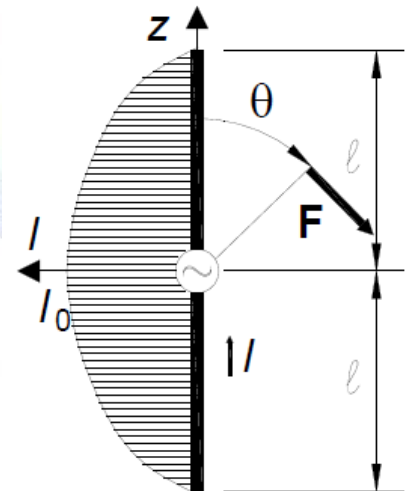
- Апроксимација
$$\underline{I}(z) = \underline{I}_0 \frac{\sin(\beta(l - |z|))}{\sin \beta l}$$

не важи за $\beta l = n\pi$, $n = 1, 2, \dots$

- На слици је приказана расподела струје полуталасног дипола

– Теоријски се може показати

да је синусна расподела струје,
дата претходном апроксимацијом,
асимптотска расподела
када дебелина жице тежи нули



Симетрични дипол

- На основу синусне апроксимације расподеле струје, користећи се једначинама

$$\underline{\mathbf{A}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-j\beta r_M}}{r_M} \int_C \underline{I} dl e^{j\beta \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r}$$

$$\underline{\mathbf{E}} = \underline{E}_\theta \mathbf{i}_\theta + \underline{E}_\phi \mathbf{i}_\phi = -j\omega(\underline{A}_\theta \mathbf{i}_\theta + \underline{A}_\phi \mathbf{i}_\phi) = -j\omega \underline{\mathbf{A}}_\perp$$

$$\underline{\mathbf{E}} = -j \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} I_0 \beta l_{\text{eff} \perp} \frac{e^{-j\beta r}}{r} = j \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} I_0 \underline{\mathbf{F}} \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

добија се да је карактеристична функција зрачења симетричног дипола једнака

$$\underline{\mathbf{F}} = \frac{\cos(\beta l \cos \theta) - \cos \beta l}{\sin \beta l \sin \theta} \mathbf{i}_\theta$$

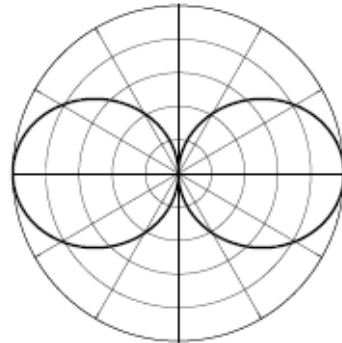
- Посебно, за полуталасни дипол је $\beta l = \pi/2$, па је

$$\underline{\mathbf{F}} = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \mathbf{i}_\theta$$

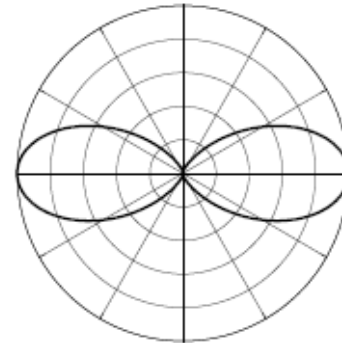
Симетрични дипол

- Дијаграм зрачења полуталасног дипола је сличан дијаграму зрачења кратког дипола (и Херцовог дипола), само је мало спљоштен у вертикалној равни
 - Максимум дијаграма зрачења је у екваторијалној равни, а усмереност је **1,64 (2,15 dBi)**
 - На следећој слици приказани су дијаграми зрачења за неколико типичних дужина крака дипола
 - При дужинама крака већим од приближно $0,7 \lambda$, лист дијаграма зрачења у хоризонталној равни престаје да буде доминантан, због чега појачање у екваторијалној равни опада
 - Са порастом учестаности мења се број листова, као и правци листова
 - Због свега овога, дугачки диполи се ретко користе у пракси

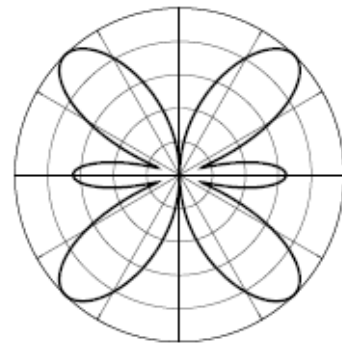
Симетрични дипол



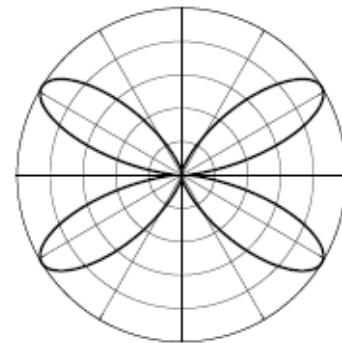
(а) $l = 0,25\lambda$ (полуталасни дипол)



(б) $l = 0,5\lambda$ (целоталасни дипол)



(в) $l = 0,75\lambda$



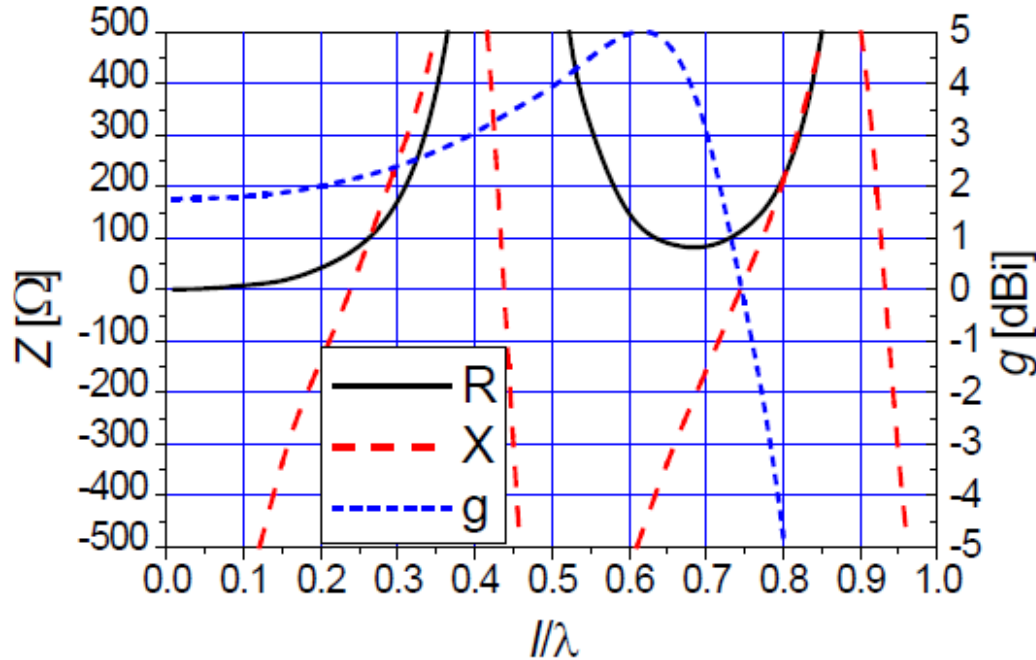
(г) $l = \lambda$

Слика 12.11. Карактеристике симетричних дипола: (а)–(г) нормализовани дијаграм зрачења по пољу и (д) улазна импеданса ($Z = R + jX$) и појачање у екваторијалној равни (г), у функцији дужине крака. Полупречник проводника је $a = 0,001\lambda$.

Симетрични дипол

- Синусна апроксимација струје даје улазну импедансу полуталасног дипола $\underline{Z} = (73,08 + j42,52) \Omega$
 - У реалности, особине дипола зависе од дебљине проводника од кога је дипол начињен
 - На следећој слици приказана је улазна импеданса симетричног дипола начињеног од жице кружног попречног пресека полупречника $a = 0,001 \lambda$, у функцији дужине крака
 - На тој слици приказано је и појачање антене у екваторијалној равни

Симетрични дипол



(д)

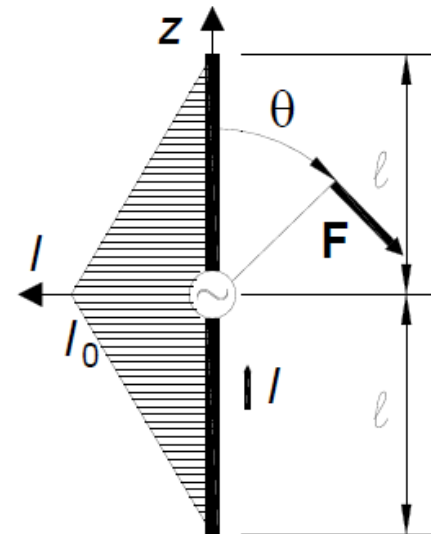
Слика 12.11. Карактеристике симетричних дипола: (а)–(г) нормализовани дијаграм зрачења по пољу и (д) улазна импеданса ($Z = R + jX$) и појачање у екваторијалној равни (g), у функцији дужине крака. Полупречник проводника је $a = 0,001\lambda$.

Симетрични дипол

- Ако је дужина крака дипола много мања од таласне дужине, тј. $\beta l \ll 1$, из једначине

$$\underline{I}(z) = \underline{I}_0 \frac{\sin(\beta(l - |z|))}{\sin \beta l}$$

се добија $\underline{I}(z) \approx \underline{I}_0(1 - |z|/l)$, односно расподела струје дуж дипола је приближно линеарна



Слика 12.12. Кратак симетричан дипол.

Симетрични дипол

– Из једначина

$$\underline{I}(z) \approx \underline{I}_0 (1 - |z|/l) \quad \underline{l}_{\text{eff}} = \frac{1}{\underline{I}_0} \int_C \underline{I} \, d\mathbf{l} e^{j\beta \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r}$$

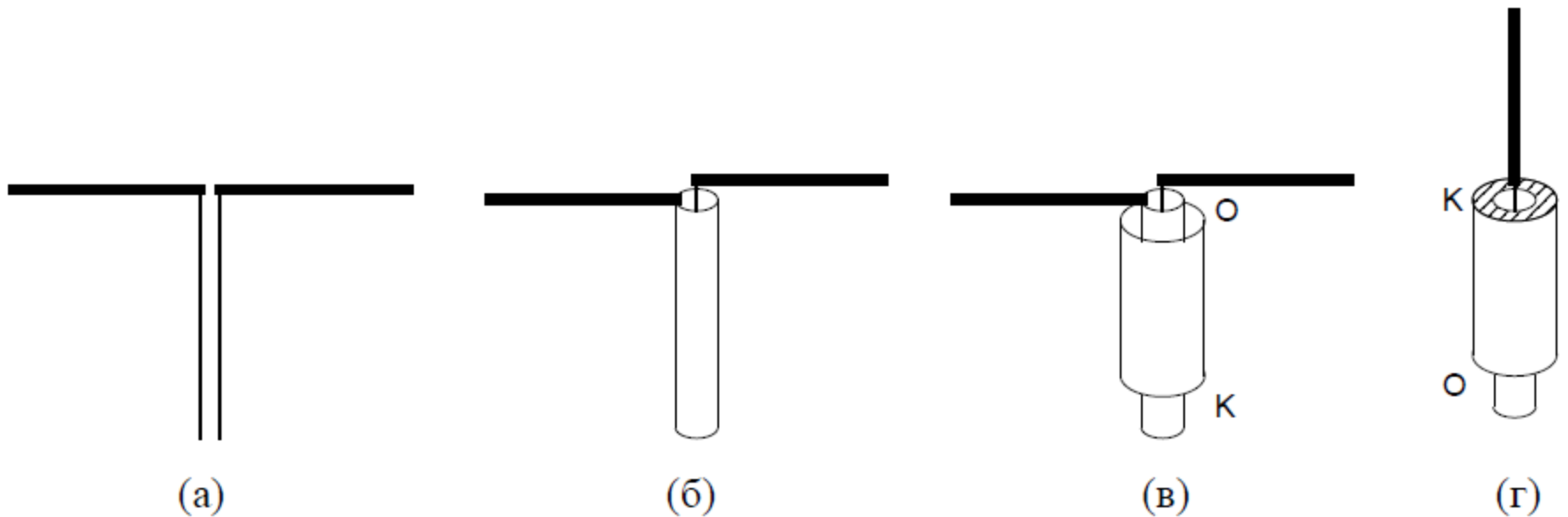
је ефективна дужина кратког дипола $\underline{l}_{\text{eff}} \approx l \mathbf{i}_z$

- То је исти резултат као за Херцов дипол
чија је укупна дужина једнака дужини крака дипола ($d = l$)
- Зато су **отпорности зрачења таква два дипола једнаке**
 - Напоменимо да је отпорност зрачења кратког дипола сразмерна квадрату дужине крака
 - Како је отпорност губитака приближно линеарно сразмерна дужини крака, следи да са смањењем дужине крака ефикасност антене брзо опада
 - » То објашњава зашто су електрички кратке антене неефикасне

Симетрични дипол

- Симетричан дипол је природно погодан за напајање симетричним двожичним водом (као на следећој слици)
 - Уколико се антена напаја коаксијалним каблом, потребно је предузети мере како кабл не би постао део антенског система
 - Једна мера је постављање неког симетризатора (балуна) описаног у трећем поглављу
 - На следећој слици приказани су и други начини напајања коаксијалним каблом

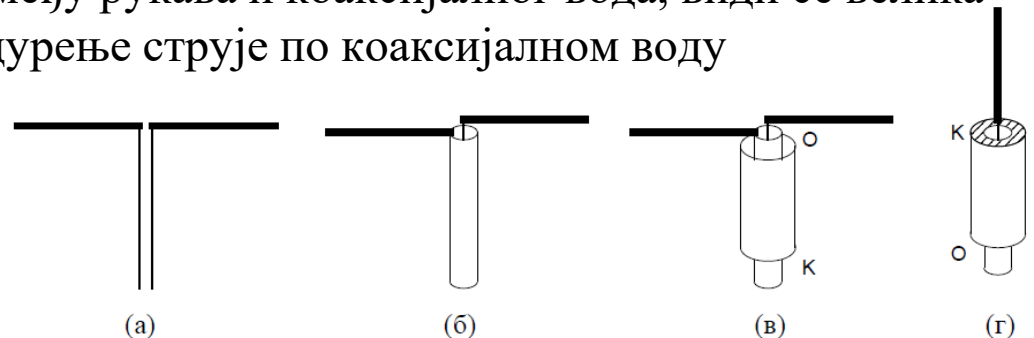
Симетрични дипол



Слика 12.13. Напајање дипола двожицим водом и коаксијалним каблом: (а) напајање симетричним двожицим водом, (б) неправилно и (в) и (г) правилно напајање коаксијалним водом. О је отворени крај рукава (вода), а К краткоспојени крај.

Симетрични дипол

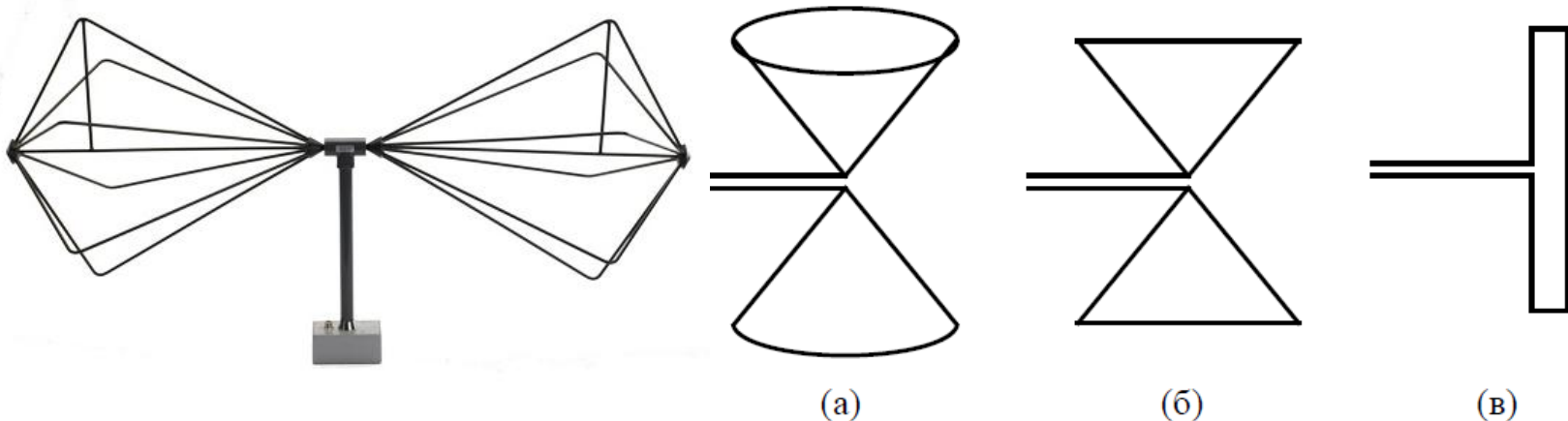
- За потискивање антенског режима по спољашњој страни коаксијалног кабла користи се кратко спојен четвртталасни коаксијални вод (рукав), чија је улазна импеданса на отвореном крају теоријски бесконачно велика
 - У систему приказаном на слици под (в) (базука), рукав својом великом импедансом спречава цурење струје надоле
 - У систему приказаном на слици под (г), рукав представља други крак дипола
 - На доњем крају рукава, између рукава и коаксијалног вода, види се велика импеданса, што спречава цурење струје по коаксијалном воду



Слика 12.13. Напајање дипола двожицим водом и коаксијалним каблом: (а) напајање симетричним двожицим водом, (б) неправилно и (в) и (г) правилно напајање коаксијалним водом. О је отворени крај рукава (вода), а К краткоспојени крај

Симетрични дипол

- Повећавањем дебљине кракова, посебно при врховима, добија се антена широкопојасних особина
 - На слици је приказана биконична антена која може покривати 1–2 октаве и често се користи у мерењима
 - Варијанта те антене има краке у облику троуглова



Слика 12.14. Широкопојасни диполи: (а) биконични дипол, (б) троугласти дипол и (в) пресавијени дипол.

Симетрични дипол

- На слици је приказан пресавијени дипол
 - Његова дужина (висина правоугаоника коју чини) је половина таласне дужине
 - У односу на обични дипол, пресавијени дипол је нешто широкопојаснији, а улазна импеданса му је око 4 пута већа
 - Пресавијени дипол се обично користи као активни (напајани) елемент јаги-антене



Симетрични дипол

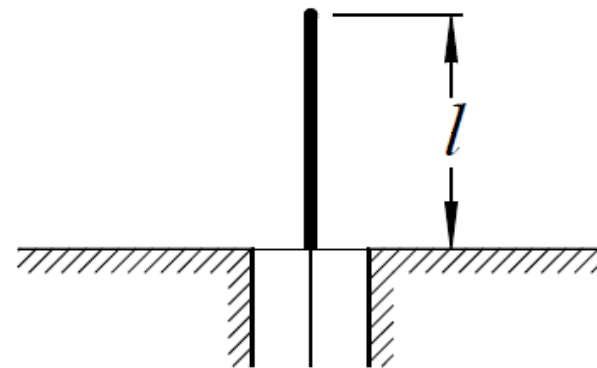
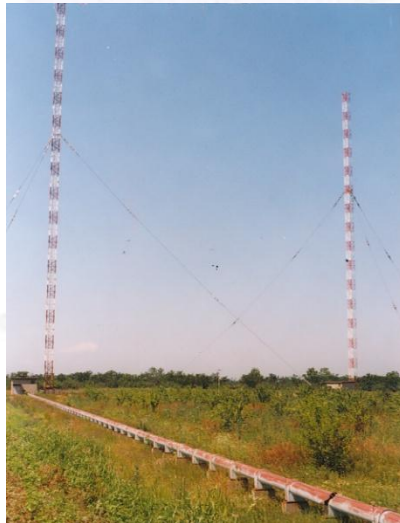
- Отпорност зрачења пресавијеног полуталасног дипола је око 300Ω
 - Због тога стандардни двожични водови који се користе код комерцијалних антена имају карактеристичну импедансу око 300Ω
- Ако се неким симетризатором описаним у трећем поглављу пређе на коаксијални вод, одговарајућа оптимална карактеристична импеданса је 75Ω
 - То је условило 75Ω као избор карактеристичне импедансе коаксијалних каблова у телевизијској техници (за везу између антене и пријемника, као и у кабловској телевизији)

Вертикални монопол

- На основу теореме ликова, симетрични дипол је еквивалентан вертикалном монополу постављеном изнад проводне равни
 - Појачање монопола је два пута веће (око 3 dB) од појачања одговарајућег дипола, а улазна импеданса монопола је два пута мања од импедансе дипола

Вертикални монопол

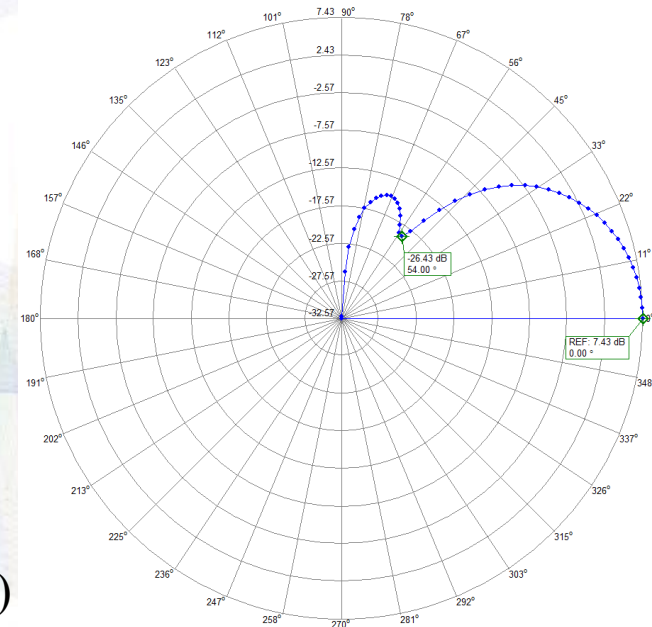
- Према дијаграму са претходне слике, четвртталасни монопол (монопол висине $l = \lambda/4$) је добро прилагођен на стандардни коаксијални вод карактеристичне импедансе 50Ω
- Напајање монопола се лако изводи коаксијалним каблом чији се спољашњи проводник завршава у проводној равни, а монопол наставља на унутрашњи проводник кабла (као на слици)



Слика 12.15. Вертикални монопол напајан коаксијалним каблом.

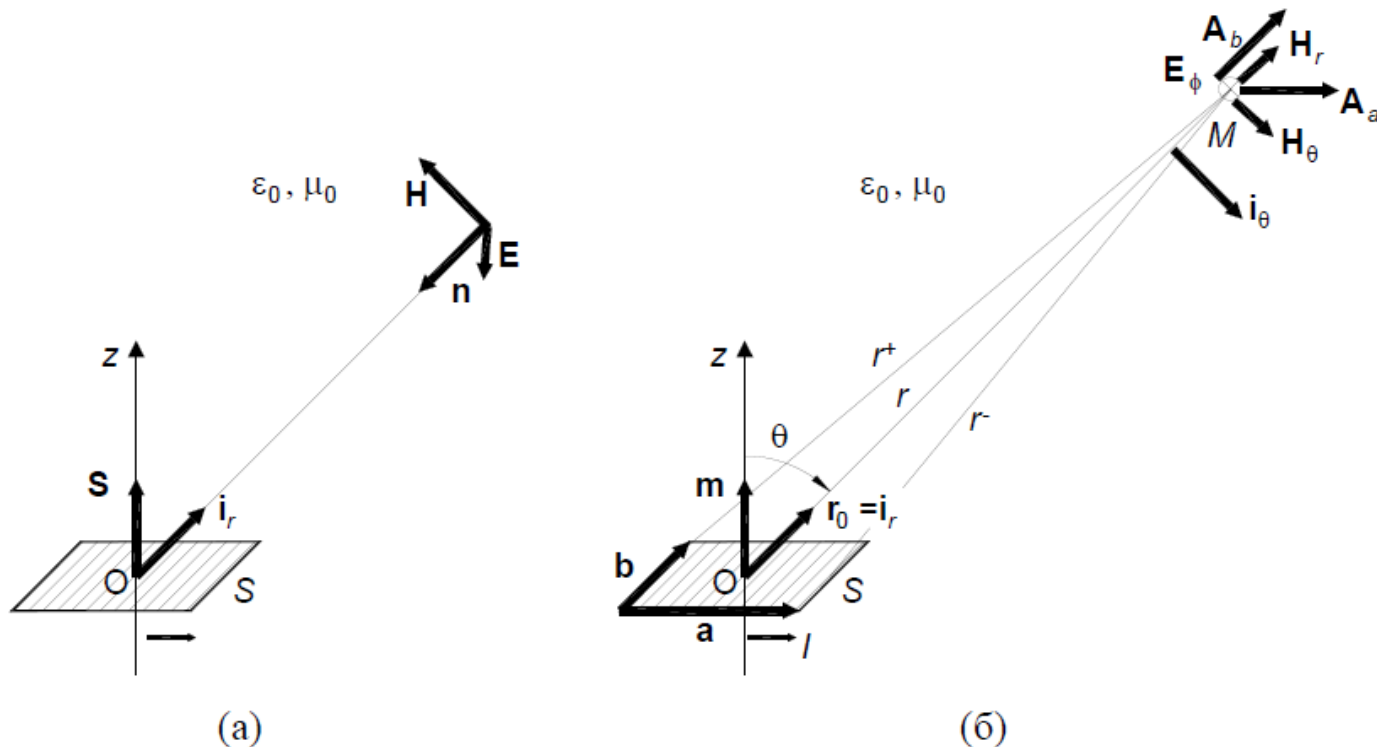
Вертикални монопол

- Примери вертикалних монопола су антене на крововима аутомобила и других возила, антене мобилних телефона старије конструкције (штап-антене), антене за локалне бежичне рачунарске мреже, као и предајне антене (стуб-антене) средњоталасних радиостаница
 - Предајна антена Првог програма Радио Београда, на учестаности $f = 684 \text{ kHz}$, односно таласној дужини $\lambda = 439 \text{ m}$, је вертикални стуб висине $l = 239 \text{ m}$
 - Висина је одабрана тако да се што више потисне талас одбијен од јоносфере и тиме смањи интерференција са таласом који се простире по површи земље (антифединг антена)



Оквирна антена

- На слици је приказана оквирна антена (петља или рам-антена)
 - Антена може имати и неколико завојака

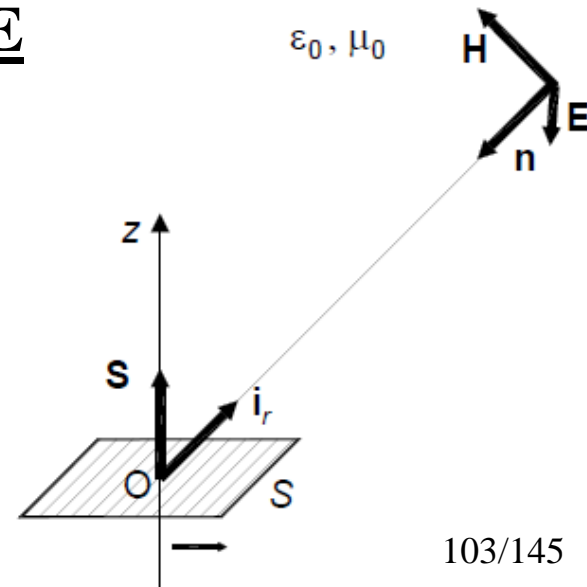


Слика 12.16. Петља као (а) пријемна и (б) предајна антена.

Оквирна антена

- Ако је петља мала у односу на таласну дужину, онда се, квазистатичком анализом, релативно једноставно може израчунати електромоторна сила индукована у петљи када она ради као пријемна антена
 - Нека се петља налази у пољу прогресивног таласа који се простире у смеру јединичног вектора \mathbf{n} и нека је вектор јачине електричног поља таласа $\underline{\mathbf{E}}$
 - Вектор магнетског поља таласа је

$$\underline{\mathbf{H}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \mathbf{n} \times \underline{\mathbf{E}}$$

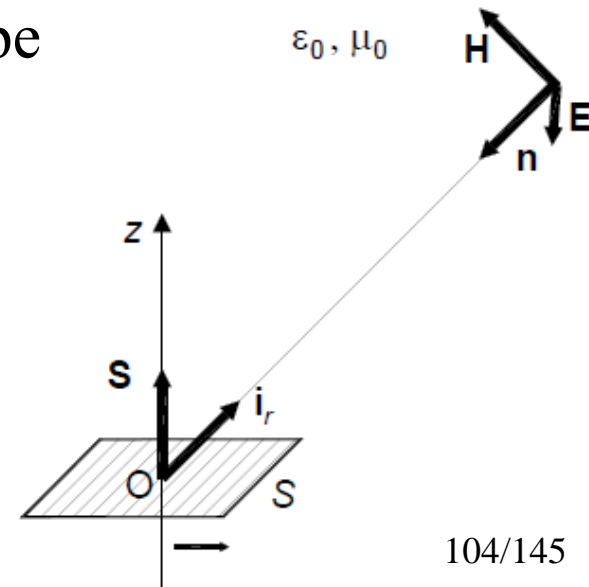
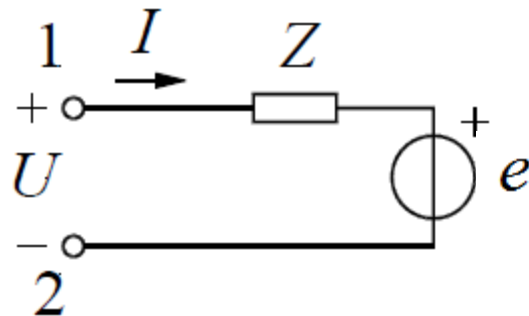


Оквирна антена

- Сматрајући да је поље на месту петље хомогено, за електромоторну силу индуковану у контури имамо, на основу Фарадејевог закона електромоторне индукције

$$\underline{e}_{\text{ind}} = -j\omega\Phi = -j\omega\mu_0 \underline{\mathbf{H}} \cdot \underline{\mathbf{S}} = -j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} (\underline{\mathbf{n}} \times \underline{\mathbf{E}}) \cdot \underline{\mathbf{S}} = -j\beta(\underline{\mathbf{i}}_r \times \underline{\mathbf{S}}) \cdot \underline{\mathbf{E}} = -\underline{e}$$

- Референтни смер индуковане електромоторне силе се поклапа са оријентацијом контуре на слици, док је референтни смер емс Тевененовог генератора супротан



Оквирна антена

- На основу слике, $\mathbf{S} = S \mathbf{i}_z$ је вектор површине петље, док је $\mathbf{i}_r = -\mathbf{n}$ орт правца из кога наилази талас

–Поредећи израз

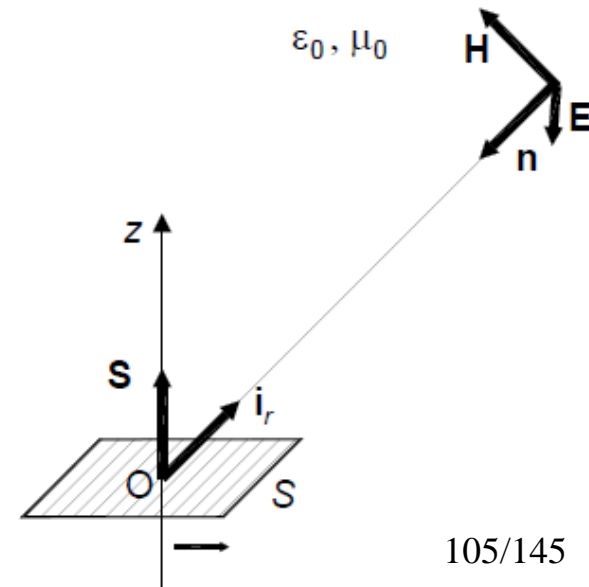
$$\underline{e}_{\text{ind}} = -j\omega \underline{\Phi} = -j\omega \mu_0 \underline{\mathbf{H}} \cdot \underline{\mathbf{S}} = -j\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} (\mathbf{n} \times \underline{\mathbf{E}}) \cdot \underline{\mathbf{S}} = -j\beta (\mathbf{i}_r \times \underline{\mathbf{S}}) \cdot \underline{\mathbf{E}} = -\underline{e}$$

са изразом

$$\underline{e} = \underline{U}_{120} = \frac{\lambda}{\pi} \underline{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{F}}$$

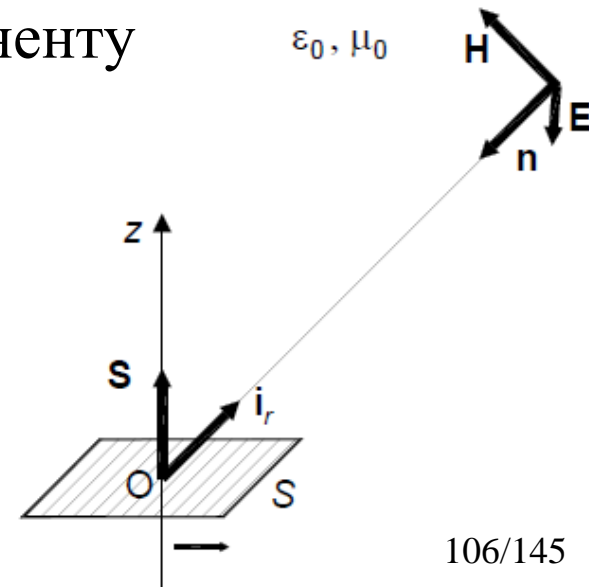
види се да је карактеристична функција зрачења петље једнака

$$\underline{\mathbf{F}} = j \frac{\beta^2}{2} (\mathbf{i}_r \times \underline{\mathbf{S}})$$



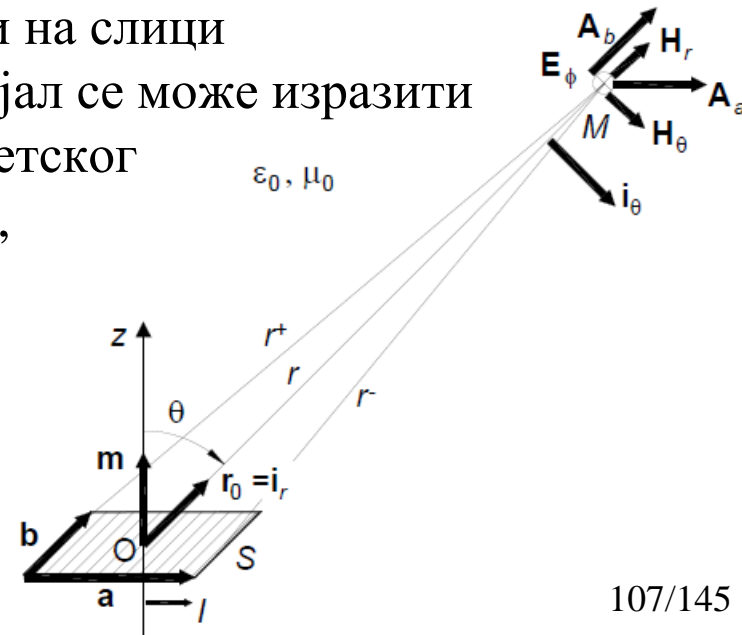
Оквирна антена

- Петља подједнако прима из свих праваца у екваторијалној равни (тј. равни управној на z -осу), као и Херцов дипол, али под условом да електрично поље има ϕ -компоненту (јер магнетско поље треба да буде управно на раван контуре)
 - За разлику од тога, код Херцовог дипола електрично поље треба да има θ -компоненту



Оквирна антена

- Ако се анализира мала петља као предајна антена, сличним поступком као код прорачуна $-\text{grad } V$ код Херцовог дипола, може се израчунати њен магнетски вектор-потенцијал
 - За правоугаону петљу приказану на слици, рачуна се магнетски вектор-потенцијал пара паралелних страница
 - Резултати су вектори \underline{A}_a и \underline{A}_b приказани на слици
 - Резултантни магнетски вектор-потенцијал се може изразити преко магнетског момента петље (магнетског момента струјне контуре), $\underline{m} = \underline{I} \underline{S} = \underline{I} S \underline{i}_z$, где је \underline{I} јачина струје петље (за коју апроксимативно сматрамо да је иста у свим тачкама петље), а $\underline{S} = \underline{a} \times \underline{b}$ је вектор површи петље



Оквирна антена

- Магнетски вектор-потенцијал има облик

$$\underline{\mathbf{A}} = \underline{A} \mathbf{i}_\phi = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(1 + j\beta r) e^{-j\beta r}}{r^2} \underline{\mathbf{m}} \times \mathbf{r}_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(1 + j\beta r) e^{-j\beta r}}{r^2} \underline{m} \sin \theta \mathbf{i}_\phi$$

– Електрични скалар потенцијал (V) једнак је нули, јер је струја истог интензитета дуж петље, па је, на основу једначине

$$\underline{Q}' = \frac{j}{\omega} \frac{d\underline{I}}{dl}$$

одговарајуће наелектрисање једнако нули

Оквирна антена

- Заменом израза

$$\underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{A}}_i \mathbf{i}_\phi = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(1 + j\beta r) e^{-j\beta r}}{r^2} \underline{\mathbf{m}} \times \mathbf{r}_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(1 + j\beta r) e^{-j\beta r}}{r^2} m \sin \theta \mathbf{i}_\phi$$

у изразе

$$\underline{\mathbf{E}} = -j\omega \underline{\mathbf{A}} - \text{grad } \underline{V} = -j\omega \left(\underline{\mathbf{A}} + \frac{1}{\beta^2} \text{grad div } \underline{\mathbf{A}} \right) \quad \underline{\mathbf{H}} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \underline{\mathbf{A}}$$

добијају се изрази за компоненте електричног и магнетског поља петље, који су дуални изразима за поље Херцовог дипола

$$\underline{E}_\phi = -j\omega \mu_0 \frac{m \sin \theta}{4\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-j\beta r}$$

$$\underline{H}_r = j\beta \frac{m \cos \theta}{2\pi} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{j}{\beta r^3} \right) e^{-j\beta r}$$

$$\underline{H}_\theta = j\beta \frac{m \sin \theta}{4\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} - \frac{j}{\beta r^3} \right) e^{-j\beta r}$$

Оквирна антена

- Због претходне дуалности, мала струјна контура се назива и магнетским диполом
 - Слично као код Херцовог дипола, одавде се добијају изрази за блиско и далеко поље, а одатле се може идентификовати карактеристична функција зрачења
 - Резултат је исти као раније приказани

$$\underline{\mathbf{F}} = j \frac{\beta^2}{2} (\mathbf{i}_r \times \mathbf{S})$$

само је написан у другачијем облику

$$\underline{\mathbf{F}} = -j \frac{\beta^2}{2} S \sin \theta \mathbf{i}_\phi$$

Оквирна антена

- Као и код свих антена, у зони зрачења су електрично и магнетско поље међусобно управни и управни на потег r , а однос интензитета им је

$$\sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$$

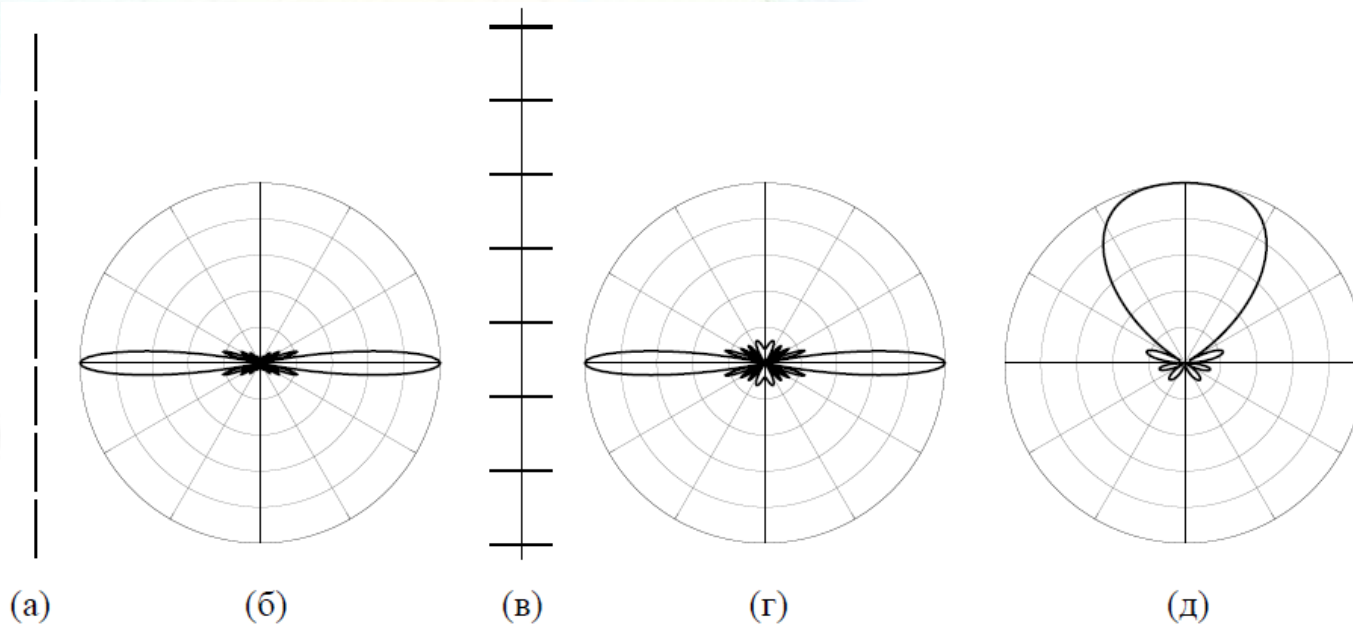
- Рам-антена (*loop antenna*) се користи релативно ретко јер јој је улазна импеданса осетљива на промену учестаности
- Примери су пријемне антене за средње таласе
 - Феритна антена (калем са феритним језгром) код преносних радиопријемника и велики калем код кућних аудио уређаја
 - Антене (сонде) за мерење магнетског поља

АНТЕНСКИ НИЗОВИ

- У циљу повећања усмерености и промене дијаграма зрачења, често се праве антенски низови
 - Антенски низ је систем од неколико идентичних или врло сличних антена које су постројене дуж праве линије (колинеарни низ), круга (циркуларни низ), по равној површи (планарни низ) итд
 - Правилним подешавањем ефективних вредности и фаза струја којима се напајају појединачне антене (елементи антенског низа) може се постићи усмеравање резултујућег дијаграма зрачења у жељеном правцу, потискивање бочних листова у дијаграму зрачења или потискивање сигнала сметњи који долази из неког правца (прављењем нуле у дијаграму зрачења за тај правац)
 - Код неких низова, дијаграм зрачења се може мењати електронским путем (електронски сканирани антенски низови)
 - » То се постиже подешавањем струја, рецимо, променљивим померачима фазе
 - » Електронско скенирање је брже од механичког скенирања (уобичајено код класичних радарских антена),
али тешко може покрити велики просторни угао

АНТЕНСКИ НИЗОВИ

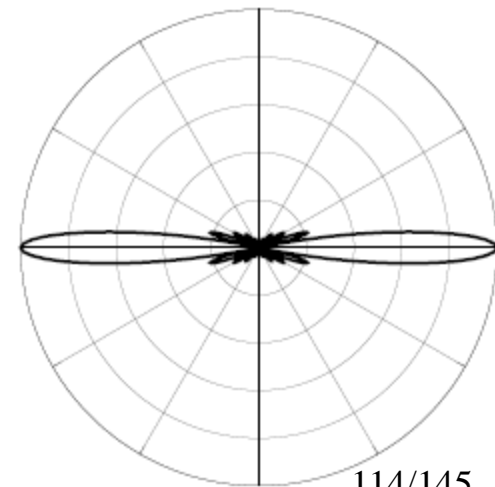
- Примери колинеарних низова полуталасних дипола приказани су на слици



Слика 12.17. Колинеарни низови полуталасних дипола. (а) Низ дипола чије се осе поклапају са осом низа, растојање између центара дипола је $0,6\lambda$, а струје напајања су у фази и (б) одговарајући дијаграм зрачења. (в) Низ дипола чије су осе нормалне на осу низа и одговарајући дијаграми зрачења (г) када је растојање између дипола $0,6\lambda$, а струје напајања су у фази и (д) када је растојање између дипола $\lambda/4$, а струје напајања фазно касне за по четвртину периода идући навише. Дијаграми (г) и (д) су у вертикалној равни нормалној на раван цртежа (12.17в).

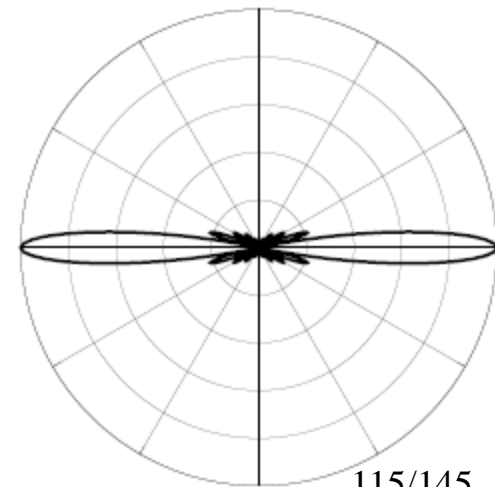
АНТЕНСКИ НИЗОВИ

- На слици је приказан колинеаран антенски низ полуталасних дипола
 - Осе дипола поклапају се са осом низа
 - Растојање између тачака напајања суседних дипла је нешто веће од $\lambda/2$
 - Ако се сви диполи напајају у фази, до конструктивног сабирања поља у зони зрачења долази у екваторијалној равни, тј. управно на осу низа (низ са трансверзалним зрачењем, *broadside array*)
 - Дијаграм зрачења је усмерен посматрано у вертикалној равни, али је омнидирекцион (кружан) у хоризонталној равни
 - Нумеричко појачање оваквих низова је приближно сразмерно броју дипола и типично реда величине 10 dB



АНТЕНСКИ НИЗОВИ

- Низ чији је дијаграм зрачења приказан на слици има 8 дипола напајаних струјама истих ефективних вредности, а појачање му је око 10 dBi
 - На дијаграму зрачења се може уочити главни лист и више бочних листова
 - Максимални ниво бочних листова се може смањити ако се диполи лоцирани ближе крајевима низа напајају струјама мањих ефективних вредности од дипола који су око средине низа
 - Потискивање бочних листова доводи до извесног проширења главног листа, а тиме до смањења појачања антене



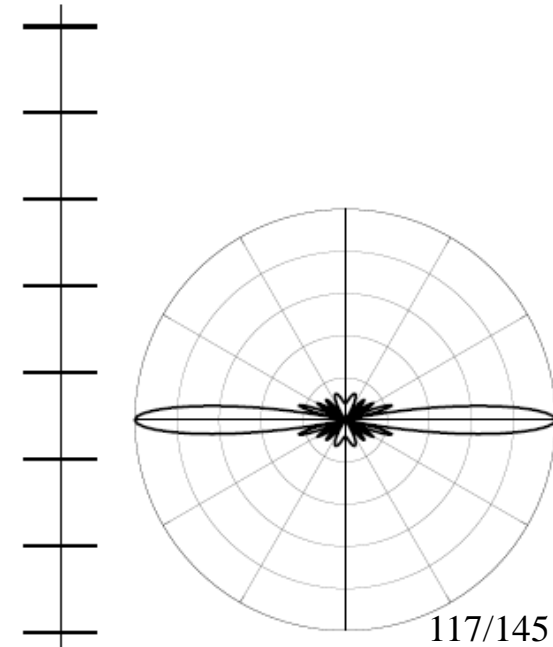
АНТЕНСКИ НИЗОВИ

- Низ сличан овоме (колинеаран низ напајан коаксијалним каблом *coco* – *coaxially-fed collinear array*) користи се у базним станицама мобилне телефоније када треба покрити пут азимутни угао
 - Уколико треба покрити само део пуног угла (типично, 120°), паралелно низу, на одстојању око $\lambda/4$ иза низа, поставља се метални рефлектор одговарајуће ширине
 - Такве антене базних станица упаковане су у високе пластичне радоме (панел-антене)



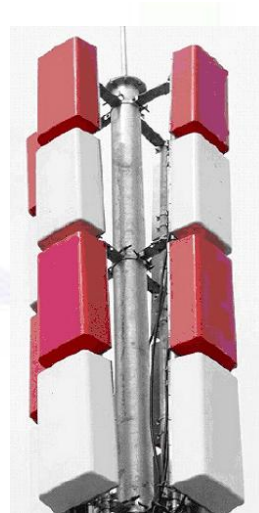
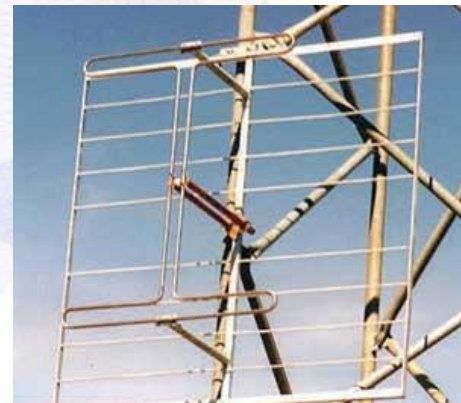
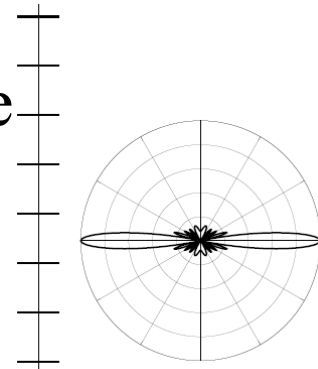
АНТЕНСКИ НИЗОВИ

- Ако се диполи поставе управно на осу низа, као на слици, а напајају се струјама у фази, максимум дијаграма зрачења је у правцу који је управан на осу низа, али истовремено управан и на осе дипола
 - За низ са 8 елемената, приказан је дијаграм зрачења
 - Појачање низа је око 13 dBi
 - У хоризонталној равни дијаграм је усмерен због тога што диполи не зраче у правцу својих оса
 - По облику, дијаграм зрачења низа у хоризонталној равни је исти као дијаграм зрачења у меридионалној равни дипола



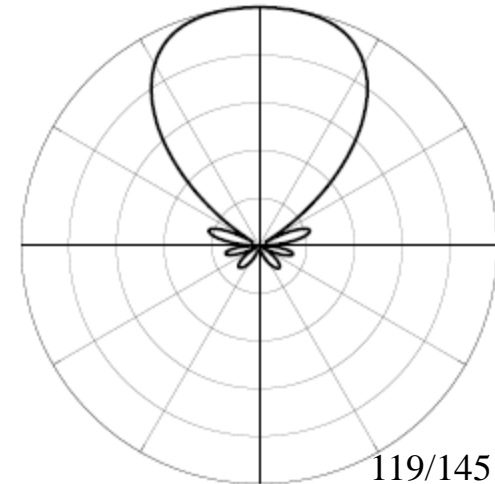
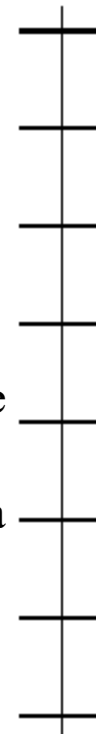
АНТЕНСКИ НИЗОВИ

- Ако се иза дипола, на растојању око $\lambda/4$, постави рефлектор, добија се панел који се користи за телевизијске предајнике, као и за FM предајнике велике снаге
 - У пракси, један панел има обично 4 дипола
 - Често се поставља неколико таквих панела један изнад другог, да би се повећала усмереност у вертикалној равни
 - Да би се покрио пун азимутни угао, на антенски стуб се постављају четири система панела, при чему два суседна система заклапају азимутни угао од 90°



АНТЕНСКИ НИЗОВИ

- Претпоставимо да је у колинеарном низу приказаном на слици растојање између тачака напајања дипола једнако $\lambda/4$
 - Нека фаза струје сваког дипола, идући одоздо нагоре, касни за $\pi/2$ у односу на претходни дипол
 - У том случају, конструктивно сабирање поља зрачења настаће у правцу осе антенског низа, у смеру увис (низ са лонгитудијалним зрачењем, *endfire array*)
 - Таква ситуација постоји код лог-периодичног низа дипола, јаги-антене и хеликоидалне антене
 - На слици је приказан дијаграм зрачења низа са 8 елемената у вертикалној равни која је управна на диполе
 - Појачање низа је само око 10 dBi због малог међусобног растојања дипола



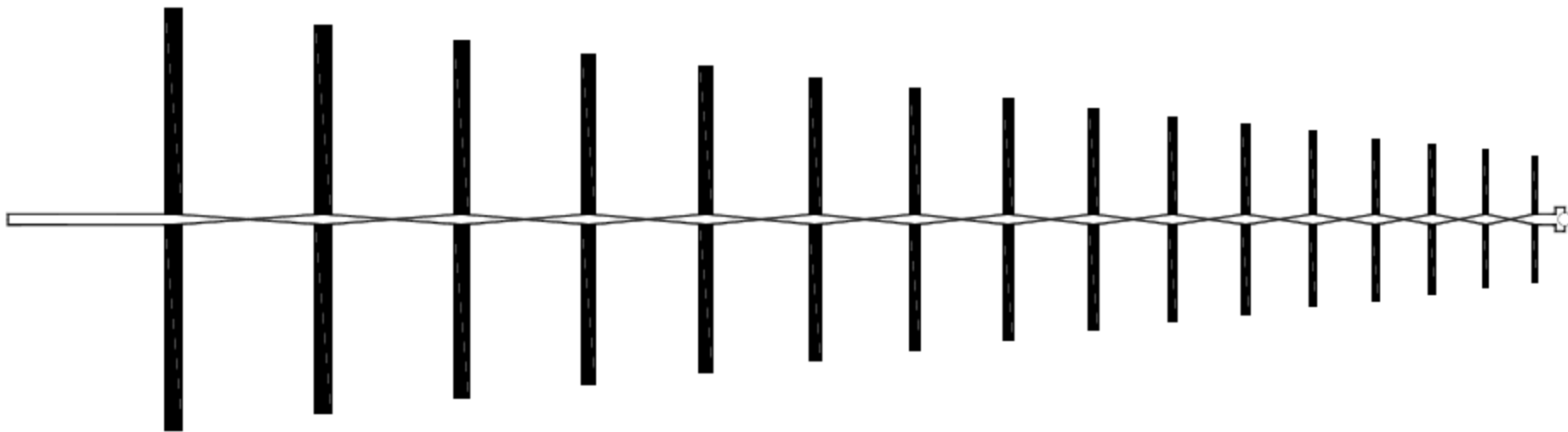
АНТЕННИ НИЗОВИ

- Двостепенни
НИЗОВИ



Лог-периодични низ дипола

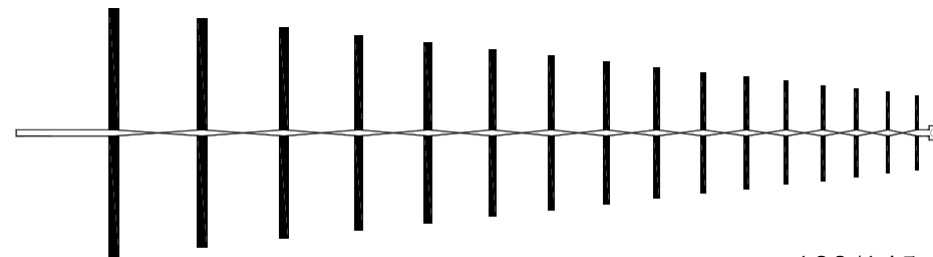
- Лог-периодични низ дипола је приказан на слици
 - Низ се обично састоји од неколико десетина дипола
 - Дужине дипола, дебљине жица од којих су диполи начињени и растојања између дипола се повећавају геометријском прогресијом идући од врха низа према крају
 - Оваква антена је широкопојасна и може покрити неколико октава



Слика 12.18. Лог-периодични низ дипола.

Лог-периодични низ дипола

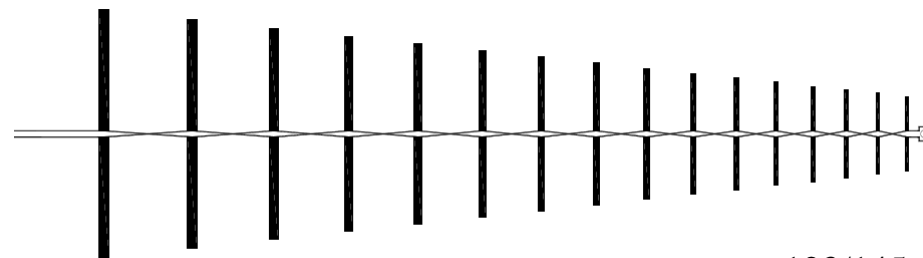
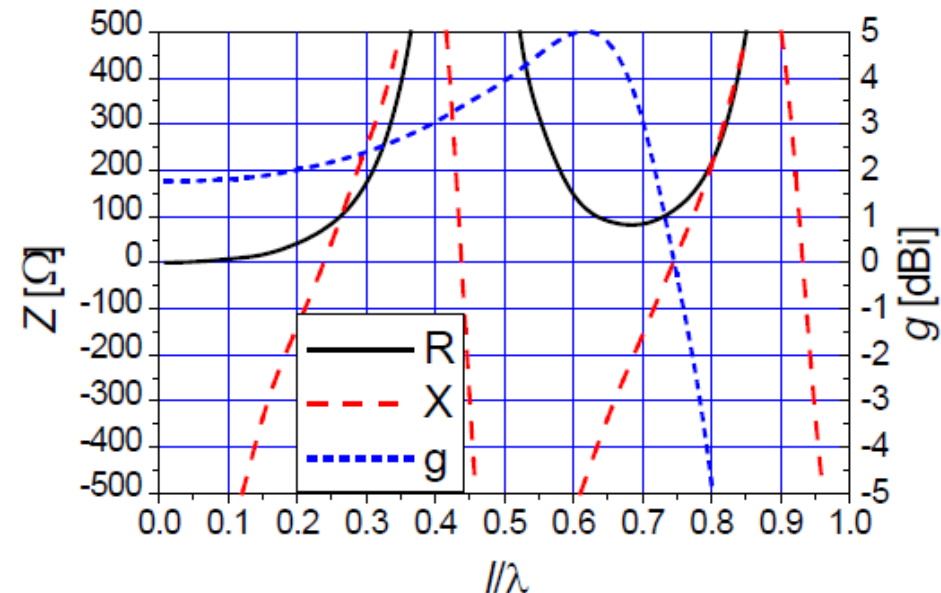
- При једној радној учестаности, активна је само група од неколико дипола чије су дужине око $\lambda/2$
 - На горњој граници радног опсега антене активни су најкраћи диполи, постављени близу врха антене, а на доњој граници радног опсега активни су најдужи диполи
- Растојање између активних дипола је око $\lambda/4$
 - Сви диполи се напајају двожичним водом (карактеристичне импедансе реда 100Ω)
 - Генератор је прикључен на врх антене (десно на слици), а вод је на другом крају затворен кратко спојеним огранком



Слика 12.18. Лог-периодични низ дипола.

Лог-периодични низ дипола

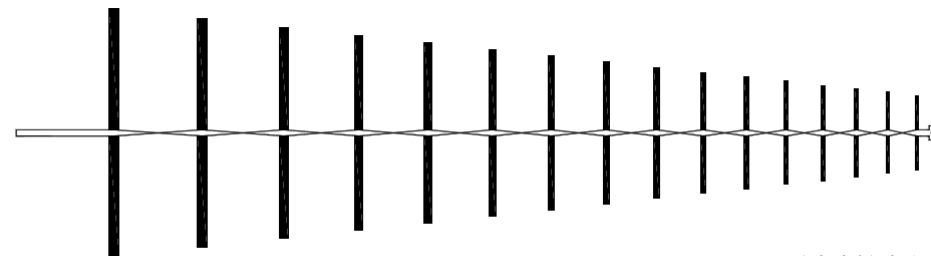
- Претпоставимо да је радна учестаност око средине радног опсега антене
 - Од генератора полази вођени TEM талас према задњем делу антене
 - Улазна импеданса кратких дипола близу врха антене је висока (претежно капацитивна), што се види са слике за улазну импедансу дипола у функцији учестаности
 - Такви диполи готово да не оптерећују вод, нити се побуђују



Слика 12.18. Лог-периодични низ дипола.

Лог-периодични низ дипола

- Када талас на воду дође до групе дипола чија је дужина око $\lambda/2$, ти диполи се побуде јер им је импеданса близу карактеристичне импедансе вода
 - Талас на воду, простирући се ка задњем делу антене, фазно касни од једног до другог дипола за око $\pi/2$
 - Због обртања вода (укрштања његових проводника) уноси се додатни помак фазе од π
 - Стога струја напајања следећег дипола фазно казни за $3\pi/2$, односно, еквивалентно, фазно предњачи за $\pi/2$, па долази до конструктивног сабирања поља зрачења у правцу унапред (удесно на слици)
 - Активна група дипола преузима са вода готово целокупну енергију вођеног таласа, тако да су неактивни остали (дужи) диполи, који се налазе у задњем делу антене



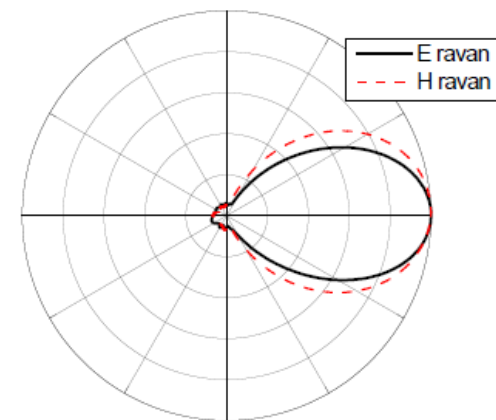
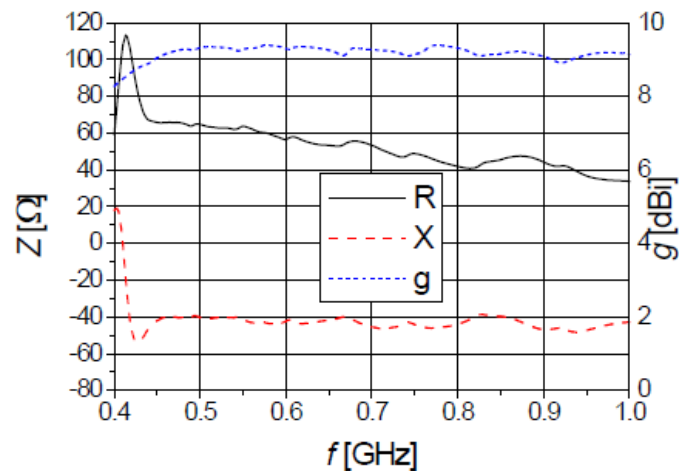
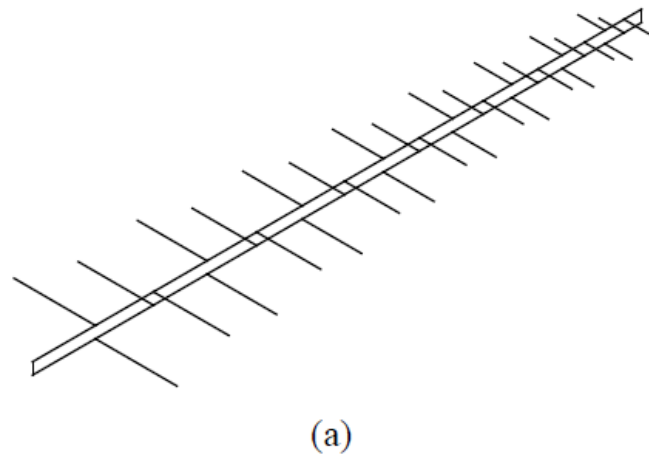
Слика 12.18. Лог-периодични низ дипола.

Лог-периодични низ дипола

- Због своје широкопојасности, лог-периодични низови дипола се користе у краткоталасној техници и као мерне антене
 - Типично појачање је 7–10 dBi
 - Лог-периодичне антене су честе и у комерцијалним применама (као што је приказано на следећој слици), за пријем телевизијских програма
 - Код таквих антена су, из економских разлога, сви диполи истих дебљина
 - Двожични вод је у вертикалној равни и служи као носач кракова дипола
 - Уместо да се вод укршта, краци се наизменично постављају са једне и друге стране равни у којој је вод
 - На следећој слици је приказана и улазна импеданса и појачање овакве антене у функцији учестаности



Лог-периодични низ дипола



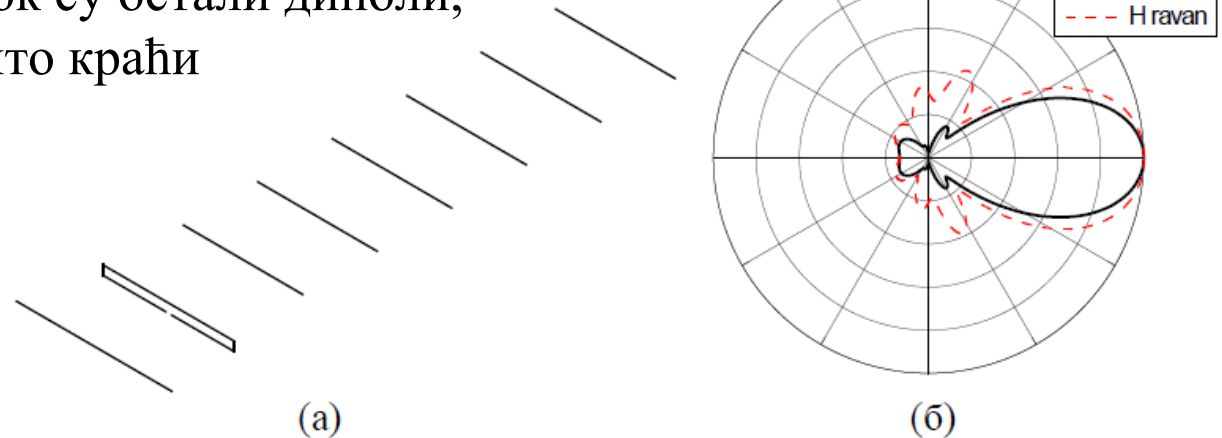
Слика 12.19. Комерцијална варијанта лог-периодичног низа дипола за UHF опсег:
(а) скица, (б) импеданса и појачање у функцији учестаности и
(в) дијаграм зрачења на 650 MHz.

Лог-периодични низ дипола

- На претходној слици приказан је дијаграм зрачења по пољу
 - Код антена које зраче **линијски поларизовано поље**, уобичајено је да се дефинишу E -раван и H -раван
 - То су две ортогоналне равни које садрже максимум дијаграма зрачења, при чему је прва раван паралелна вектору јачине електричног поља, а друга паралелна вектору јачине магнетског поља
 - Код полуталасног дипола, било која вертикална (меридионална) раван је E -раван, а екваторијална раван је H -раван

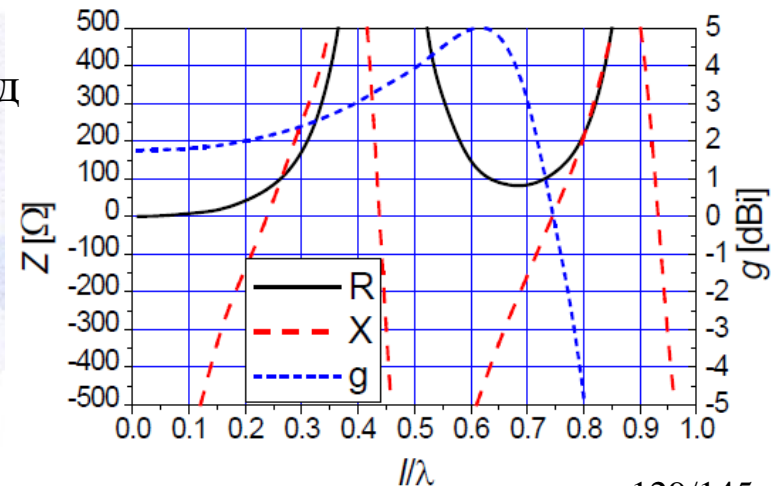
Јаги-антена

- Јаги-антена (приказана на слици) је низ дипола чија је дужина око $\lambda/2$
 - Само је један дипол директно напајан
 - У комерцијалним применама, обично је то пресавијени дипол
 - Остали диполи су пасивни, краткоспојени, а побуђују се ЕМ пољем у коме се налазе
 - Један пасивни дипол, рефлектор, нешто је дужи од напајаног, док су остали диполи, директори, нешто краћи



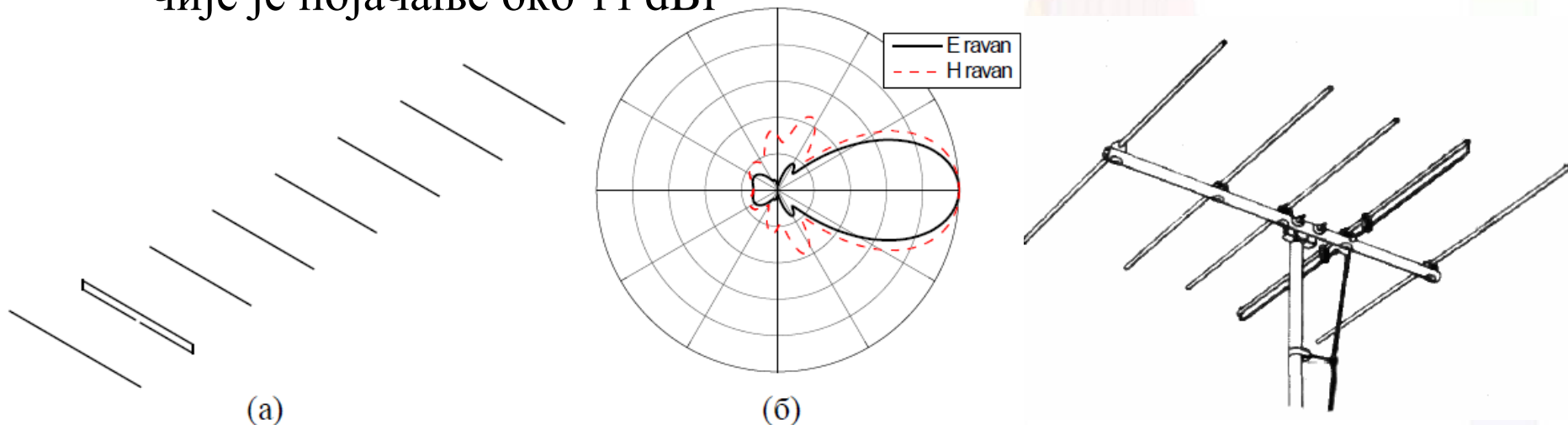
Јаги-антена

- Растојање између елемената је око $\lambda/4$
 - Захваљујући различитим импедансама ових дипола (као што је приказано на слици), фазе струја дипола нису исте
 - Струја рефлектора фазно предњачи струји напајаног елемента за око $\pi/2$
 - Стога се поље напајаног елемента и рефлектора поништавају уназад
 - Струја сваког директора фазно касни за струјом претходног директора (који је ближи напајаном диполу) за око $\pi/2$
 - Стога се зрачење свих елемената конструктивно сабирају у правцу унапред



Јаги-антена

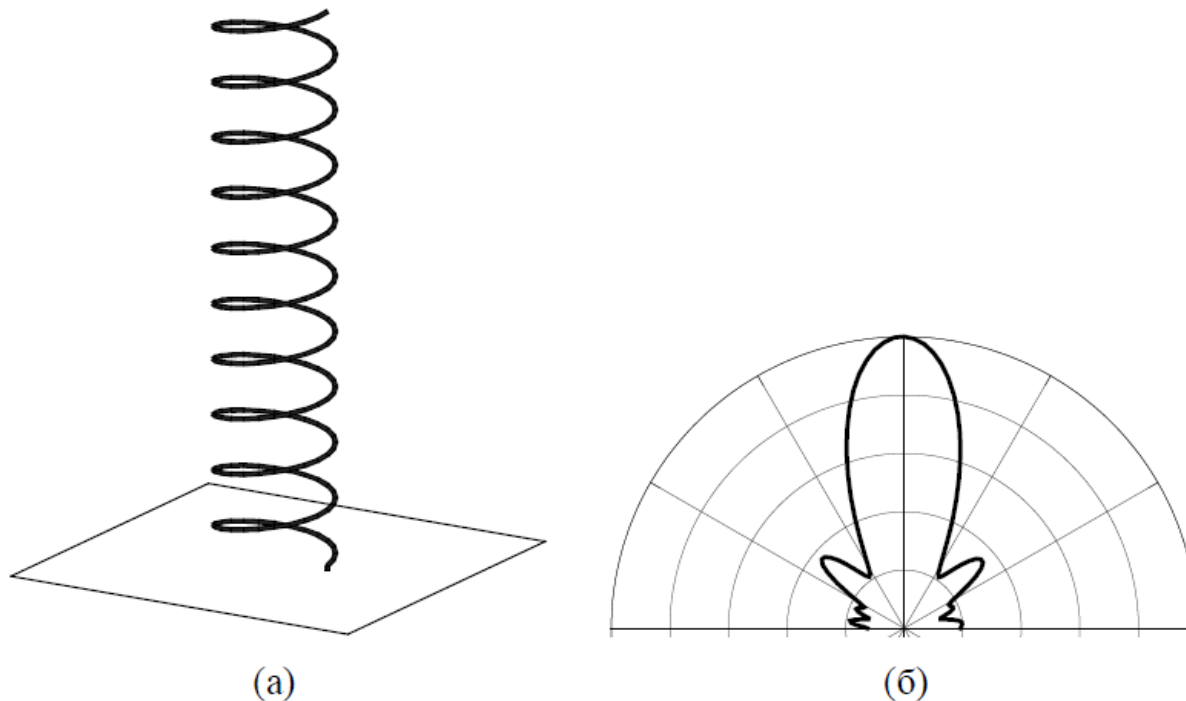
- Јаги-антене су ускопојасне (релативни радни опсег је обично испод 10%), а појачање 5–16 dBi
- Користе се за усмерене радио-везе (на пример, код бежичних рачунарских мрежа), а постоје разне верзије јаги-антена за пријем телевизијског сигнала и FM радио станица
 - На слици је приказан дијаграм зрачења антене са 6 директора, чије је појачање око 11 dBi



Слика 12.20. Јаги-антена: (а) скица и (б) дијаграм зрачења.

Хеликоидална антена

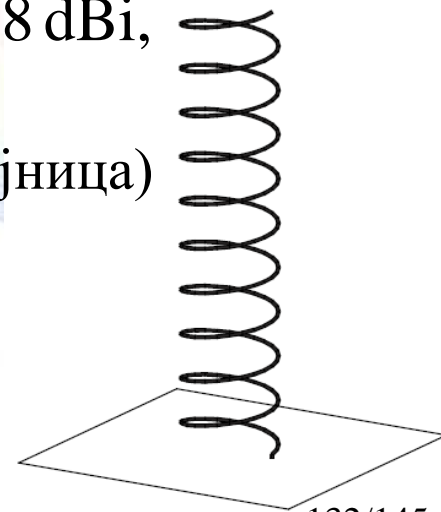
- Поларизација поља свих до сада описаних антена је линијска
 - Хеликоидална антена (приказана на слици)
 - зрачи кружно поларизован талас
 - Антена је начињена од проводника савијеног у спиралу



Слика 12.21. Хеликоидална антена: (а) скица и (б) дијаграм зрачења.

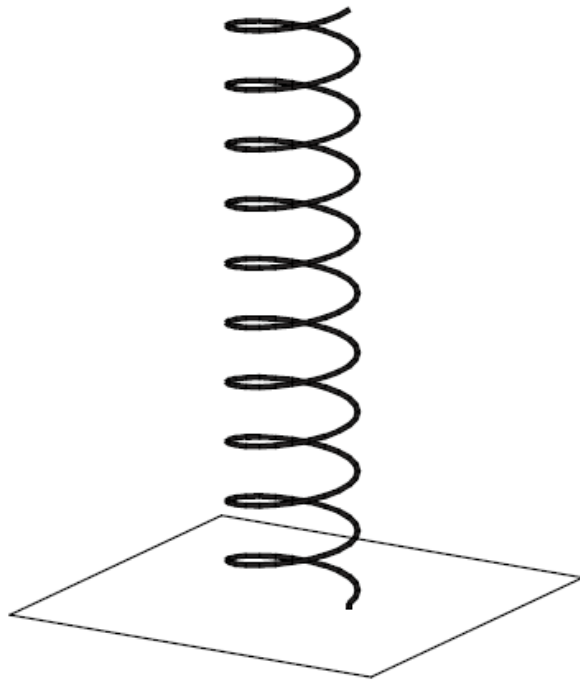
Хеликоидална антена

- Генератор је прикључен као код монопола: између проводне равни и базе антене
 - Генератор побуђује талас који путује дуж жице (као код цеви са прогресивним таласом)
 - Обим једног завојка је око једне таласне дужине
 - Тиме се остварују различите фазе струје у различитим деловима завојка, што је потребно за добијање кружне поларизације
 - Поља које стварају завојци се конструктивно сабирају у правцу осе хеликоиде
- Типично појачање хеликоидалне антене је 10–18 dBi, а ширина радног опсега око половине октаве
 - Смер мотања завојнице (десна, односно лева завојница) дефинише поларизацију поља (десна, односно лева кружна поларизација)

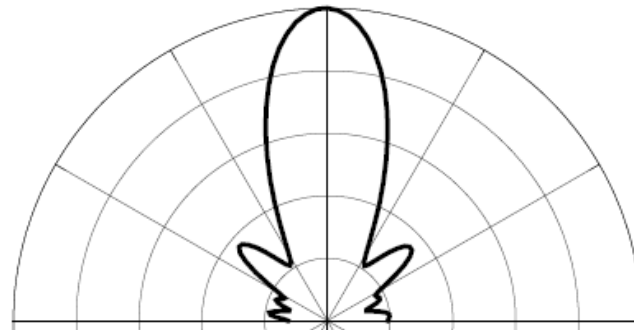


Хеликоидална антена

- Користе се за усмерене редио-везе и на сателитима
- На слици је приказан дијаграм зрачења антене са 10 завојака, чије је појачање око 13 dBi



(а)



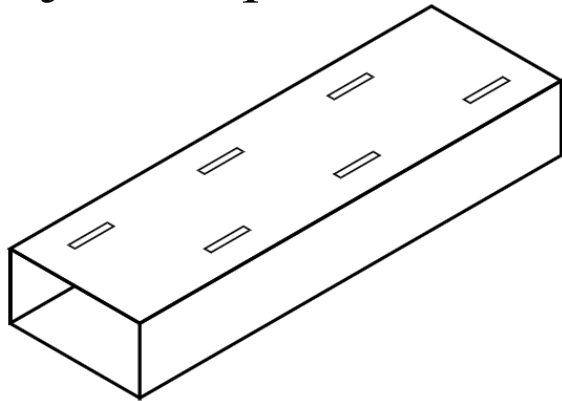
(б)



Слика 12.21. Хеликоидална антена: (а) скица и (б) дијаграм зрачења.

Зрачећи прорези

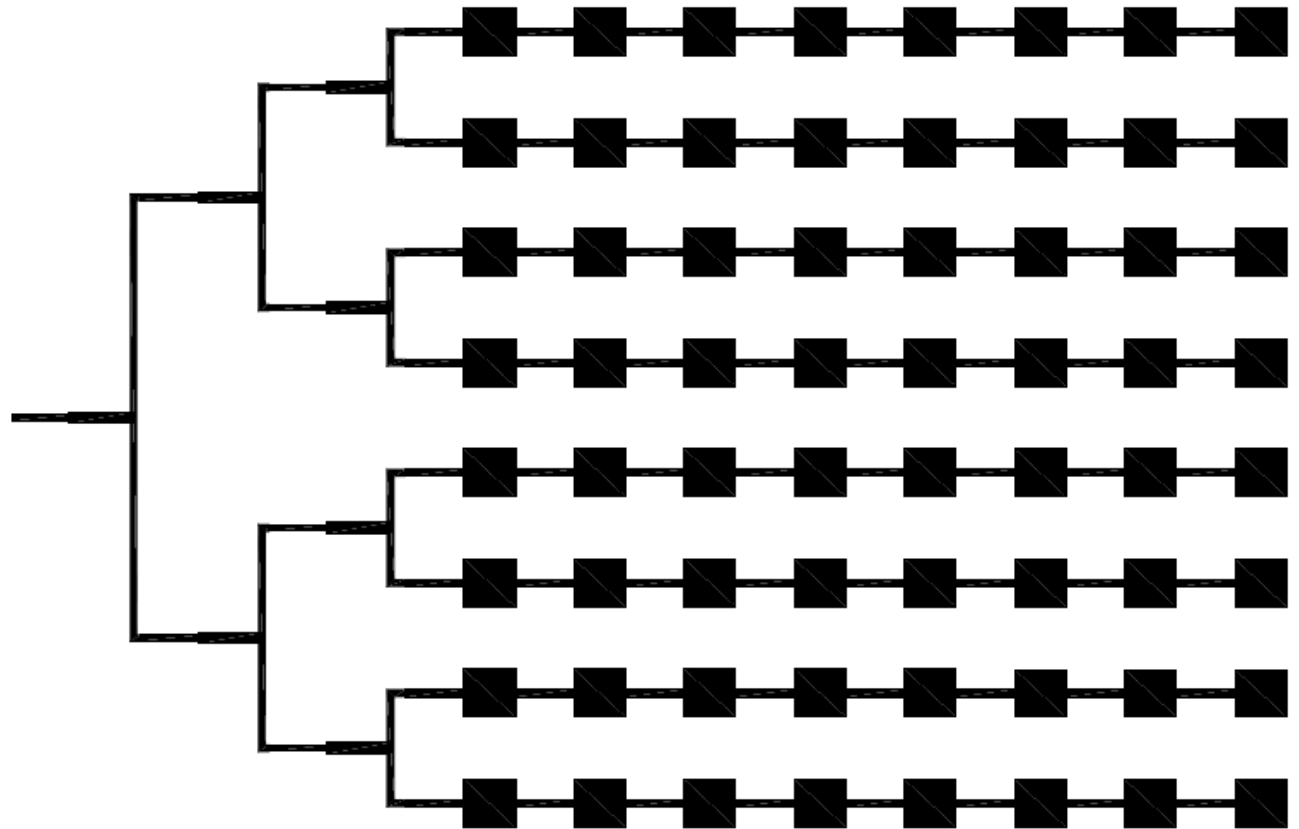
- Низ зрачећих прореза на таласоводу, приказан на слици, такође представља колинеаран антенски низ
 - Ако се паралелно постави више таласовода са прорезима, добија се дводимензиони планарни низ (антенска решетка)
 - Радарске антене које се праве на овакав начин могу имати и неколико десетина хиљада прореза, уз појачање реда 40–50 dBi



Слика 5.16. Антенски низ зрачећих прореза.

Микротракасте антене

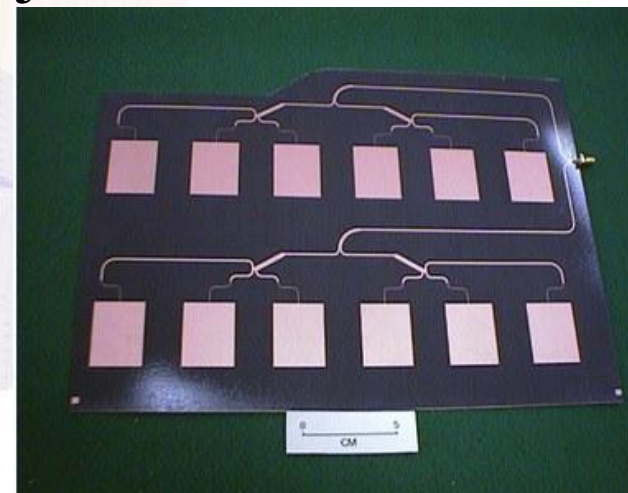
- Планарни низови се праве и са микротракастим антенама, као што је приказано на слици



Слика 12.22. Планарни низ микротракастих антена.

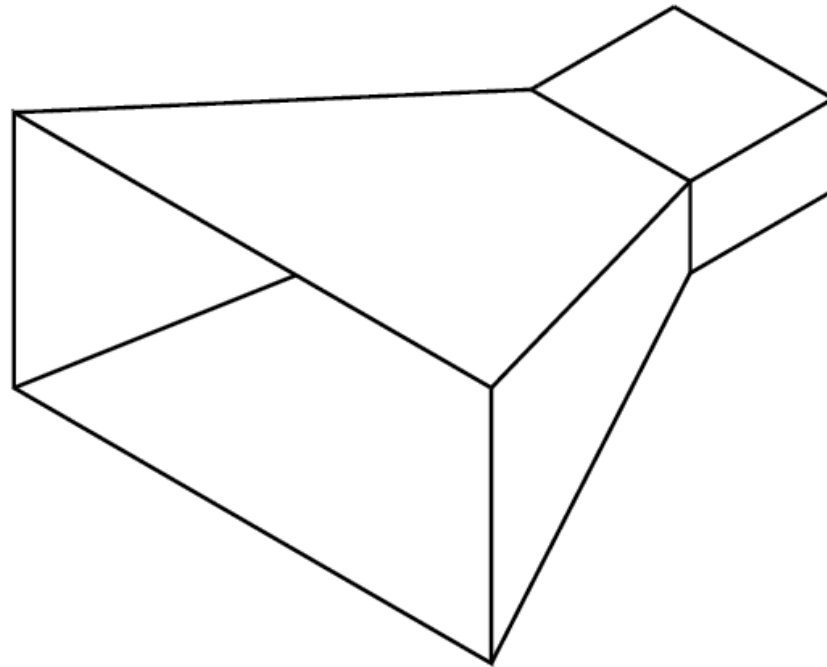
Микротракасте антене

- Микротракасте антене могу бити разних облика
 - На слици су приказане правоугаоне микротракасте антене
 - Антена и подлога представљају резонатор који је отворен на ободу
 - Стога су димензије микротракастих антена типично око $\lambda/2$, где је λ таласна дужина у диелектрику (супстрату)
 - При резонанцији, у антени постоје јаке струје, а зрачење једне антене је претежно увис, у правцу нормалном на проводну раван
- Појачање једне микротракасте антене је типично око 8 dBi, а нумеричко појачање целог низа је приближно сразмерно броју елемената



Левак-антене

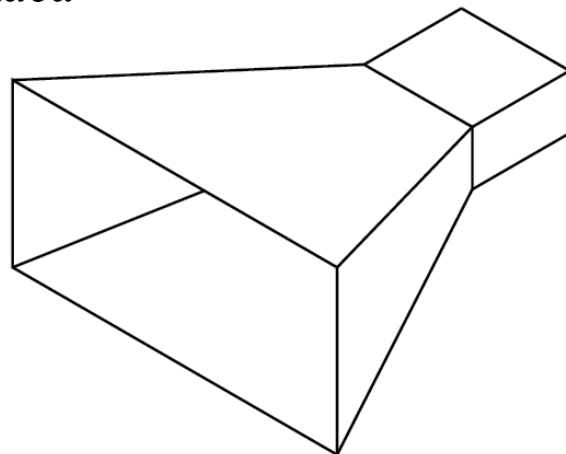
- Левкасто проширење отвореног краја таласовода, приказано на слици, омогућава да се вођени (најчешће доминантни) тип таласа постепено претвори у израчени ЕМ талас
– Оваква антена се назива левак-антенa (*horn antenna*)



Слика 12.23. Левак-антена.

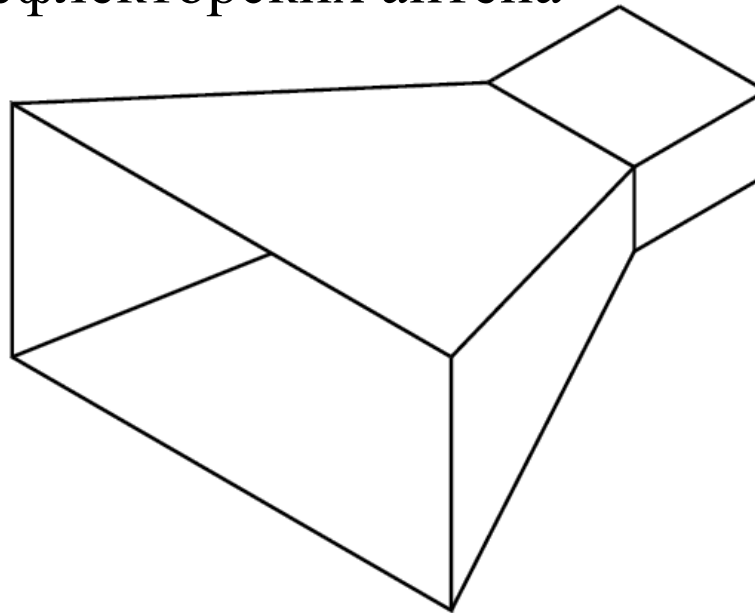
Левак-антене

- Приближна анализа зрачења из отвора левак-антене може се извести на следећи начин
 - Претпостави се расподела ЕМ поља на отвору
 - Најједноставнија апроксимација је иста структура поља као код доминантног типа таласа, само “растегнута” на цео отвор
 - Површ отвора се издели на елементе
 - Користећи се Хајгенсовим принципом, као у оптици, сматра се да је сваки елемент зрачеће површи извор ЕМ таласа (Хајгенсов извор)
 - Најзад, поље у зони зрачења се добија сабирањем доприноса тих елементарних извора



Левак-антене

- Појачање левак-антена зависи од односа површине отвора левка и λ^2
 - Типично је 10–20 dBi
 - Левак-антене се користе у мерењима као и примарни радијатори рефлекторских антена



Слика 12.23. Левак-антена.

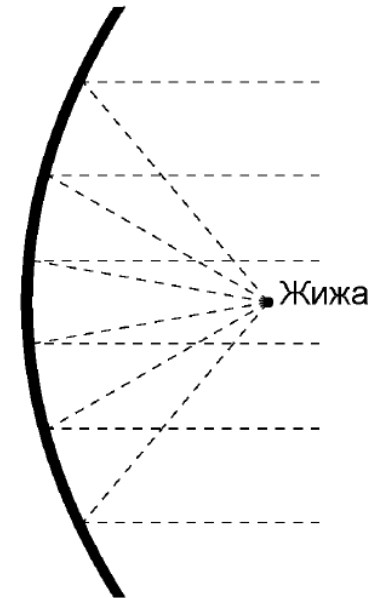
Рефлекторске антене

- Антене веома великог појачања, реда величине 30–60 dBi, праве се на сличним принципима као у оптици
 - Користећи се рефлекторима или диелектричним сочивима
 - Овакве антене имају врло узан главни лист дијаграма зрачења



Рефлекторске антене

- На слици је приказан најједноставнији систем за фокусирање зрачења, параболни рефлектор
 - Примарни извор ЕМ зрачења је нека антена умереног појачања (рецимо, левак-антена)
 - Антена се поставља у жижу обртног параболоида, а њен задатак је да “обасја” параболоид
 - Због великих димензија система у односу на таласну дужину, **приближна** анализа се може спровести користећи се геометријском оптиком: зрак који полази од примарног радијатора, после одбијања од параболоидног рефлектора, иде паралелно оси параболоида



Слика 12.24. Параболни рефлектор.

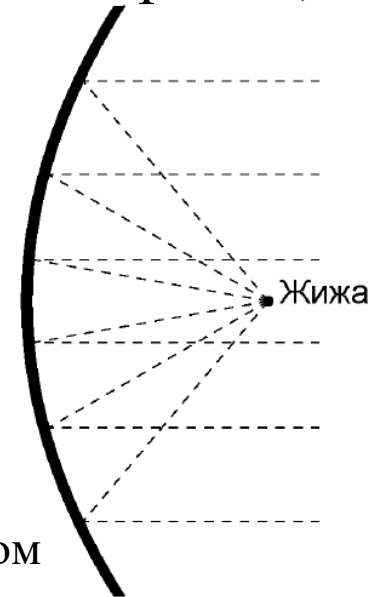
Рефлекторске антене

- Напоменимо да се ширина листа обично дефинише као угао између правца у којима је појачање антене 3 dB испод нивоа у максимуму зрачења

– Ако су $\alpha_{1[^\circ]}$ и $\alpha_{2[^\circ]}$ ширине листа у две ортогоналне равни, изражене у степенима, онда се нумеричко појачање може проценити на основу полуемпиријске формуле

$$G \approx \frac{27000}{\alpha_{1[^\circ]} \alpha_{2[^\circ]}}$$

- На пример, ако је $\alpha_1 = \alpha_2 = 3^\circ$, тада је $G \approx 3000$, односно $g \approx 35$ dBi
 - Ефективна површина антене са параболичним рефлектором је обично између 50 % и 70 % геометријске површине отвора параболоида



Слика 12.24. Параболични рефлектор.

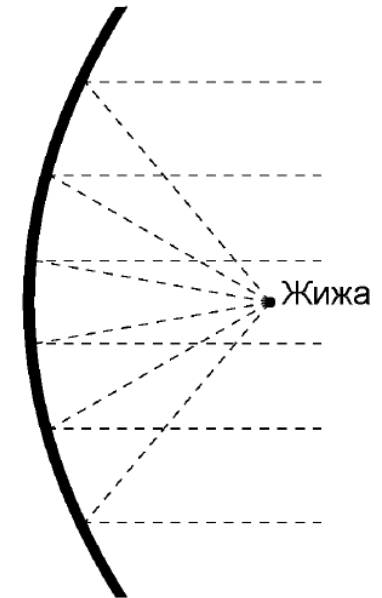
Рефлекторске антене

- Округли параболични рефлектори се користе да би се добио главни лист дијаграма зрачења приближно ротационо симетричног облика (*pencil beam*)
 - Примери су антене за пријем сателитских сигнала и антене за радиорелејне везе
 - Код неких радара је потребан дијаграм зрачења лепезастог облика, спљоштен у хоризонталној равни, а раширен у вертикалној равни (*fan beam*)
 - Тада се користи рефлектор чија је хоризонтална димензија знатно већа од вертикалне



Рефлекторске антене

- Код параболичних рефлектора и других врло усмерених антена (чије су димензије много веће од таласне дужине), разликује се прелазна зона између области блиског поља и зоне зрачења
 - Узима се да та прелазна област, која се назива **Френеловом зоном**, почиње на растојању
$$0,62D\sqrt{D/\lambda}$$
од антене, где је D највећа линеарна димензија антене



Слика 12.24. Параболични рефлектор.

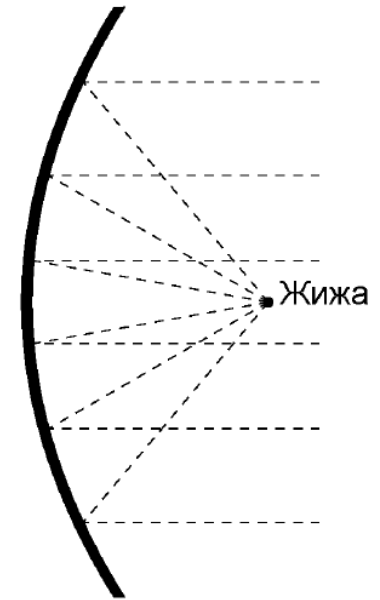
Рефлекторске антене

- Тачке у тој зони су релативно далеко у односу на антену, али не довољно далеко да се формира коначни дијаграм зрачења антене

– Проблем су фазне разлике између доприноса разних делова зрачећег система (на пример, доприноси магнетском вектор-потенцијалу) које у тој зони још увек зависе од r , уместо само од сферних координата θ и ϕ

– Тек ако је одстојање тачака од антене веће од $2D^2/\lambda$,

долази се у **Фраунхоферову зону**, у којој је коначно формиран дијаграм зрачења антене



Слика 12.24. Параболични рефлектор.