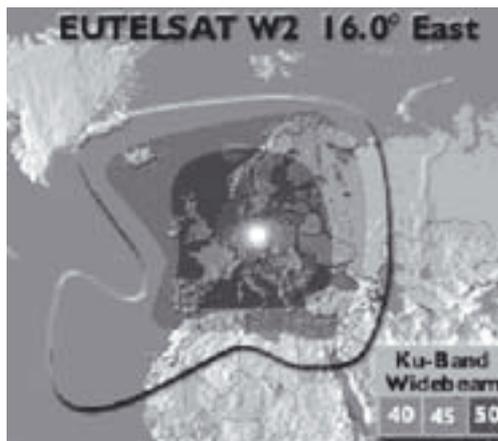


inż. JAN BOGUCKI  
Instytut Łączności – Warszawa

## Anteny łączności satelitarnej

**A**ntena jest to struktura obejmująca obszar przejściowy między wolną przestrzenią a linią przesyłową prowadzącą od nadajnika albo do odbiornika. Aparat matematyczny i modele fizyczne stosowane przy opisie anten zależą w dużym stopniu od częstotliwości. W zakresie mniejszych częstotliwości, gdzie prąd i napięcie mają bezpośredni sens fizyczny, wygodnie jest uważać antenę za element obwodu. W zakresie większych częstotliwości dogodniejsze jest podejście quasi-optyczne. Ponieważ anteny promieniują najczęściej pola o określonej polaryzacji, mówi się o polaryzacji anten, przyjmując, że polaryzacja jest taka, jaka jest polaryzacja pola elektrycznego promieniowanego przez nią. Spotyka się anteny o polaryzacji liniowej (pionowej lub poziomej), o polaryzacji eliptycznej (w szczególnym przypadku – kołowej), a także o polaryzacji podwójnej, umożliwiającej np. promieniowanie (nadawanie) o jednej polaryzacji, a odbiór fali o polaryzacji prostopadłej do niej.



Rys. 1. Obszary obsługiwane przez satelitę Eutelsat 16°E. Kolory 40/45/50 oznaczają obszary o zastępczej mocy promieniowania izotropowo 40 dBW, 45 dBW i 50 dBW

W zależności od przeznaczenia, anteny dzielą się na nadawcze i odbiorcze, mimo iż mogą być charakteryzowane

przez te same wielkości. Anteny nadawcze mają za zadanie jak najlepiej wyemitować energię pola elektromagnetycznego nadajnika do otaczającej przestrzeni. Anteny umieszczone na satelicie mogą być – w zależności od obszaru „oświetlanego” – o wiązce globalnej, strefowej czy punktowej. Często stosuje się anteny o kształtowanej wiązce promieniowania, dopasowanej do konturu obsługiwanego obszaru (rys. 1). Natomiast naziemne anteny satelitarne są wyłącznie o wiązce punktowej i zwykle są to małe anteny satelitarnych terminali VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) oraz satelitarnych stacji reporterskich SNG (*Satellite News Gathering*). Z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetyczne anteny są nierzalnym elementem całego systemu.

Do niedawna anteny mikrofalowe były przedmiotem zainteresowania wąskiej grupy specjalistów, jednak z wprowadzeniem telewizji satelitarnej i telefonii komórkowej sytuacja ta uległa zmianie.

W celu określenia jakości całego systemu teletransmisyjnego bardzo ważne są parametry anten. Najistotniejsze z nich to:

- szerokość wiązki
- poziom listków bocznych i promieniowania wstecznego
- zysk
- dopasowanie anteny (współczynnik fali stojącej)
- współczynnik polaryzacji skrośnej
- zniekształcenia intermodulacyjne
- obciążalność
- stabilność mechaniczna.

### Rodzaje anten satelitarnych

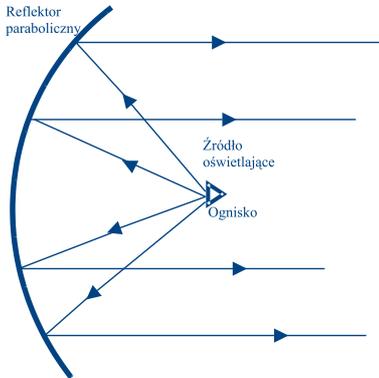
W zakresie mikrofal, w celu dobrego skupienia strumienia mocy, są stosowane reflektory wykonane najczęściej w postaci paraboloid obrotowych. W technice satelitarnej stosuje się powszechnie kilka rodzajów anten parabolicznych:

- symetryczne
- podświetlane (*offset*)

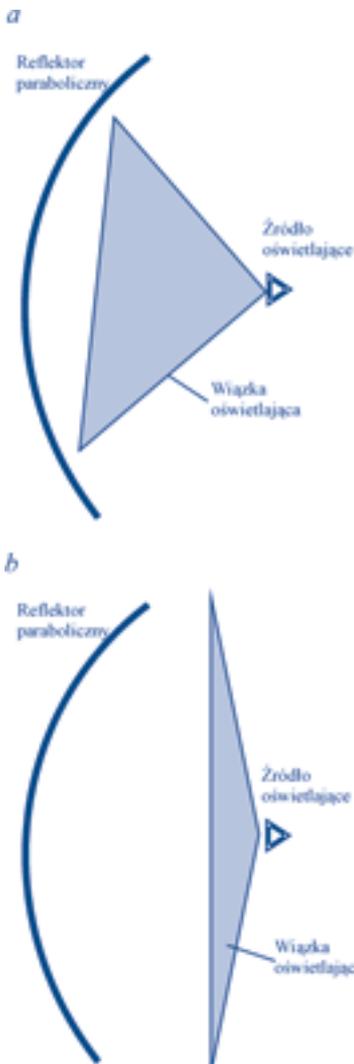
- dwurefktorowe (Cassegraina lub Gregory)

Antena paraboliczna z promiennikiem umieszczonym w ognisku reflektora (rys. 2) – konstrukcja symetryczna – jest bardzo prosta i dlatego jest powszechnie wykorzystywana w technice satelitarnej. Dokładność wykonania powierzchni reflektora ma duży wpływ na jakość anteny. Powinna być maksymalnie zbliżona do paraboloidy – z błędem nie przekraczającym 0,5 mm dla pasma 12 GHz, tj. gdy długość fali wynosi 25 mm. Łby śrub lub nitów zwykle tylko nieznacznie pogarszają parametry anteny, ich powierzchnia bowiem jest mniejsza od 1% powierzchni reflektora.

Kąt oświetlenia anteny jest również bardzo istotny. Jeżeli rozwartość kąta oświetlenia jest zbyt mała (rys. 3a), to wykorzystywana jest tylko część powierzchni reflektora. A więc antena ma takie parametry elektryczne, jakby miała znacznie mniejszą średnicę od rzeczywistej. Nadmierna szerokość wiązki promiennika powoduje „przelewanie się” energii poza reflektor (rys. 3b), a tym samym wzrost poziomu promieniowania niepożądanego wokół anteny. Ze sposobem oświetlenia anteny jest związany tzw. współczynnik wykorzystania apertury. Oświetlenie, przy którym uzyskuje się największy współczynnik wykorzystania apertury powoduje jednak niedopuszczalnie wysoki poziom listków bocznych. Dlatego wymagany jest kompromis między maksymalnym wykorzystaniem powierzchni reflektora a poziomem listków bocznych. Uzyskuje się go przez odpowiedni dobór kształtu reflektora i charakterystyki kierunkowości rożka. Zwykle jako rożek używa się otwarty koniec falowodu kołowego. Szerokość charakterystyki kierunkowej falowodu o średnicy równej długości promieniowanej fali wynosi ok. 60°. W praktyce uzyskuje się współczynnik wykorzystania apertury 0,65 przy poziomie listków bocznych równym - 20 dB.



Rys. 2. Geometria symetrycznego reflektora parabolicznego



Rys. 3. Niewłaściwa rozwartość kąta oświetlenia reflektora: a – zbyt mała, b – zbyt duża

Antenę centralnie oświetlaną o średnicy 3,8 m mającą w zakresie częstotliwości 10,95 ÷ 12,75 GHz zysk 51,9 dBi<sup>\*)</sup> i 3 dB szerokość wiązki równą 0,45° przedstawiono na rys. 4. Anteny te w zakresie częstotliwości 3,7 ÷ 4,2 GHz mają zysk 42,5 dBi, a 3 dB szerokość wiązki jest równa 1,4°.

Niewątpliwie bardzo interesująca jest antena z plastycznym reflektorem. Zapotrzebowanie na takie anteny jest na satelitach o wydłużonej orbicie. Aby zapewnić te same warunki odbioru na powierzchni Ziemi, należy w czasie lotu satelity zmieniać jej charakterystykę, a tym samym i zysk. Można to uzyskać przez mechaniczne kształtowanie powierzchni siatkowego reflektora w czasie lotu satelity.

Jednak nawet poprawnie wykonana antena symetryczna ma pewne wady, m.in. efekt blokowania polegający na tym, że promiennik zasłania część reflektora, a tym samym zmniejsza powierzchnię skuteczną anteny, a więc i jej zysk. Tę wadę eliminuje antena podświetlona (rys. 5). Kształt reflektora takiej anteny jest fragmentem powierzchni parabolicznej, nie zawierającej jednak wierzchołka. Do tego typu anten, mających długą ogniskową, stosuje się promiennik o znacznie mniejszej szerokości wiązki, niż dla anten symetrycznych.

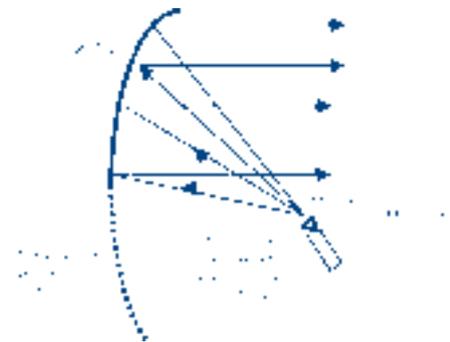
Paraboliczną antenę podświetloną satelitarną stacji reporterskiej ilustruje rys. 6. Jest to antena nadawczo-odbiorcza o zysku 40,5 dBi dla częstotliwości 11,7 GHz (odbior) i 42,0 dBi dla częstotliwości 14 GHz (nadawanie).

Natomiast anteny dwurefleksyjne (rys. 7) eliminują zjawisko „przelewania się” energii przez reflektor pomocniczy, gdyż część energii omijająca reflektor jest kierowana w stronę nieba, którego temperatura szumowa<sup>\*\*)</sup> jest niska. W tej sytuacji o szumowej temperaturze anteny decyduje tylko efekt rozpraszania energii przez podpory mocujące reflektor pomocniczy. Natomiast umieszczenie wzmacniacza bezpośrednio przy źródle oświetlającym eliminuje straty w torze przesyłowym.

Istnieją dwie podstawowe odmiany układów dwurefleksyjnych: Cassegraina i gregoriański. Układ Cassegraina (rys. 7) składa się z głównego reflektora



Rys. 4. Symetryczna antena paraboliczna



Rys. 5. Geometria podświetlonego reflektora parabolicznego

parabolicznego i pomocniczego reflektora hiperbolicznego. Reflektor pomocniczy jest położony między ogniskiem a wierzchołkiem reflektora głównego w taki sposób, że jedno z tych ognisk (pozorne) pokrywa się z ogniskiem reflektora parabolicznego. Drugie ognisko reflektora pomocniczego jest równocześnie ogniskiem całego systemu antenowego i określa położenie źródła oświetlającego. Zwykle ognisko to znajduje się w pobliżu wierzchołka reflektora głównego.

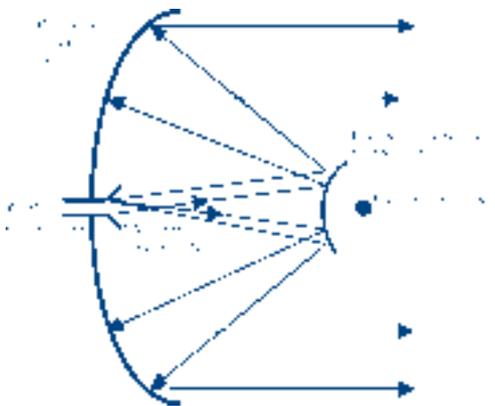
W układzie gregoriańskim rolę reflektora głównego pełni również wycinek

<sup>\*)</sup> dBi – zysk względem anteny izotropowej.

<sup>\*\*)</sup> Temperatura szumowa nieba wynosi od kilku do kilkudziesięciu kelwinów. Pojęcie temperatury szumowej wyjaśniono szczegółowo w [4].



Rys. 6. Antena podświetlana satelitarnej stacji reporterskiej



Rys. 7. Geometria anteny dwurefleksorowej



Rys. 8. Antena dwurefleksorowa

paraboloidy zawierający wierzchołek, a reflektor pomocniczy ma kształt eliptyczny. Ponieważ obydwa ogniska reflektora leżą z jednej jego strony – reflektor pomocniczy musi być umieszczony w odległości większej niż ogniskowa reflektora głównego. W związku z tym, system gregoriański jest mniej spójny niż układ Cassegraina i z tego powodu również rzadziej jest stosowany.

Na rys. 8 przedstawiono antenę dwurefleksorową pracującą w Tridbinilla w Australii. Średnica reflektora wynosi 70 m, a jej zysk na częstotliwości 8,45 GHz wynosi 75,9 dBi przy szerokości listka głównego 0,2°. Nieraz stosuje się również anteny dwurefleksorowe z przesuwającym subreflektorem umożliwiającym zmianę charakterystyki anteny, a wówczas szerokość wiązki i zysk są funkcją jej rozogniskowania.

### Pomiary anten

Podstawowe pomiary anten obejmują dwa podstawowe ich parametry: charakterystykę kierunkową oraz zysk. Wyniki tych pomiarów pozwalają określić inne parametry anteny, jak szerokość wiązki, poziom listków bocznych lub promieniowania wstecznego.

### Charakterystyka promieniowania

Charakterystyka promieniowania anteny jest jednym z ważniejszych parametrów anteny, określa bowiem przestrzenny rozkład promieniowania energii. Charakterystykę promieniowania definiuje się jako rozkład natężenia pola elektrycznego na powierzchni kuli o dostatecznie dużym promieniu, której środek pokrywa się ze środkiem anteny. Wartości natężenia pola na powierzchni kuli zależą od promienia kuli oraz od mocy promieniowanej przez antenę. Aby uniezależnić się od tych czynników, wszystkie wartości natężenia pola dzielimy przez wartość unormowaną charakterystykę promieniowania. Oczywiście, maksymalna wartość charakterystyki unormowanej jest równa jedności. Dzięki temu łatwo można porównać charakterystyki promieniowania

różnych anten. Charakterystyka promieniowania przedstawia pewną zamkniętą powierzchnię w ogólnym przypadku złożoną z kilku przestrzennych wiązek różnej postaci. Największą z nich nazywamy wiązką główną (listkiem głównym) pozostałe wiązkami bocznymi (listkami bocznymi). Wykonanie wykresu trójwymiarowego jest kłopotliwe (szczególnie dawniej – bez użycia komputerów) i dlatego zwykle tradycyjnie ograniczamy się do podania dwóch wzajemnie prostopadłych przekrojów charakterystyki promieniowania.

Charakterystykę promieniowania można wyznaczyć za pomocą obliczeń lub pomiarów. Pomiar polega na potraktowaniu badanej anteny jako elementu odbiorczego w stosunku do punktowego (umieszczonego w odpowiedniej odległości) źródła sygnału pomiarowego – rys. 9. Przez obracanie anteny (w określonej płaszczyźnie) i jednocześnie notowanie wartości odbieranego sygnału otrzymuje się żadaną charakterystykę.

Konieczne są jednak odpowiednie warunki pomiarowe, do których można zaliczyć:

- stosunkowo duży zysk anteny nadawczej (aby wyeliminować wpływ różnic fazowych czoła odbieranej fali) o liniowej polaryzacji fali promieniowanej,
- wyraźne wyróżnienie listka głównego w stosunku do listków bocznych (co najmniej o 20 dB),
- duża szerokość wiązki pomiarowej, aby zminimalizować zmiany natężenia pola w obrębie płaszczyzny mierzzonej anteny.

Dla anten o polaryzacji pionowej, źródłem błędów mogą być także odbicia od powierzchni ziemi. Wyeliminowanie ich wymaga umieszczenia anteny badanej i nadawczej na znacznej wysokości.

Charakterystyka anteny może być przedstawiona we współrzędnych prostokątnych lub biegunowych. W układzie współrzędnych prostokątnych, na osi odciętych znajduje się wartość odchyłki kątownej od kierunku maksymalnego promieniowania (rys. 10). Układ współrzędnych biegunowych jest dogodniejszy do zobrazowania charakterystyki promieniowania w pełnym (360°) otoczeniu anteny.

Dyskryminacja polaryzacji, czyli różnica między tłumiennością wnoszoną dla fali o polaryzacji niepożądaną (ortogonalną) a tłumiennością dla fali o polaryzacji pożądaną, powinna być większa od 25 dB dla popularnych anten odbiorczych telewizji satelitarnej i jest zwykle większa od 35 dB dla anten profesjonalnych.

tom rozwarcia wiązki.

Są różne metody pomiaru zysku w technice antenowej. Może być on wyznaczony np. przez bezpośredni pomiar porównawczy z anteną o zysku wzorcowym (rys. 11).

Pomiar zysku, jak wspomniano, polega na porównaniu z bezstratnym źródłem

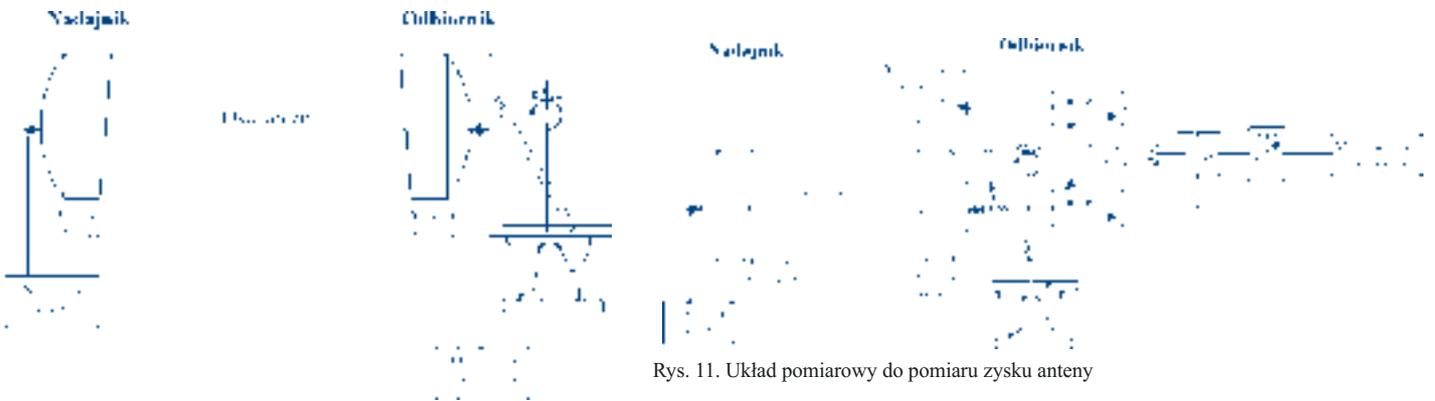
$$G_B = L_{s1} - L_{s2} + G_W \quad (1)$$

gdzie:

$G_B$  – zysk badanej anteny [dBi],

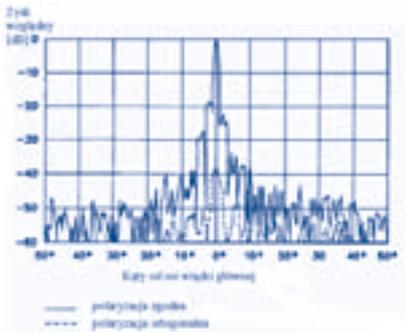
$L_{s1}$  – poziom sygnału z badanej anteny [dB],

$L_{s2}$  – poziom sygnału z wzorcowej anteny [dB],



Rys. 9. Układ pomiarowy do pomiaru charakterystyki anteny

Rys. 11. Układ pomiarowy do pomiaru zysku anteny



Rys. 10. Typowa charakterystyka promieniowania anteny satelitarnej

**Zysk**

Zysk anteny jest miarą jej jakości, ściśle związany z jej kierunkowością. Jest on określony stosunkiem (wyrażonym zwykle w decybelach) natężenia pola anteny w kierunku pożądanym i natężenia pola (w tym samym kierunku) wytworzonego przez antenę izotropową (zasilaną tą samą mocą). Zysk najczęściej określa się w kierunku maksymalnej gęstości promieniowania anteny rzeczywistej. Duże wartości zysku odpowiadają małym ką-

izotropowym, będącym hipotetycznym elementem promieniującym energię we wszystkich kierunkach. Jest on nierealizowalny w praktyce i służy zwykle do obliczeniowego wyznaczania kształtu charakterystyk promieniowania anten różnych typów. Wielkością porównawczą jest zwykle gęstość mocy przepływająca przez jednostkę powierzchni. Dla zachowania prawidłowych warunków pomiaru należy:

- zachować właściwą odległość między antenami,
- wyeliminować lub uwzględnić wszystkie dodatkowe sygnały odbite,
- właściwie skierować obie anteny,
- dopasować po zmianie anteny,
- sprawdzić pozostałe czynniki, takie jak częstotliwość, sprawność detekcji, kalibracja tłumika.

Powyższe postępowanie oparte jest na założeniu znajomości wartości zysku anteny wzorcowej. Dokładność wykonanych pomiarów w sposób decydujący określa definicja i szacunkowa wartość zysku anteny wzorcowej. Zysk badanej anteny (rys. 11) oblicza się z zależności:

$G_W$  – zysk wzorcowej anteny [dBi].  
 Przy testowaniu anten ważna jest odległość między antenami nadawczą i badaną – im jest większa, tym lepiej. Powinna ona być przynajmniej na tyle duża, by anteny znajdowały się wzajemnie w swoich dalekich strefach promieniowania. Odległość strefy dalekiej  $D_d$  promieniowania anteny o kołowej aperturze określa zależność:

$$D_d > \frac{2D^2}{\lambda} \text{ [m]} \quad (2)$$

gdzie:

$D$  – największy rozmiar apertury badanej anteny [m],

$\lambda$  – długość fali w wolnej przestrzeni dla częstotliwości pomiarowej [m].

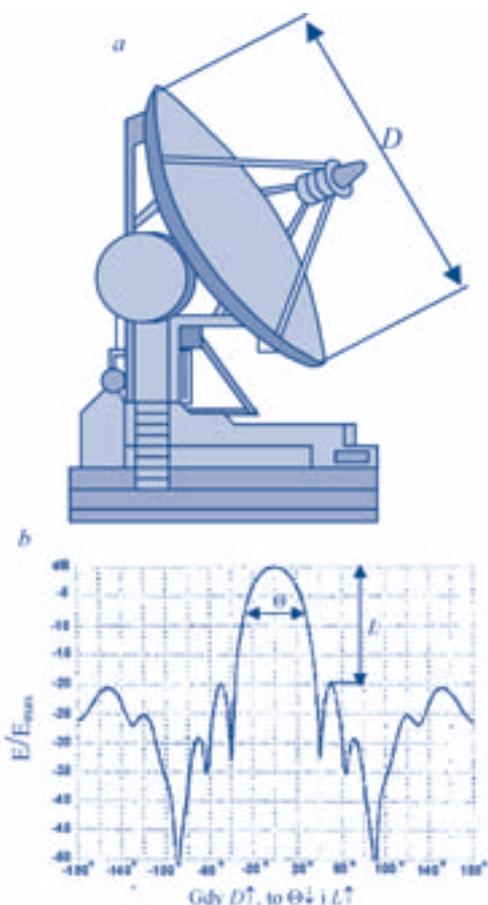
Przykładowo, dla anteny z rys. 8 granicę strefy dalekiej  $D_d$  wyliczymy dla częstotliwości 8,45 GHz, tj. długości fali równej  $\lambda = 0,0355$  m i podstawiając  $D = 70$  m:

$$D_d = \frac{2 \cdot 70^2}{0,0355} \approx 276 \text{ [km]} \quad (3)$$

Dlatego dla dużych systemów antenowych ich parametry bada się wykorzystu-

jąc jako nadajnik radiolatarnie sztucznego satelity.

Dopuszczalna wartość zysku anten satelitarnych jest ściśle określona i przykładowo dla anteny pasma 11/12 GHz, dla wiązki głównej anteny i 90% szczytów listków bocznych, wyrażony w dB względem anteny izotropowej, powinien mieścić się w granicach następujących linii (obwiedni):



Rys. 12. a – antena satelitarna, b – charakterystyka promieniowania

- a) dla fali o polaryzacji pożądanej
- 29-25logφ dBi dla 2,8° ≤ φ ≤ 7°
  - +8 dBi dla 7° ≤ φ ≤ 9,2°
  - 32-25logφ dBi dla 9,2° ≤ φ ≤ 30°
  - 5 dBi dla 30° ≤ φ ≤ 70°
  - 0 dBi dla 70° ≤ φ ≤ 180°
- b) dla fali o polaryzacji ortogonalnej
- 19-25logφ dBi dla 2,8° ≤ φ ≤ 7°
  - 2 dBi dla 7° ≤ φ ≤ 180°

Kątem między osią wiązki głównej anteny a rozpatrywanym kierunkiem jest φ. Definicja 90% szczytów listków bocznych charakterystyki anteny jest podana w zaleceniu ITU-R 732 [12].

### Parametry mechaniczne

Konstrukcja anteny powinna umożliwiać wycelowanie osi głównej wiązki promieniowania anteny w kierunku orbity geostacjonarnej z błędem nie większym niż błąd wycelowania powodujący spadek zysku anteny o 1 dB dla dowolnej częstotliwości, z zakresu częstotliwości pracy terminala i dla każdego kąta azymutu i elewacji dostępnego dla anteny.

Antena satelitarna nie powinna ulec trwałemu odkształceniu, ani nie powinna wymagać ponownej regulacji, w wyniku działania wiatru o prędkości do 130 km/h. Przy takim wietrze antena powinna utrzymać kierunek do satelity z dokładnością 20% szerokości wiązki, co odpowiada zmniejszeniu poziomu odbieranego sygnału w granicach ±0,5 dB. Szerokość wiązki antenowej jest definiowana dla spadku poziomu mocy sygnału o 3 dB. Przy wystąpieniu wiatru o prędkości między 130 km/h a 160 km/h dopuszczalne jest odchylenie osi głównej anteny od pożądanego kierunku. Dopuszcza się wówczas konieczność korekty położenia anteny. Przy wystąpieniu wiatru o prędkości do 160 km/h nie powinno nastąpić trwałe pogorszenie parametrów anteny: zmniejszenie zysku, odkształcenie charakterystyki kierunkowej lub pogorszenie tłumienia sygnału o polaryzacji ortogonalnej. Antena satelitarna również nie powinna ulec trwałemu uszkodzeniu ani odkształceniu w wyniku działania intensywnych opadów deszczu lub śniegu, a także wystąpienia skorupy lodowej o grubości do 25 mm.

\* \* \*

Należy jednocześnie wyjaśnić pewną kwestię niezrozumiałą dla ludzi nie związanych z techniką, a zamieszkujących na obszarze w pobliżu satelitarnych telewizyjnych stacji nadawczych. Otóż, gdy stosowana jest antena o bardzo dużej średnicy D, to zysk energetyczny takiej anteny jest bardzo duży, a więc moc emitowana

może być mała dla osiągnięcia zamierzonego bilansu energetycznego łącza satelitarnego. Wynika to stąd, że antena o dużej średnicy (rys. 12a) cechuje się małą szerokością kątową Θ wiązki głównej (rys. 12b), a tym samym – poziom promieniowania niepożądanego wokół anteny jest minimalny, gdyż poziom listków bocznych jest mały (duża wartość L – rys. 12b). A więc im większa jest średnica zastosowanej satelitarnej anteny nadawczej, tym bezpieczniej wokół niej – chociaż ludzie nie związani z techniką oceniają sytuację akurat odwrotnie.

### PIŚMIENNICTWO

[1] Bogucki J., Wielowieyska E.: *Tłumienie dodatkowe w łączu satelitarnym*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne 1/1998

[2] Bogucki J., Dusiński A.: *Pomiary radiometryczne*. Biuletyn informacyjny Instytutu Łączności 9/1995

[3] Bogucki J.: *Mikrofalowe anteny służb stałych*. Elektronizacja 1-2/2001

[4] Bogucki J.: *Szum mikrofalowych urządzeń odbiorczych telewizji satelitarnej*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne 6/1998

[5] Dane katalogowe firmy Andersen Manufacturing Inc.

[6] Everett J.: *VSATs very small aperture terminals*. Peter Peregrinus Ltd. London 1992

[7] <http://www.era.co.uk/PRODUCT/diamond.htm>

[8] <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/D.Jefferies/tidbin.html>

[9] Lo Y.T.: *Antenna Handbook. Their Applications, and Design*. Van Nostrand Reinhold Company. New York 1988

[10] Maral M., Bousquet M.: *Satellite Communications Systems. Systems, Techniques and Technology*. John Wiley & Sons. New York 1993

[11] Norma ETSI 300 158: *Satellite Earth Stations (SES); Television Receive Only (TVRO-FSS) Satellite Earth Stations operating in the 11/12 GHz FSS bands*. 1992

[12] Norma ETSI 300 159 *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Transmit-only or transmit-and-receive Very Small Aperture Terminals (VSATs) used for communications operating in the Fixed Satellite Service (FSS) 11/12/14 GHz frequency bands*

[13] Zalecenie ITU-R 732. *Method for statistical processing of earth-station antenna side-lobe peaks*. 1992