

## REFRAKCJA FAL RADIOWYCH W JONOSFERZE ZIEMSKIEJ

*Dokładna znajomość zagadnień dotyczących transmisji fal radiowych w jonosferze jest kluczowa w przypadku projektowania nowych systemów teleinformatycznych z wykorzystaniem satelitów. W artykule omówiony zostanie wpływ uwarunkowań panujących w jonosferze ziemskiej na propagację transjonosferyczną, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska refrakcji fal radiowych oraz scyntylacji. Ponieważ warunkiem niezbędnym propagacji transjonosferycznej jest odpowiednia wartość częstotliwości fali radiowej, na ogół większa niż 30 MHz, uwzględniając izotropowy poziom tła szumów kosmicznych, maksimum i minimum temperatury szumowej promieniowania galaktycznego oraz czynniki takie jak: błąd refrakcji czy scyntylacje jonosferyczne – przyjmuje się, że dolna granica zakresu dogodnego do łączności satelitarnej wynosi 1 GHz. Kolejno wymienione i sklasyfikowane w artykule zjawiska przyczyniły się do optymalnego doboru częstotliwości wykorzystywanych na potrzeby łączności satelitarnej (II okno kosmiczne)*

### WSTĘP

Na propagację fal radiowych w systemach satelitarnych wpływają przede wszystkim zjawiska występujące w dwóch warstwach atmosfery: w troposferze ziemskiej i w jonosferze ziemskiej. Odmienne mechanizmy propagacji fal radiowych w obu tych warstwach został szczegółowo przeanalizowany w ramach pracy badawczej realizowanej na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach we współpracy z Konsorcjum COST [1-4]. W niniejszym artykule zostaną przedstawione i uszczegółowione uwarunkowania rozchodzenia się fal radiowych w jonosferze, czyli warstwie częściowo zjonizowanych gazów, które znajdują się na wysokości od kilkudziesięciu do kilkuset, a nawet kilku tysięcy km od powierzchni Ziemi (nazwa ta jest wspólna dla termosfery i egzosfery). W tym kontekście uwzględnionych zostanie kilka czynników powodowanych zarówno przez: (1) tło jonizacji, jak i (2) nieregularności występujące wzdłuż trasy propagacji fal radiowych w jonosferze ziemskiej.

### 1. TŁO JONIZACJI

Tło jonizacji z fizycznego punktu widzenia opisuje się poprzez koncentrację elektronów  $Tec$  (ang. *Total electron content*) na drodze propagacji fali radiowej [5-7]. Wielkość ta uzależniona jest od pory dnia oraz aktywności słonecznej:

$$Tec = \int_l n_e(l) dl \quad (1)$$

gdzie:

$n_e$  [El/m<sup>3</sup>] – koncentracja elektronów (liczba elektronów) w jednostce objętości gazu przekładająca się na profil pionowy budowy jonosfery  $N_e$  (na potrzeby analiz wartość  $N_e$  wyrażono przez  $n_e$ ),  
 $l$  [m] – droga propagacji fali radiowej.

W praktyce tło jonizacji wywołuje szereg zjawisk, z których najważniejsze to: zjawisko magnetoptyczne Faradaya, zjawisko Dopplera, dyspersja, absorpcja jonosferyczna, zmiana kierunku nadejścia fali oraz opóźnienie grupowe. Najbardziej znaczący wpływ na mechanizm rozchodzenia fal radiowych w jonosferze (związany z tłem jonizacji) mają: rotacja Faradaya, opóźnienie grupowe i dyspersja. Pozostałe zjawiska: absorpcja, efekt Dopplera oraz zmiana

kąta nadejścia fali nie mają aż tak dużego znaczenia. Ponieważ celem artykułu jest przedstawienie przede wszystkim zjawiska refrakcji jonosferycznej, w artykule pominięto charakterystyki poszczególnych mechanizmów propagacyjnych powodowanych przez tło jonizacji.

### 2. NIEREGULARNOŚCI WYSTĘPUJĄCE WZDŁUŻ TRASY PROPAGACJI FAL RADIOWYCH

Odrębna grupa zjawisk wpływających na propagację fal radiowych w jonosferze znajduje swoje źródło w nieregularnościach wzdłuż trasy propagacji fal radiowych w jonosferze [5-7]. Nieregularności te są przyczyną: scyntylacji i zaników. Ich cechą charakterystyczną, podobnie jak innych procesów zachodzących w jonosferze jest fakt, że zależą one od częstotliwości (ich skutki maleją wraz z jej zwiększeniem). Powstawanie scyntylacji uznawane jest za jeden z najważniejszych czynników warunkujących propagację fal radiowych w jonosferze ziemskiej. Ich wpływ na rozchodzenie fal zostanie opisany w dalszej części artykułu.

### 3. REFRAKCJA FAL RADIOWYCH W JONOSFERZE

W wyniku przestrzennych oscylacji współczynnika załamania ośrodka, zjawisko załamania fal radiowych w jonosferze towarzyszy propagacji fal radiowych [5-11]. Z liczbą elektronów na jednostkę objętości gazu [El/m<sup>3</sup>] wiąże się pionowa struktura gęstości elektronowej. Na występowanie zjawiska wpływa wysokościowy (pionowy) rozkład rzeczywistej względnej przenikalności elektrycznej  $\epsilon_{wj}$ , którego wartość uzależniona jest od częstotliwości fali  $f$  oraz od częstotliwości plazmowej  $f_p$ :

$$\epsilon_{wj} = 1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2 \quad (2)$$

gdzie:

$f_p$  – zależna od gęstości elektronowej częstotliwość plazmowa (częstotliwość własna oscylacji położenia wszystkich swobodnych elektronów na jednostkę objętości gazu):

$$f_p = f_p(n_e) = \sqrt{80,8 n_e} \quad (3)$$

O ile w troposferze ziemskiej względna przenikalność elektryczna  $\epsilon_{wj}$  jest zawsze niemal równa jedności, o tyle jej wartość w jonosferze zależy od położenia punktu obserwacji w przestrzeni. Względna przenikalność elektryczna  $\epsilon_{wj}$  może przyjmować wartość

mniejszą od jedności, a nawet zera – w sytuacji, gdy częstotliwość fali  $f$  byłaby mniejsza od częstotliwości plazmowej  $f_p$ . Ponieważ fala uległaby wówczas odbiciu od warstwy jonosferycznej, w ośrodku takim nie może się rozchodzić. Ze wzoru 2 wynika, że gdy częstotliwość propagowanej fali radiowej  $f$  będzie równa częstotliwości plazmowej  $f_p$ , względna przenikalność elektryczna  $\varepsilon_{wj}$  będzie równa zero.

Jeżeli spełniony zostanie warunek:

$$\varepsilon_{wj} = 1 - \frac{80,8n_e}{f^2} > 0 \quad (4)$$

można dostrzec podobieństwo propagacji fal radiowych w jonosferze ziemskiej do propagacji fal radiowych w troposferze.

Ze zjawiskiem refrakcji fal radiowych w jonosferze będziemy mieć do czynienia tylko wtedy, gdy współczynnik refrakcji jest rzeczywisty. Długość propagowanej fali radiowej  $\lambda_j$  może ulec wówczas znacznemu zwiększeniu w stosunku do długości fali rozchodzącej się w wolnej przestrzeni  $\lambda_o$ :

$$\lambda_j = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\varepsilon_{wj}}} \quad (5)$$

Miarę właściwości refrakcyjnych w jonosferze określa współczynnik  $n_j$ :

$$n_j = \sqrt{\varepsilon_{wj}} = \sqrt{1 - \frac{80,8n_e}{f^2}} \quad (6)$$

Przy dolnej granicy jonosfery wartość współczynnika refrakcji jonosferycznej  $n_j$  jest prawie równa jedności. Wskutek zwiększania się ilości swobodnych elektronów wraz ze wzrostem wysokości, współczynnik ten stopniowo osiąga coraz mniejszą wartość, aż przyjmuje ekstremum minimum na wysokości maksymalnej koncentracji elektronów ( $h_{max}$ ). Powyżej wysokości  $h_{max}$  wartość współczynnika refrakcji jonosferycznej  $n_j$  ulega stopniowemu zwiększaniu z uwagi na zmniejszenie koncentracji elektronów.

Fala radiowa odbije się od warstwy jonosferycznej w kierunku Ziemi, gdy jej częstotliwość  $f$  będzie równa częstotliwości plazmowej  $f_p$  (sytuacja taka będzie miała miejsce na wysokości dla której  $\varepsilon_{wj}$  oraz  $n_j$  będą równe zero). Znajomość profilu pionowego jonosfery prowadzi do wniosku, że wraz ze zwiększeniem częstotliwości fali radiowej, zwiększeniu ulegnie wysokość (aż do momentu osiągnięcia maksymalnej koncentracji elektronów) na której fala radiowa zostanie zawrócona w kierunku Ziemi. Pozwala to obliczyć częstotliwość krytyczną  $f_{kr}$  dla danej warstwy jonosferycznej, przy której następuje bardzo wyraźna zmiana własności optycznych jonofery tzn. pionowo wypromieniowana fala zostanie odbita od jej powierzchni w kierunku Ziemi:

$$f_{kr} = \sqrt{80,8 n_e (h_{max})} \quad (7)$$

Ze wzoru 7 wynika, że częstotliwość krytyczna fali  $f_{kr}$  wzrasta wraz ze zwiększeniem wysokości występowania maksymalnej koncentracji elektronów  $h_{max}$  dla danej warstwy jonosferycznej.

Ponieważ ciągle zwiększanie wysokości skutkuje tym, że współczynnik refrakcji jonosferycznej  $n_j$  stanie się urojony (wzór 6), o tyle dalsze jej zwiększenie pozwoli określić kolejną charakterystyczną wysokość dla której  $n_j$  przyjmuje wartość rzeczywistą. Z fizycznego

punktu widzenia propagacja w tym obszarze nie jest jednak możliwa ze względu na istnienie wysokości dla której  $n_j$  przyjmował wartość urojoną. Jonosfera ziemska stanowi zatem obszar, w którym wypromieniowane pionowo fale radiowe nie będą zawracane w kierunku Ziemi dla sygnałów o częstotliwości większej od  $f_{kr}$ , przy czym należy pamiętać, że dla określonej lokalizacji geograficznej (w zależności od koncentracji elektronów) wyznaczyć można kilka lokalnych częstotliwości krytycznych.

Zakładając płasko-warstwowy model jonosfery, fala radiowa zostanie odbita od warstwy jonosfery w kierunku Ziemi, jeżeli w punkcie powrotu zostanie spełniony warunek:

$$\sin \theta_{jh} = 1 \quad (8)$$

gdzie:  $\theta_{jh}$  – kąt pod jakim fala radiowa o częstotliwości  $f$  przenika jonosferę.

Ponieważ w dolnych granicach jonosfery współczynnik załamania jest równy jedności, warunek odbicia fali w kierunku Ziemi jest następujący:

$$n_{jh} = \sin \theta_{jh} \quad (9)$$

Prowadzi to do wniosku, że:

$$\sqrt{1 - \frac{80,8N_e}{f^2}} = \sin \theta_{j0} \quad (10)$$

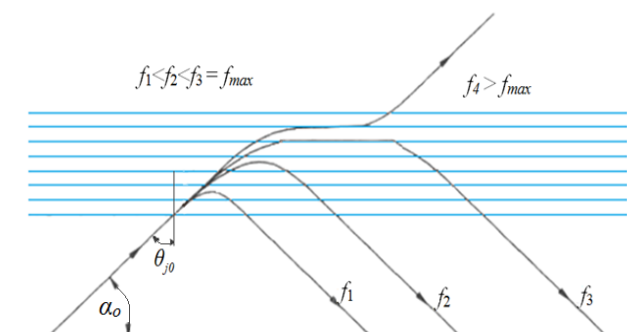
Biorąc pod uwagę parzystość tej funkcji, w oparciu o prawo secansa:

$$\sec \theta_{j0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2 \theta_{j0}}} \quad (11)$$

można matematycznie wyznaczyć wzór 12 na częstotliwość fali  $f$ , z którego wynika, że wypromieniowana pionowo fala o częstotliwości  $f_p$  oraz fala o częstotliwości  $f$ , która przenika przez jonosferę pod kątem  $\theta_{j0}$  odbije się od powierzchni jonosfery na tej samej wysokości:

$$f = \sqrt{80,8N_e} \sec \theta_{j0} = f_p \sec \theta_{j0} \quad (12)$$

Z przeprowadzonych analiz wynika zatem, że przy określonym kącie padania  $\theta_{j0}$  wysokość, na której nastąpi odbicie fali radiowej w kierunku Ziemi uzależniona jest od częstotliwości fali  $f$ . Im wyższa częstotliwość, tym większa wysokość na której fala radiowa zostanie odbita w kierunku Ziemi. Zależność tę graficznie przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Trajektorie fal radiowych w płasko-warstwowej jonosferze

Korzystając z równania 13 możliwe jest obliczenie maksymalnej częstotliwości odbicia w funkcji kąta padania  $\theta_{j0}$  (przy której wypromieniowana fala zostanie jeszcze zawrócona w kierunku Ziemi), przy  $f_p = f_{kr}$ :

$$f_{max}(\theta_{j0}) = f_{kr} \sec \theta_{j0} \quad (13)$$

Wynika z tego, że wartość maksymalnej częstotliwości odbicia  $f_{max}$ , przy zmianie kąta padania  $\theta_{j0}$ , pod jakim fala radiowa o częstotliwości  $f$  przenika przez jonosferę, w zakresie od 0 do  $\frac{\pi}{2}$  zmienia się w przedziale od  $f_{kr}$  do  $\infty$  (od  $f_{kr}$  do nieskończoności).

Ponieważ jonosfera stanowi dla wypromieniowanej fali radiowej obszar kulisto-warstwowy, wartość częstotliwości maksymalnej  $f_{max}$  dla fali wypromieniowanej stycznie do powierzchni Ziemi ( $\theta_{j0} = \frac{\pi}{2}$ ) przyjmuje wartość skończoną (w odróżnieniu od płasko-warstwowego modelu jonosfery). Maksymalną częstotliwość odbicia można wówczas policzyć z zależności:

$$f_{max}(\theta_{j0}) = \frac{f_{kr}}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_{j0}}{(1 + \frac{h_{max}}{a})^2}}} = \frac{f_{kr}}{\sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \frac{h_{max}}{a})^2}}} \quad (14)$$

gdzie:  $h_{max}$  – wysokość na której występuje maksymalna koncentracja elektronów.

Wpływ zjawiska refrakcji jonosferycznej zależy od częstotliwości propagowanej fali radiowej (maleje wraz z jej zwiększeniem). Z tego względu przy znacznych częstotliwościach można go pominąć.

## 4. PROPAGACJA TRANSJONOSFERYCZNA

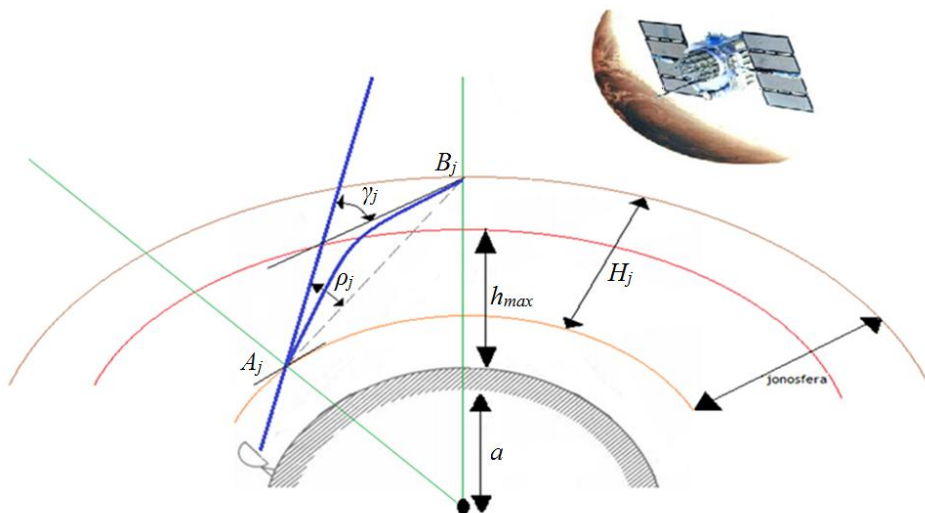
Podczas pracy systemów radiokomunikacji satelitarnej mamy do czynienia ze zjawiskiem propagacji transjonosferycznej. Fala radiowa wypromieniowana przez terminal naziemny przenika przez wszystkie warstwy jonosfery i kieruje się do satelity umieszczonego na danej orbicie (łącze *uplink*) lub propagowana jest od satelity w kierunku Ziemi (łącze *downlink*). Warunkiem niezbędnym propagacji transjonosferycznej jest odpowiednia częstotliwość fali radiowej – większa od maksymalnej częstotliwości odbicia  $f_{max}(\theta_{j0})$ . Kształt

trajektorii fali radiowej wynika z pionowego rozkładu wysokościowego koncentracji elektronów przy przeciętnej aktywności Słońca, co zilustrowano na Rys. 2.

Jak wynika z Rys. 2. fala mikrofalowa wchodzi do jonosfery o szerokości pionowej  $H_j$  w punkcie  $A_j$ . W punkcie  $B_j$  wydostaje się poza jej obszar. W miejscu występowania maksymalnej ilości elektronów na wysokości  $h_{max}$ , tor fali radiowej ulega maksymalnemu zakrzywieniu. Propagacji transjonosferycznej towarzyszy nieodzowne powstawanie błędu refrakcji  $\rho_j$  oraz kąta refrakcji  $\gamma_j$  [10], co zilustrowano na Rys. 2.

## 5. SCYNTYLACJE JONOSFERYCZNE

Zmiany współczynnika refrakcji w jonosferze zachodzą wskutek jonizacji cząsteczek energią słoneczną. Konsekwencją ww. zjawiska są scyntylacje jonosferyczne [5-7]. Zakłada się, że ich powstawanie towarzyszy rozchodzeniu się fal radiowych o częstotliwości do 7 GHz (wymiar scyntylacji zależy od kwadratu częstotliwości, maleje wraz ze zwiększeniem częstotliwości). Na drodze analiz doświadczalnych stwierdzono, że największe oscylacje amplitudy występują dla fal radiowych o częstotliwości nieprzekraczającej 300 MHz. Na scyntylacje oprócz częstotliwości wpływa zatem zależna od lokalizacji geograficznej koncentracja zjonizowanych cząsteczek, a także kąt elewacji satelity, pora doby i roku. Częstość zmian scyntylacji zmienia się w zakresie od 0,1 Hz do 1 Hz, zaś na nasilenie zjawiska oprócz współrzędnych geograficznych wpływa również długość trasy propagacji fal radiowych w jonosferze [8-11]. W praktyce scyntylacje jonosferyczne, poza bieżącą sytuacją klimatyczno-atmosferyczną, mogą znacząco przyczynić się do degradacji sygnału satelitarnego (przede wszystkim na obszarach występowania zórz polarnych oraz w okolicach równika geomagnetycznego). Na dużych szerokościach geograficznych wartość całkowitych fluktuacji amplitudy i fazy nie przekracza zwykle 10 dB. O ile zjawisko to występuje po zachodzie Słońca i trwa maksymalnie kilka godzin, o tyle w rejonie równika geomagnetycznego pojawia się niemal każdego wieczoru w okresie zwiększonej aktywności słonecznej. Nieregularności wzdłuż trasy propagacji fali radiowej w jonosferze mogą być również wynikiem lokalnych turbulencji (wirów) związanych z oddziaływaniem Księżyca, jak również przyplływami i odpływami, w konsekwencji czego fale radiowe ulegają rozproszeniu [8-11].



Rys. 2. Tor fali radiowej podczas propagacji transjonosferycznej

## PODSUMOWANIE

Analiza teoretyczna zebranych dotychczas informacji pozwala postawić tezę, że na propagację fal radiowych o częstotliwości do 3 GHz (10 cm) największy wpływ ma jonosfera ziemska, zaś powyżej 3 GHz – troposfera ziemska (jonosfera stanowi wówczas warstwę niemal transparentną). Powyższe wnioski można zastosować w celu tworzenia nowych modeli transmisji danych m.in. z wykorzystaniem systemów transmuleksacji sygnałów [12]. Funkcja regresji może być zastosowana w celu oszacowania wartości tłumienia sygnału w budżecie łącza wskutek niepożądanych zjawisk [13]. W związku z faktem, że warunkiem koniecznym propagacji transjonosferycznej jest odpowiednia wartość częstotliwości fali radiowej (zwykle większa od 30 MHz), a także biorąc pod uwagę opisany w artykule mechanizm refrakcji fal radiowych w jonosferze ziemskiej oraz wpływ wymienionych czynników (związanych zarówno z tłem jonizacji, jak również nieregularnościami wzdłuż trasy propagacji fali radiowej), a ponadto – opisany m.in. przez Autora w: [14-17] – izotropowy poziom tła szumów kosmicznych, aktywność słoneczną [18-22], maksimum i minimum temperatury szumowej promieniowania galaktycznego [8, 10, 23, 24], przyjmuje się, że dolna granica zakresu dogodnego do łączności satelitarnej wynosi 1 GHz. Z tego też względu częstotliwości z drugiego okna kosmicznego uznaje się za optymalne na potrzeby realizacji szeroko rozumianej łączności satelitarnej [8, 25, 26].

## BIBLIOGRAFIA

1. EUROPEAN COOPERATION IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH – COST, *Memorandum of Understanding for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action IC0802: Propagation tools and data for integrated Telecommunication, Navigation and Earth Observation systems*. Available online: [http://w3.cost.eu/fileadmin/domain\\_files/ICT/Action\\_IC0802/mou/IC0802-e.pdf](http://w3.cost.eu/fileadmin/domain_files/ICT/Action_IC0802/mou/IC0802-e.pdf) (accessed on 02.04.2017).
2. EUROPEAN COOPERATION IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH – COST, *Final evaluation Report: Propagation Tools and Data for Integrated Telecommunication, Navigation and Earth Observation Systems*. Available online: [http://w3.cost.eu/fileadmin/domain\\_files/ICT/Action\\_IC0802/final\\_report/final\\_report-IC0802.pdf](http://w3.cost.eu/fileadmin/domain_files/ICT/Action_IC0802/final_report/final_report-IC0802.pdf) (accessed on 02.04.2017).
3. Wilk J. Ł., *Scientific collaboration in the range of the European Research Project COST IC0802*, [w:] *The East and South in a global dimension. The experiences gained, the prospects for future*, (red.) R. Brzoza, M. Miłek, G. Wilk-Jakubowski, Wydawnictwo Stowarzyszenia Współpracy Polska-Wschód. Oddział Świętokrzyski, Kielce 2012 [In Polish].
4. Wilk J. Ł., *The impact of radiowave polarization, frequency and rain intensity on the satellite signal reception in the area of Kielce city*, [w:] *TRANSCOM 2013, 10-th European Conference of Young Research and Scientific Workers, Proceedings, Section 3 – Information And Communication Technologies*, EDIS-Žilina University publisher, Žilina 2013.
5. Ippolito L. J., *Satellite communications. Systems engineering. Atmospheric effects, satellite link design and system performance*, John Wiley & Sons, Chichester 2008.
6. Lavergnat J., Sylvain M., *Radio wave propagation: Principles and techniques*, John Wiley & Sons, Chichester 2000.
7. Roddy D., *Satellite communications*, McGraw-Hill, New York 2001.
8. Pawłowski W., *Propagacja fal radiowych w warunkach łączności satelitarnej*, [w:] *Systemy radiokomunikacji satelitarnej*, (red.) L. Knoch, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
9. Bem J., *Anteny i rozchodzenie się fal radiowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
10. Katulski R. J., *Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2009.
11. Szóstka J., *Fale i anteny*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
12. Ciosmak J., *Algorytm wyznaczania nieseparowalnych dwuwymiarowych zespołów filtrów dla potrzeb systemów transmuleksacji*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2011, t. 87, zesz. 11.
13. Marek M., *Wykorzystanie ekonometrycznego modelu klasycznej funkcji regresji liniowej do przeprowadzenia analiz ilościowych w naukach ekonomicznych*, [w:] *Rola informatyki w naukach ekonomicznych i społecznych. Innowacje i implikacje interdyscyplinarne*, (red.) T. Grabiński, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Handlowej im. B. Markowskiego w Kielcach, Kielce 2013.
14. 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.
15. Wilk J. Ł., *Wybrane zagadnienia dotyczące szumów w komunikacji 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.
16. Marciniak M., Wilk J., *Wpływ szumów na propagację fal radiowych*, „Logistyka 2015”, nr 4.
17. Wilk-Jakubowski J., *Ocena wpływu źródeł szumów naturalnych na propagację fal radiowych*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 12.
18. Ho Ch., Kantak A., Slobin S., Morabito D., *Atmospheric attenuation and noise temperature effects*, “The Interplanetary Network Progress Report” 2007, no 42-168.
19. Graves M. B., *Estimating sun noise at various frequencies, based on the 10,5 cm flux reported by WWV*, “Proceedings of Microwave Update” 1994 (wersja elektroniczna).
20. Ho Ch., Slobin S., Kantak A., Asmar S., *Solar brightness temperature and corresponding antenna noise temperature at microwave frequencies*, “The Interplanetary Network Progress Report” 2008, no 42-175.
21. Papalkar P., *Bit Error Rate performance analysis of satellite system due to sun transit, rain noise and cloud noise*, “International Journal of Emerging Trends in Electronics and Computer science (IJETECES)” 2012, vol. 1, no 2.
22. Wilk-Jakubowski J., *Wpływ aktywności słonecznej na propagację fal radiowych*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 12.
23. Johansson K. G., Koury A., *The moon as a source for G/T measurements*, “IEEE transactions on aerospace and electronic systems” 1974, vol. AE-S10, no 5.
24. Baars J. W. M., *The measurement of large antennas with cosmic radio sources*, “IEEE transactions on antennas and propagation” 1973, vol. AP-21, no 4.
25. Wilk-Jakubowski J., *Badanie niezawodności satelitarnych systemów teleinformatycznych w warunkach propagacji w atmosferze ziemskiej*, „TTS. Technika transportu szynowego” 2016, nr 12.
26. Zieliński R. J., *Satelitarne sieci teleinformatyczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.

## Refraction of radio waves in the earth's ionosphere

*Paper discussed the impact of refraction in the earth's ionosphere on the propagation of radio waves. Particular attention was paid to the total electron content and irregularities among the propagation paths (one of the effects is ionospheric scintillation). In this context the Author calls attention the frequencies from the second cosmic window*

Autorzy:

dr inż. **Jacek Łukasz Wilk-Jakubowski** – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Katedra Systemów Informatycznych, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, Polska, e-mail: [j.wilk@tu.kielce.pl](mailto:j.wilk@tu.kielce.pl)