

JAN KACZMAROWSKI, HENRYK PARAPURA, JAKUB KWIECIEŃ

Tłumienie fali radiowej w środowisku leśnym*

Radio wave attenuation in the forest environment

ABSTRACT

Kaczmarowski J., Parapura H., Kwiecień J. 2021. Tłumienie fali radiowej w środowisku leśnym. Sylwan 165 (4): 305-313. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2021026>.

The article presents the results of empirical field measurements of radio wave propagation in forest complexes in the very high frequency (VHF) range. The transmitter frequency of 168.225 MHz was used. The aim of the study was to investigate the influence of diversified forest environment on radio wave propagation. The varying heights that transmitting antenna is placed above ground level were taken into account. In addition, tests of connections between hand-held radiotelephones were carried out in order to assess the real range of communication inside dense forest complexes. To characterize the path loss in the forest, the measurements were carried out in three forest areas with different stand characteristics. As part of the research, the values of the electric component of the radio wave were measured, and then the values of the electric field strength and attenuation of radio wave propagation in the forest environment were determined. The results of the research show the dependence of VHF radio wave attenuation in forest areas on the height of the transmitting antennas in relation to the height of trees. This is further impacted by the composition of the stand and understory, its leafage in summer and autumn, as well as the topography. The results of the measurements were compared to the results of the model calculations of the electric field strength distribution and this made it possible to select the optimal values for the input data for further analysis. The study confirmed the predicted characteristics of the radio wave attenuation in the forest environment.

KEY WORDS

propagation loss, very high frequency, path loss, wireless communication, Direct Mode Operation

ADDRESSES

Jan Kaczmarowski ⁽¹⁾ – e-mail: jan.kaczmarowski@lasy.gov.pl

Henryk Parapura ⁽²⁾ – e-mail: H.Parapura@il-pib.pl

Jakub Kwiecień ⁽²⁾ – e-mail: J.Kwicien@il-pib.pl

⁽¹⁾ Wydział Ochrony Lasu, Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych; ul. Grójecka 127, 02-124 Warszawa

⁽²⁾ Zakład Badań Systemów i Urządzeń, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy; ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa

Wstęp

Problematyka propagacji fal radiowych w kompleksach leśnych jest stosunkowo słabo reprezentowana w literaturze, a narzędzia obliczeniowe do planowania sieci radiowych nie są wystarczająco zweryfikowane dla tego środowiska. Wynika to głównie z ograniczonego zapotrzebowania

*Badania sfinansowano ze środków Funduszu Leśnego w ramach zleconego przez Dyrekcję Generalną Lasów Państwowych tematu badawczego „Opracowanie koncepcji budowy i wdrożenia modernizacji ogólnokrajowej sieci radiokomunikacji ruchomej łądowej na potrzeby leśnictwa i otoczenia”, realizowanego przez Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy.

ze strony rynku, ponieważ najważniejsze miejsca dostarczania usług sieci radiowych to obszary zurbanizowane, trasy komunikacyjne itp. Ze względu na małą liczbę użytkowników duże kompleksy leśne nie są pokryte zasięgiem łączności radiowych sieci publicznych (komórkowych). Fale radiowe o częstotliwościach stosowanych w sieciach komórkowych podlegają dużemu tłumieniu w środowisku leśnym, w związku z tym obszary pokrycia zasięgami łączności są w lasach mocno ograniczone. Zapewnienie łączności bezprzewodowej na terenach leśnych jest jednak konieczne w zakresie ochrony przeciwpożarowej lasów i mienia leśnego. Główne potrzeby Lasów Państwowych (LP) dotyczą usług o charakterze dyspozytorskim, alarmowania i działań ratowniczych, współdziałania ze służbami ratowniczo-gaśniczymi, bezpieczeństwa i porządku publicznego, ochrony granicy państwowej oraz zarządzania kryzysowego [Kaczmarowski i in. 2018].

Obecnie Lasy Państwowe prowadzą prace nad budową nowego systemu łączności radiowej w paśmie VHF (Very High Frequency). Zastosowanie tych częstotliwości w specyficznych warunkach środowiska naturalnego wymaga szczegółowej wiedzy na temat wpływu roślinności leśnej na propagację fal radiowych [Kaczmarowski i in. 2020].

Las jest przykładem złożonego, niejednorodnego środowiska [Brach, Kaczmarowski 2014], które na potrzeby planowania radiowego i projektowania systemów radiokomunikacyjnych generalizuje się do poziomu jednolitej warstwy tłumiącej, gdzie tłumienie wnoszone przez środowisko w głębi lasu jest stałe [Grzybkowski i in. 2003]. Takie podejście jest też prezentowane w zaleceniu Attenuation... [2016]. W rzeczywistości poziom tłumienia sygnału radiowego jest uzależniony od wysokości umieszczenia anteny źródła sygnału względem wysokości lasu, wysokości i składu gatunkowego drzewostanu, jego wilgotności, a także ukształtowania terenu otaczającego źródło sygnału [Kaczmarowski i in. 2020].

Przewidywanie propagacji fal radiowych jest kluczowym elementem planowania sieci [Famoriji, Olasoji 2013]. Na świecie wykonano wiele prac w przedmiotowym zakresie [Meng i in. 2009a, 2010; Alade 2013; Ayekomilogbon i in. 2013], natomiast w Polsce dotychczas badania tłumienności w obszarach leśnych [Ozimek, Kobek 1970] przeprowadzono dla fal radiowych tylko w jednej lokalizacji [Grzybkowski i in. 2003]. Badania te nie uwzględniały pasma częstotliwości VHF, co znacząco utrudnia ich praktyczne zastosowanie na potrzeby planowania sieci radiowej w LP. W celu urealnienia charakterystyk tłumienia fal radiowych w środowisku leśnym istnieje konieczność wykonania badań empirycznych. W związku z realizacją prac koncepcyjno-planistycznych dotyczących wdrożenia sieci radiowej DMR (Digital Mobile Radio; otwarty standard cyfrowej łączności radiowej opracowany przez Europejski Instytut Norm Telekomunikacyjnych) rozpoczęto w LP badania propagacji radiowej w ośrodkach zalesionych w oparciu o bezpośrednie pomiary natężenia pola elektrycznego fal radiowych w paśmie VHF.

Celem badań było ustalenie wpływu zróżnicowanego środowiska leśnego na propagację fali radiowej oraz dostarczenie danych pozwalających na efektywne i skuteczne zaplanowanie oraz wdrożenie ogólnokrajowej sieci łączności radiokomunikacji ruchomej lądowej na potrzeby leśnictwa. Niniejsza praca przedstawia wyniki badania zmian natężenia pola elektrycznego wytworzonego przez stację retransmisyjną DMR o częstotliwości 168,225 MHz.

Teren badań

Pomiarów dokonano w trzech obszarach o zróżnicowanym składzie drzewostanu, charakterystycznych dla struktury zbiorowisk leśnych Polski. Założono, że ze względu na różnice występujące w ulistowieniu drzew pomiary powinny być wykonane w różnych porach roku i na różnych siedliskach.

Z infrastruktury obiektowej LP wybrano dostrzegalnie pożarowe sąsiadujące ze zwartymi kompleksami leśnymi rozciągającymi się w linii prostej na odległość co najmniej 12 km w jednym kierunku. Na potrzeby badań stację retransmisyjną systemu DMR zainstalowano w poniższych lokalizacjach:

1. Dostrzegalnia Porządzie (Nadleśnictwo Wyszaków, RDLP Warszawa): 52.696067°N, 21.439103°E; wysokość umieszczenia anteny: 39, 32 i 20 m n.p.t.; termin pomiarów: 28-29.V.2018. Na trasie pomiarowej dominuje drzewostan sosnowy na siedliskach boru mieszanego świeżego i lasu mieszanego świeżego. Średni wiek drzewostanu wynosi 60 lat. Duży udział podszytu, m.in. dąb, grab i leszczyna.
2. Dostrzegalnia Nurzec (Nadleśnictwo Nurzec, RDLP Białystok): 52.458917°N, 23.078149°E; wysokość umieszczenia anteny: 39 i 20 m n.p.t.; terminy pomiarów: 25-27.X.2017 i 11-12.VI.2018. Na trasie pomiarowej drzewostan tworzony przez wiele gatunków drzew: dąb, brzoza i sosna na siedlisku lasu świeżego. Średni wiek drzewostanu wynosi 60 lat. Duży udział podszytu, m.in. grab, leszczyna i klon.
3. Dostrzegalnia Buchałów (Nadleśnictwo Zielona Góra, RDLP Zielona Góra): 51.905555°N, 15.354300°E; wysokość umieszczenia anteny: 34 i 20 m n.p.t.; termin pomiarów: 26-27.VI.2018. Na trasie pomiarowej jednogatunkowy drzewostan sosnowy na siedlisku boru świeżego. Średni wiek drzewostanu wynosi 50 lat. Urozmaicona rzeźba terenu.

Material i metody

Przedmiotem badań był pomiar wartości natężenia pola elektrycznego wytworzonego przez antenę nadajnika stacji retransmisyjnej systemu DMR o częstotliwości 168,225 MHz. Do badań wykorzystano aparaturę i programy stanowiące wyposażenie Mobilnego Laboratorium Badania funkcjonalności i jakości usług komunikacji elektronicznej Instytutu Łączności – Państwowego Instytutu Badawczego (MLB). Zestaw pomiarowy składał się z analizatora widma radiowego zainstalowanego na pokładzie MLB (typ: FSP 13GHz nr 1164.4391.13, producent: Rohde&Schwarz), przewodu antenowego (typ: PRO-FLEX PLUS 195, producent: PCTEL) i anteny odbiorczej (148-174 MHz) prętowej (typ: 30834/6, producent: Radmor), o dookólnej charakterystyce promieniowania w płaszczyźnie poziomej, zainstalowanej na platformie antenowej na dachu pojazdu na wysokości 2,3 m. Sumaryczna wartość współczynnika antenowego z uwzględnieniem tłumienia przewodu łączącego antenę 30834/6 i wejście analizatora wynosiła 14 dB.

Jako źródło sygnału radiowego zastosowano stację retransmisyjną SLR 5500 systemu DMR firmy Motorola Solutions z filtrem antenowym, przewodem antenowym łączącym z anteną (typ: 32821/4, producent: Radmor) o zysku antenowym 3 dBd i dookólnej charakterystyce promieniowania w płaszczyźnie poziomej. Wspornik anteny stacji retransmisyjnej we wszystkich wariantach wysokościowych umieszczany był w jednym pionie względem konstrukcji dostrzegalni od strony obszaru leśnego. Stacja retransmisyjna na czas pomiarów została wprowadzona w tryb ciągłej retransmisji bez sygnału modulującego. Moc efektywna sygnału emitowanego z anteny w kanale o szerokości 12,5 kHz i częstotliwości środkowej 168,225 MHz wynosiła 11,1 dBW.

Każdorazowo przed rozpoczęciem pomiarów dokonywano przy pomocy analizatora widma pomiaru widma radiowego w paśmie obejmującym kanał nadawczy i odbiorczy o częstotliwościach środkowych 168,225 MHz i 162,475 MHz oraz kanały sąsiednie. Pomiary te prowadzono w celu sprawdzenia, czy nie występują sygnały radiowe od innych źródeł, mogące mieć wpływ na wyniki pomiarów i testów połączeniowych.

W badaniach natężenia pola elektrycznego zastosowano metody uwzględniające zalecenia Field-strength... [2011]. Zestaw pomiarowy rejestrował 50 wyników pomiaru napięcia na wejściu

analizatora widma, w ruchu na odcinkach nie dłuższych niż 40λ , tj. około 71,33 m (λ – długość fali radiowej dla częstotliwości 168,225 MHz wynosi około 1,78 m), a następnie dokonywał uśrednienia zmierzonych wartości, zaś wyniki (nazywane dalej próbkami) zapisywał w pamięci analizatora. Aparatura pomiarowa pozwalała na uzyskanie dokładności pomiaru ± 1 dB.

Wyniki pomiarów zostały zarejestrowane przez analizator widma i algorytm zaprogramowany w środowisku LabView. Na podstawie uzyskanych wyników i parametrów zestawu pomiarowego wyznaczono wartości natężenia pola elektrycznego (dBmV/m) oraz mocy odebranej sygnału radiowego (dBm), a także wartości tłumienia fali radiowej w lesie – jako różnicę pomiędzy tłumieniem całkowitym i tłumieniem wolnej przestrzeni dla każdej próbki pomiarowej. Wartość tłumienia całkowitego wyznaczono na podstawie różnicy mocy sygnału emitowanego przez antenę stacji retransmisyjnej i mocy sygnału odebranego na wejściu odbiornika pomiarowego przy uwzględnieniu parametrów zestawu pomiarowego. Badania propagacji fal radiowych w trzech lokalizacjach prowadzono na tych samych trasach pomiarowych przy zmiennych wysokościach umieszczenia anten stacji retransmisyjnej.

Przed sesją pomiarową dokonano szacowania rozkładu natężenia pola elektrycznego metodą symulacji przy wykorzystaniu narzędzi analitycznych Instytutu Łączności, w oparciu o model propagacyjny ITU 1546-5, mapy SRTM3 oraz zasoby Leśnej Mapy Numerycznej.

Przeprowadzono również serię testów połączeniowych z wykorzystaniem radiotelefonów przenośnych oraz przewoźnego poprzez stację retransmisyjną, a także w trybie Direct Mode Operation (DMO), tj. bezpośredniej komunikacji pomiędzy radiotelefonami. Testy bezpośrednich połączeń pomiędzy radiotelefonami przenośnymi w środowisku leśnym przeprowadzono, stosując nieprzerwany przekaz słowny, trwający co najmniej 7 sekund. Radiotelefony noszone wykorzystane do testów trybu DMO zostały skonfigurowane do pracy z mocą 33 i 36 dBm. Wyposażone były w odbiorniki o czułości $0,14 \mu\text{V}$ i anteny helikalne zewnętrzne o długości 14 i 21 cm oraz zysku energetycznym 0,7 i 0 dB. Testy prowadzono w punktach co 100 m, aż do granicy utraty połączeń. Pierwszy użytkownik wraz z urządzeniem pozostawał w pobliżu MLB na drodze leśnej, natomiast drugi przemieszczał się z radiotelefonem do kolejnych punktów testowych w głąb lasu. Oba radiotelefony podczas testów znajdowały się na wysokości 1,5 m n.p.t.

Badania prowadzono na wytypowanych trasach pomiarowych, na podstawie oszacowanego rozkładu natężenia pola elektrycznego. Pomiary w trzech lokalizacjach prowadzono w różnych terminach i przy zmiennych wysokościach umieszczenia anten stacji retransmisyjnej. Badania wykonano zgodnie z założonym scenariuszem. Nie stwierdzono zakłóceń źródła sygnału pomiarowego ani innych czynników mogących wpłynąć na wyniki pomiarów. Aparatura pomiarowa funkcjonowała poprawnie, co pozwoliło na wykorzystanie wyników badań zgodnie z przeznaczeniem. Pomiary prowadzono w ciągu dnia w godzinach 9:00-15:00, w dobrych warunkach pogodowych, przy następujących warunkach meteorologicznych:

- Porządzie, 28-29.V.2018: temperatura 22-26°C, zachmurzenie małe, brak opadów;
- Nurzec, 25-27.X.2017: temperatura 10-13°C, zachmurzenie duże, brak opadów;
- Nurzec, 11-12.VI.2018: temperatura 15-22°C, zachmurzenie umiarkowane do dużego, brak opadów;
- Buchałów, 26-27.VI.2018: temperatura 18-25°C, zachmurzenie małe, brak opadów.

Wyniki

Łącznie uzyskano 23 514 uśrednionych wartości natężenia pola elektrycznego zmierzonych zestawem pomiarowym MLB. Maksymalny rozrzut wartości wyniósł 13,26 dB (Nurzec), 14,07 dB (Porządzie) i 19,08 dB. (Buchałów) Wykonano 143 testy połączeń poprzez stację retransmisyjną

między radiotelefonami noszonymi i przewodnym. Dla potrzeb porównania wyników pomiarów zostały wybrane próbki uzyskane na fragmentach tras najbardziej reprezentatywnych dla oceny tłumienia fal radiowych w poszczególnych lokalizacjach (tab. 1).

Wartości tłumienia sygnału w lesie stanowią różnicę pomiędzy wartościami tłumienia całkowitego na trasach propagacji fali radiowej i wartościami tłumienia wolnej przestrzeni (ryc.). Przedstawione wyniki dotyczą pomiarów przeprowadzonych w okresie wegetacyjnym, w warunkach dużego ulistowienia drzew, tj. w trzeciej dekadzie maja oraz w czerwcu 2018 roku.

Wyniki pomiarów w lokalizacji Nurzec przy wysokości anteny stacji retransmisyjnej 39 m n.p.t. wskazują na dwa modele propagacji fali radiowej. Próbki uzyskane w odległości od stacji retransmisyjnej 1,022-1,799 km na dystansie 0,777 km obrazują wzrost tłumienia środowiska leśnego o 9,45 dB: od wartości początkowej 22,74 dB do wartości 32,19 dB. Wynik ten wskazuje na model propagacji fali radiowej od stacji retransmisyjnej do anteny odbiornika dwudrogowo, tzn. w wyniku rozpraszania na górnej powierzchni lasu w otoczeniu lokalizacji odbiornika oraz poprzez środowisko leśne w linii prostej. Próbki uzyskane w odległości większej niż 1,8 km wskazują na względnie stały poziom tłumienia środowiska leśnego w funkcji odległości, ale wartości poszczególnych próbek wykazują znaczny rozrzut. Wyniki te cechuje zgodność z modelem propagacji przyjętym w Attenuation... [2016].

Wyniki modelowanych analiz rozkładów natężenia pola elektrycznego wykazały zbieżność z wynikami pomiarów terenowych wykonanych Mobilnym Laboratorium Badawczym oraz testami połączeń w badanym systemie łączności radiowej DMR. Statystyczne porównanie wyników pomiarów i wyników analiz wykazało zbieżność na poziomie 67% oraz umożliwiło określenie najlepszej wartości dodatkowego współczynnika korekcyjnego do wzorów obliczeniowych rozkładu natężenia pola elektrycznego w środowisku leśnym do dalszego planowania radiowego.

Dodatkowo wykonano 103 testy połączeń bezpośrednich pomiędzy radiotelefonami noszonymi w trybie DMO w środowisku leśnym. Wykazały one, że możliwa jest skuteczna komunikacja w trybie bezpośrednim (DMO) na odległości do około 2 km przy mocy nadajnika radiotelefonu 2 W i około 2,5-3 km przy mocy 4 W (tab. 2). Duży udział podszytu redukuje powyższe zasięgi o około 25%.

Dyskusja

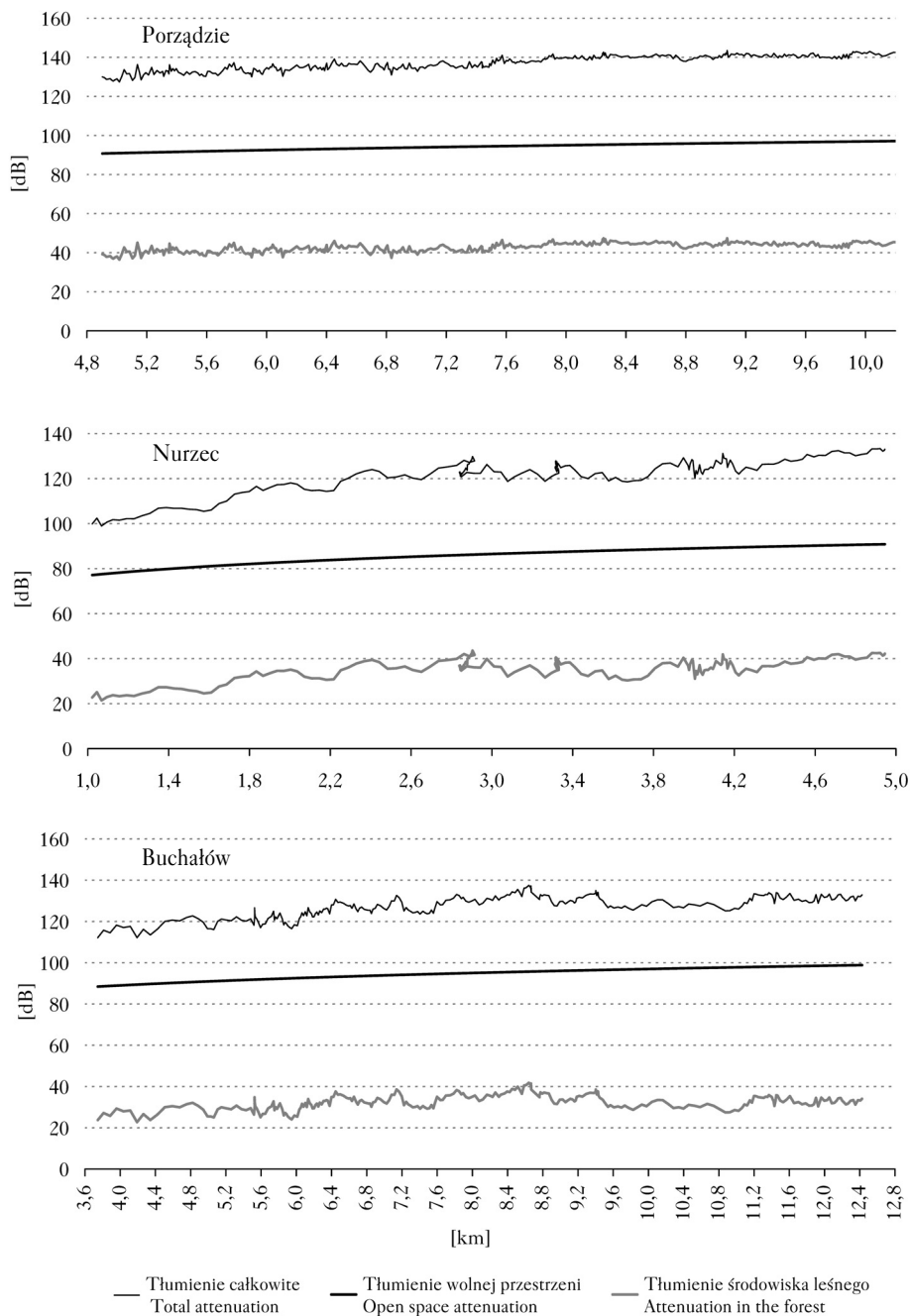
Z uwagi na specyfikę terenów leśnych badania rozkładu natężenia pola elektrycznego lub pomiary propagacyjne dokonywane są w lasach bardzo rzadko. Tylko nieliczne pozycje literaturowe

Tabela 1.

Wysokość anteny nadawczej (H_a [m n.p.t.]), liczba próbek (N), odległość od źródła sygnału (L [km]) oraz minimalna (A_{min}), maksymalna (A_{max}) i średnia ($A_{\bar{r}}$) wartość tłumienia [dB] dla fali radiowej o częstotliwości 168,225 MHz

Height of the transmitting antenna (H_a [m a.g.l.]), number of samples (N), distance from the signal source (L [km]) and minimum (A_{min}), maximum (A_{max}) and mean ($A_{\bar{r}}$) values of attenuation [dB] of 168.225 MHz radio wave

	H_a	N	L	A_{min}	A_{max}	$A_{\bar{r}}$
Nurzec	20	215	1,013-4,954	23,71	53,73	45,01
Nurzec	39	188	1,022-4,945	21,42	43,57	35,62
Porządzie	20	396	4,911-10,214	51,76	58,10	54,82
Porządzie	32	635	4,918-10,233	35,79	49,86	43,62
Porządzie	39	379	4,904-10,249	36,44	47,37	42,86
Buchałów	20	205	3,806-10,661	28,84	45,24	36,95
Buchałów	34	300	3,745-12,426	22,74	41,82	32,87



Ryc.

Tłumienie [dB] fali radiowej 168,225 MHz w zależności od odległości [km] od nadajnika w punktach pomiarowych Porządzie (wysokość anteny 39 m), Nurzec (wysokość anteny 39 m) i Buchałów (wysokość anteny 34 m) Attenuation [dB] of the 168.225 MHz radio wave with regard to the distance [km] from the transmitter at Porządzie (antenna height 39 m), Nurzec (antenna height 39 m) and Buchałów (antenna height 34 m) measuring points

Tabela 2.

Wyniki testów połączeniowych i odległość między radiotelefonami (tryb DMO) dla określonego poziomu mocy i mocy sygnału

Results of the connection test and the distance between radiotelephones (DMO mode) for given power level and signal strength

Wynik testu Result of the test	Porządzie	Porządzie (duży udział podszytu) Porządzie (large share of undergrowth)	Nurzec (duży udział podszytu) Nurzec (large share of undergrowth)	Buchałów	
33 dBm, 2 W	A	≤1900	≤1400	≤1500	≤1900
	B	2000	1500	1600	–
	C	2100-2200	1600-1700	–	2000
	D	≥2300	≥1800	≥1700	≥2100
36 dBm, 4 W	A	≤2400	≤1700	≤2000	≤2900
	C	2500	1800	2200÷2400	–
	D	>2500	>1800	≥2500	≥3000

A – połączenie bez zakłóceń, przekaz zrozumiały, B – połączenie z zakłóceniami, przekaz zrozumiały, C – połączenie z zakłóceniami, przekaz niezrozumiały, D – połączenie niedostępne

A – connections without interference, understandable message, B – connections with interference, understandable message, C – connections with interference, message not understandable, D – connection unavailable

opisują problematykę propagacji fal radiowych w środowisku leśnym [Grzybkowski i in. 2003; Kaczmarowski i in. 2020]. Trudno odnaleźć publikacje uwzględniające pasma częstotliwości VHF, w których charakterystyka obszaru badań odpowiadałaby specyfice polskich drzewostanów. Także w rozdziale 2.2 Attenuation... [2016] wskazuje się na empiryczną metodę określania parametrów do wzorów obliczeniowych tłumienia fali radiowej w lasach w celu uzyskania zgodności z danymi pomiarowymi. Przytoczono tam austriackie wyniki badań w drzewostanie sosnowym.

Uzyskane wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego wykazują znaczne zróżnicowanie pomiędzy wartościami minimalnymi i maksymalnymi. Wynika to ze zmienności wewnętrznej środowiska leśnego na trasie pomiarowej, w szczególności z różnego składu gatunkowego drzewostanu, jego wysokości, struktury, obecności podszytu o wysokości przewyższającej poziom umieszczenia anteny odbiornika MLB, a także odległości anteny odbiorczej od tej roślinności.

Wysokość terenu nad poziomem morza w miejscu umieszczenia stacji retransmisyjnej w lokalizacjach Nurzec i Porządzie oraz na trasach pomiarowych była zbliżona, a różnice nie przekraczały 10 m. W przypadku lokalizacji Buchałów dodatkowym czynnikiem wpływającym na rozrzut wartości tłumienia było zróżnicowanie wysokości terenu. Zmiana wysokości umieszczenia anteny nadawczej z 20 na 39 m spowodowała zmniejszenie uśrednionej wartości tłumienia fali radiowej w lokalizacji Nurzec o 10,24 dB, a Porządzie o 11,96 dB. Powyższe wyniki jednoznacznie wskazują, że największy wpływ na wartość tłumienia lasu ma wysokość umieszczenia anten ponad górną powierzchnią lasu. Skład gatunkowy i struktura drzewostanu mają również istotny wpływ, jednak znacząco mniejszy. Zróżnicowanie składu drzewostanu i podszytu w lokalizacjach Nurzec i Porządzie spowodowało zróżnicowanie wartości średniej tłumienia fali radiowej w środowisku leśnym o 5,89 dB w przypadku anteny nadajnika na wysokości 39 m i o 7,61 dB w przypadku anteny na wysokości 20 m.

Wyniki uzyskane w środowisku leśnym z przeważającym udziałem drzew liściastych wskazują na większe tłumienie sygnału radiowego w okresie letnim względem okresu jesiennego [Meng i in. 2009b]. Dla 70% próbek pomiarowych w lokalizacji Nurzec stwierdzono tłumienie lasu zwiększone o około 2,5 dB. Porównywalne progowe poziomy natężenia pola elektrycznego

(17 i 23 dB μ V/m) w okresie letnim występowały w odległości około 2 km bliższej źródła mierzonego sygnału radiowego niż jesienią.

Na propagację fal radiowych duży wpływ ma ukształtowanie terenu wokół stacji retransmisyjnej, co szczególnie widoczne jest dla lokalizacji Buchałów (tab. 1). Wysokość terenu w miejscu lokalizacji stacji retransmisyjnej wynosi około 167 m n.p.m., natomiast wysokość terenu na początku trasy pomiarowej w odległości 3,81 km wynosi około 108 m n.p.m. i wzdłuż trasy pomiarowej obniża się do poziomu około 88 m. W tym przypadku ukształtowanie terenu bardzo korzystnie wpływa na propagację fali radiowej i zmniejszenie tłumienia trasy. Wartość średnia tłumienia lasu na trasie pomiarowej w lokalizacji Buchałów przy wysokości anteny stacji retransmisyjnej 20 m n.p.t. wynosiła 36,95 dB i była niemal równa wartości 36,97 dB w lokalizacji Nurzec przy wysokości anteny 39 m n.p.t. Zróżnicowanie ukształtowania terenu w lokalizacji Buchałów spowodowało, że zmiana wysokości umieszczenia anteny nadajnika z 20 na 34 m skutkowało zmniejszeniem tłumienia środowiska leśnego o 4,08 dB.

Dysproporcje wynikają ze zróżnicowania środowiska leśnego, zwłaszcza udziału podszytu oraz drzewostanów młodszych klas wieku. Względnie niewielki wpływ na zasięg łączności miał udział gatunków liściastych w składzie drzewostanu. Testy wykazały znaczną zależność tłumienia sygnału radiowego nadawanego przez radiotelefon ruchomy od charakterystyki roślinności w bezpośrednim otoczeniu. Pojawienie się listowia podszytu na trasie łącza komunikacyjnego ma znaczący wpływ na poziom i jakość odbieranego sygnału [Meng i in. 2009a; Alade 2013]. Wyniki połączeń w trybie DMO wewnątrz lasów wskazują na 2÷3-krotne zmniejszenie zasięgu łączności względem terenów otwartych.

Wpływ stanu ulistowienia drzewostanu na rozkład natężenia pola elektrycznego jest znaczący, jednak znacznie mniejszy niż zróżnicowanie wysokości zawieszenia anteny będącej źródłem sygnału.

Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego od źródła o mocy 11,1 dBW i wysokości anteny 39 m n.p.t. w ciągłych kompleksach leśnych wskazują na realne zasięgi łączności 7,5-8 km w przypadku terenu o zróżnicowanej wysokości 30-40 m, 7,5-9,5 km w przypadku terenu o zróżnicowanej wysokości około 20 m oraz powyżej 13 km w przypadku terenu opadającego względem lokalizacji źródła sygnału.

Wnioski

- ✚ Średnie wartości tłumienia fali radiowej w lasach prezentują wpływ wysokości umieszczenia anten nadajników względem wysokości lasu, składu drzewostanu i podszytu, a także ich sezonowej zmienności ulistowienia na propagację fali radiowej na obszarach leśnych.
- ✚ Rozrzut wartości tłumienia fali radiowej w środowisku leśnym względem wartości średniej wskazuje na zasadność uwzględniania w bilansowaniu mocy łącza radiowego dodatkowego tłumienia o wartości nawet 6-8 dB w celu uzyskania maksymalnego prawdopodobieństwa pokrycia zasięgiem łączności obszaru leśnego.
- ✚ Tłumienie sygnału radiowego o częstotliwościach z pasma VHF w ciągłych kompleksach leśnych może powodować zmniejszenie zasięgów łączności dwu-, a nawet trzykrotnie względem terenów otwartych. Dotyczy to komunikacji z wykorzystaniem stacji retransmisyjnych, ale także trybu DMO bezpośredniej komunikacji pomiędzy radiotelefonami.
- ✚ W przypadku komunikacji w trybie bezpośrednim pomiędzy radiotelefonami w środowisku leśnym możliwy zasięg łączności wynosi 1,5-3 km, w zależności od składu środowiska leśnego.
- ✚ Istotny wpływ na zasięg łączności ma miejsce używania radiotelefonu. Występowanie w odległości do kilku metrów dużej ilości gałęzi krzewów liściastych w otoczeniu terminala lub lokalne

obniżenia terenu skutkują znacznym ograniczeniem zasięgu łączności, pomimo że symulacje wskazują na zapewnienie takiego zasięgu.

- ✦ Zwiększone tłumienie sygnału radiowego w lesie skutkuje koniecznością zaplanowania znacznie większej liczby stacji bazowych tworzących infrastrukturę sieci radiowej – dla zapewnienia łączności terminalom ruchomym na obszarach leśnych w porównaniu z terenami otwartymi.

Literatura

- Alade M. 2013. Further Investigation into VHF Radio Wave Propagation Loss over Long Forest Channel. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 2 (1): 705-710.
- Attenuation in vegetation. 2016. ITU-R Recommendation P833-9.
- Ayekomilogbon O. T., Famoriji J. O., Olasoji Y. O. 2013. Evaluation and Modeling of UHF Radiowave Propagation in a Forested Environment. *International Journal of Engineering and Innovative Technology* 2 (12): 101-106.
- Brach M., Kaczmarowski J. 2014. Ocena możliwości wykorzystania modelu HSI do analizy rozprzestrzeniania się pożaru lasu. *Sylvan* 158 (10): 769-778. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2014020>.
- Famoriji J., Olasoji Y. 2013. Radio Frequency Propagation Mechanisms and Empirical Models for Hilly Areas. *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering* 4 (2): 65-70.
- Field-strength measurements along a route with geographical coordinate registrations. 2011. ITU-R SM.1708-1.
- Grzybkowski M., Michalak M., Waga M. 2003. Badanie tłumienności fali radiowej w obszarach leśnych. *Sprawozdanie Z21/21300103/841/2003*. Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, Wrocław.
- Kaczmarowski J., Kołakowski B., Kwiatkowski M., Piwnicki J., Szczygieł R. 2018. Kierunki rozwoju ochrony przeciwpożarowej lasu. *Postępy Techniki w Leśnictwie* 142: 57-63.
- Kaczmarowski J., Parapura H., Kwiecień J. 2020. Analiza przestrzenna rozkładu natężenia pola radiowego w lasach. W: Stereńczak K. [red.]. *Zastosowanie geomatyki w leśnictwie*. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary. 285-299.
- Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B. C. 2009a. Empirical Near Ground Path Loss Modeling in a Forest at VHF and UHF Bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 57 (2): 1461-1468.
- Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B. C. 2009b. Study of propagation loss prediction in forest environment. *Progress In Electromagnetics Research B* 17: 117-133.
- Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B. C. 2010. Path loss modeling for near-ground VHF radio-wave propagation through forests with tree-canopy reflection effect. *Progress In Electromagnetics Research M* 12: 131-141.
- Ozimek E., Kobek W. 1970. Tłumienie dźwięku w wybranych terenach zadrzewionych. *Sylvan* 114 (10): 49-63.