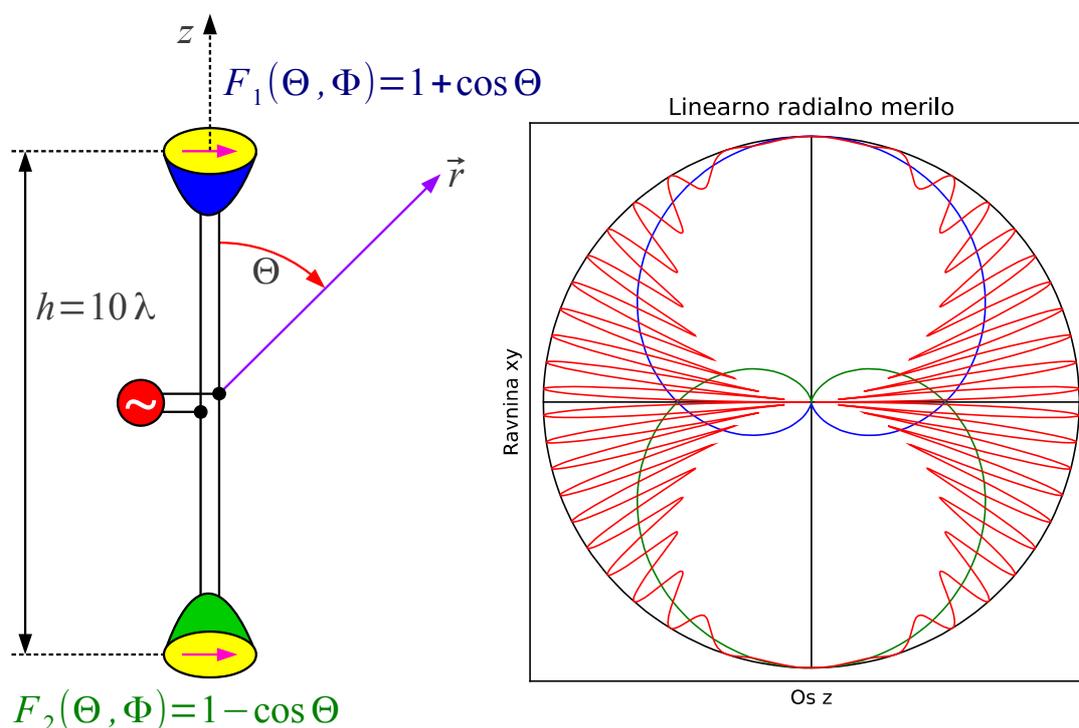


11. Skupine anten

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:



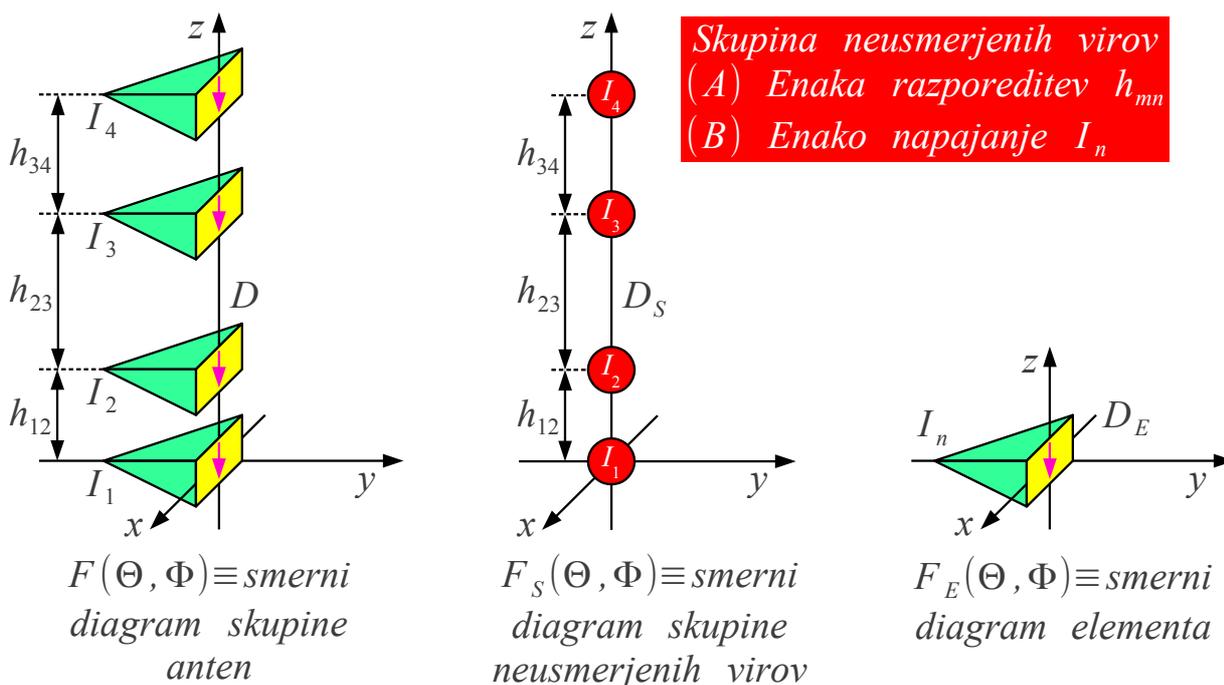
$$F(\Theta, \Phi) = F_1(\Theta, \Phi) e^{j \frac{kh}{2} \cos \Theta} - F_2(\Theta, \Phi) e^{-j \frac{kh}{2} \cos \Theta}$$

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...

Sevano polje skupine virov $\vec{E} = \sum \vec{E}_i$ je kazalčna in vektorska vsota polja posameznih virov. V kazalčni vsoti je nujno upoštevati različne razdalje do faznih središč posameznih virov. Naloga načrtovanja skupine postane nepregledna ob upoštevanju različnih amplitud in faz vzbujanja, različnih smernih diagramov, različnih polarizacij in različnih orientacij posameznih virov. Naloga načrtovanja skupine se poenostavi, ko skupina vsebuje med sabo enake antene, ki so enako orientirane in enako polarizirane:



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

Pravilo o množenju smernih diagramov

Smerni diagram skupine anten $F(\Theta, \Phi)$ je tedaj enak zmnožku smernega diagrama skupine neusmerjenih (izotropnih) virov $F_S(\Theta, \Phi)$, ki so enako nameščeni v prostoru ter napajani z enakimi tokovi I_1, I_2, \dots

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 kasneje. Zaenkrat nalogo poenostavimo za eno-dimenzijsko skupino z elementi na osi z . Najpreprostejši zgled sta dva neusmerjena izvora 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.

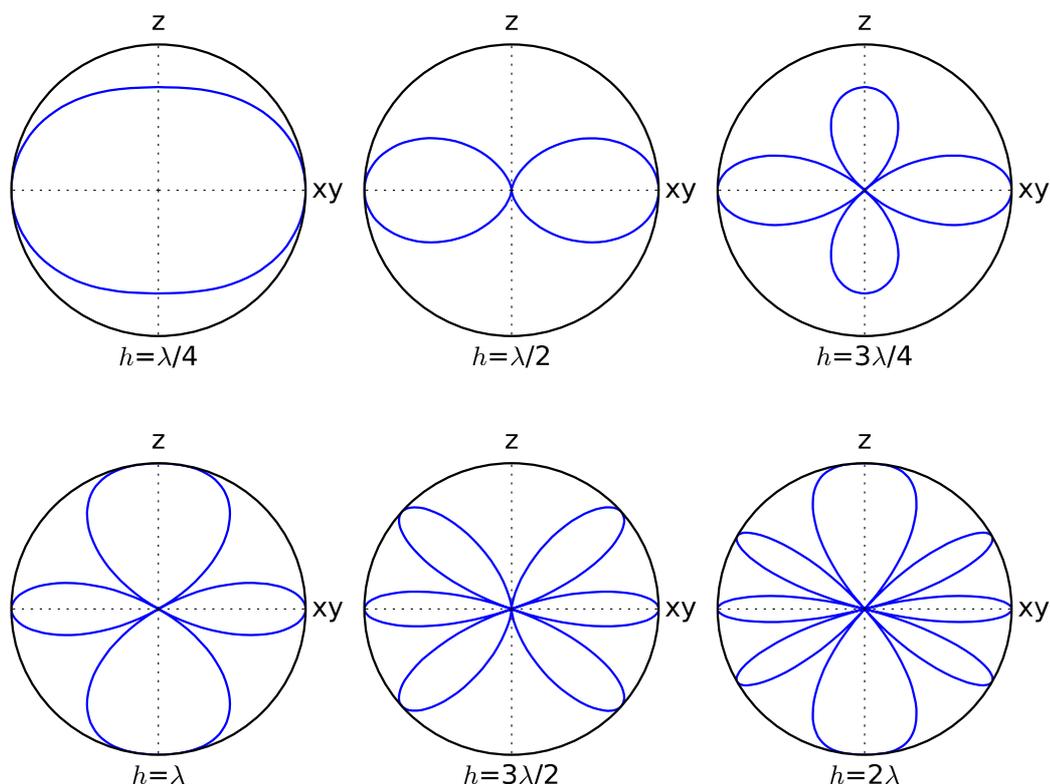
Učinek skupine dveh virov je največji, ko sta tokova enako velika $|I_1| = |I_2|$. V primeru različnih amplitud tokov $|I_1| \neq |I_2|$ se učinek skupine hitro izgubi v motečih pojavih pri razširjanju valovanja, kot so odboji od predmetov v okolici anten. Najzanimivejši primer $|I_1| = |I_2|$ opiše fazna

razlika vzbujanja virov ϕ . 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 ϕ :

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

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. Osna 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:

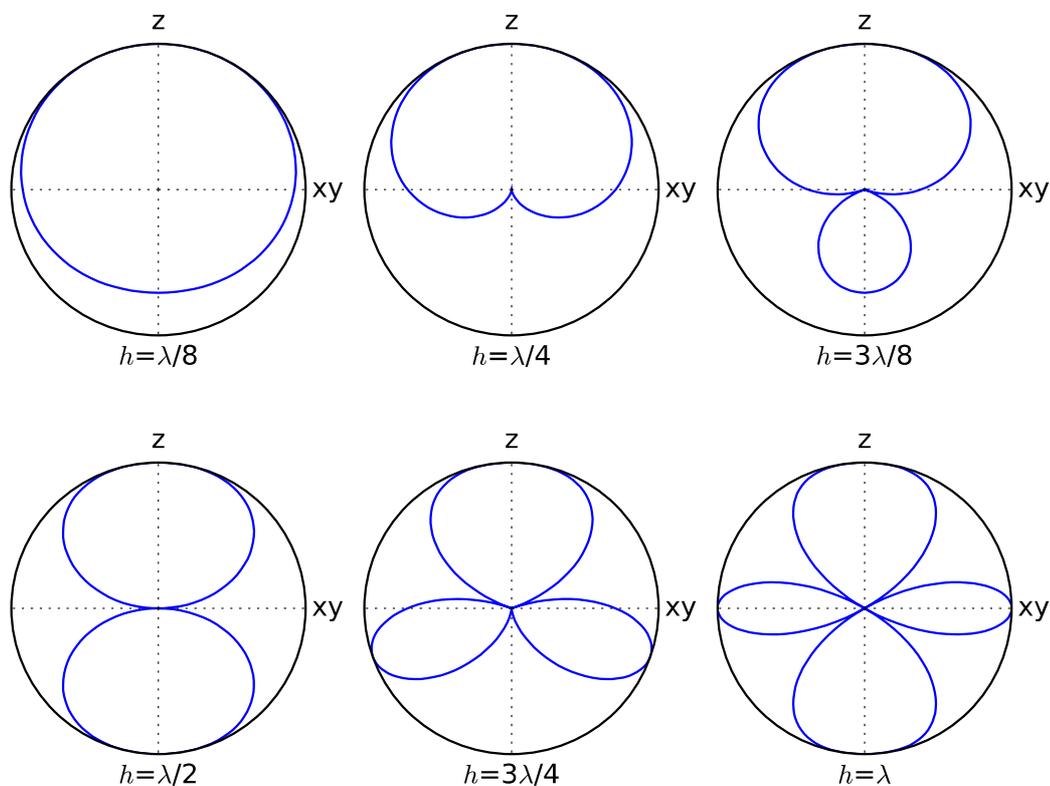


Smerni diagrami bočnih skupin $\phi=0$

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

večinoma ni zaželeno niti uporabno. 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 ϕ . Preprosta izbira $\phi = -kh$ daje največjo kazalčno vsoto v smeri osi $+z$. Žal izbira $\phi = -kh$ ne daje največje smernosti osne skupine, več o tem kasneje. Učinek razdalje h med viroma je razviden iz nekaj značilnih zgledov:



Smerni diagrami osnih skupin $\phi = -kh$

Na majhnih razdaljah $h \leq \lambda/8$ 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 večinoma ni zaželeno niti uporabno. Osa 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 vzratni smeri $-z$.

Smernost D skupine dveh neusmerjenih izvorov 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 ϕ :

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

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

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

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

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

Bočna skupina $\rightarrow \phi = 0$

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

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

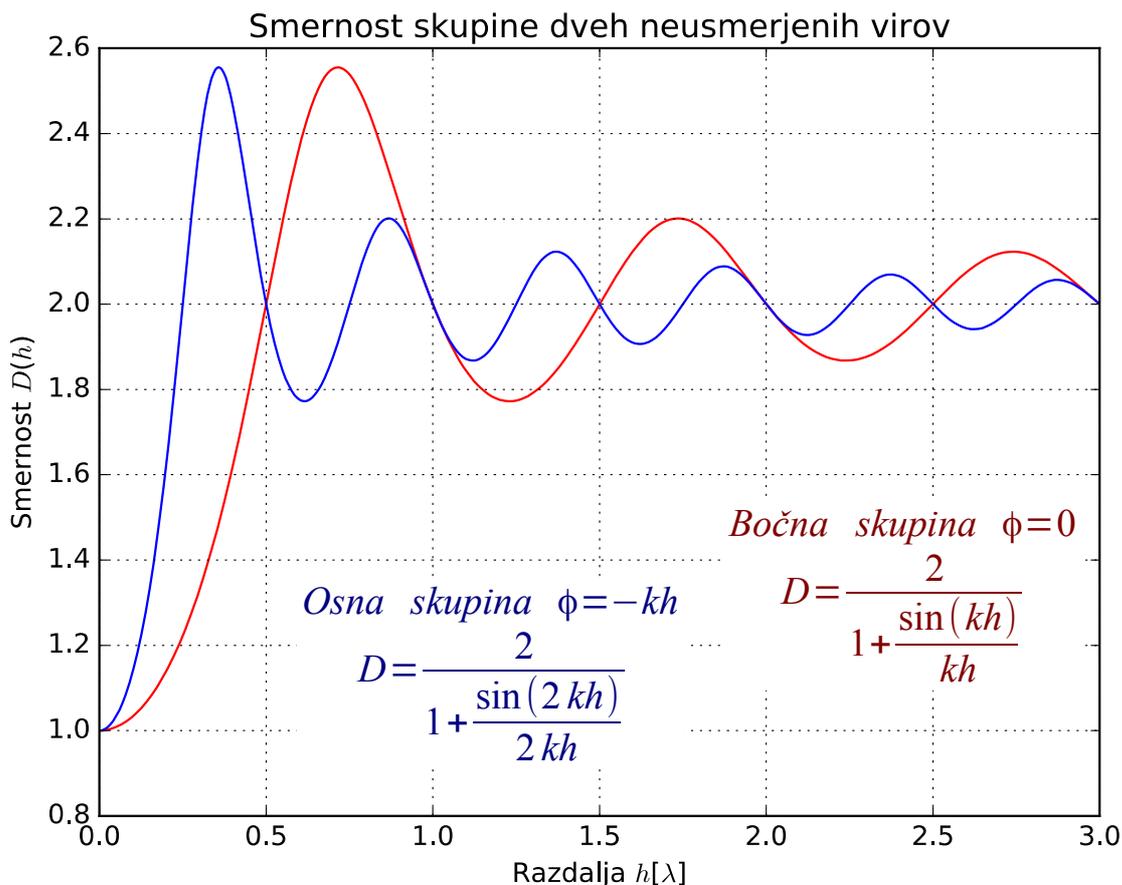
Osna skupina $\rightarrow \phi = -kh$

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

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 dvakratnega 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 :



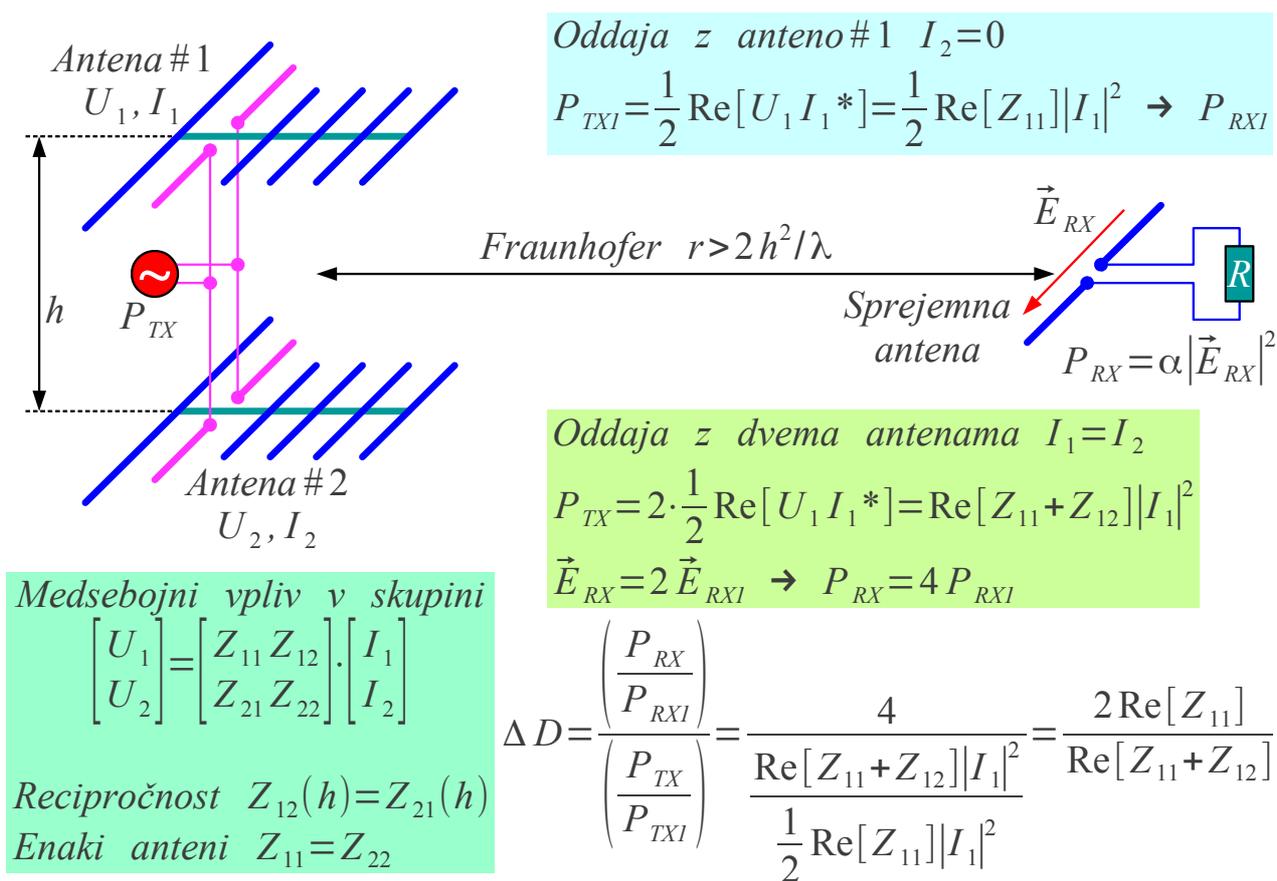
Na majhnih razdaljah $h \rightarrow 0$ gresta smernosti obeh, bočne skupine $\phi = 0$ in osne skupine $\phi = -kh$, proti enoti $D \rightarrow 1 = 0\text{dBi}$, saj na majhnih razdaljah skupina nima učinka na smerni diagram. Na velikih razdaljah $h \gg \lambda$ opletata smernosti obeh, bočne skupine $\phi = 0$ 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 vzratni 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 $D_{MAX} = ?$ na pripadajoči razdalji $h_{MAX} = ?$ 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 tržično-dobavljivih anten $F_E(\Theta, \Phi)$ običajno ne poznamo zadosti natančno.

Meritev funkcije dveh spremenljivk $F_E(\Theta, \Phi)$ zahteva poleg primerne merilne opreme dosti prostora. Vrtenje antene po dveh oseh Θ in Φ 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 impedanca v bočni skupini

Povečanje smernosti ΔD 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. Največja smernost ustreza minimumu moči oddajnika P_{TX} oziroma

minimumu realnega dela medsebojne impedance $\operatorname{Re}[Z_{12}(h)]$, če obnašanje oddajne skupine zapišemo z impedančno matriko $[Z]$. 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 $Z_{12}(h) \rightarrow 0$.

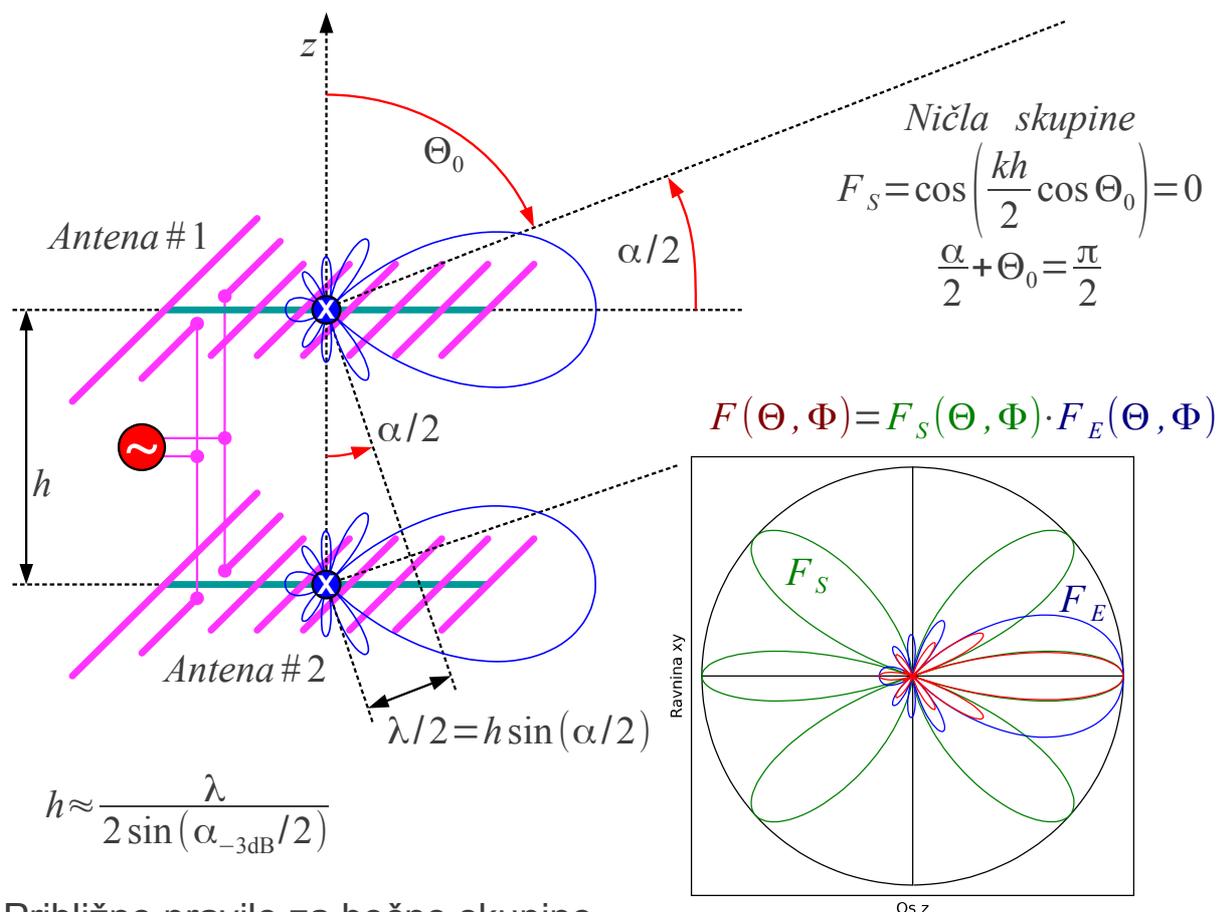
V primeru majhnega medsebojnega vpliva $|Z_{12}(h)| \ll |Z_{11}|$ velja celo groba ocena smernosti $D \approx 2 D_E$. Obratno v primeru znatnega medsebojnega vpliva $|Z_{12}(h)| \approx |Z_{11}|$ podvojevanja smernosti $D \neq 2 D_E$ ne pričakujemo.

Ko smemo medsebojni vpliv $|Z_{12}(h)| \ll |Z_{11}|$ 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 in integracije smernega diagrama. Še najbolj zanesljiva podatka tržno-dobavljivih anten sta širini -3dB glavnega snopa α_E v ravnini E oziroma α_H v ravnini H.

Brez meritev oziroma temeljitih izračunov v tem primeru bočno skupino načrtujemo tako, da najbližji ničli smernega diagrama bočne skupine neusmerjenih virov sovpadata s širino -3dB glavnega snopa. Najbližjima ničloma smernega diagrama skupine ustreza razliki poti $|r_2 - r_1| = \lambda/2 = h \sin(\alpha_{-3\text{dB}}/2)$.

Smerni diagram skupine dveh virov 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 $h_E \approx \lambda / [2 \sin(\alpha_E/2)]$. 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. Antena Yagi-Uda celo izkorišča polje vsake palčke, da z njim vzbuja naslednjo palčko.

Izbira $\phi = -kh$ sicer daje osno skupino z največjo kazalčno vsoto, ki pa ne dosega največje možne smernosti. Kot osno skupino lahko obravnavamo tudi anteno Yagi-Uda, kjer umetni dielektrik vsiljuje nižjo fazno hitrost od fазne hitrosti v praznem prostoru. Sevanje posameznih palčk antene Yagi-Uda se torej ne sešteva 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. Povrh 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 $\phi \approx \pi + kh/3$:

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

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

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

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

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

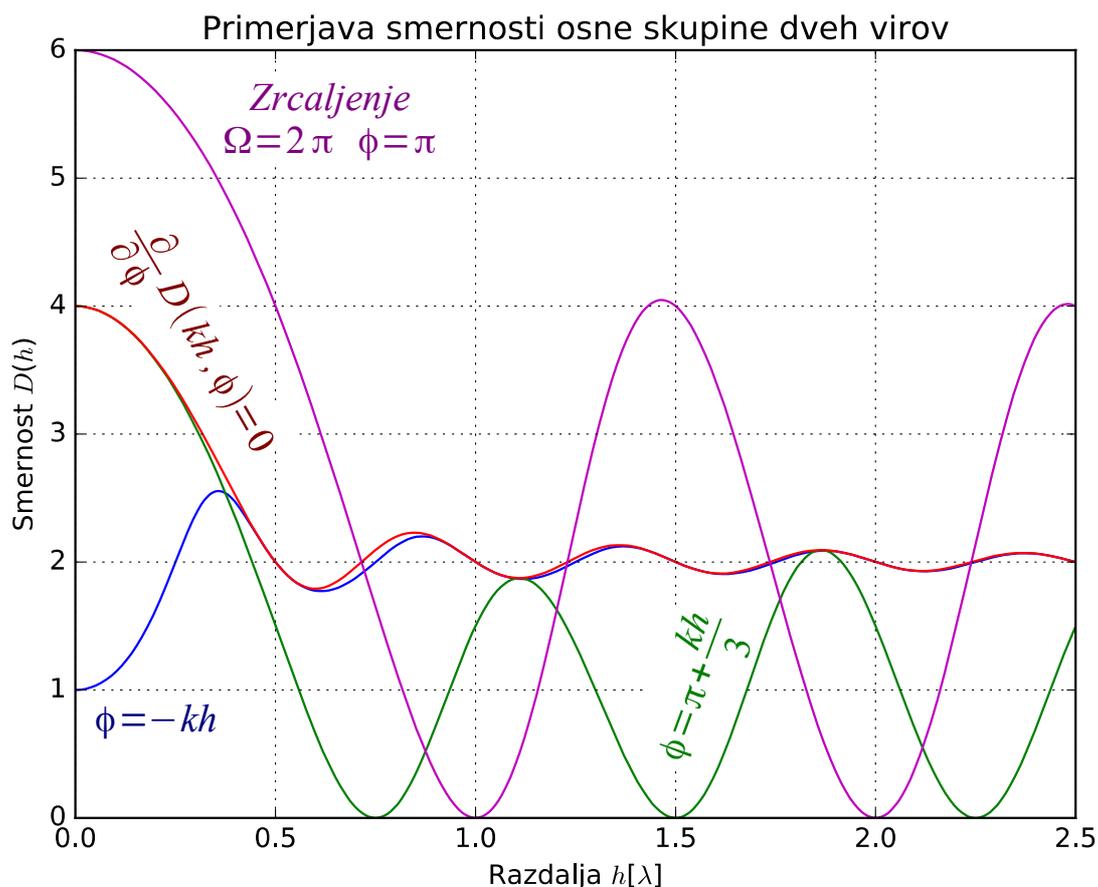
$u = \sin \phi \rightarrow \phi = \arcsin u$ ali $\phi = \pi - \arcsin u$

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

Največja smernost osne skupine

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 dobitok 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 ϕ pomembna predvsem pri majhnih razdaljah $h \leq \lambda/4$ med viroma:



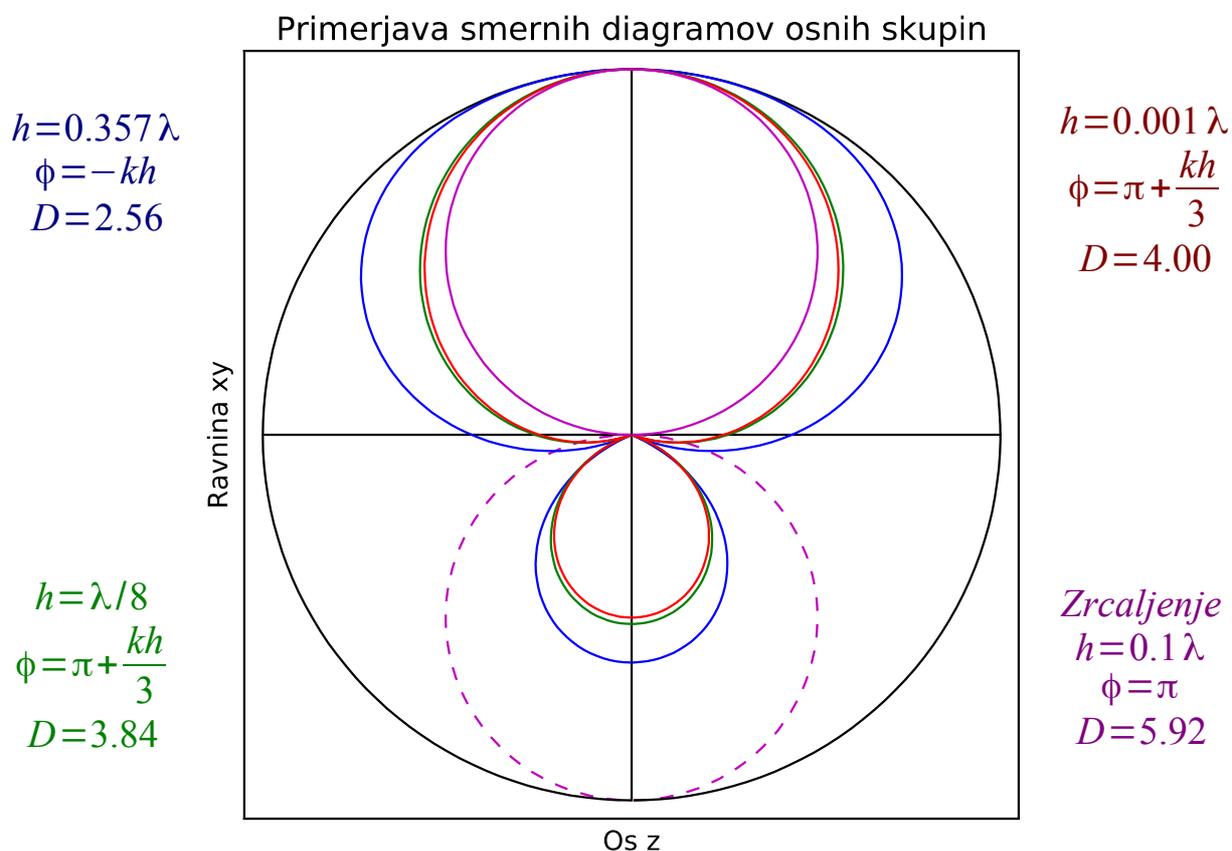
Praktična uporaba teoretskega rezultata je med radioamaterji priljubljena antena HB9CV, ki jo je razvil Rudolf Baumgartner okoli leta 1954. Slednja uporablja dva polvalovna dipola na razdalji $h = \lambda/8$, ki sta napajana skoraj protifazno. Manjši popravek faze omogočata različni dolžini obeh dipolov. Skrbno načrtovana antena HB9CV dosega višjo smernost in večji dobitek od trikrat daljše antene Yagi-Uda s tremi polvalovnimi palčkami na nosilcu dolžine kar $l \approx 0.4\lambda$!

Praktično 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 sevalni upornosti $R_s \rightarrow 0$, slabem izkoristku $\eta \rightarrow 0$ in pripadajoči izgubi dobitka $G \rightarrow 0$.

Skupino s protifaznim napajanjem običajno 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

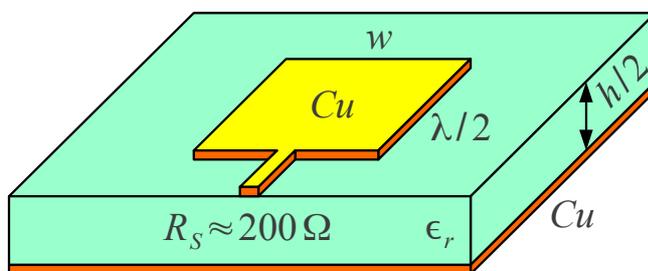
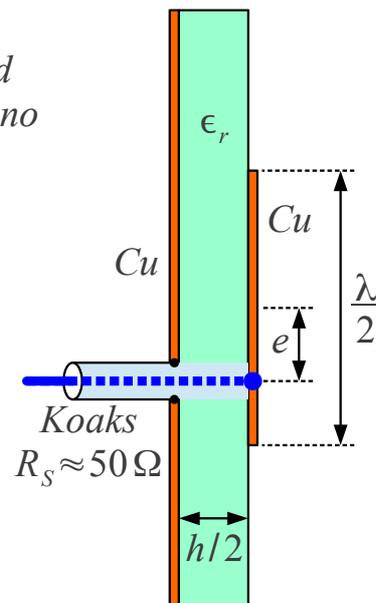
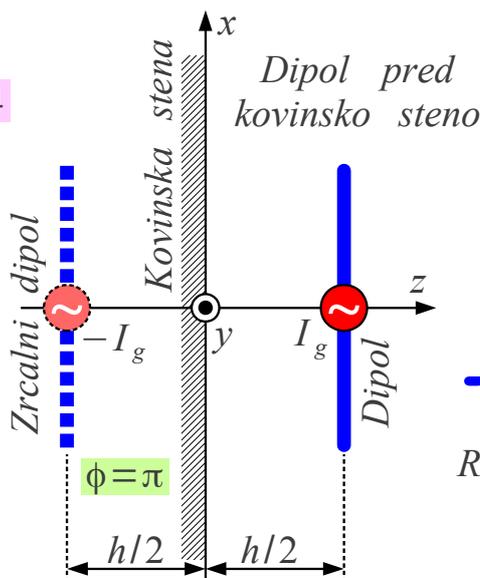
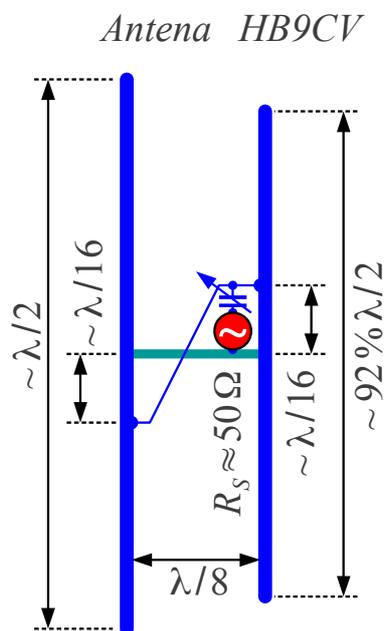
neusmerjenega vira pred kovinsko ploščo se podvoji na $D \rightarrow 6 \approx 7.78 \text{dBi}$ pri $h \rightarrow 0$. Visoka smernost preprostega zrcaljenja antene je račun brez krčmarja: kako velika mora biti velika kovinska plošča?

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 $\phi = \pi + kh/3$ daje ožji glavni snop in šibkejši vzvratni snop. Razlika med neuporabno razdaljo $h \rightarrow 0$ in priljubljeno razdaljo $h = \lambda/8$ je zelo majhna. Končno, zrcaljenje v veliki kovinski plošči daje najožji glavni snop brez vzvratnega snopa:



Vprašanje nizke sevalne upornosti R_s antene HB9CV običajno rešujeta γ priklopa na oba dipola, ki omogočata širok razpon transformacije impedance. Prilagoditev impedance dipola pred kovinsko steno je običajno bolj preprosta, če namesto polvalovnega dipola uporabimo enovalovni dipol. Enovalovni dipol povzhu daje nekoliko večjo smernost:

Rudolf Baumgartner ~ 1954



Izvedbe osnih skupin

Zelo priljubljena antena z zrcaljenjem v veliki kovinski steni je polvalovna mikrotrakasta krpica (angleško: microstrip patch). Mikrotrakasto krpico pravokotne, kvadratne, krožne ali eliptične oblike izjedkamo na eni strani dvostranskega tiskanega vezja. Druga stran tiskanega vezja ni jedkana, da deluje kot ravnina zrcaljenja antene oziroma mase (GND) mikrotrakastih vodov.

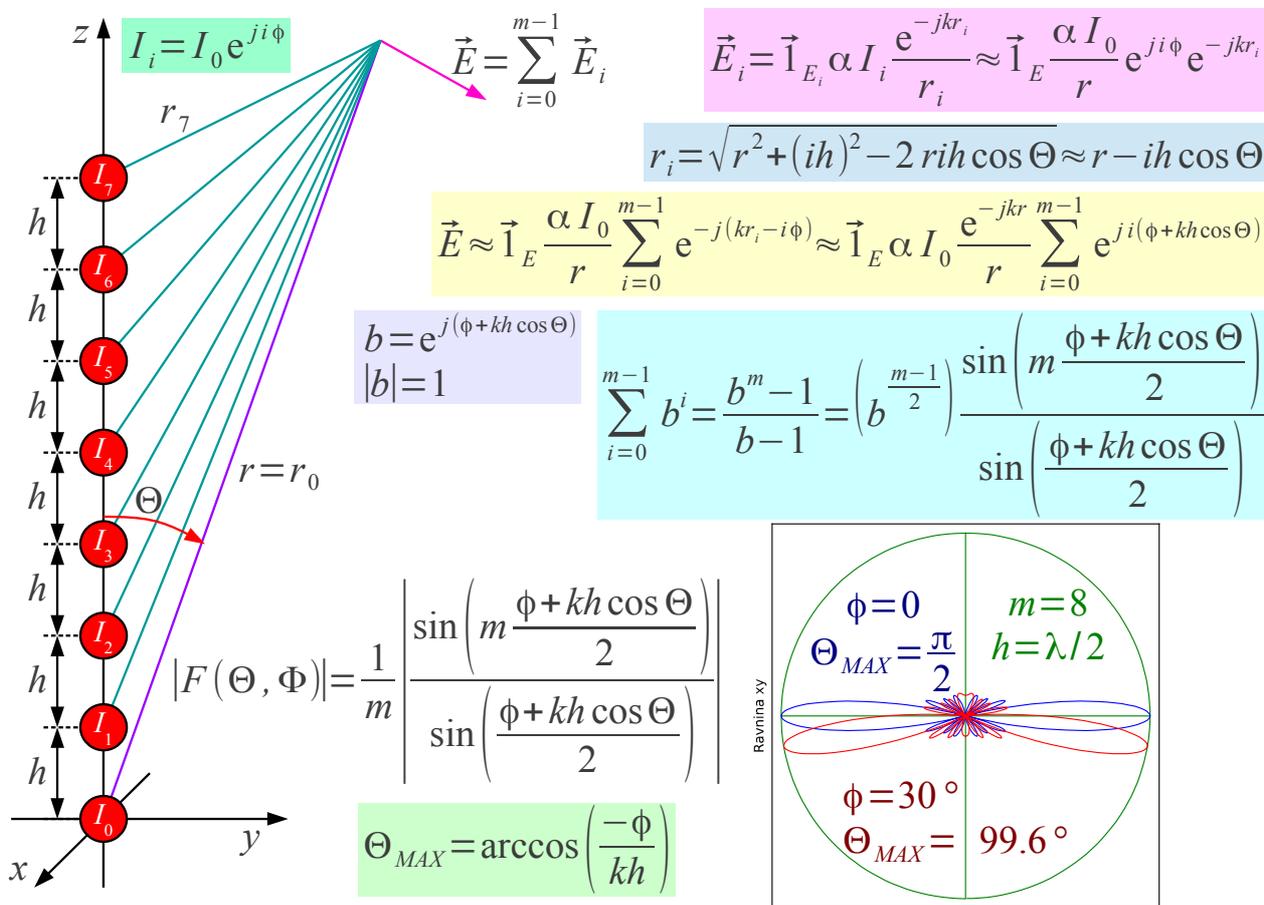
Izolirna podlaga $\epsilon_r > 1$ tiskanega vezja je običajno tanka $h/2 \ll \lambda$ v primerjavi z valovno dolžino. Izredno nizka sevalna upornost v sredini polvalovne krpice se preslika v bolj uporabno vrednost v velikostnem razredu $R_s \approx 200 \Omega$ na robu krpice, ko je krpica skoraj kvadratne oblike $w \approx \lambda/2$. Na primernem odmiku e od središča krpice najdemo celo točko, kamor lahko neposredno priključimo koaksialni kabel $Z_K = 50 \Omega$

Nizka sevalna upornost krpice, izgube v izolirni podlagi $\tan \delta > 0$ tiskanega vezja in izgube kožnega pojava v hrapavi bakreni foliji pogosto znižajo sevalni izkoristek krpice pod $\eta < 50\%$. Tanka podlaga $h/2 \ll \lambda$ daje zelo ozkopasovno anteno $B \approx 2\% f_0$. Tiskano vezje sicer omogoča izdelavo antenske skupine več krpic in pripadajočega napajalnega vezja na skupni podlagi.

Boljši sevalni izkoristek in večjo pasovno širino $B \approx 5\% f_0$ daje izvedba krpice na penastem dielektriku oziroma v tehniki dvignjene podlage (angleško: suspended substrate). V slednjem primeru je krpica izjedkana na tankem enostranskem tiskanem vezju, ki je odmaknjeno s pomočjo distančnikov od kovinske plošče na drugi strani. Razdalja $h/2$ med krpico in kovinsko ploščo se poveča, dielektrik je večinoma zrak $\epsilon_r \approx 1$.

Pravokotna mikrotrakasta krpica z zrakom $\epsilon_r \approx 1$ kot dielektrikom in dovolj veliko ravnino zrcaljenja dosega smernost do $D \approx 10\text{dBi}$. V izolirni podlagi $\epsilon_r > 1$ tiskanega vezja se skrči valovna dolžina $\lambda \approx \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ in z njo izmere krpice. Manjše izmere krpice, premajhna ravnina zrcaljenja in izgube v dielektriku $\tan \delta > 0$ znižujejo dobitke ene same mikrotrakaste krpice na $G \approx 6\text{dBi}..9\text{dBi}$.

Eno-dimenzijsko skupino lahko sestavimo iz treh ali več anten. Pogost primer je enakomerna skupina m izvorov na enakih medsebojnih razdaljah h , napajanih z enakomerno spreminjajočo fazo $I_i = I_0 e^{ji\phi}$:



Izpeljano sevanje enakomerne skupine vsebuje spreminjanje amplitude in faze v odvisnosti od polarne razdalje Θ . Če izhodišče koordinatnega sistema prestavimo v središče skupine, postane smerni diagram povsem realna funkcija oblike $\sin(mu)/\sin(u)$, kjer je $u = (\phi + kh \cos \Theta)/2$. Smerni diagram $F(\Theta, \Phi)$ preprosto normiramo tako, da ga delimo s številom virov m . Maksimum sevanja se pojavi pri $u=0$, kjer se moramo pri praktičnem računanju previdno izogniti deljenju $0/0$!

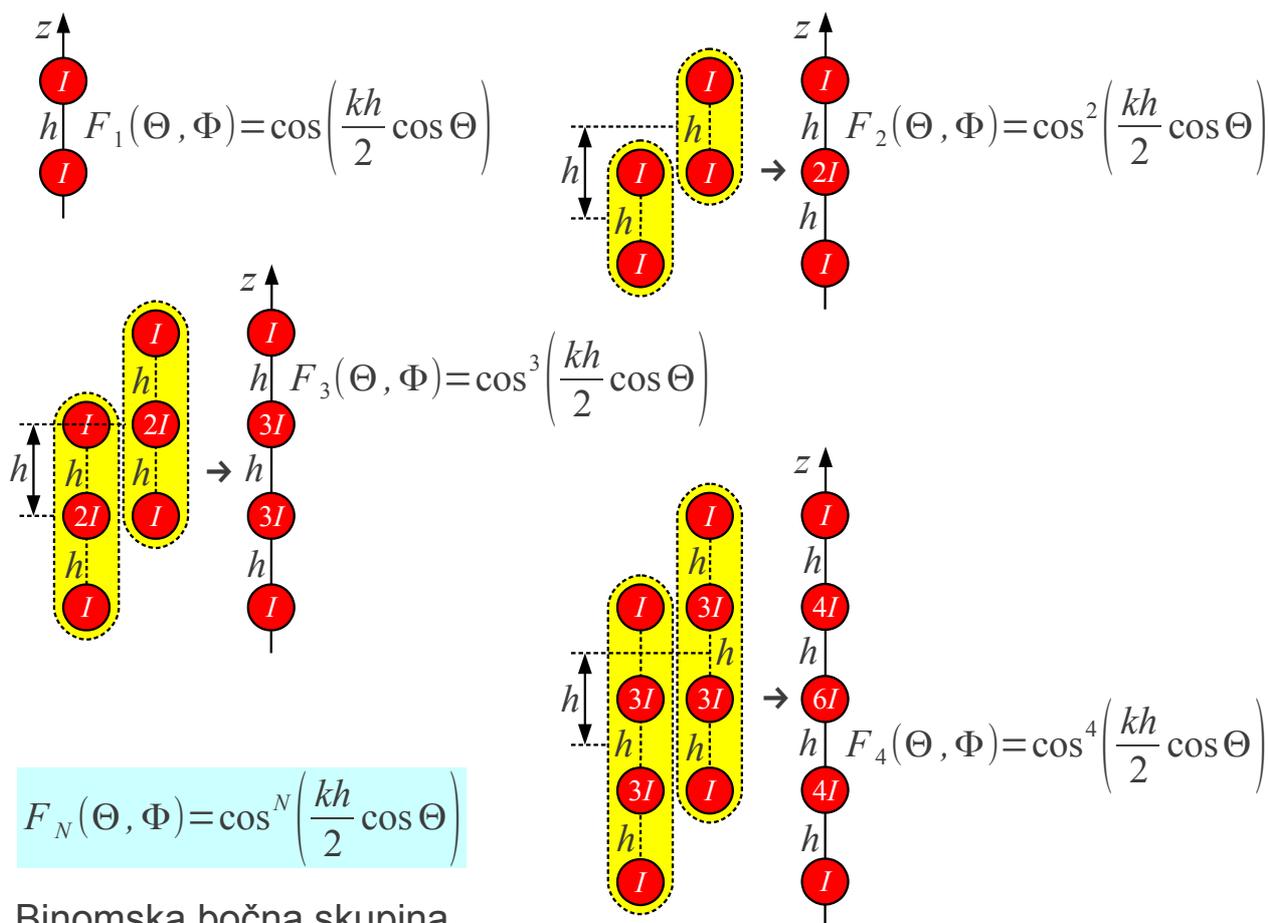
Razdaljo h izberemo glede na gradnike enakomerne skupine tako, da ne pridelamo velikih stranskih snopov na povsem enak način kot pri skupini dveh virov. Z naraščanjem števila gradnikov m lahko nato poljubno ožamo glavni snop sevanja enakomerne skupine. Ko so medsebojni vplivi v enakomerni skupini $|Z_{ij}| \ll |Z_{ii}|, i \neq j$ zanemarljivi v primerjavi z lastnimi impedancami gradnikov skupine, velja približna ocena smernosti skupine $D \approx m D_E$.

Ko medsebojni vplivi med elementi skupine niso zanemarljivi oziroma postanejo primerljivi z lastnimi impedancami gradnikov $|Z_{ij}| \approx |Z_{ii}|, i \neq j$, postane načrtovanje napajanja enakomerne skupine zelo zahtevna naloga. Skrajni primer je antena Yagi-Uda, kjer generator vzbuja en sam gradnik, vsi ostali gradniki pa so vzbujeni preko medsebojnih vplivov. Povsem jasno v tem primeru določanje smernosti skupine ni preprosto $D \neq m D_E$.

Enakomerno skupino največkrat načrtujemo kot bočno skupino $\phi=0$. Z izbiro faznega zamika $\phi \neq 0$ lahko glavni snop poljubno odklonimo navzgor ali navzdol vse do osne skupine s sevanjem v smeri osi $\pm z$. V primeru televizijskega oddajnika na vrhu hriba oziroma bazne postaje mobilne telefonije na vrhu antenskega stolpa glavni snop sevanja odklonimo le malenkost navzdol proti uporabnikom pod bočno ravnino xy .

Pri enakomerni skupini večjega števila virov $m > 2$ lahko neželjene stranske snope sevanja nadzorujemo tako, da poleg spreminjanja faze vzbujanja spreminjamo tudi amplitudo vzbujanja posameznih izvorov. Skrajni primer je binomska skupina, ki nima stranskih snopov.

Načrtovanje binomske skupine začnemo s skupino dveh virov, vzbujenih z enakima amplitudama. Razdaljo med viroma izberemo tako, da ni stranskih snopov, na primer $h \leq \lambda/2$ za bočno skupino $\phi=0$ oziroma $h \leq \lambda/4$ za osno skupino $\phi = -kh$. Skupino dveh virov uporabimo kot gradnik nove skupine dveh anten na isti razdalji h . Pri tem dva vira prvotne skupine sovpadeta v en sam vir z dvakratnim vzbujanjem $2I$:



Isti postopek nato ponovimo z gradnjo še večje skupine na isti razdalji h , kjer kot gradnika uporabimo dve prej dobljeni skupini treh virov $I, 2I, I$. Par začetnih virov, ki pri tem sovpadeta, nadomestimo z enim samim virom z vsoto vzbujanja. Dobimo skupino štirih virov z vzbujanjem $I, 3I, 3I, I$.

Isti postopek lahko še poljubno ponavljamo. Jakost vzbujanja začetnih virov postane sorazmerna binomskim koeficientom, od tod ime skupine. Smerni diagram računamo po pravilu o množenju smernih diagramov. Smerni diagram binomske skupine $F_N(\Theta, \Phi) = [F(\Theta, \Phi)]^N$ je preprosto pripadajoča potenca smernega diagrama začetne skupine.

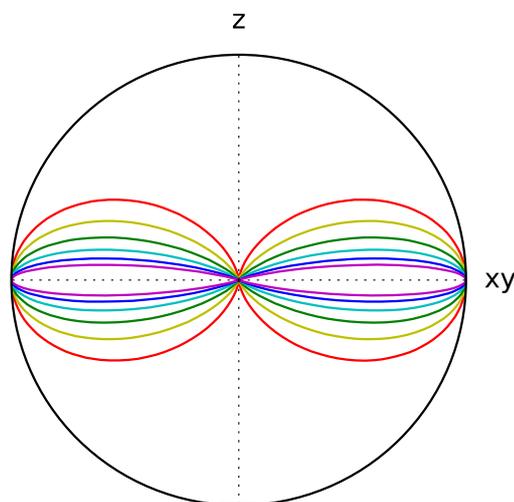
Če začetni smerni diagram $F(\Theta, \Phi)$ ni imel stranskih snopov, nima stranskih snopov niti njegova poljubna potenca $[F(\Theta, \Phi)]^{m-1}$ v končni skupini m virov. Z naraščanjem m se seveda ožja snop sevanja binomske skupine. Primerjava s preprosto enakomerno skupino z vzbujanjem konstante jakosti hitro pokaže, da binomska skupina potrebuje dosti več gradnikov za primerljivo širino (glavnega) snopa sevanja:

Bočna binomska skupina

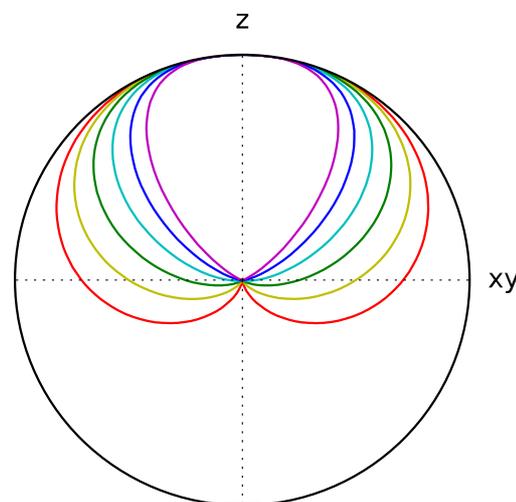
$$F_N(\Theta, \Phi) = \cos^N \left(\frac{kh}{2} \cos \Theta \right)$$

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

Napajanje binomske skupine je še dosti bolj zahtevno od napajanja enakomerne skupine z vzbujanjem konstantne jakosti. Razmerja med jakostjo vzbujanja posameznih gradnikov so visoka, zato so medsebojni vplivi $Z_{ij}, i \neq j$ še dosti bolj moteči. Pravih binomskih skupin običajno ne gradimo, pač pa izberemo kompromis med številom anten v skupini, zahtevnostjo vzbujanja in slabljenjem stranskih snopov skupine.

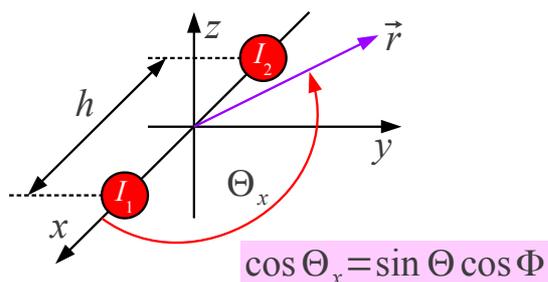
Pravilo o množenju smernih diagramov s pridom uporabimo tudi pri načrtovanju dvo-dimenzijskih in tri-dimenzijskih skupin. Preden lahko uporabimo pravilo o množenju smernih diagramov, moramo vse smerne diagrame anten in skupin zapisati v istem koordinatnem sistemu.

Pri gradnji kompliciranih skupin anten posamezne antene in podskupine namestimo pod pravim kotom oziroma orientiramo v smeri kartezičnih koordinatnih osi (x, y, z) . Pripadajoči smerni diagrami so zapisani v krogelnih koordinatah (r, Θ_x, Φ_x) s tečajem v smeri $+x$ oziroma (r, Θ_y, Φ_y) s tečajem v smeri $+y$ oziroma v običajnem krogelnem koordinatnem sistemu (r, Θ, Φ) s tečajem v smeri $+z$.

Smerni diagrami preprostih anten in skupin so zapisani samo s polarnim

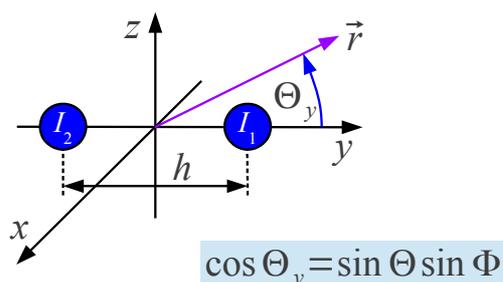
kotom Θ_x oziroma Θ_y oziroma Θ in niso odvisni od pripadajoče zemljepisne dolžine. Pravilo o množenju smernih diagramov velja za isto polarizacijo vseh gradnikov, torej pretvorbo smernih vektorjev običajno ni potrebna. Sestavljanja zahtevnejših skupin večinoma potrebuje le pretvorbo kotnih funkcij $\cos \Theta_x$, $\sin \Theta_x$, $\cos \Theta_y$ in $\sin \Theta_y$ pripadajoče polarne razdalje v kotne funkcija običajnih krogelnih koordinat (r, Θ, Φ) :

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



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

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



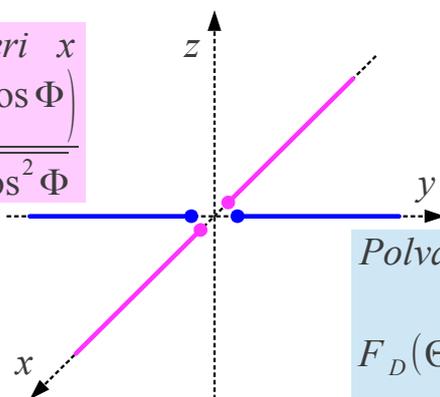
$$F_S(\Theta, \Phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2} + \frac{kh}{2} \sin \Theta \sin \Phi\right)$$

Polvalovni dipol v smeri x

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

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

Obračanje anten



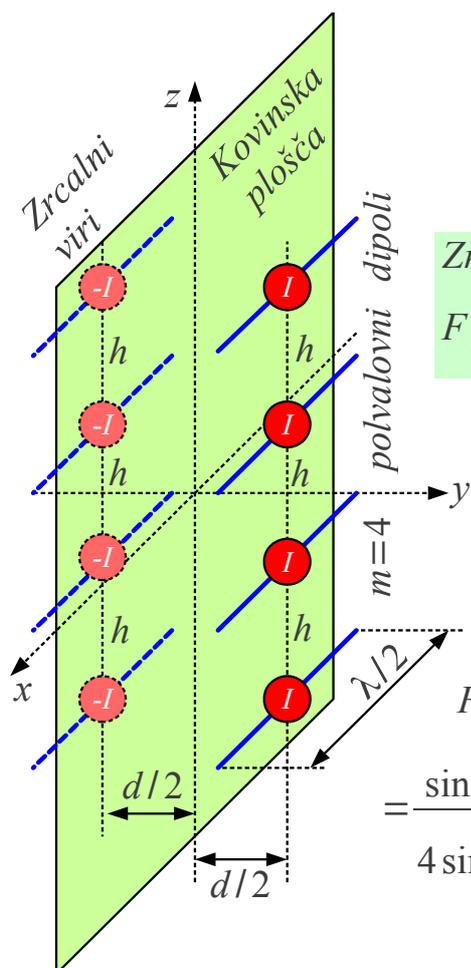
$$\sin \Theta_y = \sqrt{1 - \sin^2 \Theta \sin^2 \Phi}$$

Polvalovni dipol v smeri y

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

Nazoren zgled, kako uporabiti opisana pravila, je priljubljena skupina štirih polvalovnih dipolov pred kovinsko ploščo. Polvalovni dipoli so obrnjeni v smeri osi x . Dipoli se nahajajo na razdalji $d/2$ v smeri osi y pred ravno kovinsko ploščo, torej zrcaljenje opisuje osna skupina dveh protifaznih $\phi = -\pi$ virov na razdalji d v osi y . Končno tvorijo štiri takšne antene enakomerno skupino štirih virov v osi z .

Skupni smerni diagram $F(\Theta, \Phi)$ je po pravilu o množenju smernih diagramov zmnožek smernega diagrama polvalovnega dipola $F_E(\Theta, \Phi)$ v osi x , smernega diagrama zrcaljenja $F_{SI}(\Theta, \Phi)$ v osi y in smernega diagrama enakomerne $m=4$ bočne skupine $F_{S2}(\Theta, \Phi)$ v osi z :



Polvalovni dipol v smeri osi x

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

Zrcaljenje v smeri osi $y \rightarrow \phi = -\pi$

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

Enakomerna bočna skupina v smeri osi z

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

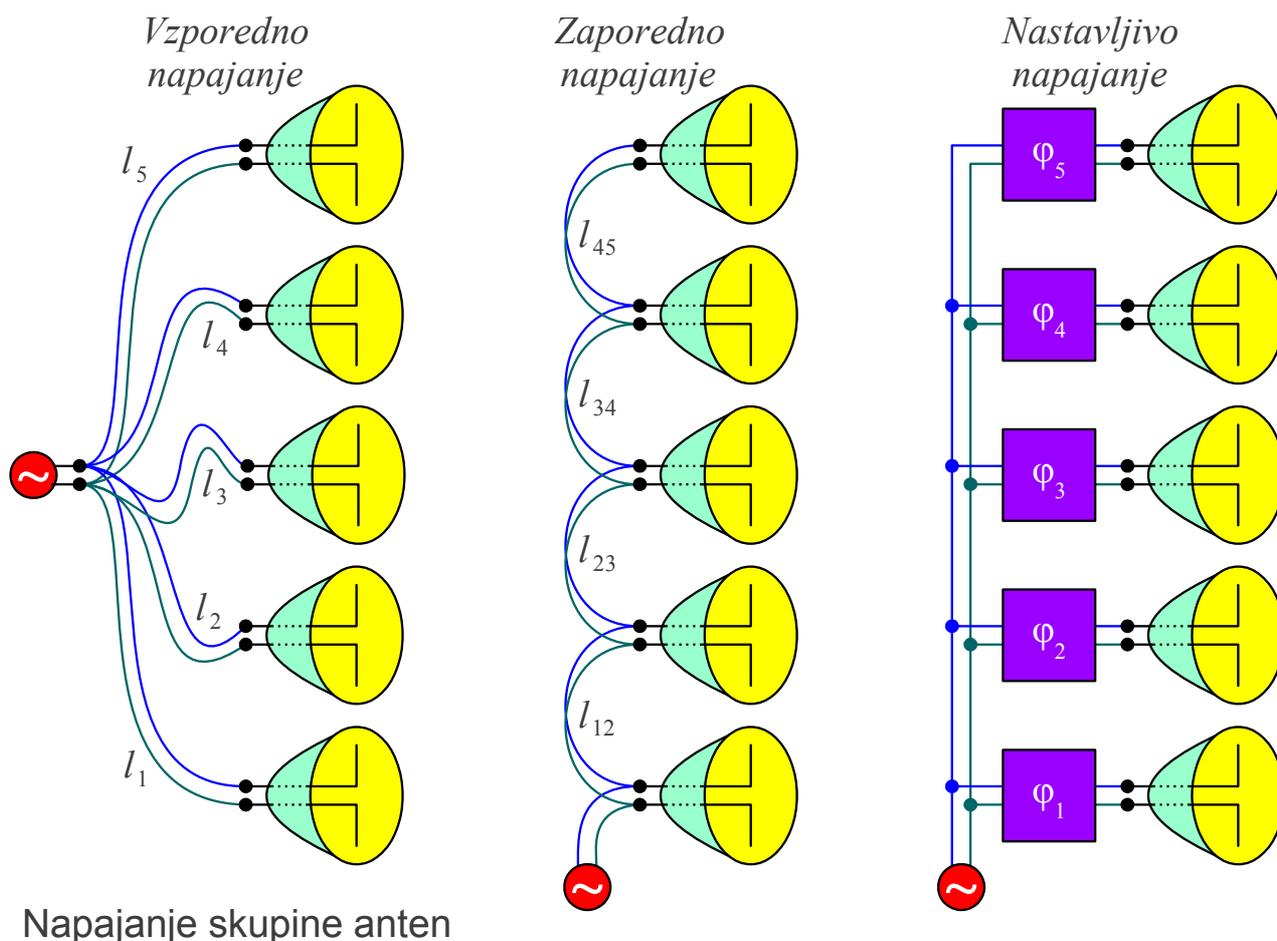
$$F(\Theta, \Phi) = F_{S2}(\Theta, \Phi) \cdot F_{SI}(\Theta, \Phi) \cdot F_E(\Theta, \Phi) = \frac{\sin(2kh \cos \Theta)}{4 \sin\left(\frac{kh}{2} \cos \Theta\right)} \sin\left(\frac{kd}{2} \sin \Theta \sin \phi\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \Theta \cos \Phi\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi}}$$

Sestavljanje skupin

Verjetno je najtežja naloga praktičnega sestavljanja skupine zagotoviti napajanje vsake posamične antene z natančno izbranimi fazo in amplitudo krmilnega električnega toka. Ker je dolžina napajalnih vodov primerljiva z valovno dolžino, so pomembne pravilne prilagoditev impedanc in fazni zasuki vodov. Nalogo dodatno otežujejo medsebojni vplivi $Z_{ij}, i \neq j$ med gradniki skupine. Končno električni vodi do posameznih anten v skupini ne smejo motiti sevanja skupine.

Resnični električni vodi vnašajo nezanemarljivo slabljenje, ki znižuje sevalni izkoristek η skupine. Dobitek skupine anten je odvisno od izvedbe napajalnih vodov omejen na približno $G_{MAX} \approx 30\text{dBi}..40\text{dBi}$. Še večja skupina bi sicer dala višjo smernost D ampak hkrati daljše napajalne vode z višjimi izgubami. Slednje bi izničile kakršenkoli prirastek dobitka G .

Napajanje iste skupine anten je lahko izvedeno na različne načine. Vzporedno napajanje pomeni, da ima vsak gradnik skupine vod enake dolžine do generatorja. Enake dolžine vodov $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5$ zagotavljajo bočno skupino $\phi = 0$ ne glede na frekvenco generatorja:

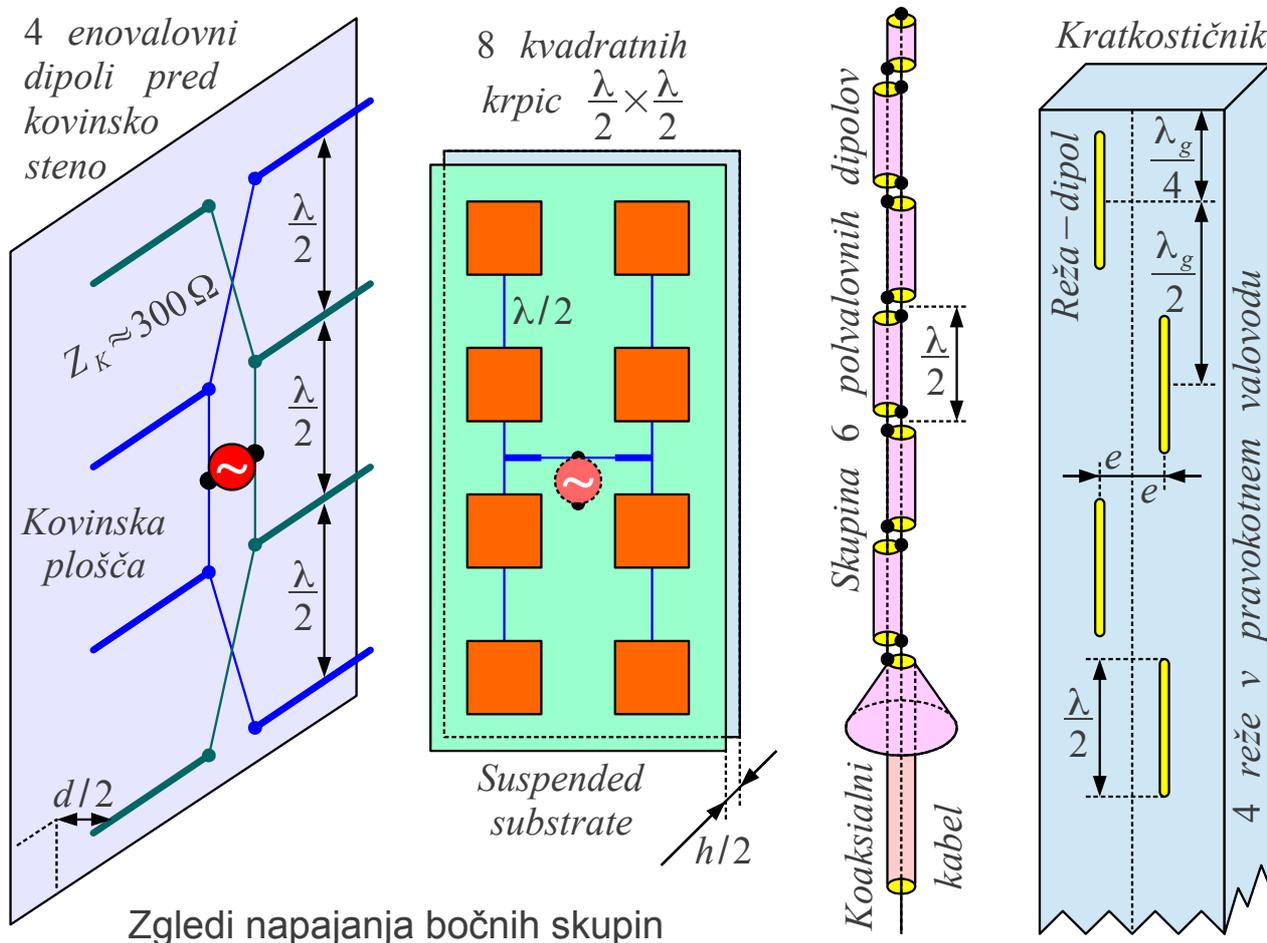


Zaporedno napajanje omogoča prihranek pri dolžini vodov, ki so napeljeni med sosednjimi gradniki skupine. Nastavitev faze vzbujanja posameznih anten, pravilna delitev moči generatorja in pravilna zaključitev impedanc so zahtevne. Ker je fazni zasuk vodov l_{12} , l_{23} , l_{34} in l_{45} odvisen od frekvence, se smer glavnega snopa sevanja skupine odklanja s frekvenco, kar večinoma ni zaželeno.

Najučinkovitejše in najzahtevnejše je nastavljivo napajanje skupine. Vsakemu gradniku skupine lahko neodvisno nastavljamo najmanj fazo, lahko pa tudi amplitudo vzbujanja. Takšni nastavljeni skupini (angleško: phased array) lahko povsem elektronsko nastavljamo smer sevanja brez mehanskega premikanja skupine.

Starejše nastavljive skupine so uporabljale pasivne feritne fazne sukalnike v sami skupini. Takšen radar je lahko sledil le en cilj naenkrat. V novejših antenah se nastavljanje faze in amplitude premika čedalje globlje v elektroniko v svet številske obdelave signalov. Vsaka antena je opremljena najmanj z lastnim ojačevalnikom, ki hkrati ojačuje neodvisne signale iz različnih smeri. Antena z nastavljivim napajanjem globoko v elektroniki lahko sledi več ciljem hkrati z neodvisnimi signali: od vojaških letal do mobilnih telefonov.

V številnih antenah se pogosto uporablja kombinacija napajanj. Zaporedno napajanje omogoča prihranek vodov na majhnih razdaljah znotraj gruče bližnjih gradnikov skupine. Hkrati se gruče napajajo vzporedno z daljšimi vodi, kar omogoča delovanje skupine v širšem frekvenčnem pasu:



Zgledi napajanja bočnih skupin

Zelo pogosta antena je bočna skupina štirih enovalovnih dipolov pred kovinsko steno na medsebojnih razdaljah $h = \lambda/2$. Enovalovni dipoli pred kovinsko steno so načrtovani za sevalno upornost okoli $R_s \approx 300 \Omega$. Sosednja dva dipola v gruči sta napajana zaporedno. Dvovod dolžine $l = \lambda/2$ obrača fazo, impedanca pa ne preslika. Sofazno napajanje omogočata prekržani žici dvovoda.

Gornja in spodnja gruča dveh dipolov sta napajani vzporedno. Sevalna upornost vsake gruče je okoli $R_{gruče} = R_s/2 \approx 150 \Omega$. Četrtovalovni vod $Z_K \approx 300 \Omega$ invertira impedanco v $R_{gruče}' \approx 600 \Omega$. Dve gruči vzporedno dajeta $R \approx 300 \Omega$ za generator.

Skupine mikrotrakastih krpic so običajno grajene v tehniki dvignjene podlage na tankem enostranskem tiskanem vezju, da večji del odmika $h/2$

od kovinske stene predstavlja zrak. Na istem tiskanem vezju so izdelani tudi vsi napajalni vodi. Prikazani primer bočne skupine osmih krpic vsebuje štiri gruče s po dvema zaporedno napajanimi krpicama. Vmesni mikrotrakasti vod sicer obrača fazo, kar pa se z odjemom signala na nasprotnih straneh krpic ravno izniči.

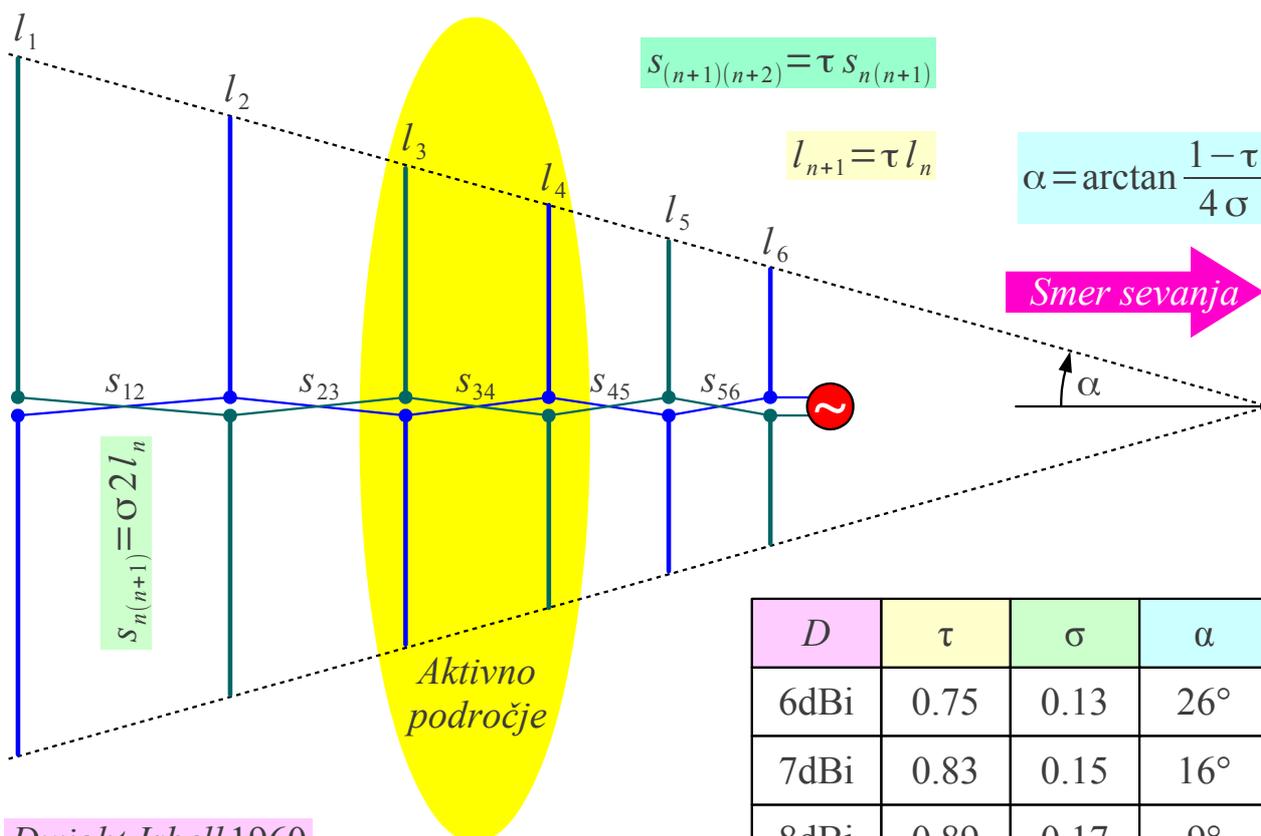
Štiri gruče so nato napajane vzporedno z mikrotrakastimi vodi primernih dolžin in karakterističnih impedanc za ustrezno preslikavo impedance vzporedne vezave. V skupni mikrotrakastih krpic se sevanju prenosnih vodov ne moremo izogniti. S primernim načrtovanjem širokih krpic in ozkih prenosnih vodov lahko sevanje slednjih kvečjemu omejimo.

Zaporedno napajano bočno skupino se da navsezadnje izdelati kar iz samih prenosnih vodov, ki hkrati z napajanjem skupine še sami po sebi sevajo. Preprosta pokončna bočna skupina za pokončno polarizacijo (VP) je sestavljena iz odsekov koaksialnega kabla dolžine $l = \lambda/2$. Med dvema sosednjima odsekoma se žila in oklop zamenjata med sabo. Hkrati z napajanjem skupine odseki plaščev kabla sevajo kot polvalovni dipoli.

Skupina polvalovnih rež v pravokotnem valovodu deluje kot pokončna bočna skupina za vodoravno polarizacijo (HP). Polvalovna reža je komplementarna antena polvalovnemu dipolu. Za sevalne upornosti komplementarnih anten velja $R_{reže} R_{dipola} = (Z_0/2)^2$, kar daje sevalno upornost sredi polvalovne reže okoli $R_{reže} \approx 500 \Omega$. Visoka impedanca reže ustreza visokim impedancam v kovinskem valovodu.

Z odmikom reže $\pm e$ od sredine valovoda se nastavljata jakost in polariteta vzbujanja s prečnimi tokovi v stenah valovoda. Ko znaša pokončni razmak med režami $h = \lambda_g/2$ polovico valovne dolžine v valovodu, sofazno vzbujanje skupine zahteva nameščanje zaporednih rež izmenično na različnih straneh od sredine valovoda. Slednji ukrep je popolnoma enakovreden križanju žic dvovoda v opisani skupini enovalovnih dipolov.

Skupina med sabo različnih anten lahko pokriva širok frekvenčni pas oziroma več ločenih frekvenčnih pasov. Izvedba napajanja takšne skupine brez izpadov na frekvenčnih mejah med sosednjima antenama na prvi pogled ni preprosta. Ena najuspešnejših rešitev opisane naloge je logaritmično-periodična skupina dipolov, ki jo je razvil Dwight Isbell leta 1960:



Dwight Isbell 1960

Logaritmično-periodična skupina dipolov

D	τ	σ	α
6dBi	0.75	0.13	26°
7dBi	0.83	0.15	16°
8dBi	0.89	0.17	9°
9dBi	0.94	0.19	5°

V logaritmično-periodični anteni učinkovito seva aktivno področje z dolžinama dipolov l_3 in l_4 blizu polovice valovne dolžine na povsem enak način kot antena HB9CV. Krajša dipola l_5 in l_6 kapacitivno obremenjujeta prenosni vod, kar ugodno znižuje njegovo karakteristično impedanco med generatorjem in aktivnim področjem. Daljša dipola l_1 in l_2 odbijeta preostalo moč generatorja nazaj proti aktivnemu področju.

Pri višanju frekvence generatorja se aktivno področje samodejno premika proti generatorju. Pri nižanju frekvence generatorja se aktivno področje samodejno premika proč od generatorja. Logaritmično-periodično skupino dipolov lahko naredimo poljubno dolgo s poljubnim številom dipolov, da z njimi pokrijemo poljubno širok frekvenčni pas!

Načrtovanje logaritmično-periodične skupine dipolov določata dve konstanti τ in σ . Konstanta $\tau = l_{n+1}/l_n$ določa razmerje dolžin dveh sosednjih dipolov. Dolžine dipolov naraščajo proč od napajalne točke oziroma upadajo v smeri napajalne točke po eksponentnem zakonu, od tod ime antene.

Konstanta $\sigma = s_{n(n+1)}/(2l_n) \approx s/\lambda$ določa razmak med sosednjima

dipoloma, izražen z valovno dolžino aktivnega področja. Povsem jasno tudi razmaki med dipoli naraščajo proč od napajalne točke oziroma upadajo v smeri napajalne točke po istem eksponentnem zakonu. Obe konstanti τ in σ določata kot ovojnice antene $\alpha = \arctan(1 - \tau)/(4\sigma)$.

Logaritmično-periodična antena dosega smernost v območju $D \approx 6\text{dBi}..9\text{dBi}$. Z višanjem smernosti se kot ovojnice antene α manjša in antena se podaljšuje. Smernost nad $D > 9\text{dBi}$ bi zahtevala neupravičeno dolgo anteno z velikim številom palčk.

Sestavljanje poljubne polarizacije s skupino dveh ali več anten je snov naslednjega poglavja.

* * * * *