



INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Zakład Systemów Radiowych (Z-1)

**Prognozowanie łączności radiowej
w zakresach częstotliwości 20 – 60 GHz
w cyfrowych systemach dostępowych
i liniach radiowych horyzontowych.**

Zadanie 2:

**Optymalizacja projektowania łączności w systemach cyfrowych
horyzontowych linii radiowych zakresu fal milimetrycznych**

Praca nr 01300055

Praca nr 09300055

Warszawa, grudzień 2005

Prognozowanie łączności radiowej w zakresach częstotliwości 20 – 60 GHz
w cyfrowych systemach dostępowych i liniach radiowych horyzontowych

Zadanie 2: Optymalizacja projektowania łączności
w systemach cyfrowych horyzontowych linii radiowych zakresu fal milimetrowych

Praca nr 01300055

Praca nr 09300055

Autorzy sprawozdania: Andrzej Dusiński
 Jan Bogucki
 Ewa Wielowieyska

Słowa kluczowe (maksimum 5 słów):

propagacja, fale milimetrowe, oprogramowanie, odbiór przestrzenny

Kierownik pracy: inż. Andrzej Dusiński

Wykonawcy pracy: inż. Andrzej Dusiński,
 inż Jan Bogucki,
 inż. Krzysztof Kaczan,
 mgr inż. Rafał Pawlak,
 st. progr. Ewa Wielowieyska

Kierownik Zakładu: mgr inż. Aleksander Orłowski.

Spis treści

1.	Wprowadzenie	4
2.	Algorytm oprogramowania dla potrzeb projektowania horyzontowych linii radiowych pracujących na częstotliwościach zakresu fal milimetrowych	7
2.1	Konwersje rozkładów tłumienia na inny okres czasu	7
2.1.1	Konwersja rozkładu średniego najgorszego miesiąca na rozkład średnio roczny tłumień wielodrogowych	7
2.1.2	Konwersja ze średniego najgorszego miesiąca na krótsze najgorsze okresy czasu	11
2.1.3	Konwersja rocznego rozkładu na rozkład najgorszego miesiąca	11
2.2	Obliczanie strefy bezpiecznej od anteny nadawczej	13
2.3	Optymalizacja zawieszenia anten	13
2.3.1	Wysokość zawieszenia anten	13
2.3.2	Optymalna wysokość zawieszenia anten	15
2.4	Oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia zaników	17
2.4.1	Zmniejszenie współczynnika polaryzacji skrośnej	17
2.4.2	Zniekształcenia wywołane efektami propagacyjnymi	20
2.4.3	Obliczenie całkowitego prawdopodobieństwa zaniku	21
3.	Dokumentacja użytkowa programu TrasaZ	21
3.1	Wprowadzenie	21
3.2	Parametry wejściowe programu	21
3.2.1	Parametry łącza	22
3.2.2	Wizualizacja przekroju trasy	24
3.2.3	Parametry klimatyczne	25
3.2.4	Parametry obliczeń	25
3.2.5	Parametry stałe programu	26
3.3	Optymalizacja	26
3.3.1	Zajętość I strefy Fresnela	26
3.3.2	Optymalizacja zawieszenia anten	28
3.4	Wyniki programu	29
3.4.1	Wyniki końcowe	29
3.4.2	Wyniki pośrednie	31
3.5	Pomoc podręczna	37
	Literatura	37

1. Wprowadzenie

Opracowany w 2004 r program „TrasaZ” dla projektowania tras horyzontowych linii radiowych w zakresie częstotliwości do 57 GHz, [6], służy do wyznaczania podstawowych parametrów łącza radiowego, a mianowicie:

- tłumienia wolnej przestrzeni,
- wysokości zawieszenia anten ustalonych ze względu na zajętość pierwszej strefy Fresnela,
- obliczenia dodatkowych tłumień z powodu:
 - a) zajętości I strefy Fresnela,
 - b) występowania deszczu na trasie linii radiowej,
 - c) istnienia gazów atmosferycznych,
 - d) występowania rozproszenia fal radiowych w atmosferze.
- mocy na wejściu odbiornika.

Do obliczeń wykorzystywano profil ukształtowania terenu pod trasą linii radiowej w uproszczonej formie, a mianowicie zaznaczone były jedynie najwyższe jego punkty względem poziomu morza, co w zupełności wystarczało w przedstawionym zakresie obliczeń.

Wprowadzone, w tym zadaniu, uzupełnienia do oprogramowania wymagają dokładnej znajomości profilu. W wyniku tego do algorytmu wprowadzono profil w postaci danych przedstawiających wysokości terenu w punktach, których odległości określono względem jednego z końców. Dane dotyczące samej rzeźby terenu mogą być uzupełnione informacjami o rodzaju i wysokości pokrycia.

Wspomniane uzupełnienia dotyczą kilku ważnych obliczeń dla optymalizacji prognozowania w celu zwiększenia jakości pracy łącza.

Współczesne cyfrowe systemy radiowe powinny być praktycznie niezawodne. Czas niedostępności dla systemów radiowych o dużej przepływności powinien wynosić tylko kilka minut w ciągu roku.

Do oszacowania jakości łącza radiowego wykorzystywane są różne parametry rozkładów tłumienia. Tę jakość charakteryzują dwa podstawowe parametry: wierność transmisji i współczynnik dostępności linii, [4].

Wierność transmisji jest wielkością opisującą progowe cechy systemu przekraczane z określonym prawdopodobieństwem w odniesieniu do danego przedziału czasu. Dla systemów analogowych będzie to stosunek sygnału do szumów S/N przekraczany z określonym prawdopodobieństwem. Dla systemów cyfrowych są to wartości stopy błędów BER i długości odcinków czasowych, w których ta stopa jest przekraczana. Na ogół przedziałem odniesienia prawdopodobieństwa jest „najgorszy miesiąc” lub „przeciętny rok”.

Dostępność linii to procent czasu, w którym system jest technicznie sprawny i zapewnia transmisję sygnałów z założoną wiernością.

Całkowita niedostępność łącza jest sumą prawdopodobieństw uszkodzenia urządzenia i niedostępności łącza spowodowanej warunkami propagacyjnymi występującymi między

dwoma antenami. Prawdopodobieństwo niedostępności linii z powodu złych warunków propagacyjnych może być przedstawione w postaci, [2]:

$$P_r = Pr(\rho(t) < \rho_{TH})$$

gdzie:

$$\rho(t) = \frac{S(t)}{I(t) + N(t)},$$

S , I , N – zmienne losowe przedstawiające odpowiednio: wymagany poziom sygnału, interferencje i szumy,

ρ_{TH} – graniczna wartość związana ze stopą błędów BER.

W systemach cyfrowych w zasadzie mamy dwa stany:

- Transmisja danych jest bezbłędna: stopa błędów mniejsza niż np. 10^{-6} ;
- Przerwa w transmisji danych: stopa błędów jest równa 10^{-3} lub jest większa.

Wynika to z charakterystyki cyfrowych odbiorników radiowych. Typowa charakterystyka odbiornika [25] o przepływności 4x2Mb/s jest taka, że przy mocy -90 dBm BER wynosi $8 \cdot 10^{-3}$, a zmniejszenie mocy tylko o 2 dB, na -92 dBm powoduje, że praktycznie występuje przerwa w transmisji, gdyż BER= $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Podobnie jest dla urządzeń o większej przepływności. Urządzenia linii radiowej np. typu 9681 LH, [1] umożliwiają transmisję sygnałów cyfrowych o przepływności 155 Mb/s z modulacją 128 QAM. Odbiornik przy poziomie mocy odbieranej -72,0 dBm zapewnia odbiór transmisji praktycznie na bardzo dobrym poziomie przy BER= $4,8 \cdot 10^{-7}$; zmiana poziomu mocy tylko o 2 dB powoduje przerwę w transmisji, bowiem wówczas moc odbierana ma wartość -74,0 dBm, ale BER= $1,1 \cdot 10^{-3}$, [1].

Z reguły współczesne urządzenia linii radiowych o dużej przepływności są dostosowane do pracy z przestrzennym odbiorem zbiorczym (*space diversity*), a ponadto są wyposażone w układy automatycznej regulacji mocy transmitowanej [1].

Przyczyna zmienności amplitudy sygnału i interferencji w czasie spowodowana jest występowaniem zjawiska wielodrogowości. Główne mechanizmy powstawania zaników wielodrogowościowych związane są z:

- atmosferą, w której powstają odbijające warstwy związane ze zmiennością wskaźnika refrakcji,
- odbiciami od gruntu również związanymi ze zmiennością współczynnika refrakcji.

Te mechanizmy mogą występować oddzielnie lub jednocześnie.

Dla prognozowania rozkładów zaników dotyczących pojedynczych częstotliwości lub wąskich pasm wykorzystywane są informacje o zachowaniu współczynnika geoklimatycznego w najgorszym miesiącu w roku. Nie można jednak tych informacji wykorzystać dla prognozowania zaników dla dłuższych przedziałów czasu. Wówczas potrzebne są rozkłady zmian zjawiska w dłuższy przedziale czasu. W związku z tym, niezbędne są odpowiednie konwersje. Tym zagadnieniom poświęcona jest część opracowanego algorytmu w rozdz. 2.1.

Interferencje są jednym z głównych czynników ograniczających systemy radiowe. Ogólnie mówiąc na trasie linii radiowej występują zjawiska propagacyjne nazywane wielodrogowościami, [6, 2, 12, 24].

Złagodzenie wpływu interferencji można dokonać za pomocą różnych technik. W prognozowaniu linii radiowych będzie to wykorzystanie systemów zbiorczych czy rozpoznanie wpływu polaryzacji skrośnej.

Jednym z systemów zbiorczych jest odbiór przestrzenny (*space diversity*), który jest powszechnie stosowany i który został wybrany w tym zadaniu jako element optymalizacji prognozy, rozdz. 2.3.

Z reguły współczesne urządzenia linii radiowych o dużej przepływności są dostosowane do pracy z przestrzennym odbiorem zbiorczym, a ponadto są wyposażone w układy automatycznej regulacji mocy transmitowanej, [1].

Odbiór przestrzenny sygnału odbieranego przez dwie lub więcej anten jest jednym ze sposobów zapobieżenia zanikom sygnałów spowodowanych zjawiskami wielodrogowościami. Ustalaniem odległości między antenami w systemie odbioru przestrzennego rządzą trzy prawa, [12]:

- zachowanie prześwitu przy obniżaniu niższej anteny tak, aby zminimalizować występowanie zaników spowodowanych powierzchniowymi, wielodrogowymi odbiciami;
- określenie specyficznego przestrzennego współczynnika obejmującego trasę;
- zminimalizowania prawdopodobieństwa, że sygnał na jednej z anten odbioru przestrzennego będzie również zanikał, jeśli takie zdarzenie ma miejsce w drugiej antenie.

Wyznaczenie wysokości anten do odbioru przestrzennego związane jest ze szczegółowym badaniem profilu ukształtowania terenu pod trasą łącza radiowego. Między innymi badane jest nachylenie odcinków terenu niezbędne dla ustalenia czy występują odbicia od terenu w danym miejscu. Ze względu na niedokładność opisu profilu wynikającą z przyjętej definicji obliczenia przeprowadzono dla kątów nachylenia terenu w danym punkcie z przedziału $\pm 1^\circ$ kąta wyznaczonego pierwotnie.

W algorytmie założono, że odbicia występują od wszystkich wierzchołków profilu terenu.

Wielodrogowość związana ze zjawiskami atmosferycznymi, w tym z deszczem, jest przyczyną powstania depolaryzacji fal radiowych. Deszcz odgrywa tu znaczną rolę ze względu na fakt, że jego krople nie są kuliste i w związku z tym przyczyniają się do powstania zjawiska depolaryzacji fali.

Znaczne zmniejszenie współczynnika polaryzacji skrośnej XPD (*cross polarization discrimination*) powoduje, w radiowych systemach łączności o dużej przepływności z podwójną polaryzacją, interferencje wspólnokanałowe i w mniejszym stopniu sąsiednio-kanałowe. Dla krótkich tras depolaryzacja jest w przybliżeniu proporcjonalna do długości trasy.

Wspomniane wyżej problemy zostały włączone do algorytmu dotychczasowego oprogramowania prognostycznego, o którym mowa na wstępie. Algorytm włączonej części zawiera:

1. Prognozowanie bilansu energetycznego linii radiowej dla różnych parametrów rozkładów tłumienia:
 - a) średni rok
 - b) najgorszy miesiąc
 - c) krótsze okresy czasu (od 72 – 1 godziny)
2. Optymalizacja zawieszenia anten
3. Prawdopodobieństwo wystąpienia przerwy w transmisji sygnału w wyniku:
 - zmniejszenia współczynnika polaryzacji skrośnej (w deszczu i bez),
 - tłumienia deszczowego,
 - zaników selektywnych i nieselektywnych.
4. Dodatkowe parametry charakterystyki trasy
 - strefa bezpieczna od anteny w kierunku maksymalnego promieniowania,
 - margines mocy lub długość trasy dla stosunku sygnał/szum = 1.

Na podstawie algorytmu przedstawionego w rozdz. 2. wykonano uaktualnione oprogramowanie TrasaZ, którego opis w dokumentacji użytkowej zawiera rozdz. 3.

2. Algorytm oprogramowania dla potrzeb projektowania horyzontowych linii radiowych pracujących na częstotliwościach zakresu fal milimetrowych

2.1 Konwersje rozkładów tłumienia na inny okres czasu

2.1.1 Konwersja rozkładu średniego najgorszego miesiąca na rozkład średnio roczny tłumień wielodrogowych

Najpierw określamy miesięczny średni najgorszy rozkład wykorzystując opracowaną wcześniej [6] procedurę, a mianowicie:

Dane wejściowe:

dN_1 – punktowy gradient refrakcji w najniższych 65 m atmosfery nie przekraczany w 1% czasu średniego roku; dane te są podane w Zaleceniu Rec. ITU-R P.453, a także są dostępne w postaci tabelarycznej w Biurze Radiokomunikacyjnym ITU (Radiocommunication Bureau (BR)).

s_a – standardowe odchylenie wysokości terenu. [m];

h_e, h_r – wysokość anten nad poziomem morza [m];

h_L – wysokość niższej anteny;

f – częstotliwość [GHz];

d – długość trasy [km];

ξ – szerokość geograficzna (N lub S).

Krok 1: Określamy współczynnik geoklimatyczny dla średniego najgorszego miesiąca z zależności:

gdy jest określone s_a :

$$K = 10^{-3,9-0,003dN_1} s_a^{-0,42} \quad (1a)$$

gdy nie uwzględniamy profilu terenu:

$$K = 10^{-4,2-0,0029dN_1} \quad (1b)$$

Krok 2: Określamy wielkość nachylenia trasy ε_p [mrad] z zależności:

$$\varepsilon_p = \frac{|h_r - h_e|}{d} \quad (2)$$

Krok 3: Określamy procent czasu p_w [%] przekroczenia zaniku A [dB] w średnim najgorszym miesiącu, gdy K wyznaczone ze wzoru (1a), z zależności:

$$p_w = Kd^{3,2} (1 + |\varepsilon_p|)^{-0,97} \cdot 10^{0,032f - 0,00085h_L - \frac{A}{10}} \quad (3)$$

Procent czasu p_w [%] przekroczenia zaniku A [dB] w średnim najgorszym miesiącu można wyliczyć z wystarczającą dokładnością, gdy K wyznaczone ze wzoru (1b), z uproszczonej z zależności:

$$p_w = Kd^{3,0} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,2} \cdot 10^{0,033f - 0,001h_L - \frac{A}{10}} \quad (4)$$

Zależności (3) i (4) można stosować co najmniej do częstotliwości 45 GHz. Najniższa częstotliwości f_{min} [GHz], dla jakiej można stosować te zależności określa empiryczna zależność:

$$f_{min} = \frac{15}{d} \quad (5)$$

Dla określenia konwersji rozkładu średniego najgorszego miesiąca na rozkład średnio roczny wylicza się najpierw współczynnik konwersji:

Krok 4: Wyliczamy geoklimatyczny logarytmiczny współczynnik konwersji ΔG z zależności:

$$\Delta G = 10,5 - 5,6 \log(1,1 \pm |\cos 2\xi|^{0,7}) - 2,7 \log d + 1,7 \log(1 + |\varepsilon_p|) \quad \text{dB} \quad (6)$$

gdzie: $\Delta G \leq 10,8$ dB jest wartością dodatnią dla $\xi \leq 45^\circ$, a wartością ujemną dla $\xi > 45^\circ$.

Krok 5: Oblicza się procent czasu p [%], w którym głębokość zaniku A jest wyższa od największego tłumienia w rozkładzie średnio rocznym:

$$p = 10^{\frac{-\Delta G}{10}} \cdot p_w \quad \% \quad (7)$$

Wylicza się rozkład zakresu tłumień, wykorzystuje się metodę dla wszystkich procentów:
Krok 6: Wykorzystując metodę zaprezentowaną w [6] określamy współczynnik wystąpienia wielodrogowości z zależności:

$$p_o = Kd^{3,0} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,2} \cdot 10^{0,033f - 0,001h_t} \quad [\%] \quad (8)$$

Należy zauważyć, że wzór (8) jest ekwiwalentny równaniom (3) i (4) dla $A=0$.

Krok 7: Określamy wartość zaniku A , przy którym zależność pomiędzy rozkładem głębokich zaników i płaskich jest oszacowana z empirycznej zależności:

$$A_t = 25 + 1,2 \log p_o \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

Krok 8a: Jeżeli wartość wymagana zaniku A_t jest równa lub większa od A_t , liczymy procent czasu w którym A jest przekraczane w średnim najgorszym miesiącu:

$$p_w = p_o \cdot 10^{\frac{-A}{10}} \quad [\%] \quad (10)$$

Należy zauważyć, że równanie (10) jest ekwiwalentne równaniom odpowiednio (3) i (4).

Krok 8b: Jeżeli wartość wymagana zaniku A_t jest mniejsza od A_t , liczymy procent czasu p_t , w którym A jest przekraczane w średnim najgorszym miesiącu:

$$p_t = p_o \cdot 10^{\frac{A_t}{10}} \quad [\%] \quad (11)$$

Należy zauważyć, że równanie (11) jest ekwiwalentne równaniom odpowiedni (3) i (4), przy $A=A_t$.

Obliczając q_a' z przejścia zaniku A_t i przejścia procentu czasu p_t :

$$q_a' = \frac{-20 \log \left\{ -\ln \left[\frac{(100 - p_t)}{100} \right] \right\}}{A_t} \quad (12)$$

Obliczając q_t z q_a' i z przejścia zaniku A_t :

$$q_t = \frac{q_a' - 2}{(1 + 0,3 \cdot 10^{-\frac{A_t}{20}}) \cdot 10^{-0,016A_t}} - 4,3 \cdot (10^{-\frac{A_t}{20}} + \frac{A_t}{800}) \quad (13)$$

Obliczając q_a dla żadanego zaniku A :

$$q_a = 2 + (1 + 0,3 \cdot 10^{-\frac{A}{20}}) \cdot 10^{-0,016A} [q_t + 4,3 \cdot (10^{-\frac{A}{20}} + \frac{A}{800})] \quad (14)$$

Obliczamy procent czasu p_w dla przekraczanej głębokości zaniku A [dB] w średnim najgorszym miesiącu:

$$p_w = 100[1 - \exp(-10^{-q_a \frac{A}{20}})] \quad [\%] \quad (15)$$

Zastosowanie iteracji wykorzystując wzór (15) pozwala znaleźć A dla zadanego p_w .

Aby wyliczyć rozkład zakresu tłumień zastępuje się p_w (15) przez p .

Szacuje się rozkład dla średniego roku, postępując w następujący sposób, gdzie $A_{0,01}$ jest teraz głębokością zaniku przekraczanej w 0,01% średniego roku:

Krok 9: Średni najgorszy miesiąc dla tłumień większych od 10 dB określa się z zależności:

$$p_w = 100 - 10^{\frac{-1,7 + 0,2A_{0,01} - E}{3,5}} \quad \text{dla } E > 10 \text{ dB} \quad (16)$$

gdzie: E – jest wartością nie przewyższaną w p [%] czasu i $A_{0,01}$ jest oszacowaną wartością tłumienia z zależności (3) lub (4) przewyższaną w $p=0,01\%$ czasu.

Dla wartości pomiędzy 10 i 0 dB wykorzystuje się następującą procedurę:

Krok 10: Wylicza się, wykorzystując wzór (16) procent czasu p_w' dla wartości mniejszych niż 10 dB lub równych 10 dB ($E'=10$).

Krok 11: Wylicza się q_e' wykorzystując wzór:

$$q_e = -\frac{20}{E} \left(\log_{10} \left[-\ln \left(1 - \frac{100 - p_w'}{58,21} \right) \right] \right) \quad (17)$$

Krok 12: Wylicza się q_s wykorzystując wzór:

$$q_s = 2,05q_e - 20,3 \quad (18)$$

Krok 13: Wylicza się q_e dla danej wartości E wykorzystując wzór:

$$q_e = 8 + \left[1 + 0.3 \times 10^{-E/20} \right] \left[10^{-0.7E/20} \right] \left[q_s + 12 \left(10^{-E/20} + E/800 \right) \right] \quad (19)$$

Krok 14: Wylicza się procent czasu dla nie przewyższania danej wartości E [dB] wykorzystując wzór:

$$p_w = 100 - 58.21 \left[1 - \exp \left(-10^{-q_e E/20} \right) \right] \quad (20)$$

Otrzymuje się pierwszą wartość p_w z równania (7) podstawiając $0=0,01\%$. Otrzymuje się głębokość zaniku $A_{0,01}$ przekraczaną w $0,01\%$ czasu średniego roku wykorzystując równania (3) i (4) i wstawiając p zamiast p_w .

2.1.2 Konwersja ze średniego najgorszego miesiąca na krótsze najgorsze okresy czasu

Tłumienia wywołane wielodrogowością ściśle zależą od pory roku, a nawet pory dnia. Stąd potrzeba wyliczeń statystycznych tłumień wywołanych w krótszych okresach czasu.

Z procentu czasu p_w przekraczania progu tłumienia A w średnim najgorszym miesiącu można przeprowadzić konwersję procentu czasu p_w [%] przekraczania tego tłumienia w krótszych okresach czasu T , wykorzystując zależności:

a) dla: $1h \leq T < 720h$ i dla tras płaskich

$$p_{sw} = p_w \cdot (89,34 T^{-0,854} + 0,676) \quad (21)$$

b) dla: $1h \leq T < 720h$ i dla tras pagórkowatych

$$p_{sw} = p_w \cdot (119 T^{-0,78} + 0,295) \quad (22)$$

c) dla: $1h \leq T < 720h$ i dla tras lądowych pofałdowanych

$$p_{sw} = p_w \cdot (19985 T^{-0,834} + 0,175) \quad (23)$$

2.1.3 Konwersja rocznego rozkładu na rozkład najgorszego miesiąca

Procent czasu p_w przekraczany dla danego progu dla średniego najgorszego miesiąca roku, wylicza się z procentu czasu p przekroczenia w średnim roku wykorzystując współczynnik konwersji Q :

$$p_w = Q p \quad (24)$$

gdzie: $1 < Q < 12$ a obie wielkości p i p_w odnoszą się do tego samego progu.

Przy czym Q jest funkcją p [%] dwóch parametrów (Q_1, β):

$$Q(p) = \begin{cases} 12 & \text{dla } p < \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{\beta}} \% \\ Q_1 p^{-\beta} & \text{dla } \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{\beta}} < p < 3\% \\ Q_1 3^{-\beta} & \text{dla } 3\% < p < 30\% \\ Q_1 3^{-\beta} \left(\frac{p}{30}\right)^{\frac{\log(Q_1 3^{-\beta})}{\log 0,3}}} & \text{dla } 30\% p \end{cases} \quad (25)$$

Obliczając procent czasu przekroczenia w średnim roku z danej wartości procentu przekroczenia czasu średniego najgorszego miesiąca w roku, korzystamy z zależności:

$$p = \frac{p_w}{Q} \quad (26)$$

zależność Q od p_w może być wyliczona z zależności Q od p .

Dla

$$12p_o < p_w(\%) < Q_1 3^{(1-\beta)} \quad (27)$$

gdy p_o wyraża się zależnością:

$$p_o = \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (28)$$

i wówczas Q od p_w jest dane:

$$Q = Q_1^{\frac{1}{1-\beta}} \cdot p_w^{\frac{-\beta}{1-\beta}} \quad (29)$$

Przyjmuje się, dla danych ogólnosiawiatowych, że $Q_1=2,85$ i $\beta=0,1$. Wówczas, zależność Q od p_w jest dana:

$$p[\%] = 0,30 p_w^{1,15} \quad (30)$$

dla $1,9 \cdot 10^{-4} < p_w(\%) < 7,8$.

Dla bardziej precyzyjnego określenia wartości Q_1 i β dla danego regionu klimatycznego, korzysta się z tabeli podanej w zaleceniu [19]. Dla terenu Polski wartości te wynoszą: $\beta = 0,18$ i $Q = 2,6$.

2.2 Obliczanie strefy bezpiecznej od anteny nadawczej

Dane wejściowe:

P – moc [dBW]

G – zysk [dB]

S_{max} – maksymalna gęstość mocy dla strefy bezpiecznej: 0,1 [W/m²]

Moc w watach wyliczamy z zależności:

$$P[W] = 10^{\frac{P[dB]}{10}} \quad (31)$$

Zysk w [W/W] wyliczamy z zależności:

$$G\left[\frac{W}{W}\right] = 10^{\frac{G[dB]}{10}} \quad (32)$$

Gęstość mocy S w odległości l od anteny wynosi:

$$S = \frac{P[W] \cdot G[W/W]}{4\pi l^2} \quad (33)$$

Minimalna odległość od anteny l_{min} [m], od której jest strefa bezpieczna w osi wiązki głównej promieniowania:

$$l_{min} = \frac{P[W] \cdot G[W/W]}{4\pi S_{max}} \quad (34)$$

Podstawiając $S_{max}=0,1$ [W/m²], otrzymujemy:

$$l_{min} = \frac{P[W] \cdot G[W/W]}{0,4\pi} \quad (35)$$

2.3 Optymalizacja zawieszenia anten

2.3.1 Wysokość zawieszenia anten

Dane wejściowe:

a – rzeczywisty promień Ziemi ($a=6375$ km);

k – współczynnik;

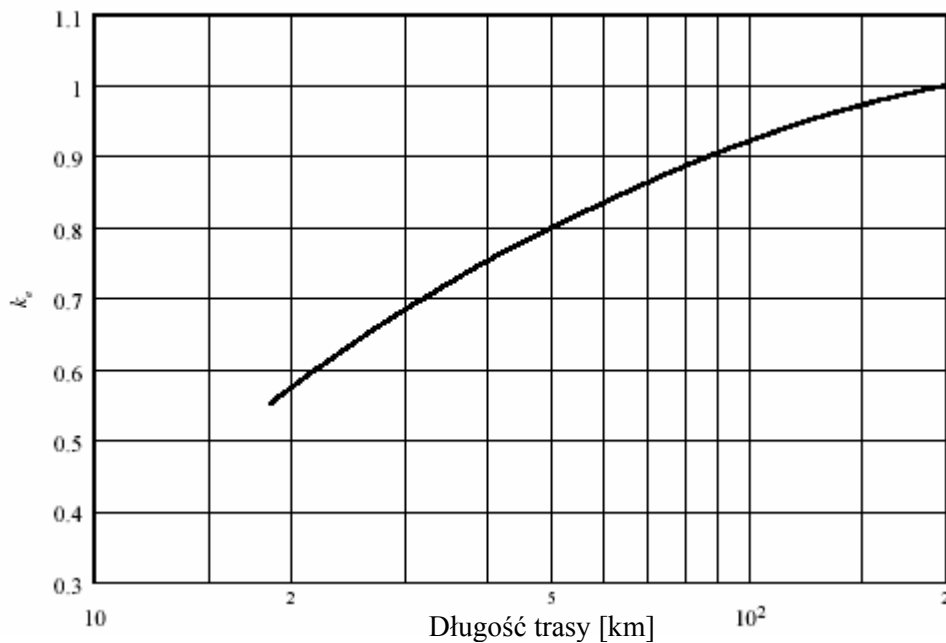
k_e – współczynnik określony dla 99,9 %.

Krok 1: Należy określić wysokości zawieszenia anten przyjmując współczynnik $k=4/3$ a pierwsza strefa Fresnela $1,0 \cdot F_1$ powinna być wolna (ponad przeszkodami).

Wybrzuszenie w Ziemi liczymy z zależności:

$$w = \frac{d_1 d_2}{12,74 k} \quad (36)$$

Krok 2: Należy określić wartość współczynnika $k_e(99,9 \%)$ z rys. 1 dla projektowanej długości trasy.



Rys.1 Wartość współczynnika k_e przekraczana w 99,9 % czasu najgorszego miesiąca, [12]

Krok 3: Należy określić wysokości zawieszenia anten przyjmując współczynnik k_e z kroku 2 i następującą czystość promienia strefy Fresnela (tab. 1):

Tab. 1. Promień strefy Fresnela wymagany w kroku 3

Klimat umiarkowany	Klimat tropikalny
0,0 F_1 dla pojedynczej przeszkody	0,6 F_1 dla długości trasy >30 km
0,3 F_1 dla przeszkody zajmującej część trasy	

Krok 4: Wysokości zawieszenia anten powinna być większa niż otrzymana w *krokach 1 i 3.*

2.3.2 Optymalna wysokość zawieszenia anten

Dane wejściowe:

y_1, y_2 – wysokości terenu nad poziomem morza odpowiednio dla stacji 1 i 2 [m];

h_{1G}, h_{2G} – wysokości anten nad poziomem terenu odpowiednio dla stacji 1 i 2 [m];

y_o – wysokość środkowego punktu powierzchni odbijającej nad poziomem morza [m];

x_o – odległość środkowego punktu powierzchni odbijającej od stacji 1 [km];

v – kąt nachylenia [st];

a – rzeczywisty promień Ziemi ($a=6375$ km);

k – współczynnik;

d – długość trasy [km].

Krok 1: Określić wstępne wysokości zawieszenia anten (jak w *kroku 4* „Wysokość zawieszenia anten”)

Krok 2: Należy określić wysokości zawieszenia anten h_1 i h_2 powyżej powierzchni odbijającej:

$$h_1 = h_{1G} + y_1 - y_o + x_o \cdot 10^3 \cdot \operatorname{tg} v \quad (37)$$

$$h_2 = h_{2G} + y_2 - y_o + (d - x_o) \cdot 10^3 \cdot \operatorname{tg} v \quad (38)$$

Krok 3: Należy określić odległości d_1 i d_2 , w których może istnieć powierzchnia odbijająca odpowiednio od stanowiska 1 i 2.

Najpierw określamy wielkość a_e :

$$a_e = ka \quad (39)$$

następnie wyliczamy współczynnik c :

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \quad (40)$$

określamy współczynnik m :

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} 10^3 \quad (41)$$

oraz współczynnik b :

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m} \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right]} \quad (42)$$

i wówczas można wyliczyć wartości d_1 i d_2 :

$$d_1 = d \frac{1+b}{2} \quad (43)$$

$$d_2 = d \frac{1-b}{2} \quad (44)$$

Jeżeli można przypuszczać, że można uniknąć odbijającego obszaru przez optymalny dobór zamocowania jednej lub obydwóch anten zgodnie z *krokiem 1*, należy oszacować i ponownie wykonać obliczenia zgodnie z *krokiem 2*.

Krok 4: Należy określić odległości pomiędzy falą bezpośrednią i odbitą w długościach fali dla tego samego zakresu wartości efektywnego k z zależności:

$$\tau = \frac{2f}{0,3d} \left(h_1 - \frac{d_1^2}{12,74k} \right) \left(h_2 - \frac{d_2^2}{12,74k} \right) \times 10^{-3} \quad (45)$$

Jeżeli τ jest całkowitą dodatnią wielokrotnością długości fali, tzn. zmienia się jak k (tzn. przyjmuje wartość 1, 2... itd.) odbierany sygnał ma wartość minimalną. Taki przypadek musi być jak najmniej prawdopodobny. Większa liczba całkowitych wartości ($\tau_{\max} - \tau_{\min}$) wskazuje, że koniecznym jest zastosowanie anten z rozstawem przestrzennym.

I wówczas:

Krok 5: Należy określić dla anteny I (dla k jak w *kroku 3*) odległości pomiędzy sąsiednimi minimami lub maksimumami poziomu odbieranego sygnału z zależności:

$$\theta_2 = \frac{150d}{f \left(h_1 - \frac{d_1^2}{12,74k} \right)} \quad [\text{m}] \quad (46)$$

i dla anteny II:

$$\theta_1 = \frac{150d}{f \left(h_2 - \frac{d_2^2}{12,74k} \right)} \quad [\text{m}] \quad (47)$$

Wykonać *krok 5* dla każdej istotnej płaszczyzny odbijającej.

Krok 6: Należy określić optymalną odległość (dla k jak w *kroku 3*) rozmieszczenia anten z zależności:

$$s_1 = \frac{\theta_1}{2} \quad s_1 = \frac{3\theta_1}{2} \quad s_1 = \frac{5\theta_1}{2} \quad \text{itd.} \quad (48)$$

$$s_2 = \frac{\theta_2}{2} \quad s_2 = \frac{3\theta_2}{2} \quad s_2 = \frac{5\theta_2}{2} \quad \text{itd.} \quad (49)$$

Wykonać *krok 6* dla każdej istotnej płaszczyzny odbijającej.

2.4 Oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia zaników

2.4.1 Zmniejszenie współczynnika polaryzacji skrośnej

Znaczne zmniejszenie współczynnika polaryzacji skrośnej XPD (*cross-polarization discrimination*) powoduje interferencje wspólnie kanałową i w mniejszym stopniu sąsiednio kanałową. Zmniejszenie XPD powstaje w warunkach opadów atmosferycznych jak i bez opadów. Dla obu tych przypadków należy rozpatrywać zmianę XPD .

2.4.1.1 Zmniejszenie współczynnika polaryzacji skrośnej w warunkach bez opadów

Dane wejściowe:

XPD_g – gwarantowana katalogowo min. wartość XPD dla anteny w łączy (nadawczej lub odbiorczej);

λ – długość fali nośnej [m];

s_t – odległość pomiędzy antenami [m] (gdy stosuje się 2 anteny).

C_o/I – stosunek nośnej do interferencji dla danego BER .

$XPIF$ – współczynnik poprawy tłumienia przeników polaryzacyjnych (*cross-polarization improvement factor*).

Wpływ efektów propagacji wielodrogowej i polaryzacji skrośnej samej anteny powodują zmniejszenie XPD dla małych procentów czasu. Efekt tych zmian na jakość linii radiowych wyznacza się w następujących krokach:

Krok 1: Oblicza się XPD_o

$$XPD_o = \begin{cases} XPD_g + 5 & \text{dla } XPD_g \leq 35 \\ 40 & \text{dla } XPD_g > 35 \end{cases} \quad (50)$$

Krok 2: Obliczenie parametru aktywności wielodrogowej η

$$\eta = 1 - e^{-0,2(p_o)^{0,75}} \quad (51)$$

gdzie: $p_o = p_w/100$ – współczynnik pojawienia się wielodrogowości odpowiadający procentowi czasu $p_w(\%)$ przekraczającego $A=0$ dB w średnim najgorszym miesiącu, wyliczony z zależności (3) lub (4).

Krok 3: Określamy współczynnik Q

$$Q = -10 \log \left(\frac{k_{XP} \cdot \eta}{p_o} \right) \quad (52)$$

gdzie:

$$k_{XP} = \begin{cases} 0,7 & \text{dla jednej nadawczej anteny} \\ 1 - 0,3 \exp \left[-4 \cdot 10^{-6} \left(\frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{dla dwóch anten nadawczych} \end{cases} \quad (53)$$

W przypadku dwóch ortogonalnych polaryzacyjnych transmisji dla różnych anten, pionowa odległość s_t jest w [m] i długość fali nośnej λ w [m].

Krok 4: Parametr C określamy z zależności:

$$C = XPD_o + Q \quad (54)$$

Krok 5: Obliczmy prawdopodobieństwo przerwy P_{XP} wywołany polaryzacją ortogonalną w warunkach bez opadów atmosferycznych:

$$P_{XP} = p_o \cdot 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} \quad (55)$$

gdzie: M_{XPD} [dB] jest marginesem dla danego BER (*bit error ratio*)

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_o}{I} & \text{bez XPIC} \\ C - \frac{C_o}{I} + XPIF & \text{z XPIC} \end{cases} \quad (56)$$

gdzie: $XPIC$ – tłumik przeników polaryzacyjnych (*cross polar interference canceller*);

$XPIF$ jest laboratoryjnie mierzonym współczynnikiem polepszenia polaryzacji skrośnej, który określa różnicę izolacji polaryzacji skrośnej XPI (*cross-polar isolation*) przy dostatecznie dużym stosunku nośnej do szumu (zwykle 35 dB) i określonej wartości BER dla systemu z lub bez $XPIF$. Typowa wartość $XPIF$ to 20 dB.

2.4.1.2 Zmniejszenie współczynnika polaryzacji skrośnej w warunkach z opadami atmosferycznymi

Znaczne zmniejszenie XPD może powodować interferencje wspólnokanałowe i w mniejszym stopniu, interferencje sąsiedniokanałowe. Zmniejszenie XPD może nastąpić zarówno w warunkach opadu atmosferycznego jak i bez opadu.

2.4.1.2.1 Wartości statystyczne XPD podczas opadów atmosferycznych

Dane wejściowe:

CPA – tłumienia dla polaryzacji zgodnej;

f_1, f_2 – częstotliwości pracy linii radiowych;

XPD_1, XPD_2 – wartości XPD nieprzekraczane w tych samych procentach czasu dla częstotliwości f_1 i f_2 .

Intensywny opad deszczu zmniejsza wartość XPD dla małych procentach czasu. Dla tras, w których dokładne pomiary lub oszacowane są niemożliwe, zgrubnie można oszacować XPD z całkowitego rozkładu tłumienia dla polaryzacji zgodnej CPA (*co-polar attenuation*) korzystając z zależności:

$$XPD = U - V(f) \log CPA \quad (57)$$

Współczynniki U i $V(f)$ są zależne od wielu zmiennych empirycznych parametrów, będących funkcją częstotliwości f . Dla tras o bezpośredniej widoczności i małych kątów elewacji oraz pionowej lub poziomej polaryzacji te współczynniki mogą być oszacowane:

$$U = U_o + 30 \log f \quad (58)$$

$$V(f) = \begin{cases} 12,8 f^{0,19} & \text{dla } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ 22,6 & \text{dla } 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \end{cases} \quad (59)$$

Średnia wartość U_o około 15 dB, a dla niższego zakresu z pomiarów otrzymano 9 dB przy tłumieniach większych od 15 dB.

Długoterminowa statystyka XPD uzyskana dla jednej częstotliwości może być przeskalowana na inną częstotliwość z wykorzystaniem pół empirycznej zależności:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log \frac{f_2}{f_1} \quad \text{dla } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (60)$$

gdzie: XPD_1, XPD_2 – wartości XPD nie przekraczane w tych samych procentach czasu dla częstotliwości f_1 i f_2 .

Wartość z (72) jest tym mniejsza im większa jest różnica pomiędzy rozpatrywanymi częstotliwościami. Jest większa dokładność, jeżeli XPD_1 i XPD_2 odnoszą się do tej samej polaryzacji (poziomej lub pionowej).

2.4.1.2.2 Procedura oszacowania przerw spowodowanych efektami opadów atmosferycznych

Dane wejściowe:

$XPIF$ – współczynnikiem poprawy polaryzacji skrośnej dla danego BER ;

C_o/I – stosunek nośnej do interferencji dla danego BER .

Krok 1: Określamy tłumienie trasy, $A_{0,01}$ [dB], przekraczane w 0,01% czasu – wzór (40) z [6].

Krok 2: Określamy ekwiwalentne tłumienie trasy, A_p [dB]:

$$A_p = 10 \frac{U \frac{C_o}{I} + XPIF}{V} \quad (61)$$

gdzie: U jest z równania (70), a V z (71), C_o/I [dB] jest stosunkiem nośnej do interferencji zdefiniowana dla danego BER bez $XPIC$, a $XPIF$ [dB] jest współczynnikiem poprawy polaryzacji skrośnej dla danego BER .

Gdy urządzeń $XPIC$ nie zastosowano, wówczas $XPIF=0$.

Krok 3: Określamy następujące parametry

$$m = \begin{cases} 23,6 \frac{A_p}{0,12 A_{0,01}} & \text{dla } m \leq 40 \\ 40 & \text{dla pozostałych} \end{cases} \quad (62)$$

i

$$n = \frac{-12,7 + \sqrt{161,23 - 4m}}{2} \quad (63)$$

Wartość n musi zawierać się w zakresie od -3 do 0 . Jednak w pewnych przypadkach, szczególnie, gdy urządzenia *XPIC* są zastosowane, wartość ta może być mniejsza niż -3 . W tym przypadku $BER < 1 \times 10^{-5}$.

Krok 4: Określamy prawdopodobieństwo zaniku:

$$P_{XPR} = 10^{(n-2)} \quad (64)$$

2.4.2 Zniekształcenia wywołane efektami propagacyjnymi

2.4.2.1 Prawdopodobieństwo zaniku w wyniku tłumienia deszczowego

Prawdopodobieństwo zaniku sygnału w wyniku tłumienia deszczowego, które jest równe prawdopodobieństwu przekroczenia tłumienia deszczowego równego marginesowi tłumienia F (dB) w czasie deszczu dla danego BER jest wyznaczane z zależności

$$P_R = p/100 \quad (65)$$

gdzie p (%) jest procentem czasu, w którym tłumienie deszczowe F (dB) jest przekraczane dla średniego roku otrzymane z równania:

$$\frac{F}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546+0,043 \log p)} \quad (66)$$

gdzie: $A_{0,01}$ – tłumienie przekraczane z prawdopodobieństwem 0,01% dla danej linii radiowej.

2.4.2.2 Prawdopodobieństwo zaników nieselektywnych

Prawdopodobieństwo zaniku nieselektywnego wyznaczane jest z równania:

$$P_{ns} = p_w/100 \quad (67)$$

gdzie: p_w (%) jest procentem czasu, w którym margines tłumienia F (dB) jest przekraczany w średnim najgorszym miesiącu roku, wyznaczonym z równania (15).

2.4.2.3 Prawdopodobieństwo zaników selektywnych

Prawdopodobieństwo przerwy jest zdefiniowane jako prawdopodobieństwo, przy którym wartość BER przekracza określony próg.

Dane wejściowe:

d – długość trasy [km];

W_x – szerokość sygnatury [GHz];

B_x – głębokość sygnatury [dB];

$\tau_{r,M}$ – czas opóźnienia otrzymany z sygnatury, dla minimalno-fazowego zaniku M;

$\tau_{r,NM}$ – czas opóźnienia otrzymany z sygnatury, dla nieminimalno fazowego zaniku NM.

Krok 1: obliczamy średni czas opóźnienia τ_m [ns]

$$\tau_m = 0,7 \left(\frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad (68)$$

Krok 2: obliczamy parametr aktywności wielodrogowej η z równania (63).

Krok 3: obliczamy prawdopodobieństwo przerwy selektywnej

$$P_s = 2,15 \eta \left(W_m \cdot 10^{\frac{-B_m}{20}} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \cdot 10^{\frac{-B_{NM}}{20}} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right) \quad (69)$$

Zdefiniowane parametrów sygnatury podano w Zaleceniu ITU-R F.1093.

2.4.3 Obliczenie całkowitego prawdopodobieństwa zaniku

Obliczenie prawdopodobieństwa P_t całkowitego tłumienia dla propagacji bez opadów:

$$P_t = P_{ns} + P_s + P_{XP} \quad (70)$$

gdzie: P_{ns} – prawdopodobieństwo zaniku nieselektywnego, wzór (67);

P_s - prawdopodobieństwo selektywnego, wzór (69);

P_{XP} - prawdopodobieństwo zaniku wywołanego polaryzacją skrośną w warunkach bez opadów atmosferycznych, wzór (55).

Prawdopodobieństwo zaniku dla propagacji w czasie deszczu jest równe większej wartości z P_{XPR} i P_R ; zależności (64) i (65).

3. Dokumentacja użytkowa programu TrasaZ

3.1 Wprowadzenie

Program TrasaZ służy do wyznaczania bilansu energetycznego naziemnego łącza radiowego oraz optymalizacji parametrów trasy radiowej.

Podstawowymi danymi wejściowymi programu są parametry stacji nadawczej i odbiorczej oraz parametry geo-klimatyczne trasy. Wynikiem programu jest obliczona moc odbierana na wejściu odbiornika w warunkach rzeczywistych oraz wartości proponowanych zmian dla niektórych parametrów trasy.

Zastosowany algorytm został przedstawiony w rozdz. 2.

Program został napisany w języku Visual Basic i pracuje w środowisku Windows.

3.2 Parametry wejściowe programu

Program wykorzystuje trzy rodzaje parametrów potrzebnych do wyznaczenia bilansu energetycznego łącza radiowego:

1. Parametry łącza (parametry stacji nadawczej i odbiorczej oraz parametry trasy),

2. Parametry klimatyczne trasy,
3. Parametry obliczeń,
4. Stałe wewnętrzne wykorzystywane przez algorytm.

3.2.1 Parametry łącza

Parametry stacji nadawczej i odbiorczej oraz parametry trasy są wprowadzane przez operatora programu w planszy głównej programu zatytułowanej „Parametry trasy horyzontowej – obliczanie tłumienia linii” przedstawionej na Rys.2.

W Tab.1 i Tab.2 podano nazwy parametrów i ich jednostki oraz dopuszczalne zakresy. Program zgłasza operatorowi wprowadzenie wartości wychodzącej poza dopuszczalny zakres wyświetlając wartość w kolorze czerwonym.

Tab.1 Parametry stacji nadawczej i odbiorczej

Nazwa parametru	Jednostki	Dopuszczalny zakres	Stacja	
			nadawcza	odbiorcza
Średnica anteny*	m	0,3 – 10	+	+
Zysk anteny*	dB	5 – 90	+	
Moc*	dBW	-30 – 20	+	
Moc zastępcza EIRP*	dBW	-25 – 120	+	
Wysokość terenu n.p.m.	m	0 – 2000	+	+
Wysokość zamocowania anteny	m	0 – 150	+	+
Współrzędne geograficzne*		strefa umiarkowana	+	+
Czułość odbiornika*	dBm	-140 – -30		+
Częstotliwość	GHz	1 – 66		
Polaryzacja		- liniowa pozioma - liniowa pionowa		

* - parametr opcjonalny

Tab.2 Parametry trasy linii radiowej

Nazwa parametru	Jednostki	Dopuszczalny zakres
Długość trasy	km	0,5 – 100
Liczba punktów (łącznie z końcami trasy)		2 - 500
Współrzędne geograficzne środka trasy	st, min	dowolny punkt na kuli ziemskiej w klimacie umiarkowanym
Parametry przekroju geodezyjnego trasy – punktów na trasie		
Odległość od stacji nadawczej	km	<0, długość trasy>

Nazwa parametru	Jednostki	Dopuszczalny zakres
Wysokość nad poziomem morza	m	-10 – 2000
Wysokość nad poziomem terenu	m	0 – 200
Rodzaj przeszkody		0 – przeszkoda nieostra 1 – przeszkoda ostra

Niektóre z parametrów są opcjonalne, tzn. jeśli operator nie poda ich wartości zostaną one wyliczone przez program. Parametry opcjonalne anten zostały zaznaczone na planszy strzałkami, które są wyświetlane wtedy, gdy kursor znajduje się w polu zależnych od siebie parametrów, Rys.2. I tak np. do wyliczenia zysku anteny potrzebna jest średnica anteny i częstotliwość; jeśli zostanie podany zysk operator nie musi podawać średnicy anteny.

Parametry trasy horyzontowej: Kampinos - W-wa PKiN; obliczenie tłumienia lini

Parametry tras Testy Stałe programu Optymalizacja Pomoc Zakończ program

Strona nadawcza

Średnica [] m Zysk 42,8 dB

Moc -4,2 dBW Moc zastępcza (EIRP) 38,6 dBW

Wysokość terenu n.p.m. 87,5 m Wysokość zamocowania anteny n.p.t. 30,5 m

Współrzędne geograficzne lokalizacji: długość [] E szerokość [] N

Częstotliwość 6,04 GHz

Polaryzacja sygnału: liniowa pionowa

Długość trasy 36,6 km

Liczba punktów trasy 11

Współrzędne geograficzne środka trasy: długość 21 E 0,65 szerokość 52 N 4

Strona odbiorcza

Zysk [] B Średnica [] m

Czułość odbiornika -80 dBm

Wysokość terenu n.p.m. 112 m Wysokość zamocowania anteny n.p.t. 138,5 m

Współrzędne geograficzne lokalizacji: długość [] E szerokość [] N

Parametry obliczeń

Procent czasu 0,01 %

Obliczenia dla: śr. najgorszego miesiąca

Wsp. krzywizny Ziemi: wspKe - wg ITU-R wspKe = 4/3

Obliczenia dla zestawu: bez wyświetlania parametrów i wyników z wyświetlaniem parametrów i wyników

Wyczyść pola parametrów

Oblicz bilans energetyczny łącza

Pokaż wykres przekroju trasy

Uzupełnij tablicę przekroju trasy

Przekrój geodezyjny trasy:

Odległość od stacji nad. [km]	0	0,4	2,7	5,5	6	6,6	28	29,5	31,5	36	36,6						
Wysokość n.p.morza [m]	87,5	89,5	91,5	92,5	92,5	92,5	112,5	113,5	112,5	111,5	112						
Wysokość przeszkody [m]	30,5	10	21	0	9	0	36	7	38	49	138,5						
Rodzaj przeszkody		1	1	0	0	0	1	0	0	1							

Rodzaj przeszkody: 0 - przeszkoda nieostra (np. zabudowa, las); 1 - przeszkoda ostra (np. wieża)

Kierunek przechożenia po naciśnięciu klawisza ENTER w tabelce przekroju geodezyjnego: w prawo

Rys.2 Plansza główna programu z parametrami łącza.

Ponieważ algorytm wyznaczania bilansu energetycznego wykorzystuje w obliczeniach wartości parametrów klimatycznych takich jak np. intensywność deszczu czy temperatura, program, aby móc skorzystać z danych proponowanych przez ITU-R, musi mieć podane współrzędne geograficzne trasy. Ze względu na to, że nie są to bardzo duże odległości przyjęto, że trasę pod względem klimatycznym reprezentuje punkt środkowy trasy. Przy wyznaczaniu zajętości I strefy Fresnela wykorzystuje się m.in. współczynnik k_e określonego dla klimatu umiarkowanego. Z tego względu obliczenia mogą dotyczyć jedynie obszarów leżących w strefie klimatu umiarkowanego.

Wprowadzenie wartości wysokości npm i wysokości anteny nadawczej (z naciśnięciem 'Enter') spowoduje wstawienie tych wartości do tabelki przekroju w pierwszym punkcie. Jeśli

jest podana ilość punktów na trasie, to wprowadzenie długości trasy oraz parametrów stacji odbiorczej (z naciśnięciem 'Enter') spowoduje wstawienie tych wartości do przekroju.

Wybranie przycisku „Uzupełnij tablicę przekroju” spowoduje wypełnienie wolnych miejsc w tabeli:

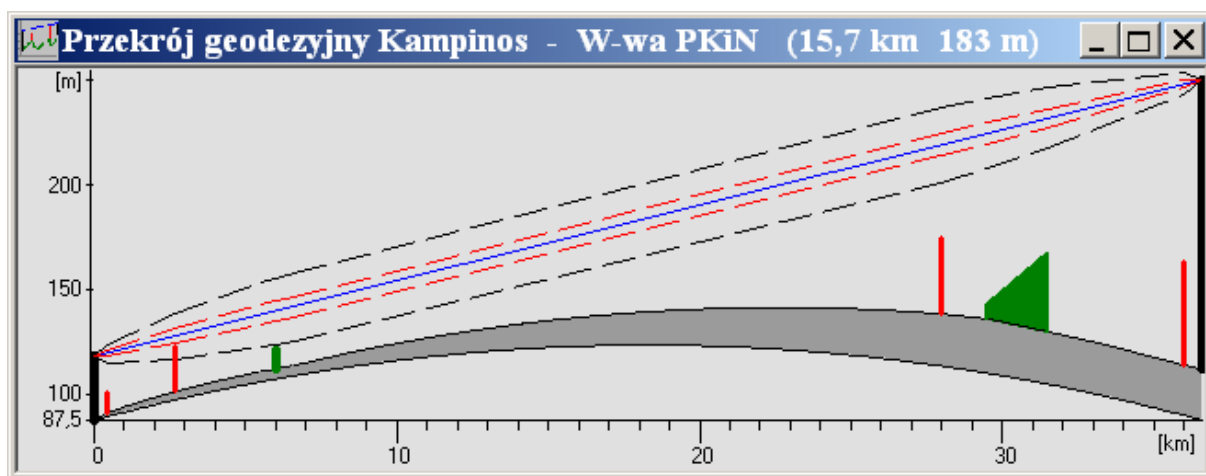
- w wierszu „Wysokość n.p. morza [m]” (Wysokość nad poziomem morza) wartości zostaną wyliczone przez interpolację podanych wartości na krańcach,
- w wierszu „Wysokość przeszkody [m]” (Wysokość nad poziomem terenu) w puste komórki zostanie wstawione 0,
- w wierszu „Rodzaj przeszkody” w puste komórki zostanie wstawione 0.

Jeśli nie próbowano wprowadzać danych do przekroju geodezyjnego trasy, to przy kliknięciu przycisku „Oblicz” lub wybraniu z menu „Wyznacz I strefę Fresnela” nastąpi automatyczne uzupełnienie tabeli w ten sam sposób jak przy kliknięciu przycisku „Uzupełnij tablicę przekroju”.

3.2.2 Wizualizacja przekroju trasy

Po wprowadzeniu parametrów przekroju trasy użytkownik ma możliwość wyświetlenia danego przekroju na wykresie przez kliknięcie w przycisk „Pokaż wykres przekroju trasy”.

Przykładowy wykres zawiera Rys.3. Wykres uwzględnia wybrany współczynnik krzywizny Ziemi.



Rys.3 Przykładowy wykres przekroju trasy

Opis wykresu:

Oś pionowa odnosi się jedynie do wysokości npm końców trasy. Minimalna wartość osi pionowej odpowiada minimalnej wysokości npm dla danego przekroju. Na pasku okienka wykresu wyświetlana jest pozycja myszy: odległość punktu od anteny nadawczej w km, oraz wysokość punktu npm w metrach.

Użyte kolory:

- szary – obszar wypełniony - teren,
- linia przerywana - I strefa Fresnela
- zielony – przeszkody nieostre np. zabudowa, lasy

- czerwony – linia ciągła - przeszkody ostre np. wieża
- linia przerywana - 0,3 I strefy Fresnela
- czarny – anteny
- niebieski – linia bezpośredniej widoczności

Parametry klimatyczne

Tab.3 podano listę plików tekstowych, które są wczytywane przez program TrasaZ. Pliki te zawierają wartości parametrów klimatycznych, które są wykorzystywane przy wyznaczaniu tłumień spowodowanych warunkami meteorologicznymi na trasie.

Tab.3 Pliki tekstowe wykorzystane jako dane wejściowe programu TrasaZ

Nazwa pliku	Rozmiar pliku [kB]	Zawartość	Wykorzystane w obliczeniach
EsaTemp.txt	171	Średnia temperatura 2 m nad powierzchnią w Kelwinach	Tłumienia gazów atmosferycznych
surfWV_01.txt	454	Średnia roczna gęstość pary wodnej w powietrzu przekraczana z prawdopodobieństwem 1%	Tłumienia gazów atmosferycznych
EsaRain_Mc.txt	399	Wartości potrzebne do wyznaczenia intensywności deszczu przekraczanego z prawdopodobieństwem 0,01%	Tłumienia deszczowego.
EsaRain_Ms.txt	399		
EsaRainPr6.txt	399		
dNdZ_01.txt	257	Punktowy gradient refrakcji w najniższej warstwie o wysokości 65 m w atmosferze nie przekraczany z prawdopodobieństwem 1%	Tłumienia spowodowanego wielodrogowością

Pliki te zostały pobrane z oficjalnej witryny ITU-R [7] Podana data aktualizacji wynosi 2.05.2002r.

W obecnej wersji pliki zawierają dane dotyczące wszystkich punktów na kuli ziemskiej rozmieszczonych w siatce geograficznej co 1,5°, zarówno szerokości jak i długości. Do wyznaczenia danego parametru dla dowolnego punktu zastosowano interpolację bi-linearną, [9], wykorzystującą wartości z czterech najbliższych położonych punktów siatki.

Proponowane przez program wartości parametrów klimatycznych dotyczą środkowego punktu trasy, którego współrzędne są podawane w planszy parametrów łącza. Operator ma możliwość podania innych wartości parametrów klimatycznych. Szczegółowy opis wykorzystywanych parametrów klimatycznych został podany w rozdziałach dotyczących poszczególnych składowych tłumienia propagacyjnego.

3.2.3 Parametry obliczeń

- procent czasu
- czas: średni rok, średni najgorszy miesiąc, krótszy okres czasu
- rodzaj terenu dla krótszego okresu czasu

– współczynnik krzywizny Ziemi.

Ustalenie okresu czasu ważne jest przy obliczeniach tłumienia wywołanego deszczem lub wielodrogowością.

Przy obliczaniu tłumienia wywołanego wielodrogowością podstawowym obliczeniem jest tłumienie dla średniego najgorszego miesiąca; pozostałe przypadki oblicza się korzystając z metody podanej w ITU-R P.530-10

Przy obliczaniu tłumienia wywołanego deszczem podstawowym obliczeniem jest tłumienie dla średniego roku; do wyznaczenia tłumienia dla średniego najgorszego miesiąca wykorzystuje się metodę podaną w zalec. ITU-R P.841.

Przy wyborze krótszych okresów czasu dodatkowo należy wybrać rodzaj terenu.

Współczynnik krzywizny Ziemi wykorzystywany jest do obliczenia rzeczywistego promienia Ziemi. Może być wyznaczony z krzywych podanych przez ITU-R dla zadanej częstotliwości lub może przyjąć wartość 4/3.

3.2.4 Parametry stałe programu

Oprócz danych wprowadzanych w planszy głównej i tekstowych plików zewnętrznych program wykorzystuje stałe wewnętrzne. Są to dane tabelaryczne, których wartości zostały podane w Zaleceniach ITU-R.

Tab.4 Stałe programu

Nazwa	Wykorzystane przy obliczeniach	Źródło
Teoretyczna krzywa tłumienia na przeszkodzie ostrej	tłumienia dyfrakcyjnego	Zalec. ITU-R P.530-10
Współczynniki regresji	tłumienia deszczowego	Zalec. ITU-R P.838-2
Współczynnik k_e (klimat umiarkowany)	wybrzuszenia Ziemi	Zalec. ITU-R P.530-10

3.3 Optymalizacja

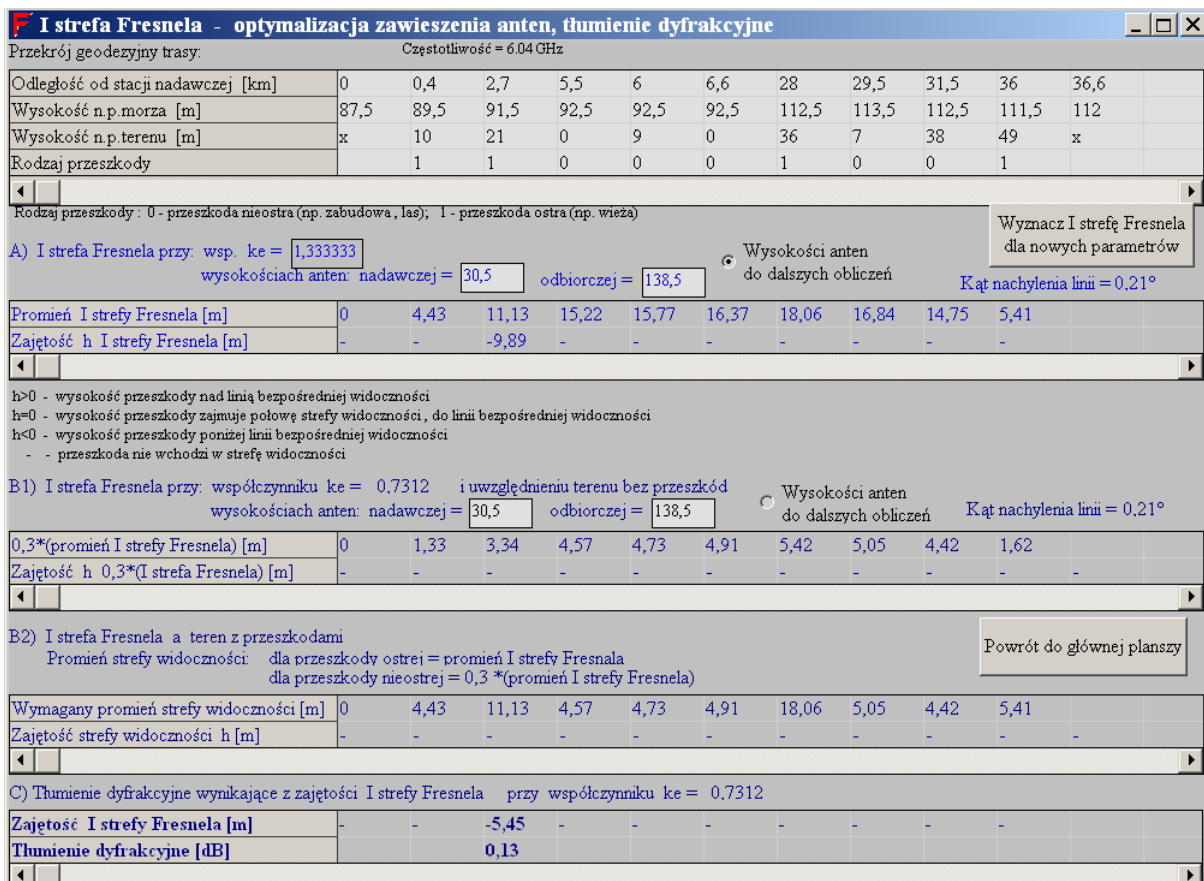
3.3.1 Zajętość I strefy Fresnela

Po wprowadzeniu parametrów łącza i przekroju geodezyjnego trasy operator ma możliwość sprawdzenia zajętości I strefy Fresnela wykorzystując planszę „I strefa Frenkla”, którą można wyświetlić wybierając z menu okna pozycje „Optymalizacja”, „Wyznacz I strefę Fresnela”. Operator może sprawdzić, przy jakich wysokościach zawieszenia anten uzyska najmniejsze tłumienie dyfrakcyjne.

Na Rys.4 przedstawiono planszę „I strefa Fresnala”.

Pierwsza tabelka na planszy zawiera dane przekroju geodezyjnego przepisane z planszy parametrów łącza. Wszystkie elementy przekroju na tej planszy można zmienić oprócz długości trasy i parametrów anten. Zmieniony przekrój można przy zamknięciu planszy przepisać do planszy parametrów łącza.

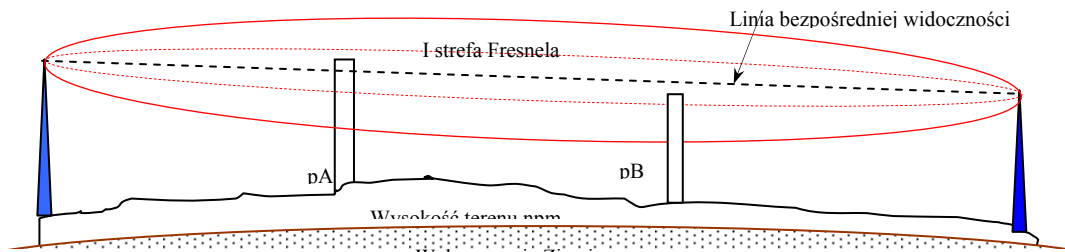
Tabela A z planszy „I strefa Fresnela” zawiera wyznaczone w punktach trasy promienie I strefy Fresnela oraz zajętość I strefy Fresnela. W przyjętej konwencji, jeśli przeszkoda wystaje ponad linię bezpośredniej widoczności, to wartość oznaczająca zajętość I strefy Fresnela przez przeszkodę przyjmuje wartość wysokości, na jaką przeszkoda wystaje ponad linię bezpośredniej widoczności ze znakiem dodatnim. Jeśli przeszkoda nie dochodzi do linii bezpośredniej widoczności, zajętość określa się jako wartość odległości przeszkody do linii bezpośredniej widoczności ze znakiem ujemnym.



Rys.4 Plansza– zajętość I strefy Fresnela

Na Rys. 5 przedstawiono przykładową trasę łącza radiowego. Na rysunku przeszkoda ‘pA’ wystaje ponad linię bezpośredniej widoczności i dla niej zajętość I strefy Fresnela wynosiłaby np. 2 m, a dla przeszkody ‘pB’ -2 m. Tabela A z planszy na Rys.4 zawiera wartości zajętości I strefy Fresnela wyliczone dla współczynnika $ke=4/3$.

Tabelki B zawierają dane wyliczone dla współczynnika ke wyznaczonego przez program w zależności od długości trasy, [6].

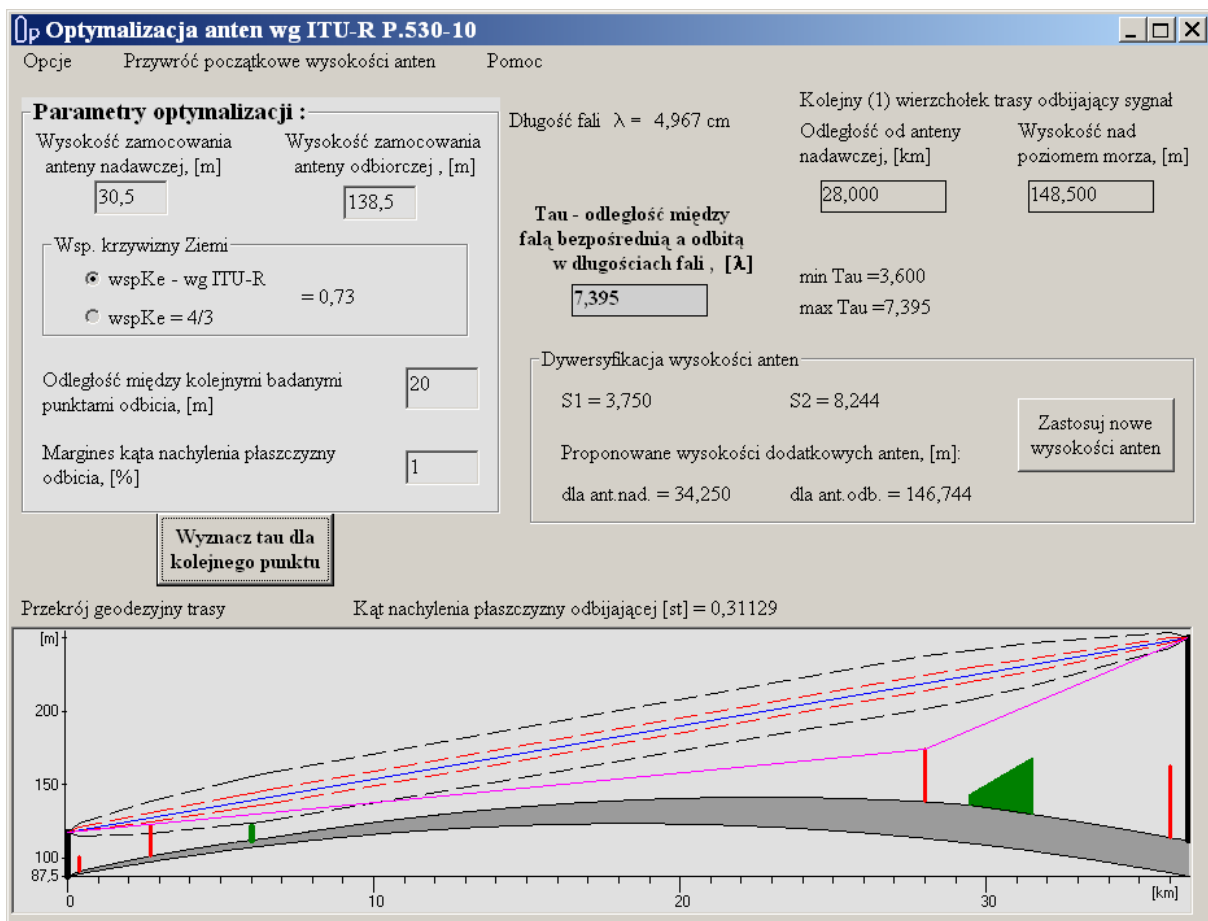


Rys. 5 Przykład trasy łącza radiowego i przeszkód w I strefie Fresnala

Program umożliwia graficzne przedstawienie przekroju geodezyjnego poprzez naciśnięcie przycisku ‘Pokaż wykres przekroju trasy’ w oknie z parametrami trasy, a także jest wyświetlany w planszy z wynikami obliczeń.

3.3.2 Optymalizacja zawieszenia anten

Optymalizacja zawieszenia anten została opracowana w oparciu o algorytm przedstawiony w rozdz. 2.3, skąd też pochodzą symbolika i oznaczenia użyte do wyświetlania wyników.



Rys.6 Plansza umożliwiająca optymalizację zawieszenia anten

Przy wyznaczaniu optymalnej wysokości anten:

1. sprawdza się sygnał odbity w kolejnych wierzchołkach trasy
2. a następnie wyszukuje się taki kolejny punkt na trasie, w którym nachylenie terenu (lub przeszkody nieostrej) umożliwi odbitemu sygnałowi dotarcie do anteny odbiorczej.

Ad.1 Przy sprawdzaniu sygnału odbitego od kolejnego wierzchołka na trasie, program wylicza wartość teoretyczną kąta nachylenia płaszczyzny odbicia dla tego punktu trasy, przy którym odbity sygnał trafiłby do anteny odbiorczej.

Ad2. Program sprawdza kolejno każdy punkt trasy z zadaniem krokiem: wyznacza kąt nachylenia terenu, wyznacza teoretyczny kąt płaszczyzny odbicia, dla którego odbity sygnał trafiłby do anteny odbiorczej, a następnie sprawdza, różnicę między kątami. Jeśli ta różnica jest mniejsza od zadanego marginesu i sygnał jest niezasłonięty to jest on rozpatrywany w dalszej części algorytmu i wyświetlany.

Dla kolejnego rozpatrywanego punktu trasy wyznacza się minimalną i maksymalną wartość τ , która jest różnicą trasy sygnału odbitego i bezpośredniego wyrażoną w długościach fali. Jeśli różnica między tymi wartościami jest większa od 1 to należy rozpatrzyć konieczność dywersyfikacji anten.

Rozpatrywany sygnał odbity jest wyświetlany na rysunku, a proponowane wysokości zawieszenia dodatkowych anten i wyliczona wartość kąta odbicia są wyświetlane nad rysunkiem przekroju trasy.

Algorytm wyświetla tylko te sygnały odbite, które nie są przysłonięte przez przeszkody występujące na trasie. Wybranie z menu elementu: 'Opcje' i zaznaczenie pozycji 'Pokazuj sygnały odbite zasłonięte' spowoduje wyświetlenie wszystkich rozpatrywanych sygnałów odbitych; sygnał odbity zasłonięty będzie sygnalizowany wyświetleniem informacji o tym nad rysunkiem przekroju trasy.

3.4 Wyniki programu

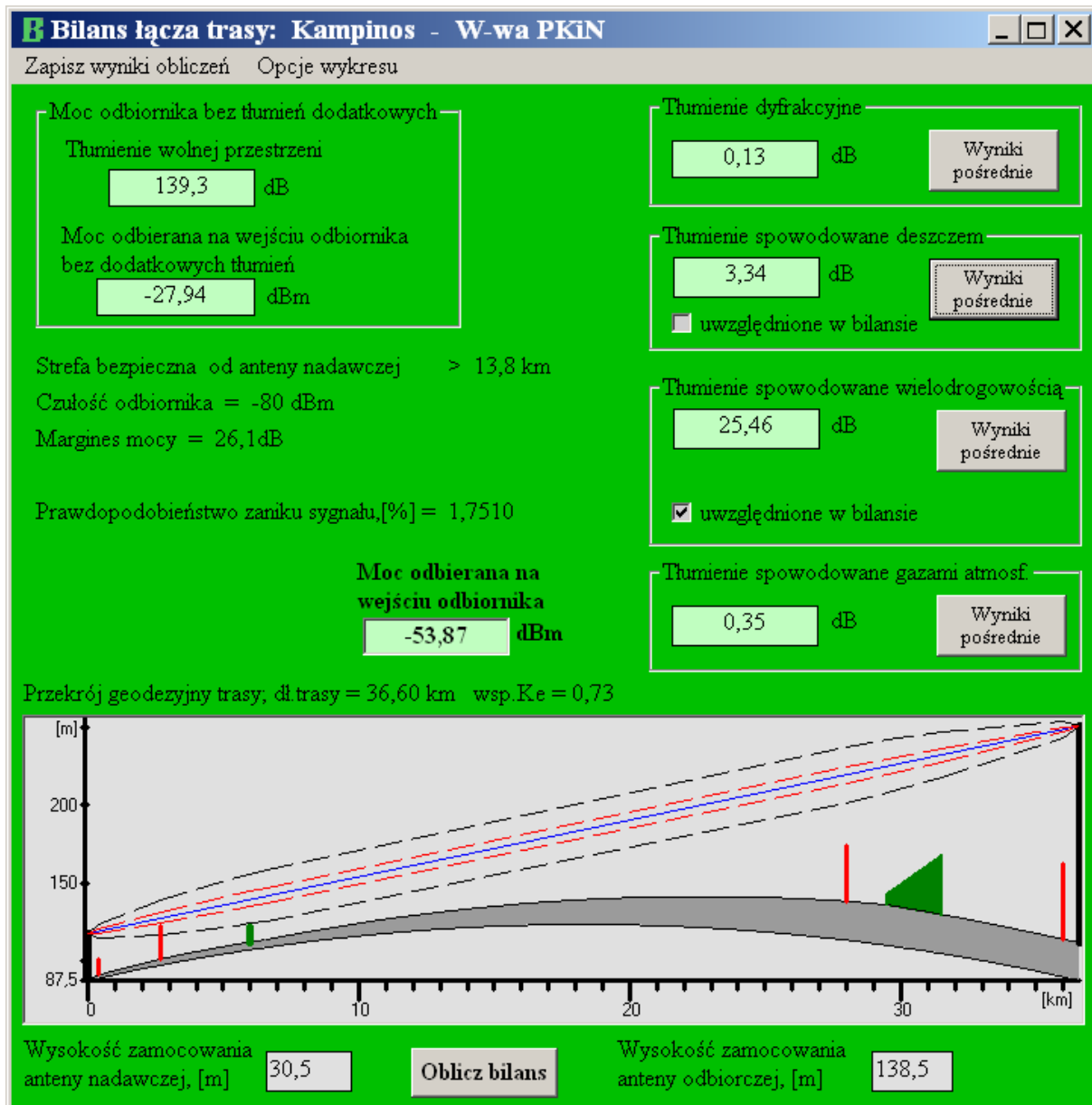
3.4.1 Wyniki końcowe

Wynikiem programu jest obliczona moc odbierana na wejściu odbiornika. Obliczenie następuje po kliknięciu w przycisk "Oblicz bilans energetyczny łącza" na planszy "Parametry trasy horyzontowej". Wynik jest wyświetlany na planszy pod tytułem "Bilans – moc odbierana na wejściu odbiornika".

Oprócz tego, wyświetlane są następujące wartości:

- t.zw. minimalna odległość dla strefy bezpiecznej od anteny nadawczej, jeśli jest podana moc anteny nadawczej to wyświetlana;
- margines mocy, jeśli jest podana czułość odbiornika i czułość jest mniejsza od wyliczonego tłumienia całkowitego;
- optymalna długość trasy, jeśli jest podana czułość i czułość jest większa od wyliczonego tłumienia całkowitego;
- prawdopodobieństwo wystąpienia zaniku sygnału powstałe w wyniku zjawisk atmosferycznych.

Pod wykresem przekroju trasy podane są wysokości zamocowania anten, które można zmienić i po kliknięciu przycisku „Oblicz bilans” nastąpi ponowne obliczenie bilansu dla nowych wartości oraz aktualizacja wyświetlanych wartości i wykresu.



Rys.7 Plansza z wynikiem końcowym programu

Na planszy z wynikiem mocy odbieranej na wejściu program wyświetla wykres przekroju trasy w formie opisanej w rozdz. 3.2.2. Pod wykresem znajdują się pola do wprowadzenia nowych wartości wysokości zamocowania anten. Kliknięcie w przycisk „Oblicz bilans” powoduje wyliczenie na nowo wszystkich wartości końcowych i pośrednich wyświetlanych w tym oknie dla nowych wartości zawieszenia anten. Zmiana wysokości anten w tym oknie nie spowoduje zmiany tych wartości w oknie parametrów anten.

3.4.2 Wyniki pośrednie

Oprócz wyniku końcowego wyświetlane są też wyniki pośrednie:

- tłumienie wolnej przestrzeni,
- moc odbierana na wejściu odbiornika bez dodatkowych tłumień,
- tłumienie dyfrakcyjne,
- tłumienie spowodowane deszczem,
- tłumienie spowodowane wielodrogowością
- tłumienie spowodowane gazami atmosferycznymi.

Ponieważ warunki klimatyczne występowania deszczu wykluczają występowanie zjawiska wielodrogowości i vice versa, do wyznaczenia bilansu energetycznego program automatycznie wykorzystuje większą z tych wartości. Która z wartości została uwzględniona w obliczeniach wskazuje zaznaczenie opcji „uwzględnione w bilansie”. Operator może zmienić ten wybór.

Istnieje też możliwość wyświetlenia wyników pośrednich tłumień propagacyjnych przez kliknięcie przycisku „Wyniki pośrednie” przy odpowiednim wyniku tłumienia. Na planszach z wynikami pośrednimi tłumień propagacyjnych wyświetlane są wartości parametrów klimatycznych wykorzystywanych w obliczeniach. Operator ma możliwość zmiany wartości tych parametrów.

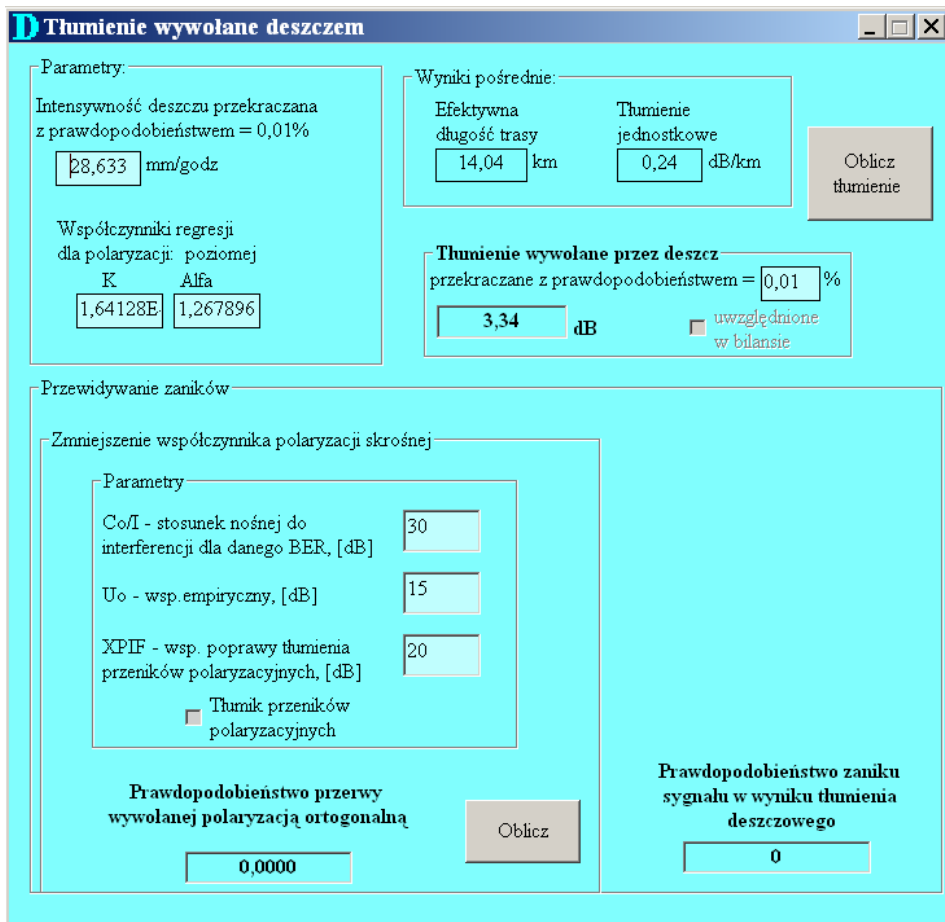
Zmiana wartości parametrów klimatycznych powoduje wyzerowanie pól z wartościami zależnymi od nich. Kliknięcie przycisku „Oblicz tłumienie” spowoduje powtórne wyznaczenie tłumienia wg nowych parametrów. Program ‘pamięta’ zmianę parametrów do następnego kliknięcia przycisku „Oblicz bilans energetyczny łączy” na planszy z parametrami łączy.

3.4.2.1 Wyniki pośrednie tłumienia wywołanego deszczem

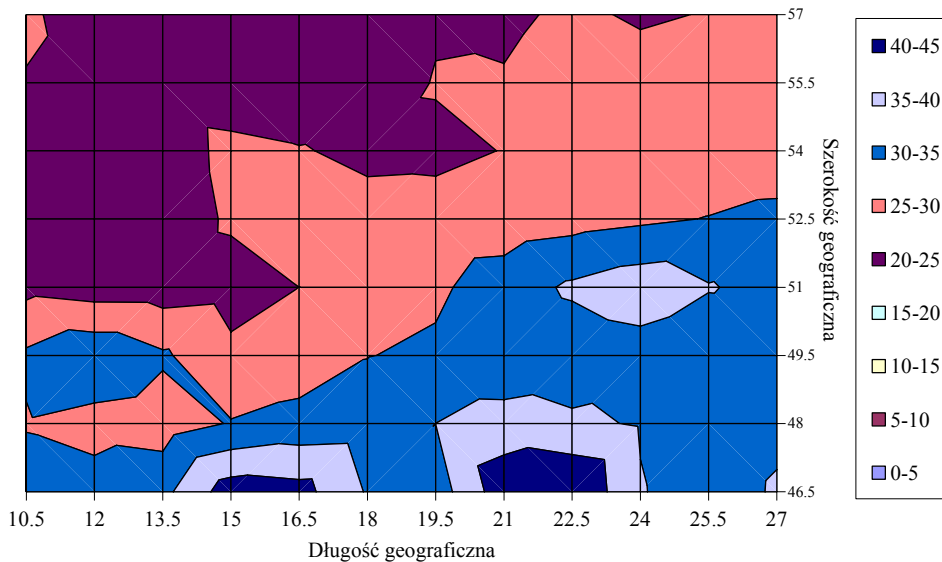
Standardowo przy projektowaniu systemów radiowych wykorzystuje się 1-minutową średnią intensywność deszczu przekraczaną z prawdopodobieństwem 0.01%. Dla uzyskania innej niezawodności linii można wyznaczyć tłumienie spowodowane przez intensywność deszczu przekraczaną z mniejszym prawdopodobieństwem np. 0,001% - tzn. rzadziej występujące jeszcze większe intensywności deszczu. W sytuacji, gdy są dostępne inne źródła parametru intensywność deszczu można zmienić proponowaną przez ITU-R wartość.

Tab.5 Parametry tłumienia deszczowego

Nazwa parametru	Jednostki	Dopuszczalny zakres
Intensywność deszczu przekraczana z prawdopodobieństwem 0,01%	mm/godz	dla terenu Polski : 20 – 60
Współczynnik regresji K		
Współczynnik regresji Alfa		
Prawdopodobieństwo, z jakim jest przekraczane tłumienie wywołane deszczem	%	1; 0,1; 0,01; 0,001



Rys.8 Plansza z wynikami pośrednimi tłumienia deszczowego.



Rys.9 Średnia intensywność deszczu przekraczana z prawdopodobieństwem 0,01% w Europie środkowej, [7]

Na planszy z tłumieniem spowodowanym deszczem, została wydzielona część dotycząca obliczeń prawdopodobieństwa powstania zaniku w wyniku deszczu. Dodatkowymi parametrami, [Tab.6] do wyliczenia tego prawdopodobieństwa są wartości podawane w dokumentacji sprzętu radiowego. Program proponuje typowe wartości; operator może je zmienić.

Tab.6 Dodatkowe parametry prawdopodobieństwa zaniku w warunkach opadu atmosferycznego

Nazwa parametru	Jednostki	Proponowana wartość	Dopuszczalny zakres
Co/I - stosunek nośnej do interferencji dla danego BER	dB	30	
Uo – współczynnik empiryczny	dB	15	<9, 15>
XPIF - współczynnik poprawy tłumienia przeniów polaryzacyjnych	dB	20	
Tłumik przeniów polaryzacyjnych	logiczny	nie	tak, nie
BER			

Obliczane jest prawdopodobieństwo zaniku powstałe w wyniku polaryzacji skośnej oraz tłumienia spowodowanego deszczem, Jako wynik końcowy podaje się większą wartość, jeśli do bilansu końcowego zostało dodane tłumienie wywołane deszczem.

3.4.2.2 Wyniki pośrednie tłumienia spowodowanego wielodrogowością

Na Rys.10 przedstawiono planszę z parametrami wykorzystywanymi do wyznaczenia tłumienia wywołanego zjawiskiem wielodrogowości oraz wartość tego tłumienia. Na tej planszy można zmienić wartość gradientu oraz prawdopodobieństwo, z jakim wyliczone tłumienie może wystąpić.

Do wyznaczenia tłumienia spowodowanego wielodrogowością wykorzystano algorytm iteracji, który wyznacza wartość tłumienia z dokładnością do 0,01.

Tab.7 Parametry tłumienia wywołanego wielodrogowością

Nazwa parametru	Jednostki	Dopuszczalny zakres
Gradient refrakcji		-600 – -200

W Tłumienie wywołane wielodrogowością

Parametry

Gradient refrakcji: Częstotliwość = 6.04 GHz

Wysokość anteny nadawczej npm = 118 m Długość trasy = 36.6 km

Wysokość anteny odbiorczej npm = 250.5 m

Oblicz tłumienie

Tłumienie wywołane wielodrogowością

przekraczane z prawdopodobieństwem = %

dB uwzględnione w bilansie

Przewidywanie zaników

Zmniejszenie współczynnika polaryzacji skrośnej

Gwarantowana katalogowo min.wartość XPD, [dB]

Co/I - stosunek nośnej do interferencji dla danego BER, [dB]

XPIF - wsp. poprawy tłumienia przetransmitowanych polaryzacyjnych, [dB]

S - odległość anten odbiorczych, [m]

Tłumienie przetransmitowanych polaryzacyjnych

Prawdopodobieństwo przerwy wywołanej polaryzacją ortogonalną **Oblicz**

Przerwa w systemach niezabezpieczonych

BER=10⁻³ BER=10⁻⁶

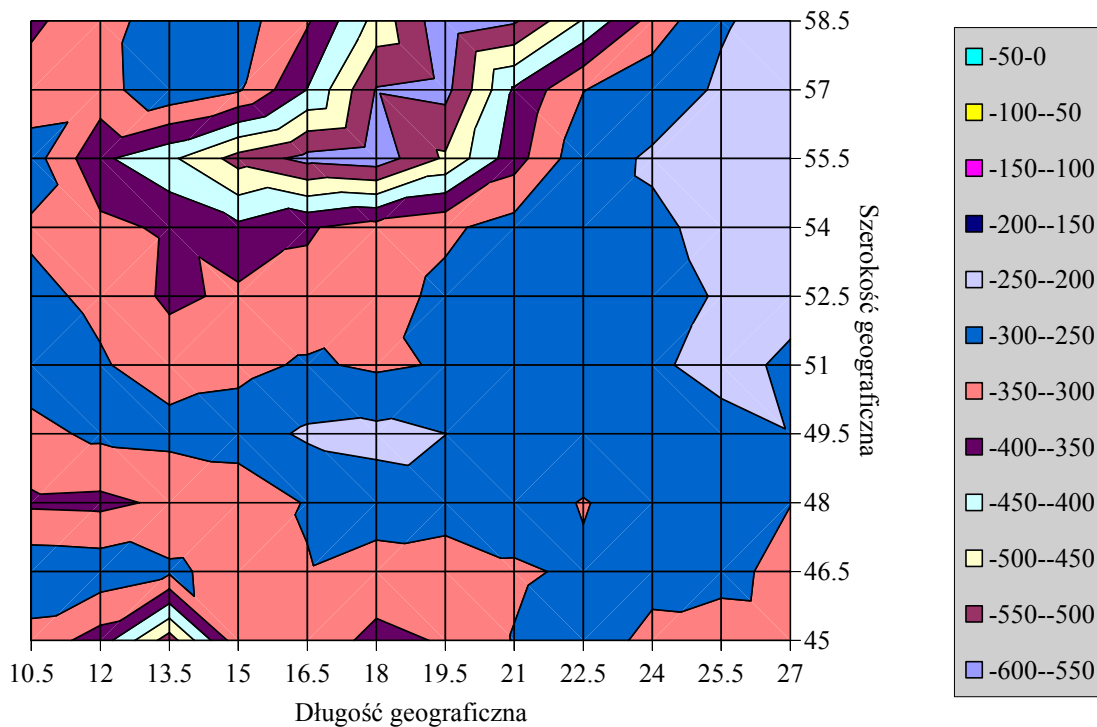
Prawdopodobieństwo przerwy w systemach niezabezpieczonych

Zaniki nieselektywne

Margines zaniku płaskiego, [dB]

Prawdopodobieństwo przerwy w wyniku zaników nieselektywnych **Oblicz**

Rys.10 Plansza z parametrami i tłumieniem spowodowanym wielodrogowością



Rys.11 Gradient refrakcji w najniższej warstwie atmosfery o wysokości 65 m, [7]

Wydzielona część planszy dotyczy obliczeń prawdopodobieństwa powstania zaników w warunkach bez deszczu. Dodatkowymi parametrami, [Tab.8] do wyliczenia tych prawdopodobieństw są wartości podawane w dokumentacji sprzętu radiowego. Program proponuje typowe wartości; operator może je zmienić.

Tab.8 Dodatkowe parametry prawdopodobieństwa zaniku w warunkach bez opadu atmosferycznego

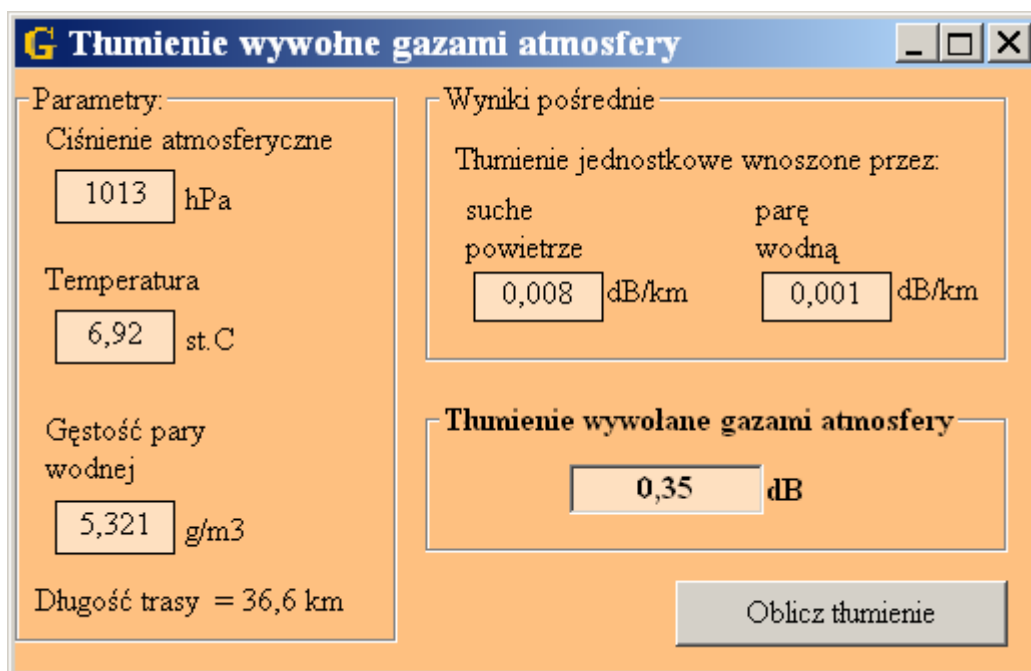
Nazwa parametru	Jednostki	Proponowana wartość	Dopuszczalny zakres
XPDg - gwarantowana katalogowo minimalna wartość XPD	dB	35	<15, 60>
Co/I - stosunek nośnej do interferencji dla danego BER	dB	30	
Uo – współczynnik empiryczny	dB	15	<9, 15>
XPIF - współczynnik poprawy tłumienia przenuków polaryzacyjnych	dB	20	
Tłumik przenuków polaryzacyjnych	logiczny	nie	tak, nie
BER			
Margines zaniku płaskiego	dB		

Obliczane jest prawdopodobieństwo zaniku powstałe w wyniku polaryzacji skrośnej, zaniku w systemach niezabezpieczonych oraz zaników nieselektywnych. Jako wynik końcowy podaje się sumę tych wartości, jeśli do bilansu końcowego zostało dodane tłumienie wywołane wielodrogowością.

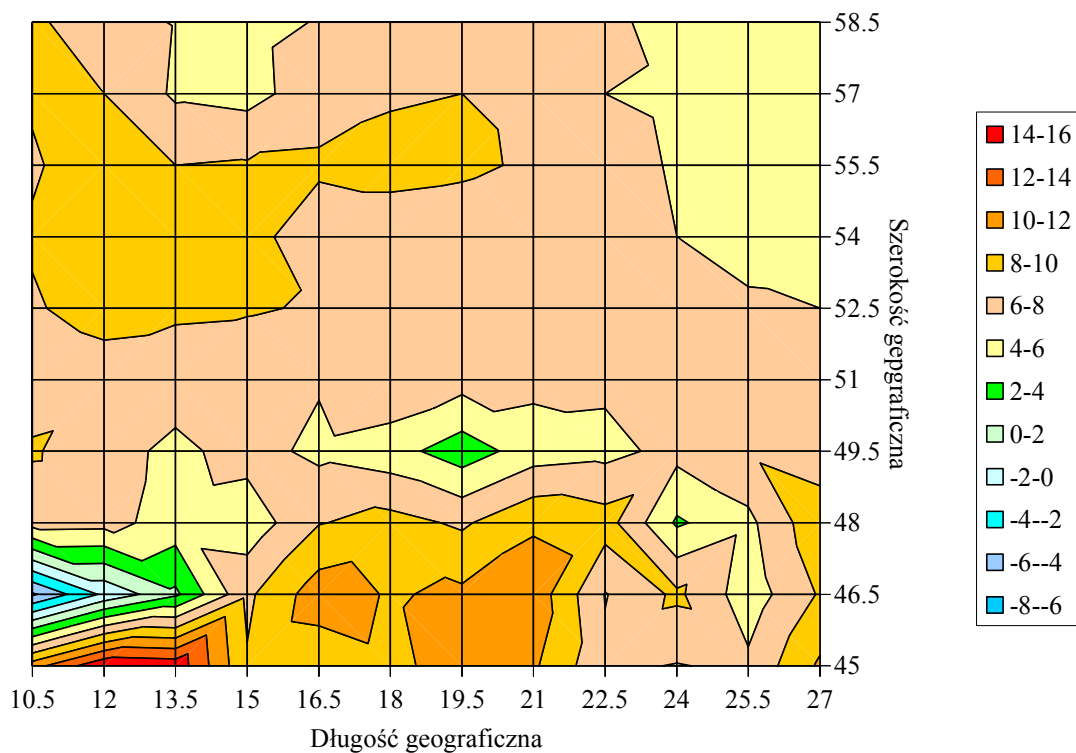
3.4.2.3 Wyniki pośrednie tłumienia wywołanego gazami atmosfery

Tab.9 Parametry tłumienia wywołanego gazami atmosfery

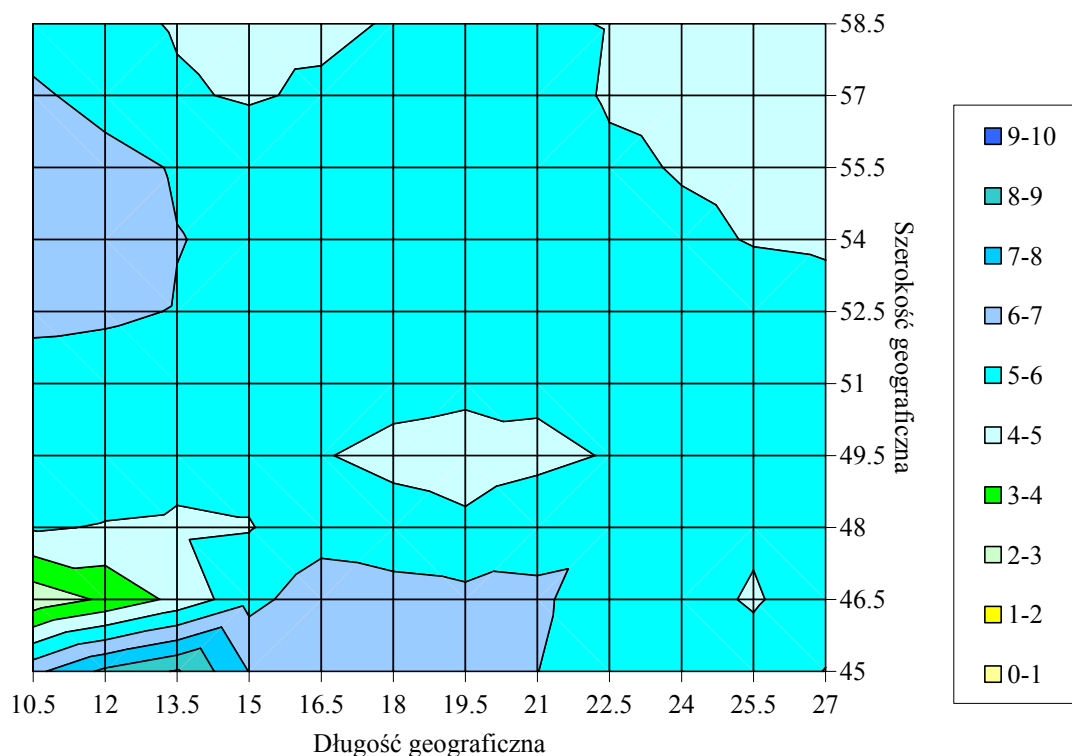
Nazwa parametru	Jednostki	Dopuszczalny zakres
Ciśnienie atmosferyczne	hPa	1001
Temperatura	st. Celsjusza	dla Polski: 2 – 9
Gęstość pary wodnej	g/m ³	dla Polski: 4 – 6



Rys.12 Plansza z parametrami i wynikami pośrednimi tłumienia wywołanego gazami atmosfery



Rys.13 Średnia roczna temperatura w środkowej Europie, [7]



Rys.14 Średnia gęstość zawartości pary wodnej na terenie Polski, [7]

3.5 Pomoc podręczna

Program posiada wbudowaną pomoc podręczną wywoływaną kontekstowo przez naciśnięcie klawisza 'F1' lub z menu głównej planszy.

Literatura

1. ALCATEL *Urządzenia linii radiowej typu 9681 LH*. Dane katalogowe.
2. Anderson H.R.: *Fixed broadband wireless system design*. John Wiley & Sons Ltd. 2003.
3. Bogucki J., Wielowieyska E.: *Charakterystyki intensywności deszczu dla potrzeb radiokomunikacji*. Elektronizacja, nr 7-8, 2003
4. Bogucki J., Wielowieyska E.: *Niezawodność horyzontowych linii radiowych – aspekt praktyczny*. Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Wrocław, 25-27 czerwca 2003
5. Bogucki J., Wielowieyska E.: *Propagation reliability of line-of-sight radio relay systems above 10 GHz*. 17th International Wrocław Symposium and Exhibition on Electromagnetic compatibility, Wrocław, 29 czerwca - 1 lipca, 2004
6. Dusiński A.: *Opracowanie oprogramowania dla potrzeb projektowania horyzontowych linii radiowych pracujących na częstotliwościach zakresu fal milimetrowych*. Etap 2 w: *Problemy propagacyjne w środkach przekazu radiowego*. Warszawa, Instytut Łączności, 2004
7. <http://www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/troposph/>

8. ITU-R F.1093-1: 1997: *Effects of multipath propagation on the design and operation of line-of-sight digital radio-relay systems*. Rec.
9. ITU-R P.1144-3, 2001: *Guide to the application of the propagation methods of Radiocommunication Study Group 3*, Rec.
10. ITU-R P.1410-1: 2001: *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband millimetric radio access systems operating in a frequency range of about 20-50 GHz*.
11. ITU-R P.1510: 2001: *Annual mean surface temperature*, Rec.
12. ITU-R P.530-10: 2001 *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*, Rec.
13. ITU-R P.676-5: 2001: *Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1÷350. GHz*, Rec.
14. ITU-R P.835-3:1999: *Reference standard atmospheres*, Rec.
15. ITU-R P.836-3:2001: *Water vapour: surface density and total columnar content*.
16. ITU-R P.837-3: 2001: *Characteristics of precipitation for propagation modelling*, Rec.
17. ITU-R P.838-1: 1999: *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, Rec.
18. ITU-R P.839-3: 2001: *Rain height model for prediction methods*, Rec.
19. ITU-R P.841-3:2003: *Conversion of annual statistics to worst-month statistics*, Rec
20. Kawecki A.: *Charakterystyki zaników sygnału, wywołanych propagacją wielodrogową w doświadczalnych liniach mikrofalowych 11,5 i 18,6 GHz*. Prace IŁ, nr 101, 1993
21. Kawecki A.: *Korelacja intensywności deszczu z tłumieniem mikrofal*. Prace IŁ, nr 108, 1997
22. Kawecki A.: *Niektóre aspekty przewidywania tłumienia fali wywołanego przez deszcze oraz korelacja intensywności deszczu z tłumieniem*. Prace IŁ, nr 104, 1995
23. Kawecki A.: *Wieloletnie charakterystyki intensywności deszczu w Miedzeszynie na potrzeby radiokomunikacji*. Prace IŁ, nr 106, 1996
24. Persons J.D.: *The Mobile Radio Propagation Channel*. Pentech Press Limited. London 1992.
25. SIMENS *Urządzenia linii radiowej typu SRA-L/7*. Dane katalogowe.