



# **INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI**

## **PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY**

**Centralne Laboratorium Badawcze (CLB)**

### **Nowe rozwiązania anten satelitarnych**

**Praca nr 09300046**

Warszawa, grudzień 2006

Nowe rozwiązania anten satelitarnych

Praca nr 09300046

Słowa kluczowe: systemy satelitarne, systemy wielowiązkowe, pasmo K, V

Kierownik pracy: dr inż. Jacek Jarkowski

Wykonawca pracy: inż. Jan Bogucki

Kierownik Zakładu: mgr inż. Adam Borowski

## Spis treści

1. Wstęp.....	4
2. Równania łącza satelitarnego.....	4
3. Konstrukcja satelitów telekomunikacyjnych.....	8
4. Satelity nowej generacji.....	9
4.1. Anteny z wiązką wielo punktową.....	11
4.1.1. Obszar pokrycia anteny punktowej.....	14
4.2. Ponowne wykorzystanie częstotliwości.....	15
4.2.1. Współczynnik wielokrotnego wykorzystania częstotliwości.....	16
4.3. Zakłócenia interferencyjne w wielo-wiązkowych systemach satelitarnych.....	17
4.4. Tłumienie wolnej przestrzeni w liniach satelitarnych.....	19
4.5. Opóźnienie czasowe w łączach satelitarnych.....	20
5. Rodzaje anten satelitów.....	21
6. Konstrukcja dotychczas stosowanych anten satelitów.....	22
6.1. Anteny pierwszych satelitów telekomunikacyjnych.....	22
6.1.1. Antena satelity „Telstar”.....	22
6.1.2. Symetryczne anteny paraboliczne.....	22
6.1.3. Anteny tubowo-paraboliczne.....	24
6.1.4. Anteny z plastycznym reflektorem siatkowym.....	25
6.2. Współczesne mikrofalowe anteny satelitarne.....	25
6.2.1. Paraboliczne anteny podświetlone.....	25
6.2.2. Paraboliczne anteny dwurefleksyjne.....	27
6.2.3. Sferyczne anteny.....	30
7. Anteny satelitów LEO.....	31
8. Tendencje zmian w konstrukcji anten satelitarnych.....	32
Bibliografia.....	33

## 1. Wstęp

Technika satelitarna rozwija się niezmiernie dynamicznie od jej początku, tj. od lat 60-ych. Szacuje się, że co kilkanaście lat (około 13) zmienia się generacja satelitów. Przyjmuje się, że teraz, tj. lata 1997 ÷ 2010, jest czwarta generacja satelitów. Jest to epoka satelitów inteligentnych. Na ich pokładzie są z reguły anteny operujące wiązkami punktowymi, które są przełączana zestawiając dynamiczne łącza, w zależności do potrzeb użytkownika.

Antena 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, umożliwiającą np. promieniowanie (nadawanie) o jednej polaryzacji a odbiór fali o polaryzacji prostopadłej do niej.

Z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetyczne anteny są niewrażliwym elementem całego systemu a ich parametry są bardzo ważne dla określenia jakości całego systemu teletransmisyjnego, co wynika z równania łącza satelitarnego.

## 2. Równania łącza satelitarnego

W systemach radiokomunikacji satelitarnej są wykorzystywane satelity aktywne, to znaczy satelity wyposażone w radiokomunikacyjne urządzenia przekaźnikowe, zwane transponderami. Każdy system satelitarny składa się z łącza Ziemia – satelita (*Uplink*), służącego do transmisji sygnału z Ziemi do satelity, stanowiącego orbitalną stację transmisyjną oraz łącza satelita – Ziemia (*Downlink*), którym sygnał z satelity jest rozsyłany do odbiorców na powierzchni Ziemi. Zasadniczą zaletą retransmisji satelitarnej jest możliwość korzystania z niej przez nieograniczoną ilość odbiorców (w zasadzie niezależnie od ich położenia geograficznego,) jako adresatów sygnałów nadawanych z satelity, łączem satelita – Ziemia.

Antena naziemna promieniuje energię w kierunku satelity. Gdyby była ona izotropowa promieniująca dookoła to intensywność promieniowania  $U$  nie zależałaby od kierunku i wynosiłaby:

$$U = \frac{P_i}{4\pi} \quad (1)$$

gdzie:  $P_i$  – całkowita moc promieniowana.

Gęstość powierzchniowa mocy promieniowanej w odległości  $R$  od tej anteny określa wektor Poyntinga  $S$ :

$$S = \frac{U}{R^2} \quad (2)$$

a więc:

$$S = \frac{P_i}{4\pi R^2} \quad (3)$$

Oczywiście antena naziemna promieniuje sygnał nie dookólnie, ale w określonym kierunku. W takim przypadku w odległości  $R$  od anteny nadawczej gęstość strumienia mocy będzie zwiększona o wielkość  $G_T$ :

$$S = \frac{P_i G_T}{4\pi R^2} \quad (4)$$

gdzie:  $G_T$  – zysk anteny nadawczej.

Antena satelitarna odbiera tylko część energii  $P_r$  wprost proporcjonalną do jej apertury  $A_r$  ponieważ:

$$P_r = S A_{sk} = S \eta A_{cz} = S \eta w A_r \quad (5)$$

gdzie:  $\eta$  – sprawność anteny odbiorczej;

$w$  – współczynnik wykorzystania apertury;

$A_{sk}$  – powierzchnia skuteczna anteny odbiorczej;

$A_{cz}$  – powierzchnia czynna anteny odbiorczej.

Przy czym:

$$A_{sk} = \eta A_{cz} = \eta \frac{P_{obc}}{S} \quad (6)$$

gdzie:  $P_{obc}$  – moc oddana do obciążenia.

Powierzchnia czynna dla fali padającej z kierunku osi listka głównego wyraża się poprzez zależność:

$$A_{cz} = pq \frac{\lambda^2 G_T}{4\pi} \quad (7)$$

gdzie:  $p$  – współczynnik dopasowania energetycznego;

$q$  – współczynnik dopasowania polaryzacyjnego;

$\lambda$  – długość fali.

Współczynniki  $p$  i  $q$  przyjmują wartości pomiędzy 0 i 1. Jeżeli współczynniki  $p$  i  $q$  są równe 1, co ma miejsce w większości praktycznych zastosowań, gdyż pracujemy w warunkach optymalnych dopasowań, wówczas powierzchnia czynna wyraża się zależnością:

$$A_{cz} = \frac{\lambda^2 G_T}{4\pi} \quad (8)$$

Wówczas moc  $P_r$  odbieraną przez antenę satelitarną oblicza się wykorzystując zależności (5) i (8):

$$P_r = \frac{w P_T G_T G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (9)$$

gdzie:  $P_T$  – moc nadajnika.

Gęstość szumów  $N_o$ , czyli moc szumów zawarta w znormalizowanej szerokości pasma 1 Hz

wynosi natomiast:

$$N_0 = kT_e \quad (10)$$

gdzie:  $k$  – stała Boltzmana ( $-198,6$  dBm/K);

$T_e$  – systemowa temperatura szumów [K].

Stosunek poziomu przebiegu nośnej do widma gęstości szumów określa zależność:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{kT_e} \quad (11)$$

gdzie:  $C$  – średnia moc szerokopasmowego przebiegu nośnego.

Należy zwrócić uwagę, że zysk energetyczny anteny nie stanowi jedyne parametru, na podstawie którego można ocenić skuteczność anteny. Każda antena odbiera w zakresie listka głównego i listków bocznych szumy pochodzące od atmosfery, jonosfery, powierzchni ziemi, ze źródeł pozaziemskich, do których dodaje się szum własny anteny pochodzący od jej elementów stratnych. Nawet jeśli dana antena cechuje się dużym zyskiem, jej skuteczność użytkowa może być w znacznym stopniu zredukowana przez wartość jej temperatury szumowej. Wynika to z mocy szumów  $P$  określonej – jeśli temperatura szumowa jest niezależna częstotliwościowo w paśmie częstotliwości odbieranym  $W$  – następującą zależnością:

$$P = \frac{kW}{4\pi} \iint T(\theta, \Psi) |E(\theta, \Psi)|^2 d\Omega \quad (12)$$

gdzie:  $E(\theta, \Psi)$  – względna charakterystyka kierunkowa anteny;

$T(\theta, \Psi)$  – temperatura szumowa anteny.

Istotnym parametrem jest również stosunek energii przypadającej na bit  $E_b$  do gęstości widmowej szumów. Średnia energia przesyłanego bitu jest proporcjonalna do czasu jego trwania  $T_b$ :

$$E_b = P_0 T_b \quad (13)$$

gdzie:  $P_0$  – moc zawarta w bicie [W].

Stąd:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{CT_b}{kT_e} = \frac{C}{N_0} T_b \quad (14)$$

Wykorzystując (5) otrzymujemy:

$$\frac{C_u}{N_{ou}} = \frac{P_{ru}}{kT_e} = \frac{wP_T G_T G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2 kT_e} \quad (15)$$

gdzie:  $\frac{C_u}{N_{ou}}$  – stosunek poziomu nośnej do szumów dla kierunku Ziemia – satelita.

Dla kierunku Ziemia – satelita równanie (15) można przedstawić w wygodniejszej formie logarytmicznej:

$$\frac{C_u}{N_{ou}} = 10 \lg P_T G_T - 20 \lg \frac{4\pi R_u}{\lambda_d} + 10 \frac{G_{ru}}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg w \quad (16)$$

Dla kierunku satelita – Ziemia:

$$\frac{C_d}{N_{od}} = 10 \lg P_s G_{sd} - 20 \lg \frac{4\pi R_d}{\lambda_d} + 10 \frac{G_d}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg w \quad (17)$$

Równania (16) i (17) mają tę samą postać, w których:

- pierwszy składnik to zastępcza moc promieniowana izotropowo EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) stacji naziemnej (satelity); EIRP określa efektywną moc promieniowania w kierunku maksymalnego zysku odniesiona do mocy jaka byłaby promieniowana przez źródło izotropowe:  $EIRP = P_T \cdot G_T$ ;
- drugi składnik to tłumienie wolnej przestrzeni na trasie Ziemia – satelita (satelita – Ziemia);
- trzeci składnik to współczynnik wykorzystania apertury anteny naziemnej (satelitarnej);
- czwarty składnik zależy od stałej Boltzmana;
- piąty składnik to sprawność anteny satelity (odbiorczej).

Wielkość  $w$  jest ujemna, więc składnik piąty reprezentuje straty. Jednak w równaniach (16) i (17) – dla rzeczywistych systemów – należy wprowadzić szósty składnik, uwzględniający dodatkowe straty  $L_d$ , jakie mogą powstać wskutek zjawisk atmosferycznych na trasie satelita – Ziemia i Ziemia – satelita, gdyż tłumienność międzyantenowa, składająca się z dwu wielkości:

- tłumienności głównej, odpowiadającej tłumieniu sygnału w warunkach propagacji wolnej przestrzeni (drugi składnik równań (16) i (17));
- tłumienności dodatkowej, powodowanej zanikami sygnału w wyniku opadów atmosferycznych; tłumienność dodatkowa zmienia się w funkcji czasu, oscylując wokół wartości zerowej w dobrych warunkach propagacyjnych i osiągając wartość nawet kilkudziesięciu decybeli w warunkach głębokich zaników sygnału.

Wtedy równania (16) i (17) przybierają postać:

$$\frac{C_u}{N_{ou}} = 10 \lg P_T G_T - 20 \lg \frac{4\pi R_u}{\lambda_d} + 10 \frac{G_{ru}}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg w + 10 \lg L_d \quad (18)$$

$$\frac{C_d}{N_{od}} = 10 \lg P_s G_{sd} - 20 \lg \frac{4\pi R_d}{\lambda_d} + 10 \frac{G_d}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg w + 10 \lg L_d \quad (19)$$

Z powyższych zależności wynika, że parametry anten mają decydujący wpływ na bilans energetyczny łącza satelitarnego a tym samym na jakość transmisji. Wartość gęstość strumienia na powierzchni Ziemi, przy stałej mocy nadajnika pokładowego, jest zależna tylko od parametrów anteny.

### 3. Konstrukcja satelitów telekomunikacyjnych

Satelita telekomunikacyjny składa się z dwóch głównych modułów:

- platformy kosmicznej (*spacecraft bus*);
- aparatury telekomunikacyjnej (*communication subsystem*).

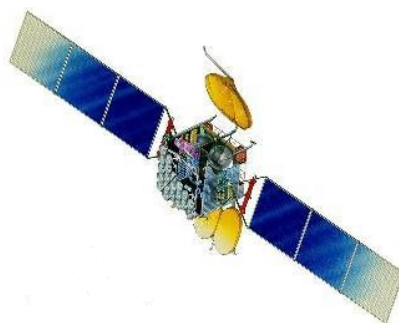
Do zadań platformy kosmicznej należy m.in. utrzymanie pozycji orbitalnej satelity i jego stabilnego położenia w przestrzeni kosmicznej oraz nakierowanie anten na obsługiwane obszary na powierzchni Ziemi.

Współczesne satelita telekomunikacyjny mają dwa rodzaje konstrukcji mechanicznej:

- cylindryczną (rys. 1); jest to starsze rozwiązanie konstrukcyjne. Stabilizację położenia satelity uzyskuje się w tym przypadku przez nadanie mu ruchu obrotowego. Nieruchome pozostają tylko anteny wycelowane w obsługiwane obszary na powierzchni Ziemi;
- prostopadłościenną (rys. 2); jest to nowsze rozwiązanie konstrukcyjne, stosowane w większości aktualnie umieszczanych na orbicie satelitach. Przy tej konstrukcji – pudełkowej, stabilizację we wszystkich trzech płaszczyznach zapewniają żyroskopy.



Rys. 1. Satelita cylindryczny



Rys. 2. Satelita pudełkowy



#### 4. Satelity nowej generacji

Wprowadzenie systemów niskoorbitowych jest związane z wprowadzeniem satelitów nowej generacji. Dotychczas aparatura telekomunikacyjna satelity składała się z zespołu nadawczo odbiorczego, który odbierał sygnały ze stacji naziemnej, wzmacniał je, przesuwał do innego zakresu częstotliwości, dalej wzmacniał, aż do uzyskania założonego poziomu mocy, a następnie wypromieniowywał w kierunku Ziemi. Wszystko to dokonywało się w urządzeniach „przezroczystych”, tzn. nie oddziałujących na przekazywane informacje, lecz jedynie wzmacniających sygnały nośne i zmieniających ich częstotliwość. Natomiast satelity telekomunikacyjne nowej generacji nie tylko wzmacniają i retransmitują sygnały, lecz również komutują je, ewentualnie buforują i odpowiednio kierują (do abonenta lub innej stacji satelitarnej czy naziemnej stacji pośredniczącej).

Szerokopasmowe cyfrowe systemy komunikacji satelitarnej są rozwijane w paśmie częstotliwości Ka, tj.  $26,5 \div 40$  GHz, a także zaplanowane w paśmie V, tj.  $50 \div 75$  GHz (tab. 1). Są to dynamiczne transmisyjne łącza z przetwarzaniem sygnałów na pokładzie satelity. Natomiast interfejsy naziemne wykorzystują technologie wykorzystywaną od dawna. Systemy te wielokrotnie wykorzystują przydzielone częstotliwości stosując maksymalną przepływność transmisji, a tym samym minimalizując pasmo wykorzystywanych częstotliwości. Wykorzystuje się wiązki punktowe dla ściśle określonego obszaru. Zastosowanie systemów satelitarnych pracujących w paśmie częstotliwości Ka lub V powoduje, że na pokładzie satelity są anteny mniejsze gabarytowo. Systemy na pasmo częstotliwości Ka są aktualnie wdrażane do eksploatacji. Natomiast zaplanowane systemy pasma V, w których anteny będą znacząco mniejsze niż w paśmie Ka, będą wdrożone około 2010 roku.

Należy zwrócić uwagę, że antena punktowa w przypadku techniki satelitarnej, to najczęściej antena pokrywająca obszar co najmniej kraju. Przykładowo, dla zakresu częstotliwości  $10 \div 15$  GHz antena punktowa na orbicie satelity GEO mająca szerokość wiązki  $0,7^\circ/1,2^\circ$  pokrywa cały obszar Polski. A najmniejsza typowa antena kołowa szerokość w tym zakresie częstotliwości ma szerokość wiązki  $0,6^\circ$ .

Tabela 1. Najważniejsze zaplanowane wielowiązkowe systemy satelitarne

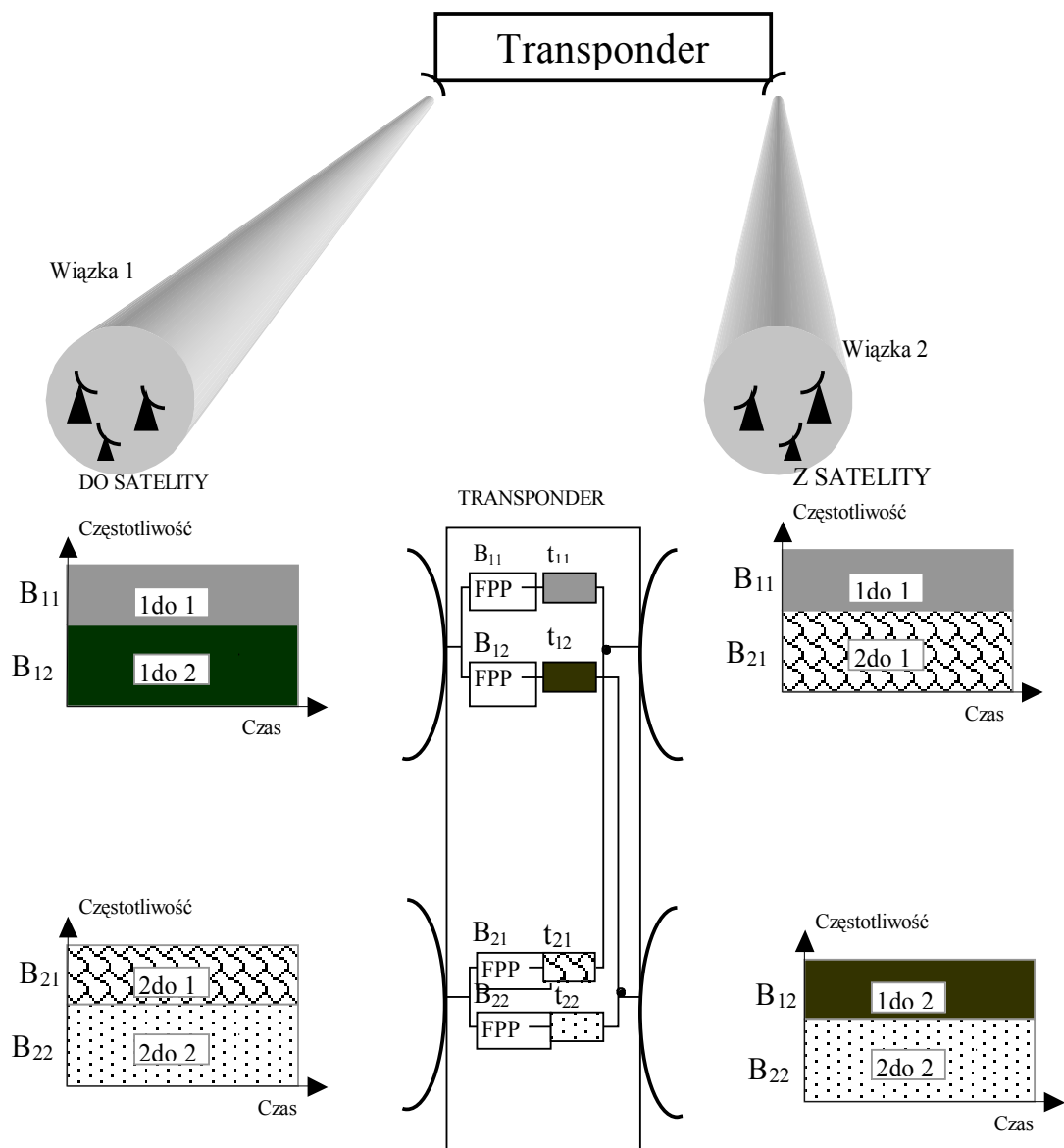
System	Orbita	Liczba satelitów	Obszar pokrycia	Pasma często.	Szerokość wiązki [°]	Liczba wiązek	Antena	Rynek	Przetwarzanie na satelicie
Astrolink	GEO	5	Obszary zaludnione	Ka	0,8	96	Tuba oświetlająca	Multimedia	Pełne
Cyberstar	GEO	3	Europa Azja Płn. Ameryka	Ka	1	72	Tuba oświetlająca	Multimedia	Pasma podstawowe
Euroskyway	GEO	5	Europa Azja Śród Wschód	Ka	1	32	Tuba oświetlająca	Multimedia	Pasma podstawowe
East	GEO	12	Europa Afryka	Ka	0,6	-	Tuba oświetlająca	Infrastruktura	Pasma podstawowe
WEST	GEO/MEO	9	Europa, Afryka, Śród Wschód	Ka	0,6	64	Tuba oświetlająca	Multimedia	Pasma podstawowe
SPACEWAY	GEO/MEO	16-36	Obszary zaludnione	Ka	1	24	Tuba oświetlająca	Infrastruktura	Pasma podstawowe
Celestri	GEO/MEO	-	-	Ka/V	0,5 (1÷5)*	-	-	Infrastruktura	-
Astar	GEO	5-25	-	V	-	58	-	Infrastruktura	-
GESN	GEO/MEO	19	-	V	-	32/48**)	-	Infrastruktura	-
V-Stream	GEO	12	-	V	1,5°	20	-	-	-
CyberPath	GEO	10	-	V	0,42°	100	-	-	-

Ozn.: GEO geosynchronous Earth orbit; MEO – medium Earth orbit; WEST – Wide-Band European Satellite Telecommunication;  
GESN – Global Extremely High-Frequency Satellite Network.  
\*) Regionalne; \*\*) GEO/MEO

Jednak stosując systemy satelitarne pracujące w wyższych zakresach częstotliwości, tj. paśmie Ka względnie V, uzyskuje się kilkakrotnie mniejszą szerokość wiązki antenowej, a tym samym kilkadziesiąt razy większy poziom sygnału na danym obszarze, który np. dla częstotliwości 75 GHz może mieć wielkość tylko województwa.

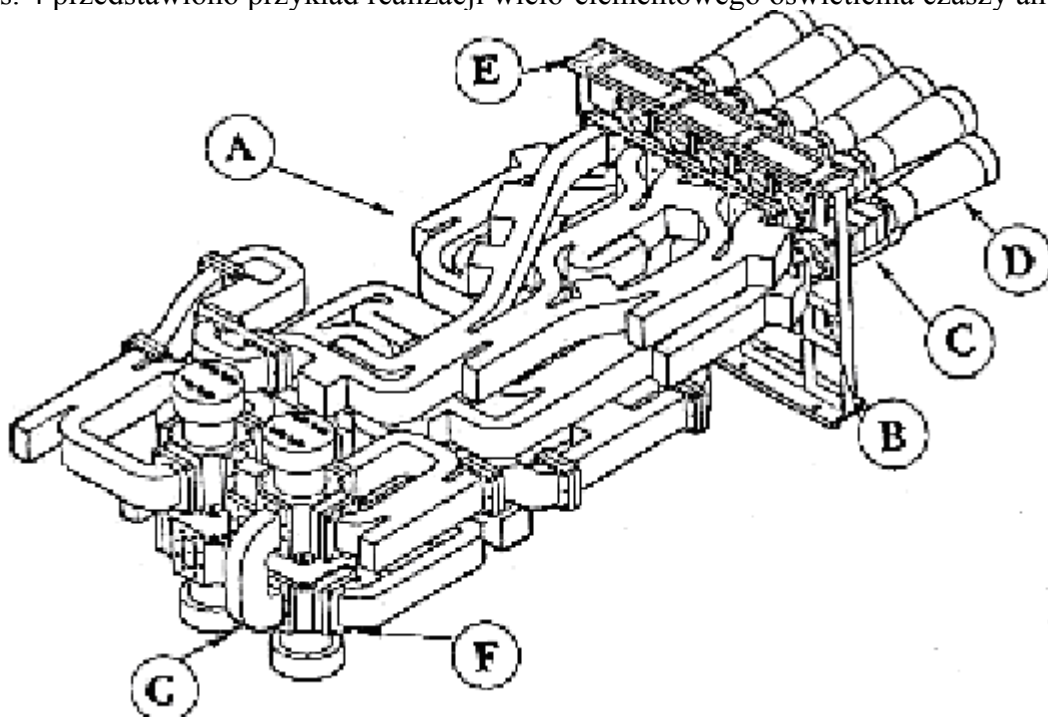
#### 4.1. Anteny z wiązką wielo punktową

Anteny z wiązką wielo punktową mają większy zysk niż inne rodzaje anten satelitarnych, ale obsługują tylko ograniczony obszar, z całego, jaki obsługuje dany satelita.



Rys. 3. Sieć satelitarna – przełączanie wiązek antenowych

Pozostały obsługiwany obszar większy niż pokrywa jedna antena punktowa może być obsługiwany przez antenę o większym zysku dzięki wielo punktowym charakterystykom poszczególnych anten. Zapewnienie połączeń pomiędzy wszystkimi stacjami danego obszaru wymaga albo stałej łączności pomiędzy wiązkami do i z satelity (rys. 3) albo czasowych połączeń wykonanych za pomocą matrycy przełączającej na pokładzie satelity. Na rys. 4 przedstawiono przykład realizacji wielo-elementowego oświetlenia czaszy anteny.

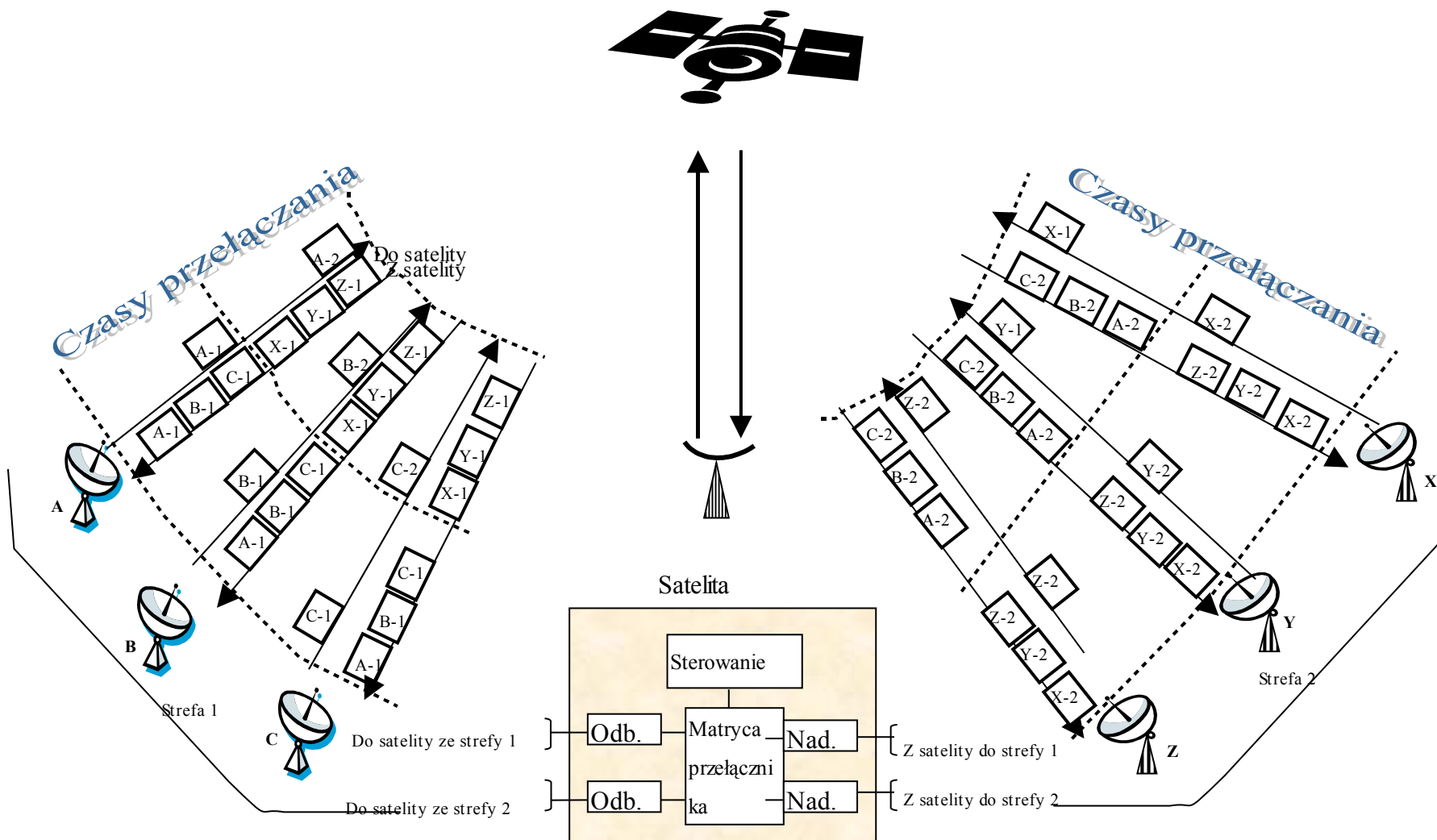


Rys. 4. Przykład wielo elementowego oświetlenia czaszy anteny [8].

- Oznaczenia:
- A – układy formowania wiązki
  - B – skręt falowodowy
  - C – przejście falowód prostokątny na falowód kołowy
  - D – tuby promieniujące
  - E – kołnierze mocujące
  - F – przełącznik w.cz
  - G – łączenia płaszczyzn ortogonalnych

Oprócz elementów pokazanych na rys. 4, w skład układów formujących wiązkę anteny satelitarnej, wchodzi również inne bardzo istotne elementy, takie jak przesuwniki fazy i dzielniki mocy. Pozwala to na formowanie wiązek anteny satelitarnej, uzyskania ich założonego kształtu. Każdy pojedynczy element systemu antenowego mając odpowiednią fazę emitowanej fali, tworzy w całości, tj. uwzględniając wszystkie rożki, założoną powierzchnię fazową (*phase array*), a tym samym żądany kształt wiązki.

Jednak stałe połączenia wymagają większej ilości transponderów, niż przełączanie na pokładzie.



Rys. 5. Przełączanie wiązek poprzez czasowe zestawianie kanałów

Przełączanie na pokładzie satelity (rys. 5) wymaga, że stacja naziemne transmitują pęczki nośnych, zsynchronizowanych z przełącznikami satelity w ten sposób, że docierają one do satelity dokładnie wtedy, gdy właściwa wiązka do i z satelity są zestawione.

#### 4.1.1. Obszar pokrycia anteny punktowej

Zdolność odbioru sygnału przychodzącego do satelity zależy od stosunku  $G/T$  (wzór (16) i (17)), gdzie  $G$  – zysk anteny odbiorczej satelity dla sygnałów docierających do anteny, a  $T$  temperatura szumu dla kierunku odbiorczego.

Natomiast zdolność nadawcza satelity określa efektywna moc zastępcza promieniowana izotropowego nadajnika stacji satelitarnej (wzór (16) i (17)), która jest zależna od zysku satelitarnej anteny nadawczej i mocy doprowadzonej do anteny z wzmacniacza transpondera.

A więc powyższe parametry są proporcjonalnej do zysku anteny satelitarnej. Dokładnie wartości  $G/T$  i EIRP są definiowane na krawędzi obszaru pokrycia. Zwykle krawędź obszaru pokrycia jest definiowana przez linie na powierzchni Ziemi odpowiadającą stałemu zyskowi anteny satelitarnej, np. 3 dB poniżej zysku maksymalnego (*boresight*).

Maksymalny zysk anteny satelitarnej  $G_{max}$  jest odwrotnie proporcjonalny do kwadratu szerokości wiązki, określonej dla połowy mocy  $\Theta_{3dB}$ :

$$G_{max} = \frac{29000}{(\theta_{3dB})^2} \quad (20)$$

lub

$$G_{max} (dBi) = 44,6 - 20 \lg \theta_{3dB} \quad (21)$$

Przy czym 3 dB szerokość wiązki  $\Theta_{3dB}$  [°] można wyrazić zależnością:

$$\Theta_{3dB} = \frac{70c}{Df} \quad (22)$$

gdzie:  $D$  – średnica anteny [m];

$f$  – częstotliwość [Hz];

$c$  – prędkość światła,  $3 \cdot 10^8$  [m/s].

Rozpatrywane wartości  $G/T$  i EIRP są określone przez wartość zysku anteny satelitarnej na krawędzi obszaru pokrycia  $G_{eoc}$ :

$$G_{eoc} = \frac{G_{max}}{2} \quad (23)$$

lub

$$G_{eoc} (dBi) = G_{max} (dBi) - 3 dB \quad (24)$$

Wartość zysku anteny satelitarnej, w zakresie kąta  $\Theta$ , od maksymalnego zysku ( $0^\circ$ ) do spadku mocy o trzy decybele  $\Theta_{3dB}$ , można wyrazić zależnością:

$$G(\Theta) (dBi) = G_{max} (dBi) - 12 \left( \frac{\Theta}{\Theta_{3dB}} \right)^2 \quad (25)$$

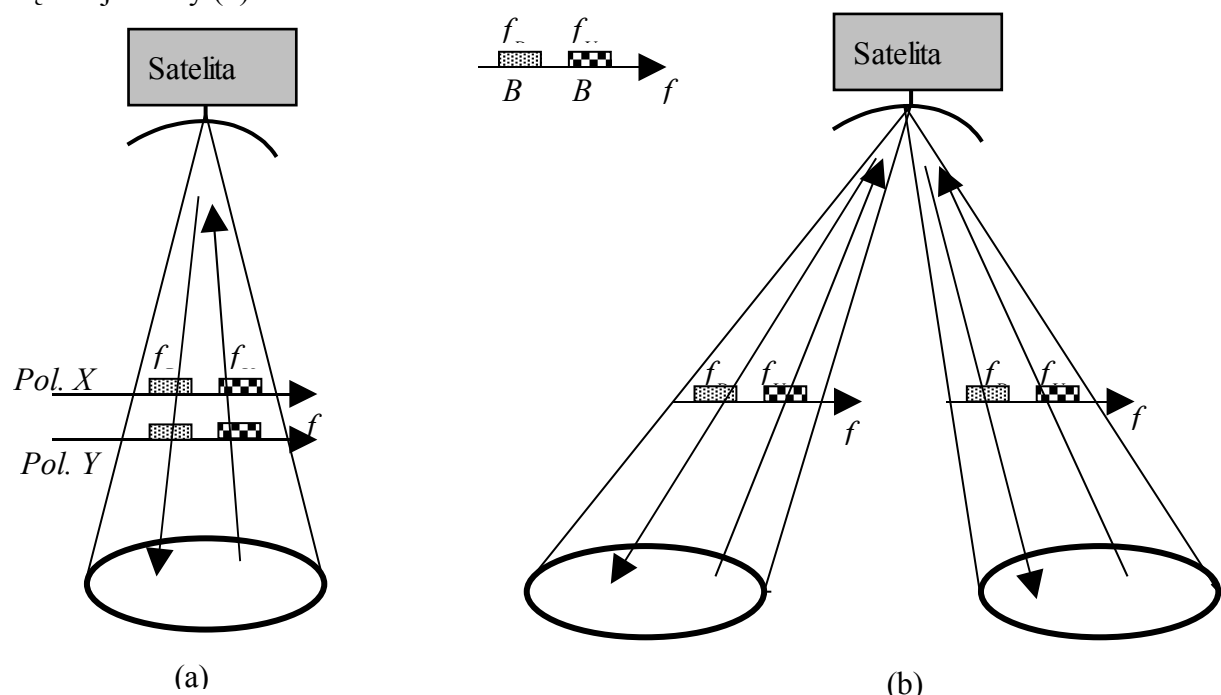
Ze wzorów (21) i (24) wynika, że wartości  $G/T$  i EIRP na krawędzi obszaru pokrycia są określone przez szerokość wiązki satelitarnej  $\Theta_{3dB}$ : szersza wiązka, to wówczas mniejsze są wartości  $G/T$  i EIRP.

A więc obszar pokrycia satelity zależy od jego parametrów wyrażających się w wielkościach  $G/T$  i EIRP. Globalny obszar pokrycia powoduje mniejsze wartości  $G/T$  i EIRP, w porównaniu do wiązek punktowych.

W przypadku wielu wiązkowych systemów satelitarnych można zmniejszyć gabaryty stacji, a tym samym zminimalizować koszty segmentu naziemnego. Przykładowo, zmniejszenie o 20 dB  $(EIRP)_{stacji}$  i  $(G/T)_{stacji}$  pozwala na zmniejszenie średnicy anteny z 30 m do 3 m, a tym samym zredukować koszty z 30 mln zł do 150 tys. zł.

#### 4.2. Ponowne wykorzystanie częstotliwości

Ponowne wykorzystanie częstotliwości ma na celu kilkakrotne wykorzystanie tej samej częstotliwości, gdyż w ten sposób wzrasta całkowita przepływność sieci bez zwiększenia przydzielonego pasma częstotliwości. Ponowne wykorzystanie częstotliwości może być zrealizowane z wykorzystaniem dyskryminacji polaryzacyjnej: dwie nośnej o tej samej częstotliwości, ale z ortogonalnymi polaryzacjami mogą być odbierane przez antenę z określeniem ich polaryzacji. W wielu wiązkowych satelitach wykorzystuje się również separację kątową będącą wynikiem kierunkowości anten, co pozwala wykorzystać te same częstotliwości w różnych wiązkach. Na rys. 6 pokazano powtórne wykorzystanie częstotliwości z wykorzystaniem dyskryminacji polaryzacyjnej (a) oraz charakterystyki kątowej anteny (b).



Rys. 6. Powtórne wykorzystanie częstotliwości z dyskryminacją polaryzacyjną (a) i kątową (b)

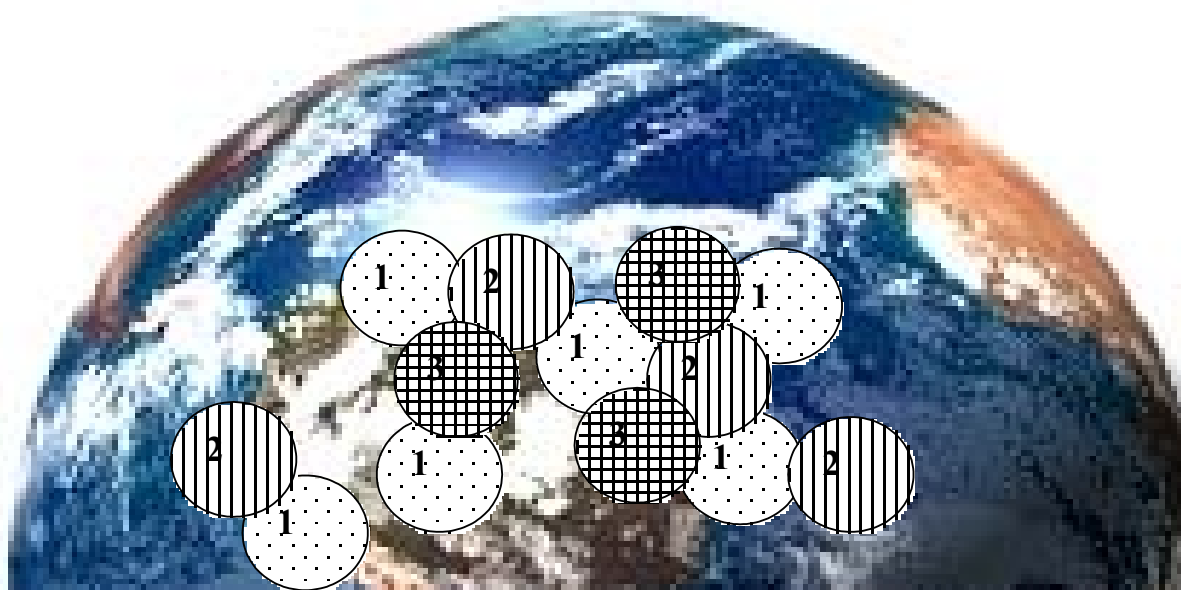
W obu przypadkach zlokalizowano pasmo o szerokości  $B$ . System wykorzystuje pasmo  $B$  o częstotliwości środkowej  $f_U$  w kierunku satelity i  $f_D$  w kierunku z satelity. Przy ponownym wykorzystaniu częstotliwości z wykorzystaniem dyskryminacji polaryzacyjnej pasmo  $B$  może być wykorzystane tylko dwukrotnie. W tym drugim przypadku, przy dyskryminacji kątowej, wiązki mogą być wykorzystywane wielokrotnie; ich wielokrotność ogranicza tylko poziom interferencji. Możliwe jest jednocześnie ponowne wykorzystanie częstotliwości z wykorzystaniem dyskryminacji polaryzacyjnej i kątowej.

#### 4.2.1. Współczynnik wielokrotnego wykorzystania częstotliwości

Współczynnik wielokrotnego wykorzystania częstotliwości  $w$  jest zdefiniowany jako liczba określająca, ile razy pasmo  $B$  jest wykorzystane.

Teoretycznie, wielo-wiązkowy satelita z  $M$  jedno-polaryzacyjnymi wiązkami, z których każda jest umiejscowiona w paśmie  $B$  i jest wykorzystywana separacja polaryzacyjna i kątowa, ma współczynnik  $w=2M$ . To oznacza, że można uzyskać taką przepływność jakby wykorzystując pojedynczą wiązkę anteny z jedną polaryzacją, ale wykorzystując pasmo  $M \times B$ .

Praktycznie, współczynnik wielokrotnego wykorzystania częstotliwości zależy od konfiguracji urządzeń obsługujących dany obszar pokrycia. Jeżeli obsługiwany obszar zawiera regiony, które są oddzielone od siebie, np. obszary miast oddzielony są terenami mało zamieszkałymi, wówczas jest możliwe wykorzystanie wielokrotne tego samego pasma we wszystkich wiązkach. Współczynnik wielokrotnego wykorzystania częstotliwości teoretycznie wówczas może mieć wartość  $M$ .



Rys. 7. Satelitarny system wielo-wiązkowy z 3 podpasмами i 13 wiązkami antenowymi

Rys. 7 przedstawia obszar pokrycia reprezentatywny dla jednorodnego rozmieszczenia populacji. Jeżeli obszar pokrycia jest ciągły, to samo pasmo częstotliwości nie może być wykorzystywane z jednej wiązki oświetlającej dany obszar do następnej. W takim przypadku, dostępne pasmo częstotliwości jest dzielone na trzy równe oddzielone podpasma i każde jest



wykorzystywane w wiązkach pokrywających obszar (1, 2 i 3) z wystarczającą separacją kątową, a równoważne pasmo, bez wykorzystywania dyskryminacji polaryzacyjnej, jest równe:

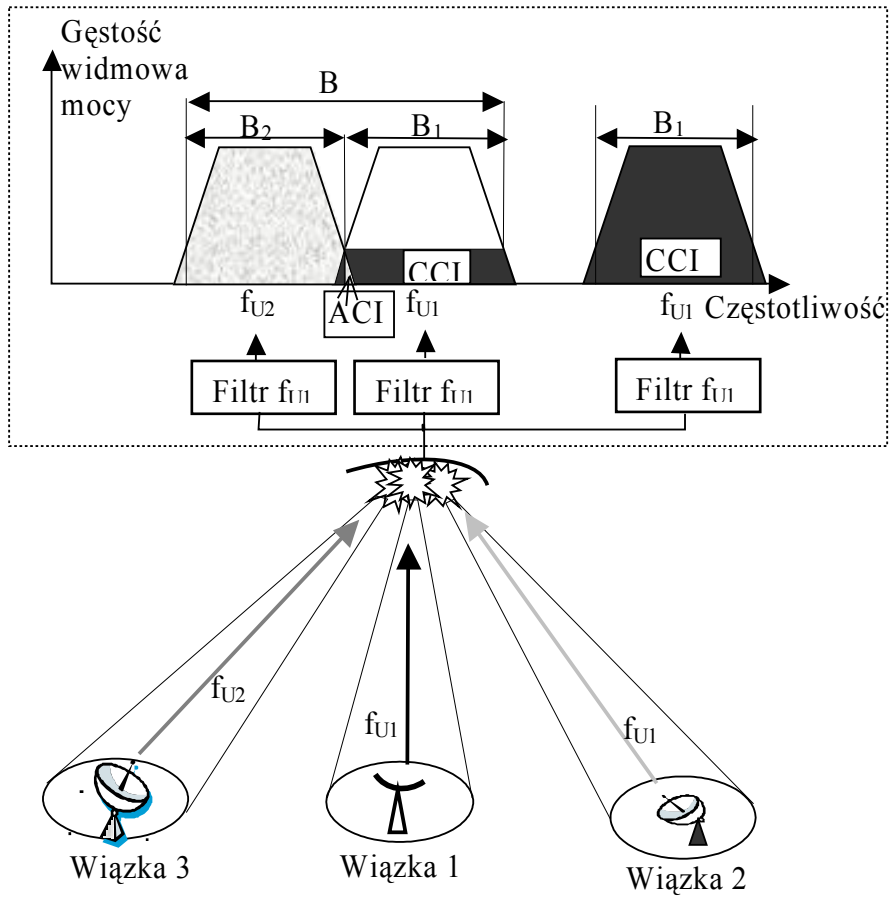
$$6x \frac{B}{3} + 4 \frac{B}{3} + 3 \frac{B}{3} = 4,3B \quad \text{dla } M = 13 \quad (26)$$

Współczynnik wielokrotnego wykorzystania częstotliwości jest wówczas 4,3 dla 13 wiązek antenowych. Zastosowanie separacji polaryzacyjnej w każdej wiązce pokrywającej dany obszar spowoduje, że wówczas liczba wiązek  $M=26$ , a współczynnik wielokrotnego wykorzystania częstotliwości będzie  $w=8,6$ .

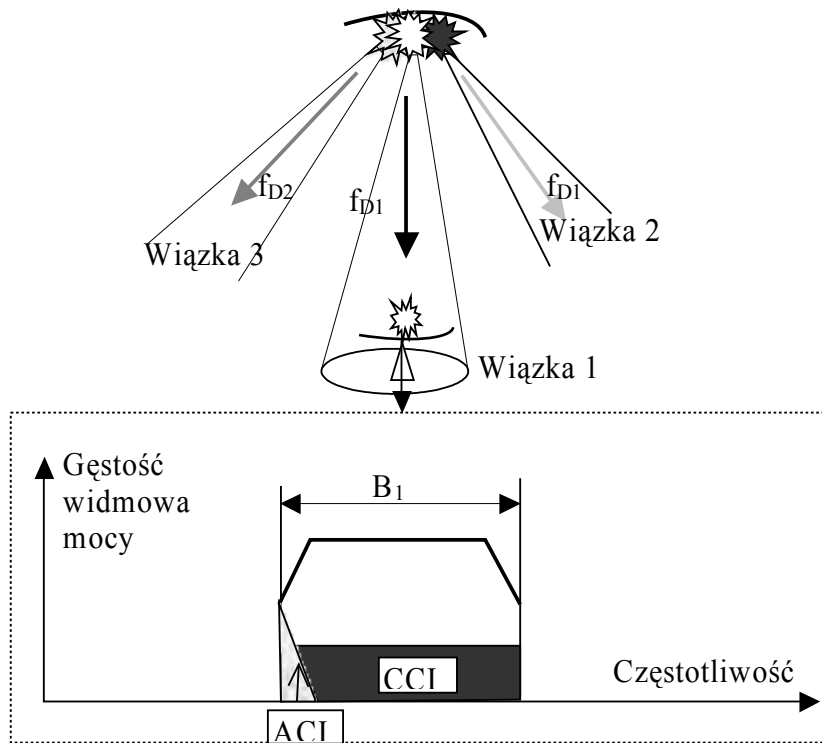
#### 4.3. Zakłócenia interferencyjne w wielo-wiązkowych systemach satelitarnych

Jedynym z najpoważniejszych źródeł zakłóceń w wielo-wiązkowych systemach satelitarnych są interferencje pomiędzy poszczególnymi wiązkami anten. Zagadnienie interferencji generowanych w wielo-wiązkowych systemach satelitarnych przedstawiono na rys. 8.

a)



b)



Rys. 8. Interferencje w satelitarnych systemach wielo-wiązkowych

Wykorzystywane pasmo częstotliwości  $B$  jest podzielone na dwa pod-pasma  $B_1$  i  $B_2$ . Wiązki 1 i 2 są w tym samym paśmie  $B_1$ , a wiązka 3 wykorzystuje pasmo  $B_2$ .

Do satelity (rys.8a), nośna o częstotliwości  $f_{U1}$  z pasma  $B_1$  transmitowana przez wiązkę 2 stacji naziemnej jest odbierana poprzez listek boczny anteny wiązki 1, który to listek boczny ma niski, ale nie zerowy zysk. Widmo tej nośnej nakłada się na nośną o tej samej częstotliwości emitowane przez wiązkę 1 stacji naziemnej, które jest odbierane w listku głównym z maksymalnym zyskiem. Nośna wiązki 2 będzie się więc pojawiała jako szum interferencyjny w widmie nośnej wiązki 1. Ten szum jest nazywany wspólnokanałowymi interferencjami CCI (*co-channel interference*). Ponadto, część mocy nośnej o częstotliwości  $f_{U2}$  emitowana przez stację naziemną wiązki 3 jest wprowadzona jako wynik niedoskonałego filtrowania filtrów wejściowego multipleksera. W tym przypadku powstają interferencje sąsiednio-kanałowe ACI (*adjacent channel interference*).

Z satelity (rys. 8b) wiązka 1 naziemnej stacji odbiera nośną o częstotliwości  $f_{D1}$ , wyemitowaną z maksymalnym zyskiem w głównym listku anteny wiązki 1.

Interferencje na łączu z satelity nakładają się na widmo tej nośnej:

- widmo sąsiednio-kanałowe łącza do satelity i szumy interferencyjne wspólnokanałowe retransmitowane przez satelitę;
- widmo nośnej o tej samej częstotliwości  $f_{D1}$  emitowane z maksymalnym zyskiem w wiązce 2 i z niskim, ale nie zerowym zyskiem w kierunku stacji wiązki 1. To uwidacznia się w dodatkowych interferencjach wspólnokanałowych.

Efekt interferencji pojawia się jako wzrost szumu cieplnego. Uwzględniając dużą ilość źródeł interferencji, gdy ich liczba wzrasta, to wzrasta również liczba względnie niskiej wartości  $(C/N_o)_I$  co ma wpływ na całkowitą wartość  $(C/N_o)_T$  łącza. Szacuje się, że typowy udział szumu interferencji, w wielu wiązkowych łączach satelitarnych stanowi 40% całego szumu.

#### 4.4. Tłumienie wolnej przestrzeni w liniach satelitarnych

Satelita geostacjonarny GEO (*Geosynchronous Earth Orbit*) znajduje się najbliżej Ziemi, dla punktu podsatelitarnego – w odległości 35 803 km. Dla innych punktów odbiorczych ta odległość jest większa i można przyjąć, że dla północnych krańców Europy wynosi 40000 km. Wówczas tłumienie na trasie o tej długości i częstotliwości 12 GHz (długość fali  $\lambda = 25$  mm) – z satelity do Ziemi (*downlinks*) – wynosi 206,07 dB, natomiast dla kierunku z Ziemi do satelity (*uplinks*) – jest wykorzystywana częstotliwość 14 GHz (długość fali  $\lambda = 21,4$  mm) i wówczas tłumienie wynosi 207,4 dB.

Wykonując takie same obliczenia dla satelity LEO (*Low Earth Orbit*), np. systemu IRIDIUM, tzn. dla trasy o długości 750 km i częstotliwości 1620 MHz (długość fali  $\lambda = 185,0$  mm, systemy LEO pracują na częstotliwościach poniżej 3 GHz) otrzymano wartość tłumienia 156,64 dB. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Tłumienie wolnej przestrzeni dla tras satelitarnych GEO i LEO

Satelita	GEO	LEO
Długość trasy [km]	40 000	750
Tłumienie [dB] <i>downlinks</i>	206,07	156,64
Tłumienie [dB] <i>uplinks</i>	207,4	156,64

A więc tłumienie swobodnej przestrzeni w łączy Ziemia – satelita jest mniejsze ok. 50 dB dla niskoorbitowego satelity. Oznacza to, że dla pojedynczego skoku, np. dla rozmowy telefonicznej przez satelitę, tj. dla trasy Ziemia–satelita–Ziemia i z powrotem Ziemia–satelita–Ziemia – tłumienie jest mniejsze o 200 dB dla satelity LEO w porównaniu z satelitą GEO. W tabeli 2 przedstawiono, jak się zmienia tłumienie wolnej przestrzeni dla satelitów GEO pracujących w różnych pasmach częstotliwości X, Ku, Ka oraz V, dla wybranych częstotliwości.

Tabela 2. Tłumienie wolnej przestrzeni dla tras satelitarnych GEO w różnych pasmach częstotliwości, dla wybranych częstotliwości. Długość trasy 40000 km.

Pasma		C	X	Ku	K	Ka		V		
Częstotliwość	[GHz]	6	11	14	20	30	40	50	60	75
Tłumienie	[dB]	200,1	205,3	207,4	210,5	214	216,5	218,5	220	222

#### 4.5. Opóźnienie czasowe w łącach satelitarnych

Sygnal radiowy rozchodzi się z prędkością światła. Oznacza to, że powstaje opóźnienie pomiędzy sygnałem wysyłanym i odbieranym. Czas opóźnienia sygnału  $t$  pomiędzy satelitą i stacją naziemną wynosi:

$$t = \frac{S}{c} \quad (27)$$

gdzie:  $S$  – długość trasy [km];

$c$  – prędkość światła 299,792 km/s.

Odległość satelity geostacjonarnego od Ziemi wynosi od 35 803 km do 41 679 km. Ta pierwsza wartość odnosi się do przypadku, gdy stacja naziemna jest w punkcie podsatelitarnym, natomiast druga – do przypadku, gdy stacja naziemna „widzi” satelitę pod kątem  $0^\circ$  elewacji, tj. na horyzoncie. To odpowiada czasowi opóźnienia pomiędzy satelitą i Ziemią od 0,12 s do 0,14 s. Zwykle łącze satelitarne zawiera skok Ziemia–satelita–Ziemia od jednego odbiorcy do drugiego i z powrotem przez inne łącze Ziemia–satelita–Ziemia. Jest to nazwane pojedynczym skokiem. To jednak oznacza w konsekwencji cztery czasy opóźnienia. Całkowity czas opóźnienia zawiera się pomiędzy 0,48 s i 0,56 s. Czas opóźnienia może być problemem, kiedy rozmawiający nawzajem próbują sobie przerwać rozmowę. Słumienie echa wymaga specjalnej aparatury, ponieważ lokalne telefony wykorzystują tylko jedną parę przewodów do odbioru i nadawania.

W tabeli 2 pokazano kilka możliwych tras satelitarnych – dla transmisji bez echa (transmisja tylko do odbiorcy, np. telewizja rozsiewcza) oraz transmisji z pojedynczym i podwójnym skokiem, a także w łączności wykorzystującej łącze satelitarne i naziemne.

Gdy natomiast odległość satelity niskoorbitowego od Ziemi wynosi np. 750 km, wówczas czas opóźnienia jest równy tylko 0,0025 s. A więc dla pojedynczego skoku opóźnienie jest rzędu 0,01 s. Zatem zaletą systemów LEO jest również szybsze działanie, co czyni praktycznym i atrakcyjnym interakcyjny globalny dostęp do sieci i prowadzenie wideotelekonferencji.

Podstawową wadą systemów niskoorbitowych LEO jest to, że w czasie ok. 1 godziny satelity przemierzają niebo od horyzontu do horyzontu, a więc nie „wiszą” nieruchomo nad Ziemią. Jeśli łączność ma być zapewniona, użytkownik stale musi widzieć satelitę. Tłumaczy to,

dlaczego systemy LEO, w celu zapewnienia łączności, muszą korzystać z tak wielu satelitów – ok. 60. Każdy z satelitów „widzi” tylko niewielką powierzchnię (rys. 2). To tak, jakby żyrafę fotografować z odległości 1 m, a nie 40 m. A więc systemy LEO do pokrycia całej kuli ziemskiej wymagają 20 razy więcej satelitów niż system geostacjonarny; przykładowo system IRIDIUM wykorzystuje 66 satelity.

Pomimo tych zalet, systemy komercyjne budowy sieci transmisji danych opartych na satelitach LEO zakończyło się raczej niepowodzeniem.

Wynikło to z dwóch podstawowych przyczyn:

- pojedynczy satelita LEO pozostaje w zasięgu danego punktu na powierzchni Ziemi nie dłużej niż przez 30 min. Konieczne są częste przełączenia - przekierowania transmisji radiowej odbywającej się przez jednego satelitę na innego;
- duża prędkość satelity względem Ziemi rodzi problem proporcjonalnie dużych dopplerowskich zmian częstotliwości.

## 5. Rodzaje anten satelitów

Anteny satelitów telekomunikacyjnych są to zazwyczaj układy antenowe złożone z szeregu elementów promieniujących o kształtowanej charakterystyce promieniowania. W zależności od rozmiaru obsługiwanego obszaru rozróżnia się anteny operujące wiązką:

- globalną;
- półkulową;
- strefową;
- punktową;
- wiele punktową.

Satelita geostacjonarny przy pomocy jednej anteny globalnej może obsługiwać 45% powierzchni kuli ziemskiej. Parametry takiej anteny są: szerokość wiązki :  $2\theta_{3dB} = 17,4^\circ$ , zysk  $G_{max} = 18,3$  dBi.

Anteny punktowe mają szerokość wiązki  $2\theta_{3dB} \leq 1^\circ$ .

Ale również istotnym parametrem, głównie ze względu na interferencje, jest separacja listków bocznych anteny. Wzór (26) stał się praktycznie wymaganym parametrem określającym maksymalny dopuszczalny poziom listków bocznych  $G(\Theta)$  [dBW] w paśmie C:

$$G(\Theta) = 29 - 25 \log \Theta \quad (26)$$

gdzie:  $\Theta$  - kąt między osią wiązki głównej anteny a rozpatrywanym kierunkiem [ $^\circ$ ].

Zależność (26) została przyjęta przez Federalną Komisję Łączności FCC (*Federal Communications Commission*) w USA i stała się światowym standardem dla częstotliwości koordynacyjnej pomiędzy sieciami satelitarnymi GEO. Zależność (26) została przyjęta również przez Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny ITU (*International Telecommunication Union*), ale w zmienionej nieco formie, gdyż dopuszcza o 3 dB wyższy poziom listków bocznych. I wówczas ta zależność ma postać:

$$G(\Theta) = 32 - 25 \log \Theta \quad (27)$$

Natomiast w zakresie częstotliwości 29,5 GHz ÷ 30 GHz poziom listków bocznych nie może przekroczyć następujących poziomów:

a) dla fali o polaryzacji pożądaney			
19-25logφ	dBW	dla	$1,8^{\circ} \leq \varphi \leq 7^{\circ}$
-2	dBW	dla	$7^{\circ} < \varphi \leq 9,2^{\circ}$
22-25logφ	dBW	dla	$9,2^{\circ} < \varphi \leq 48^{\circ}$
-10	dBW	dla	$\varphi > 48^{\circ}$
b) dla fali o polaryzacji ortogonalnej			
9-25logφ	dBW	dla	$1,8^{\circ} \leq \varphi \leq 7^{\circ}$
-12	dBW	dla	$7^{\circ} < \varphi \leq 9,2^{\circ}$

## 6. Konstrukcja dotychczas stosowanych anten satelitów

### 6.1. Anteny pierwszych satelitów telekomunikacyjnych

Anteny pierwszych satelitów telekomunikacyjnych miały stosunkowo proste rozwiązania konstrukcyjne.

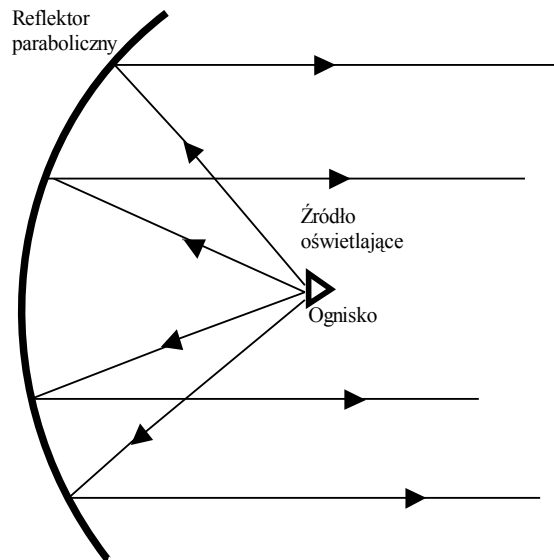
#### 6.1.1. Antena satelity „Telstar”

W pierwszym aktywnym satelicie telekomunikacyjnym „Telstar”, pracującym w paśmie 6/4 GHz, antena składała się z wielu elementów promieniujących w postaci otwartych końców falowodów, rozmieszczonych na dwóch pierścieniach w płaszczyźnie prostopadłej do osi symetrii satelity. Obie anteny miały prawie izotropowe charakterystyki promieniowania a tym ich zyski energetyczne były bliskie 0 dB. Takie słabe parametry anten wynikały z braku dostatecznej stabilizacji położenia satelity na orbicie.

W miarę doskonalenia metod stabilizacji położenia satelity na orbicie możliwe było wprowadzenie anten kierunkowych, dzięki czemu poprawiono bilans energetyczny łącza satelitarnego.

#### 6.1.2. Symetryczne anteny paraboliczne

Antena paraboliczna z promiennikiem umieszczonym w ognisku reflektora (rys. 9) – konstrukcja symetryczna – jest bardzo prosta i dlatego była powszechnie wykorzystywana w technice satelitarnej.

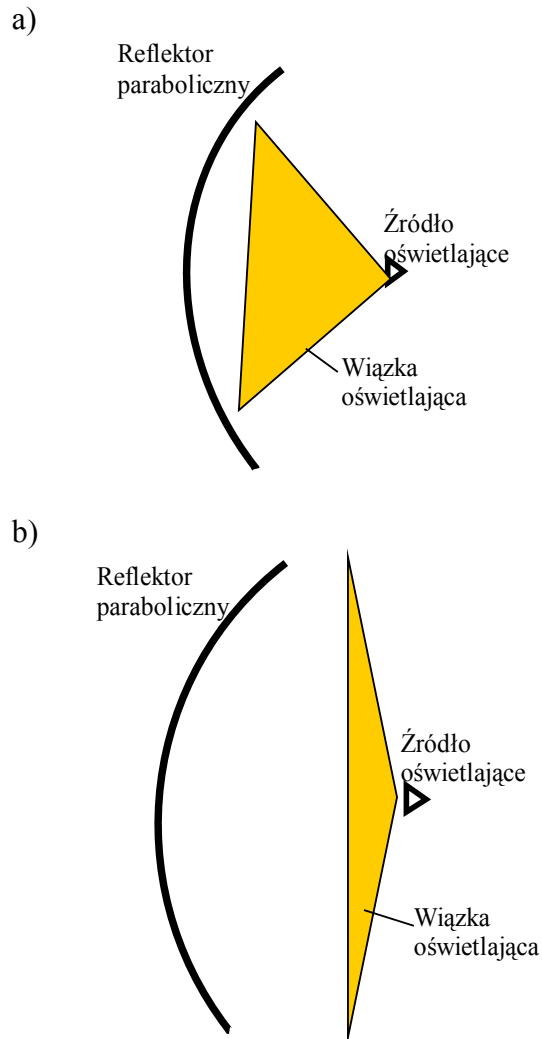


Rys. 9 Geometria symetrycznego reflektora parabolicznego

Dokładność wykonania powierzchni reflektora ma duży wpływ na jakość anteny, gdyż powinna być ona 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, gdyż ich powierzchnia jest mniejsza od 1 % powierzchni reflektora.

Kąt oświetlenia anteny jest również bardzo istotny. Jeżeli rozwartość kąta oświetlenia jest zbyt mała (rys. 10a), to wykorzystywana jest tylko część powierzchni reflektora. A więc antena ma takie parametry elektryczne jakby była o znacznie mniejszej średnicy, niż jest faktycznie. Nadmierna szerokość wiązki promiennika powoduje „przelewanie się” energii poza reflektor (rys. 10b), 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 pomiędzy maksymalnym wykorzystaniem powierzchni reflektora a poziomem listków bocznych, a uzyskuje się go przez odpowiedni dobór kształtu reflektora i charakterystyki kierunkowości rożka.



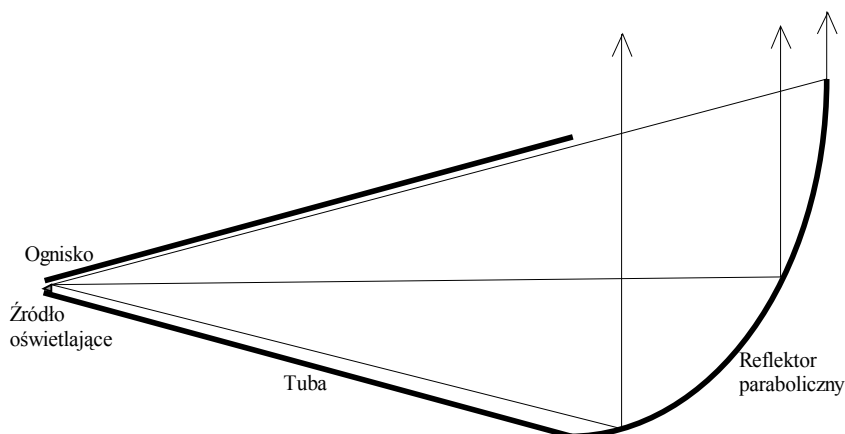
Rys. 10. Niewłaściwa rozwartość kąta oświetlenia reflektora: a) zbyt mała; b) zbyt duża

Zwykle jako rożek używa się otwarty koniec falowodu kołowego. Szerokość charakterystyki kierunkowej falowodu o średnicy równej długości promieniowanej fali wynosi rzędu  $60^\circ$ . W praktyce zwykle uzyskuje się współczynnik wykorzystania apertury 0,65 przy poziomie listków bocznych równym  $-20$  dB.

### 6.1.3. Anteny tubowo-paraboliczne

Podstawowa wada anten parabolicznych centralnie oświetlanych, tj. efekt blokowania i związane z tym nienajlepsze parametry szumowe, została wyeliminowana przez zastosowanie anten tubowo-parabolicznych.





Rys. 11. Geometria anteny tubowo-parabolicznej

We wstępnej fazie systemów satelitarnych stosowano również anteny tubowo-paraboliczne złożone z reflektora w postaci wycinka paraboloidy niezawierającego wierzchołka i tuby, za pomocą której jest oświetlany reflektor (rys. 11). Stosowano dwa rodzaje anten: z tubą w kształcie stożka obrotowego lub piramidalną. Anteny te miały bardzo korzystne parametry szumowe – ok. 1,5 K przy zenitalnym ustawieniu osi głównej wiązki – gdyż źródło oświetlające jest skutecznie ekranowane od wpływu Ziemi, a także nie ma elementów rozpraszających energię w niepożądanych kierunkach.

Jedną z podstawowych wad anten tubowo-parabolicznych jest ich potężna konstrukcja mechaniczna. Stąd całkowicie zostały one wyeliminowane przez anteny dwurefleksyjne, a szczególnie przez anteny dwurefleksyjne niesymetryczne.

#### 6.1.4. Anteny z plastycznym reflektorem siatkowym

Antena taka umieszczana jest na satelicie o bardzo wydłużonej orbicie eliptycznej. Aby zapewnić te same warunki odbioru na powierzchni Ziemi trzeba w czasie lotu satelity zmieniać charakterystykę i zysk anteny, co można uzyskać przez mechaniczne kształtowanie powierzchni reflektora w czasie lotu satelity.

### 6.2. Współczesne mikrofalowe anteny satelitarne

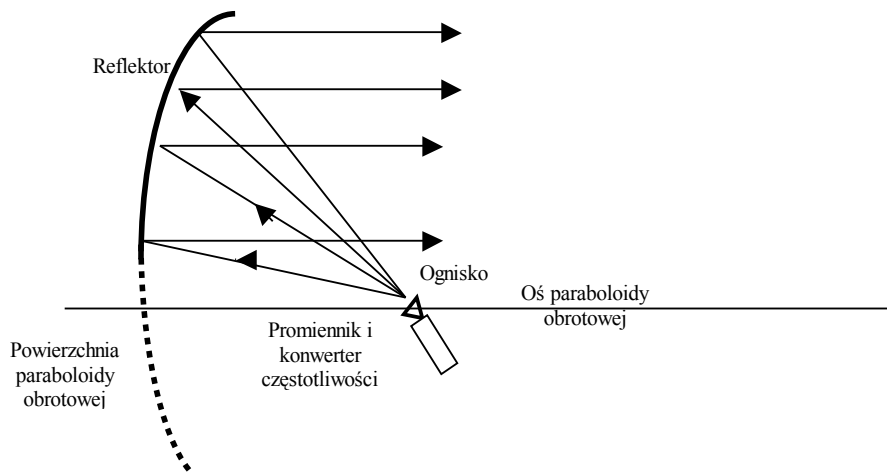
W technice satelitarnej stosuje się powszechnie dwa rodzaje anten parabolicznych:

- podświetlane (*offset*);
- dwurefleksyjne (Cassegrain lub Gregory).

#### 6.2.1. Paraboliczne anteny podświetlone

Nawet poprawnie wykonana antena symetryczna ma pewne wady, m.in. efekt blokowania polegający na tym, że promiennik zasłania część reflektora, a tym samym zmniejsza

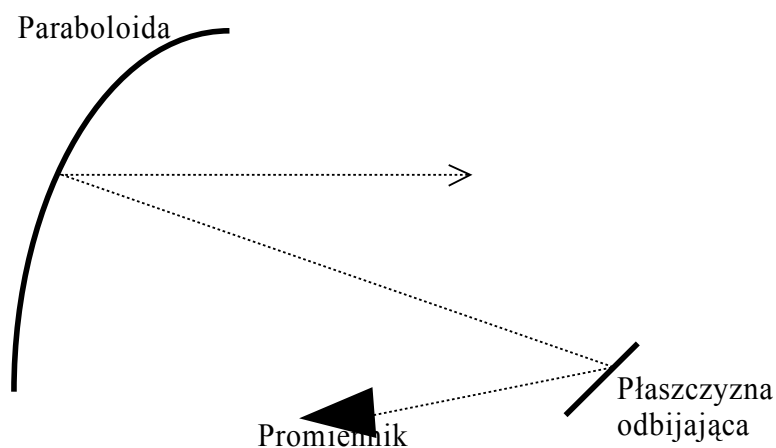
powierzchnie skutecznej anteny a więc i jej zysk. Tę wadę eliminuje antena podświetlona (rys. 12).



Rys. 12. Geometria parabolicznej anteny podświetlonej

Kształt reflektora takiej anteny jest fragmentem powierzchni parabolicznej niezawierającej jednak wierzchołka. Do tego typu anten, mających długą ogniskową, stosuje się promiennik o znacznie mniejszej szerokości wiązki, niż dla anten symetrycznych.

Pojedynczy offsetowy reflektor jest anteną stosunkowo prostą mechanicznie. Łatwą do montażu, ale wymaga dużej odległości pomiędzy punktem zogniskowania fal a punktem środkowym reflektora. Tej wady nie posiada pojedynczy offsetowy reflektor z płaszczyzną odbijającą (rys. 13).



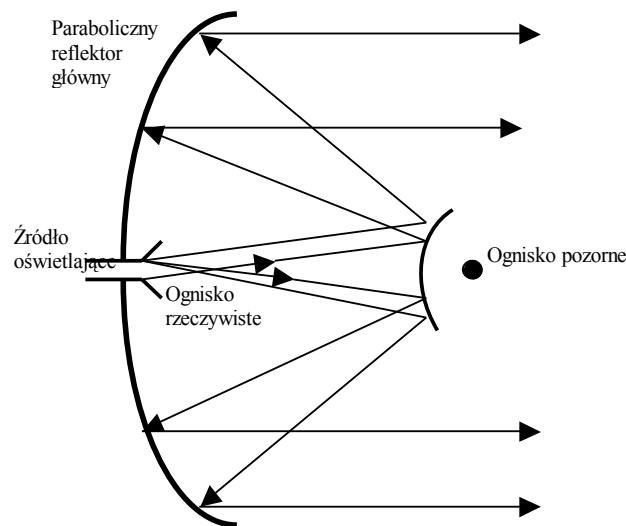
Rys. 13. Geometria pojedynczego offsetowego reflektora z płaszczyzną odbijającą

Jest to antena ekwiwalentna do pojedynczego offsetowego reflektora. Antena taka ma już dużo mniejsze gabaryty, ale jeszcze wystarczająco dobre parametry.

## 6.2.2. Paraboliczne anteny dwurefleksorowe

Natomiast anteny dwurefleksorowe eliminują zjawisko „przelewania się” energii przez reflektor pomocniczy, gdyż część energii omijająca reflektor jest kierowana w stronę nieba, którego temperatura szumowa<sup>1</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.

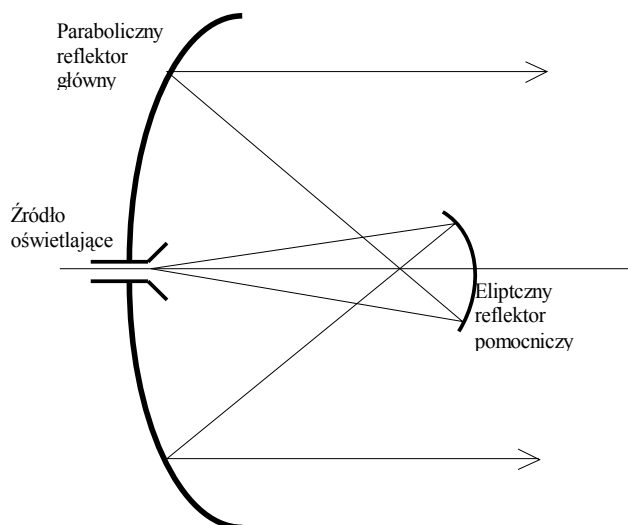
Istnieją dwie podstawowe odmiany układów dwurefleksorowych: Cassegraina i gregoriana. Układ Cassegraina (rys. 14) składa się z głównego reflektora parabolicznego i pomocniczego reflektora hiperbolicznego. Reflektor pomocniczy jest położony między ogniskiem i wierzchołkiem reflektora głównego w taki sposób, 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.



Rys. 14. Geometria anteny Cassegraina

<sup>1</sup> Temperatura szumowa nieba wynosi od kilku do kilkudziesięciu kelwinów. Pojęcie temperatury szumowej wyjaśniono szczegółowo w [7].

W układzie gregoriana rolę reflektora głównego pełni również wycinek paraboloidy zawierający wierzchołek, a reflektor pomocniczy ma kształt eliptyczny (rys. 15).



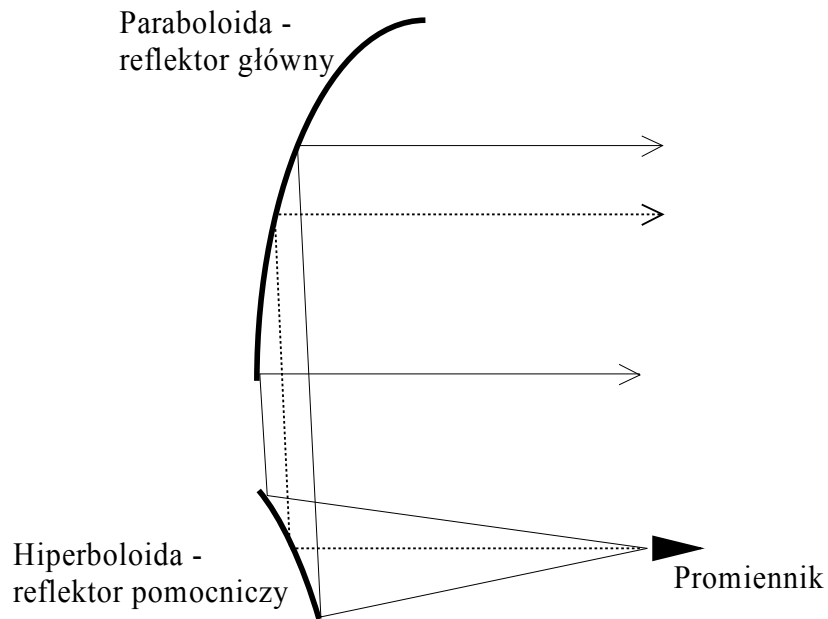
Rys. 15. Geometria anteny gregoriana

Ponieważ obydwa ogniska reflektora leżą z jednej jego strony – reflektor pomocniczy musi być umieszczony w odległości większej niż ogniskowa reflektora głównego. Wskutek tego system gregoriana jest mniej spójny od układu Cassegraina i z tego powodu również rzadziej stosowany.

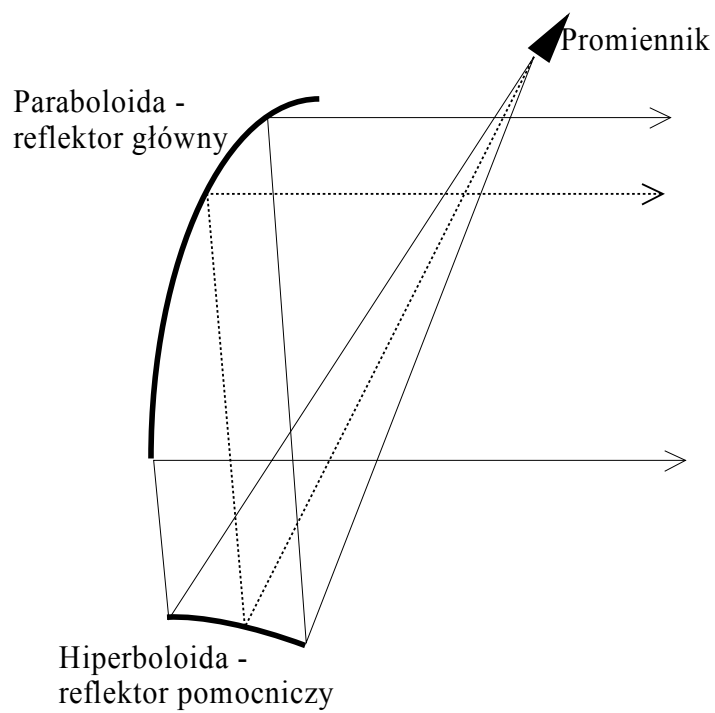
#### 6.2.2.1. Anteny Cassegraina ze zmodyfikowanym zasilaniem

Dużo lepsze parametry mają anteny Cassegraina zasilane z góry (rys. 16) lub z boku (rys. 17), dzięki wysokiemu współczynnikowi wykorzystania powierzchni apertury.

Antena Cassegraina zasilana z góry ma duży stosunek ogniskowej  $F$  do średnicy  $D$ , oraz dobrą aperturę kątową, tzn. kąt bryłowy, pod jakim widać aperturę z ogniska reflektora. Jednak antena Cassegraina zasilana z boku ma podobnie dobre parametry, a mechanicznie jest ona stosunkowo niewielkich rozmiarów (bardziej „spakowana”).



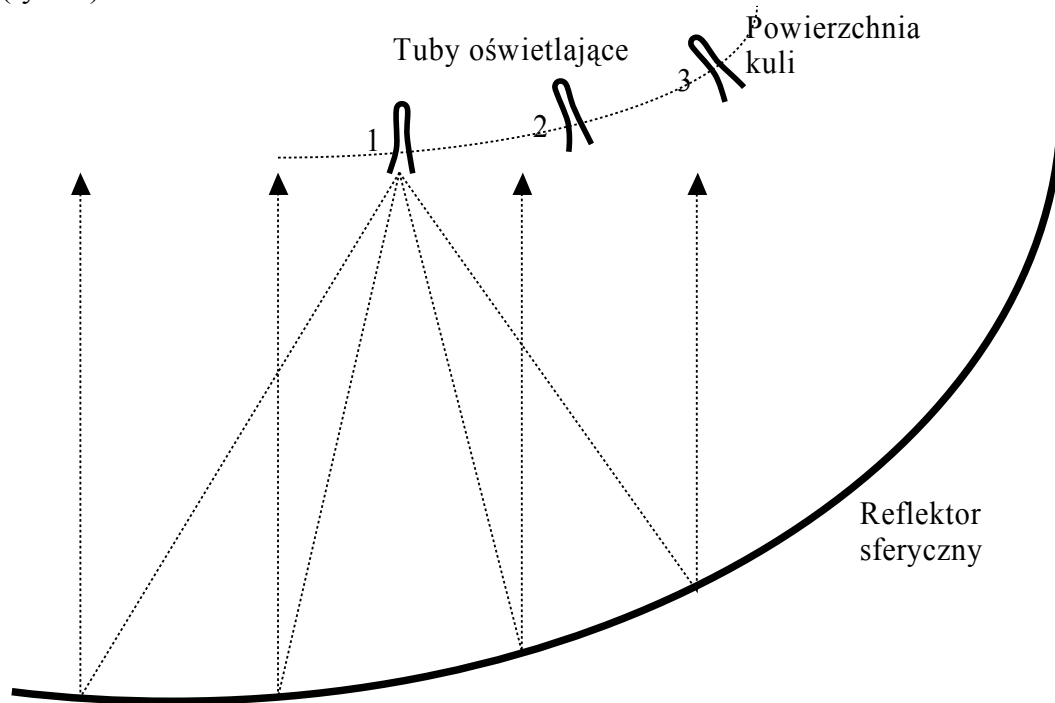
Rys. 16. Geometria anteny Cassegraina zasilanej z góry



Rys. 17. Geometria anteny Cassegraina zasilanej z boku

### 6.2.3. Sferyczne anteny

Sferyczne anteny zaprojektowano tworząc wiele ognisk zlokalizowanych z przodu środka reflektora, po jednym dla każdego z dostępnych satelitów. Krzywizna reflektora jest taka, że jeżeli byłaby rozciągnięta dostatecznie na zewnątrz obu osi, otrzymuje się wówczas kule (rys 18).



Rys. 18. Geometria sferycznej anteny

Płaszczyzna czoła fali od satelity może być przedstawiona jako szereg równoległych promieni. Te promienie są równoległe do symetrycznej osi paraboli i są one odbijane do ogniska  $F$ . Ta właściwość paraboloidy jest wykorzystywana w antenach mikrofalowych. Sferyczna czasza może być przedstawiona jako wycinek kuli, ze środkiem  $C$ , gdzie  $C$  jest podwójną odległością od sferycznego reflektora, tak jak  $F$  powinna być ogniskiem parabolicznego reflektora. Jednakże ogniskowanie może być najlepiej opisane w pewnej strefie. Jeżeli ta strefa ogniskowania jest dość mała w porównaniu z długością fali, sygnały będą odbierane, sferyczny reflektor pozostaje użyteczną anteną, ale z niewiele mniejszym zyskiem w porównaniu do ogniska.

Jeżeli płaszczyzna czoła fali przesuwa się około  $20^\circ$  od osi, wiązka główna sferycznej anteny może być sterowana poprzez zmianę położenia tuby oświetlającej lub umieszczenia drugiej tuby oświetlającej w nowym ognisku. Reflektor właściwie wykorzystuje nową oś symetrii, na której jest to ognisko. Antena sferyczna jest wycinkiem kuli, która ma dowolną ilość symetrii, z których żadna nie ma supremacji nad inną. Każda oś reprezentuje promień kuli i dlatego ma ten sam związek z reflektorem, tak jak dowolna inna oś.

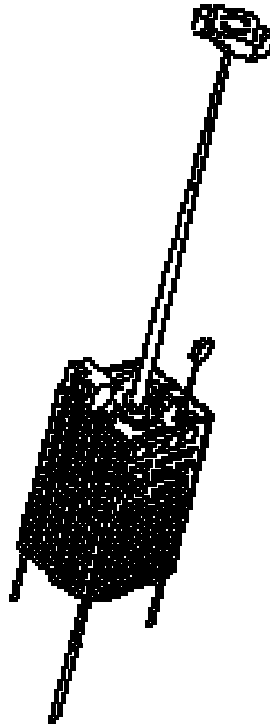
Projektant anteny może uzyskać dobrą efektywność ogniskowania przez oświetlenie wycinka reflektora wokół danej osi. W rezultacie antena osiągnie zysk równy zyskowi paraboloidy o średnicy, która jest proporcjonalna do powierzchni oświetlanej kuli. Dokładniejsze umieszczenie tuby oświetlającej w osi, powoduje lepsze ogniskowanie promieni a tym samym większą efektywność anteny.

Większość sferycznych anten pracuje poprawnie przy odchyleniu od osi do  $\pm 20^\circ$ . Jednak

pewien efekt dezogniskowania powstaje, powodując zmniejszenie zysku.

## 7. Anteny satelitów LEO

W satelitach LEO wykorzystuje się anteny prętowe. Pracują one w paśmie L, tj. 1 GHz ÷ 2 GHz. Przykładowo - antena „contrawound” spiralna toroidalna (rys. 19), łatwo może być zintegrowana z satelitą, dzięki jej kołowej geometrii. Była ona wystrzelona przez rakietę ARIANE, lot V-59 dla systemu satelitarnego HelthNET.



Rys. 19. Antena „contrawound” spiralna toroidalna

Antena systemu THURAYA wytwarza 250 wąskich wiązek, a każda z nich na powierzchni Ziemi oświetla komórkę o średnicy 450 km. Szyk 128 dipoli zaopatrzony w płaski siatkowy reflektor o eliptycznym kształcie, o wymiarach 12,25x16 m. Formowanie i ułożenie wiązek jest kontrolowane programowo (przy użyciu procesora)

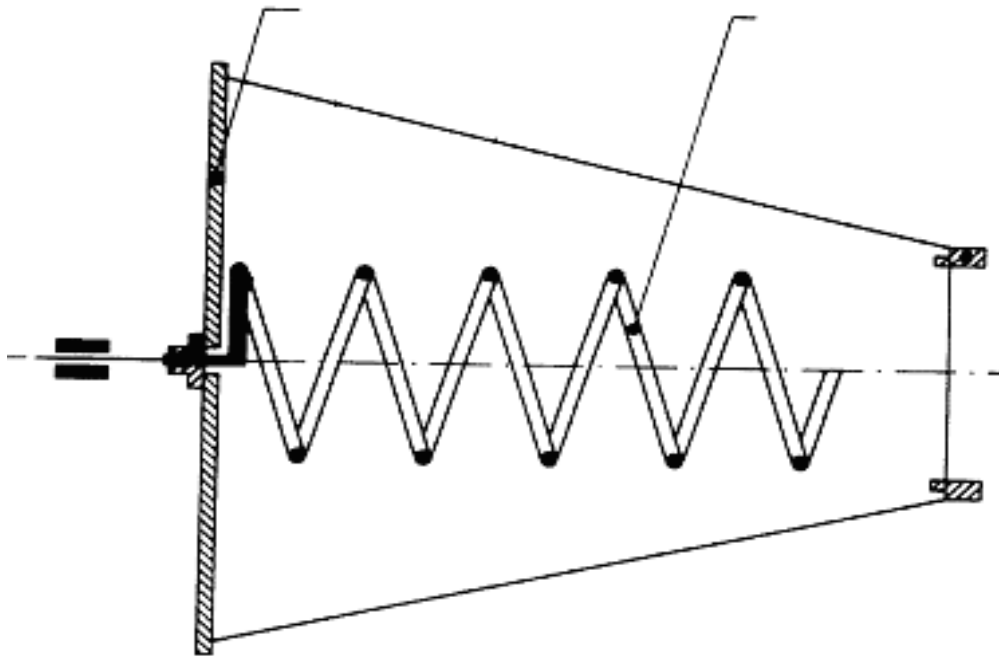
Antena spiralna (rys. 20) jest szczególnie przydatna w systemach niskoorbitowych. Pozwala na uzyskanie szerokiego pasma przy względnie małych gabarytach.

Wytwarza ona falę elektromagnetyczną o polaryzacji eliptycznej. Współczynnik eliptyczności  $m$  dla fali wytwarzanej przez antenę spiralną wyraża się zależnością:

$$m = \frac{2M}{2M - 1} \quad (28)$$

gdzie:  $M$  – liczba zwojów spirali.

Wartość współczynnika  $m$  dąży do 1, wraz ze wzrostem liczby zwojów spirali  $M$ .



Rys. 20. Antena spiralna

## 8. Tendencje zmian w konstrukcji anten satelitarnych

Stosując wielo-wiązkowe systemy satelitarne, uzyskuje się zwiększenie wartości  $G/T$  i EIRP, a więc możliwe jest zmniejszenie gabarytów stacji naziemnych; prowadzi to do zmniejszenia kosztów segmentu naziemnego systemu satelitarnego.

Stosując wielo-wiązkowe systemy można wielokrotnie wykorzystywać częstotliwości, a tym samym uzyskać znacznie większą przepływność systemu, przy zachowaniu przydzielonego pasma częstotliwości.

Kierunki rozwoju anten satelitarnych są następujące:

- W dalszym ciągu są popularne anteny dwurefleksyjne typu Cassegraina lub Gregory a także zmodyfikowane anteny, szczególnie typu Cassegraina;
- Systemy antenowe pracują na coraz to wyższych zakresach częstotliwości, tj. pasmo Ka (26,5 ÷ 40 GHz) oraz już zaplanowane w paśmie V (50 ÷ 75 GHz); tym samym rozmiary geometryczne tych anten są coraz mniejsze;
- Są to anteny o wiązce punktowej, których szerokość wiązki wynosi poniżej  $1^\circ$ ;
- Systemy inteligentnych satelitów mają dynamiczne łącza z przetwarzaniem sygnałów i komutacją wiązek na pokładzie satelity;
- Każdy nowoczesny system satelitarny posiada kilkadziesiąt wiązek antenowych.

Są to nowe kierunki zmian rozwoju systemów satelitarnych, stąd wynika brak jeszcze stosownych dokumentów prawnych, opisujących parametry urządzeń, w tym i anten, w nich stosowanych.



## Bibliografia

- [1] Bogucki J.: *Trasy nachylone w zakresie fal milimetrych*. Telekomunikacja i Techniki Informacyjne, 3-4, 2003
- [2] Bogucki J.: *Satelity telekomunikacyjne*. Elektronizacja, 1-2, 2002
- [3] Bogucki J.: *Anteny łączności satelitarnej*. Bezpieczeństwo pracy, 06, 2001
- [4] Bogucki J., Wielowieyska E.: *Czynniki wpływające na bilans energetyczny łącza satelitarnego w zakresie fal milimetrych*. Telekomunikacja i Techniki Informacyjne, 1-2'2005
- [5] Bogucki J., Wielowieyska E.: *Elewacja a tłumienie propagacyjne na trasie nachylonej milimetrych zakresie fal milimetrych*. XI Sympozjum Nauk Radiowych URSI 2005, 7-8 kwietnia 2005, Poznań
- [6] Bogucki J., Wielowieyska E.: *Wpływ warunków propagacji na niezawodność pracy tras nachylonych w zakresie fal milimetrych*. Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Warszawa
- [7] Bogucki J.: *Szum mikrofalowych urządzeń odbiorczych telewizji satelitarnej*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 6, 1998
- [8] Bostian Ch., W., Chan W., W., S., Hager E., P., Helm N., R., Mahle C., E., Miller E., F., Pelton J., N: *Review Assessment of satellite communications technologies*. Dostępne: [http://www.wtec.org/loyola/satcom/c2\\_s1a.htm#f2\\_1](http://www.wtec.org/loyola/satcom/c2_s1a.htm#f2_1)
- [9] Castanet L., Bolea-Alamañac A., Bousquet M.: *Interference and fade mitigation techniques for Ka and Q/V band satellite communication systems*. Dostępne: <http://www.cost280.rl.ac.uk/documents/WS2%20Proceedings/documents/pm-5-002.pdf>
- [10] Chandler Ch., W., Hoey L., A., Peebles L., A., Em M.: *Advanced Antenna Technology for a Broadband Ka-Band Communication Satellite*. Technology Review Journal • Spring/Summer 2002
- [11] Elbert B., E.: *The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook*. Artech House, Boston, 2001
- [12] Hazdra P., Polivka M., Sokol V.: *Microwave Antennas and Circuits Modeling Using Electromagnetic Field Simulator*. Radioengineering, 4, 2005
- [13] Kraus J., D., Marhefka R., J.: *Antennas for all applications*. McGraw-Hill, New York, 2002
- [14] Maral G.: *VSAT Networks*. John Wiley&Sons, Chichester, 2003
- [15] Maral G., Bousquet M.: *Satellite Communications Systems*. Wiley, Chichester, 2002
- [16] Rosłonec S.: *Układy antenowe monoimpulsowych urządzeń radiolokacyjnych*. Prace Przemysłowego Instytutu Telekomunikacji, z. 135, 2005
- [17] Projekt normy ETSI EN 301 459 V1.3.3: *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Harmonized EN for Satellite Interactive Terminals (SIT) and Satellite User Terminals (SUT) transmitting towards satellites in geostationary orbit in the 29,5 to 30,0 GHz frequency bands covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive*. 11'2006
- [18] Rosłonec S.: *Podstawy techniki antenowej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa. 2006
- [19] Sheriff R., E., Hu F., Y.: *Mobile Satellite Communications Networks*. John Wiley&Sons, Chichester, 2001
- [20] Syed J., U., I., Oliver A., D.: *Variable bandwidth dual reflector antenna*. IX International Conference on Antennas and Propagation. Eindhoven, Holandia, 1995

- [21] Zalecenie ITU-R 732. *Method for statistical processing of earth-station antenna side-lobe peaks*. 1992
- [22] Zhou H.: *A mesh zooming reflector antenna*. IX International Conference on Antennas and Propagation. Eindhoven, Holanda, 1995
- [23] Zhou G., Kafatos M.: *Future intelligent earth observing satellites*. Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS Conference Proceedings, 2002