

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

**Wydział Elektroniki
i Technik Informatycznych**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marcin Stolarski

**Rozproszony system komunikacji satelitarnej
wykorzystujący stacje małej mocy**

Promotor
prof. dr hab. inż. Józef Modelski

Warszawa 2009

Ani

Podziękowania dla:

- *prof. dr hab. inż. Józefa Modelskiego za poprowadzenie przewodu doktorskiego,*
- *prof. nzw. dr hab. inż. Wiesława Winieckiego za motywację do podjęcia studiów doktoranckich oraz uwagi przy realizacji rozprawy doktorskiej,*
- *dr Krzysztofa Kurka za pomoc w obliczeniach oraz użyczenie niektórych rysunków,*
- *Tomka Śliwowskiego za pomoc w angielskich tłumaczeniach,*
- *studentów Studenckiego Koła Inżynierii Kosmicznej, Studenckiego Koła Astronautycznego oraz radioamatorów za pomoc przy realizacji eksperymentów,*
- *innych, którzy pomogli w realizacji tej rozprawy doktorskiej.*

Streszczenie.

Praca przedstawia oryginalną teorię komunikacji satelitarnej z wykorzystaniem Rozproszonej Stacji Naziemnej.

Autor przeprowadza szczegółową analizę parametrów stosowanej aktualnie komunikacji satelitarnej. Wskazuje wady współczesnych systemów komunikacji takie jak niewielkie (czasowo) wykorzystanie stacji uniwersyteckich, ograniczony zasięg stacji dla orbity LEO oraz niewykorzystanie wielu stacji do poprawy jakości łącza. Proponuje zmiany w istniejących systemach przedstawiając idee Rozproszonej Stacji Naziemnej, która rozwiązuje wyżej wskazane problemy.

System RSN polega na równoległym odbiorze sygnału z tego samego nadajnika satelitarnego poprzez wiele stacji naziemnych. Wykorzystując rozproszony odbiór tego samego źródła za pomocą wielu odbiorników każdy z określoną jakością łącza, poprzez porównanie otrzymanych pakietów możliwe jest otrzymanie danych z mniejszą liczbą błędów. Zjawisko to jest efektem nieskorelowania względem siebie szumów własnych poszczególnych odbiorników. Dodatkowo różne miejsca instalacji stacji naziemnych powodują, że zakłócenia środowiskowe toru radiowego także stają się niezależne. W efekcie otrzymujemy kilka skorelowanych strumieni danych z nieskorelowanymi zakłóceniami. Porównanie takich strumieni pozwala na wzmacnianie wartości prawidłowych i tłumienie wartości błędnych.

W dalszej części pracy autor przeprowadził szczegółową analizę proponowanego rozwiązania pokazując wiele symulacji jednowymiarowych jak i trójwymiarowych. Za pomocą eksperymentów balonowych pokazał, że jest możliwa realizacja systemu komunikacji przy wykorzystaniu rozproszonej sieci stacji odbiorczych. Dzięki wykorzystaniu kilku stacji odbiorczych udało się uzyskać równoległy odbiór danych jednokrotnie wysyłanych z gondoli balonu. Eksperymenty te potwierdziły, że rozproszony odbiór poprawia jakość transmisji. Odebrane dane po poddaniu analizie porównawczej posłużyły do wygenerowania danych z mniejszą liczbą błędnych informacji. Kolejne eksperymenty przy wykorzystaniu modelu laboratoryjnego pozwoliły uzyskać bardzo szczegółowe wyniki potwierdzające wysoką jakość opracowanego przez autora modelu matematycznego Rozproszonej Stacji Naziemnej i zastosowanych algorytmów poprawiających jakość łącza.

Opracowana przez autora koncepcja RSN pozwala na jej zastosowanie do aktualnie używanych systemów i takie wdrożenia aktualnie są prowadzone. Wykorzystanie technik RSN może okazać się ważne, aby pokonać bariery technologiczne współczesnych oraz przyszłych systemów antenowych.

Abstract.

The dissertation presents an original theory of satellite communication by means of Distributed Ground Station System.

The author carries out a detailed analysis of the parameters of currently used satellite communication. He points out the flaws in current communication systems, such as little (for the time being) exploit of university stations, limited range of Low Earth Orbit and failure in using many stations to improve link quality. He proposes changes to the existing systems, presenting the theoretical assumptions of DGSS, which solves the above-mentioned problems.

The RSN system consists in parallel reception of the signal from the same satellite transmitter by many ground stations. When using distributed reception of a single source by many receivers, all with a specific link quality, it is possible to obtain less erroneous data via the comparison of received packets. This phenomenon results from mutually uncorrelated noises of given receivers. Additionally, different places of ground station installation enable independent environmental noises of radio band. This results in a set of correlated data streams with uncorrelated noises. Comparing such streams facilitates strengthening the correct values and muffling the incorrect ones.

Subsequently, the author performs a detailed analysis of the proposed solution, presenting numerous one-dimensional, as well as three-dimensional simulations. Through balloon experiments, he shows that implementing a communication system is possible with the use of DGSS. Parallel reception of data sent only once from the balloon car was achieved by using a couple of receiving stations. The experiments have confirmed that distributed reception improves transmission quality. After being subjected to comparative analysis, the received data was later used for generating data with a reduced number of incorrect information. Further experiments, featuring a laboratory model, produced very detailed results that confirmed high quality of the author's mathematical model of DGSS and the algorithms for link quality improvement.

The author's idea of RSN allows to implement it into currently operative systems, with such implementations are being done at present. RSN technologies may prove instrumental for overcoming technological barriers of contemporary and future antenna systems.

Spis treści:

WSTĘP.....	17
1.1. Teza i cele pracy.	18
1.2. Układ pracy.....	19
2. PRZEGLĄD STOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ.....	21
2.1. Przegląd rozwiązań stosowanych w klasycznej komunikacji kosmicznej.	21
2.1.1. Segment kosmiczny.....	22
2.1.2. Segment naziemny.	27
2.1.3. Protokół komunikacyjny.	33
2.1.4. System APRS.	34
2.2. Przegląd rozwiązań stosowanych w komunikacji kosmicznej z wykorzystaniem komunikacji sieciowej.....	38
2.2.1. Rozwiązania komercyjne	39
2.2.2. Systemy komunikacji kosmicznej wykorzystujące pasma amatorskie.	43
2.3. Przegląd rozwiązań stosowanych w dziedzinach pokrewnych komunikacji kosmicznej.....	47
2.3.1. Program WSJT.	47
2.3.2. Astronomia z wykorzystaniem kamer internetowych.	49
3. KONCEPCJA ROZPROSZONEJ STACJI NAZIEMNEJ (DGSS).....	50
3.1. Zasada ogólna Rozproszonej Stacji Naziemnej.....	50
3.2. System porównywanie pakietów (Packet Voiting System).....	53
3.3. Rozproszona Stacja Naziemna (DGSS).	54
4. ANALIZA TEORETYCZNA ZAGADNIENIA.....	57
4.1. Budżet mocy dla satelity radioamatorskiego.....	57
4.2. Jakość łącza satelitarnego.....	60
4.3. Narzędzia do symulacji.	62
4.4. Analiza pojedynczej stacji naziemnej.....	64
4.5. Analiza rozproszonej stacji naziemnej.	66
4.6. System rozproszonego odbioru.	71
5. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA KONCEPCJI.....	89
5.1. Weryfikacja w systemie rzeczywistym - misje balonowe.....	89
5.1.1. Opis modułu Świerszcz.....	90
5.1.2. Misja Świerszcz 1.....	91
5.1.3. Misja BOBAS.	92
5.1.4. Misja BOBAS 2.	93
5.1.5. Misja BOBAS 3.	93
5.1.6. Wyniki zastosowania techniki Rozproszonej Stacji Naziemnej.	94
5.2. Weryfikacja labolatoryjna - sprzętowy symulator Rozproszonej Stacji Naziemnej.	96
5.2.1. Opis systemów.	96
5.2.2. Prezentacja otrzymanych wyników.....	102
5.2.3. Porównanie otrzymanych wyników z modelowaniem matematycznym.	111
5.3. Wnioski z eksperymentów.....	117
6. WYNIKI KOŃCOWE I PODSUMOWANIE.....	119
6.1. Podsumowanie wyników pracy.....	119
6.2. Możliwości wdrożenia wyników pracy oraz kierunki dalszych badań.	121
6.2.1. Satelita PW-Sat	121
6.2.2. GENSO.....	124
6.2.3. Rozproszona Antena.	124

6.2.4.	Rozproszona Antena Kierunkowa.....	125
7.	BIBLIOGRAFIA.....	126
7.1.	Satelity uniwersyteckie.....	126
7.2.	Środowisko kosmiczne, analiza i projektowanie misji kosmicznych, wiarygodność systemów komputerowych.....	127
7.2.1.	Analiza misji kosmicznych	127
7.2.2.	Środowisko kosmiczne.....	127
7.2.3.	Wiarygodność systemów komputerowych.....	127
7.3.	Bilans mocy, anteny, budowa stacji naziemnej.....	128
7.4.	Stosowane rozwiązania stacji naziemnych.....	130
7.4.1.	Standardowe stacje naziemne.....	130
7.4.2.	GSN.....	130
7.4.3.	SMACS	131
7.4.4.	TriS-TAR	132
7.4.5.	BEXUS	132
7.4.6.	GENSO.....	132
7.4.7.	CISCO	132
7.4.8.	NOAA	132
7.4.9.	DSN.....	132
7.4.10.	Irydium	133
7.5.	Rozproszona Stacja Naziemna.....	133
7.6.	Predykcja położenia satelity.....	134
7.7.	APRS.....	135
7.8.	Odwołania do innych projektów i dziedzin.....	135
7.9.	Noty aplikacyjne.....	135
7.10.	Jezyki programowania.....	135
8.	Załączniki.....	137
8.1.	Fragment kodu aplikacji DGSSC.....	137
8.2.	Fragment kodu Symulatora RSN.....	139
8.3.	Kod Scilab porównujący algorytmy poprawy jakości łącza.....	148
8.4.	Opis systemu komunikacji i sterowania satelity PW-Sat.....	150
8.4.1.	Wstęp.....	150
8.4.2.	Opis systemu C&CS.....	151
8.4.3.	Płytki PCB.....	157
8.4.4.	System antenowy.....	157
8.4.5.	Podsumowanie.....	158
8.5.	Płyta CD.....	159

Spis ważniejszych skrótów i oznaczeń.

1D	Obiekt jednowymiarowy.
3D	Obiekt trójwymiarowy.
A/C	Przetwarzanie analogowo-cyfrowe.
AFSK	(ang. Audio FSK) Modulacja częstotliwości z wykorzystaniem toru audio transceivera.
APRS	(ang. Automatic Packet Reporting System) radioamatorski system przekazywania pozycji stacji.
APRS-IS	Internetowa sieć APRS.
ASK	(ang. Amplitude-Shift Keying) kluczkowanie amplitudą sygnału.
AX25	Protokół komunikacyjny.
B	(ang. Bandwidth) szerokość pasma transmisji.
BBS	Tryb serwerowy pracy stacji radioamatorskiej.
BER	(ang. Bit Error Rate) współczynnik ilości błędów.
BPR	(ang. Bit Probability of Reception) prawdopodobieństwo poprawnego odebrania bitu.
BR	(ang. Bit Rate) przepływność bitowa transmisji na sekundę.
C	Moc sygnału.
C&CS	(ang. Communications and Control System) moduł komunikacji i sterowania satelity PW-Sat.
CNR	Stosunek sygnału do szumu.
CW	Kluczkowanie nośną (zwykle kodem Morse-a).
dBm	Moc (w miliwatach) wyrażona w decybelach.
dBw	Moc (w watach) wyrażona w decybelach.
D_c	Długość przewodu antenowego.
DGSN	(ang. Distributed Ground Station Network) sieć Rozproszonej Stacji Naziemnej.
DGSS	(ang. Distributed Ground Station System) System Rozproszonej Stacji Naziemnej.
DGSSC	(ang. Distributed Ground Station System Calculator) narzędzie do symulowania RSN.
DS	(ang. Deep Space) głęboki kosmos, orbity międzyplanetarne (większe od 40000 km).
DSPR	(ang. Data Set Probability of Reception) prawdopodobieństwo przesyłania danych.
DTMF	(ang. Dual Tone Multi Frequency) standard modulowania sygnału.

EbNoR	Stosunek energii bitu do energii szumu 1Hz.
ECSS	(ang. European Cooperation for Space Standardization) to europejska organizacja definiująca standardy na użytek inżynierii kosmicznej.
EEPROM	Rodzaj pamięci nieulotnej.
EME	Łączność polegająca na odbiciu sygnału od Księżyca.
F_{F100}	Tłumienie 100m przewodu antenowego.
F_{FRx}	Tłumienie przewodu antenowego.
FM	(ang. Frequency modulation) modulacja częstotliwości.
FSK	(ang. Frequency-Shift Keying) Kluczowana modulacja częstotliwości.
FSL	(ang. Free Space Loss) tłumienie wolnej przestrzeni.
FX614	Układ scalony umożliwiający modulacje AFSK.
G3RUH	Rodzaj kodowania sygnału FSK stosowany przez radioamatorów.
GATE	Bramka APRS.
GENSO	(ang. Global Educational Network for Satellite Operations) sieć uczelnianych stacji naziemnych.
GEO	(ang. Geostationary Earth Orbit) orbita geosynchroniczna (w szczególności geostacjonarna, 36000 km).
GPS	(ang. Global Positioning System) satelitarny system nawigacji.
GS	(ang. Ground Station) stacja naziemna.
GSM	(ang. Global System for Mobile Communications) system telefonii komórkowej.
GSN	(ang. Ground Station Network) sieć stacji naziemnych.
GS-SCP	Oprogramowanie wykorzystujące techniki RSN.
HEO	(ang. High Earth Orbit) orbita paraboliczna (perygeum około 500km, apogeum około 40000 km).
I-GATE	Bramka APRS z połączeniem do sieci internet.
IOSI	Model stosu sieciowego TCP/IP.
ISS	(ang. International Space Station) Międzynarodowa Stacja Kosmiczna.
K	Stała Boltzmann.
K	Kelwin (jednostka temperatury)
L_A	Tłumienie atmosferyczne.
LEO	(ang. Low Earth Orbit) orbita bliska Ziemi (100 – 2000 km od powierzchni Ziemi).
L_M	Margines bezpieczeństwa (w bilansie mocy).

MAC	(ang. Media Access Control) adres sprzętowy w protokole AX25.
MEO	(ang. Medium Earth Orbit) orbita średnio oddalona od Ziemi (2000 – 30000 km).
MIR	Rosyjska stacja kosmiczna.
MixW	Programowa realizacja modemu radiowego.
N	Moc szumu.
NASA	(ang. National Aeronautics and Space Administration) amerykańska narodowa agencja kosmiczna.
NOAA	(ang. National Oceanic and Atmospheric Administration) amerykańska organizacja pogodowa i morska.
NRX	Moc szumu termicznego odbiornika.
NRZ	(ang. Non Return to Zero) metoda kodowania sygnału binarnego.
OBC	(ang. On Board Computer) komputer pokładowy.
PPR	(ang. Packet Probability of Reception) prawdopodobieństwo poprawnego odebrania pakietu.
PS	(ang. Power Supply) zasilanie.
PSK	(ang. Phase -Shift Keying) modulacja fazy sygnału.
PSU	(ang. Power Supply Unit) system zasilania.
PVS	(ang. Packet Voiting System) system głosowania pakietów.
RF	(ang. Radio Frequency) sygnał radiowy.
RSN	Rozproszona Stacja Naziemna.
RXAG	Zysk anteny odbiorczej.
RXS	Czułość odbiornika wyrażona w watach bądź w dBw.
RXU	Czułość odbiornika wyrażona w voltach.
SNIAD	Poziom sygnału w stosunku do szumu i zniekształceń.
SQ5FNQ	Znak radioamatorski autora.
SSETI	(ang. The Student Space Exploration and Technology Initiative) studenckie stowarzyszenie zajmujące się budowaniem satelitów.
T_{A0}	Średnia temperatura szumowa przestrzeni kosmicznej.
T_{AS}	Temperatura zastępcza systemu antenowego.
TCP/IP	Protokół sieciowy.
TDRS	Amerykański system komunikacji satelitarnej.
T_F	Temperatura szumowa przewodu antenowego.
TFSL	Teoretyczne tłumienie wolnej przestrzeni.

TNC	(ang. Terminal Node Controller) rodzaj kontrolera modemu radiowego.
T_R	Temperatura szumowa odbiornika.
TTL	(ang. Transistor-Transistor Logic) standard cyfrowych układów scalonych.
T_U	Zastępcza temperatura systemu odbiorczego.
TXAG	Zysk anteny nadawczej.
TXP	Moc nadajnika.
USA	Stany Zjednoczone.
VNC	Zdalny pulpit graficzny systemu operacyjnego.
WATCHDOG	Automatyczny system restartu urządzenia w przypadku awarii oprogramowania.
WiFi	Bezprzewodowa sieć komputerowa.
WWW	(ang. Word Wide Web) protokół sieci internet.
YAGI	Rodzaj anteny kierunkowej.
ZSRR	Związek Radziecki.
λ	Długość fali elektromagnetycznej.

WSTĘP.

Wiele uniwersytetów zajmuje się zagadnieniami związanymi z budową satelitów. Powstają małe i tanie satelity ([01] - [12]) oraz stacje naziemne ([41] - [47]) umożliwiające wymianę danych pomiędzy Ziemią a satelitą. Pojedyncze stacje naziemne, ze względu na ograniczony czas widoczności radiowej pomiędzy stacją a satelitą wykorzystywane są w skali doby w niewielkim stopniu. Bardzo rzadko zdarza się, aby dana stacja była wykorzystywana do obsługi satelitów innego uniwersytetu. Sama realizacja łącza pomiędzy Ziemią a satelitą nie jest łatwa i wymaga zbudowania odpowiedniego systemu antenowego zapewniającego odpowiednią jakość połączenia.

Tematem rozprawy jest zastosowanie Rozproszonej Stacji Naziemnej, jako nowej metody komunikacji satelitarnej. Zadane zostały możliwości zwiększenia ilości przesyłanych danych pomiędzy satelitą a Ziemią bez zmiany konfiguracji satelity. Zmiany dotyczą segmentu naziemnego, a w szczególności jego rozproszenia na powierzchni Ziemi.

Zaproponowane metody zapewniają zwiększenie ilości przesyłanych danych, dzięki poprawieniu jakości łącza oraz zwiększeniu czasu dostępności do satelity. Zaproponowane zostały mechanizmy wykorzystania dotychczasowej infrastruktury przy zmienionej organizacji jej pracy.

System rozproszonej komunikacji satelitarnej zakłada, że dzięki rozproszonemu odbiorowi (przy wykorzystaniu wielu stacji naziemnych rozproszonych terytorialnie) telemetrii z satelity, można uzyskać poprawę jakości łącza. Pojawiają się tu dwie podstawowe metody poprawy jakości łącza. Pierwsza metoda zakłada, że stacje naziemne rozproszone są po całym świecie. Dzięki takiemu rozproszeniu satelita zawsze (albo prawie zawsze) jest w zasięgu jednej ze stacji naziemnych. Połączenie stacji naziemnych za pomocą rozległej sieci komputerowej umożliwia stały kontakt z satelitą. Druga metoda polega na wykorzystaniu kilku stacji naziemnych będących jednocześnie w zasięgu satelity. Równoległy odbiór telemetrii przez kilka stacji naziemnych pozwala na porównanie odebranych strumieni danych, co umożliwia eliminację ewentualnych błędów transmisji w pojedynczych stacjach naziemnych. Metoda ta pozwala na niwelowanie lokalnych zaników sygnału z satelity oraz na programowe sumowanie energii elektromagnetycznej odebranej z satelity przez wiele stacji naziemnych.

Należy zaznaczyć, że praca ma charakter interdyscyplinarny. Dotyczy zagadnień związanych z radioelektroniką pracującą w przestrzeni kosmicznej. Wymusza to na autorze

znajomości zagadnień związanych z budową urządzeń przewidzianych do pracy w kosmosie, stosowanych tam rozwiązań sprzętowych jak i programowych oraz stosownych standardów niezawodności. Zadanie komplikuje fakt, że do realizacji eksperymentów wykorzystano pasma amatorskie, wykorzystywane przez amatorów, hobbystów i studentów rzadziej pracowników naukowych. Powoduje to że dokumentacja eksperymentów częściej występuje w postaci stron internetowych, niż jako profesjonalne publikacje na konferencjach czy w periodykach. Efektem tego jest zmniejszenie wiarygodności źródeł, które należy weryfikować na drodze eksperymentalnej, bądź podpierając się teoriami zawartymi w publikacjach profesjonalnych.

Badania realizowane były na podstawie modeli programowych oraz elektronicznych systemu równoległej transmisji danych. Pojawiają się tu takie zagadnienia jak bilans łącza, korekcja błędów, system porównywania pakietów, budowa rozległej sieci komputerowej przy zachowaniu dużej dostępności oraz bezpieczeństwa danych. Nie bez znaczenia jest opracowanie odpowiednich interfejsów końcowych systemu umożliwiających łatwe dodawanie kolejnych stacji naziemnych do systemu przy zachowaniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa autoryzacji użytkowników oraz utajniania danych. Kolejnym aspektem jest opracowanie mechanizmów zarządzania taką siecią, a w szczególności automatycznego podziału jej zasobów pomiędzy klientów w sieci. Podsumowując, prace dotyczą dziedziny radiokomunikacji, realizowane są jako system informatyczny, a wdrożone zostały jako system telekomunikacyjny.

1.1. Teza i cele pracy.

Praca ma charakter teoretyczny z rozbudowaną częścią doświadczalno-eksperymentalną weryfikującą przedstawione teorie. Teza rozprawy brzmi:

Wykorzystanie systemu rozproszonego odbioru zbudowanego ze stacji naziemnych małej mocy umożliwia poprawę jakości transmisji satelitarnej.

Tak sformułowana teza rozprawy wymaga wytyczenia następujących celów:

1. Analizy teoretycznej parametrów stosowanej komunikacji satelitarnej w systemach małej mocy. W szczególności stosowanych modulacji, protokołów transmisji, budowy segmentów kosmicznych i naziemnych. Wykazania wad tych systemów.

2. Zaproponowania zmian w stosowanych systemach komunikacji kosmicznej poprawiających ich wydajność.
3. Przeprowadzenia analizy teoretycznej działania systemów po wprowadzeniu zaproponowanych zmian.
4. Przeprowadzenia badań eksperymentalnych potwierdzających słuszność stosowania proponowanych teorii.

1.2. Układ pracy

Praca składa się z sześciu rozdziałów.

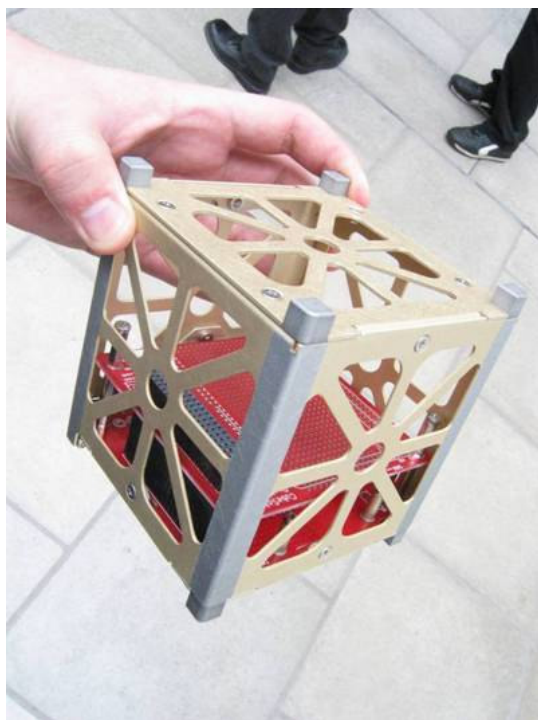
1. *Wstęp*. W części tej przedstawiono tezę i cele pracy. Omówiony układ pracy.
2. *Przegląd stosowanych rozwiązań*. W punkcie tym szczegółowo omówiono zagadnienie komunikacji kosmicznej. Przedstawiono budowę stacji naziemnej oraz sekcji kosmicznej. Przedstawiono aktualnie stosowane rozwiązania w radiokomunikacji kosmicznej oraz prace związane z najnowszymi proponowanymi rozwiązaniami. Pokazano także prace z innych dziedzin powiązane z koncepcją rozproszonego odbioru.
3. *Koncepcja Rozproszonej Stacji Naziemnej (DGSS)*. W punkcie tym przedstawiono propozycję autora dotyczącą realizacji komunikacji kosmicznej poprzez budowę Rozproszonej Stacji Naziemnej. Przedstawiono architekturę systemów, algorytmy zapewniające poprawę jakości kanału transmisji (w szczególności system porównywania pakietów) oraz zwiększające czas dostępu do satelity, środowisko programowe utrzymania systemu, narzędzia oraz programowe systemy diagnostyczne.
4. *Analiza teoretyczna zagadnienia*. Punkt ten dotyczy analizy teoretycznej zagadnienia. Zaproponowano metodę obliczeniową służącą do modelowania Rozproszonej Stacji Naziemnej, a w szczególności bilans energetyczny rozproszonego łącza radiowego. Przedstawiono oryginalne narzędzie obliczeniowe (Distributed Ground Station System Calculator).
5. *Weryfikacja doświadczalna koncepcji*. W punkcie piątym pracy przedstawiono eksperymenty zrealizowane w ramach prac badawczych. W szczególności opisano eksperymenty realizowane podczas lotów balonów stratosferycznych. Przedstawiono misje balonowe z serii BOBAS oraz ich elektroniczne systemy telemetryczne. Kolejne opisane eksperymenty dotyczą elektronicznego modelu laboratoryjnego systemu

rozproszonego łącza radiowego. Omówiono otrzymane wyniki i porównano je z modelem matematycznym RSN.

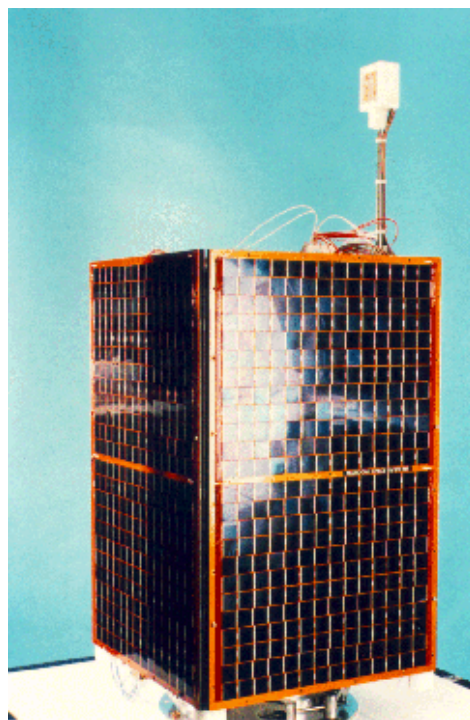
6. *Wnioski końcowe i podsumowanie.* W ostatnim punkcie przeprowadzono dyskusję uzasadniająca poprawność postawionej w rozdziale pierwszym tezy. Przedstawiono także problemy, jakie pojawiły się podczas realizacji pracy, propozycje wdrożenia oraz możliwe kierunki dalszych prac badawczych.

2. PRZEGLĄD STOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ.

Systemy komunikacji małej mocy stosowane w komunikacji satelitarnej to zwykle systemy małych satelitów realizujących eksperymenty w ramach uczelnianych programów badawczych ([01], [11]). Są to satelity w standardzie Cubesat (Rys. 1, do jednego kg) albo Microsat (Rys. 2, do 100kg). W celu obniżenia kosztów do komunikacji pomiędzy stacją naziemną a satelitą stosuje się pasma amatorskie oraz sprawdzone poprzez radioamatorów rozwiązania techniczne. Z tego powodu w analizie teoretycznej, autor skupia się na tego typu komunikacji, choć przedstawione rozwiązania mogą być również skalowane na systemy profesjonalne.



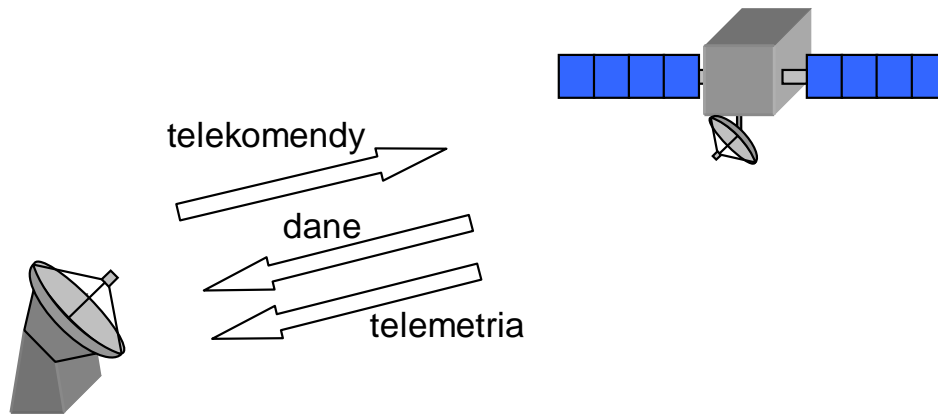
Rys. 1. Satelita typu Cubesat.



Rys. 2. Satelita typu Microsat.

2.1. Przegląd rozwiązań stosowanych w klasycznej komunikacji kosmicznej.

Klasyczny system komunikacji Ziemia – satelita – Ziemia składa się z systemu telemetrycznego na satelicie, łącza radiowego oraz systemu komunikacyjnego na Ziemi [13] (Rys. 3).



Rys. 3. Łączności między satelitą a segmentem naziemnym.

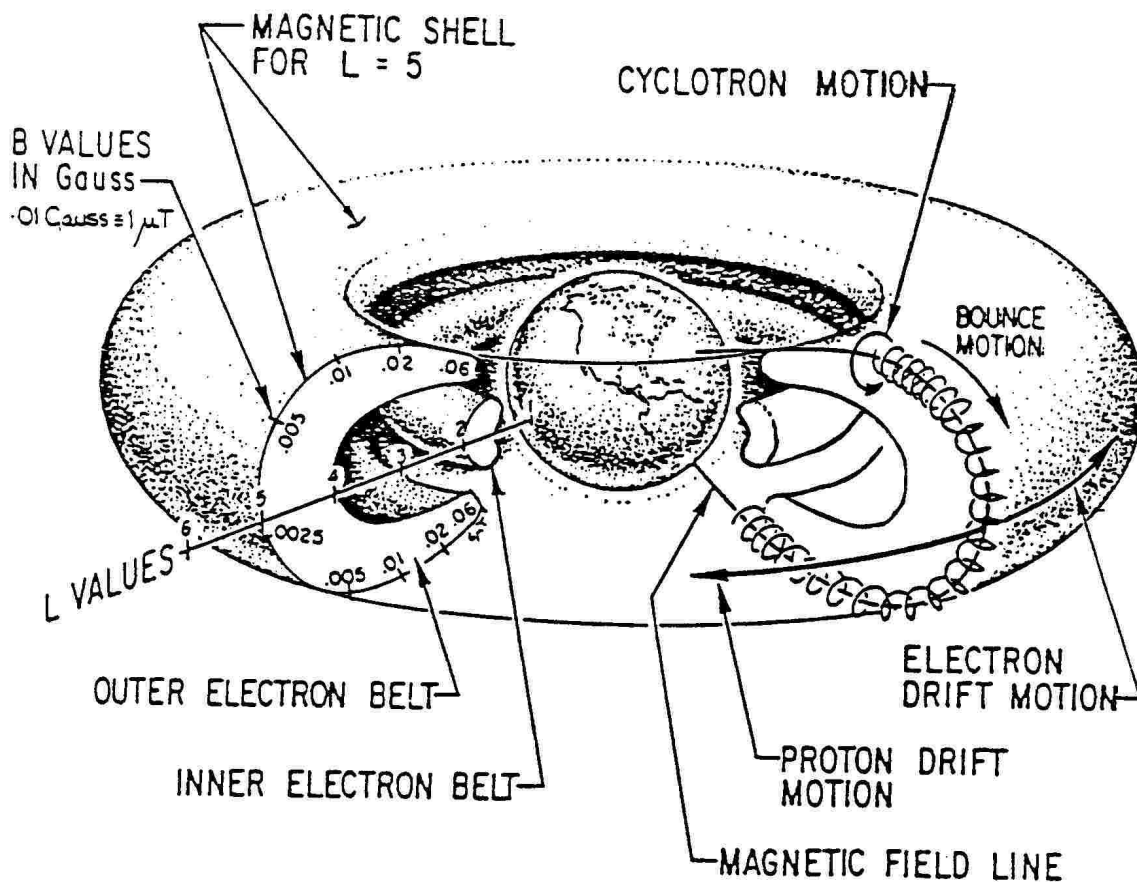
2.1.1. Segment kosmiczny.

Satelita kosmiczny jest dość specyficznym urządzeniem. Pracuje w bardzo niekorzystnych warunkach środowiskowych takich jak próżnia, mikrogravitacja, czy promieniowanie kosmiczne ([14] - [16]). Musi znieść przeciążenia związane z wyniesieniem na orbitę. Stosowane w satelitach elementy elektroniczne optymalizowane są w celu zwiększenia odporności na promieniowanie kosmiczne, niezawodności działania (uszkodzenia w kosmosie są zwykle nienaprawialne, [17] - [21]) i minimalizacji zużycia prądu ze względu na ograniczone zasoby pochodzące z ogniw słonecznych, baterii, bądź generatorów na materiały promieniotwórcze.

Istotnym parametrem satelity ze względu na komunikację jest jego orbita. Istnieje wiele rodzajów orbit, ale w pracy autor posłuży się podziałem najprostszym, czyli ze względu na odległość:

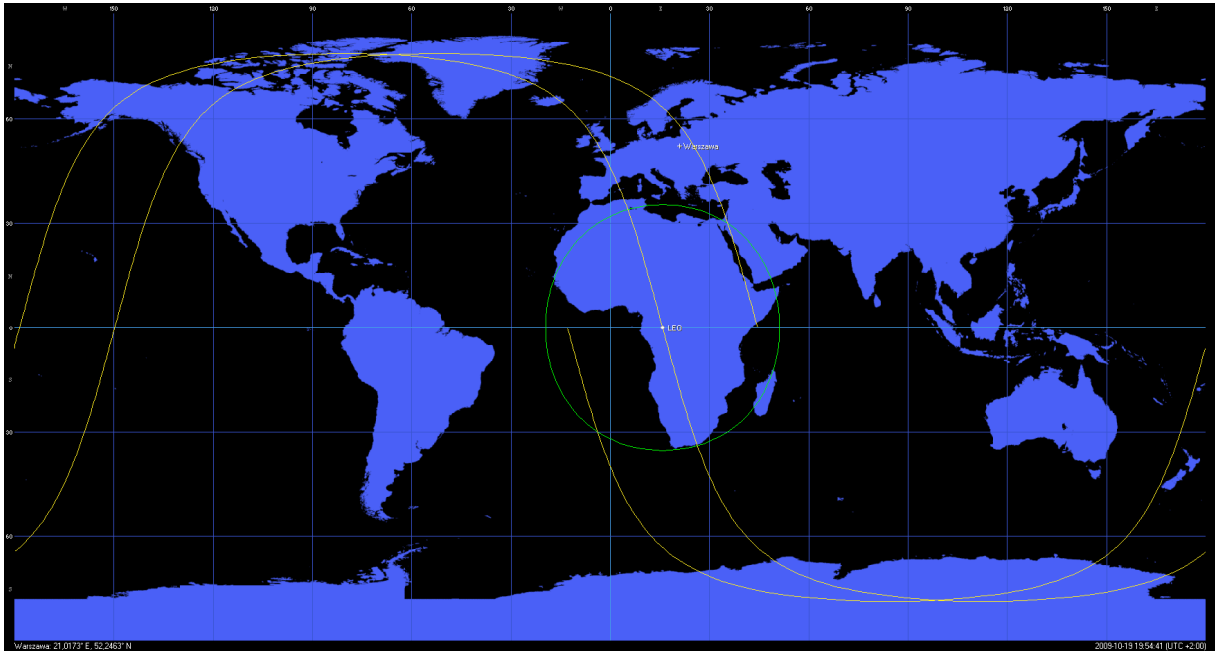
- LEO – orbita bliska Ziemi (100 – 2000 km od powierzchni Ziemi);
- MEO – orbita średnio oddalona od Ziemi (2000 – 30000 km);
- GEO – orbita geosynchroniczna (w szczególności geostacjonarna, 36000 km);
- HEO – wysoka orbita paraboliczna (perygeum około 500km, apogeum około 40000 km);
- DS – głęboki kosmos, orbity międzyplanetarne (większe od 40000 km).

Orbita LEO charakteryzuje się najmniejszymi wymaganiami w zakresie elektroniki satelity. Znajduje się ona poniżej pasów Van Allena ([16], Rys. 4), dzięki czemu satelita jest dużo mniej narażony na promieniowanie kosmiczne.



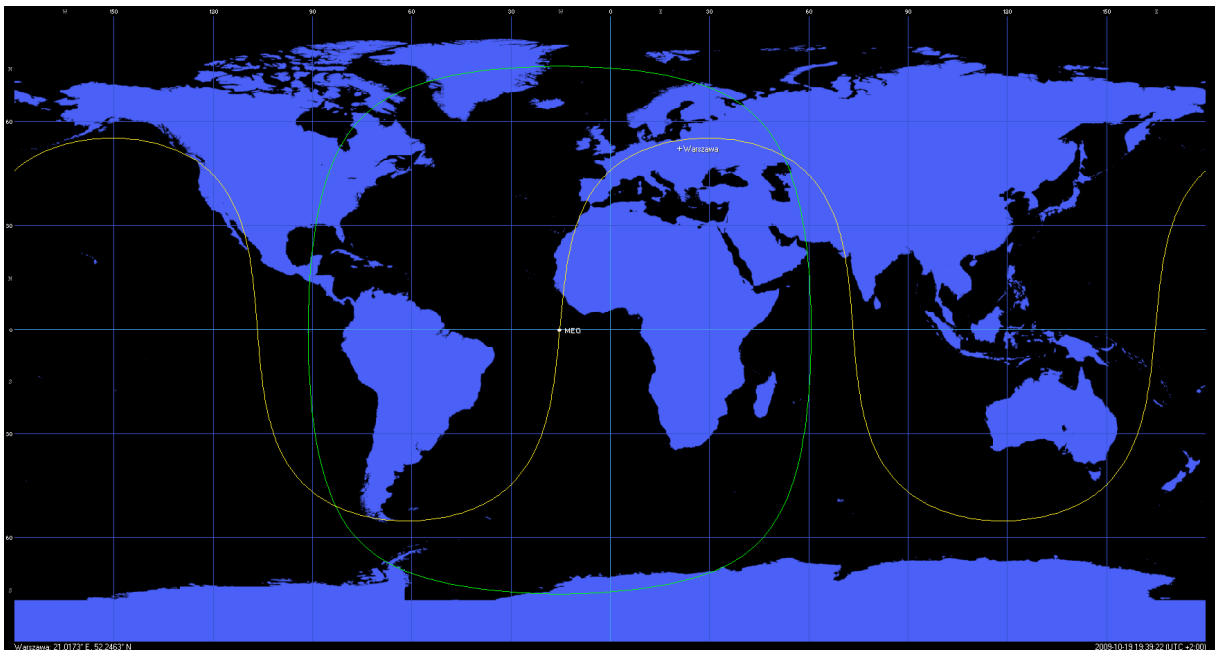
Rys. 4. Pasy Van Allen'a.

Niewielkie też są odległości pomiędzy satelitą a stacją naziemną. Orbita LEO jest najbardziej popularna w tanich misjach, ze względu na najniższy koszt wyniesienia satelity na orbitę. Wadami takiej orbity jest mała dostępność satelity dla stacji naziemnej wynosząca średnio (w zależności od orbity satelity oraz położenia stacji naziemnej) około 10% doby oraz duża prędkość satelity względem powierzchni Ziemi wymuszająca stosowanie systemów antenowych śledzących położenie satelity. Wady te wynikają ze stosunkowo niskiego położenia satelity nad Ziemią. Skutkiem tego jest mały widnokrąg radiowy (Rys. 5), który w połączeniu z krótkim czasem obiegu satelity wokół Ziemi (około 90 minut), dla stacji naziemnej położonej w Polsce daje około trzech – czterech przelotów nad stacją naziemną w ciągu doby ze średnim czasem komunikacji podczas jednego przelotu około 10 minut.



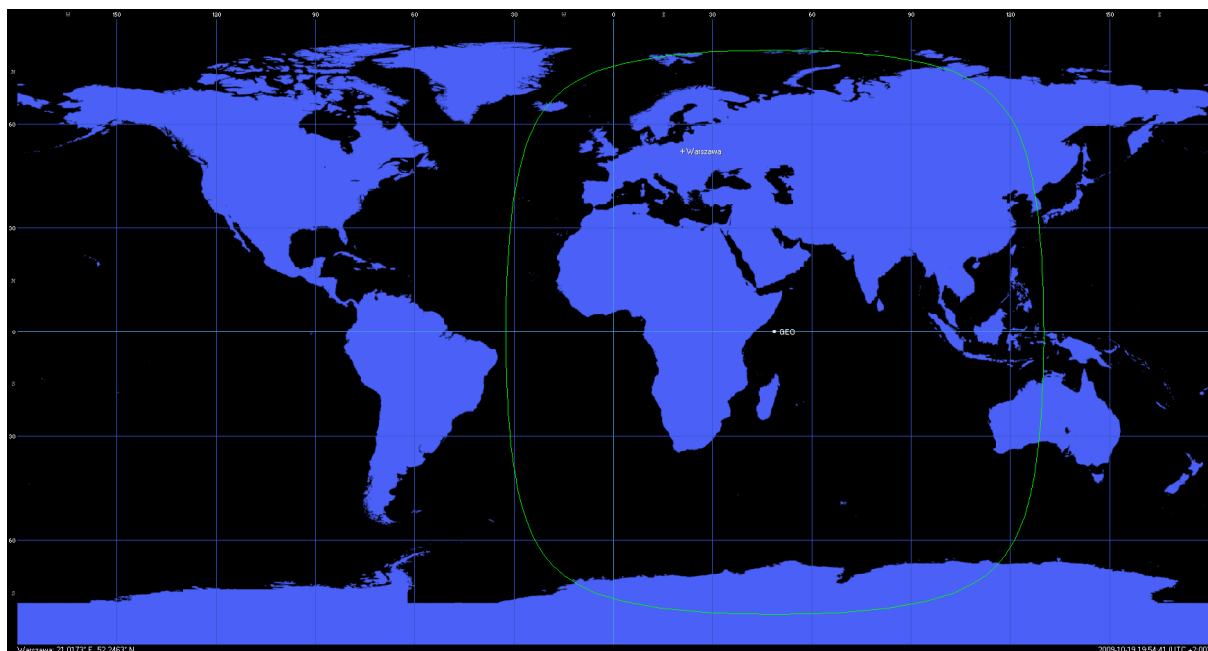
Rys. 5. Chwilowy widok z orbity $h = 600\text{km}$.

Orbita typu MEO jest bardzo rzadko wykorzystywana. Występują na niej jedynie satelity typu GPS. Jej niska popularność wynika z przecinania przez nią pasów Van Allen'a, w których występuje duże natężenie promieniowania kosmicznego. Wymusza to wykorzystanie najbardziej odpornych systemów elektronicznych, co oznacza ich najwyższą cenę. Zaletami tej orbity jest stosunkowy duży horyzont radiowy przy jeszcze niedużej odległości od powierzchni Ziemi (Rys. 6).



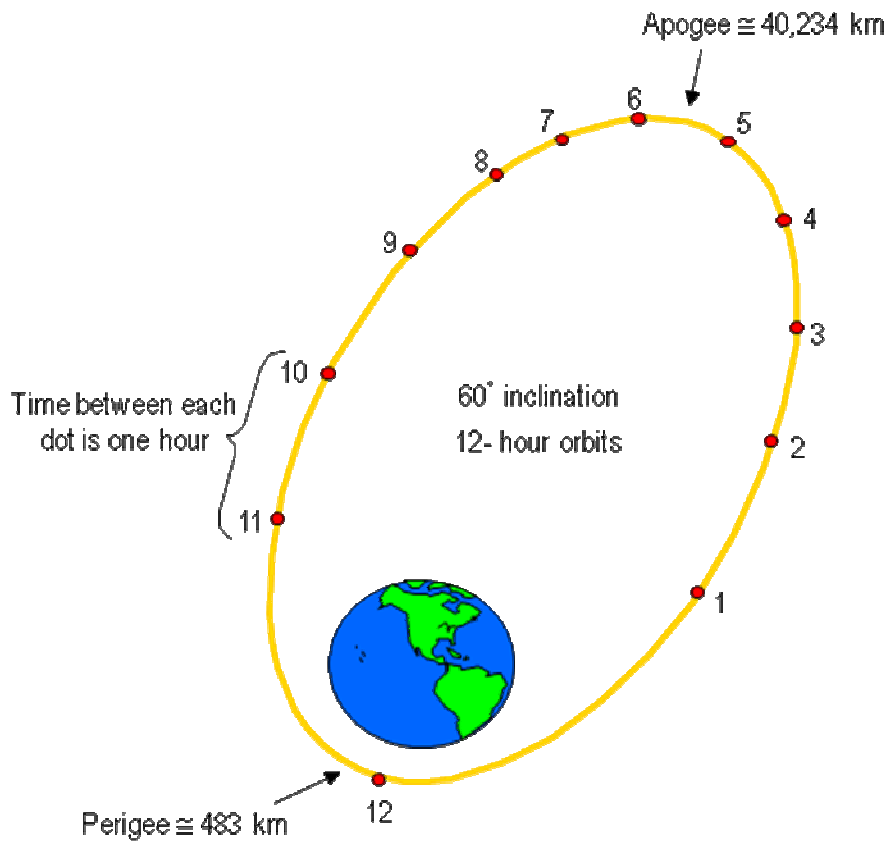
Rys. 6. Chwilowy widok z orbity MEO, $h = 20000\text{km}$.

Orbita GEO (w szczególności geostacjonarna) jest bardzo popularna w zastosowaniach profesjonalnych/komercyjnych. Charakteryzuje się pełną synchronizacją obrotu satelity wraz z obrotem Ziemi. Satelita pozornie wisi w jednym punkcie nad powierzchnią Ziemi. Umożliwia to stosowanie anten bez systemu śledzenia. Orbita GEO charakteryzuje się również dużym horyzontem radiowym (Rys. 7). Stacja znajdująca się w zasięgu horyzontu radiowego ma ciągły dostęp do satelity. Wadami tej orbity są duża odległość od powierzchni Ziemi, konieczność stosowania kilku satelitów do zapewnienia komunikacji globalnej (ponieważ satelita nie przesuwa się względem Ziemi) oraz problemy z zapewnieniem łączności w okolicy biegunów Ziemi.

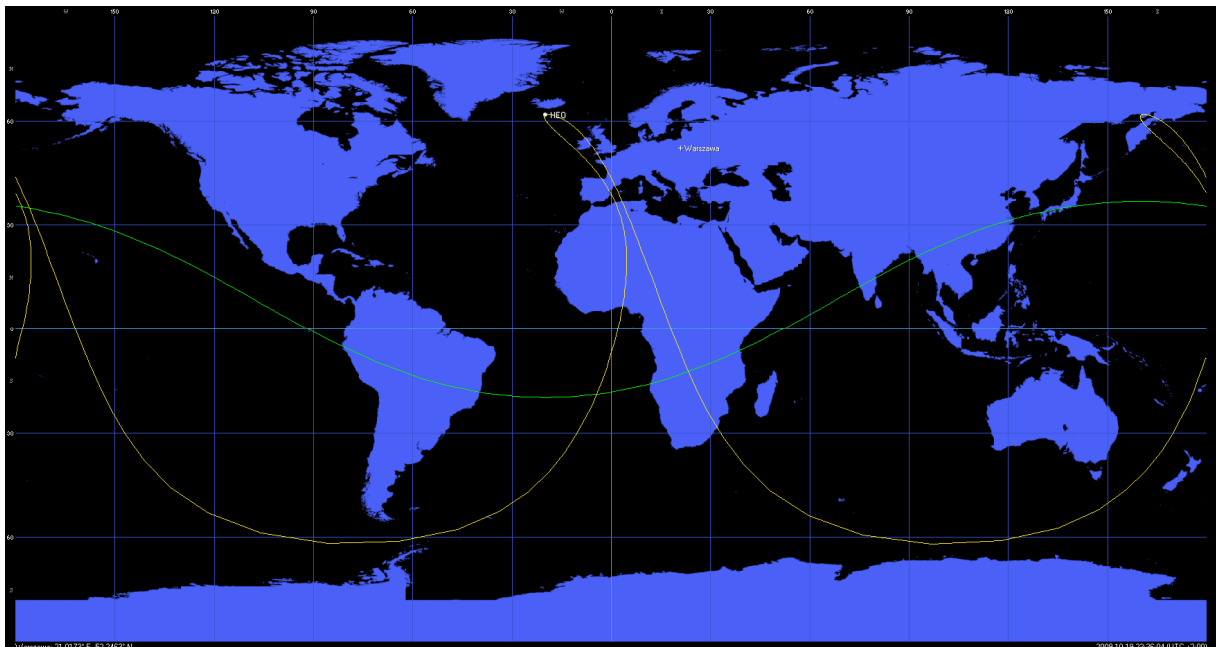


Rys. 7. Chwilowy widok z orbity GEO.

Odpowiedzią na problemy orbity GEO z komunikacją w okolicy biegunów Ziemi jest orbita HEO. Jest to orbita paraboliczna, która umożliwia dostęp do satelity przez około 90% czasu obiegu wokół Ziemi (Rys. 8), zapewniając duży horyzont radiowy w okolicy biegunów planety (Rys. 9). Jej koncepcja rozwijana była głównie przez dawny Związek Radziecki, w celu zapewnienia łączności w bazach wojskowych wysuniętych daleko na północ kraju.



Rys. 8. Dwunasto godzinna orbita HEO.



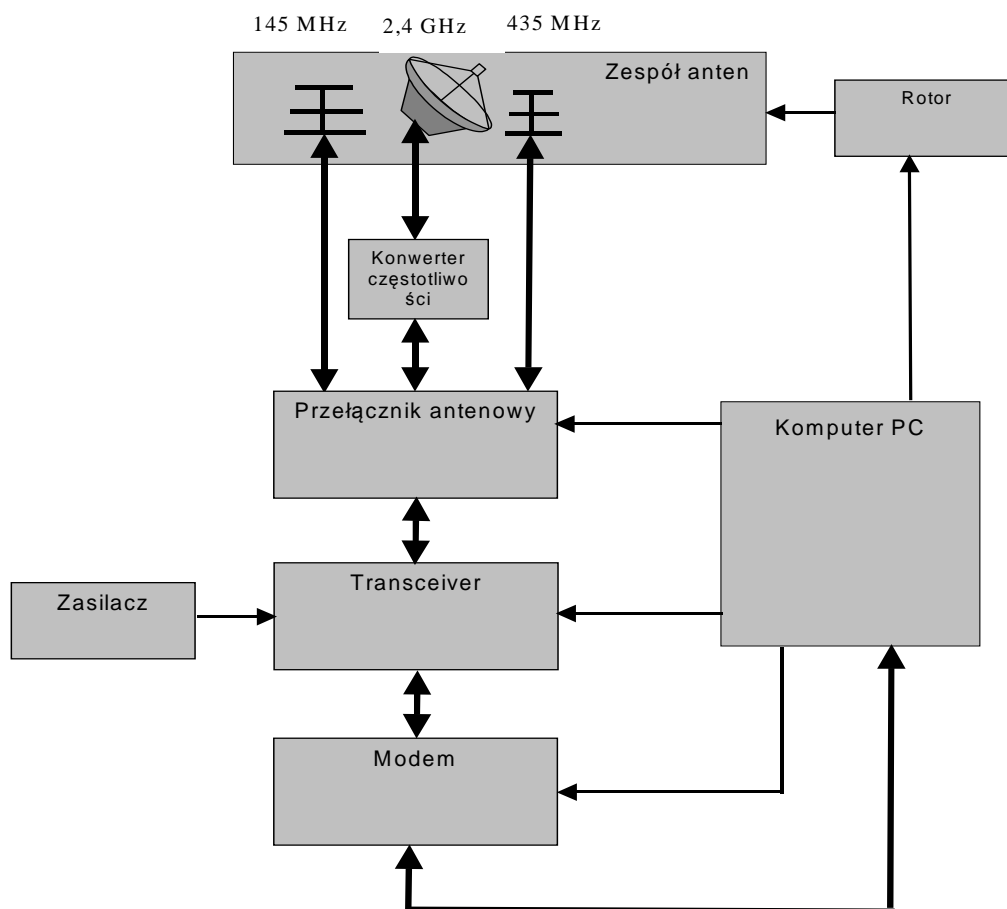
Rys. 9. Chwilowy widok z apogeum orbity HEO.

Ostatnim typem orbity jest orbita DS (głęboki kosmos) wykorzystywana w misjach międzyplanetarnych. Jej horyzont radiowy pokrywa prawie 50% obszaru Ziemi, a

przesuwanie się satelity względem powierzchni Ziemi związane jest głównie z jej obrotem. Ponieważ misje wykorzystujące te orbity odbywają się w płaszczyźnie układu słonecznego, to stacja naziemna wykorzystywana do komunikacji z satelitą (podobnie jak dla satelitów GEO) powinna znajdować się z dala od biegunów Ziemi. Do największych problemów związanych z tymi misjami należą ogromne odległości jakie pokonuje sygnał radiowy liczony nie w kilometrach, ale w minutach i godzinach jakich potrzebuje do pokonania drogi pomiędzy satelitą a Ziemią.

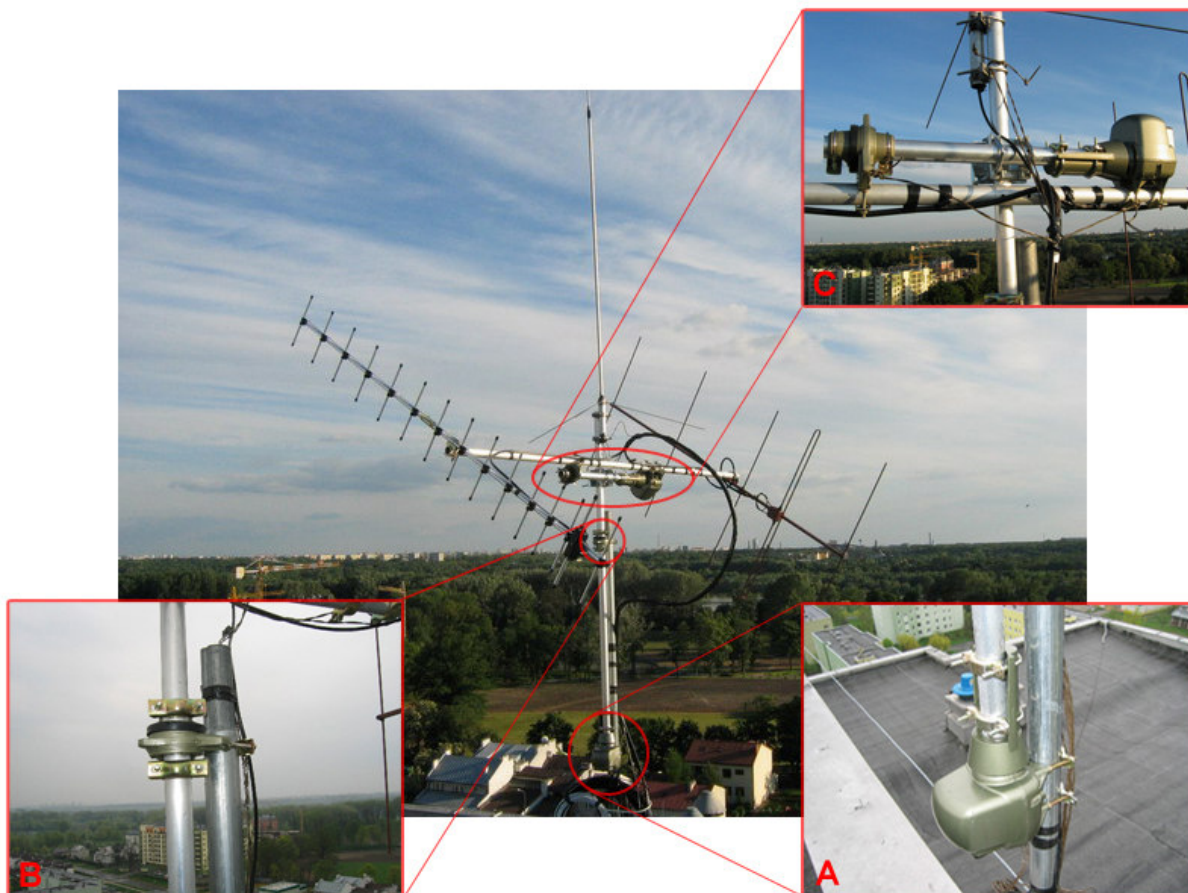
2.1.2. Segment naziemny.

Małe, niekomercyjne satelity do komunikacji zwykle wykorzystują nieodpłatne pasmo amatorskie. W paśmie tym najczęściej wykorzystywanymi częstotliwościami do komunikacji satelitarnej jest pasmo 145 MHz oraz 435 MHz. Niektóre satelity wykorzystują też dodatkowe pasmo 2.4 GHz, rzadziej 29 MHz, 1.2 GHz, 5 GHz, 10 GHz i 24 GHz. Systemy profesjonalne najczęściej wykorzystują pasma mikrofalowe typu 2 GHz, 10 GHz czy 21 GHz. Na Rys. 10 przedstawiono schemat blokowy typowej stacji naziemnej.



Rys. 10. Schemat blokowy proponowanej stacji naziemnej.

Stacja naziemna składa się z zespołu anten zainstalowanych na rotorze, linii przesyłowej, transceivera (radiostacji amatorskiej), modemu radiowego, zasilacza (zwykle 13.8V) oraz komputera PC. W rozbudowanych wersjach spotyka się dodatkowo konwertery częstotliwości, przełączniki antenowe, oraz dodatkowe modemy i transceivery.



Rys. 11. System obracania antenami zbudowany przez autora (A - rotor horyzontalny, B – łożysko oporowe, C - rotor elewacji wraz z łożyskiem).

W paśmie 145 MHz i 435 MHz najczęściej wykorzystuje się anteny typu YAGI (Rys. 11, [25], [26], [33], [42]). Dla pasma 2.4 GHz stosuje się niewielkie anteny paraboliczne. W przypadku systemów profesjonalnych stosuje się duże anteny paraboliczne (Rys. 12, [24]).

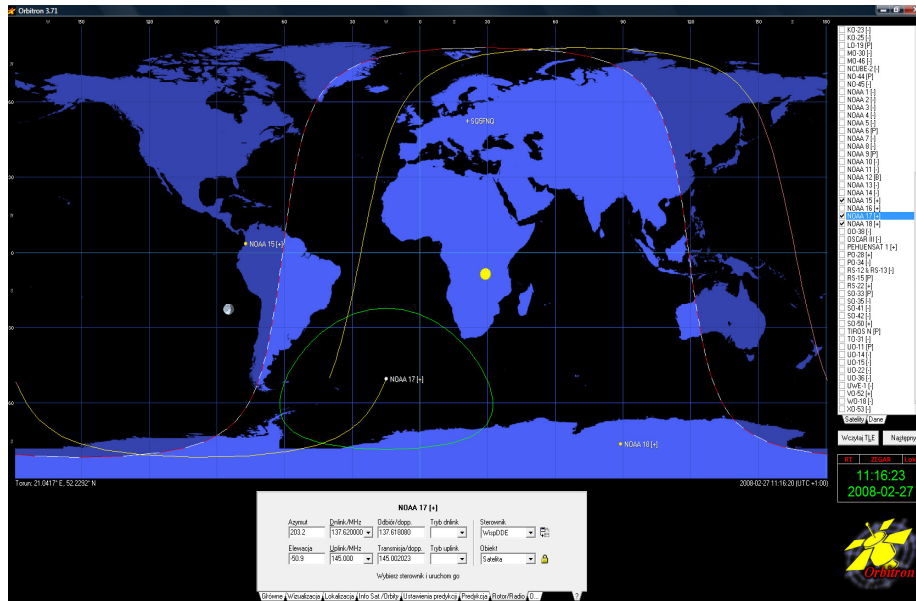
Ponieważ w większości satelity przesuwają się względem powierzchni Ziemi (jedynie satelity na orbicie GEO pozostają w spoczynku), system antenowy musi być wyposażony w system obracania anten w azymucie i elewacji. Stosuje się do tego rotory (Rys. 13), sterowane za pomocą specjalnego oprogramowania [83], które dzięki modelowi matematycznemu ([85], [89]) orbity satelity wyznacza kierunek w jakim rotor powinien ustawić anteny. Przykładem takiego oprogramowania są aplikacje Predict i Orbitron (Rys. 14, , [86], [87]).



Rys. 12. Profesjonalna stacja naziemna.



Rys. 13. Rotor anteny YAESU G5500.



Rys. 14. Aplikacja ORBITRON.

Czasami sprzęt jest upraszczany i stosuje się manualne obracanie anteny (Rys. 15).

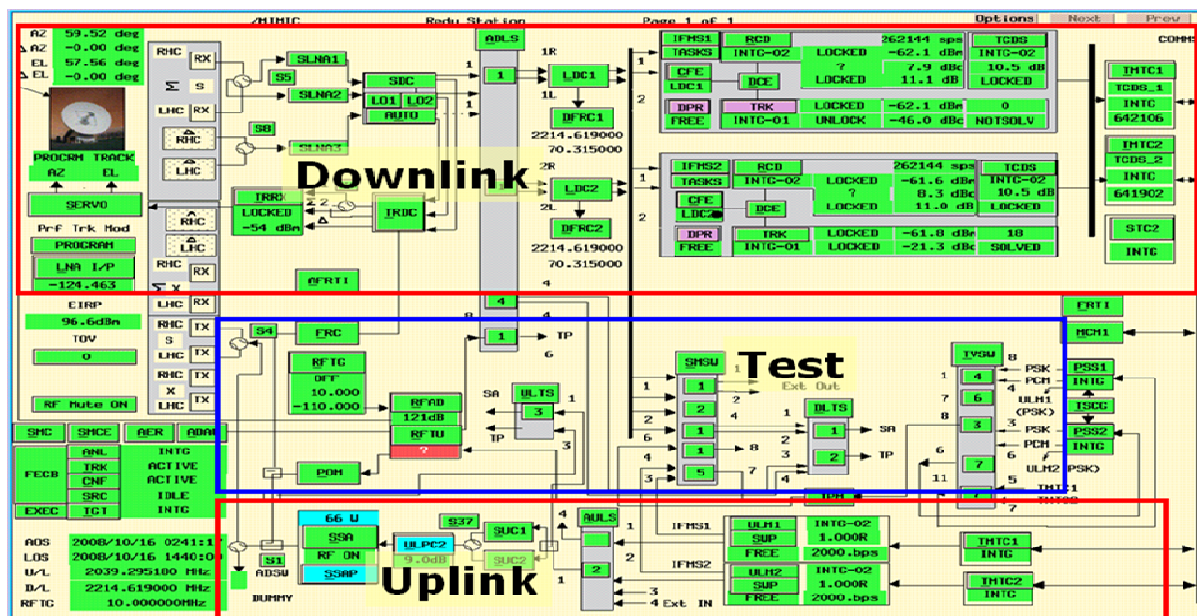


Rys. 15. Manualne obracanie anteny.

Kolejną częścią systemu jest transceiver. W zastosowaniach komercyjnych stosuje się wyspecjalizowane systemy spełniające normy ECSS bądź dedykowane urządzenia produkowane przez twórców satelity. W pasmach amatorskich wykorzystuje się standardowe urządzenia komunikacyjne, bądź ich wyspecjalizowane do pracy satelitarnej wersje.

Na Rys. 16 przedstawiono typową budowę profesjonalnej stacji naziemnej [28]. W odróżnieniu od systemów radioamatorskich system ten nie stanowi jednego urządzenia a wiele oddzielnych modułów takich jak konwertery częstotliwości, wzmacniacze mocy, generatory funkcji. Największą różnicę stanowi podłączenie modemu modulującego. W systemach amatorskich modemy podłączone są do toru audio transceivera. W systemie

profesjonalnym modem podłącza się do pośredniej częstotliwości 70 MHz która jest standardem w tego typu rozwiązaniach.



Rys. 16. Budowa systemu radiowego profesjonalnej stacji naziemnej.

Przykładem wyspecjalizowanego urządzenia radioamatorskiego jest transceiver ICOM IC-910 (Rys. 17, [84]). Urządzenie tego typu posiada specjalny tryb pracy satelitarnej. Charakteryzuje się on jednoczesną pracą dwukierunkowa (ang. duplex) oraz mechanizmami kompensującymi efekt Dopplera [22] występujący w komunikacji satelitarnej. Dodatkowo urządzenie można podłączyć do komputera, aby zautomatyzować proces odbioru i korekcji częstotliwości przy wykorzystaniu modelu matematycznego orbity satelity.

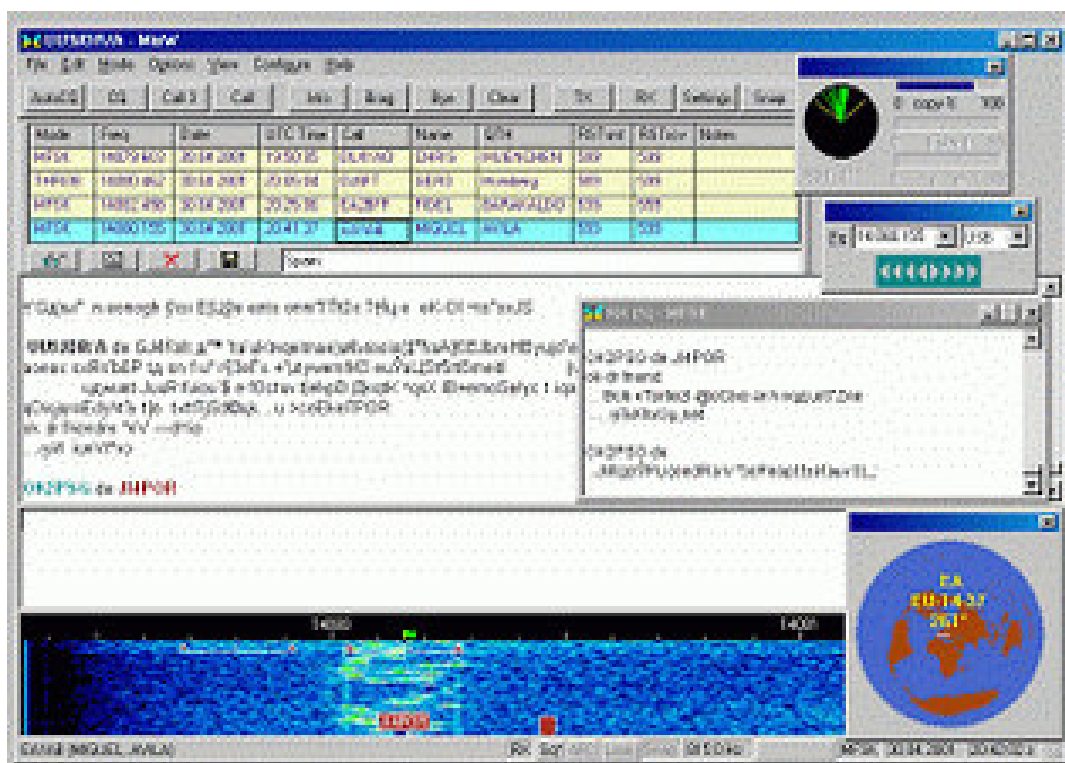


Rys. 17. Radio ICOM IC-910.

Zdemodulowany sygnał trafia do kolejnego segmentu systemu jakim jest modem. Ma on za zadanie zamianę sygnału audio na postać zdekodowanych danych cyfrowych. Jego realizacja może być sprzętowa (np. modem Packet Radio TNC3, Rys. 18, [81]), bądź programowa przy wykorzystaniu karty muzycznej komputera oraz specjalnych aplikacji takich jak MixW (Rys. 19, [82]).



Rys. 18. Modem Packet Radio TNC3.



Rys. 19. Aplikacja MixW.

Zdekodowane dane analizowane są przez odpowiednie programy służące do zarządzania satelitą, bądź przesyłane za pomocą sieci komputerowej do centrum zarządzania misją.

2.1.3. Protokół komunikacyjny.

Prawidłowe przesyłanie danych pomiędzy satelitą a stacją naziemną wymaga użycia odpowiedniego protokołu komunikacyjnego. Rozwiązania komercyjne bazują najczęściej na normie ECSS-E-70-41A ([27]) bądź na rozwiązaniach własnych. Oparcie komunikacji o wyżej wymienioną normę gwarantuje możliwość wykorzystania profesjonalnych centrów stacji naziemnych do obsługi satelity.

W satelitach wykorzystujących pasma amatorskie stosuje się kilka różnych rozwiązań. Jednym z najprostszych jest nadawanie telemetrii za pomocą alfabetu morsa. Zaletą tego rozwiązania jest prostota systemu, niewielkie zapotrzebowanie na moc nadajnika (wystarcza 100 mW) ze względu na niewielką prędkość transmisji oraz zajmowane wąskie pasmo radiowe (około 50 Hz). Wadą jest kłopotliwy odbiór i wręcz niemożliwa jego automatyzacja (podczas odbioru operator musi kontrolować urządzenia ze względu na duży wpływ efektu Dopplera itp.). Pewną odmianą tego sposobu przesyłania telemetrii jest przesyłanie impulsów, których częstotliwość jest zależna od określonych parametrów satelity np. temperatury czy napięcia zasilania. Tryb taki wykorzystywany był np. w satelicie SSETI ESEO, który to w trybie uśpienia związanego z uszkodzeniem zasilania nie mógł uruchomić komputera pokładowego i jedynie prosta elektronika zawarta w systemie zasilania za pomocą odpowiednich impulsów przekazywała raport o dostępnym napięciu zasilania.

Zdecydowanie najbardziej rozpowszechnionym protokołem komunikacyjnym jest Packet Radio ([29], [30]). Protokół ten oparty jest o standard AX25 [93]. Na Rys. 20 i Rys. 21 przedstawiono strukturę ramki. W polu adres zamiast adresów sprzętowych MAC wpisywane są znaki krótkofalarskie (np. SQ5FNQ), bądź nazwy usług sieciowych (np. APRS).

Flag	Address	Control	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 Bits	8/16 Bits	N*8 Bits	16 Bits	01111110

Rys. 20. Struktura ramki U (nienumerowanej) oraz S (nadzorczej).

Flag	Address	Control	PID	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 Bits	8/16 Bits	8 Bits	N*8 Bits	16 Bits	01111110

Rys. 21. Struktura ramki I (informacyjnej).

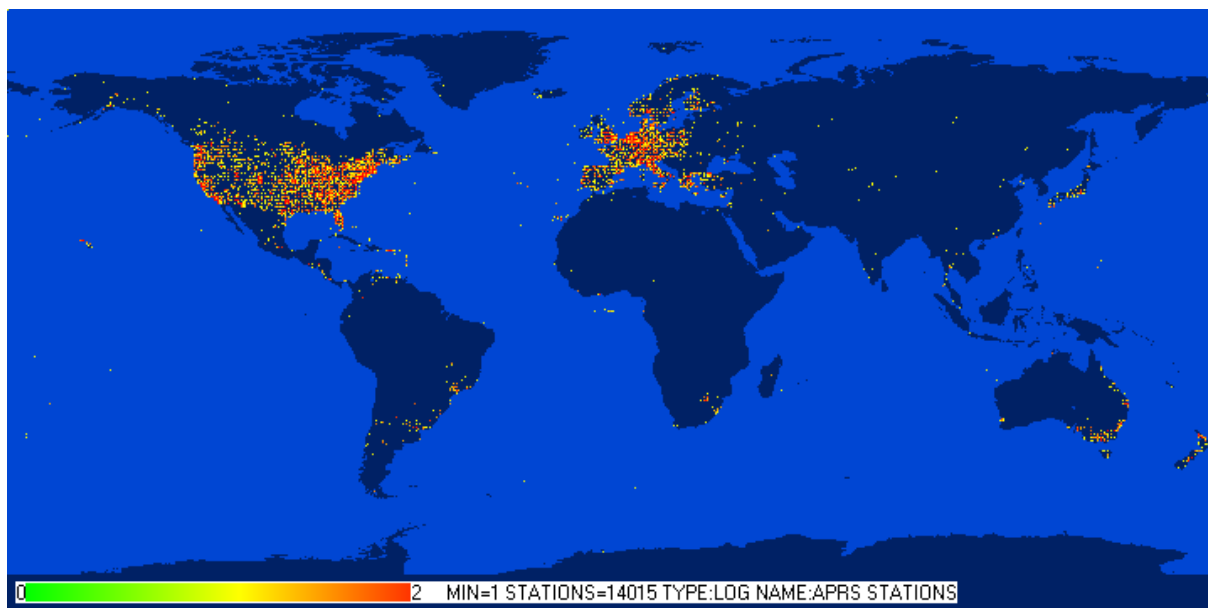
Protokół ten pozwala na przesyłanie danych w trybie połączeniowym (np. BBS) bądź bezpołączeniowym (np. APRS). Pozwala też na inkapsulację wyższych protokołów takich jak TCP/IP czy APRS. Ramki z danymi tworzone są przez kontroler zwany TNC, a następnie w postaci binarnej NRZ podawane na modem modulujący sygnał audio.

Do przesyłania danych za pomocą Packet Radio w komunikacji kosmicznej wykorzystuje się kilka rodzajów modulacji. Najbardziej popularna jest modulacja 1200 AFSK, ale można też spotkać modulację 9600 FSK G3RUH, 38400 FSK G3RUH czy 1200 PSK. Protokół Packet Radio 1200 AFSK został stworzony w celu umożliwienia przesyłania danych cyfrowych za pomocą urządzeń przeznaczonych do przesyłania głosu ludzkiego. Uzyskuje się dużą skuteczność przesyłania danych, choć przy dość niskiej prędkości jaką jest 1200 bps. Do przesyłania danych binarnych wykorzystuje się dwie podnośnie (0 – 1200 Hz i 1 – 2200 Hz), które następnie wprowadzane są w normalny tor audio nadajnika FM. Funkcję tą realizuje np. układ FX614 firmy CML Semiconductor [100]. Obecnie technika cyfrowa poszła na przód i powszechniej używa się modulacji cyfrowych do przesyłania głosu ludzkiego. Dostępne są scalone jednoukładowe transceivery, które niewielkim kosztem pozwalają na przesyłanie danych cyfrowych z większymi prędkościami. Za przykład może tu posłużyć układ CC1000 firmy CHIPCON [99], który umożliwia pracę z modulacją FSK z prędkością do 76800 bps. Łatwość implementacji tych układów powoduje, że są one stosowane w technice kosmicznej (zwłaszcza w Cubesat-ach). Niestety nie są one dostosowane do pracy z modulacją 1200 AFSK, co powoduje, że albo realizuje się tę modulację przy pomocy specjalnych funkcji programowych, albo transmituje się dane w trybie 1200 FSK, co uniemożliwia ich zdekodowanie na urządzeniach przeznaczonych do pracy 1200 AFSK.

2.1.4. System APRS.

Jednym z protokołów, który może być inkapsulowany przez Packet Radio, jest protokół APRS (Automatic Position Reporting System, System Automatycznego Raportowania Pozycji, [90] - [95]). System ten został zaprojektowany przez Boba Bruninga do przesyłania informacji o swoim położeniu pomiędzy radioamatorami. Jest on optymalizowany na stacje poruszające się, aby można było na bieżąco obserwować na mapie, gdzie się one znajdują. Z czasem sieć stacji APRS rozrastała się i pojawiły się specjalizowane stacje pełniące różne role. Pierwszą z nich jest stacja WX (stacja pogodowa), która dokonuje pomiarów środowiskowych (temperatura, wilgotność, prędkość wiatru itp.), a następnie wysyła te dane w postaci ramek APRS wraz ze swoją pozycją. Drugim rodzajem specjalizowanej stacji jest

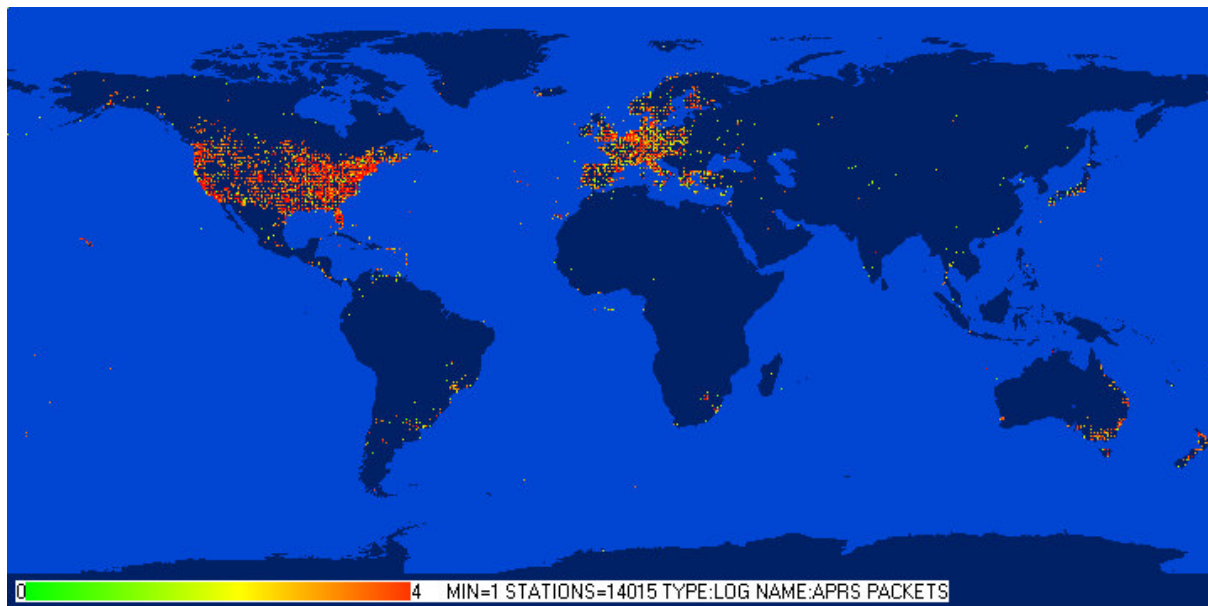
GATE (bramka), która pełni rolę przemiennika APRS. Montowana jest ona zwykle na dużej wysokości i retransmituje usłyszane ramki powiększając zasięg stacji mobilnych. Rozwinięciem stacji GATE są stacje I-GATE (bramka internetowa), które do rozsyłania danych wykorzystują sieć internetową APRS-IS. Wykorzystanie stacji I-GATE pozwala na przesyłanie danych APRS pomiędzy dowolnymi punktami na świecie. Na Rys. 22 można zobaczyć położenie około 14000 stacji APRS, które przesłały swoje położenie do sieci APRS-IS. Oznacza to, że były to stacje, które przesłały swoje położenie za pomocą połączenia radiowego do stacji I-GATE, bądź były bezpośrednio połączone z siecią APRS-IS, co znaczyło, że jeśli posiadały także łącze radiowe, mogły same pracować jako I-GATE. Aktualnie system APRS wykorzystywany jest nawet w komunikacji kosmicznej. Satelity takie jak np. ISS (International Space Station - Międzynarodowa Stacja Kosmiczna) przesyłają drogą radiową informacje o swoim położeniu, przy okazji pełniąc rolę stacji GATE. O ile sieć APRS-IS umożliwia odbieranie danych z satelitów, to niestety nie można wykorzystać jej do przesyłania danych do satelity. Przyczyną tego jest optymalizacja tej sieci do stacji naziemnych, o czym będzie mowa w dalszej części rozprawy.



Rys. 22 Pozycje stacje APRS (oraz ich liczba na 0.5 stopnia kwadratowego - skala logarytmiczna).

System APRS nie pozwala na przesyłanie dużej ilości danych, nie mniej umożliwia dość skuteczny sposób komunikowania się ze stacjami będącymi w ruchu. W ciągu tygodnia w sieci APRS-IS przepływa około 250MB danych. Na Rys. 23 można zobaczyć rozkład geograficzny, miejsc generacji tych danych. Rozkład ten pokrywa się dość równomiernie z rozkładem stacji, co oznacza, że każda stacja generuje dość podobny ruch w sieci.

Najwięcej stacji znajduje się na terenie Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej, Unii Europejskiej, Japonii oraz Australii, nie mniej pojedyncze stacje rozsiane są po całym globie ziemskim.

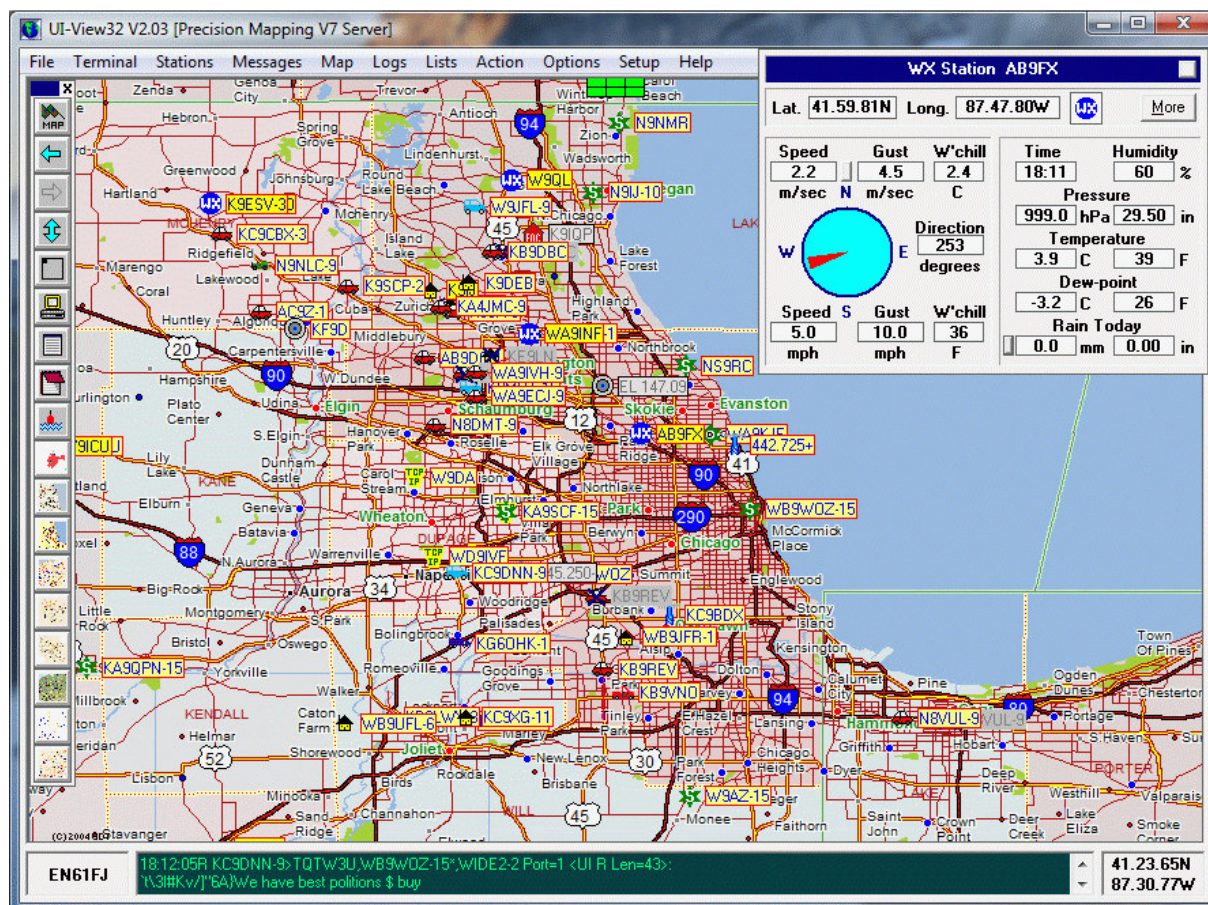


Rys. 23 Liczba przesyłanych pakietów w zależności od położenia geograficznego (skala logarytmiczna).

W systemie APRS występuje kilka rodzajów komunikatów. Pierwszy z nich zawiera położenie geograficzne stacji oraz dodatkowe informacje np. o prędkości pojazdu, w którym zainstalowana jest stacja. Drugim rodzajem pakietów jest telemetria. Jej głównym zastosowaniem jest przekazywanie informacji ze stacji pogodowych, ale mogą to być również inne dowolne dane. Trzecim rodzajem komunikatów są krótkie wiadomości. Pakiety pierwszego i drugiego rodzaju rozsyłane są rozgłoszeniowo do wszystkich węzłów sieci APRS. Liczba pakietów przesyłanych drogą radiową ograniczana jest terytorialnie ze względu na przepustowość łączy radiowych. W sieci Internet można odbierać pełny strumień danych. Wiadomości rozsyłane są w inny sposób. Są one dwóch rodzajów. Pierwszy rodzaj to biuletyny i te rozsyłane są do wszystkich stacji. Drugi rodzaj to wiadomości prywatne i te przesyłane są do wskazanego adresata. Sieć APRS wysyła takie wiadomości do retransmisji do wszystkich stacji podłączonych do sieci Internet. Jeśli któraś ze stacji słyszała stację adresata na porcie radiowym w ciągu określonego czasu (zwykle 30 min), to następuje retransmisja wiadomości za pomocą portu radiowego. Kiedy adresat odbierze wiadomość, wysyła on potwierdzenie za pomocą zwrotnie zaadresowanej wiadomości. Taki sposób transmisji nie daje 100% skuteczności, ale jest wystarczający na potrzeby radioamatorów. Jest on też wykorzystywany do komunikacji z satelitami radioamatorskimi. Ma on jednak kilka

wad. O ile system umożliwia odbiór telemetry od satelity, jeśli tylko znajduje się on w zasięgu sieci, to wysłanie wiadomości do satelity wykorzystując sieć jest praktycznie niemożliwe. Kiedy satelita znajduje się np. nad USA, jest on w zasięgu ponad 600 stacji i jeśli wszystkie stacje naraz retransmitują wiadomość do satelity (co jest związane z tym, że wszystkie słyszały satelitę w ciągu ostatnich 30 min), to nastąpi kolizja pakietów na drodze radiowej i taki pakiet nie zostanie prawidłowo odebrany. Powoduje to, że transmisja w kierunku satelity jest możliwa jedynie, gdy satelita znajduje się bezpośrednio nad macieżystą stacją naziemną.

Aby realizować funkcję stacji APRS, należy użyć odpowiedniego oprogramowania albo odpowiedniego modemu.



Rys. 24. Oprogramowanie UI-view.

Przykładem oprogramowanie APRS jest aplikacja UI-view (Rys. 24). Pozwala ona na wyświetlanie pozycji stacji na zaimportowanej mapie bitowej. Aplikacja może być podłączona do modemu Pakiet Radio, aby obsługiwać link radiowy oraz do serwera sieci APRS-IS, aby obsługiwać link internetowy. Za jej pomocą można wysyłać wiadomości do

użytkowników sieci APRS oraz obserwować ruch w sieci. Dodatkowo jeśli do aplikacji zostanie podłączony odbiornik GPS, będzie ona mogła pełnić rolę mobilnej stacji APRS. Aplikacja ta do pracy potrzebuje systemu Windows, więc używanie jej w terenie (nawet z wykorzystaniem laptopa) może być niewygodne. Rozwiązaniem są jej odpowiedniki przeznaczone na komputery PDA (palmptopy), samodzielne urządzenia realizujące funkcję terminala jak np. FOA-PACK (Rys. 25, zbudowany przez autora), Tiny Trak [80], bądź terminale wbudowane bezpośrednio w transceivery (np. w urządzeniu firmy Kenwood TH-7D).



Rys. 25. Terminal APRS FOA-PACK.

2.2. Przegląd rozwiązań stosowanych w komunikacji kosmicznej z wykorzystaniem komunikacji sieciowej.

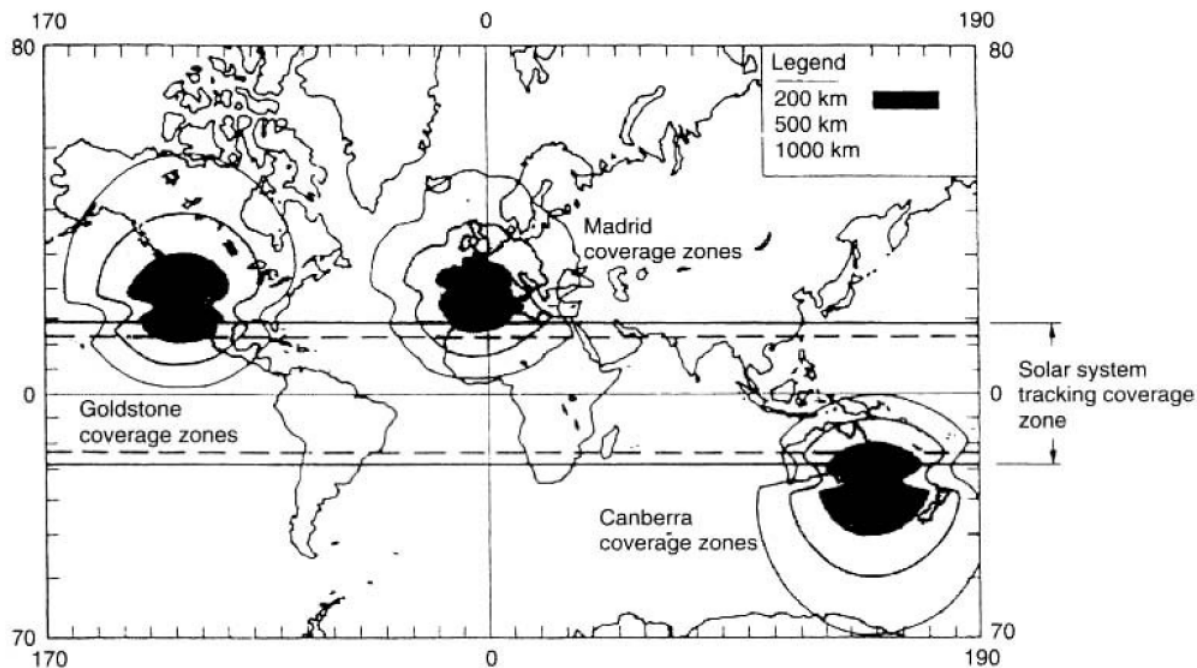
Problem z dostępem do satelity pojawił się zaraz po tym, gdy wyniesiony został w przestrzeń kosmiczną pierwszy satelita Sputnik1. Początkowo wykorzystywano pojedyncze stacje naziemne. Kiedy upowszechniła się sieć Internet, pojawiły się techniki wykorzystujące

tą sieć, aby poprawić dostęp do satelitów. W literaturze można spotkać wiele propozycji rozwiązywania tego problemu.

2.2.1. Rozwiązania komercyjne

2.2.1.1. Sieć komercyjnych stacji naziemnych.

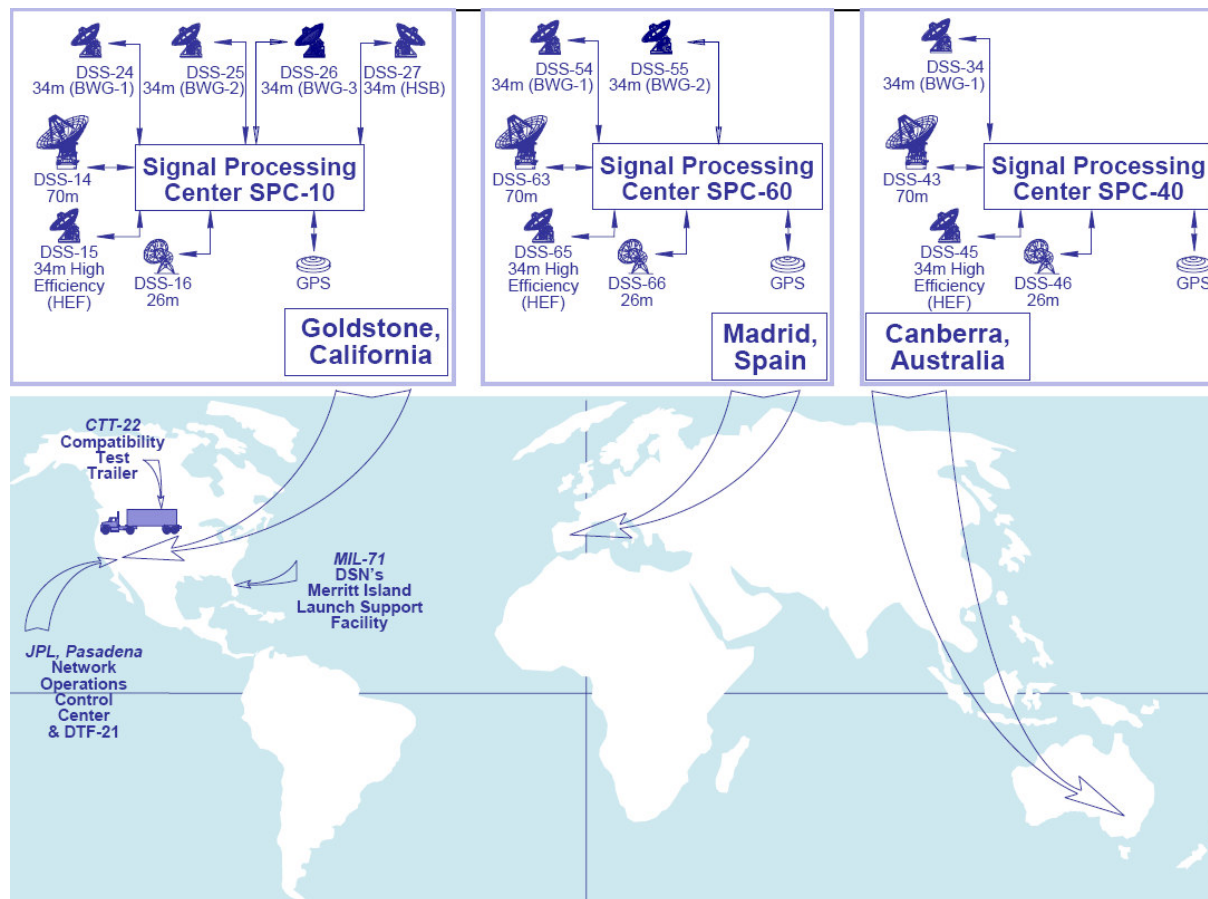
Do realizacji profesjonalnych misji wykorzystuje się profesjonalne stacje naziemne. Przykładem takich stacji mogą być stacje Goldstone, Madrid, czy Canberra (Rys. 26). Stacje te realizują prace sieciową w ramach sieci Deep Space Network (Rys. 27, [66]). System ten pozwala na utrzymanie stałej łączności z misjami międzyplanetarnymi pomimo obracania się Ziemi. Zasada działania opiera się o wykorzystanie do komunikacji systemu, który jest w zasięgu satelity, a następnie przesłanie odebranych danych do centrum zarządzania misją danego satelity poprzez sieć Internet. Przykładów podobnych systemów można znaleźć jeszcze kilka. Np. system Japońskiej Agencji Kosmicznej JAXA do zarządzania satelitami SMACS [59].



Rys. 26. Zasięg stacji profesjonalnych dla orbity LEO.

Czasami wykorzystuje się technikę zwaną „odbiorem zbiorczym” [38]. Polega ona na tym, że jeśli w danym okresie jedna stacja odczuwa silne zakłócenia, druga może być wolna od zakłóceń. Jeśli do nasłuchu wykorzystana jest kilka stacji oraz algorytm przełączania gałęzi (ang. sanning combining), możliwy jest poprawny odbiór sygnału. Rozwiązanie to jest

podobne do algorytmu minimalnego opisanego w dalszej części rozprawy. Innym możliwym scenariuszem jest sumowanie sygnału po jego wcześniejszym sfazowaniu (odbiór zbiorczy z kojarzeniem gałęzi).



Rys. 27. System Deep Space Network.

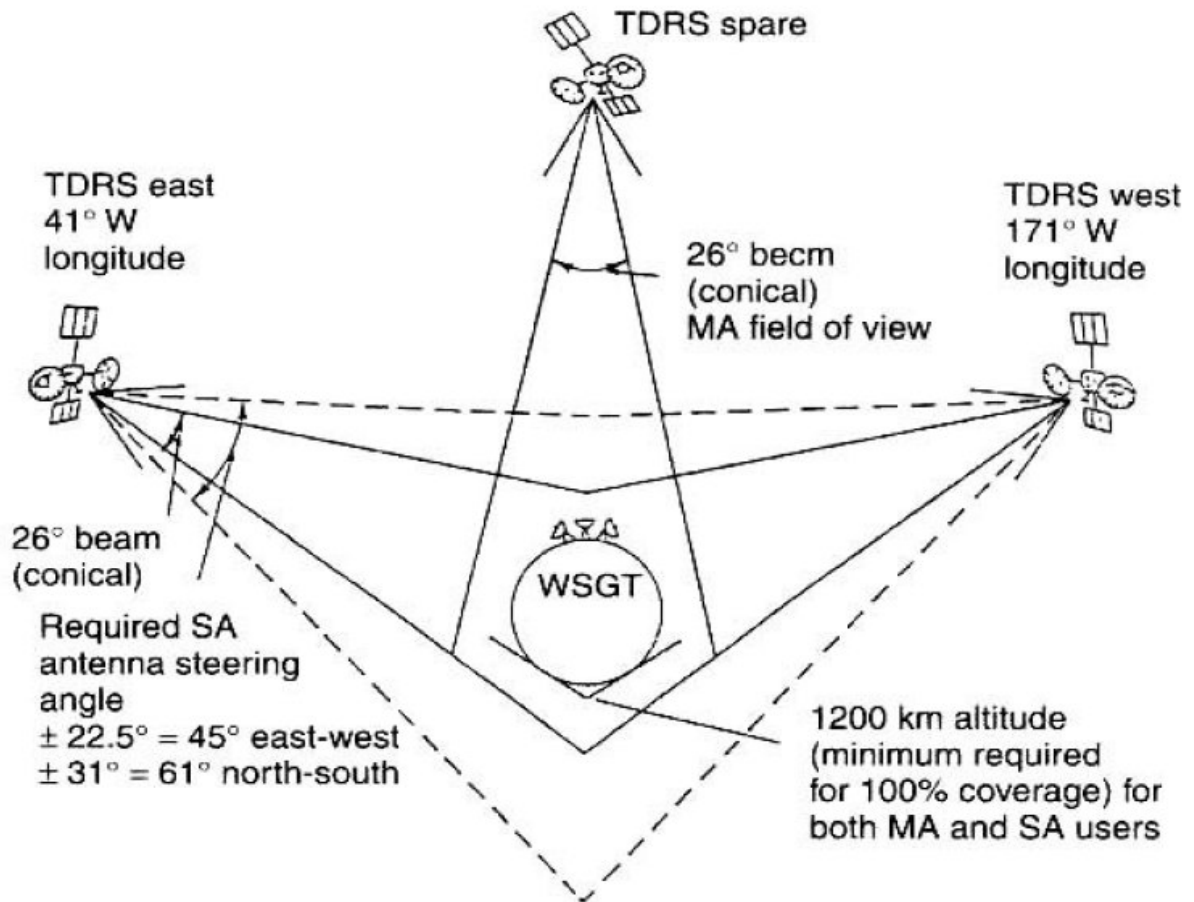
2.2.1.2. System komunikacji z Międzynarodową Stacją Kosmiczną.

Do bardzo zaawansowanych systemów sieciowej łączności satelitarnej należy system komunikacyjny Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS - Rys. 28). System ten składa się z 6 stacji naziemnych znajdujących się na obszarze dawnego Związku Radzieckiego (ZSRR), pracujących w systemie TsUP, oraz satelitów TDRS [38]. System TsUP to dość starty system. Wykorzystywany był między innymi do komunikacji z rosyjską stacją kosmiczną MIR. Pozwala on na komunikację głosową oraz telemetryczną pomiędzy satelitą a jedną stacją naziemną. W zależności od orbity wybierana jest odpowiednia stacja naziemna, a łączność pomiędzy GS a centrum kontroli zapewniają łącza naziemne. System ten pozwalał na komunikację z satelitami tylko podczas przelotów nad terytorium dawnego ZSRR.



Rys. 28. System komunikacji z Międzynarodową Stacją Kosmiczną.

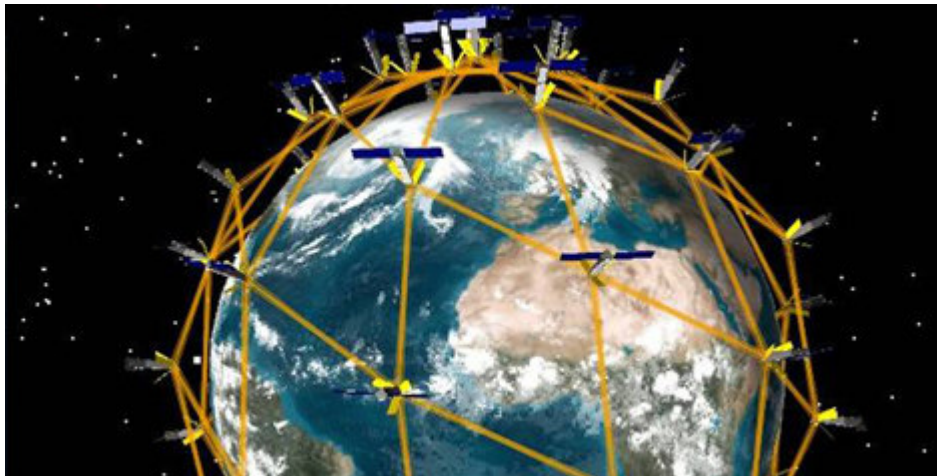
Dużo nowocześniejszym systemem komunikacji jest system TDRS. Do komunikacji wykorzystywane są trzy satelity retransmitujące dane na Ziemię (Rys. 29). Satelity są tak umieszczone w przestrzeni kosmicznej, że pozwalają na niemal 100% pokrycie orbity. Jednocześnie każdy z satelitów ma kontakt ze stacją naziemną położoną na obszarze USA. Pomiędzy stacjami naziemnymi a centrum kontroli lotu łączność realizowana jest za pomocą systemów naziemnych. System ten oprócz zapewnienia łączności na orbicie jako jedyny pozwala na łączność podczas powrotu z orbity. Kiedy realizowane jest hamowanie statku kosmicznego w atmosferze, wokół statku tworzy się warstwa zjonizowanego gazu skutecznie blokująca łączność radiową w kierunku Ziemi. Warstwa ta nie powstaje jedynie z tyłu (przeciwnego do kierunku lotu) pojazdu. Podczas powrotu promy kosmiczne tak dobierają ścieżkę podejścia, aby przez powstałą szczelinę w zjonizowanym gazie możliwa była komunikacja z jednym z satelitów TDRS, który następnie retransmituje dane na Ziemię.



Rys. 29. System TDRS.

2.2.1.3. System IRIDIUM.

Kolejnym przykładem wykorzystania sieci w systemach satelitarnych jest system telefonii satelitarnej Iridium [67].



Rys. 30. Sieć satelitów Iridium.

System ten składa się z 66 satelitów (Rys. 30) oraz czterech stacji naziemnych połączonych w jedną sieć. Satelity umieszczone są na orbicie LEO. Kiedy realizowana jest łączność pomiędzy dwoma aparatami telefonicznymi Iridium, system wysyła dane z telefonu poprzez antenę dookólna do satelity na orbicie. Dalej sygnał jest retransmitowany pomiędzy kolejnymi satelitami sieci, a następnie retransmitowany jest on do drugiego telefonu na Ziemi. Jeśli połączenie realizowane jest poza sieć Iridium, do przekazywania sygnału wykorzystywane jest jedna ze stacji naziemnych.

2.2.1.4. Systemy wiele do wielu.

Do zupełnie innej grupy można zaliczyć satelity pracujące w systemach NOAA [65] czy TriS-TAR [60]. System zakłada, że na orbicie znajduje się wiele satelitów realizujących identyczną albo podobną usługę (np. obrazowanie Ziemi). Kiedy chcemy uzyskać zdjęcie danego obszaru Ziemi wykorzystując satelitę NOAA, musimy posiadać na tym lub bliskim obszarze stację naziemną i odebrać dane obrazujące Ziemię, które są automatycznie przesyłane zaraz po ich wykonaniu. Dalej stacje naziemne przesyłają otrzymane dane łączami sieciowymi do centralnego serwera, gdzie są one udostępniane. Choć system komunikacji satelitarnej nie wykorzystuje sieci bezpośrednio, pozwala na stałe wykorzystanie łączy wielu satelitów oraz wielu stacji naziemnych.

2.2.2. Systemy komunikacji kosmicznej wykorzystujące pasma amatorskie.

Stacje naziemne wykorzystujące pasma amatorskie przechodzą swego rodzaju ewolucję. Na początku były to pojedyncze stacje naziemne przewidziane do operowania pojedynczymi satelitami. Ponieważ utrzymanie stałej obsługi stacji naziemnej przy małym budżecie jest trudne, rozpoczęto prace celem wirtualizacji stacji naziemnej.

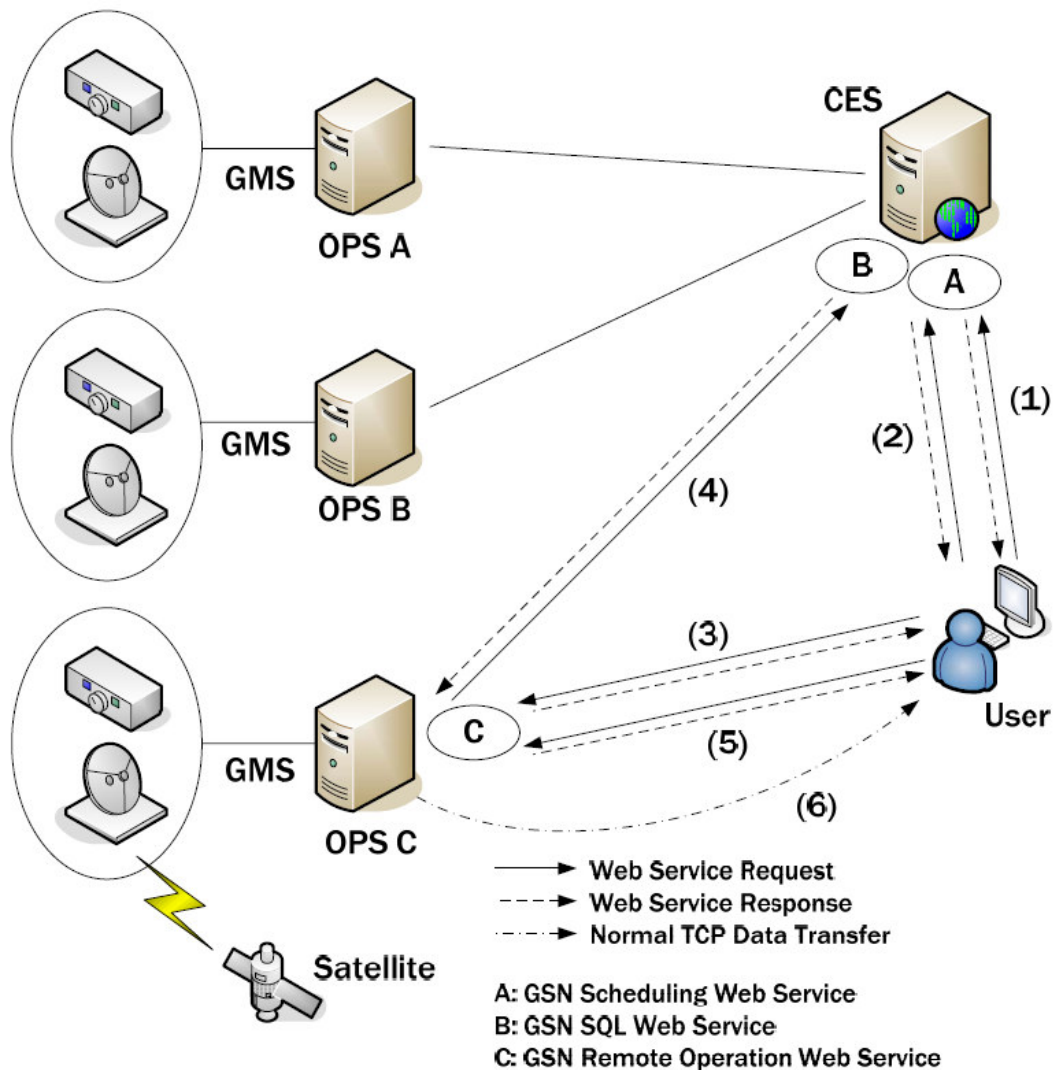
2.2.2.1. Wirtualna Stacja Naziemna.

Pierwsze próby wirtualizacji stacji naziemnej polegały na wykorzystaniu narzędzi zdalnego dostępu do komputera. Na komputerze były uruchamiane aplikacje do predykcji położenia satelitów, obracania antenami, kontroli radiotelefonów, dekodowania telemetrii odebranej z satelitów. W zależności od stosowanych systemów wykorzystywano usługi terminalowe (dla systemów Linux był to zwykle telnet, ssh) czy wirtualne pulpity (dla

systemów Windows były to zwykle wirtualne pulpity czy VNC). Wadą tego rozwiązania było to, że wymagało nadania dużych uprawnień systemowych dla zdalnego operatora, co ograniczało liczbę operatorów systemu do osób zaufanych. Kolejnym rozwinięciem tej koncepcji były systemy oparte o usługi WWW. Stacja nadal była kontrolowana za pomocą zdalnego dostępu, natomiast odebrane dane były dostępne na stronie WWW. Przykładami stacji wykorzystujących to rozwiązanie jest stacja w Alborg w Danii która obsługiwała satelitę SSETI EXPRESS oraz stacja do obsługi balona BEXUS w Kirunie w Szwecji ([61]).

2.2.2.2. System GSN.

Prawdziwe sieciowe podejście do tematu zostało zaproponowane przez zespół z Japonii ([48]-[58]). Do obsługi małych satelitów stworzono sieć stacji naziemnych na różnych uniwersytetach japońskich. System oparty jest o środowisko Windows. W jego skład wchodzi serwer centralny (CES) do zarządzania siecią, systemy operatorskie (OPS) sterujące poszczególnymi stacjami naziemnymi oraz klienci do korzystania z wirtualnych stacji naziemnych (Rys. 31). System OPS udostępnia wirtualny dostęp do stacji naziemnej, tj. włączenie stacji, obracanie antenami, ustawianie parametrów radia oraz umożliwia odbiór danych zdekodowanych w modemach radiowych. Serwer centralny kojarzy klientów stacji z systemami operatorskimi i umożliwia połączenie tylko z jedną stacją naziemną. Sieć GSN pozwoliła na znaczne zwiększenie dostępu do satelitów japońskich dzięki wykorzystaniu stacji na terenie Niemiec oraz USA. Podczas eksperymentu wykazano, że jeśli przy wykorzystaniu jednej stacji naziemnej odbiór jednego zdjęcia z satelity XV zajmował około 24h, to dzięki sieci GSN można go skrócić do 7h. System do pracy wymaga określonych rotorów oraz radia ICOM IC-910, co ogranicza jego rozwój.



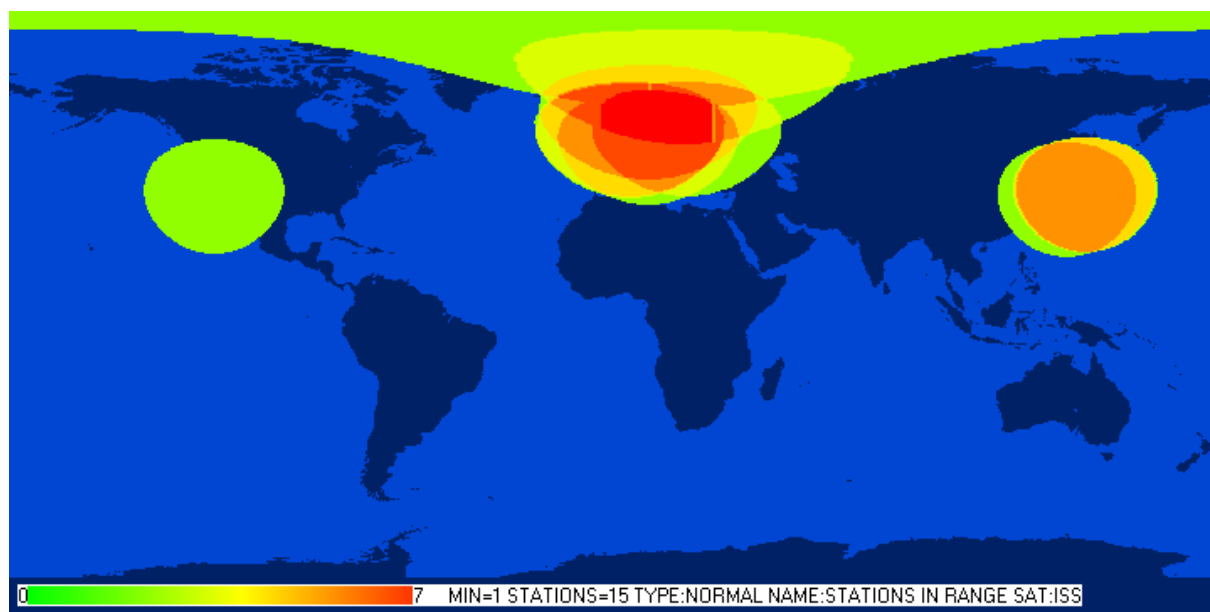
Rys. 31. Schemat Ground Station Network.

2.2.2.3. System GENSO.

Sieć GENSO ([62], [63]) to międzynarodowy projekt pod opieką Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), Japońskiej Agencji Kosmicznej (JAXA) oraz Amerykańskiej Agencji Kosmicznej (NASA). Jest rozwinięciem koncepcji GSN. Dodana została wieloplatformowość, wprowadzone uniwersalne sterowniki sprzętu (radii, rotorów, modemów). Dodano strumieniowanie sygnału audio. Serwer centralny służy do kojarzenia klientów ze stacjami naziemnymi, a dalsza transmisja odbywa się już z pominięciem serwera centralnego. Zoptymalizowano także system pod względem przepisów prawnych, tak by mogli z niego korzystać radioamatorzy. W wymaganiach systemu umieszczono także wykorzystanie wielu stacji naziemnych do korzystania z jednego satelity, ale nie jest to zaimplementowane w wersji Alfa oprogramowania (projekt jest nowy i dopiero się rozwija).

Docelowo system GENSO będzie głównym systemem współdzielenia stacji naziemnych znajdujących się na uniwersytetach oraz stacji jakimi dysponują radioamatorzy na całym świecie.

Autor aktywnie współpracuje z projektantami tej sieci. Na Rys. 1 można zobaczyć przewidywaną liczbę stacji naziemnych w zasięgu satelity ISS (Międzynarodowej Stacji Kosmicznej) wykonaną za pomocą autorskiego oprogramowania DGSS Calculator opisanego w dalszej części rozprawy.



Rys. 32. Liczba stacji w zasięgu sieci GENSO.

2.2.2.4. Systemy TCP/IP.

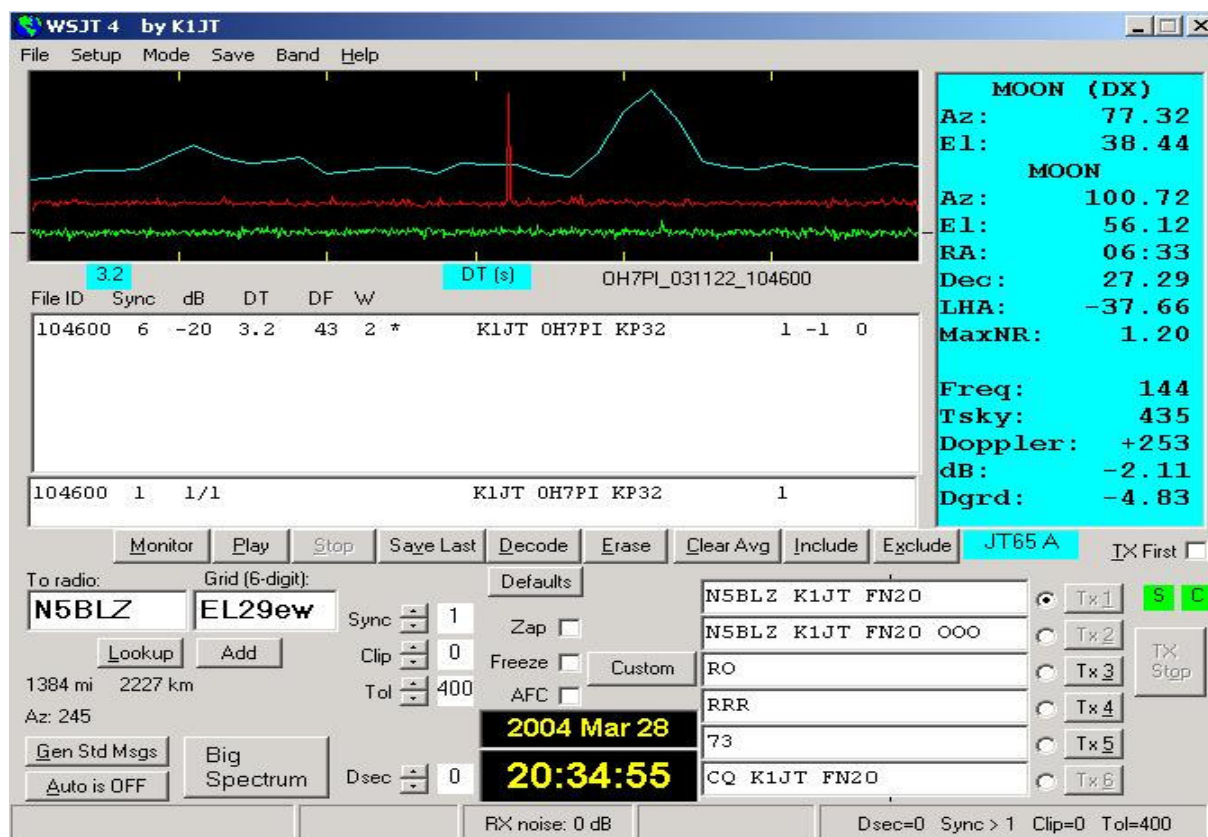
Kolejna koncepcja sieciowej komunikacji satelitarnej to sieci TCP/IP ([75] - [77]). Przykładem takiego systemu jest system CISCO [64]. System wykorzystuje możliwości mobilnego trasowania (ang. routing) sieci TCP/IP. Polega on na tym, że satelita przelatując nad kolejnymi stacjami naziemnymi dokonuje przełączenia niskopoziomowego (na 2 warstwie modelu IOSI), a sieć naziemna zapewnia utrzymanie połączenia na poziomie łącza (na 3 warstwie modelu IOSI), dzięki czemu utrzymane jest stałe połączenie z satelitą. Podobne mechanizmy wykorzystywane są w sieciach 802.11 (WiFi).

2.3. Przegląd rozwiązań stosowanych w dziedzinach pokrewnych komunikacji kosmicznej.

W poprzednim podrozdziale pokazano przykłady technik sieciowych wykorzystywanych w komunikacji satelitarnej.

2.3.1. Program WSJT.

Program WSJT [97] to radioamatorskie narzędzie do przeprowadzania łączności z odbicia od Księżyca (EME).



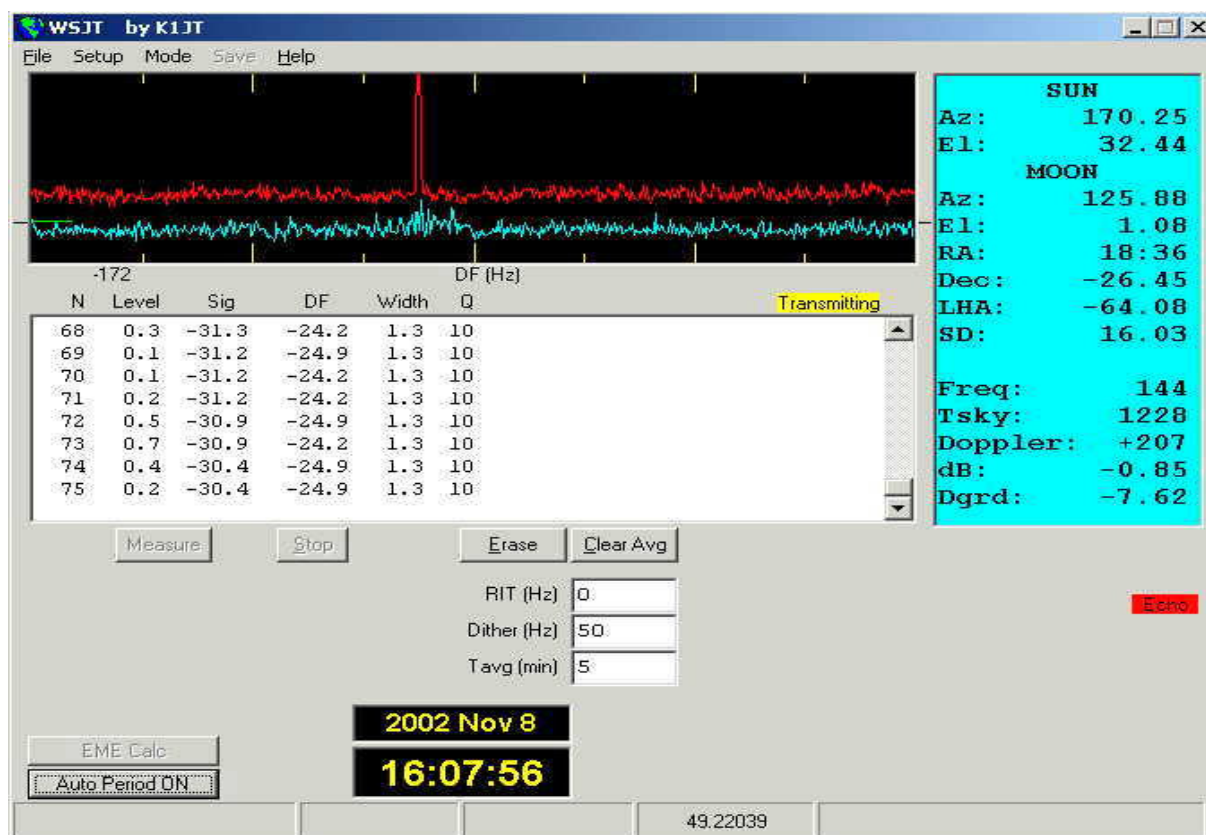
Rys. 33. WSJT tryb JT65A.

To bardzo trudna do realizacji komunikacja ze względu na bardzo duże dochodzące do 262 dB tłumienie trasy. Standardowe techniki EME wymagają silnych nadajników (około 1 kW), ogromnych zestawów antenowych, czułych przedwzmacniaczy, małostratnych przewodów. Radioamatorzy, aby zrealizować taką łączność, starają się niwelować tłumienie systemów odbiorczych uwzględniając nawet miejsca wprowadzające jedynie 0.5 dB straty. Wraz z pojawieniem się komputerów z dostępem do Internetu, pojawiły się techniki

polegające na synchronicznym, wielokrotnym wysłaniu tych samych danych. Oprogramowanie WSJT do pracy EME ma dwa tryby pracy. Pierwszy JT65A (Rys. 33) służy do komunikacji pomiędzy dwoma radioamatorami. Jeden radioamator wysyła wielokrotnie takie same dane. Informacja o dokładnym czasie nadania wysyłana jest przez Internet do drugiego radioamatora, który wielokrotnie próbuje odbierać dane z uwzględnieniem opóźnienia sygnału. Jakość kanału poprawiana jest poprzez porównywanie wielu błędnie odebranych danych, wykorzystując fakt, że dane są skorelowane względem siebie. Zakłócenie nie są skorelowane, a więc nawzajem się wygaszają. Technika ta pozwala na odbiór danych przy stosunku sygnał szum (CNR) -20 dB.

Druga technika ECHO (Rys. 34) polega na wielokrotnym wysłaniu sekwencji przez 2 sekundy (czas potrzebny na przesłanie sygnału Ziemia – Księżyc – Ziemia), a następnie jej odbieraniu przez kolejne 2 sekundy. Dzięki brakowi opóźnień związanych z synchronizacją stacji nadawczej z odbiorczą oraz dzięki ograniczeniu wiadomości jedynie do stawiania nośnej, udaje się odebrać własny sygnał przy stosunku sygnału do szumu -31 dB.

Technika ta prawdopodobnie pokazuje graniczne możliwości wielokrotnego odbioru.



Rys. 34. Aplikacja WSJT tryb ECHO.

2.3.2. Astronomia z wykorzystaniem kamer internetowych.

Bardziej obrazowym przykładem wykorzystania techniki wielokrotnego odbioru jest współczesna astronomia amatorska. Do teleskopu montuje się kamerę internetową i zamiast zdjęcia rejestruje się film. W ten sposób uzyskuje się wiele zdjęć obserwowanego obiektu. Następnie zebrany materiał poddaje się cyfrowej obróbce np. za pomocą aplikacji IRIS [98]. Aplikacja ta poprzez nakładanie kolejnych obrazów poprawia jakość zdjęcia zwiększając jego kontrast, oraz ostrość (Rys. 35). Podobnie dzieje się z sygnałem radiowym, kiedy porównuje się te same ramki z danymi uzyskuje się efekt zmniejszenia liczby błędów.



Rys. 35. Obraz planety Saturn przed i po obróbce przez aplikację IRIS.

3. KONCEPCJA ROZPROSZONEJ STACJI NAZIEMNEJ (DGSS).

3.1. Zasada ogólna Rozproszonej Stacji Naziemnej.

W poprzednim rozdziale przedstawiono kierunki, w których rozwija się komunikacja satelitarna. Polegają one głównie na budowaniu kolejnych stacji naziemnych i udostępnianiu ich zasobów poprzez sieć Internet centrom zarządzającym misjami satelitów. Jest to rozwiązanie bardzo drogie w profesjonalnej realizacji. Natomiast w przypadku systemów budowanych na uniwersytetach rozwiązanie to wydaje się bardzo korzystne, ponieważ pozwala na dużo lepsze wykorzystanie sprzętu już istniejącego na uczelniach. Technika stosowaną eksperymentalnie w komunikacji kosmicznej jest rozciągnięcie danych w czasie poprzez stosowanie wielokrotnego nadawania tej samej wiadomości, aby poprzez sumowanie pakietów wyłumić szumy oraz wzmocnić odbierane dane. Niestety technika, choć bardzo wydajna pod względem energetycznym, powoduje duże spowolnienie transmisji.

Autorską propozycją jest niejako połączenie obu tych technik. Rozwiązanie polega na tym, aby zamiast rozciągać sygnał w czasie, rozciągnąć go w odbieranej przestrzeni poprzez równoległy odbiór jednokrotnie nadanych danych poprzez wiele stacji naziemnych, a następnie dzięki odpowiednim algorytmom porównanie odebranych danych w celu poprawy jakości łącza radiowego.

Niestety nie można w łatwy sposób zebrać odebranej energii z wielu stacji naziemnych ze względu na ich duże rozproszenie terytorialne. Utrudnia to wykorzystanie ich pełnego potencjału. Autor proponuje użycie techniki wykorzystującej połączenie stacji poprzez sieć Internet. Proponowana przez autora nazwa takiej sieci to Rozproszona Stacja Naziemna (RSN, ang. DGSS – Distributed Ground Station System).

System Rozproszonej Stacji Naziemnej polega na równoległym odbiorze sygnału z tego samego nadajnika poprzez wiele stacji naziemnych ([68], [69]). Wykorzystując wielokrotny odbiór tego samego źródła za pomocą wielu odbiorników każdy z określoną jakością łącza, poprzez porównanie otrzymanych pakietów można otrzymać dane z mniejszą liczbą błędów. Zjawisko to wynika z tego, że szumy własne poszczególnych odbiorników są nieskorelowane względem siebie. Dodatkowo różne miejsca instalacji stacji naziemnych powodują, że zakłócenia środowiskowe toru radiowego także stają się niezależne. W efekcie otrzymujemy kilka skorelowanych strumieni danych z nieskorelowanymi zakłóceniami. Porównanie takich strumieni pozwala na wzmacnianie wartości prawidłowych i tłumienie wartości błędnych. Rozwiązanie to jest nieco podobne do „odbioru zbiorczego” [38]. Różnica

polega na tym, że w odbiorze zbiorczym porównywane są sygnały analogowe natomiast w RSN porównywane są odebrane i zdekodowane dane binarne. Dodatkowo głównym celem odbioru zbiorczego jest eliminacja lokalnych zaników sygnału radiowego, natomiast RSN wykorzystuje rozproszony odbiór, aby uzyskać lepszą jakość łącza w porównaniu do pojedynczej stacji naziemnej.

Do opisu zależności autor posłużył się wielkością zwaną błędem procentowym $B_{\%}$ zdefiniowaną jako (1) stosunek odebranych błędnie danych E do wszystkich wysłanych danych A pomnożony przez 100%.

$$B_{\%} = \frac{E}{A} \cdot 100\% \quad (1)$$

Stosując taką nomenklaturę, jakość łącza radiowego w rozproszonym systemie odbioru można przedstawić w postaci równania (2), gdzie B_i to procentowy udział nieskorelowanych błędów w kolejnych odbiornikach, B_x to procentowy błąd wynikowy po porównaniu strumieni danych, a n to liczba odbiorników. Wynikowy błąd jest tym mniejszy (przy tej samej jakości kanału radiowego), im więcej stacji naziemnych zostanie wykorzystanych do odbioru transmisji satelitarnej.

$$B_x = \left(\prod_{i=1}^n \frac{B_i}{100\%} \right) * 100\% \quad (2)$$

Równanie to wynika z własności rachunku prawdopodobieństwa określanego jako warunku niezależności zdarzeń [39]. Przyjmując że A_1 oraz A_2 to zdarzenia niezależne polegające na odebraniu przez pojedynczą stację błędnego bitu a $P(A_1)$ i $P(A_2)$ jako prawdopodobieństwa tego że dana stacja odbierze błędny bit, to prawdopodobieństwo że obie stacje odbiorą błędnie bit wyrażona jest zależnością (3). Równanie to można przekształcić (równania (4) - (7)) dla przypadku wykorzystania n stacji. Prawdopodobieństwo odebrania błędnego bitu przez n stacji określa równanie (8).

$$P(A_1 \cap A_2) = P(A_1) * P(A_2) \quad (3)$$

$$C = A_1 \cap A_2 \quad (4)$$

$$P(C \cap A_3) = P(C) * P(A_3) \quad (5)$$

$$P(A_1 \cap A_2 \cap A_3) = P(A_1) * P(A_2) * P(A_3) \quad (6)$$

$$P(A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap \dots \cap A_n) = P(A_1) * P(A_2) * P(A_3) * \dots * P(A_n) \quad (7)$$

$$P(A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap \dots \cap A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (8)$$

Stosując nomenklaturę opisaną w dalszej części rozprawy (patrz podrozdział 4.2 "Jakość łącza satelitarne.") równanie (2) można przedstawić jako równanie (9), gdzie BER_i określa jakość odbioru pojedynczej stacji, a BER_x określa jakość odbioru w odbiorze rozproszonym.

$$BER_x = \prod_{i=1}^n BER_i \quad (9)$$

Technika rozproszonego odbioru powinna dawać wyniki podobne do techniki wielokrotnego odbioru, a więc poprawiać jakość kanału radiowego o ponad 20 dB jednocześnie nie zmniejszając szybkości przesłania danych. Podobieństwo wyników wynika z równań (10) - (12), gdzie B_{Pi} to procentowy udział nieskorelowanych błędów w kolejnych odbiornikach równoległych, B_p to procentowy błąd wynikowy po porównaniu strumieni danych a np to liczba odbiorników równoległych. Podobnie B_{Mi} to procentowy udział nieskorelowanych błędów w kolejnych odebranych identycznych ramkach, B_M to procentowy błąd wynikowy po porównaniu danych w tych samych wielokrotnie nadanych ramkach, a nm to liczba nadanych jednakowych ramek. Jeżeli przy odbiorze równoległym stacje posiadają taką samą stopę błędów B_{Pi} jak stacja wykorzystywana do odbioru wielokrotnego B_{Mi} , oraz do odbioru rozproszonego wykorzystano taką samą liczbę stacji naziemnych np co liczba powtórzeń transmisji w odbiorze wielokrotnym nm , to oba rodzaje systemów powinny posiadać podobną jakość łącza.

$$B_p = \left(\prod_{i=1}^{np} \frac{B_{Pi}}{100\%} \right) * 100\% \quad (10)$$

$$B_M = \left(\prod_{i=1}^{nm} \frac{B_{Mi}}{100\%} \right) * 100\% \quad (11)$$

$$B_{P_i} = B_{M_i} \wedge np = nm \Rightarrow B_P = B_M \quad (12)$$

Stosując nomenklaturę opisaną w dalszej części rozprawy (patrz podrozdział 4.2 "Jakość łącza satelitarnego.") równanie (12) można przedstawić jako równanie (13), gdzie BER_{P_i} określa jakość odbioru pojedynczej ramki w odbiorze wielokrotnym, BER_{M_i} określa jakość odbioru pojedynczej stacji w odbiorze rozproszonym, BER_P określa jakość odbioru w odbiorze wielokrotnym, a BER_M określa jakość odbioru w odbiorze rozproszonym.

$$BER_{P_i} = BER_{M_i} \wedge np = nm \Rightarrow BER_P = BER_M \quad (13)$$

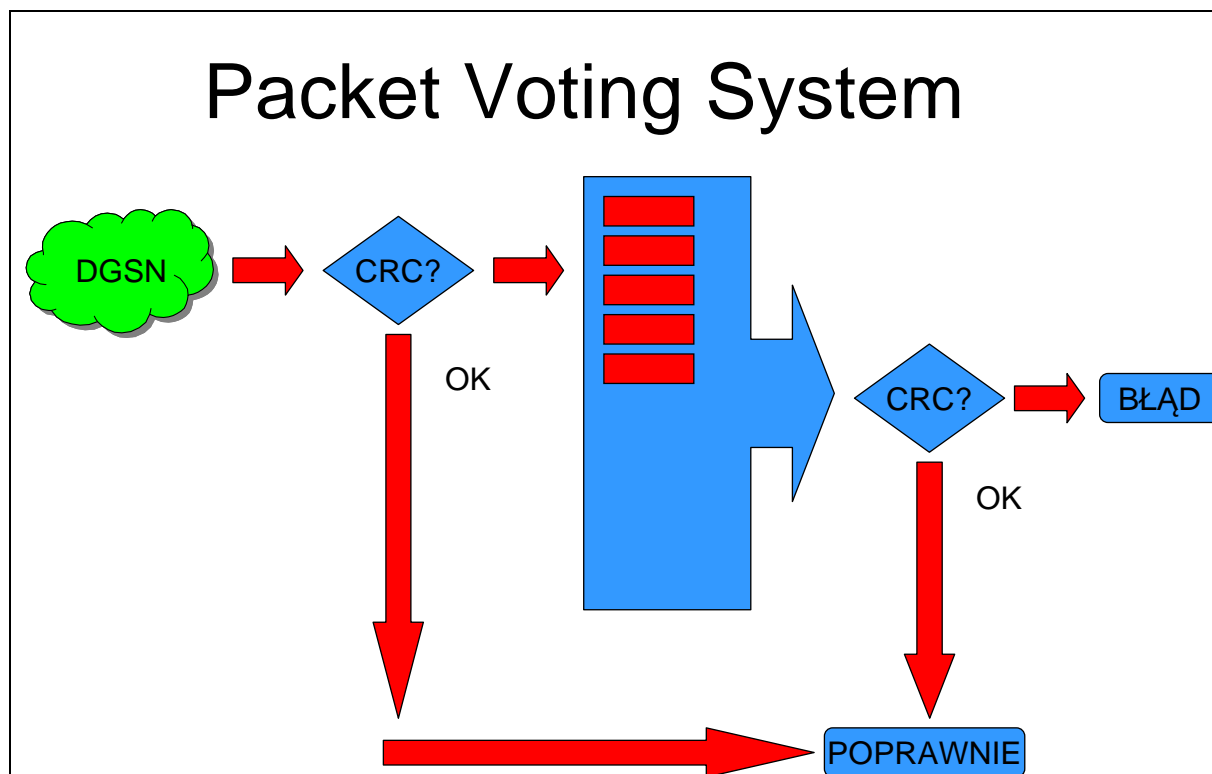
Uzyskaną poprawę jakości łącza można wykorzystać na kilka sposobów:

- Zwiększenie niezawodności łącza satelitarnego.
- Zmniejszenie wymagań na systemy antenowe. Jeśli jakość kanału jest lepsza od wymaganej (zwykle $BER < 1E-4$, patrz podrozdział 4.2 "Jakość łącza satelitarnego."), to można zmniejszyć system antenowy kosztem jakości kanału.
- Zmniejszenie mocy nadawczej satelity. Jeśli jakość kanału jest lepsza od wymaganej (zwykle $BER < 1E-4$), to można zmniejszyć moc nadawczą satelity kosztem jakości kanału.
- Zwiększenie prędkości transmisji przy wykorzystaniu tego samego kanału radiowego. Jeśli jakość kanału jest lepsza od wymaganej (zwykle $BER < 1E-4$), to można zwiększyć prędkość transmisji kosztem jakości kanału.

3.2. System porównywanie pakietów (Packet Voiting System).

Przykładem proponowanej realizacji rozproszonego odbioru jest system porównywania pakietów (PVS - Rys. 36, [70]). Do systemu przesyłane są strumienie odbieranych danych z pojedynczych stacji naziemnych. Najpierw sprawdzane jest, czy któryś ze strumieni jest prawidłowy (np. za pomocą przesyłanej w strumieniu sumy kontrolnej). Jeśli nie można znaleźć bezbłędnego strumienia danych, otrzymane wyniki przesyłane są do systemu porównywania bitowego (Rys. 37). W systemie tym dane w postaci pojedynczych bitów otrzymane z różnych źródeł niejako głosują wynik pomiędzy sobą. Jeśli w większości

odebrano bit 0, na wyjściu systemu otrzymujemy 0. Jeśli w danych źródłowych większość stanowi bit 1, na wyjściu otrzymujemy 1. W strumieniu wyjściowym ponownie sprawdzana jest suma kontrolna. Jeśli nadal nie jest ona prawidłowa, system przekazuje informację o błędnym odbiorze. Jeśli jednak suma jest zgodna oznacza to, że system zamaskował błędy w odbiorze i dane przekazywane są do systemu docelowego.



Rys. 36. System porównywania pakietów.

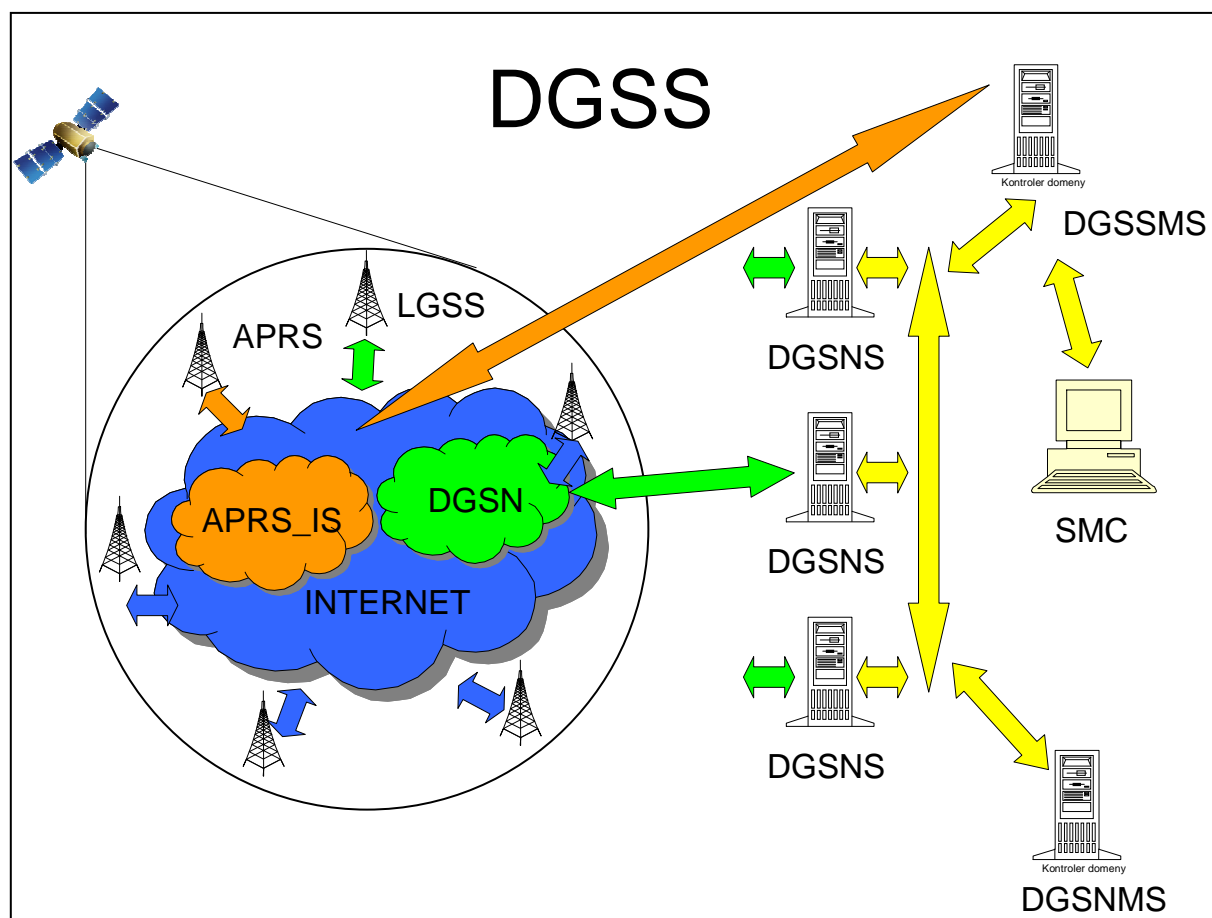
Pakiety źródłowe	011010010 100101010 100100110 100110101 010100010
Pakiet wynikowy	100100010

Rys. 37. System głosowania bitowego.

3.3. Rozproszona Stacja Naziemna (DGSS).

Autor proponuje, aby zaproponowany przez niego system poprawy jakości łącza satelitarne zrealizować jako Rozproszoną Stację Naziemną (DGSS). System zakłada

wykorzystanie wielu stacji rozmieszczonych na całym świecie połączonych za pomocą sieci Internet (Rys. 38). Jako bazę do realizacji eksperymentalnej proponuje wykorzystać stacje naziemne znajdujące się na uniwersytetach oraz urządzenia znajdujące się w posiadaniu radioamatorów. Dodatkowo można wykorzystać zasoby systemu APRS-IS. Pojedyncze stacje przesyłają dane poprzez sieć DGSN oraz APRS-IS (zależnie od użytego oprogramowania) do serwerów z systemem porównującym pakiety (DGSSMS), zarządzającym telemetrią oraz telekomendami dla danego satelity. Operatorowi satelity system udostępniłby wirtualny dostęp do satelity poprzez odpowiednią konsolę (SMC) niezależnie od tego, gdzie taki satelita aktualnie by się znajdował. Kierunek odwrotny transmisji (ze względu na wcześniej wykazane wady wykorzystania sieci APRS-IS do komunikacji kosmicznej) odbywałby się jedynie poprzez sieć DGSN. Zagwarantowałoby to transmisję danych w kierunku satelity jedynie poprzez jedną wybraną przez system stację naziemną minimalizując problem kolizji pakietów w eterze.



Rys. 38. System Rozproszonej Stacji Naziemnej.

Możliwe jest optymalizowanie systemu DGSS. Autor przedstawia kilka propozycji takiej optymalizacji:

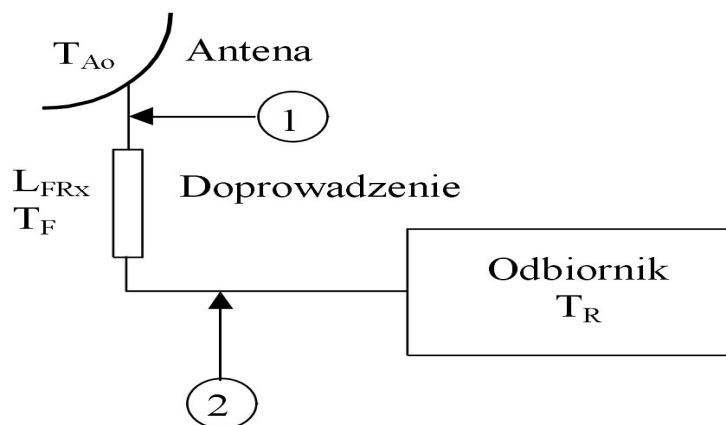
- Modelowanie możliwości stacji na podstawie teoretycznych parametrów stacji i jej położenia oraz położenia satelity, w celu utworzenia rankingu najlepszych w danej chwili do komunikacji z satelitą stacji naziemnych.
- Prowadzenie statystyk jakości stacji naziemnych. Prowadzenie takich statystyk umożliwia utworzenie rankingu stacji o najlepszych parametrach nadawczo odbiorczych.
- Wykorzystanie rankingów stacji naziemnych np. do wyboru najlepszej stacji do nadania pakietu w kierunku satelity, czy przy doborze odpowiednich wag podczas wykorzystania systemu głosowania pakietów.
- Wprowadzenie zaawansowanego systemu korelacji pakietów. Standardowo system aby porównać pakiety, musi poprawnie znaleźć ich początek oraz numer pakietu. W przypadku uszkodzenia pakietów możliwe jest porównanie strumieni binarnych i ich wzajemna korelacja na podstawie dalszych części pakietów. System mógłby dokonywać wzajemnego przesuwania strumieni danych i poddawania ich wartości głosowaniu aż do prawidłowego odczytania pakietu bądź przekroczenia dostępnego czasu i mocy systemu obliczeniowego. Rozwiązanie to jest bardzo skomplikowane obliczeniowo ze względu na wykładniczo rosnącą (w zależności od liczby strumieni oraz długości pakietów) liczbę porównań (stacji naziemnych), ale w dobie ciągle rosnącej mocy obliczeniowej komputerów może okazać się korzystne dla bardzo słabych sygnałów.

4. ANALIZA TEORETYCZNA ZAGADNIENIA.

4.1. Budżet mocy dla satelity radioamatorskiego.

W celu analizy zagadnienia przeprowadzono symulacje łącza radiowego pomiędzy Ziemią a satelitą.

Na potrzeby obliczeń założono, że satelita nadaje z mocą $T_{XP}=5W$ (7 dBw) na częstotliwości $f=433$ MHz. Zysk anteny nadawczej $TXAG=0$ dB. Zysk anteny odbiorczej $RXAG=6$ dB (zwykle dla radio amatorskiej stacji naziemnej $RXAG$ ma wartość 14 dB, ale ponieważ w dalszej części pracy będą wykorzystane stacje radioamatorskie nieprzewidziane do pracy satelitarnej, wartość ta została zmniejszona do 6 dB). Zastosowano modulację FM FSK o szerokości pasma $B=15$ kHz (41,8 dB) i prędkości transmisji, $BR=1200$ bps (30,8 dB). Czułość typowego odbiornika radiowego o impedancji wejściowej, $Z=50 \Omega$ to $RXU=0,18$ uV dla $SNIAD=12$ dB dla modulacji FM. Pozwala to na wyznaczenie czułości odbiornika w jednostkach dBw, tj. $RXS=-151$ dBw (14). Do analizy dodano jeszcze tłumienie atmosferyczne $L_A=0,1$ dB, tłumienie polaryzacyjne $L_P=3$ dB oraz margines bezpieczeństwa $L_M=6$ dB. Stała Boltzmanna $K=-228,6$ dB.



Rys. 39. System odbiorczy.

Na Rys. 39 przedstawiono schemat blokowy stacji odbiorczej. Za pomocą równania (15) wyznaczono moc szumu termicznego odbiornika $NRX=-163$ dBw. Z równania (16) wyznaczono temperaturę szumową odbiornika $T_R=23,8$ dB (240 K).

Czułość
odbiornika

$$RXS[dBw] = 10 * \log\left(\frac{RXU[V]^2}{Z[\Omega]}\right) \quad (14)$$

Moc szumów w odbiorniku $NRX[dBw] = RXS[dBw] - SINAD[dB]$ (15)

Temperatura szumowa odbiornika $T_R[dB] = NRX[dBw] - K[dB] - B[dB]$ (16)

Za średnią temperaturę szumową przestrzeni kosmicznej przyjęto wartość $T_{A0}=100$ K. W systemie antenowy założono użycie $D_C=30$ m kabla koncentrycznego (typ H1000), którego tłumienie wynosi $F_{F100}=-9$ dB/100 m dla pasma 435 MHz i temperatury $T_F=290$ K. Z równania (17) wyznaczono tłumienie przewodu $F_{FRx}=2,7$ dB. Z kolei z równania (18) wyznaczono temperaturę zastępczą systemu antenowego $T_{AS}=187$ K (22 dB). Pozwoliło to wyznaczyć (19) zastępczą temperaturę systemu odbiorczego $T_U=475$ K (26 dB).

Tłumienie przewodu $L_{FRx}[dB] = \frac{L_{F100}[dB/100m] * D_F[m]}{100}$ (17)

Temperatura szumowa systemu antenowego $T_{AS}[K] = \frac{T_{A0}[K]}{L_{FRx}[W/W]} + \left(1 - \frac{1}{L_{FRx}[W/W]}\right) * T_F[K]$ (18)

Zastępcza temperatura szumowa systemu $T_U[K] = T_R[K] + T_{AS}[K]$ (19)

Tłumienie wolnej przestrzeni wyznacza równanie (20) które zależy od odległości pomiędzy stacją naziemną a satelitą (R) oraz długością fali elektromagnetycznej (λ). Wartość R jest zmienna i w symulacji przyjmuje wartości od 300 km do 30'000 km. Długość fali wyznacza równanie (21) gdzie c to prędkość światła, a f to częstotliwość na jakiej odbywa się transmisja radiowa. Obliczona wartość to $\lambda=0,68$ m.

Tłumienie wolnej przestrzeni $FSL[dB] = 10 * \log\left(\left(\frac{4 * \pi * R[m]}{\lambda[m]}\right)^2\right)$ (20)

Długość fali $\lambda[m] = \frac{c[m/s]}{f[Hz]}$ (21)

Moc sygnału w systemie odbiorczym

$$C[dBw] = TXP[dBw] + TXAG[dB] + RXAG[dB] - L_{FRx}[dB] - L_A[dB] - L_P[dB] - L_M[dB] - FSL[dB] \quad (22)$$

Moc szumu w systemie odbiorczym.

$$N[dBw] = B[dB] + T_U[dB] + K[dB] \quad (23)$$

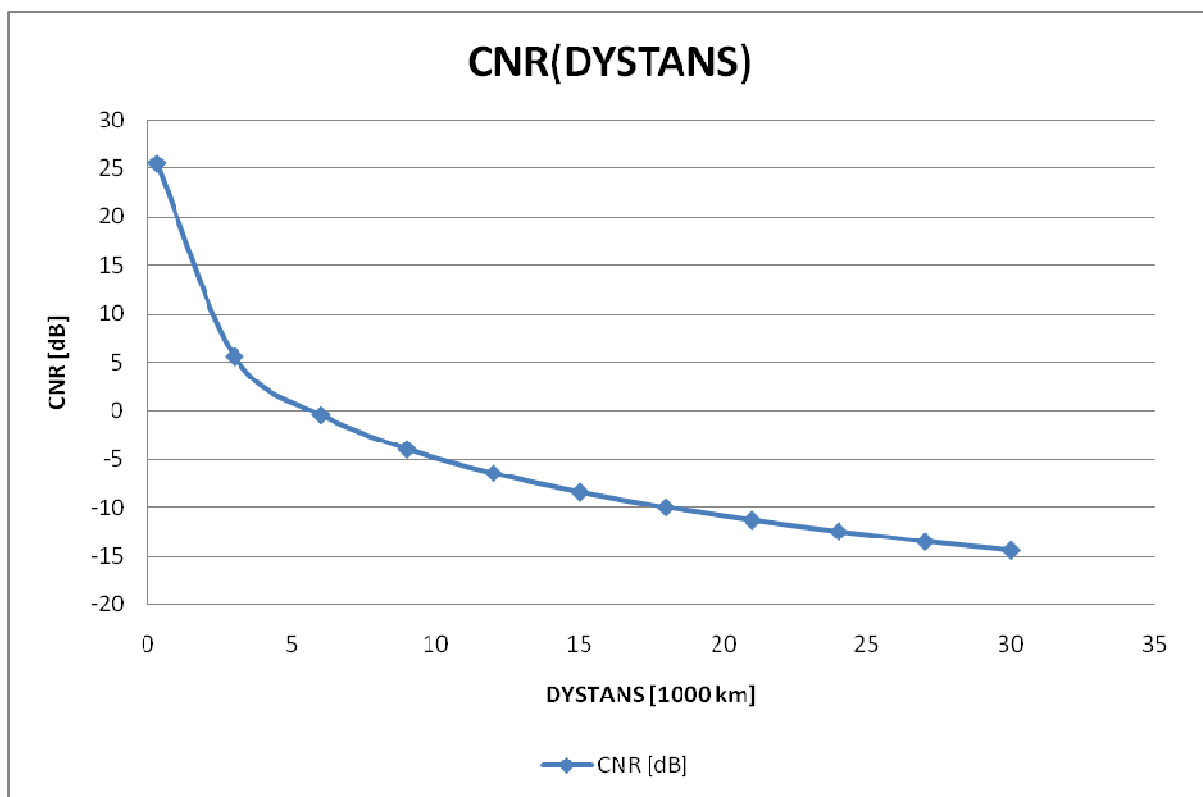
Stosunek sygnał/szum w systemie odbiorczym

$$CNR[dB] = C[dBw] - N[dBw] \quad (24)$$

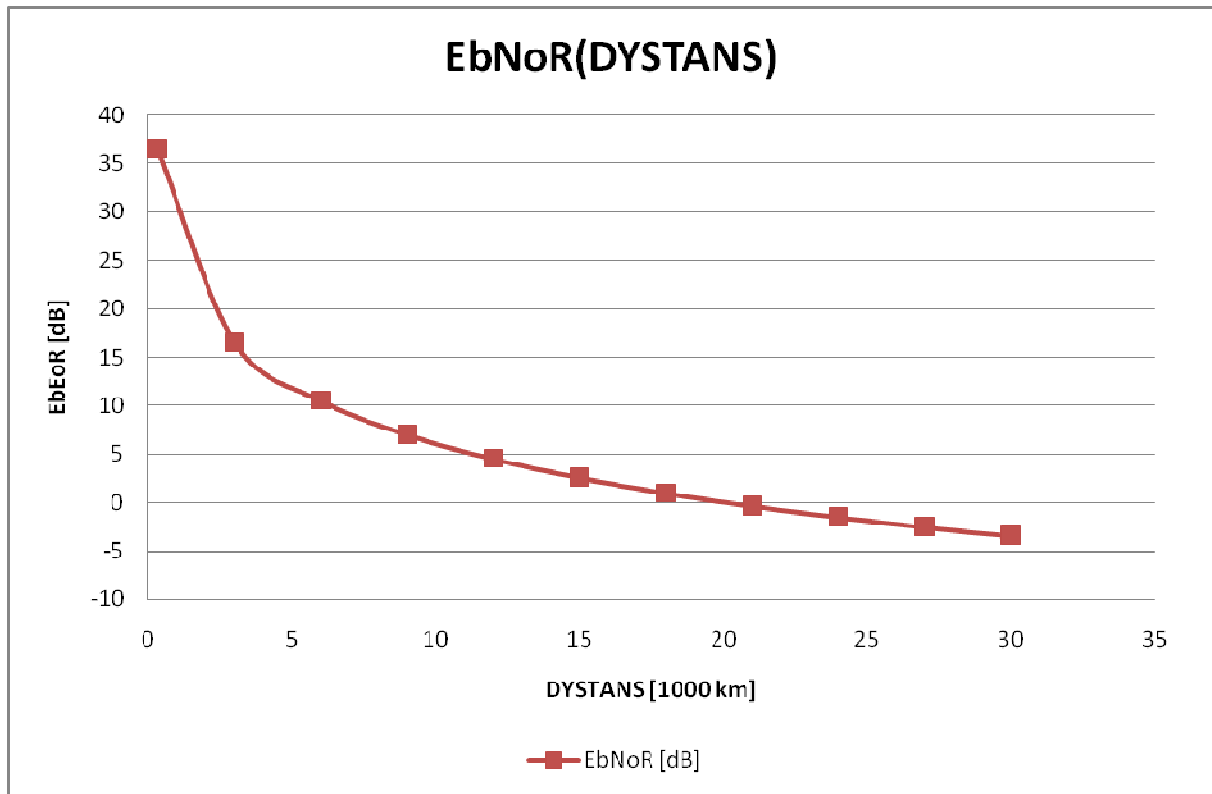
Stosunek energii bitu do szumu 1Hz

$$E_b N_o R[dB] = CNR[dB] + B[dB] - BR[dB] \quad (25)$$

Poziom odbieranego sygnału C wyznacza równanie (22), a poziom odbieranego szumu wyznacza równanie (23). Pozwala to na wyznaczenie stosunku sygnału do szumu CNR (24) oraz energii jednego bitu do szumu na jeden herc $E_b N_o R$ (25). Na Rys. 40 oraz Rys. 41 można obejrzeć wynik symulacji. Otrzymane wyniki posłużyły do symulacji przedstawionych w dalszej części rozprawy.



Rys. 40. Stosunek sygnału do szumu (CNR) w łączu Ziemia-satelita.



Rys. 41. Stosunek energii jednego bitu do szumu jeden herc (EbNoR) w łączu Ziemia-satelita.

4.2. Jakość łącza satelitarnego.

Podstawowym parametrem określającym jakość cyfrowego łącza radiowego ([31], [32]) jest prawdopodobieństwo błędnego odebrania bitu (Bit Error Rate – BER), które określamy (26) jako stosunek liczby błędnie odebranych bitów (R_E) do liczby wszystkich nadanych bitów (R_A). Można też ją zdefiniować jako odwrotność liczby poprawnie odebranych pomiędzy dwoma źle odebranymi bitami bitów.

$$BER = \frac{R_E}{R_A} \quad (26)$$

Jakość łącza można również określić jako prawdopodobieństwo prawidłowego odebrania bitu (Bit Probability of Reception - BPR), które określamy (27) jako stosunek liczby poprawnie odebranych bitów (R_C) do liczby wszystkich nadanych bitów (R_A). Zależność pomiędzy BER a BPR określa równanie (28).

$$BPR = \frac{R_C}{R_A} \quad (27)$$

$$BER = (1 - BPR) \quad (28)$$

Należy jednak zwrócić uwagę, że aby poprawnie przesłać pakiet danych, należy przesłać bezbłędnie wiele kolejnych bitów. W takiej sytuacji lepiej posługiwać się parametrem prawdopodobieństwa przesłania pakietu (Packet Probability of Reception - PPR), który określamy (29) jako stosunek liczby poprawnie odebranych pakietów (R_{CP}) do liczby wszystkich nadanych pakietów (R_{AP}). Jeśli znamy długość bitową pakietu (n) oraz jakość łącza (BER, BPR), możemy go obliczyć za pomocą równań (30) oraz (31).

$$PPR = \frac{R_{CP}}{R_{AP}} \quad (29)$$

$$PPR = BPR^n \quad (30)$$

$$PPR = (1 - BER)^n \quad (31)$$

Przyjmuje się, że dobrej jakości łącze radiowe powinno zapewniać BER lepszy (mniejszy) niż $1E-4$. Pakiety AX25 typu U oraz S mają wielkość od 152 bitów (pakiet bez danych oraz ścieżki rutowania) do 2656 bitów (z 256 bajtami danych i maksymalną długością ścieżki trasowania (ang. routing)). Typowy pakiet APRS ma wielkość 792 bitów (typu nawigacyjnego UI, z dwoma stacjami przekaźnikowymi oraz 65 bajtami danych). W Tab. 1 można zobaczyć obliczone wartości PPR dla różnej jakości kanału oraz różnej długości pakietu. Można zaobserwować, że dla $BER=1E-4$ można odebrać 98% nadanych pakietów, ale już tylko 76% dla najdłuższych pakietów. Kiedy kanał jest jeszcze słabszej jakości ($BER>1E-2$), to przesłanie dużego pakietu staje się niemożliwe ($PPR<1E-500$).

Tab. 1. Zestawienie PPR.

BER	1E-5	1E-4	1E-3	1E-2	1E-1
Rozm. pakietu [bit]	PPR(BER)				
152	9.984E-01	9.849E-01	8.589E-01	2.170E-01	1.109E-07
792	9.921E-01	9.239E-01	4.528E-01	3.492E-04	5.755E-37
2656	9.737E-01	7.667E-01	7.014E-02	2.553E-12	<1E-500
258'336	7.551E-02	6.026E-12	5.622E-113	<1E-500	<1E-500

Problem ten pogłębia się jeszcze bardziej, kiedy chcemy przesłać określoną liczbę danych binarnych wykorzystując jedynie system wykrywania błędów bez ich korekcji. W przypadku przesyłania danych jakość określamy za pomocą prawdopodobieństwa przesłania danych (Data Set Probability of Reception - DSPR). Wartość DSPR liczy się

podobnie do PPR (32) jako stosunek liczby poprawnie odebranych danych (R_{CD}) do liczby wszystkich nadanych danych (R_{AD}). Jeśli znamy długość bitową danych wysyłanych jednocześnie (n) oraz jakość łącza (BER , BPR), możemy ją obliczyć za pomocą równań (33) oraz (34).

$$DSPR = \frac{R_{CD}}{R_{AD}} \quad (32)$$

$$DSPR = BPR^n \quad (33)$$

$$DSPR = (1 - BER)^n \quad (34)$$

Dla przykładu policzono wartość DSPR dla przesłania 30KB danych (Tab. 2). W takim przypadku jakość kanału staje się jeszcze bardziej krytyczna. Dla kanału $BER=1E-5$ przesłane zostanie jedynie 7% tak nadanych danych, a dla $BER=1E-4$ będzie to poniżej 1% tak nadanych danych.

Tab. 2. Zestawienie DSPR.

BER	1E-5	1E-4	1E-3	1E-2	1E-1
Data Size [bite]	DSPR(BER)				
258'336	7.551E-02	6.026E-12	5.622E-113	<1E-500	<1E-500

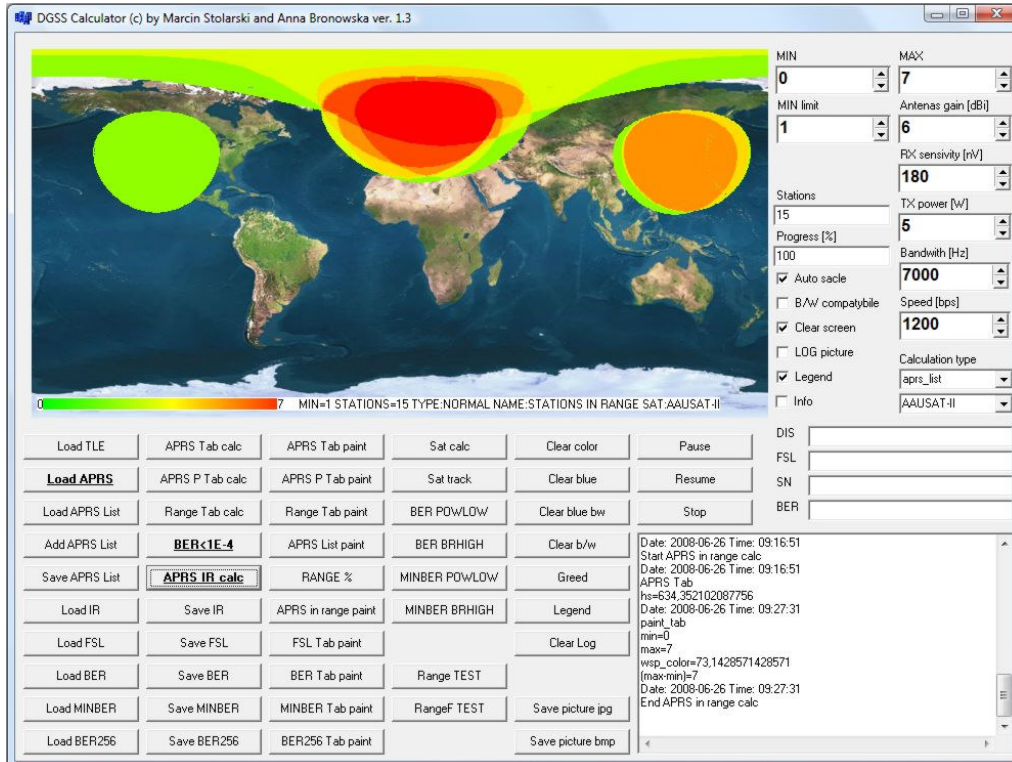
Dla małych satelitów i stacji małych mocy największą akceptowaną wartością współczynnika BER przez organizacje AMSAT (The Radio Amateur Satellite Corporation) i IARU (International Amateur Radio Union) jest $1E-4$ [40]. Wartość ta przy prędkości transmisji 1200 bps spowoduje, że stacja naziemna będzie odbierać błędny bit co 8,3 sekundy. Wartość $BER=1E-4$ w dalszej części rozprawy będzie używana jako największa wartość BER dla łącza satelitarnego dobrej jakości.

4.3. Narzędzia do symulacji.

Do kolejnych symulacji autor, przy wykorzystaniu narzędzi programistycznych C++ Builder 6 Personal [101], stworzył narzędzie DGSSC (Distributed Ground Station System Calculator, Rys. 42).

Narzędzie to jako źródło danych pobiera log z ruchu w sieci APRS-IS (pobrane np. za pomocą aplikacji UI-view) oraz dane orbit satelitów w postaci „NASA 2 line TLE” [88]. Następnie z przetworzonych plików APRS-IS tworzy mapę rozmieszczenia stacji APRS na

świecie oraz ilości generowanego przez nie ruchu sieciowego. W kolejnym kroku mapy te w połączeniu z danymi o orbitach satelitów są wykorzystywane do przeprowadzenia symulacji.



Rys. 42. Oprogramowanie “Distributed Ground Station System Calculator”.

Generowanych jest 5 głównych symulacji.

1. Liczba stacji w zasięgu satelity (IR). Satelita o wybranych parametrach ustawiany jest nad kolejnymi punktami mapy (wszystkimi, a nie tylko wynikającymi z orbity), wyznaczany jest jego horyzont radiowy, a następnie zliczane są wszystkie stacje będące w jego zasięgu i obliczona wartość zaznaczana jest na mapie w postaci odpowiedniego koloru w miejscu, nad którym znajduje się satelita.
2. Współczynnik teoretycznego tłumienia przestrzeni (TFSL). Na podstawie symulacji IR liczona jest sumaryczna moc radiowa odebrana przez wszystkie stacje naziemne i wartość ta jest dodawana do wartości tłumienia wolnej przestrzeni pomiędzy satelitą a punktem podsatelitarnym na Ziemi. Symulacja ta obrazuje, jaka jest różnica energetyczna pomiędzy pojedynczą stacją naziemną a zespołem połączonych stacji.
3. Liczenie stopy błędów (BER). Na podstawie symulacji IR liczona jest stopa błędów przed i po zastosowaniu różnych wariantów poprawy jakości łącza przy wykorzystaniu

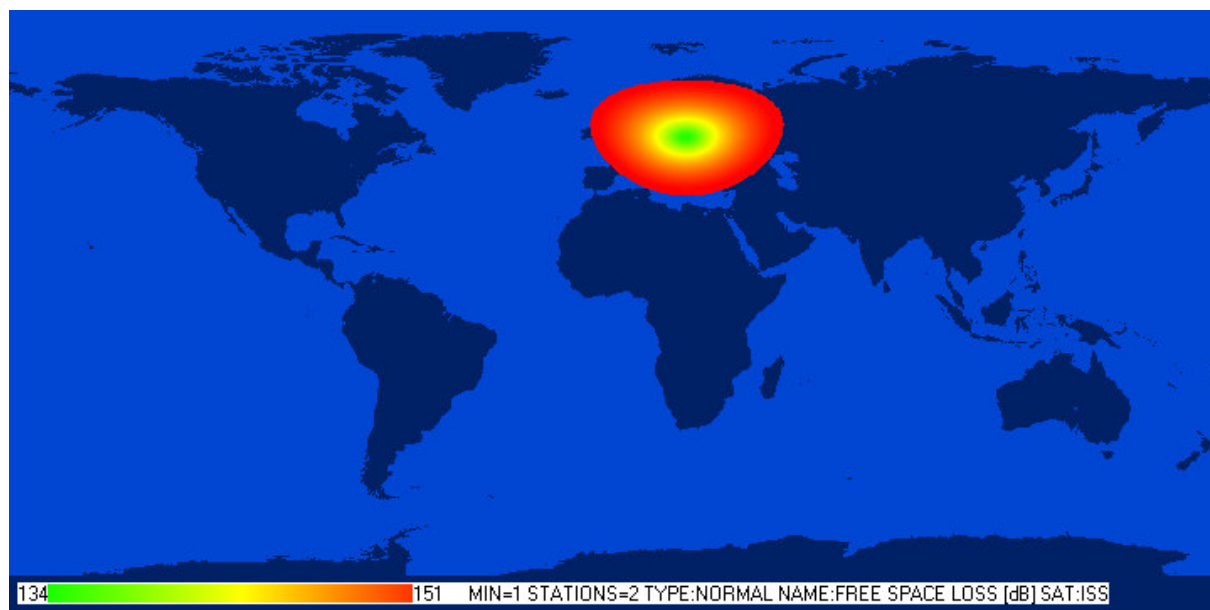
technik Rozproszonej Stacji Naziemnej, które to techniki opisane są w dalszej części rozprawy. Dla każdego z wariantów tworzona jest inna symulacja.

4. Maksymalna prędkość w kanale radiowym (SPEED). Na podstawie symulacji BER liczone jest możliwe teoretycznie zwiększenie prędkości w kanale radiowym kosztem zwiększenia stopy błędów (BER) do wartości E-4.
5. Minimalna moc w kanale radiowym (POW). Na podstawie symulacji BER liczone jest możliwe teoretycznie zmniejszenie mocy nadajnika w kanale radiowym kosztem zwiększenia stopy błędów (BER) do wartości E-4.

Wszystkie symulacje realizowane są z rozdzielczością 0.5 stopnia zarówno wysokości jak i szerokości geograficznej. Możliwe są zmiany parametrów łącza radiowego, stacji naziemnej jak i satelity. Wyniki można zapisywać w postaci plików tekstowych oraz map bitowych. Kod głównej obliczeniowej pętli programu zastał umieszczony w załączniku 8.1.

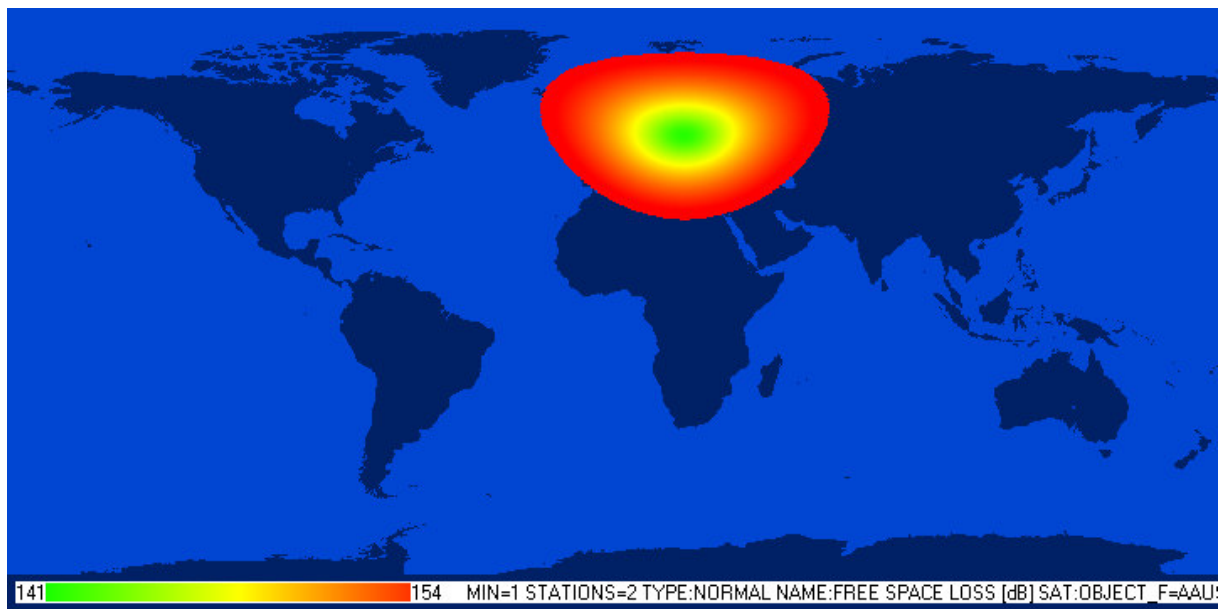
4.4. Analiza pojedynczej stacji naziemnej.

W rozdziale 4.1 ”Budżet mocy dla satelity radioamatorskiego.” przedstawiono Symulację łącza radiowego Ziemia – satelita w układzie jednowymiarowym (1D). W rzeczywistości łącze takie jest realizowane w układzie trójwymiarowym (3D). Do przeprowadzenia symulacji 3D wykorzystano narzędzie DGSSC oraz równania matematyczne wraz z parametrami stacji naziemnej i satelity z symulacji 1D.



Rys. 43. Tłumienie Wolnej Przestrzeni dla satelity ISS (Free Space Lost [dB]).

Do symulacji wykorzystano satelitę ISS, który znajduje się na orbicie LEO o wysokości około 320 km nad powierzchnią Ziemi. Dane z tak nisko orbitującego satelity pozwolą na zwiększenie rozdzielczości uzyskanych obrazów ze względu na stosunkowo mały horyzont radiowy (horyzont radiowy wykreśla na Ziemi okrąg o promieniu około 3000 km - Rys. 43). Dla porównania autor przeprowadził kilka symulacji dla satelity AUUSAT, którego orbita znajduje się około 600 km nad powierzchnią Ziemi (Rys. 44, Rys. 47). Pokazują one, że dwukrotne zwiększenie odległości satelity od Ziemi powiększa (około) dwukrotnie promień horyzontu radiowego, co powoduje że uzyskiwane obrazy symulacji mają czterokrotnie mniej widocznych szczegółów.



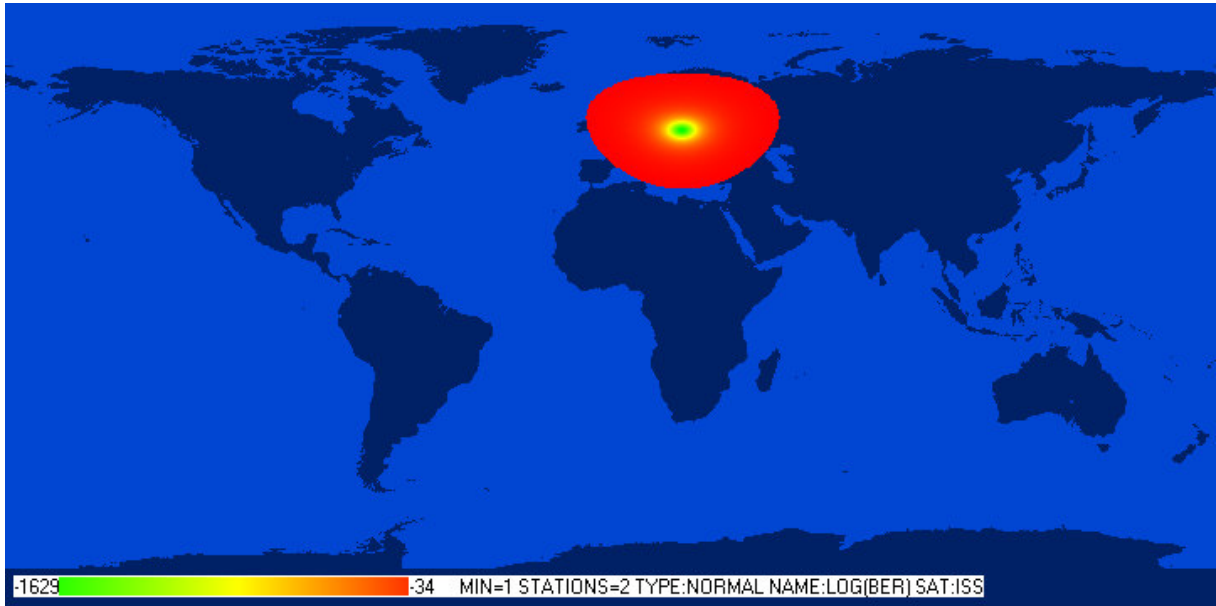
Rys. 44. Tłumienie Wolnej Przestrzeni dla satelity AUUSAT (Free Space Lost [dB]).

Na Rys. 43 przedstawiono wynik symulacji tłumienia wolnej przestrzeni (FSL) dla pojedynczej stacji naziemnej (GS) umieszczonej na terytorium Warszawy. Wartość liczona jest jedynie dla obszaru znajdującego się w horyzoncie radiowym stacji naziemnej, ponieważ uznaje się, że FSL poza horyzontem radiowym ma tak duże wartości (jest większy o wiele rzędów wielkości), że prowadzenie łączności staje się niemożliwe.

Kolejną symulacją to obliczenie współczynnika stopy błędów dla modulacji FSK ([34], [35]). Wykorzystując równania (35) - (36) [22] wykonano kolejną symulację przedstawioną na Rys. 45.

$$BER = \frac{1}{2} * e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{-2} \right)} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} E_b N_0 R [dB] = & TXP [dBW] + TXAG [dB] + RXAG [dB] \\ & - L_{FRx} [dB] - L_A [dB] - L_P [dB] - L_M [dB] - FSL [dB] \\ & - BR [dB] - T_U [dB] - K [dB] \end{aligned} \quad (36)$$



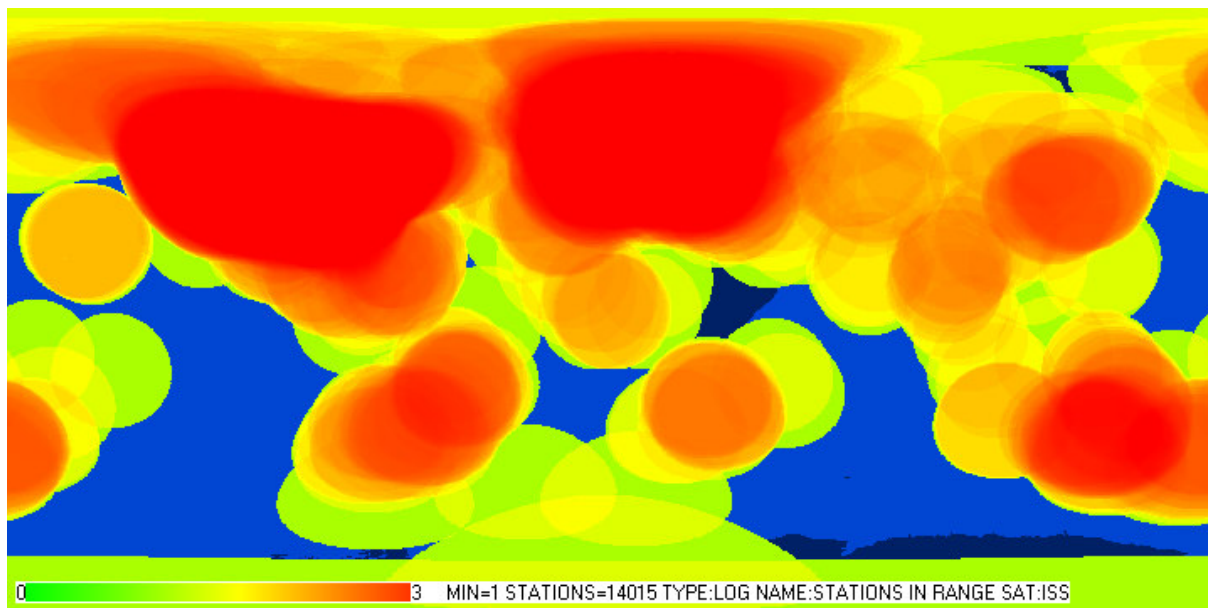
Rys. 45. Współczynnik błędów (BER).

Symulacja pokazała, że stosowane rozwiązania są skuteczne w zasięgu horyzontu radiowego. Poza nim łączność z satelitą jest niemożliwa. Wynika to z geometrii orbity satelity względem stacji naziemnej i kształtu Ziemi. Oznacza to, że jeśli satelita przebywa nad stacją naziemną tylko przez określony krótki czas, to stacja naziemna jest mało efektywnie wykorzystywana. Przez większość czasu (około 90%) stacja nie umożliwia komunikacji z satelitą. Problem ten dotyczy wielu uniwersytetów, które realizują misje kosmiczne na orbicie LEO.

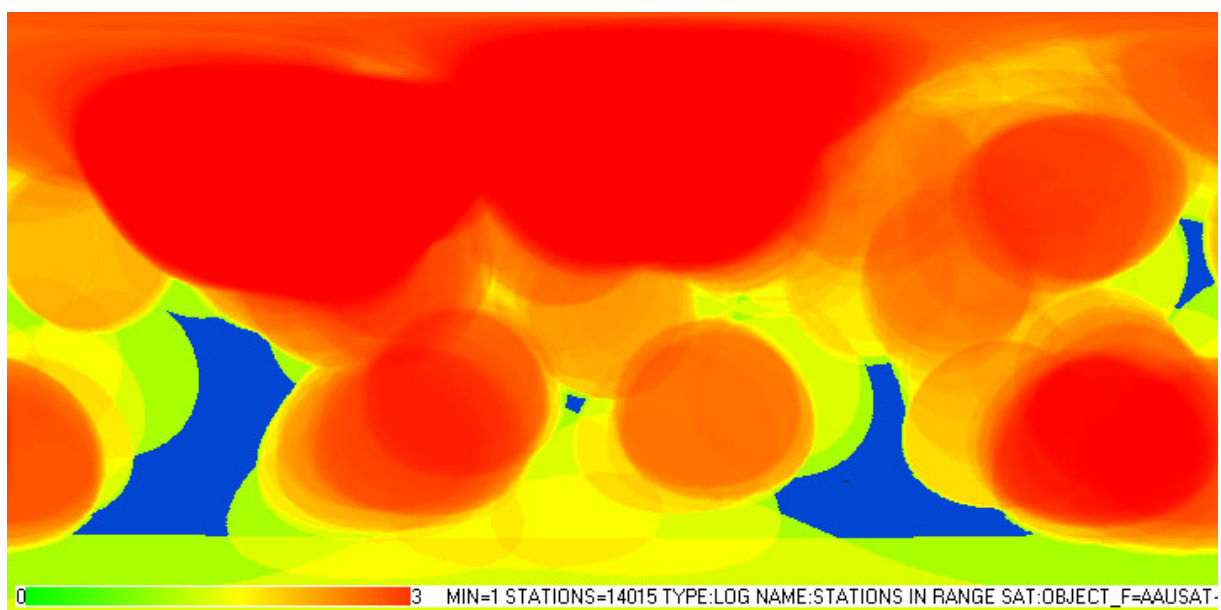
4.5. Analiza rozproszonej stacji naziemnej.

Proponowanym przez autora rozwiązaniem problemów z dostępnością do satelity jest połączenie stacji naziemnych pomiędzy sobą za pomocą sieci rozległej i udostępnianie sobie nawzajem infrastruktury. Takie udostępnienie infrastruktury pojedynczych stacji spotyka się w systemach komercyjnych. Polegają one na wykupywaniu czasu stacji naziemnej i

udostępnienia jej infrastruktury poprzez sieć Internet. Trwają prace nad połączeniem systemów uniwersyteckich. Dodatkowo autor proponuje wykorzystanie systemów używanych przez radioamatorów na całym świecie. Na Rys. 46 przedstawiono wynik symulacji liczby stacji radioamatorskich w zasięgu satelity ISS (wartości są w skali logarytmicznej). Dane do symulacji autor uzyskał poprzez tygodniowe nasłuchiwanie radioamatorskiej sieci APRS-IS, [91] z której odebrał pozycje ponad 14000 stacji radioamatorskich.



Rys. 46. Liczba stacji w zasięgu satelity ISS (skala logarytmiczna).



Rys. 47. Liczba stacji w zasięgu satelity AUUSAT (skala logarytmiczna).

Powyższa symulacja pokazuje dwa rodzaje korzyści, jakie mogą wyniknąć z podłączenia stacji radioamatorskich do sieci stacji naziemnych.

1. Pierwsza z nich to globalny zasięg. Symulacja pokazuje, że satelita przez 80% swojej orbity znajduje się w zasięgu sieci stacji naziemnych.
2. Druga to ogromna liczba stacji naziemnych w zasięgu satelity nad obszarami zurbanizowanymi. W szczególności nad obszarem Stanów Zjednoczonych oraz Unii Europejskiej liczba ta przekracza wartość 1300. Wykorzystanie technik komputerowych do sumowania odebranej energii fali radiowych, powinno poprawić jakość łącza.

Do obrazowania sumarycznej energii autor proponuje wykorzystanie stworzonego przez autora parametru teoretycznego tłumienia wolnej przestrzeni (TFSL), którego wartość to matematyczna suma (w dziedzinie mocy wyrażonej w watach) parametru FSL pomiędzy satelitą a poszczególnymi stacjami naziemnymi (37). Do formuły dodano mnożnik (-1) ponieważ wartości FSL (tłumienia) w obliczeniach są przechowywane jako dodatnie ale tak naprawdę oznaczają ujemne wzmocnienie. Parametr ten pozwala na obrazowanie niezależnie od stosowanych anten i mocy nadajnika w linku i zależy jedynie od częstotliwości dla której liczony jest FSL. Należy pamiętać że parametr TFSL obrazuje teoretyczne możliwości zbudowania szyku antenowego z anten położonych na całej Ziemi będących w danej chwili w zasięgu horyzontu radiowego satelity. Zbudowanie takiego systemu jest niemożliwe z powodu nie istnienia bezstratnych przewodów sygnałowych i służy jedynie zobrazowaniu potencjału tak wielkiego systemu antenowego.

$$TFSL[dB] = (-1) * 10 * \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{(-1)*FSL_i[dB]}{10}} \right) \quad (37)$$

$$CNR[dB] = TXP[dBw] + TXAG[dB] + RXAG[dB] - L_{FRx}[dB] - FSL[dB] - B[dB] - T_U[dB] - K[dB] \quad (38)$$

$$CNR_D[dB] = 10 * \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{CNR_i[dB]}{10}} \right) \quad (39)$$

$$CNR_i[dB] = -FSL_i[dB] \quad (40)$$

$$\begin{aligned} &+ (TXP[dBw] + TXAG[dB] + RXAG[dB] \\ &- L_{FRx}[dB] - L_A[dB] - L_p[dB] - L_M[dB] \\ &- B[dB] - T_U[dB] - K[dB]) \end{aligned}$$

$$GSP[dB] = TXP[dBw] + TXAG[dB] + RXAG[dB] \quad (41)$$

$$- L_{FRx}[dB] - L_A[dB] - L_p[dB] - L_M[dB] - B[dB] - T_U[dB] - K[dB]$$

$$CNR_i[dB] = GSP[dB] - FSL_i[dB] \quad (42)$$

$$CNR_D[dB] = 10 * \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{GSP[dB] - FSL_i[dB]}{10}} \right) \quad (43)$$

$$CNR_D[dB] = 10 * \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{GSP[dB]}{10}} * 10^{\frac{(-1)*FSL_i[dB]}{10}} \right) \quad (44)$$

$$CNR_D[dB] = 10 * \log \left(10^{\frac{GSP[dB]}{10}} * \sum_{i=1}^n 10^{\frac{(-1)*FSL_i[dB]}{10}} \right) \quad (45)$$

$$CNR_D[dB] = 10 * \log \left(10^{\frac{GSP[dB]}{10}} \right) + 10 * \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{(-1)*FSL_i[dB]}{10}} \right) \quad (46)$$

$$CNR_D[dB] = GSP[dB] + 10 * \log \left(\left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{FSL_i[dB]}{10}} \right)^{-1} \right) \quad (47)$$

$$CNR_D[dB] = GSP[dB] + (-1) * 10 * \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{FSL_i[dB]}{10}} \right) \quad (48)$$

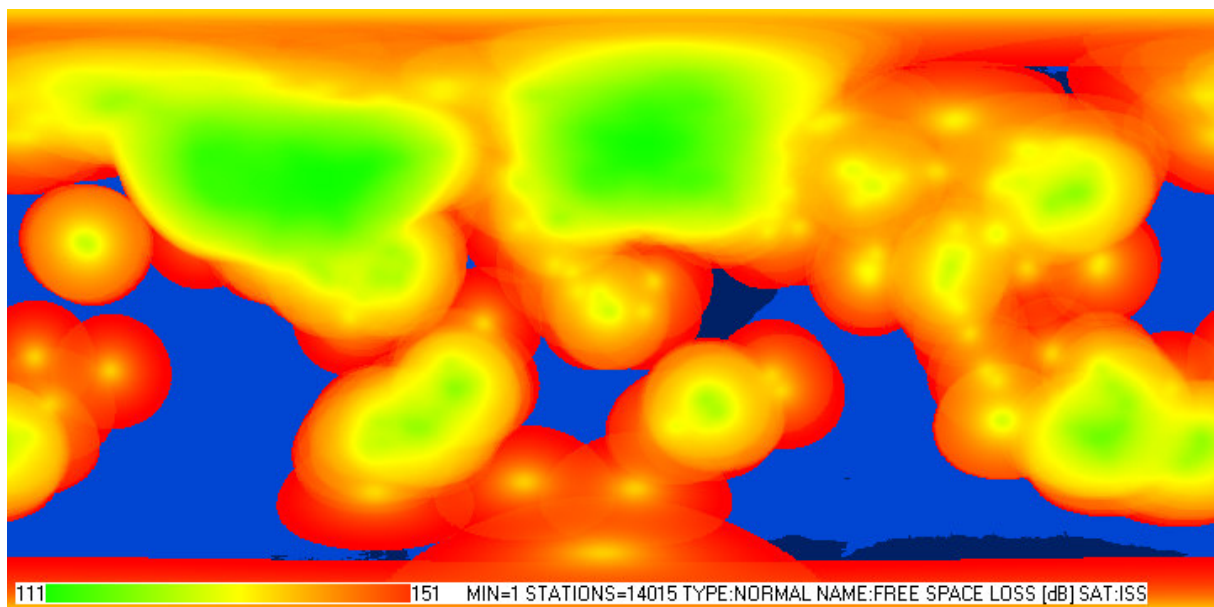
$$CNR_D[dB] = GSP[dB] - TFSL[dB] \quad (49)$$

$$CNR_D[dB] = -TFSL[dB] \quad (50)$$

$$\begin{aligned} &+ (TXP[dBw] + TXAG[dB] + RXAG[dB] \\ &- L_{FRx}[dB] - L_A[dB] - L_p[dB] - L_M[dB] \\ &- B[dB] - T_U[dB] - K[dB]) \end{aligned}$$

$$CNR_D[dB] - CNR_i[dB] = TFSL[dB] - FSL_i[dB] \quad (51)$$

Równanie (38) przedstawia formułę do obliczenia stosunku sygnał szum dla pojedynczej stacji naziemnej. Aby obliczyć, jaki można uzyskać CNR_D (rozproszony CNR) poprzez zsumowanie wszystkich odebranych sygnałów przez stacje naziemne w zasięgu satelity, należy zastosować równanie (39). Dla uproszczenia modelu założono, że parametry stacji odbiorczych są takie same a jedynym wyróżnikiem jest odległość od satelity. W takiej sytuacji parametr CNR pojedynczej stacji różni się jedynie wartościami FSL (40). Dla uproszczenia zapisu pozostałe parametry stacji naziemnej przypisano do parametru GSP (41). Po podstawieniu równania (42) do równania (39) otrzymujemy równanie (43). Następnie po kolejnych krokach przekształceń (równania (44) - (49)) otrzymujemy równanie (50). Zależność ta pokazuje, że różnica CNR pomiędzy pojedynczą stacją naziemną a rozproszoną stacją naziemną jest taka sama jak różnicą pomiędzy teoretycznym tłumieniem wolnej przestrzeni a tłumieniem wolnej przestrzeni dla pojedynczej stacji (51). Z tego powodu autor proponuje wykorzystanie parametru TFSL do obrazowania możliwości systemu wykorzystującego technikę rozproszonej stacji naziemnej.



Rys. 48 Teoretyczne Tłumienie Wolnej Przestrzeni.

Na Rys. 48 przedstawiono obliczoną wartość parametru TFSL. Porównując ją do wartości FSL (Rys. 43) pojedynczej stacji wykazano, że wykorzystując sieć stacji naziemnych można uzyskać poprawę współczynnika CNR o 23dB.

4.6. System rozproszonego odbioru.

Ogólna formuła opisująca jakość łącza radiowego w systemie rozproszonym została przedstawiona w rozdziale 3.1 „Zasada ogólna Rozproszonej Stacji Naziemnej” i można ją przedstawić w postaci równania (52), gdzie BER_i określa jakość łącza w kolejnych odbiornikach, BER_x to wynikowa jakość łącza po porównaniu strumieni danych, a n to liczba odbiorników.

$$BER_x = \prod_{i=1}^n BER_i \quad (52)$$

Aby wykorzystać technikę DGSS, należy opracować odpowiednie algorytmy. Do dalszej części symulacji wykorzystano kilka scenariuszy, a następnie dla każdego z nich obliczono współczynnik błędów BER.

Scenariusze:

- Odbiór przez pojedynczą stację (BER_{ss}).
- Odbiór przez pojedynczą stację wyposażoną w szereg antenowy składający się z pięciu anten, każda o zysku 6 dB (BER_n). Sumaryczny zysk systemu antenowego wyniósł 13 dB.
- Odbiór przez pięć oddzielnych systemów odbiorczych identycznych z pojedynczą stacją. Obliczono współczynnik błędów dla każdej ze stacji i wybrano tę z najlepszą jakością łącza (BER_{min}).
- Odbiór przez pięć oddzielnych systemów odbiorczych identycznych z pojedynczą stacją. Obliczono współczynnik błędów dla przypadku, kiedy żadna ze stacji nie odebrała prawidłowo danych (rozwiązanie optymalne, BER_o). Jeśli jedna ze stacji odebrała prawidłowo daną, uznaje się, że dana zostanie poprawnie zinterpretowana.
- Odbiór przez pięć oddzielnych systemów odbiorczych identycznych z pojedynczą stacją. Obliczono współczynnik błędów dla przypadku, kiedy większość stacji nie

odebrała prawidłowo danych (rozwiązanie głosowane, BER_v). Jeśli większość stacji odebrała prawidłowo daną, uznaje się, że dana zostanie poprawnie zinterpretowana w systemie porównywania pakietów.

$$BER_{SS} = \frac{1}{2} * e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{-2} \right)} \quad (53)$$

$$BER_n = \frac{1}{2} * e^{\left(\frac{n * \left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{-2} \right)}{-2} \right)} \quad (54)$$

$$BER_{MIN} = \underset{i=1}{\overset{n}{MIN}}(BER_i) \quad (55)$$

$$BER_i = BER_{SS} \Rightarrow BER_{MIN} = BER_{SS} \quad (56)$$

$$BER_O = \prod_{i=1}^n BER_i \quad (57)$$

$$BER_i = BER_{SS} \Rightarrow BER_O = (BER_{SS})^n \quad (58)$$

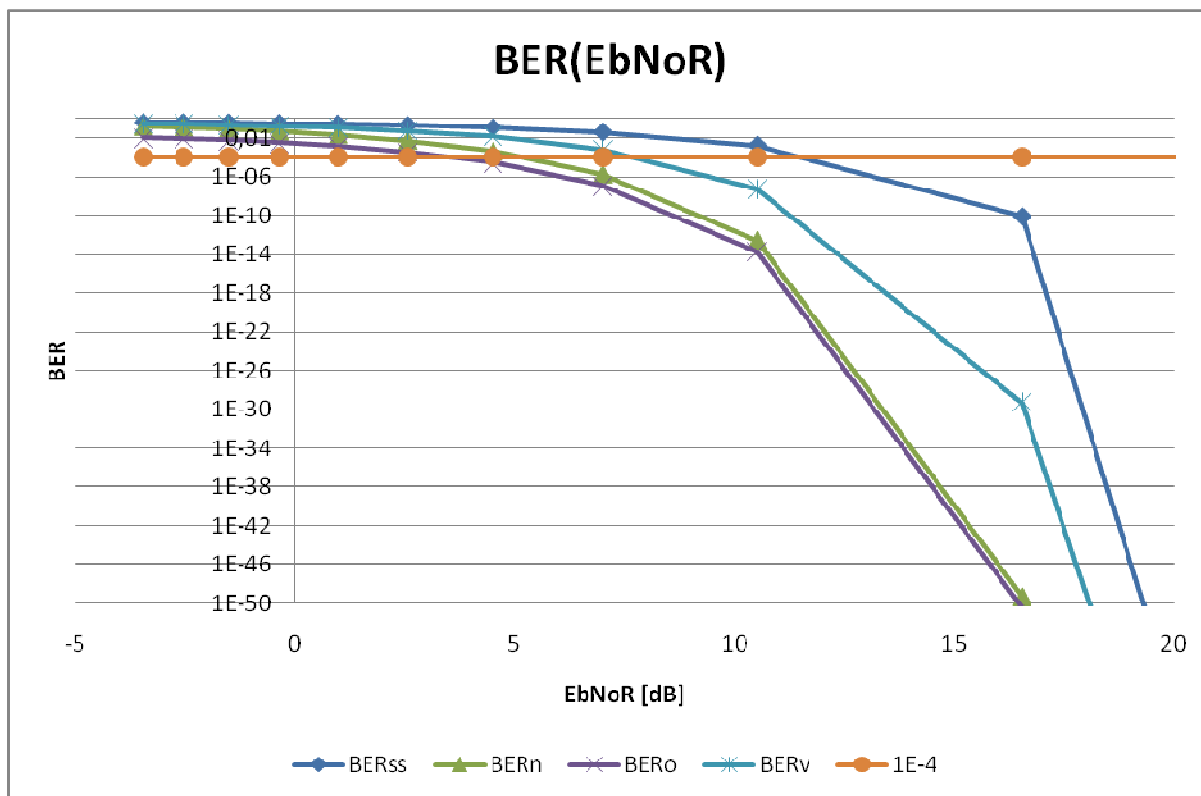
$$BER_V = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} * (BER_{SS})^i * (1 - BER_{SS})^{n-i} \quad (59)$$

n – liczba stacji odbiorczych, liczba anten w szyku
 k – liczba stacji odbiorczych potrzebnych do przegłosowania bitu
 (najmniejsza większość)

$$n < 2 * k \quad (60)$$

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (61)$$

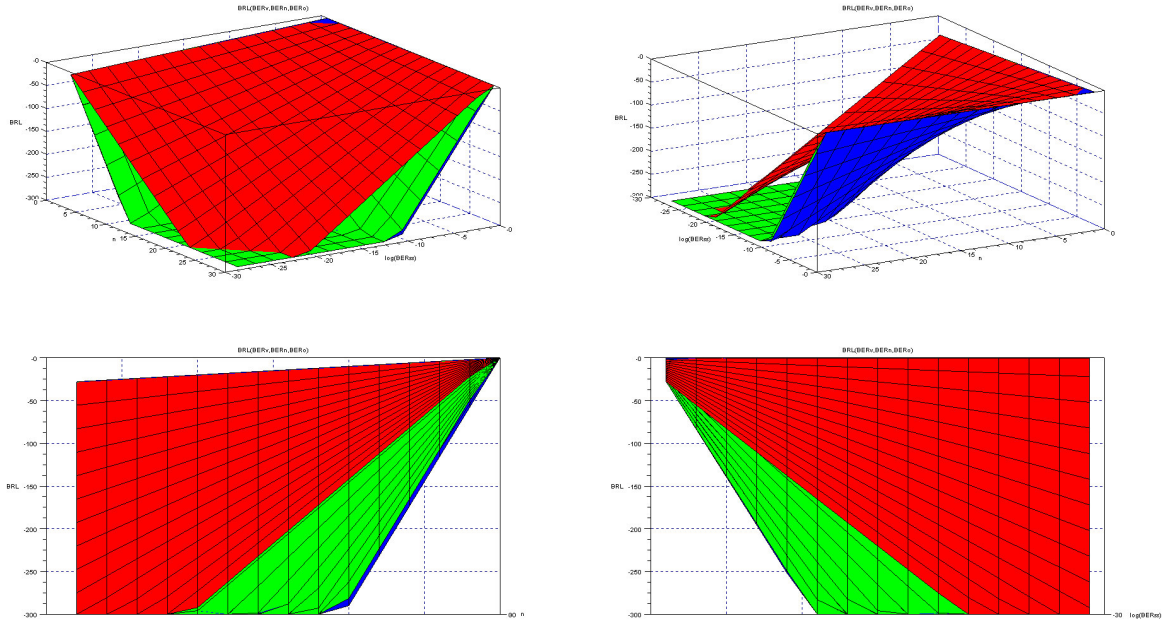
Współczynniki błędów przedstawionych w scenariuszach zawarte są w formułach (53) - (59), a ich zobrazowanie można zobaczyć na Rys. 49. W obliczeniach, gdzie wszystkie stacje naziemne mają taki sam BER, formuła BER_{min} (55) ma taką samą wartość jak formuła BER_{ss} (53), dlatego zostanie ona użyta dopiero w obliczeniach 3D.



Rys. 49. Współczynnik błędów (BER) w zależności od E_b/N_0R w bilansie łącza pojedynczej stacji.

Symulacja (Rys. 49) pokazała, że wszystkie techniki poprawiają jakość łącza radiowego. Najskuteczniejszą techniką poprawy jakości łącza jest technika optymalna (BERo). Prawie identyczne wyniki uzyskuje się dzięki budowaniu szyków antenowych (BERn). Najłabszą techniką jest technika głosowania (BERv), nie mniej należy pamiętać, że jest ona najprostsza w implementacji.

Na Rys. 50 przedstawiono graficzne porównanie jakości łącza w skali logarytmicznej ($BRL = \log(BER)$) dla różnych scenariuszy w zależności od jakości łącza pojedynczej stacji BERss oraz liczby stacji n. Symulacje przeprowadzono w programie Scilab [102], a kod symulacji umieszczono w załączniku 8.3. Wyplaszczenie na dole wykresu wynika z przekroczenia zakresu obliczeniowego programu Scilab. Symulacja potwierdza wyniki z symulacji przedstawionej na Rys. 49. Dodatkowo można zaobserwować, że zwiększanie w systemie liczby stacji (n) oraz zmniejszenie wartości BERss zwiększa skuteczność technik poprawiających jakość łącza.



Rys. 50. Wartości współczynników błędów. BER_v (czerwony), BER_n (zielony) oraz BER_o (niebieski) w zależności od BER_{ss} oraz n (skala logarymiczna $BRL = \log(BER_x)$, cztery rzuty tego samego wykresu).

Wyjaśnienia wymaga pochodzenie równania (59) opisującego współczynnik BER_v . Współczynnik ten określa prawdopodobieństwo pojawienia się błędu w transmisji przy wykorzystaniu systemu głosowania pakietów. Kiedy w systemie wykorzystywane jest „ n ” stacji naziemnych, większość z nich „ k ” musi odebrać a następnie głosować za błędnym rozwiązaniem. Równanie (62) to warunek aby „ k ” stacji stanowiło większość wśród „ n ” stacji.

$$n < 2 * k \tag{62}$$

BER_{ss} określa prawdopodobieństwo odebrania błędu przez pojedynczą stację, a $(1-BER_{ss})$ określa prawdopodobieństwo odebrania prawidłowego bitu przez pojedynczą stację. Prawdopodobieństwo odebrania od k stacji błędnego bitu (BER_k) określone jest w równaniu (63). Jest to prawdopodobieństwo odebrania błędu (BER_{ss}) przez „ k ” stacji pomnożone przez prawdopodobieństwo odebrania poprawnego bitu $(1-BER_{ss})$ przez $(n-k)$ stacji pomnożone przez liczbę takich kombinacji (bez powtórzeń). Formuła ta określana jest jako schemat Bernoullego (prawdopodobieństwo, że w n próbach Bernoullego sukces wypadnie dokładnie k razy [39]).

$$BER_k = \binom{n}{k} (BER_{SS})^k (1 - BER_{SS})^{n-k} \quad (63)$$

Liczba stacji z błędnie odebrany bitem może się zmieniać od k (równanie (62)) czyli najmniejszej możliwej większości do jednomyślności czyli liczby wszystkich stacji „n”. Prawdopodobieństwo popełnienia błędu w systemie głosowania (BER_V) to suma wygranych głosowań (BER_k) i określone jest przez równanie (64).

$$BER_V = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} (BER_{SS})^i (1 - BER_{SS})^{n-i} \quad (64)$$

Równania (65) oraz (66) przedstawiają przykładowe rozwinięcie formuły dla liczby stacji $n=5$ oraz najmniejszej większości $k=3$.

$$BER_{V5} = \sum_{i=3}^5 \binom{5}{i} (BER_{SS})^i (1 - BER_{SS})^{5-i} \quad (65)$$

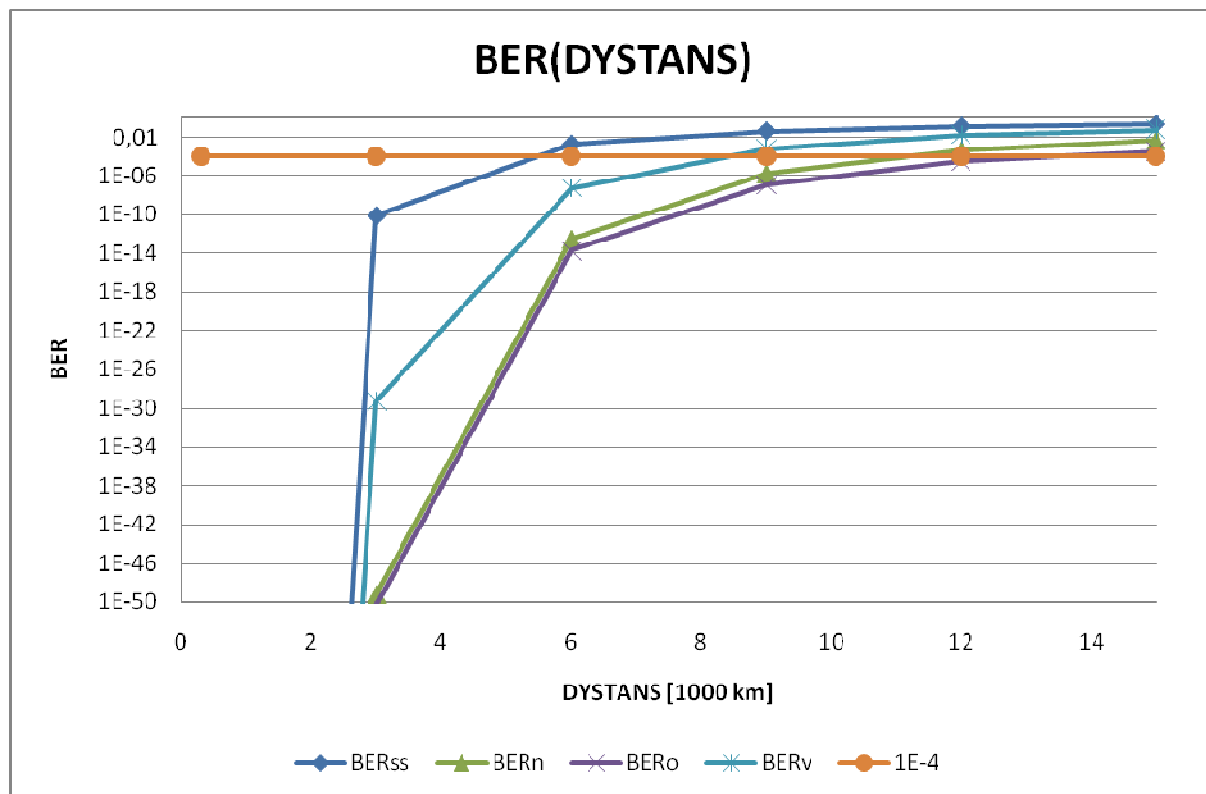
$$\begin{aligned} BER_{V5} &= \frac{5!}{3!(5-3)!} (BER_{SS})^3 (1 - BER_{SS})^{5-3} \\ &+ \frac{5!}{4!(5-4)!} (BER_{SS})^4 (1 - BER_{SS})^{5-4} \\ &+ \frac{5!}{5!(5-5)!} (BER_{SS})^5 (1 - BER_{SS})^{5-5} \end{aligned} \quad (66)$$

Formuła ta jest szczególnym przypadkiem ($E=n/2$) prawdopodobieństwa (P_W) wystąpienia więcej niż E błędów niezależnych w jednym słowie bitowym określonym według formuły Bernoulliniego (równanie (67), [38]) gdzie P_i to prawdopodobieństwo elementarne (jeden lub więcej błędów w ciągu j kolejnych bitów).

$$P_W = \sum_{j=E+1}^n \binom{n}{j} (P_i)^j (1 - P_i)^{n-j} \quad (67)$$

Na Rys. 51 przedstawiono wyniki symulacji współczynnika BER w zależności od odległości (zależność $E_b N_0 R$ w stosunku do odległości potrzebna do obliczeń została obliczona w punkcie 4.1 „Budżet mocy dla satelity radioamatorskiego.”). Linia BER_{SS} (53) przedstawia wynik dla pojedynczej stacji. Jest to linia odniesienia. BER_n (54)

przedstawiająca, o ile polepsza się kanał, jeśli zastosujemy pięć razy większą antenę. BER_o (57) to teoretyczna górna granica możliwości systemu. Jest to przypadek, gdy otrzymamy przynajmniej jeden poprawny wynik i w jakiś sposób będziemy wiedzieć, która stacja ma ten wynik. BER_v (59) to linia pokazująca współczynnik błędów przy wykorzystaniu systemu porównywania pakietów. System zakłada, że większość stacji odbierze poprawnie dane, co pozwoli metodą głosowania większościowego odrzucić błędnie odebrane dane.



Rys. 51. Wartości parametrów BER w zależności od odległości.

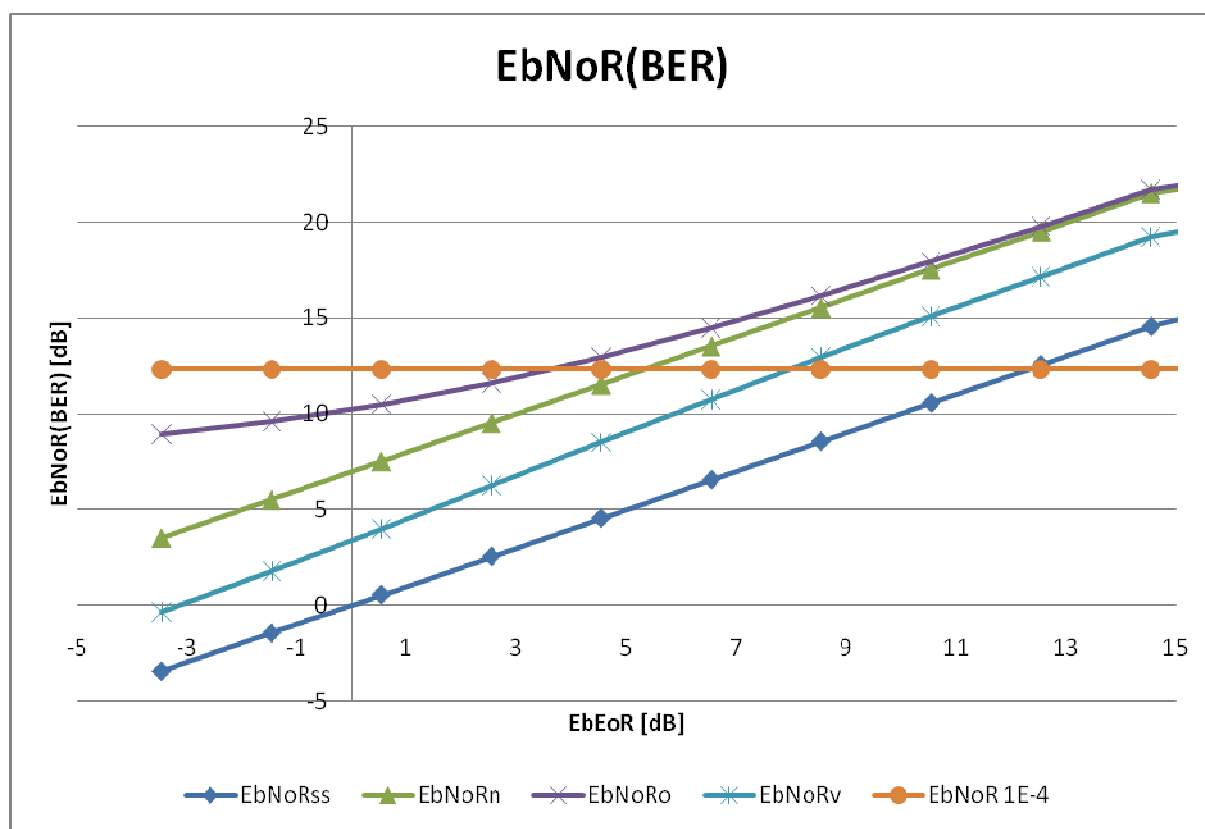
Wyniki symulacji są zgodne z poprzednimi dwoma symulacjami. Przedstawia ona, że system głosowania pakietów składający się z pięciu stacji odbiorczych umożliwia poprawę jakości łącza w porównaniu do pojedynczej stacji. Nie jest on jednak tak skuteczny jak zastosowanie odpowiednio powiększonego systemu antenowego (jedna stacja z pięciokrotnie lepszą anteną). Najbliższym odpowiednikiem szyku antenowego jest rozwiązanie optymalne, które daje wyniki nieznacznie lepsze od szyku antenowego.

Warto zauważyć, że odległość 3500 km jest zwykle ze względu na horyzont radiowy granicznym zasięgiem dla niskoorbitujących satelitów. Wraz z malejącą odległością rośnie przewaga systemów porównujących. Przekształcenie równania (53) do postaci równania (68), umożliwia obliczenie jak duży musiał być system antenowy, aby dorównać systemowi

porównywania pakietów (Rys. 52). Dla ułatwienia obliczeń komputerowych (ze względu na problemy z obliczeniami na bardzo wielkich liczbach) warto zamiast z wartości BER korzystać z wartości $\log(\text{BER})$. W takiej sytuacji formuła przyjmuje postać (69). Serie danych ($E_bN_0R_{SS}$, $E_bN_0R_n$, $E_bN_0R_o$, $E_bN_0R_v$) uzyskujemy przez podstawianie formuł (równania (53) - (59)) do równania (68) jako niewiadomej BER_x .

$$E_bN_0R_x[\text{dB}] = 10 * \log(-2 * \ln(2 * \text{BER}_x)) \quad (68)$$

$$E_bN_0R_x[\text{dB}] = 10 * \log(-2 * (\ln(2) + \log(\text{BER}_x) * \ln(10))) \quad (69)$$



Rys. 52. Porównanie różnic w teoretycznym bilansie łącza w zależności od E_bN_oR w bilansie pojedynczej stacji odbiorczej.

Zgodnie z przewidywaniem, odległość pomiędzy $E_bN_0R_{SS}$ a $E_bN_0R_n$ wynosi 7 dB, a więc tyle ile wynosi różnica w zysku sekcji pięciu anten względem pojedynczej anteny. Różnica pomiędzy $E_bN_0R_o$ a $E_bN_0R_n$ jest zmienna. Za pomocą przekształceń (równania (70) - (83)) otrzymujemy równanie (84), za pomocą którego można obliczyć dokładnie tą różnicę. Z formuły wynika, że różnica ta rośnie wraz z malejącą wartością E_bN_0R oraz rosnącą wartością n . Oznacza to, że dla słabszych sygnałów korzystniejsze jest wykorzystanie większej liczby

stacji odbiorczych korzystających z algorytmu optymalnego zamiast budowania większych szyków antenowych.

$$BER_{SS} = \frac{1}{2} * e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{-2} \right)} \quad (70)$$

$$BER_o = (BER_{SS})^n \quad (71)$$

$$BER_o = \frac{1}{2} * e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R_o [dB]}{10}}}{-2} \right)} \quad (72)$$

$$\frac{1}{2} * e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R_o [dB]}{10}}}{-2} \right)} = \left(\frac{1}{2} * e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{-2} \right)} \right)^n \quad (73)$$

$$e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R_o [dB]}{10}}}{-2} \right)} = \left(\frac{1}{2} \right)^{n-1} * \left(e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{-2} \right)} \right)^n \quad (74)$$

$$\frac{10^{\frac{E_b N_0 R_o [dB]}{10}}}{-2} = \ln \left(\left(\frac{1}{2} \right)^{n-1} \right) + \ln \left(\left(e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{-2} \right)} \right)^n \right) \quad (75)$$

$$\frac{10^{\frac{E_b N_0 R_o [dB]}{10}}}{-2} = (n-1) * \ln \left(\frac{1}{2} \right) + n * \left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{-2} \right) \quad (76)$$

$$10^{\frac{E_b N_0 R_o [dB]}{10}} = (-2) * (n-1) * \ln \left(\frac{1}{2} \right) + n * \left(10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}} \right) \quad (77)$$

$$\frac{E_b N_0 R_o [dB]}{10} = \log \left((n-1) * \ln(4) + n * \left(10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}} \right) \right) \quad (78)$$

$$E_b N_0 R_o [dB] = 10 * \log(n) + 10 * \log \left(\left(1 - \frac{1}{n} \right) * \ln(4) + 10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}} \right) \quad (79)$$

$$E_b N_0 R_n [dB] = E_b N_0 R [dB] + 10 * \log(n) \quad (80)$$

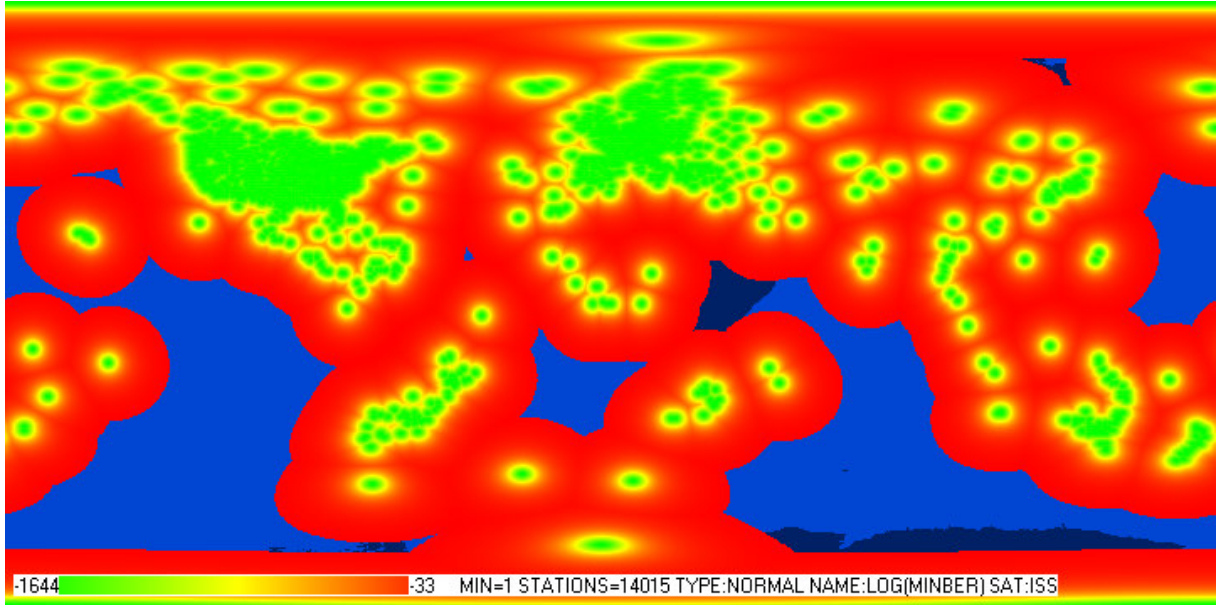
$$\begin{aligned} E_b N_0 R_o [dB] - E_b N_0 R_n [dB] = \\ 10 * \log \left(\left(1 - \frac{1}{n} \right) * \ln(4) + 10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}} \right) - E_b N_0 R [dB] \end{aligned} \quad (81)$$

$$\begin{aligned} E_b N_0 R_o [dB] - E_b N_0 R_n [dB] = \\ 10 * \log \left(\left(1 - \frac{1}{n} \right) * \ln(4) + 10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}} \right) - 10 * \log \left(10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}} \right) \end{aligned} \quad (82)$$

$$E_b N_0 R_o [dB] - E_b N_0 R_n [dB] = 10 * \log \left(\frac{\left(1 - \frac{1}{n} \right) * \ln(4) + 10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}} \right) \quad (83)$$

$$E_b N_0 R_o [dB] - E_b N_0 R_n [dB] = 10 * \log \left(\frac{\left(1 - \frac{1}{n} \right) * \ln(4)}{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}} + 1 \right) \quad (84)$$

Do przeprowadzenia symulacji 3D tak jak poprzednich podpunktach autor użył narzędzia DGSSC. Na Rys. 53 można zaobserwować wartość współczynnika BER dla algorytmu BERmin (do komunikacji wybierana jest stacja z najlepszą jakością łącza). Metoda ta pozwala na uzyskanie stabilnego połączenia z satelitą podczas około 80% jego orbity. Wadą tego rozwiązania jest to, że do odbioru danych wykorzystujemy tylko energię odebraną poprzez jedną stację naziemną. Pozostała energia (odebrana przez inne stacje) wykorzystywana jest jedynie do obliczania współczynników BER poszczególnych stacji celem przeprowadzenia wyboru najlepszej stacji.



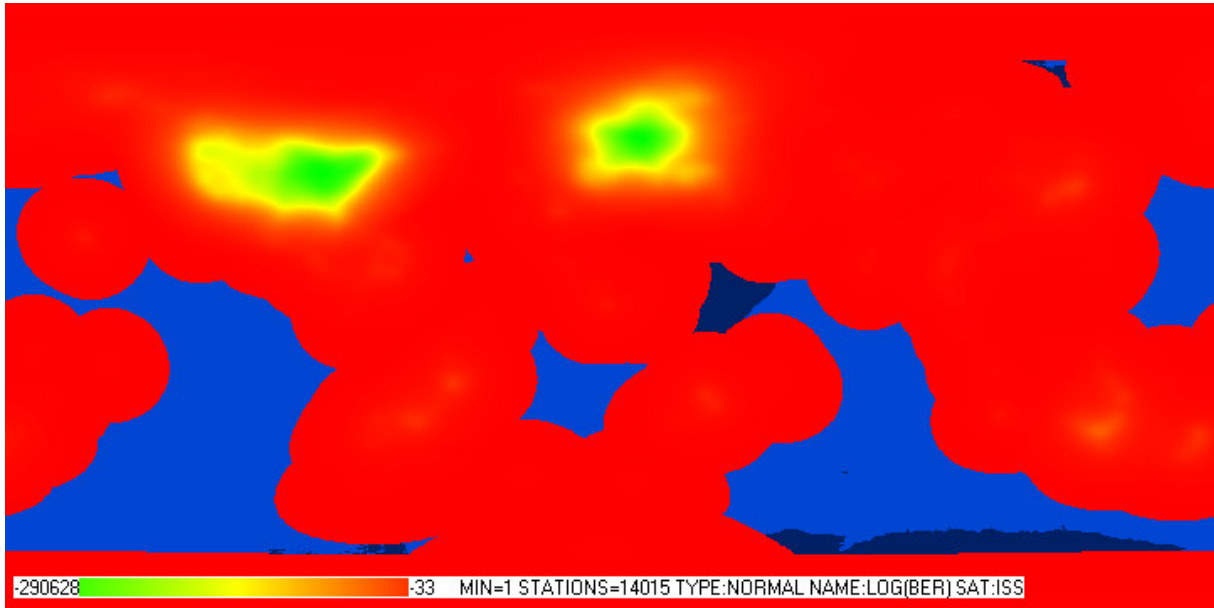
Rys. 53 Wartości współczynnika BER przy wykorzystaniu algorytmu minimalnego (BERmin).

Kolejna symulacja przedstawia realizację rozproszonego odbioru za pomocą algorytmu optymalnego (BERo - Rys. 54, Rys. 55). Rozwiązanie to pokazuje teoretyczne maksymalne możliwości wykorzystania odebranej energii poprzez system rozproszony. Pojawiają się tu wręcz nieprawdopodobne wartości $BER=E-290628$. Dane te należy traktować jako wartości teoretyczne, ponieważ rozważamy tu przypadek idealny, czyli dane są całkowicie skorelowane, a szumy całkowicie nieskorelowane. Rozważny jest tu przypadek odebrania prawidłowo jednego bitu. W przypadku użycia algorytmu BERo do odebrania ciągu bitów (ramkę składającą się z nagłówka, pola danych i sumy kontrolnej) przez jedną stację wartość parametry BER będzie dużo większa. Dla ramki o wielkości „l” bitów wartość BER_l odebrania pakietu przez jedną stację będzie większa (przy założeniu, że wartość BER_{ss} jest mniejsza od 1, (85) [39]), a zatem wartość BER_{ol} dla rozwiązania optymalnego będzie także większa i określa ją równanie (86), gdzie „n” to liczba stacji wykorzystana do odbioru optymalnego a „l” to wielkość pakietu danych w bitach.

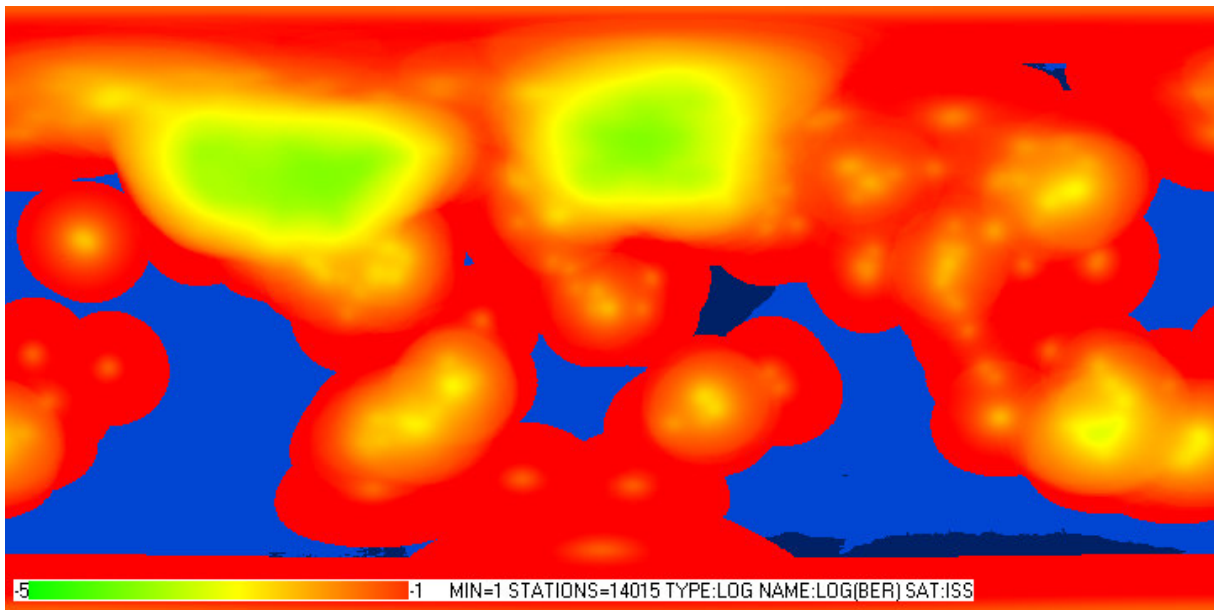
$$BER_l = 1 - (1 - BER_{ss})^l \quad (85)$$

$$BER_{ol} = BER_l^n \quad (86)$$

Ważną uwagą do tej symulacji jest to, że algorytm optymalny nad obszarami zurbanizowanymi pozwala uzyskać bardzo wysoką jakość łącza.



Rys. 54. Wartości współczynnika BER przy wykorzystaniu algorytmu optymalnego BERo (skala logarytmiczna – $\log(\text{BER})$).



Rys. 55. Wartości współczynnika BER przy wykorzystaniu algorytmu optymalnego BERo (skala podwójnie logarytmiczna $\log(\log(\text{BER}))$).

Do przeprowadzenia symulacji 3D algorytmu głosowanego (BERv) autor wyprowadził odpowiednie formuły (równania (87) - (92)).

Liczba stacji w zasięgu n

BER pojedynczej i-tej stacji BER_{ss_i}

Współczynnik poprawności odebrania bitu przez i-tą stację naziemną

$$a_i = \begin{cases} 1 & \text{gdy } i\text{-ta stacja odebrała poprawnie bit} \\ 0 & \text{gdy } i\text{-ta stacja odebrała niepoprawnie bit} \end{cases} \quad (87)$$

Funkcja binarna:
1 stacja odebrała prawidłowo bit,
0 stacja odebrała nieprawidłowo bit.

$$Y(x) = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n) \quad (88)$$

$$Y(0) = (0, 0, 0, \dots, 0, 0, 0)$$

$$Y(1) = (0, 0, 0, \dots, 0, 0, 1)$$

$$Y(2) = (0, 0, 0, \dots, 0, 1, 0)$$

$$Y(3) = (0, 0, 0, \dots, 0, 1, 1)$$

...

$$Y(2^n) = (1, 1, 1, \dots, 1, 1, 1)$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, 2^n$$

Liczba stacji która odebrała prawidłowy bit w kombinacji x.

$$S(x) = \sum_{i=1}^n a_i \quad (89)$$

Prawdopodobieństwo i-tego elementu w kombinacji x

$$P_i(x) = \begin{cases} BER_{ss_i} & a_i = 1 \wedge S(x) > \frac{n}{2} \\ 1 - BER_{ss_i} & a_i = 0 \wedge S(x) > \frac{n}{2} \\ 0 & S(x) \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (90)$$

Prawdopodobieństwo kombinacji x

$$PK(x) = \prod_{i=1}^n P_i \quad (91)$$

Prawdopodobieństwo odebrania błędnego bitu

$$BER_V - 3D = \sum_{x=1}^{2^n} PK(x) \quad (92)$$

Formuły służą do obliczenia parametru BER_V dla n stacji naziemnych z których każda odbiera z jakością łącza BER_{ss_i} (parametr BER_{ss_i} dla każdej stacji może być różny). Przy n stacjach prawidłowo odebrać bit może od 0 stacji do n stacji. Parametr a_i (87) określa, czy dana stacja naziemna odebrała bit poprawnie (1) czy błędnie (0). Przy n stacjach odbiorczych liczba kombinacji parametru a_i jest równa 2^n . Funkcja $Y(x)$ (88) jest funkcją binarną określającą wszystkie możliwe kombinacje parametru a_i . Parametr x określa numer możliwej kombinacji. Aby w systemie głosowania „wygrał” prawidłowo odebrany bit, liczba stacji

która poprawnie odbierze bit musi być większa od połowy (89). Parametr P_i jest powiązaniem prawdopodobieństwa odebrania przez i -tą stację błędnego bitu z informacją czy w danej kombinacji i -ta stacja odebrała poprawnie ten bit. Formuła $PK(x)$ (91) określa prawdopodobieństwo odebrania błędnego bitu przez daną kombinację. Parametr BER_v_{3D} (92) jest sumą prawdopodobieństw wszystkich kombinacji i określa prawdopodobieństwo odebrania błędnego bitu przez system głosowania pakietów.

Złożoność obliczeniowa parametry BER_o (57) ma wartość n . Złożoność obliczeniowa parametru BER_v_{3D} wynosi 2^{n+1} . Wraz ze wzrostem liczby stacji w zasięgu wykładniczo rośnie złożoność obliczeniowa problemu. Realizacja symulacji 3D dla całej Ziemi okazała się zbyt złożona i niemożliwa czasowo dla współczesnych komputerów. Autor przedstawił kilka przykładowych obliczeń dla przypadku 1D (Tab. 3) oraz dla przypadku 3D (Tab. 4), aby możliwe było porównanie skuteczności algorytmów do poprawy jakości łącza. Obliczenia przeprowadzono dla pięciu stacji naziemnych. Wyniki symulacji 1D są zbieżne z poprzednimi symulacjami. Najmniejszą skuteczność daje algorytm BER_{min} . Lepsze rezultaty daje algorytm BER_v a najlepsze BER_o .

Tab. 3. Porównanie współczynnika BER_v do BER_v_{3D} model 1D.

Nr	Dystans [km]	EbNoR [dB]	BER_{ss}	BER_{min}	BER_n	BER_o	BER_v	BER_v_{3D}
1	3,78E+03	1,45E+01	3,34E-07	3,34E-07	6,69E-32	4,18E-33	3,74E-19	3,74E-19
2	4,75E+03	1,25E+01	6,35E-05	6,35E-05	1,66E-20	1,03E-21	2,56E-12	2,56E-12
3	5,99E+03	1,05E+01	1,74E-03	1,74E-03	2,56E-13	1,60E-14	5,26E-08	5,26E-08
4	7,54E+03	8,54E+00	1,41E-02	1,41E-02	8,79E-09	5,49E-10	2,72E-05	2,72E-05
5	9,49E+03	6,54E+00	5,25E-02	5,25E-02	6,39E-06	4,00E-07	1,34E-03	1,34E-03
6	1,19E+04	4,54E+00	1,21E-01	1,21E-01	4,09E-04	2,56E-05	1,45E-02	1,45E-02
7	1,50E+04	2,54E+00	2,04E-01	2,04E-01	5,64E-03	3,52E-04	6,09E-02	6,09E-02
8	1,89E+04	5,39E-01	2,84E-01	2,84E-01	2,95E-02	1,84E-03	1,42E-01	1,42E-01
9	2,38E+04	-1,46E+00	3,50E-01	3,50E-01	8,38E-02	5,24E-03	2,35E-01	2,35E-01
10	3,00E+04	-3,46E+00	3,99E-01	3,99E-01	1,62E-01	1,01E-02	3,16E-01	3,16E-01

Można zaobserwować, że rząd wielkości wyników BER_v jest około dwa większy niż rząd wielkości BER_o . W przypadku 1D można zastosować wzór przybliżony (93), aby na podstawie parametru BER_o oszacować wartości parametru BER_v , który jest bardziej złożony obliczeniowo.

$$BER_v \approx 10^{\frac{\log(BER_o)}{2}} \quad (93)$$

W przypadku symulacji 3D autor wykorzystał losowy rozkład parametru BER_{ss} wyniki są inne. Najmniejszą skutecznością wykazał się algorytm głosowany (BER_{v_3D}). Lepszy okazał się algorytm minimalny (BER_{min}) a najlepszy optymalny (BER_o). Zmiana ta jest wynikiem dużego wpływu przez stacje z większym parametrem BER_{ss} na algorytm głosowany. W celu poprawienia skuteczności tego algorytmu autor proponuje prowadzić aktywny monitoring jakości łącza poszczególnych stacji aby wykluczyć z systemu głosowania stacje które będą wpływać negatywnie na jakość łącza w systemie głosowanym. Innym możliwym rozwiązaniem jest zastosowanie algorytmów mieszanych wykorzystujących wszystkie trzy algorytmy jednocześnie. Zagadnienia te wymaga jednak przeprowadzenia dalszych badań.

Tab. 4. Porównanie współczynnika BER_v do BER_{v_3D} model 3D.

Nr	BER _{ss_1}	BER _{ss_2}	BER _{ss_3}	BER _{ss_4}	BER _{ss_5}	BER _{v_3D}	BER _{min}	BER _o
1	3,34E-07	6,35E-05	1,74E-03	1,41E-02	5,25E-02	1,34E-06	3,34E-07	2,73E-17
2	1,21E-01	2,04E-01	2,84E-01	3,50E-01	3,99E-01	1,21E-01	1,21E-01	9,75E-04
3	6,35E-05	3,34E-07	5,25E-02	3,99E-01	1,41E-02	2,96E-04	3,34E-07	6,26E-15
4	2,04E-01	2,84E-01	3,50E-01	3,34E-07	3,99E-01	2,96E-04	3,34E-07	6,26E-15
5	3,34E-07	1,21E-01	2,04E-01	3,50E-01	1,41E-02	1,02E-02	3,34E-07	4,04E-11
6	1,74E-03	3,34E-07	1,74E-03	3,99E-01	1,21E-01	1,69E-04	3,34E-07	4,88E-14
7	1,74E-03	2,04E-01	3,34E-07	1,21E-01	3,50E-01	8,80E-03	3,34E-07	5,01E-12
8	1,21E-01	6,35E-05	3,50E-01	3,50E-01	1,41E-02	1,71E-02	6,35E-05	1,32E-08
9	5,25E-02	2,84E-01	1,21E-01	6,35E-05	3,99E-01	2,18E-02	6,35E-05	4,56E-08
10	2,84E-01	5,25E-02	3,99E-01	2,04E-01	3,50E-01	1,02E-01	5,25E-02	4,24E-04

Jak wcześniej wspomniano, dla poprawnej komunikacji w kanale radiowym współczynnik BER powinien być równy lub mniejszy niż 1E-4. Proponowane metody pozwalają na osiągnięcie dużo mniejszych wartości. Autor proponuje wykorzystać „potencjał” małych wartości współczynnika BER zmniejszając moc nadajnika, bądź zwiększając prędkość transmisji tak, aby zachowana była zależność $BER < 1E-4$.

Równanie (96) wyznacza teoretyczną wartość $E_b N_0 R_O$ dla algorytmu optymalnego oraz uzyskanego optymalnego współczynnika błędów BER_o. Równanie (97) wyznacza wartość $E_b N_0 R_{1E-4}$ dla BER=1E-4. Równanie (99) określa różnicę pomiędzy wartościami $E_b N_0 R_O$ a $E_b N_0 R_{1E-4}$. Ta sama formuła w postaci ułatwiającej obliczenia komputerowe (BER przechowywane jako log(BER)) ma postać równania (100). Różnica może zostać spożytkowana na zmniejszenie mocy nadajnika, aby zachować zadowalającą jakość łącza. Równanie (101) wyznacza, jaką mocą minimalną należy nadawać, aby przy wykorzystaniu algorytmu optymalnego uzyskać jakość łącza na poziomie BER=1E-4.

$$BER = \frac{1}{2} * e^{\left(\frac{10^{\frac{E_b N_0 R [dB]}{10}}}{-2} \right)} \quad (94)$$

$$E_b N_0 R [dB] = 10 * \log(-2 * \ln(2 * BER)) \quad (95)$$

$$E_b N_0 R_o [dB] = 10 * \log(-2 * \ln(2 * BER_o)) \quad (96)$$

$$E_b N_0 R_{1E-4} [dB] = 10 * \log(-2 * \ln(2 * (1E - 4))) \quad (97)$$

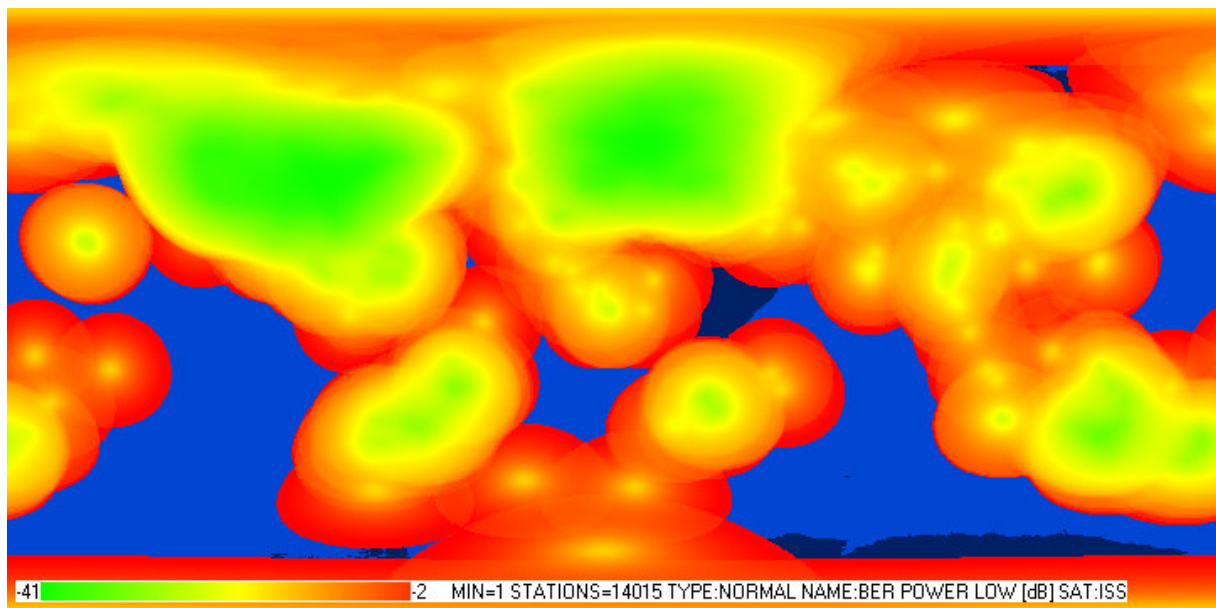
$$SUBE_b N_0 R [dB] = E_b N_0 R_o [dB] - E_b N_0 R_{1E-4} [dB] \quad (98)$$

$$SUBE_b N_0 R [dB] = 10 * \log\left(\frac{\ln(2 * BER_o)}{\ln(2E - 4)} \right) \quad (99)$$

$$SUBE_b N_0 R [dB] = 10 * \log\left(\frac{\ln(2) + \log(BER_o) * \ln(10)}{\ln(2E - 4)} \right) \quad (100)$$

$$TXP_{POWERLOW} [dBw] = TXP [dBw] - SUBE_b N_0 R [dB] \quad (101)$$

Symulacja matematyczna (Rys. 56) pokazuje, że dzięki temu zabiegowi możliwy jest prawidłowy odbiór sygnału z satelity, gdy ten nadaje z niewielką mocą $TXP_{POWERLOW}$. Nad obszarami USA oraz Unii Europejskiej wartość ta wynosi tylko -41 dBw czyli mniej o 48 dB względem wartości zwykle używanej dla wcześniej założonych warunków symulacji ($TXP=5$ W (7 dBw)).



Rys. 56. Symulacja wartości parametru $TXP_{POWERLOW}(BER_o)$.

Kolejna metoda wykorzystania wysokiej jakości łącza dzięki algorytmom rozproszonego odbioru, to zwiększenie prędkości transmisji kosztem parametru BER. Zgodnie z twierdzeniem Shanonna [37] dla danego stosunku sygnału do szumu (CNR) oraz szerokości pasma B_s można wyznaczyć maksymalną przepływność bitową BR_s (równanie (102) - (103)). Jako wartość CNR wykorzystano CNR_o uzyskany podczas symulacji algorytmu optymalnego (równanie (104) - (105)), co pozwoliło na wyprowadzenie formuły (106) zależnej od E_bN_oR oraz B i BR . Wartość E_bN_oR w zależności od BER została wyprowadzona wcześniej (107), co po podstawieniu pozwala otrzymać ostateczną formułę (108). Ta sama formuła w postaci ułatwiającej obliczenia komputerowe (BER przechowywane jako $\log(BER)$) ma postać równania (109).

$$BR_s[bps] = B_s[Hz] * \log_2 \left(1 + \frac{C[W]}{N[W]} \right) \quad (102)$$

$$BR_s[dB] = B_s[dB] + 10 * \log \left(\log_2 \left(10^{\frac{CNR[dB]}{10}} \right) \right) \quad (103)$$

$$E_bN_oR_o[dB] = CNR_o[dB] + B_o[dB] - BR_o[dB] \quad (104)$$

$$CNR_o[dB] = E_bN_oR_o[dB] - B_o[dB] + BR_o[dB] \quad (105)$$

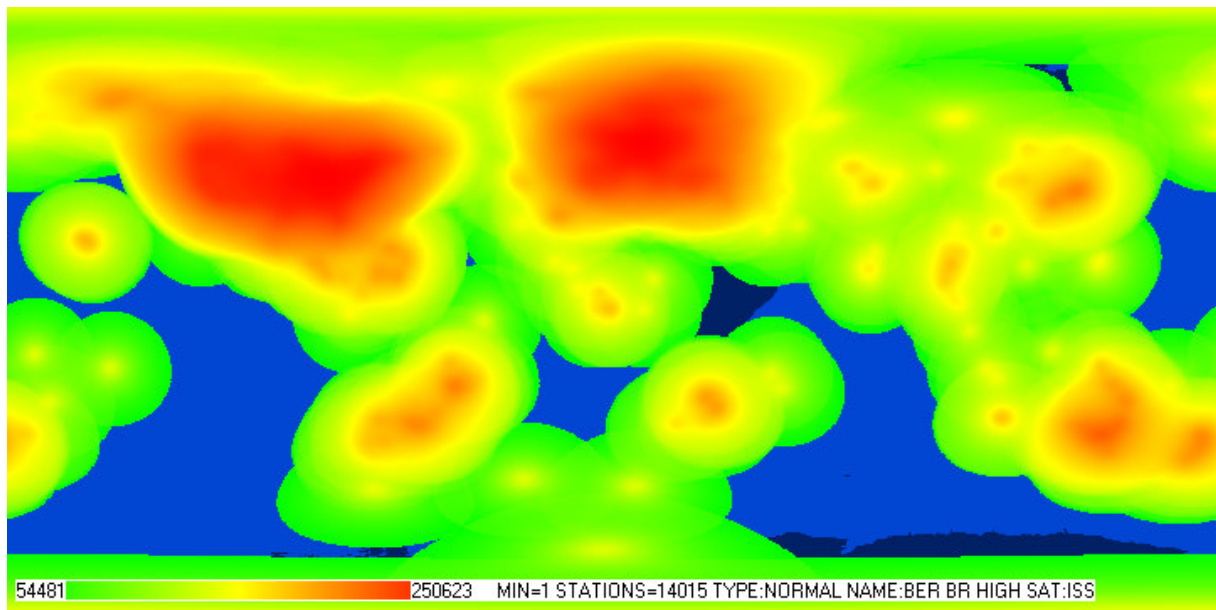
$$BR_s[dB] = B_s[dB] + 10 * \log \left(\log_2 \left(10^{\frac{E_bN_oR_o[dB] - B_o[dB] + BR_o[dB]}{10}} \right) \right) \quad (106)$$

$$E_bN_oR_o[dB] = 10 * \log(-2 * \ln(2 * BER_o)) \quad (107)$$

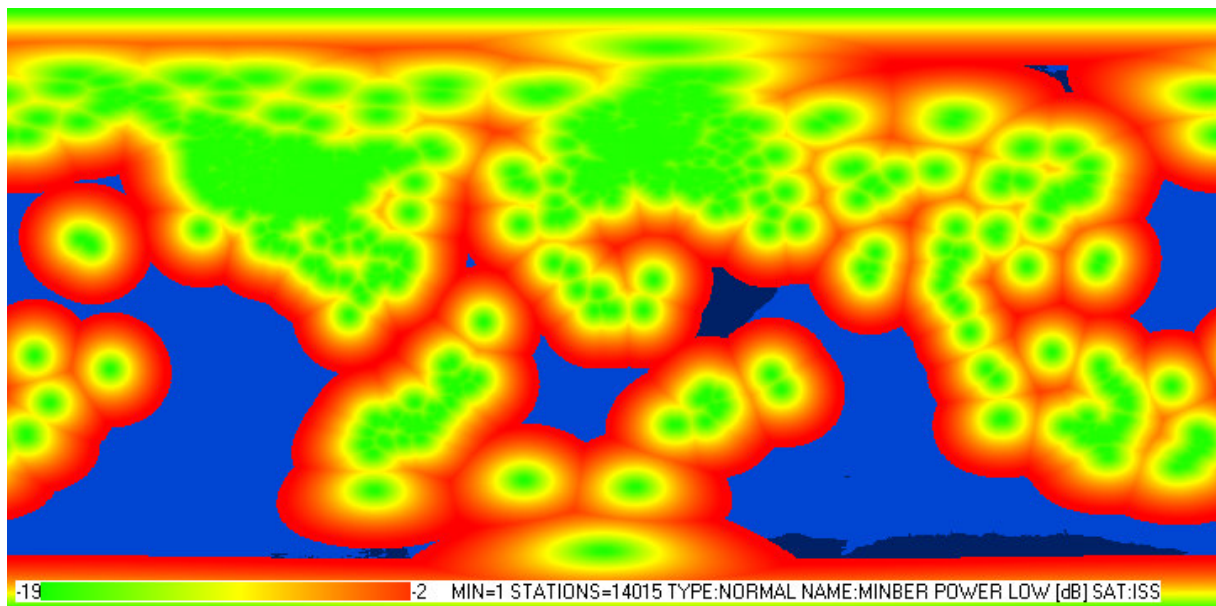
$$BR_s[dB] = B_s[dB] + 10 * \log \left(\log_2 \left(10^{\frac{10 * \log(-2 * \ln(2 * BER_o)) - B_o[dB] + BR_o[dB]}{10}} \right) \right) \quad (108)$$

$$BR_s[dB] = B_s[dB] + 10 * \log \left(\left(\log(-2 * (\ln(2) + \log(BER_o) * \ln(10))) \right) + \frac{BR_o[dB] - B_o[dB]}{10} \right) * \log_2(10) \quad (109)$$

Na Rys. 57 przedstawiono wynik symulacji maksymalnej przepustowości bitowej łącza. Nad obszarami USA oraz UE wartości osiągają poziom 250 Kbps (200 razy szybciej względem wartości zwykle używanej dla wcześniej założonych warunków symulacji (BR=1200 bps)). Należy jednak pamiętać, że wartości te są dla przypadku idealnego oraz algorytmu optymalnego, który wyznacza granicę możliwości rozproszonego odbioru.



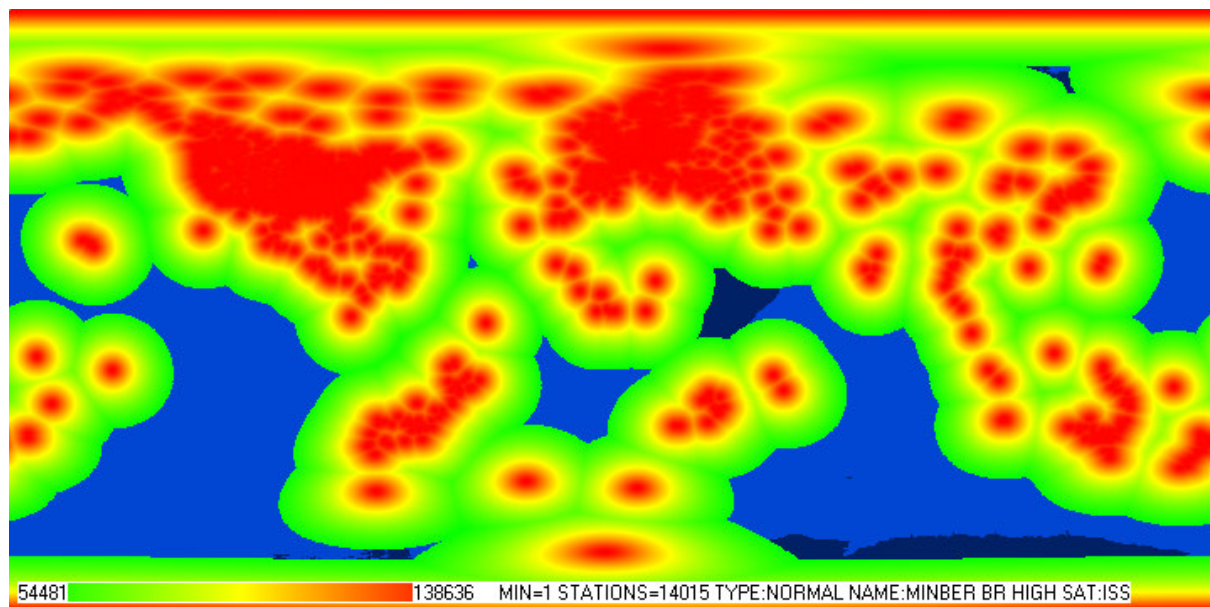
Rys. 57. Symulacja wartości parametru BR_s (BERo) dla algorytmu optymalnego.



Rys. 58. Symulacja wartości parametru $TXP_{POWERLOW}$ (BERmin) dla algorytmu minimalnego.

Autor przeprowadził również symulację na bardziej rzeczywistym modelu, jakim jest algorytm minimalny (BERmin). Model ten odpowiada pracy w sieci APRS-IS. Wyniki

symulacji można zobaczyć na Rys. 58 i Rys. 59. Uzyskane wartości to $\text{TXP}_{\text{POWERLOW}} = -19$ dBw oraz $\text{BR}_S = 138636$ bps (100 razy szybciej).



Rys. 59. Symulacja wartości parametru BR_S (BERmin) dla algorytmu minimalnego.

5. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA KONCEPCJI.

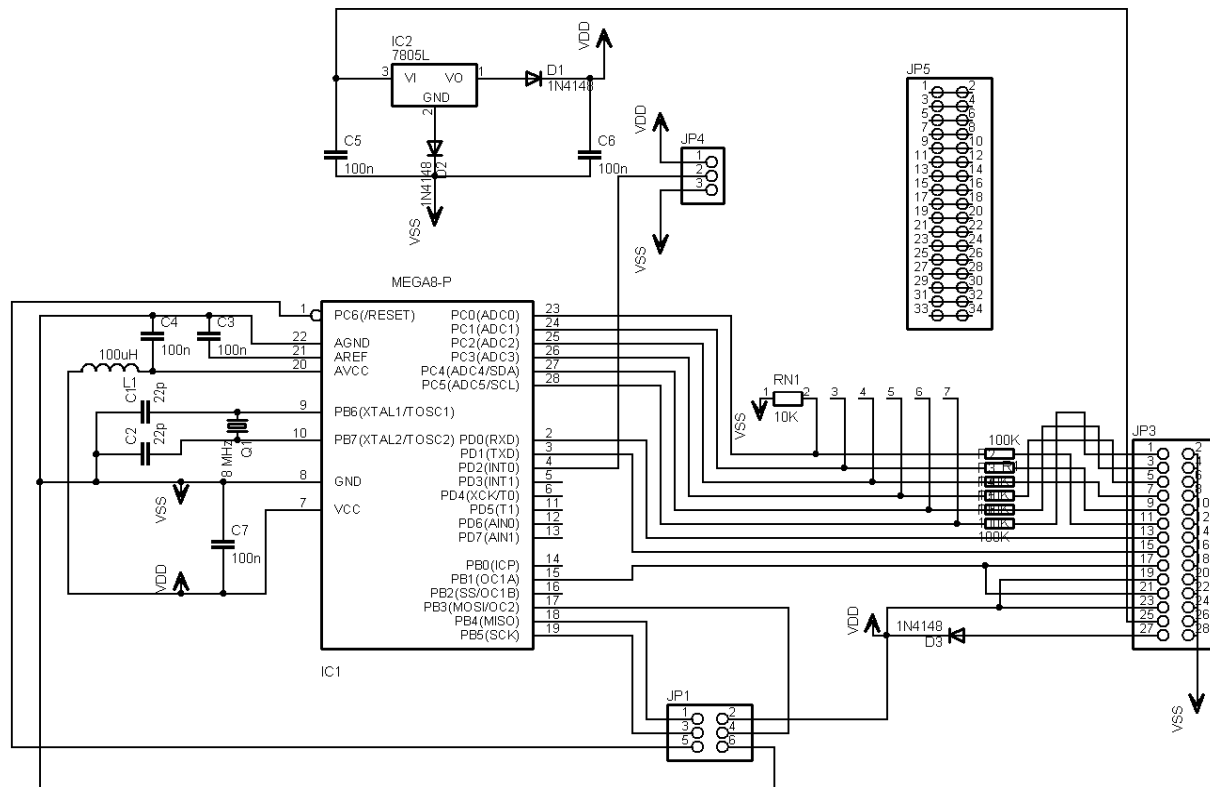
W poprzednim rozdziale autor przedstawił sposoby symulacji wykorzystania technik Rozproszonej Stacji Naziemnej. Aby sprawdzić rzeczywiste działanie zaproponowanych technik poprawy jakości łącza, autor przeprowadził kilka eksperymentów [71]. Eksperymenty te można zaliczyć do dwóch grup. Pierwsza grupa to eksperymenty z wykorzystaniem balonów stratosferycznych. Polegały one na wysyłaniu w powietrze nadajnika telemetrycznego i wielokrotnym odbiorze wysyłanych przez niego sygnałów. Eksperymenty te pozwoliły na ogólne sprawdzenie koncepcji RSN. Drugi typ eksperymentów to laboratoryjny symulator Rozproszonej Stacji Naziemnej. Eksperymenty te polegały na zbudowaniu systemu składającego się z nadajnika, tłumika sygnału wielkiej częstotliwości, dzielnika sygnału oraz 9 odbiorników. System ten pozwalał na szczegółowe symulowanie zjawisk w kanale radiowym i sprawdzanie skuteczności różnych algorytmów poprawy jakości łącza.

5.1. Weryfikacja w systemie rzeczywistym - misje balonowe.

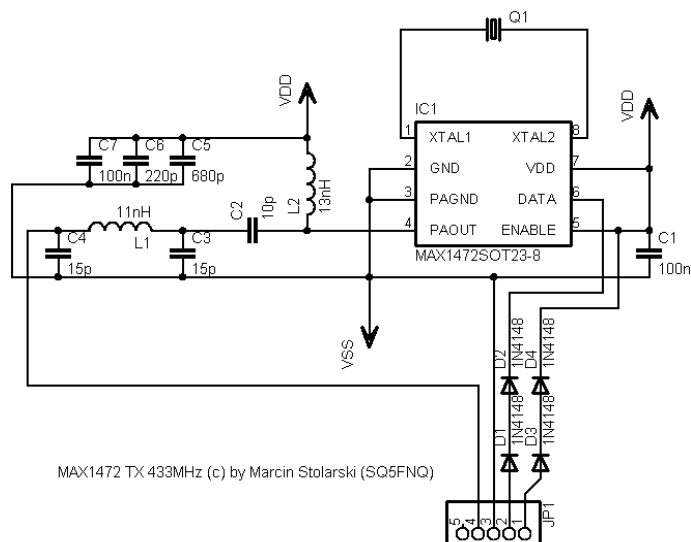
Podczas własnych prac badawczych związanych z technikami satelitarnymi autor w procesie prototypowania komponentów często posługiwał się balonami stratosferycznymi. Balon stratosferyczny [96] [73] pozwala na wyniesienie komponentu na wysokość do około 40 km nad powierzchnię Ziemi. Podczas lotu urządzenia mogą zostać poddane ekstremalnym warunkom środowiskowym takim jak temperatura poniżej -70 stopni Celsjusza, ciśnienie 5 Pa, zwiększone napromieniowanie (np. na wysokości 40 km urządzenia narażane są na 10-krotnie większą dawkę promieniowania protonowego niż na Ziemi [16]) czy mikrogravitacja. Taka misja ma też znamiona misji kosmicznej, ponieważ podczas jej trwania nie ma dostępu do urządzenia, a jego sterowanie może się odbywać jedynie drogą radiową. Autor postanowił wykorzystać taką platformę do przetestowania możliwości Rozproszonej Stacji Naziemnej w warunkach rzeczywistych. Kapsuła balonu symulowała satelitę, z którego telemetria była odbierana przez wiele stacji naziemnych. Misje balonowe realizowały różne eksperymenty, ale opis ograniczono jedynie do kwestii związanych z badaniem Rozproszonej Stacji Naziemnej.

5.1.1. Opis modułu Świerszcz.

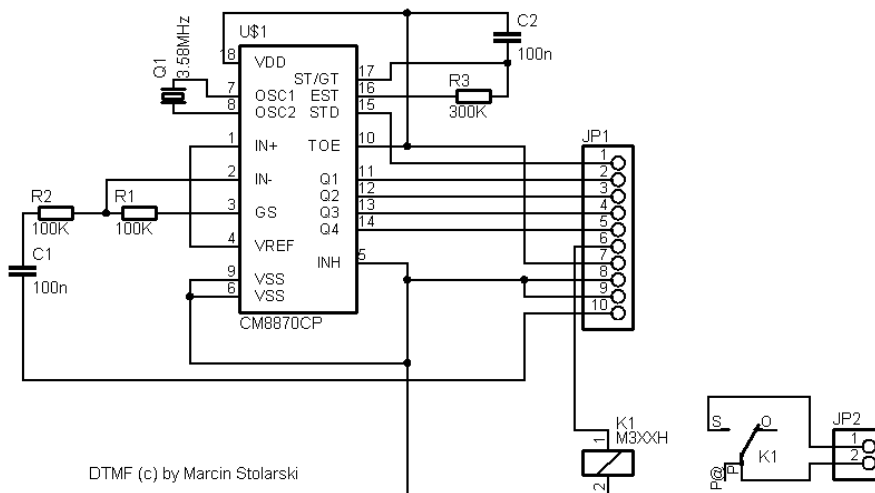
W celu realizacji misji balonowych, powstał uniwersalny moduł telemetryczny Świerszcz, który poprzez doświadczenia i potrzeby kolejnych misji stale był rozwijany o kolejne podsystemy. Moduł składa się z mikrokontrolera ATmega8 (Rys. 60). Zostały dołączone do niego po magistrali I2C cyfrowe termometry DALLAS DS18S20 (mierzące temperaturę w zakresie od -50 do 125 stopni Celsjusza) oraz nadajnik CW (ASK) pracujący w paśmie 70 cm (Rys. 61) z mocą 10 mW. Całość została dostosowana do zasilania przez ogniwo paliwowe, które dostarczało napięcie około 12 V oraz ciepło ogrzewające część elektroniczną, w późniejszym etapie zostało ono zastąpione przez baterie litową. W kolejnych wersjach modułu telemetrycznego dodano pomiar napięć za pomocą wbudowanego w mikrokontroler przetwornika A/C. Kolejną modyfikacją było dodanie dekodera kodów DTMF (Rys. 62) oraz przekaźników, które pozwalały na zdalne uwalnianie ładunków. Ostatnią zastosowaną modyfikacją było dodanie możliwości wysyłania SMS-ów z danymi telemetrycznymi za pomocą telefonu GSM. W kolejnych wersjach modułu poprawiano również protokół komunikacyjny, aby ułatwiać eksperymenty związane z Rozproszoną Stacją Naziemną.



Rys. 60. Schemat modułu Świerszcz 2.



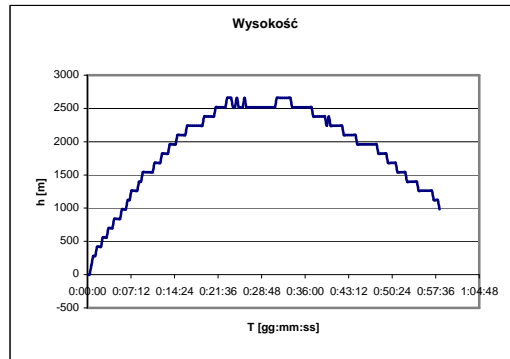
Rys. 61. Schemat nadajnika opartego na układzie MAX1472.



Rys. 62. Schemat dekodera DTMF.

5.1.2. Misja Świerszcz 1.

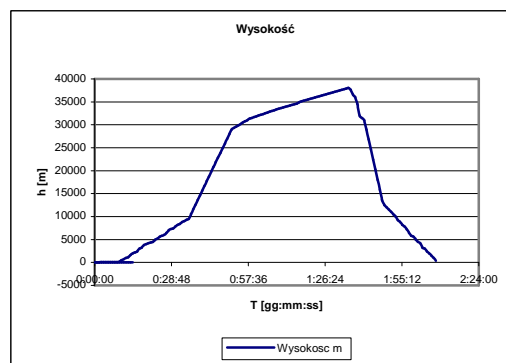
Misja Świerszcz 1 była pierwszym projektem balonowym realizowanym przez autora. Za pomocą balonu gronowego (złożonego z 25 mniejszych balonów) udało się osiągnąć wysokość około 2.5 km (Rys. 63). Celem misji było sprawdzenie możliwości prostego systemu telemetrycznego i jego nadajnika. Podczas misji dane były odbierane dopóki balon nie wyleciał poza horyzont radiowy. Szacowana zbadana odległość to 40 km, co pokazało, że tak opracowany system transmisji jest rozwiązaniem dobrym.



Rys. 63. Wysokość lotu w misji Świerszcz 1.

5.1.3. Misja BOBAS.

Misja BOBAS zawierała moduł Świerszcz 2 (ulepszona wersja modułu Świerszcz 1, dodano pomiar napięć pokładowych oraz obsługę dwóch termometrów do pomiaru temperatury zewnętrznej oraz wewnętrznej).

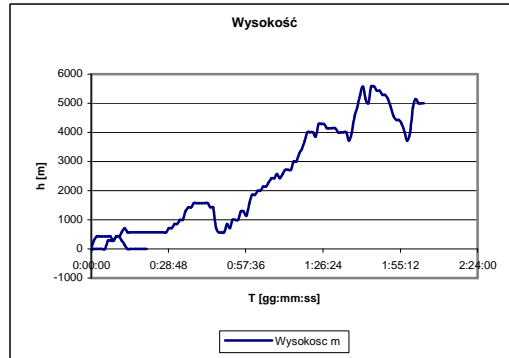


Rys. 64. Wysokość lotu w misji BOBAS.

Wykorzystano profesjonalny balon stratosferyczny, który pozwolił na osiągnięcie wysokości 40 km (Rys. 64). Z balonu odbierano cały czas telemetrię, dopóki znajdował się on w horyzoncie radiowym. Po wylądowaniu podjęto próbę odnalezienia gondoli, niestety zasięg nadajnika znajdującego się na Ziemi okazał się niewystarczający. Podczas lotu balonu realizowany był eksperyment rozproszonego odbioru. Uczestniczący w eksperymencie radioamatorzy przekazali fragmenty odebranej telemetrii, które pozwoliły na poprawienie jakości sumarycznej telemetrii.

5.1.4. Misja BOBAS 2.

Misja BOBAS 2 była niejako powtórzeniem misji BOBAS. System wyposażono w moduł Świerszcz 3 (dodano obsługę GPS, poprawiono protokół komunikacyjny, aby poprawić własności systemu RSN).

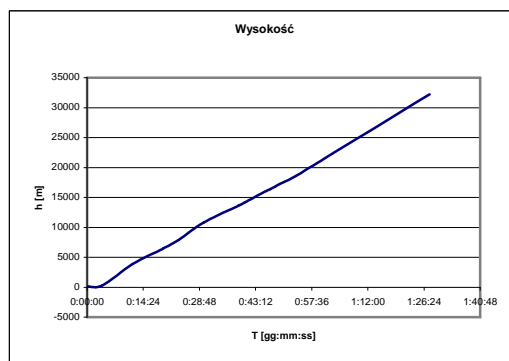


Rys. 65. Wysokość lotu w misji BOBAS 2.

Misja realizowana była z problemami i zakłócenia na liniach zasilających doprowadziły do wstrzymania pracy modułu Świerszcz 3 po 2 godzinach pracy. Wprowadzone poprawki w protokole transmisji (dodano licznik ramek na początku i na końcu pakietu) bardzo ułatwiły łączenie odebranej przez wiele stacji naziemnych telemetrii i dalsze prace nad systemem RSN. Balon, zanim wyleciał z horyzontu radiowego, osiągnął pułap ponad 5 km (Rys. 65).

5.1.5. Misja BOBAS 3.

Kolejna misja została wyposażona w moduł Świerszcz 4 (dodano obsługę telefonu GSM, odbiór komend w standardzie DTMF, obsługę dwóch przekaźników).



Rys. 66. Wysokość lotu w misji BOBAS 3.

W trakcie misji gondola dotarła na wysokość około 35 km (Rys. 66). Przeprowadzono test potrójnej redundancji komunikacji. Test wykazał prawidłowe działanie systemu CW oraz

APRS w powietrzu do śledzenia balonu oraz systemu GSM na Ziemi do odnajdywania ładunku. Problemy komunikacyjne (w trakcie lotu pękający balon urwał antenę od nadajnika CW oraz obracająca się gondola uniemożliwiła działanie łącza GSM) zostały skompensowane przez systemy zapasowe. W misji tej nie stosowano technik RSN, ale dane wykorzystano do celów porównawczych. Z powodzeniem odebrano obraz video pomimo dużej odległości między stacją naziemną a gondolą oraz pomimo wykorzystania nadajnika małej mocy (300 mW). Przy okazji nagrano ciekawy materiał filmowy pokazujący widok Ziemi z 35 km (Rys. 67 - widać krzywiznę Ziemi, czarny kosmos, oraz cienką warstwę atmosfery).



Rys. 67. Widok z kamery pokładowej misji BOBAS 3.

5.1.6. Wyniki zastosowania techniki Rozproszonej Stacji Naziemnej.

Podczas realizacji misji balonowych, odbierane dane zostały zarchiwizowane. W misjach BOBAS i BOBAS 2 odbierano dane przy wykorzystaniu wielu stacji naziemnych. Na podstawie budowy protokołu transmisji, licznika ramek telemetrycznych oraz czasu trwania misji określano ilość wysłanych danych, a następnie porównano je ze zarchiwizowanymi wynikami. W przypadku odbioru wielokrotnego dane zostały manualnie porównane pomiędzy sobą, aby uzyskać mniejszą stopę błędów. Wyniki eksperymentów przedstawione zostały w tabeli (Tab. 5). Znaki typu SQ5FNQ oznaczają pojedyncze stacje

naziemne. Błąd sumaryczny (RSN) został obliczony z danych odebranych z wielu stacji i porównanych manualnie lub (dla misji BOBAS 3) przepisano wartość uzyskaną dla jedynej stacji. Błędy optymalny (BERo) oraz porównawczy (BERv) policzone zostały zgodnie z algorytmem optymalnym BERo (równania (2) - (9)) oraz algorytmem porównawczym BERv (90).

Tab. 5 Jakość odebranych danych podczas misji balonowych.

Nazwa misji	Nazwa stacji odbiorczej	Procentowy udział błędów (Bi)	BER
BOBAS	SQ5FNQ	10%	0.10
	SQ5GVY	95%	0.95
	SQ5LTT	99%	0.99
	Błąd sumaryczny (RSN)	9%	0.09
	Błąd optymalny (BERo)	9%	0.09
	Błąd porównawczy (BERv)	38%	0.38
BOBAS 2	SQ5FNQ	38%	0.38
	SQ5FG	44%	0.44
	SQ5GVY	85%	0.85
	SP4XYD	100%	1.00
	Błąd sumaryczny (RSN)	11%	0.11
	Błąd optymalny (BERo)	14%	0.14
	Błąd porównawczy (BERv)	28%	0.28
BOBAS 3	SQ5FNQ	90%	0.90
	Błąd sumaryczny (RSN)	90%	0.90
	Błąd optymalny (BERo)	90%	0.90
	Błąd porównawczy (BERv)	90%	0.90

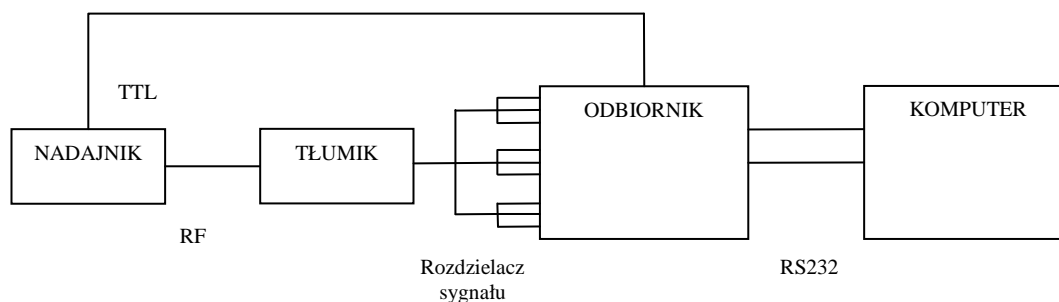
Przedstawione wyniki pokazują, że po zastosowaniu mechanizmu RSN sumaryczny błąd jest mniejszy niż błędy pojedynczych stacji. W misji BOBAS tylko stacja SQ5FNQ

odbierała dane z dobrą jakością. Pozostałe stacje poprawne dane odbierały tylko w szczątkowej ilości. Mimo tak dużej liczby błędów w strumieniach danych ze słabych stacji znaleziono dane, których nie odebrała stacja SQ5FNQ. W kolejnej misji stacje miały lepsze jakości łącza, które pozwoliły na lepsze wyodrębnienie danych z nieskorelowanych zakłóceń pokazując, że zastosowanie systemu RSN poprawia jakość łącza. W misji BOBAS 3 nie zastosowano techniki RSN, a mobilna stacja odbiorcza odebrała jedynie 10% danych z modułu Świerszcz 4. W eksperymencie wykorzystano technikę potrójnej redundancji komunikacji, dzięki czemu rzeczywista stopa błędów była dużo niższa. Istotne jest to, że wyniki zastosowania rozproszonego odbioru są zbliżone do wartości BER_o (a nie do BER_v). Wpływ na to miały dwa czynniki. Pierwszy polega na tym, że w błędach odbiorników istotną rolę odegrało lokalne zanikanie sygnału. Drugim czynnikiem było to, że porównywanie danych nie było wykonane za pomocą zwykłego systemu głosowania, a za pomocą analizy na podstawie oczekiwanej treści (znany był protokół transmisji oraz wartości poprzednich i następnym ramek z danymi). Eksperyment pokazał, że w rzeczywistych warunkach dzięki technikom RSN możliwe jest znaczne poprawienie jakości łącza, niemalże do granicy możliwości optymalnych. Należy również pamiętać że eksperyment obarczony jest dużą niestabilnością parametrów i jakość oraz powtarzalność wyników może nie być najwyższa dlatego należy przeprowadzić badania w środowisku w większym stopniu kontrolowanym.

5.2. Weryfikacja laboratoryjna - sprzętowy symulator Rozproszonej Stacji Naziemnej.

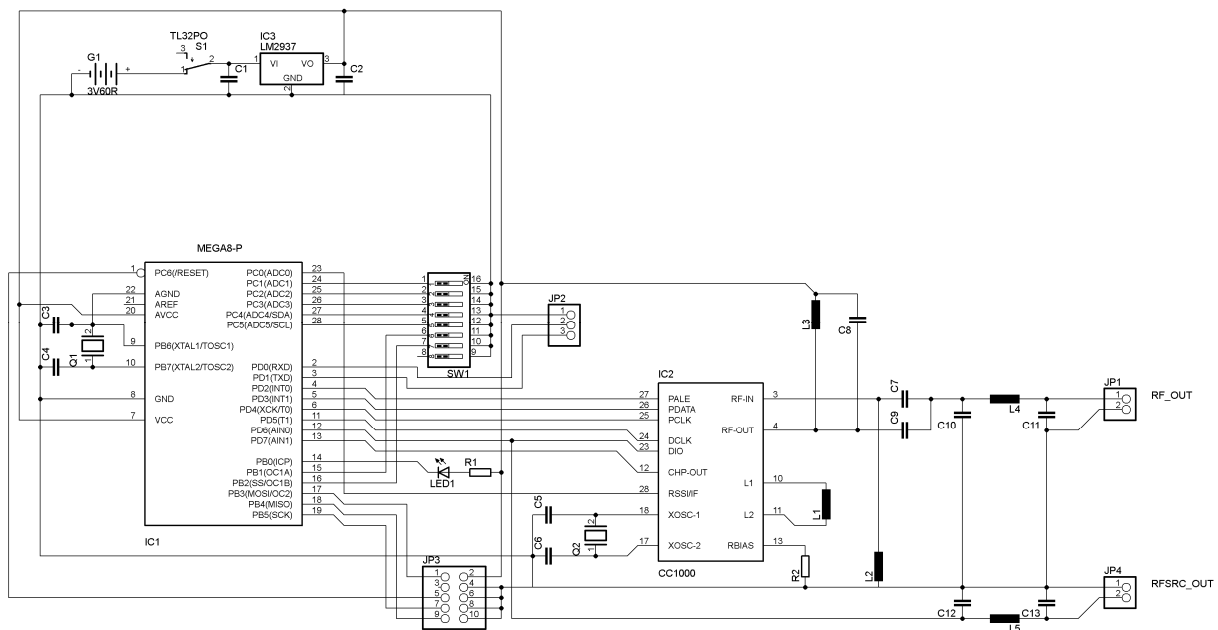
Aby zweryfikować z dużą dokładnością przedstawione teorie autor zbudował laboratoryjny zestaw pomiarowy do symulowania Rozproszonej Stacji Naziemnej.

5.2.1. Opis systemów.



Rys. 68. Schemat budowy symulatora Rozproszonej Stacji Naziemnej.

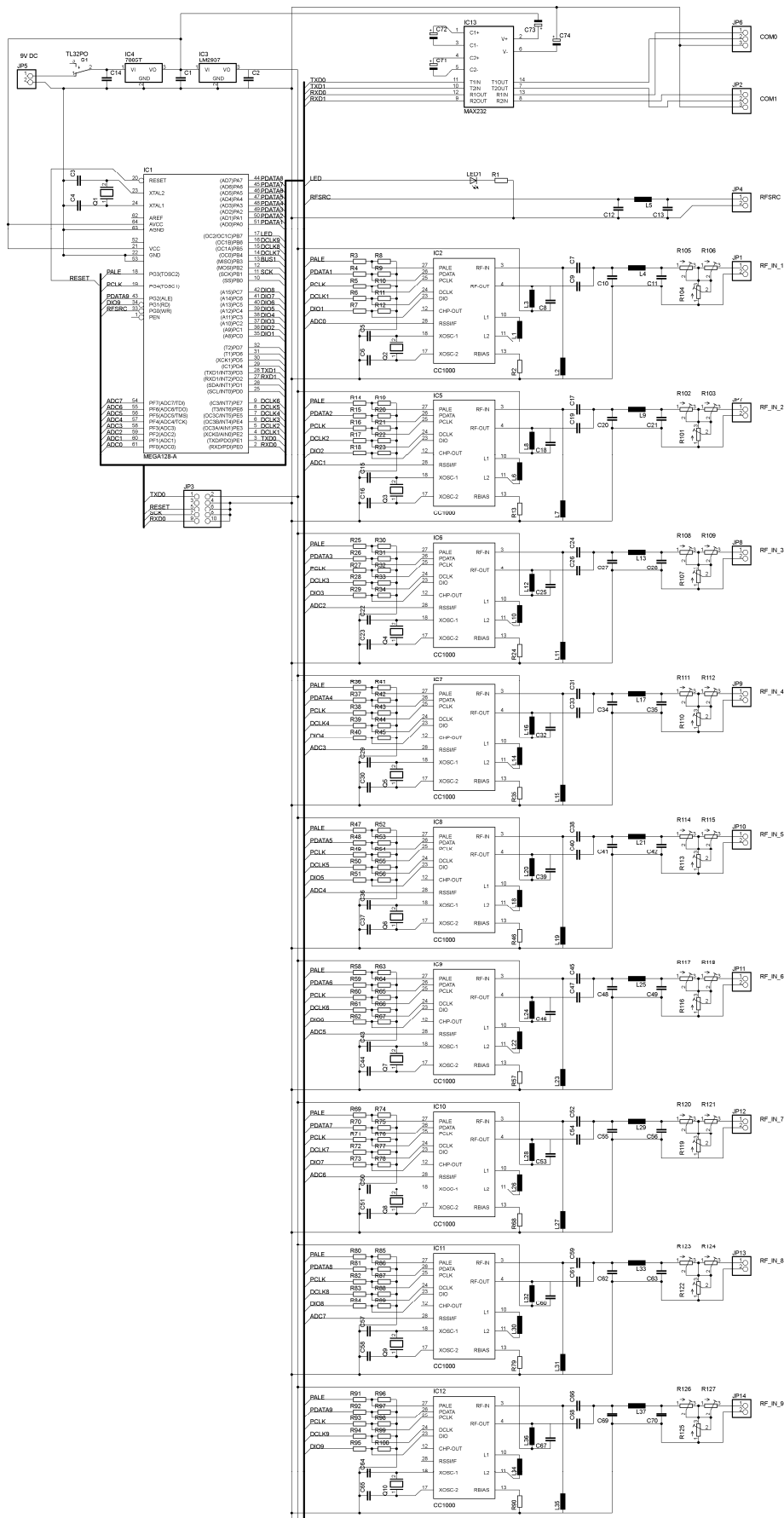
Na Rys. 68 przedstawiona jest blokowa budowa systemu pomiarowego. System składa się z symulatora nadajnika satelity. Z nadajnika wyprowadzony jest sygnał radiowy (RF) oraz cyfrowy (TTL) nadawanej sekwencji. Sygnał radiowy przepuszczany jest następnie przez tłumik dekadowy (0-102 dB). Kolejnym elementem systemu jest rozdzielacz sygnału (z 1 na 9). Tak rozdzielony sygnał prowadzony jest do odbiornika, który wewnętrznie składa się między innymi z dziewięciu scalonych odbiorników. Do odbiornika dodatkowo wprowadzona jest nadawana sekwencja w postaci TTL, aby umożliwić pomiar współczynników BER. Odbiornik z komputerem połączony jest za pomocą dwóch portów RS232. Pierwszy udostępnia interfejs odbiornika, a drugi przesyła dane pomiarowe.



Rys. 69. Schemat ideowy symulatora nadajnika satelity.

Schemat ideowy nadajnika przedstawiono na Rys. 69. Zbudowany jest on z procesora ATmega8 oraz scalonego transceivera CC1000. Układ zasilany jest bateryjnie napięciem 3.3V oraz jest zamknięty w specjalnej obudowie zapewniającej tłumienie sygnału w.cz. na poziomie 60dB. Nadajnik nadaje na częstotliwości 433.500 MHz sygnał FSK z prędkością 1200 bps oraz mocą -30 dBw. Mikrokontroler generuje naprzemienną sekwencję 01, która wyprowadzona jest za pomocą dwóch gniazd (w.cz-RF, oraz TTL). Na wyjściu TTL założony jest dodatkowo filtr PI, aby uniemożliwić wyprowadzenie sygnału w.cz tym wyjściem.

Tłumik dekadowy służy do symulowania tłumienia wolnej przestrzeni z dokładnością do 1 dB. W połączeniu z mocą nadawaną z nadajnika pozwala zmieniać poziom sygnału w.cz. w zakresie od -30 dBw do -132 dBw.



Rys. 70. Schemat ideowy odbiornika symulatora Rozproszonej Stacji Nziemnej.

Dzielnik sygnału został zrealizowany za pomocą koncentrycznych linii ćwierćfalowych. Sygnał linii o impedancji 50Ω obciążony jest trzema odcinkami ćwierćfalowymi 50Ω . Powoduje to transformacje impedancji do 150Ω na końcu każdej z linii. Sygnały te są po raz kolejny rozdzielane na trzy kolejne linie co daje w końcu dziewięć linii sygnałowych o impedancji 50Ω . Tłumienie teoretyczne takiego dzielnika to 9 dB a zmierzone to 10 dB.

Na Rys. 70 przedstawiono schemat ideowy odbiornika. Sygnały w.cz. wprowadzane są do scalonych transceiverów CC1000 poprzez wyrównawcze tłumiki T (0 - 20 dB). Służą one do takiego skorygowania sygnałów wchodzących, aby wszystkie dziewięć odbiorników dekodowało sygnał z podobną jakością. Zmierzone po kalibracji średnie tłumienie wyniosło 15 dB. Transceivery przetwarzają równolegle sygnał radiowy i równolegle są odpytywane przez mikrokontroler ATmega128. Pomiędzy mikrokontrolerem a transceiverami są opornikowe dzielniki napięcia dostosowujące napięcie 5 V (z jakim pracuje mikrokontroler) do 3,3 V (z jakim pracują scalone transceivery). Do mikrokontrolera poprzez filtr PI blokujący sygnał w.cz doprowadzona jest bezpośrednio z nadajnika linia z nadawaną sekwencją w standardzie TTL. Mikrokontroler pracuje z częstotliwością 18.432 MHz, co jest wartością większą od maksymalnej 16 MHz dopuszczonej przez producenta, ale układ pracuje stabilnie z tą częstotliwością taktowania, a jej wartość pozwala na uzyskiwanie dokładnych prędkości transmisji zgodnych ze standardem RS232 (1200 bps oraz 115200 bps). Z mikrokontrolera wyprowadzono dwa porty RS232 pracujące z prędkością 115200 bps i poprzez układ MAX232 (dostosowujący poziomy napięcie z TTL na RS232) połączono z komputerem. Odbiornik zasilany jest napięciem 9 V z zasilacza sieciowego.

Sumaryczne tłumienie linii w.cz. (tłumik dekadowy + dzielnik + tłumik wyrównawczy) wynosi od 25 dB do 127 dB co daje dynamikę sygnału mierzonego od -157 dBw do 55 dBw. Pomiar realizowany jest z dynamiką od -150 dBw do 80 dBw. Na liniach w.cz. oraz TTL dodatkowo założone są koraliki ferrytowe tłumiące sygnały w.cz płynące po powierzchni przewodów. Podczas pomiarów nie stwierdzono przenikania sygnału w.cz poprzez obudowę, co oznacza, że tłumienie osłon było wystarczające.

Jak napisano wcześniej, dane z odbiorników odbierane są równolegle a następnie przetwarzane w mikrokontrolerze. Realizowane jest to poprzez funkcję pracującą w przerwaniu z częstotliwością 4800 Hz. W załączniku 8.2 umieszczone są najważniejsze fragmenty funkcji pobierającej dane z odbiorników oraz realizującej algorytm poprawy jakości łącza radiowego.

Funkcja realizuje następujące algorytmy poprawiające jakość łącza:

- głosowania (V, voting) polegający na porównywaniu pakietów przez system głosowania,
- liczony (C, calculated) polegający na sprawdzaniu ciągłości odbieranej sekwencji,
- optymalny (O, optimal) polegający na wybieraniu odbiornika odbierającego prawidłowe dane,
- mieszany (M, mixed) stanowiący połączenie algorytmu głosowania z naturalnym,
- najlepszy (B, best) polegający na wyborze stacji z najlepszą jakością łącza,
- pakietowy (P, packet) polegający na zastosowaniu algorytmu optymalnego do przesyłania pakietów o długości 32 B,
- wielko pakietowy (LP, long packet) polegający na zastosowaniu algorytmu optymalnego do przesyłania pakietów o długości 256 B,
- źródłowy (SRC, source) polegający na odbiorze sekwencji źródłowej bezpośrednio z nadajnika poprzez połączenie TTL,
- naturalny (N, natural, near optimal), „prawie optymalny” polegający na stosowaniu algorytmu optymalnego z zastosowaniem funkcji wybierającej odbiornik na podstawie oczekiwanej sekwencji (np. po 0 oczekiwane jest 1) bez wykorzystania danych napływających poprzez złącze TTL, do określania jakości wykorzystuje się znajomość zawartości ciągu nadawanego.

Odbiornik zawiera 9 scalonych transceiverów, ale algorytmy realizują eksperyment przy wykorzystaniu 1, 3, 5, 7 oraz 9 modułów, dzięki czemu możliwe będzie porównanie skuteczności algorytmów w zależności od liczby stacji odbiorczych.

Przedstawiony kod zaczyna się od definicji zmiennych, w których będą przechowywane odebrane dane oraz dane pomiarowe. Na początku funkcji `int_reveivers_dgss(void)` znajduje się sekcja zegarowa wyboru realizowanych funkcji. Przerwanie jest zgłaszane czterokrotnie w ciągu przesłania jednego bitu i podzielone jest na cztery takty: wstępny odbiór danych, odbiór danych, spóźniony odbiór danych, przetwarzanie danych.

Kolejną sekcją jest sekcja synchronizacji. Moduły CC1000 posiadają system do generowania zegara transmisji z odbieranego sygnału radiowego. Zgodnie ze specyfikacją układu odebrany bit należy odczytywać po pojawieniu się narastającego zbocza tego zegara. Podczas eksperymentu okazało się, że dla słabych sygnałów zegar traci synchronizację i odbiór danych staje się niemożliwy. Aby zniwelować problemy z synchronizacją, sekwencja synchronizująca jest odtwarzana na podstawie danych bezpośrednio z nadajnika połączeniem

TTL. Dzięki temu uniknięto problemu braku korelacji czasowej odbieranych danych, której odtwarzanie jest bardzo złożone obliczeniowo.

Po sekcji synchronizacji znajduje się sekcja odbioru bitu danych z poszczególnych odbiorników

Kolejna sekcja odpowiada za odbiór sekwencji bezpośrednio z nadajnika. Ponieważ jest to ciąg zero-jedynkowy, następuje jego odpowiednie opóźnienie celem utworzenia zegara synchronizującego odbiór danych. Sekcja kończy się kodem realizującym sprawdzenie poprawności odebranych danych zwanym dalej „funkcją sprawdzającą poprawność danych” i opisanym w następnym akapicie.

Kolejny fragment kodu stanowi funkcja sprawdzająca poprawności odebranych z odbiorników danych. Sprawdzanie może być realizowane na dwa sposoby. Pierwszy (AUTO_CHECK_MODE) sprawdza ciągłość odbierania sekwencji zero-jedynkowej. Niestety metoda nie sprawdza się dla słabych sygnałów, w których odbierane ciągi są krótkie, co powoduje, że odbiornik sam może w losowy sposób taki ciąg wygenerować. Druga metoda polega na porównywaniu odbieranych danych drogą w.cz. i porównaniu ich z danymi odebranymi drogą TTL. Jeśli dane są poprawne, inkrementowane są liczniki odebranego pakietu oraz odebranych wszystkich bitów. Jeśli stwierdza się odebranie błędnego bitu, licznik pakietu przenoszony jest do licznika zapasowego (previous), a następnie jest on zerowany. Ustawiany jest też znacznik odebrania pakietu, który jest wykorzystywany przy wyświetlaniu i generowaniu danych pomiarowych na portach RS232.

Kolejna sekcja odpowiada za algorytm głosowania. Sprawdzana jest zwykła większość w głosowaniu bitowym, a wygrany bit zapisywany jest do odpowiedniej zmiennej. Sekcja kończy się funkcją sprawdzającą poprawność danych.

Kolejnym elementem jest algorytm liczonej. Funkcja sprawdza, czy w danej grupie chociaż jeden odbiornik jest w stanie nieprzerwanego odbierania pakietu, co oznacza, że odbiera prawidłowe dane. Jeśli odpowiedź jest twierdząca, to traktowane jest to jak odebranie prawidłowego bitu. Funkcja ta służy do sprawdzania poprawności algorytmu funkcji sprawdzającej AUTO_CHECK_MODE. Jeśli jej wyniki są takie same jak w algorytmie optymalnym, oznacza to, że funkcja sprawdzająca działa prawidłowo.

Następna część kodu odpowiada za algorytm optymalny. W grupach odbiorników sprawdzane jest, czy któryś z nich odebrał bit taki sam jak odebrany jest z połączenia TTL. Kiedy bit taki zostanie znaleziony, wpisywany jest do odpowiedniej zmiennej. Jeśli nie, to pozostaje poprzednia wartość. Następnie wykonywana jest funkcja sprawdzająca poprawność danych. W funkcji tej zrealizowano również algorytm pakietowy oraz wielko pakietowy.

Różnica polega na tym, że podczas sprawdzania poprawności danych sprawdzane jest również, czy odebrano w jednym ciągu przynajmniej odpowiednio 256 bitów dla algorytmu pakietowego oraz 2048 bitów dla algorytmu wielko pakietowego. W teście tym sprawdzana jest możliwość bezbłędnego przesłania pakietu odpowiedniej wielkości.

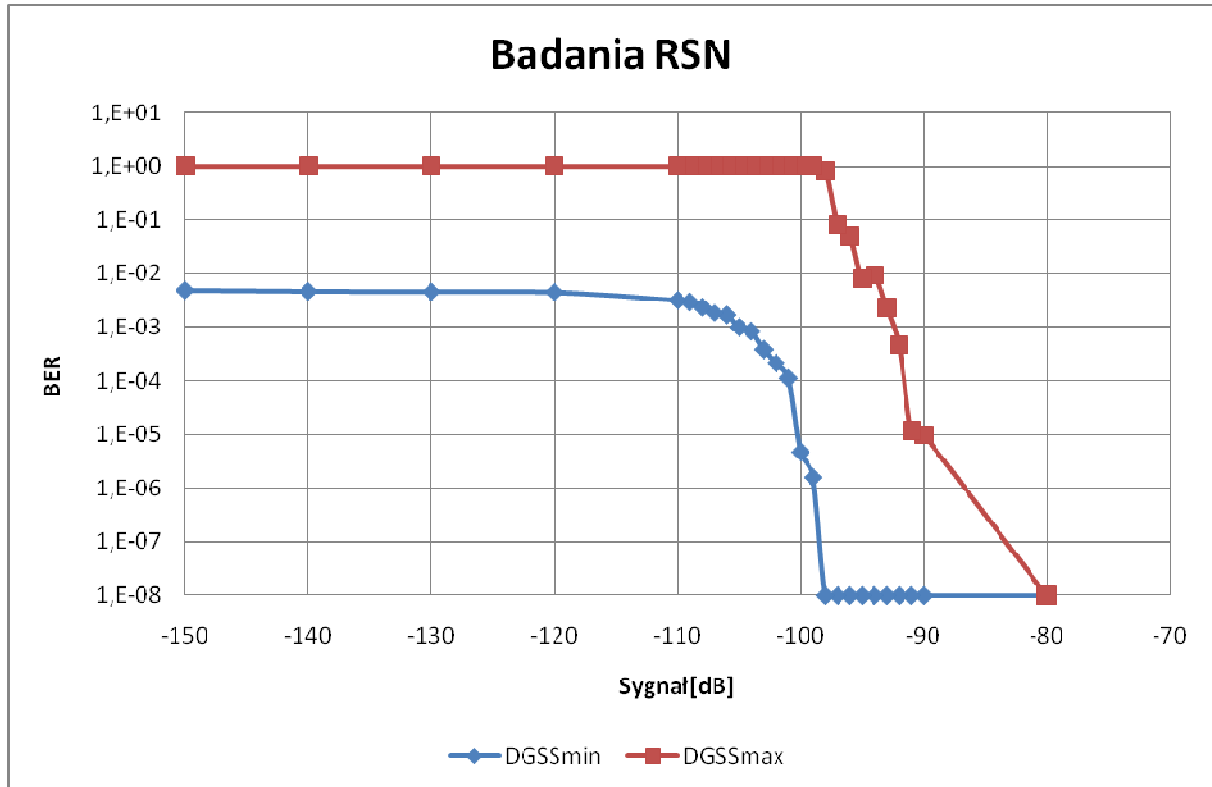
Następna sekcja realizuje algorytm najlepszy. Polega on na tym, że sprawdzane są odbiorniki pod względem jakości łącza. W danej grupie ten, który odbiera nieprzerwanie najdłuższą sekwencje, uznawany jest za najlepszy w danej chwili i z niego brany jest kolejny odebrany bit. Na końcu wykonywana jest funkcja sprawdzająca poprawność danych.

Ostatnia sekcja odpowiada za algorytmy prawie optymalny oraz mieszany. W algorytmie prawie optymalnym stosowany jest algorytm optymalny, ale jako test sprawdzający wykorzystuje się sprawdzenie prawidłowego odbioru ciągu zero-jedynkowego (nie wykorzystuje się danych odebranych przez połączenie TTL). Algorytm ten jest bardziej podatny na błędy ze względu na prawdopodobieństwo wystąpienia samo generacji takiego ciągu z szumu radiowego. Następnie poprawność algorytmu testowana jest funkcją sprawdzającą poprawność danych (wykorzystującą sygnał TTL). Algorytm mieszany polega na wykorzystaniu odebranych bitów przez algorytm prawie optymalny, a jeśli żaden odbiornik w grupie nie odebrał prawidłowo bitu, wykorzystywane są bity odebrane przez odpowiednie grupy w algorytmie głosowania. Następnie wykonywana jest funkcja sprawdzająca poprawność danych. Algorytm mieszany jest próbą pokazania rzeczywistych możliwości RSN, ponieważ do swej pracy wykorzystuje dwa algorytmy, które można wykorzystać w systemach rzeczywistych (nie testowych). Daje on jednak nieco zawyżone wyniki, ponieważ test wyboru pomiędzy algorytmami oparty jest o dane odbierane drogą TTL.

5.2.2. Prezentacja otrzymanych wyników.

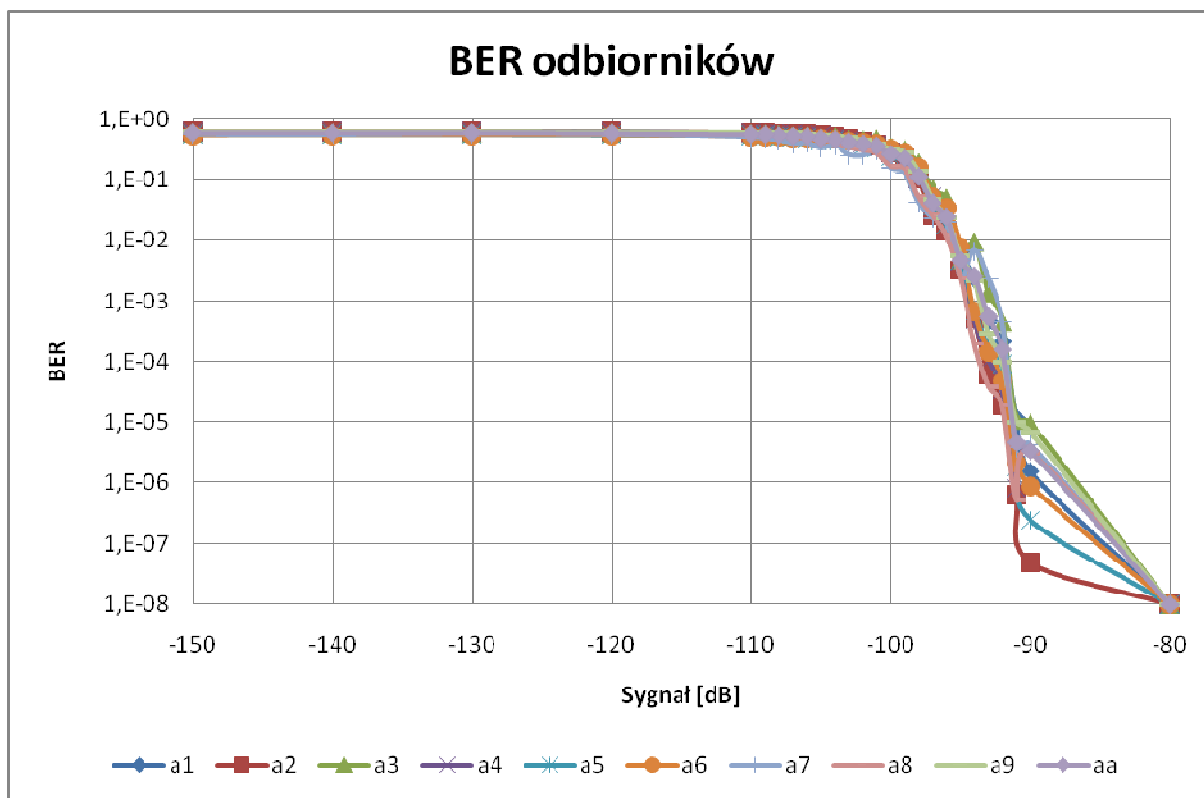
Na Rys. 71 - Rys. 85 przedstawiono zrealizowane pomiary. Dane „a1-a9” to testy bezpośrednio dziewięciu odbiorników. Dane „aa”, to średnia z danych „a1-a9”. Dane BERa3-BERa9 to symulacja wyniku „aa” kiedy moc sygnału radiowego jest 3 razy silniejsza (pochodzi z 3 zsumowanych anten; +4.77 dB), 5 razy silniejsza (+6.98 dB), 7 razy silniejsza (+8.45 dB) i 9 razy silniejsza (+9.54 dB). Dane „v3-v9” to wynik algorytmu głosowanego w odpowiedniej grupie. Dane „BERv3-BERv9” to symulacja matematyczna jakości łącza przy wykorzystaniu algorytmu głosowania zgodnie z równaniem (59). Dane „c3-c9” to wynik algorytmu liczonego w odpowiedniej grupie. Dane „o3-o9” to wynik algorytmu optymalnego w odpowiedniej grupie. Dane „BERo3-BERo9” to symulacja matematyczna jakości łącza

przy wykorzystaniu algorytmu optymalnego zgodnie z (57). Dane „m3-m9” to wynik algorytmu mieszanego w odpowiedniej grupie. Dane „b3-b9” to wynik algorytmu najlepszego w odpowiedniej grupie. Dane „p3-p9” to wynik algorytmu pakietowego w odpowiedniej grupie. Dane „l3-l9” to wynik algorytmu wielko pakietowego w odpowiedniej grupie. Dane „n3-n9” to wynik algorytmu prawie optymalnego w odpowiedniej grupie.

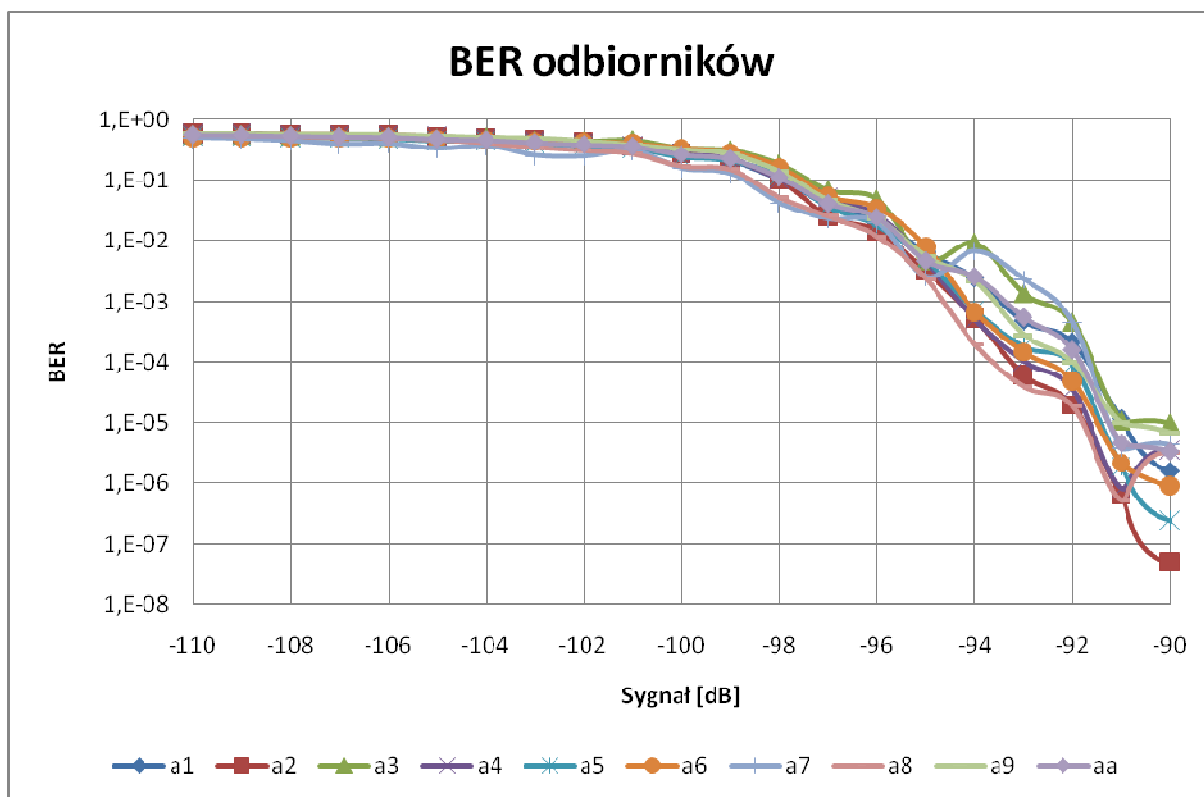


Rys. 71. Badania Rozproszonej Stacji Naziemnej, dynamika pomiarów (DGSSmax - wartości największe, DGSSmin wartości najmniejsze).

Pomiary (Rys. 71) były wykonywane w zakresie sygnału od -150 dB do -80 dB. Największe zróżnicowanie wyników występuje w zakresie od -110 dB do -90 dB, dlatego większość wyników została przedstawiona na podwójnych zakresach pomiarowych. Jeden pomiar realizowany był maksymalnie przez okres jednej doby. Dla prędkości transmisji 1200 bps daje to $1E8$ przesłanych bitów. Pozwala to na pomiar współczynnika BER większego niż $1E-8$ z dokładnością do jednego rzędu wielkości. Wartości mniejsze zostały zaokrąglone w górę do $1E-8$. Wartości większe były mierzone krótszym okresem czasu tak, by przynajmniej pierwsza cyfra wyniku była znacząca.



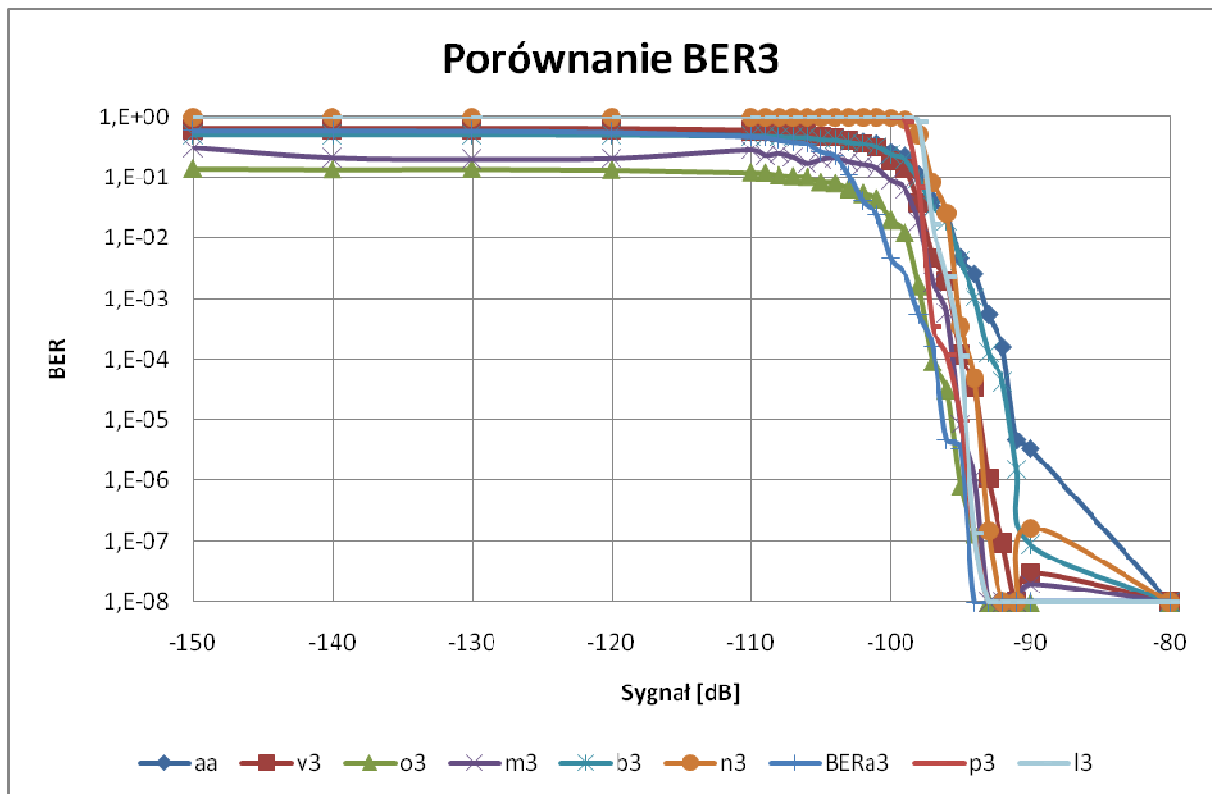
Rys. 72. Współczynnik BER odbiorników modelu laboratoryjnym RSN.



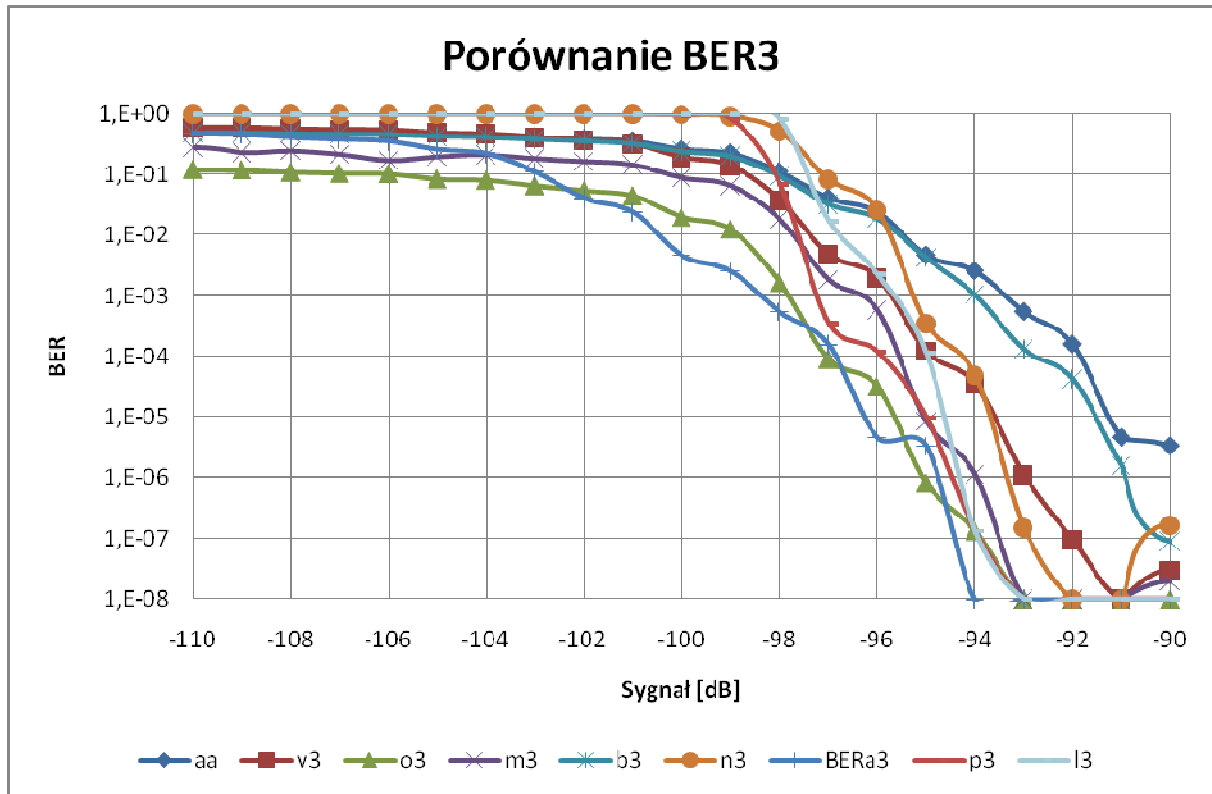
Rys. 73. Współczynnik BER odbiorników modelu laboratoryjnym RSN (obszar zawężony).

Na Rys. 72, Rys. 73 przedstawiono wyniki pomiaru współczynnika BER dla każdego z odbiorników (a1-a9) oraz ich średnią wartość (aa). Dzięki indywidualnym tłumikom wyrównawczym udało uzyskać się podobne charakterystyki z dokładnością do $1E-2$. Pozwoliło to uzyskać średnią charakterystykę (aa – liczone z 9 odbiorników) z dokładnością większą niż $1E-3$.

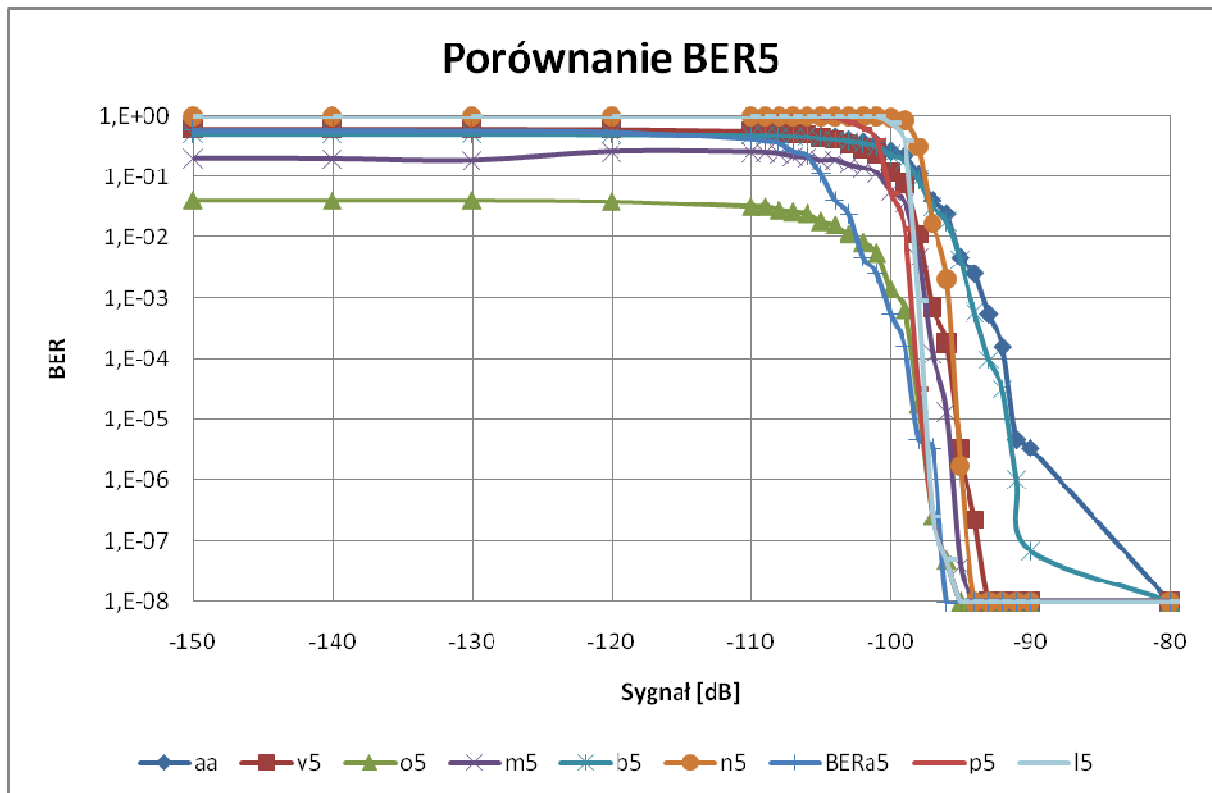
Na Rys. 74 - Rys. 81 przedstawiono wyniki pomiarów dla grupy 3, 5, 7 oraz 9 odbiorników.



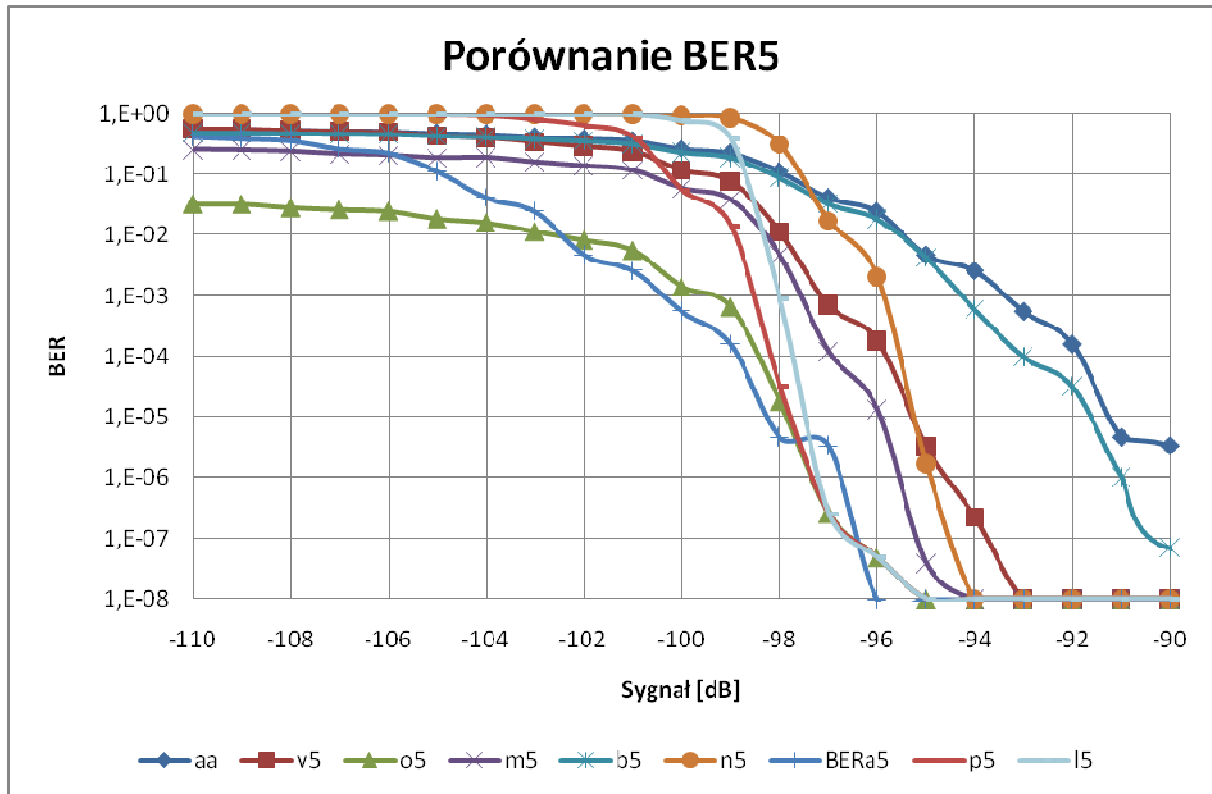
Rys. 74. Porównanie algorytmów poprawiających jakość łącza radiowego przy wykorzystaniu 3 odbiorników.



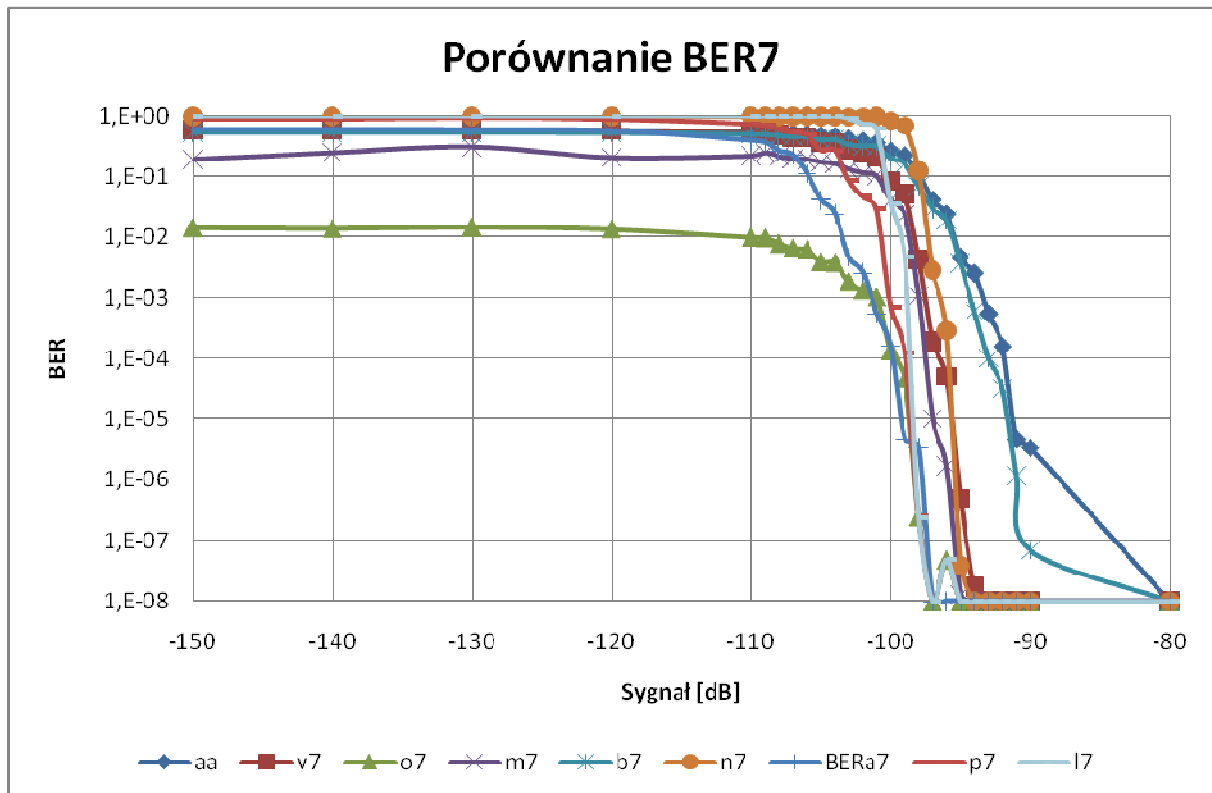
Rys. 75. Porównanie algorytmów poprawiających jakość łącza radiowego przy wykorzystaniu 3 odbiorników (obszar zawężony).



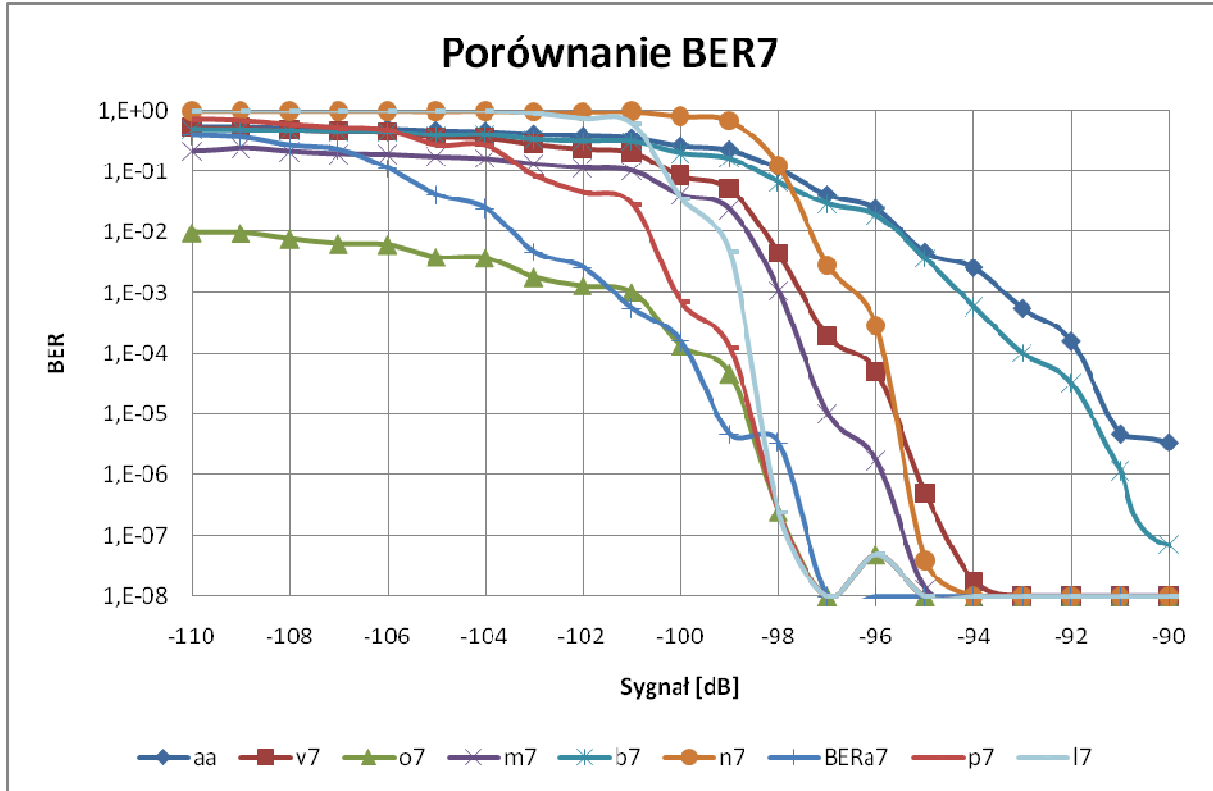
Rys. 76. Porównanie algorytmów poprawiających jakość łącza radiowego przy wykorzystaniu 5 odbiorników.



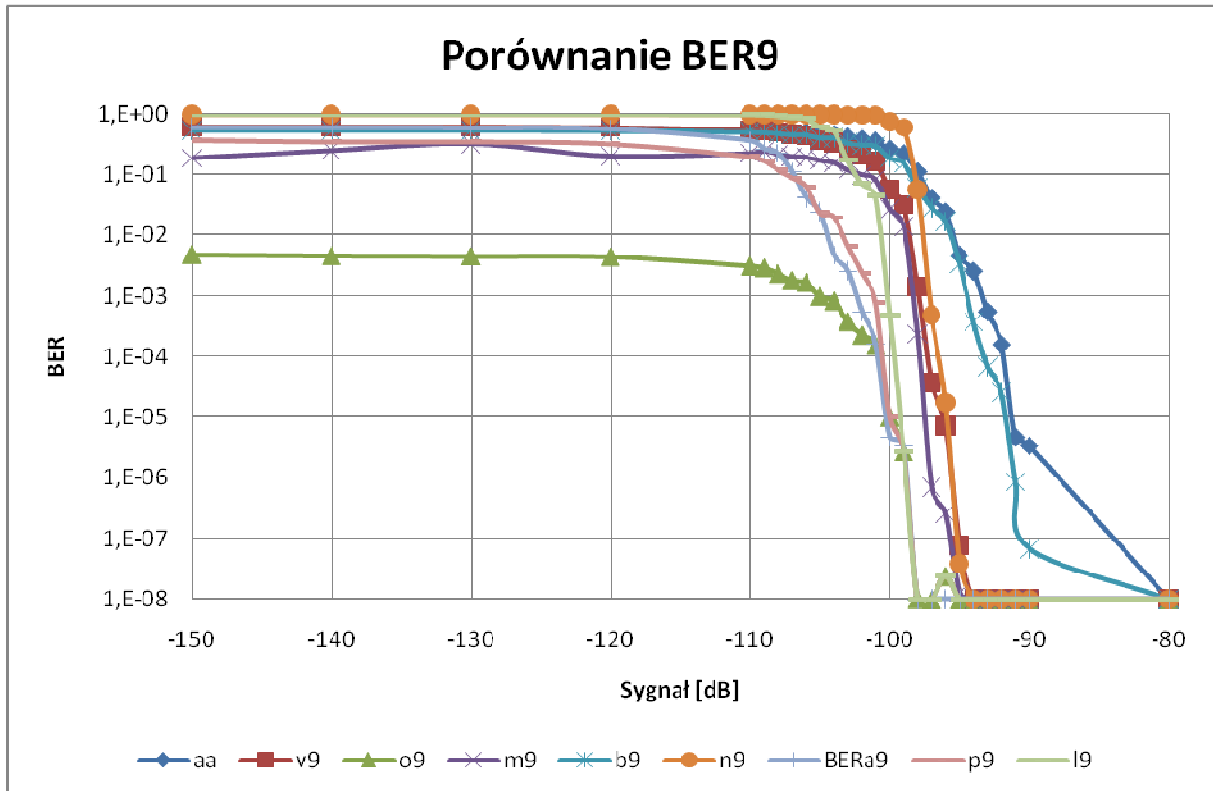
Rys. 77. Porównanie algorytmów poprawiających jakość łącza radiowego przy wykorzystaniu 5 odbiorników (obszar zawężony).



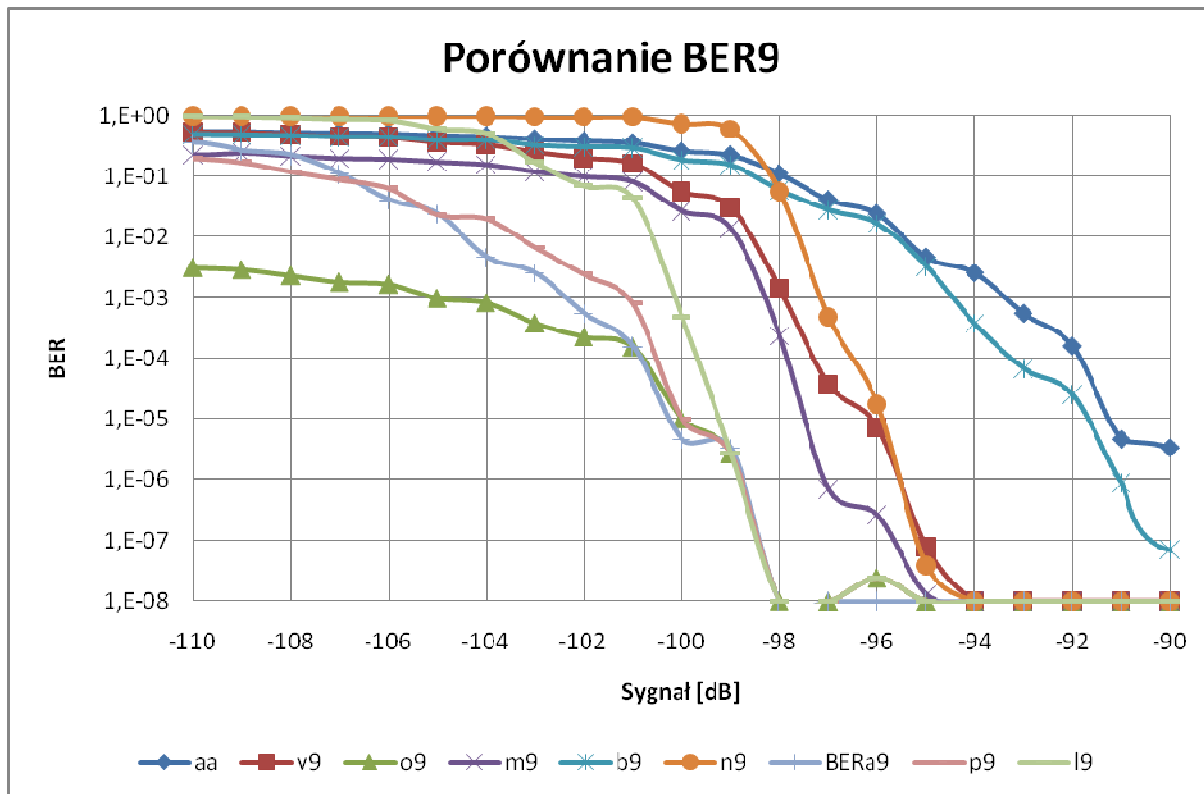
Rys. 78. Porównanie algorytmów poprawiających jakość łącza radiowego przy wykorzystaniu 7 odbiorników.



Rys. 79. Porównanie algorytmów poprawiających jakość łącza radiowego przy wykorzystaniu 7 odbiorników (obszar zawężony).



Rys. 80. Porównanie algorytmów poprawiających jakość łącza radiowego przy wykorzystaniu 9 odbiorników.



Rys. 81. Porównanie algorytmów poprawiających jakość łącza radiowego przy wykorzystaniu 9 odbiorników (obszar zawężony).

Niezależnie od liczby użytych odbiorników wykazano, że techniki RSN pozwalają na poprawę jakości łącza radiowego. Zwiększanie liczby odbiorników dodatkowo poprawia skuteczność technik RSN.

Linia „aa” przedstawia średni współczynnik BER dla pojedynczego odbiornika i stanowi odniesienie dla innych wyników.

Linia „bi” (i – liczba odbiorników wykorzystana w eksperymencie) przedstawia wyniki algorytmu „najlepszego”. Ponieważ pojedyncze odbiorniki były korygowane na minimalizację różnic, algorytm najlepszy jest tylko nieznacznie lepszy od pojedynczego odbiornika. Algorytm ten dałby dużo lepsze rezultaty przy większym zróżnicowaniu odbiorników oraz po pojawieniu się lokalnych zakłóceń pojedynczych odbiorników.

Linia „oi” przedstawia wynik działania algorytmu optymalnego a zarazem jest granicą możliwości technik RSN. Stanowi ona drugą linię odniesienia. Ciekawe jest to, że nawet dla bardzo małych sygnałów algorytm optymalny daje dobre rezultaty. Dzieje się tak, ponieważ nawet przy całkowitym braku sygnału istnieje duże prawdopodobieństwo, że któryś z odbiorników odbierze prawidłowy bit i bardzo małe prawdopodobieństwo, że wszystkie odbiorniki odbiorą błędny bit. Linia ta jest też wyznacznikiem zawartości informacji

w odbieranym sygnale. Jeśli nie jest ona całkowicie pozioma oznacza to, że w sygnale znajduje się jeszcze informacja, którą można odzyskać metodami matematycznymi z określonym prawdopodobieństwem.

Aby skorzystać z algorytmu optymalnego, należy mieć dobrą funkcję sprawdzającą, która opiera się albo na znajomości przesyłanej treści albo na przesyłaniu sum kontrolnych bądź kodowania nadmiarowego. Znajomość przesyłanej treści może sprowadzać nas do rozwiązania testowego. Linia „ni” algorytmu prawie optymalnego przedstawia skuteczność takiej metody. Możliwe jest też oczekiwanie jakiegoś wyniku np. przesłanie kolejnych wartości funkcji liniowej. Wymaganie ciągłości ogranicza podzbiór oczekiwanych wyników. Należy jednak pamiętać, że zamiast przesyłania wartości funkcji można przysłać oczekiwane różnice, co dałoby kompresję danych. Wniosek z tego jest taki, że przesyłanie wartości funkcji można traktować jako kodowanie nadmiarowe. Kodowanie nadmiarowe pozwala na wykorzystanie algorytmu optymalnego, ale ma pewne ograniczenia. Albo należy przesłać dane w niezakłóconym pakiecie, albo należy dane odzyskiwać poprzez porównywanie pakietów. Linie „pi” oraz „li” przedstawiają możliwości przesyłania pakietów. O ile przesyłanie krótkich pakietów (pi) daje poprawę jakości łącza od dość słabych sygnałów, to przesłanie dłuższych pakietów (li) wymaga określonego poziomu sygnału, aby algorytm ten był skuteczniejszy od pojedynczego odbiornika.

Linia BERai przedstawia jakość sygnału, jaką uzyskamy z pojedynczego odbiornika, gdy odbiera on sygnał i razy silniejszy (sumaryczną moc odbieraną z anten przez i odbiorników). To rozwiązanie bardzo skuteczne i powszechnie stosowane. Ma ono jednak swoje ograniczenia takie jak zawężenie wiązki antenowej, czy niemożliwość skalowania rozwiązania ze względu na straty w połączeniach i przesyłaniu sygnału. Techniki RSN są wolne od tych problemów i skalowanie ograniczone jest jedynie mocą obliczeniową komputerów oraz przepustowością sieci komputerowej. Badania pokazały, że dla bardzo słabych sygnałów zwiększanie systemu antenowego jest bardzo skuteczne, ale dla silniejszych sygnałów rozwiązanie to pokrywa się z rozwiązaniem optymalnym. Zgodnie z przedstawioną teorią, wraz ze wzrastającym poziomem sygnału rozwiązanie optymalne powinno być lepsze od budowania większych systemów antenowych.

Kolejna linia (vi) reprezentuje rozwiązanie głosowane, polegające na porównywaniu pakietów. Można zaobserwować, że algorytm ten zawsze poprawia jakość sygnału i wraz ze wzrostem poziomu sygnału wejściowego jego skuteczność staje się coraz większa względem pojedynczej stacji naziemnej. Ogromną zaletą tego algorytmu jest jego prostota implementacji oraz liniowa złożoność obliczeniowa w zależności od liczby stacji wykorzystywanych do

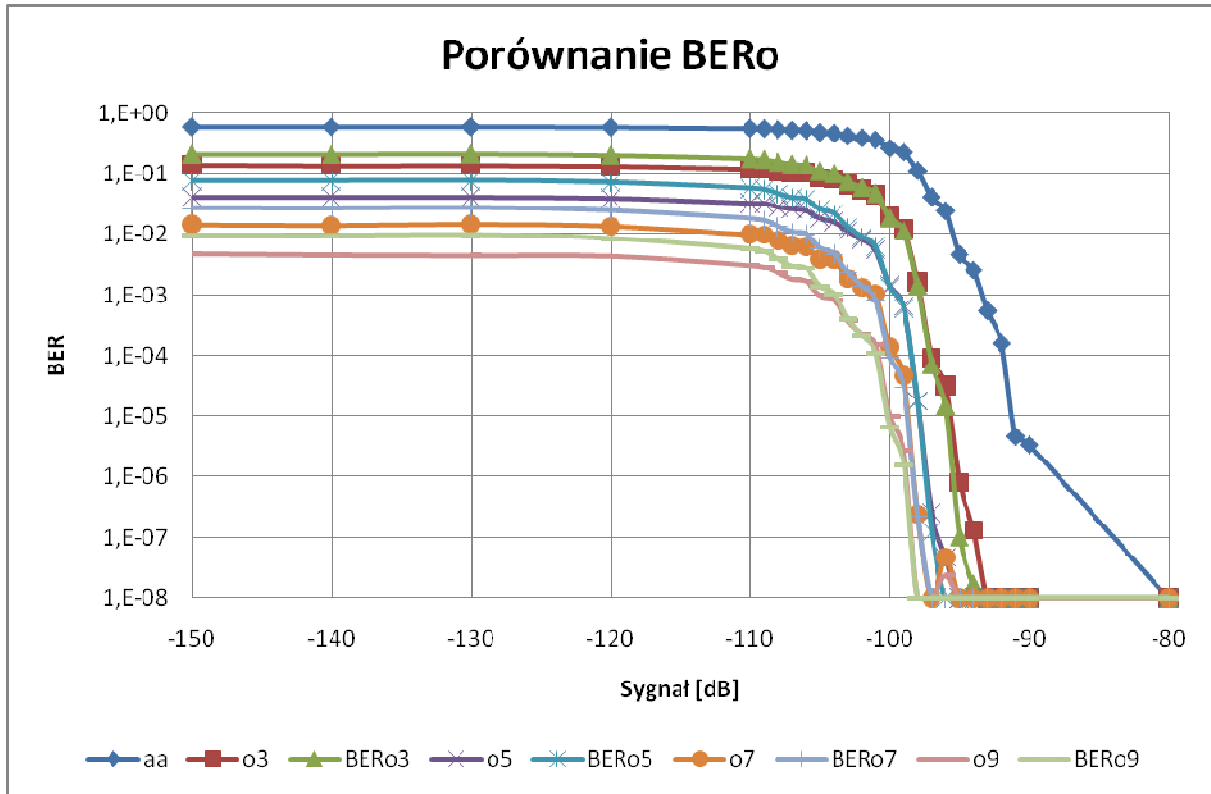
głosowania. Problemem implementacyjnym może być korelacja sygnału. Jeśli znane jest opóźnienie sygnału pomiędzy odbiornikami a systemem głosowania, wymaga to jedynie dodania odpowiedniego opóźnienia otrzymywanych strumieni danych. Zrealizować to można za pomocą dodawania do odebranych danych odpowiednich znaczników czasowych synchronizowanych stabilnym zegarem np. z systemu GPS (Global Positioning System). Należy też uwzględnić różnice odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikami np. z modelu matematycznego satelity. Rozwiązaniem uproszczonym jest sytuacja, kiedy wszystkie odbiorniki mają takie same opóźnienie, dzięki czemu w systemie głosowania strumienie danych są skorelowane czasowo. Tak było to zrealizowane w systemie laboratoryjnym. Rozwiązaniem najbardziej skomplikowanym była by korelacja sygnałów o nieznanym opóźnieniu. Takie rozwiązanie wymagałoby przesuwania wzajemnie strumieni danych tak, aby uzyskać najmniejszy współczynnik BER. Niestety takie rozwiązanie ma wykładniczą złożoność obliczeniową co oznacza, że jest mało skalowalne.

Ostatnia linia (mi) przedstawia wyniki działania algorytmu mieszanego, a więc jednoczesnego zastosowania algorytmu prawie optymalnego oraz głosowania. Oba algorytmy należą do grupy rozwiązań rzeczywistych, a ich połączenie dało dodatkową poprawę jakości łącza.

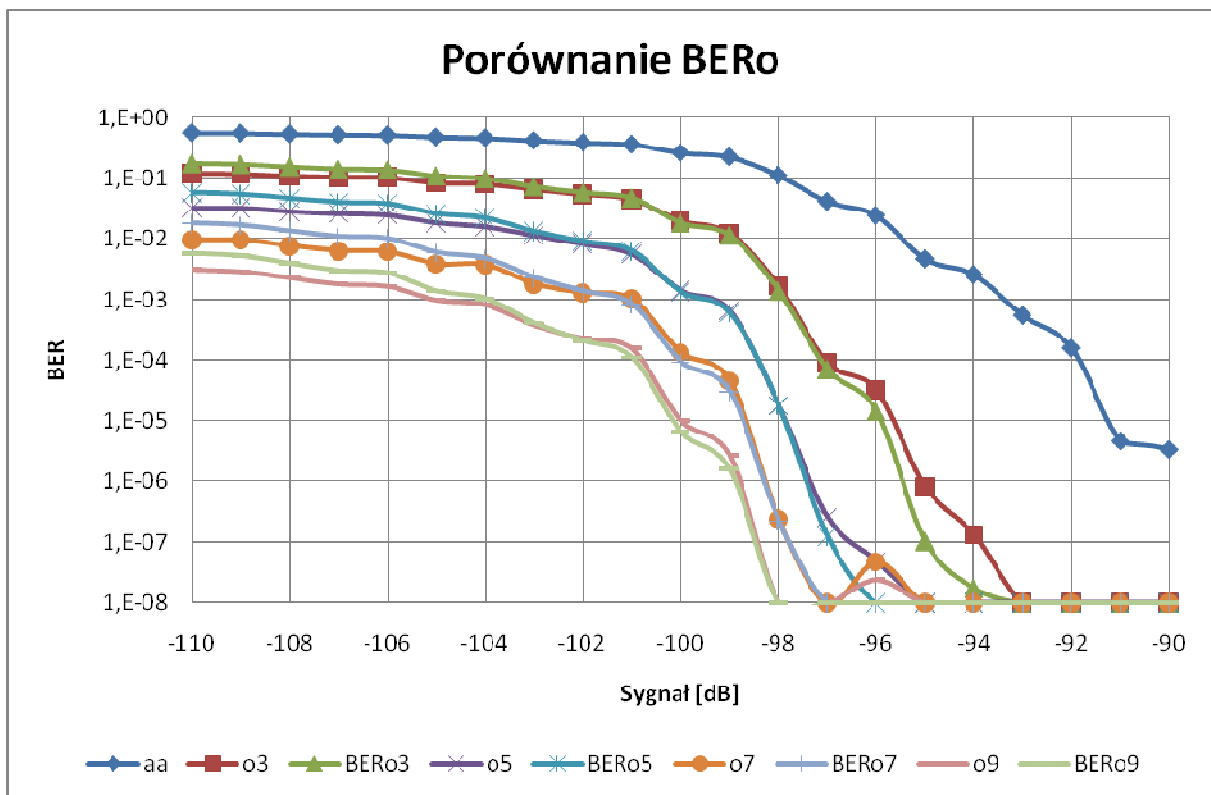
5.2.3. Porównanie otrzymanych wyników z modelowaniem matematycznym.

Na Rys. 82, Rys. 83 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów współczynnika BER dla algorytmu optymalnego (o3-o9) oraz wynik symulacji matematycznej (BERo3-BERo9) tego współczynnika na podstawie liczby wykorzystanych odbiorników oraz uśrednionego współczynnika BER tych odbiorników (aa).

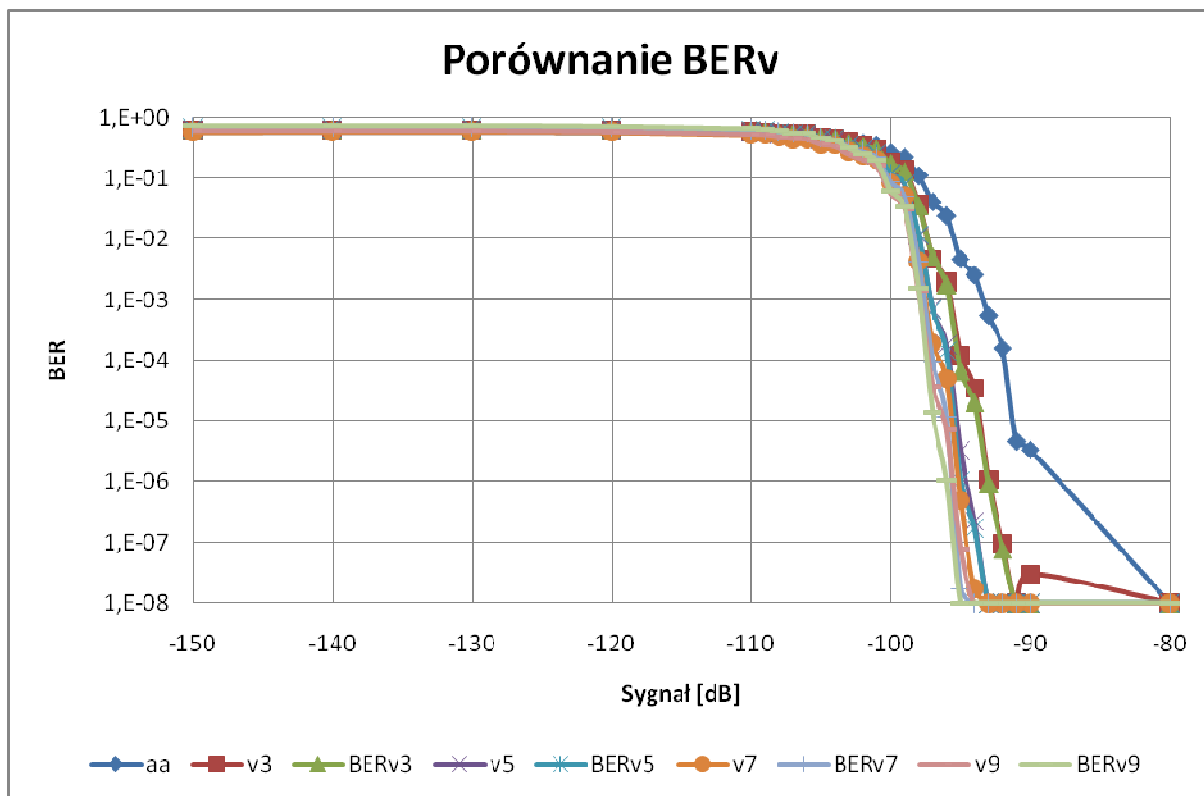
Na Rys. 84, Rys. 85 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów współczynnika BER dla algorytmu głosowanego (v3-v9) oraz wynik symulacji matematycznej (BERv3-BERv9) tego współczynnika na podstawie liczby wykorzystanych odbiorników oraz uśrednionego współczynnika BER tych odbiorników (aa).



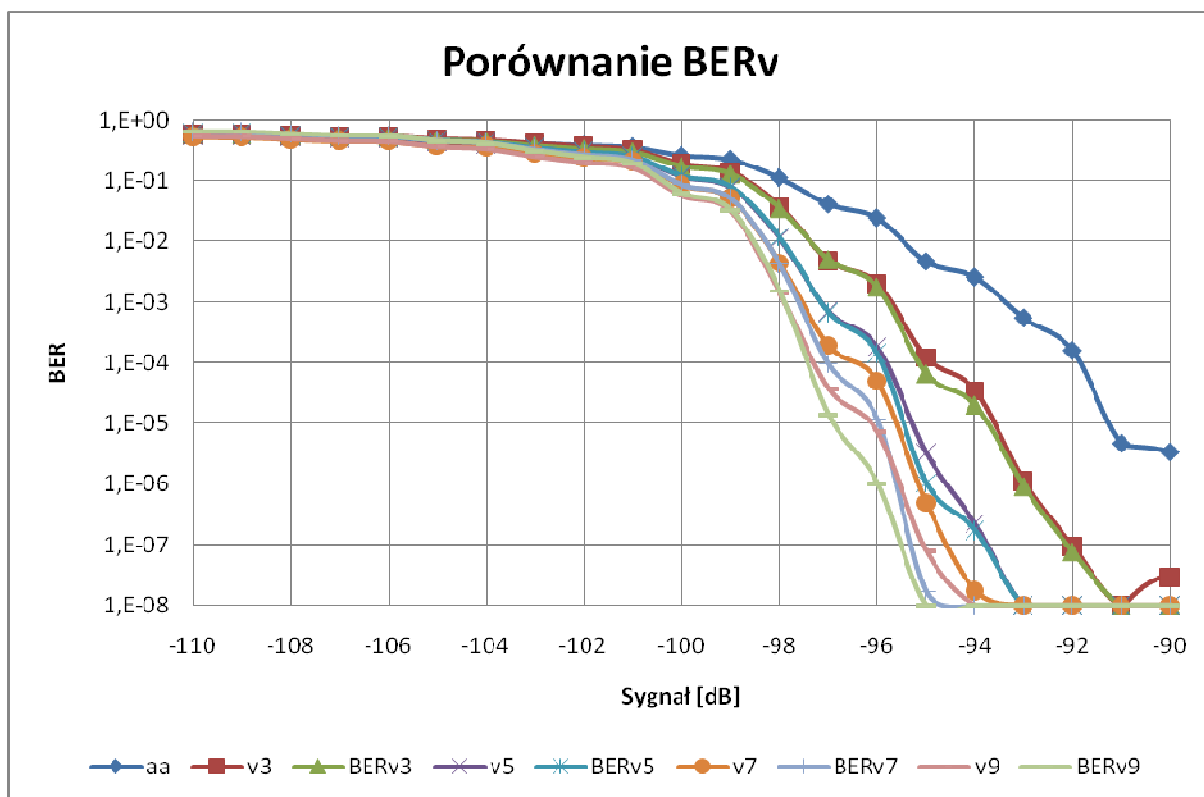
Rys. 82. Porównanie algorytmu optymalnego radiowego w zależności od liczby odbiorników.



Rys. 83. Porównanie algorytmu optymalnego w zależności od liczby odbiorników (obszar zawężony).



Rys. 84. Porównanie algorytmu głosowanego w zależności od liczby odbiorników.



Rys. 85. Porównanie algorytmu głosowanego w zależności od liczby odbiorników (obszar zawężony).

Na przedstawionych rysunkach można zaobserwować, że w obu przypadkach model matematyczny przedstawiony przez autora daje wyniki porównywalne z badaniami eksperymentalnymi. Zmiany w dziedzinie współczynnika BER pojedynczych stacji jak i w liczbie samych stacji naziemnych nie powodują rozbieżności między modelem matematycznym a wynikami eksperymentalnymi. Na wykresach można zaobserwować niewielkie rozbieżności dla małych wartości BER. Należy jednak pamiętać, że oś BER jest w skali logarytmicznej, dlatego też rozbieżności te wydają się większe.

Aby dokładniej przeanalizować różnice pomiędzy modelem matematycznym a pomiarami modelu laboratoryjnego, autor obliczył błąd bezwzględny [36]. Ze względu na to, że współczynnik BER najczęściej podaje się w rzędach wielkości, porównano logarytmy dziesiętne współczynników BER (110) i porównanie to nazwano Bezwzględną Różnicą Logarymiczną, gdzie X_a i X_b to wartości porównywane, „i” to numer pomiaru, a „x” to nazwa mierzonej wartości. Równania (111) oraz (112) przedstawiają formuły służące do wyliczenia błędu odpowiednio dla BER optymalnego ($x=0$) oraz BER głosowanego ($x=v$).

$$BRLx_i = |\log(Xa_i) - \log(Xb_i)| \quad (110)$$

$$BRLo_i = |\log(BERo_i) - \log(o_i)| \quad (111)$$

$$BRLv_i = |\log(BERv_i) - \log(v_i)| \quad (112)$$

Określanie błędu za pomocą BRL jest wygodne, ponieważ za pomocą niewielkich liczb przedstawia zarówno duże wartości błędu jak i małe (podobnie jak wartości wyrażone w decybelach). Zwykle wyrażany jest w wielkościach od 0 do 10. Jeśli zajdzie jednak potrzeba przedstawienia wyników w postaci klasycznego błędu względnego wyrażonego w procentach (113) [36], to autor proponuje formułę (114) przekształcającą BRL na BWP.

$$BWPx_i = \frac{|Xa_i - Xb_i|}{|Xb_i|} * 100\% \quad (113)$$

$$BWPx_i = (10^{BRLx_i} - 1) * 100\% \quad (114)$$

Autor na potrzeby dodatkowych porównań wyznaczył formuły określające zakres mierzonego współczynnika błędów BER oraz BRL, gdzie „i” to numer pomiaru, „n” to liczba pomiarów danej wielkości, a „x” to nazwa mierzonej wielkości (o – optymalna, v – głosowana). MAXBRL_{x_i} (115) to największy wyznaczony BRL_{x_i} z pomiaru danej wartości. SBRL_{x_i} (116) to średnia z wszystkich n pomiarów BRL_{x_i}.

MAXLOGBER_{x_i} (117) oraz MINLOGBER_{x_i} (118) to kolejno największa i najmniejsza zmierzona wartość współczynnika BER_{x_i} wyrażona w skali logarytmicznej. DYNLOGBER_{x_i} (119) określa różnicę pomiędzy MAXLOGBER_{x_i} a MINLOGBER_{x_i} i wyznacza dynamikę pomiaru wartości BER_{x_i} w skali logarytmicznej. Porównanie MAXBRL_{x_i} do DYNLOGBER_{x_i} wyznacza (nazwaną przez autora) Względną Różnicę Logarytmiczną (120) i określa jaką częścią dynamiki powiarów wartości BER_{x_i} jest błąd BRL_{x_i}.

$$MAXBRL_{x_i} = \underset{i=1}{\overset{n}{MAX}}(BRL_{x_i}) \quad (115)$$

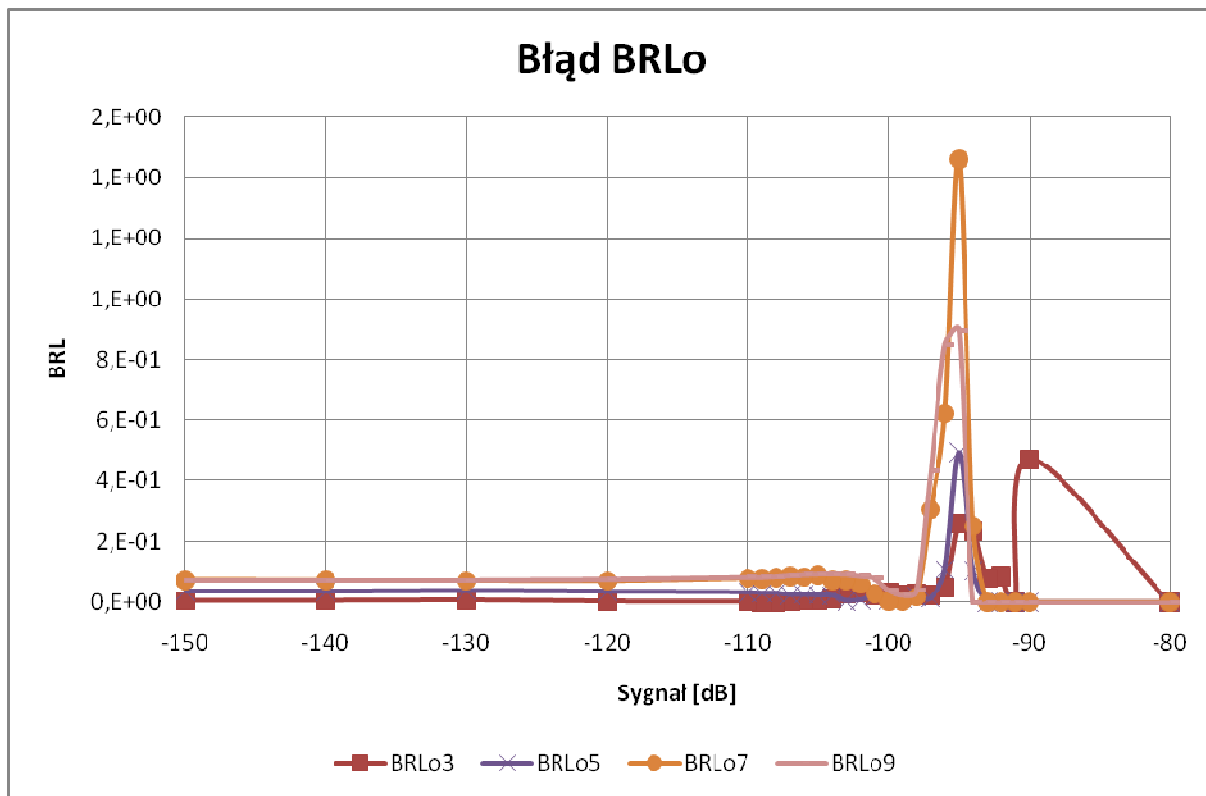
$$SBRL_{x_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (BRL_{x_i})}{n} \quad (116)$$

$$MAXLOGBER_{x_i} = \underset{i=1}{\overset{n}{MAX}}(\log(BER_{x_i})) \quad (117)$$

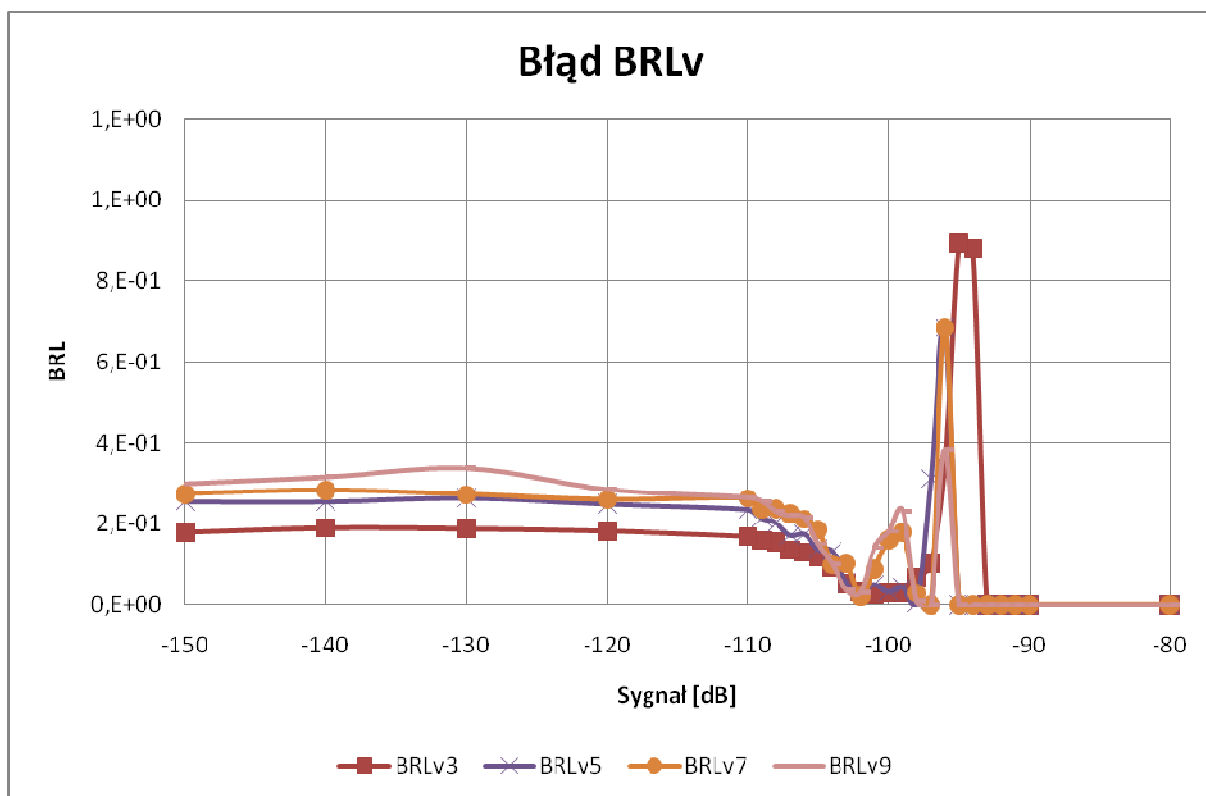
$$MINLOGBER_{x_i} = \underset{i=1}{\overset{n}{MIN}}(\log(BER_{x_i})) \quad (118)$$

$$DYNLOGBER_{x_i} = MAXLOGBER_{x_i} - MINLOGBER_{x_i} \quad (119)$$

$$WRL_{x_i} = \frac{MAXBRL_{x_i}}{DYNLOGBER_{x_i}} \quad (120)$$



Rys. 86. Błąd BRLo.



Rys. 87. Błąd BRLv.

Tab. 6. Zestawienie błędów.

Nazwa	Nazwa pomiaru							
	BERo3	BERo5	BERo7	BERo9	BERv3	BERv5	BERv7	BERv9
SBRLxi	5,597E-02	4,405E-02	1,423E-01	1,336E-01	1,602E-01	1,351E-01	1,470E-01	1,425E-01
MAXBRLxi	4,730E-01	4,955E-01	1,463E+00	8,971E-01	8,955E-01	6,852E-01	6,852E-01	3,842E-01
WRLxi	6,618E-02	7,481E-02	2,372E-01	1,579E-01	1,148E-01	8,791E-02	8,811E-02	4,933E-02
MAXLOGBERxi	-8,523E-01	-1,377E+00	-1,835E+00	-2,318E+00	-1,992E-01	-2,058E-01	-2,231E-01	-2,117E-01
MINLOGBERxi	-8,000E+00	-8,000E+00	-8,000E+00	-8,000E+00	-8,000E+00	-8,000E+00	-8,000E+00	-8,000E+00
DYNLOGBERxi	7,148E+00	6,623E+00	6,165E+00	5,682E+00	7,801E+00	7,794E+00	7,777E+00	7,788E+00

Podczas eksperymentów pomiary w spólczynnik BER były realizowane z dokładnością minimum 10% ($BRL_{ai}=0,1$), przy czym najmniejszą dokładność uzyskano przy pomiarach BERxi w okolicy wartości $1E-8$. Dla wartości BERxi większych od $1E-3$ wartości wyznaczane były z dokładnością 1%. Na Rys. 86 oraz Rys. 86 przedstawiono graficzną reprezentację obliczonych błędów a w Tab. 6 przedstawiono szczegółowe dane.

W większości przypadków BRLxi nie przekracza wartości 0,2-0,4. Średnie wartości BRLxi znajdują się w przedziale od 0,04 do 0,16, co jest wynikiem bardzo dobrym. Jedynie w przedziale, gdzie wartości BERxi mają największą dynamikę zmian (DYNLOGBERxi oscyluje wokół wartości 7), błąd jest większy. Przyczynę wzrostu błędu należy upatrywać w fakcie, że błąd rośnie wraz z rosnącymi błędami pomiarów. Zanotowane największe wartości BRLxi to 1,5 dla BRLoi oraz 0,9 dla BRLvi. Wyniki te stanowią około 15% dokładność względem dynamiki pomiarów parametru BERxi (największe wartości parametru WRLxi dla algorytmu optymalnego to 0,23 a dla algorytmu głosowanego to 0,11). Jest to bardzo dobry wynik, ponieważ wartości te zostały zmierzone w przedziale sygnałowym od -100 dB do -90 dB, w którym zmiana współczynnika BER o 1 rząd wielkości odpowiada zmianie poziomu sygnału o około 1,2 dB. Jest to wartość mniejsza niż zakładany margines błędu modelu bilansu łącza radiowego stosowany przy projektowaniu systemów radiokomunikacyjnych, który zwykle wynosi 3 dB albo 6 dB w zależności od szczegółowości stosowanego modelu ([22], [23]).

5.3. Wnioski z eksperymentów.

Oba rodzaje eksperymentów udowodniły skuteczność technik RSN. Zaproponowane algorytmy udało się zrealizować w systemach laboratoryjnych oraz rzeczywistych. Eksperymenty potwierdziły możliwość realizacji rozproszonego odbioru oraz poprawienie jakości łącza dzięki zastosowaniu tej techniki. Udało się także potwierdzić, że zaproponowane przez autora modele matematyczne pozwalają na przeprowadzenie symulacji systemu z dużą

dokładnością. Przeprowadzone eksperymenty udowodniły poprawność przedstawionej przez autora w tej rozprawie tezy.

6. WYNIKI KOŃCOWE I PODSUMOWANIE.

6.1. Podsumowanie wyników pracy.

Przedstawiono rozprawę doktorską, zawierającą cztery cele. Autor przedstawił szczegółowo przegląd dotychczas stosowanych rozwiązań. Opisano budowę profesjonalnej oraz amatorskiej stacji naziemnej oraz segment satelitarny, z którym stacje się komunikują. Następnie opisano sieciowe systemy wspomagające komunikację satelitarną. Wykazano także znajomość przez autora systemów naziemnych, w których stosuje się komunikację z wykorzystaniem wielu stacji naziemnych. Opisano przykłady z innych dziedzin, które ze względu na swój charakter obrazują problemy rozproszonej komunikacji.

W kolejnym rozdziale przedstawiono autorską propozycję komunikacji satelitarnej przy wykorzystaniu Rozproszonej Stacji Naziemnej. Omówiono ogólną koncepcję polegającą na wykorzystaniu wielu odbiorników odbierających ten sam sygnał w celu poprawienia jakości łącza radiowego. Przedstawiono podstawowe formuły pozwalające na obliczenie współczynnika błędów (BER) przy wykorzystaniu technik RSN. Opisano także autorską propozycję systemu porównywania pakietów (Packet Voting System). Na końcu rozdziału opisano, w jaki sposób autor proponuje budowę Rozproszonej Stacji Naziemnej.

W kolejnej części pracy przeprowadzono szczegółową analizę teoretyczną zagadnienia. Wykonano budżet mocy dla łącza satelitarnego. Następnie omówiono zagadnienie jakości łącza satelitarnego. Przeprowadzono kilka symulacji wpływu współczynnika BER na możliwość przesyłania pakietów w łączu. Omówiono także oryginalne oprogramowanie (Distributed Ground Station System Calculator) do symulacji omawianych zagadnień. Następnie dokonano porównania pomiędzy pojedynczą stacją naziemną a systemem połączonych stacji naziemnych. Wyprowadzono autorską formułę do liczenia teoretycznego tłumienia wolnej przestrzeni (TFSL) i wskazano, dlaczego parametr ten ułatwia symulacje bilansu łącza dla Rozproszonej Stacji Naziemnej. Realizowane symulacje przedstawiono dla przypadku jednowymiarowego (1D) jak i trójwymiarowego (3D). W dalszej części zaproponowano kilka scenariuszy realizacji technik RSN, przedstawiono proponowane autorskie algorytmy (optymalny, głosowany, minimalny) oraz wyprowadzono formuły do liczenia współczynnika BER oraz E_b/N_0 dla każdego z algorytmów. Następnie przeprowadzono wiele symulacji (1D, 3D) w celu porównania skuteczności technik RSN w zależności od algorytmu, jakości łącza oraz liczby stacji. Przedstawiono problemy z algorytmem głosowania dla przypadku 3D. Wskazano także, w jaki sposób można

wykorzystać wysoką jakość łącza dzięki zastosowaniu technik RSN (zmniejszenie mocy nadawczej oraz zwiększenie przepływności bitowej).

W kolejnym rozdziale dokonano weryfikacji doświadczalnej bronionej przez autora tezy oraz poprawności wyprowadzonych formuł. Autor na potrzeby badań zbudował balonowy moduł komunikacyjny, model laboratoryjny satelity oraz Rozproszonej Stacji Naziemnej. Opisano szczegółowo szereg przeprowadzonych w terenie z wykorzystaniem balonów stratosferycznych doświadczeń. Doświadczenia te wykazały, że zastosowanie technik RSN jest możliwe w przypadku prawdziwych misji oraz że zastosowane techniki poprawiły jakość. Kolejna grupa doświadczeń została przeprowadzona na modelu laboratoryjnym. Doświadczalnie potwierdzono, że wyprowadzone przez autora formuły do symulacji jakości łącza RSN pokrywają się z przeprowadzonymi doświadczeniami. Przeprowadzono analizę błędów, która wykazała, że jakość uzyskanych wyników jest bardzo dobra.

Autor przedstawił oryginalną teorię rozproszonej komunikacji i potwierdził ją eksperymentalnie. Przeprowadził szczegółową analizę parametrów stosowanej komunikacji satelitarnej (pierwszy cel rozprawy). Wskazał wady tych systemów takie jak małe (czasowo) wykorzystanie stacji uniwersyteckich, ograniczony zasięg stacji dla orbity LEO oraz nie wykorzystanie wielu stacji do poprawy jakości łącza. Zaproponował zmiany w istniejących systemach (drugi cel rozprawy) przedstawiając idee Rozproszonej Stacji Naziemnej, która rozwiązuje wyżej wskazane problemy. W dalszej części pracy przeprowadził szczegółową analizę proponowanego rozwiązania (trzeci cel rozprawy) pokazując wiele symulacji jednowymiarowych jak i trójwymiarowych. Za pomocą eksperymentów balonowych (czwarty cel rozprawy) pokazał, że jest możliwa realizacja systemu komunikacji przy wykorzystaniu rozproszonej sieci stacji odbiorczych. Dzięki wykorzystaniu kilku stacji odbiorczych udało się uzyskać równoległy odbiór danych jednokrotnie wysyłanych z gondoli balonu. Eksperymenty te potwierdziły także tezę pracy, wykazując, że rozproszony odbiór poprawia jakość transmisji. Odebrane dane po poddaniu analizie porównawczej posłużyły do wygenerowania danych z mniejszą ilością błędnych informacji. Kolejne eksperymenty przy wykorzystaniu modelu laboratoryjnego pozwoliły uzyskać bardzo szczegółowe wyniki potwierdzające wysoką jakość opracowanego przez autora modelu matematycznego Rozproszonej Stacji Naziemnej i zastosowanych algorytmów poprawiających jakość łącza. Dodatkowych badań wymaga mechanizm korelacji danych oraz wykorzystania algorytmu optymalnego, aby maksymalnie zwiększyć skuteczność technik RSN. Zbadać należy też w jaki sposób dobierać stacje naziemne do algorytmu głosowanego w modelu 3D, aby uzyskiwać dużą poprawę

jakości łącza. Prawdopodobnie można też opracować inne algorytmy wykorzystujące koncepcję RSN. Opracowana przez autora koncepcja RSN pozwala na jej zastosowanie do aktualnie używanych systemów i takie wdrożenia aktualnie są prowadzone (szczegóły opisane są w następnym podpunkcie). Patrząc daleko w przyszłość wydaje się prawdopodobne, że ludzkość będzie realizować podróże kosmiczne do coraz odleglejszych obiektów kosmicznych, a to będzie się wiązało z budową coraz potężniejszych systemów antenowych. Wykorzystanie technik RSN może się okazać ważne, aby pokonać bariery technologiczne współczesnych systemów antenowych.

Podsumowując uzyskane wyniki można stwierdzić, że wszystkie cele rozprawy zostały osiągnięte, a teza udowodniona.

Autorski wkład opisany w niniejszej rozprawie doktorskiej:

- Opracowanie koncepcji Rozproszonej Stacji Naziemnej.
- Wyprowadzenie formuł do liczenia budżetu mocy RSN.
- Opracowanie formuły Teoretycznego Tłumienia Wolnej Przestrzeni (TFSL) ułatwiającej symulację RSN.
- Opracowanie algorytmów poprawy jakości łącza w technikach RSN (optymalny, głosowany).
- Opracowanie formuł do liczenia współczynnika błędów dla opracowanych algorytmów (BER_o, BER_v).

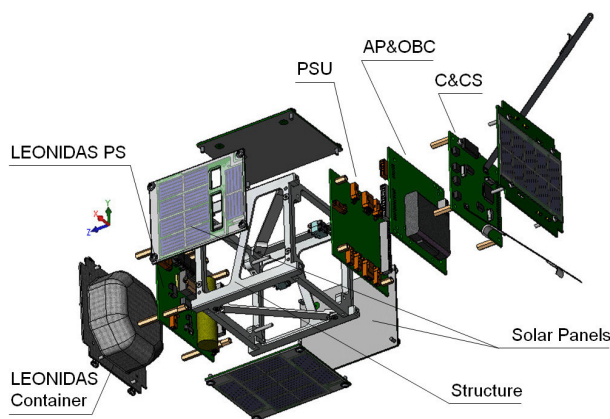
6.2. Możliwości wdrożenia wyników pracy oraz kierunki dalszych badań.

Techniki RSN opisane w tej rozprawie doktorskiej można zastosować w praktyce. Autorowi znane są projekty, w których wykorzystuje się te techniki bądź planuje się ich wykorzystanie. Przykładem jest system komunikacji dla satelity PW-Sat budowanego przez studentów Politechniki Warszawskiej oraz system GENSO.

6.2.1. Satelita PW-Sat

Satelita PW-Sat ([01], [03]) to mały satelita w standardzie Cubesat (rozmiar 10x10x10cm, waga do 1 kg - Rys. 88). Ma on być wyniesiony na orbitę o wysokości około 600km n.p.m. Jego głównym celem jest sprawdzenie systemu deorbitacji poprzez

wykorzystanie żagla kosmicznego. Jego działanie polega na wielokrotnym zwiększeniu przekroju poprzecznego satelity, co wielokrotnie zwiększa opory w szczątkowych warstwach atmosfery. Zwiększenie tych oporów powinno znacznie skrócić czas przebywania satelity na orbicie i w konsekwencji jego spalenie w górnych warstwach atmosfery. Drugim eksperymentem realizowanym przez satelitę jest system komunikacji oparty o techniki RSN. Autor zbudował na potrzeby tego satelity moduł komunikacyjny (szczegółu dostępne są w załączniku 8.4) oraz radioamatorską stację naziemną umiejscowioną na jednym z budynków uczelni. Na Politechnice Warszawskiej powstaje oprogramowanie GS-SCP [72], które ma umożliwić globalną komunikację z satelitą przy wykorzystaniu wolontariatu radioamatorów na całym świecie oraz sieci Internet. Badania autora przedstawione w niniejszej rozprawie posłużyły jako baza teoretyczna dla tego oprogramowania.

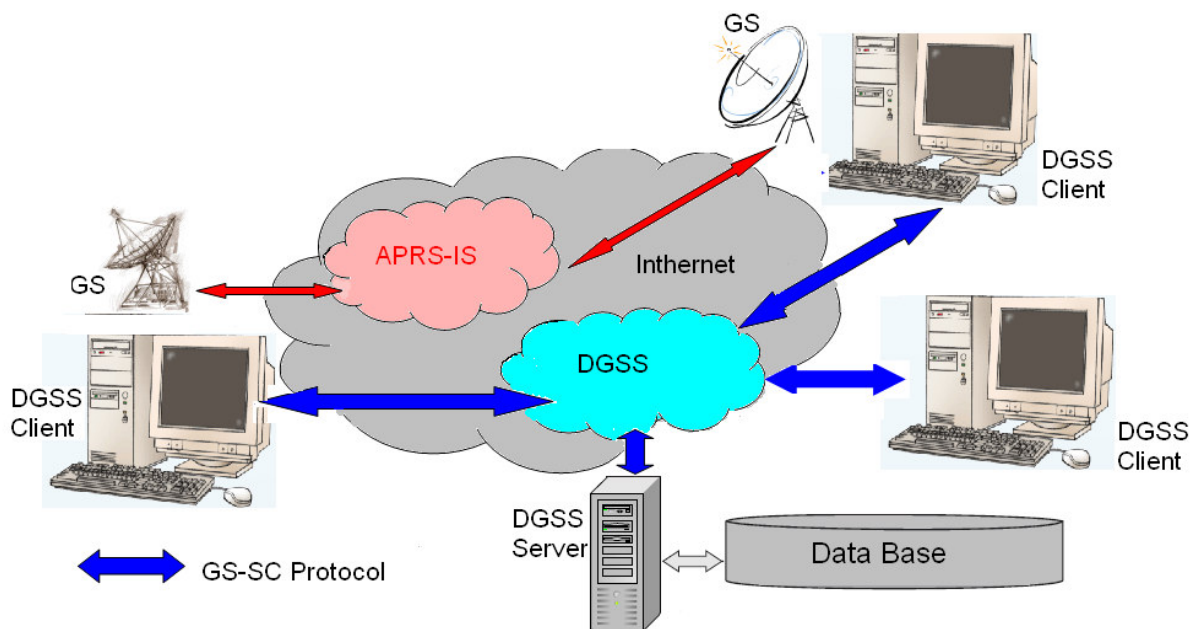


Rys. 88. Budowa satelity PW-SAT.

6.2.1.1. Oprogramowanie GS-SCP.

Oprogramowanie GS-SCP ([72], [74]) bazuje na koncepcji RSN (DGSS) i jest rozwinięciem systemu APRS-IS, który ma ograniczenia związane ze standardem APRS (opisanym w rozdziale 2.1.4). Oprócz sieci APRS-IS wykorzystuje dodatkowo sieć DGSSN (Distributed Ground Station System Network). Aby rozwiązać problem kolizji pakietów w torze radiowym (opisany w punkcie 2.1.4), radioamatorom zostanie dostarczone specjalne oprogramowanie klienckie. Klient taki otrzymywałby oddzielnym kanałem pakiet do retransmisji, co pozwoliłoby na transmisję wiadomości tylko przez wybraną stację. Kolejnym problemem systemu APRS to aspekty prawne pracy w sieci. Przepisy krajowe jak i między narodowe nakazują, aby transmisja w ramach systemów radioamatorskich była jawna (nie była szyfrowana). Naraża to satelitę na nieautoryzowany dostęp przez innych radioamatorów.

System przeprowadza autoryzacje za pomocą podpisu elektronicznego ([78], [79]). Każda wiadomość do satelity jest podpisana elektronicznie przez Zespół Operacyjny (Operation Team) i satelita akceptuje tylko tak podpisane komendy. Aby wyeliminować ryzyko, że podpisana wiadomość zostanie przechwycona i ponownie retransmitowana przez nieautoryzowanego nadawcę, do każdej wiadomości dodany jest inkrementowany licznik, co pozwala na wyeliminowanie już raz wykorzystanych pakietów. System GS-SCP cały czas jest rozwijany. Docelowo aplikacja kliencka będzie całkowicie autonomiczna. Po odebraniu polecenia z serwera będzie potrafiła sama wysłać odpowiednie komendy do rotora antenowego, aby system antenowy śledził wybranego satelitę. Równocześnie będzie kontrolować transceiver aby ustawić odpowiednio częstotliwości (nadawczą i odbiorczą). Kiedy system będzie gotowy, klient będzie w stanie sterować modemem TNC bądź sam modulować i demodulować za pomocą karty muzycznej pakiety do i z satelity. Należy zaznaczyć że oprócz ogólnej koncepcji RSN autorskim wkładem w to oprogramowanie są omówione rozwinięcia sieci APRS-IS poprzez zastosowanie dedykowanego klienta w celu eliminacji problemu kolizji pakietów w trakcie transmisji w kierunku satelity oraz zastosowanie podpisu elektronicznego.



Rys. 89. Schemat budowy systemu DGSS w oparciu o oprogramowanie GS-SCP.

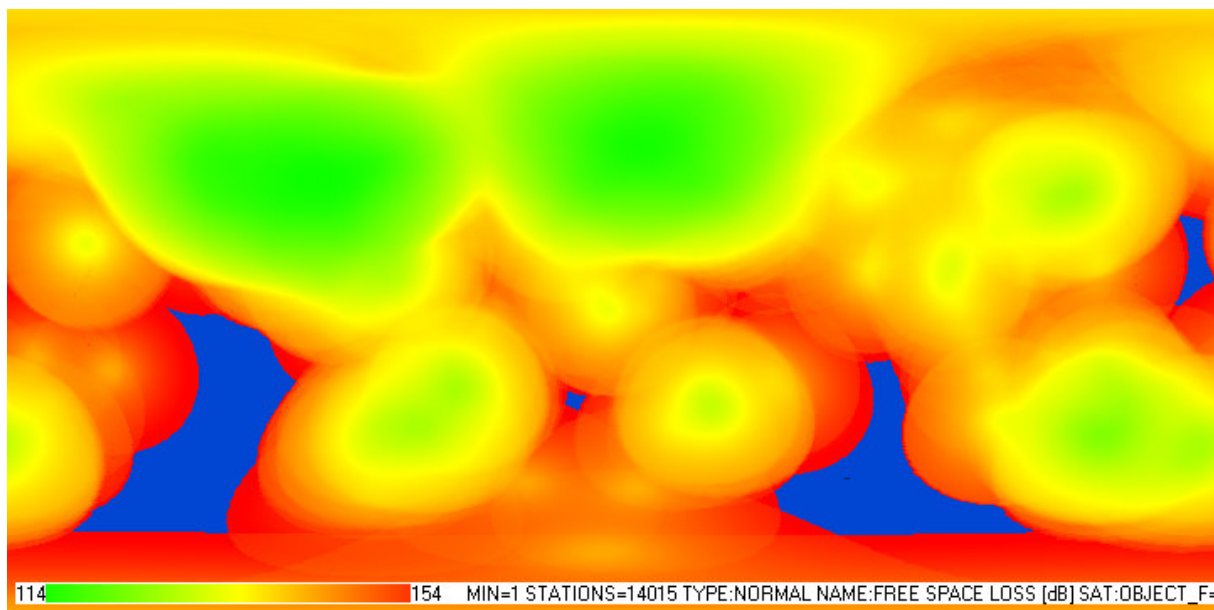
6.2.2. GENSO.

Drugim projektem, w którym zaplanowane jest wykorzystanie technik RSN, jest projekt GENSO ([62], [63], rozdział 2.2.2.3). System ten jest dopiero na etapie prototypowania i umożliwia dostęp jednocześnie tylko do jednej stacji naziemnej. W przyszłości planuje się w nim wykorzystanie wielokrotnego odbioru w celu poprawy jakości łącza. Główną różnicą pomiędzy systemem GS-SCS a GENSO jest to, że w GS-SCS serwery sieci wykorzystywane są do transmisji danych oraz autoryzacji, natomiast w sieci GENSO wykorzystywane są jedynie do autoryzacji oraz kojarzenia stacji naziemnych z centrum kontroli. Transmisja danych odbywa się już bezpośrednio pomiędzy pojedynczymi stacjami naziemnymi a centrum kontroli. Oznacza to, że aby możliwe było skorzystanie z technik RSN należy je zaimplementować w oprogramowaniu centrum kontroli, a nie na serwerach samego systemu.

Warto nadmienić, że autor aktywnie uczestniczy w pracach przy projekcie GENSO. Za pomocą autorskiego programowania DGSSC wykonuje symulacje działania sieci oraz dzięki jego staraniom twórcy systemu planują wykorzystanie technik RSN w kolejnej wersji systemu.

6.2.3. Rozproszona Antena.

Nieco innym kierunkiem rozwoju może być realizacja Rozproszonej Anteny. Aby zapewnić równomierny odbiór dookoła jakiegoś obiektu (np. budynku, góry albo planety), należy zbudować system połączonych anten. Realizacja takiego projektu może być bardzo trudna ze względu na występujące interferencje sygnału pomiędzy antenami oraz stratami sygnału w przewodach antenowych. Systemy oparte o techniki RSN nie mają takich problemów, ponieważ anteny nie są połączone bezpośrednio (brak interferencji), a sygnał transmitowany jest w postaci cyfrowej, dzięki czemu straty w przewodach można bezstratnie regenerować. Na Rys. 90 przedstawiono Teoretyczne Tłumienie Wolnej Przestrzeni systemu RSN dla satelity AAUSAT-II, ale można je traktować także jako charakterystykę teoretycznej anteny realizowanej przez system RSN. Listki silniejszego wzmocnienia wynikają z liczby użytych stacji naziemnych w danym obszarze. Charakterystyka nie ma listków interferencyjnych oraz w realizacji nie przeszkadza obiekt pochłaniający fale elektromagnetyczne, jakim jest planeta Ziemia. Autor uważa, że formuły które opracował do modelowania systemów RSN, mogą posłużyć do modelowania takich teoretycznych anten.



Rys. 90. Teoretyczne Tłumienie Wolnej Przestrzeni dla systemu RSN.

6.2.4. Rozproszona Antena Kierunkowa.

Kolejną propozycją wykorzystania technik RSN przez autora jest zbudowanie Rozproszonej Anteny Kierunkowej. Przy budowie współczesnych anten o wielkim zysku ograniczeniem staje się ich wielkość. Współczesne materiały pozwalają na zbudowanie anten ruchomych, których czasy mają średnice około 100m. Większe anteny budowane są w nieckach dolin czy kraterów, co mocno ogranicza ustawienie kierunku nasłuchu. Rozwiązaniem tego problemu jest budowa szyków antenowych, ale i to rozwiązanie ma swoje wady. Łącząc anteny w szyki, część sygnału jest tracona w liniach transmisyjnych, co także ogranicza maksymalny rozmiar szyku. Wydaje się, że zastosowanie technik RSN pozwoliło by na wyeliminowanie problemów z tłumieniem sygnału w liniach transmisyjnych, ale temat ten powinien być najpierw szczegółowo zbadany.

7. BIBLIOGRAFIA.

7.1. Satelity uniwersyteckie.

- [01] Grzegorz Niemirowski, *Cubesat microsatellite with balloon, 56th International Astronautical Congress in Fukuoka*, Październik 2005
- [02] Zespół AMSAT, *About AMSAT*, <http://www.amsat.org/amsat-new/AboutAmsat/>
- [03] Zespół PW-Sat, *Projekt PW-Sat*, <http://www.pw-sat.pl/>
- [04] Marcin Stolarski, Marcin Dobrowolski, Rafał Graczyk, Krzysztof Kurek, *Space platform for student cubesat pico-satellite*, CD Proc. of Signal Processing Symposium (SPS 2009), Jachranka Village, May 28-30, 2009
- [05] Marcin Stolarski, Krzysztof Kurek, Marcin Dobrowolski, Rafał Graczyk, *System komunikacji i sterowania satelity PW-SAT*, Materiały Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji (KKRRiT 2009), Warszawa, 17-19 czerwca 2009 r. s. 337 – 340
- Marcin Stolarski, Krzysztof Kurek, Marcin Dobrowolski, Rafał Graczyk, *System komunikacji i sterowania satelity PW-SAT*, Przegląd Telekomunikacyjny - rocznik LXXXII - i Wiadomości Telekomunikacyjne - rocznik LXXVIII - nr 6/2009, CD-ROM s. 337 - 340
- [06] Rafał Graczyk, Marcin Stolarski, Marcin Dobrowolski, Krzysztof Kurek, *System zasilania dla satelity PW-SAT*, Materiały Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji (KKRRiT 2009), Warszawa, 17-19 czerwca 2009 r. , s. 358 – 361
- Rafał Graczyk, Marcin Stolarski, Marcin Dobrowolski, Krzysztof Kurek, *System zasilania dla satelity PW-SAT*, Przegląd Telekomunikacyjny - rocznik LXXXII – i Wiadomości Telekomunikacyjne - rocznik LXXVIII - nr 6/2009, CD-ROM s. 358 - 361

- [07] Marcin Tymiński, *Projekt system lokalizacji kapsuły kosmicznej: podsystem nadawczy*, Praca dyplomowa – magisterska, Politechnika Warszawska 2005
- [08] Piotr Sitek, *Projekt system lokalizacji kapsuły kosmicznej. Podsystem Odbiorczy*, Praca dyplomowa – magisterska, Politechnika Warszawska 2005
- [09] Cezary Jezierski, *Projekt elementów nadajnika i odbiornika sygnałów cyfrowych do łączności satelitarnych z wykorzystaniem struktur FPGA*, Praca dyplomowa - magisterska, Politechnika Warszawska 2007
- [10] Zespół YES2, *Young Engendering Satellite 2*, <http://www.yes2.info/>
- [11] Michiel Kruijff, Patrick Hambloch, Erik J van der Heide, Marco Stelzer, *The Second Young Engineers Satellite*, IAC 2007
- [12] Zespół Delta-Utec, *Main*, <http://www.delta-utec.com/>

7.2. Środowisko kosmiczne, analiza i projektowanie misji kosmicznych, wiarygodność systemów komputerowych.

7.2.1. Analiza misji kosmicznych

- [13] Wiley J.Larson, James R. Wertz, *Space Mission, Analysis and Design*, Space Technology Library 2005

7.2.2. Środowisko kosmiczne

- [14] Piotr Orleański, *Technologie Kosmiczne*, CBK PAN
- [15] Piotr Orleański, *Optymalizacja układu redukcji szumów w satelitarnym teleskopie promieniowania gamma*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2006 Warszawa
- [16] Mike Maher and others, *Radiation Owner's Manual*, National Semiconductors

7.2.3. Wiarygodność systemów komputerowych

- [17] M. Stolarski, *Program methods of masking errors in programs, data and calculations, which are the result of computer malfunction caused by space radiation*,

Proc. (<http://www.stec2005.space.aau.dk/>) of Space Technology Education Conference (STEC05), 6-8 April 2005, Aalborg University, The Nederland

- [18] M. Stolarski, *Distributed testing of the satellite's components with the use of the Internet on the example of the virtual CAN*, Proc. CD-ROM of Signal Processing Symposium Wilga 2005 part of XIV IEEE-SPIE Symposium on Advanced Electronics, 3-5 June 2005, Poland

M. Stolarski, *Distributed testing of the satellite's components with the use of the Internet on the example of the virtual CAN*, Proc. of SPIE, Volume: 6159, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments IV, February 2006, Poland

- [19] M. Stolarski, *Budowa komputera pokładowego studenckiego satelity ESA SSETI ESEO*, Materiały Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji KKRRiT, Kraków, 15-17 Czerwca 2005, s. 331-334

- [20] Piotr Gawkowski, *Analiza i zwiększanie odporności na błędy aplikacji programowych z systemach z elementami COTS*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2005 Warszawa

- [21] Janusz Sosnowski, *Testowanie i niezawodność systemów komputerowych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005

7.3. Bilans mocy, anteny, budowa stacji naziemnej.

- [22] Michael O. Kolawole, *Satellite Communication Engineering*, Marcel Dekker, Inc., New York 2002

- [23] Zdzisław Bieńkowski, *Poradnik Ultrakrótkofalowca*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1988

- [24] Daniel Józef Bem, *Telewizja satelitarna*, Wydawnictwo Czasopism i Książek Technicznych SIGMA NOT, Spółka z o.o., Warszawa 1992

- [25] Jacek Matuszczyk, *Poradnik Antenowy dla krótkofalowców*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1996

- [26] Łukasz Komsta, *Krótkofalarstwo i radiokomunikacja*, Poradnik, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001
- [27] ECSS, ECSS-E-70-41A, *Space engineering, Ground system and operations – Telemetry and telecommand packet utilization*, ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, The Netherlands, Noordwijk 2003
- [28] Duncan Warren, *Introduction to Ground Stations*, European Space Operations Centre
- [29] Krzysztof Dąbrowski, *Nie tylko fonia I CW*, Poradnik dla krótkofalowców, Wydawnictwo BOGMAR, Olsztyn 1994
- [30] Krzysztof Dąbrowski, *Amatorska komunikacja cyfrowa*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994
- [31] Steve Goode, K9NG, *BER Performance of TAPR TNC Modem*, ARRL QEX, August 1983
- [32] Ralph Wallio, *AX.25 Packet Radio AFSK on FM Bit*, Packet and Data Set Error Rates, http://showcase.netins.net/web/wallio/BER_Packetradiobiterrorrate.html
- [33] Praca zbiorowa pod kierunkiem R. Dean Straw, N6BV, *The ARRL Antenna Book*, ARRL
- [34] Bernard Sklar, *Digital Communications, Fundamentals and Applications*, Prentice Hall P T R
- [35] John Proakis, *Digital Communications By John Proakis 4Th Edition*, Mcgraw Hill
- [36] Praca zbiorowa pod red. Henryka Szydłowskiego, *Teoria pomiarów*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1978, wyd.II.
- [37] Claude E. Shannon, *Communication in the Presence of Noise*, Proceedings of the IEEE, vol 86, No. 2, February 1998, p 447-457
- [38] Józef J. Pawelec, *Radiosterowanie i łączność kosmiczna*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1991

- [39] Julian Lipczyński, *Tablice matematyczne*, SPONSOR & Apewu, 1994
- [40] Jan A. King, W3GEY/VK4GEY and others, *AMSAT / IARU Annotated Link Model System, Version: 2.4.1*, AMSAT, 2007

7.4. Stosowane rozwiązania stacji naziemnych.

7.4.1. Standardowe stacje naziemne.

- [41] Krystian Górski, *Stacja naziemna amatorskiej łączności satelitarnej*, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2006
- [42] Grzegorz Woźniak, *The automatic controller for satellite antenna rotator*, Praca dyplomowa - inżynierska, Politechnika Warszawska 2007
- [43] Renato Krpoun, *The SwissCube mission and associated ground station segment activities*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [44] Dmitriy Bogdanov, *Cubesat Ground Station of the Technical University of Berlin*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006,
- [45] Tokyo C. Priya Fernando, *IRV Ground Station Status*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [46] Chiu-Teng Tsai, Hideki Yoshihara, Kazuhiko Yotsumoto, Daichi Kumagai, Fumio Asai, Haruki Shiroma, Bryan Klofas, *Short Presentations on Introduction of Various Ground Stations*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [47] Steve Bernier, Michael Barbeau, *A Virtual Ground Station Based on Distributed Components for Satellite Communications*, 15th annual AIAA/Utah State University Conference on Small Satellites, August 2001

7.4.2. GSN

- [48] Zespół GSN, *Ground Station Network Software Specification*, ISSL, University of Tokyo
- [49] Zespół GSN, *GMS manual for GSN*, ISSL, University of Tokyo

- [50] Yasuhisa Oda, *A Report on Students' Ground Station Network Project in Japan*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [51] Kyle Leveque, *Using Cubesats to Create a Ground Station Network*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [52] Mitsuhiro Komatsu, *A report of GSN activities by Univ. of Tokyo ISSL -the efficient spacecraft operation system with domestic & international collaborators*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [53] Masaki Maeno, *XML and IP Based Ground Station System for Distributed Operations of Small Satellites*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [54] Rajesh Shankar Priya, *Component Based Ground Station Network using Modular and Distributed Systems*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [55] Naonori Kakimura, *A mathematical programming approach to the Ground Station Network*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [56] Yuya Nakamura, *Operation Scheduling of Multiple Small Satellites Using Ground Station Network*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [57] Akira Yamaguchi, *Efforts toward networking ready ground station*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [58] Kazuhiko Takeoka, *Approach Concerning Hokkaido Institute of Technology Ground Station*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo

7.4.3. SMACS

- [59] Yusuke Murata, *Spacecraft Management And Control System (SMACS) Overview*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo

7.4.4. TriS-TAR

- [60] Jose Edgardo L.Aban, *Towards the Development of Small Satellite Systems and Technologies for Applications and Research in the Philippines - the TriS-TAR Program*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo

7.4.5. BEXUS

- [61] Muhammad Imran Majid, *Implementation of Ground Station for Stratospheric Balloon Campaign BEXUS II*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo

7.4.6. GENSO

- [62] Neil Melville, *A Global Educational Network for Satellite Operations*, http://www.genso.org/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,54/Itemid,28/

- [63] Neil Melville, *A European Perspective on a Global Educational Ground Station Network*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo

7.4.7. CISCO

- [64] Lance Gatling, *Use of Internet by the Disaster Monitoring Constellation*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo

7.4.8. NOAA

- [65] NOAA, *NOAA Satellite and Information Service*, <http://www.nesdis.noaa.gov/>

7.4.9. DSN

- [66] Rich Miller, *Deep Space Network Status*, http://www.ioag.org/ioag6_nasajpl_dsn_status.pdf, National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology

7.4.10. Irydium

[67] Iridium, *How it works*, <http://www.iridium.com/about/howitworks.htm>

7.5. Rozproszona Stacja Naziemna.

[68] M. Stolarski, W. Winiecki, *Building Distributed Ground Station with Radio Amateurs*, Proc. of Space Technology Workshop STW 2006 (MIKON 2006), Kraków, 23 May 2006, Poland, p. 49-54

M. Stolarski, W. Winiecki, *Building Distributed Ground Station with Radio Amateurs*, Journal of Telecommunications and Information Technology, No.1, 2007, Warsaw, Poland, p. 72-75

[69] M. Stolarski, *The Use of Distributed Ground Station System for Very Low Power Communication*, Proc. CD-ROM of The 1st International Workshop on Ground Station Network, Tokyo, 18-19 July 2006, Japan

[70] M. Stolarski, *System porównywania pakietów jako metoda poprawiania jakości łącza satelitarne w Rozproszonej Stacji Naziemnej*, Materiały VII Seminarium stypendystów Fundacji Wspierania Rozwoju Radiokomunikacji i Technik Multimedialnych, Warszawa, 6 grudnia 2006, s. 35-42

[71] M. Stolarski, *Distributed Ground Station System experimental theory confirmation*, Proc. of European Ground System Architecture Workshop (ESAW), Darmstadt, 5-6 May 2009, Germany, p. 1-12

[72] K. Dąbrowska, M. Stolarski, *Ground Segment of Distributed Ground Station System*, Proc. CD-ROM of IEEE Region 8 EUROCON 2007, Warsaw, 9-12 September 2007, Poland

[73] M. Stolarski, *Balony stratosferyczne, tania platforma testowania systemów kosmicznych*, Materiały VIII Seminarium stypendystów Fundacji Wspierania Rozwoju Radiokomunikacji i Technik Multimedialnych, Warszawa, 5 grudnia 2007, s. 9-18

[74] Katarzyna Dąbrowska, *System komunikacji z satelitą poprzez internet i stacje naziemne*, Praca inżynierska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2007

- [75] W.R.Stevens, *Programowanie zastosowań sieciowych w systemie UNIX*, Wydaw. WNT,1996
- [76] W.R.Stevens, *Biblia TCP/IP* , Wydaw. RM,1998
- [77] D.Cormmer, *Sieci komputerowe i intersieci*, WNT, 2003
- [78] N. Ferguson, B.Schneier, *Kryptografia w praktyce*, Helion,2004
- [79] A.J. Menezes, P.C. van Oorschot, S.A. Vanstone, *Handbook of Applied Cryptography*, CRC Press, 1997, pages 425-488
- [80] Zespół BYONICS, *Tiny Trak3*, <http://www.byonics.com/tinytrak/>
- [81] SYMEK, *SYMEK GmbH Homepage* , <http://www.symek.com/>
- [82] Nick Fedoseev, Denis Nechitailov, *MixW - Multimode Operating Software For Ham's*, <http://www.mixw.net/>
- [83] Fernando Mederos, *WiSP DDE Client Ver. 4.1*, <http://www.amsat.org/amsat/ftp/software/win32/radio-control/>
- [84] ICOM, *ICOM homepage*, <http://www.icomamerica.com>

7.6. Predykcja położenia satelity.

- [85] *Orbital Mechanics with MATLAB*, documents describes an interactive MATLAB script named npoe.m, website <http://www.cdeagle.com/ommatlab/npoe.pdf>
- [86] John A. Magliacane, *PREDICT: A satellite tracking/orbita prediction program*, website <http://www.qsl.net/kd2bd/predict.html>
- [87] Sebastian Stoff, *Orbitron - Satellite Tracking System*, <http://www.stoff.pl/>
- [88] Miguel Menendez Vazquez, *The Keplerian Elements Short Tutorial*, http://www.amsat.org/amsat-new/tools/keps_tutorial.php
- [89] Marcel J. Sidi, *Spacecraft Dynamics and Control, A practical Engineering Approach*, Cambrydge University Press 1997

7.7. APRS.

- [90] APRS Polish Group, *Charakterystyka systemu APRS*, <http://www.aprs.pl/>
- [91] Bob Bruninga, *Automatic Packet Reporting System*, <http://www.aprs.org>
- [92] The APRS Working Group, *APRS protocol reference. Protocol Version 1.0.*, TAPR Publication Number: 99-4
- [93] Amateur Packet-Radio Group, *AX.25 Amateur Packet-Radio Link-Layer Protocol*, <http://sq2foa.republika.pl/AX25.txt>
- [94] Mike Chepponis, Phil Karn, *The KISS TNC: A simple Host-to-TNC communications protocol*, <http://sq2foa.republika.pl/kiss.txt>
- [95] SQ5FOA, *Podstawy teoretyczne protokołu AX25 w systemie APRS*, <http://sq2foa.republika.pl>

7.8. Odwołania do innych projektów i dziedzin.

- [96] Henryk Ordakowski, Kazimierz Stefanicki, *Pomiary Radiosondażowe w IMGW*, Ośrodek Aerologii
- [97] Joe Taylor, tłumaczył Zdzisław Bieńkowski, *Przewodnik Użytkownika WSJT 4.7*, http://physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/WSJT_User_470_Polish.pdf
- [98] Christian Buil, *IRIS Tutorial*, <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>

7.9. Noty aplikacyjne

- [99] CHIPCON, *CC1000, Single Chip Very Low Power RF Transceiver*, <http://www.chipcon.com/>
- [100] CML Semiconductor, *Bell 202 Compatible Modem FX614*, www.alldatasheet.com

7.10. Języki programowania.

- [101] BORLAND, *C++ Builder 6 Personal*, <http://www.borland.pl>

[102] Scilab Consortium, *Scilab 5.1.1*, <http://www.scilab.org/>

8. Załączniki

8.1. Fragment kodu aplikacji DGSSC.

```
int __fastcall aprs_in_range_calc(LPVOID Parameter) {
AddLog("Start APRS in range calc");
tab_clear(aprs_ir_tab);

tab_clear(aprs_ir_tab);
tab_ld_clear(fsl_ld_tab);
tab_ld_clear(ebnor_ld_tab);
tab_ld_clear(tebnor_ld_tab);
tab_ld_clear(ber_ld_tab);
tab_ld_clear(ber256_ld_tab);
tab_ld_clear(minber_ld_tab);

aprs_tab_calc();
int xx, yy;
int typcalc=Form1->ComboBox2->ItemIndex;
//typcalc=1;
double daynum=CurrentDaynum();
PreCalc(daynum);
Calc();
AddLogD("hs", r-R0);
if (typcalc==2||typcalc==1) create_aprst_list();
//int l=-1;

double dis;
long double fsl;

double tx_power=power_dBw(Form1->CSpinEdit5->Value); //TRX[dBw]
double rx_bandwidth=power_dBw(Form1->CSpinEdit6->Value); //B[dB]
double rx_baudrate=power_dBw(Form1->CSpinEdit7->Value); //BR[dB]
double a_gain=Form1->CSpinEdit3->Value; //TXAG[dB]+RXAG[dB]
double frequency=433000000; //f[Hz]

double rx_sensitivity=rx_sensitivity_dBw(((double)Form1->CSpinEdit4->Value)/1000.0); //RXS[dB]=10*log10((RXU[V]^2)/Z[ohm])
double rx_sinad=12; //SINAD[dB]
double rx_noise=rx_sensitivity-rx_sinad; //NRX[dBw]=RXS[dBw]-SINAD[dB] moc szumow odbiornika
double rx_tr=rx_noise+228.6-rx_bandwidth; //Tr[dB]=NRX[dBw]-K[dB]-B[dB] szumowa temperatura odbiornika
double rx_lfrx=2.7; //Lfrx[dB]=(Lf100[dB]*Df[m])/100 tłumienie przewodu
double rx_ta0=100; //Ta0=100[K] szumowa temperatura przestrzeni kosmicznej
double rx_tf=290; //Tf=100[K] szumowa temperatura przewodu
double rx_tas=rx_ta0/power_w(rx_lfrx)+(1-1/power_w(rx_lfrx))*rx_tf; //Tas[K]=Ta0[K]/Lfrx[W/W] + (1 - 1/Lfrx[W/W])*TF[K]
szumowa temperatura systemu antenowego
double rx_tu=power_w(rx_tr)+rx_tas; //Tu[K]=Tr[K]+Tas[K] zastepcza temperatura szumowa systemu
double rx_la=0.1; // La[dB] tłumienie atmosferyczne
double rx_lp=3; // Lp[dB] tłumienie polaczen
double rx_lm=6; // Lm[dB] margines

AddLogD("tx_power", tx_power);
AddLogD("rx_bandwidth", rx_bandwidth);
AddLogD("rx_baudrate", rx_baudrate);
AddLogD("a_gain", a_gain);
AddLogD("frequency", frequency);

AddLogD("rx_sensitivity", rx_sensitivity);
AddLogD("rx_sinad", rx_sinad);
AddLogD("rx_noise", rx_noise);
AddLogD("rx_tr", rx_tr);
AddLogD("rx_lfrx", rx_lfrx);
AddLogD("rx_ta0", rx_ta0);
AddLogD("rx_tas", rx_tas);
AddLogD("rx_tu", rx_tu);
AddLogD("rx_la", rx_la);
AddLogD("rx_lp", rx_lp);
AddLogD("rx_lm", rx_lm);

double cx=tx_power+a_gain-rx_lfrx-rx_la-rx_lp-rx_lm; //CX[dBw]=TXP[dBw]+TXAG[dB]+RXAG[dB]-Lfrx[dB]-La[dB]-Lp[dB]-Lm[dB] moc
sygnalu w systemie odbiorczym bez FSL[dB]
double n=rx_bandwidth+power_dBw(rx_tu)-228.6; //N[dBw]=B[dB]-Tu[dB]+K[dB] moc szumu w systemie odbiorczym
double cnrx=cx-n; //CNRx[dB]=Cx[dBw]-N[dBw] stosunek szygnal szum bez FSL[dB]

AddLogD("cx", cx);
AddLogD("n", n);
AddLogD("cnrx", cnrx);

//sn=fsl+a_gain+tx_power-rx_sensitivity;

long double cnr;
long double ebnor;
long double cber;

for (int x=0;x<720; x++){
Form1->Edit1->Text=IntToStr(x*100/719);
for (int y=0; y<360; y++){

range_tab_calc(r-R0, ((double)x/2.0), (90.0-(double)y/2.0));
//t_tab_paint(rangef_tab);

//0-aprs_tab - liczone z tabeli
if (typcalc==0) {
for (int xx=0;xx<720; xx++){
```

```

        for (int yy=0; yy<360; yy++) {
            if (rangef_tab[xx][yy] != 0) {
                aprs_ir_tab[x][y]=aprs_ir_tab[x][y]+aprs_tab[xx][yy];
                //Form1->Image2->Canvas->Pixels[xx][yy] = clWhite;
            }
        }
    }
}
//1-aprs_list - liczone z listy
//2-aprst_list - liczone z listy z uwzględnieniem ilości pojawienia się tej samej stacji
else if (typcalc==2||typcalc==1) {
    for (list<aprs_qth>::iterator i=aprst_list.begin(); i!=aprst_list.end(); i++) {
        xx=(*i).stnlong;
        yy=(*i).stnlat;
        //xx=(int)(2*(i).stnlong);
        //yy=(int)(2*(90-(i).stnlat));
        if ( xx>=0 && xx<720 && yy>=0 && yy<360 ){
            if (rangef_tab[xx][yy] != 0) {
                if (typcalc==2) aprs_ir_tab[x][y]=aprs_ir_tab[x][y]+(*i).stntimes;
                else aprs_ir_tab[x][y]=aprs_ir_tab[x][y]+1;
                //Form1->Image2->Canvas->Pixels[xx][yy] = clWhite;

                dis=distance(r-R0, x/2.0, y/2.0, xx/2.0, yy/2.0);
                //fsl dla danej stacji
                fsl=free_space_loss(frequency, dis);

                //sumowanie energii w fsl
                if (fsl_ld_tab[x][y]==0.0) fsl_ld_tab[x][y]=fsl;
                else fsl_ld_tab[x][y]=(-1)*10.0*log10(power_wl((-1)*fsl_ld_tab[x][y])+power_wl((-
1)*(long double)fsl));

                //liczenie CNR i BER
                cnr=cnrx-fsl;

                //liczenie EbNoR
                ebnor=cnr*rx_bandwidth-rx_baudrate;
                if (ebnor_ld_tab[x][y]<ebnor) ebnor_ld_tab[x][y]=ebnor;

                //liczenie BER
                cber=ber(ebnor);
                if (cber>1) cber=1;
                if (cber<0) cber=0;

                //przeniesienie BER w skale logarytmiczna
                if (cber>0.0) cber=log10(cber);
                else cber=0;

                //sumowanie i zapisywanie BER w skali logarytmicznej (dlatego jest dodawanie a nie
mnożenie)
                ber_ld_tab[x][y]=ber_ld_tab[x][y]+cber;
                //if (ber_ld_tab[x][y]==0.0) ber_ld_tab[x][y]=cber;
                //else ber_ld_tab[x][y]=ber_ld_tab[x][y]+cber;

                //zapisywanie MINBER w skali logarytmicznej
                if (cber<minber_ld_tab[x][y]) minber_ld_tab[x][y]=cber;

                //wyswietlenie informacji o aktualnych obliczeniach
                if (Form1->CheckBox6->Checked==true) {
                    Form1->Edit4->Text=FloatToStr(dis);
                    Form1->Edit5->Text=FloatToStr(fsl);
                    Form1->Edit6->Text=FloatToStr(ebnor);
                    Form1->Edit7->Text=FloatToStr((float)cber);
                }
            }
        }
    }
}

//liczenie teoretycznego EbNoR
rx_baudrate;
if (aprs_ir_tab[x][y]!= 0) tebnor_ld_tab[x][y]=cnrx-fsl_ld_tab[x][y]+rx_bandwidth-

//liczenie BER256 w skali logarytmicznej
if (aprs_ir_tab[x][y]!= 0) {
    ber256_ld_tab[x][y]=ber_ld_tab[x][y]+256;
    if (ber256_ld_tab[x][y]>0) ber256_ld_tab[x][y]=0; //0 bo skala logarytmiczna
}
//ograniczenia ???
//if ((ber_ld_tab[x][y]<0.0)&&((1.0-pow1(1.0-pow1(10, ber_ld_tab[x][y]), 256))!=0))
ber256_ld_tab[x][y]=log10( 1.0-pow1(1.0-pow1(10, ber_ld_tab[x][y]), 256) );
//if ((ber256_ld_tab[x][y]<-1E50)|| (ber256_ld_tab[x][y]>1)) ber256_ld_tab[x][y]=0;

//if (ber_ld_tab[x][y]>=1E-4) ber_ld_tab[x][y]=0;
//if (ber256_ld_tab[x][y]>=1E-4) ber256_ld_tab[x][y]=0;

}
}
t_tab_paint(aprs_ir_tab);
AddLog("End APRS in range calc");
return 0;
}

```

8.2. Fragment kodu Symulatora RSN.

```
#define MAX_CC1000_DEVICES 9 // 0 - 8
#define MAX_DGSS_V 4 // 9 - 12
#define MAX_DGSS_C 4 // 13 - 16
#define MAX_DGSS_O 4 // 17 - 20
#define MAX_DGSS_M 4 // 21 - 24
#define MAX_DGSS_B 4 // 25 - 28
#define MAX_DGSS_P 4 // 29 - 32
#define MAX_DGSS_LP 4 // 33 - 36
#define MAX_DGSS_SRC 2 // 37 - 38
#define MAX_DGSS_N 4 // 39 - 42

#define MAX_DGSS_SIZE
MAX_CC1000_DEVICES+MAX_DGSS_V+MAX_DGSS_C+MAX_DGSS_O+MAX_DGSS_M+MAX_DGSS_B+MAX_DGSS_P+MAX_DGSS_LP+MAX_DGSS_SRC+MAX_DGSS_N

#define MAX_DGSS_CLK 16

#define SYNC_MASK 0xFFFFFFFF //standard 1b 0B
#define SYNC_MASK_M 0xFFFFFFFF //minimal 1b 0B
#define SYNC_MASK_P 0xFFFFFFFF0 //packet 256b 32B
#define SYNC_MASK_LP 0xFFFFFFFF800 //long packet 2048b 256B
#define SYNC_MASK_N 0xFFFFFFFF0 //near optimal 16b 0B

//wlacza sprawdzanie poprawnosci ciagu bez synchronizacji z nadajnika
//#define AUTO_CHECK_MODE

//wlacza sprawdzanie poprawnosci ciagu bez synchronizacji z nadajnika
//dla sygnalu synchronizujacego
#define AUTO_CHECK_MODE_SRC

//wlacza synchronizacja odbioru z zegarem nadajnika (a nie z zegarem odbiornika)
#define TRX_SYNCHRO

uint8_t i=0,j=0;
uint8_t received_clock [MAX_CC1000_DEVICES+MAX_DGSS_SRC];
uint8_t previous_received_clock [MAX_CC1000_DEVICES+MAX_DGSS_SRC];

uint8_t src_bit [4][2];

uint8_t received_bit [MAX_DGSS_SIZE];
uint8_t previous_received_bit [MAX_DGSS_SIZE];

uint32_t received_bits;

//do testowania korelowanego z nadajnikiem
uint32_t received_correct_bits [MAX_DGSS_SIZE];
uint32_t previous_recived_correct_bits [MAX_DGSS_SIZE];
uint32_t received_correct_bits_sum [MAX_DGSS_SIZE];
uint8_t change_flag_previous_recived_correct_bits [MAX_DGSS_SIZE];

//do auto testowania
uint32_t received_correct_bits_a [MAX_CC1000_DEVICES];
uint32_t previous_recived_correct_bits_a [MAX_CC1000_DEVICES];
uint32_t received_correct_bits_sum_a [MAX_CC1000_DEVICES];
uint8_t change_flag_previous_recived_correct_bits_a [MAX_CC1000_DEVICES];

uint8_t best_received_correct_bits [MAX_DGSS_B][2];

uint8_t dgss_system_clock [MAX_DGSS_CLK];

void int_receivers_dgss(void) {

    uint8_t i;

    // received_bit[37]=0;

    if (dgss_system_clock[9]) {

        dgss_system_clock[9]=0;

    }

    if (dgss_system_clock[10]) {

        dgss_system_clock[3]=1; //bs
        dgss_system_clock[5]=1; //ns

        dgss_system_clock[9]=1;

        dgss_system_clock[10]=0;

    }

    if (dgss_system_clock[11]) {

        dgss_system_clock[0]=1; //vs
        dgss_system_clock[1]=1; //cs
        dgss_system_clock[2]=1; //os ms
        dgss_system_clock[4]=1; //cdfr

        dgss_system_clock[10]=1;

        dgss_system_clock[11]=0;

    }

    //Getting data from CC1000
    for (i=0;i< MAX_CC1000_DEVICES; i++){
```

```

//odbior zegara

#ifndef TRX_SYNCHRO
previous_received_clock[i]=received_clock[i];
switch (i) {
case 0: received_clock[0]=1&&(DCLK_Q1_PIN & (1<<DCLK_Q1)); break;
case 1: received_clock[1]=1&&(DCLK_Q2_PIN & (1<<DCLK_Q2)); break;
case 2: received_clock[2]=1&&(DCLK_Q3_PIN & (1<<DCLK_Q3)); break;
case 3: received_clock[3]=1&&(DCLK_Q4_PIN & (1<<DCLK_Q4)); break;
case 4: received_clock[4]=1&&(DCLK_Q5_PIN & (1<<DCLK_Q5)); break;
case 5: received_clock[5]=1&&(DCLK_Q6_PIN & (1<<DCLK_Q6)); break;
case 6: received_clock[6]=1&&(DCLK_Q7_PIN & (1<<DCLK_Q7)); break;
case 7: received_clock[7]=1&&(DCLK_Q8_PIN & (1<<DCLK_Q8)); break;
case 8: received_clock[8]=1&&(DCLK_Q9_PIN & (1<<DCLK_Q9)); break;
}
#endif

#ifdef TRX_SYNCHRO
if (src_bit[0][0]!=src_bit[1][0]) {
previous_received_clock[i]=0;
received_clock[i]=1;
} else {
previous_received_clock[i]=1;
received_clock[i]=0;
}
#endif

//wykrywanie zbocza opadajacego
if ((previous_received_clock[i]!=0) && (received_clock[i]==0) ) {

dgss_system_clock[14]++;

if (dgss_system_clock[14]==5) {
// dgss_system_clock[11]=1; //system clock
// dgss_system_clock[8]=1; //rfsync
}

if (dgss_system_clock[14]>4) {
dgss_system_clock[15]=0;
}

}

//wykrywanie zbocza narastajacego
if ((previous_received_clock[i]==0) && (received_clock[i]!=0) ) {

dgss_system_clock[15]++;

if (dgss_system_clock[15]==5) {
dgss_system_clock[11]=1; //system clock
dgss_system_clock[8]=1; //rfsync
}

if (dgss_system_clock[15]>4) {
dgss_system_clock[14]=0;
}

//odbior bitu
previous_received_bit[i]=received_bit[i];
switch (i) {

case 0: received_bit[0] = 1&&(DIO_Q1_PIN & (1<<DIO_Q1)); break;
case 1: received_bit[1] = 1&&(DIO_Q2_PIN & (1<<DIO_Q2)); break;
case 2: received_bit[2] = 1&&(DIO_Q3_PIN & (1<<DIO_Q3)); break;
case 3: received_bit[3] = 1&&(DIO_Q4_PIN & (1<<DIO_Q4)); break;
case 4: received_bit[4] = 1&&(DIO_Q5_PIN & (1<<DIO_Q5)); break;
case 5: received_bit[5] = 1&&(DIO_Q6_PIN & (1<<DIO_Q6)); break;
case 6: received_bit[6] = 1&&(DIO_Q7_PIN & (1<<DIO_Q7)); break;
case 7: received_bit[7] = 1&&(DIO_Q8_PIN & (1<<DIO_Q8)); break;
case 8: received_bit[8] = 1&&(DIO_Q9_PIN & (1<<DIO_Q9)); break;

}

}

}

//optymalna sekwencja odczytywana z nadajnika
previous_received_clock[9]=received_clock[9];
received_clock[9]=1&&(RFDATA_Q1_PIN & (1<<RFDATA_Q1));

src_bit[3][0]=src_bit[2][0];
src_bit[2][0]=src_bit[1][0];
src_bit[1][0]=src_bit[0][0];

src_bit[3][1]=src_bit[2][1];
src_bit[2][1]=src_bit[1][1];
src_bit[1][1]=src_bit[0][1];

//uart_putchar (received_bit[37]+'0');
//uart_putchar (received_bit[38]+'0');

//wykrywanie zbocza opadajacego
if ((previous_received_clock[9]!=0) && (received_clock[9]==0) ) {

previous_received_bit[37]=received_bit[37];
received_bit[37]=1;
}

```

```

        src_bit[0][1]=0;
        src_bit[0][0]=1;

//sprawdzenie optymalnej sekwencji odczytywanej z nadajnika
        if (received_correct_bits[37]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits[37]++;
        if (received_correct_bits_sum[37]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[37]++;
    }

//wykrywanie zbocza narastającego
    if ((previous_received_clock[9]==0) && (received_clock[9]!=0) ) {

        previous_received_bit[37]=received_bit[37];
        received_bit[37]=0;

        src_bit[0][1]=1;
        src_bit[0][0]=0;

//sprawdzenie optymalnej sekwencji odczytywanej z nadajnika
        if (received_correct_bits[37]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits[37]++;
        if (received_correct_bits_sum[37]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[37]++;
    }

//optymalna sekwencja odczytywana z nadajnika
//synchronizowana zegarami odbiorników (zbocze narastające)

        received_bit[38]=1&&!src_bit[2][0];
        previous_received_bit[38]=1&&!src_bit[2][1];

    if (dgss_system_clock[8]) {

        dgss_system_clock[8]=0;
    }

//cdfr - checking data from receivers
    if ((dgss_system_clock[4])) {

        //zliczanie wszystkich odebranych bitów

//z zegara odbiorników
        if (received_bits!=0xFFFFFFFF) received_bits++;
//z zegara nadajnika
        received_bits=received_correct_bits_sum[37];

//Checking data from CC1000
//sprawdzenie odebranych danych przez moduły CC1000
        for (i=0;i<
            MAX_CC1000_DEVICES; i++){

//odebrano zsynchronizowany bit

#ifdef AUTO_CHECK_MODE
            if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
#endif
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
            if (received_bit[38]==received_bit[i]) {
#endif

                if (received_correct_bits[i]!=0xFFFFFFFF) {
                    received_correct_bits[i]++;
                }
                if (received_correct_bits_sum[i]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[i]++;
            } else {
//zerwano synchronizacje

//sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
                if (received_correct_bits[i]&SYNC_MASK) {
//zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
                    previous_recived_correct_bits[i]=received_correct_bits[i];
                    change_flag_previous_recived_correct_bits[i]=1;
                } else received_correct_bits_sum[i]-=received_correct_bits[i];
//kasowanie przy braku synchronizacji
                received_correct_bits[i]=0;
            }
        }
    }

//Checking data from CC1000
//sprawdzenie odebranych danych przez moduły CC1000
//bez korelacji z nadajnikiem
        for (i=0;i<
            MAX_CC1000_DEVICES; i++){

//odebrano zsynchronizowany bit
            if (previous_received_bit_a[i]!=received_bit_a[i]) {
                if (received_correct_bits_a[i]!=0xFFFFFFFF) {
                    received_correct_bits_a[i]++;
                }
                if (received_correct_bits_sum_a[i]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum_a[i]++;
            } else {
//zerwano synchronizacje

//sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
                if (received_correct_bits_a[i]&SYNC_MASK) {
//zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
                    previous_recived_correct_bits_a[i]=received_correct_bits_a[i];
                    change_flag_previous_recived_correct_bits_a[i]=1;
                } else received_correct_bits_sum_a[i]-=received_correct_bits_a[i];
//kasowanie przy braku synchronizacji
                received_correct_bits_a[i]=0;
            }
        }
    }

```

```
    }
}

//sprawdzenie optymalnej sekwencji odczytywanej z nadajnika
//odebrano zsynchronizowany bit
/*
#ifdef AUTO_CHECK_MODE_SRC
    if (previous_received_bit[37]!=received_bit[37]) {
#endif
#ifdef AUTO_CHECK_MODE_SRC
    if (received_bit[37]==received_bit[37]) {
#endif
        if (received_correct_bits[37]!=0xFFFFFFFF) {
            received_correct_bits[37]++;
        }
        if (received_correct_bits_sum[37]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[37]++;
    } else {
        //zerwano synchronizacje

        //sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
        if (received_correct_bits[37]&SYNC_MASK) {
            //zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
            previous_recived_correct_bits[37]=received_correct_bits[37];
            change_flag_previous_recived_correct_bits[37]=1;
        } else received_correct_bits_sum[37]-=received_correct_bits[37];
        //kasowanie przy braku synchronizacji
        received_correct_bits[37]=0;
    }
}
*/
//sprawdzenie optymalnej sekwencji odczytywanej z nadajnika
//synchronizowanej zegarem odbiornika
//odebrano zsynchronizowany bit
#ifdef AUTO_CHECK_MODE_SRC
    if (previous_received_bit[38]!=received_bit[38]) {
#endif
#ifdef AUTO_CHECK_MODE_SRC
    if (received_bit[38]==received_bit[38]) {
#endif
        if (received_correct_bits[38]!=0xFFFFFFFF) {
            received_correct_bits[38]++;
        }
        if (received_correct_bits_sum[38]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[38]++;
    } else {
        //zerwano synchronizacje

        //sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
        if (received_correct_bits[38]&SYNC_MASK) {
            //zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
            previous_recived_correct_bits[38]=received_correct_bits[38];
            change_flag_previous_recived_correct_bits[38]=1;
        } else received_correct_bits_sum[38]-=received_correct_bits[38];
        //kasowanie przy braku synchronizacji
        received_correct_bits[38]=0;
    }
}

dgss_system_clock[4]=0;
}

//voting system
if ((dgss_system_clock[0])) {

    //voting system 9 0 3
    received_bit[9]=received_bit[0]+received_bit[1]+received_bit[2];
    if (received_bit[9]>1) received_bit[9]=1;
    else received_bit[9]=0;
    //voting system 10 1 5
    received_bit[10]=received_bit[0]+received_bit[1]+received_bit[2]
        +received_bit[3]+received_bit[4];
    if (received_bit[10]>2) received_bit[10]=1;
    else received_bit[10]=0;
    //voting system 11 2 7
    received_bit[11]=received_bit[0]+received_bit[1]+received_bit[2]
        +received_bit[3]+received_bit[4]
        +received_bit[5]+received_bit[6];
    if (received_bit[11]>3) received_bit[11]=1;
    else received_bit[11]=0;

    //voting system 12 3 9
    received_bit[12]=received_bit[0]+received_bit[1]+received_bit[2]
        +received_bit[3]+received_bit[4]
        +received_bit[5]+received_bit[6]
        +received_bit[7]+received_bit[8];
    if (received_bit[12]>4) received_bit[12]=1;
    else received_bit[12]=0;

    //sprawdzenie voting system
    for (i=9;i<13;i++) {
        //odebrano zsynchronizowany bit
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
        if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
```

```
#endif
#ifndef AUTO_CHECK_MODE
#endif
//
if (received_bit[38]==received_bit[i]) {
//
if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
if (received_correct_bits[i]!=0xFFFFFFFF) {
//standard
received_correct_bits[i]++;
}
if (received_correct_bits_sum[i]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[i]++;
} else {
//zerwanie synchronizacji
//sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
//standard
if (received_correct_bits[i]&SYNC_MASK) {
//zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
previous_received_correct_bits[i]=received_correct_bits[i];
change_flag_previous_received_correct_bits[i]=1;
} else received_correct_bits_sum[i]-=received_correct_bits[i];
//kasowanie przy braku synchronizacji
//standard
received_correct_bits[i]=0;
//packet
}
previous_received_bit[i]=received_bit[i];
}
dgss_system_clock[0]=0;
}
//optimal system calculation
if (dgss_system_clock[1]) {
//optimal system 13 4 3
if ((received_correct_bits[0]|received_correct_bits[1]|received_correct_bits[2]
|received_correct_bits[3]|received_correct_bits[4]) {
if (received_correct_bits[13]!=0xFFFFFFFF) {
received_correct_bits[13]++;
}
if (received_correct_bits_sum[13]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[13]++;
} else {
//zerwanie synchronizacji
//sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
if (received_correct_bits[13]&SYNC_MASK_M) {
//zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
previous_received_correct_bits[13]=received_correct_bits[13];
change_flag_previous_received_correct_bits[13]=1;
} else received_correct_bits_sum[13]-=received_correct_bits[13];
//kasowanie przy braku synchronizacji
received_correct_bits[13]=0;
}
//optimal system 14 5 5
if ((received_correct_bits[0]|received_correct_bits[1]|received_correct_bits[2]
|received_correct_bits[3]|received_correct_bits[4]
|received_correct_bits[5]|received_correct_bits[6]) {
if (received_correct_bits[14]!=0xFFFFFFFF) {
received_correct_bits[14]++;
}
if (received_correct_bits_sum[14]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[14]++;
} else {
//zerwanie synchronizacji
//sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
if (received_correct_bits[14]&SYNC_MASK_M) {
//zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
previous_received_correct_bits[14]=received_correct_bits[14];
change_flag_previous_received_correct_bits[14]=1;
} else received_correct_bits_sum[14]-=received_correct_bits[14];
//kasowanie przy braku synchronizacji
received_correct_bits[14]=0;
}
//optimal system 15 6 7
if ((received_correct_bits[0]|received_correct_bits[1]|received_correct_bits[2]
|received_correct_bits[3]|received_correct_bits[4]
|received_correct_bits[5]|received_correct_bits[6]
|received_correct_bits[7]|received_correct_bits[8]) {
if (received_correct_bits[15]!=0xFFFFFFFF) {
received_correct_bits[15]++;
}
if (received_correct_bits_sum[15]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[15]++;
} else {
//zerwanie synchronizacji
//sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
if (received_correct_bits[15]&SYNC_MASK_M) {
//zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
previous_received_correct_bits[15]=received_correct_bits[15];
change_flag_previous_received_correct_bits[15]=1;
} else received_correct_bits_sum[15]-=received_correct_bits[15];
}
}
}
}
```

```

        //kasowanie przy braku synchronizacji
        received_correct_bits[15]=0;
    }

    //optimal system 16 7 9
    if ((received_correct_bits[0]|received_correct_bits[1]|received_correct_bits[2]
        |received_correct_bits[3]|received_correct_bits[4]
        |received_correct_bits[5]|received_correct_bits[6]
        |received_correct_bits[7]|received_correct_bits[8]
        )) {
        //
        )&SYNC_MASK_M) {
            if (received_correct_bits[16]!=0xFFFFFFFF) {
                received_correct_bits[16]++;
            }
            if (received_correct_bits_sum[16]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[16]++;
        } else {
            //zerwano synchronizacje
            //sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
            if (received_correct_bits[16]&SYNC_MASK_M) {
                //zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
                previous_recived_correct_bits[16]=received_correct_bits[16];
                change_flag_previous_recived_correct_bits[16]=1;
            } else received_correct_bits_sum[16]-=received_correct_bits[16];

            //kasowanie przy braku synchronizacji
            received_correct_bits[16]=0;
        }

        dgss_system_clock[1]=0;
    }

    //optimal system
    if ((dgss_system_clock[2])) {

//optimal system
        for (i=0; i<MAX_CC1000_DEVICES; i++) {
            if (received_bit[i]==received_bit[38]) {

                //received_correct_bits[38]++;
                //optimal system 17 0 3
                if (i<3) {
                    received_bit[17]=received_bit[i];
                }
                //optimal system 18 1 5
                if (i<5) {
                    received_bit[18]=received_bit[i];
                }
                //optimal system 19 2 7
                if (i<7) {
                    received_bit[19]=received_bit[i];
                }
                //optimal system 20 3 9
                {
                    received_bit[20]=received_bit[i];
                }
            }

            //sprawdzenie optimal, packet, long packet
            //generowanie mixed system
            for (i=17;i<21;i++) {

                //odebrano zsynchronizowany bit
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
                if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
#endif
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
                if (received_bit[38]==received_bit[i]) {
#endif
                    //optimal, packet, long packet
                    if (received_correct_bits[i]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits[i]++;
                    if (received_correct_bits[i+12]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits[i+12]++;
                    if (received_correct_bits[i+16]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits[i+16]++;

                    if (received_correct_bits_sum[i]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[i]++;
                    if (received_correct_bits_sum[i+12]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[i+12]++;
                    if (received_correct_bits_sum[i+16]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[i+16]++;

                } else {
                    //zerwano synchronizacje

                    //sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
                    //optimal
                    if (received_correct_bits[i]&SYNC_MASK) {
                        //zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
                        previous_recived_correct_bits[i]=received_correct_bits[i];
                        change_flag_previous_recived_correct_bits[i]=1;
                    } else {
                        received_correct_bits_sum[i]-=received_correct_bits[i];
                    }

                    //packet
                    if (received_correct_bits[i+12]&SYNC_MASK_P) {

```



```

        //zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
        previous_recived_correct_bits[i+12]=received_correct_bits[i];
        change_flag_previous_recived_correct_bits[i+12]=1;
    } else received_correct_bits_sum[i+12]-=received_correct_bits[i];

    //long packet
    if (received_correct_bits[i+16]&SYNC_MASK_LP) {
        //zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
        previous_recived_correct_bits[i+16]=received_correct_bits[i];
        change_flag_previous_recived_correct_bits[i+16]=1;
    } else received_correct_bits_sum[i+16]-=received_correct_bits[i];

    //kasowanie przy braku synchronizacji
    received_correct_bits[i]=0;
    received_correct_bits[i+12]=0;
    received_correct_bits[i+16]=0;

    }
    //optimal
    previous_received_bit[i]=received_bit[i];
}
dgss_system_clock[2]=0;
}

//best system
    if ((dgss_system_clock[3])) {
        for (i=0; i<MAX_CC1000_DEVICES; i++) {
//bez porownania z src (model prawdziwy)
//z porownaniem z src (model teoretyczny, pokazuje gorna granice)
            if (received_correct_bits_a[i]&SYNC_MASK) {
                if (i<3) {
                    if (received_correct_bits[i]>received_correct_bits[25]) {
                        received_correct_bits[25]=received_correct_bits[i];
                        best_received_correct_bits[0][0]=i;
                    }
                }
                if (i<5) {
                    if (received_correct_bits[i]>received_correct_bits[26]) {
                        received_correct_bits[26]=received_correct_bits[i];
                        best_received_correct_bits[1][0]=i;
                    }
                }
                if (i<7) {
                    if (received_correct_bits[i]>received_correct_bits[27]) {
                        received_correct_bits[27]=received_correct_bits[i];
                        best_received_correct_bits[2][0]=i;
                    }
                }
                {
                    if (received_correct_bits[i]>received_correct_bits[28]) {
                        received_correct_bits[28]=received_correct_bits[i];
                        best_received_correct_bits[3][0]=i;
                    }
                }
            }
        }

        received_bit[25]=received_bit[best_received_correct_bits[0][1]];
        received_bit[26]=received_bit[best_received_correct_bits[1][1]];
        received_bit[27]=received_bit[best_received_correct_bits[2][1]];
        received_bit[28]=received_bit[best_received_correct_bits[3][1]];

        best_received_correct_bits[0][1]=best_received_correct_bits[0][0];
        best_received_correct_bits[1][1]=best_received_correct_bits[1][0];
        best_received_correct_bits[2][1]=best_received_correct_bits[2][0];
        best_received_correct_bits[3][1]=best_received_correct_bits[3][0];

//sprawdzenie best system
        for (i=25;i<29;i++) {
            //odebrano zsynchronizowany bit
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
            if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
#endif
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
            if (received_bit[38]==received_bit[i]) {
#endif
            //
            if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
                if (received_correct_bits[i]!=0xFFFFFFFF) {
                    received_correct_bits[i]++;
                }
            }
            if (received_correct_bits_sum[i]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[i]++;
        } else {
            //zerwano synchronizacje
            //sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
            if (received_correct_bits[i]&SYNC_MASK) {
                //zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
                previous_recived_correct_bits[i]=received_correct_bits[i];
                change_flag_previous_recived_correct_bits[i]=1;
            }
            //kasowanie przy braku synchronizacji

```

```

        received_correct_bits[i]=0;
    }
    previous_received_bit[i]=received_bit[i];
}
dgss_system_clock[3]=0;
}

//near optimal, mixed system
if ((dgss_system_clock[5])) {
    //if (received_clock[0]&received_clock[1]&received_clock[2]&(dgss_system_clock[0])) {
//near optimal system
    for (i=0; i<MAX_CC1000_DEVICES; i++) {
        if (received_correct_bits_a[i]&SYNC_MASK_N) {
            //received_correct_bits[38]++;
            //near optimal system 39 0 3
            if (i<3) {
                received_bit[39]=received_bit[i];
            }
            //near optimal system 40 1 5
            if (i<5) {
                received_bit[40]=received_bit[i];
            }
            //near optimal system 41 2 7
            if (i<7) {
                received_bit[41]=received_bit[i];
            }
            //near optimal system 42 3 9
            {
                received_bit[42]=received_bit[i];
            }
        }
    }

    //sprawdzenie near optimal
    //generowanie mixed system
    for (i=39;i<43;i++) {

        //odebrano zsynchronizowany bit
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
        if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
#endif
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
        if (received_bit[38]==received_bit[i]) {
#endif
//
        if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
            //optimal, packet, long packet
            if (received_correct_bits[i]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits[i]++;

            if (received_correct_bits_sum[i]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[i]++;

            //mixed near optimal (wybierany jest near optimal)
            received_bit[i-18]=received_bit[i];

        } else {
            //zerwano synchronizacje

            //sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji
            //optimal
            if (received_correct_bits[i]&SYNC_MASK) {
                //zapisanie zliczonego wyniku jesli była synchronizacja
                previous_recived_correct_bits[i]=received_correct_bits[i];
                change_flag_previous_recived_correct_bits[i]=1;
            } else {
                received_correct_bits_sum[i]-=received_correct_bits[i];
            }

            //mixed voiting (wybierany jest voting)
            received_bit[i-18]=received_bit[i-30];
            //kasowanie przy braku synchronizacji
            received_correct_bits[i]=0;

        }
        //near optimal
        previous_received_bit[i]=received_bit[i];
    }

    //sprawdzenie mixed
    for (i=21;i<25;i++) {

        //odebrano zsynchronizowany bit
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
        if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
#endif
#ifdef AUTO_CHECK_MODE
        if (received_bit[38]==received_bit[i]) {
#endif
//
        if (previous_received_bit[i]!=received_bit[i]) {
            if (received_correct_bits[i]!=0xFFFFFFFF) {
                received_correct_bits[i]++;
            }
        }
    }
}

```

```
    }  
    if (received_correct_bits_sum[i]!=0xFFFFFFFF) received_correct_bits_sum[i]++;  
    } else {  
        //zerwano synchronizacje  
        //sprawdzenie czy zerwano synchronizacje czy brak synchronizacji  
        if (received_correct_bits[i]&SYNC_MASK) {  
            //zapisanie zliczonego wyniku jesli byla synchronizacja  
            previous_recived_correct_bits[i]=received_correct_bits[i];  
            change_flag_previous_recived_correct_bits[i]=1;  
        }  
        //kasowanie przy braku synchronizacji  
        received_correct_bits[i]=0;  
    }  
    previous_received_bit[i]=received_bit[i];  
}  
dgss_system_clock[5]=0;  
}  
}
```

8.3. Kod Scilab porównujący algorytmy poprawy jakości łącza.

```
//Rysowanie porównania BERO i BERV BERn w zależności od BERss i n

//Wartosc minimalna
minv=1E-300;
//Inkrementacja n
incv=2;

//Polowa + 1
function [y]=kn(n)
    if (modulo(n,2))
        y=(n+1)/2;
    else
        y=(n/2)+1;
    end
endfunction

//Dwumian niutona
function [y]=combination(n, k)
    y=factorial(n)/(factorial(k)*factorial(n-k));
endfunction

//Liczenie BERO
function [y]=BERon(BERss,n)
    y=BERss^n;
    if (y==0)
        y=minv;
    end
endfunction

//Liczenie BERV
function [y]=BERvn(BERss,n)
    k=kn(n);
    y=0;
    for i=k:1:n
        y=y+combination(n, i)*(BERss^i)*((1-BERss)^(n-i));
    end
    if (y==0)
        y=minv;
    end
endfunction

//Liczenie BERn
function [y]=BERnn(BERss,n)
    if (BERss>=0.5)
        BERss=0.499;
    end
    ebnor=10*log10((-2)*log(2*BERss));
    y=0.5*exp(n*(10^(ebnor/10))/(-2));
    if (y==0)
        y=minv;
    end
    if (BERss==0.499)
        y=BERss;
    end
endfunction

function []=BERvplot(t)
    [BERss,nx]=meshgrid(10^(0:-incv:(-t+1)),1:incv:t);
    for a=1:1:(t/incv);
        for b=1:1:(t/incv);
            z(b,a)=BERvn(BERss(b,a),nx(b,a));
            z2(b,a)=BERon(BERss(b,a),nx(b,a));
            z3(b,a)=BERnn(BERss(b,a),nx(b,a));
            if (z(b,a)<minv)
                z(b,a)=minv;
            end
            if (z2(b,a)<minv)
                z2(b,a)=minv;
            end
            if (z3(b,a)<minv)
                z3(b,a)=minv;
            end
        end
    end
end

colordef('white');

figure(0);
scf(0);
clf;

subplot(221)
g=gca();
g.parent.background=color('white');
set(g,"grid",[1 1 1])
xtitle('BRL(BERV,BERn,BERO)');
ylabel('log(BERss)');
xlabel('n');
zlabel('BRL');
mesh(nx,log10(BERss),log10(z));
mesh(nx,log10(BERss),log10(z2));
mesh(nx,log10(BERss),log10(z3));
surf(nx,log10(BERss),log10(z), 'facecol','red');
surf(nx,log10(BERss),log10(z2), 'facecol','blue');
surf(nx,log10(BERss),log10(z3), 'facecol','green');
set(g,"rotation_angles",[58,-33]);
```

```
subplot(223)
g=gca();
g.parent.background=color('white');
set(g,"grid",[1 1]);
xlabel('log(BERss)');
ylabel('n');
zlabel('BRL');
mesh(nx,log10(BERss),log10(z));
mesh(nx,log10(BERss),log10(z2));
mesh(nx,log10(BERss),log10(z3));
surf(nx,log10(BERss),log10(z), 'facecol','red');
surf(nx,log10(BERss),log10(z2), 'facecol', 'blue');
surf(nx,log10(BERss),log10(z3), 'facecol', 'green');
set(g,"rotation_angles",[90,0]);

subplot(222)
g=gca();
g.parent.background=color('white');
set(g,"grid",[1 1]);
xlabel('log(BERss)');
ylabel('n');
zlabel('BRL');
mesh(nx,log10(BERss),log10(z));
mesh(nx,log10(BERss),log10(z2));
mesh(nx,log10(BERss),log10(z3));
surf(nx,log10(BERss),log10(z), 'facecol','red');
surf(nx,log10(BERss),log10(z2), 'facecol', 'blue');
surf(nx,log10(BERss),log10(z3), 'facecol', 'green');
set(g,"rotation_angles",[58,-300]);

subplot(224)
g=gca();
g.parent.background=color('white');
set(g,"grid",[1 1]);
xlabel('log(BERss)');
ylabel('n');
zlabel('BRL');
mesh(nx,log10(BERss),log10(z));
mesh(nx,log10(BERss),log10(z2));
mesh(nx,log10(BERss),log10(z3));
surf(nx,log10(BERss),log10(z), 'facecol','red');
surf(nx,log10(BERss),log10(z2), 'facecol', 'blue');
surf(nx,log10(BERss),log10(z3), 'facecol', 'green');
set(g,"rotation_angles",[90,-90]);

endfunction

BERvplot(30);
```

8.4. Opis systemu komunikacji i sterowania satelity PW-Sat.

8.4.1. Wstęp.

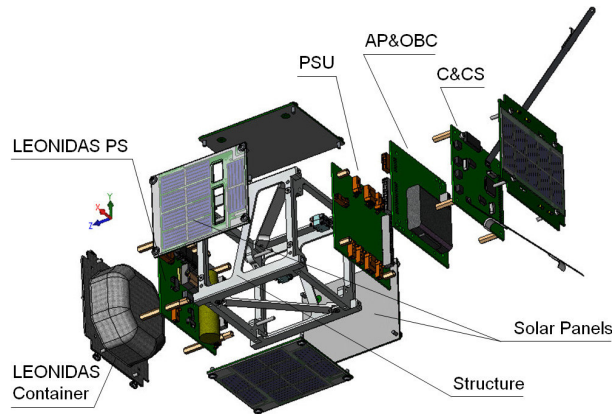
PW-Sat jest studenckim projektem budowy małego satelity standardu „cubesat” ([01], [03]), będącym kostką sześcienną o wymiarach 10x10x10 cm i masie poniżej 1 kg, realizowanym w Instytucie Radioelektroniki i Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej. Celem projektu jest przeprowadzenie dwóch eksperymentów w przestrzeni kosmicznej:

- Test nowej metody stopniowego przerywania poruszania się satelity po orbicie przy wykorzystaniu żagla kosmicznego. W eksperymencie tym na orbicie zostanie rozłożony żagiel, zwiększający wielokrotnie przekrój poprzeczny satelity i powodujący zwiększenie oporów aerodynamicznych działających na satelitę w szczątkowej atmosferze na wysokości około 600 km n.p.m., co z kolei spowoduje przyspieszone obniżanie orbity satelity, a w końcowej fazie jego spalenie w atmosferze.
- Praktyczny test koncepcji systemu rozproszonego obioru sygnału z satelity (DGSS – Distributed Ground Station System), który polega na poprawieniu jakości kanału komunikacyjnego poprzez jednoczesne odbieranie przez wiele stacji naziemnych nadawanej przez satelitę telemetrii i jej późniejszej obróbce (porównaniu w celu wyeliminowania błędów transmisji) w systemach naziemnych. Autor zbudował system komunikacji i sterowania C&CS dla tego satelity, który będzie realizował komunikację satelity z Ziemią oraz zarządzał pracą innych systemów satelity. Na Politechnice Warszawskiej powstaje oprogramowanie GS-SCP [72], które ma umożliwić globalną komunikację z satelitą przy wykorzystaniu wolontariatu radioamatorów na całym świecie oraz sieci Internet.

Satelita PW-Sat składa się z czterech podsystemów elektronicznych oraz ładunku użytecznego realizującego założone eksperymenty. Są to (Rys. 91):

- System komunikacji oraz sterowania satelity – C&CS (Communications and Control System).
- System zasilania – PSU (Power Supply Unit).
- Port dostępowy oraz drugi komputer pokładowy będący dodatkowym ładunkiem użytecznym satelity – AP&OBC (Access Port and On-Board Komputer).

- Ładunek użyteczny eksperymentu LEONIDAS składający się z żagla rozkładanego z wykorzystaniem nitinolu – materiału z pamięcią kształtu, rozkładającego żagiel po podgrzaniu, pojemnika (Container) w którym umieszczony jest złożony żagiel oraz systemu zasilania (PS - Power Supply) służącego do podgrzewania drutu z nitinolu.



Rys. 91. Budowa satelity PW-SAT.

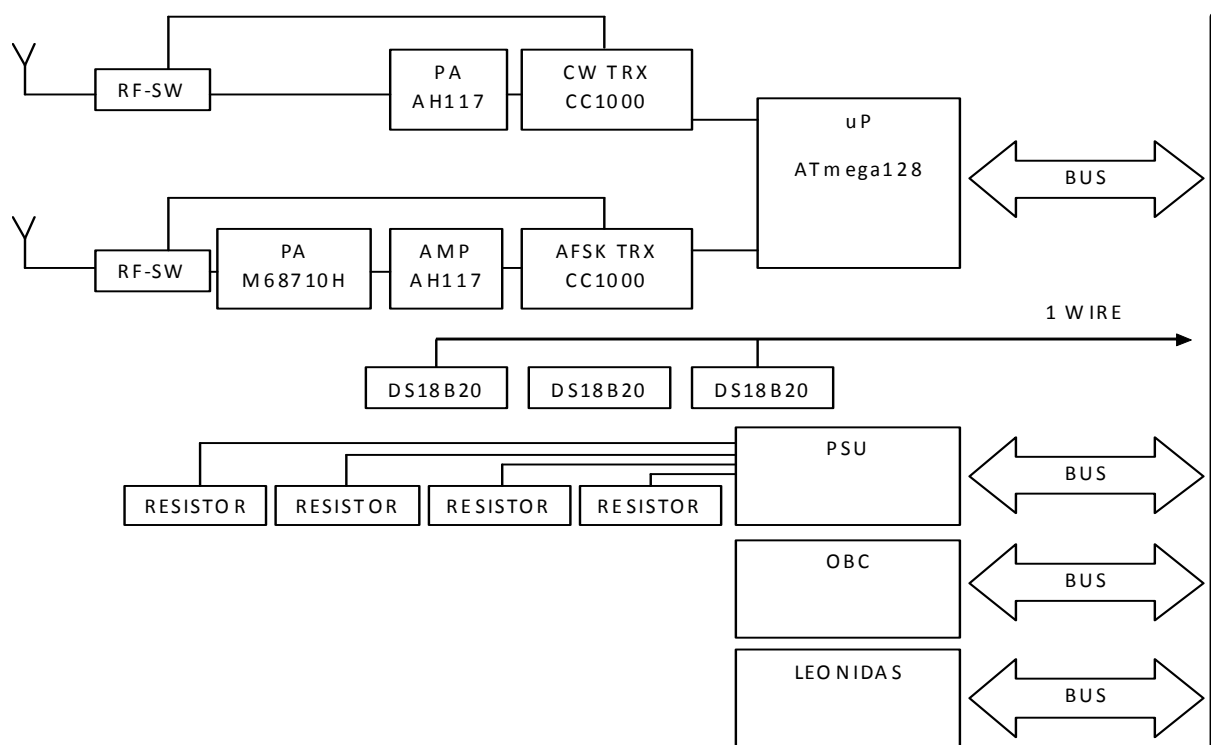
8.4.2. Opis systemu C&CS.

System C&CS [05] realizuje zadania dwóch systemów satelity: systemu łączności z Ziemią i systemu sterowania satelitą. Zadaniem systemu łączności jest prowadzenie komunikacji radiowej między satelitą a stacjami naziemnymi w tym stacją kontrolno-sterującą. Przewidziano dwa kanały łączności między satelitą a stacjami naziemnymi:

- Nadajnik znacznika (beacon) - kanał transmisji podstawowych danych o satelicie.
- Układ nadawczo-odbiorczy pracujący w trybie APRS, pozwalający na odbiór telekomend przesyłanych do satelity z naziemnej stacji sterującej oraz przesyłanie na Ziemię danych telemetrycznych o stanie wszystkich systemów satelity.

Dodatkowo układ nadawczo odbiorczy APRS może być przełączany na rozkaz z Ziemi w tryb pracy przemiennika umożliwiając łączność radioamatorską poprzez satelitę.

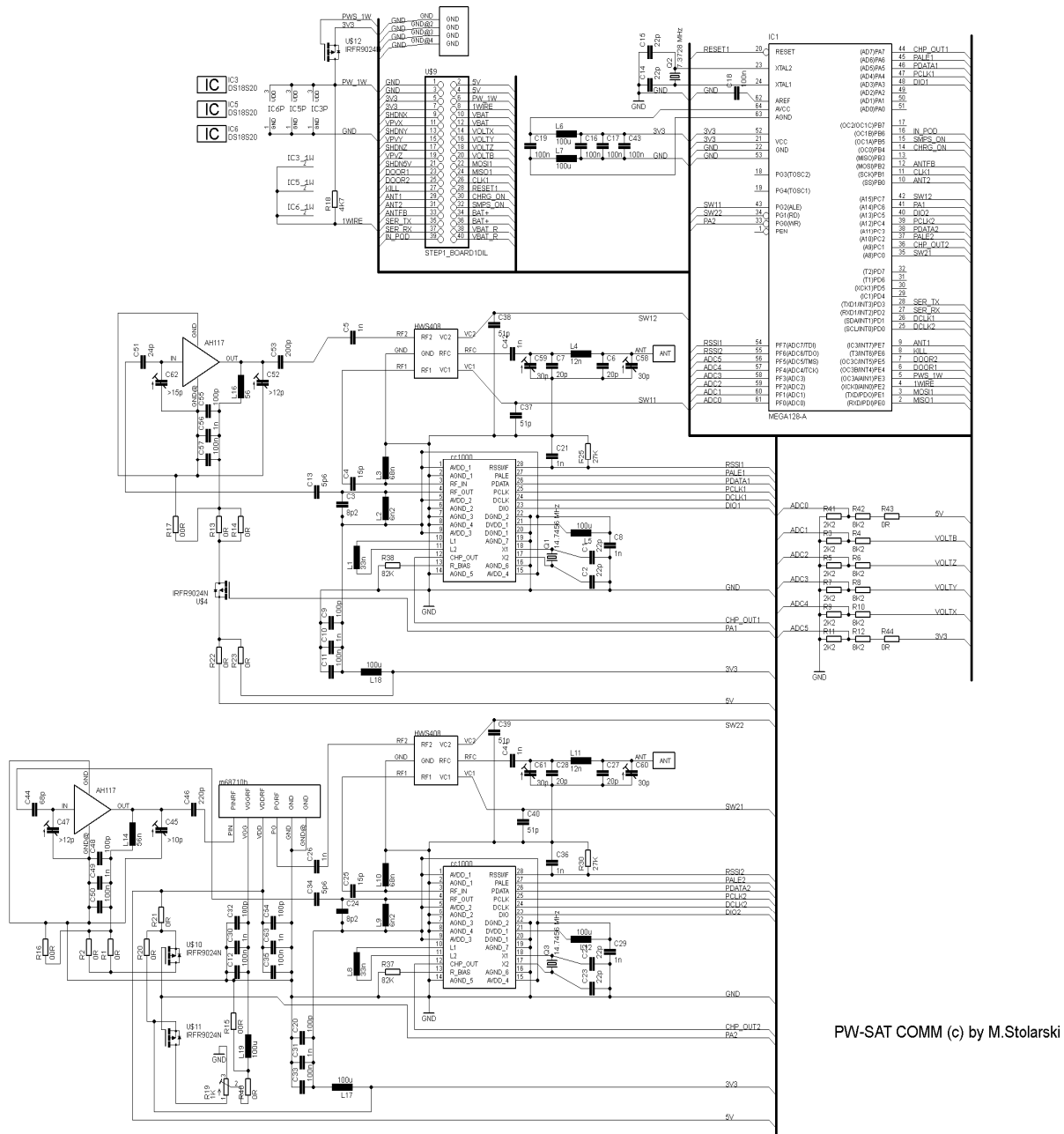
Zadaniem systemu C&CS jest sterowanie pracą wszystkich systemów satelity (wykonywanie telekomend przesłanych z Ziemi) oraz zbieranie danych z czujników (temperatury, napięcia zasilania, poboru prądu zasilania) umieszczonych na satelicie, informujących o aktualnym stanie poszczególnych systemów.



Rys. 92. Diagram połączeń w systemie C&CS oraz jego połączeń z innymi podsystemami.

Schemat blokowy systemu przedstawiono na Rys. 92. Zawiera on dwa torów nadawczo-odbiorcze łączności radiowej oraz sterownik mikroprocesorowy zbudowany na mikrokontrolerze Atmel ATmega128. Każdy z torów radiowych współpracuje z oddzielną anteną. W celu umożliwienia użycia tej samej anteny do nadawania i odbioru, części nadawcza i odbiorcza obu torów połączone są z anteną przez przełączniki sygnału radiowego.

Tory radiowe systemu C&CS składają się (Rys. 93) z dwóch scalonych układów nadawczo - odbiorczych Chipcon CC1000, dwóch scalonych wzmacniaczy radiowych WJ Communications AH117 oraz hybrydowego wzmacniacza mocy Mitsubishi M68710H. System został zaprojektowany do pracy w paśmie 70 cm (437 MHz). Tory radiowe zbudowane są redundantnie. Jediną różnicą jest maksymalna moc wyjściowa. Pierwszy tor radiowy domyślnie nadaje za pomocą modulacji FM AFSK z mocą 30 dBm (1 W). Drugi pracuje w modulacji CW z mocą 20 dBm (100 mW), przy czym w obu torach istnieje możliwość zmiany sposobu modulacji sygnału, ponieważ funkcję modulatora pełni oprogramowanie mikrokontrolera. Satelita będzie nadawał dane telemetryczne: ciągłe modulacją CW (beacon) oraz raz na 30 sekund modulacją FM AFSK (beacon2). Pakiety nadawane modulacją FM AFSK będą realizowane w standardzie APRS i w tym standardzie będzie też możliwość wysyłania telekomend do satelity.



Rys. 93. Schemat ideowy podsystemu C&S.

Maksymalna moc dostępna w układach CC1000 to 10 dBm. Aby ją zwiększyć do 20 dBm wykorzystano scalone wzmacniacze AH117. Dalsze wzmocnienie do 30 dBm realizowane jest poprzez układ M68710H. W celu odseparowania i przełączania części nadawczej oraz odbiorczej od anten wykorzystano scalone przełączniki HEXWAVE HWS408 (RF-SW). Układ CC1000 został zaprojektowany do realizacji modulacji FSK. Aby możliwe było wykorzystanie w tych układach modulacji AFSK oraz CW, należy sterować układami niestandardowo. Jak już wcześniej zostało napisane, funkcję tę realizuje mikrokontroler ATmega128. Do realizacji modulacji CW oprogramowanie wykonała komenda

włączenia i wyłączenia wzmacniacza mocy w układzie CC1000 jednocześnie włączając i wyłączając wzmacniacz AH117 oraz przełączając przełącznik HWS408. Aby realizować modulację AFSK, mikrokontroler generuje sygnały 1200 Hz oraz 2200 Hz, które podawane są bezpośrednio na wejście cyfrowe modulatora FSK. Sygnał ten jest kodowany w standardzie NRZ. W taki koder wprowadzony jest strumień danych zgodny ze standardem AX25, który transportuje ramki w standardzie APRS. W celu demodulacji sygnału AFSK, sygnał z układu CC1000 (komparatora FSK) jest wprowadzany do mikrokontrolera, gdzie mierzona jest jego częstotliwość celem wyróżnienia podnośnych 1200 Hz oraz 2200 Hz. W modulacji AFSK 1200 bps jest to jeden lub niecałe dwa okresy na jeden bit. Następnie ze strumienia bitowego dekodowane są ramki AX25 i w dalszej części ramki APRS. Urządzenia realizujące kodowanie i dekodowanie ramek AX25 zwane są TNC (Terminal Node Controller). Kolejnymi funkcjami mikrokontrolera są:

- Sterowanie magistralą 1WIRE i pomiar temperatur poprzez scalone termometry DALLAS DS18B20.
- Pomiar napięć systemowych (zasilania 3V3, 5V, baterii, ogniw słonecznych) za pomocą wbudowanych w mikrokontroler przetworników A/C.
- Rozkładanie anten (włączanie zasilania oporników do przepalania linek związujących anteny).
- Otwieranie kontenera z żaglem (j.w.).
- Sterowanie systemem zasilania LEONIDAS.
- Przechowywanie danych telemetrycznych do późniejszego przekazania stacji naziemnej (we wbudowanej w mikrokontroler pamięci EEPROM).
- Zabezpieczenie przed zawieszeniem się systemu (poprzez wbudowany w mikrokontroler układ WATCHDOG).
- Realizacja funkcji systemu komunikacji z systemem naziemnym dla drugiego komputera pokładowego (OBC).

Through - board connector:	ESQ-120-14-S-D
Bottom - board connector:	ESQ-120-12-S-D
Manufactured by SAMTEC, www.samtec.pl	
ver. 8	15.01.2009

	ROW A	ROW B		
Ground	GND	A1	B1	5V
	GND	A2	B2	5V
power supp. 3V3	3V3	A3	B3	5V 1W
	3V3	A4	B4	1WIRE
SMPS X shutdown	SHDNX	A5	B5	VBAT
X sides power line	VPVX	A6	B6	VBAT
SMPS Y shutdown	SHDNY	A7	B7	VOLT X
Y sides power line	VPVY	A8	B8	VOLT Y
SMPS Z shutdown	SHDNZ	A9	B9	VOLT Z
Z sides power line	VPVZ	A10	B10	VOLT B
SMPS 5V shutdown	SHDN5V	A11	B11	MOSI
door resistor ctrl line 1	DOOR1	A12	B12	MISO
door resistor ctrl line 2	DOOR2	A13	B13	CLK
shutdown 5V & 3V3 supply	KILL	A14	B14	RESET
antenna resistor ctrl line 1	ANT1	A15	B15	CHRG_ON
antenna resistor ctrl line 2	ANT2	A16	B16	SMPS_ON
antenna monitor	ANTFB	A17	B17	BAT+
serial line TX	SER_TX	A18	B18	BAT+
serial line RX	SER_RX	A19	B19	VBAT_R
ppod access time	IN_POD	A20	B20	VBAT_R

power supp. 5V
1 wire power supp.
1 wire data line
battery supp
X sides PV supp
Y sides PV supp
Z sides PV supp
Battery voltage
SPI
pld battery charger
pld SMPS
payload battery +
battery supp ret

Row A is placed closer to the board edge and row B closer to the board center.

Rys. 94. Opis magistrali systemowej PW-SAT.

Do komunikacji z innymi podsystemami wykorzystywana jest czterdziesto stykowa szyna systemowa (BUS - Rys. 94), która zawiera napięcia zasilania, linie 1WIRE, linie sterujące TTL do sterowania innymi komponentami. Na przykład, aby włączyć rezystor przepalający linkę wiążącą anteny, mikrokontroler ustawia sygnał HI na linii szyny systemowej ANT1. Powoduje to w systemie PSU włączenie tranzystora, który włącza zasilanie rezystora 1.

System C&CS zasilany jest dwoma napięciami. Napięcie 3,3 V wykorzystywane jest do zasilania mikrokontrolera, układów CC1000, wzmacniaczy AH117 oraz magistrali 1WIRE. Napięcie 5 V służy do zasilania wzmacniacza mocy M68710H. Podwójne zasilanie ma na celu minimalizację poboru prądu przez podzespoły logiczne systemu oraz maksymalizację sprawności wzmacniacza mocy w torze radiowym. W Tab. 7 oraz Tab. 8 przedstawiono wyniki pomiarów zużycia prądu przez układ oraz uzyskanej mocy radiowej.

Tab. 7. Pomiary prądowe systemu C&CS, wzmacniacz mocy CW zasilany z napięcia 3,3 V.

CW 3.3V						
Mode	RF P [dBm]	I 3V3 [mA]	I 5V [mA]	P 3V3 [mW]	P 5V [mW]	P All [mW]
pd	0	38	0	125	0	125
rx	0	57	0	188	0	188
tx cw	18	162	0	535	0	535
tx afsk	31	65	789	215	3945	4160
tx all	18+31	170	760	561	3800	4361

Tab. 8. Pomiary prądowe systemu C&CS, wzmacniacz mocy CW zasilany z napięcia 5 V.

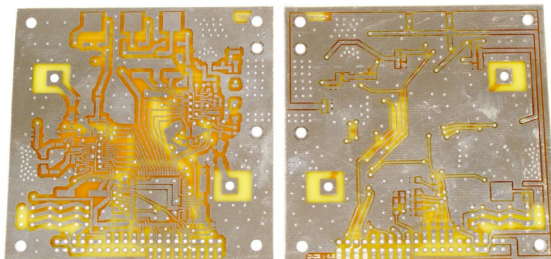
CW 5V						
Mode	RF P [dBm]	I 3V3 [mA]	I 5V [mA]	P 3V3 [mW]	P 5V [mW]	P All [mW]
pd	0	38		125	0	125
rx	0	58		191	0	191
tx cw	20	65	158	215	790	1005
tx afsk	31	65	792	215	3960	4175
tx All	20+31	70	903	231	4515	4746

W torze FM AFSK udało się uzyskać maksymalną moc radiową 31 dBm. W torze CW maksymalną uzyskaną mocą było 18 dBm. Ponieważ moc ta była mniejsza od oczekiwanego minimum, końcowy wzmacniacz AH117 zasilono napięciem 5 V. W tym przypadku maksymalna zmierzona moc radiowa wyniosła 24 dBm. W trybie wyłączenia układów CC1000 (pd) układ pobiera 125 mW mocy. W trybie odbioru (rx) układ pobiera około 190 mW. W trybie nadawania sygnału CW układ pobiera (w zależności od sposobu zasilania wzmacniacza końcowego) około 500 mW bądź 1000 mW. Ponieważ nadajnik CW transmituje dane telemetryczne ciągle, zostanie jeszcze rozważony sposób zasilania wzmacniacza mocy stopnia końcowego toru CW. Obniżenie wymagań minimalnych o 2 dB pozwoliło by na dwukrotne obniżenie zapotrzebowania na dostarczaną moc z układu zasilania. Przy włączonym nadajniku w torze FM AFSK (tx afsk) układ pobiera około 4 W, a przy włączonych obu torach nadawczych (tx all) układ pobiera około 4,5 W.

System C&CS jest kompatybilny z radioamatorskimi systemami AX25, APRS, siecią APRS-IS, siecią uniwersyteckich stacji naziemnych GENSO oraz systemem Rozproszonej Stacji Naziemnej DGSS. Pozwoli to na komunikację satelity nie tylko podczas przelotów nad Polską (około 40 minut na dobę), ale także kiedy będzie przelatywał nad innymi rejonami świata, co wielokrotnie zwiększy czas dostępu do satelity i zarazem zwiększy ilość odebranych danych telemetrycznych. Jeśli zajdzie potrzeba (np. wzajemne zagłuszanie się torów radiowych), będzie możliwe selektywne wyłączanie nadajników przy niemożliwości wyłączenia odbiorników. Dodatkowo system pracujący modulacją CW będzie wykorzystywany do dokładnego określania parametrów orbity satelity. Nadajnik będzie nadawać sygnał o szerokości pasma około 50 Hz. Dzięki efektowi Dopplera będzie możliwe precyzyjne określenie prędkości satelity względem stacji naziemnej, co pozwoli na wyliczenie poprawek do parametrów orbity. Określenie tych parametrów pozwoli na sprawdzenie, czy eksperyment LEONIDAS powoduje przyspieszone obniżanie się wysokości orbity satelity, a w konsekwencji wcześniejsze spalenie się satelity w atmosferze Ziemi.

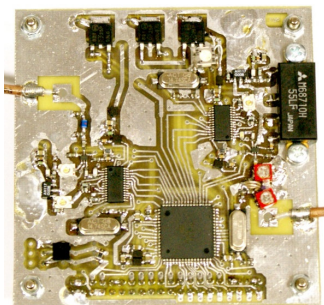
8.4.3. Płytki PCB.

System C&CS zrealizowany jest na dwustronnym laminacie FR4 o wymiarach 80x80x1 mm (Rys. 95).



Rys. 95. Płytki PCB systemu C&CS.

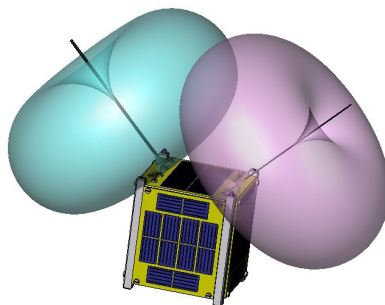
Elementy montowane są głównie na górnej warstwie (Rys. 96), aby dolna warstwa zawierała jak największą powierzchnię masy. Jest to niezbędne, aby zachować odpowiednią impedancję linii sygnałowych.



Rys. 96. Zmontowany układ C&CS.

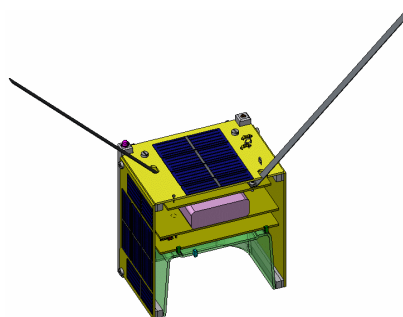
8.4.4. System antenowy.

System antenowy stanowią dwa ćwierćfalowe monopole (wykonane z paska blachy sprężystej). Są one zamontowane bezpośrednio do laminatu (Rys. 98), a dopasowanie realizowane jest za pomocą wyjściowego filtra PI. Anteny ustawione są względem ściany satelity pod kątem 45 stopni oraz względem siebie pod kątem 90 stopni, aby zminimalizować wzajemny wpływ obu torów radiowych (Rys. 97).



Rys. 97. Model charakterystyki promieniowania anten systemu C&CS.

Przejsięcie anten przez górną ścianę satelity (Rys. 98) następuje poprzez materiał dielektryczny (aby przejsięcie zachowało charakter linii koncentrycznej, szkielet oraz ścianka górna satelity nie zawiera żadnych metalowych powierzchni oraz elementów w promieniu jednego cm od anten).



Rys. 98. System antenowy, przejsięcie przez ścianę satelity.

8.4.5. Podsumowanie.

System C&CS to przemysłana konstrukcja, która łączy zalety systemów redundantnych przy zachowaniu niewielkich rozmiarów oraz niewielkim zapotrzebowaniu na energie. Został on zaprojektowany tak, aby był kompatybilny z systemami radioamatorskimi a także z technikami poprawy jakości łącza dzięki rozproszonemu odbiorowi. W momencie pisania rozprawy sprzętowa część systemu była gotowa. Oprogramowanie było na etapie modelu inżynierskiego.

8.5. Płyta CD.

Zawartość płyty CD:

- Elektroniczna wersja niniejszej rozprawy.
- Źródła oraz skompilowana aplikacja DGSSC.
- Źródła oprogramowania modeli laboratoryjnych RSN.
- Programy dla aplikacji SciLab.
- Surowe wyniki badań.

