

ANTENY TUBOWE DLA PASMA 10 GHz

Zdzisław Bieńkowski, SP6LB, sierpień 2006

Obserwując dyskusję i stawiane pytania na grupie PK UKF, oraz przymierzając się do uruchomienia bikonu na 10 GHz doszedłem do wniosku, że warto zrobić przegląd literatury na temat prostych anten dla pasma 3 cm.

1. Falowód [1], [2], [3], [4]

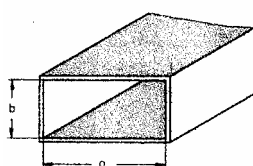
W zakresie częstotliwości 10 GHz energię w.cz. przesyła się głównie za pomocą falowodów, gdyż przewody współosiowe wprowadzają znaczne tłumienie, oraz stwarzają trudności przy przemianie typu fali. Dla amatorów, z różnych powodów, w rachubę wchodzi tylko falowody jednego typu (R 100) opisane w tabeli 1. W ostateczności mogą być stosowane także falowody R 120.

Tabela 1 – Falowody prostokątne dla pasma 10 GHz.

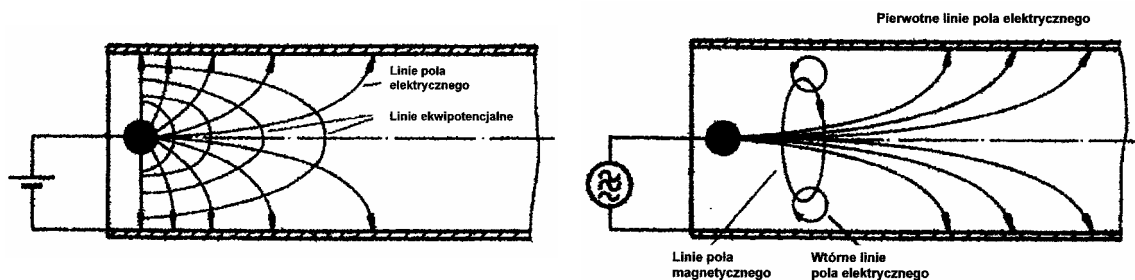
Oznaczenie			Wymiar wewnętrzny a x b [mm]	Zakres częstotliwości [GHz]
I.E.C (PN)	EIA (U.S.)	RCSC (UK)		
R 100	WR 90	WG 16	22.9 x 10.2	8.2 – 12.4
R 120	WR 75	WG 17	19.05 x 9.53	9.84 – 15.0

Falowód składa się z rury prostokątnej, (może być także okrągła, eliptyczna) wykonanej z metalu, a więc z przewodzącymi ściankami. Na rysunku 1 pokazano podstawowe wymiary a x b falowodu prostokątnego. Falowody mosiężne mają tłumienie, zależne od częstotliwości, w granicach 14 – 20 dB/100 m, zaś aluminiowe 12 – 17 dB/100 m [3]. Dla zrozumienia sposobu przepływu energii w.cz. wzdłuż falowodu wyobraźmy sobie kulek, albo małą kulkę w środku otworu falowodu, do której przyłożono napięcie stałe (DC), drugim biegunem jest metalowy falowód. Z podstaw elektrotechniki wiemy, że utworzy się pole elektrostatyczne, którego obraz pokazano na rys. 2. Od dodatniej kulki przebiegają linie sił pola, dochodzące do ścianek falowodu pod kątem prostym. Wzdłuż takiej linii potencjał maleje do zera (na powierzchni ścianki). W kierunku wzdłuż falowodu pole elektrostatyczne jest coraz słabsze. Pole to można opisać liniami o stałym potencjale – tzw. ekwipotencjalnymi.

Jeśli teraz, w miejsce napięcia stałego (DC) przyłoży się między kulkę i ściankę falowodu napięcie przemiennie, to pole elektryczne będzie się zmieniało w rytmie częstotliwości przyłożonego napięcia. Na zasadzie prawa przepływu powstawać będzie pole magnetyczne (rys. 3) tworzące zamknięte linie przepływu. Ponieważ pole magnetyczne zmienia się w czasie, powoduje ono indukowanie się dodatkowych linii pola elektrycznego wzdłuż osi falowodu. W ten sposób energia pola w.cz. rozchodzi się wzdłuż osi falowodu.



Rys. 1 Podstawowe wymiary (wewnętrzne) falowodu prostokątnego

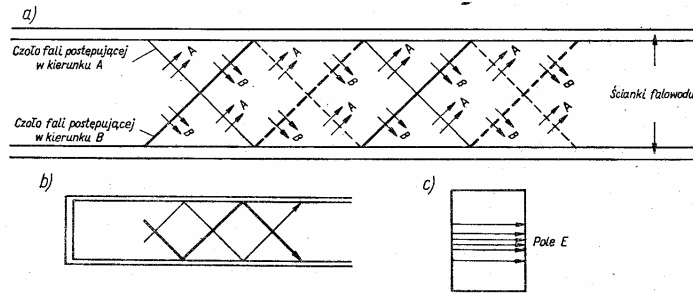


Rys. 2 Linie sił pola elektrycznego po przyłożeniu napięcia stałego (DC)

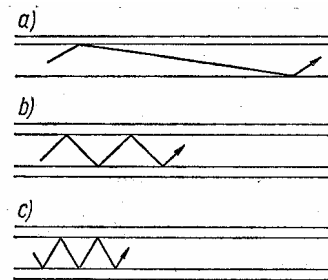
Rys. 3 Linie pola elektrycznego i magnetycznego w falowodzie po przyłożeniu napięcia w.cz.

Przemieszczanie się obu składowych pól fali elektromagnetycznej wzdłuż falowodu możliwe jest dzięki odbiciom od bocznych ścianek falowodu. Fala poruszająca się bezpośrednio wzdłuż osi falowodu zostaje szybko wytłumiona i nie wpływa na przenoszenie mocy [3].

Pola generowane w kierunkach ukośnych podążają do ścianek falowodu, gdzie są odbijane z pomijalnymi stratami. Zjawisko przenoszenia mocy zilustrowano na rys. 4. W falowodzie występują maksima i minima pól E i H, tak więc w przypadku niedopasowania na końcu powstaje fala stojąca, podobnie jak w linii przesyłowej. Na skutek odbić od ścianek bądź narożników, energia koncentruje się bardziej w pewnych punktach, a rozprasza w innych. Kąt pod którym czoło fali przecina oś falowodu jest funkcją długości fali oraz wymiaru poprzecznego falowodu. Jest to fala typu H_{10} (czytaj H jeden, zero).



Rys. 4. Przenoszenie mocy w falowodzie [3]



Rys. 5. Kąt padania fali w falowodzie [3]
 a) przy dużej częstotliwości
 b) przy średniej częstotliwości
 c) przy małej częstotliwości.

Gdy częstotliwość maleje, kąt padania i odbicia zwiększa się i gdy zbliża się do 90° to fale padająca i odbita znoszą się wzajemnie, powstają duże straty energii przenoszonej. Występuje to przy tzw. częstotliwości krytycznej falowodu, której odpowiada krytyczna długość fali.

Dla falowodu prostokątnego wynosi ona:

$$\lambda_{kr} = 2a$$

gdzie a – jak pokazano na rys. 1, przy założeniu że $b \approx a/2$. W zakresie od $\lambda = 2a$ do $\lambda = a$ w falowodzie może powstawać tylko fala typu H_{10} . Jeśli $a > \lambda$ to na jakimś zakłóceniu w falowodzie (zły kołnierz, filtr, sprężenie itd.) mogą powstać inne typy fali, zakłócające całość propagacji.

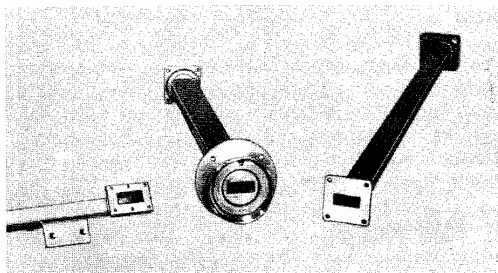
Prędkość propagacji fali w falowodzie, w wyniku dłuższej drogi po linii łamanej, jest mniejsza niż w powietrzu, mimo, że czoło fali porusza się z prędkością światła. Przy fali H_{10} falowód ma długość fali

$$\lambda_f = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_{kr})^2}}$$

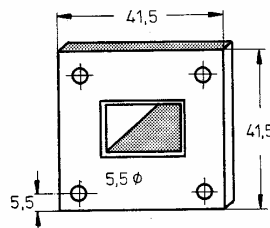
Przyjmując $\lambda_0 = 28.93$ mm oraz, dla falowodu R 100 (WR90), $a = 22.9$ mm otrzymuje się:

$$\lambda_{kr} = 2 \times 22.9 = 45,8 \text{ mm, oraz } \lambda_f = 37.3 \text{ mm, oraz } \lambda_f/4 = 9.32 \text{ mm}$$

W falowodzie prądy płyną po wewnętrznych powierzchniach ścianek, które powinny być wykonane z materiału dobrze przewodzącego i być możliwie gładkie (polerowane). Poszczególne odcinki falowodu łączone są ze sobą za pomocą kołnierzy, które muszą być czyste i równo przylegać, dając dobry styk elektryczny dla prądów powierzchniowych. W przeciwnym przypadku w tych miejscach wystąpią duże straty.

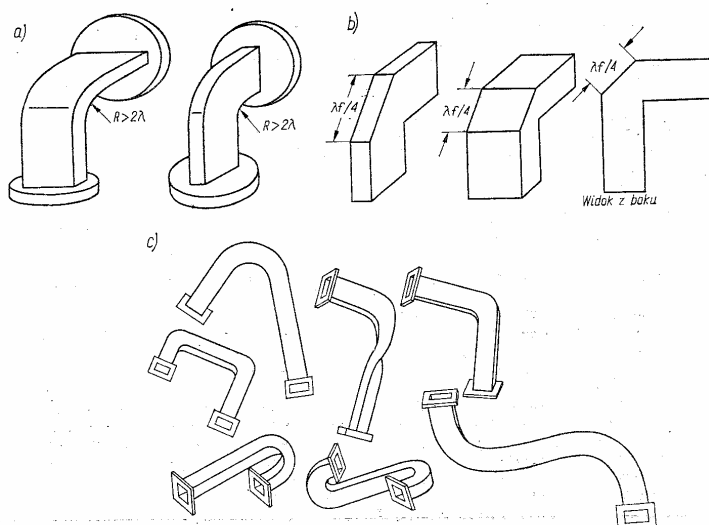


Rys. 6 Różne falowody prostokątne z kołnierzem [1]



Rys. 7 Znormalizowany kołnierz dla 10 GHz [1]

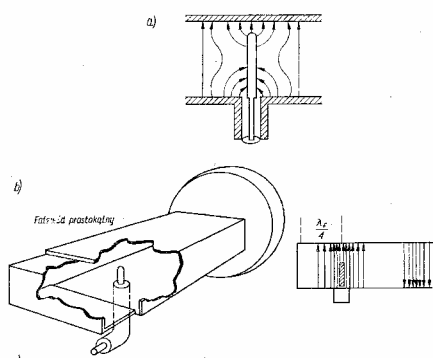
W przypadku zmiany kierunku stosuje się odcinki przejściowe ze złączami kołnierzowymi pokazanymi na rys. 8.



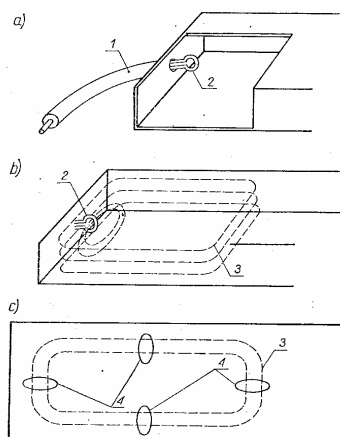
Rys. 8 Złącza kołnierzowe i odcinki przejściowe: a) wygięcie stopniowe, b) wygięcie ostre, c) odcinki przejściowe falowodów. [3].

2. Przejście falowod prostokątny – linia współosiowa

Przejście z linii koncentrycznej do falowodu i odwrotnie, z falowodu do linii koncentrycznej można wykonać sondą elektryczną lub magnetyczną, rys. 9 i 10.



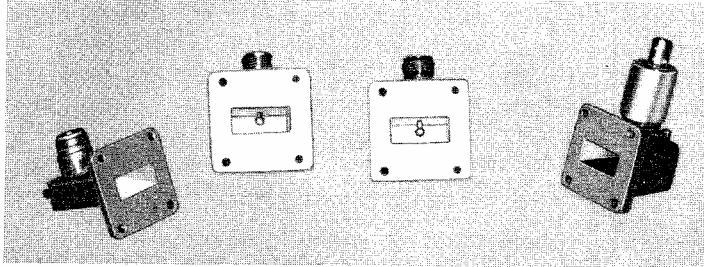
Rys. 9 Sonda elektryczna : a) rozkład pola elektrycznego, b) położenie sondy



Rys. 10. Pętla sprzęgająca z polem [3] magnetycznym w falowodzie.
1) kabel współosiowy, 2) pętla
3) linie pola H, 4) możliwe położenia pętli

Dla najskuteczniejszego wzbudzenia podstawowego rodzaju pola, sonda powinna być umieszczona w środku szerszej ścianki w odległości ćwierć fali ($\lambda_f/4$) od zwartego końca falowodu (rys. 9). Sondę można umieścić także w odległości $3/4$ długości fali λ_f . Wielkość sondy powinna zapewniać dobre dopasowanie do impedancji kabla. W tym celu dobiera się jej długość ($\sim \lambda/4$) i grubość. Grubsze sondy są bardziej szerokopasmowe (do 20% [6]). Stosować można nakładanie na sondę tulejki z teflonu, wprowadzenie wkrętu nastawczego po stronie przeciwnej, lub gniazda ze stykiem środkowym dającym się nieznacznie przesunąć. W paśmie 3 cm najczęściej stosuje się gniazda typu SMA, choć można stosować także gniazda N. Zachowanie odległości $\lambda_f/4$ jest dość krytyczne. W niektórych rozwiązaniach ściankę tylną wykonuje się w postaci dopasowanego, przesuwanego tłoczka prostokątnego. Fala odbita od tylnej ścianki powinna powrócić do sondy we właściwej fazie (180°) [6].

Na rysunku 10 pokazano sposób sprzężenia magnetycznego. Jak z rysunku wynika, pętlę sprzęgającą można umieszczać w kilku różnych miejscach. Sposób ten jest jednak przez amatorów rzadziej stosowany. Na zdjęciach na rys. 11 pokazano przykłady wykonania sprzężenia magnetycznego.



Rys. 11. Przykłady sprzężeń magnetycznych z gniazdami N, SMA i BNC [1]

Przejścia takie są opisane w Internecie np.:

<http://www.dl6nci.de/slotant.htm>, lub

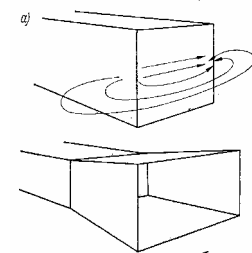
http://hjem.get2net.dk/ole_nykjaer/oz2oe/antenner/10ghz_slotant_sma.jpg

3. Impedancja falowodu

Impedancja falowodu opisana jest wzorem [Ω]:

$$Z_f = \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_{kr})^2}}$$

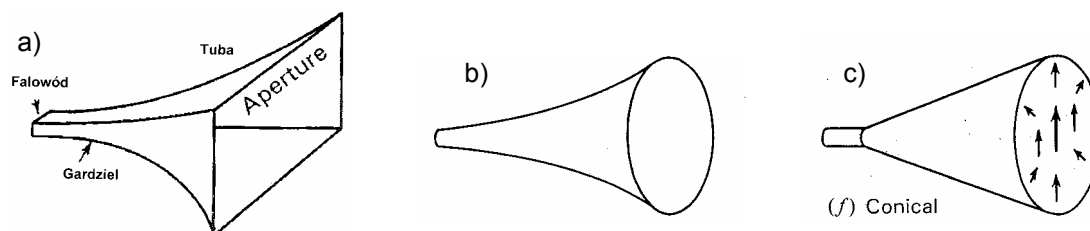
i jest większa od impedancji otwartej przestrzeni (377 Ω). Skutkiem tego następuje odbicie fali na wyjściu z falowodu, powstaje fala stojąca i znacznie rosną straty. Aby wyeliminować zakłócenie rozkładu pól E i H przy przepływie energii stosuje się rozszerzenie otwartego końca falowodu (rys. 12).



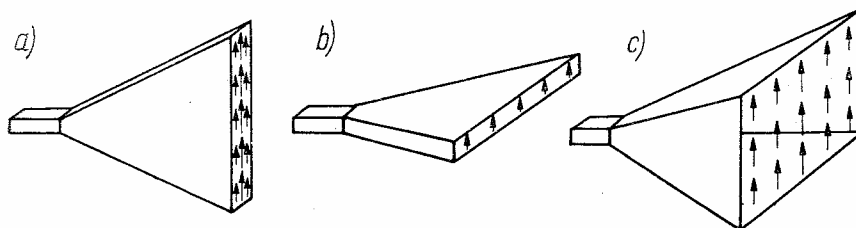
Rys. 12 Zakłócenie pola na wyjściu z falowodu

4. Rodzaje anten tubowych

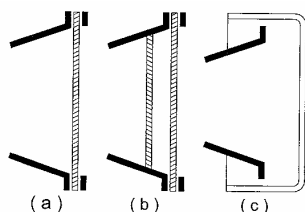
Antena tubowa może być traktowana jako wybuchowe rozszerzenie falowodu. Zadaniem tuby jest wytworzenie jednolitego frontu fazowego z większą aperturą niż ma falowód i przez to większą kierunkowość. Pierwszą antenę piramidальną skonstruował Jagadis Chandra Bose w 1897 [7].



Rys. 13 Antena a) wykładnicza prostokątna, b) okrągła c) stożkowa [7]



Rys. 14. Anteny tubowe: a) tuba sektorowa typu E; b) tuba sektorowa typu H; c) tuba piramidalna. [7], [8].



Rys. 15 Zmniejszenie odbicia w aperturze anteny tubowej za pomocą płytek dielektrycznych (a, b) lub osłony dielektrycznej (c), stanowiącej jednocześnie ochronę przed wpływami atmosferycznymi. [4]

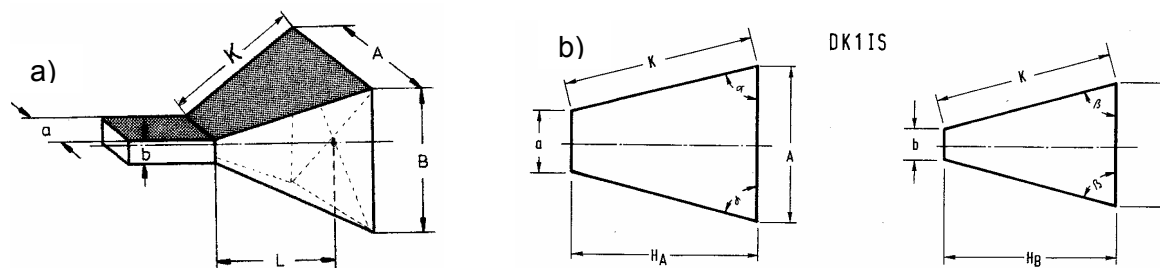
Do zalet anten tubowych można zaliczyć duży zysk energetyczny (kilkanaście dB), mały WFS, względnie szerokie pasmo pracy (ok. 50%), mały ciężar i prostota konstrukcji. Obliczenia teoretyczne zgadzają się bardzo dobrze z pomiarami prototypów anten. Dlatego anteny tubowe są chętnie wykorzystywane jako anteny wzorcowe o znanym zysku energetycznym, a także jako źródło oświetlenia innego rodzaju anten (np. paraboliczne).

Na rys. 14 pokazane są trzy podstawowe typy anten tubowych (Horn) o przekroju prostokątnym. Są one zasilane falowodem prostokątnym, którego szersza ścianka jest równoległa do horyzontu i na niej umocowane jest gniazdo z pionową sondą wzbudzącą. Dla dominującego rodzaju pola H_{10} płaszczyzna E jest równoległa do krótszej ścianki (pionowej) falowodu, a płaszczyzna H jest równoległa do szerszej ścianki (poziomej). Jeśli zwiększenie wymiarów falowodu następuje w płaszczyźnie E, to mamy tubę sektorową typu E (rys. 14 a)), natomiast jeśli rozszerzamy rozmiary w płaszczyźnie H, to otrzymujemy tubę sektorową typu H (rys. 14. b).

Tuby sektorowe koncentrują energię w tej płaszczyźnie, dla której nastąpił wzrost apertury, natomiast w drugiej płaszczyźnie charakterystyka promieniowania odpowiada charakterystyce otwartego końca falowodu. Jeśli chcemy uzyskać koncentrację energii w obu płaszczyznach, to wykorzystujemy tubę piramidalną, w której rozszerzenie wymiarów następuje w obu płaszczyznach. Tuby sektorowe, przy zadanej długości L mają optymalną aperturę $A \times B$, przy której antena ma maksymalny zysk. Takie tuby stosuje się jako anteny do samodzielnej pracy. Jeśli tuba ma oświetlać inną antenę to ważniejsze, od maksymalnego zysku, staje się odpowiednie oświetlenie reflektora, a więc optymalne ukształtowanie charakterystyki. [4], [6], [7].

5. Anteny tubowe o maksymalnym zysku

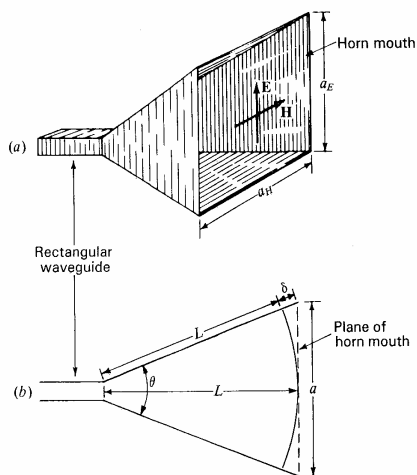
Na podstawie dokładnych wzorów opracowane zostały wymiary optymalnej anteny tubowej piramidalnej dla pasma 10.3 GHz dla poszczególnych wartości wzmocnienia w dB. Na rysunku 16 pokazano podstawowe wymiary takiej anteny: przekrój falowodu $a \times b$, aperturę anteny $A \times B$, długość osi piramidy L , mierzoną od wyjścia z falowodu do płaszczyzny otwarcia tuby (apertury), długość krawędzi boku tuby K , oraz długości wycinanych płytek boków H_A i H_B i kąty pomocnicze α i β .



Rysunek 16 Podstawowe wymiary anteny tubowej (a) oraz wymiary płytek tworzących boki tuby (b).[1], [9]

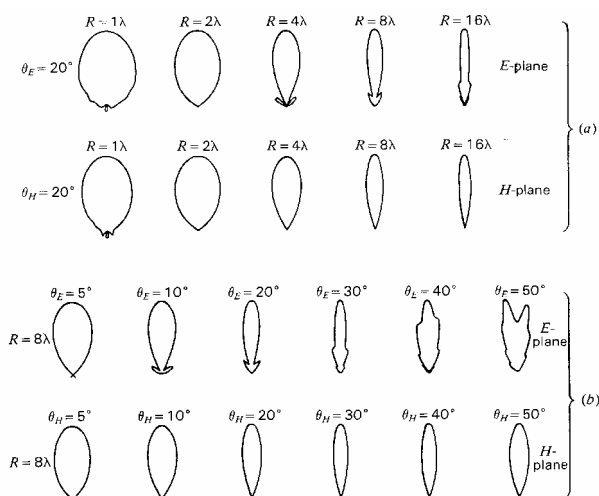
Tablica 2. Wymiary wewnętrzne optymalnej anteny tubowej dla $f = 10.3$ GHz

Zysk dB	Bok A mm	Bok B mm	Długość L mm	H_A mm	H_B mm	Kąt α stopnie	Kąt β stopnie	Krawędź K mm
14	68,2	50,5	26,2	33,1	34,6	55,6	59,8	40,1
15	76,5	56,7	36,5	43,4	45,3	58,2	62,8	50,9
16	85,8	63,6	49,8	56,5	58,9	60,9	65,6	64,7
17	96,3	71,3	66,7	73,4	76,1	63,4	68,1	82,1
18	108,1	80,0	88,5	95,1	98,2	65,9	70,4	104,2
19	121,2	89,8	116,2	122,8	126,2	68,2	72,5	132,3
20	136,0	100,8	151,6	158,2	161,8	70,3	74,4	168,0
21	152,6	113,1	196,6	203,2	207,0	72,3	76,0	213,3
22	171,3	126,9	253,7	260,3	264,3	74,1	77,5	270,7
23	192,2	144,3	326,2	333,0	337,0	75,7	78,7	343,6
24	215,6	159,7	418,1	424,7	429,1	77,2	80,1	435,5
25	241,9	179,2	534,5	541,1	545,6	78,6	81,2	552,1



Rys. 17 Antena tubowa piramidalna [7]

Dla uzyskania równomiernego rozkładu pola na aperturze, czyli możliwie płaskiego czoła fali, powinno stosować się długą tubę (duże L) z małym kątem rozwarcia θ (rys. 17). Z punktu widzenia praktycznego tuba powinna być jak najkrótsza. Jeśli w antenie tubowej czoło fali znajduje się na osi w odległości L , to na krawędzi długości K jest ono "spóźnione" o wartość δ . ($K = L + \delta$) (rys. 16). Jeśli wartość δ stanowi niewielką część długości fali λ , to pole na aperturze ma w przybliżeniu jednakową fazę. Jeśli natomiast δ zbliża się do 180° to partie brzegowe tuby emitują energię w fazie przeciwnej. Powoduje to pojawienie się listków bocznych i spadek zysku anteny [7]. W praktyce, jako optymalną antenę uznaje się antenę z takim rozwarcie θ , aby w płaszczyźnie E było $\delta \leq 0.25 \lambda$, a w płaszczyźnie H nie więcej niż 0.4λ [7]. Jest wtedy ona dostatecznie krótka i ma duży zysk (kierunkowość), bez nadmiernych listków bocznych.



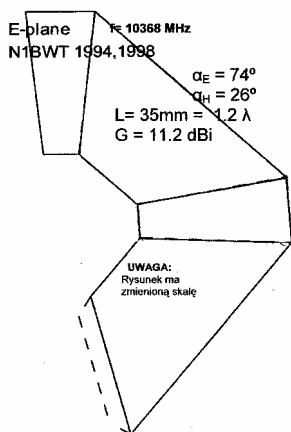
Rysunek 18.

Pomierzone charakterystyki piramidalnej anteny tubowej w płaszczyznach E i H w funkcji kąta rozwarcia θ i długości tuby $R (= K$ z rys. 16)

Na rysunku 18 w części górnej pokazano charakterystyki promieniowania anteny tubowej piramidalnej przy różnych długościach krawędzi $R = 1 \lambda$ do 16λ ($R = K$ z rys. 16), przy stałym kącie rozwarcia $\theta_E = \theta_H = 20^\circ$, zaś w części dolnej pokazano wpływ kąta rozwarcia $\theta = 5^\circ$ do 50° , przy stałej długości krawędzi $R = 8 \lambda$. [7].

6. Programy obliczeniowe

W1GHZ w [5] opublikował wzory, oraz program **HDL-ANT** pozwalający na zaprojektowanie optymalnej anteny piramidalnej. Program ten można pobrać z Internetu jako plik <hdl_3b4_all.zip>. Program ten pozwala na zaprojektowanie anteny o pożądanej charakterystyce, na przykład płetwowej – szerokie promieniowanie w kierunku poziomym i zawężone w kierunku pionowym, przy polaryzacji poziomej. W programie tym zastosowano nieco inne oznaczenia, ale krótkie porównanie z wyżej podanymi opisami anteny pozwoli na łatwe zaprojektowanie wymaganej anteny.



Wynikiem końcowym projektowania jest narysowanie i wydrukowanie obrazu wykroju blachy z czterema bokami, w skali 1:1. Po przyłożeniu do arkusza blachy mosiężnej, można z łatwością taką tubę wyciąć, złożyć i na jednej krawędzi zlutować.

Rys. 19. Obraz wykroju blachy anteny tubowej dla bikonu SR6XHZ



Rysunek 20. Antena tubowa na bikonie SR6XHZ

Antena taka została wykorzystana w testowanym bikonie SR6XHZ uruchamianym w SOT PZK (rys. 19 i 20). Sonda jest wykonana w postaci gniazda SMA, przylutowanego do szerszego boku falowodu w odległości 9 mm od zamkniętego końca falowodu. Długość sondy od podstawy wynosi 7.5 mm. Na sondę nałożono koszulkę teflonową wysokości 3 mm. Naprzeciw sondy przylutowano z zewnątrz nakrętkę M3 a wkrętem M3 dostraja się na maksymalny sygnał na wyjściu anteny tubowej.

Dla pomiarów pracy bikonu wykonano na podobnej zasadzie sondę pomiarową z diodą D 603 (rosyjska) i wymiarami tuby: $L = 76$ A = 103, B = 82 mm.. Szerokość wiązki, obliczona ww. programem HDL-ANT wynosi $16.5^\circ \times 18.9^\circ$, zysk $G = 16.5$ dBd. Sonda wykrywa sygnał bikonu w odległości do 1 m.

Podobny program dla projektowania anten piramidalnych jest opisany przez DK2WT i DG2GTS w Dubus 2/1995 [10]. Program ten, poza konwencjonalnym zaprojektowaniem tuby dla przyjętych danych wyjściowych, pozwala na trójwymiarowe przedstawienie obrazu anteny wraz z falowodem. Program kosztował 40.- DM.

Opracował
na Sesję Techniczną SOT w Zieleńcu 18-20 sierpień 2006
Zdzisław Bieńkowski, SP6LB, 10.08.2006

- [1] Heubusch, DC5CX, A.Hock, DC0MT, Knauf DC5CY; *EINE SENDE-EMPFÄNGER FÜR DAS 10-GHZ-BAND UKW-BERICHTTE* 3/1976 str. 184-188
- [2] Marian Suski; *Technika Mikrofalowa*, WNT Warszawa 1972
- [3] Harry E.Thomas; *Techniki i urządzenia mikrofalowe*; WNT , Warszawa 1978
- [4] Jarosław Szóstka; *Fale I Anteny WKŁ* , Warszawa 2001
- [5] Paul Wade, W1GHZ; *The W1GHZ Online Microwave Antenna Book*;
<http://www.qsl.net/n1bwt/contents.htm>
- [6] R. Litwin, M. Suski; *Technika mikrofalowa*; WNT, Warszawa 1972.
- [7] John D. Kraus; *Antennasi*; McGraw-Hill , USA 1988
- [8] Daniel Józef Bem; *Anteny i rozchodzenie się fal radiowych*; WNT, Warszawa 1973
- [9] Thomas Kölpin, DK1IS ; *Hilfsdaten zum Aufbau von 10-GHz-Hornantennen*;
UKW-BERICHTTE 2/1977 str. 107
- [10] Arnold Tibus, DK2WT i Stefan Tibus, DG2GTS; "*HornCalc V2.50*", DUBUS 2/1995