

Stefan JACKOWSKI¹
Marcin CHRZAN²
Mieczysław KORNASZEWSKI³

CHARAKTERYSTYKA ŁĄCZNOŚCI TROPOSFERYCZNEJ DLA POTRZEB ORGANIZACJI SYSTEMU RATOWNICTWA

W artykule przedstawiono przykłady rozwiązań obiektów latających ich charakterystykę oraz możliwości. Omówiono problem propagacji fali elektromagnetycznej w troposferze, zaprezentowano teoretyczny obszar pokrycia radiowego z wykorzystaniem platform powietrznych. Przedstawiono zasięg pojedynczej wiązki radiowej i jej zależność od średnicy obszaru pokrycia i kąta elewacji oraz zależność opóźnienia wiązki sygnału od kąta elewacji.

CHARACTERISTICS OF THE COMMUNICATION NEEDS OF THE ORGANIZATION FOR TROPOSPHERIC RESCUE SYSTEM

The article presents examples of solutions to their flying object characteristics and possibilities. Discusses the problem of electromagnetic wave propagation in the troposphere, the area presents a theory of radio coverage using airborne platforms. Presents the scope of a single beam of radio and its dependence on the diameter of coverage and the elevation angle and the dependence of the delay signal from the beam elevation angle.

1. WSTĘP

Próby wykorzystania jonosfery i troposfery dla celów łączności były w Polsce prowadzone do końca lat osiemdziesiątych. Sieć BARS (ros. "Барс" czyli Leopard) została zbudowana na bazie rozbudowanej przez Niemców w czasie drugiej wojny światowej sieci łączności kablowej, tzn. w niektórych węzłach sieci kablowej (dosłownie sieci - w/g siatki w-e / n-s) dodano stacje łączności troposferycznej na bazie dwupoziomowych bunkrów łączności z załogą średnio 30 osób. Ze względu na rozwój innych środków łączności dla celów militarnych projekt ten został zaniechany. Na całym świecie prowadzone są badania

¹Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
tel: + 48 48 361-77-00, 361-77-16, Fax: + 48 48 361-77-42, e-mail: s.jackowski@pr.radom.pl

²Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
tel: + 48 48 361-77-00, 361-77-02, Fax: + 48 48 361-77-42, e-mail: m.chrzan@pr.radom.pl

³Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
tel: + 48 48 361-77-00, 361-77-02, Fax: + 48 48 361-77-84, e-mail: m.kornaszewski@pr.radom.pl

na temat wykorzystania łączności troposferycznej w warunkach klęsk żywiołowych. W Polsce też prowadzone są badania i budowane są prototypy systemów opartych o łączność troposferyczną. Znane są przykłady zniszczeń infrastruktury telekomunikacyjnej poprzez ataki terrorystyczne lub klęski żywiołowe. Rozwiązaniem problem łączności na terenach ogarniętymi takimi zdarzeniami jest sieć łączności oparta o radiolączność troposferyczną. W dalszej części artykułu zostaną omówione problemy propagacji fali elektromagnetycznej w troposferze, zaprezentowany zostanie teoretyczny obszar pokrycia radiowego z wykorzystaniem platform powietrznych. Przedstawiony zostanie zasięg pojedynczej wiązki radiowej i jej zależność od średnicy obszaru pokrycia i kąta elewacji oraz zależność opóźnienia wiązki sygnału od kąta elewacji.

2. PROPAGACJA FAŁ RADIOWYCH W TROPOSFERZE

Troposfera jest to najniższa warstwa atmosfery ziemskiej. Rozciąga się od powierzchni Ziemi, natomiast górna granica jest zależna od szerokości geograficznej i waha się od 7 km (w obszarach podbiegunowych) do 18 km (w okolicach równika). Powietrze w troposferze ma wszędzie jednakowy skład, jedynie zawartość pary wodnej jest zróżnicowana i podobnie jak temperatura i ciśnienie maleje wraz z wysokością. Rozchodzenie się fal radiowych w troposferze w dużym stopniu związane jest z warunkami meteorologicznymi. Deszcz, śnieg, grad czy mgła sprawiają, że warstwa ta jest bardzo niejednorodnym ośrodkiem propagacyjnym. Zjawiska propagacyjne występujące w troposferze, które odgrywać będą ważną rolę w rozważanym segmencie telefonii komórkowej to rozpraszanie i tłumienie fal elektromagnetycznych.

Według [2] wśród przyczyn tłumienia troposferycznego wyróżnia się :

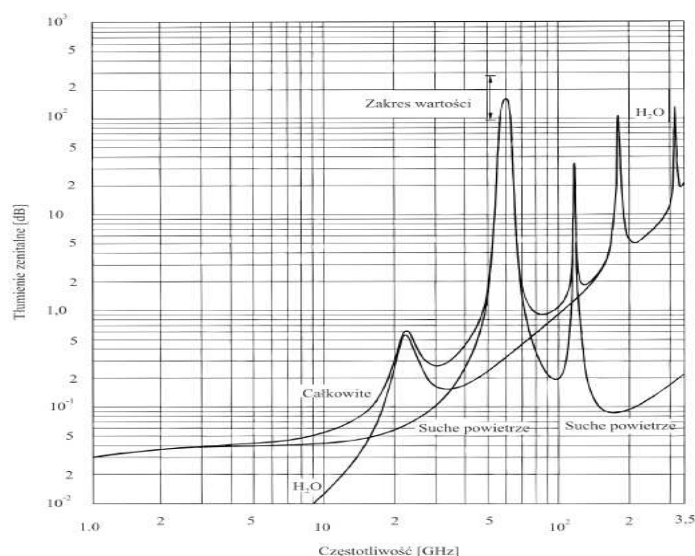
- absorpcję molekularną,
- tłumienie w hydrometeorach,
- rozpraszanie przez cząsteczki,
- tłumienie w cząsteczkach twardych.

Absorpcja molekularna polega na tym, że rozchodząca się fala elektromagnetyczna wprawia w drgania atomy i cząsteczki gazów. Wynikiem zrównania się częstotliwości drgania molekuł i fali są zjawiska rezonansowe, a w efekcie energia fali przechodzi w energię wewnątrz cząsteczkową, czyli zachodzi tłumienie fali o określonej długości. Tłumienie związane ze zjawiskiem absorpcji molekularnej rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości i wykazuje kilka maksimów o charakterze rezonansowym. Zależności te zobrazowane są na rysunku 1.

Przyczyną tłumienia są również hydrometeory czyli opady atmosferyczne. Tłumienie to zależy od częstotliwości fali, intensywności opadów i wymiarów kropli (im te wielkości są większe tym tłumienie wzrasta). Słaby deszcz może być przyczyną niewielkich ale za to długotrwałych tłumień sygnału, natomiast intensywny ale krótko trwający deszcz może stłumić sygnał nawet o 60 dB [2].

Rozchodzeniu się fal radiowych z nadajników znajdujących się w troposferze, podobnie jak w transmisji przyziemnej, towarzyszy efekt wielodrogowości. W przypadku rozpatrywanego segmentu troposferycznego telefonii komórkowej, opisywany efekt może być spotęgowany, gdyż zwykle stacja bazowa będzie zmieniała swe położenie niezależnie od użytkownika. Spowoduje to zmiany drogi rozchodzenia się sygnału nadawanego oraz

zmienne opóźnienie kolejnych replik sygnału, czego skutkiem będą zwiększone zaniki odbieranego sygnału [8] [9]



Rys.1 Absorpcja fal elektromagnetycznych przy powierzchni Ziemi w cząsteczkach pary wodnej i tlenu [3]

Innym zjawiskiem towarzyszącym propagacji sygnału, którego skalę należy rozważyć przy projektowaniu segmentu troposferycznego telefonii komórkowej jest przesunięcie Dopplera. Abonent będzie posiadał dwustronną łączność poprzez umieszczony w troposferze statek powietrzny, który będzie spełniał rolę UTRAN lub RNC. Należy liczyć się z sytuacją, że nie będą one całkowicie stacjonarne i będą się poruszały z niewielką prędkością. Częstotliwość przesunięcia Dopplera wyznacza się, wykorzystując wzór [4]

$$f_D = f \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Gdzie: f - częstotliwość nadawcza, v - prędkość przemieszczania się odbiornika, c - prędkość światła, a θ - kąt pod jakim fala radiowa dociera do odbiornika.

Maksymalna zakładana prędkość poruszania się platform segmentu troposferycznego niech wynosi 20 km/h, przyjmując dodatkowo częstotliwość nadawczą 2 GHz oraz $\theta = 60^\circ$ otrzymuje się. Wyznaczona wartość przesunięcia Dopplera jest pomijalnie mała. Przy zmniejszeniu kąta padania do 30° , częstotliwość dopplerowska wzrasta do 32,6 Hz, a maksymalne przesunięcie wyniesie 37 Hz. Wydaje się, że przy założonej niewielkiej prędkości statku powietrznego, efekt Dopplera będzie miał mały wpływ na odbiór informacji w całym zakresie zmian kąta pod jakim pada fala radiowa. Analizowana sytuacja bierze pod uwagę jedynie ruch stacji bazowej. W rzeczywistości segment

troposferyczny będzie zapewniał łączność również użytkownikom przemieszczającym się. Z uwagi jednak na założenie o jak największej stacjonarności platform powietrznych, wpływ efektu Dopplera na zmianę częstotliwości będzie porównywalny z tym jaki występuje w naziemnym systemie komórkowym.

3. PLATWORMY POWIETRZNE

Podstawą troposferycznego systemu radiokomunikacyjnego byłyby platformy powietrzne, utrzymujące się w quasytacionarnej pozycji na wysokości około 18 km nad ziemią. W skład ich wyposażenia weszłaby kompletna stacja bazowa. Komunikacja typu LOS (*Line of Sight*) byłaby możliwa dla większości użytkowników i zapewniałaby usługi łączące najlepsze cechy łączności naziemnej i satelitarnej. Przykładowe statki, które mogłyby być wykorzystane w segmencie troposferycznym UMTS zostały przedstawione poniżej [12]. Nie wszystkie spełniają wymagania stawiane platformom powietrznym. Ciągły rozwój techniki pozwala jednak sądzić, że w przyszłości każdy z nich może znaleźć zastosowanie w omawianym systemie radiokomunikacyjnym.

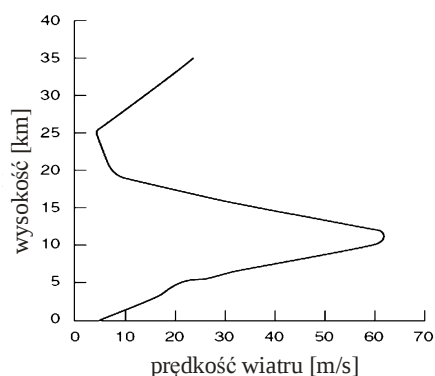
Funkcję platform mogą pełnić samoloty lub sterowce, przewożące załogę lub też bezzałogowe, sterowane zdalnie z ziemi. Najbardziej pożądane byłoby opracowanie bezzałogowego statku powietrznego, który napędzany byłby energią słoneczną i utrzymywał się na swej pozycji przez możliwie najdłuższy okres czasu. W fazie tworzenia jest projekt HALE (*High Altitude Long Endurance*), który zakłada skonstruowanie wehikulu, który unosiłby się wysokości do 20 km nawet przez kilka lat. Prace nad platformami powietrznymi prowadzone są w wielu organizacjach, które koncentrują się nad postępem technologicznym w produkcji materiałów na budowę statków, baterii słonecznych czy w sposobie magazynowania energii.

Najbardziej tradycyjną platformą powietrzną wydaje się być balon. Znane one były już w starożytnych Chinach, a początkach XX wieku pełniły ważny środek transportowy jako sterowce. Po katastrofie niemieckiego sterowca Hindenburg w 1937 r. wydawało się, że przejdą one już do historii. Jednak dziś okazuje się, że wcale nie musi tak być. Już od kilku lat powstają nowe typy sterowców, tworzone z bardzo wytrzymałych materiałów i wypełnione helem, który jest bezpieczniejszy od wcześniej stosowanego wodoru. Przykładem takiego sterowca jest polski sterowiec na ogrzane powietrze SP BSC pokazany na rysunku 2



Rys. 2 Sterowiec SP BSC[<http://airbot.net>]

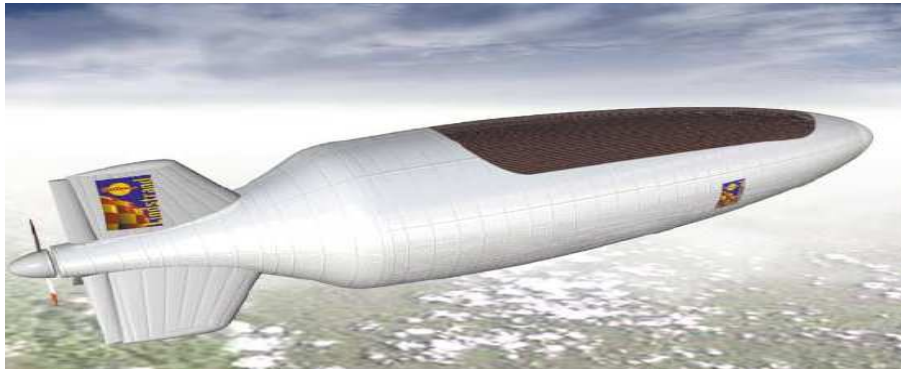
Wydaje się, że tego typu obiekt byłby idealny do wykorzystania jako urządzenie nadawczo-odbiorcze w systemie komunikacyjnym. Przewagą sterowca nad samolotem byłaby w tym przypadku możliwość utrzymania stałej pozycji nad ziemią. Jedynym problemem jaki się tu napotyka są wiatry. Z tego powodu jako maksymalna wysokość zawieszenia sterowców należałoby wybrać wartość z przedziału 16-22 km, ponieważ ta warstwa atmosfery w większości regionów świata charakteryzuje się stosunkowo łagodnym poziomem wiatru i turbulencji. Wykres przedstawiający zależność prędkości wiatru od wysokości przedstawiony jest na rysunku 3.



Rys.3 Zależność prędkości wiatru od wysokości [12]

Według jednej z propozycji sterowiec pełniący funkcję latającej stacji bazowej powinien być zbudowany jako duży, pólśtywny kontener o długości około 100 metrów. Powinien być wyposażony w elektryczne silniki i śmigła, które utrzymywałyby go w jednym położeniu i były przeciwwagą dla wiatru. Jednak podstawowa energia pochodziłaby od lekkich ogniw słonecznych rozmieszczonych w formie dużych arkuszy na poszyciu sterowca. Energia ta byłaby wykorzystywana na utrzymywanie całej stacji oraz do działania

ładunku czyli urządzeń nadawczo- odbiorczych. Część tej energii byłaby magazynowana i wykorzystywana w nocy. Przykładowo taka stacja wyglądałaby jak na rysunku 4.



Rys.4 Projekt platformy powietrznej [12]

W planach długoterminowych czynnikiem, który w największym stopniu przyczyniałby się do zakończenia pracy takiej stacji, wydaje się być starzenie się ogniw paliwowych. Jednak w przypadku systemu troposferycznego nie będzie problemem sprowadzenie sterowca na ziemię i przeprowadzenie naprawy lub wymiany uszkodzonych podzespołów. Kolejnym pomysłem na powietrzną platformę będącą przekaźnikiem komunikacyjnym jest stworzenie bezzałogowego samolotu napędzanego energią słoneczną. Powinien on pokonywać opory wiatru oraz utrzymywać w przybliżeniu kołową trajektorię lotu. W tym przypadku również najważniejszym aspektem jest bilans energii potrzebnej do utrzymania całej takiej stacji. Statek musiałby gromadzić również energię dostateczną do pracy w nocy. Jednym z pomysłów jest statek powietrzny Helios o rozpiętości skrzydeł 75 metrów, na których znajdują się baterie słoneczne (rys. 5)



Rys.5 Helios [12]

Obecnie najbliższy wprowadzenia na rynek komunikacyjny jest jednak samolot załogowy Proteus rys 6. Został on stworzony do dostarczania usług komunikacji szerokopasmowej w obszarze o średnicy do 40 km. Działa na wysokościach od 16 do 18 km, a prawie stacjonarną pozycję utrzymuje dzięki poruszaniu się po kołowym torze o średnicy poniżej 13 km. Urządzenia komunikacyjne są przymocowane do spodniej części

kadłuba samolotu, a w ich skład może wchodzić nawet do 125 anten mikrofalowych. Ten statek powietrzny został już dokładnie przebadany i jego wprowadzenie zależy jedynie od czynników ekonomicznych.

Inną formą powietrznej platformy jest UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Nazwa ta odnosi się do małych bezzałogowych samolotów wykorzystywanych głównie w celach wojskowych. Działają one na niewielkich wysokościach i przeprowadzają krótko trwające misje. Z tego powodu wykorzystanie UAV jako węzłów radiokomunikacyjnych jest ograniczone. Jedynie samoloty Global Hawk26 i Predator mogłyby przenosić cięższe ładunki na dość dużym pułapie, ale nawet w tym przypadku lot trwa maksymalnie 48 godzin a wyposażenie w urządzenia radiokomunikacyjne w ogóle nie zostało rozważone.



Rys.6 Proteus [12]

Kolejnym rozwiązaniem jest aerostat serii DB i FB czyli sterowiec utrzymywany na kablu, który może osiągać długość nawet do 5 km. „Przywiązanie” sterowca zapewnia utrzymanie go w prawie stabilnej pozycji, dodatkowo kablem może być dostarczana energia a także relizowany ruch komunikacyjny.



a)



b)

Rys. 7 Sterowiec: a) na uwięzi seria DB b) na uwięzi seria FB [<http://www.vigilance.nl>]

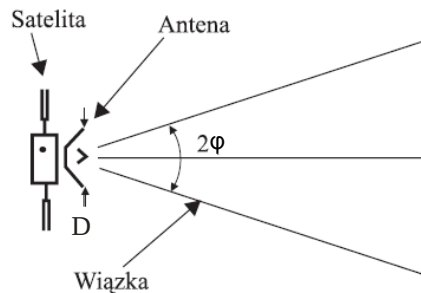
Największym problemem w tym przypadku jest fakt, że aerostaty mogłyby być rozmieszczone jedynie w obszarach gdzie nie prowadzone są korytarze ruchu lotniczego. Dlatego to rozwiązanie jest przeznaczone dla regionów mniej rozwiniętych. Aktualnie system oparty na aerostatach zawieszonych na wysokościach 4 – 6 km funkcjonuje w Brazylii. Dostarcza usługi komunikacyjne do 125000 użytkowników.

Pojedyncza platforma łączy się z terminalami użytkowymi, z naziemnymi stacjami bazowymi, w przyszłości być może również z innymi platformami. Obszar pokrycia jaki zapewnia jedna platforma jest ograniczony przez propagację typu LOS oraz minimalny kąt elewacji. Należy dodać, że z przedstawionych możliwości, najkorzystniejszym rozwiązaniem platform powietrznych byłyby sterowce. W ich przypadku można przyjąć stacjonarność pozycji a jest to bardzo ważne w propagacji sygnału oraz utrzymywaniu stałego obszaru pokrycia radiowego.

W dalszej części przedstawione zostaną parametry przestrzenne systemu opartego na łączu troposferycznym.

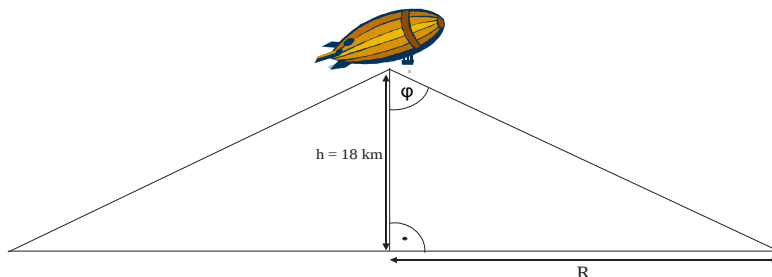
3.1 Obszar pokrycia

Bardzo ważną kwestią jaką należy rozważyć tworząc nowy segment telefonii komórkowej jest wielkość obszaru jaki będzie obsługiwany przez jedną stację bazową. Z tym związana jest liczba potencjalnych abonentów do obsługi. Poza tym od tego czynnika zależy jego ogólna pojemność systemu. Obszar pokrycia daje nam informację o powierzchni do jakiej dociera sygnał z jednej anteny nadawczej. Wielkość takiej komórki zależy od drogi propagacji sygnału oraz kąta elewacji, czyli również od wysokości na jakiej umieszczona jest antena. Na etapie projektowania segmentu troposferycznego należy zdecydować jaki rodzaj anteny zostanie wykorzystany. Istotne znaczenie będzie tu miała szerokość wiązki anteny 2ϕ , schematycznie pokazana na rysunku 8.



Rys. 8 Schemat anteny [5]

Dla uzyskania jak największej średnicy komórki najkorzystniejsze będzie zastosowanie anteny o szerokości wiązki $2\phi = 180^\circ$. Biorąc pod uwagę krzywiznę ziemi oznacza to, że do jej powierzchni będą docierały sygnały wypromieniowane z anteny pod kątem nie większym niż około 87° - 88° , względem odcinka łączącego platformę powietrzną z terminalem użytkownika i padającego prostopadle do ziemi. Sytuację taką ilustruje rysunek 9.



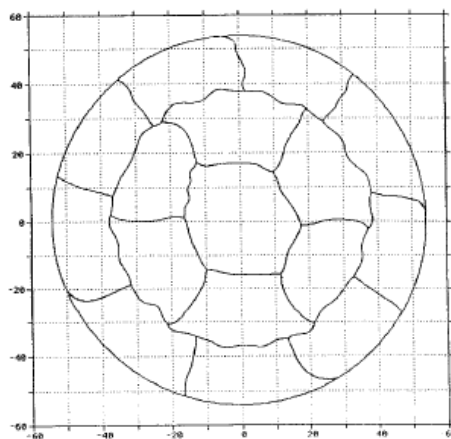
Rys.9 Promień obszaru pokrycia od jednej stacji powietrznej

Dla wyznaczenia długości promienia komórki w segmencie troposferycznym należy posłużyć się prostą zależnością

$$\frac{R}{h} = \operatorname{tg} \varphi \Leftrightarrow R = h \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

Z tego wynika, że maksymalny promień obszaru pokrycia w tym przypadku wyniesie dla $\varphi = 88^\circ$, $R = 18 \cdot \operatorname{tg} 88^\circ = 515 \text{ km}$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że jedna troposferyczna stacja bazowa mogłaby objąć swym zasięgiem teren o powierzchni nawet 833228 km^2 . Jest to bardzo duży obszar, co biorąc pod uwagę wcześniejsze analizy dotyczące pojemności systemu, nakazuje podzielenie go na mniejsze komórki. Można to osiągnąć poprzez zastosowanie anten wielowiązkowych. Obecnie rozwiązania techniczne pozwalają na konstruowanie anten o 48 wiązkach. Takie wyjście jest optymalne w rozważanym segmencie. Dzięki temu omawiany obszar będzie tworzyło 48 komórek i o tyle razy wzrośnie pojemność całego systemu. Satelity systemu Globalstar wyposażone są w anteny o szesnastu wiązkach. Takie rozwiązanie pozwala na zapewnienie pokrycia radiowego na obszarze pokazanym na rysunku 10.



Rys. 10 Obszar pokrycia systemu Globalstar

Powyższy rysunek przedstawia kształt komórek systemu Globalstar[11]. W segmencie troposferycznym komórki obsługiwane przez jedną platformę będą miały podobny kształt, a różnica będzie ich liczba i wielkość. W naziemnej części UMTS wyróżnia się trzy rodzaje komórek: makro-, mikro- i pikokomórki. W przypadku segmentu troposferycznego będzie to raczej niemożliwe. Zawieszenie anteny na wysokości 18 km nad ziemią sprawi, że trudno będzie uzyskać małe długości promienia komórek. Można to osiągnąć poprzez odpowiednie dobranie szerokości poszczególnych wiązek. Sposób wyznaczenia wielkości obszaru pokrycia radiowego od jednej wiązki antenowej przeanalizowany został poniżej.

3.2 Zasięg pojedynczej wiązki antenowej

Zakładając takie nachylenie anteny aby ramię kąta elewacji było jednocześnie dwusieczną szerokości wiązki antenowej, korzystając z rysunku schematycznego 15 oraz z twierdzenia tangensów, a także pomijając krzywiznę ziemi można wyprowadzić zależność na średnicę obszaru pokrycia od jednej wiązki antenowej.[5]

$$\frac{d-c}{d+c} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta-\varphi-\varphi}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\theta-\varphi+\varphi}{2}} \quad (3)$$

Po przekształceniach uzyskuje się

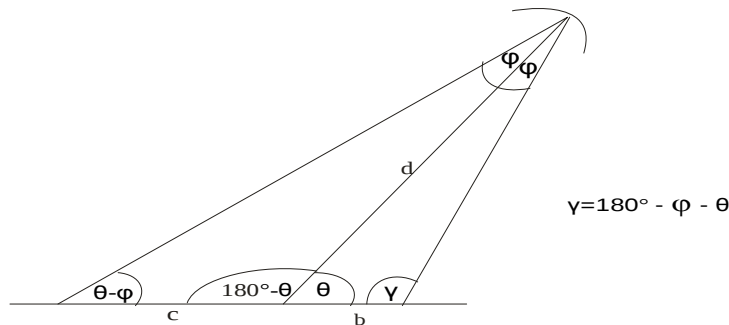
$$c = d * \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \operatorname{tg} \frac{\theta-2\varphi}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\theta-2\varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}} \quad (4)$$

Analogicznie otrzymuje się

$$b = d * \frac{\operatorname{tg} \frac{180^\circ-\theta}{2} - \operatorname{tg} \frac{180^\circ-\theta-2\varphi}{2}}{\operatorname{tg} \frac{180^\circ-\theta-2\varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{180^\circ-\theta}{2}} \quad (5)$$

Średnica R obszaru pokrycia wynosi zatem

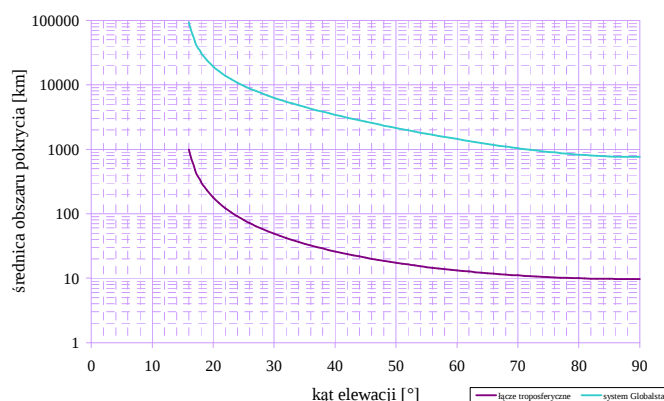
$$R = c + b \quad (6)$$



Rys. 11 Obszar pokrycia terenu przez jedną wiązkę anteny nadawczej

W powyższych zależnościach d oznacza długość drogi propagacji sygnału do punktu, z którego prowadzona jest dwusieczna kąta szerokości wiązki, θ kąt elewacji, a ϕ połowę kąta szerokości wiązki anteny nadawczej.

Obliczone w ten sposób wartości średnicy obszaru pokrycia dla wiązek anteny w segmencie troposferycznym zostały naniesione na wykres przedstawiony na rysunku 12. Dla porównania przedstawione zostały także wielkości charakterystyczne dla Globalstar. Szerokość wiązki antenowej przyjęta została jako $2\phi = 30^\circ$.

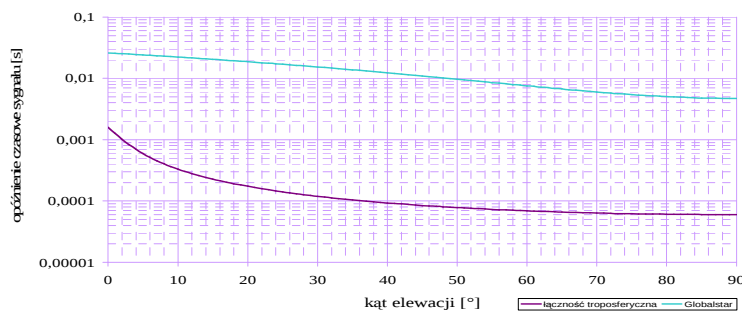


Rys. 12 Zależność średnicy obszaru pokrycia od kąta elewacji

Charakterystyka przedstawiona na rysunku 12 pokazuje wyraźnie, że wielkość obszaru pokrycia sygnałem emitowanym przez jedną wiązkę antenową zależy jedynie od wysokości umieszczenia anteny. Przebiegi zmian średnicy tego obszaru wraz ze wzrostem kąta elewacji posiadają jednakowy charakter przebiegu dla obu systemów. Przeprowadzone obliczenia są teoretyczne, nie biorą pod uwagę krzywizny ziemi, a wyprowadzone zależności geometryczne sprawiają, że istnieje minimalna wartość kąta elewacji, od której możliwe jest wyznaczenie średnicy omawianego obszaru. Jest to związane z szerokością wiązki antenowej. Przyjęta w założeniach szerokość wiązki zdeterminowała najmniejszą wartość kąta elewacji, który musi być większy od $\phi = 0,26$ rad, czyli wynosi około 15° . Biorąc pod uwagę tłumienie sygnału przedstawione na rysunku 1, zauważa się że przy kącie widoczności satelity zbliżonym do 50° warunki propagacyjne już w niewielkim stopniu odbiegają od optymalnych dla omawianych systemów. Obliczona przez autorów rozpiętość obszaru pokrycia w systemie Globalstar wynosi wówczas 2141 km, natomiast w systemie opartym na łączności troposferycznej ok. 17,3 km. Biorąc pod uwagę fakt, że duży teren, w którym praca systemu opiera się na jednej częstotliwości nośnej, prowadzi do zablokowania ruchu telekomunikacyjnego, korzystne jest zmniejszenie obszaru pokrycia. Przy kącie elewacji około 75° , średnica tego obszaru wyniesie dla Globalstar 910 km i 10,4 km dla segmentu troposferycznego. Tłumienie automatycznie spadnie do wartości odpowiednio 163,8 dB i 125 dB.

3.3 Opóźnienie transmisji

Opóźnienie transmisji jest jednym z parametrów charakteryzujących kanał radiowy. Wyznaczenie tej wielkości dla segmentu troposferycznego pozwoli w utworzeniu modelu omawianego systemu w kolejnym etapie pracy. Zależności czasów opóźnienia w systemie Globalstar i dla łączności troposferycznej w funkcji kąta elewacji satelity przedstawione zostały na rysunku 12.



Rys. 12 Zależność opóźnienia transmisji od kąta elewacji

Porównując czasy opóźnienia w obydwu systemach widoczne jest, że w Globalstar jest on w całym zakresie kąta elewacji prawie o dwa rzędy wielkości większy. W granicy kąta θ wynoszącego 30° ma ono wartość 15,3 ms, przy 119 μ s dla łączności troposferycznej. W optymalnym przypadku gdy sygnał pada prostopadłe na powierzchnię ziemi czasy te wynoszą odpowiednio 4,7 ms i 60 μ s. Należy podkreślić, że w każdym z omawianych systemów, w całym badanym zakresie zmian kąta elewacji, spełnione są wymagania dotyczące opóźnień w transmisji UMTS. Według [9] dopuszczalne wartości czasu opóźnienia dla przykładowych usług wynoszą: 200 ms dla przesyłania danych w paśmie akustycznym, dźwięku HI-FI; 100 ms dla krótkich wiadomości tekstowych, transmisji rozsiewczej, poczty elektronicznej, telefaksu; 40-90 ms dla wideotelefonii; 40 ms dla telefonii. Przeprowadzone obliczenia nie brały jednak pod uwagę efektu wielodrogowości sygnału, który spowoduje zwiększenie otrzymanych wartości.

4. WNIOSKI

Przedstawiony w artykule materiał prezentuje porównanie możliwości pod względem ruchowym i eksploatacyjnym systemów troposferycznych i satelitarnych ukierunkowanych na wykorzystanie jako powietrznych segmentów telekomunikacji mobilnej. Tego aspektu spojrzenia na problem nie spotkamy w dostępnej literaturze. Z przeglądu literatury i analizy wynika, że segment satelitarny telefonii komórkowej spełnia oczekiwania zarówno w systemach bezpieczeństwa jak i sytuacjach katastroficznych, jednak potrzebne są duże nakłady finansowe do jego uruchomienia, poza tym zapewnia on mniejszy ruch telekomunikacyjny oraz istnieje konieczność posiadania przez abonenta (dotychczas) dodatkowej MS (Mobile Station), powoduje to bardzo powolny rozwój tych systemów. Widać zatem celowość zainteresowania się innymi, spełniającymi we wspomnianych warunkach wymagania, w tym systemami troposferycznymi jako nie współmiernie

tańszymi zarówno dla operatorów jak i abonentów. Z obserwacji prowadzonych badań i literatury widać, że nazwane w skrócie, systemy powietrzne a w szczególności troposferyczne stają się istotnym elementem heterogenicznej bezprzewodowej sieci.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kwiatosz J.: *Łączność troposferyczna*. Skrypt WAT, Warszawa 1991
- [2] ITU-R, Rec. P.676-5: Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1÷350 GHz; Geneva, 2001
- [3] Kołakowski J, Cichocki J: *UMTS. System telefonii komórkowej trzeciej generacji*. WKiŁ, Warszawa 2006
- [4] Jackowski S, Chrzan M: *Współczesne systemy telekomunikacyjne*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2008
- [5] www.elec.york.ac.uk/comms/papers/tozer01_ecej.pdf
- [6] White Papers : *Nasa Systems Engineering Behaviour Study*. NASA 2010