

Zakład Kompatybilności
Elektromagnetycznej
ul. Swojczycka 38
51-501 Wrocław
tel.: [+48 71] 36 99 803
fax: [+48 71] 37 28 878
e-mail: wroclaw@il-pib.pl
www.il-pib.pl



ul. Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel.: [+48 22] 512 81 00
fax: [+48 22] 512 86 25
e-mail: info@il-pib.pl
www.il-pib.pl

Bezprzewodowe przyłącza telekomunikacyjne

Raport nr Z21/21.10.1.01.12.4/056/2024



Ministerstwo
Cyfryzacji



Instytut Łączności
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Nr pracy : 21.10.1.01.12.4
Nazwa pracy : Bezprzewodowe przyłącza telekomunikacyjne
Zlecniodawca : Ministerstwo Cyfryzacji, Departament
Telekomunikacji
Data rozpoczęcia : Październik 2024
Data zakończenia : Grudzień 2024
Wykonawcy pracy : Zespół Z-21
Data : 31.12.2024 r.
Miejscowość : Wrocław

Praca wykonana w Pracowni Gospodarki i Inżynierii Widma
Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej
Instytutu Łączności – PIB we Wrocławiu.

Spis treści

1. Wprowadzenie	5
2. Definicja punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu.....	5
2.1. Europejski kodeks łączności elektronicznej.....	6
2.2. Rozporządzenie wykonawcze do art. 57 EKŁE	7
2.3. Warunki instalacji punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu wg normy EN 62232:2022 wskazanej w rozporządzeniu wykonawczym	9
3. Urządzenia radiowe niewymagające pozwolenia	10
3.1. Urządzenia klasy 1	12
3.2. Urządzenia niewymagające pozwoleń działające w sieciach WAS/RLAN w paśmie 6 GHz	15
3.3. Urządzenia bliskiego zasięgu niewymagające pozwoleń w zakresie 874 – 876 MHz i 915 – 921 MHz.....	16
3.4. Podsumowanie	19
4. Pasma chronione.....	21
5. Urządzenia bez pozwoleń dostępne w pasmach nielicencjonowanych	22
5.1. Ubiquiti LTU	22
5.2. Ubiquiti airMAX	23
5.3. Ubiquiti airFiber.....	23
5.4. Cambium Networks ePMP 4500 oraz ePMP Force 400	24
5.5. Cambium Networks cnWave 60 GHz.....	25
5.6. MikroTik 5 GHz	26
5.7. MikroTik 60 GHz	27
5.8. Mikrotik 60 GHz z 5GHz jako połączenie awaryjne	28
6. Analiza zasięgów	30
6.1. Tłumienie wolnej przestrzeni	30
6.2. Tłumienie spowodowane obecnością gazów w atmosferze	31
6.3. Tłumienie spowodowane opadami atmosferycznymi lub występowaniem cząstek stałych w atmosferze	34
6.4. Tłumienie dyfrakcyjne	36
6.5. Zmiany kąta dotarcia do terminala odbiornika i kąta „wystrzelenia” na terminalu nadajnika.....	37

6.6.	Tłumienie opadów atmosferycznych.....	37
6.7.	Tłumienie przez chmury i mgły	40
6.8.	Tłumienie na pojedynczych przeszkodach roślinnych	40
6.9.	Tłumienie całkowite trasy.....	42
6.10.	Bilans łączą	42
7.	Monitoring przyszłych wdrożeń pilotażowych	46
8.	Analiza kosztów	47
9.	Podsumowanie.....	53

1. Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie, pt. Bezprzewodowe przyłącza telekomunikacyjne, przygotowane zostało przez Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności – Państwowego Instytutu Badawczego w ramach umowy dotacji celowej 1/DT/2024, zawartej pomiędzy Instytutem Łączności – Państwowym Instytutem Badawczym, a Ministerstwem Cyfryzacji.

Zapewnienie dostępu do bardzo szybkiego Internetu na obszarach białych plam jest jednym z kluczowych projektów prowadzonych przez Polskę w dziedzinie cyfryzacji. W raporcie Polska w zasięgu stacjonarnego dostępu do usług szerokopasmowych¹ opublikowano informacje o punktach adresowych w zasięgu usług na koniec III kwartału 2024 roku. Spośród 9 059 048 punktów adresowych na obszarze całego kraju objętych zasięgiem było 7 534 460 punktów, czyli ponad 83%. Wśród punktów adresowych znajdujących się w zasięgu usług szerokopasmowych, blisko 67% miało przepustowość łącza telekomunikacyjnego na poziomie 1 Gb/s.

Zwiększanie procentu punktów adresowych w zasięgu Internetu szerokopasmowego z wykorzystaniem wyłącznie medium światłowodowego jest zadaniem bardzo trudnym. W wielu przypadkach istnieją istotne ograniczenia związane z budową sieci światłowodowej, jak na przykład:

- rozproszona własność gruntów,
- niechęć właścicieli gruntów (posesji) do udostępnienia ich terenu pod budowę światłowodu,
- problemy proceduralne – uzyskanie odpowiednich zgód i pozwoleń,
- brak możliwości wykonania prac ziemnych np. ze względu na zabytkową nawierzchnię,
- nieopłacalne kosztowo inwestycje polegające na doprowadzeniu światłowodu do pojedynczych lub niewielkich skupisk budynków.

Celem niniejszej pracy jest analiza i przedstawienie możliwości zapewnienia dostępu do łącza szerokopasmowego dla punktów adresowych objętych wyżej wymienionymi problemami, gdzie podłączenie z wykorzystaniem światłowodu okazało się niemożliwe lub nieefektywne kosztowo.

W pracy przedstawiane są także najważniejsze wskaźniki, które mogą pomóc w ocenie wdrożeń testowych rozwiązań bezprzewodowych w paśmie niechronionym.

2. Definicja punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu

Zgodnie z definicją zawartą w Dyrektywie ustanawiającej Europejski kodeks łączności elektro-
nicznej pod pojęciem punktu dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu rozumiane jest

¹ Minister Cyfryzacji, Instytut Łączności – PIB, Polska w zasięgu stacjonarnego dostępu do Internetu, III kwartał 2024, <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/juz-jest-sprawdz-nowy-raport-polska-w-zasiegu-z-danymi-z-internet-govpl> (dostęp: 25.11.2024)

niewielkie urządzenie o niskiej mocy, dysponujące małym zasięgiem i wykorzystujące widmo radiowe objęte obowiązkiem uzyskania zezwolenia albo widmo zwolnione z obowiązku uzyskania zezwolenia. Możliwe jest też połączenie tych obu rodzajów widma. Urządzenie takie może być częścią publicznej sieci łączności elektronicznej i być wyposażone w antenę lub anteny o niskim oddziaływaniu na środowisko elektromagnetyczne i które pozwala użytkownikom uzyskać bezprzewodowy dostęp do sieci łączności elektronicznej, niezależnie od topologii tej sieci – ruchomej lub stałej.

2.1. Europejski kodeks łączności elektronicznej

Europejski kodeks łączności elektronicznej² (EKŁE) jest dyrektywą, która ustanawia zharmonizowane ramy prawne regulujące sieci łączności elektronicznej, usługi łączności elektronicznej, urządzenia i usługi towarzyszące i niektóre aspekty urządzeń końcowych. Określa ona zadania krajowych organów regulacyjnych i, w stosownych przypadkach, innych właściwych organów oraz zbiór procedur w celu zapewnienia zharmonizowanego stosowania ram prawnych w obrębie Unii.

W szczególności w art. 57 dyrektywy, o której mowa, określone są zasady wdrożenia do eksploatacji i użytkowania punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu. Podkreśla się tam fakt, że organy właściwe dla regulacji telekomunikacji nie powinny ograniczać z nieuzasadnionych powodów uruchamiania takich punktów. W szczególności właściwe organy regulacyjne nie mogą uzależniać uruchamiania punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu mających fizyczne i techniczne cechy określone przez Komisję Europejską w drodze aktów wykonawczych, takie jak maksymalna wielkość, masa i, w stosownych przypadkach, moc nadawania tych punktów od jakiegokolwiek indywidualnego pozwolenia w zakresie planowania przestrzennego lub innych indywidualnych uprzednich pozwoleń. Natomiast na zasadzie odstępstwa właściwe organy mogą wymagać zezwoleń na uruchamianie punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu na budynkach lub w miejscach o wartości architektonicznej, historycznej lub przyrodniczej chronionych zgodnie z prawem krajowym lub, w razie konieczności, ze względów bezpieczeństwa publicznego.

Istotne jest to, że według EKŁE państwa członkowskie UE, stosując w odpowiednich przypadkach procedury przyjęte zgodnie z dyrektywą 2014/61/UE, powinny zapewnić operatorom dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu prawo dostępu do każdej zarządzanej przez krajowe, regionalne lub lokalne organy publiczne infrastruktury technicznej, która nadaje się pod względem technicznym do umieszczania punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu lub która jest niezbędna do połączenia takich punktów dostępu z siecią szkieletową, w tym takiego wyposażenia ulic, jak np. latarni, znaków ulicznych, sygnalizacji świetlnej, tablic reklamowych, przystanków autobusowych i tramwajowych oraz stacji metra. Ponadto uruchamianie punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu nie powinno podlegać

² Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/1972 z dnia 11 grudnia 2018 r. ustanawiająca Europejski kodeks łączności elektronicznej, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/1972/oj/pol> (dostęp: 18.11.2024)

żadnym opłatami niebędącym opłatami administracyjnymi a wnioski o taki dostęp powinny być rozpatrywane na uczciwych, rozsądnych, przejrzystych i niedyskryminacyjnych warunkach.

2.2. Rozporządzenie wykonawcze do art. 57 EKŁE

W art. 57 EKŁE jest mowa o tym, że fizyczne i techniczne cechy punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu, takie jak maksymalna ich wielkość, masa oraz w stosownych przypadkach, moc nadawania określi Komisja w drodze aktów wykonawczych. Takim aktem wykonawczym jest Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2020/1070 z dnia 20 lipca 2020 r. określające cechy punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu³, zwane dalej „Rozporządzeniem”.

W art. 3 Rozporządzenia stwierdzono, że punkty dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu, o których mowa w art. 57 EKŁE muszą spełniać wymogi normy europejskiej wskazanej w pkt B załącznika do tego rozporządzenia (patrz niżej) oraz muszą być w pełni i bezpiecznie zintegrowane ze swoją konstrukcją nośną i w związku z tym być niewidoczne dla ogółu społeczeństwa lub spełniać szczegółowe warunki określone w pkt A załącznika do tego rozporządzenia.

Punkt A załącznika do Rozporządzenia opisuje ogólne warunki instalacji punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu. Stwierdzono tam m.in., że:

„1. Całkowita objętość części punktu dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu obsługującego co najmniej jednego użytkownika widma radiowego, która jest widoczna dla ogółu społeczeństwa, nie może przekraczać 30 litrów.

2. Całkowita objętość części wielu różnych punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu współdzielących obiekt infrastruktury o ograniczonej powierzchni, taki jak słup oświetleniowy, słup sygnalizacji świetlnej, billboard lub przystanek autobusowy, które są widoczne dla ogółu społeczeństwa, nie może przekraczać 30 litrów.

3. W przypadkach, w których system antenowy i inne elementy, takie jak moduł radiowy, procesor cyfrowy, moduł przechowywania danych, system chłodzenia, zasilacz, przyłącza kablowe, elementy sieci dosyłowej lub elementy do uziemiania i mocowania punktu dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu, są instalowane oddzielnie, każda ich część przekraczająca objętość 30 litrów musi pozostać niewidoczna dla ogółu społeczeństwa.

³ Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2020/1070 z dnia 20 lipca 2020 r. określające cechy punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu zgodnie z art. 57 ust. 2 dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/1972 ustanawiającej Europejski kodeks łączności elektronicznej, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:32020R1070> (dostęp: 18.11.2024), zmienione przez Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2024/2000 z dnia 24 lipca 2024 r. zmieniające Rozporządzenie wykonawcze (UE) 2020/1070 w celu racjonalizacji sprawozdawczości dotyczącej jego stosowania oraz umożliwienia korzystania z aktywnych systemów antenowych, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202402000 (dostęp: 12.12.2024)

4. Punkt dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu musi być wizualnie spójny z konstrukcją nośną oraz mieć proporcjonalny rozmiar w stosunku do całkowitej wielkości konstrukcji nośnej, jak również spójny kształt, neutralne kolory pasujące do koloru konstrukcji nośnej lub wtapiające się w nią oraz ukryte kable i nie może tworzyć bałaganu wizualnego wraz z innymi punktami dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu, które są już zainstalowane w tym samym miejscu lub miejscach sąsiadujących.

5. Masa punktu dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu i jego kształt nie powinny powodować konieczności strukturalnego wzmocnienia konstrukcji nośnej.

6. Punkt dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu klasy instalacji E10 może być zainstalowany wyłącznie w przestrzeni zewnętrznej lub w dużych pomieszczeniach, w których wysokość stropu wynosi co najmniej 4 metry.”

Z kolei wymogi dotyczące instalacji punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu przedstawiono w części B załącznika do Rozporządzenia. Widnieje tam zapis, że:

„1. Wdrażanie punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu musi być zgodne z wymogami klas instalacji E0, E2 i E10⁴ przedstawionymi w tabeli 2 w pkt 6.2.5 normy europejskiej EN 62232:2022 „Wyznaczanie natężenia pola RF, gęstości mocy i SAR w otoczeniu stacji bazowych dla oceny poziomu ekspozycji człowieka”⁵.

2. W przypadkach, w których w jednym miejscu występuje wiele systemów antenowych lub ich części, co najmniej jednego punktu dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu, który wchodzi w zakres niniejszego rozporządzenia, kryteria dotyczące EIRP przedstawione w normie, o której mowa w pkt 1, mają zastosowanie do sumy EIRP wszystkich systemów antenowych lub ich części występujących w jednym miejscu. W przypadku rozmieszczenia w tym samym miejscu systemów antenowych lub ich części podmioty wdrażające mogą przedstawić wspólnie dowody zgodności zagregowanej EIRP, chyba że prawo krajowe stanowi inaczej.”

W art. 3 Rozporządzenia jest mowa również o tym, że przedstawione powyżej przepisy nie powinny wpływać na uprawnienia państw członkowskich do określania zagregowanych poziomów pól elektromagnetycznych wynikających ze wspólnej lokalizacji kilku (wielu) punktów dostępowych lub agregacji na lokalnym obszarze punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu. Powinna być także zapewniona zgodność z prawem Unii z obowiązującymi zagregowanymi granicznymi poziomami narażenia na pole elektromagnetyczne w przypadku stosowania środków innych niż indywidualne zezwolenia na wdrażanie punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu. Z kolei operatorzy, którzy utworzyli punkty dostępu

⁴ Wszystkie rodzaje stacji bazowych podzielono w normie EN 62232:2022 na pięć klas instalacji odpowiadających różnym wartościom granicznym ich zastępczej mocy promieniowanej izotropowo (EIRP) wynoszącym, odpowiednio, kilka miliwatów (klasa E0), 2 W (klasa E2), 10 W (klasa E10), 100 W (klasa E100) i powyżej 100 W (klasa E+).

⁵ Norma ta została zmieniona w 2023 r. i została zaadaptowana w Polsce pod nazwą PN-EN IEC 62232:2023-07 „Wyznaczanie natężenia pola RF, gęstości mocy i SAR w otoczeniu radiokomunikacyjnych stacji bazowych dla oceny poziomu ekspozycji człowieka”

bezprzewodowego o bliskim zasięgu klasy E2 lub E10, spełniające warunki określone w częściach A i B Załącznika do Rozporządzenia, w terminie jednego miesiąca od wdrożenia każdego punktu dostępu powinni powiadomić właściwy organ krajowy (w przypadku Polski Urząd Komunikacji Elektronicznej) o instalacji i lokalizacji powyższych punktów dostępu, a także o tym, czy te punkty dostępu spełniają ogólne warunki instalacji tych punktów.

Należy nadmienić, że oprócz wymogów stawianych operatorom istnieje również wymóg regularnego monitorowania przez państwa członkowskie stosowania przepisów Rozporządzenia (zgodnie z art. 4 Rozporządzenia) i składania Komisji Europejskiej sprawozdania na ten temat w szczególności sprawozdania dotyczącego technologii wykorzystywanych przez wdrażane punkty dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu. Państwa członkowskie mają składać Komisji sprawozdania co 2 lata, po raz pierwszy do dnia 31 marca 2026 r. Każde z tych sprawozdań ma obejmować okres 2 lat kalendarzowych i ma być przedkładane Komisji do dnia 31 marca roku następującego po zakończeniu okresu sprawozdawczego.

2.3. Warunki instalacji punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu wg normy EN 62232:2022 wskazanej w rozporządzeniu wykonawczym

Warunki instalacji punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu określone są w normie PN-EN IEC 62232:2023-07 służącej do wyznaczania natężenia pola sygnałów radiowych gęstości ich mocy i określenia ilości promieniowania elektromagnetycznego, którą ciało człowieka pochłania (SAR) w otoczeniu radiokomunikacyjnych stacji bazowych celem oceny poziomu ekspozycji człowieka w polach elektromagnetycznych. Poniżej w tabeli 1 przedstawiono te warunki dla trzech (z pięciu klas) instalacji dysponujących najmniejszymi mocami promieniowanymi wraz z EIRP wyrażoną w watach oraz w skali logarytmicznej (dBW jest logarytmiczną jednostką miary mocy w stosunku do 1 W).

Tabela 1. Warunki instalacji wyspecyfikowane w tabeli 2 w pkt 6.2.5 normy europejskiej EN 62232:2022 dla klas instalacji E0, E2 i E10

Klasa instalacji	EIRP [W]	EIRP [dBm]	Warunki instalacji
E0	n/a	n/a	Produkt zgodny z IEC 62479 ⁶ lub warunki zgodności osiągnięte w odległości zero. Brak wymagań instalacyjnych.
E2	≤ 2	≤ 33	Produkt instalowany zgodnie z wymaganiami producenta i podmiotów wprowadzających do użytku. Zgodność z limitami natężenia pola jest osiągnięta przy odległości zero lub w odległości kilku cm.

⁶ Norma ta została zaadaptowana w Polsce pod nazwą PN-EN 62479:2011 „Ocena zgodności elektronicznych i elektrycznych urządzeń małej mocy z ograniczeniami podstawowymi dotyczącymi ekspozycji ludzi w polach elektromagnetycznych (od 10 MHz do 300 GHz)”

Klasa instalacji	EIRP [W]	EIRP [dBm]	Warunki instalacji
E10	≤ 10	≤ 40	Produkt instalowany zgodnie z wymaganiami producenta i podmiotów wprowadzających do użytku oraz najniższa część promieniująca anteny(anten) jest na wysokości minimum 2,2 m powyżej powierzchni dostępnej do spacerowania lub postoju dostępnej przez ogół ludności.

Obowiązujące ograniczenia technologiczne dotyczące punktów dostępu bezprzewodowego o bliskim zasięgu wynikające z art. 57 EKłE, aktów wykonawczych 2020/1070 oraz 2024/2000 i normy PN-EN IEC 62232:2023-07 (wszystkie obowiązują łącznie) przedstawiają się następująco:

1. Objętość 30 litrów lub niewidoczność dla społeczeństwa związana z integracją z konstrukcją nośną (Rozporządzenie załącznik A ust. 1, 2, 3).
2. Maksymalna moc EIRP nieprzekraczająca 10 W (40 dBm) (tabela 2 w pkt 6.2.5 normy PN-EN IEC 62232 wskazanej w Rozporządzeniu załącznik B ust. 1)⁷. EIRP dotyczy sumy wszystkich anten i wszystkich pasm. Możliwe jest stosowanie anten aktywnych (AAS).
3. Wysokość mocowania najniższej części promieniującej anteny przynajmniej 2,2 m nad powierzchnią dostępną dla społeczeństwa do ruchu lub postoju pieszych. (Tabela 2 w pkt 6.2.5 normy europejskiej EN 62232 wskazanej w Rozporządzeniu załącznik B ust. 1).
4. W przypadku mocowania punktów dostępowych klasy E10 wewnątrz budynków wysokość stropu w takim budynku musi wynosić co najmniej 4 m (Rozporządzenie załącznik A ust. 6): Produkty klasy E0 lub E2 nie mają ograniczeń wysokości i mogą być swobodnie instalowane wewnątrz dowolnego budynku.

3. Urządzenia radiowe niewymagające pozwolenia

Urządzenia radiowe niewymagające pozwolenia to kategoria urządzeń, które mogą być używane bez konieczności uzyskania indywidualnego pozwolenia radiowego od właściwego organu regulacyjnego (w Polsce od Prezesa UKE). Takie urządzenia działają w pasmach częstotliwości określonych jako pasma ogólnodostępne. Pasma te regulowane są przepisami krajowymi i międzynarodowymi. Urządzenia niewymagające pozwolenia radiowego zazwyczaj podlegają restrykcyjnym wymogom dotyczącym mocy promieniowanej, a także czasu i sposobu dostępu do widma. Często wymaga się także, aby implementowały algorytmy sterowania mocą lub stawia się bardziej restrykcyjne wymagania co do maksymalnej mocy promieniowanej, jeżeli takich algorytmów nie stosują. Korzyściami stosowania tego typu urządzeń są: niska cena, brak konieczności pozyskiwania pozwoleń, ograniczenie kosztów budowy i utrzymania sieci dzięki darmowemu dostępowi do widma. Powszechny dostęp bez

⁷ W treści rozporządzenia 2024/2000 wskazana jest norma EN 62232:2022. Znowelizowana norma PN-EN IEC 62232:2023-07 nie wnosi zmian danych zamieszczonych w tabeli 2 w pkt 6.2.5

ograniczeń prowadzi jednak do możliwości powstania zakłóceń na obszarach, gdzie pracuje jednocześnie wiele urządzeń w tym samym paśmie.

Szczegóły dotyczące rodzajów urządzeń niewymagających pozwoleń przedstawione są w art. 145 obowiązującej ustawy z dnia 12 lipca 2024 r. Prawo komunikacji elektronicznej⁸ (PKE).

W artykule tym stwierdzono, że:

„1. Nie wymaga pozwolenia używanie urządzeń radiowych przeznaczonych wyłącznie do odbioru.

2. Nie wymaga pozwolenia używanie urządzenia radiowego nadawczego lub nadawczo-odbiorczego:

2.1. używanego przez zagraniczny statek powietrzny, morski lub statek żeglugi śródlądowej, zgodnie z międzynarodowymi przepisami radiokomunikacyjnymi, jeżeli urządzenie zostało dopuszczone do używania przez właściwy organ;

2.2. używanego, zgodnie z przepisami międzynarodowymi, w służbie amatorskiej przez cudzoziemca oraz obywatela polskiego stale rezydującego za granicą podczas pobytu na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej, jeżeli jednorazowo pobyt taki nie jest dłuższy niż 90 dni;

2.3. końcowego:

2.3.1. dołączanego do zakończenia sieci telekomunikacyjnej, z wyłączeniem urządzeń stosowanych w służbie lotniczej, morskiej lub żeglugi śródlądowej,

2.3.2. służącego do utrzymywania łączności z przebywającym krótkookresowo na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej lub znajdującym się na nim w tranzycie, zagranicznym pojazdem, statkiem powietrznym, morskim lub statkiem żeglugi śródlądowej, przytwierdzonego w sposób trwały do tego pojazdu lub statku, wykorzystującego międzynarodowo uzgodnione zakresy częstotliwości;

2.4. wykorzystującego zakresy częstotliwości zarezerwowane na rzecz podmiotu uprawnionego do dysponowania częstotliwością lub za zgodą tego podmiotu, podmiotu przez niego upoważnionego lub któremu częstotliwości zostały wydierżawione lub przekazane do użytkowania zgodnie z art. 96⁹, o ile nie została wydana decyzja, o której mowa w art. 96 ust. 5, jeżeli rezerwacja częstotliwości przewiduje zwolnienie z obowiązku uzyskania pozwolenia i określa warunki wykorzystywania częstotliwości;

2.5. będącego urządzeniem klasy 1, o którym mowa w art. 274 ust. 3.

⁸ Ustawa z dnia 12 lipca 2024 r. Prawo komunikacji elektronicznej, Dz.U. 2024 r., poz. 1221

⁹ W artykule 96 PKE określone są warunki wydierżawienia lub przekazania częstotliwości objętych rezerwacją częstotliwości przez podmiot dysponujący rezerwacją częstotliwości na rzecz innego podmiotu

3. *Urządzenia klasy 1, o których mowa w art. 274 ust. 3, nie podlegają ochronie przed szkodliwymi zakłóceniami powodowanymi przez inne urządzenia.*

4. *Minister właściwy do spraw informatyzacji może, w drodze rozporządzenia, określić rozszerzony zakres urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia¹⁰, określając:*

4.1. *warunki używania urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia,*

4.2. *rodzaje służb radiokomunikacyjnych, w których urządzenia te mogą być używane – uwzględniając przepisy międzynarodowe oraz kierując się zasadą zwiększania liczby rodzajów takich urządzeń, przy uwzględnieniu potrzeby harmonijnego gospodarowania częstotliwościami.”*

Szczególnym rodzajem przedstawionych w art. 145 PKE urządzeń, na pracę których nie jest wymagane uzyskanie pozwolenia, są opisane poniżej urządzenia klasy 1.

3.1. Urządzenia klasy 1

Ogólne informacje dotyczące urządzeń klasy 1 zawarte są w punkcie 3 art. 274 PKE. Stwierdza się tam, że urządzeniami klasy 1 są takie urządzenia, wobec których państwa członkowskie Unii nie stosują ograniczeń w zakresie wprowadzania ich do obrotu lub oddawania do użytku.

Pełna lista urządzeń klasy 1. wraz ze szczegółowymi specyfikacjami interfejsów radiowych sporządzona została w ramach Decyzji Komisji¹¹ ustalającej wstępną klasyfikację urządzeń radiowych i końcowych urządzeń telekomunikacyjnych oraz powiązanych identyfikatorów. Lista ta¹² zawiera wykaz ponad stu podklas urządzeń (ponumerowanych od 07/09a do 143) przeznaczonych do działania w różnych zakresach częstotliwości, wraz z poszczególnymi specyfikacjami interfejsów radiowych określającymi warunki użytkowania tych urządzeń. Przykładową listę urządzeń klasy 1. opublikowano na stronie internetowej UKE¹³ zgodnie z zaleceniami zawartymi w art. 274 pkt 4 PKE o udostępnieniu przez Prezesa UKE takiej listy. Na

¹⁰ Obecnie istnieją w obiegu prawnym dwa rozporządzenia Ministra Cyfryzacji w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego wydane na mocy uchylonej już ustawy Prawo telekomunikacyjne z dnia 16 lipca 2004 r. Są to: Rozporządzenie Ministra Cyfryzacji z dnia 9 lutego 2022 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego (Dz.U. 2022 poz. 567) oraz Rozporządzenie Ministra Cyfryzacji z dnia 11 listopada 2023 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego ([Dz.U. 2023 poz. 2567](#)). Na podstawie zapisów art. 145 pkt 4 Prawa komunikacji elektronicznej w roku 2025 powinno zostać wydane nowe rozporządzenie w tej sprawie

¹¹ Decyzja Komisji z dnia 6 kwietnia 2000 r. ustanawiająca wstępną klasyfikację urządzeń radiowych i końcowych urządzeń telekomunikacyjnych oraz związanych z nimi znaków identyfikacyjnych (2000/299/WE), <http://data.europa.eu/eli/dec/2000/299/oj> (dostęp: 16.12.2024)

¹² Publication in accordance with Article 1(3) of Commission Decision 2000/299/EC (Version January 2020 of indicative and non-exhaustive list), <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/40361>, (dostęp: 15.11.2024)

¹³ UKE, Urządzenia niewymagające pozwolenia, urządzenia klasy 1, <https://bip.uke.gov.pl/pozwolenia-radiowe/urządzenia-niewymagające-pozwolenia/> (dostęp: 15.11.2024)

stronie tej zamieszczony jest ponadto odnośnik do omawianej powyżej listy urządzeń klasy 1. (wraz ze specyfikacjami tych urządzeń) sporządzonej przez Komisję Europejską.

Prezes UKE udostępnił na stronie podmiotowej BIP UKE przykładową listę¹⁴ urządzeń klasy 1, o której mowa w ustawie Prawo komunikacji elektronicznej art. 274 ust. 4, wraz ze szczegółowymi specyfikacjami interfejsów radiowych dla poszczególnych podklas¹⁵.

Na podstawie analizy parametrów interfejsów radiowych i zakresów częstotliwości, które mogą zostać wykorzystane do realizacji przyłączy bezprzewodowych, będących przedmiotem niniejszego raportu, przygotowano wyciąg z listy opublikowanej przez Komisję Europejską. Tabela 2 przedstawia wymagania, jakie powinny spełniać urządzenia radiowe pracujące w wybranych podklasach. Wybór podklas do analizy podyktowany był m.in. rodzajem służby radiokomunikacyjnej dozwolonej w danej podklasie czy dozwolonymi zastosowaniami.

¹⁴ Urządzenia niewymagające pozwoleń, BIP UKE, 2023, <https://bip.uke.gov.pl/pozwolenia-radiowe/urządzenia-niewymagające-pozwoleń/> (dostęp: 15.11.2024)

¹⁵ Publication in accordance with Article 1(3) of Commission Decision 2000/299/EC (Version January 2020 of indicative and non-exhaustive list), Komisja Europejska, 2020, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/40361> (dostęp: 15.11.2024)

Tabela 2. Wybrane podklasy urządzeń klasy 1

Parametr	Opis					
Zastosowanie	Bezprzewodowe sieci dostępne, w tym radiowe sieci lokalnego dostępu (WAS/RLAN)	Urządzenia bliskiego zasięgu ogólnego przeznaczenia	Urządzenia bliskiego zasięgu ogólnego stosowania	Urządzenia bliskiego zasięgu ogólnego stosowania	Szerokopasmowe systemy transmisji danych	Szerokopasmowe systemy transmisji danych
Zakres częstotliwości	5 470 – 5 725 MHz	5 725 – 5 875 MHz	24,00-24,15 GHz	24,15 – 24,25 GHz	57 – 71 GHz	57 – 71 GHz
Moc nadawania / Gęstość mocy	30 dBm mocy średniej EIRP, 17 dBm/MHz średniej gęstości mocy EIRP w każdym paśmie o szerokości 1 MHz	14 dBm mocy EIRP	20 dBm mocy EIRP	20 dBm mocy EIRP	40 dBm mocy EIRP, 23 dBm/MHz gęstości mocy EIRP i maksymalna moc nadawania 27 dBm na zacisku lub zaciskach anteny	55 dBm mocy EIRP, 38 dBm/MHz gęstości mocy EIRP i zysk anteny nadawczej ≥ 30 dBi
Zasady dostępu do kanału i zajętości	Muszą być stosowane techniki dostępu do widma i łagodzenia zakłóceń, które zapewniają efektywność co najmniej równoważną technikom opisanym w normie zharmonizowanej EN 301 893		Zakres jest przeznaczony również dla urządzeń ISM. Urządzenia pracujące w tym zakresie muszą zaakceptować szkodliwe zakłócenia, jakich mogą doznać podczas pracy urządzeń ISM.		Muszą być stosowane techniki dostępu do widma i łagodzenia zakłóceń, które zapewniają efektywność co najmniej równoważną technikom opisanym w normie zharmonizowanej EN 302 567	Muszą być stosowane techniki dostępu do widma i łagodzenia zakłóceń, które zapewniają efektywność co najmniej równoważną technikom opisanym w normie zharmonizowanej EN 302 567
Odniesienia	EN 301 893 Decyzja Komisji 2007/90/EC	EN 300 440 Decyzja Komisji 2006/771/EC z późniejszymi zmianami	EN 300 440 Rozporządzenie w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego; Dz. U. z dn. 10 marca 2022 r. poz. 567	EN 300 440 Decyzja Komisji 2006/771/EC z późniejszymi zmianami	EN 302 567 Decyzja Komisji 2006/771/EC z późniejszymi zmianami	EN 302 567 Decyzja Komisji 2006/771/EC z późniejszymi zmianami

3.2. Urządzenia niewymagające pozwoleń działające w sieciach WAS/RLAN w paśmie 6 GHz

Komisja Europejska, biorąc pod uwagę wkład zastosowań WAS/RLAN w realizację celów społeczeństwa gigabitowego, rosnącą liczbę i różnorodność urządzeń na potrzeby systemów dostępu bezprzewodowego, przyjęła Decyzję wykonawczą 2021/1067 z dnia 17 czerwca 2021 r. w sprawie zharmonizowanego wykorzystania widma radiowego w paśmie częstotliwości 5 945 – 6 425 MHz celem wdrożenia systemów dostępu bezprzewodowego, w tym lokalnych sieci radiowych (WAS/RLANs). W załączniku do decyzji określono zharmonizowane warunki techniczne dla urządzeń WAS/RLAN pracujących w zakresie częstotliwości 5 945 – 6 425 MHz. Niektóre z tych urządzeń (urządzenia o bardzo niskiej mocy) mogą być wykorzystane do tworzenia bezprzewodowych przyłączy. Nie są to jednak urządzenia klasy 1. W tabeli poniżej przedstawiono warunki techniczne stosowania urządzeń WAS/RLAN o bardzo niskim poziomie mocy promieniowanej, ponieważ tylko one, ze względu na moc, są dopuszczone do zastosowań na zewnątrz budynków.

Tabela 3. Urządzenia WAS/RLAN o bardzo niskim poziomie mocy (VLP)

Parametr	Warunki techniczne
Dopuszczalne stosowanie	W pomieszczeniach i na zewnątrz. Stosowanie w systemach bezzałogowego statku powietrznego jest niedozwolone.
Kategoria urządzenia	Urządzenie VLP to urządzenie przenośne
Zakres częstotliwości	5 945 – 6 425 MHz
Maksymalna średnia moc EIRP dla emisji wewnątrz pasma (uwaga 1)	14 dBm
Maksymalna średnia gęstość mocy EIRP dla emisji wewnątrz pasma (uwaga 1)	1 dBm/MHz
Maksymalna średnia gęstość mocy EIRP dla emisji wewnątrz pasma w przypadku zastosowań wąskopasmowych (uwaga 1) (uwaga 2)	10 dBm/MHz
Maksymalna średnia gęstość mocy EIRP dla emisji pozapasmowych poniżej 5 935 MHz (uwaga 1)	-45 dBm/MHz do 31 grudnia 2024 r. (uwaga 3) ¹⁶

Uwaga 1: Średnia moc EIRP odnosi się do mocy EIRP w trakcie transmisji, która odpowiada najwyższej mocy, jeżeli stosuje się sterowanie mocą.

Uwaga 2: Urządzenia wąskopasmowe to urządzenia działające na kanałach o szerokości pasma poniżej 20 MHz. Urządzenia wąskopasmowe wymagają również mechanizmu modulacji ze skokową zmianą częstotliwości opartego na co najmniej 15 kanałach, aby funkcjonować

¹⁶ Wartość -45 dBm/MHz została poddana przeglądowi przez CEPT. W najnowszym wydaniu Decyzji ECC (20)01 z dn. 8 listopada 2024 r. wartość ta wynosi -37 dBm/MHz z pewnymi obwarowaniami określonymi w Uwadze 3.

przy wartości gęstości widmowej mocy powyżej 1 dBm/MHz.

Uwaga 3: Adekwatność tego ograniczenia zostanie poddana przeglądowi do dnia 31 grudnia 2024 r. W przypadku braku uzasadnionych dowodów od dnia 1 stycznia 2025 r. zastosowanie będzie mieć wartość -37 dBm/MHz.¹⁷

Decyzja Komisji Europejskiej wskazuje, że należy stosować techniki dostępu do widma oraz osłabiania zakłóceń, które zapewniają odpowiedni poziom skuteczności działania umożliwiając spełnienie zasadniczych wymagań dyrektywy 2014/53/UE. W przypadku, gdy odpowiednie techniki zostały opisane w normach zharmonizowanych lub w ich fragmentach, do których odniesienia opublikowano w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej zgodnie z dyrektywą 2014/53/UE, należy zapewnić skuteczność działania równoważną z poziomem skuteczności działania odpowiadającym tym technikom.

Należy podkreślić, że urządzenia VLP pracujące w sieciach WAN/RLAN nie figurują w wykazie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego w rozporządzeniu Ministra Cyfryzacji¹⁸ dotyczącym takich urządzeń. W przyszłej wersji tego rozporządzenia wydanego już na mocy zapisów Prawa komunikacji elektronicznej tego typu urządzenia powinny być wyszczególnione w Załączniku 2 (Urządzenia bliskiego zasięgu szerokopasmowych systemów transmisji danych).

Zgodnie z Decyzją wykonawczą 2021/1067 urządzenia niskiej (wyższej niż VLP) mocy pracujące bez pozwoleń w ramach służby stałej, w zakresie 5 945 – 6 425 MHz dopuszczone są do stosowania wyłącznie na obszarach ograniczonych do pomieszczeń, w tym w pociągach z metalizowanymi oknami lub podobnych konstrukcjach wykonanych z materiału o porównywalnych właściwościach tłumiących) i w statkach powietrznych, co nie jest tematem opracowania.

3.3. Urządzenia bliskiego zasięgu niewymagające pozwoleń w zakresie 874 – 876 MHz i 915 – 921 MHz

W rozporządzeniu Ministra Cyfryzacji z 2022 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego określone są (załącznik 15) warunki używania urządzeń bliskiego zasięgu¹⁹ pracujących w zakresach częstotliwości 874 – 874,4 MHz i 916,1 – 919,4 MHz. W treści tego załącznika następuje powołanie się na warunki określone w Decyzji wykonawczej Komisji (UE) 2018/1538 z dn. 11 października 2018 r., gdzie powyższe zakresy wydzielono z zakresów częstotliwości 874 – 876 MHz i 915 – 921 MHz. Ograniczenie szerokości zakresów z 874 – 876 MHz na 874 – 874,4 MHz

¹⁷ Treść tej uwagi została zmieniona w najnowszej wersji Decyzji ECC (20)01 i nosi teraz brzmienie: Urządzenia VLP muszą podczas inicjowania sesji komunikacyjnej najpierw podjąć próbę wybrania bloku częstotliwości powyżej 6105 MHz. Alternatywnie, gdy taki mechanizm nie jest wdrożony, wówczas obowiązuje maksymalna średnia gęstość e.i.r.p. dla emisji poza pasmem wynosząca -45 dBm/MHz poniżej 5935 MHz.

¹⁸ Rozporządzenia Ministra Cyfryzacji w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego (op. cit.)

¹⁹ Nie są to urządzenia klasy 1, niewymieniane w tym rozporządzeniu

i 915 – 921 MHz na 916,1 – 919,4 MHz wynika prawdopodobnie z przeznaczenia zakresów częstotliwości 874,4 – 880,0 MHz i 919,4 – 925,0 MHz na potrzeby systemu łączności kolejowej GSM-R, co zostało potwierdzone w Rozporządzeniu Prezesa UKE²⁰. Nie zmienia to jednak faktu, że zgodnie z Decyzją wykonawczą Komisji (UE) 2022/172 z dnia 7 lutego 2022 r. zmieniającą decyzję wykonawczą Komisji (UE) 2018/1538 w sprawie harmonizacji widma radiowego na potrzeby urządzeń bliskiego zasięgu w zakresach częstotliwości 874 – 876 MHz i 915 – 921 MHz²¹ (i zgodnie z przywołanym wyżej rozporządzeniem Ministra Cyfryzacji z 2022 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego) można w zakresach sąsiadujących do zakresów „kolejowych” wykorzystywać urządzenia o bliskim zasięgu z małymi mocami promieniowania niewymagające pozwoleń radiowych. Tabela 4 przedstawia wybrane z Decyzji 2022/172 warunki wykorzystania zakresów częstotliwości 874 – 874,4 MHz, 917,4 – 919,4 MHz, 917,3 – 918,9 MHz i 917,4 – 919,4 MHz przez różnego rodzaju urządzenia o bliskim zasięgu pracujące w sieciach danych.

²⁰ Zarządzenie Prezesa Urzędu Komunikacji Elektronicznej z dnia 7 listopada 2024 r. w sprawie planu zagospodarowania częstotliwości dla zakresów 874,4-880,0 MHz i 919,4-925,0 MHz, <https://edziennik.uke.gov.pl/legislact/2024/12/> (dostęp: 19.12.2024)

²¹ Decyzja wykonawcza Komisji (UE) 2022/172 z dnia 7 lutego 2022 r. zmieniająca decyzję wykonawczą Komisji (UE) 2018/1538 w sprawie harmonizacji widma radiowego na potrzeby urządzeń bliskiego zasięgu w zakresach częstotliwości 874–876 MHz i 915–921 MHz, https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2022/172/oj/pol (dostęp: 18.11.2024)

Tabela 4. Warunki pracy urządzeń bliskiego zasięgu w zakresach 874 – 876 MHz i 915 – 921 MHz

Parametr	Opis			
Zastosowanie	Urządzenia bliskiego zasięgu ogólnego stosowania	Urządzenia do szerokopasmowej transmisji danych	Urządzenia bliskiego zasięgu ogólnego stosowania	Urządzenia bliskiego zasięgu ogólnego stosowania
Zakres częstotliwości	874 – 874,4 MHz	917,4 – 919,4 MHz	917,3 – 918,9 MHz	917,4 – 919,4 MHz
Moc nadawania / Gęstość mocy	500 mW EIRP	25 mW EIRP	500 mW EIRP	25 mW EIRP
Zasady dostępu do kanału i zajętości	Stosuje się techniki dostępu do widma oraz osłabiania zakłóceń zapewniające odpowiedni poziom skuteczności działania w celu spełnienia zasadniczych wymagań dyrektywy 2014/53/UE. Szerokość pasma ≤ 200 kHz	Stosuje się techniki dostępu do widma oraz osłabiania zakłóceń zapewniające odpowiedni poziom skuteczności działania w celu spełnienia zasadniczych wymagań dyrektywy 2014/53/UE. Szerokość pasma ≤ 600 kHz	Stosuje się techniki dostępu do widma oraz osłabiania zakłóceń zapewniające odpowiedni poziom skuteczności działania w celu spełnienia zasadniczych wymagań dyrektywy 2014/53/UE. Szerokość pasma ≤ 200 kHz	Stosuje się techniki dostępu do widma oraz osłabiania zakłóceń zapewniające odpowiedni poziom skuteczności działania w celu spełnienia zasadniczych wymagań dyrektywy 2014/53/UE. Szerokość pasma ≤ 600 kHz
Odniesienia	Decyzja Komisji 2022/172/UE Rozporządzenie w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego; Dz. U. z dn. 10 marca 2022 r. poz. 567			

3.4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionego przeglądu można stwierdzić, że urządzenia, które można zastosować bez konieczności uzyskania pozwolenia radiowego w łączach radiowych zastępujących łącza światłowodowe mogą pracować w różnych bardzo wysokich zakresach częstotliwości, skończywszy na kilkudziesięciu gigahercach. Wykorzystanie częstotliwości gigahercowych spowodowane jest koniecznością uzyskania odpowiednio dużych przepływności danych, które zapewniają szerokopasmowe kanały radiowe o dużych przepustowościach. Z przedstawionych powyżej zakresów częstotliwości jedne z nich lepiej, inne gorzej, nadają się do użytkowania przez bezprzewodowe łącza telekomunikacyjne, gdy rozpatrywane są dopuszczalne moce EIRP oraz szerokości kanałów dostępnych do transmisji danych.

Do celów zastępowania łączy światłowodowych nie nadają się łącza radiowe wyposażone w urządzenia pracujące w zakresach 874 – 876 MHz i 915 – 921 MHz, choć urządzenia te mogą pracować bez pozwoleń i prawdopodobnie są relatywnie tanie. Najszerzy dostępny podzakres w powyższych zakresach ma maksymalną szerokość 2 MHz (patrz Tabela 4), z dodatkowym ograniczeniem na szerokość pasma kanału roboczego, które wynosi 600 kHz. Nawet w przypadku zastosowania rozwiązania o wysokiej efektywności widmowej (rzędu 10-20 b/s/Hz) nie jest możliwe uzyskanie tam przepływności danych rzędu 300 Mb/s dla łącza w dół i 100 Mb/s dla łącza w górę, zgodnie z wymaganiami dla sieci KPO/FERC²². Z tego względu urządzenia pracujące w powyższych zakresach częstotliwości nie powinny być brane pod uwagę przy zapewnianiu szerokopasmowego dostępu do Internetu.

Z kolei łącza radiowe pracujące w zakresie częstotliwości 5 945 – 6 425 MHz (zawartym w tzw. paśmie 6 GHz) i przeznaczonym dla użytku przez sieci WAS/RLAN, wykorzystujące urządzenia radiowe, na działanie których nie są wymagane pozwolenia, umożliwiają spełnienie podstawowych wymagań co do szerokości kanałów, natomiast ich istotnym ograniczeniem może być ograniczenie mocy urządzeń końcowych (EIRP) jedynie do 14 dBm (patrz Tabela 3). Szczegółowe możliwości wykorzystania łączy radiowych uruchamianych w tym zakresie zostaną przedstawione w rozdziale związanym z analizą zasięgów.

Największy potencjał wdrożeniowy w łączach radiowych zastępujących przyłącza światłowodowe mają przedstawione wyżej (patrz Tabela 2) urządzenia radiowe klasy 1, w szczególności stosowane w zakresach 5 470 – 5 725 MHz, 24,00 – 24,25 GHz oraz 57 – 71 GHz. Zakres 5 725 – 5 875 MHz ma podobną do zakresu 5 470 – 5 725 MHz dostępność urządzeń lecz choć cechuje się prawie identycznymi warunkami propagacyjnymi, to dozwolone jest w nim stosowanie urządzeń o znacznie niższej mocy EIRP (50 mW vs. 1 W) co istotnie ogranicza długość łączy radiowych stosowanych w tym zakresie. Można oczekiwać, że najlepszą jakość transmisji, zbliżoną do medium światłowodowego, można będzie uzyskać stosując w łączach radiowych

²² Centrum Projektów Polska Cyfrowa, Inwestycja C 1.1.1 Zapewnienie dostępu do bardzo szybkiego Internetu na obszarach białych plam (trzeci nabór), <https://www.gov.pl/web/cppc/inwestycja-c-111-zapewnienie-do-stepu-do-bardzo-szybkiego-internetu-na-obszarach-bialych-plam-trzeci-nabor> (dostęp: 20.11.2024)

urządzenia działające w zakresie 57 – 71 GHz ze względu na możliwość wykorzystania szerokiego kanału, stosunkowo dużej mocy promieniowanej oraz anten o wysokim zysku energetycznym (wymagany nie mniejszy niż 30 dBi), stosowanie których rekompensuje gorsze warunki propagacyjne cechujące takie łącza. Wykorzystanie tak wysokich częstotliwości będzie się wiązało jednak z ograniczeniami w montażu i konfigurowaniu urządzeń końcowych stosowanych w łączu radiowym, np. ze względu na konieczność maksymalnego unikania lub całkowitego wykluczenia przeszkód na trasie celem minimalizowania tłumienności tras radiowych wnoszonych przez otoczenie. Właściwości propagacyjne tych zakresów w połączeniu z wykorzystaniem dopuszczalnych mocy promieniowanych urządzeń radiowych, które mogą być wykorzystane w powyższym zakresie zostaną szczegółowo porównane w rozdziale związanym z analizą zasięgów.

4. Pasma chronione

Pasma chronione to częstotliwości radiowe, które są zarezerwowane do określonych zastosowań (określonych służb radiokomunikacyjnych) i są objęte specjalną ochroną przed zakłóceniami. Regulacje dla tych pasm są ściśle określone przez organy regulacyjne, takie jak Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny (ITU), a na poziomie krajowym przez jednostki odpowiedzialne za gospodarkę widmem, w Polsce przez Urząd Komunikacji Elektronicznej. Do prowadzenia emisji w pasmach chronionych konieczne jest uzyskanie pozwolenia radiowego, wydawanego przez regulatorów krajowych.

W Polsce, w ramach dotacji KPO/FERC, gdzie warunkiem koniecznym jest wykorzystanie pasma chronionego, obecnie obserwowane jest popularne wykorzystanie częstotliwości z zakresów 5 945 – 6 425 MHz oraz 24 – 29 GHz. W tak dużych programach jest to rozwiązanie uzasadnione, ponieważ opłaty za rezerwację dzielone są na wielu abonentów w sieci operatora. Jednak w przypadku rozważanych przyłączy dla pojedynczych budynków, bądź nawet jednego budynku, wykorzystanie pasm chronionych i ponoszenie corocznych opłat za rezerwację częstotliwości mogłoby być nieopłacalne.

Można przyjąć, że 50 MHz jest minimalną szerokością kanału transmisyjnego do świadczenia bezprzewodowego dostępu do Internetu, jednak rekomendowaną szerokością ze względu na jakość transmisji jest co najmniej 100 MHz. Aktualne opłaty za wykorzystanie widma w pasmach 5 GHz oraz 60 GHz wynoszą:

1. dla miasta na prawach powiatu:
 - a. 50 MHz: 12,5 tys. zł rocznie,
 - b. 80 MHz: 20 tys. zł rocznie,
 - c. 100 MHz: 25 tys. zł rocznie,
2. w przypadku gminy miejskiej z wyłączeniem miast na prawach powiatu:
 - a. 50 MHz: 6,25 tys. zł rocznie,
 - b. 80 MHz: 10 tys. zł rocznie,
 - c. 100 MHz: 12,5 tys. zł rocznie,
3. w przypadku gminy miejsko-wiejskiej:
 - a. 50 MHz: 1250 zł rocznie,
 - b. 80 MHz: 2000 zł rocznie,
 - c. 100 MHz: 2500 zł rocznie,
4. w przypadku gminy wiejskiej:
 - a. 50 MHz: 500 zł rocznie,
 - b. 80 MHz: 800 zł rocznie,
 - c. 100 MHz: 1000 zł rocznie.

Tak wysokie opłaty w przypadku pojedynczych przyłączy ulokowanych nawet na terenie gminy wiejskiej (najtaniej) mogłyby oznaczać, że w opłacie za usługę dostępu do Internetu, większą część stanowiłyby koszty pozwolenia radiowego.

5. Urządzenia bez pozwoleń dostępne w pasmach nielicencjonowanych

Z przeprowadzonej analizy, obejmującej pasma nielicencjonowane, na rynku wyróżnić możemy szereg konkurencyjnych rozwiązań pracujących w oparciu o różne technologie, jednak najczęściej spotykane urządzenia radiowe wykorzystują pasmo 5 GHz oraz pasmo 60 GHz. W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane rozwiązania z dostępnych na rynku. Mogą one w przyszłości zostać wybrane do przykładowego wdrożenia. Prezentowane urządzenia są zgodne z regulacjami opisanymi w poprzednich punktach (EKL, urządzenia klasy 1, etc.), jednak po stronie instalatora leży obowiązek poprawnego montażu i skonfigurowania urządzeń zgodnie z powyższymi regulacjami (m.in. wybór odpowiedniego kanału radiowego, ograniczenie maksymalnej mocy EIRP do wartości dopuszczalnej, dobór anten).

W analizie wybrano urządzenia oferujące maksymalną szybkość transmisji danych na poziomie co najmniej 300 Mb/s w łączu w dół i 100 Mb/s w łączu w górę. Wszystkie z prezentowanych urządzeń mają możliwość podłączenia zasilania przez ten sam przewód miedziany, który wykorzystywany jest do transmisji danych – jest to technologia Power over Ethernet (PoE), która eliminuje konieczność tworzenia dodatkowego przyłącza energetycznego. Prezentowane urządzenia oferują również odpowiednią klasę odporności (International Protection Rating, IP) na warunki atmosferyczne, dostosowaną do instalacji na zewnątrz budynków.

5.1. Ubiquiti LTU

Minimalny zestaw rozwiązania Ubiquiti LTU składa się z dwóch urządzeń: Ubiquiti LTU-Rocket pełniącego funkcję stacji bazowej typu punkt-wiele punktów (PtMP) oraz Ubiquiti LTU-Lite będącego urządzeniem klienckim (CPE). W tabeli poniżej przedstawiono najważniejsze parametry zestawu urządzeń.

Tabela 5. Najważniejsze parametry urządzeń Ubiquiti LTU

Parametr	LTU-Rocket	LTU-Lite
Tryby pracy	Stacja bazowa PtMP	Bridge / Router
Zakres częstotliwości	5150 - 5875 MHz	5150 - 5875 MHz
Maksymalna przepływność	900 Mb/s	900 Mb/s
Maksymalna moc nadajnika	29 dBm	22 dBm
Maksymalna moc EIRP	39 – 51 dBm (zależnie od anteny)	35 dBm
Szerokość kanału	10 – 100 MHz	10 – 100 MHz
Modulacja zapewniająca najwyższą przepływność	1024-QAM	Brak danych
Porty Ethernet	1x 1GbE	1x 1GbE
Zasilanie PoE	Tak	Tak
Montaż	Na słupie	Na słupie

Parametr	LTU-Rocket	LTU-Lite
Odporność na warunki atmosferyczne	IP 67	IP 67
Szacowana cena (brutto)	1 943,44 zł (bez anteny)	490,52 zł

5.2. Ubiquiti airMAX

Minimalny zestaw rozwiązania Ubiquiti airMAX składa się z dwóch urządzeń. W analizowanym przykładzie są to Ubiquiti LiteAP ac LAP-120 pełniący funkcję stacji bazowej typu punkt-wiele punktów (PtMP) oraz Ubiquiti NS-5AC będącego urządzeniem klienckim (CPE). W tabeli poniżej przedstawiono najważniejsze parametry zestawu urządzeń.

Tabela 6. Najważniejsze parametry urządzeń Ubiquiti airMAX

Parametr	LiteAP ac LAP-120	NS-5AC
Tryby pracy	Stacja bazowa PtP/PtMP	Bridge / Router
Zakres częstotliwości	5150 - 5875 MHz	5150 - 5875 MHz
Maksymalna przepływność	900 Mb/s	450 Mb/s
Maksymalna moc nadajnika	25 dBm	25 dBm
Maksymalna moc EIRP	41 dBm	38 dBm
Szerokość kanału	10 – 80 MHz	10 – 80 MHz
Modulacja zapewniająca najwyższą przepływność	256-QAM	256-QAM
Porty Ethernet	1x 1GbE	1x 1GbE
Zasilanie PoE	Tak	Tak
Montaż	Na słupie	Na słupie
Odporność na warunki atmosferyczne	IP 67	IP 67
Szacowana cena (brutto)	485,85 zł	231,87 zł

5.3. Ubiquiti airFiber

Zestaw rozwiązania Ubiquiti airFiber składa się z dwóch identycznych urządzeń AF60-LR. Jest to rozwiązanie typu punkt-punkt (PtP). Po stronie końcówki światłowodowej należy dokonać konwersji z kabla światłowodowego na miedziany, a następnie podłączyć urządzenie nadawczo/odbiorcze. Po stronie użytkownika końcowego należy doprowadzić sygnał z urządzenia radiowego do domowego routera, z którym będzie możliwe połączenie przez sieć Wi-Fi lub kabel Ethernet. W tabeli poniżej przedstawiono najważniejsze parametry urządzenia.

Tabela 7. Najważniejsze parametry urządzenia Ubiquiti airFiber

Parametr	AF60-LR
Tryby pracy	PtP
Zakres częstotliwości	57 – 71 GHz
Maksymalna przepływność	1,8 Gb/s
Maksymalna moc nadajnika	21 dBm
Maksymalna moc EIRP	64 dBm
Szerokość kanału	1 080 / 2 160 MHz
Modulacja zapewniająca najwyższą przepływność	16-QAM
Porty Ethernet	1x 1GbE
Zasilanie PoE	Tak
Montaż	Na słupie
Odporność na warunki atmosferyczne	IP 67
Szacowana cena (brutto)	2 195,72 zł

5.4. Cambium Networks ePMP 4500 oraz ePMP Force 400

Rozwiązanie Cambium Networks ePMP pozwala na stworzenie łącza typu punkt-punkt lub punkt-wiele punktów o przepływności do 1 Gb/s dla trasy radiowej o długości poniżej 1 km. Do utworzenia konfiguracji punkt-punkt możliwe jest wykorzystanie dwóch urządzeń abonenckich Force 4525L wyposażonych w porty 1 Gb Ethernet. Dla konfiguracji punkt-wiele punktów konieczne jest zastosowanie stacji bazowej, np. urządzenia Force 425 lub ePMP 4500L, a także urządzenia Force 4525L po stronie użytkownika końcowego.

Dzięki portowi SFP, możliwe jest bezpośrednie wykorzystanie światłowodu do połączenia z urządzeniami, natomiast należy pamiętać, że pracują one zgodnie z protokołem Ethernet, a przyłącza światłowodowe najczęściej realizowane są w standardzie gigabitowej pasywnej sieci optycznej (Gigabit Passive Optical Network, GPON).

Tabela 8. Najważniejsze parametry urządzeń ePMP Force

Parametr	ePMP Force 4500L	ePMP Force 425	ePMP Force 4525L
Tryby pracy	PtP/PtMP	PtP/PtMP	PtP/PtMP
Zakres częstotliwości	4910 – 6135 MHz	5150 – 5920 MHz	5150 – 5920 MHz
Maksymalna przepływność	1 Gb/s	1 Gb/s	1 Gb/s
Maksymalna moc nadajnika	28 dBm	28 dBm	28 dBm
Maksymalna moc EIRP	46 dBm	53 dBm	53 dBm
Szerokość kanału	20 / 40 / 80 MHz	20 / 40 / 80 MHz	20 / 40 / 80 MHz
Modulacja zapewniająca najwyższą przepływność	1024-QAM	1024-QAM	1024-QAM
Porty Ethernet	1x 1GbE, 1x SFP	1x 1GbE, 1x SFP	1x 1GbE
Zasilanie PoE	Tak	Tak	Tak
Montaż	Na słupie	Na słupie	Na słupie
Odporność na warunki atmosferyczne	IP 67	IP 67	IP 67
Szacowana cena (brutto)	3 611,03 zł (bez anteny)	3 106,32 zł	1 131,35 zł

5.5. Cambium Networks cnWave 60 GHz

Rozwiązanie cnWave 60 GHz firmy Cambium Networks pozwala na stworzenie wyspowej sieci radiowej. W proponowanym rozwiązaniu sygnał od zakończenia światłowodu:

- przykazywany jest ze stacji bazowej bezpośrednio do grupy urządzeń końcowych na częstotliwości 60 GHz lub
- przesyłany jest na częstotliwości 60 GHz do stacji bazowej V5000, a następnie ze stacji bazowej przekazywany na tej samej częstotliwości do grupy urządzeń końcowych.

Rozwiązanie pozwala także na tworzenie sieci w topologii „sieć” (mesh), gdzie urządzenia klienckie mogą jednocześnie służyć jako ripitery pozwalające docierać sygnałowi na dalsze odległości. Dzięki portowi SFP, możliwe jest bezpośrednie wykorzystanie światłowodu do połączenia z urządzeniami, natomiast należy pamiętać, że pracują one zgodnie z protokołem Ethernet, a przyłącza światłowodowe najczęściej realizowane są w standardzie GPON.

W tabeli poniżej przedstawiono najważniejsze parametry zestawu urządzeń.

Tabela 9. Najważniejsze parametry urządzeń Cambium Networks cnWave 60 GHz

Parametr	V5000	V3000	V2000
Tryby pracy	Stacja bazowa PtMP / PtP	Klient PtMP lub PtP	Klient PtMP lub PtP
Zakres częstotliwości	57 – 66 GHz	57 – 66 GHz	57 – 66 GHz
Maksymalna przepływność	1,8 Gb/s	1,8 Gb/s	1,8 Gb/s
Maksymalna moc nadajnika	15,5 dBm	14 dBm	14,5 dBm
Maksymalna moc EIRP	38 dBm	54,5 dBm	49 dBm
Szerokość kanału	2 160 MHz	2 160 MHz	2 160 MHz
Modulacja zapewniająca najwyższą przepływność	16-QAM	16-QAM	16-QAM
Porty Ethernet	1 x 100/1000/10G BaseT with PoE In, 1 x 100/1000 BaseT with 802.3at PoE Out, 1 x SFP+ 1G and 10G	1 x 100/1000/10G BaseT with PoE In, 1 x 100/1000 BaseT with 802.3at PoE Out, 1 x SFP+ 1G and 10G	1 x 2.5 GbE PoE Input 1 x 2.5 GbE PoE 802.3at Output
Zasilanie PoE	Tak	Tak	Tak
Montaż	Na słupie	Na słupie	Na słupie
Odporność na warunki atmosferyczne	IP66/67	IP66/67	IP66/67
Szacowana cena (brutto)	6 182,43 zł	4 211,16 zł	3 655,12 zł

Tabela 10. Plan kanałowy wykorzystywany przez Cambium Networks cnWave 60 GHz

Numer	Częstotliwość środkowa (GHz)	Szerokość kanału (GHz)
1	58,32	2,16
2	60,48	
3	62,64	
4	64,80	

5.6. MikroTik 5 GHz

MikroTik LHG 5 i MikroTik SXTsq 5 ac to kompaktowe, zewnętrzne urządzenia bezprzewodowe 5 GHz z wbudowanymi antenami, które są przeznaczone do połączenia punkt-punkt (PtP) oraz jako jednostka kliencka (CPE).

Tabela 11. Najważniejsze parametry urządzeń Mikrotik 5 GHz

Parametr	MikroTik LHG 5	MikroTik SXTsq 5 ac
Tryby pracy	PtP/PtMP	PtP/PtMP
Zakres częstotliwości	5150 – 5875 MHz	5150 – 5875 MHz
Maksymalna przepływność	300 Mb/s	867 Mb/s
Maksymalna moc nadajnika	25 dBm	25 dBm
Maksymalna moc EIRP	49,5 dBm	41 dBm
Szerokość kanału	20/40 MHz	20/40/80 MHz
Modulacja zapewniająca najwyższą przepływność	64-QAM	256-QAM
Porty Ethernet	1 x 10/100 Mb/s	1 x 10/100/1000 Mb/s
Zasilanie PoE	Tak	Tak
Montaż	Na słupie	Na maszcie lub słupie
Odporność na warunki atmosferyczne	IP54	IP54
Szacowana cena (brutto)	219,87 zł	247,37 zł

5.7. MikroTik 60 GHz

MikroTik LHG 60G to zewnętrzne urządzenie klienckie CPE działające w paśmie 60 GHz, idealne do połączeń punkt-punkt na dystansach do 1500 metrów oraz punkt-wielopunkt do 800 metrów. Z kolei MikroTik wAP 60G AP to kompaktowy, wodoodporny punkt dostępowy 60 GHz, przeznaczony do użytku wewnętrznego i zewnętrznego, obsługujący do ośmiu jednocześnie klientów na odległościach przekraczających 200 metrów. Oba urządzenia oferują gigabitowe porty Ethernet i są zasilane przez PoE, co ułatwia instalację i integrację w istniejących sieciach.

Tabela 12. Najważniejsze parametry urządzeń Mikrotik 60 GHz

Parametr	MikroTik LHG 60G	MikroTik wAP 60G AP
Tryby pracy	Punkt-punkt (PtP), Punkt-wielopunkt (PtMP)	Punkt-punkt (PtP), Punkt-wielopunkt (PtMP)
Zakres częstotliwości	57 – 66 GHz	57 – 66 GHz
Maksymalna przepływność	1 Gb/s	1 Gb/s
Maksymalna moc nadajnika	Brak danych	Brak danych
Maksymalna moc EIRP	Brak danych	Brak danych
Szerokość kanału	2 160 MHz	2 160 MHz
Modulacja zapewniająca najwyższą przepływność	16-QAM	16-QAM
Porty Ethernet	1 x 10/100/1000 Mb/s	1 x 10/100/1000 Mb/s
Zasilanie PoE	Tak	Tak
Montaż	Na słupie	Na słupie
Odporność na warunki atmosferyczne	IP54	IP55
Szacowana cena (brutto)	577,17 zł	445,25 zł

5.8. Mikrotik 60 GHz z 5GHz jako połączenie awaryjne

MikroTik Cube 60Pro ac i CubeSA 60Pro ac to urządzenia bezprzewodowe działające w paśmie 60 GHz, z obsługą standardu 802.11ay, oferujące prędkości porównywalne do światłowodów. Oba modele wyposażone są w automatyczne przełączanie na pasmo 5 GHz w przypadku zakłóceń lub niekorzystnych warunków pogodowych, co zapewnia nieprzerwaną łączność. Cube 60Pro ac jest kompaktowym urządzeniem CPE, idealnym do połączeń punkt-punkt na dystansach do 1 km, w przypadku pasma 5 GHz ta maksymalna odległość wynosi 2,4 km. Z kolei CubeSA 60Pro ac to urządzenie przeznaczone do połączeń punkt-wielopunkt, umożliwiające stabilne połączenia na odległość około 600 metrów, a w połączeniu z urządzeniami takimi jak MikroTik nRAY – nawet do 800 metrów. Oba urządzenia oferują gigabitowe porty Ethernet i są zasilane przez PoE.

Tabela 13. Najważniejsze parametry urządzeń Mikrotik w paśmie 60 GHz z możliwością przełączania na pasmo 5 GHz

Parametr	MikroTik Cube 60Pro ac	MikroTik CubeSA 60Pro ac
Tryby pracy	Punkt-punkt (PtP), Punkt-wielopunkt (PtMP)	Punkt-punkt (PtP), Punkt-wielopunkt (PtMP)
Zakres częstotliwości	57 – 66 GHz	57 – 66 GHz
Maksymalna przepływność (60 GHz)	1 Gb/s	1 Gb/s
Maksymalna przepływność (5 GHz)	433 Mb/s	433 Mb/s
Maksymalna moc nadajnika (60 GHz)	Brak danych	Brak danych
Maksymalna moc nadajnika (5GHz)	22 dBm	22 dBm
Maksymalna moc EIRP (60 GHz)	40 dBm	40 dBm
Maksymalna moc EIRP (5 GHz)	33,5 dBm	33,5 dBm
Szerokość kanału (60 GHz)	8 640 MHz	8 640 MHz
Modulacja zapewniająca najwyższą przepływność	256-QAM	256-QAM
Porty Ethernet	1 x 10/100/1000 Mb/s	1 x 10/100/1000 Mb/s
Zasilanie PoE	Tak	Tak
Montaż	Na słupie	Na słupie
Odporność na warunki atmosferyczne	IP66	IP66
Szacowana cena (brutto)	600 zł	800 zł

6. Analiza zasięgów

Wyznaczanie tłumienia trasy dla naziemnych systemów radiowych o bezpośredniej widoczności radiowej, oparto o wytyczne z Zalecenia ITU-R P.530²³ Międzynarodowej Unii Telekomunikacyjnej (ITU).

Zalecenie to zawiera metody prognozowania efektów propagacji, które należy uwzględnić przy projektowaniu cyfrowych stałych łączy o bezpośredniej widoczności, zarówno w warunkach czystego powietrza, jak i opadów deszczu. Zawiera również wytyczne dotyczące projektowania łączy krok po kroku, z wykorzystaniem jasno zdefiniowanych procedur, w tym stosowanie technik mających na celu zminimalizowanie zakłóceń propagacyjnych.

Przy projektowaniu systemów radiowych bezpośredniej widoczności należy wziąć pod uwagę kilka efektów propagacji:

- tłumienie wolnej przestrzeni,
- tłumienie spowodowane gazami atmosferycznymi,
- tłumienie spowodowane opadami atmosferycznymi lub cząstkami stałymi w atmosferze,
- tłumienie sygnału spowodowane występowaniem wzdłuż trasy propagacji pionowych przeszkód terenowych (zabudowa, drzewa, kominy, maszty, itp.), tzw. tłumienie dyfrakcyjne,
- zaniki sygnału spowodowane wielodrogowością atmosferyczną lub rozproszeniem wiązki (dotyczy łączy o długości co najmniej kilku kilometrów),
- zaniki sygnału spowodowane wielodrogowością, wynikającą z odbicia od powierzchni,
- zmniejszenie dyskryminacji polaryzacji ortogonalnej (XPD) w warunkach wielodrogowości lub opadów atmosferycznych;
- zniekształcenia sygnału spowodowane zanikiem selektywnym częstotliwości i opóźnieniem podczas propagacji wielodrogowej.

6.1. Tłumienie wolnej przestrzeni

Zalecenie ITU serii dotyczącej propagacji, ITU-R P.525²⁴, określa sposób wyznaczania tłumienia wolnej przestrzeni. Dla celów radiokomunikacji, wolna przestrzeń definiowana jest jako doskonała próżnia, która może być uważana za nieskończoną we wszystkich kierunkach. Tłumienie wolnej przestrzeni, L_{bf} , wyrażone w decybelach, określone jest poniższą zależnością.

$$L_{bf} = 32,4 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) \quad (1)$$

Gdzie:

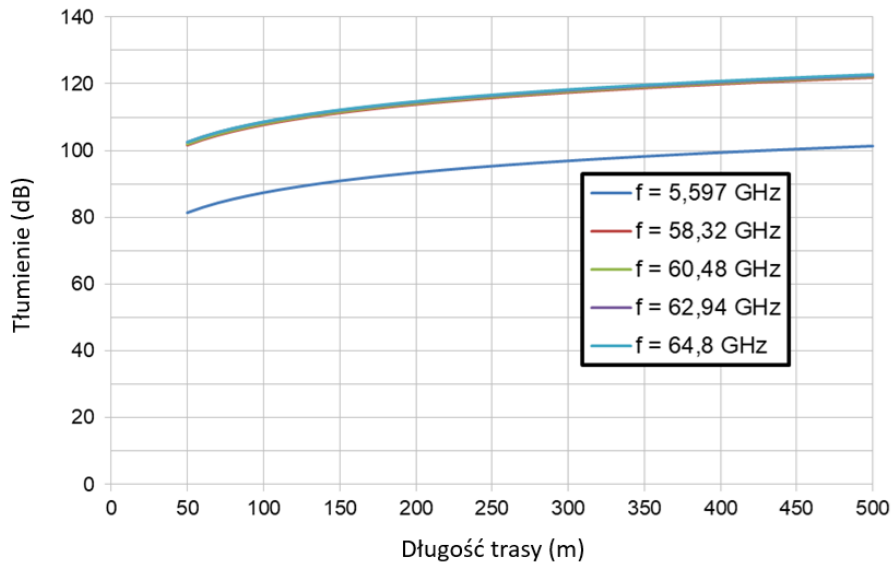
²³ Zalecenie ITU-R P.530-18, Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems, 2021

²⁴ Zalecenie ITU-R P.525-5, Calculation of free-space attenuation, 2024

f – częstotliwość (GHz),

d – długość trasy (m).

Na rysunku poniżej przedstawiono wyznaczone wartości tłumienia wolnej przestrzeni dla odległości od 50 do 500 m i przykładowych częstotliwości środkowych kanałów w paśmie 5 GHz oraz paśmie 60 GHz.



Rysunek 1. Wartość tłumienia wolnej przestrzeni wyznaczona dla różnych częstotliwości

6.2. Tłumienie spowodowane obecnością gazów w atmosferze

Za tłumienie fal radiowych w atmosferze odpowiada zjawisko absorpcji molekularnej, w stanowiących składniki powietrza gazach atmosferycznych, na skutek którego wzbudzone atomy i cząsteczki pochłaniają energię propagowanej fali radiowej, a w konsekwencji przyczyniają się do spadku jej amplitudy i zaniku sygnału (proces absorpcji produkuje również szumy termiczne, których wielkość jest zależna od intensywności absorpcji molekularnej). Wskutek pochłaniania energii propagowanej fali radiowej, atomy i cząsteczki (pojedyncze molekuly gazów mają właściwości dipola elektrycznego w przypadku pary wodnej, a dla tlenu dipola magnetycznego) zmieniają swój poziom energetyczny, przechodząc ze stanu o mniejszej energii do stanu o większej energii. Jako że dozwolone poziomy energetyczne mają wartości dyskretne, przejścia te mają charakter typowo rezonansowy (zjawisko selektywnego tłumienia fal radiowych zachodzi wskutek elastyczności wiązań międzyatomowych i drgań własnych cząsteczek gazów).

Tłumienie spowodowane absorpcją tlenu i pary wodnej jest zawsze obecne i powinno być uwzględnione w obliczeniach całkowitych strat propagacyjnych przy częstotliwościach powyżej około 10 GHz. Tłumienie dla częstotliwości z zakresu od 1 do 1 000 GHz, określone jest poniższym równaniem.

$$A_a = \gamma_a d \quad (2)$$

Gdzie:

γ_a – tłumienie jednostkowe (dB/km),

d – długość trasy (km)

Tłumienie jednostkowe γ_a wyznaczone jest w oparciu o Zalecenie ITU-R P.676²⁵ dla suchego powietrza i pary wodnej dla dowolnych profili temperatury, ciśnienia i gęstości pary wodnej w funkcji wysokości nad powierzchnią ziemi, znanych z danych lokalnych (np. pomiarów radiosondą) lub dowolnych profili odniesienia podanych w załącznikach 1, 2 lub 3 do Zalecenia ITU-R P.835²⁶.

Tłumienie jednostkowe dla częstotliwości do 1 000 GHz, spowodowane suchym powietrzem i parą wodną, można dokładnie oszacować dla dowolnej wartości ciśnienia, temperatury i wilgotności.

Tłumienie jednostkowe atmosfery można wyrazić jako sumę tłumienia jednostkowego w parze wodnej, γ_w , oraz tlenie, γ_o , co przedstawiono poniższym wzorem.

$$\gamma_a = \gamma_o + \gamma_w \quad (3)$$

Gdzie:

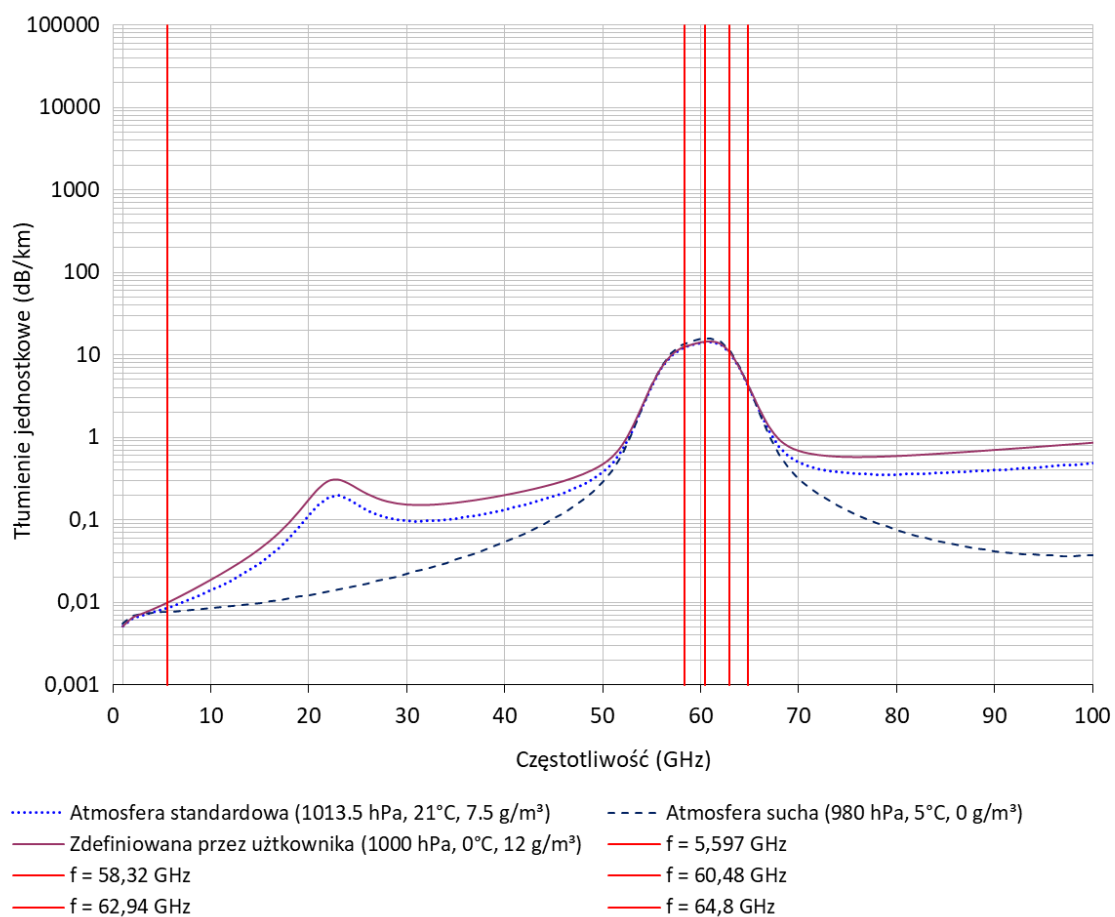
γ_o – tłumienie jednostkowe suchego powietrza (dB/km)

γ_w – tłumienie jednostkowe pary wodnej (dB/km)

Rysunek poniżej przedstawia tłumienie jednostkowe spowodowane gazami atmosferycznymi, dla częstotliwości z zakresu od 1 do 100 GHz, dla standardowej atmosfery oraz dla suchego powietrza.

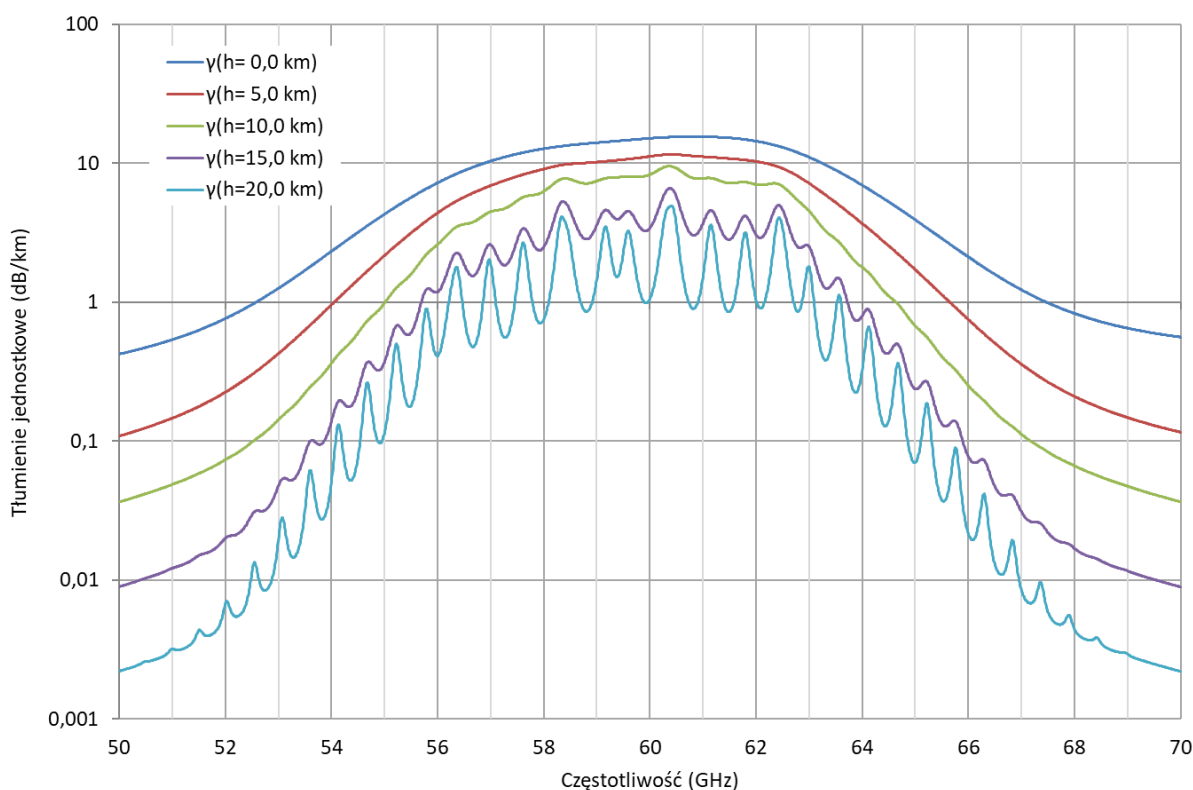
²⁵ Zalecenie ITU-R P.676-13, Attenuation by atmospheric gases and related effects, 2022

²⁶ Zalecenie ITU-R P.835-7, Reference atmosphere, 2024



Rysunek 2. Wykres tłumienia jednostkowego spowodowanego gazami atmosferycznymi, dla typowych (standardowych) warunków atmosferycznych dla suchego powietrza (brak pary wodnej) i warunków zdefiniowanych przez autorów²⁷

²⁷ Opracowanie własne, zgodnie z zaleceniem ITU-R P.676-13



Rysunek 3. Tłumienie jednostkowe w zakresie częstotliwości 50-70 GHz na wybranych wysokościach atmosfery²⁸

6.3. Tłumienie spowodowane opadami atmosferycznymi lub występowaniem cząstek stałych w atmosferze

Zgodnie z Zaleceniem ITU-R P.840²⁹, do wyznaczenia tłumienia spowodowanego opadami atmosferycznymi (deszcz i/lub śnieg) lub występowaniem w atmosferze cząstek stałych (np. chmury i/lub mgły), zakłada się, że zarówno chmury i mgły składają się wyłącznie z małych kropelek, zwykle mniejszych niż 0,01 cm. Dla częstotliwości do 200 GHz, tłumienie jednostkowe, można w przybliżeniu, wyznaczyć w oparciu o model rozproszenia fal radiowych na małych cząstkach (drobinach) podany przez Rayleigha i opisany w powyższym zaleceniu.

W chmurach lub mgłę tłumienie jednostkowe, γ_c , wyrażone w dB/km, można wyznaczyć w oparciu o poniższy wzór.

$$\gamma_c = K_l(f, T) \rho_l \quad (4)$$

Gdzie:

K_{lo} – współczynnik tłumienia właściwy dla ciekłej wody w chmurze ((dB/km)/(g/m³)),

ρ_l – gęstość ciekłej wody w chmurze lub mgłę (g/m³),

²⁸ Opracowanie własne, zgodnie z Zaleceniem ITU-R P. 676-13

²⁹ Zalecenie ITU-R P.840-9, Attenuation due to clouds and fog, 2023

f – częstotliwość (GHz),

T – temperatura ciekłej wody w chmurze.

Przy częstotliwościach rzędu 100 GHz i wyższych, tłumienie spowodowane mgłą może być znaczące. Gęstość ciekłej wody we mgie wynosi zazwyczaj około 0,05 g/m dla średniej mgły (widoczność rzędu 300 m) i 0,5 g/m³ dla gęstej mgły (widoczność rzędu 50 m)³.

Tłumienie jednostkowe w przypadku opadów deszczu, γ_R , wyznaczane jest w oparciu o Zalecenie ITU-R P.838³⁰, uzyskana z natężenia deszczu R (mm/h) przy użyciu zależności wykładniczej.

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (5)$$

Wartości współczynników k i α określone są jako funkcje częstotliwości, które zostały opracowane na podstawie dopasowania krzywej do współczynników potęgowych uzyskanych z obliczeń rozpraszania.

Zalecenie ITU-R P.530 umożliwia również wyznaczanie tłumienia na hydrometeorytach innych niż powyższe, do których należą również śnieg i grad. Tu również mamy do czynienia ze zjawiskami absorpcji i rozpraszania fali radiowej.

Tłumienie na hydrometeorytach można zignorować przy częstotliwościach poniżej około 5 GHz, należy je jednak uwzględnić w obliczeniach projektowych przy wyższych częstotliwościach, gdzie jego znaczenie gwałtownie wzrasta.

Dane niezbędne do wyznaczenia tłumienia jednostkowego, w przypadku braku danych lokalnych, można uzyskać z danych dostępnych w ITU, opisanych w Zaleceniach ITU-R P.837³¹ oraz wspomnianym wcześniej Zaleceniu ITU-R P.835. Zalecenie ITU-R P.837 zawiera statystyki natężenia opadów deszczu z jednominutowym czasem integracji. Ta metoda prognozowania opiera się na następujących danych:

- a) całkowitych miesięcznych danych o opadach wygenerowanych z bazy danych GPCC Climatology (V 2015) nad lądem,
- b) o opadach nad wodą, pochodzących z bazy danych ERA Interim Europejskiego Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF),
- c) miesięcznych średnich danych o temperaturze powierzchni Ziemi w zaleceniu ITU-R P.1510³². Miesięczne mapy średniej temperatury powierzchni pochodzą z okresu od roku 1979 do 2014 (36 lat) z danych ERA Interim Europejskiego Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF), a roczna mapa średniej temperatury powierzchni jest średnią miesięcznych map średniej temperatury powierzchni ważonych względną liczbą dni w każdym miesiącu kalendarzowym.

³⁰ Zalecenie ITU-R P.838-3, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, 2005

³¹ Zalecenie ITU-R P.837-7, Characteristics of precipitation for propagation modeling, 2017

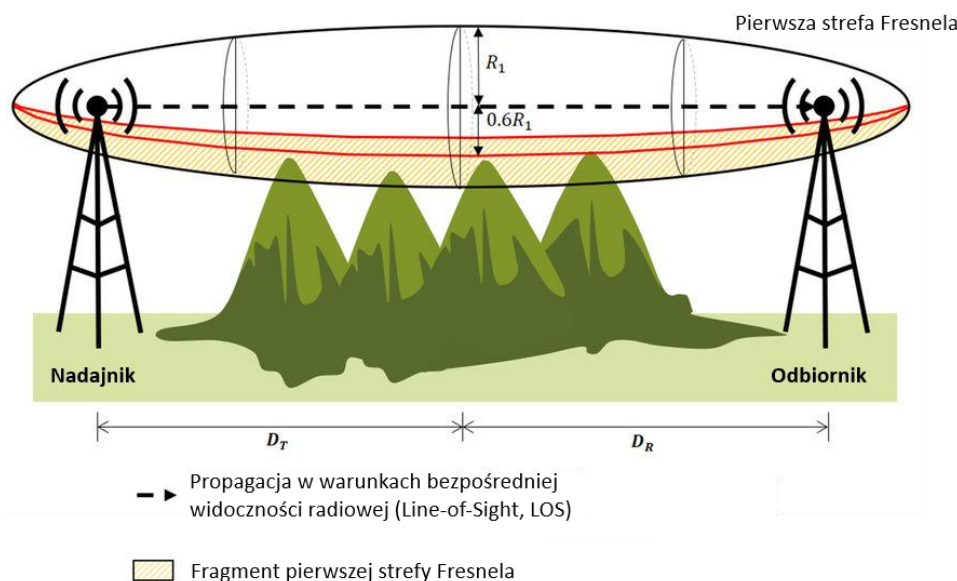
³² Zalecenie ITU-R P.1510-1, Mean surface temperature, 2017

Zalecenie ITU-R P.835 pozwala, przy braku danych lokalnych, określanie temperatury, ciśnienia całkowitego (barometrycznego) i gęstości pary wodnej w zależności od wysokości geometrycznej powierzchni Ziemi powyżej średniego poziomu morza.

6.4. Tłumienie dyfrakcyjne

Tłumienie dyfrakcyjne zależy od rodzaju terenu i roślinności. Dla danego prześwitu promienia trasy nad obiektami terenowymi tłumienie dyfrakcyjne będzie się wahać od wartości minimalnej dla pojedynczej przeszkody (zwanej dyfrakcją „na krawędzi noża”) do wartości maksymalnej w przypadku gładkiej kulistej Ziemi. Metody obliczania tłumień dyfrakcyjnych dla tych dwóch przypadków, a także dla tras w terenie o nieregularnie zmieniających się wysokościach, omówiono w Zaleceniu ITU-R P.526³³.

Z teorii dyfrakcji^{34,35,36} wynika, że trasa bezpośredniej widoczności między nadajnikiem a odbiornikiem wymaga prześwitu nad ziemią wynoszącego co najmniej 60% promienia pierwszej strefy Fresnela, aby osiągnąć warunki propagacji jak dla wolnej przestrzeni. Odpowiedni dobór lokalizacji oraz wysokości anten skutkuje spełnieniem powyższego warunku, w związku z czym w niniejszym opracowaniu, przy bilansie łącza, tłumienia spowodowane zjawiskiem dyfrakcji zostaną pominięte.



Rysunek 4. Graficzna prezentacja pierwszej strefy Fresnela na trasie z przeszkodami pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem (źródło³⁷)

³³ Zalecenie ITU-R P.526-15, Propagation by diffraction, 2019

³⁴ J. A. Stratton, L. J. Chu, Diffraction Theory of Electromagnetic Waves, Phys. Rev. 56, 99, July 1939

³⁵ Pyotr Ya. Ufimtsev, Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2014

³⁶ Graeme L. James, Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves (3rd Edition), IET, 1979

³⁷ A New GIS-Based Algorithm to Support Initial Transmitter Layout Design in Open-Pit Mines - Scientific Figure on ResearchGate, https://www.researchgate.net/figure/Conceptual-view-of-the-first-Fresnel-zone-and-the-3D-Partial-Fresnel-zone_fig1_328795055 (dostęp: 09.12.2024)

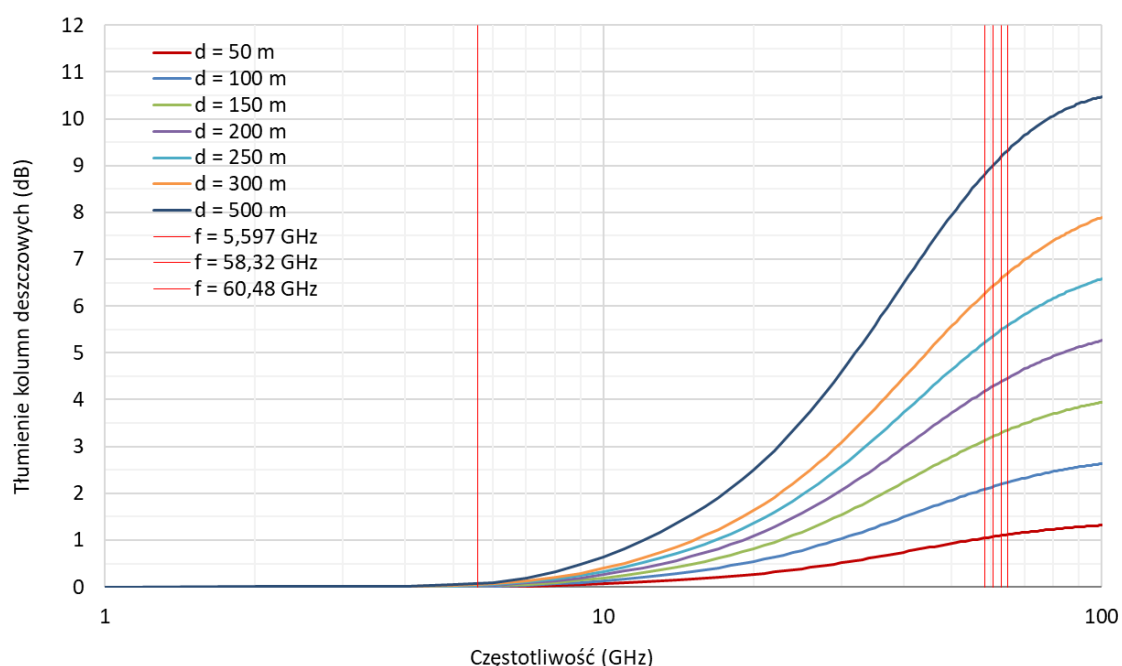
6.5. Zmiany kąta dotarcia do terminala odbiornika i kąta „wystrzelenia” na terminalu nadajnika

Gradienty współczynnika załamania światła w czystym powietrzu wzdłuż ścieżki odbiegające od wartości normatywnych mogą powodować znaczne różnice w kątach nadawania i odbioru fal nadawanych i odbieranych. Zmienność ta jest zasadniczo niezależna od częstotliwości i występuje głównie w płaszczyźnie pionowej anten. Zakres kątów jest większy w wilgotnych rejonach przybrzeżnych niż w suchych obszarach śródlądowych. Nie zaobserwowano znaczących zmian podczas opadów atmosferycznych.

Efekt ten może być istotny na długich trasach, na których stosowane są anteny o dużym zysku/wąskiej wiązce. Jeśli szerokość wiązki anteny jest zbyt wąska, bezpośrednia fala wychodząca/wpływająca może znajdować się na tyle daleko od osi, że może dojść do znacznego zaniku. Ponadto, jeśli anteny są ustawiane w okresach bardzo nietypowych kątów nadejścia, ustawienie może nie być optymalne. Dlatego przy ustawianiu anten na krytycznych ścieżkach (np. długich ścieżkach w obszarze przybrzeżnym) może być pożądane sprawdzenie wyrównania kilka razy w ciągu kilku dni. Ze względu na rozpatrywane trasy, o długości maksymalnie kilkuset metrów, efekty te nie mają istotnego wpływu i w niniejszym opracowaniu zostaną pominięte.

6.6. Tłumienie opadów atmosferycznych

Wraz ze wzrostem częstotliwości, wzrasta również wpływ opadów atmosferycznych na propagację sygnału. Poniżej przedstawiono wykresy tłumienia atmosferycznego w funkcji częstotliwości dla wybranych długościach tras, przy określonych intensywnościach opadów oraz procent czasu. Według zaleceń ITU w przypadku braku danych lokalnych, wykorzystywane są długoletnie uśrednione dane statystyczne odniesione do intensywności opadów godzinowych, wyrażonych w mm/h, przekraczanych przez 0,01% czasu (tzw. parametr $R_{0.01}$), dostępnych dla całej powierzchni Ziemi, na podstawie których można wyznaczyć wartości dla innych procent czasu.



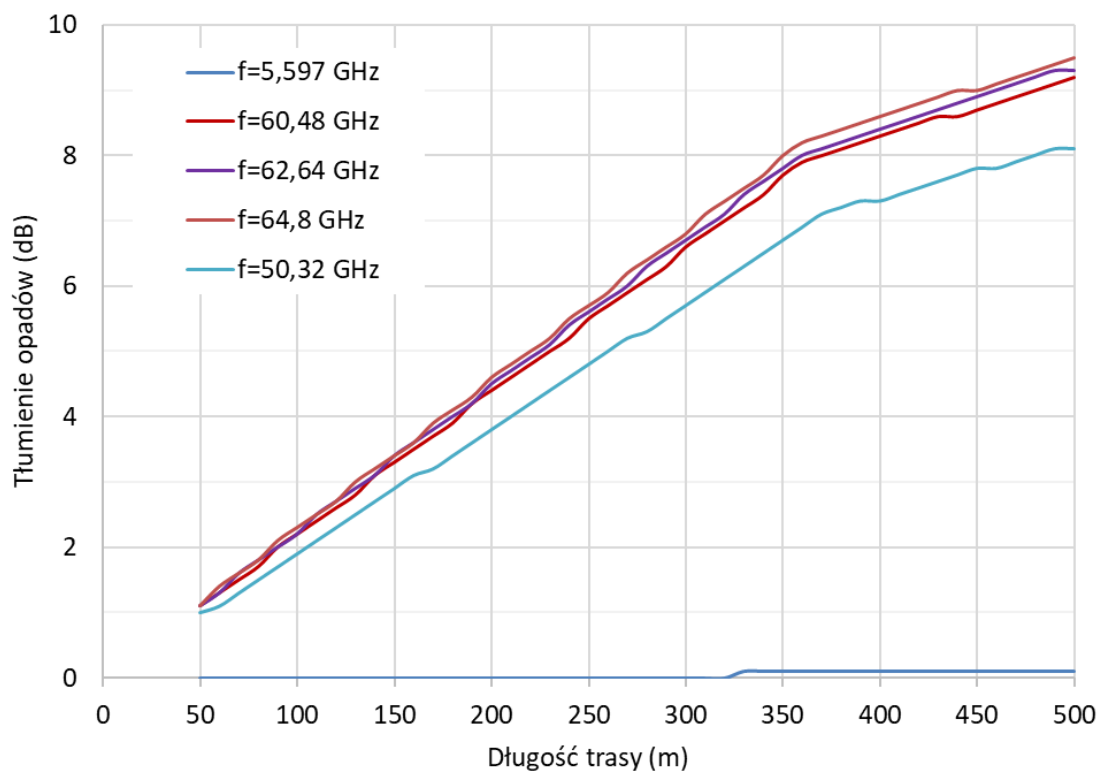
Rysunek 5. Tłumienie wywołane kolumnami deszczowymi o intensywności 20 mm/h dla 0,01% czasu, w funkcji częstotliwości, dla tras o różnych długościach³⁸

Na wykresie naniesiono dodatkowo linie pionowe odpowiadające częstotliwościom, które są przedmiotem niniejszego opracowania. Widać wyraźnie, że dla częstotliwości z zakresu 60 GHz, tłumienie opadów odgrywa rolę w tłumieniu całkowitym trasy.

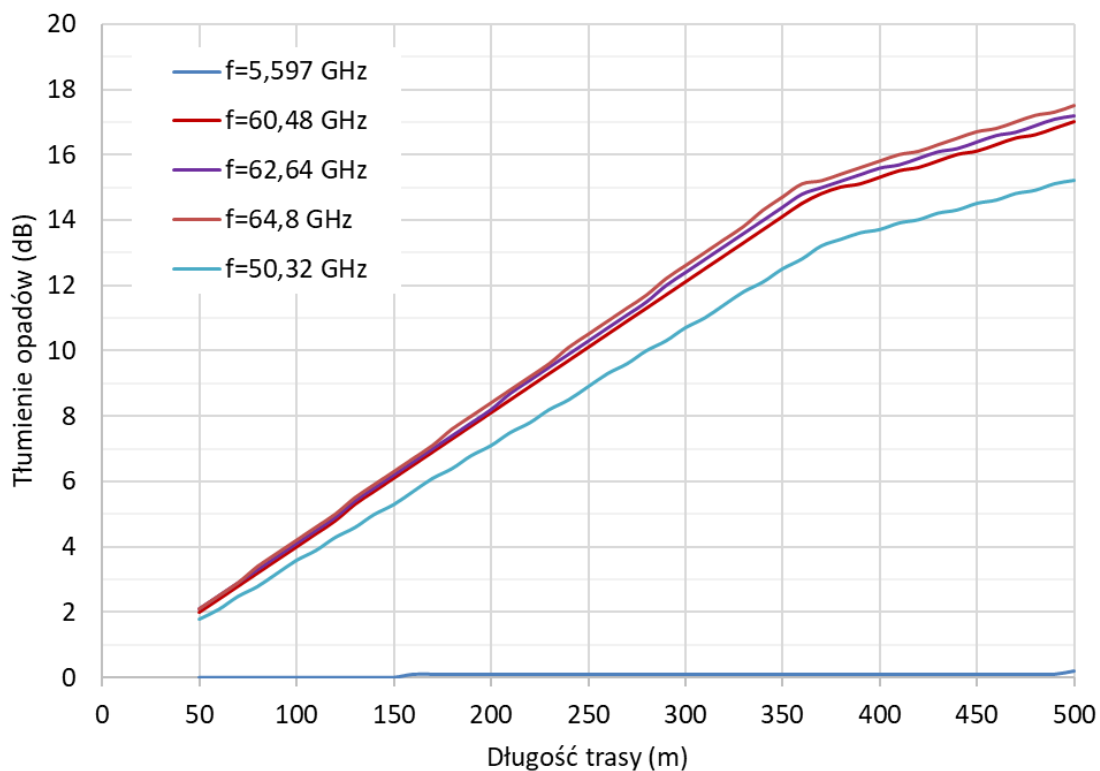
Jak można zaobserwować, dla częstotliwości rzędu 5 GHz tłumienie wywoływane kolumnami deszczowymi jest pomijalne, natomiast wraz z dalszym wzrostem częstotliwości zaczyna dynamicznie rosnać.

Na dwóch kolejnych rysunkach przedstawiono także tłumienie spowodowane opadami deszczu w funkcji długości trasy dla wybranych częstotliwości. Wraz ze wzrostem częstotliwości, obserwowany jest wzrost tłumienia.

³⁸ Opracowanie własne



Rysunek 6. Tłumienie opadów deszczu w funkcji długości trasy dla wybranych częstotliwości, dla 0,01% czasu³⁹



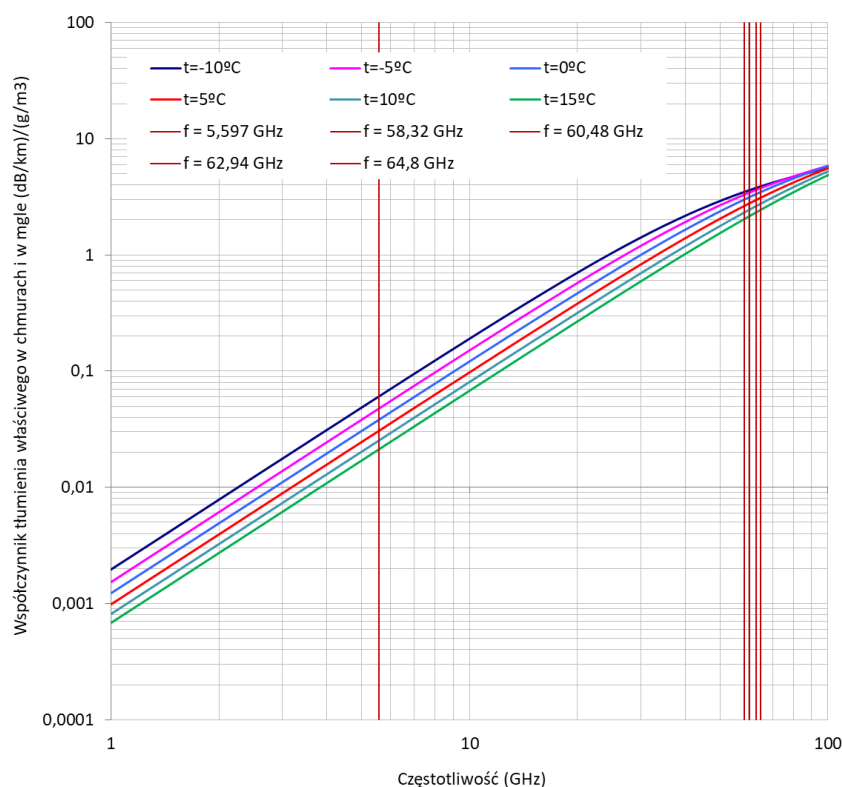
Rysunek 7. Tłumienie opadów deszczu w funkcji długości trasy dla wybranych częstotliwości, dla 0,001% czasu⁴⁰

³⁹ Opracowanie własne

⁴⁰ Opracowanie własne

6.7. Tłumienie przez chmury i mgły

Na rysunku poniżej przedstawiono tłumienie wnoszone przez chmury i mgły dla częstotliwości będących przedmiotem niniejszego opracowania dla zakresu temperatur od -10°C do $+15^{\circ}\text{C}$. Na wykresie zaznaczono również liniami pionowymi wybrane częstotliwości. Z uwagi na rozpatrywane wysokości tras radiowych nad Ziemią, mamy do czynienia wyłącznie z mgłami.



Rysunek 8. Tłumienie właściwe mgieł dla różnych temperatur powietrza⁴¹

W chmurach i mgłach można przyjąć, że widoczność rzędu 300 m (mgła o średniej gęstości) odpowiada gęstości ciekłej wody $0,05 \text{ g/m}^3$, widoczność rzędu 50 m (gęsta mgła) gęstość ciekłej wody $0,5 \text{ g/m}^3$ oraz brak widoczności odpowiada gęstości 5 g/m^3 .

6.8. Tłumienie na pojedynczych przeszkodach roślinnych

Metodykę wyznaczania tłumienia w roślinności opisuje Zalecenie ITU-R P.833⁴². Badania wskazują, że przy częstotliwościach rzędu 1 GHz tłumienie właściwe spowodowane przez drzewa z liśćmi jest około 20% większe niż w przypadku drzew bez liści, a zmiany tłumienia mogą być spowodowane ruchem liści, na przykład wywołanym przez wiatr.

⁴¹ Opracowanie własne

⁴² Zalecenie ITU-R P.833-3, Attenuation in vegetation, 2001; istnieje również nowsza, bardziej złożona wersja wzoru (6) w Zaleceniu ITU-R P.833-10, Attenuation in vegetation, 2021

W zaleceniu rozróżnione są przypadki, gdy trasa lądowa posiada punkt końcowy umieszczony w lesie oraz tłumienie wywołane pojedynczą przeszkodą roślinną (drzewem) dla częstotliwości poniżej oraz powyżej 5 GHz. Ten przypadek jest interesujący dla nas z uwagi na możliwość występowania pojedynczych drzew wzdłuż trasy. Na podstawie danych pomiarowych w zakresie częstotliwości 9,6 – 57,6 GHz, powstał model empiryczny, który uwzględnia geometrię terenu pod względem sposobu oświetlenia roślinności przez falę radiową, określonego przez minimalny obszar oświetlenia, A_{min} . Tłumienie spowodowane wyłącznie przez roślinność jest opisywane poniższym wzorem.

$$A_{scat} = R_{\infty}d + k \left(1 - \exp \left\{ \frac{-(R_0 - R_{\infty})}{k} d \right\} \right) \quad (6)$$

Gdzie:

$R_0 = af$ współczynnik a określa tabela poniżej, f – częstotliwość (GHz),

$R_{\infty} = \frac{b}{f^c}$ współczynniki b, c określa tabela poniżej, f – częstotliwość (GHz),

f częstotliwość (GHz),

$$k = k_0 - 10 \log_{10} \left\{ A_0 \left(1 - \exp \left[\frac{-A_{min}}{A_0} \right] \right) (1 - \exp[-R_f f]) \right\} \quad (7)$$

Wartości współczynników a, b, c, k_0, R_f i A_0 , wykorzystywanych w równaniach 6 i 7, przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela 14. Tabela współczynników dla modelu z Zalecenia ITU-R P.833

Parametr	Roślinność	
	z liśćmi	bez liści
a	0,2	0,16
b	1,27	2,59
c	0,63	0,85
k_0	6,57	12,6
R_f	0,0002	2,1
A_0	10	10

Wyniki obliczeń (ekstrapolowane) dla tego modelu wskazują, że dla częstotliwości pasma 5 GHz, tłumienie przez pojedyncze drzewa jest rzędu 4 – 6 dB dla drzew z liśćmi, oraz 3 – 5 dB w przypadku drzew bez liści. Dla zakresu częstotliwości 60 GHz wartości te są równe odpowiednio 22 – 25 dB i 12 – 15 dB. Wartości te zależą od przyjętej minimalnej powierzchni przekroju drzewa oświetlanej falą radiową (przyjęto wartość uśrednioną dla $A_{min}=0,5, 1$ i 2 m^2) i rozpiętości drzewa równej 5 m. Dla mniejszych wartości, przykładowo rozpiętości drzewa równej 2 m, wartości tłumienia równe są odpowiednio około 2 dB (pasmo 5 GHz) i około 15 dB (pasmo 60 GHz).

Istnieją też inne opracowania odnośnie tłumienia przez pojedyncze drzewa, wszystkie oparte o modele empiryczne, przykładowo model FITU⁴³ czy COST 235⁴⁴.

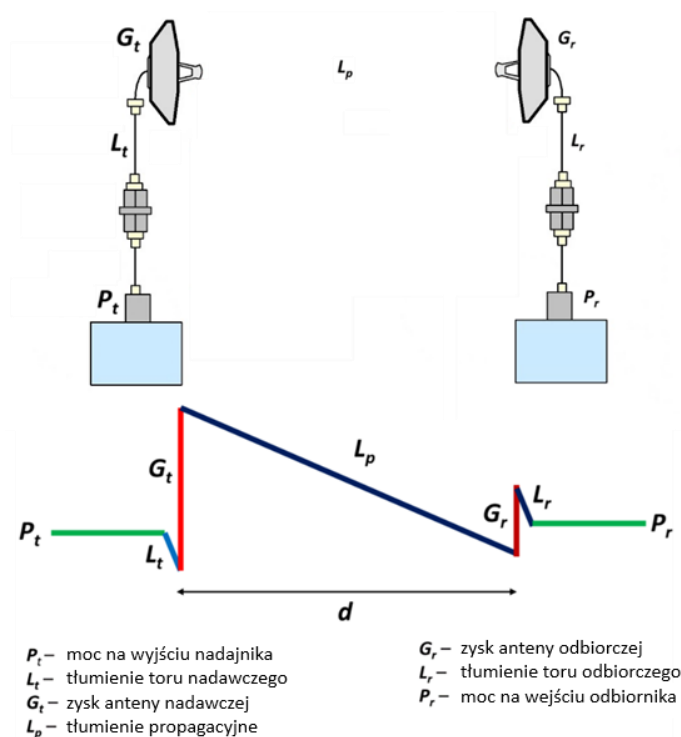
6.9. Tłumienie całkowite trasy

Tłumienie całkowite trasy (L_p) jest sumą składowych tłumienia wolnej przestrzeni (L_{bf}), gazów atmosferycznych (L_a), deszczu (L_R) lub mgły (L_f) oraz ewentualne innych składowych tłumienia (L_i).⁴⁵

$$L_p = L_{bf} + L_a + [L_R | L_f] + L_i \quad (8)$$

6.10. Bilans łącza

Bilans łącza radiowego to równanie pozwalające wyznaczyć moc sygnału docierającego do odbiornika, uwzględniając charakterystykę urządzeń radiowych, anten, a także czynniki występujące wzdłuż trasy propagacji sygnału radiowego. Schematycznie zostało to przedstawione na rysunku poniżej.



Rysunek 9. Schemat przedstawiający składowe bilansu łącza radiowego (Sexton⁴⁶)

⁴³ Al-Nuaimi M.O and R.B.L.Stephens, Measurement and prediction model optimization for signal attenuation in vegetation media at centimetre wave frequencies, IEE Proc. Microwave. Antennas & Propagations Vol. 145. No. 3, pp. 201-206, June 1998

⁴⁴ COST 235, Radio propagation effects on next-generation fixed-service terrestrial telecommunication systems, final report, Luxembourg, 1996

⁴⁵ Zakładamy, że w praktyce jednocześnie nie występują deszcz i mgła

⁴⁶ G. Sexton, Link budget calculations, <https://www.youtube.com/watch?v=aNOuN6LMtow> (dostęp: 09.12.2024)

Po stronie nadawczej sygnał z nadajnika o mocy P_t , zostaje doprowadzony na wejście anteny nadawczej o zysku energetycznym G_t . Przewód doprowadzający (ang. feeder) posiada pewne tłumienie L_t . Pokonując trasę pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, z uwagi na różne zjawiska towarzyszące propagacji sygnału, sygnał ulega osłabieniu o wartość L_p . Sygnał docierający po stronie odbiorczej do anteny o zysku G_r , poprzez przewód łączący antenę odbiorczą z odbiornikiem, o tłumieniu L_r , dociera na wejście odbiornika. Wartość sygnału na wejściu odbiornika, P_r , opisuje równanie poniżej.

$$P_r = P_t - L_t + G_t - L_p + G_r - L_r \quad (9)$$

Na podstawie powyższego równania można określić, jaka moc zostanie dostarczona do odbiornika, przy założonych parametrach (zysków anten i tłumienia w przewodach doprowadzających sygnał) oraz tłumieniu trasy.

Jednym z ważnych parametrów odbiornika jest czułość odbiornika, P_s , która określa minimalny poziom sygnału, który odbiornik jest w stanie przetworzyć bez utraty lub zmiany zawartej w nim informacji, przy ustalonej bitowej stopie błędów (bit error rate, BER). Zatem, jeżeli moc na wejściu odbiornika wyznaczona z bilansu łącza jest większa od czułości odbiornika, to różnica tych wartości stanowi tzw. margines łącza. Jeżeli margines łącza będzie zbyt mały łącze będzie niestabilne, a w rezultacie nie uda się zapewnić wymaganego czasu jego dostępności ani zakładanej jakości transmisji. Z drugiej strony zbyt duży margines, który uzyskać można stosując przede wszystkim bardziej efektywne mocowo i droższe anteny, przełoży się na nieuzasadnione zwiększenie kosztów budowy łącza.

Jak wspomniano wcześniej, na tłumienie trasy składa się wiele zjawisk fizycznych, których wpływ zależny jest od częstotliwości sygnału oraz zjawisk fizycznych zachodzących w środowisku propagacyjnym (obecność chmur lub mgieł, występowanie gazów atmosferycznych, kolumn deszczowych), które zależą od warunków atmosferycznych (temperatury, wilgotności, ciśnienia atmosferycznego). Warunki atmosferyczne, które należy uwzględnić przy wykonywaniu obliczeń, pochodzą z wieloletnich obserwacji i stanowią uśrednienie, bądź to roczne lub miesięczne, względem procent czasu ich występowania na danym obszarze.

W procesie projektowania łącza radiowego, jednym z kryterium jest procent dostępności łącza w danym czasie. Przyjmuje się, że niezawodność łącza określa tzw. reguła pięciu dziewiątek, czyli niezawodność łącza równe jest 99,999% czasu. Oznacza to, że dopuszczalny jest brak łączności radiowej dla 0,001% czasu. Konwersja danych dla innych procent czasu zawarta jest, m.in. we wspomnianym już Zaleceniu ITU-R P.530 oraz w Załączniku 1 Zalecenia ITU-R P.837, a metodę przeliczania wartości średnich rocznych na najgorszy miesiąc pod względem opadów zawarto w Zaleceniu ITU-R P.841. Przykładowo, posiadając dane o intensywności opadów przekraczanych dla 0,01% czasu, możemy wyznaczyć intensywność opadów przekraczanych dla 0,001% czasu. Dla mniejszych procentów czasu wartości wyznaczanych parametrów rosną – zatem wspomniana intensywność opadów przekraczanych w czasie 0,001% czasu jest większa niż dla 0,01%, co jest logiczną konsekwencją metody uśredniania – przykładowo określając intensywność opadów w czasie jednej godziny, uśredniamy jest za ten okres czasu,

a praktyce w czasie godzinowego pomiaru możemy mieć do czynienia z kilkuminutowym intensywnym opadem, a w pozostałym czasie z tzw. mżawką lub brakiem opadów. Im intensywniejszy opad, tym gęstsza kolumna deszczowa i tłumienie fali radiowej przechodzącej przez taką kolumnę jest większe. Podany przykład sposobu uśredniania intensywności opadów dotyczy również pozostałych zjawisk fizycznych.

Korzystając z danych o tłumieniu, przedstawionych w poprzednich punktach, a także z omówionych wzorów 8 i 9, przygotowano tabele przedstawiające sumaryczne tłumienie trasy radiowej dla 5 wybranych częstotliwości i tras radiowych o długościach: 50, 100, 150 oraz 300 m. Wyniki obliczeń przedstawiono w dwóch kolejnych tabelach (tabela 15 i tabela 16).

Tabela 15. Składowe tłumienia oraz tłumienie sumaryczne dla łącza o dostępności 99,99% czasu

Częstotliwość (GHz)	Długość trasy (m)	Tłumienie wolnej przestrzeni (dB)	Tłumienie gazów atmosferycznych (dB)	Tłumienie kolumn deszczowych (dB)	Tłumienie sumaryczne (tylko deszcz) (dB)	Tłumienie sumaryczne (tylko mgła) (dB)
5,597	50	81,4	0,0	0,0	81,4	81,4
	100	87,4	0,0	0,0	87,4	87,4
	150	90,9	0,0	0,0	90,9	90,9
	300	97,0	0,0	0,0	97,0	97,0
58,320	50	101,7	0,6	1,0	103,3	102,4
	100	107,8	1,3	1,9	111,0	109,2
	150	111,3	1,9	2,9	116,1	113,3
	300	117,3	3,9	5,7	126,9	121,3
60,480	50	102,1	0,8	1,1	104,0	103,0
	100	108,1	1,5	2,2	111,8	109,7
	150	111,6	2,3	3,3	117,2	114,0
	300	117,6	4,5	6,6	128,7	122,2
62,940	50	102,4	0,6	1,1	104,1	103,1
	100	108,4	1,1	2,2	111,7	109,6
	150	112,0	1,7	3,4	117,1	113,8
	300	118,0	3,4	6,7	128,1	121,5
64,800	50	102,7	0,2	1,1	104,0	103,0
	100	108,7	0,4	2,3	111,4	109,2
	150	112,2	0,7	3,4	116,3	113,0
	300	118,2	1,3	6,8	126,3	119,6

Tabela 16. Składowe tłumienia oraz tłumienie sumaryczne dla łącza o dostępności 99,999% czasu

Częstotliwość (GHz)	Długość trasy (m)	Tłumienie wolnej przestrzeni (dB)	Tłumienie gazów atmosferycznych (dB)	Tłumienie kolumn deszczowych (dB)	Tłumienie sumaryczne (tylko deszcz) (dB)	Tłumienie sumaryczne (tylko mgła) (dB)
5,597	50	81,4	0,0	0,0	81,4	81,4
	100	87,4	0,0	0,0	87,4	87,4
	150	90,9	0,0	0,0	90,9	90,9
	300	97,0	0,0	0,1	97,1	97,0
58,320	50	101,7	0,6	1,8	104,1	102,4
	100	107,8	1,3	3,6	112,7	109,2
	150	111,3	1,9	5,3	118,5	113,3
	300	117,3	3,9	10,7	131,9	121,3
60,480	50	102,1	0,8	2	104,9	103,0
	100	108,1	1,5	4	113,6	109,7
	150	111,6	2,3	6,1	120,0	114,0
	300	117,6	4,5	12,1	134,2	122,2
62,940	50	102,4	0,6	2,1	105,1	103,1
	100	108,4	1,1	4,1	113,6	109,6
	150	112,0	1,7	6,2	119,9	113,8
	300	118,0	3,4	12,4	133,8	121,5
64,800	50	102,7	0,2	2,1	105,0	103,0
	100	108,7	0,4	4,2	113,3	109,2
	150	112,2	0,7	6,3	119,2	113,0
	300	118,2	1,3	12,6	132,1	119,6

Na podstawie analizy dostępnych urządzeń, efektywności bitowej dla różnych schematów modulacyjno-kodowych oraz szerokości kanałów, przyjęto w analizie minimalną czułość odbiornika na poziomie -63 dBm i dla tej wartości wyznaczono wartość marginesu łącza. Dodatkowo przyjęto, że nadajniki pracują z maksymalnymi dozwolonymi mocami EIRP (30 dBm w paśmie 5 GHz i 55 dBm w paśmie 60 GHz), a zyski energetyczne anten nadawczych i odbiorczych są identyczne, i wynoszą odpowiednio 15 dBi dla pasma 5 GHz oraz 38 dBi dla pasma 60 GHz.

Tabela 17. Margines łącza dla dostępności łącza równej 99,999%

Częstotliwość (GHz)	Długość trasy (m)	Margines łącza (dB)	
		Tylko deszcz	Tylko mgła
5,597	50	26,6	26,6
	100	20,6	20,6
	150	17,1	17,1
	300	11,0	11,0
58,320	50	51,9	53,6
	100	43,3	46,8
	150	37,5	42,7
	300	24,1	34,7
60,480	50	51,1	53,0
	100	42,4	46,3
	150	36,0	42,0
	300	21,8	33,8
62,940	50	50,9	52,9
	100	42,4	46,4
	150	36,1	42,2
	300	22,2	34,5
64,800	50	51,0	53,0
	100	42,7	46,8
	150	36,8	43,0
	300	23,9	36,4

Analizując wyniki z powyższej tabeli można dostrzec, że margines łącza, nawet przy zakładanej dostępności łącza 99,999%, we wszystkich przypadkach wynosi powyżej 10 dB, a w paśmie 60 GHz ponad 20 dB. Przy prezentowanych w niniejszym rozdziale założeniach, dotyczących występowania kolumn deszczowych, mgieł, tłumienia dyfrakcyjnego, tłumienia wolnej przestrzeni i tłumienia gazów, wynika, że we wszystkich przypadkach zaprezentowanych w tabeli 17 możliwe jest stworzenie łącza radiowego o analizowanej długości do 300 m. Ponadto istnieje możliwość zapewnienia łączności przy zwiększeniu długości trasy łącza powyżej planowanych 300 m i/lub podczas wystąpienia na trasie propagacji dodatkowych przeszkód, np. w postaci roślinności. Tak znaczący margines łącza pozwoli również na skompensowanie dodatkowego tłumienia wynikającego np. z niedokładności wycelowania anten lub zakłóceń od innych użytkowników w tym samym zakresie częstotliwości. Analiza zakłóceń wprowadzanych do systemu przez innych użytkowników współużytkujących częstotliwości robocze nie była przedmiotem tej pracy.

7. Monitoring przyszłych wdrożeń pilotażowych

W monitoringu przyszłych wdrożeń powinien zostać wykorzystany system pomiarowy umożliwiający przeanalizowanie wartości szerokiego zakresu parametrów łącza z długiego okresu czasu, co najmniej kilku miesięcy. Pomiaru te mogą zostać wykorzystane do oceny efektywności działania bezprzewodowych przyłączy telekomunikacyjnych w pasmach nielicencjonowanych. Dane te mogą służyć zarówno dostawcom usług, jak i administracji krajowej, do oceny ich zgodności z deklaracjami producentów urządzeń.

Badanie parametrów ilościowych i jakościowych łącza i usługi obejmuje ocenę parametrów, które wpływają na doświadczenie użytkownika końcowego (quality of experience, QoE) oraz zapewnienie zgodności usługi z deklarowanymi przez operatora parametrami (quality of service, QoS). W tym celu przeprowadza się pomiary i analizy, które pozwalają na kompleksową ocenę jakości transmisji oraz funkcjonalności sieci. Istotnymi parametrami w badaniu jakości łącza i usługi są:

- przepływność – rzeczywista szybkość przesyłania danych wyrażona w Mb/s lub Gb/s.
- opóźnienie – czas potrzebny na przesłanie danych z jednego punktu do drugiego, szczególnie istotne w przypadku usług czasu rzeczywistego, jak wideokonferencje czy VoIP,
- zmienność opóźnienia – różnica w czasie przesłania kolejnych pakietów, istotne dla aplikacji wymagających stabilności, np. strumieniowanie wideo,
- utrata pakietów – procentowa utrata pakietów przesłanych w sieci, wpływa na jakość usługi, zwłaszcza w zastosowaniach wrażliwych na utratę danych, takich jak transmisja plików czy wideo,
- czas dostępności usługi – procent czasu, w którym usługa jest dostępna i działa zgodnie z deklarowanymi parametrami.

Przykładowym systemem pomiarowym, który może zostać wykorzystany do monitoringu jakości łącza w trakcie wdrożenia testowego, jest System Monitorowania Jakości Internetu (SMJI) opracowany przez Urząd Komunikacji Elektronicznej. SMJI poprzez zbieranie i analizę danych z bezprzewodowych przyłączy telekomunikacyjnych może wspierać rozwój technologii dostępu szerokopasmowego w Polsce, dostarczając niezbędnych informacji do optymalizacji sieci i podejmowania decyzji. Pozwala to na lepsze zrozumienie potrzeb użytkowników i zapewnienie wysokiej jakości usługi dostępu do Internetu. Innym rodzajem testów, które użytkownicy mogą wykonać samodzielnie jest wykorzystanie ogólnodostępnych narzędzi, jak np. Looking Glass⁴⁷.

8. Analiza kosztów

Celem niniejszego opracowania jest zbadanie możliwości wykorzystania przyłączy bezprzewodowych jako potencjalnej alternatywy dla przyłączy światłowodowych. Aby w pełni porównać wdrożenie należy także porównać koszty budowy przyłączy światłowodowych i bezprzewodowych oraz koszty ich późniejszego utrzymania.

Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności – PIB przeprowadził własną analizę kosztów urządzeń radiowych oraz zlecił wykonanie kosztorysu dla przyłączy

⁴⁷ Użytkownik podłączony do sieci dostawcy Internetu może w prosty sposób sprawdzić jakość połączenia, czasu dostępu do usług w sieci lub poza siecią dostawcy oraz zweryfikować przez jakie sieci osiąga adres docelowy. Służy do tego Looking Glass – narzędzie udostępniane przez dostawcę usług IP, które pozwala sprawdzić pomiar najlepszej trasy do konkretnego adresu IP użytkownika lub usługi sieciowej. <https://hurt-orange.pl/2021/06/jit-ter-opoznienie-utrata-pakietow-parametry-transmisji-danych-o-ktorych-warto-pamietac/> (dostęp: 16.12.2024)

światłowodowych i instalacji przyłącza bezprzewodowego. Koszty zostały wyliczone dla 3 wariantów przyłączy światłowodowych oraz dla 1 wariantu przyłącza radiowego:

1. wykonanie doziemnego przyłącza światłowodowego do domu jednorodzinnego od punktu elastyczności operatora sieci przy następujących założeniach (Tabela 18):
 - a. wzdłuż drogi publicznej światłowód prowadzony jest w kanalizacji technicznej,
 - b. przygotowany zostanie wykop o długości 20 m i głębokości ok. 0,7 m,
 - c. wykonawca położy i zabezpieczy światłowód w wykopie,
 - d. długość światłowodu to 20 m w wykopie oraz 30 m na rozprowadzenie po budynku (łącznie 50 m),
 - e. wykonane zostanie przejście przez ścianę zewnętrzną budynku, a światłowód zostanie doprowadzony wewnątrz do centralnego pomieszczenia,
 - f. wykonane zostaną zakończenia światłowodu,
 - g. dostarczone i zainstalowane zostanie urządzenie końcowe (Optical Network Terminal, ONT) dla sieci GPON,
2. wykonanie doziemnego przyłącza światłowodowego do domu jednorodzinnego od punktu elastyczności operatora sieci przy następujących założeniach (Tabela 19):
 - a. założenia takie jak w punkcie 1 (powyżej), przy zwiększeniu długości wykopu do 50 m i długości światłowodu do 50 m w przekopie i 30 m na rozprowadzenie po budynku (łącznie 80 m),
3. wykonanie doziemnego przyłącza światłowodowego do domu jednorodzinnego od punktu elastyczności operatora sieci przy następujących założeniach (Tabela 20):
 - a. założenia takie jak w punkcie 1, przy zwiększeniu długości wykopu do 150 m i długości światłowodu do 150 m w przekopie i 30 m na rozprowadzenie po budynku (łącznie 180 m),
4. dzierżawa słupa energetycznego przez okres 1 roku, montaż licznika energii oraz instalacja urządzeń radiowych, poprowadzenie kabla przez ściany budynku do terminala użytkownika umiejscowionego na zewnętrznej ścianie budynku (lub dachu) oraz koszt urządzenia radiowego oszacowany przez IŁ-PIB (Tabela 21) dla łącza radiowego na trasie radiowej o długości do 300 m (porównywalnej z najdłuższym analizowanym doziemnym przyłączem światłowodowym).

Tabela 22 zawiera porównanie szacowanych kosztów dla wariantów 1 – 4 przedstawionych powyżej.

Tabela 18. Szacowany koszt wykonania przyłącza światłowodowego (przekop długości 20 m)

Podstawa wyceny	Opis pozycji kosztorysowych	Obmiar	J.m.	Koszt jedn.	Wartość (PLN netto)
KNR TP39 0303-11-043	Budowa rurociągu kablowego z 1 rury HDPE o średnicy 40 mm w zwojach na głębokości 1 m w wykopie wykonanym koparkami łyżkowymi w gruntach kat. III-IV	0,020	km	55283,2900	1 105,67
KNNR 5 1209-120-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu betonowym, długość przebicia do 40 cm	1,000	szt.	129,9546	129,95
KNNR 5 1209-100-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu betonowym, długość przebicia do 20 cm	1,000	szt.	36,8321	36,83
KNNR 5 1209-070-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu z cegły, długość przebicia do 2 cegieł	1,000	szt.	72,9692	72,97
KNR TP39 0504-01-043	Wciąganie kabli światłowodowych do kanalizacji wtórnej z rur HDPE o średnicy 40 mm metodą pneumatyczną tłoczkową. Rury z warstwą poślizgową, kabel w odcinkach o długości 2 km	0,020	km	7190,1400	143,80
KNNR 5 0206-040-040	Przewody kabelkowe o łącznym przekroju żył do 7,5 mm ² układane na terenie w podłożu innym niż beton	30,000	m	31,7182	951,55
KNR TP39 0607-01-171	Obustronne wykonanie pigtaili	2,000	złącze	1106,9706	2 213,94
AW-090	Dostawa i montaż urządzenia końcowego ONT dla sieci GPON	1,000	kpl.	636,6000	636,60
Razem kosztorys (PLN netto):					5 291,31

Tabela 19. Szacowany koszt wykonania przyłącza światłowodowego (przekop długości 50 m)

Podstawa wyceny	Opis pozycji kosztorysowych	Obmiar	J.m.	Koszt jedn.	Wartość (PLN netto)
KNR TP39 0303-11-043	Budowa rurociągu kablowego z 1 rury HDPE o średnicy 40 mm w zwojach na głębokości 1 m w wykopie wykonanym koparkami łyżkowymi w gruntach kat. III-IV	0,050	km	55283,2840	2 764,16
KNNR 5 1209-120-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu betonowym, długość przebicia do 40 cm	1,000	szt.	129,9546	129,95
KNNR 5 1209-100-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu betonowym, długość przebicia do 20 cm	1,000	szt.	36,8321	36,83
KNNR 5 1209-070-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu z cegły, długość przebicia do 2 cegieł	1,000	szt.	72,9692	72,97
KNR TP39 0504-01-043	Wciąganie kabli światłowodowych do kanalizacji wtórnej z rur HDPE o średnicy 40 mm metodą pneumatyczną tłoczkową. Rury z warstwą poślizgową, kabel w odcinkach o długości 2 km	0,050	km	7 190,1380	359,51
KNNR 5 0206-040-040	Przewody kabelkowe o łącznym przekroju żył do 7,5 mm ² układane na terenie w podłożu innym niż beton	30,000	m	31,7182	951,55
KNR TP39 0607-01-171	Obustronne wykonanie pigtaili	2,000	złącze	1106,9706	2 213,94
AW-090	Dostawa i montaż urządzenia końcowego ONT dla sieci GPON	1,000	kpl.	636,6000	636,60
Razem kosztorys (PLN netto):					7 165,51

Tabela 20. Szacowany koszt wykonania przyłącza światłowodowego (przekop 150 m)

Podstawa wyceny	Opis pozycji kosztorysowych	Obmiar	J.m.	Koszt jedn.	Wartość (PLN netto)
KNR TP39 0303-11-043	Budowa rurociągu kablowego z 1 rury HDPE o średnicy 40 mm w zwojach na głębokości 1 m w wykopie wykonanym koparkami łyżkowymi w gruntach kat. III-IV	0,150	km	55283,2840	8 292,49
KNNR 5 1209-120-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu betonowym, długość przebicia do 40 cm	1,000	szt.	129,9546	129,95
KNNR 5 1209-100-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu betonowym, długość przebicia do 20 cm	1,000	szt.	36,8321	36,83
KNNR 5 1209-070-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu z cegły, długość przebicia do 2 cegieł	1,000	szt.	72,9692	72,97
KNR TP39 0504-01-043	Wciąganie kabli światłowodowych do kanalizacji wtórnej z rur HDPE o średnicy 40 mm metodą pneumatyczną tłoczkową. Rury z warstwą poślizgową, kabel w odcinkach o długości 2 km	0,050	km	7190,1380	359,51
KNNR 5 0206-040-040	Przewody kabelkowe o łącznym przekroju żył do 7,5 mm ² układane na terenie w podłożu innym niż beton	30,000	m	31,7182	951,55
KNR TP39 0607-01-171	Obustronne wykonanie pigtaili	2,000	złącze	1106,9706	2 213,94
AW-090	Dostawa i montaż urządzenia końcowego ONT dla sieci GPON	1,000	kpl.	636,6000	636,60
Razem kosztorys (PLN netto):					12 693,84

Tabela 21. Szacowany koszt wykonania przyłącza bezprzewodowego typu punkt-punkt (bez kosztów zakupu urządzeń radiowych)

Pod- stawa wyceny	Opis pozycji kosztorysowych	Ob- miar	J.m.	Koszt jedn.	Wartość (PLN netto)
KNNR 5 0717- 05010- 040	Układanie kabli o masie do 0,5 kg/m przez wciąganie do rur osłonowych mocowanych do słupa betonowego z zastosowaniem obejmek	8,000	M	124,5720	996,58
KNR 5- 10 0603-07- 020	Montaż głowic kablowych - zarobienie na sucho końca kabla Al 4-żyłowego o przekroju do 50 mm ² na napięcie do 1 kV o izolacji i powłoce z tworzyw sztucznych	1,000	szt.	312,9597	312,96
KNNR 5 0402- 080-090	Złącza napowietrzne Zn-200	1,000	kpl.	1 347,7080	1 347,71
KNNR 5 0907- 020-040	Montaż uziomów lub przewodów uziemiających w gruncie kat. III	2,000	M	93,7213	187,44
KNNR 5 0606- 040-020	Uziomy ze stali profilowanej miedziowane o długości 3 m (metoda wykonania udarowa) - grunt kat. III	1,000	szt.	368,9656	368,97
KNR 5- 14 0604-01- 020	Przykręcanie tabliczek opisowych	1,000	szt.	38,4118	38,41
AW-090	Montaż licznika	1,000	kpl.	688,4171	688,42
AW-090	Montaż urządzenia radiowego	2,000	kpl.	138,9889	277,98
KNNR 5 1209- 120-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu betonowym, długość przebicia do 40 cm	1,000	szt.	129,9546	129,95
KNNR 5 1209- 100-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu betonowym, długość przebicia do 20 cm	1,000	szt.	36,8321	36,83
KNNR 5 1209- 070-020	Przebijanie otworów o średnicy 25 mm w ścianach lub stropach, w podłożu z cegły, długość przebicia do 2 cegieł	1,000	szt.	72,9692	72,97
AW-090	Dzierżawa słupa 1 rok	1,000	kpl.	1 273,2000	1 273,20
Razem kosztorys (PLN netto):					5 731,41

Tabela 22. Porównanie kosztów wykonania różnych przyłączy

Wariant	Razem kosztorys (PLN netto)
1 – przyłącze światłowodowe (przekop 20 m)	5 291,31
2 – przyłącze światłowodowe (przekop 50 m)	7 165,51
3 – przyłącze światłowodowe (przekop 150 m)	12 693,84
4 – przyłącze radiowe (bez kosztów zakupu urządzeń radiowych)	5 731,41

Tabela 23. Koszt zakupu urządzeń radiowych

Model urządzenia	Cena / sztuka (PLN netto)
LTU-Rocket	1580,03
LTU-Lite	398,8
LiteAP ac LAP-120	395
NS-5AC	188,51
AF60-LR	1785,14
ePMP Force 4500L	2935,8
ePMP Force 425	2525,46
ePMP Force 4525L	919,8
V5000	5026,37
V3000	3423,71
V2000	2971,64
MikroTik LHG 5	178,76
MikroTik SXTsq 5 ac	201,11
MikroTik LHG 60G	469,24
MikroTik wAP 60G AP	361,99
MikroTik Cube 60Pro ac	487,8
MikroTik CubeSA 60Pro ac	650,41

Z porównania kosztu zakupu różnych urządzeń wynika, że koszt zakupu urządzeń radiowych waha się od kwoty około 200 zł do ponad 5 000 zł. Dobór urządzeń będzie zależny od scenariusza wdrożenia oraz konkretnej lokalizacji. Urządzenia, jak wskazano w opracowaniu, różnią się możliwością tworzenia łącza typu punkt-punkt lub punkt-wiele punktów, maksymalną przepływnością łącza, trybem pracy jako stacja bazowa lub terminal użytkownika, lub w obydwu trybach. Koszt ten powinien zostać dodany do szacowanych kosztów budowy przyłącza radiowego przedstawionych w tabeli 21 oraz tabeli 22.

9. Podsumowanie

W niniejszym sprawozdaniu przeanalizowano niezbędne przy planowaniu i wykonywaniu przyłączy radiowych akty regulacyjne: Europejski Kodeks Łączności Elektronicznej oraz akty wykonawcze do niego, Prawo komunikacji elektronicznej i stosowne rozporządzenie Ministra Cyfryzacji w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego, a także decyzje Komisji Europejskiej harmonizujące wykorzystanie urządzeń WAS/RLAN w paśmie 6 GHz oraz wykorzystanie urządzeń bliskiego zasięgu w zakresach 874 – 876 MHz i 915 – 921 MHz. Jednak EKŁE oraz akty wykonawcze do niego odnoszą się w szczególności do parametrów fizycznych punktów dostępowych bliskiego zasięgu (np. maksymalna objętość, spójność wizualna z otoczeniem). Istotniejsze w kontekście analizy możliwości wdrożenia omawianych telekomunikacyjnych przyłączy bezprzewodowych są regulacje związane z parametrami urządzeń klasy 1.

Po przeprowadzeniu szczegółowej analizy zasad dostępu i sposobu wykorzystania kanału radiowego w różnych zakresach częstotliwości, w szczególności pod kątem szerokości dostępnego pasma oraz dozwolonej mocy promieniowanej wpływających na zasięg łączności oraz przepływność transmisji radiowej, wytypowano dwa zakresy o największych możliwościach efektywnego wdrożenia przyłączy bezprzewodowych o parametrach transmisji zbliżonych do łączy światłowodowych. Są to zakresy częstotliwości 5 470 – 5 725 MHz oraz 57 – 71 GHz.

Urządzenia pracujące w obydwu zakresach częstotliwości mogą podlegać pod zapisy wynikające z EKŁE ze względu na ograniczenie mocy nadajników radiowych (EIRP) do 40 dBm. Należy jednak pamiętać, że w zakresie 57 – 71 MHz dozwolone jest stosowanie także wyższej mocy EIRP (do 55 dBm) przy zachowaniu odpowiedniej kierunkowości anten. Konieczne jest wtedy zapewnienie odpowiedniej odległości instalacji od miejsc ogólnie dostępnych, aby zachować zgodność z dozwolonymi poziomami natężenia pola elektrycznego potencjalnie niekorzystnie wpływającego na organizmy ludzkie.

W tekście zaprezentowano przykładowe urządzenia 3 producentów popularnych⁴⁸ na polskim rynku, pochodzące z różnych pólek cenowych. Mogą one zostać wykorzystane do przeprowadzenia przyszłych wdrożeń testowych.

Dla wytypowanych zakresów oszacowano tłumienie trasy radiowej potencjalnego przyłącza, z podziałem na składowe związane z tłumieniem sygnału radiowego powodowanego przez gazy w atmosferze, tłumieniem spowodowanym opadami (deszczem, śniegiem, mgłą), a także tłumieniem spowodowanym pojedynczymi przeszkodami roślinnymi. W sposób ogólny scharakteryzowano także inne składowe tłumienia, które jednak ze względu na nieznaczne długości tras radiowych opisywanych w ramach niniejszej pracy, nie mają zastosowania. Przeprowadzono analizę działania łączy radiowego, która wykazała, że zarówno dla 99,99%, jak i 99,999% czasu dostępności łączy możliwe jest zrealizowanie przyłączy bezprzewodowych dla tras radiowych o badanej długości (do 300 m).

W końcowym etapie pracy porównano koszty wykonania przyłączy punkt-punkt dla trzech wariantów przyłącza światłowodowego (przekop o długości: 20 m, 50 m i 150 m) oraz jednego wariantu przyłącza bezprzewodowego. Koszty wykonania przyłącza radiowego są porównywalne z wykonaniem przekopu o długości 20 m (szacowana cena około 5,7 tys. zł netto w porównaniu do 5,3 tys. zł netto za przyłączy z przekopem o długości 20 m, 7,2 tys. zł netto za przyłączy z przekopem o długości 50 m i 12,7 tys. zł netto za przyłączy z przekopem o długości 150 m). Pokazuje to, że inwestycja z wykorzystaniem przyłącza bezprzewodowego może być uzasadniona finansowo, szczególnie w przypadkach trudności wykonania łączy przewodowego ze względu na warunki terenowe, należy jednak rozważyć jej istotną składową, jaką jest dzierżawa obiektów służących do zawieszenia stacji nadawczo-odbiorczej po stronie końcówki światłowodowej stanowiącej własność operatora telekomunikacyjnego.

⁴⁸ Urządzenia wybranych producentów stosowane są już w pasmach licencjonowanych w programach KPO/FERC, zapewniając zwiększenie dostępu do ultraszybkiego Internetu szerokopasmowego drogą radiową; sprzęt prezentowanych producentów jest też powszechnie rozpoznawalny w środowisku telekomunikacyjnym

W sporządzonej wycenie obliczono koszt dzierżawy słupa energetycznego na potrzeby realizacji łącza bezprzewodowego przez 1 rok. Podłączenie jednego użytkownika (gospodarstwa domowego) do sieci dostarczającej usługi internetowe i przeniesienie na niego całkowitych kosztów dzierżawy w przyszłych latach może spowodować, że w dłuższej perspektywie nie będzie zainteresowanych tego typu rozwiązaniami, nawet jeżeli inwestycja na początku będzie dofinansowywana z budżetu państwa lub funduszy europejskich. Konieczne wydaje się zapewnienie odpowiedniego modelu wsparcia, który pozwoli na uwzględnienie wieloletnich kosztów dzierżawy takich elementów jak słupy energetyczne, latarnie czy dachy budynków, których właściciele zgodzą się na instalację urządzeń radiowych.