



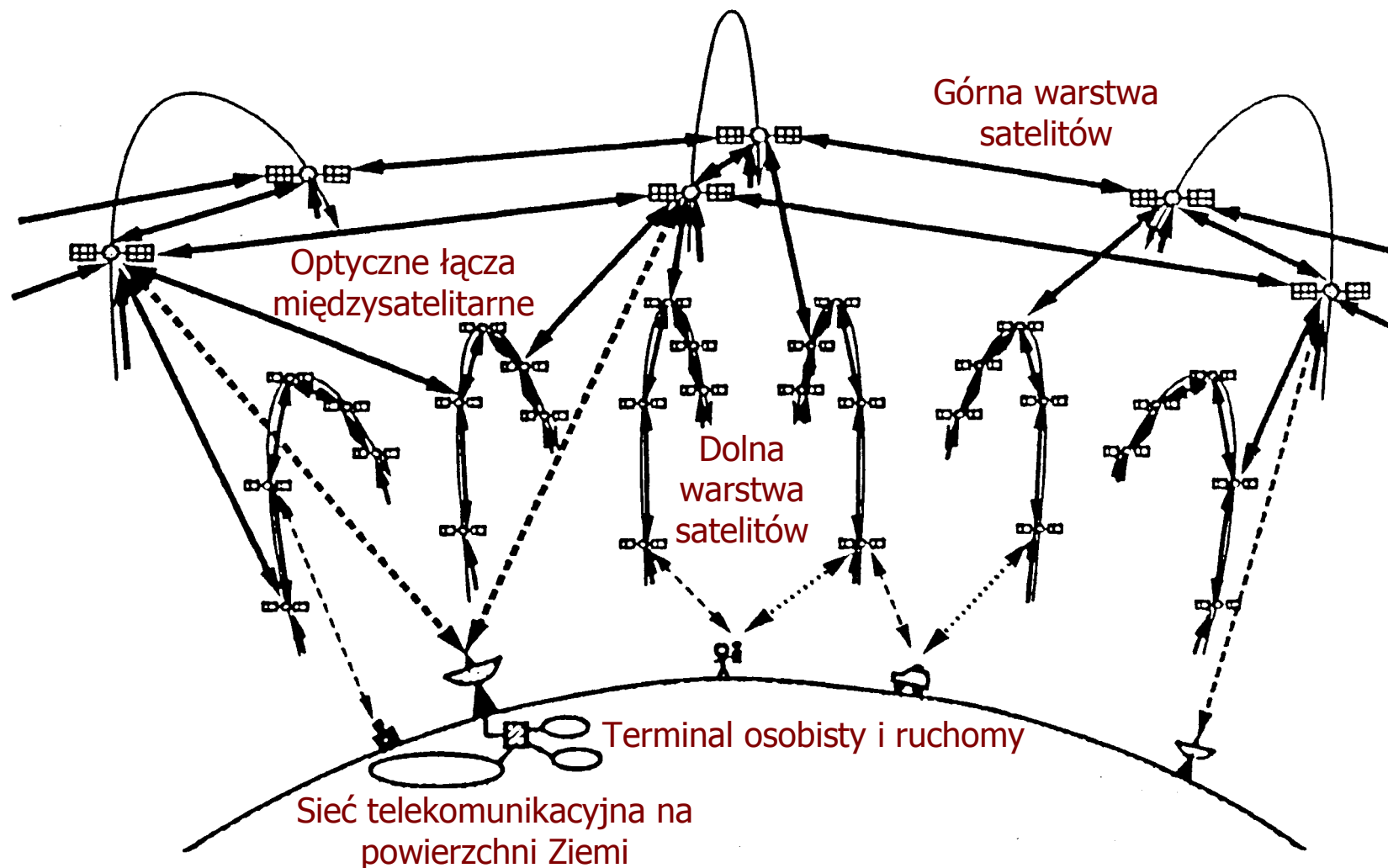
TELEKOMUNIKACJA OPTOFALOWA

12. Telekomunikacja optyczna w wolnej przestrzeni

Spis treści:

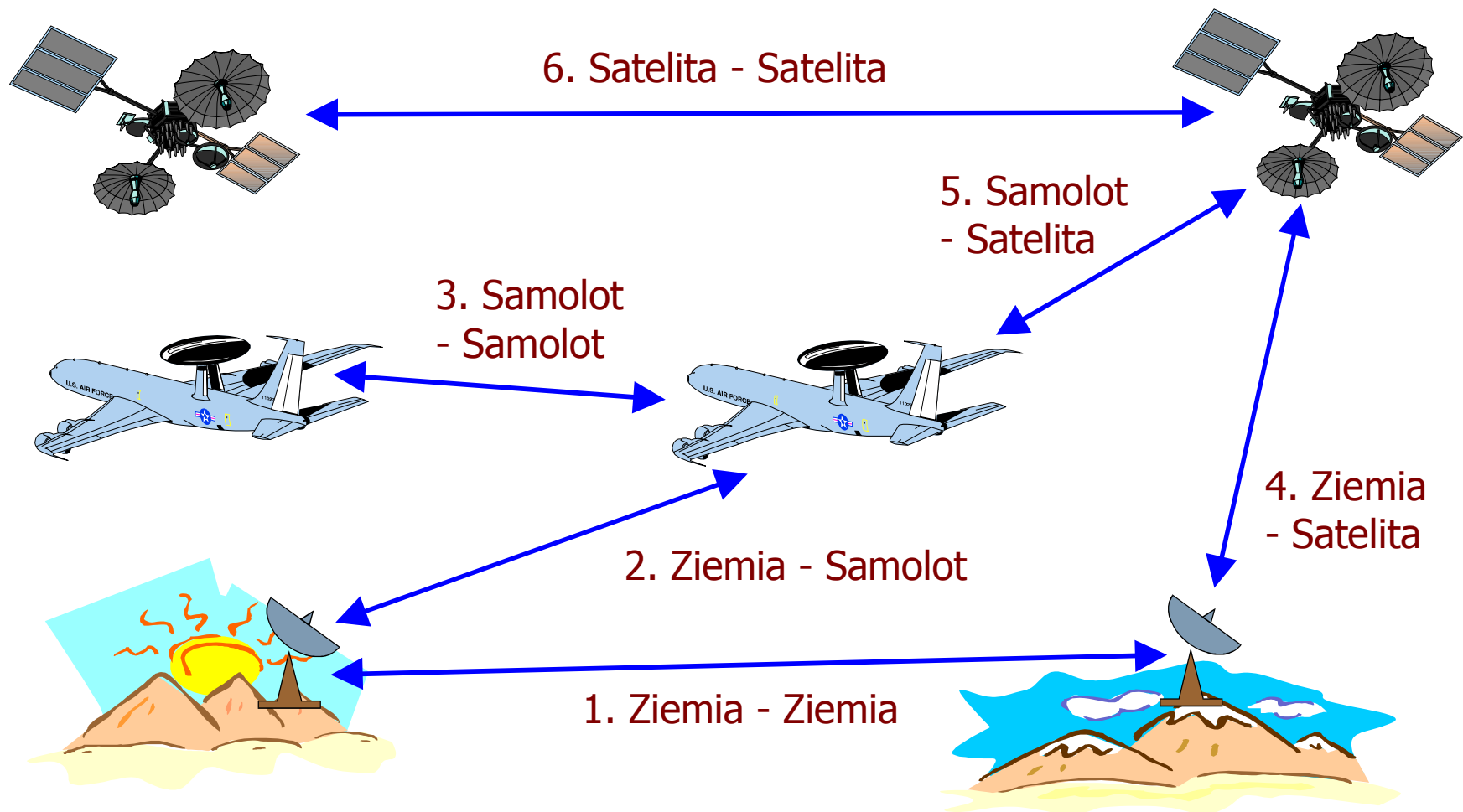
- 12.1. Wiadomości wprowadzające
- 12.2. Propagacja sygnałów optycznych
- 12.3. Komunikacja optyczna na duże odległości
- 12.4. Komunikacja optyczna krótkiego zasięgu
- 12.5. Podsumowanie

12.1. WPROWADZENIE – ŁĄCZA OPTYCZNE MIĘDZYSATELITARNA - ILUSTRACJA 1



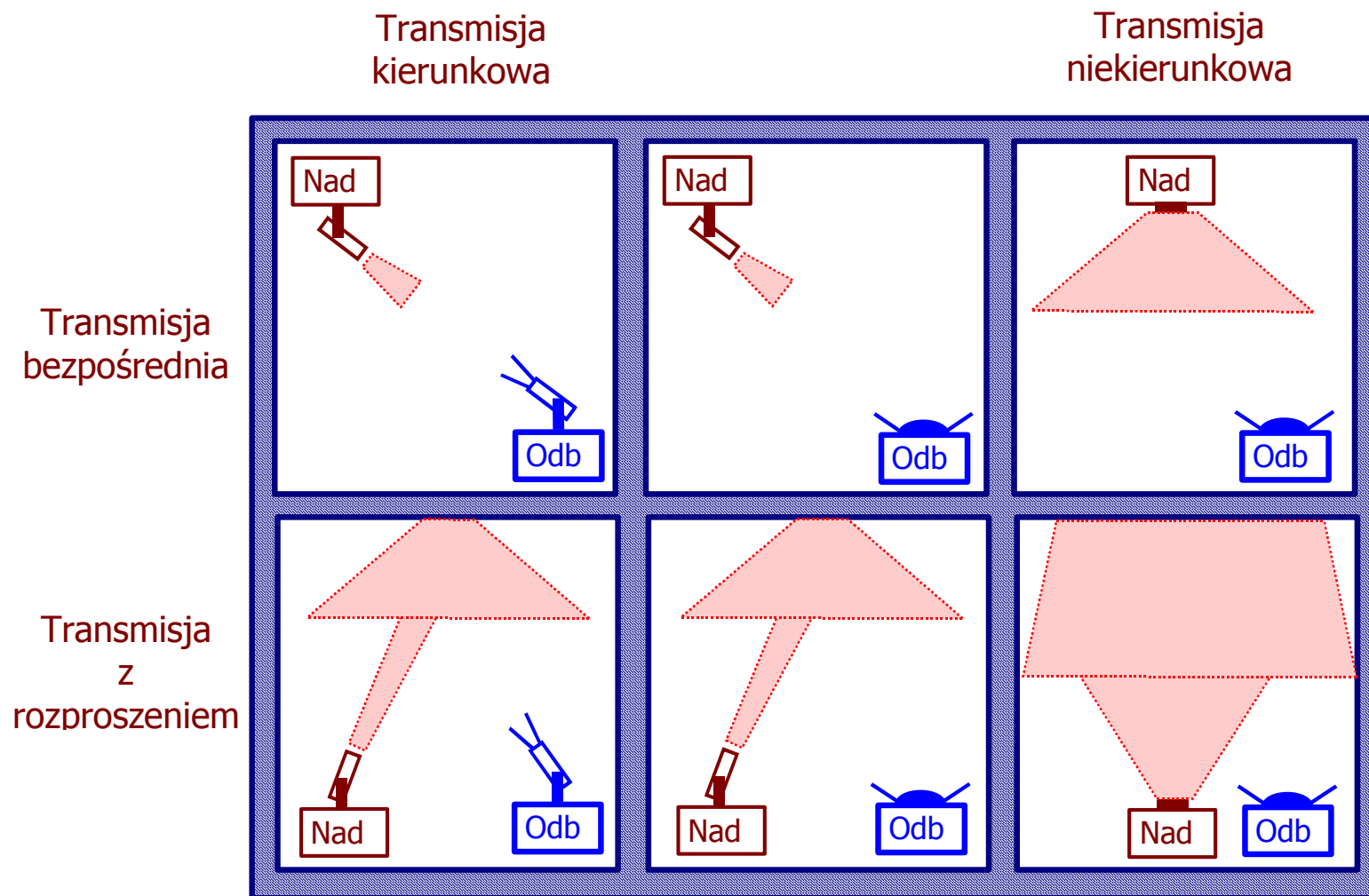
Rys.12.1. Struktura telekomunikacyjnej sieci satelitarnej z międzysatelitarnymi łączami optycznymi.

12.1. WPROWADZENIE – ROZMAITOŚĆ ŁĄCZ OPTYCZNYCH - ILUSTRACJA 2



Rys.12.2. Rodzaje łącz optycznych opracowanych przez US Army

12.1. WPROWADZENIE – ŁĄCZA OPTYCZNE WEWNĘTRZNE - ILUSTRACJA 3



Rys.12.3. Proste łącza optyczne pracujące w paśmie podczerwieni wewnątrz pomieszczeń.

12.1. WPROWADZENIE – PROBLEMY:

→ Problemy łącz optycznych dalekiego zasięgu:

- Dlaczego i do czego potrzebne są łącza optyczne dalekiego zasięgu?
- Jakie korzyści dają łącza optyczne dalekiego zasięgu w stosunku do radiolinii mikrofalowych?
- Jakie trudności napotykamy inne, niż znane do tej pory?
- Jaka jest przyszłość telekomunikacji optycznej wolnej przestrzeni dalekiego zasięgu?

→ Problemy łącz optycznych krótkiego zasięgu:

- Dlaczego i do czego potrzebne są łącza optyczne krótkiego zasięgu?
- Jakie korzyści dają łącza optyczne krótkiego zasięgu w stosunku do pikokomórek mikrofalowych?
- Jakie trudności napotykamy inne, niż znane do tej pory?
- Jak sobie radzimy z szumami?
- Jaka jest przyszłość łącz optycznych wolnej przestrzeni krótkiego zasięgu?

12.2. PROPAGACJA SYGNAŁÓW OPTYCZNYCH – ŹRÓDŁO PROMIENIOWANIA

◆ Źródło promieniowania promieniuje z jednakowym natężeniem mocy w każdym kierunku wewnątrz kąta bryłowego Ω_S .

◆ Całkowita moc promieniowania P_S emitowanego przez powierzchnię A_S :

$$P_S = A_S \Omega_S B(\theta);$$

◆ Tutaj $B(\theta)$ [W/m²steradian] jest natężeniem promieniowania na jednostkę kąta bryłowego i powierzchni.

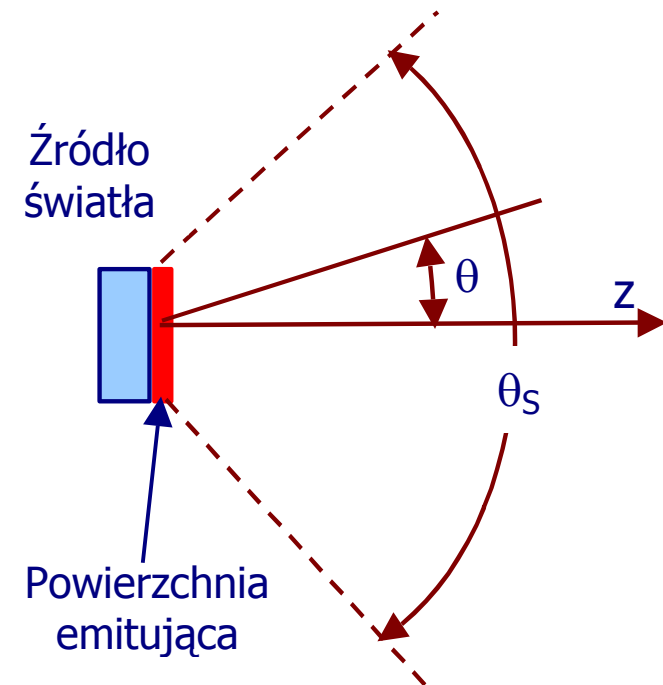
◆ Dla pełnej symetrii kąt bryłowy Ω_S związany jest z kątem płaskim θ_S :

$$\Omega_S = 2\pi \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_S}{2}\right) \right];$$

◆ W prostym, popularnym modelu źródło promieniuje z jednakowym natężeniem B wewnątrz kąta Ω_S , wtedy:

$$P_S = 2\pi A_S B;$$

Rys.12.4. Źródło emitujące promieniowanie

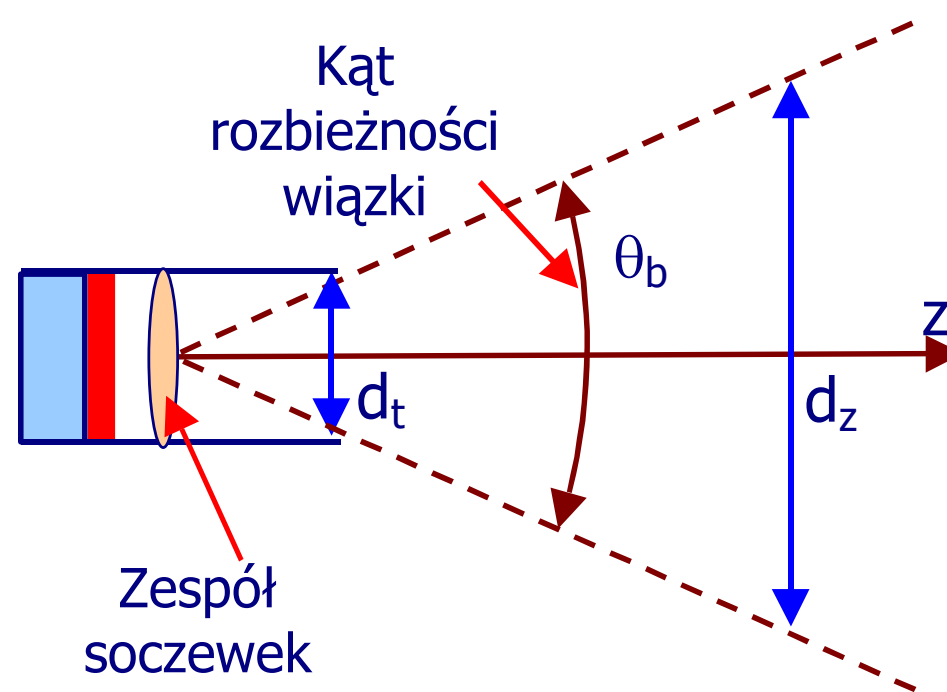


12.2. PROPAGACJA SYGNAŁÓW OPTYCZNYCH – FORMOWANIE WIĄZKI

- ◆ Wypromieniowany sygnał jest poddany ogniskowaniu i "obróbkom" optycznym.
- ◆ Soczewki skupiające i rozpraszające mają wytworzyć wiązkę równoległą.
- ◆ Efekty ugięcia, zależne od fali λ , powodują zmianę średnicy wiązki:
 - z d_t - średnica soczewki,
 - na d_z po przebyciu drogi z:

$$d_z = d_t \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{d_t^2}\right)^2};$$

- ◆ Dyfrakcja ogranicza kąt rozbieżności wiązki.
- ◆ W polu bliskim, gdy $(\lambda z/d_t^2) \ll 1$, wiązka jest równoległa o średnicy d_t .



Rys.12.5. Formowanie wiązki

12.2. PROPAGACJA SYGNAŁÓW OPTYCZNYCH – WZMOCNIENIE ANTENY

- ◆ W polu dalekim, gdy $(\lambda z/d_t^2) \gg 1$, otrzymujemy falę płaską o kącie rozbieżności θ_b :

$$\theta_b \cong \frac{\lambda}{d_t} \text{ rad};$$

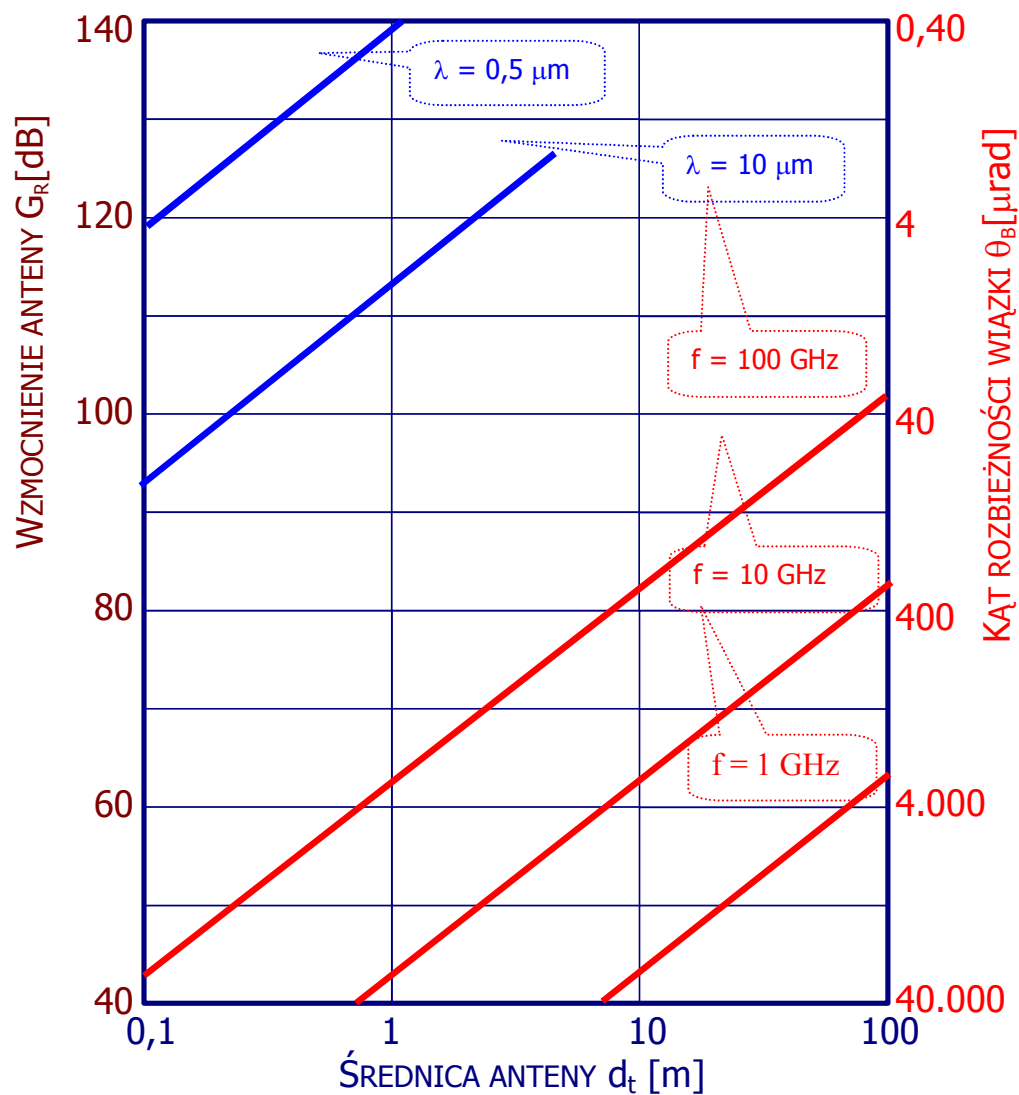
- ◆ Kąt bryłowy wiązki:

$$\Omega_s = 2\pi \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_s}{2}\right) \right] \cong \frac{\pi\theta_b^2}{4};$$

- ◆ Przykład: soczewka o średnicy 30 cm tworzy wiązkę $3 \times 10^{-6} \text{ rad} = 0,16 \text{ mdeg}$.
- ◆ Mając kąt rozbieżności wiązki θ_b obliczamy wzmacnienie anteny:

$$G_r = \frac{4\pi}{\Omega_b} \cong \left(\frac{4d_t}{\lambda} \right)^2;$$

Rys.12.6. Wzmacnienie anteny i kąt rozbieżności dla różnych długości fali



12.2. PROPAGACJA SYGNAŁÓW... – JAKĄ MOC ODBIERA ODBIORNIK? – CZ. 1

- ◆ Równania Maxwell'a opisują pole EM w każdym punkcie.
- ◆ Pole elektryczne jest opisane funkcją $E(t, \xi)$ przy kierunku propagacji zgodnej z wektorem \mathbf{i} .

$$\text{Nat. pola } E \text{ [V/m]} = \text{Re}\{E(t, \xi)\};$$

- ◆ Gęstość mocy $I(t, \xi)$ fali (Z_f - impedancja falowa):

$$I(t, \xi) = \frac{|E(t, \xi)|^2}{Z_f} \text{ [W / m}^2\text{]};$$

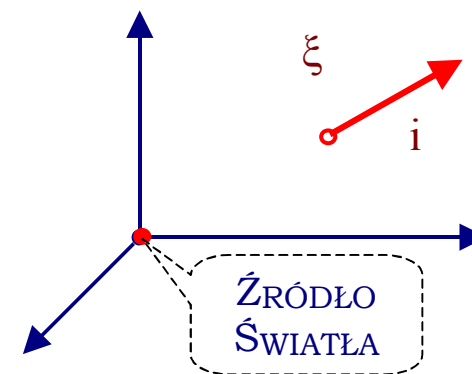
- ◆ Moc chwilowa $P_A(t)$ w czasie t fali przepływającej przez powierzchnię A , gdy kierunek propagacji \mathbf{i} nachylony pod kątem θ do normalnej do A :

$$P_A(t) = (\cos\theta) \iint_A I(t, \xi) d\xi;$$

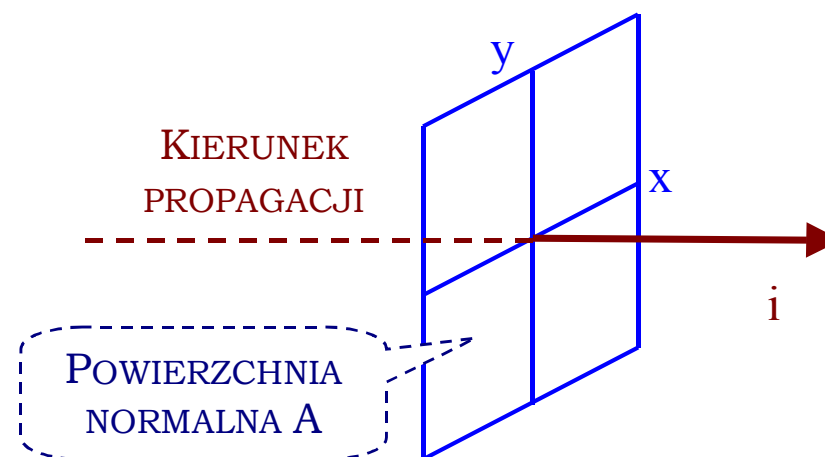
- ◆ Gdy $\mathbf{r} \in A$ a normalna $\mathbf{i}(\mathbf{i}_x, \mathbf{i}_y)$:

$$E(t, \mathbf{r}) = \mathbf{a}(t)e^{j\omega t} = [a_x \mathbf{i}_x + a_y \mathbf{i}_y] e^{j\omega t};$$

- ◆ Składowe a_x i a_y są zespolonymi składowymi określającymi stan polaryzacji.



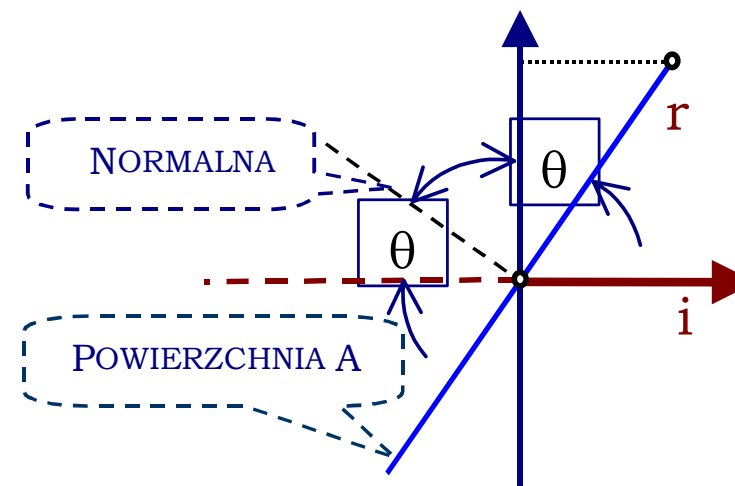
Rys.12.7. Układ współrzędnych



Rys.12.8. Powierzchnia normalna do kierunku propagacji

12.2. PROPAGACJA SYGNAŁÓW... – JAKĄ MOC ODBIERA ODBIORNIK? – CZ.2

- ◆ Gdy $|a_x(t)| = |a_y(t)|$, oraz
 - różnica faz wynosi 90° - polaryzacja kołowa,
 - różnica faz wynosi 0° polaryzacja liniowa.
- ◆ Zał.: polaryzacja liniowa i $a(t) = |a(t)|e^{j\phi(t)}$;
 - $|a(t)|$ - modulacja amplitudy,
 - $|a(t)|^2$ - modulacja intensywności - mocy,
 - $\phi(t)$ - modulacja fazy,
 - $d\phi(t)/dt$ - modulacja częstotliwości
- ◆ Pole elektryczne wytworzone przez nadajnik optyczny - punktowy, o mocy $P_s(t) = |a(t)|^2$, (amplituda $|a(t)|$ znormalizowana względem Z_f) obserwowane w punkcie ξ ,
- ◆ Gęstość mocy w odległości z , gdy G_T jest wzmocnieniem anteny nadajnika



Rys.12.9. Powierzchnia A nachylona do kierunku propagacji \mathbf{i} .

$$E(t, \xi) = \frac{\sqrt{G(\xi)}}{\sqrt{4\pi|\xi|}} a\left(t - \frac{|\xi|}{c}\right) e^{j\left(\omega t - \frac{2\pi|\xi|}{\lambda}\right)};$$

$$I(t, \xi) = \frac{G_T}{4\pi z^2} \left| a\left(t - \frac{z}{c}\right) \right|^2;$$

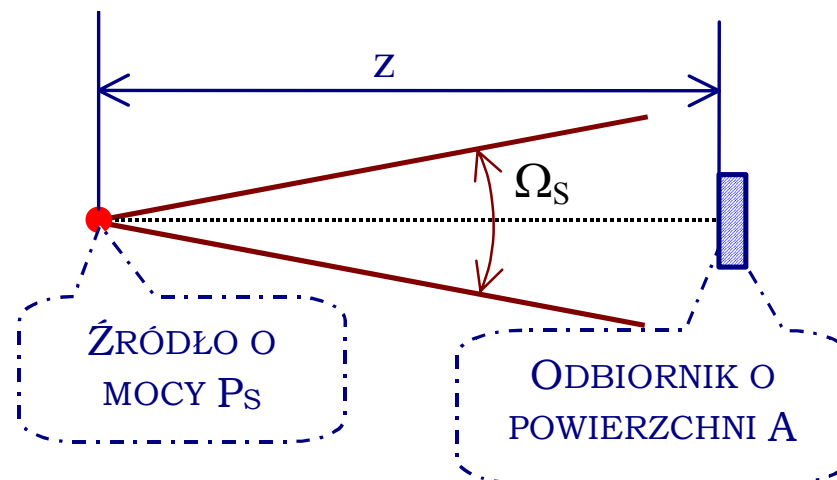
12.2. PROPAGACJA SYGNAŁÓW... – JAKĄ MOC ODBIERA ODBIORNIK? – CZ.3

- ◆ Łącze optyczne nadajnik i odbiornik o powierzchni odbioru A , oddalone o z ,
 - Gęstość mocy przy odbiorniku:

$$I(t, \xi) = \frac{G_T P_S}{4\pi z^2};$$

- Moc odebrana przez odbiornik:

$$P_R = \left(\frac{G_T P_S}{4\pi z^2} \right) A;$$



Rys.12.10. Prosty model łącza w przestrzeni

- ◆ Definiujemy wzmacnienie anteny odbiornika:
- ◆ Moc odebrana przez odbiornik raz jeszcze:

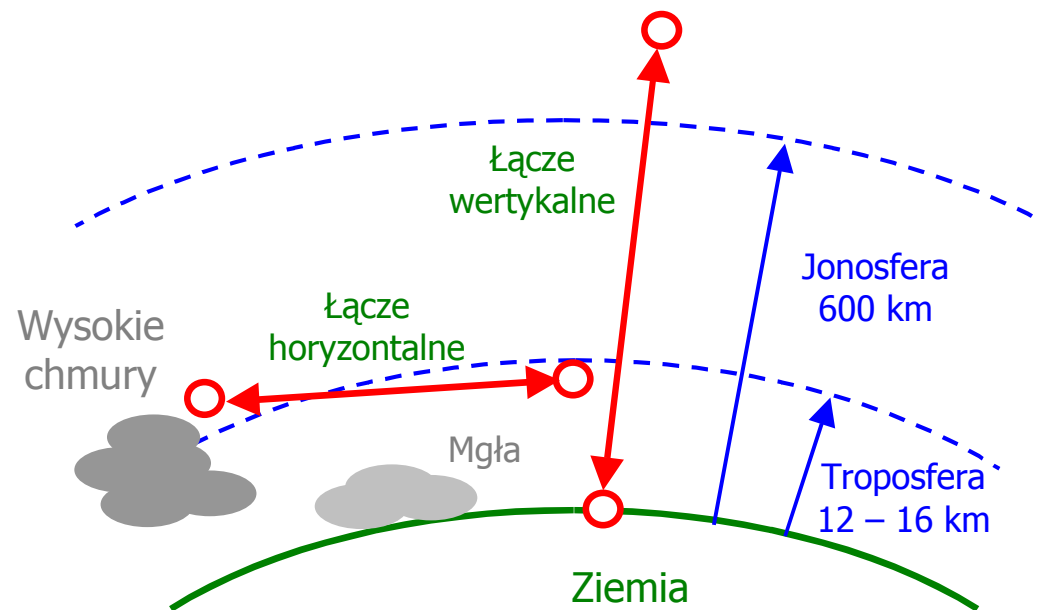
$$G_R = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) A;$$

$$P_R = P_S G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi z} \right)^2 = P_S G_T L_P G_R;$$

- ◆ Straty L_P rosną, gdy w atmosferze moc jest absorbowana przez mgły, deszcz, oraz gdy powierzchnia A nachylona jest pod kątem do kierunku propagacji.

12.2. PROPAGACJA SYGNAŁÓW... – PROPAGACJA W ATMOSFERZE - CZ.1

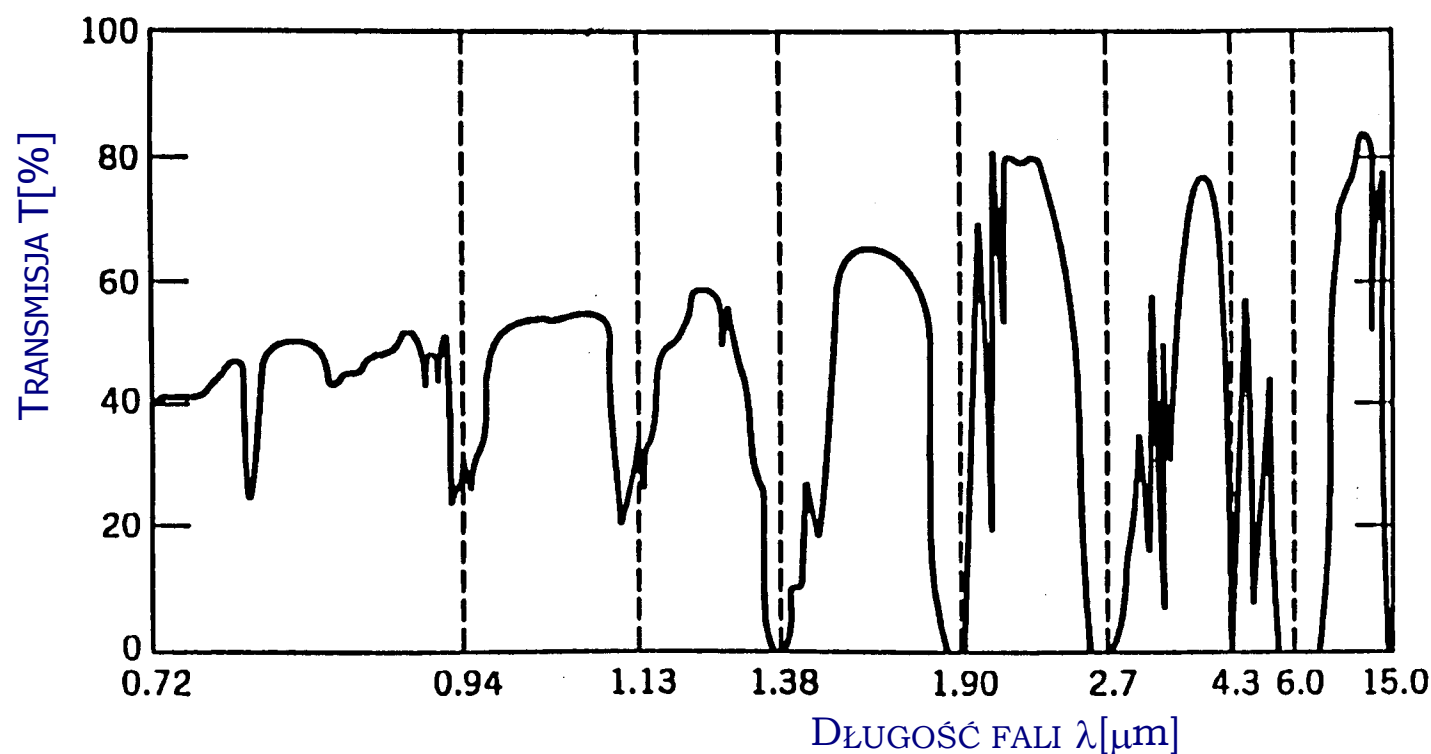
- ◆ Atmosfera składa się z gazów, atomów, pary wodnej, pyłu, wszystko utrzymywane siłą grawitacji.
- ◆ Największa koncentracja w troposferze.
- ◆ Atmosfera absorbuje i rozprasza promieniowanie EM.
- ◆ Efekty te stają się tym wyraźniejsze, im długość fali zbliży się do rozmiaru drobin.
- ◆ Straty mocy zależą od typu transmisji horyzontalnej i wertykalnej.
- ◆ 3 podstawowe rodzaje warunków:
 - czyste powietrze,
 - chmury, mgły,
 - deszcze.
- ◆ W warunkach czystego powietrza zmiany temperatury powodują:
 - turbulencje,
 - zmienia się współczynnik załamania,
 - powstają soczewki zmieniające kierunek propagacji.



Rys.12.11. Atmosfera Ziemi, horyzontalne i wertykalne łącza optyczne

12.2. PROPAGACJA SYGNAŁÓW... – PROPAGACJA W ATMOSFERZE - CZ.2

- ◆ Czyste powietrze jest w stanie silnie absorbować promieniowanie podczerwone.
- ◆ Absorpcja ma charakter selektywny, związany z pobudzeniem określonych cząsteczek.
- ◆ W miarę rozrzedzania powietrza absorpcja słabnie, przy transmisji między satelitami, na wysokościach powyżej 200 km, można ją pominąć.



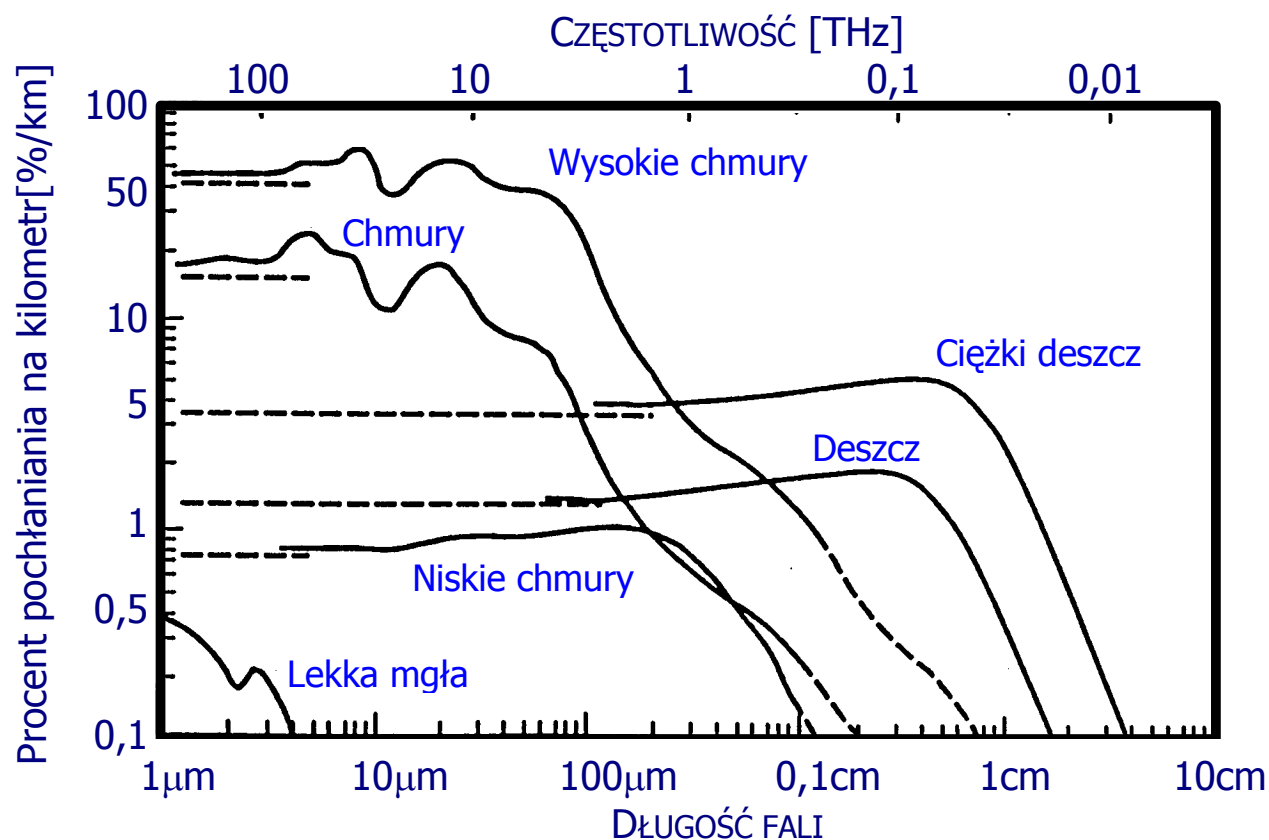
Rys.12.12. Transmisja sygnałów optycznych przez atmosferę.

12.2. PROPAGACJA SYGNAŁÓW... – PROPAGACJA W ATMOSFERZE - CZ.3

- ◆ Absorpcja i rozpraszanie wiązki powodują dodatkowe tłumienie, które zależy od długości fali

$$L_{\text{ATM}} = e^{-\alpha_{\text{ATM}}z}; \text{ przy czym: } \alpha_{\text{ATM}} = \alpha_{\text{ABS}} + \alpha_{\text{ROZP}};$$

- ◆ Ponadto efekty turbulencji w czystym powietrzu powodują dodatkowe tłumienie fali.

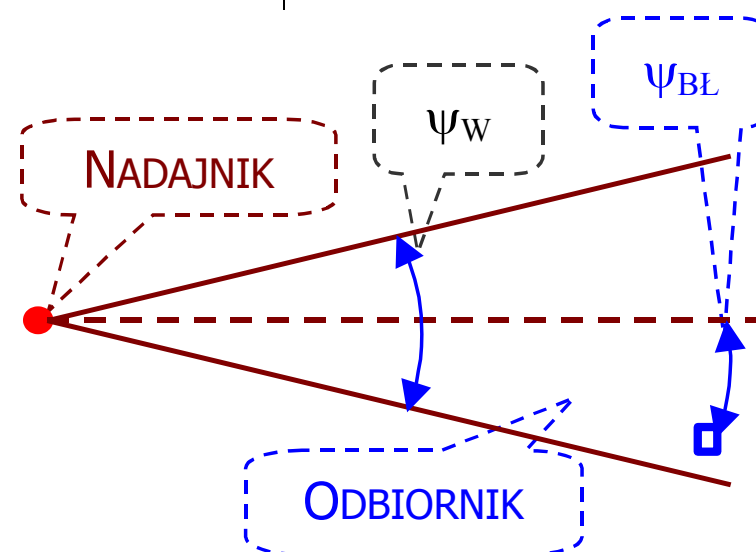


Rys.12.13. Współczynnik pochłaniania fali w różnych warunkach atmosferycznych i dla różnych długości fali.

12.3. KOMUNIKACJA OPTYCZNA NA DUŻE ODLEGŁOŚCI – CZ. 1

- Wiązka optyczna ma szerokość kątową ψ_W .
- Wiązka skierowana jest w stronę punktowego odbiornika z określoną dokładnością (błędem) ψ_{BL} .
- Przykład: wiązka sygnału optycznego kierowana jest z satelity odległego o 20.000 km i ma szerokość kątową 50 μ rad. Na Ziemi średnica wiązki = 1 km.
- Wiązka mikrofalowa o kącie 10^0 ma średnicę ok. 4.000 km.
- Niedokładne naprowadzenie wiązki powoduje stratę mocy. Dla kształtu opisanego krzywą Gaussa dla kąta ψ_W moc spada do 1/e.
- Przyczyny niedokładności:
 - Niedokładne określenie kierunku, ruch nadajnika i odbiornika względem punktu odniesienia (gwiazdy).
 - Niedośkonalszość aparatury kierującej wiązką.
 - Źle skompensowany ruch-obrót nadajnika i odbiornika.
 - Turbulencje gradienty temperatury atmosfery.

$$P_R = \frac{C}{\psi_W^2} e^{-(2\psi_{BL} / \psi_W)^2};$$

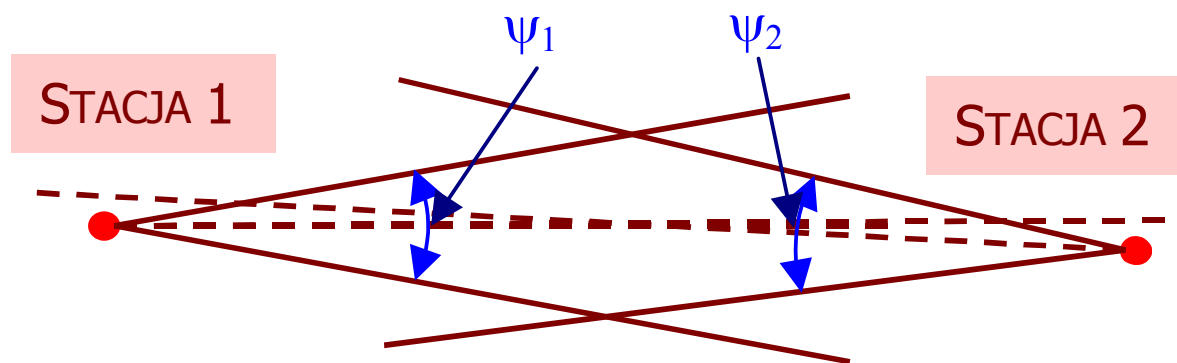


Rys.12.14. Wiązka optyczna naprowadzona na kierunek do odbiornika

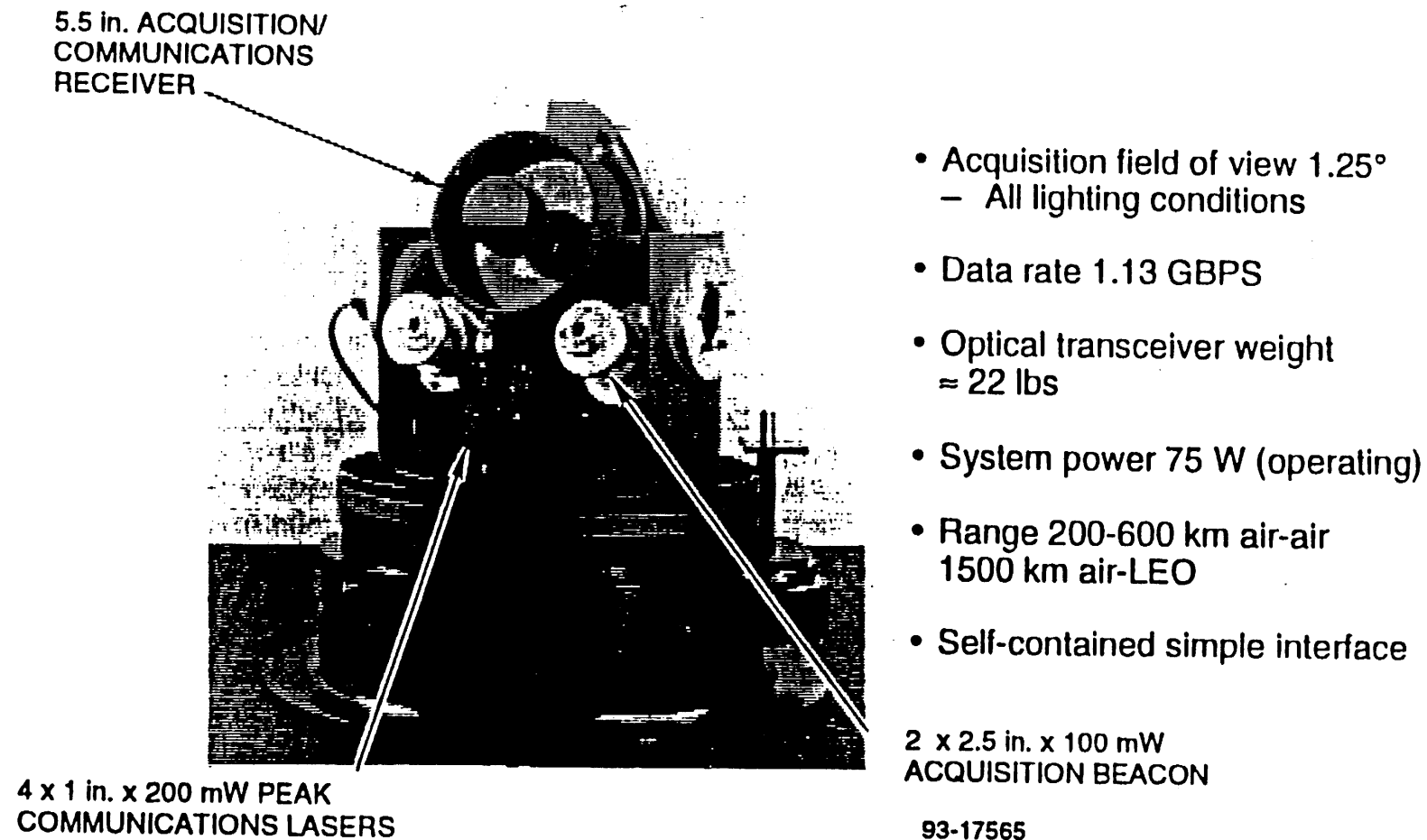
12.3. KOMUNIKACJA OPTYCZNA... – NAPROWADZANIE, WYKRYWANIE I ŚLEDZENIE.

- ◆ Wpływ atmosfery jest większy przy transmisji z Ziemi do satelity, niż odwrotnie.
- ◆ Przy dużych odległościach N-O i dużych prędkościach satelity wiązka nakierowana jest z wyprzedzeniem o czas przepływu sygnału.
- ◆ Wykrywanie i śledzenie jednostronne przez odbiornik, który usiłuje ustalić wektor normalny na kierunek przyływu sygnału z nadajnika (maksimum sygnału).
- ◆ Przy obustronnym wykrywaniu i śledzeniu jedna ze stacji wykorzystuje informację o położeniu drugiej i "oświetla" ją. Druga stacja ustawia swoje położenie na maksimum mocy odbieranej.
- ◆ Wtedy rozpoczyna transmisję w stronę pierwszej stacji. Teraz ta może ustalić swoje położenie na maksimum odbioru mocy.

Rys.12.15. Wykrywanie, naprowadzanie i śledzenie obustronne są ważnymi problemami automatyki układu transmisji.



12.3. KOMUNIKACJA OPTYCZNA... – NAPROWADZANIE, WYKRYWANIE I ŚLEDZENIE.



Rys.12.16. System rozwinięty dla potrzeb US Army i NASA. Długość fali 810 nm. "High-elevation terrestrial validation of BMDO lasercom system at 1,1 Gb/s. SPIE 1995

12.3. KOMUNIKACJA OPTYCZNA... – PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ

- ◆ System amerykański, opisany w "High Data Rate Systems for Space Applications", Lincoln Laboratory, 1996
 - Źródło mocy – laser półprzewodnikowy do transmisji światłowodowej, $\lambda = 1500$ nm.
 - Dwustopniowy wzmacniacz mocy, zwiększający moc nadawaną do 1 W mocy.
 - Modulacja fazy modulatorem zewnętrznym.
 - W odbiorniku optyczny wzmacniacz małej mocy, czułość odbiornika - 50 fotonów/bit.
 - Uzyskana szybkość transmisji cyfrowej - 10 Gb/s ,

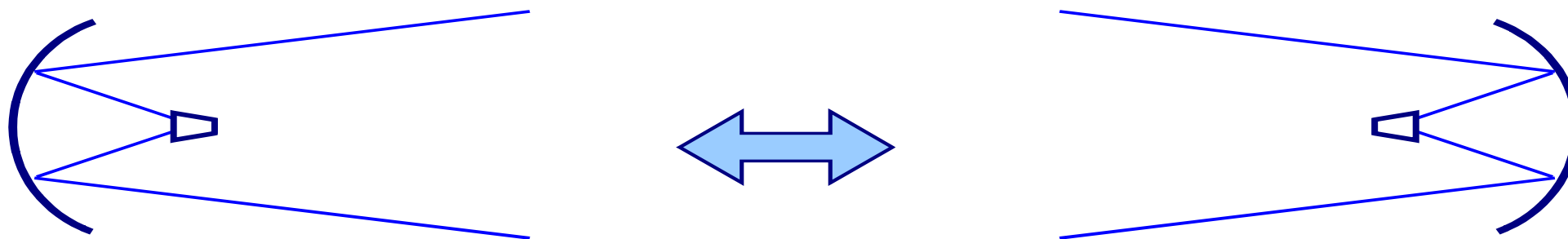
- ◆ System niemiecki, opisany w "Practical results of a coherent free space transmission experiment through the atmosphere...", German Aerospace Establishment.
 - Źródło mocy – laser Nd:YAG, $\lambda = 1064$ nm.
 - Modulacja fazy PSK modulatorem zewnętrznym.
 - W odbiorniku odbiór kohherentny.
 - Uzyskana szybkość transmisji cyfrowej - 2 Mbit/s.
 - Wymiary: nadajnika $D = 2,5$ cm, odbiornika $D = 5$ cm.
 - Łącze optyczne bliskiego zasięgu, do transmisji danych między budynkami, próby do 360 m.

12.3. KOMUNIKACJA OPTYCZNA. – PORÓWNANIE TRANSMISJI RADIOWEJ I OPTYCZNEJ

TABLICA 12.1: Porównanie parametrów łącz LEO-GEO na odległość 40.000 km, wykonanych w technice mikrofalowej i optycznej.

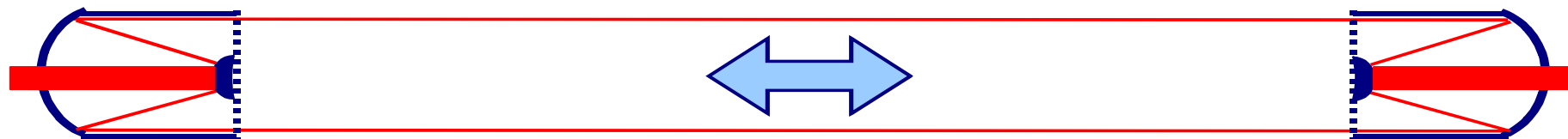
Częstotliwość / długość fali	32 GHz	60 GHz	1535 nm	850 nm
Moc nadajnika	25 W	15 W	1 W	0,5 W
Szybkość transmisji	1 Gb/s	1 Gb/s	1 Gb/s	1 Gb/s
Wzmocnienie anteny nadajnika	41 dB	46 dB	111 dB	116,5 dB
Średnica anteny nadajnika	46 cm	46 cm	18 cm	18 cm
Wzmocnienie anteny odbiornika	60 dB	63,5 dB	116 dB	121,5 dB
Średnica anteny odbiornika	488 cm	488 cm	30 cm	32 cm
Moc odebrana przez odbiornik	- 73 dBm	- 73 dBm	- 41,2 dBm	- 38,5 dBm
Czułość odbiornika			150 fot./bit	150 fot./bit
Stopa błędu	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}

12.3. KOMUNIKACJA OPTYCZNA. – INNE PORÓWNANIE



◆ Łącze mikrofalowe, radiolinia:

- Duże rozmiary anten (3 m), duża waga (100 kg).
- Duży pobór mocy (350 W), duża moc transmitowana (150 W),
- Mała prędkość transmisji danych (20 Mb/s...100 Mb/s).

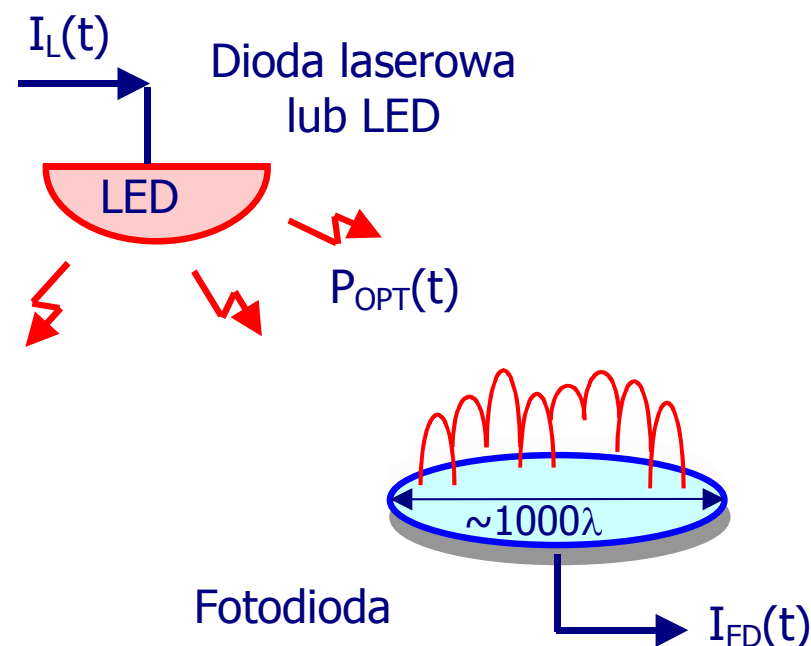


◆ Łącze optyczne:

- Małe rozmiary układu ogniskującego (15 cm), mała waga (15 kg).
- Mały pobór mocy (75 W), mała moc transmitowana (0,2 W...2 W),
- Duża prędkość transmisji danych (100 Mb/s...10 Gb/s)

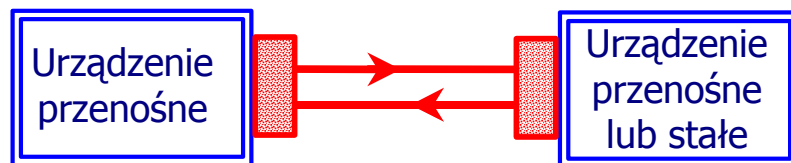
12.4. KOMUNIKACJA OPTYCZNA KRÓTKIEGO ZASIĘGU. – WSTĘP

- ◆ Łącza optyczne krótkiego zasięgu przydatne do tworzenia sieci LAN.
- ◆ Infrared Data Association ustaliła standard łącz krótkiego zasięgu z szybkością transmisji 4 Mb/s, 1,152 Mb/s, 115,2 kb/s, długość fali 850 - 900 nm, BER 10^{-9} przy transmisji na odległość 1m.
- ◆ Możliwe wszystkie typy modulacji: AM, PM, FM. Najprostszym i dobrym rozwiązaniem jest łącze typu IM/DD: *Intensity modulation* IM - *Direct detection* DD
- ◆ Moc optyczna nadajnika $X(t)$. Odbierany przez fotodetektor impulsu - $Y(t)$.
- ◆ Sygnał dociera do odbiornika złożoną drogą, liczne interferencje. Problem nieistotny, gdy średnica detektora $\gg \lambda$.
- ◆ Opisywane łącza optyczne pracują w obecności silnego światła widzialnego słonecznego i sztucznego, sygnałów podczerwonych, są to źródła szumów.
- ◆ Najpopularniejsze łącza z transmisją bezpośrednią, z diodami LED i krzemowymi fotodetektorami.

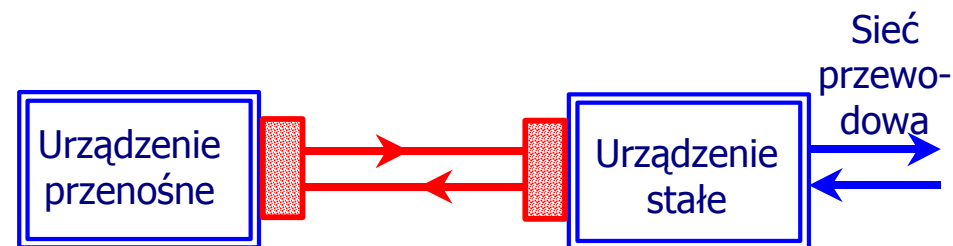


Rys.12.18. Elementy łącza optycznego krótkiego zasięgu.

12.4. KOMUNIKACJA OPTYCZNA KRÓTKIEGO ZASIĘGU. – RODZAJE ŁĄCZ



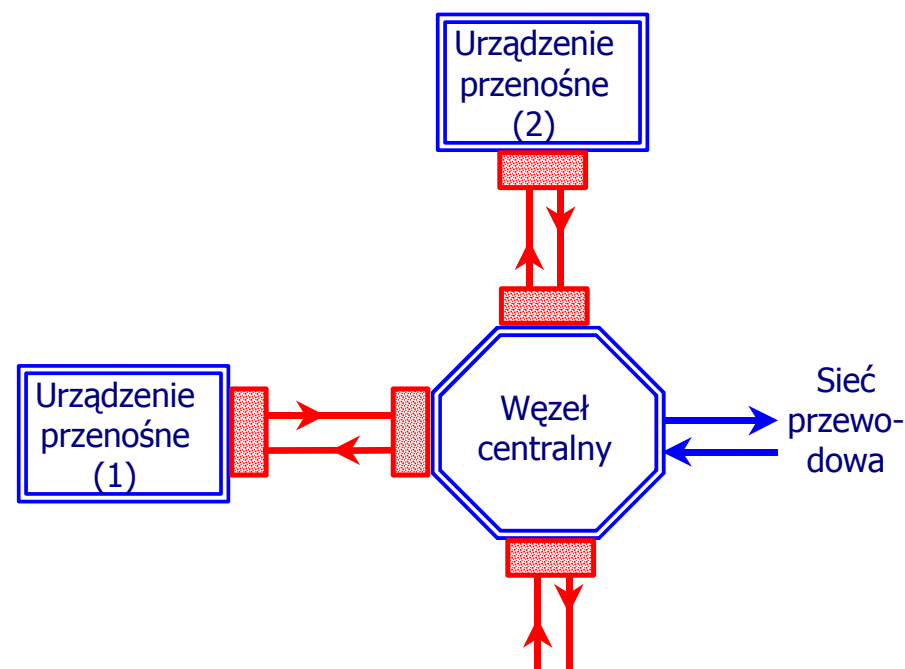
Rys. 12.19. Proste łącze np. laptop komputer z innym komputerem, drukarką.



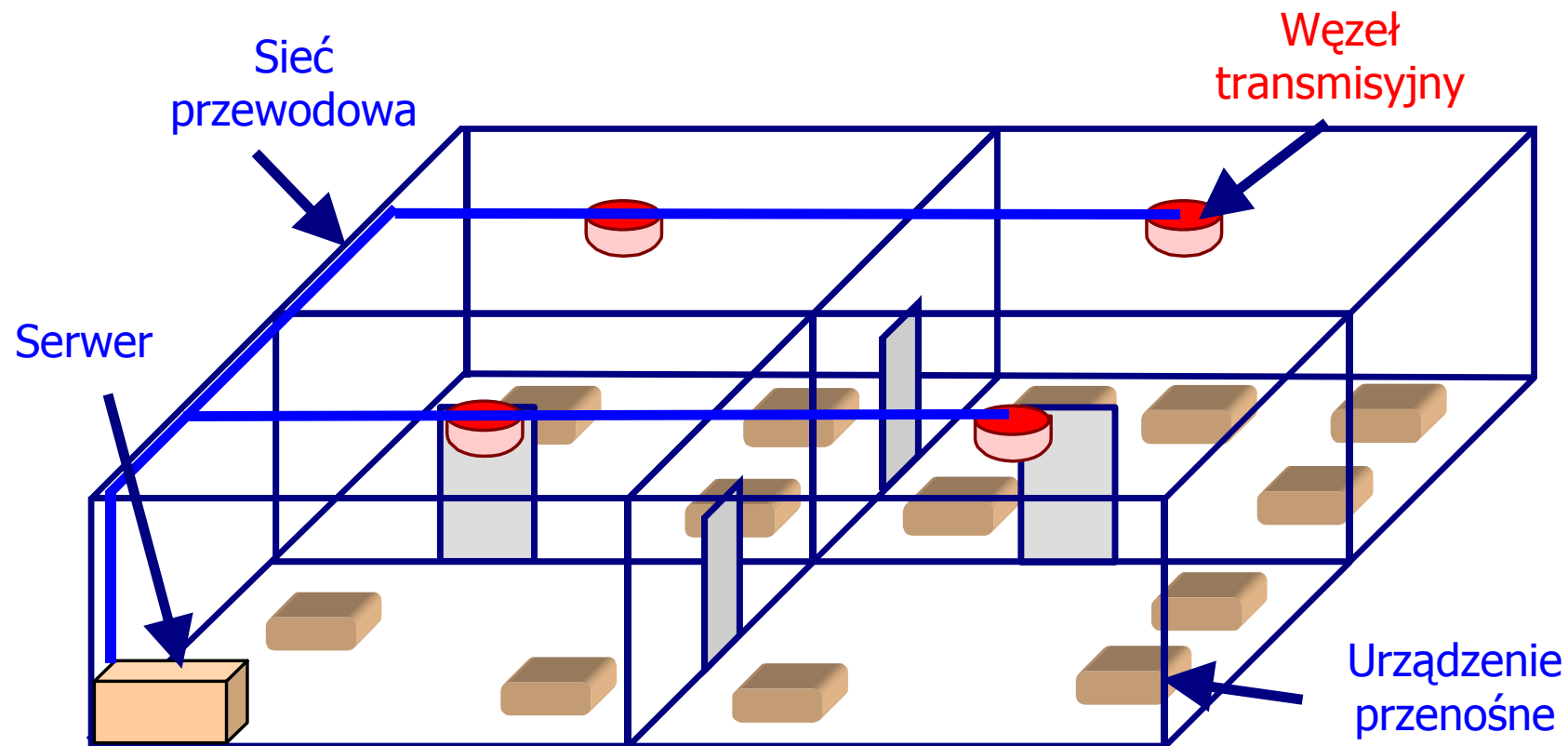
Rys.12.20. Przenośne urządzenie (laptop) połączony z siecią przewodową i dalej z siecią przewodową, element LAN.

Rys.12.21. Centralny węzeł połączony z siecią przewodową realizuje połączenie z wieloma urządzeniami przenośnymi.

- ◆ Zespół z węzłem centralnym może być wykorzystywany przy transmisji wielodostępowej, w salach konferencyjnych.
- ◆ Zespół taki stanowi ważny element umożliwiający konstrukcję LAN.



12.4. KOMUNIKACJA OPTYCZNA KRÓTKIEGO ZASIĘGU. – SIEĆ TYPU LAN



Rys.12.22. Wielodostępowa sieć typu LAN z możliwością współpracy z wieloma przenośnymi urządzeniami

12.4. KOMUNIKACJA OPTYCZNA KRÓTKIEGO..– ŹRÓDŁA NADAJNIKÓW OPTYCZNYCH

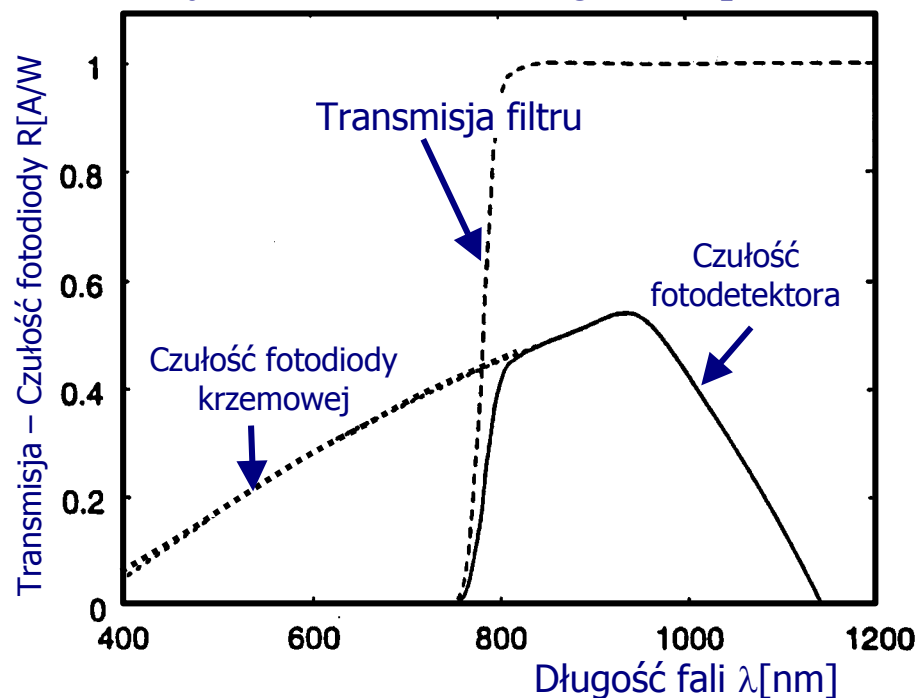
TABLICA 12.2. Porównanie parametrów diod LED i laserowych

PARAMETR	DIODY LED	DIODY LASEROWE
Szerokość widma	25 - 100 nm (10 - 50 THz)	$<10^{-5}$ do 5 nm (~ 1 MHz - 2 THz)
Pasmo modulacji	$10^4 - 10^7$ Hz	$10^4 - 10^{10}$ Hz
Sprawność przetwarzania E/O	10 - 20%	30 - 70%
Bezpieczeństwo oczu	Bezpieczne dla oczu	Dla $\lambda < 1400$ nm specjalne środki bezpieczeństwa
Koszty	Niskie	Umiarkowane i wysokie

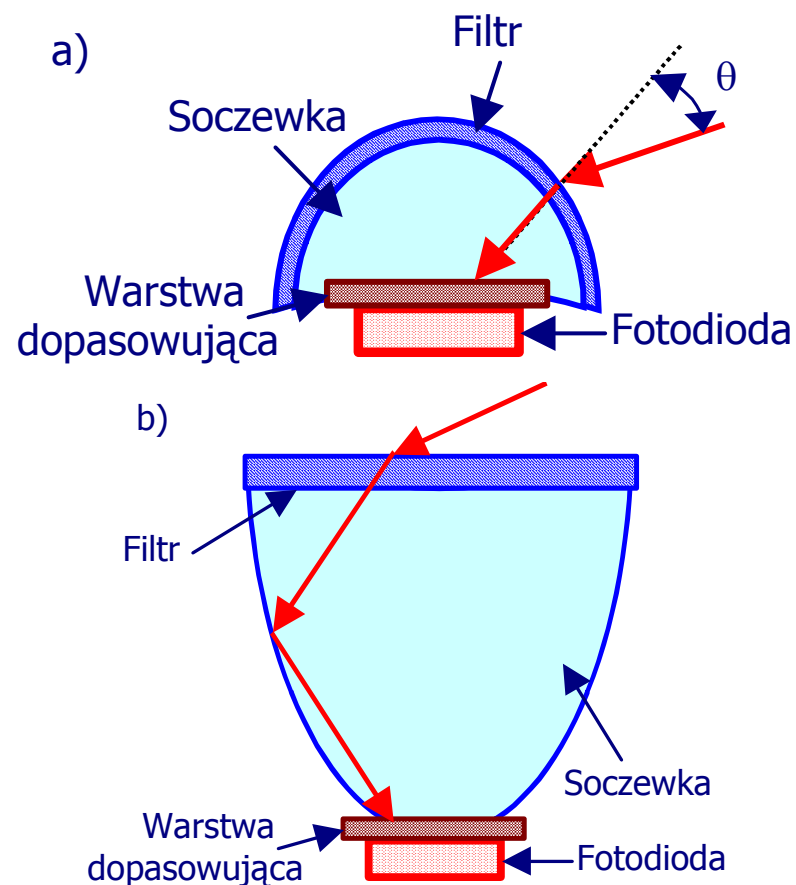
- ◆ Nadajniki pracują w paśmie 780 - 950 nm.
- ◆ Diody LED są bezpieczne i tanie.
- ◆ Szerokość kątowna wiązki $10^0 - 30^0$.
- ◆ Diody laserowe wykazują szereg korzyści w stosunku do diod LED.
- ◆ Ze względów bezpieczeństwa zaleca się wykorzystywanie pasma 1550 nm.

12.4. KOMUNIKACJA OPTYCZNA KRÓTKIEGO...– ODBIORNIKI

- ◆ Pokryte filtrem odcinającym zakres widzialny, a transmitującym zakres podczerwieni diody krzemowe p-i-n są typowymi fotodetektorami.
- ◆ Specjalnego typu koncentraty-soczewki umożliwiają odbiór z szerokiego kąta padania.

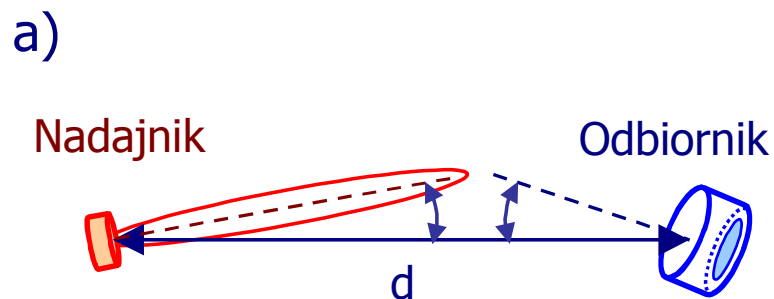


Rys.12.23. Czułość fotodiod krzemowych p-i-n pokrytych filtrem tłumiącym światło widzialne

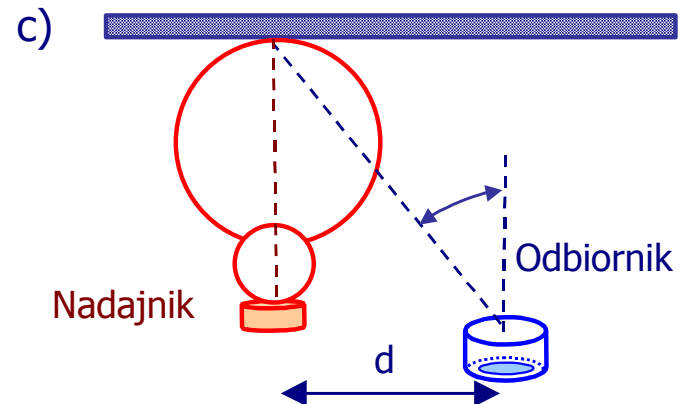


Rys.12.24. Układy ogniskujące odbiorników optycznych. a) Soczewka kulista z filtrem. b) Soczewka paraboliczna.

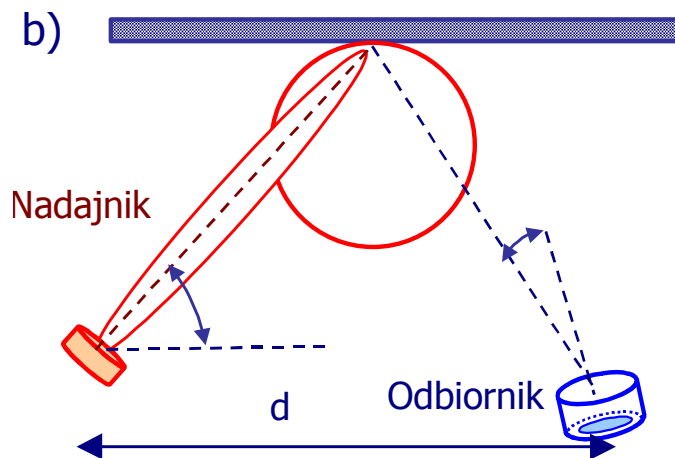
12.4. KOMUNIKACJA OPTYCZNA KRÓTKIEGO...- STRUKTURY ŁĄCZ



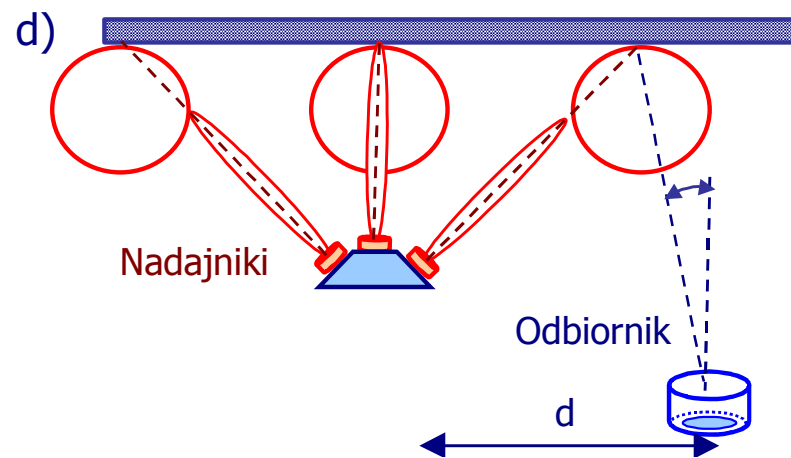
Rys.12.25.a) Łącze z transmisją bezpośrednią
LOS line-on-sight



Rys.12.25.c) Łącze z transmisją pośrednią
niekierowaną



Rys.12.25.b). Łącze z transmisją pośrednią
kierowaną non-line-on-sight

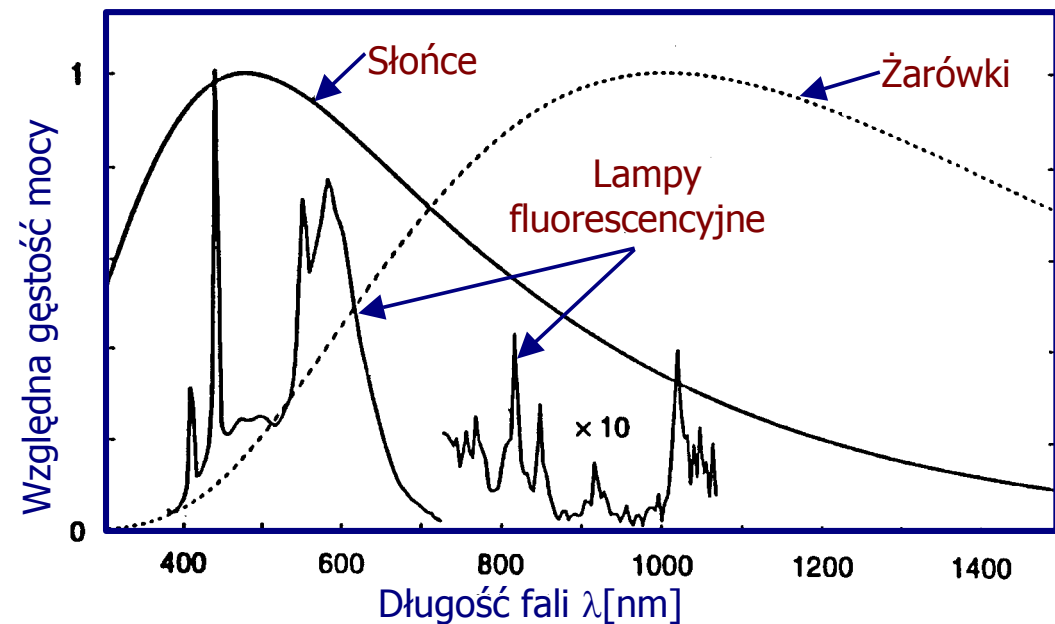


Rys.12.25.d) Łącze z nadajnikiem
wielowięzkowym

12.4. KOMUNIKACJA OPTYCZNA KRÓTKIEGO...– ŹRÓDŁA SZUMÓW

- ◆ W paśmie podczerwieni można znaleźć wiele źródeł szumów - rys. a):
 - Promieniowanie słoneczne.
 - Promieniowanie nieba.
 - Sztuczne źródła światła, takie jak żarówki, lampy fluorescencyjne, jarzeniowe, itp.
- ◆ Pozostałe źródła szumów są typowe dla odbiorników z fotodiodami:
 - Szumy śrutowe $1/f$ fotodiody i przedwzmacniacza.
 - Szumy termiczne.
- ◆ Obfitość szumów powoduje zmniejszenie zasięgu łącza, wzrost stopy błędów, konieczność powtarzania transmisji.

Rys.12.26. Względna gęstość szumów w paśmie widzialnym i bliskiej podczerwieni wewnątrz typowego pomieszczenia biurowego.



12.5. PODSUMOWANIE

- ◆ Łącza optyczne dalekiego zasięgu, między satelitami typu LEO (1500 km), między satelitami LEO i GEO (40.000 km) zapewniają większą prędkość transmisji, mniejszą wagę i pobór mocy.
- ◆ Opracowanie układów automatyki umożliwiło transmisję sygnałów optycznych między obiektami ruchomymi, satelitami LEO i samolotami.
- ◆ Prawdopodobnie obecnie jedynie armie stosują łącza optyczne dalekiego zasięgu w wolnej przestrzeni. Zastosowania cywilne bardzo bliskie.
- ◆ Łącza optyczne w zakresie podczerwieni są atrakcyjną i użyteczną alternatywą w stosunku do łączy mikrofalowych dla przenośnych komputerów i terminali telekomunikacyjnych.
- ◆ Jakkolwiek podstawową techniką łączy krótkiego zasięgu jest IM/DD, to możliwym jest wykorzystanie techniki transmisji na podnośnej i wielokrotnej multipleksacji.
- ◆ Ze względu na duży poziom szumów własnych i zewnętrznych napotyka się na trudności w uzyskaniu odpowiednio małej stopy błędu.