

## **PROJEKTOWANIE CYFROWYCH LINII RADIOWYCH**

### **SPIS TREŚCI :**

1. Wprowadzenie	1
2. Wstępny wybór trasy linii radiowej	2
3. Wizja lokalna trasy linii radiowej	3
4. Wykonanie przekrojów odcinków transmisyjnych	3
5. Stopa błędów a stosunek sygnału do zakłóceń	5
6. Obliczanie mocy sygnału na wejściu odbiornika	8
7. Wybór trasy linii radiowej – zasady i kryteria	16
8. Inny sposób wyznaczania przekroju trasy odcinka transmisyjnego i wysokości zawieszenia anten	20
Literatura	24

# PROJEKTOWANIE CYFROWYCH LINII RADIOWYCH

## 1. Wprowadzenie

Właściwa praca linii radiowej zależy od dwóch czynników:

- poprawnego zaplanowania jej przebiegu oraz ustalenia liczby i rodzajów stacji,
- prawidłowego zaprojektowania linii radiowej od strony ustalenia geometrycznych parametrów profili poszczególnych odcinków trasy, ustalenia wysokości zawieszenia anten, wyboru urządzeń radiowych, częstotliwości, ilości kanałów (przepływności).

Powyższe czynniki są ściśle ze sobą związane.

Podstawą do zaplanowania linii radiowej są następujące dane:

- miejsca rozmieszczenia węzłów usługowych systemu telekomunikacyjnego,
- ilość i rodzaj łączy potrzebnych między poszczególnymi węzłami łączności, a wynikających z zapotrzebowań informacyjnych i perspektywy ich wzrostu,
- stan aktualny i ewentualny plan rozbudowy sieci przewodowej i światłowodowej,
- ilość, stan techniczny i parametry eksploatacyjne posiadanych urządzeń linii radiowej,
- przybliżona lokalizacja stacji początkowej i stacji końcowej oraz ewentualnych stacji węzłowych,
- wymagania techniczne dotyczące powyższych stacji,
- parametry techniczne przewidywanych do zastosowania urządzeń radioliniowych,
- dane o liniach radiowych znajdujących się lub przewidywanych do zainstalowania w pobliżu projektowanej trasy linii,
- dane o potencjalnych źródłach zakłóceń elektromagnetycznych.

Posiadając powyższe dane, można przystąpić do zaplanowania odpowiedniej do potrzeb i możliwości sieci linii radiowych, w ścisłym powiązaniu z siecią przewodową (jeśli zachodzi taka potrzeba), a następnie do zaprojektowania poszczególnych odcinków transmisyjnych.

W procesie planowania sieci linii radiowych określić należy:

- sposób organizacji łączności radioliniowej (pojedyncze odcinki transmisyjne, linie wieloodcinkowe, linia ze stacjami węzłowymi),
- trasy przebiegu poszczególnych linii radiowych,
- potrzebne urządzenia,

- rozdział łączy w poszczególnych liniach radiowych,
- przydział fal roboczych i zasady ich zmiany, przy uwzględnieniu wymagań kompatybilności elektromagnetycznej, tak zewnętrznej jak i wewnętrznej,
- organizację łączności służbowej,
- rezerwowanie urządzeń..

W procesie projektowania linii radiowych wyróżnia się następujące etapy:

- wstępny wybór przebiegu trasy linii radiowej,
- przeprowadzenie wizji lokalnej trasy linii radiowej,
- wykonanie przekrojów terenu poszczególnych odcinków transmisyjnych linii radiowej,
- obliczenie parametrów linii radiowej i ostateczne ustalenie miejsca rozmieszczenia stacji radioliniowych,
- wyznaczenie azymutów dla poszczególnych stacji,
- wyznaczenie częstotliwości roboczych dla poszczególnych stacji linii radiowej.

## 2. Wstępny wybór trasy linii radiowej

Wstępną analizę obszaru między punktami końcowymi danej linii radiowej (z uwzględnieniem stacji retransmisyjnych i węzłowych), której celem jest ustalenie wariantów przebiegu trasy, przeprowadza się na mapie topograficznej w skali 1:200000 lub 1:100000. Na mapę należy nanieść punkty przez które ma przebiegać trasa linii radiowej (stosownie do potrzeb) i punkty, gdzie przewidywane jest odgałęzianie kanałów oraz takie charakterystyczne dane, jak rozmieszczenie stacji radiowych,. przebieg linii energetycznych i innych linii radiowych. Następnie wzdłuż punktów, gdzie będą rozwijane stacje węzłowe i końcowe, zaznacza się obszar terenu w postaci pasa o szerokości około 1/3 odcinka przelotowego. W zaznaczonym obszarze wybiera się najwyższe wzniesienia dogodnie do budowy stacji retransmisyjnych. Można oznaczyć również miejsca niedogodne lub utrudniające rozwijanie stacji. Na tak przygotowanej mapie należy wybrać, w przedziale wyznaczonego pasa, takie warianty tras, aby ilość stacji przekaźnikowych była jak najmniejsza. Średnie długości odcinków transmisyjnych przyjmuje się zależnie od typu stacji. Na tym etapie prac można orientacyjnie określić prześwity na danych odcinkach trasy. ***Pomocnym może być tutaj program komputerowy „Mapa” lub inny dostępny, czyli cyfrowa mapa terenu i sprzęgnięty z nią moduł projektowania tras linii radiowych.*** Na podstawie przeprowadzonych badań za pomocą tego programu, można określić poszczególne warianty tras i podzielić je na poszczególne odcinki, a także wybrać miejsca rozmieszczenia stacji retransmisyjnych. Należy podkreślić, że tendencja do zmniejszania liczby stacji nie może prowadzić do wyboru trasy najkrótszej. Aby uniknąć wzajemnych zakłóceń w linii radiowej, trasę linii wybiera się tak, aby każda stacja znajdowała się w wiązce promieniowania anten tylko

stacji sąsiednich. Jednak gdy stacje radioliniowe wykorzystują fale centymetrowe, gdy długość całej linii, albo poszczególnych odcinków transmisyjnych przekracza dopuszczalną wartość, gdy wielkość przesłonięcia budzi zastrzeżenia, gdy przeszkoda na trasie ma kształt sferyczny, należy wykonać przekrój danego odcinka transmisyjnego, obliczyć parametry propagacji i dopiero na tej podstawie ocenić przydatność trasy linii radiowej.

### **3. Wizja lokalna trasy linii radiowej**

W związku z tym, że obecnie możliwe jest szybkie wykonanie przekrojów terenu poszczególnych odcinków transmisyjnych za pomocą programów komputerowych, to nie ma większego znaczenia, który z etapów planowania linii radiowej jest wykonywany wcześniej. Na ogół zawsze czynności te, wykonywane w dowolnej kolejności, nawzajem się uzupełniają i korygują. Celem wizji lokalnej trasy linii radiowej, niezależnie od tego w którym momencie będzie wykonywany, powinno być:

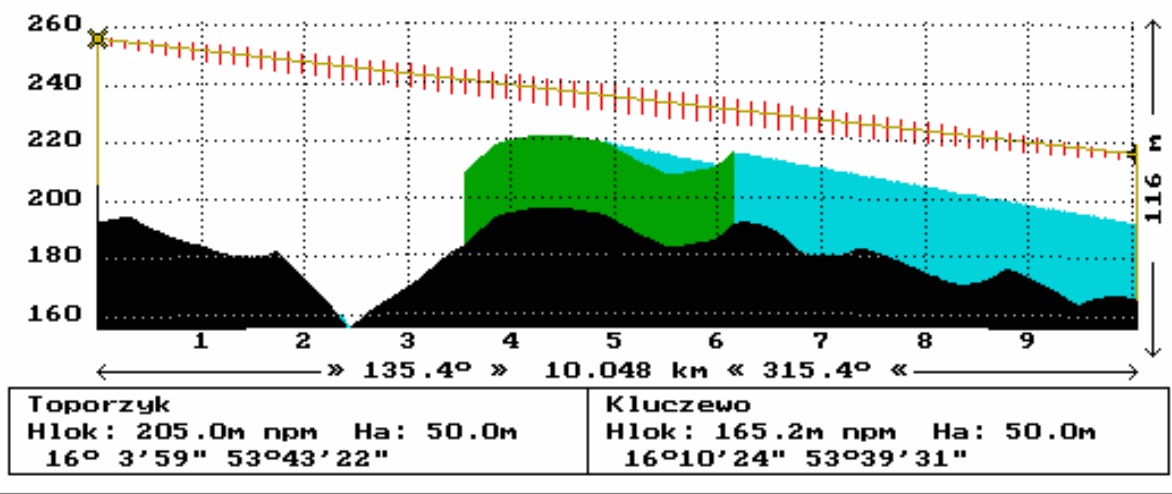
- ustalenie możliwości dojazdu do wyznaczonych punktów oraz zakresu ewentualnych prac w przystosowaniu terenu albo dróg do ruchu samochodowego w okresie budowy i eksploatacji linii radiowej,
- wybór placu budowy wieży stacji radioliniowej i ustalenie zakresu prac na jego przystosowanie,
- ustalenie i uściślenie rozmiarów (wysokości) miejscowych przedmiotów terenowych oraz ewentualnie na odcinkach przelotowych (wysokość i położenie w stosunku do anten wież triangulacyjnych, budynków, wysokość lasu),
- zbadanie obecności źródeł zakłóceń,
- określenie trasy budowy linii przewodowych do ewentualnych węzłów usługowych,
- ocena możliwości oraz sposobów zasilania stacji z sieci energetycznej,

Szczególne rangę powinno mieć ustalenie miejsc rozwinięcia stacji węzłowych i końcowych. Dobrze wybrane miejsca na rozwinięcie tych stacji, to gwarancja uniknięcia zakłóceń wzajemnych i od innych stacji radiowych, a w konsekwencji wzrost jakości transmisji, skrócenie doprowadzeń kablowych oraz zmniejszenie ilości stacji przekaźnikowych.

### **4. Wykonanie przekrojów odcinków transmisyjnych**

Po ustaleniu lokalizacji stacji wykonuje się profile odcinków transmisyjnych pomiędzy sąsiednimi stacjami w celu określenia rzeźby terenu oraz przeszkód naturalnych i sztucznych, występujących na danym odcinku, co stanowi podstawę do określenia wysokości zawieszenia anten. Profilem odcinka transmisyjnego jest przekrój terenu wzdłuż linii łączącej podstawy

masztów (wież) anten, skorygowany z punktu widzenia fali radiowej o czynniki związane z krzywizną ziemi, zakrzywieniem trajektorii fali radiowej w troposferze oraz pierwszą strefą Fresnela. Jak już wspomniano można wykorzystać do tego celu istniejące programy komputerowe sprzęgnięte z komputerową mapą terenu, ewentualnie inne aplikacje, które wymagają wykorzystania mapy. Wykonanie przekrojów, ogólnie rzecz ujmując, polega na odczytaniu z mapy w skali 1:100000 lub 1:50000 rzędnych terenu w funkcji odległości od stacji wzdłuż prostej łączącej stacje oraz określeniu rodzaju i położenia przeszkód na odcinku.



F= 13.500000 GHz P= 30.0 dBm  
**OBLICZENIA WG RAPORTU 715 CCIR**  
 Tłumienie: 135.1 dB (wolna przestrzeń: 135.1 dB)  
 Natężenie: 54.7 dBuV/m Gęstość mocy: -61.1 dBm/m2  
 Propagacja w wolnej przestrzeni!

Rys. 1. Przekrój odcinka transmisyjnego wykonany za pomocą programu komputerowego i cyfrowej mapy terenu (mapa i oprogramowanie wykonane w IŁ Oddz. Wrocław)

Przekrój wykreśla się na łuku, którego krzywizna jest określona zależnością:

$$s = \frac{d_1 \cdot d_2}{12,74 \cdot K_e} \quad (1)$$

gdzie:

s - wielkość strzałki krzywizny łuku w [m],

d<sub>1</sub>- odległość od początku odcinka w [km],

d<sub>2</sub>- odległość od końca odcinka w [km],

K<sub>e</sub>- współczynnik refrakcji, opisujący stosunek promienia zastępczego dla fal radiowych do promienia rzeczywistego Ziemi.

## 5. Stopa błędów a stosunek sygnału do zakłóceń

W procesie projektowania cyfrowych linii radiowych należy uwzględnić charakterystyczne cechy wynikające z transmisji sygnałów drogą radiową. Należą do nich zaniki i zakłócenia, mogące spowodować niedopuszczalne pogorszenie jakości transmisji. Zatem przy projektowaniu linii radiowych konieczne jest dokonanie obliczeń parametrów jakościowych tych linii z uwzględnieniem kompatybilności w środowisku elektromagnetycznym. Wskazane jest by obliczenia te, z uwagi na dużą liczbę źródeł zakłócających, były dokonywane przy użyciu techniki komputerowej.

Stopa błędów bitowych w sygnale cyfrowym transmitowanym w cyfrowej linii radiowej jest determinowana stosunkiem sygnału do zakłóceń (szumu) S/Z oraz rodzajem zastosowanej modulacji.

Teoretyczna wartość stosunku sygnału do zakłóceń<sup>1</sup> na wejściu układu decyzyjnego jest określona zależnością:

$$\frac{S}{Z} = \frac{P_s}{P_{sz}} = \frac{P_s}{kTb} = \frac{P_s}{kT \frac{f_s}{2}} \quad (2)$$

gdzie:

$P_s$  - moc sygnału użytecznego na wejściu układu decyzyjnego, w [W],

$P_{sz}$  - moc szumu cieplnego w paśmie skutecznym sygnału cyfrowego, w [W],

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \left[ \frac{W}{Hz \cdot ^\circ K} \right]$  - stała Boltzmana,

$T$  - temperatura bezwzględna [ $^\circ K$ ] w praktyce przyjmuje się [ $T = 293^\circ K$ ]

$b = \frac{f_s}{2}$  - skuteczna szerokość pasma szumów na wejściu układu decyzyjnego w [Hz], równa połowie szybkości symbolowej  $f_s$  w [Bodach]

W tabeli 1 przedstawiono zależność stopy błędów od stosunku sygnał/zakłócenie w cyfrowych liniach radiowych dla różnych rodzajów modulacji

Tabela 1

Rodzaj modulacji		2 PSK	4 PSK 4 QAM	8 PSK	16 PSK	16 QAM	64 QAM
S/Z [dB] (wartości teoretyczne)	BER= $10^{-3}$	7,4	10,4	15,3	21	17,3	23
	BER= $10^{-8}$	12	15,1	20,1	26,2	22,1	28,0

<sup>1</sup> W warunkach idealnych sygnał użyteczny ma idealne prostokątne impulsy, zakłócenie jest szumem gausowskim, stosuje się optymalną detekcję koherentną.

S/Z <sub>pr</sub> [dB] (wartości progowe, przyjmowane w prak tyce)	BER=10 <sup>-3</sup>	10,4	13,4	18,3	24	20,3	26,0
f <sub>s</sub> [Bod] szybkość symbolowa		f <sub>b</sub>	f <sub>b</sub> /2	f <sub>b</sub> /3	f <sub>b</sub> /4	f <sub>b</sub> /4	f <sub>b</sub> /6
T <sub>s</sub> =1/f <sub>s</sub> [s] czas trwania symbolu		1/ f <sub>b</sub>	2/ f <sub>b</sub>	3/ f <sub>b</sub>	4/ f <sub>b</sub>	4/ f <sub>b</sub>	6/ f <sub>b</sub>
b=f <sub>s</sub> /2 [Hz] szerokość pasma sygnału cyfrowego		f <sub>b</sub> /2	f <sub>b</sub> /4	f <sub>b</sub> /6	f <sub>b</sub> /8	f <sub>b</sub> /8	f <sub>b</sub> /12
B=2·b=f <sub>s</sub> [Hz] szerokość pasma odbiornika		f <sub>b</sub>	f <sub>b</sub> /2	f <sub>b</sub> /3	f <sub>b</sub> /4	f <sub>b</sub> /4	f <sub>b</sub> /6

f<sub>b</sub> - szybkość binarna sygnału cyfrowego

Zależność (1) w mierze logarytmicznej ma następującą postać:

$$S / Z [dB] = 114 + P_s [dBm] - 10 \log b [MHz] \quad (3)$$

W celu uzyskania praktycznie tej samej stopy błędów co w warunkach teoretycznych powiększa się odstęp sygnału od zakłóceń o około 2 dB przy stopie błędów 10<sup>-3</sup> do około 4,5 dB przy stopie błędów 10<sup>-8</sup>. Do obliczeń przybliżonych można przyjąć 3 dB pogorszenie dla stopy błędów 10<sup>-3</sup>. Jest to równoznaczne przyjęciu dwukrotnie większej wartości szumów od określonych w zależności (1). Zatem

$$\left( \frac{S}{Z} \right)_{pr} = \frac{P_s}{2P_{sz}} = \frac{P_s}{kTf_s} \quad (4)$$

Stosunek sygnał/zakłócenia odniesiony do wejścia odbiornika uwzględnia wpływ jego szumów własnych, poprzez wprowadzenie współczynnika szumów odbiornika n<sub>sz</sub> [1]:

$$\left( \frac{S}{Z} \right)_{we} = \frac{P_s}{n_{sz} kTB} \quad (5)$$

gdzie:

P<sub>s</sub> - moc sygnału użytecznego na wejściu odbiornika w [W],

B - szerokość pasma odbiornika, w [Hz].

W celu uzyskania wymaganej stopy błędów

$$\left(\frac{S}{Z}\right)_{we} \gg \left(\frac{S}{Z}\right)_{pr} = \frac{P_{pr}}{n_{sz} kTB} \quad (6)$$

gdzie:

$P_{pr}$  - wartości progowe mocy sygnału określone w praktyce dla danego rodzaju modulacji,

$(S/Z)_{pr}$  - wartości progowe stosunku mocy sygnału do mocy szumu podane w tabeli 1.

Minimalna progowa wartość mocy sygnału na wejściu odbiornika ( $P_{pr}$ ), która zapewnia uzyskanie wymaganej stopy błędów wynosi:

$$P_{pr} [dBm] = \left(\frac{S}{Z}\right)_{pr} [dB] + n_{sz} [dB] - 114 + 10 \log B [MHz] \quad (7)$$

dla  $T=290^{\circ}K$

Wartość mocy progowej na wejściu odbiornika jest zwykle podawana w specyfikacji aparatury. Wynosi ona dla typowych urządzeń radioliniowych nowej generacji od - 95 dBm do - 82 dBm.

W przypadku oddziaływania na wejście odbiornika zakłóceń zewnętrznych o mocy  $P_z^2$ , stosunek sygnału do zakłóceń może być określony za pomocą zależności:

$$\left(\frac{S}{Z}\right)_{wez} = \frac{P_s}{P_z + n_{sz} kTB} \gg \left(\frac{S}{Z}\right)_{pr} \quad (8)$$

$P_z = P_{z1} + P_{z2} + P_{z3} + \dots$  w przypadku kilku różnych zakłóceń.

W takim przypadku przesunięcie progu odbioru wyznacza się z zależności:

$$\frac{P_{prz}}{P_{pr}} = \frac{P_z + n_{sz} kTB}{n_{sz} kTB} = \frac{P_z}{n_{sz} kTB} + 1 = \frac{F_{az}}{n_{sz}} + 1 \quad (9)$$

gdzie:

$P_{prz}$  - moc progowa sygnału na wejściu odbiornika w obecności zakłóceń,

$F_{az}$  - antenowy współczynnik zakłóceń zewnętrznych zdefiniowany w sprawozdaniu CCIR670

$$F_{az} = \frac{P_z}{kTB} \quad (10)$$

<sup>2</sup> jeśli zakłócenia mają charakter taki, że można je modelować rozkładem normalnym.



## 6. Obliczanie mocy sygnału na wejściu odbiornika

Moc sygnału (lub zakłócenia) na wejściu odbiornika w linii radiowej wynosi:

$$P_o = \frac{P_n G_n G_o}{L_{fn} \cdot L_{\alpha n} \cdot L_{wp} \cdot L_d \cdot L_z \cdot L_o \cdot L_{fo} \cdot L_{\alpha o} \cdot L_p} \quad (11)$$

gdzie:

$P_o$  - moc sygnału odbieranego na wejściu odbiornika w [mW],

$P_n$  - moc sygnału na wyjściu nadajnika w [mW],

$G_n$  - zysk anteny nadawczej,

$G_o$  - zysk anteny odbiorczej,

$L_{fn}$  - tłumienie traktu fiderowo-antenowego po stronie nadawczej,

$L_{\alpha n}$  - tłumienie promieniowania anteny nadawczej w kierunku anteny odbiorczej w stosunku do promieniowania maksymalnego,

$L_{wp}$  - tłumienie wolnej przestrzeni,

$L_d$  - tłumienie dodatkowe powodowane przeszkodami na trasie propagacji fali,

$L_z$  - tłumienie zaników (wielodrogowości),

$L_o$  - tłumienie zaników opadowych (dla linii pracujących na częstotliwościach powyżej 10 Ghz),

$L_{fo}$  - tłumienie traktu fiderowo-antenowego po stronie odbiorczej,

$L_{\alpha o}$  - tłumienie promieniowania anteny odbiorczej w kierunku anteny nadawczej w stosunku do promieniowania maksymalnego,

$L_p$  - tłumienie polaryzacji, które jest wynikiem niezgodności polaryzacji fali dochodzącej do anteny odbiorczej i polaryzacji anteny odbiorczej.

Stosunek mocy sygnału na wyjściu nadajnika do mocy sygnału na wejściu odbiornika jest tłumieniem transmisji

$$L_t = \frac{P_n}{P_o} \quad (12)$$

Zależność 10 może być wyrażona w mierze logarytmicznej

$$P_o[\text{dBm}] = P_n[\text{dBm}] + G_n[\text{dB}] + G_o[\text{dB}] - L_{fn}[\text{dB}] - L_{\alpha n}[\text{dB}] - L_{wp}[\text{dB}] - L_d[\text{dB}] - L_z[\text{dB}] - L_o[\text{dB}] - L_{fo}[\text{dB}] - L_{\alpha o}[\text{dB}] - L_p[\text{dB}] \quad (12)$$

Zazwyczaj w danych technicznych aparatury radioliniowej określone są:

- moc wyjściowa sygnału w.cz. na wyjściu nadajnika,
- zysk anten nadawczej i odbiorczej,
- straty mocy w traktach fiderowo-antenowych zarówno po stronie nadawczej jak i odbiorczej.

Również tłumienie promieniowania anteny nadawczej w kierunku anteny odbiorczej i odwrotnie, definiowane jako stosunek gęstości mocy promieniowanej (jaka byłaby odbierana) przez antenę nadawczą w (z) kierunku maksymalnego promieniowania do gęstości promieniowanej (odbieranej) w kierunku odchylonym o pewien kąt od kierunku maksymalnego promieniowania, może być określona za pomocą charakterystyki kierunkowości promieniowania anteny, która powinna być podawana w danych technicznych aparatury.

Schemat blokowy odcinka transmisyjnego linii radiowej i przykładowy rozkład poziomów mocy jest pokazany na rys. 2.

**Tłumienie wolnej przestrzeni**  $L_{wp}$  determinowane odległością ( $d$ ) między antenami i długością fali ( $\lambda$ ) oblicza się z zależności:

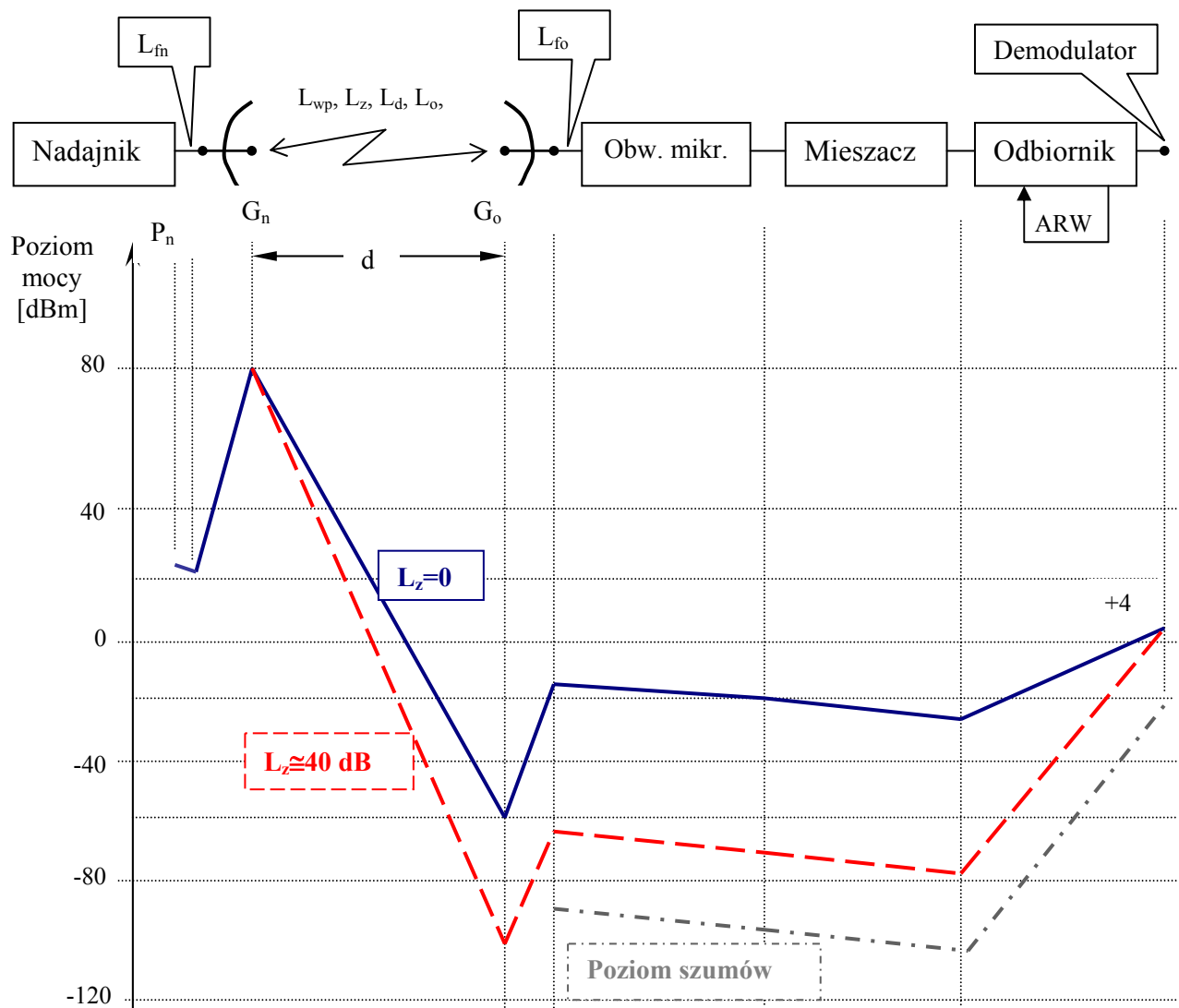
$$L_{wp} = \left( 4\pi \frac{d}{\lambda} \right)^2 \quad (13)$$

gdzie:

$$\lambda[m] = \frac{300}{f[MHz]} \quad (14)$$

Podstawiając wartość częstotliwości ( $f$ ) w [GHz] i odległość ( $d$ ) w [km] mamy:

$$L_{wp} [dB] = 92,5 + 20 \log f(GHz) + 20 \log d(km) \quad (15)$$



Rys.2. Schemat blokowy odcinka transmisyjnego linii radiowej i przykładowy rozkład poziomów mocy

**Tłumienie dodatkowe,  $L_d$**  powodowane przeszkodami na trasie propagacji fali zależy od:

- kształtu przekroju (profilu) trasy,
- kształtu i lokalizacji przeszkody,
- długości fali radiowej,
- prześwitu, czyli od stosunku wysokości szczytu przeszkody od linii łączącej anteny do promienia pierwszej strefy Fresnela,
- istnienia przeszkody ekranującej (np. zalesienia).

W przekroju (profilu) trasy uwzględnia się zakrzywienie drogi propagacji fali wskutek jej refrakcji w troposferze. Przyjmuje się zatem tzw. zastępczy promień Ziemi ( $R_z$ ), który w warunkach polskich wynosi 8500 km. Zmiany wartości wskaźnika refrakcji w czasie i związane z tym zmiany tłumienia traktuje się jako zaniki.

Na podstawie sprawozdania CCIR 715-2 wartość tłumienia dodatkowego oblicza się ze wzoru:

$$L_d [dB] = J(V) + T(e) + \theta(x) \quad (16)$$

gdzie:

$J(V)$  - opisuje tłumienie fali powodowane dyfrakcją na ostrym klinie,

$T(e)$  - określa tłumienie powodowane przeszkodą o zaokrąglonym wierzchołku o promieniu  $R > 0$ ,

$B(x)$  - jest tłumieniem powodowanym propagacją fali wzdłuż powierzchni przeszkody zaokrąglonej

Tłumienie w każdym przypadku jest zależne od prześwitu, którego parametrem jest stosunek

$$\mathbf{h/r_f}$$

gdzie:

$h$  - stanowi wysokość szczytu przeszkody ponad linią prostą łączącą anteny nadawczą i odbiorczą (gdy szczyt przeszkody jest poniżej tej linii, to  $h$  jest ujemne),

$r_f$  - promień pierwszej strefy Fresnela w miejscu przeszkody wyznaczamy jako:

$$r_f [m] = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f \cdot d}} \quad (17)$$

gdzie:

$d_1, d_2$  - odległość do przeszkody od początku i końca odcinka w [km],

$f$  - częstotliwość w [GHz],

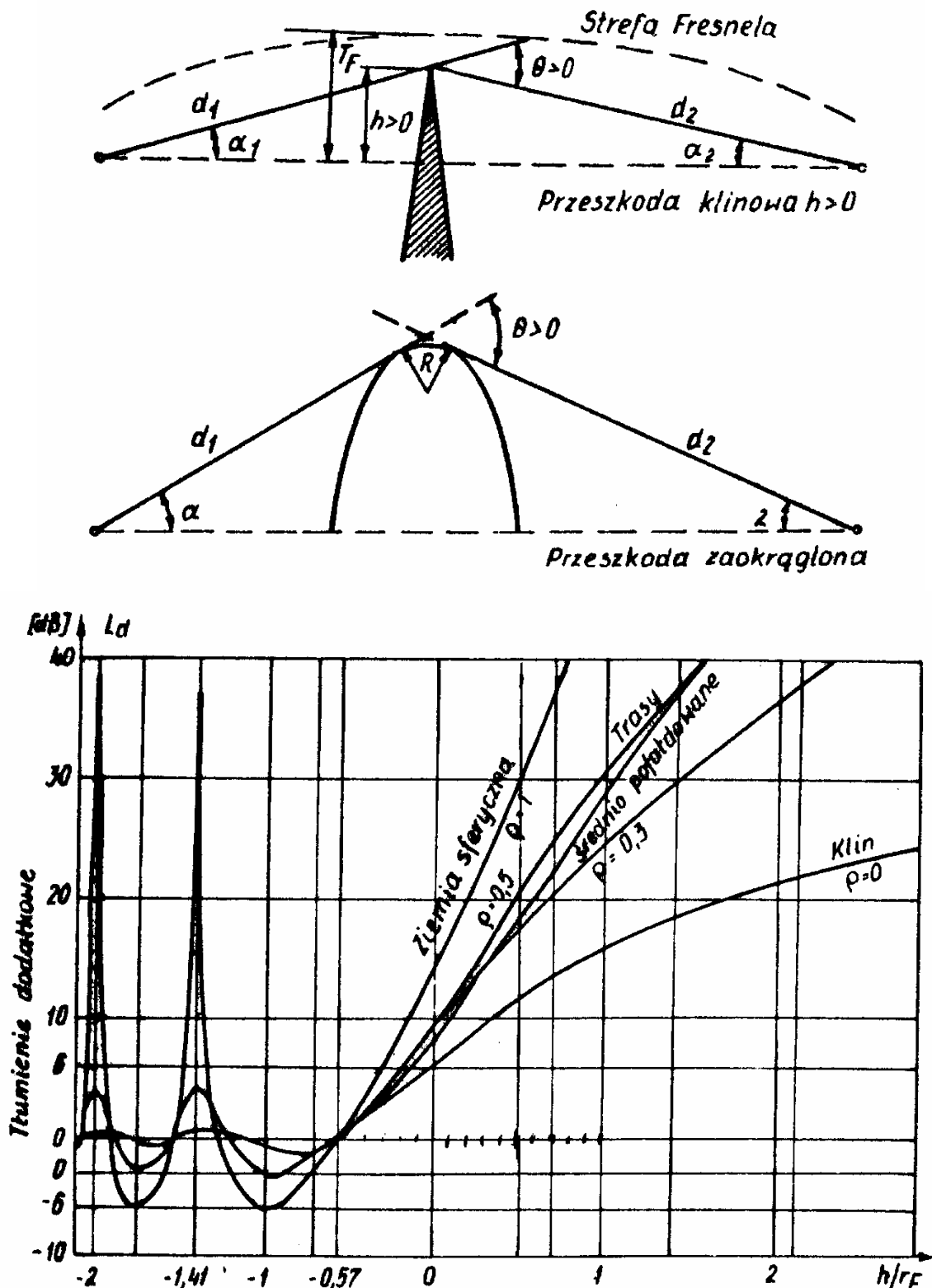
$d$  - długość odcinka w [km].

Tłumienie dodatkowe wynosi:

- na przeszkodzie klinowej w zależności od prześwitu 6,4 dB przy  $h/r_f = 0$ : około 20 dB przy  $h/r_f = 2$ ,
- na przeszkodzie zaokrąglonej około 14 dB przy  $h/r_f = 0$  i powyżej 40 dB przy  $h/r_f = 1$ ,

– na trasie lądowej pofalowanej z pokryciem leśnym albo w postaci zabudowań przy  $h/r_f = 0$  około 8,5 dB i przy  $h/r_f = 1$  około 30 dB.

W [1] znajduje się wykres, z którego można w miarę precyzyjnie wyznaczyć tłumienie  $L_d$  powodowane przeszkodami na trasie (rys.3).



Rys. 3. Propagacja na trasach linii radiowych z przeszkodami a) rodzaje przeszkód, b) tłumienie dodatkowe powodowane przeszkodami

**Tłumienie zaników ( $L_z$ )** wyrażane jest zazwyczaj poprzez ich głębokość, która jest wielkością statystyczną. Prawdopodobieństwo wystąpienia zaniku o głębokości  $L_z$ , charakteru interferencyjnego w czasie najgorszego miesiąca można określić wzorem (sprawozdanie CCIR 338-5) [1]:

$$P_r(L_z) = K \cdot Q \cdot f^B \cdot d^C \cdot \frac{1}{L_z} \quad (18)$$

$P_r$  - prawdopodobieństwo wystąpienia szybkiego zaniku Rayleigh'a o głębokości  $L_z$ ,

$K$  - współczynnik warunków klimatycznych,

$Q$  - współczynnik warunków terenowych,

$f$  - częstotliwość, w [GHz],

$B$  - współczynnik częstotliwościowy,

$d$  - długość trasy odcinka linii,

$C$  - współczynnik odległościowy.

Dla przeciętnych warunków przyjęto w [2]:

$$K \cdot Q = 6 \cdot 10^{-5}, B = 1 C = 3$$

stąd zależność przybiera postać

$$P_r = 6 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot \frac{d^3}{L_z} \quad (19)$$

Przy założeniu dopuszczalnego prawdopodobieństwa wystąpienia zaniku można na podstawie powyższej zależności obliczyć głębokość zaniku

$$L_z = 6 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot \frac{d^3}{P_r} \quad (20)$$

lub w mierze logarytmicznej

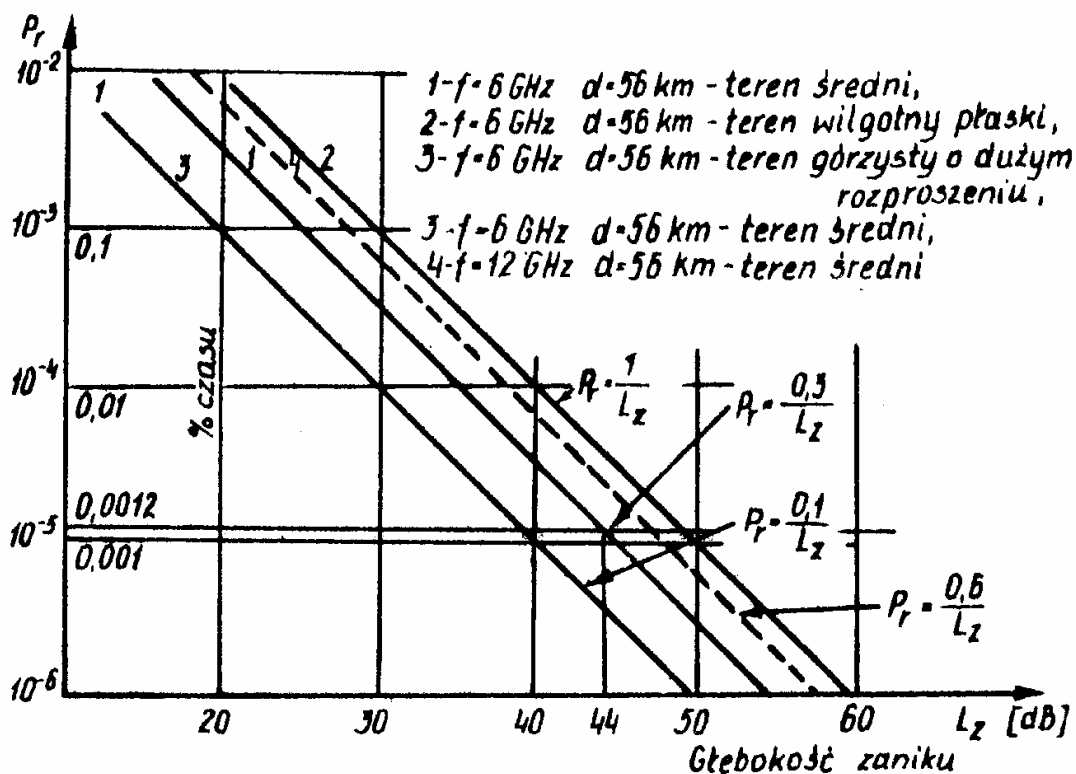
$$L_z[\text{dB}] = -42,2 + 10 \log f[\text{GHz}] + 30 \log d [\text{km}] - 10 \log P_r \quad (21)$$

Dla terenów podmokłych i nadmorskich  $K \cdot Q = 10^{-6}$ , natomiast dla terenów

górzystych suchych  $K \cdot Q = 10^{-7}$

Wartość tłumienia zaników sygnału użytecznego na odcinku linii radiowej zależy od wymaganej jakości transmisji określonej w wymaganiach, czyli od procentu czasu przekroczenia dopuszczalnej stopy błędów. Np. dla odcinka linii radiowej o długości 30 km i częstotliwości 15 GHz w terenie o średnim pofałdowaniu, dopuszczalny procent czasu przekroczenia dopuszczalnej stopy błędów  $10^{-3}$  wynosi 0,00005, stąd głębokość zaników będzie przekraczać wartość  $L_z$  obliczoną z zależności (21):

$$L_z[\text{dB}] = -42,2 + 10 \log 15[\text{GHz}] + 30 \log 30 [\text{km}] - 10 \log 0,00005 = 56,8 \text{ dB}$$



Rys. 4. Rozkłady prawdopodobieństwa zaników powodowanych wielodrogowością

**Tłumienie polaryzacji  $L_p$** , definiowane jako stosunek mocy odbieranej z fali o polaryzacji zgodnej z polaryzacją anteny do mocy niezgodnej, przy tej samej gęstości mocy dochodzącej do anteny odbiorczej, może wynosić od 2 do 10 dB.

#### **Tłumienie zaników opadowych .**

Na trasach linii radiowych pracujących na częstotliwościach powyżej 10 GHz, w małym procencie czasu, mogą występować zaniki opadowe. Głębokość i czas trwania tych zaników mogą przewyższać wartości zaników powodowane przez interferencje fal dochodzących do anteny odbiorczej różnymi drogami wskutek propagacji wielodrogowej. Poniższa metoda szacowania głębokości zaników opadowych została przedstawiona w zaleceniu ITU-R P.530-7. Metoda jest słuszna dla częstotliwości 40 GHz i długości łącza radiowego do 60 km dla dowolnej lokalizacji na świecie.

1. Z map klimatycznych zamieszczonych w zaleceniu ITU-R P.837-1 należy określić strefę opadową stosowną dla miejsca funkcjonowania projektowanej linii radiowej. Na terenie Polski występują dwie strefy opadowe: część północna kraju leży w strefie E, natomiast część środkowa i południowa w strefie H. Intensywność opadów przekraczana w danej strefie z prawdopodobieństwem 0,01% w roku wynosi:

**strefa E –  $R_{0,01}=22$  mm/h, strefa H -  $R_{0,01}=32$  mm/h.**

2. Tłumienie jednostkowe ( $\gamma_R$ ), w 0,01% czasu powodowane przez opad o intensywności R wynosi:

$$\gamma_R = k \cdot R_{0,01}^\alpha \quad (22)$$

współczynniki  $k$  i  $\alpha$  są obliczane jako:

$$k = \frac{k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2 \Theta \cdot \cos(2\tau)}{2} \quad (23)$$

$$\alpha = \frac{k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \Theta \cdot \cos(2\tau)}{2k} \quad (24)$$

gdzie:  $\tau$  jest kątem pomiędzy płaszczyzną polaryzacji fali radiowej a płaszczyzną horyzontu,

$\Theta$  jest kątem elewacji trasy radiowej. W łączach naziemnych  $\Theta=0$ .

Dla polaryzacji **poziomej H**, kąt  $\tau=0$ , a dla polaryzacji **pionowej V**,  $\tau=90^\circ$ .

Wartości współczynników regresji  $k_H$ ,  $k_V$ ,  $\alpha_H$ ,  $\alpha_V$ , odpowiednio dla polaryzacji poziomej i pionowej, są podane w tabeli 2.

TABELA 2. Współczynniki regresji do wyznaczenia jednostkowego tłumienia deszczu  $\gamma_R$ .

Częstotliwość GHz	$k_H$	$k_V$	$\alpha_H$	$\alpha_V$
4	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$5,91 \cdot 10^{-4}$	1,121	1,075
6	0,00175	0,00155	1,308	1,265
7	0,00301	0,00265	1,332	1,312
8	0,00454	0,00395	1,327	1,310
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
12	0,0188	0,0168	1,217	1,200
15	0,0367	0,0335	1,154	1,128
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
25	0,124	0,113	1,061	1,03
30	0,187	0,167	1,021	1
35	0,263	0,233	0,979	0,963
40	0,35	0,31	0,939	0,929

3. Efektywna długość trasy jest wyznaczana za pomocą zależności (dla długości przęseł  $d \leq 60$  km)

$$d_{ef} = d[km] \cdot r \quad (25)$$

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d[km]}{d_0}} \quad d_0 = 35e^{-0,015R_{0,01}} \quad (26)$$

4. Tłumienie  $L_o$  spowodowane opadami deszczu, którego wartość może być przekroczona z prawdopodobieństwem 0,01% w 0,01% czasu danego roku wynosi:

$$L_o(0,01) = \gamma_R \cdot d_{ef} \Rightarrow L_o(0,01)[dB] = 10 \log(\gamma_R \cdot d_{ef}) \quad (27)$$

Tłumienie zaników opadowych  $L_o(p)$  przekraczane z innym prawdopodobieństwem niż 0,01% (wzór słuszny dla 0,0001% do 1%):

$$L_o(p) = L_o(0,01\%) \cdot 0,12 \cdot p^{-(0,546+0,43 \cdot \log p)} \quad (28)$$

### **Moc sygnału użytecznego i jego zapas na wejściu odbiornika.**

Dla dobrze zaprojektowanego odcinka przelotowego linii radiowej tłumienia  $L_{\alpha n}$ ,  $L_d$ ,  $L_{\alpha o}$ ,  $L_p$  można zaniedbać. Zatem moc sygnału użytecznego na wejściu odbiornika będzie zapisana zależnością:

$$P_o[\text{dBm}] = P_n[\text{dBm}] + G_n[\text{dB}] + G_o[\text{dB}] - L_{fn}[\text{dB}] - L_{wp}[\text{dB}] - L_z[\text{dB}] - L_{fo}[\text{dB}] - L_o[\text{dB}] \quad (29)$$

Moc sygnału użytecznego na wejściu odbiornika w czasie trwania zaniku o głębokości  $L_z$  (względnie zaniku opadowego  $L_o$ , jeśli jest brany pod uwagę) powinna być większa od mocy progowej  $P_{pr}$ .

$$P_s > P_{pr}$$

Jeśli  $L_z = 0$  dB ( $L_o = 0$  dB) to moc sygnału na wejściu odbiornika będzie większa i wynosi:

$$P_{so}[\text{dB}] = P_n[\text{dB}] + G_n[\text{dB}] + G_o[\text{dB}] - L_{fn}[\text{dB}] - L_{wp}[\text{dB}] - L_{fo}[\text{dB}] \quad (30)$$

Odstęp poziomów mocy  $P_{so}[\text{dB}]$  i mocy  $P_{pr}[\text{dB}]$  jest zapasem lub marginesem mocy:

$$Z[\text{dB}] = P_{so}[\text{dB}] - P_{pr}[\text{dB}] \quad (31)$$

Zapas mocy  $Z$  powinien być większy od głębokości zaników  $L_z$

$$Z[\text{dB}] > L_z[\text{dB}]$$

### **Moc zakłóceń na wejściu odbiornika**

Moc zakłóceń,  $P_z$ , na wejściu odbiornika jest sumą wszystkich zakłóceń, które do niego docierają:

$$P_z[\text{dB}] = P_{zw}[\text{dBm}] + P_{zo}[\text{dBm}] + P_{z1}[\text{dBm}] + P_{z2}[\text{dBm}] + \dots \quad (32)$$

gdzie:

$$P_{zw}[\text{dBm}] = 114 + n_{sz}[\text{dB}] + 10 \log B \quad (33)$$

jest mocą zakłóceń (szumów) wewnętrznych, wprowadzanych przez odbiornik, odniesionych do jego wejścia,

$P_{zo}[\text{dBm}]$  - moc zakłóceń tłowych otoczenia, którą w zakresie częstotliwości od kilku do

kilkudziesięciu GHz można oszacować w granicach od 0,3 kTB do kTB,

$P_{z1}$ ,  $P_{z2}$ , ... - inne zakłócenia zewnętrzne, do których zaliczamy:

- zakłócenia wewnątrzsystemowe, powodowane przez źródła należące do tej samej lub innej linii radiowej,
- zakłócenia pozasystemowe, od innych źródeł zakłócających (stacje satelitarne, nadajniki telewizyjne i radiofoniczne, radary).

Moc tych zakłóceń może być obliczana w taki sposób jak moc sygnału użytecznego, bez uwzględniania zaników ( $L_z$ ). Do obliczeń przyjmować należy wartość medianową, gdyż skutek różnych długości tras, a także różnicy częstotliwości, ewentualnie polaryzacji fali dla sygnałów użytecznego i zakłócającego, zaniki można uważać za nieskorelowane. Przypadek krytyczny dotyczący równoczesnego wystąpienia głębokiego zaniku zarówno sygnału użytecznego jak i zakłócającego można uznać za mało prawdopodobny.



## 7. Wybór trasy linii radiowej – zasady i kryteria

**Lokalizacja stacji radioliniowej** jest determinowana wieloma, zazwyczaj sprzecznymi czynnikami. Niemniej ogólne zalecenia mogą być następujące:

- miejsce lokalizacji to najwyższy punkt w otaczającym terenie,
- powinna być droga dojazdowa i linia energetyczna do wykorzystania jako źródło zasilania,
- budowa wieży na glebie najniższej klasy,
- niewielka odległość od siedzib ludzkich.
- stacje początkowe i końcowe powinny być lokalizowane jak najbliżej stacji teletransmisyjnych (central),
- nie należy wybierać miejsc lokalizacji na terenach leśnych, w pobliżu lotnisk, zakładów przemysłowych, linii energetycznych wysokiego napięcia, terenów wojskowych,
- konieczne uzgodnienie lokalizacji z odnośnymi władzami.

Należy unikać lokalizacji stacji w takich miejscach, aby trasa odcinka transmisyjnego nie przebiegała nad terenem o dużym współczynniku odbicia fal radiowych (duże rozlewiska wodne i mokradła, duże płaskie niepokryte obszary. Może to powodować głębokie zaniki sygnału wskutek interferencji fali bezpośredniej i odbitej.

**Średnia długość odcinka transmisyjnego** w linii radiowej jest zależna od wielu czynników technicznych, ekonomicznych i eksploatacyjnych. Zwiększanie długości odcinka transmisyjnego powoduje zmniejszanie liczby stacji retransmisyjnych (mniejsze koszty) oraz zmniejszanie zakłóceń wprowadzanych przez urządzenia. Jednak następuje wzrost tłumienia na trasie linii i wzrost tłumienia zanikowego, potrzebne są wyższe wieże, rośnie wartość zakłóceń (zaników) interferencyjnych. Potrzebne są nadajniki o większych mocach. Ogólnie można powiedzieć, że skracanie długości odcinka transmisyjnego poprawia wskaźniki techniczne, ekonomiczne i kompatybilnościowe.

W praktyce projektowej przyjmuje się średnie długości odcinków determinowane zakresem częstotliwości (tabela 3).

TABELA 3

Zakres częstotliwości [GHz]	2	4	6	7 - 8	11	13 - 18
Średnia długość odcinka [km]	65	50	45	40	35	kilkanaście km

### **Rejony lokalizacji stacji retransmisyjnych**

Po wybraniu lokalizacji stacji początkowej i końcowej, mierzy się na mapie w skali 1:100000 odległość między nimi w linii prostej, co daje w przybliżeniu długość  $D$  całej relacji. Długość całej relacji zwiększa się o 10% ze względu na to, że trasa wieloodcinkowej linii radiowej powinna być linią łamaną. Ma to na celu uniknięcie zakłóceń między stacjami pracującymi na tych samych częstotliwościach i polaryzacjach fal. Wartość minimalnego kąta między kierunkiem promieniowania anteny na stacji 1 i 4 a linią prostą łączącą te stacje określa się dla każdego zakresu częstotliwości w zależności od charakterystyki promieniowania anten. Można przyjmować następujące wartości:

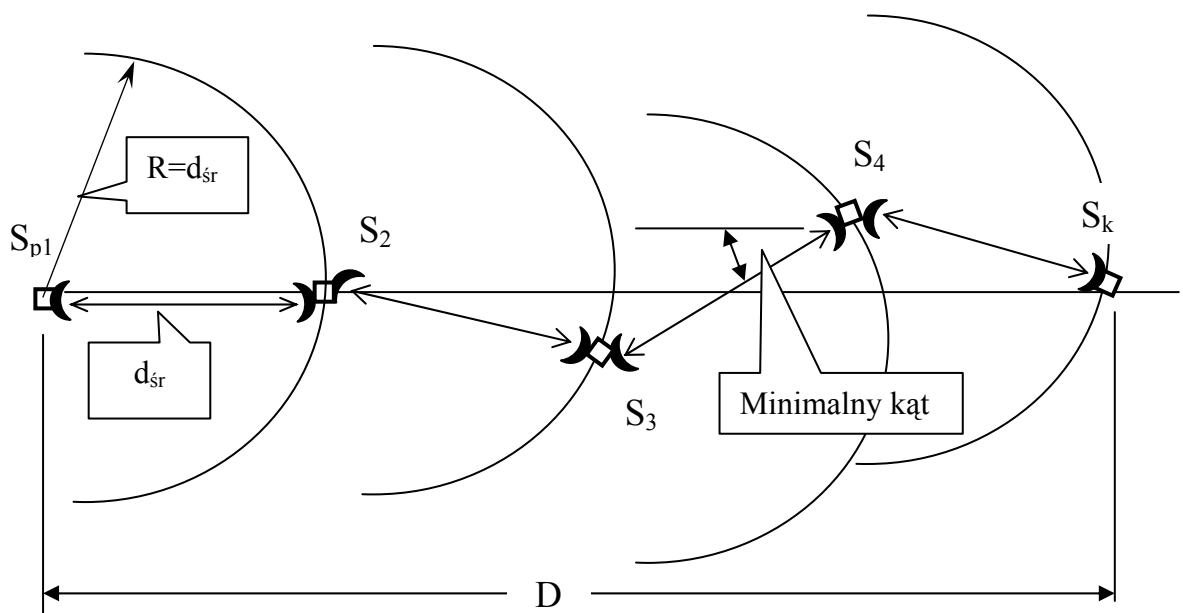
- zakres częstotliwości 2 GHz - minimalny kąt  $5^\circ$ ,
- zakres częstotliwości 4-8 GHz - minimalny kąt  $3^\circ$ ,
- zakres częstotliwości 10-13 GHz - minimalny kąt  $2^\circ$

Otrzymaną długość trasy  $D$  dzieli się przez średnią długość odcinka  $d_{sr}$  i otrzymuje niezbędną liczbę odcinków przekaźnikowych (z zaokrągleniem w górę):

$$n = \frac{1,1 \cdot D}{d_{sr}} \quad (34)$$

Sposób wyznaczania miejsc lokalizacji stacji retransmisyjnych jest pokazany na rys. 5.

Na mapie fizycznej 1:100000 lokalizuje się stację początkową  $S_{p1}$  i stację końcową. Z punktu lokalizacji stacji początkowej zakreśla się półokrąg o promieniu równym  $d_{sr}$ . Rejon lokalizacji stacji 2 wybiera się w pobliżu punktu przecięcia się półokręgu z linią łączącą stację początkową i końcową. Następnie z punktu lokalizacji stacji 2 zakreśla się kolejny półokrąg o promieniu  $d_{sr}$  i wybiera się podobnie jak poprzednio punkt lokalizacji stacji 3. Analogicznie postępuje się przy wyborze lokalizacji kolejnych stacji retransmisyjnych. W przypadku wyboru miejsca dla stacji 4 należy sprawdzić czy kierunki promieniowania anten stacji 1 i 4 odchyłone są od linii prostej łączącej te stacje o kąt eliminujący zakłócenia w sytuacji gdy stacje te będą pracowały na tych samych częstotliwościach. Podobnie należy sprawdzić kąty dla stacji 2-5, 3-6. Jeśli kąty te są za małe należy dokładniej obliczyć poziomy zakłóceń i ewentualnie skorygować przebieg trasy i lokalizacje stacji, zmienić plan przydziału częstotliwości lub polaryzacji fali w linii.



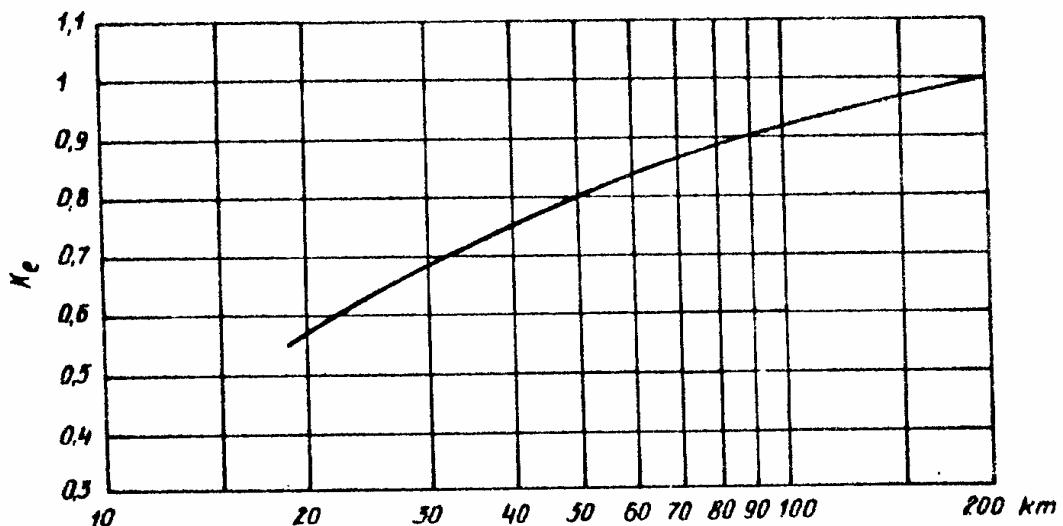
Rys. 5. Wyznaczania miejsc lokalizacji stacji retransmisyjnych

### Przekroje tras i wysokości zawieszenia anten

Po ustaleniu miejsc do budowy stacji przekaźnikowych należy wykonać przekroje pionowe tras poszczególnych odcinków transmisyjnych w celu określenia rzeźby terenu oraz przeszkód naturalnych i sztucznych. Chodzi o wzniesienia, lasy, zabudowania, linie energetyczne, rozlewiska wodne, płaskowyże, wieże innych stacji telekomunikacyjnych. Zależność na krzywiznę łuku powierzchni ziemi podano wcześniej (wzór 1). Przykład przekroju odcinka pokazano na rys. 4. Łuk wykonuje się dla  $K=1$ . Skalę poziomą przekroju dla terenu o małym i średnim pofałdowaniu przyjmuje się zazwyczaj 1:100000 (1 cm = 1 km), natomiast skalę pionową 1:1000 (1 cm = 10 m) lub 1:2000 (1 cm = 20 m).

Po wykonaniu przekrojów wykonuje się obliczenia niezbędnego prześwitu  $h_p$ , czyli odległości szczytu przeszkody od linii prostej łączącej anteny, potrzebnego do zapewnienia optymalnej pracy linii. Do obliczeń szacunkowych na terenie Polski można przyjąć procedurę zaproponowaną w Sprawozdaniu CCIR 338-5, która polega na:

- wyznaczeniu wysokości zawieszenia anten dla prześwitu równego promieniowi pierwszej strefy Fresnela nad najwyższą przeszkodą na trasie  $h_p = r_f$  i współczynnika refrakcji  $K=4/3$ ,
- określeniu współczynnika refrakcji  $K_e(99,9\%)$  dla danej długości odcinka transmisyjnego z wykresu (rys. 6),
- wyznaczeniu wysokości zawieszenia anten dla współczynnika refrakcji  $K_e$  oraz warunków na prześwit  $h_p=r_f$  jeśli jest pojedyncza przeszkoda na trasie i  $h_p=0,3r_f$  jeśli przeszkoda jest rozciągnięta na części trasy,
- przyjęciu większej wysokości zawieszenia anten z określonych w punktach a i c.



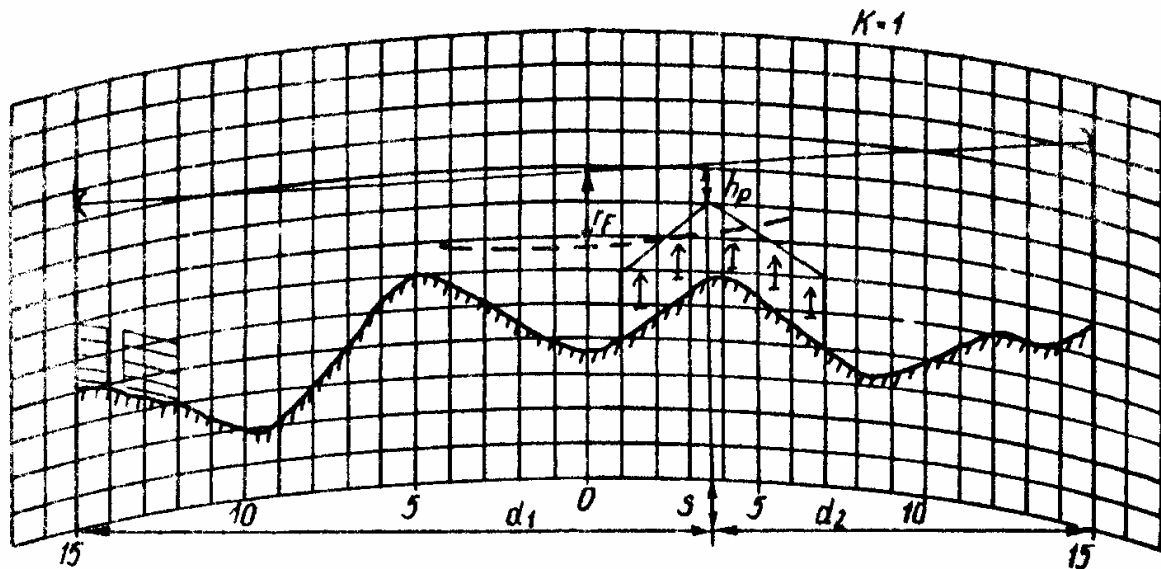
Rys. 6. Zależność współczynnika refrakcji  $K_e$  od długości odcinka transmisyjnego

Wielkość prześwitu, a w szczególności wskaźnik prześwitu  $h_p/r_f$ , ma wpływ na tłumienie trasy, wprowadzając tzw. tłumienie dodatkowe, omówione wcześniej. Warto zauważyć, że dla  $h_p=0,57$  tłumienie dodatkowe przeszkody (niezależnie od jej rodzaju) wynosi 0 dB. Przy  $h_p=r_f$  tłumienie dodatkowe wynosi -6 dB (tłumienie trasy jest mniejsze od tłumienia wolnej przestrzeni) w przypadku przeszkody zaokrąglonej o dużym promieniu krzywizny.

Po obliczeniu prześwitów nad przeszkodami nanosi się ich wielkości na przekrój odcinka, dodając je do wysokości odpowiednich przeszkód. Zwykle wystarcza uwzględnienie jednej lub dwóch przeszkód. Następnie przez punkt określający prześwit nad najwyższą przeszkodą kreśli się linię prostą, aż do przecięcia się jej z liniami pionowymi na końcach odcinka. Punkty przecięcia określają wysokości zawieszenia anten. W przypadku dużych różnic wysokości terenu na końcach odcinka, nachylenie prostej trzeba dobrać tak aby nie zmniejszać prześwitu nad innymi przeszkodami i aby wysokości zawieszenia anten były jak najmniejsze.

Po sporządzeniu przekroju odcinka należy dokonać **weryfikacji wyboru trasy**. Polega ona na sprawdzeniu czy punkt odbicia fali od powierzchni ziemi nie leży w terenie o dużym

współczynnika odbicia (duże rozlewiska wodne, mokradła, duże płaskie tereny bez jakiegokolwiek pokrycia). Może to bowiem powodować głębokie zaniki sygnału wskutek interferencji fali bezpośredniej i odbitej. Należy sprawdzić punkt odbicia dla wskaźników refrakcji  $K=1$ ,  $K=4/3$  i  $K=2/3$ . Jeśli punkt odbicia dla tych wartości  $K$  charakteryzuje się dużym współczynnikiem odbicia, należy zmienić lokalizację jednej lub obu stacji lub zmienić wysokości zawieszenia anten.



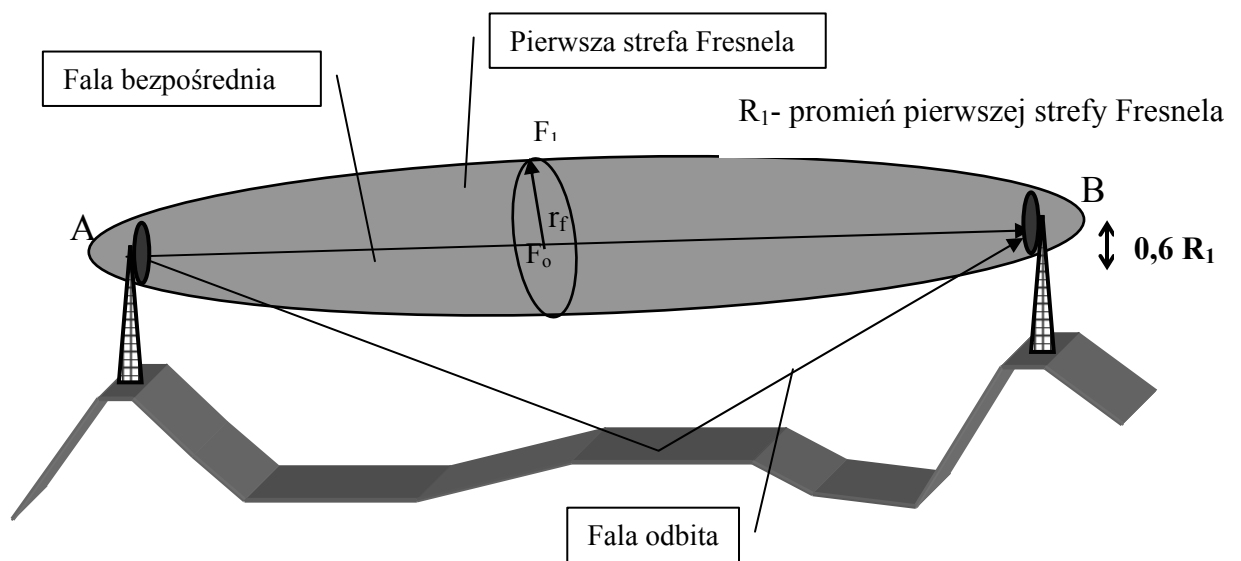
Rys. 7. Przekrój odcinka transmisyjnego linii radiowej

## 8. Inny sposób wyznaczania przekroju trasy odcinka transmisyjnego i wysokości zawieszenia anten

Jak podkreślono wcześniej bardzo istotne znaczenie dla poprawnego funkcjonowania odcinka transmisyjnego linii radiowej ma prawidłowy dobór wysokości zawieszenia anten. Jest to problem ważny ze względu na:

- zapewnienie wiązki mikrofalowej przesyłanej w torze radiowym czystości pierwszej strefy Fresnela,
- istnienie na trasie propagacji fal obszarów odbicia fali zakłócającej falę bezpośrednią,
- występujące zjawisko zakrzywienia trajektorii fal w niejednorodnej troposferze.

Należy zawsze wysokości zawieszenia anten dobierać ze względu na atrybuty fali bezpośredniej i korygować ze względu na falę odbitą, która może zakłócać odbiornik.



Rys. 8. Fala bezpośrednia i fala odbita oraz obszar przestrzeni w którym odbywa się przenoszenie energii między antenami od punktu A do B

Obszar ograniczony okręgiem o promieniu  $r_f$ , czyli pierwsza strefa Fresnela, charakteryzuje się tym, że fazy fal elementarnych docierające do z tego obszaru do punktu B różnią się o kąt  $\leq 180^\circ$  w stosunku do fali w środku tego okręgu. Fazy fal elementarnych, których źródła wtórne leżą w drugiej strefie Fresnela, różnią się o kąt od  $180$  do  $360^\circ$  od fazy fali w punkcie środkowym okręgu o promieniu  $r_f$ . Zatem fale elementarne wytwarzane w drugiej strefie kompensują działanie źródeł wtórnych strefy pierwszej.

Działanie źródeł wtórnych rozmieszczonych w sąsiednich strefach wyższych rzędów wzajemnie się kompensuje i to tym pełniej, im wyższy jest numer strefy. Oddziaływanie wypadkowe źródeł wtórnych jest równoważne w przybliżeniu działaniu połowy źródeł strefy pierwszej ( w praktycznie 60%).

Promień pierwszej strefy Fresnela przyjmuje największą wartość w połowie trasy. Zbiór punktów  $F_1$  tworzy elipsoidę o ogniskach A i B. Jest to obszar, który ma największe znaczenie w niezakłóconym odbiorze energii docierającej z punktu A do punktu B. Zatem projektując łącze radiowe należy dążyć do tego, aby w przestrzeni obejmującej 60% pierwszej strefy Fresnela nie było przeszkód.

W liniach radiowych wiązka mikrofal rozchodzi się w troposferze, będącej środowiskiem niejednorodnym. Trajektorja fali nie jest linią prostą. Stąd w związku ze zmianą krzywizny

trajektorii fali radiowej wysokości przeszkód na trasie wiązki mikrofalowej koryguje się o czynnik zwany względną krzywizną ziemi w miejscu lokalizacji przeszkody

$$s = \frac{d_1 \cdot d_2}{12,74 \cdot K} = \frac{d(d - x)}{12,74 \cdot K}$$

gdzie:

s - względna krzywizna ziemi (wielkość strzałki krzywizny łuku) w [m],

d<sub>1</sub>- odległość od początku odcinka w [km],

d<sub>2</sub>- odległość od końca odcinka w [km],

x- odległość od początku lub końca odcinka transmisyjnego,

K - współczynnik refrakcji, opisujący stosunek promienia zastępczego dla fal radiowych do promienia rzeczywistego Ziemi.

W tabeli podano wartość współczynnika refrakcji K stosownie do warunków propagacji w określonym terenie i klimacie.

Warunki propagacji	Teren i klimat	Współczynnik refrakcji K
Doskonałe	Troposfera standardowa, strefa umiarkowana, brak mgieł i duktów troposferycznych	4/3
Bardzo dobre	Brak zróżnicowanych warstw w troposferze, klimat suchy, brak mgieł	1 do 4/3
Dobre	Teren równinny, niezbyt gęste mgły	2/3 do 1
Trudne	Silnie zróżnicowane warstwy troposfery, mgły zalegające przy ziemi, klimat wilgotny	1/2 do 2/3
złe	Gęste mgły, duża wilgotność powietrza, zbiorniki wodne, zatoki morskie, klimat tropikalny	2/5 do 1/2

Do wyznaczania przekroju trasy radiowej odcinka transmisyjnego stosuje się trzy metody:

- w pełni liniową (*Fully Linear Method*),
- 4/3 promienia krzywizny ziemi (*4/3 Earth Method*),
- krzywoliniową (*Curvature Method*).

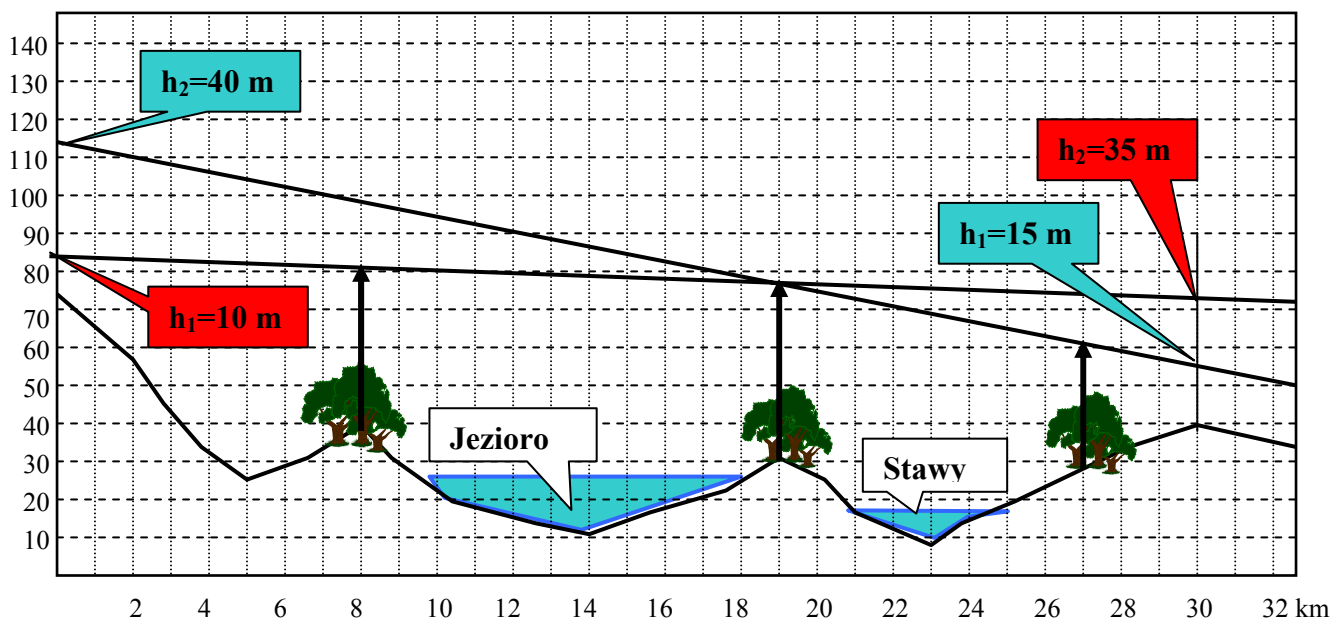
Metoda liniowa jest bardzo wygodna gdyż:

- pozwala na przedstawienie przekroju trasy na siatce prostokątnej,
- umożliwia prezentację na tym samym wykresie trajektorii fal radiowych dla różnych wartości współczynnika nasilenia refrakcji,
- wszystkie trajektorie fal mogą być przedstawione jako linie proste

Metoda w pełni liniowa zostanie przedstawiona na przykładzie odcinka transmisyjnego o długości 30 km, częstotliwości pracy urządzeń radioliniowych 13 GHz i współczynnika nasilenia refrakcji K<sub>e</sub>=0,8. Przekrój hipsometryczny odcinka transmisyjnego jest przedstawiony na rys. 9. Efektywne wysokości przeszkód zlokalizowanych na 8, 19 i 27 kilometrze wyznaczono z zależności:

$$h_{ep} = h_p + 0,6r_f + s$$

gdzie:  $h_p$  – rzeczywista wysokość przeszkody w [m]  
 $r_f$  – promień pierwszej strefy Fresnela w [m]  
 $s$  - względna krzywizna ziemi w [m]



Rys. 9. Przekrój hipsometryczny przykładowego odcinka transmisyjnego

Kolejność postępowania podczas wyznaczania efektywnej wysokości przeszkód:

- na profilu hipsometrycznym odcinka transmisyjnego należy wyszukać wszystkie przeszkody, które mogą pogorszyć rozchodzenie się fal w torze radiowym,
- określić odległości przeszkody  $d_1$  i  $d_2$  od obu stacji,
- określić wysokości przeszkód,
- obliczyć promień pierwszej strefy Fresnela dla każdej przeszkody,
- obliczyć względną krzywiznę ziemi w punkcie każdej przeszkody z uwzględnieniem współczynnika nasilenia refrakcji,
- obliczyć efektywne wysokości przeszkód i nanieść je na przekrój hipsometryczny,
- na przekroju hipsometrycznym narysować proste na których znajdują się punkty końcowe efektywnych wysokości przeszkód, narysowane proste stanowią granice stref w których przeszkody nie przesłaniają wiązki mikrofal,
- odczytać wysokości zawieszenia anten stacji linii radiowej.

Wyniki obliczeń dla przypadku pokazanego na rysunku zamieszczono w tabeli:

Nr przeszkody	$d_1$ [km]	$d_2$ [km]	$h_p$ [m]	$0,6r_f$ [m]	$s$ [m]	$h_{ep}$ [m]
1	8	22	20	7	17	44
2	19	11	20	8	21	49
3	27	3	20	5	8	33

Obliczone wysokości zawieszenia anten wynoszą odpowiednio: 40 i 15 m oraz 10 i 35 m. Wyniki są na tyle wiarygodne na ile dobrze dobrano wartość współczynnika refrakcji.

Po określeniu wysokości zawieszenia anten z punktu widzenia fali bezpośredniej należy dokonać ich weryfikacji koncentrując się na fali odbitej. Gdyż jeśli obszar odbicia jest na tyle duży, że obejmuje nieparzystą liczbę stref Fresnela, to sygnał odbity, o fazie przeciwnej do fazy fali bezpośredniej, może spowodować bardzo głęboki zanik sygnału użytecznego.

Aby uniknąć głębokich zaników, należy odpowiednio dobrać obszar odbicia dla fali zakłócającej w takim miejscu trasy, które tłumi fale radiowe. Doboru takiego miejsca dokonuje się poprzez odpowiedni dobór wysokości zawieszenia anten. Głębokości zaników fali bezpośredniej powodowane falą zakłócającą (wielodrogowość propagacji) dla różnych typów terenu wynoszą:

- teren porośnięty gęstym lasem do 2 dB,
- teren słabo zadrzewiony, pojedyncze drzewa, krzewy 2-5 dB,
- wysokie trawy 5-10 dB,
- niskie trawy, pomarszczona powierzchnia zbiorników wodnych 10-20 dB,
- gładka powierzchnia zbiorników wodnych, gładka powierzchnia ziemi 20-40 dB.

Aby wyznaczyć obszar odbicia można wykorzystać metodę graficzną. W metodzie tej przyjmuje się, że wartości graniczne współczynnika K wynoszą  $K_I = \infty$  oraz  $K_G$  (*G-grazing*). W celu uproszczenia obliczeń w miejsce  $K_I$  i  $K_G$  współczynniki zastępcze odpowiednio  $n_I$  i  $n_G$ , których wartości odczytuje się z wykresu (rys. 10). Wykres przedstawia wzajemne związki współczynników  $n_I$  oraz  $n_G$  i stosunków wysokości zawieszenia anten  $h_1$  i  $h_2$ , liczonych od pewnego, wcześniej ustalonego poziomu odniesienia ( $h_1/h_2 \leq 1$ ).

Współczynniki  $n_I$  i  $n_G$  służą do wyznaczania granic  $D_I$  i  $D_G$  obszaru odbicia fali zakłócającej wg następujących zależności:

$$D_G = d \cdot n_G$$

$$D_I = d \cdot n_I$$

gdzie  $d$  jest długością odcinka transmisyjnego.

W [4] podano następujące zależności analityczne dla współczynników  $n_I$  i  $n_G$ :

$$n_I = 1 - \frac{1}{1 + \frac{h_1}{h_2}} \dots \dots \dots n_G = 1 - \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}}$$

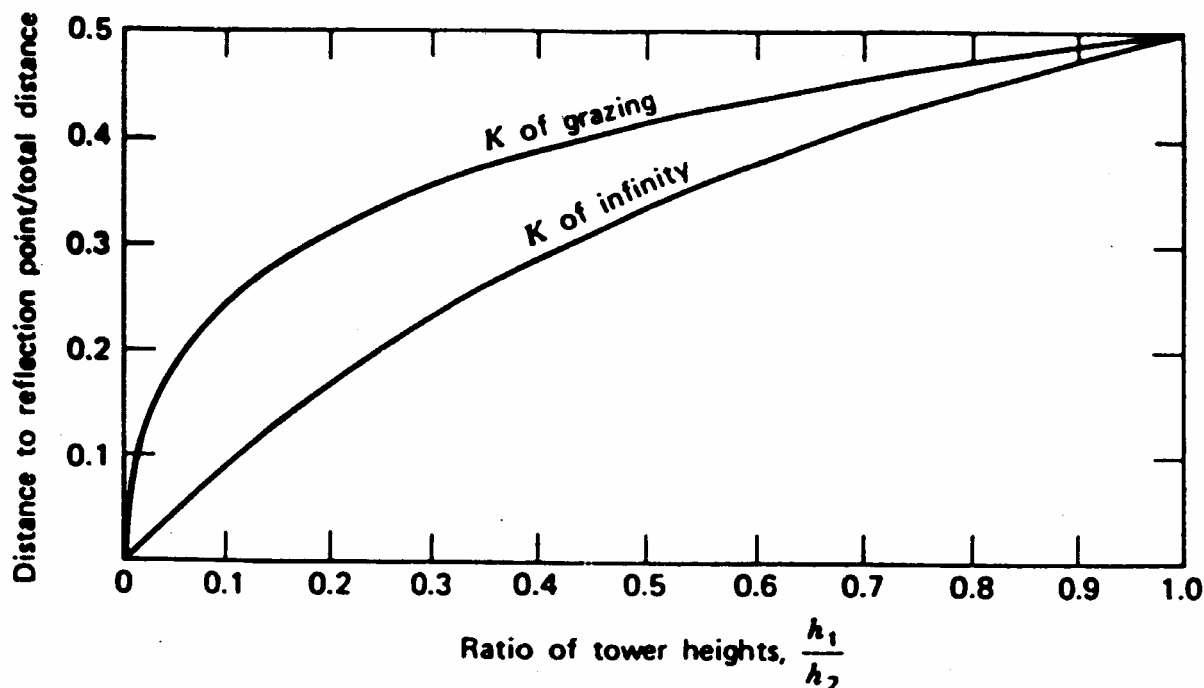
Przyjmijmy obliczone wcześniej wysokości zawieszenia anten 40 i 15 m. Założymy, że wysokości zawieszenia anten liczone od najniższego punktu trasy (10 m) wynoszą:

- anteny zawieszonych niżej  $h_1 = (40-10)+15=45$  m, podstawa wieży na wysokości 40 m,
- anteny zawieszonych wyżej  $h_2 = (74-10)+40=104$  m, podstawa wieży na wysokości 74 m.

Obliczone współczynniki wynoszą:  $n_I=0,31$  i  $n_G=0,39$  (co jest zgodne z wykresem), natomiast granice obszaru odbicia, liczone od anteny niżej zawieszonych:  $D_I=9,3$  km i  $D_G=11,7$  km. Obszar odbicia wypada więc w lesie między stawami i jeziorem co jest sytuacją korzystną, gdyż las dobrze tłumi fale radiowe.

Prezentowana metoda ma jedną istotną wadę. Nie jest sprecyzowany poziom odniesienia, od którego należy liczyć wysokości zawieszenia anten, co niejednokrotnie może prowadzić do wielu niejednoznaczności.





Rys.10. Zależność współczynników zastępczych  $n_1$  i  $n_G$  od ilorazu wysokości zawieszenia anten

W [4] podano metodę polegającą na odwróceniu kolejności obliczeń, a mianowicie:

- wskazaniu miejsca, na podstawie przekroju hipsometrycznego, w którym odbicie fali zakłócającej wpłynie najmniej niekorzystnie na głębokość zaniku,
- przyjęcie poziomu odniesienia, od którego będą liczone wysokości zawieszenia anten, poziomem tym jest poziom terenu w miejscu odbicia,
- ustaleniu jednej z granic obszaru odbicia  $D_1$  lub  $D_G$  i jednocześnie  $n_1$  lub  $n_G$ ,
- z wykresu odczytuje się wartość stosunku wysokości zawieszenia anten  $h_1/h_2$ ,
- dobraniu wysokości zawieszenia jednej z anten, tak, by zawierała się w przedziale wysokości obliczonym z metody w pełni liniowej i obliczeniu wysokości zawieszenia drugiej anteny,

Warunek: nie należy przyjmować zbyt małej wysokości zawieszania jednej anteny, gdyż wynik obliczeń może niekiedy okazać się błędny i wysokość drugiej anteny wypadnie poniżej poziomu terenu.

Literatura:

1. Gęborys L., Dumania E. Metodyka projektowania cyfrowych linii radiowych o małej i średniej przepływności. Prace IŁ nr 98/1991
2. Kawecki A. Charakterystyki zaników sygnału, wywołanych propagacją wielodrogową w doświadczalnych liniach mikrofalowych 11,5 i 18,6 GHz
3. Rasiukiewicz M., Leśnicki A. Podstawy systemów horyzontowych linii radiowych, WkiŁ 1983.
4. Dańda J., Ludwin W. Wyznaczanie profilu trasy radiowej i wysokości zawieszenia anten. Materiały Konferencyjne. Cyfrowe linie radiowe o małej i średniej przepływności. Kraków AGH, 1999
5. Wybrane zagadnienia techniczne i organizacyjno-eksploatacyjne linii radiowych. Wyd MON, 1972
6. R. L. Freeman. Radio System Design for Telecommunications.
7. Zalecenia ITU (nr w tekście).