



**Jacek Łukasz Wilk-Jakubowski**

*Politechnika Świętokrzyska*

*Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki*

*Katedra Systemów Informatycznych*

*Zakład Informatyki*

*al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25–314 Kielce*

## WYBRANE ASPEKTY BADAŃ SYMULACYJNYCH STRAT W RZECZYWISTYCH ŁĄCZACH SATELITARNYCH

**Streszczenie.** Na konkurencyjność oraz innowacyjność gospodarki światowej wpływa stan zaawansowania technologii TIK. Jednym z rozwiązań podnoszenia jakości świadczonych usług jest dążenie do optymalizacji współczesnych systemów łączności satelitarnej. Z punktu widzenia ich pracy, w celu zapewnienia zadowalającej pracy łącza satelitarnego konieczna jest odpowiednia moc nadajnika. W praktyce moc ta uzależniona jest od wielu czynników, jak chociażby: współrzędne geograficzne miejsca odbioru, ukształtowanie terenu, częstotliwość, lokalizacja anteny (ustawienie anteny), tłumienie sygnału w wolnej przestrzeni, wymagany poziom dostępności łącza. Czynniki te składają się na bilans energetyczny łącza satelitarnego, który uzależniony jest ponadto od parametrów technicznych systemu (zwłaszcza: apertury anteny, sprawności anteny oraz całkowitych strat w łączy). W artykule przeanalizowano wpływ całkowitych strat w łączy w zakresie 0,1–0,7 dB na jakość odbioru mikrofalowego sygnału satelitarnego w obszarze Kielc (z uwzględnieniem szumów interferencyjnych), co pozwala przedstawić wpływ tych strat na odbiór sygnału w skrajnie niekorzystnych warunkach.

**Słowa kluczowe:** parametry anteny, model matematyczny, modelowanie obliczeniowe, pomiar strat, straty całkowite w łączy, niezawodność systemu teleinformatycznego, propagacja fal radiowych, tłumienie sygnału.

## SELECTED ASPECTS OF SIMULATION STUDIES OF COUPLING LOSSES IN THE ACTUAL SATELLITE LINKS

**Abstract.** To ensure satisfactory operation of satellite links in the direction of the satellite-to-earth is essential to get an adequate power of the transmitter. In practice, this

power depends on many factors such as: geographical coordinates, terrain, frequency, antenna aperture, antenna efficiency, coupling loss, the signal attenuation in space – in the atmosphere, the required level of availability of bandwidth, etc. Moreover in order to ensure a correct balance, properly conducted link budget requires consideration of extreme weather conditions (precipitation etc.). It is necessary to determine the required transmitter power (or antenna performance) as a function of many factors. The article analyzes the impact of the coupling loss on the receiving satellite signal and presents the results of modeling of these losses in the actual satellite links.

**Keywords:** antenna parameters, mathematical model, computational modeling, loss measurement, coupling losses, telematic system reliability, radiowave propagation, signal attenuation.

## Wprowadzenie

Przez całkowite straty w łączu rozumie się wyrażone w dB tłumienie sygnału odbiorczego, spowodowane obecnością falowodu i polaryzatorów. O ile typowe wartości całkowitych strat w łączu nie przekraczają 0,3 dB, w artykule przedstawiono oryginalne wyniki prac ukazujące ekstremalny wpływ tych strat (do 0,7 dB) na jakość odbioru mikrofalowego sygnału satelitarnego. Wyniki te można zatem wykorzystać do określenia bilansu łącza (ang. *link budget*), który stanowi równanie niezbędne do wyznaczenia potrzebnej mocy nadajnika (lub parametrów anteny) w funkcji wielu czynników wpływających na jakość odbioru sygnału satelitarnego, przy skrajnie dużym tłumieniu sygnału w falowodzie i polaryzatorach.

W prawidłowo przeprowadzonym bilansie istnieje potrzeba uwzględnienia ekstremalnych warunków pogodowych (zachmurzenie, opady atmosferyczne itp.), które przekładają się na eksploatację i niezawodność satelitarnych sieci teleinformatycznych (jakość linii radiowej oprócz niezawodności systemu opisuje również wierność transmisji) [3, 5, 6, 18, 22]. Poprzez niezawodność systemu definiuje się procent czasu w skali roku lub najgorszego miesiąca, w trakcie którego realizowany jest przekaz z zadaną wiernością transmisji, z określeniem przedziału czasu, kiedy wartości te mogą zostać przekroczone [44] (Tab. 1). Podczas pracy systemów cyfrowych mamy do czynienia z efektem progowym. W praktyce zmniejszenie stosunku *CNR* poniżej 1–2 dB od wartości progowej, może być w przypadku systemów telewizyjnych przyczyną czasowego zamrożenia obrazu, deformacji dźwięku lub całkowitego załamania transmisji (zanik obrazu i dźwięku) [44].

Tab. 1. Wpływ średniorocznej dostępności systemu na przestój w odbiorze sygnału

<b>Dostępność systemu (średnia w roku) [%]</b>	<b>Dostępność systemu (najgorszy miesiąc) [%]</b>	<b>Przestój godzinowy w roku [h]</b>	<b>Przestój godzinowy w najgorszym miesiącu [h]</b>
<b>99,99</b>	<b>99,948</b>	<b>0,877</b>	<b>0,379</b>
99,90	99,615	8,766	2,809
99,80	99,297	17,532	5,134
99,70	99,000	26,298	7,305
99,60	98,716	35,064	9,382
99,50	98,440	43,830	11,393
99,40	98,172	52,596	13,351
99,30	97,910	61,362	15,267
99,20	97,653	70,128	17,148
99,10	97,399	78,894	18,998
99,00	97,150	87,660	20,822

W celu zamodelowania wpływu całkowitych strat w łączu na jakość odbioru mikrofalowego sygnału satelitarnego posłużono się modelem matematycznym systemu czwartej klasy dostępności, który pozwala na oszacowanie parametrów jakościowych odbieranych sygnałów radiowych. Średnia dostępność sygnału w ciągu roku wynosi 99,99% (przestój godzinowy 0,877 godz.), co pozwala uzyskać dostępność w najgorszym miesiącu na poziomie 99,948% (przestój godzinowy 0,379 godz.). Dodatkowo, aby otrzymać rzetelne wyniki, podczas modelowania wzięto pod uwagę towarzyszące propagacji fal radiowych szumy interferencyjne od sąsiednich systemów łączności, które nieodczownie występują podczas normalnej pracy systemów radiokomunikacji satelitarnej. Można wykorzystać do tego celu wiele narzędzi, ważne by zachować zgodność z obowiązującymi standardami międzynarodowymi.

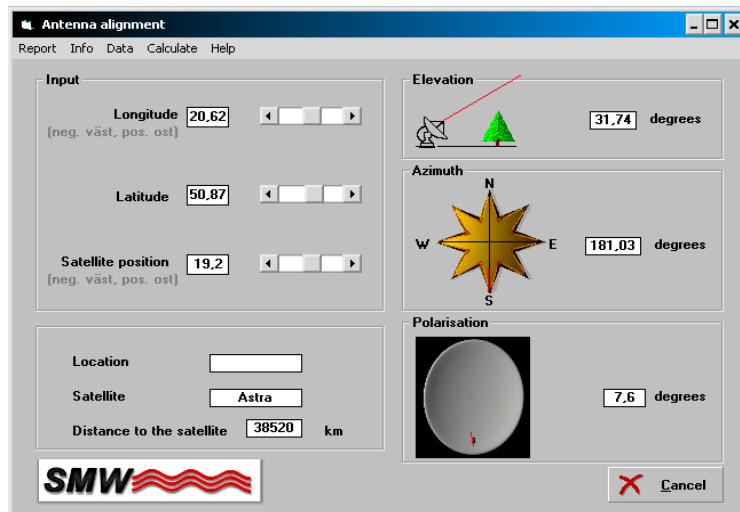
Ponieważ celem niniejszego artykułu jest analiza wpływu całkowitych strat w łączu na jakość odbioru mikrofalowego sygnału satelitarnego, ze względu na ograniczoną objętość, w artykule zrezygnowano z zamieszczenia wzorów, skupiając się przede wszystkim na szczegółowym przedstawieniu założeń oraz analizie wyników. W związku z powyższym pozostałe parametry wpływające na odbiór (w tym położenie, straty wynikające z niedokładności ustawienia an-

teny, apertura anteny, sprawność anteny) przyjęto za niezmiennie. Typowe wartości tych parametrów zostały określone w dalszej części artykułu.

## Cel badań oraz lokalizacja stanowiska pomiarowego

Niezbędnym elementem podczas modelowania zjawisk jest wybranie parametrów miejsca lokalizacji odbioru sygnałów satelitarnych – długość i szerokość geograficzna oraz wysokość położenia nad poziomem morza. Wiąże się to bezpośrednio z „widocznością” sygnału satelitarnego. W tym celu wybrano miasto Kielce (50,87N, 20,62E), zakładając średnią wysokość 300 m n.p.m. Kąt polaryzacji dla miasta Kielce do odbioru sygnałów z satelity Astra 1KR (19,2E) wynosi 7,6°. Do analizy wpływu całkowitych strat w łączu na jakość odbioru mikrofalowego sygnału satelitarnego posłużono się sygnałem o częstotliwości 10,773 GHz o polaryzacji liniowej poziomej (dane satelity: EIRP = 51 dBW, pasmo 26 MHz).

W celu wyznaczenia właściwego położenia anteny można posłużyć się mapami topograficznymi lub też skorzystać ze specjalistycznego oprogramowania, jak chociażby SMW Link (Rys. 1).



Rys. 1. Wyznaczenie kąta polaryzacji dla miasta Kielce z użyciem oprogramowania SMW Link

Wyniki przedstawiono dla miasta Kielce. Wybór ten nie był przypadkowy. Niegdyś w miejscowości Psary-Kąty zlokalizowane było największe w Europie Środkowo-Wschodniej centrum usług satelitarnych. Intensywność opadów w Kielcach uznaje się za reprezentatywną dla całej Polski [44–47, 51]. Obszar

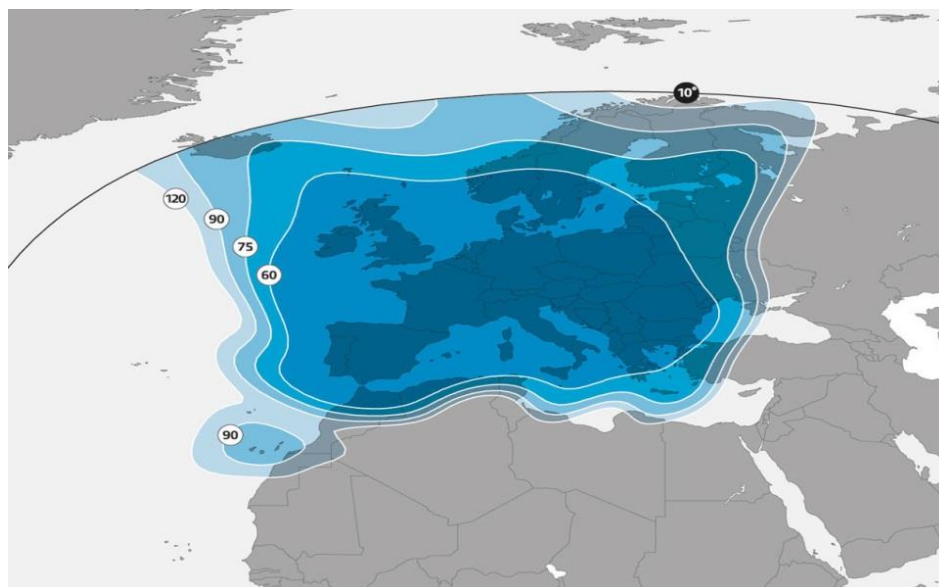
ten objęto badaniami w ramach Europejskiego Projektu Badawczego ICT COST Action IC0802 “Propagation tools and data for integrated Telecommunication, Navigation and Earth Observation systems”, które przeprowadzono m.in. na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach [50]. Przedmiotem badań była analiza wpływu parametrów urządzeń nadawczo-odbiorczych stosowanych w torze transmisyjnym, jak również ekstremalnych warunków klimatyczno-atmosferycznych – na jakość odbioru sygnałów satelitarnych [29, 30, 48, 49]. Celem projektu ICT COST Action IC0802 jest budowa niezawodnej, koherentnej, globalnej „sieci przyszłości” GIN, umożliwiającej wielodrogową, bezpieczną komunikację w przypadku wystąpienia niekorzystnych zjawisk (np. nadmiernego tłumienia, strat w łączu), w tym klęsk żywiołowych [19–20]. Warto podkreślić, że podobne badania są obecnie przedmiotem nieustannych wysiłków naukowych w wielu ośrodkach akademickich i badawczych na całym świecie (m.in. DLR, ESA/ESTEC, ONERA, EUTELSAT, GMV Aerospace and Defence). Współpraca ekspertów zajmujących się propagacją fal radiowych oraz teledetekcją (z użyciem eksperymentalnych danych klimatycznych) zmierza zatem w kierunku wymiernych korzyści dla społeczeństwa [7–9].

Całościowo uzyskane wyniki mogą być w przyszłości wykorzystywane przez inżynierów łączności satelitarnej w celu projektowania nowych systemów łączności, które pozwalają na znaczną poprawę jakości świadczonych usług QoS (ang. Quality of Service) również metodą transmultipleksacji sygnałów. Badania takie prowadzone są obecnie na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach [17]. Do celów analizy degradacji sygnału można wykorzystać metodę Monte-Carlo [52].

Teledetekcja umożliwia obecnie modelowanie deszczu przy użyciu technik GIS. Ostatnio wiele badań skupia się na deszczu jako jednym z najważniejszych czynników klimatycznych [10–16]. Wykorzystanie bazy danych klimatycznych z 40 lat, udostępnionej przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie, pozwala uzyskać informacje niezbędne do określenia niezawodności systemu. Na tej podstawie można wyznaczyć parametry statystyczne dla danej lokalizacji geograficznej. Z drugiej strony wykorzystanie teledetekcji jest przydatne do określenia szacunkowych prognoz poziomu opadów deszczu.

## **Uwarunkowania techniczne odbioru**

Ponieważ w polskich lokalizacjach geograficznych zaleca się stosowanie anten o średnicy co najmniej 60 cm (Rys. 2), do analiz wykorzystano antenę o sprawności 74% (dane katalogowe) oraz średnicy talerza parabolicznego 80 cm.



Rys. 2. Minimalna wymagana wielkość anteny [cm] do odbioru sygnałów z satelity Astra 1KR [1]

Zgodnie z założeniami konstrukcja anteny powinna pozwolić na ustawienie osi głównej wiązki w kierunku orbity geostacjonarnej z maksymalnym błędem równym błędowi wycelowania, przyczyniającym się do spadku zysku anteny o 1 dB dla dowolnej częstotliwości (dla każdego kąta azymutu i elewacji). Precyzja wykonania powierzchni reflektora ma wpływ na jakość odbioru sygnałów (maksymalny błąd nie powinien przekraczać wartości 0,5 mm dla pasma 12 GHz) [4]. Straty wynikające z niedokładności ustawienia anteny, jak również współczynnik szumów konwertera LNB założono na poziomie 0,3 dB.

W rzeczywistych systemach radiokomunikacji satelitarnej degradacja sygnału wynikać może przede wszystkim z tłumienia sygnału mikrofalowego w hydrometeorach, wzrostu szumu spowodowanego wystąpieniem opadów deszczu czy absorpcji fal radiowych w gazach atmosferycznych (wchodzących w skład atmosfery) [25, 40–41]. Ponieważ w kroplach wody indukują się prądy przesunięcia (kropelki wody w zakresie mikrofalowym mają charakter półprzewodzący), fale radiowe mogą ulegać rozpraszaniu [34–35, 41]. W praktyce tłumienie spowodowane wystąpieniem opadów deszczu wzrasta wraz ze zwiększeniem częstotliwości propagowanej fali radiowej [51]. Im dłuższy odcinek trasy propagacji fali radiowej w deszczu oraz im intensywniejsze opady, tym większa jest degradacja sygnału [47]. Na podstawie szeregu badań udowodniono, że fale radiowe o polaryzacji poziomej są bardziej tłumione od fal o polaryzacji pionowej ze względu na fakt, że krople deszczu mają kształt spłaszczonej sferoidy [47]. Do analiz założono model tłumienia deszczu zgodny z ITU-R [26, 39].

Na rozchodzenie się fal radiowych wpływa zatem bieżąca sytuacja klimatyczno-atmosferyczna, przy czym skala pozioma uwarunkowań występujących w atmosferze sięga długości 40075,014 km (czyli obwodu Ziemi), zaś skala pionowa zjawisk – ok. 10 km (czyli lokalnej wysokości troposfery) [29]. Odbiór mikrofalowych sygnałów satelitarnych pogarszają naturalne źródła szumów, jak np.: wyładowania burzowe, szum jonizacyjny oraz uzależniony od intensywności absorpcji molekularnej szum termiczny. Do innych czynników należą dodatkowo: rozbieżność energii wiązki wypromieniowanej w postaci fali radiowej, tłumienie fal radiowych wskutek depolaryzacji przez hydrometeory, zaniki spowodowane scyntylacjami oraz zjawiskami wielodrogowości, a także zakłócenia emitowane przez ośrodki absorbujące [5]. W konsekwencji szum radiowy (szum nieba) jako wielkość addytywna stanowi sumę emisji ze wszystkich sztucznych oraz naturalnych źródeł szumów (zarówno o podłożu ziemskim, jak i pozaziemskim), przyczyniając się do całościowej degradacji sygnału satelitarnego [38]. Informacje na temat warunków propagacji, a także oddziaływania sztucznych oraz naturalnych źródeł szumów (o podłożu ziemskim oraz pozaziemskim) autor zamieścił w: [29–31, 45–47, 51].

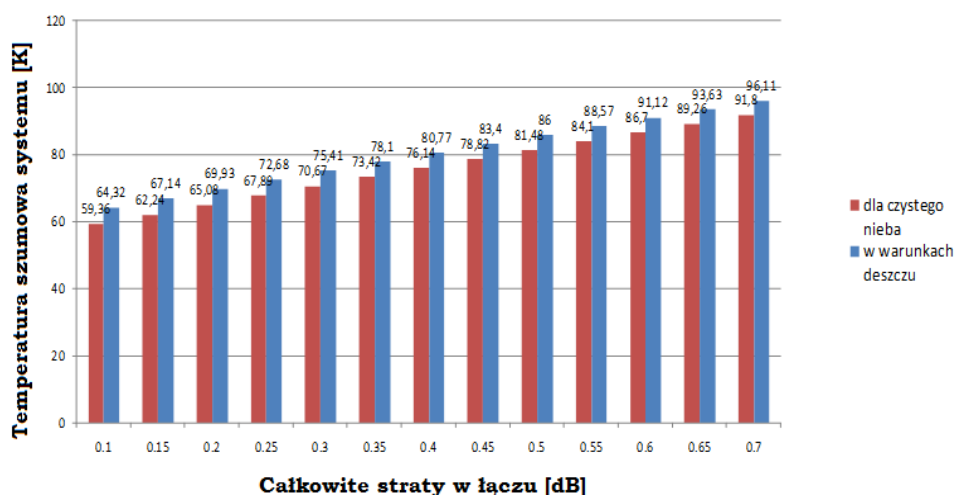
Nadrzędnym celem inżynierów łączności satelitarnej jest dążenie do zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej wewnętrznej (dot. danego systemu), jak i zewnętrznej, poprzez zgodne współistnienie określonych podsystemów i systemów w czasie i przestrzeni. Ponieważ szумы interferencyjne pomiędzy poszczególnymi wiązkami anten uznawane są za znaczące źródło zakłóceń w wielowiązkowych systemach satelitarnych (efekt interferencji przejawia się wzrostem szumu cieplnego), w prezentowanym modelu uwzględniono wpływ systemów zakłócających o parametrach: EIRP = 51 dBW, w paśmie 26 MHz i 33 MHz, w wyniku czego powstały zakłócenia interferencyjne. Bardzo często w wielowiązkowych systemach satelitarnych szum interferencji stanowi aż 40% całego szumu [4, 53]. Do celów analizy przyjęto wartość współczynników interferencyjnych (wyrażających odpowiednio stosunek sumarycznej mocy sąsiednich sygnałów nakładających się na dany kanał w stosunku do mocy fali nośnej tego kanału oraz stosunek całkowitej mocy sygnałów interferujących spolaryzowanych krzyżowo do mocy fali nośnej) na poziomie 100 dB.Hz (typowe wartości wynoszą od 100 do 115 dB.Hz).

## **Analiza wyników**

Analiza otrzymanych wyników dla prezentowanego modelu propagacyjnego pozwala zauważyć prawidłowość, że całkowite straty w łączy wpływają na temperaturę szumową systemu, moc fali nośnej na wyjściu konwertera LNB oraz współczynnik przydatności G/T stacji odbiorczej. Ponieważ całkowite straty

w łączy nie mają wpływu na tłumienie atmosferyczne oraz tłumienie w wolnej przestrzeni, wartości tych strat pozostają niezmiennie.

Parametr ten w znaczny sposób oddziałuje na szумы systemowe. Zwiększając całkowite straty w łączy co 0,5 dB, w warunkach opadów deszczu, jak również czystego nieba uzyskano wyniki zaprezentowane na Rys. 3. Jak wynika z przeprowadzonych analiz temperatura szumowa systemu jest liniowo zależna od całkowitych strat w łączy – wraz z ich wzrostem obserwuje się wzrost temperatury szumowej. Minimalna wartość temperatury szumowej dla całkowitych strat w łączy nieprzekraczających 0,1 dB wynosi 59,36 K w warunkach bezdeszczowych oraz 64,32 K w przypadku wystąpienia opadów deszczu (wzrost o 4,96 K). Maksymalną wartość temperatury szumowej odnotowano dla całkowitych strat w łączy 0,7 dB na poziomie 91,8 K w warunkach bezdeszczowych oraz 96,11 K w przypadku wystąpienia opadów deszczu (wzrost o 4,31 K). Pozwala to przedstawić wpływ całkowitych strat w łączy w zakresie 0,1–0,7 dB na temperaturę szumową systemu. Zależnie od warunków meteorologicznych (pogoda deszczowa lub bezdeszczowa) otrzymuje się różnicę na poziomie 31,79 K lub 32,44 K. Ponieważ na szумы systemowe oddziałują przede wszystkim odbierane przez antenę odbiorczą szумы atmosferyczne [23, 29, 31], temperatura szumowa systemu jest większa w warunkach deszczu niż w warunkach czystego nieba.

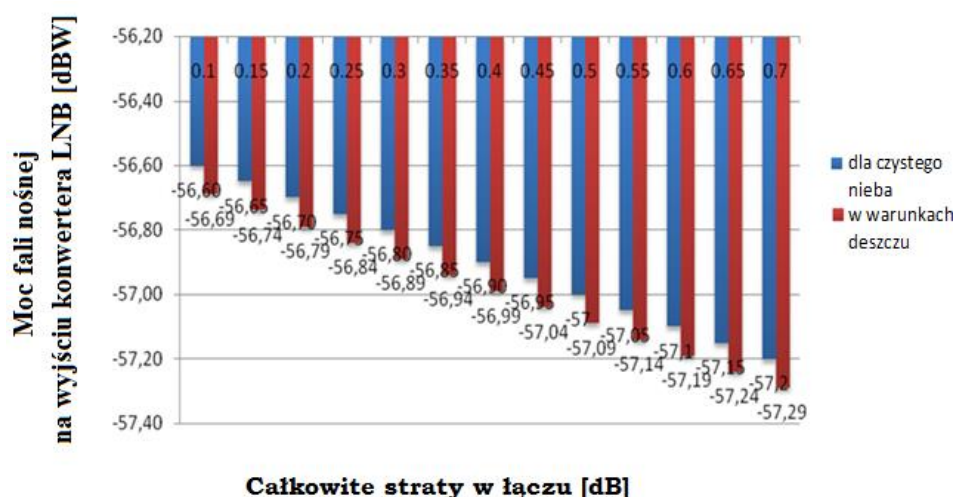


Rys. 3. Wpływ całkowitych strat w łączy [dB] na temperaturę szumową systemu [K] dla czystego nieba oraz w warunkach opadów deszczu

Innym parametrem zależnym od całkowitych strat w łączy jest moc fali nośnej na wyjściu konwertera LNB [dBW] (Rys. 4). Przy stratach całkowitych w łączy nieprzekraczających 0,1 dB wartość mocy fali nośnej na wyjściu kon-



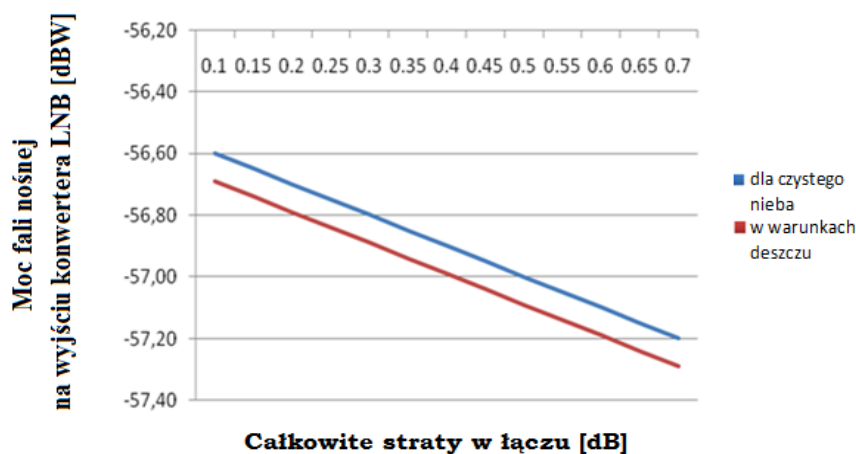
wertera LNB nie przekracza  $-56,60$  dBW w warunkach bezdeszczowych oraz  $-56,69$  dBW w przypadku wystąpienia opadów deszczu. Zależnie od sytuacji atmosferycznej (pogoda deszczowa lub bezdeszczowa) przy stratach całkowitych w łączy  $0,1$  dB notuje się różnicę na poziomie  $0,09$  dBW. Wzrost całkowitego tłumienia do poziomu  $0,7$  dB przekłada się na spadek mocy fali nośnej na wyjściu konwertera LNB do poziomu  $-57,2$  dBW w warunkach bezdeszczowych oraz  $-57,29$  dBW w przypadku wystąpienia opadów deszczu. Zależnie od warunków meteorologicznych (pogoda deszczowa lub bezdeszczowa) przy stratach całkowitych w łączy  $0,7$  dB otrzymuje się różnicę na poziomie  $0,09$  dBW.



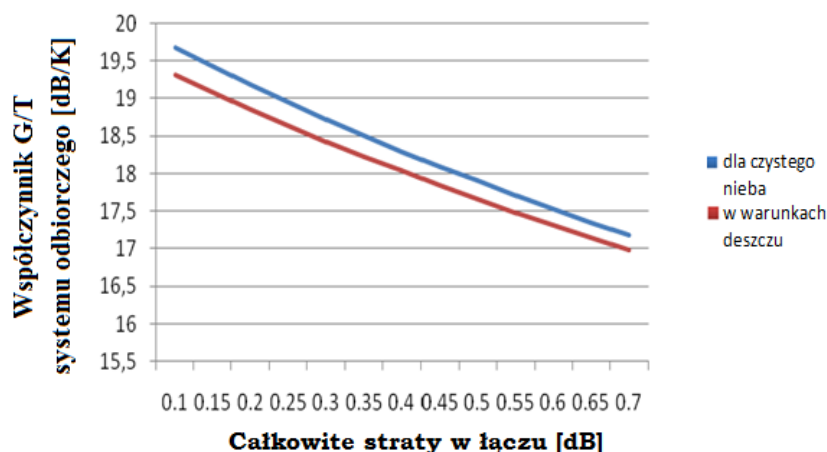
Rys. 4. Wpływ całkowitych strat w łączy [dB] na moc fali nośnej na wyjściu konwertera LNB [dBW] dla czystego nieba oraz w warunkach opadów deszczu

Jak wcześniej stwierdzono, w warunkach opadów deszczu mikrofalowy sygnał satelitalny jest bardziej tłumiony niż podczas pogody bezdeszczowej (Rys. 4). Jak wynika z Rys. 5 moc fali nośnej na wyjściu konwertera LNB jest liniowo zależna od całkowitych strat w łączy. Jej wartość w zakresie prezentowanego modelu przedstawiono na Rys. 4.

Ponieważ podstawowym czynnikiem oceny systemu odbiorczego jest jego zysk odniesiony do temperatury szumowej (współczynnik przydatności G/T systemu odbiorczego), na Rys. 6. przedstawiono wyniki modelowania wpływu całkowitych strat w łączy [dB] na współczynnik G/T systemu odbiorczego [dB/K], uzyskane w warunkach bezdeszczowych, jak również podczas opadów deszczu.



Rys. 5. Zależność liniowa wpływu całkowitych strat w łączy [dB] na moc fali nośnej na wyjściu konwertera LNB [dBW] dla czystego nieba oraz w warunkach opadów deszczu



Rys. 6. Wpływ całkowitych strat w łączy [dB] na współczynnik G/T systemu odbiorczego [dB/K] dla czystego nieba oraz w warunkach opadów deszczu

Wraz ze wzrostem całkowitych strat w łączy stopniowo pogarsza się zależny od komponentów systemu współczynnik G/T. Konsekwencją tego faktu jest spadek jakości odbieranych sygnałów mikrofalowych. Przy stratach całkowitych w łączy do 0,1 dB wartość współczynnika przydatności G/T systemu nie przekracza 19,67 dB/K w warunkach bezdeszczowych oraz 19,32 dB/K w przypadku wystąpienia opadów deszczu. Zależnie od bieżącej sytuacji meteorologicznej (pogoda bezdeszczowa lub deszczowa) przy stratach całkowitych w łączy 0,1 dB notuje się różnicę na poziomie 0,35 dB/K. Wzrost całkowitego

tłumienia do 0,7 dB przekłada się na spadek współczynnika przydatności G/T systemu odbiorczego do poziomu 17,18 dB/K w warunkach bezdeszczowych oraz 16,98 dB/K w przypadku wystąpienia opadów deszczu. Zależnie od warunków meteorologicznych (pogoda bezdeszczowa lub deszczowa) przy stratach całkowitych w łączu 0,7 dB otrzymuje się różnicę na poziomie 0,2 dB/K.

## Podsumowanie

Celem badań była analiza wpływu całkowitych strat w łączu (z uwzględnieniem parametrów technicznych anteny) na jakość odbioru sygnału mikrofalowego w obszarze Kielc na przykładzie systemu satelitarnego. W praktyce głównym źródłem zakłóceń sygnałów są zaniki opadowe – wywołane absorpcją oraz rozpraszaniem energii fal radiowych w opadach atmosferycznych, zaniki interferencyjne, zaniki mocy i zaniki dyfrakcyjne – spowodowane nietypowym ugięciem fali radiowej lub prowadzeniem jej w dukcie oraz propagacja wielodrogowa. Czynniki te przyczyniają się do wzrostu tłumienia sygnału w atmosferze ziemskiej. W przypadku systemów satelitarnych duży poziom zakłóceń wprowadzają również inne systemy łączności, linie radiowe, zakłócenia radarowe pojawiające się w równych odstępach czasu. Przyczyną mogą być także wzmacniacze mocy pracujące blisko punktu nasycenia. W konsekwencji niepożądane warunki pogodowe, jak również uwarunkowania panujące w atmosferze ziemskiej (absorpcja molekularna) mogą przyczynić się do zerwania łączności na skutek chwilowego lub całkowitego zaniku sygnału (spadku jego amplitudy). O ile na sytuację klimatyczno-atmosferyczną nie można wpłynąć, o tyle odpowiedni dobór urządzeń wchodzących w skład systemu odbiorczego może spowodować niezawodne działanie systemu również w przypadku wystąpienia niekorzystnych warunków pogodowych. Istnieje zatem potrzeba prowadzenia tego typu badań o charakterze optymalizacyjnym [2, 21, 24, 27, 28, 36]. W ramach projektu europejskiego COST IC0802 badania na temat wpływu określonych parametrów technicznych urządzeń na jakość odbioru sygnałów radiowych przeprowadzono również w Polsce, co pozwoliło przeanalizować wpływ czynników atmosferycznych na niezawodność systemów satelitarnych w tej części Europy. W praktyce zmniejszenie stosunku *CNR* poniżej 1–2 dB od wartości progowej, może być przyczyną czasowego zamrożenia obrazu, deformacji dźwięku lub całkowitego załamania transmisji (zanik obrazu i dźwięku). W bilansie łącza (jako równaniu niezbędnym do określenia mocy w funkcji wielu pozostałych czynników) istnieje zatem potrzeba uwzględnienia nie tylko bieżącej sytuacji klimatyczno-atmosferycznej, ale również parametrów technicznych urządzeń, w tym całkowitych strat w łączu (tłumienia wprowadzonego przez falowody i polaryzatory) [2, 24, 42].

Podczas modelowania wpływu całkowitych strat w łączu na temperaturę szumową systemu, moc fali nośnej na wyjściu konwertera LNB oraz współczynnik przydatności G/T stacji odbiorczej, wartość tłumienia zmieniano w zakresie od 0,1 do 0,7 dB co 0,5 dB. Wraz ze zwiększeniem strat zaobserwowano wzrost temperatury szumowej systemu w zakresie od 59,36 K do 91,8 K w warunkach czystego nieba oraz od 64,32 K do 96,11 K w przypadku wystąpienia opadów deszczu (zgodnie z modelem deszczu rekomendowanym przez ITU-R do tego typu analiz). Na moc fali nośnej oprócz strat wynikających z niedokładności ustawienia anteny (założonych na poziomie 0,3 dB) wpływają również całkowite straty w łączu. Moc fali nośnej na wyjściu konwertera LNB wraz ze zwiększeniem tłumienia od 0,1 dB do 0,7 dB zmienia się w zakresie od -56,69 dBW do -57,29 dBW w przypadku wystąpienia opadów deszczu oraz od -56,60 dBW do -57,20 dBW w przypadku pogody bezdeszczowej.

Całościowe wyniki badań otrzymane w ramach projektu COST IC0802 mogą zostać wykorzystane do optymalizacji istniejących już łącz telekomunikacyjnych, poprawy jakości odbioru sygnałów radiowych, a w przyszłości – projektowania nowych systemów, pozwalających na znaczną poprawę jakości i wiarygodności przesyłanych informacji. Ponadto zaprezentowane wyniki umożliwiają prognozowanie wpływu całkowitych strat w łączu na odbiór mikrofalowych sygnałów satelitarnych poprzez podanie progowej wartości tłumienia dla danego prawdopodobieństwa wystąpienia opadów deszczu oraz wymaganej dostępności (niezawodności) systemu telekomunikacyjnego [44]. Zebranie danych może umożliwić zatem uzyskanie „zapasu sygnałowego”, który pozwoli zredukować oddziaływanie niekorzystnych warunków pogodowych, w tym również zminimalizować ryzyko utraty sygnału satelitarnego.

Bazując na otrzymanych charakterystykach, w sposób przedstawiony m.in. w [32, 51], można wyznaczyć krzywe ilustrujące wpływ całkowitych strat w łączu na odbiór sygnałów radiowych. Wyniki analiz mogą być przydatne podczas łączenia wielu niezależnych sygnałów w jeden wielodostępowy sygnał transmitowany łączem satelitarnym metodą transmultipleksacji sygnałów, co w dalszej perspektywie może przełożyć się na rozwój współczesnych technologii ICT, w tym również sieci satelitarnych [17, 33, 37, 43].

## Literatura

- [1] Astra 1KR – footprints. Available online: <https://www.ses.com/network/satellites/335> (date of access: 10.03.2018).
- [2] Baghsiahi H., Wang K., Kandulski W., Pitwon R., Selviah D., Optical waveguide end facet roughness and optical coupling loss, [in:] *Journal of Lightwave Technology*, 31(16), 2013, p. 2659–2668. Available online: DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2013.2271952>

- 
- [3] Benarroch A., García-del-Pino P., García-Rubia J.M., Riera J.M., Derivation of rain attenuation from experimental measurements of drop size and velocity distributions, [in:] COST IC0802 (MCM3). Available online: [http://www.tesa.prd.fr/cost/input\\_documents.pdf](http://www.tesa.prd.fr/cost/input_documents.pdf) (date of access: 10.03.2018).
- [4] Bogucki J., Anteny łączności satelitarnej, [in:] *Bezpieczeństwo pracy*, 6, 2001, p. 6–10.
- [5] Bogucki J., Trasy nachylone w zakresie fal milimetrowych, [in:] *Telekomunikacja i Techniki Informacyjne*, 3/4, 2003, p. 66–92.
- [6] Boulanger X., Castanet L., Jeannin N., Lacoste F., Study and modelling of tropospheric attenuation for land mobile satellite system operating at Ku and Ka band, [in:] COST IC0802 (MCM2). Available online: [http://www.tesa.prd.fr/cost/input\\_documents.pdf](http://www.tesa.prd.fr/cost/input_documents.pdf) (date of access: 11.03.2018).
- [7] Cetin M., Adiguzel F., Kaya O., Sahap A., Mapping of bioclimatic comfort for potential planning using GIS in Aydin, [in:] *Environment, Development and Sustainability*, 2016, in press, p. 1-15. Available online: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10668-016-9885-5>
- [8] Cetin M., Consideration of permeable pavement in Landscape Architecture, [in:] *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 16(1), 2015, p. 385–392. Available online: <https://docs.google.com/a/jepe-journal.info/viewer?a=v&pid=sites&srcid=amVwZS1qb3VybmFsLmluZm98amVwZS1qb3VybmFsGd4OjNmY2FkYzYzN2Y1MWNlYjM>
- [9] Cetin M., Determination of bioclimatic comfort areas in landscape planning: A case study of Cide Coastline, [in:] *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 4(9), 2016, p. 800–804.
- [10] Cetin M., Determining the bioclimatic comfort in Kastamonu City, [in:] *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(10), 2015, p. 640. Available online: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-015-4861-3>
- [11] Cetin M., Evaluation of the sustainable tourism potential of a protected area for landscape planning: a case study of the ancient city of Pompeipolis in Kastamonu, [in:] *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 22(6), 2015, p. 490–495. Available online: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13504509.2015.1081651?src=recsys&journalCode=tsdw20>
- [12] Cetin M., Sevik H., Assessing potential areas of ecotourism through a case study in Ilgaz Mountain National Park, ed. L. Butowski, InTech, Rijeka 2016. Available online: <http://www.intechopen.com/books/tourism-from-empirical-research-towards-practical-application/assessing-potential-areas-of-ecotourism-through-a-case-study-in-ilgaz-mountain-national-park> (date of access: 13.03.2018).
- [13] Cetin M., Sevik H., Evaluating the recreation potential of Ilgaz Mountain National Park in Turkey, [in:] *Environmental Monitoring and Assessment*,

- 188(1), 2015, p. 52. Available online: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-015-5064-7>
- [14] Cetin M., Sustainability of urban coastal area management: a case study on Cide, [in:] *Journal of Sustainable Forestry*, 35(7), 2016, p. 527–541, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10549811.2016.1228072>
- [15] Cetin M., Topay M., Kaya L. G., Yilmaz B., Efficiency of bioclimatic comfort in landscape planning process: case of Kutahya, [in:] *Turkish Journal of Forestry*, 1(1), 2010, p. 83–95.
- [16] Cetin M., Using GIS analysis to assess urban green space in terms of accessibility: case study in Kutahya, [in:] *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 22(5), 2015, p. 420–424. DOI: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13504509.2015.1061066>
- [17] Ciosmak J., Algorytm wyznaczania nieseparowalnych dwuwymiarowych zespołów filtrów dla potrzeb systemów transmultipleksacji, [in:] *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(11), 2011, p. 217–220.
- [18] Ciosmak J., Wilk J., Badanie wpływu mżawki na odbiór mikrofalowych sygnałów satelitarnych, [in:] *Logistyka*, 6, 2014, p. 11108–11116. Available online: [http://czasopismo.logistyka.pl/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=291&Itemid=79](http://czasopismo.logistyka.pl/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=291&Itemid=79)
- [19] 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) (date of access: 12.03.2018).
- [20] 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) (date of access: 12.03.2018).
- [21] Heiser D. A., Keyser R. B., Microwave measurements for antenna random maintenance and replacement, [in:] *IEEE Conference Publications. Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, 1, 1998, p. 501–506, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ANTEM.1998.7861713>
- [22] Ho Ch., Katak A., Slobin S., Morabito D., Atmospheric attenuation and noise temperature effects, [in:] *The Interplanetary Network Progress Report*, 42-168, 2007, p. 1–22.
- [23] Ho Ch., Katak A., Slobin S., Asmar S., Solar brightness temperature and corresponding antenna noise temperature at microwave frequencies, [in:] *The Interplanetary Network Progress Report*, 42-175, 2008, p. 1–11.

- [24] Huo X., Li D., Han X., Wang J., Effects of structural and environmental parameters on the coupling loss of leaky rectangular waveguide in tunnel, [in:] *Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LAPC.2015.7366022>
- [25] Ippolito L. J., *Satellite communications. Systems engineering. Atmospheric effects, satellite link design and system performance*, John Wiley & Sons, Chichester 2008.
- [26] ITU-R, *Radio Regulations. Edition of 2017*. Available online: <http://www.itu.int/en/publications/ITU-R/Pages/default.aspx> (date of access: 15.03.2018).
- [27] Loska A., Scenario modeling exploitation decision-making process in technical network systems, [in:] *Eksploatacja I Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 19(2), 2017, p. 268–278, DOI: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.2.15>
- [28] Lozano A., Tulino A. M., Capacity of multiple-transmit multiple-receive antenna architectures, [in:] *IEEE Transactions on Information Theory*, 48(12), 2002, p. 3117–3128, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2002.805084>
- [29] Marciniak M., Wilk J., Czynniki tłumienia fal radiowych w atmosferze ziemskiej, [in:] *Logistyka*, 4, 2015, p. 6578–6588.
- [30] Marciniak M., Wilk J., Relationship between the quality coefficients signal and rainfall intensity, [in:] *TRANSCOM 2015. 11-th European conference of young researchers and scientists*, 3, 2015, p. 94–98.
- [31] Marciniak M., Wilk J., Wpływ szumów na propagację fal radiowych, [in:] *Logistyka*, 4, 2015, p. 6589–6597.
- [32] Marek M., Wykorzystanie ekonometrycznego modelu klasycznej funkcji regresji liniowej do przeprowadzenia analiz ilościowych w naukach ekonomicznych, [in:] *Rola informatyki w naukach ekonomicznych i społecznych. Innowacje i implikacje interdyscyplinarne. The role of informatics in economic and social sciences. Innovations and interdisciplinary implications*, ed. T. Grabiński, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Handlowej im. B. Markowskiego w Kielcach, Kielce 2013.
- [33] Mohseni M., Zhang R., Cioffi J. M., Optimized transmission for fading multiple-access and broadcast channels with multiple antennas, [in:] *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(8), 2006, p. 1627–1639, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2006.879407>
- [34] Natrov D. M., Marciniak M., Sauleau R., Nosich A. I., Effect of Periodicity in the Resonant Scattering of Light by Finite Sparse Configurations of Many Silver Nanowires, [in:] *Plasmonics*, 9(2), 2014, p. 389–407.
- [35] Nosich A. I., Marciniak M., Zinenko T. L., Accurate Analysis of Light Scattering and Absorption by an Infinite Flat Grating of Thin Silver Nanostrips in Free Space Using the Method of Analytical Regularization,

- [in:] IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 19(3), 2013, p. 1–8.
- [36] Pardo E., Kapolka M., Kováč J., Šouc J., Grilli F., Piqué A., Three-Dimensional Modeling and Measurement of Coupling AC Loss in Soldered Tapes and Striated Coated Conductors, [in:] IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26(3), 2016,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2016.2523758>
- [37] Pilch R., Reliability evaluation of networks with imperfect and repairable links and nodes, [in:] Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 19(1), 2017, p. 19–25,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.1.3>
- [38] Rec. P. 372-10, Radio noise, ITU-R, Genewa 2009.
- [39] Rec. P. 837-6, Characteristics of precipitation for propagation modeling. Radio noise, ITU-R, Genewa 2012.
- [40] Roddy D., Satellite communications, McGraw-Hill, New York 2001.
- [41] Szóstka J., Fale i anteny, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [42] Weitzen J. A., Effects of polarization coupling loss mechanism on design of meteor scatter antennas for short- and long-range communication, [in:] Radio Science, 24(4), 1989, p. 549–557,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/RS024i004p00549>
- [43] Wilk-Jakubowski G., Wpływ technologii informatyczno-komunikacyjnych na funkcjonowanie współczesnych społeczeństw, [in:] Rola informatyki w naukach ekonomicznych i społecznych. Innowacje i implikacje interdyscyplinarne. The role of informatics in economic and social sciences. Innovations and interdisciplinary implications, ed. T. Grabiński, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Handlowej im. B. Markowskiego w Kielcach, Kielce 2011.
- [44] Wilk-Jakubowski J., Badanie niezawodności satelitarnych systemów teleinformatycznych w warunkach propagacji w atmosferze ziemskiej, [in:] TTS. Technika transportu szynowego, 12, 2016, p. 364–367.
- [45] Wilk-Jakubowski J., Ocena wpływu źródeł szumów naturalnych na propagację fal radiowych, [in:] Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 12, 2016, p. 1450–1453.
- [46] Wilk-Jakubowski J., Wpływ warunków klimatyczno-atmosferycznych na mechanizm propagacji fal radiowych w atmosferze ziemskiej, [in:] TTS. Technika transportu szynowego, 12, 2016, p. 266–268.
- [47] Wilk J. Ł., The impact of radiowave polarization, frequency and rain intensity on the satellite signal reception in the area of Kielce city, [in:] TRANSCOM 2013. 10-th European Conference of Young Research and Scientific Workers, 3, 2013, p. 94–98.



- 
- [48] Wilk J. Ł., The influence of the antenna aperture on the quality of a satellite signal, [in:] XII International PhD Workshop OWD 2010, 28, 2010, p. 335–341.
- [49] Wilk J. Ł., The influence of the dish efficiency on the quality of a satellite signal, [in:] TRANSCOM 2011. 9-th European Conference of Young Research and Scientific Workers, 3, 2011, p. 253–256.
- [50] Wilk J., Współpraca naukowa w ramach Projektu Europejskiego COST IC0802, [in:] Wschód i Zachód w wymiarze globalnym. Doświadczenia z przeszłości a perspektywy na przyszłość, 1st ed., (red.) R. Brzoza, M. Miłek, G. Wilk-Jakubowski, Wydawnictwo Stowarzyszenia Współpracy Polska-Wschód. Oddział Świętokrzyski, Kielce 2012.
- [51] Wilk J., Total signal degradation due to rain precipitation in the troposphere in the area of Kielce city, [in:] Scientific Journal. Telecommunications and Electronics, 17(262), 2013, p. 5–16.
- [52] Yang H., Xu G., Fan X., A reliability analysis method of cloud theory – Monte Carlo based on performance degradation data, [in:] Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 17(3), 2015, p. 435–442, DOI: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.3.15>
- [53] Zieliński R. J., Satelitarne sieci teleinformatyczne, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.