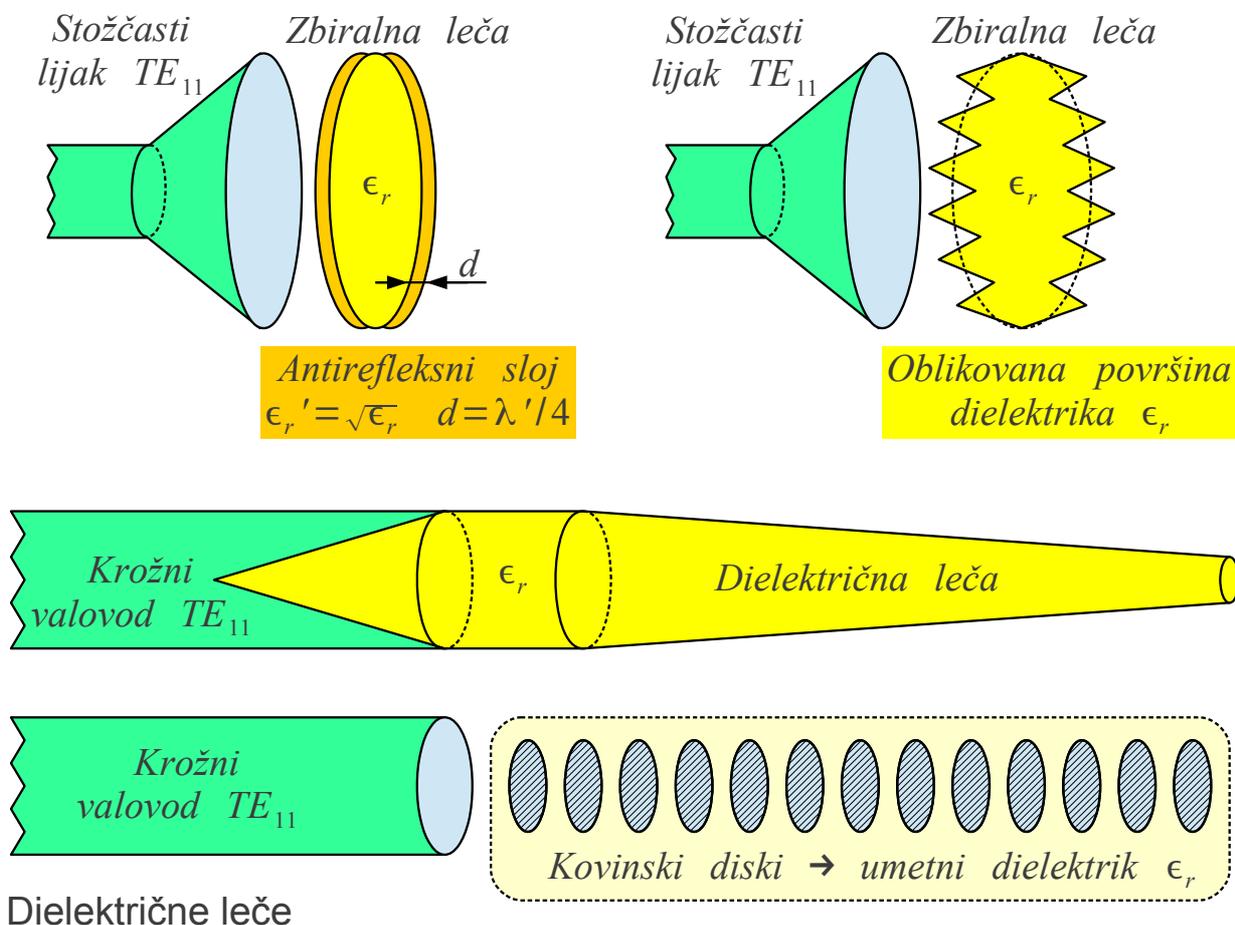


9. Umetni dielektriki

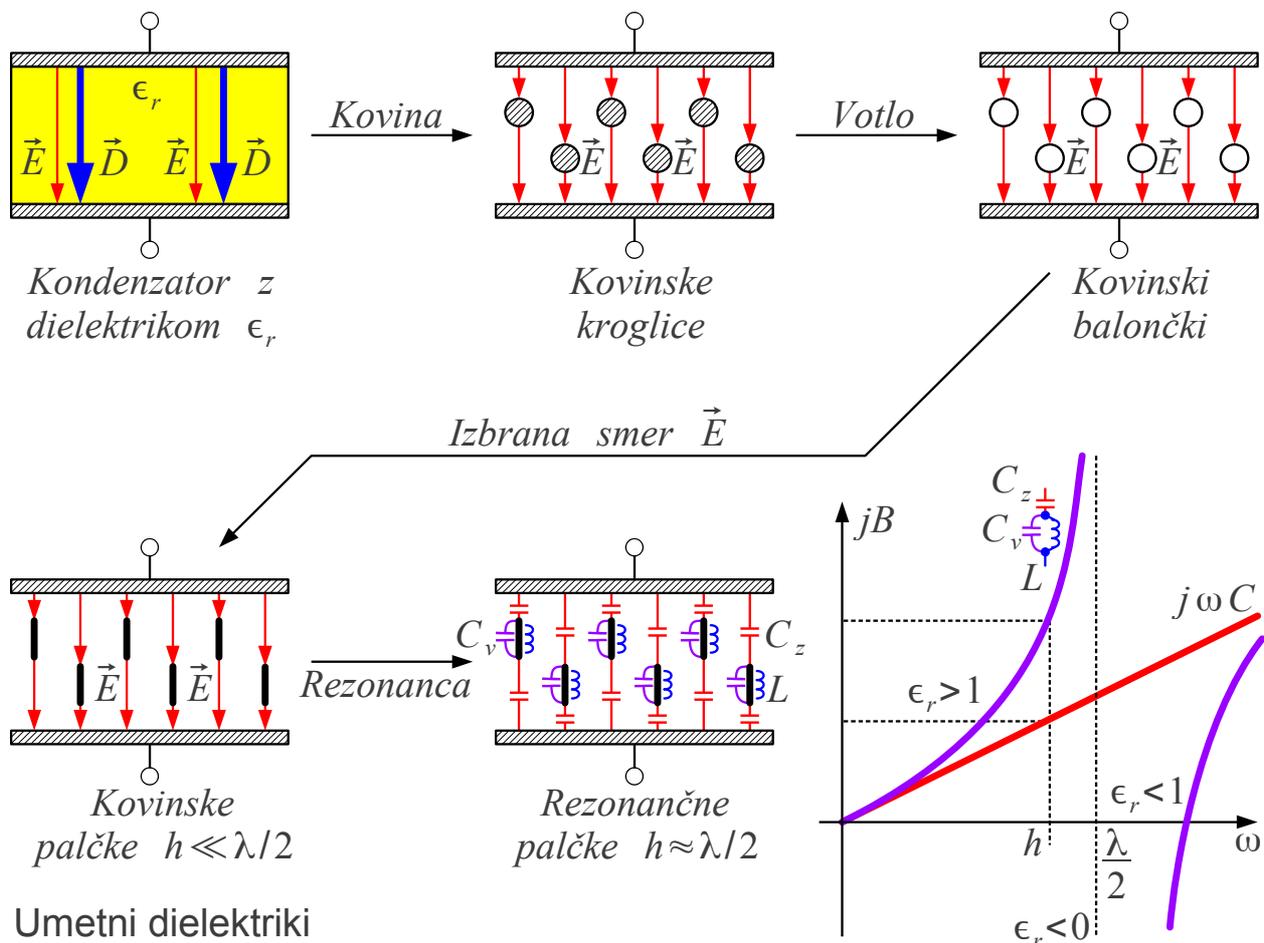
Omejevanje kvadratne napake faze lahko zahteva nepraktično dolge valovodne lijake. Kvadratno napako faze popravi zbiralna leča oziroma zbiralno zrcalo, ki pretvori krogelne valovne fronte v ravne valovne fronte.

Čeprav so osnove delovanja enake, se praktične izvedbe leč za radijske valove v marsičem razlikujejo od leč za vidno svetlobo. Bistvena razlika je v velikosti leče v primerjavi z valovno dolžino. Leče za vidno svetlobo so običajno dosti večje $d \gg \lambda$ od valovne dolžine. Izmere leč za radijske valove so pogosto primerljive $d \approx \lambda$ z valovno dolžino.

Antirefleksni sloj v področju radijskih valov zlahka nadomestimo s primernim oblikovanjem površine dielektrične leče. Pravi dielektrik lahko nadomestimo z lažjim in cenejšim umetnim dielektrikom. Slednji omogoča oboje: $\epsilon_r > 1$ oziroma $\epsilon_r < 1$. Končno je oblika majhnih leč $d \approx \lambda$ lahko precej drugačna od tistega, kar smo navajeni v optiki $d \gg \lambda$:



Naloga naravnega dielektrika $\epsilon_r > 1$ v zbiralni leči je, da poveča električni pretok $\vec{D} > \vec{D}_0 = \epsilon_0 \vec{E}$ v primerjavi s praznim prostorom. Električni pretok in kapacitivnost ploščatega kondenzatorja lahko povečamo tudi drugače, na primer skrajšamo silnice električnega polja. Silnice skrajšamo tako, da prostor med ploščama zapolnimo s kovinskimi kroglicami:



Radijske antene zahtevajo velike leče. Masa in cena 3D predmeta iz naravnega dielektrika oziroma kovine nista zanemarljivi. V primeru umetnega dielektrika smemo polne kovinske kroglice zamenjati z votlimi balončki. Drag in masiven 3D predmet lahko zamenja lahek in cenen 2D predmet. Kovinski balončki so lahko pravi nadomestek za naravni dielektrik z izotropno dielektričnostjo $\epsilon_r > 1$, ki je neodvisna od smeri električnega polja \vec{E} .

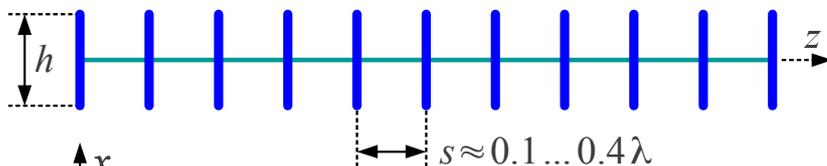
Radijsko anteno lahko dodatno poenostavimo tako, da izdelamo umetni dielektrik samo za izbrano smer električnega polja \vec{E} . V smereh, kjer je komponenta električnega polja enaka nič, je popolnoma nepotrebno graditi umetni dielektrik. Preprosto povedano, ko poznamo smer električnega polja, lahko kovinske balončke zamenjamo z lažjimi in cenejšimi kovinskimi palčkami v smeri polja \vec{E} .

Končno, radijske naprave pogosto uporabljajo razmeroma ozek frekvenčni pas $B < 10\% f_0$, največkrat celo $B < 1\% f_0$ v primerjavi z osrednjo frekvenco. V ozkopasovnih napravah $B \ll f_0$ lahko dodatno povečamo učinkovitost kovinskih palčk oziroma zmanjšamo količino potrebnega materiala za gradnjo antene z uporabo rezonančnih pojavov.

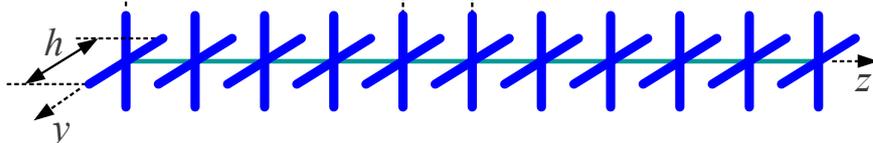
Vitka kovinska palčka doseže svojo najnižjo rezonančno frekvenco, ko dolžina palčke $h \approx \lambda/2$ približno ustreza polovici valovne dolžine v praznem prostoru. Tik pod zaporedno rezonanco palčka še dodatno poveča dielektričnost prostora $\epsilon_r > 1$, kar dodatno zbira valovanje. Nad zaporedno rezonanco je lahko dielektričnost $\epsilon_r < 1$ tudi manjša od enote, kar razpršuje valovanje. Med zaporedno in vzporedno rezonanco palčke je dielektričnost lahko celo $\epsilon_r < 0$ negativna, kar preprečuje širjenje valovanja.

Antene največkrat potrebujejo zbiralno lečo iz dielektrika $\epsilon_r > 1$. Leča je pogosto podolgovate oblike v smeri širjenja valovanja z . Eno-dimenzijske strukture z upočasnjenim valovanjem (angleško: slow-wave structure) lahko izdelamo na različne načine:

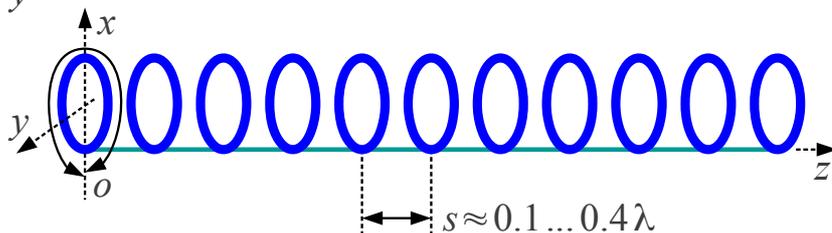
Palčke $h \approx 0.4 \dots 0.45 \lambda$
(Shintaro Uda 1926)



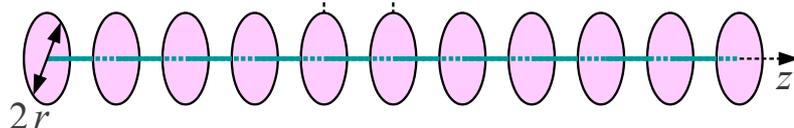
Križne palčke
(obe polarizaciji)



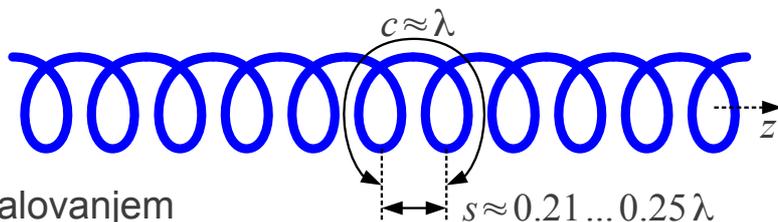
Žične zanke $o \approx 0.9 \lambda$
(krožne, kvadratne)



Kovinski diski $2r \approx 0.3 \lambda$
(obe polarizaciji)



Vijačnica $0.75 \lambda < c < 1.33 \lambda$
(krožna polarizacija)



Strukture z upočasnjenim valovanjem

Ko ima električno polje samo eno smer, na primer $\vec{E} = \vec{1}_x E_x$, zadoščajo palčke v isti smeri x , ki jih nanizamo v smeri strukture z . Palčke smemo pritrditi na vzdolžni kovinski nosilec v smeri z točno na sredini, ker tam ni električnega polja v smeri nosilca. Dolžina palčk je običajno okoli $h \approx 0.4 \dots 0.45 \lambda$ in razmak med palčkami $s \approx 0.1 \dots 0.4 \lambda$.

Ko ima električno polje obe prečni komponenti $\vec{E} = \vec{1}_x E_x + \vec{1}_y E_y$, uporabimo skupino palčk v smeri osi x in drugo skupino enakih palčk v smeri osi y . Obe skupini palčk smemo pritrditi na skupni kovinski nosilec v smeri osi z . Dolžine palčk v obeh smereh x in y so med sabo enake $h_x = h_y \approx 0.4 \dots 0.45 \lambda$.

Namesto palčk lahko uporabimo rezonatorje iz tankih vodnikov drugačnih oblik. Zanka krožne, kvadratne, pravokotne ali trikotne oblike doseže svojo najnižjo rezonančno frekvenco, ko obseg zanke $o \approx \lambda$ približno ustreza valovni dolžini. Žične zanke so uporabne kot umetni dielektrik $\epsilon_r > 1$, ko obseg zanke znaša približno $o \approx 0.9 \lambda$.

Krožne oziroma kvadratne zanke so uporabne kot umetni dielektrik za poljubno polarizacijo $\vec{E} = \vec{1}_x E_x + \vec{1}_y E_y$. Če zanke pritrdimo na vzdolžni kovinski nosilec, struktura žal ni več uporabna za obe polarizaciji. Struktura na sliki deluje samo še za električno polje v smeri $\vec{E} = \vec{1}_y E_y$. Električno polje v smeri $\vec{E} = \vec{1}_x E_x$ vzbudi v zankah na sliki takšno bližnje polje, da ga močno moti kovinski nosilec.

Ugodnejše lastnosti od žičnih zank imajo tanki kovinski diski premera okoli $2r \approx 0.3 \lambda$. Takšna struktura z upočasnjnim valovanjem je lahko zelo širokopasovna $B \geq 50\% f_0$. Diske smemo pritrditi na kovinski nosilec v osi, ki ne moti prečnega polja $\vec{E} = \vec{1}_x E_x + \vec{1}_y E_y$ s poljubno polarizacijo. Kovinski diski seveda predstavljajo večji strošek materiala, večjo maso antene in večji upor za veter od vitkih palčk ali zank.

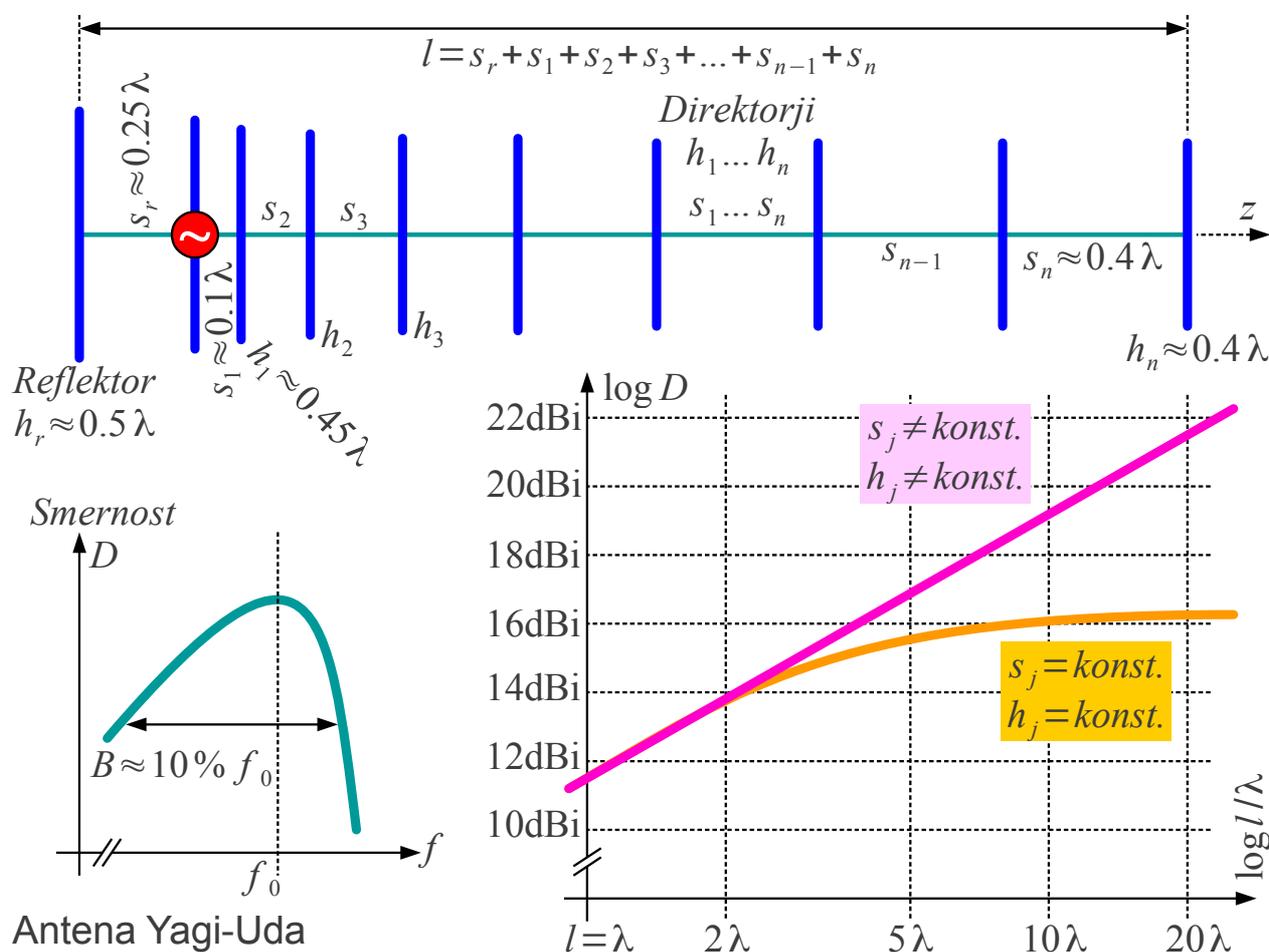
Kot zelo širokopasovna $B \approx 65\% f_0$ struktura z upočasnjnim valovanjem se obnaša tudi vijačnica (angleško: helix) iz kovinske žice ali traku. Obseg vijačnice oziroma dolžina ovoja $c \approx \lambda$ je v velikostnem razredu ene valovne dolžine. Korak vijačnice je okoli $s \approx 0.23 \lambda$.

Vijačnica deluje kot struktura z upočasnjnim valovanjem za krožno polarizacijo. Bolj natančno, desna vijačnica deluje kot dielektrik $\epsilon_r > 1$ za desno krožno polarizacijo $\vec{E}_D = (\vec{1}_x - j \vec{1}_y) E / \sqrt{2}$ in leva vijačnica kot

dielektrik $\epsilon_r > 1$ za levo krožno polarizacijo $\vec{E}_L = (\vec{1}_x + j\vec{1}_y)E/\sqrt{2}$.
 Kovinski nosilci se nikjer ne smejo dotikati vijačnice!

Prve antene z umetnimi dielektriki je izdelal in objavil v svoji domovini Shintaro Uda leta 1926, tedaj asistent na univerzi Tohoku v mestu Sendai (Japonska). Njegove antene so postale bolj znane šele leta 1928, ko predpostavljeni profesor Hidetsugu Yagi prikaže delo svoje skupine na področju oddajnikov, sprejemnikov, anten in razširjanja metrskih (VHF) in decimetrskih (UHF) v ZDA. Čeprav je Yagi v svojih člankih o usmerjeni (angleško: beam) radijski zvezi pošteno navajal Udo kot izumitelja antene, se je slednje prijelo ime Yagi, poleg tega v angleško govorečih državah pogosto "beam" in le redkokdo uporablja Yagi-Uda kot ime izuma.

Antena Yagi-Uda uporablja umetni dielektrik $\epsilon_r > 1$ v zbiralni leči, strukturi z upočasnjenim valovanjem iz številnih palčk, ki Uda jih imenuje "direktorji" in v razpršilni leči $\epsilon_r < 1$ oziroma odbojniku, ki ga Uda imenuje "reflektor". Anteno Yagi-Uda vzbuja en sam polvalovni dipol. Vse palčke: reflektor, vzbujevalni dipol in direktorji, so običajno nameščene na enem samem (kovinskem) nosilcu v smeri največjega sevanja antene z :



Zaradi uporabe rezonančnih pojavov v vseh palčkah je antena Yagi-Uda razmeroma ozkopasovna $B \approx 10\% f_0$. Debelejše palčke dajejo malenkost večjo pasovno širino. Odvisnost smernosti antene Yagi-Uda $D(f)$ od frekvence ni simetrična funkcija. Delovanje antene Yagi-Uda se zelo hitro poruši na višjih frekvencah. Ko direktorji dosežejo polovico valovne dolžine, antena Yagi-Uda lahko celo seva vzvratno! Obratno, proti nižjim frekvencam smernost antene Yagi-Uda upada razmeroma počasi s frekvenco.

Tudi v svoji najpreprostejši različici z vsemi palčkami na enem samem vzdolžnem nosilcu je načrtovanje antene Yagi-Uda silno zahtevno s številnimi stopnjami svobode. Načeloma so lahko vse palčke različnih dolžin in na različnih medsebojnih razmakih. Debelina palčk ima prav tako manjši vpliv na lastnosti antene Yagi-Uda. Končno mora načrtovalec izbirati med številom palčk $n+2$, skupno dolžino antene l , željeno smernostjo D in pripadajočo pasovno širino B .

Shintaro Uda je v svojih poskusih leta 1926 uporabljal direktorje enakih dolžin $h_j = konst. @ j=1,2,3 \dots n-1, n$ na enakih medsebojnih razdaljah $s_j = konst. @ j=2,3,4 \dots n-1, n$. Uporabljal je enega ali več prostorsko razporejenih reflektorjev in eksperimentalno z oddaljenostjo reflektorja s_r in oddaljenostjo prvega direktorja s_1 od vzbujevalnega dipola. Poskusi so pokazali, da v takšnih razmerah antena Yagi-Uda doseže največjo smernost okoli $D_{MAX} \approx 16 \text{dBi}$, ki pri dolžini nosilca nad $l \geq 5\lambda$ več ne narašča.

Razvoj antene Yagi-Uda se nadaljuje šele v desetletjih po drugi svetovni vojni. H. W. Ehrenspeck in H. Pöhler sta z res natančnimi meritvami leta 1959 ugotovila, da je bistven podatek za načrtovanje verige direktorjev fazna hitrost strukture z upočasnim valovanjem. Fazna hitrost ne sme biti konstantna vzdolž antene Yagi-Uda, pač pa mora biti najnižja pri vzbujevalnem dipolu in počasi naraščati vzdolž antene v smeri sevanja.

Peter P. Viezbicke je v laboratorijih National Bureau of Standards (Sterling, Virginia in Boulder, Colorado, ZDA) opravil v dveh desetletjih številne meritve s ciljem najti načrtovalski postopek anten Yagi-Uda. Viezbicke je svoje ugotovitve strnil v poročilu "Yagi Antenna Design, NBS Technical Note 688" leta 1976.

Viezbicke je uporabljal samo direktorje $h_j \neq konst.$ različnih dolžin. Medsebojne razdalje direktorjev $s_j = konst. @ j=1,2,3 \dots n-1, n$ je držal konstantne. Kljub temu njegovo delo še vedno predstavlja temelj resnega načrtovanja antene Yagi-Uda s pomočjo tabele nekaj uspešnih prototipov:

TABLE 1. OPTIMIZED LENGTHS OF PARASITIC ELEMENTS
FOR YAGI ANTENNAS OF SIX DIFFERENT LENGTHS

		LENGTH OF YAGI IN WAVELENGTHS					
		0.4	0.8	1.20	2.2	3.2	4.2
LENGTH OF REFLECTOR, λ		0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	0.475
LENGTH OF DIRECTOR, λ	1st	0.424	0.428	0.428	0.432	0.428	0.424
	2nd		0.424	0.420	0.415	0.420	0.424
	3rd		0.428	0.420	0.407	0.407	0.420
	4th			0.428	0.398	0.398	0.407
	5th				0.390	0.394	0.403
	6th				0.390	0.390	0.398
	7th				0.390	0.386	0.394
	8th				0.390	0.386	0.390
	9th				0.398	0.386	0.390
	10th				0.407	0.386	0.390
	11th					0.386	0.390
	12th					0.386	0.390
	13th					0.386	0.390
	14th					0.386	
	15th					0.386	
SPACING BETWEEN DIRECTORS, IN λ		0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.308
GAIN RELATIVE TO HALF-WAVE DIPOLE IN dBd		7.1	9.2	10.2	12.25	13.4	14.2
DESIGN CURVE (SEE FIG. 9)		(A)	(B)	(B)	(C)	(B)	(D)

Tabela NBS

ELEMENT DIAMETER = 0.0085λ

$f = 400 \text{ MHz}$

REFLECTOR SPACED 0.2λ BEHIND DRIVEN ELEMENT

Viezbicke je prvi objavil, kako upoštevati debelino palčk in preračunati

uspešno anteno Yagi-Uda za palčke drugačnih debelin s pomočjo grafa:

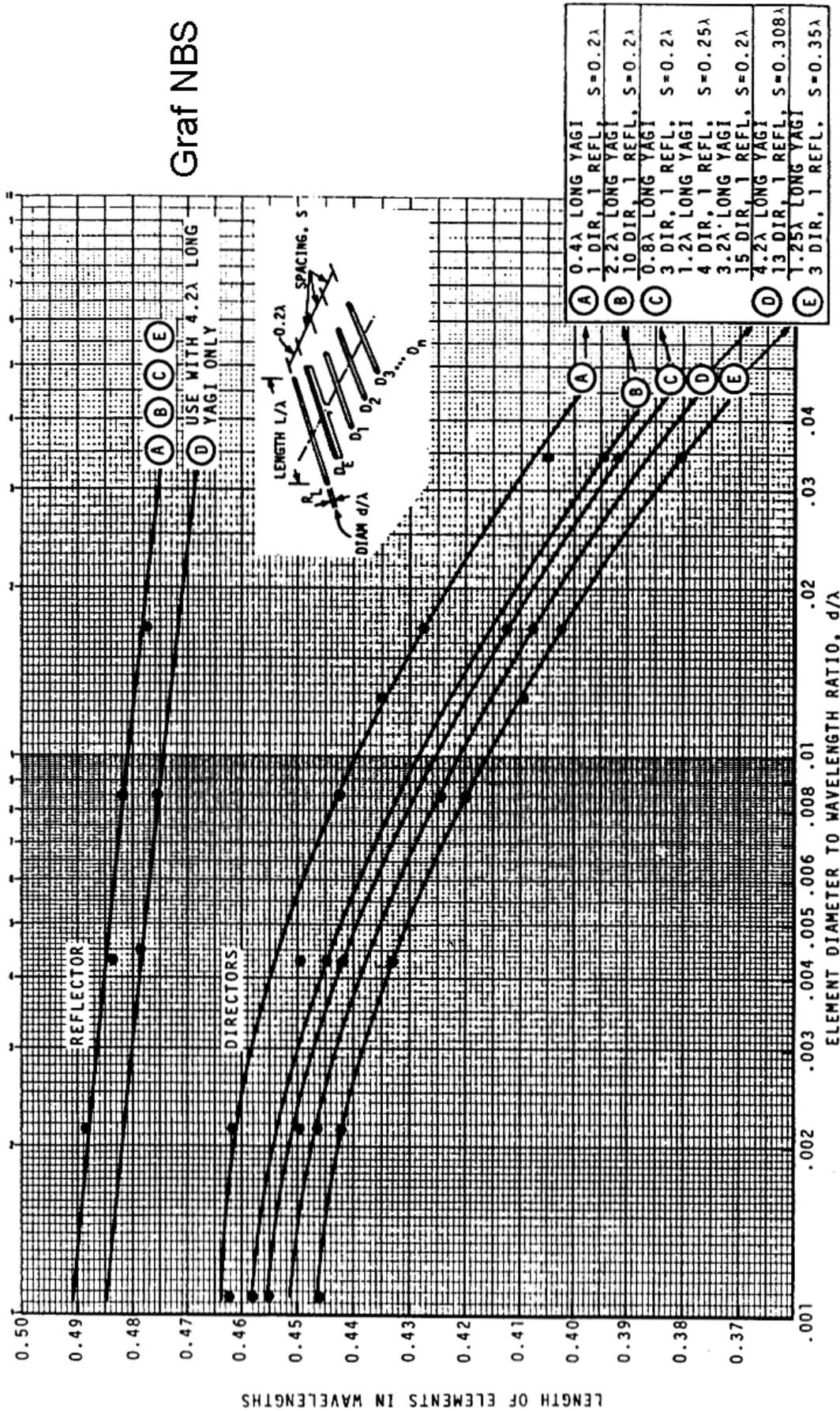


FIG. 9 YAGI ANTENNA DESIGN DATA SHOWING THE RELATIONSHIP BETWEEN ELEMENT DIAMETER TO WAVELENGTH RATIO AND ELEMENT LENGTH FOR DIFFERENT ANTENNAS

Viezbicke je ovrednotil manjši vpliv vzdolžnega nosilca na lastnosti antene. Če palčke prebadajo kovinski nosilec in so z njim v dobrem električnem stiku, je treba dolžinam palčk prišteti približno $\Delta h \approx 0.7 d$ premera kovinskega nosilca krožnega prereza.

Z uporabo direktorjev $h_j \neq konst.$ različnih dolžin na razdaljah, ki naraščajo od $s_1 \approx 0.1 \lambda$ pri vzbujevalnem dipolu vse do $s_n \approx 0.4 \lambda$ na drugem koncu antene je možno doseči še višje smernosti zelo dolge antene Yagi-Uda. Günter Hoch je leta 1982 s skrbnim načrtovanjem antene Yagi-Uda dosegel prirastek smernosti za $\Delta D_{dB} = D_{dBi}(2l) - D_{dBi}(l) \approx 2.35 \text{ dB}$ za vsako podvojitve dolžine antene vse do $l \geq 20 \lambda$ in več.

Smernost skrbno načrtovane antene Yagi-Uda torej narašča počasneje od dolžine nosilca oziroma stroškov materiala. Podvojitve dolžine prinese precej manjši prirastek smernosti $\Delta D_{dB} < 3 \text{ dB}$ od pričakovanj. Pri zelo dolgih antenah Yagi-Uda niti izgube zaradi končne prevodnosti palčk iz aluminija niso zanemarljive, da je prirastek dobitka še manjši $\Delta G_{dB} < \Delta D_{dB}$ od prirastka smernosti.

Varčevanje s kovino v umetnem dielektriku antene Yagi-Uda ima še druge neželjene posledice. Če se na palčkah antene Yagi-Uda za $f_0 \approx 1 \text{ GHz}$ naberejo dežne kapljice, se frekvenčni odziv antene premakne navzdol za približno $\Delta f \approx -50 \text{ MHz}$. Če se na palčkah nabereta sneg ali žled, se snop sevanja antene za $f_0 \approx 1 \text{ GHz}$ obrne v vzvratno smer, frekvenčni odziv antene za $f_0 \approx 100 \text{ MHz}$ pa znatno premakne navzdol.

Iz omenjenih razlogov vse antene Yagi-Uda običajno načrtujemo za nekoliko višjo frekvenco od nazivne. Če anteno zapremo v pokrov iz izolirne snovi, moramo obvezno upoštevati vpliv dielektričnosti pokrova na frekvenčni odziv antene. Pri izbiri antene ne smemo pozabiti, da so drugačne vrste anten lahko manj občutljive na vremenske pojave, zaščita pred vremenskimi vplivi je mogoče bolj preprosta in lahko imajo pri enaki smernosti manjše izmere od antene Yagi-Uda oziroma drugih anten z umetnimi dielektriki.

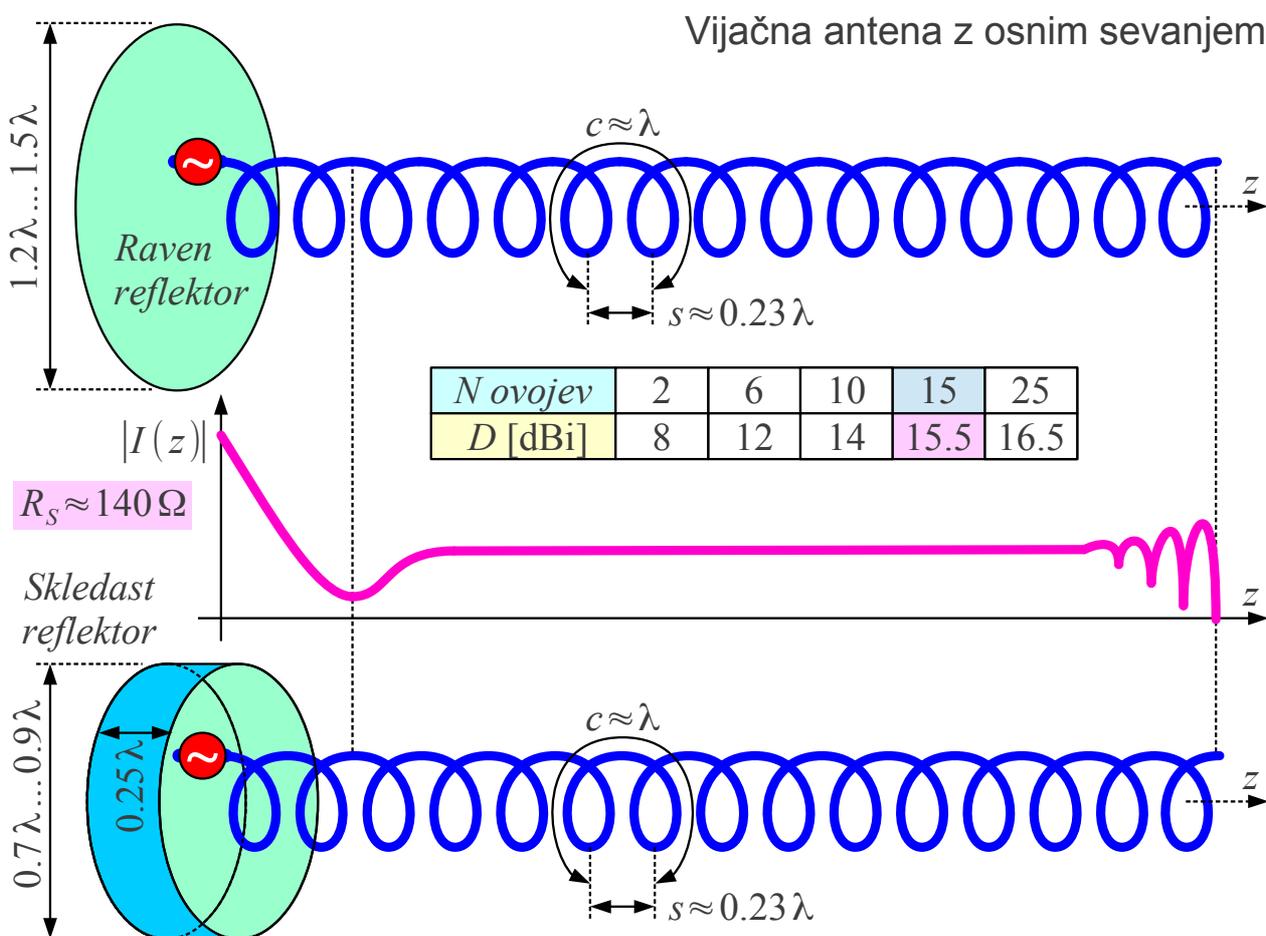
Že Shintaro Uda je preizkusil strukture s palčkami, več direktorji in več reflektorji, razporejenimi v več kot eni dimenziji, kar zahteva komplicirane nosilce. Strukture z upočasnjenim valovanjem iz vitkih kovinskih zank imajo zelo podobne električne lastnosti kot strukture iz ravnih palčk. Večjo pasovno širino omogočajo kovinski diski kot tudi gradniki iz pločevine drugačnih oblik.

Vijačnica iz žice se je najprej uporabljala v mikrovalovnih elektronkah na potujoči val (TWT). V slednjih vijačnica ali drugačna struktura upočasnji

elektromagnetno valovanje do te mere, da postane njegova fazna hitrost primerljiva s hitrostjo snopa elektronov. Takšna vijačnica ima premajhne ovoje in prenizko fazno hitrost, da bi bila uporabna v antenah.

Uporabno usmerjeno anteno, osnovano na vijačnici iz žice, je razvil John D. Kraus in opisal leta 1948. Vijačnica z obsegom oziroma dolžino enega ovoja v območju $3\lambda/4 \leq c \leq 4\lambda/3$ in razmeroma majhnim naklonom $\alpha = 12^\circ \dots 15^\circ$ se obnaša kot struktura z upočasnjenim valovanjem za pripadajočo krožno polarizacijo. Naklon ustreza hodu vijačnice $s \approx 0.21 \dots 0.25\lambda$ pri osrednji frekvenci $c \approx \lambda$.

Vijačnica ni samo struktura z upočasnjenim valovanjem, pač pa hkrati izvor sevanja. Električni generator priključimo med veliko ravno kovinsko ploščo (reflektor) in začetkom vijačnice. Porazdelitev toka na vijačnici pokaže dva zelo različna pojava. Prva dva ovoja vijačnice se obnašata kot izvor sevanja, jakost toka $|I(z)|$ tu skoraj linearno upada. Ostali ovoji vijačnice se obnašajo kot dielektrična leča s tokom skoraj konstantne jakosti $|I(z)| = konst.$ z izjemo krajšega stojnega vala na odprtem koncu antene:



Med obema deloma vijačne antene, po dveh ovajih, jakost toka močno upade. Poskus pokaže, da se obnašanje antene skoraj nič ne spremeni, če

po dveh ovojih žico prekinemo. Najkrajša smiselna vijačna antena z osnim sevanjem v smeri osi z ima torej dva ovoja. Vijačne antene z več ovoji se obnašajo zelo podobno antenam Yagi-Uda primerljive dolžine z izjemo krožne polarizacije in večje pasovne širine strukture z upočasnjenim valovanjem.

Vijačna antena z osnim sevanjem zahteva velik kovinski reflektor. Krožna kovinska plošča naj ima premer $d \approx 1.2\lambda \dots 1.5\lambda$. Premajhen reflektor povzroči bočno sevanje antene, kar odžira smernost v osi antene. Raven reflektor lahko uspešno nadomesti skledast reflektor premera $d \approx 0.7\lambda \dots 0.9\lambda$ in obodom višine najmanj četrtr valovne dolžine.

Nadležno bočno sevanje lahko povzroči tudi raven odsek žice, pravokoten na reflektor, med reflektorjem in začetkom vijačnice. Slednji je pogosta konstrukcijska napaka številnih praktičnih vijačnih anten. Na skici vijačne antene je na tem mestu narisani električni generator, ki bi moral biti čim manjši, da bočno sevanje ravnega odseka ne odžira smernosti v osi antene. Sevalna upornost opisane vijačne antene z osnim sevanjem je v velikostnem razredu $R_s \approx 140\Omega$.

Vijačnica s konstantnim premerom in hodom ustreza anteni Yagi-Uda z direktorji enake dolžine $h_j = konst.$ na enakih medsebojnih razdaljah $s_j = konst.$. Seveda lahko električni vodnik navijemo tudi na plašč stožca in uporabimo spremenljiv hod vijačnice. Stojni val na odprtem koncu vijačnice lahko zadušimo tako, da zadnja dva ovoja skrčimo v stožec in na ta način izboljšamo osno razmerje krožne polarizacije.

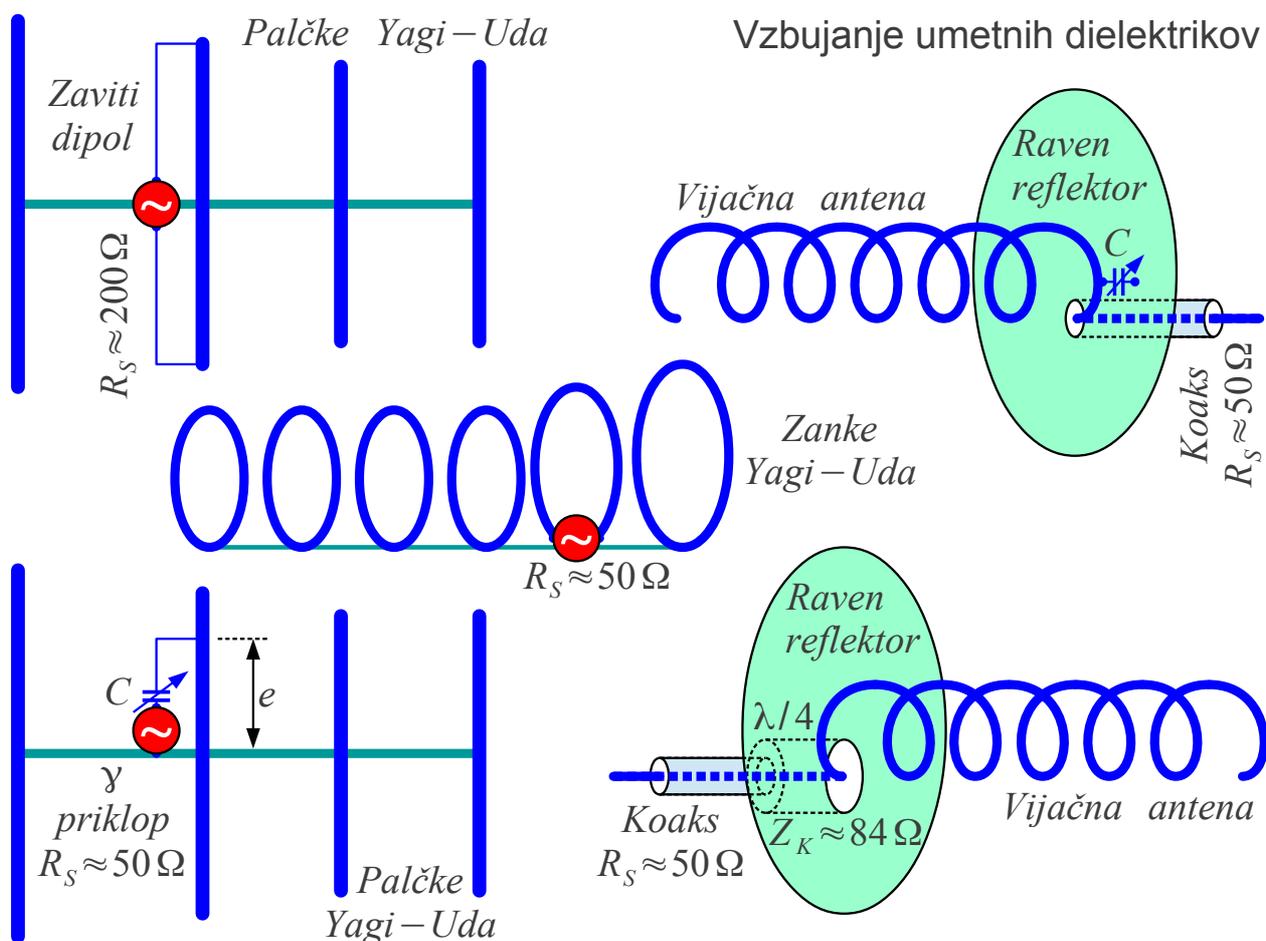
Z izjemo vijačnice večina ostalih struktur z upočasnjenim valovanjem potrebuje še vzbujanje s primernim izvorom sevanja. Vzbujanje je najpogosteje podobno gradnikom strukture, na primer polavalovni dipol v anteni Yagi-Uda s palčkami, enovalovna zanka $o \approx \lambda$ v strukturi zank oziroma valovodni lijak, ki osvetljuje kovinske diske. Prisotnost zbiralnih in razpršilnih leč ter odbojnikov ima velik vpliv na impedanco polvalovnega dipola oziroma enovalovne zanke.

Reflektor in direktorji običajno znižajo sevalno upornost vzbujevalnega dipola antene Yagi-Uda. Kot vzbujevalni dipol se pogosto uporablja zaviti dipol s sevalno upornostjo okoli $R_s \approx 200\Omega$, kar simetrični člen $\lambda/2$ preslika na $Z_K = 50\Omega$ standardnega koaksialnega kabla. Dodatno transformacijo impedance omogoča nesimetrični zaviti dipol.

"Gamma" prilagoditev (angleško: gamma match) oziroma γ priklop omogoča transformacijo impedance v zelo širokem razponu z nastavljanjem dveh gradnikov: kondenzatorja C in dolžine prilagodilnega voda e .

Izredno širok razpon transformacije γ priklopa je lahko celo varljiv: kljub brezhibni prilagoditvi impedance antena mogoče sploh ne deluje na željeni frekvenci?

Sevalna upornost osamljene enovalovne zanke je v velikostnem razredu $R_S \approx 100 \Omega$. Ko vzbujevalno zanko vstavimo med zanko reflektor in verigo zank direktorjev, se njena sevalna upornost razpolovi. Slednja je blizu $Z_K = 50 \Omega$ standardnega koaksialnega kabla, kar razlaga priljubljenost zank Yagi-Uda:



Vijačno anteno pogosto napajamo s standardnim koaksialnim kablom $Z_K = 50 \Omega$ preko četrtvalovnega transformatorja iz koaksialnega kabla s karakteristično impedanco $\sqrt{140 \Omega \cdot 50 \Omega} \approx 84 \Omega$. Bolj preprosta rešitev prilagoditve impedance vijačne antene na $Z_K = 50 \Omega$ je nastavljeni kondenzator C , priključen med prvi ovoj vijačnice in reflektor na približno $1/8$ ovoja (45°) od napajalne točke. Nastavljeni kondenzator C je lahko preprosto košček pločevine, pritrjen na reflektor ali pa vijačnico in ukrivljen proti drugi elektrodi za najboljšo prilagoditev impedance.

Za vse antene s strukturami z upočasnjnim valovanjem, ki so

načrtovane za največjo smernost, so značilni razmeroma veliki stranski snopi sevanja in ožji glavni snop. Krausov približek smernosti $D \approx 4\pi/(\alpha_E \alpha_H)$ iz širin -3dB obeh prerezov glavnega snopa daje previsoko oceno smernosti. Previsoke navedbe smernosti in dobitkov zasledimo v številnih člankih, knjigah in reklamah proizvajalcev anten.

Vsem antenam s strukturami z upočasnjnim valovanjem se impedanca hitro spreminja s frekvenco. Če izmerjena impedanca antene ni kaj dosti odvisna od frekvence oziroma je antena dobro impedančno prilagojena v širšem frekvenčnem pasu, to najpogosteje pomeni resno načrtovalsko napako antene. Smernost in dobitek takšne sumljive antene sta najpogosteje dosti nižja od navedb.

Vsi opisani umetni dielektriki so eno-dimenzijske strukture. Gradniki strukture so nanizani na eni sami osi v smeri sevanja antene. Povsem jasno se da izdelati tudi 2D in 3D umetne dielektrike. Ker slednji potrebujejo večjo količino kovine od preprostega zbiralnega zrcala, se pri gradnji anten večinoma niso uveljavili.

* * * * *