

Piramidna lijaka za 5.7GHz in 10GHz

Matjaž Vidmar, S53MV

1. Kaj početi z valovodnim lijakom?

Valovodni lijaki spadajo med najenostavnejše antene. Kakorkoli namreč oblikujemo konec kovinskega valovoda v trobento pravokotnega, okroglega ali drugačnega prereza, se naprava vedno obnaša kot usmerjena antena. Celo odrezan konec valovoda se obnaša kot antena, ki jo s pridom uporabljamo, na primer kot žarilec za osvetljevanje parabolčnih zrcal.

Uporabo valovodnih lijakov seveda pogojuje uporaba kovinskih valovodov kot prenosnih vodov, kar pomeni, da takšne antene običajno uporabljamo na visokih frekvencah nad 1GHz. Ker so lijaki enostavni za izdelavo in razmeroma neobčutljivi na tolerance izdelave, so prav gotovo najprimernejša vrsta antene za vse začetnike na mikrovalovih.

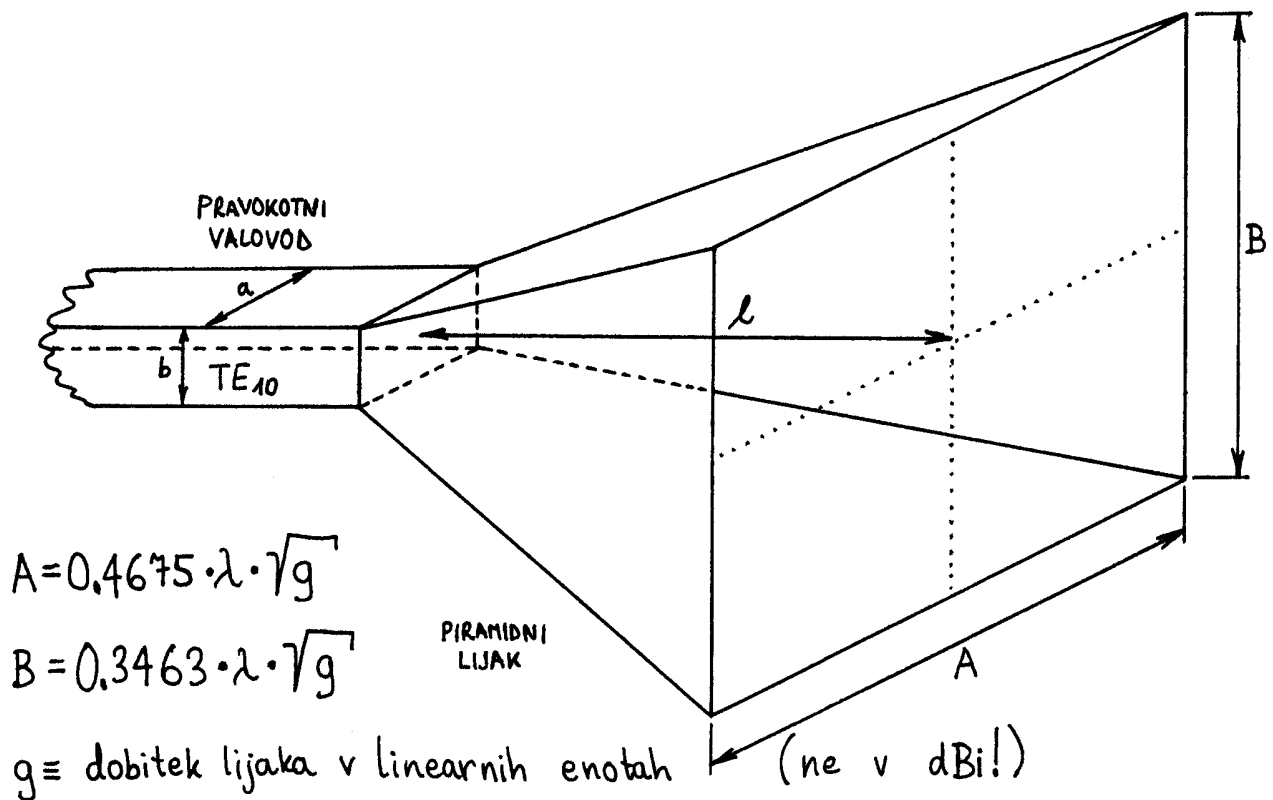
Napaka marsikaterega začetnika je ravno v tem, da je prepričan, da v tekmovanju nujno potrebuje ogromno parabolčno zrcalo. Priprava zrcala, žarilca in podstavka zahteva dosti dela že doma. Prevoz, postavljanje in nastavljanje takšne antene tudi ni od muh. Tudi veter se na vrhu hriba najrajši poigra z velikim zrcalom.

Iz lastnih izkušenj dobro vem, da je propadel marsikateri poskus mikrovalovne zveze samo zato, ker moj sogovornik ni znal ali mogel naciljati svoje antenske pošasti name, oziroma mu veter ni dopuščal, da bi jo sploh postavil. Najbolj žalosten je seveda izgovor, ki sem ga slišal od marsikaterega sogovornika v tekmovanju: transverter oziroma postajo za one gigaherce sicer imam, ampak sem ju pustil doma, ker nimam antene...

Valovodni lijak je prava antena ne samo za prve poskuse na mikrovalovih, pač pa tudi potem, ko že imamo pripravljeno večjo anteno. Za veliko večino zvez namreč zadošča nižji dobitok antene in jih lahko vzpostavimo tudi z lijakom, da ne zamujamo dragocenega časa v tekmovanju s ciljanjem ogromne antenske pošasti. Antensko pošast je smiselno vključiti samo takrat, ko smo prepričani, da je poskus zveze propadel zaradi premajhnega dobitka našega lijaka.

2. Načrtovanje piramidnega lijaka

Od velikosti in oblike lijaka (ali trobente) ter vzbujevalnega valovoda so seveda odvisne lastnosti antene. S pravokotnim kovinskim valovodom običajno vzbujujamo lijak pravokotnega prereza v obliki piramide, kot je to prikazano na sliki 1. Polarizacija takšnega lijaka seveda ustreza smeri električnega polja v valovodu, ki za osnovni valovodni rod TE₁₀ kaže v smeri krajše stranice valovoda "b".



Slika 1 - Izgled in izmere piramidnega lijaka.

Antena na sliki 1 je torej pokončno polarizirana. Če bi želeli izdelati lijak za obe polarizaciji, pokončno in vodoravno, oziroma za krožno polarizacijo, bi seveda izbrali lijak kvadratnega ali okroglega prereza. Za eno samo linearno polarizacijo (pokončno ali vodoravno) pa s pravokotnim prerezom prihranimo nekaj prostora in pločevine.

Če nas zanima le dobitek lijaka in ne postavljamo nobenih posebnih zahtev za obliko smernega diagrama, potem izmere odprtine lijaka (veliki črki "A" in "B") izberemo tako, kot je to prikazano na sliki 1. Pri tem moramo v oba izraza vstaviti valovno dolžino (λ v praznem prostoru) in željeni dobitek antene "g", izražen v linearnih enotah, ne v decibelih! Na primer, 20dBi pomeni razmerje moči 100, se pravi vstavimo število 100 kot "g" v oba izraza za "A" in "B".

Dolžino lijaka "l" je težje določiti. Pri prekratkih lijaku valovne fronte na odprtini niso ravne, pač pa ukrivljene, kar odžira dobitek antene. Predolg lijak pa je preprosto ogromen. V grobem povedano, potrebna dolžina lijaka "l" narašča sorazmerno kvadratu izmer odprtine "A" ali "B". Lijaki za velike dobitke so zato zelo dolgi in položni. Enostavnih piramidnih lijakov zato običajno ne gradimo za dobitke, večje od 25dBi ($g=316$), saj postanejo dosti večji in težji od drugih vrst anten.

Tabeli na sliki 2 nam povesta, kako izbrati dolžino lijaka "l", da dobimo največ decibelov dobitka z najmanjšim stroškom za pločevino. Tabeli sta napisani za dobitke od 10dBi do 25dBi za dve različni razmerji stranic vzbujevalnega valovoda (mali črki "a" in "b"). Končno je parameter tabel še razmerje med valovno dolžino v praznem prostoru in široko stranico vzbujevalnega valovoda " λ/a ". Objavljene tabele so povzete iz članka Donald E. Cozzens: "Tables Ease Horn Design", objavljenega v reviji Microwaves, marec

1966.

Gain (dB)	λ/a							
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
10	0.060	0.067	0.072	0.077	0.081	0.083	0.087	0.089
11	0.191	0.208	0.222	0.233	0.243	0.252	0.259	0.265
12	0.339	0.365	0.385	0.402	0.416	0.428	0.439	0.449
13	0.533	0.565	0.591	0.613	0.632	0.648	0.662	0.675
14	0.786	0.825	0.858	0.885	0.909	0.929	0.946	0.962
15	1.116	1.164	1.204	1.237	1.265	1.289	1.306	1.321
16	1.547	1.603	1.650	1.689	1.722	1.751	1.772	1.789
17	2.104	2.170	2.224	2.270	2.309	2.343	2.366	2.386
18	2.823	2.898	2.961	3.015	3.060	3.098	3.124	3.147
19	3.745	3.832	3.905	3.966	4.018	4.061	4.091	4.117
20	4.926	5.026	5.110	5.179	5.239	5.285	5.319	5.349
21	6.435	6.548	6.643	6.723	6.791	6.840	6.879	6.913
22	8.357	8.486	8.594	8.684	8.762	8.813	8.857	8.896
23	10.802	10.949	11.070	11.173	11.256	11.313	11.363	11.407
24	13.908	14.074	14.211	14.327	14.414	14.478	14.534	14.584
25	17.849	18.035	18.190	18.321	18.410	18.482	18.546	18.602

Dolžina l (v enotah λ) za $a/b=2.0$

Gain (dB)	λ/a							
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
10	0.064	0.071	0.076	0.080	0.084	0.087	0.090	0.092
11	0.201	0.218	0.231	0.242	0.252	0.259	0.266	0.272
12	0.354	0.378	0.398	0.414	0.428	0.439	0.449	0.458
13	0.551	0.582	0.607	0.628	0.646	0.661	0.674	0.686
14	0.807	0.845	0.876	0.902	0.924	0.944	0.960	0.975
15	1.141	1.186	1.224	1.255	1.282	1.305	1.323	1.336
16	1.574	1.628	1.672	1.710	1.742	1.770	1.789	1.805
17	2.133	2.196	2.249	2.293	2.330	2.363	2.386	2.403
18	2.854	2.928	2.989	3.040	3.083	3.121	3.146	3.166
19	3.780	3.864	3.934	3.993	4.044	4.087	4.114	4.137
20	4.965	5.061	5.141	5.209	5.266	5.315	5.345	5.372
21	6.476	6.586	6.677	6.755	6.821	6.872	6.907	6.937
22	8.402	8.527	8.631	8.719	8.794	8.849	8.888	8.922
23	10.852	10.993	11.111	11.211	11.296	11.352	11.396	11.435
24	13.963	14.123	14.256	14.369	14.464	14.521	14.571	14.615
25	17.909	18.089	18.240	18.367	18.467	18.530	18.586	18.636

Dolžina l (v enotah λ) za $a/b=2.25$

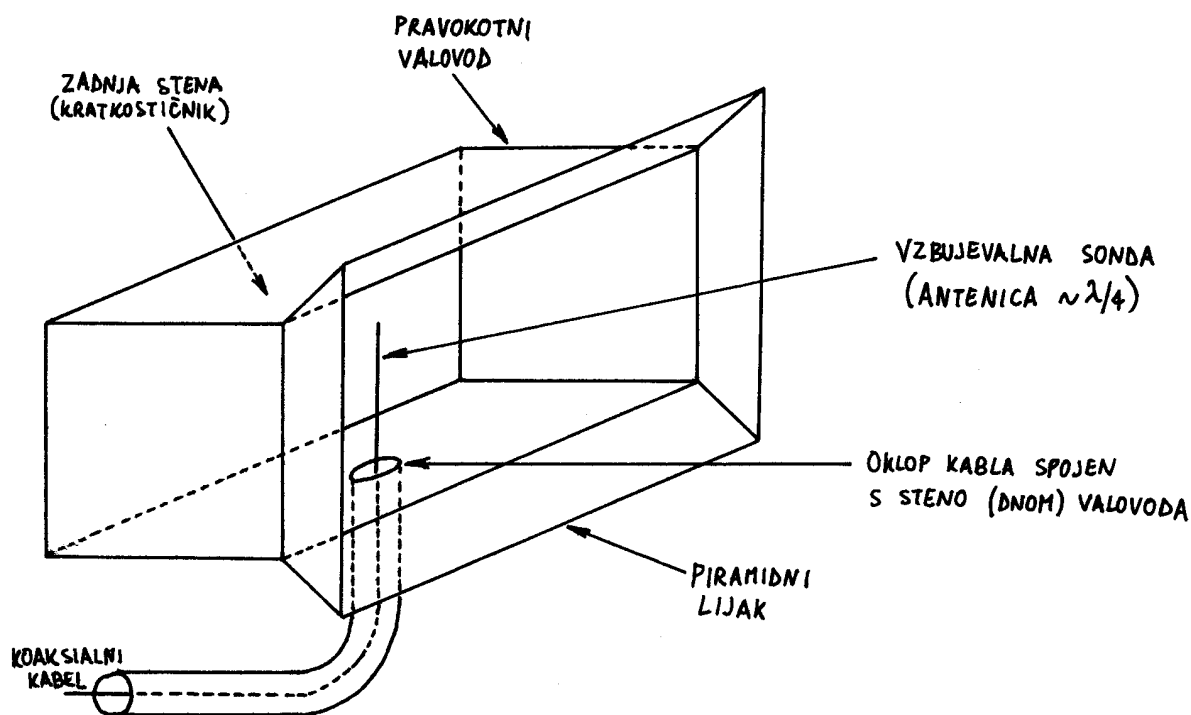
Slika 2 - Tabeli za izračun dolžine lijaka l .

Odčitek iz tabel na sliki 2 moramo seveda pomnožiti z valovno dolžino, da dobimo potrebno dolžino lijaka " l ". Odčitek smemo vedno zaokrožiti navzgor: daljši lijak bo dal celo kakšno desetinko dB več dobitka na račun dosti večjega stroška za pločevino. Zaokroževanje navzdol ni smiselno, ker dobitek prekratkega lijaka hitro pada.

3. Vzbujanje valovoda s koaksialnim kablom

Večina sodobnih mikrovalovnih naprav, vsaj za manjše moči do nekaj W in frekvence do 24GHz, je izdelana s polprevodniki, vgrajenimi na mikrotrakasto tiskano vezje. Vse takšne naprave so zato opremljene s 50-ohmskim koaksialnim priključkom. Valovodni priključki so za frekvence pod 10GHz nerodno veliki in se uporabljajo le za prenos velikih moči.

Valovodni lijak lahko vzbuja preko koaksialnega kabla na različne načine. Med najenostavnejše sodi vzbujanje z majhno paličasto anteno, ki je prikazano na sliki 3. Antenico vstavimo v pravokotni valovod skozi luknjo sredi široke stranice valovoda. Valovod je na enem (prednjem) koncu priključen na lijak, drugi (zadnji) konec valovoda pa je kratkosklenjen s kovinsko steno.



Slika 3 - Vzbujevanje lijaka s koaksialnim kablom.

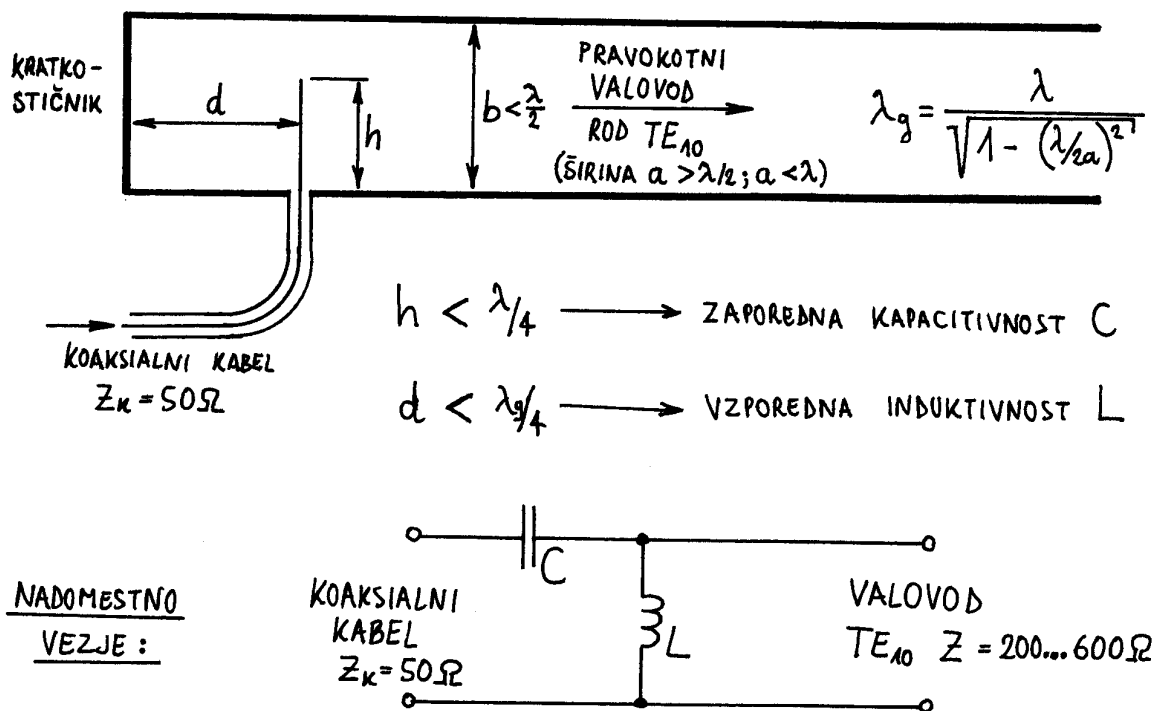
Pri napajanju katerekoli antene moramo seveda upoštevati tudi prilagoditev impedance. V slučaju piramidnega valovodnega lijaka, ki ga napajamo s koaksialnim kablom preko antenice, imamo kar tri skoke med različnimi prenosnimi sredstvi:

- (1) koaksialni kabel na pravokotni valovod,
- (2) pravokotni valovod na piramidni lijak in
- (3) piramidni lijak na prazen prostor pred anteno.

Vsi trije prehodi v splošnem primeru povzročajo odbite valove. Seveda bo pri dobro načrtovani anteni kazalčna vsota vseh treh odbitih valov majhna.

Vse tri odboje (oziroma dva, če je lijak kar odprti konec valovoda) moramo vedno upoštevati pri lijakih z majhnim dobitkom pod 15dBi, na primer pri žarilcih za osvetljevanje paraboličnih zrcal. Lijaki z visokimi dobitki nad 20dBi so zelo položni, zato je odboj na prehodu valovod/lijak zanemarljiv. Ker imajo lijaki z visokim dobitkom nad 20dBi tudi veliko odprtino, so tokovi v kovinskih stenah blizu odprtine lijaka že zelo majhni in je tudi odboj na meji lijak/prazen prostor zanemarljiv.

Pri lijakih z visokimi dobitki nad 20dBi povzročajo odboje le neprilagoditev na prehodu koaksialni kabel/valovod. Prilagoditev impedance koaksialnega kabla na valovod je prikazana na sliki 4. Za prilagajanje impedance imamo na razpolago vsaj dve spremenljivki: dolžino antenice "h" in razdaljo med antenico in kratkostičnikom "d".



Slika 4 - Prilagoditev impedance koaksialnega kabla na valovod.

Karakteristične impedance valovoda ne moremo definirati v običajnem smislu, ker električna napetost v valovodu ni definirana. Približno pa si impedanco valovoda lahko predstavljamo kot impedanco bremena, ki bi ga vgradili na mestu antenice in priključili med gornjo in spodnjo široko steno valovoda. Za osnovni valovodni rod TE_{10} je takšna impedanca razmeroma visoka, nekje med 200 in 600 ohmi in je močno frekvenčno odvisna. Pri mejni frekvenci valovoda je neskončno velika in potem z naraščanjem frekvence upada.

Impedanco koaksialnega kabla prilagodimo na valovod tako, da izberemo dolžino antenice nekoliko krajšo od četrte valovne dolžine. Takšna antenica predstavlja kapacitivno breme oziroma zaporedni kondenzator "C" proti nasprotni široki steni valovoda. Tudi razdaljo "d" med kratkostičnikom in antenico izberemo nekoliko krajšo od četrte valovne dolžine v valovodu " λ_g ", da predstavlja kratkosklenjeni kos valovoda vzporedno induktivnost "L".

Nadomestno "LC" vezje deluje kot transformator impedance, ki preslika 50-ohmski kabel na dosti višjo impedanco. Takšen transformator je sicer frekvenčno odvisen. Dobro načrtovan prehod iz koaksialnega kabla na valovod to frekvenčno odvisnost koristno izrablja, da se prilagodi frekvenčni odvisnosti impedance valovoda.

Pri lijakih z majhnimi dobitki pod 15dBi vplivajo na prilagoditev impedance še drugi odboji. Impedanco antene zato prilagodimo na koaksialni kabel z nekoliko drugačno izbiro dolžine antenice "h" in oddaljenosti kratkostičnika "d". Prilagoditev impedance je odvisna tudi od dolžine valovoda med antenico in lijakom, saj ta določa fazno razliko med kazalci različnih odbojev.

Končno lahko prilagoditev impedance popravimo tudi z uglaševalnimi vijaki, ki jih vgradimo v široko steno valovoda. Uglaševalni vijaki omogočajo le razmeroma ozkopasovno prilagoditev impedance, zato se jih rajši izogibljemo.

Za začetnike še par besed o valovodih. Kovinski valovodi povsem jasno ne morejo prenašati enosmerne oziroma zelo nizkih frekvenc. Visokofrekvenčni signali pa lahko potujejo skozi kovinski valovod na različne načine, ki jih imenujemo rodovi. Vsak rod valovanja ima svojo valovno dolžino " λ ", ki je večja od valovne dolžine v praznem prostoru, ker je fazna hitrost razširjanja valovanja v valovodu večja od svetlobne hitrosti.

Modulacija signala sicer potuje s skupinsko hitrostjo v valovodu, ki je različna od faze hitrosti. Skupinska hitrost je vedno manjša od svetlobne hitrosti v praznem prostoru. Informacija torej potuje po valovodu počasneje od svetlobe v praznem prostoru, da je gospod Einstein zadovoljen.

Vsak rod valovanja ima tudi svojo mejno ali zaporno frekvenco, pod katero ne more potovati po valovodu. Da se izognemo zmešnjavi najrazličnejših rodov, kovinski valovod običajno načrtujemo tako, da se po njemu širi en sam rod valovanja, z oznako TE₁₀ v valovodu pravokotnega prereza. Mejno frekvenco osnovnega rodu dosežemo takrat, ko je široka stranica valovoda "a" enaka polovici valovne dolžine v praznem prostoru.

Valovod običajno želimo izdelati čim širši, da so izgube zaradi končne prevodnosti kovinskih sten manjše. Široka stranica "a" mora biti pri tem manjša od cele valovne dolžine v praznem prostoru, da se izognemo naslednjemu višjemurodu TE₂₀. Ozka stranica "b" pa mora biti manjša od polovice valovne dolžine, da se izognemo rodu TE₀₁.

Valovodne lijake najenostavneje napajamo z valovodom, po katerem se pri delovni frekvenci lahko širi en sam rod valovanja. V nekaterih slučaji pa namerno napajamo lijak z valovodom, ki prenaša več rodov valovanja. Pri tem moramo paziti na jakost in fazo posameznih rodov, ki vzbujajo lijak, da dosežemo željene lastnosti antene.

4. Izvedbi lijakov za 5.7GHz in 10GHz

Piramidne valovodne lijake lahko izdelamo iz različnih snovi, ki pa morajo biti dobri električni prevodniki. Piramidni lijak je verjetno najlažje izdelati iz kosov medeninaste pločevine, ki jih med sabo mehko ali trdo spajkamo. Medeninasto pločevino lahko tudi neposredno prispajkamo na valovod oziroma na standardno prirobnico za spajanje pravokotnih valovodov.

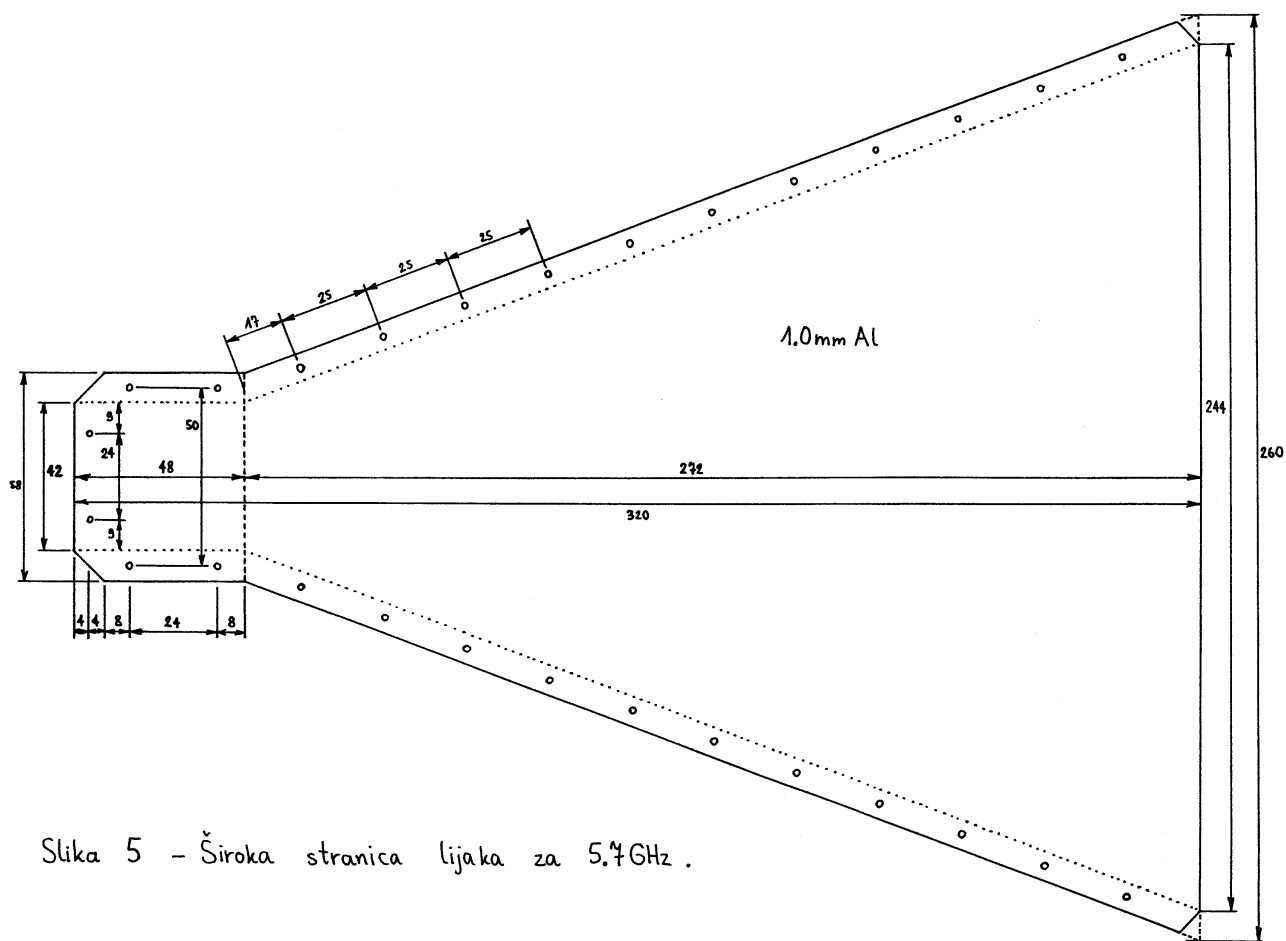
Ker so medeninasti lijaki razmeroma težki, pogosto iščemo lažje snovi za gradnjo lijakov. Precej lažje lijake lahko na primer izdelamo iz vitroplasta za tiskana vezja. Stranice iz vitroplasta spajamo z mehkim spajkanjem bakrene folije, ki mora biti obrnjena na notranjo stran lijaka zaradi čim manjših izgub. Pri tem morajo biti stranice med sabo vedno spojene na notranji strani, tudi v slučaju uporabe dvostranskega vitroplasta. Seveda lahko za izboljšanje mehanske trdnosti dvostranski vitroplast dodatno spajkamo še na zunanji strani.

Pri gradnji lijakov za 5.7GHz in 10GHz sem se odločil za mehko aluminijevo pločevino debeline 1mm, ki je razmeroma lahka in poceni ter jo enostavno obdelujemo:

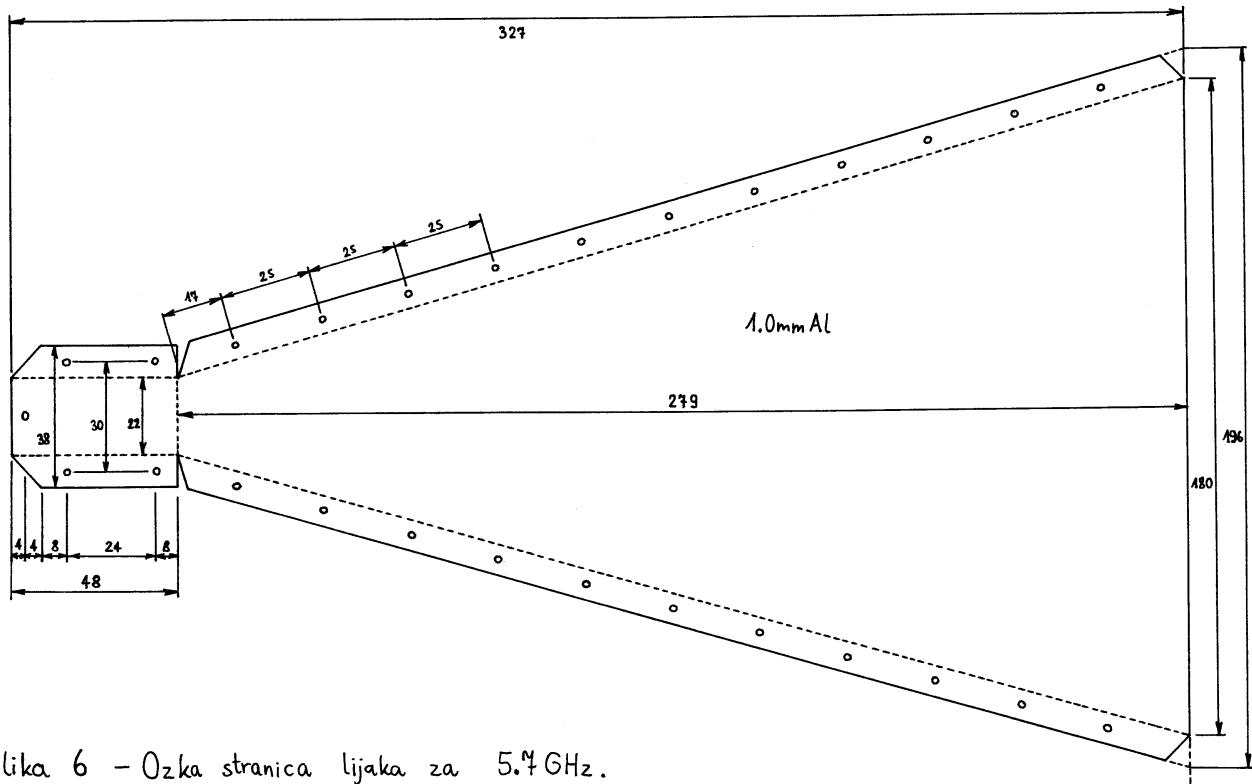
režemo, vrtamo in krivimo. Ker aluminija ne moremo enostavno spajkati, stranice spojimo z večjim številom vijakov ali zakovic. Vijake oziroma zakovice postavljamo na razdalji največ pol valovne dolžine, se pravi z razmakom 25mm za področje 5.7GHz in z razmakom 15mm za področje 10GHz.

Izmere lijakov so seveda v glavnem odvisne od željenega dobitka antene. Za frekvenčno področje 5.7GHz sem se odločil za anteno z dobitkom 20dBi, za frekvenčno področje 10GHz pa za anteno z dobitkom 23dBi. Številke, dobljene iz formul in tabel sem nekoliko zaokrožil, da je bilo rezanje, vrtanje in krivljenje pločevine enostavnejše.

Vsak valovodni lijak potrebuje pet sestavnih delov iz 1mm debele aluminijeve pločevine: po dve enaki široki stranici, po dve enaki ozki stranici in kratkostičnik. Široka in ozka stranica 20dBi lijaka za 5.7GHz sta prikazani na slikah 5 in 6.

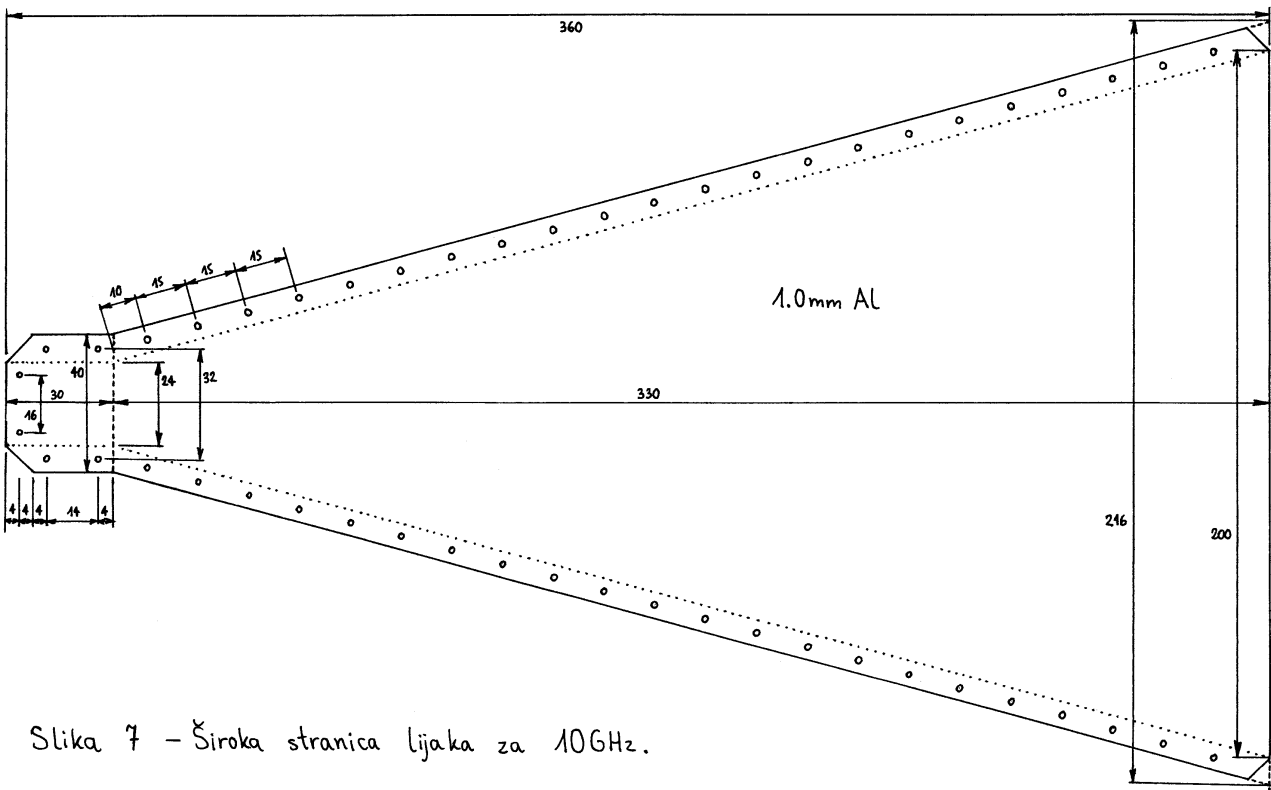


Slika 5 - Široka stranica lijaka za 5.7GHz.

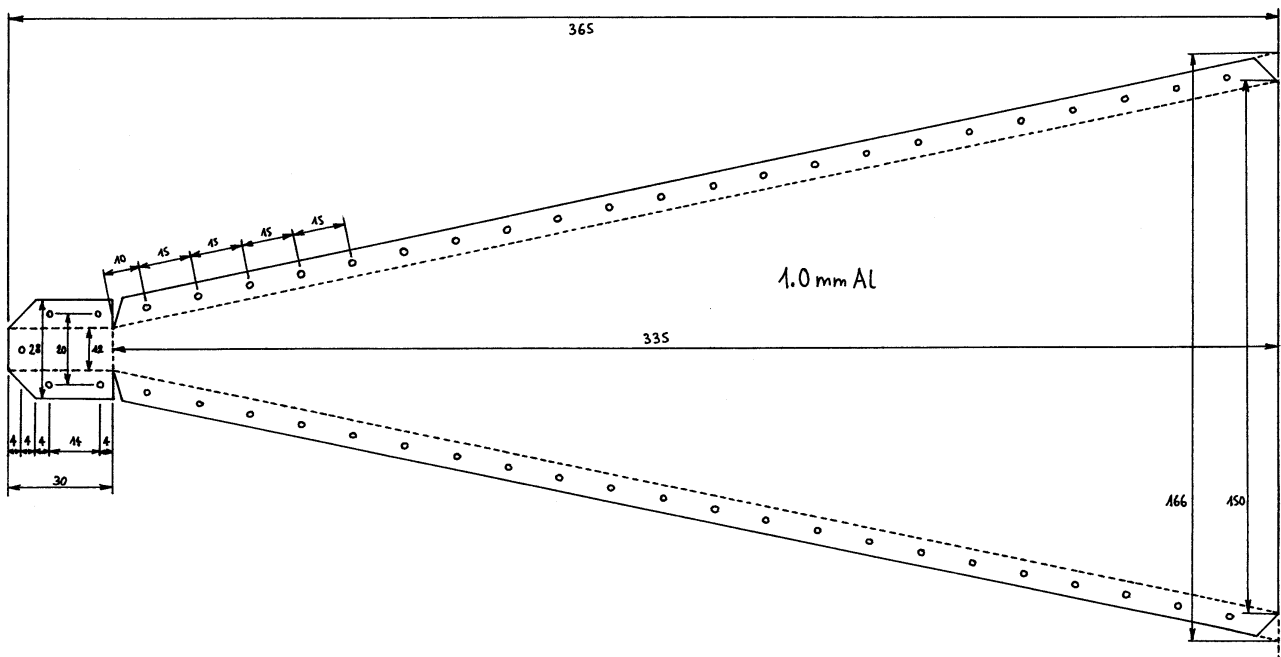


Slika 6 - Ozka stranica lijaka za 5.7GHz.

Široka in ozka stranica 23dBi lijaka za 10GHz sta prikazani na slikah 7 in 8.



Slika 7 - Široka stranica lijaka za 10GHz.

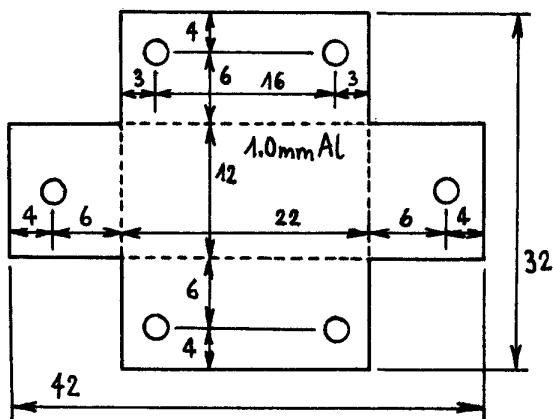
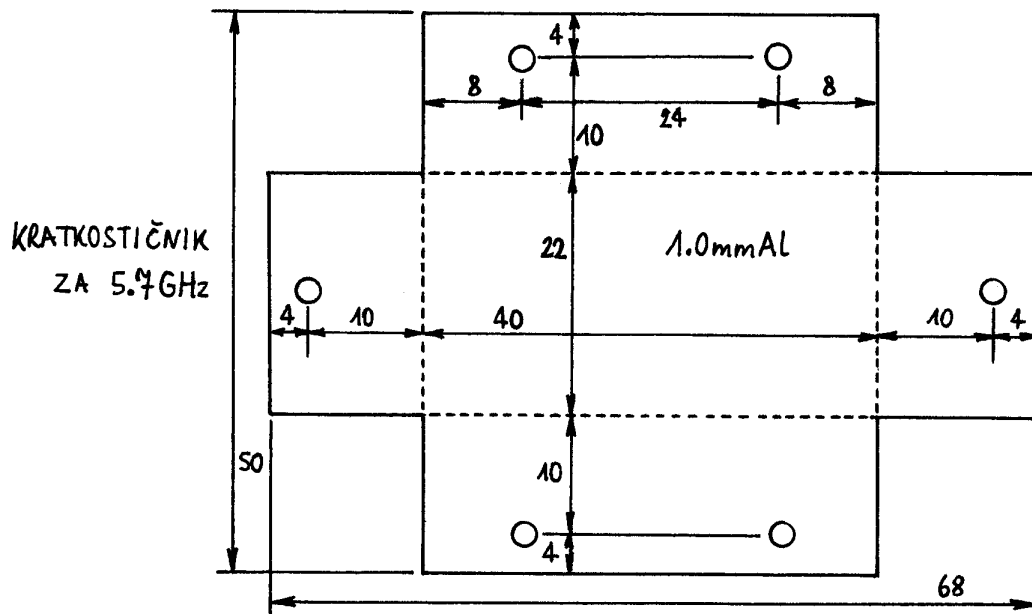
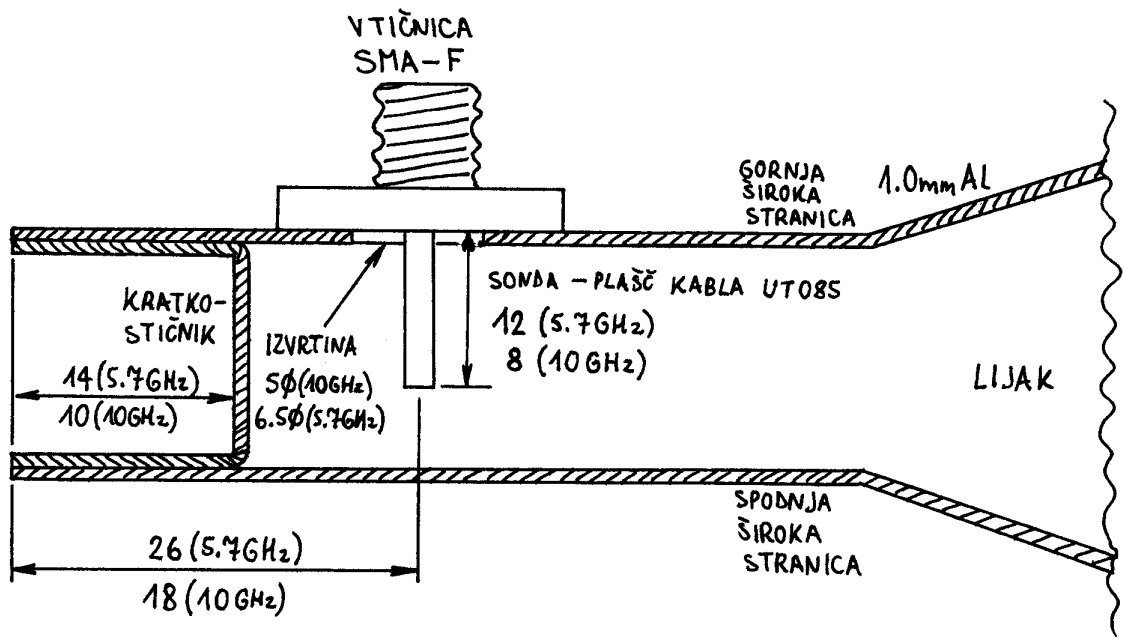


Slika 8 - Ozka stranica lijaka za 10GHz.

Na vseh štirih slikah so prikazane le izvrtine za medsebojno spajanje stranic. Če za spajanje stranic uporabimo vijake M3 dolžine 4mm, potem so vse te izvrtine premera 3mm ali 3.2mm. Pri uporabi zakovic moramo premer izvrtin seveda prilagoditi vrsti uporabljenih zakovic. Ena od obeh širokih stranic jasno potrebuje še izvrtine za vgradnjo SMA vtičnice.

Široki stranici skoraj ne potrebujeta krivljenja, razen blagega prehoda v grlu lijaka. Ozki stranici zahtevata več obdelave, saj je treba previdno zavihati vse robove širine 8mm za spajanje s širokima stranicama. V grlu lijaka imata ozki stranici zarez v obliki črke "V", ker se tu lijak lomi. Robove zavijamo navzven, da so vsi vijaki oziroma zakovice popolnoma dostopni. Pri vseh izmerah so že upoštevana odstopanja, ki nastanejo pri krivljenju 1mm debele Al pločevine.

Vzbujanje obeh lijakov je prikazano na sliki 9. Koaksialni vod pripeljemo preko SMA vtičnice s kvadratno prirobnico, ki jo pritrdimo s štirimi vijaki M2.5 na široko stranico valovoda. Ker v 1mm debelo Al pločevino nima smisla vrezovati navoje M2.5, vsi štirje vijaki potrebujejo matice, ki nekoliko vplivajo na elektromagnetno polje v valovodu. Vzbujevalna sonda je zaradi vpliva matic nekoliko daljša in sicer 12mm za 5.7GHz in 8mm za 10GHz, merjeno od površine prirobnice SMA vtičnice. Povsem jasno moramo pritrdilne vijake M2.5 odrezati na takšno dolžino, da iz matic prav nič ne štrli še globlje v valovod.



KRATKOSTIČNIK
ZA 10GHz

Slika 9 - Vzbujanje lijakov za 5.7GHz in 10GHz.

Oba kratkostičnika sta prav tako izdelana iz 1mm debele Al pločevine in pritrjena s šestimi vijaki na stranice valovoda. Na tem mestu ne priporočam uporabe zakovic, ker antena lahko potrebuje uglaševanje in matice za pritrnitev SMA vtičnice lahko potrebujejo dostop. Položaj kratkostičnika je določen z dolžino štirih ušes. Pri tem prodre kratkostičnik v lijaku za 10GHz tako globoko, da se lahko dotakne matic M2.5, ki nosijo SMA vtičnico. Dotik kratkostičnika in matic moramo preprečiti, sicer dobimo zoprne prekinjajoče preskoke impedance antene.

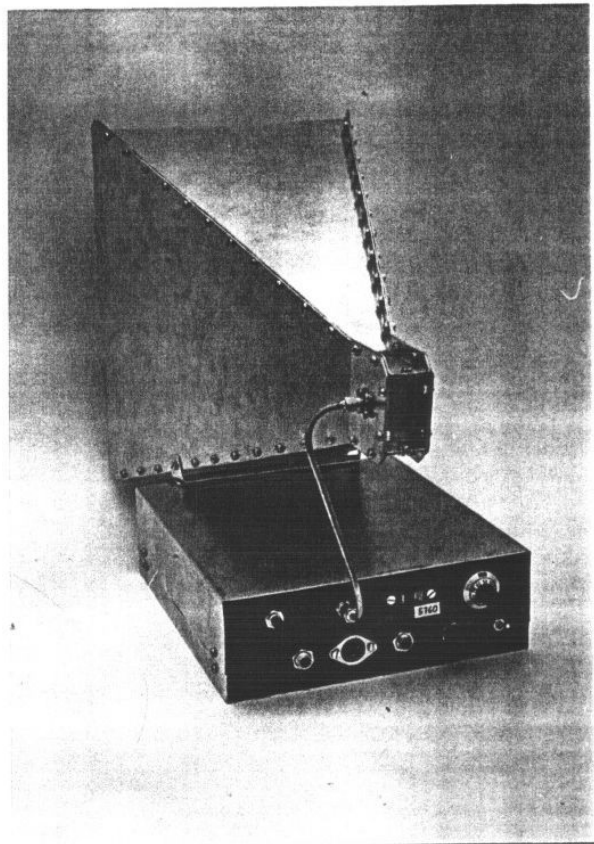
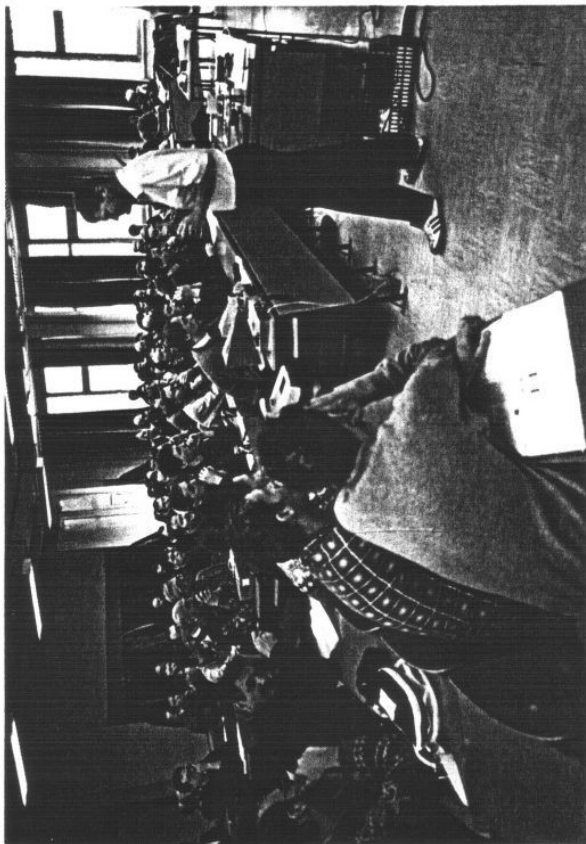
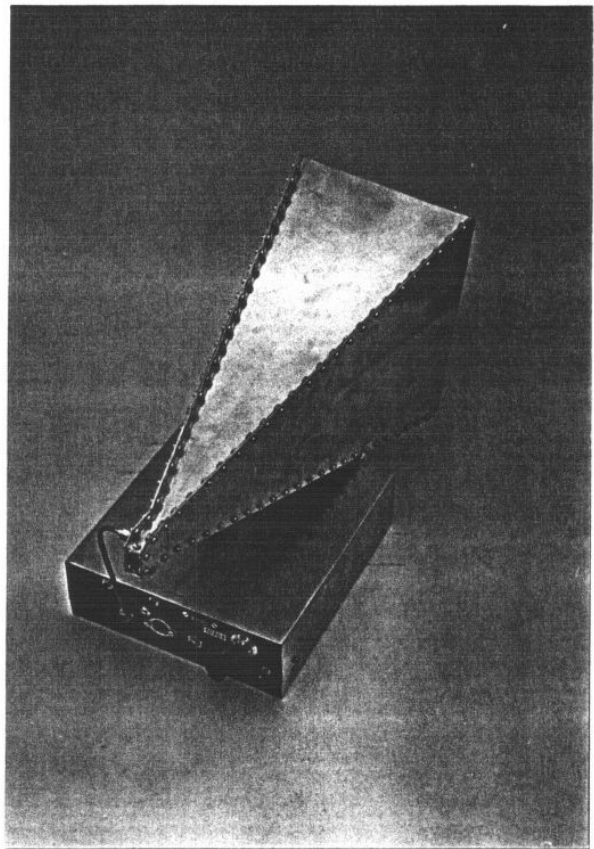
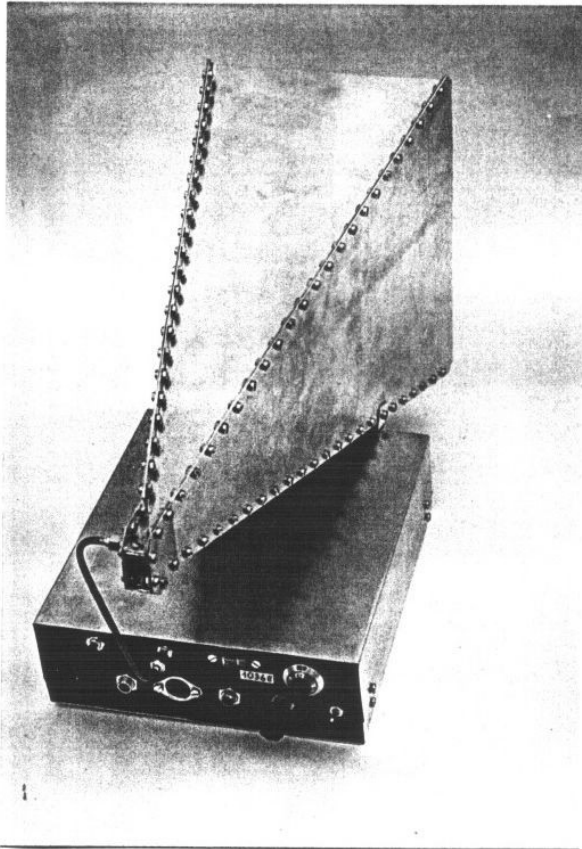
5. Uporaba lijakov za 5.7GHz in 10GHz

Radioamaterji običajno uporabljamo na UKV in višjih frekvencah vodoravno linearno polarizirane antene vsaj za tako imenovano "tropo-DX" delo, se pravi za delo v tekmovanjih. Na 2m področju obstajajo sicer malenkostne razlike v razširjanju vodoravno oziroma navpično polariziranih valov, na frekvencah nad 1GHz pa kakšnih bistvenih razlik ni in je vodoravna polarizacija le dogovor, ki se ga je smiselno držati.

Pritrditev piramidnega lijaka moramo zato načrtovati tako, da dobimo vodoravno polarizacijo. Bolj preprosto povedano, vzbujevalna sonda v valovodu mora ležati vodoravno. To pomeni, da bosta široki stranici valovoda in lijaka postavljeni pokončno. Za pritrnitev opisanih lijakov uporabimo kar nekaj vijakov, ki spajajo skupaj stranice valovoda oziroma piramidnega lijaka.

Antena z dobitkom 20-23dBi ima širino glavnega lista smernega diagrama v velikostnem razredu 10-15 stopinj. Opisane valovodne lijake lahko (za zemeljske zveze) vgradimo na običajni antenski rotator, ki omogoča le vrtenje po azimutu. Antene z večjim dobitkom in ožjim smernim diagramom zahtevajo zelo natančen rotator za azimut in možnost fine nastavitve elevacije tudi za zemeljske zveze.

Zelo preprosta in praktična rešitev je vgradnja lijaka na samo ohišje mikrovalovnega transverterja oziroma radijske postaje. Na ta način je tudi napajalni vod med radijsko postajo in anteno zelo kratek. Celotno radijsko postajo z anteno vred postavimo na primeren vrteči podstavek, da imamo vse pomembne komande pri roki na enem mestu: smer antene in frekvenco postaje.



Smerni diagram valovodnih lijakov je zelo čist. Razen glavnega in prvih bočnih snopov valovodni lijaki skoraj nimajo drugih stranskih snopov. Tega se moramo zavedati

pri uporabi takšnih anten, saj bomo le s težavo vzpostavili zvezo z anteno v napačni smeri, kot se to pogosto zgodi z Yagi antenami ali paraboličnimi zrcali, ki imajo množico stranskih snopov.

Posledica čistega smernega diagrama je tudi razmeroma nizka šumna temperatura, ko valovodne lijake usmerimo v nebo. Žal imajo opisani lijaki premajhen dobitek za običajne satelitske zveze. Za satelitske zveze običajno potrebujemo krožno polarizacijo, za kar bi potrebovali drugačno vzbujanje valovodnih lijakov.

* * * * *