



Jacek Wilk-Jakubowski<sup>1</sup>

## WYBRANE ZAGDANIENIA DOTYCZĄCE PROPAGACJI FAL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

**Streszczenie:** W artykule przeanalizowano wybrane zjawiska dotyczące propagacji fal elektromagnetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk związanych z tłem jonizacji w strefie jonów atmosfery ziemskiej. W tym zakresie można wyodrębnić przede wszystkim: absorpcję dewiacyjną i niedewiacyjną, zjawisko magnetoptyczne Faradaya, zjawisko Dopplera, dyspersję, zmianę kierunku nadejścia fali i opóźnienie grupowe.

**Słowa kluczowe:** absorpcja jonosferyczna, zjawisko magnetoptyczne Faradaya, zjawisko Dopplera, dyspersja, zmiana kierunku nadejścia fali, opóźnienie grupowe

## SELECTED DATA CONCERNING THE ELECTROMAGNETIC WAVES PROPAGATION

**Abstract:** This article discusses the different effects concerning the electromagnetic waves propagation in the ionized part of Earth's upper atmosphere (the ionosphere as the layer of ions), with particular focus on effects connected with the ionization background, such as: anormal deviation absorption, normal deviation absorption, Faraday rotation, Doppler effect, dispersion, the change in the wave arrival, group delay.

**Keywords:** ionospheric absorption, Faraday rotation, Doppler effect, dispersion, the change in the wave arrival, group delay

### Wstęp

Najczęściej fale elektromagnetyczne, podobnie jak światło słoneczne są falą płaską, której natężenie pola elektrycznego i magnetycznego zmienia się z czasem. Zasadniczo przyjmuje się, że promieniowanie optyczne (podlegające prawom optyki) zawiera fale elektromagnetyczne w zakresie długości od 100 nm do 1 mm (obejmuje zakres podczerwieni, światła widzialnego i ultrafioletu). W rzeczywistości oprócz promieniowania widzialnego promieniowanie elektromagnetyczne obejmuje także: fale radiowe, fale mikrofalowe, promieniowanie podczerwone, promieniowanie ultrafioletowe, promieniowanie rentgenowskie oraz promieniowanie gamma. Fale radiowe, podobnie jak fale mikrofalowe są powszechnie

---

<sup>1</sup> Reprezentuje nauki techniczne w dyscyplinie naukowej Telekomunikacja o specjalności telekomunikacja, teleinformatyka, transmisja danych, przetwarzanie sygnałów. Na Politechnice Świętokrzyskiej ukończył zarówno studia magisterskie w 2009 roku (na kierunku Elektrotechnika), jak i studia doktoranckie w 2013 roku (w dyscyplinie naukowej Elektrotechnika). Autor wielu publikacji naukowych (w tym monografii, rozdziałów w monografiach, jak również licznych artykułów) w których podejmuje szeroko rozumianą tematykę ICT (dotyczącą m.in. optymalizacji systemów zarządzania kryzysowego i transmisji danych w przypadku wystąpienia niekorzystnych zjawisk, w tym klęsk żywiołowych). Uczestnik wielu konferencji krajowych i zagranicznych.

stosowane w systemach telekomunikacyjnych (wytwór zamierzony)<sup>2</sup>. Ich źródłem mogą być także naturalne źródła szumów o podłożu ziemskim i pozaziemskim, jak również źródła sztuczne, będące niezamierzonym wytworem człowieka<sup>3</sup>. Na rysunku 1 zilustrowano mapę mentalną przedstawiającą skojarzenia studentów z promieniowaniem widzialnym. Najczęściej światło kojarzy się z promieniowaniem elektromagnetycznym, optyką, Słońcem, promieniowaniem termicznym (cieplnym) oraz falą. Typowe skojarzenia ze światłem dotyczą na ogół fizycznych właściwości światła. Obejmują one m.in. zjawiska i obiekty wytwarzające światło (zarówno naturalne źródła promieniowania, jak i sztuczne).

Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie wybranych zagadnień związanych z rozchodzeniem się fal radiowych, ze szczególnym uwzględnieniem propagacji fal mikrofalowych stosowanych w łączności satelitarnej oraz wpływu mechanizmów zachodzących w jonosferze ziemskiej na propagację fal radiowych (w szczególności najważniejszych zjawisk powodowanych przez tło jonizacji).

### **Korpuskularno-falowa natura światła**

Sir Izaak Newton uważany jest za piewce korpuskularnej teorii światła. W praktyce energia fotonu uzależniona jest od długości fali. Zaobserwowanie zjawiska dyfrakcji i interferencji przyczyniło się do ogłoszenia w 1867 roku teorii fal elektromagnetycznych, potwierdzającej założenia Huygensa z 1690 roku. Heinrich Hertz w 1887 roku wygenerował i poddał detekcji fale o częstotliwości z zakresu VHF. Wówczas uświadomiono sobie, że światło jest falą elektromagnetyczną (stanowi widzialną część promieniowania elektromagnetycznego). Rozwój nauki w XX wieku zaowocował ogłoszeniem teorii korpuskularno-falowej, według której promieniowanie widzialne ma dwojaki charakter (może być postrzegane zarówno jako zbiór cząstek – fotonów, jak również jako fala). Odkrycia te doprowadziły do opracowania metod porozumiewania się na odległość.

### **Propagacja fal w atmosferze ziemskiej**

Atmosfera ziemska stanowi powłokę gazową otaczającą kulę ziemską. Skład atmosfery zmienia się wraz z wysokością, przy czym kolejne warstwy atmosfery wyznaczone są poprzez wzrost lub spadek temperatury<sup>4</sup>. W przypadku fal radiowych w łączności satelitarnej istotne znaczenie mają zwłaszcza dwa obszary atmosfery ziemskiej – troposfera i jonosfera ziemska<sup>5</sup>.

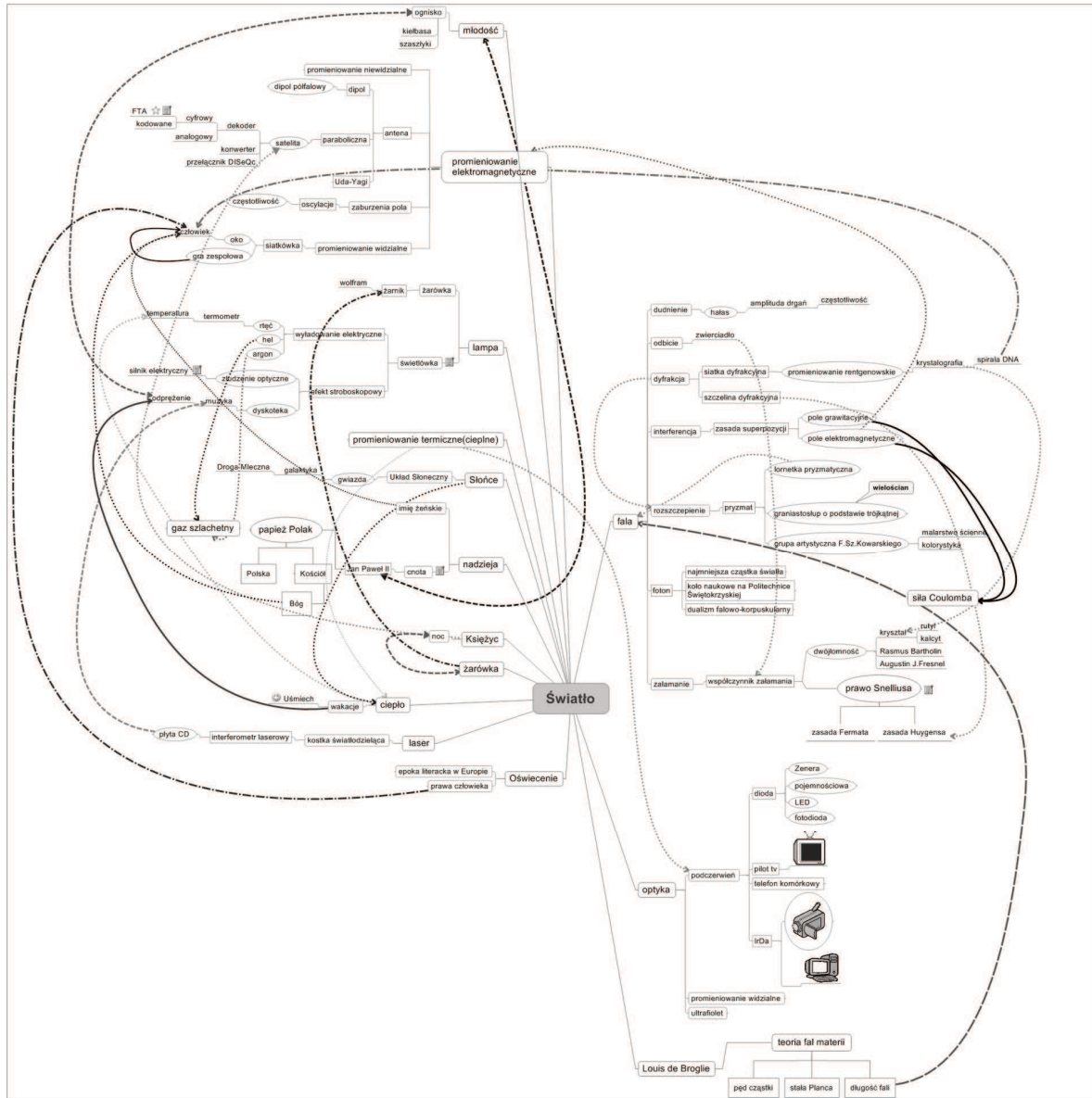
---

<sup>2</sup> I. A. Glover, P. M. Grant, *Digital communications*, Prentice Hall, Dorchester 2010; S. Haykin, *Digital communication systems*, John Wiley & Sons, Chichester 2011.

<sup>3</sup> J. Ł. Wilk, *Naturalne źródła szumów w transmisji satelitarnej*, [w]: Rola Informatyki w Naukach Ekonomicznych i Społecznych. Innowacje i implikacje interdyscyplinarne, (red.) T. Grabiński, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Handlowej im. B. Markowskiego w Kielcach, t. II, Kielce 2010.

<sup>4</sup> A. Woś, *Meteorologia dla geografów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997; J. Zwoździak, A. Zwoździak, A. Szczurek, *Meteorologia w ochronie atmosfery*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.

<sup>5</sup> L. J. Ippolito, *Satellite communications. Systems engineering. Atmospheric effects, satellite link design and system performance*, JohnWiley & Sons, Chichester 2008; Y. Jo Kenneth, *Satellite communications network design and analysis*, Artech House, Norwood 2011.



Rys. 1. Mapa mentalna skojarzeń ze światłem.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie materiałów studenckich.

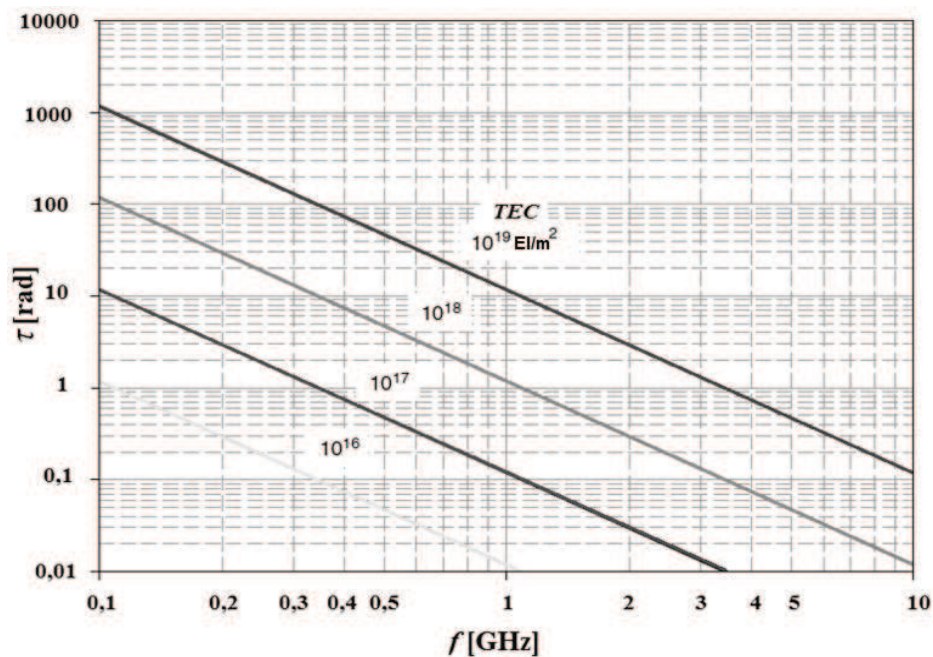
W pierwszej z nich zachodzą zjawiska meteorologiczne, uwidaczniające się zmianami wilgotności, temperatury oraz ciśnienia atmosferycznego. W jonosferze (strefie jonów z promieniowania słonecznego) znajdują się cząsteczki posiadające ładunek elektryczny<sup>6</sup>. Influencja Słońca i Księżyca objawia się powstawaniem wirów i wiatru w jonosferze. Ponieważ kierunek rozchodzenia się fali uzależniony jest od koncentracji swobodnych elektronów, w warstwie tej może występować zjawisko rozpraszania lub odbijania fal docierających z powierzchni Ziemi. Ponieważ w przypadku rzeczywistego środowiska propagacyjnego fale rozchodzą się w ośrodku niejednorodnym, o stratnym charakterze, na

<sup>6</sup> Oprócz promieniowania słonecznego źródłem jonizacji może być promieniowanie kosmiczne oraz pył kosmiczny kontaktujący z atmosferą ziemską.

ich propagację wpływa dyfrakcja<sup>7</sup>. Innym zjawiskiem jest refrakcja, objawiająca się zmianą kierunku propagacji fali na granicy dwóch ośrodków<sup>8</sup>. Fala radiowa może ulec także odbiciu od warstwy jonosfery. Warunkiem koniecznym propagacji transjonosferycznej jest odpowiednia wartość częstotliwości, zwykle większa niż 30 MHz. Zakłada się, że zakres częstotliwości odpowiednich do wykorzystania na potrzeby radiokomunikacji satelitarnej zawiera się w przedziale od 1 GHz do 10 GHz, co odpowiada II oknu kosmicznemu<sup>9</sup>.

### Zjawiska związane z tłem jonizacji w jonosferze ziemskiej

Rozchodzenie się fal elektromagnetycznych zostanie przedstawione w oparciu o najważniejsze zjawiska związane z tłem jonizacji w jonosferze ziemskiej.



\* Dla średniej wartości natężenia pola magnetycznego Ziemi  $B_g = 5 \cdot 10^{21} \frac{\text{A}}{\text{m}}$ .

**Rys. 2.** Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji  $\tau$  w funkcji częstotliwości fali\*.

Źródło: Opracowanie własne, na podstawie: ITU-R Rec. P. 531-11, *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems*, Genewa 2012, <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.531-11-201202-I/en>

Propagację fal radiowych w jonosferze oprócz refrakcji oraz niejednorodności (nie-regularności wzdłuż ścieżek rozchodzenia się fal radiowych), skutkujących powstawaniem fluktuacji amplitudy i fazy fali (scyntyłacje jonosferyczne), warunkują zjawiska związane

<sup>7</sup> B. R. Elbert, *Introduction to satellite communication*, Artech House, Norwood 1987; B. R. Elbert, *Satellite communication applications handbook*, Artech House, Norwood 2004.

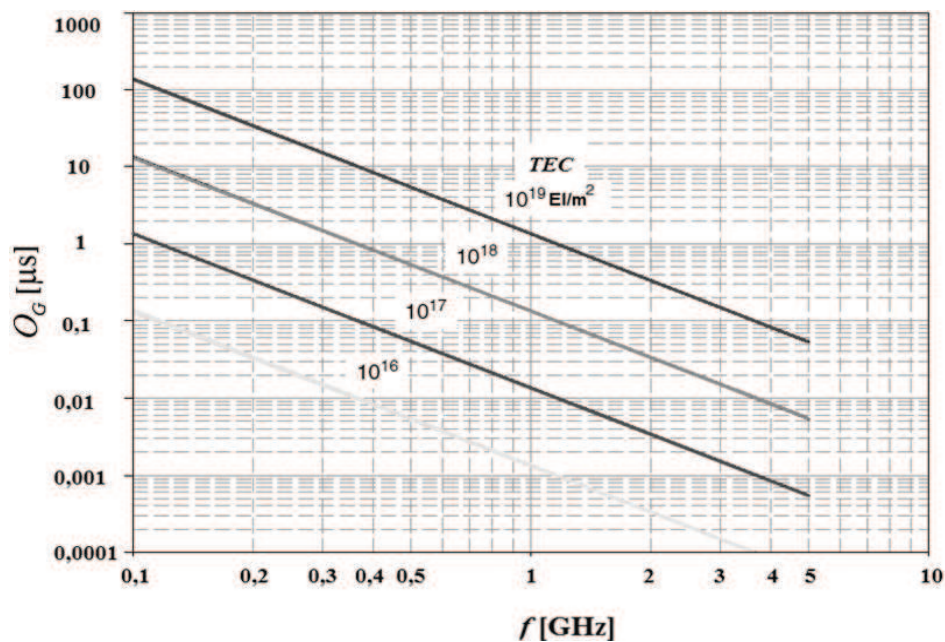
<sup>8</sup> J. Wilk-Jakubowski, *Refrakcja fal radiowych w jonosferze ziemskiej*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2017, Z. 6.

<sup>9</sup> J. Ł. Wilk, *Prawne uregulowania dotyczące klasyfikacji fal elektromagnetycznych*, „TTS. Technika Transportu Szynowego” 2015, Z. 12; A. Karwowski, *Systemy łączności satelitarnej stałej*, [w:] *Systemy radiokomunikacji satelitarnej*, (red.) L. Knoch, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.

z tłem jonizacji<sup>10</sup>. Tło jonizacji opisuje się w oparciu o koncentrację elektronów na drodze rozchodzenia się fali radiowej. Wywołuje ono wiele zjawisk, spośród których najważniejsze to: absorpcja, zjawisko magnetoptyczne Faradaya, zjawisko Dopplera, dyspersja, zmiana kierunku nadejścia fali oraz opóźnienie grupowe. Ponieważ na mechanizm propagacji fal radiowych spośród zjawisk związanych z tłem jonizacji największy wpływ mają: rotacja Faradaya, opóźnienie grupowe i dyspersja, zjawiska te zostaną poniżej opisane.

Rotacja Faradaya oddziałuje przede wszystkim na rozchodzenie się fal radiowych w zakresie *VHF* i *UHF*. Na skutek oddziaływania pola magnetycznego Ziemi, podczas propagacji transjonoosferycznej płaszczyzna polaryzacji fal wychodzących z jonosfery ulega skręceniu o kąt zależny od: częstotliwości fali radiowej, gęstości elektronowej w jonosferze oraz strumienia pola magnetycznego Ziemi (rys. 2). Zjawisko magnetoptyczne Faradaya odgrywa bardzo ważną rolę w systemach stosujących ortogonalne polaryzacje. Minimalizacja wpływu rotacji Faradaya możliwa jest poprzez ręczną korektę kąta nachylenia polaryzacji anteny naziemnej.

Kolejnym zjawiskiem powodowanym przez tło jonizacji jest opóźnienie grupowe, zwane również opóźnieniem propagacyjnym (rys. 3). Skutkuje ono zmniejszeniem prędkości fali radiowej wskutek obecności wolnych elektronów na ścieżce propagacji. Wymiar zjawiska zależy od częstotliwości fali oraz koncentracji elektronów. W praktyce opóźnienie grupowe opisuje opóźnienie sygnału zmodulowanego o nieskończenie małej szerokości pasma. Zjawisko to ma niekorzystny wpływ zwłaszcza dla systemów GPS oraz TDMA. Konsekwencją opóźnienia propagacyjnego jest rozmycie nadawanych impulsów, przez co wyższe składowe częstotliwości docierają wcześniej do anteny.

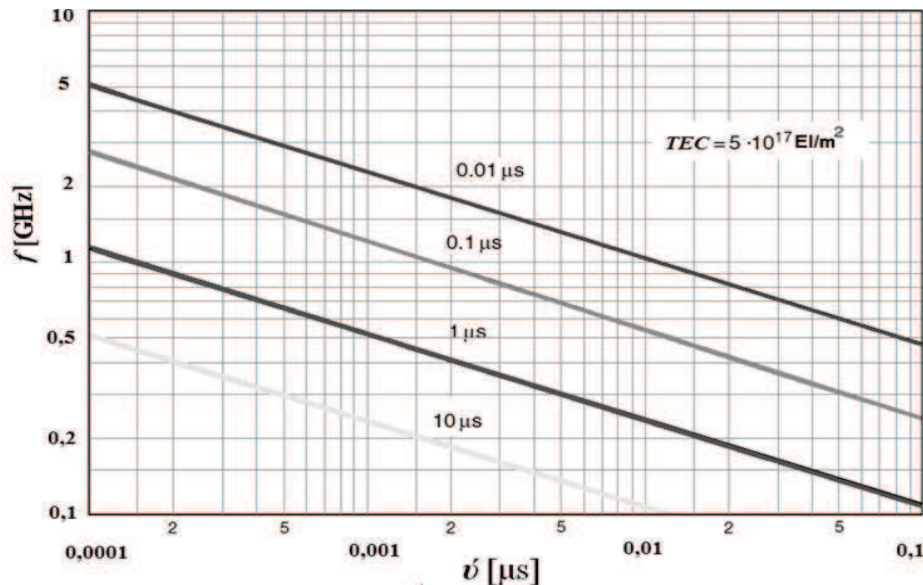


**Rys. 3.** Opóźnienie grupowe  $O_G$  w jonosferze ziemskiej w funkcji częstotliwości fali.

Źródło: Opracowanie własne, na podstawie: ITU-R Rec. P. 531-11, *Ionospheric propagation data...*

<sup>10</sup> M. V. Tinin, S. I. Knizhin, *On radio wave propagation in multiscale randomly inhomogeneous ionosphere*, "Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)" 2017.

Dyspersja jest następstwem różnicy czasów opóźnienia górnej i dolnej częstotliwości sygnału  $\delta$ , która zależy od gęstości elektronowej na drodze transmisji fali radiowej (rys. 4). Wartość opóźnienia zmniejsza się wraz ze zwiększeniem częstotliwości fali oraz czasu trwania impulsu.



**Rys. 4.** Różnica czasów opóźnienia górnej i dolnej częstotliwości sygnału w funkcji częstotliwości fali.

Źródło: Opracowanie własne, na podstawie: ITU-R Rec. P. 531-11, *Ionospheric propagation data...*

Wskutek dyspersji sygnały są zniekształcane, podlegając dystorsji, co uwidacznia się zwłaszcza w zakresie *UHF* i *VHF*.

## Wnioski

Widmo promieniowania elektromagnetycznego obejmuje wiele zakresów częstotliwości, w ramach których fale wykazują różne właściwości. Ponieważ częstotliwości te są powszechnie stosowane w bezprzewodowych systemach łączności, przeprowadzenie analizy wpływu poszczególnych warstw atmosfery ziemskiej na rozchodzenie się fal radiowych jest niezwykle ważne dla zapewnienia poprawnego działania systemów łączności<sup>11</sup>.

Fale radiowe są pochłaniane (podlegają absorpcji w stanowiących składniki powietrza gazach atmosferycznych), zaś ich propagacji towarzyszy wiele zjawisk, z których najważniejsze to: odbicie fali od powierzchni Ziemi, ugięcie fali nad powierzchnią Ziemi oraz załamanie fali w troposferze i jonosferze ziemskiej. Rozchodzeniu się fal w środowisku dyspersyjnym i niedyspersyjnym atmosfery ziemskiej towarzyszy wydłużenie ścieżki propagacji. W konsekwencji sygnały propagowane stycznie do powierzchni Ziemi ulegają

<sup>11</sup> Jako przykłady badań można wskazać prace prowadzone przez polskie instytuty badawcze, jak np.: J. W. Wroński, E. Wielowieyska, *Udostępnienie narzędzia informatycznego do prognozowania zasięgów stacji radiowych użytkowanych we współczesnych systemach radiokomunikacyjnych i radiodifuzyjnych w sieci korporacyjnej i w Internecie*, „Prace IŁ”, Nr 21300017, 01300017, 07300017, Wrocław 2007.

największemu tłumieniu, zaś rozchodzące się pionowo, pod dużymi kątami elewacji, są najmniej narażone na influencję klimatyczno-atmosferyczną. Z punktu widzenia łączności satelitarnej na propagację fal radiowych wpływają przede wszystkim dwie warstwy atmosfery ziemskiej (troposfera i jonosfera). Na rozchodzenie się fal radiowych o częstotliwości poniżej 3 GHz (10 cm) największy wpływ ma jonosfera ziemska, z kolei dla fal o częstotliwości powyżej 3 GHz stanowi ona warstwę prawie przezroczystą (za to ujawnia się niekorzystne oddziaływanie troposfery ziemskiej). Na propagację fal w jonosferze wpływają przede wszystkim – zależne od częstotliwości – zjawiska związane z tłem jonizacji (absorpcja, zjawisko magneto-optyczne Faradaya, zjawisko Dopplera, dyspersja, zmiana kierunku nadejścia fali i opóźnienie grupowe) oraz nieregularnościami wzdłuż ścieżki propagacji (scyntyłacje). Skutki wymienionych wyżej w jonosferze zjawisk maleją wraz ze zwiększeniem częstotliwości (uwidaczniają się wówczas absorpcyjne właściwości troposfery ziemskiej). Najistotniejszy wpływ na mechanizm propagacji w jonosferze mają: fluktuacje amplitudy i fazy fal radiowych (scyntyłacje), rotacja Faradaya (dla fal o częstotliwości do 3-4 GHz), opóźnienie grupowe i dyspersja. Pozostałe z wymienionych zjawisk: absorpcja jonosferyczna (dewiacyjna – anormalna zorzowa i anormalna rozbłyskowa oraz niedewiacyjna – normalna)<sup>12</sup>, zmiana kąta nadejścia fali i efekt Dopplera – mają znacznie mniejszy wpływ na degradację sygnału w tej warstwie atmosfery i z tego względu ich analiza została pominięta. Przyjmuje się, że atmosfera ziemska nie wykazuje znacznego tłumienia w oknie częstotliwości do 6 GHz podczas poziomej propagacji fali radiowej (przypadek skrajnie niekorzystny). W przypadku pionowego rozchodzenia się sygnału okno rozszerza się nawet do 50 GHz. Dla fal radiowych o częstotliwości powyżej 6 GHz znaczny wpływ na tłumienie sygnału mają gazy atmosferyczne, zaś powyżej 10 GHz – opady deszczu.

### **Bibliografia:**

- Elbert B. R., *Introduction to satellite communication*, Artech House, Norwood 1987.
- Elbert B. R., *Satellite communication applications handbook*, Artech House, Norwood 2004.
- Glover I. A., Grant P. M., *Digital communications*, Prentice Hall, Dorchester 2010.
- Haykin S., *Digital communication systems*, John Wiley & Sons, Chichester 2011.
- Ippolito L. J., *Satellite communications. Systems engineering. Atmospheric effects, satellite link design and system performance*, John Wiley & Sons, Chichester 2008.
- ITU-R Rec. P. 531-11, *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems*, Genewa 2012, <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.531-11-201202-I/en>
- Jo Kenneth Y., *Satellite communications network design and analysis*, Artech House, Norwood 2011.
- Karwowski A., *Systemy łączności satelitarnej stałej*, [w:] *Systemy radiokomunikacji satelitarnej*, (red.) L. Knoch, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
- Tinin M. V., Knizhin S. I., *On radio wave propagation in multiscale randomly inhomogeneous ionosphere*, “Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)” 2017.

<sup>12</sup> Klasyfikację absorpcji Autor wprowadził do terminologii przedmiotu w: J. Ł. Wilk-Jakubowski, *Propagacja fal radiowych w łączności satelitarnej*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2018 (w oczekiwaniu na publikację).

- Wilk-Jakubowski J., *Refrakcja fal radiowych w jonosferze ziemskiej*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2017, Z. 6.
- Wilk-Jakubowski J. Ł., *Propagacja fal radiowych w łączności satelitarnej*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2018 (w oczekiwaniu na publikację).
- Wilk J. Ł., *Prawne uregulowania dotyczące klasyfikacji fal elektromagnetycznych*, „TTS. Technika Transportu Szynowego” 2015, Z. 12.
- Wilk J. Ł., *Naturalne źródła szumów w transmisji satelitarnej*, [w]: *Rola Informatyki w Naukach Ekonomicznych i Społecznych. Innowacje i implikacje interdyscyplinarne*, (red.) T. Grabiński, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Handlowej im. B. Markowskiego w Kielcach, t. II, Kielce 2010.
- Woś A., *Meteorologia dla geografów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- Wroński J. W., Wielowieyska E., *Udostępnienie narzędzia informatycznego do prognozowania zasięgów stacji radiowych użytkowanych we współczesnych systemach radiokomunikacyjnych i radiodyfuzyjnych w sieci korporacyjnej i w Internecie*, „Prace IŁ”, Nr 21300017, 01300017, 07300017, Wrocław 2007.
- Zwoździak J., Zwoździak A., Szczurek A., *Meteorologia w ochronie atmosfery*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.