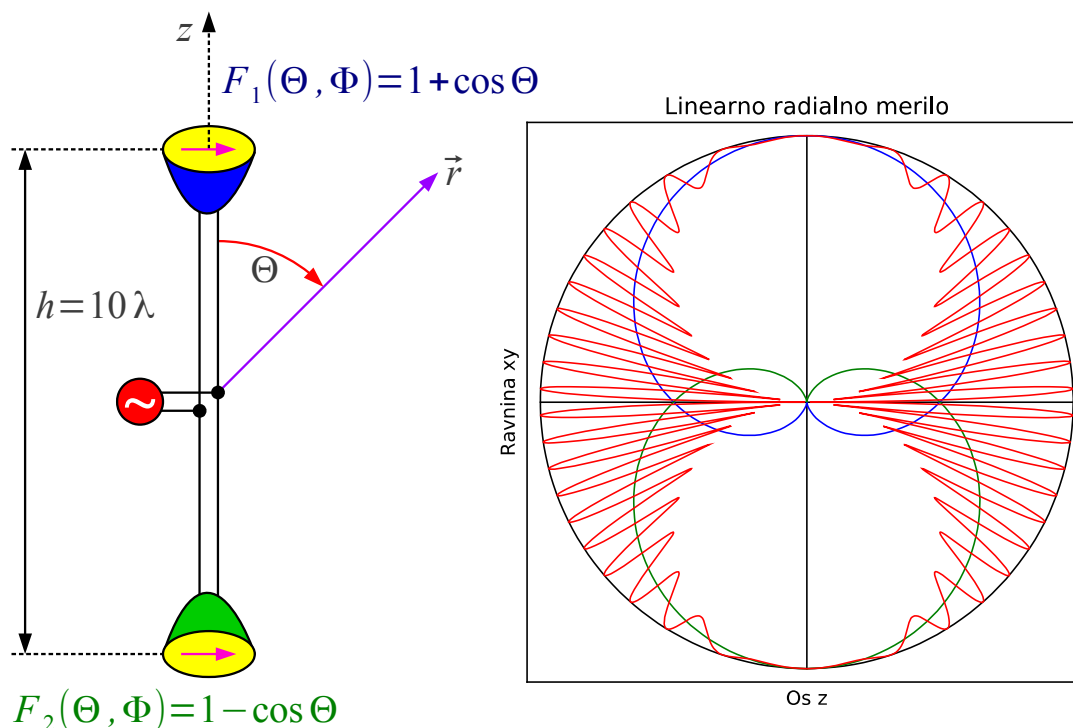


## 11. Skupine anten

Višja smernost oziroma dobitok je mogoče najpogostejši, ampak nikakor ni edini namen sestavljanja skupine anten (angleško: antenna array). Skupina anten omogoča tudi doseganje drugačne polarizacije, pokrivanje širšega frekvenčnega pasu ali več ločenih frekvenčnih pasov, smerne diagrame, ki jih z eno samo anteno ne moremo narediti, električno odklanjanje smeri sevanja brez mehanskega premikanja antene in podobno.

Pri sestavljanju skupine moramo biti previdni. Doseganje ene lastnosti lahko poruši druge lastnosti skupine anten. Preprost zgled je antena na letalu ali umetnem satelitu, ki mora oddajati in sprejemati iz poljubne smeri. Ko je plovilo dosti večje  $d \gg \lambda$  od valovne dolžine, se je senci plovila zelo težko izogniti ne glede na to, kam namestimo eno samo anteno na površino plovila. Radijsko zvezo v poljubno smer omogočata dve ločeni anteni, nameščeni na nasprotni strani plovila, da vsaka antena vidi neovirano poloblo:



$$F(\Theta, \Phi) = F_1(\Theta, \Phi) e^{j \frac{kh}{2} \cos \Theta} - F_2(\Theta, \Phi) e^{-j \frac{kh}{2} \cos \Theta}$$

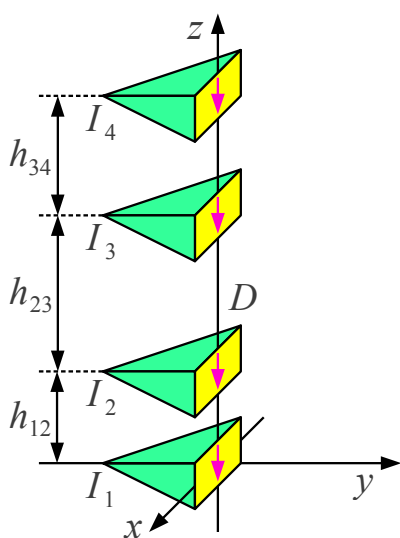
Nesmiselna skupina dveh anten

Poloblo odlično pokriva Huygensov izvor. Dva Huygensova izvora na gornji in spodnji strani plovila naj bi omogočala radijsko zvezo v poljubno

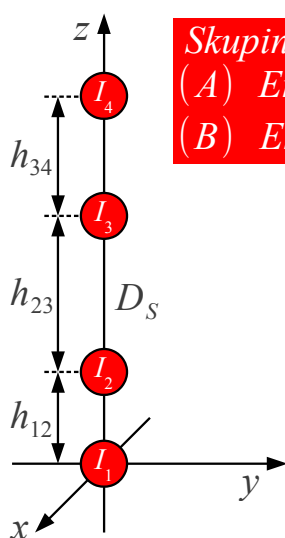
smer. Žal se delovanje opisane naprave poruši, ko obe anteni na nasprotnih straneh plovila povežemo vzporedno na skupni radijski oddajnik oziroma sprejemnik. Že pri debelini plovila oziroma razdalji med antenama komaj  $h = 10\lambda$  smerni diagram opisane skupine postane interferenčni vzorec z velikim številom ozkih snopov sevanja in globokimi minimumi med njimi. Smerni diagram s številnimi globokimi minimumi pomeni nezanesljivo radijsko zvezo s številnimi izpadi, pogosto celo slabše od tistega, kar bi dosegli z eno samo anteno...

Smerni diagram skupine je linearna naloga. Sevano polje skupine virov je vedno kazalčna vsota polja posameznih virov. V kazalčni vsoti je nujno upoštevati različne razdalje do faznih središč posameznih virov. Ob upoštevanju različnih amplitud in faz vzbujanja, različnih smernih diagramov, različnih polarizacij in različnih orientacij posameznih virov, naloga načrtovanja skupine postane nepregledna.

Naloga načrtovanja skupine se poenostavi, ko skupina vsebuje med sabo enake antene, ki so enako orientirane in enako polarizirane:

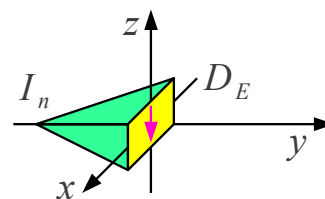


$F(\Theta, \Phi) \equiv$  smerni diagram skupine anten



$F_S(\Theta, \Phi) \equiv$  smerni diagram skupine neusmerjenih virov

*Skupina neusmerjenih virov*  
(A) Enaka razporeditev  $h_{mn}$   
(B) Enako napajanje  $I_n$



$F_E(\Theta, \Phi) \equiv$  smerni diagram elementa

- (1) Skupina samih enakih anten
- (2) Vse antene enako orientirane
- (3) Vse antene enako polarizirane

$$F(\Theta, \Phi) = F_S(\Theta, \Phi) \cdot F_E(\Theta, \Phi)$$

Pravilo o množenju smernih diagramov

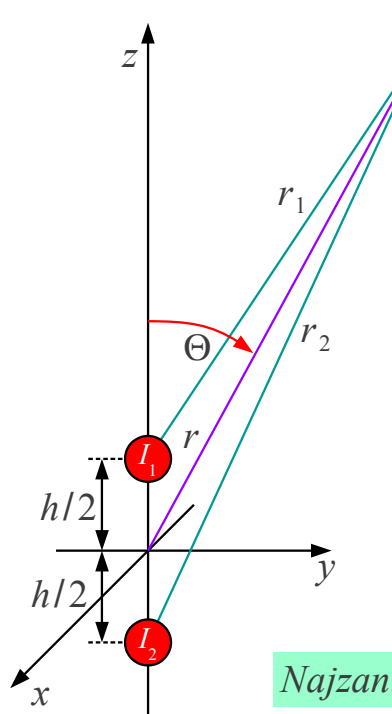
$$D \neq D_S \cdot D_E$$

Običajno  $D_E, D_S < D < D_S \cdot D_E$

Smerni diagram skupine anten  $F(\Theta, \Phi)$  je tedaj enak zmnožku smerne diagrama skupine neusmerjenih (izotropnih) virov  $F_S(\Theta, \Phi)$ , ki

so enako nameščeni v prostoru ter napajani z enakimi tokovi  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ... in smernega diagrama posameznega elementa skupine  $F_E(\Theta, \Phi)$  v koordinatnem izhodišču. Kar se pogosto privzame ampak običajno NE velja, skupna smernost ni enaka  $D \neq D_S \cdot D_E$  zmnožku smernosti skupine izotropnih virov in smernosti elementa.

Antene skupine so načeloma lahko poljubno nameščene v vseh treh dimenzijah prostora. Kako do več-dimenzijskih skupin, si bomo ogledali kasneje. Zaenkrat si nalogo poenostavimo za eno-dimenzijsko skupino z elementi na osi  $z$ . Najpreprostejši zgled sta dva neusmerjena izvora nameščena na  $z = \pm h/2$ :



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{1}_{E_1} \alpha I_1 \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \vec{1}_{E_2} \alpha I_2 \frac{e^{-jkr_2}}{r_2}$$

*Fraunhofer*  $r > \frac{2h^2}{\lambda}$

$$\vec{1}_{E_1} \approx \vec{1}_{E_2} \approx \vec{1}_E \quad \frac{1}{r_1} \approx \frac{1}{r_2} \approx \frac{1}{r}$$

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (h/2)^2 - rh \cos \Theta} \approx r - \frac{h}{2} \cos \Theta$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (h/2)^2 + rh \cos \Theta} \approx r + \frac{h}{2} \cos \Theta$$

$$\vec{E} \approx \vec{1}_E \alpha \frac{e^{-jkr}}{r} \left[ I_1 e^{j\frac{kh}{2} \cos \Theta} + I_2 e^{-j\frac{kh}{2} \cos \Theta} \right]$$

*Najzanimivejši primer*  $|I_1| = |I_2| \rightarrow I_1 = I e^{j\phi/2} \quad I_2 = I e^{-j\phi/2}$

$$\vec{E} \approx \vec{1}_E \alpha I \frac{e^{-jkr}}{r} \left[ e^{j\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta\right)} + e^{-j\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta\right)} \right] = \vec{1}_E \alpha I \frac{e^{-jkr}}{r} 2 \cos \left( \frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta \right)$$

$$F(\Theta, \Phi) = \cos \left( \frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta \right)$$

Dva neusmerjena (izotropna) vira

Na velikih razdaljah v Fraunhoferjevem področju  $r > 2h^2/\lambda$  postanejo razlike v smeri in amplitudi električnega polja nepomembne. Učinek skupine je interferenčni pojav zaradi razlike v fazi, ki nastane zaradi različnih razdalj  $r_1 \neq r_2$ . Razdalji računamo s kosinusnem izrekom, ki ga na velikih razdaljah smemo poenostaviti tudi pri fazi.

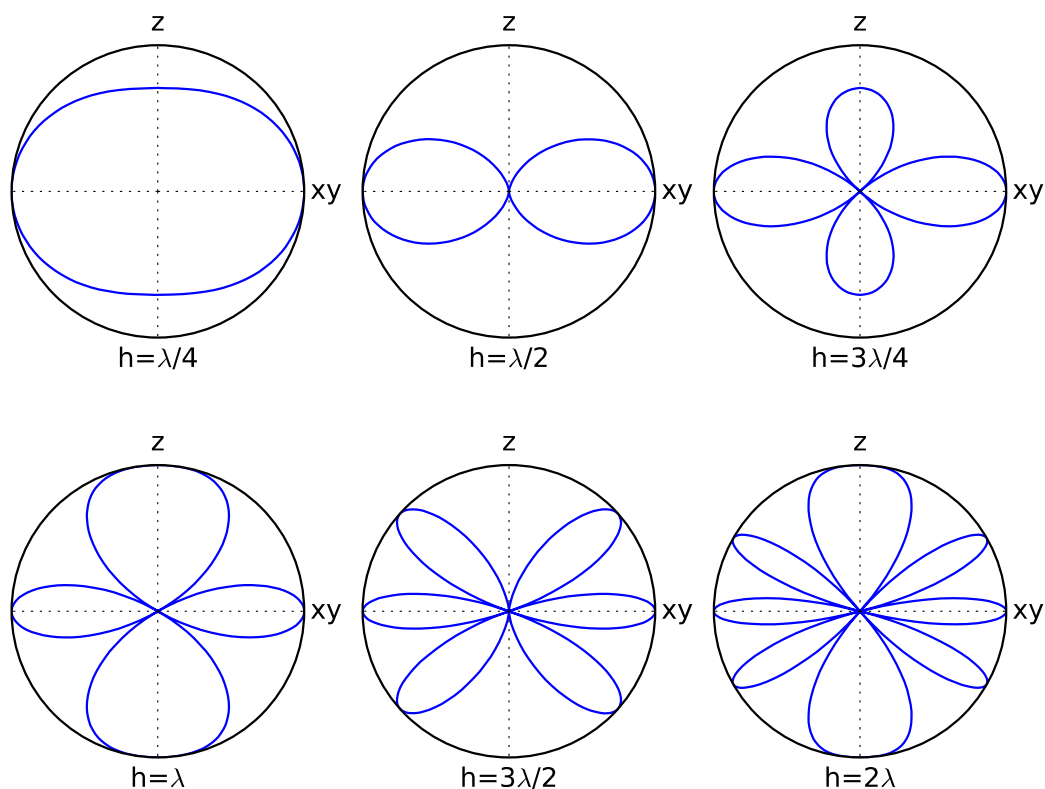
Učinek skupine dveh virov je največji, ko sta tokova enako velika  $|I_1| = |I_2|$ . V primeru različnih amplitud tokov  $|I_1| \neq |I_2|$  se učinek skupine

hitro izgubi v motečih pojavih pri razširjanju valovanja, kot so odboji od predmetov v okolici anten. Najzanimivejši primer  $|I_1|=|I_2|$  opiše fazna razlika vzbujanja virov  $\phi$ . Glede na en sam neusmerjen vir daje skupina dveh takšnih virov dvakratno polje in smerni diagram, ki je funkcija razdalje  $h$  med viroma in razlike v fazi vzbujanja  $\phi$ :

$$F(\Theta, \Phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{hk}{2} \cos \Theta\right) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \pi \frac{h}{\lambda} \cos \Theta\right)$$

Skupine anten običajno imenujemo po namenu. Bočna skupina (angleško: broadside array) največ seva v ravnini  $xy$ , torej pravokotno oziroma bočno na os  $z$ , v kateri so postavljeni viri. Očna skupina (angleško: end-fire array) največ seva v osi postavljanja virov, torej v smeri  $+z$  oziroma  $-z$ .

Načrtovanje bočne skupine preprosto zahteva sofazno vzbujanje obeh virov oziroma  $\phi=0$ . Učinek razdalje  $h$  med viroma je razviden iz nekaj značilnih zgledov:

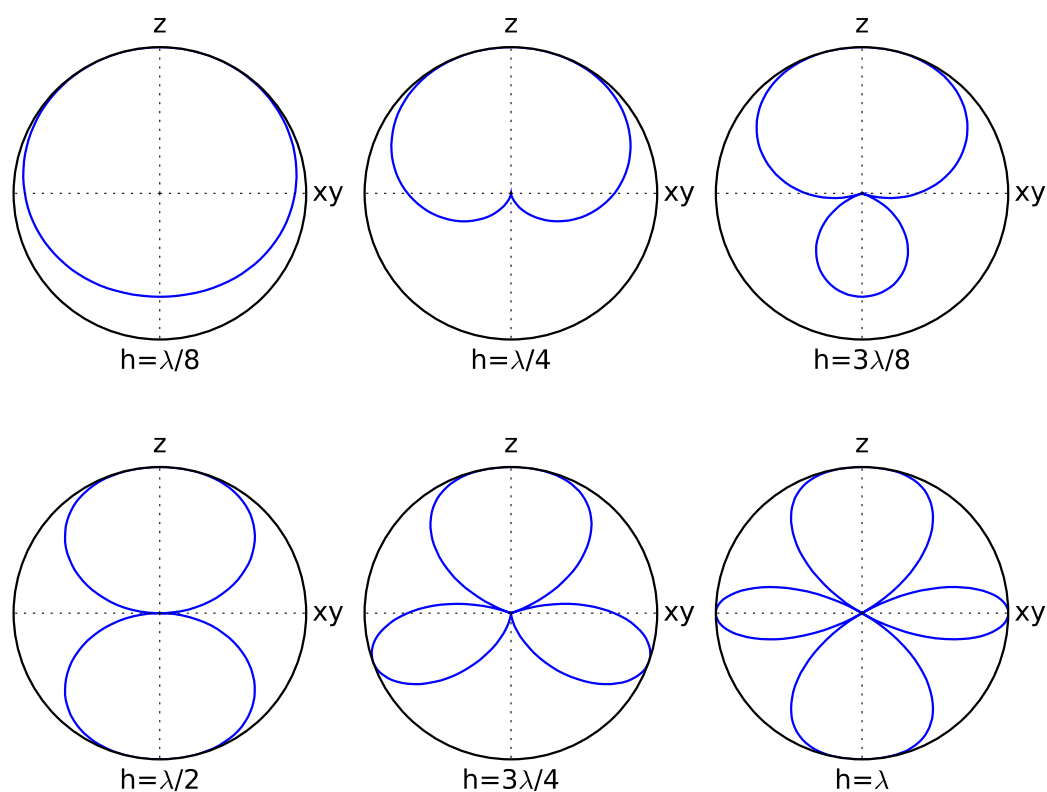


Smerni diagrami bočnih skupin  $\phi=0$

Na majhnih razdaljah  $h \leq \lambda/4$  med viroma je učinek bočne skupine

komaj viden. Na velikih razdaljah  $h \geq \lambda$  med viroma ima smerni diagram bočne skupine številne liste enake velikosti in globoke ničle med njimi, kar je večinoma nezaželeno oziroma neuporabno. Bočna skupina ima uporaben smerni diagram na razdaljah  $\lambda/2 \leq h \leq 3\lambda/4$  z enim samim, rotacijsko-simetričnim glavnim snopom v ravnini  $xy$  in dvema šibkima stranskima listoma v smereh  $\pm z$ .

Načrtovanje osne skupine ni samoumevno, saj dopušča različne možne izbire fazne razlike vzbujanja  $\phi$ . Preprosta izbira  $\phi = -kh$  daje največjo kazalčno vsoto v smeri osi  $+z$ . Žal izbira  $\phi = -kh$  ne daje največje smernosti osne skupine, o tem več kasneje. Učinek razdalje  $h$  med viroma je razviden iz nekaj značilnih zgledov:



Smerni diagrami osnih skupin  $\phi = -kh$

Na majhnih razdaljah  $h \leq \lambda/4$  med viroma je učinek osne skupine  $\phi = -kh$  komaj viden. Na velikih razdaljah  $h \geq \lambda/2$  med viroma ima smerni diagram osne skupine številne liste enake velikosti in globoke ničle med njimi, kar je večinoma nezaželeno oziroma neuporabno. Oсна skupina  $\phi = -kh$  ima uporaben smerni diagram na razdaljah  $\lambda/4 \leq h \leq 3\lambda/8$  z enim samim glavnim snopom v smeri  $+z$  in šibkim stranskim listom v smeri  $-z$ .

Smernost  $D$  skupine dveh neusmerjenih virov dobimo z integracijo smernega diagrama  $F(\Theta, \Phi)$ . Pri tem nam je v veliko pomoč preprosta analitska rešitev integrala za poljubno razdaljo  $h$  med viroma in poljubno razliko v fazi vzbujanja  $\phi$ :

$$D = \frac{4\pi |F(\Theta_{MAX}, \Phi_{MAX})|^2}{\iint_{4\pi} |F(\Theta, \Phi)|^2 d\Omega}$$

$$F(\Theta, \Phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta\right)$$

$$\begin{aligned} \iint_{4\pi} |F(\Theta, \Phi)|^2 d\Omega &= \int_0^\pi \int_0^{2\pi} |F(\Theta, \Phi)|^2 \sin \Theta d\Theta d\Phi = \\ &= \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \left| \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta\right) \right|^2 \sin \Theta d\Theta d\Phi = 2\pi \int_0^\pi \left| \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta\right) \right|^2 \sin \Theta d\Theta = \\ &= 2\pi \int_{-1}^1 \left| \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{khu}{2}\right) \right|^2 du = \pi \int_{-1}^1 [1 + \cos(\phi + khu)] du = \\ &= \pi \left[ 2 + \frac{\sin(\phi + kh) - \sin(\phi - kh)}{kh} \right] = 2\pi \left[ 1 + \frac{\sin(kh)}{kh} \cos \phi \right] \end{aligned}$$

$$D = \frac{2 |F(\Theta_{MAX}, \Phi_{MAX})|^2}{1 + \frac{\sin(kh)}{kh} \cos \phi}$$

$$F(\Theta_{MAX} = \pi/2, \Phi_{MAX}) = 1$$

Bočna skupina  $\rightarrow \phi = 0$

$$D = \frac{2}{1 + \frac{\sin(kh)}{kh}}$$

$$F(\Theta_{MAX} = 0, \Phi_{MAX}) = 1$$

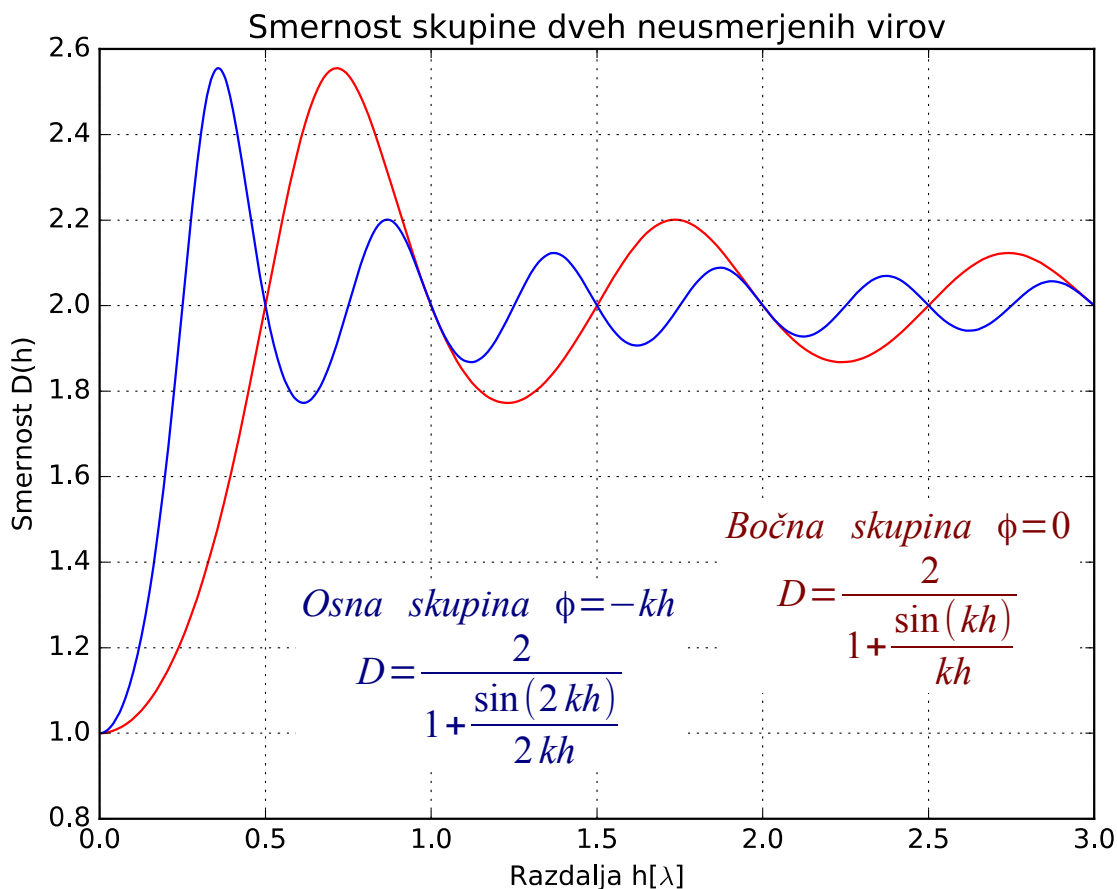
Oсна skupina  $\rightarrow \phi = -kh$

$$D = \frac{2}{1 + \frac{\sin(2kh)}{2kh}}$$

Smernost dveh virov

Bočna skupina  $\phi = 0$  največ seva v ravnini  $xy$ , kjer pri  $\Theta_{MAX} = \pi/2$  smerni diagram doseže  $F(\Theta_{MAX}) = 1$ . Osna skupina  $\phi = -kh$  največ seva v smeri osi  $+z$ , kjer pri  $\Theta_{MAX} = 0$  smerni diagram prav tako doseže  $F(\Theta_{MAX}) = 1$ . Pri izračunu smernosti osne skupine upoštevamo  $\sin(kh) \cos(-kh) = \sin(2kh)/2$ , kar daje silno podoben rezultat bočni skupini z izjemo faktorja  $2kh$ .

Smernost bočne skupine  $\phi = 0$  dveh neusmerjenih virov in smernost osne skupine  $\phi = -kh$  dveh neusmerjenih virov je smiselno prikazati kot funkcijo razdalje med viroma  $h$ :



Na majhnih razdaljah  $h \rightarrow 0$  gresta smernosti obeh, bočne skupine  $\phi = 0$  in osne skupine  $\phi = -kh$ , proti enoti  $D \rightarrow 1 = 0\text{dBi}$ , saj na majhnih razdaljah skupina nima učinka na smerni diagram. Na velikih razdaljah  $h \gg \lambda$  opletata smernosti obeh, bočne skupine  $\phi = 0$  in osne skupine  $\phi = -kh$ , proti vrednosti  $D \rightarrow 2 \approx 3\text{dBi}$ . Slednji rezultat je varljiv, saj mu pripada neuporaben smerni diagram s številnimi listi in ostrimi ničlami med njimi.

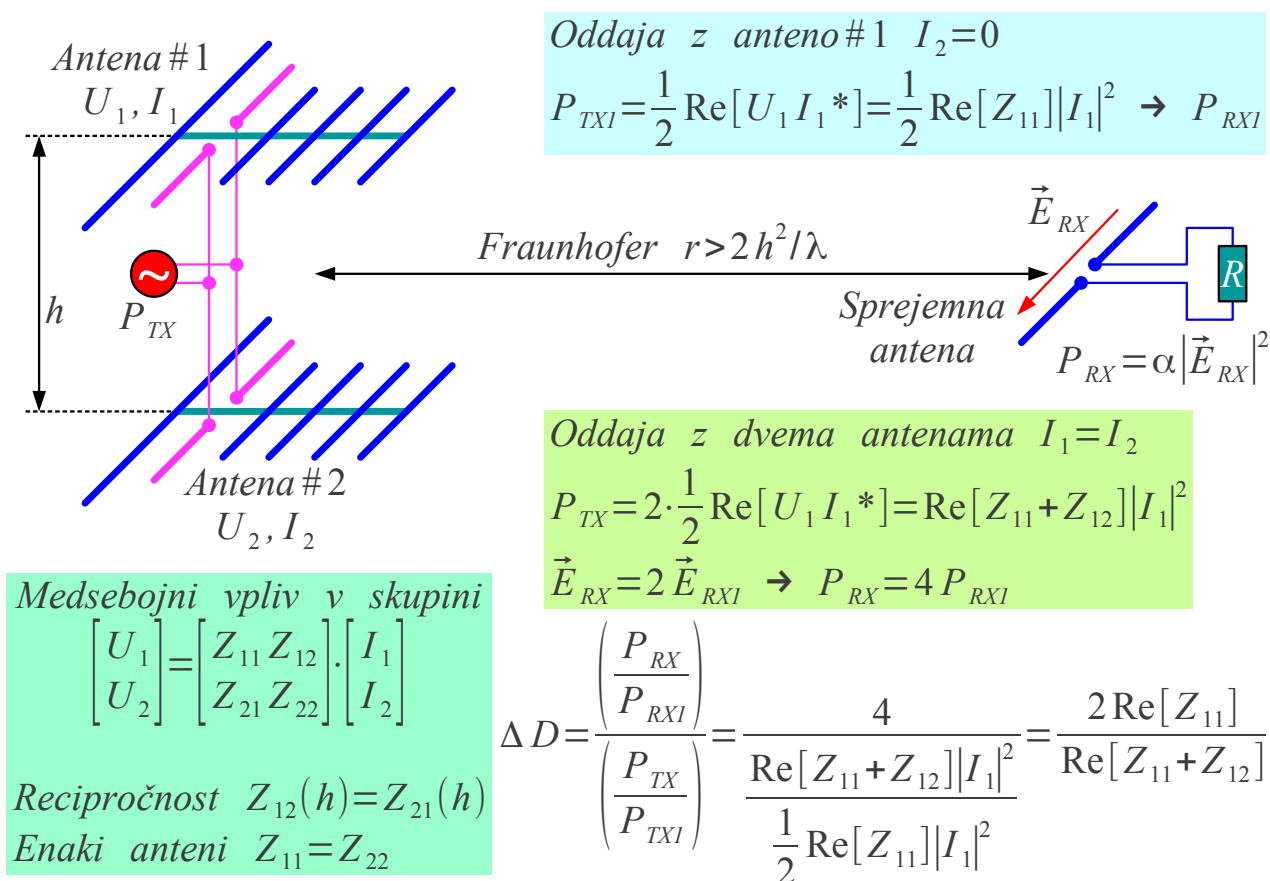
Bočna skupina  $\phi = 0$  dveh neusmerjenih virov doseže največjo smernost  $D_{MAX} \approx 2.56 \approx 4.07\text{dBi}$  pri razdalji med viroma  $h \approx 0.715\lambda$ , kar popolnoma ustreza smiselnemu smernemu diagramu z enim samim, rotacijsko-simetričnim glavnim snopom v ravnini  $xy$  in dvema šibkima stranskima listoma v smereh  $\pm z$ .

Osna skupina  $\phi = -kh$  dveh neusmerjenih virov doseže največjo smernost  $D_{MAX} \approx 2.56 \approx 4.07\text{dBi}$  pri razdalji med viroma  $h \approx 0.357\lambda$ , kar popolnoma ustreza smiselnemu smernemu diagramu z enim samim glavnim snopom v smeri  $+z$  in šibkim stranskim listom v smeri  $-z$ .

Smernost skupine dveh neusmerjenih virov žal ne daje odgovora, kako

sestaviti učinkovito skupino iz dveh med sabo enakih anten s poljubnim smernim diagramom  $F_E(\Theta, \Phi) \neq konst.$  Pri iskanju največje smernosti  $D_{MAX} = ?$  @  $h_{MAX} = ?$  bi morali integrirati skupni smerni diagram  $F(\Theta, \Phi) = F_S(\Theta, \Phi) \cdot F_E(\Theta, \Phi)$ . Žal znamo natančno izračunati samo smerni diagram skupine neusmerjenih virov  $F_S(\Theta, \Phi)$ , smernega diagrama tržno-dobavljivih anten  $F_E(\Theta, \Phi)$  pa zadosti natančno ne poznamo.

Meritev funkcije dveh spremenljivk  $F_E(\Theta, \Phi)$  zahteva poleg merilne opreme dosti prostora. Vrtenje antene po dveh oseh  $\Theta$  in  $\Phi$  je zamudno. Popolnoma enakovreden rezultat za optimalno razdaljo  $h_{MAX}$  elementov bočne skupine in dosegljivo smernostjo  $D_{MAX}$  lahko dobimo z meritvijo medsebojne impedance dveh anten v skupini:



Medsebojna impedance v bočni skupini

Povečanje smernosti  $\Delta D$  oziroma dobitka bočne skupine izračunamo iz razmerja povečanja sprejete moči  $P_{RX}/P_{RXI}$  in povečanja moči oddajnika  $P_{TX}/P_{TXI}$ , ko oddajno skupino primerjamo z eno samo anteno. Če obnašanje oddajne skupine zapišemo z impedančno matriko



$[Z]$  , največja smernost ustreza minimumu realnega dela medsebojne impedance  $\operatorname{Re}[Z_{12}(h)]$  . Zahtevno meritev smernega diagrama  $F_E(\Theta, \Phi)$  torej nadomesti dosti bolj preprosta meritev lastne impedance  $Z_{11}$  in medsebojne impedance  $Z_{12}(h)$  kot funkcija razdalje med antenama.

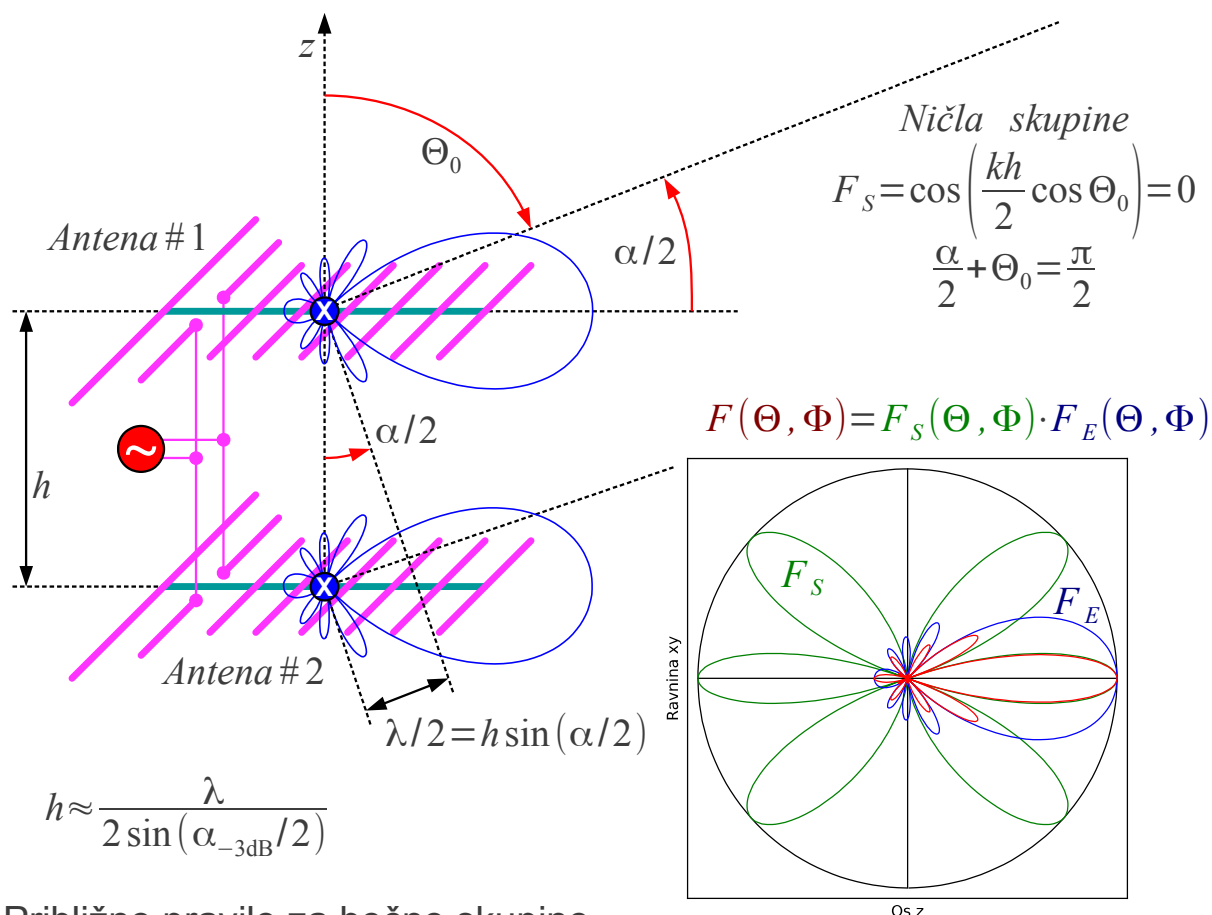
V grobem je  $\operatorname{Re}[Z_{12}(h)]$  sorazmeren obratni vrednosti funkcije smernosti  $D(h)$  . Na majhnih razdaljah  $h \rightarrow 0$  gre v bočni skupini medsebojna impedanca  $Z_{12}(h) \rightarrow Z_{11}$  proti lastni impedanci in učinek bočne skupine izgine. Na velikih razdaljah  $h \gg \lambda$  medsebojni vpliv izgine  $Z_{12}(h) \rightarrow 0$  .

V primeru majhnega medsebojnega vpliva  $|Z_{12}(h)| \ll |Z_{11}|$  velja celo groba ocena smernosti  $D \approx D_S \cdot D_E$  . Obratno je v primeru velikega medsebojnega vpliva  $|Z_{12}(h)| \approx |Z_{11}|$  množenje smernosti  $D \neq D_S \cdot D_E$  popolnoma nezanesljivo.

Ko medsebojni vpliv  $|Z_{12}(h)| \ll |Z_{11}|$  smemo zanemariti, lahko optimalno razdaljo  $h$  med antenama, ki zagotavlja smiselno smernost  $D$  in sprejemljivo slabljenje stranske stranskih listov smernega diagrama bočne skupine, določimo še na preprostejši način s približnim pravilom.

Smernega diagrama tržno-dobavljivih anten  $F_E(\Theta, \Phi)$  običajno natančno ne poznamo. Navedena smernost tržno-dobavljivih anten je pogosto izračunana po Krausovem približku  $D \approx 4\pi/(\alpha_E \alpha_H)$  brez celovite meritve smernega diagrama. Še najbolj zanesljiva podatka tržno-dobavljivih anten sta širini  $-3\text{dB}$  glavnega snopa  $\alpha_E$  v ravnini E oziroma  $\alpha_H$  v ravnini H.

Brez meritev oziroma temeljitih izračunov v tem primeru bočno skupino načrtujemo tako, da prva ničla smernega diagrama bočne skupine neusmerjenih virov sovpadе s širino  $-3\text{dB}$  glavnega snopa. Smerni diagram skupine razreže glavni snop elementa v več snopov. Optimalna izbira razdalje  $h$  med antenama učinkovito zožuje glavni snop in hkrati omejuje novonastale stranske snope:



### Približno pravilo za bočno skupino

V prikazanem primeru je bočna skupna sestavljena v ravnini H. Optimalno razdaljo med antenama ocenimo  $h_H \approx \lambda / [2 \sin(\alpha_H/2)]$ . Optimalna razdalja v ravnini E je nekoliko drugačna  $h_E \approx \lambda / [2 \sin(\alpha_E/2)]$ . V primeru različnih širin snopov elementa  $\alpha_E \neq \alpha_H$  optimalni razdalji v obeh ravninah nista enaki  $h_E \neq h_H$ .

Načrtovanje osne skupine ni tako preprosto. Pri sestavljanju osne skupine se lahko zgodi, da en element v skupini zasenči sevanje enakega elementa za njim. Izbira  $\phi = -kh$  sicer daje osno skupino, ki pa ne dosega največje možne smernosti pri izbrani razdalji  $h$ . Kot osno skupino lahko obravnavamo tudi anteno Yagi-Uda, kjer umetni dielektrik vsiljuje nižjo fazno hitrost od faze hitrosti v praznem prostoru. Sevanje posameznih palčk antene Yagi-Uda se torej ne seštevata sofazno!

Največjo smernost osne skupine dveh neusmerjenih virov poiščemo z iskanjem ničle odvoda  $\partial D / \partial \phi = 0$ . Rezultat iskanja je kvadratna enačba s spremenljivko  $\sin \phi$ , ki ima dve rešitvi. Povrhu ima enačba  $u = \sin \phi$  dve rešitvi. Izmed vseh rešitev je treba poiskati tisto, ki daje največjo smernost  $D_{MAX}$ . Pri majhnih razdaljah  $h < \lambda/4$  dokaj dobro velja približek  $\phi \approx \pi + kh/3$  :

$$\text{Osna skupina } |F(\Theta_{MAX}=0, \Phi_{MAX})| < 1$$

$$F(\Theta, \Phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta\right)$$

$$D = \frac{2|F(\Theta_{MAX}, \Phi_{MAX})|^2}{1 + \frac{\sin(kh)}{kh} \cos \phi} = \frac{2\left|\cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2}\right)\right|^2}{1 + \frac{\sin(kh)}{kh} \cos \phi} = \frac{1 + \cos(\phi + kh)}{1 + \frac{\sin(kh)}{kh} \cos \phi}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \phi} = 0 = \frac{-\sin(\phi + kh) \left[1 + \frac{\sin(kh)}{kh} \cos \phi\right] - [1 + \cos(\phi + kh)] \left[-\frac{\sin(kh)}{kh} \sin \phi\right]}{\left[1 + \frac{\sin(kh)}{kh} \cos \phi\right]^2}$$

$$0 = \left[ \frac{\sin^2(kh)}{(kh)^2} - 2 \frac{\sin(kh)}{kh} \cos(kh) + 1 \right] \sin^2 \phi - 2 \frac{\sin^2(kh)}{kh} \left[ \frac{\sin(kh)}{kh} - \cos(kh) \right] \sin \phi + \left[ \frac{\sin^4(kh)}{(kh)^2} - \sin^2(kh) \right]$$

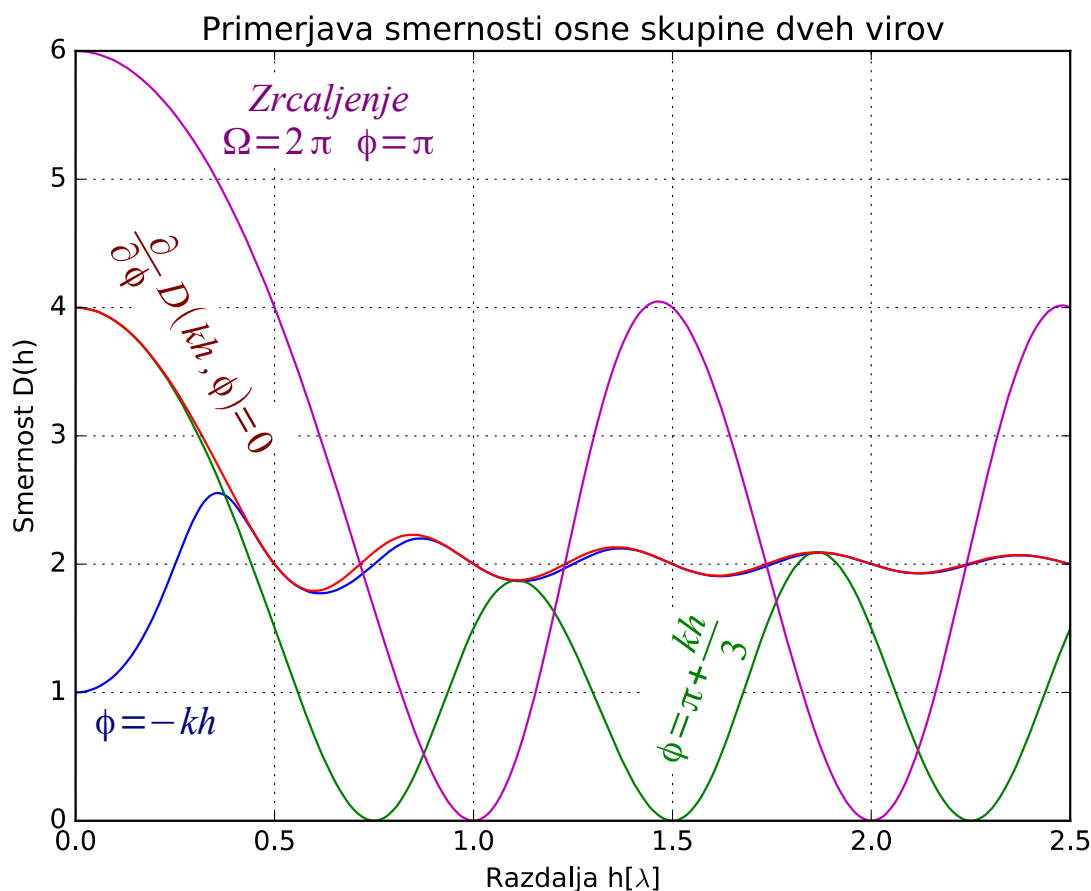
$$u = \sin \phi \rightarrow \phi = \arcsin u \text{ ali } \phi = \pi - \arcsin u$$

Največja smernost osne skupine

$$\text{Približek } h < \frac{\lambda}{4} \rightarrow \phi \approx \pi + \frac{kh}{3}$$

Rezultat računanja daje sumljiv rezultat  $D_{MAX} \rightarrow 4 \approx 6\text{dBi}$ , ko gre razdalja med neusmerjenima viroma  $h \rightarrow 0$  proti nič in sta vira napajana protifazno  $\phi \rightarrow \pi$ . Dva enaka vira na majhni razdalji napajana protifazno skoraj nič ne sevata! Sevalna upornost takšne antene  $R_s \rightarrow 0$  gre proti nič, prav tako gre proti nič sevalni izkoristek  $\eta \rightarrow 0$  in dobitek resnične antene  $G \rightarrow 0$  iz kovine s končno prevodnostjo. Ob upoštevanju vezja za prilagoditev impedance gre tudi pasovna širina  $B \rightarrow 0$  proti nič. Skratka v praksi neuporaben teoretski rezultat!

Rezultat teoretskega izračuna lahko s pridom uporabimo, če izrišemo celoten potek smernosti  $D(h)$  kot funkcijo razdalje med antenama za različne postopke načrtovanja osne skupine. Iz poteka smernosti  $D(h)$  razberemo, da je skrbna izbira fazne razlike  $\phi$  pomembna predvsem pri majhnih razdaljah  $h \leq \lambda/4$  med viroma:



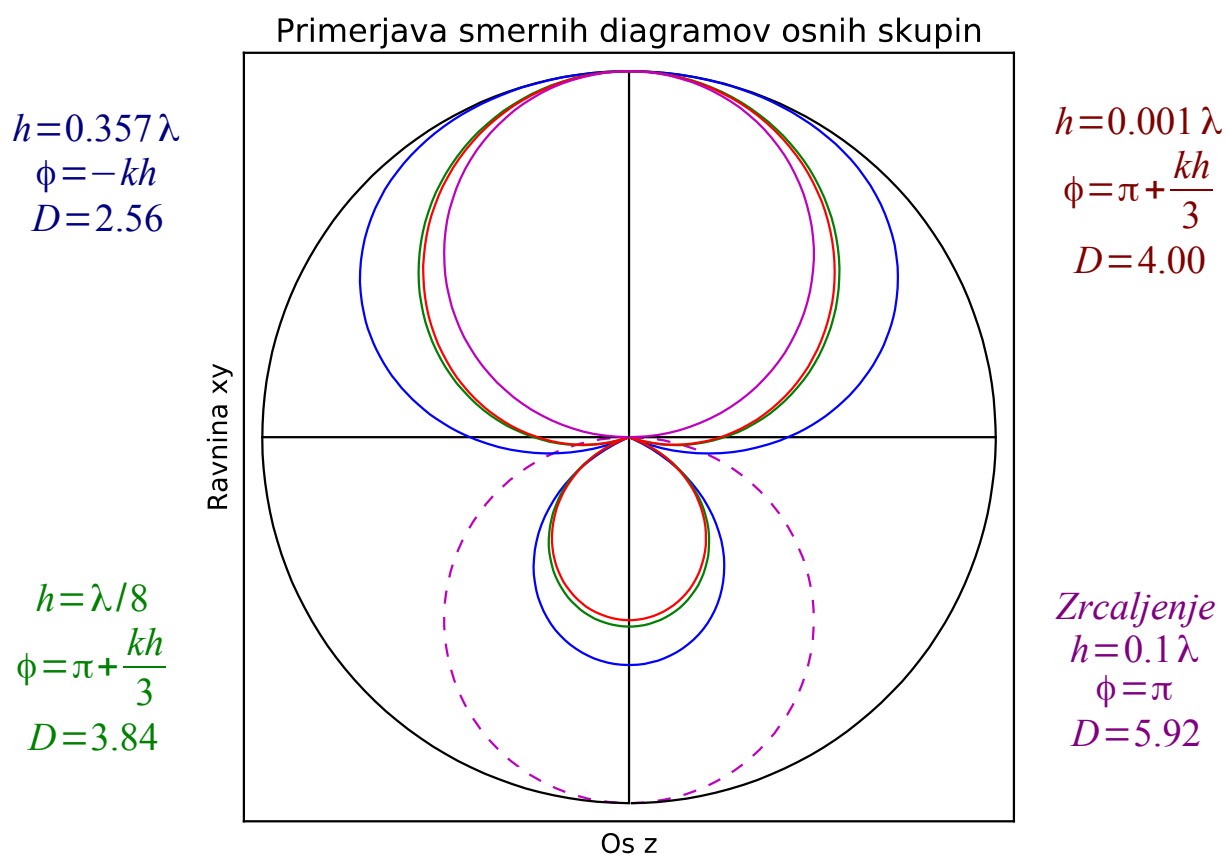
Praktična uporaba teoretskega rezultata je med radioamaterji priljubljena antena HB9CV. Slednja uporablja dva polvalovna dipola na razdalji  $h = \lambda/8$ , ki sta napajana skoraj protifazno. Manjši popravek faze omogočata različni dolžini obeh dipolov. Skrbno načrtovana HB9CV dosega višjo smernost in večji dobitek od trikrat večje antene Yagi-Uda s tremi polvalovnimi palčkami na nosilcu dolžine kar  $l \approx 0.4\lambda$  !

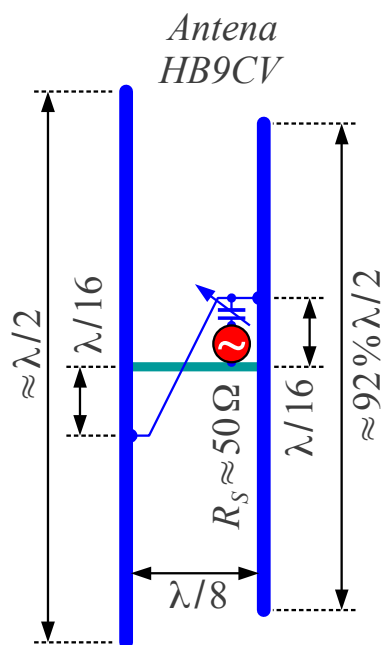
Prktično zelo pomemben primer je protifazno napajanje osne skupine oziroma izbira  $\phi = \pi$  ne glede na razdaljo  $h$  med antenama. Takšna skupina seva enako v smereh  $\pm z$ . Pri majhnih razdaljah  $h \rightarrow 0$  gre smernost dveh neusmerjenih virov proti  $D \rightarrow 3 \approx 4.77\text{dBi}$  ob neuporabni upornosti  $R_s \rightarrow 0$ , slabem izkoristku  $\eta \rightarrow 0$  in izgubi dobitka  $G \rightarrow 0$ .

Skupino s protifaznim napajanjem običanjo ne gradimo iz dveh enakih anten, pač pa dobimo z zrcaljenjem ene same antene v veliki kovinski steni. Antena pred veliko kovinsko steno seva samo v eno poloblo  $\Omega = 2\pi$ . V drugo poloblo seva zrcalna slika antene na drugi strani kovinske plošče. Ker zrcalna slika v resnici ne obstaja, ne odžira moči oddajnika. Smernost neusmerjenega vira pred kovinsko ploščo se podvoji na  $D \rightarrow 6 \approx 7.78\text{dBi}$  pri  $h \rightarrow 0$ . Visoka smernost preproste antene je račun brez krčmarja: kako

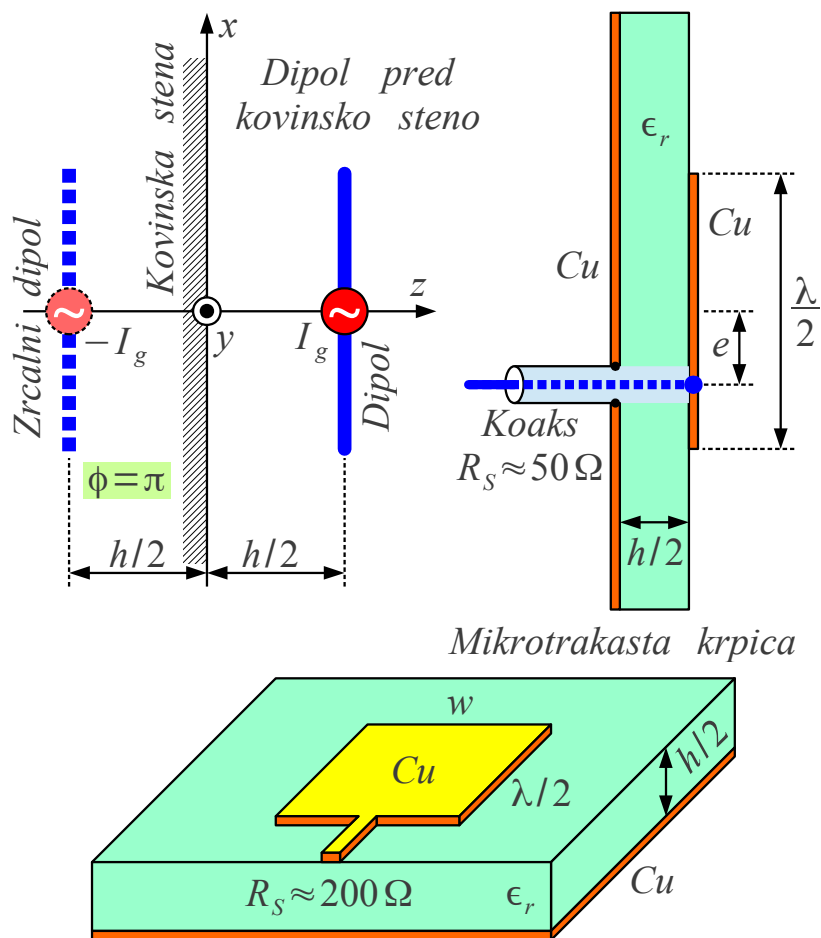
velika mora biti velika kovinska plošča?

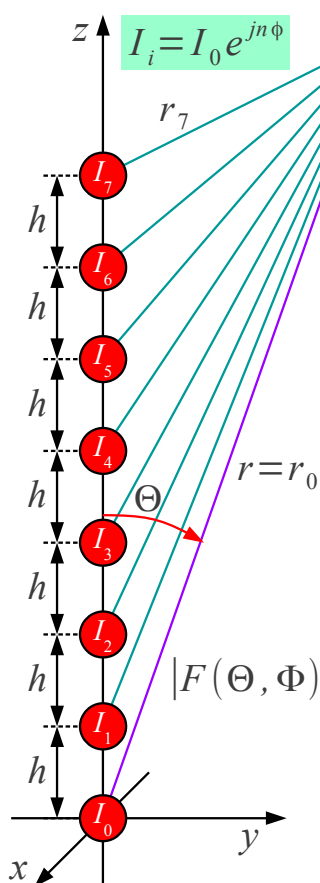
Razlike v smernosti različnih osnih skupin je najlažje razložiti s primerjavo pripadajočih smernih diagramov. Najširši glavni snop in najmočnejši vzvratni snop ima skupina  $\phi = -kh$  celo pri optimalni izbiri  $h = 0.357\lambda$ . Izbira  $\phi = \phi + kh/3$  daje ožji glavni snop in šibkejši vzvratni snop, razlika med neuporabnim  $h \rightarrow 0$  in priljubljenim  $h = \lambda/8$  je zelo majhna. Končno, zrcaljenje daje najožji glavni snop brez vzvratnega snopa:





Izvedbe osnih skupin





$$\vec{E} = \sum_{n=0}^{m-1} \vec{E}_i$$

$$\vec{E}_i = \vec{1}_{E_i} \alpha I_i \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \approx \vec{1}_E \frac{\alpha I_0}{r} e^{jn\phi} e^{-jkr_n}$$

$$r_i = \sqrt{r^2 + (ih)^2 - 2rih \cos \Theta} \approx r - ih \cos \Theta$$

$$\vec{E} \approx \vec{1}_E \frac{\alpha I_0}{r} \sum_{n=0}^{m-1} e^{-j(kr_n - n\phi)} \approx \vec{1}_E \alpha I_0 \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=0}^{m-1} e^{jn(\phi + kh \cos \Theta)}$$

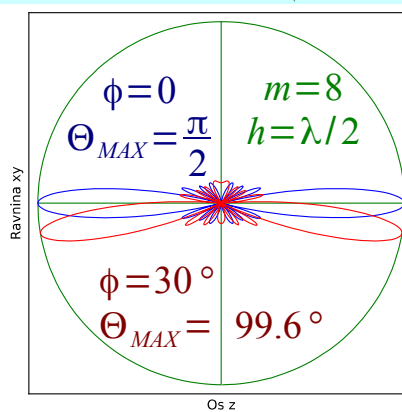
$$b = e^{j(\phi + kh \cos \Theta)}$$

$$|b| = 1$$

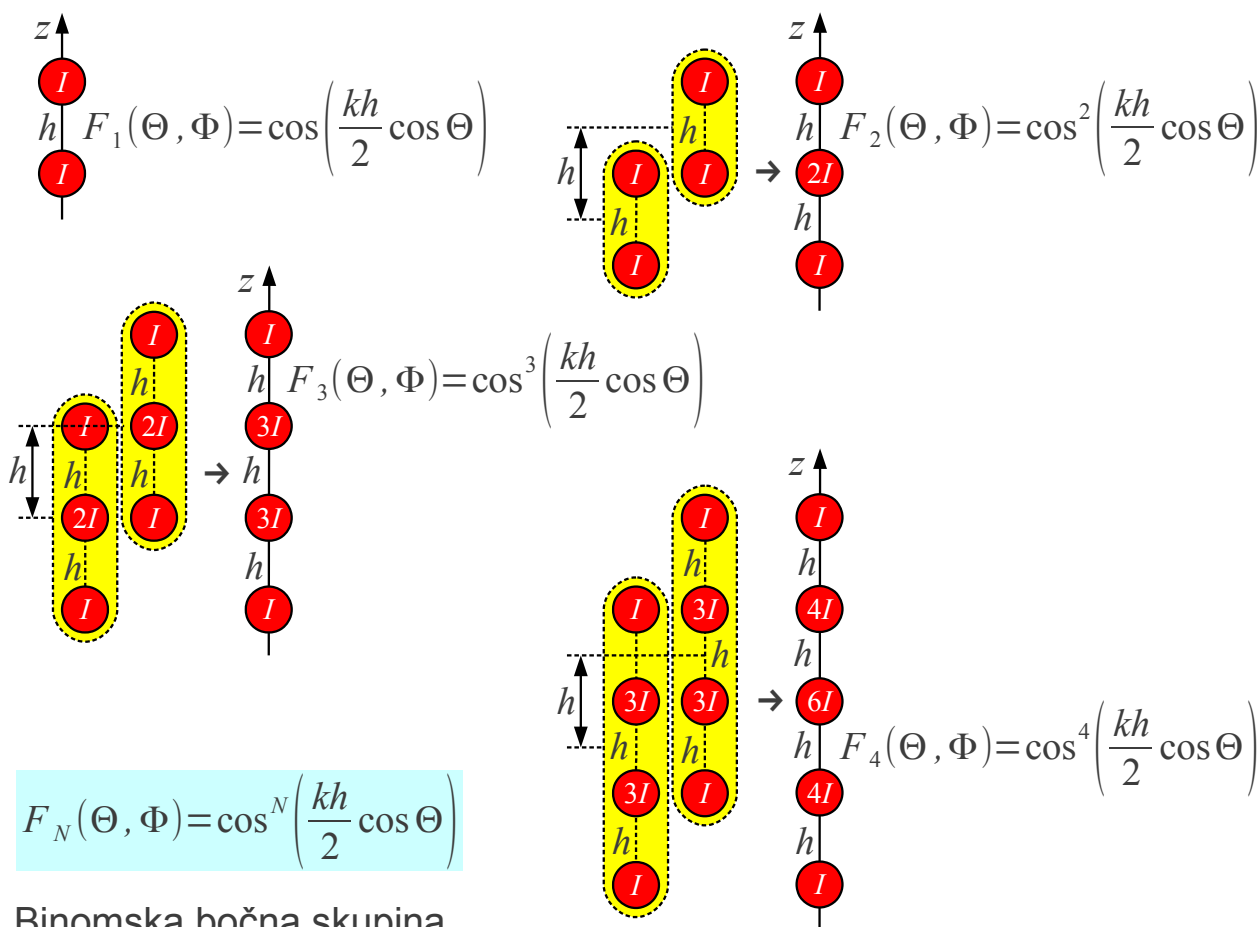
$$\sum_{n=0}^{m-1} b^n = \frac{b^m - 1}{b - 1} = \left( b^{\frac{m-1}{2}} \right) \frac{\sin \left( m \frac{\phi + kh \cos \Theta}{2} \right)}{\sin \left( \frac{\phi + kh \cos \Theta}{2} \right)}$$

$$|F(\Theta, \Phi)| = \frac{1}{m} \left| \frac{\sin \left( m \frac{\phi + kh \cos \Theta}{2} \right)}{\sin \left( \frac{\phi + kh \cos \Theta}{2} \right)} \right|$$

$$\Theta_{MAX} = \arccos \left( \frac{-\phi}{kh} \right)$$



Enakomerna skupina izvorov



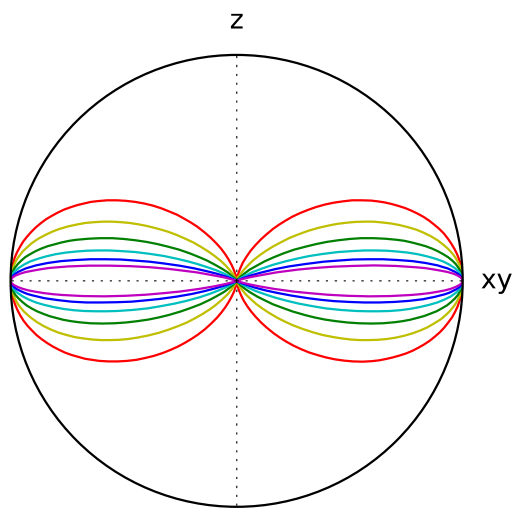


*Bočna binomska skupina*

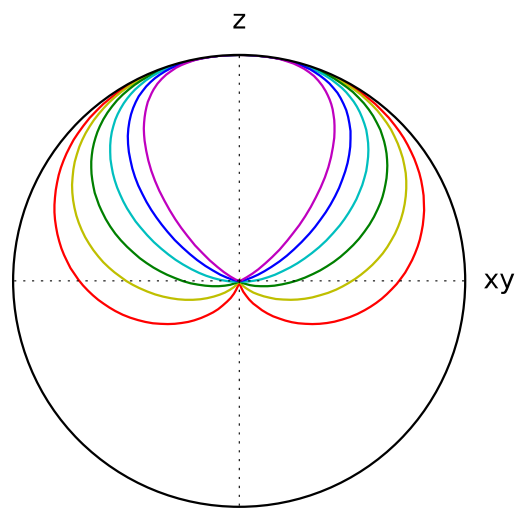
$$F_N(\Theta, \Phi) = \cos^N \left( \frac{kh}{2} \cos \Theta \right)$$

*Osna binomska skupina*

$$F_N(\Theta, \Phi) = \cos^N \left( \frac{kh}{2} (\cos \Theta - 1) \right)$$



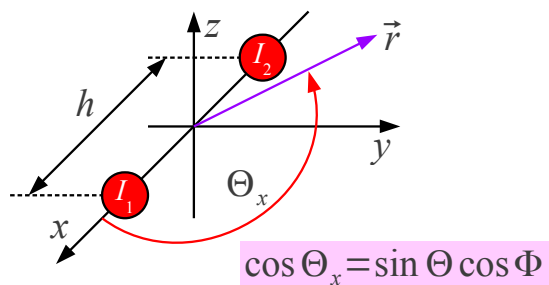
$h = \lambda/2 \quad \phi = 0 \quad N = 1, 2, 4, 8, 16, 32$



$h = \lambda/4 \quad \phi = -kh \quad N = 1, 2, 4, 8, 16, 32$

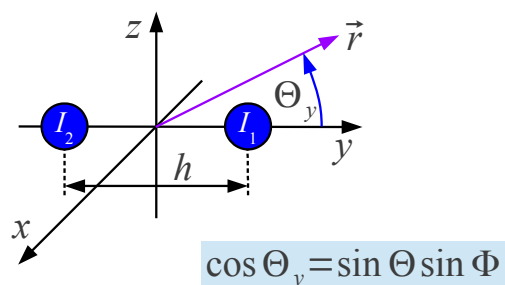
Smerni diagrami binomskih skupin

$$F_S(\Theta, \Phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta_x\right)$$



$$F_S(\Theta, \Phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \sin \Theta \cos \Phi\right)$$

$$F_S(\Theta, \Phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \cos \Theta_y\right)$$

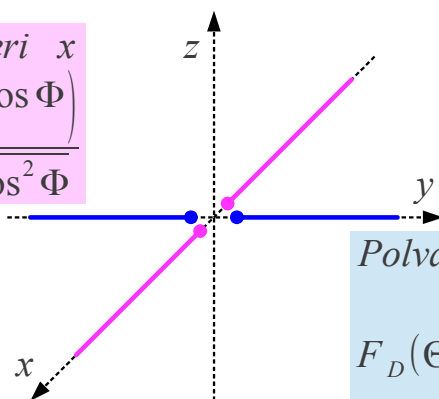


$$F_S(\Theta, \Phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \sin \Theta \sin \Phi\right)$$

*Polvalovni dipol v smeri x*  
 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \Theta \cos \Phi\right)$   
 $F_D(\Theta, \Phi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \Theta \cos \Phi\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi}}$

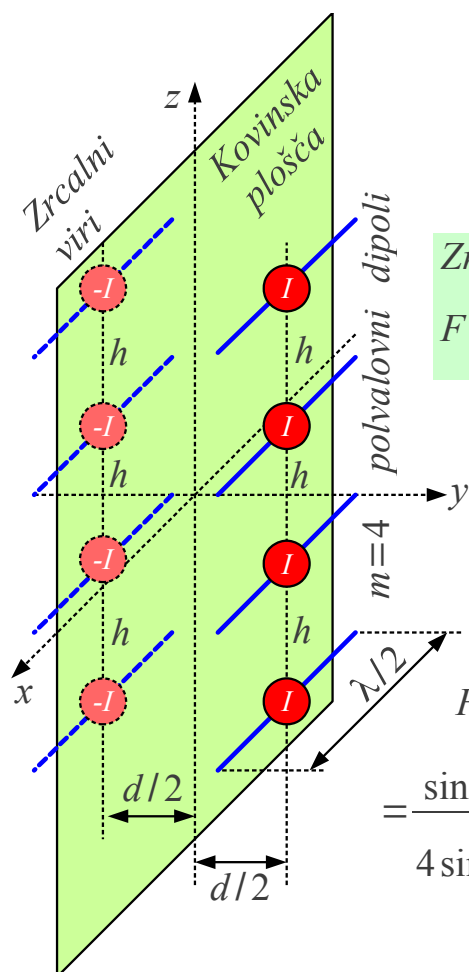
$$\sin \Theta_x = \sqrt{1 - \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi}$$

Obračanje anten



$$\sin \Theta_y = \sqrt{1 - \sin^2 \Theta \sin^2 \Phi}$$

*Polvalovni dipol v smeri y*  
 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \Theta \sin \Phi\right)$   
 $F_D(\Theta, \Phi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \Theta \sin \Phi\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \Theta \sin^2 \Phi}}$



*Polvalovni dipol v smeri osi x*

$$F_E(\Theta, \Phi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \Theta_x\right)}{\sin \Theta_x} = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \Theta \cos \Phi\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi}}$$

*Zrcaljenje v smeri osi y →  $\phi = -\pi$*

$$F_{SI}(\Theta, \Phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kd}{2} \cos \Theta_y\right) = \sin\left(\frac{kd}{2} \sin \Theta \sin \phi\right)$$

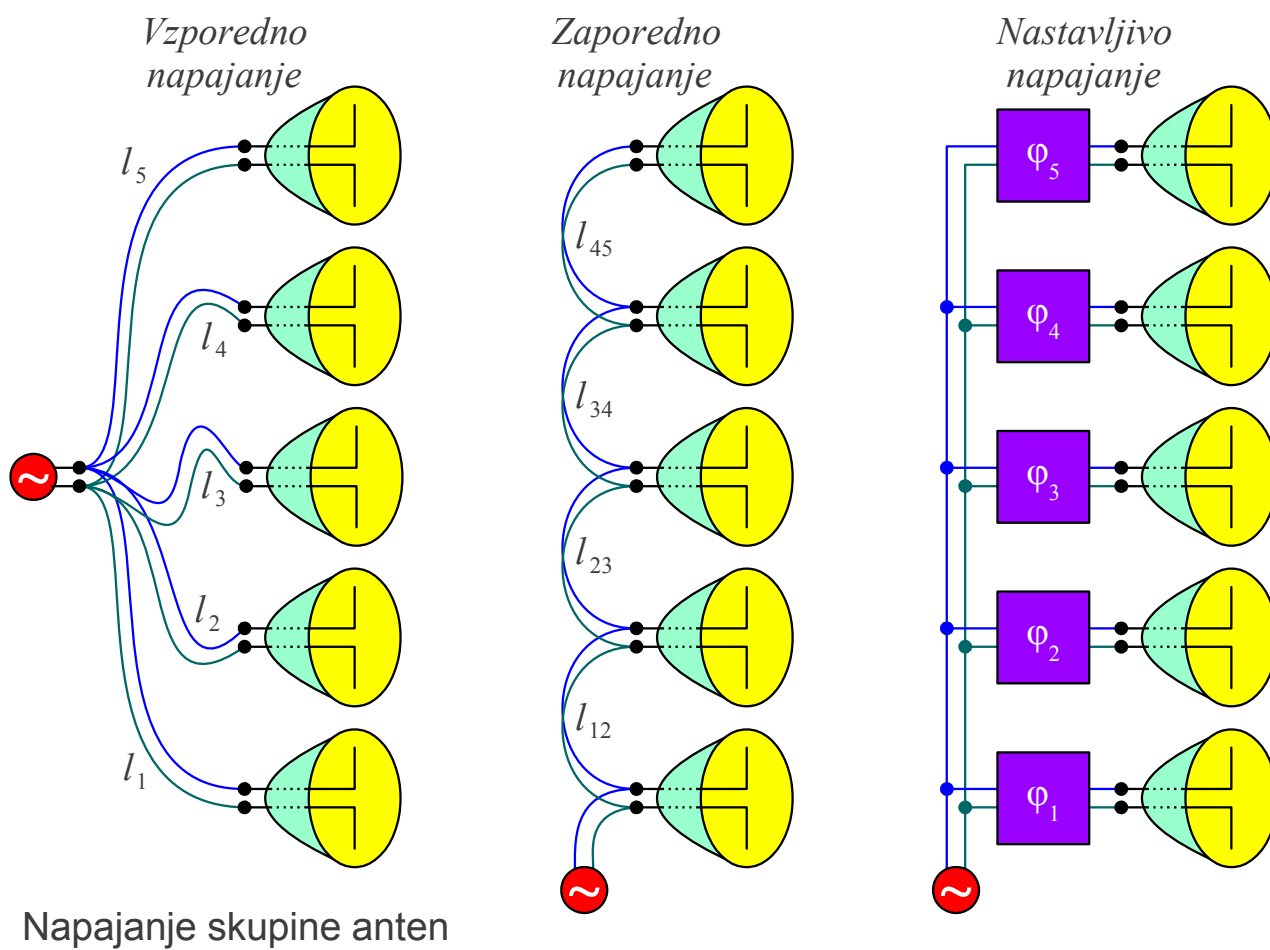
*Enakomerna bočna skupina v smeri osi z*

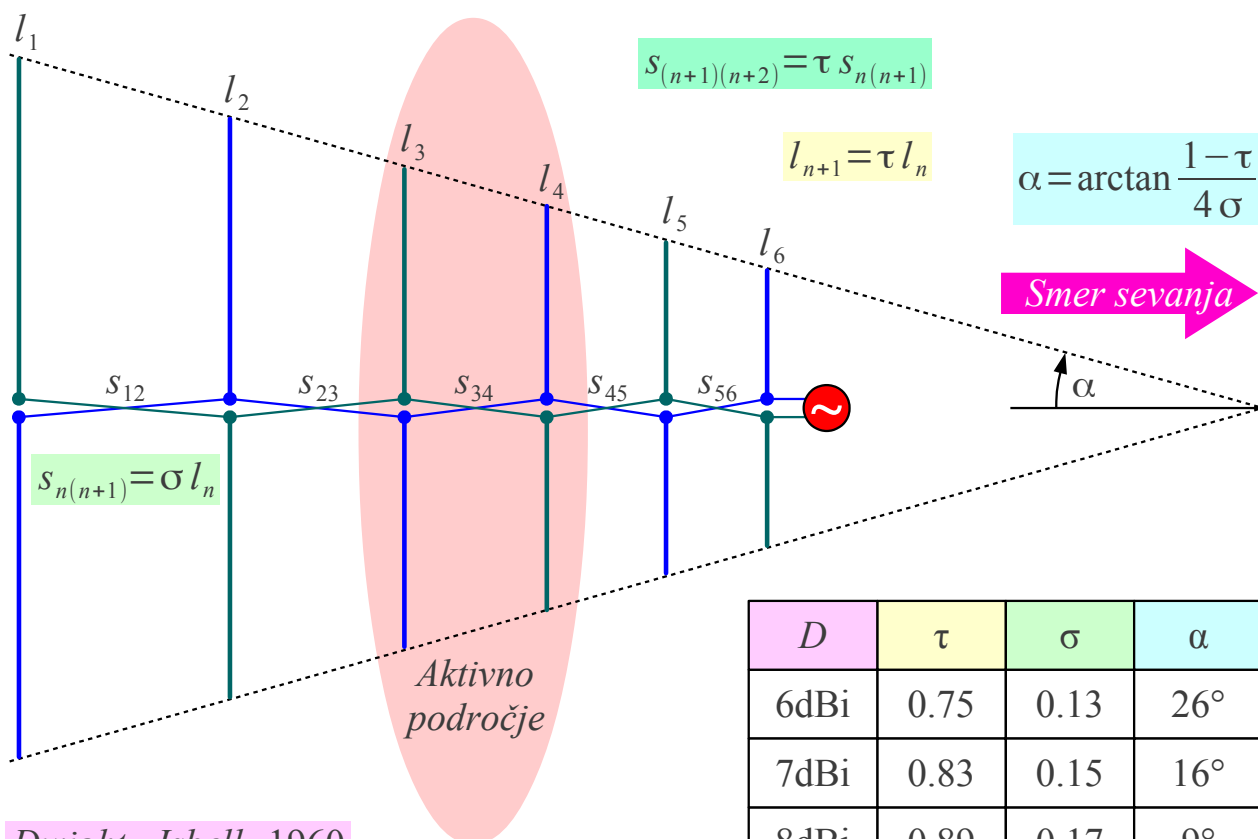
$$F_{S2}(\Theta, \Phi) = \frac{\sin\left(m \frac{kh}{2} \cos \Theta\right)}{m \sin\left(\frac{kh}{2} \cos \Theta\right)} = \frac{\sin(2kh \cos \Theta)}{4 \sin\left(\frac{kh}{2} \cos \Theta\right)}$$

$$F(\Theta, \Phi) = F_{S2}(\Theta, \Phi) \cdot F_{SI}(\Theta, \Phi) \cdot F_E(\Theta, \Phi) =$$

$$= \frac{\sin(2kh \cos \Theta)}{4 \sin\left(\frac{kh}{2} \cos \Theta\right)} \sin\left(\frac{kd}{2} \sin \Theta \sin \phi\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \Theta \cos \Phi\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi}}$$

Sestavljanje skupin





Dwight Isbell 1960

Logaritmično-periodična skupina dipolov

$D$	$\tau$	$\sigma$	$\alpha$
6dBi	0.75	0.13	26°
7dBi	0.83	0.15	16°
8dBi	0.89	0.17	9°
9dBi	0.94	0.19	5°

\* \* \* \* \*