

1: Katarzyna Szczygielska
2: Marcin Stolarski
ad 1, 2: Centrum Badań Kosmicznych PAN
ad 1: kszczygielska@asio.pl
ad 2: mstolars@cbk.waw.pl



Łódź, 8-10 kwietnia 2015

SATELITARNY NADAJNIK ADAPTACYJNY WYKORZYSTUJACY TECHNIKĘ RADIA PROGRAMOWEGO (SDR)

Streszczenie: W artykule przedstawiono model nadajnika dla adaptacyjnego systemu łączności satelitarnej realizowanego w ramach projektu SACC (ang. *Satellite adaptive communication channel*) w oparciu o technologię radia programowanego SDR (ang. *Software Defined Radio*). Zaprezentowano strukturę nadajnika stworzoną w oparciu o architekturę klient-serwer oraz opisano poszczególne bloki programu. Zawarto także rezultaty przeprowadzonych testów. Aby przybliżyć ideę projektu SACC krótko przedstawiono podstawowe informacje dotyczące problematyki łączności satelitarnej z satelitami na niskiej orbicie okołozemskiej.

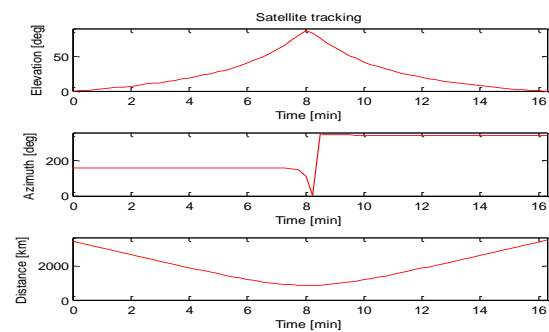
1. WSTĘP

Projekt SACC (ang. *Satellite adaptive communication channel*) realizowany jest w ramach działania Europejskiej Agencji Kosmicznej. Jego celem jest zamodelowanie adaptacyjnego systemu łączności satelitarnej dla małych satelitów znajdujących się na niskiej orbicie okołozemskiej LEO (ang. *Low Earth Orbit*). Taki system dzięki adaptacyjnej zmianie parametrów transmisji pozwoli na zwiększenie ilości przesyłanych danych podczas jednego przelotu satelity nad stacją naziemną. W trakcie trwania projektu powstały modele nadajnika, odbiornika oraz symulator kanału pozwalające na zamodelowanie działania adaptacyjnego systemu komunikacji. Model kanału radiowego pozwolił na odwzorowanie warunków panujących w łączu satelitarnym (dla satelity na niskiej orbicie okołozemskiej).

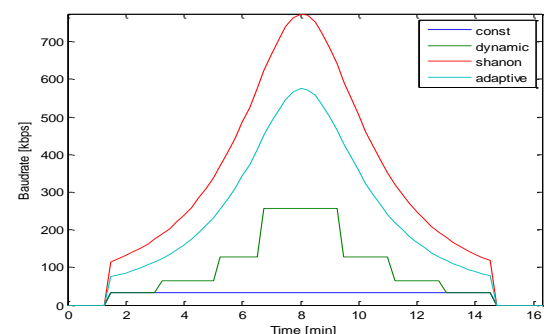
2. OPIS SYSTEMU

Przelot satelity LEO nad stacją naziemną (zwany oknem komunikacyjnym) trwa około 15 minut [4]. W trakcie takiego przelotu odległość między satelitą a stacją naziemną zmienia się w zakresie 3500 – 600 km (dla satelity na orbicie LEO 600 km nad powierzchnią Ziemi) [Rys. 1], co wiąże się ze zmianami wartości tłumienia wolnej przestrzeni (FSL), co z kolei implikuje zmienne wartości stosunku sygnał/szum (SNR) w systemie odbiorczą stacji naziemnej. Na Rys. 2 przedstawiono różne scenariusze łączy radiowego i osiąganą prędkość bitową łączy danych dla satelitów BRITE-PL. Scenariusz „constant” zakłada bezpieczną stałą prędkość transmisji w trakcie całego przelotu satelity. Scenariusz „dynamic” to ustawienie maksymalnej dostępnej prędkości transmisji przy danym SNR. Scenariusz „shanon” to maksymalna teoretyczna przepustowość łączy. Scenariusz „adaptive” to maksymalna teoretyczna przepustowość

łącza danych dla modulacji BPSK przy założeniu idealnego sprzężenia zwrotnego z satelitą pozwalającego zmieniać prędkość bitową transmisji, co 1 sekundę z rozdzielczością 1bps. Projekt SACC to budowa prototypu systemu, który dzięki szybkiej pętli sprzężenia zwrotnego pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem i wprowadzeniem mechanizmu zmiany modulacji, zmiany systemu kodowania oraz zmiany prędkości bitowej łączy realizuje scenariusz adaptacyjny („adaptive”), aby zmaksymalizować ilość przesyłanych danych pomiędzy satelitą a stacją naziemną bez zwiększenia radiowej mocy nadawczej na satelicie.



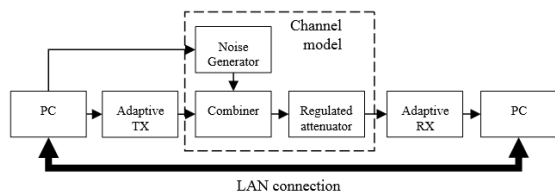
Rys. 1 Parametry satelity LEO podczas przelotu nad stacją naziemną.



Rys. 2 Przepływności bitowe podczas przelotu satelity LEO nad stacją naziemną.

Na potrzeby projektu SACC zbudowano system czasu rzeczywistego w oparciu o technikę radia programowego (SDR) [5]. System ten składa się z adaptacyjnego nadajnika radiowego, systemu symulującego model

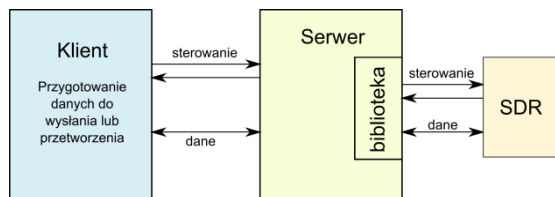
kanalu satelitarnego (do analogowego sygnału radiowego dokładane są zakłócenia związane z tłumieniem wolnej przestrzeni (FSL), efektem Dopplera, oraz szumem tła) oraz adaptacyjnego odbiornika. Sprzężenie zwrotne pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem realizowane jest za pomocą sieci Ethernet [Rys. 3].



Rys. 3 Konfiguracja systemu SACC.

3. MODEL NADAJNIKA

Przygotowany na potrzeby projektu SACC model nadajnika pozwala na zmianę, zgodnie z sygnałami sterującymi, parametrów transmisji takich jak rodzaj modulacji, sprawność kodu splotowego oraz prędkość transmisji. Został on wykonany w oparciu o moduł radia programowanego USRP N210. Zastosowana architektura klient-serwer pozwoliła na oddzielenie części zawierającej bibliotekę UHD, wykorzystywaną do sterowania radiem, od reszty kodu programu, co przedstawiono na [Rys. 4].



Rys. 4 Schemat aplikacji klient-serwer [3]

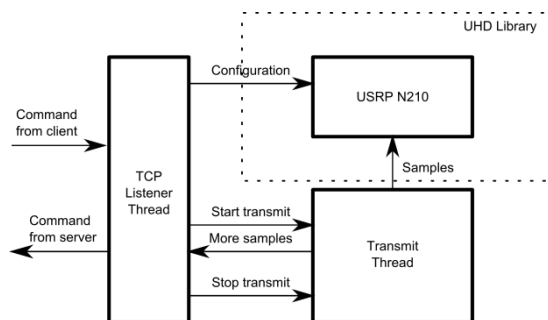
Serwer pozwala na konfigurowanie radia programowalnego oraz nadawanie otrzymanych próbek. Aplikacja klienta odpowiada za przygotowanie ramki danych oraz sygnału IQ. Pomiędzy programami komunikacja odbywa się połączeniem TCP/IP z wykorzystaniem protokołu SDRP stworzonego na potrzeby projektu pozwalającego na zarządzanie radiem programowalnym.

3.1. Serwer

Aplikacja serwera umożliwia zarządzanie oraz nadawanie próbek sygnału modułem radia programowalnego USRP N210. Można wyróżnić trzy główne części aplikacji: wątek serwera TCP/IP, wątek nadawczy oraz wątek odpowiadający za obsługę modułu radiowego. Zostało to przedstawione na [Rys. 5].

Wątek serwera pozwala na asynchroniczne oczekiwanie na przyjęcie zgłoszenia o nowym użytkowniku oraz odbiór i nadawanie wiadomości. Obsługuje on protokół SDRP zawierający zestaw komend do konfiguracji modułu radia oraz nadawanie próbek sygnału. Z tego wątku wywoływane są odpowiednie funkcje biblioteki UHD konfigurujące radio programowalne oraz wątek odpowiedzialny za nadawanie próbek sygnału. Opis poszczególnych funkcji można znaleźć w dokumentacji biblioteki [2]. Serwer przygotowany w ramach niniej-

szego projektu pozwala na nadawanie próbek z prędkością 10 MSa/s.



Rys. 5 Serwer [3]

3.1. Klient

Aplikacja klienta odpowiada za przygotowanie próbek sygnału IQ, a następnie wysłanie ich do serwera za pośrednictwem połączenia TCP/IP. Składają się na nią cztery główne części zarządzane z poziomu graficznego interfejsu użytkownika GUI. Za realizację funkcji nadajnika odpowiadają trzy wątki: wątek odbierający dane sterujące od odbiornika, wątek przygotowujący ramkę danych oraz wątek komunikujący się z serwerem. Poza tym GUI daje też dostęp do części testującej - pozwalającej na wygenerowanie transmisji i zapisanie jej do pliku.

W projekcie założono, że dane będą przesyłane w ramach o stałej długości symbolowej dla każdej z możliwych modulacji i sprawności kodu splotowego. Struktura ramki została przedstawiona w Tab. 1. Ustalono, że czas trwania ramki nie powinien być większy niż 10 ms - 20 ms. Wartość ta została dobrana na podstawie analizy szybkości zmian częstotliwości sygnału odbieranego z satelity umieszczonego na orbicie o wysokości 300 - 800 km. Ilość danych przesyłanych w ramce zależy od parametrów transmisji - modulacji i sprawności kodu splotowego. W ramce może zostać przesłane od 609 bajtów, przy wykorzystaniu modulacji BPSK i sprawności kodu splotowego $\frac{1}{2}$, do 4359 bajtów w przypadku modulacji 16APSK i sprawności $\frac{7}{8}$.

Tab. 1. Struktura ramki

Nazwa pola	Opis
Preambuła	Sekwencja synchronizacyjna (pseudolosowa) o stałej długości symbolowej dla wszystkich modulacji
Nagłówek	Nagłówek zawierający informacje o numerze ramki, ilości przesyłanych danych oraz parametrach transmisji kolejnej ramki
CRC16	Suma kontrolna nagłówka
Payload	Pakiet danych
CRC32	Suma kontrolna wczytanych danych

W procesie przygotowania sygnału nadawanego można wyszczególnić kilka etapów. Pierwszym z nich jest wczytanie danych, które mają zostać przesłane. Aby odbiornik mógł stwierdzić czy odebrane dane są poprawne obliczana jest 32-bitowa suma kontrolna CRC 32 i jest ona dopisywana na koniec tablicy danych. Następ-

nie przygotowane dane są kodowane splotowo. Zaimplementowano kod splotowy o sprawności $\frac{1}{2}$ z wykorzystaniem wielomianów generacyjnych $G_1 = 171_{(oct)}$ oraz $G_2 = 133_{(oct)}$. Większe sprawności kodu splotowego uzyskano poprzez selektywne wymazywanie bitów. Zostały wykorzystane schematy wymazywania bitów takie jak w standardzie DVB-S2. Uzyskane sprawności kodu splotowego to: $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{7}{8}$. Do tak przygotowanych danych dodawany jest nagłówek zawierający informacje o numerze ramki, ilości danych, parametrach transmisji następnym ramek. Te informacje są niezbędne do prawidłowego odbioru i dekodowania ramki w odbiorniku. Następnie dane wraz z nagłówkiem mapowane są na odpowiednie symbole. Na maper bity podawane są w kolejności od najstarszego bitu najmłodszego bajtu do najmłodszego bitu najstarszego bajtu. Mapper zgodnie z zadaną tablicą konstelacji przypisuje sekwencjom bitów odpowiednie symbole. Wyjściem mapera są dwie tablice symboli - I oraz Q. Zostały zaimplementowane modulacje BPSK, QPSK, 8PSK, 16APSK. Na początek ramki dodawane są symbole sekwencji treningowej dla odpowiedniej modulacji. Sekwencja ma stałą długość symbolową i pozwala odbiornikowi na uzyskanie synchronizacji z nadajnikiem. Ostatnim etapem przetwarzania sygnału jest nadpróbkowanie oraz filtracja, obie operacje wykonywane są w oddzielnych wątkach dla obydwu składowych. Ponieważ sygnał nadpróbowywany jest zerami, to operacja nadpróbkowania wykonywana jest podczas filtracji tak, aby uniknąć niepotrzebnego mnożenia przez zera (filtracja realizowana jest po przez slot sygnałów w dziedzinie czasu). Sygnał nadpróbowywany jest ośmiokrotnie i filtrowany filtrem pierwiastka z podniesionego kosinusa. Zastosowanie filtru RRC w nadajniku oraz odbiorniku pozwala na zmniejszenie interferencji międzysymbolowych. Tak przygotowana ramka danych jest gotowa do nadania.

Po zainicjowaniu transmisji przez użytkownika aplikacja oczekuje asynchronicznie na polecenia z serwera. Gdy otrzyma komendę nadania danych wysyła przygotowaną wcześniej ramkę i równocześnie wystawia flagę dla wątku przygotowującego dane, że można przygotować kolejną ramkę danych. Przed przygotowaniem kolejnej ramki sprawdzane są dane odebrane od odbiornika o zmianach modulacji, sprawności kodu oraz prędkości transmisji i jeżeli uległy zmianie są ustawiane z zachowaniem opóźnienia wymaganego przez odbiornik. Gdy kolejna ramka jest gotowa, wystawiana jest odpowiednia flaga informująca wątek wysyłający, że może on pobrać dane. Dane są przygotowywane dopóki w pliku wejściowym znajdują się dane do wczytania lub osiągnięta została żądana liczba nadanych ramek.

4. TESTY MODELU NADAJNIKA

Przygotowany model nadajnika został przetestowany na laptopie Dell Inspirion 7720 pracującym pod kontrolą systemu operacyjnego Windows 8. Wykorzystano także radio programowalne firmy Ettus Research USRP N210 wyposażone w moduł nadawczo odbiorczy SBX pracujący w paśmie 400 MHz – 4.4 GHz. Do obsługi tego radia wykorzystano bibliotekę UHD w wersji 3.6.2.

4.1. Testy części przygotowującej sygnał

W trakcie tworzenia aplikacji klienta, przygotowującej dane do nadania, każdy powstały blok był oddzielnie testowany. Dane wejściowe były podawane na analogiczny blok „wzorcowy” przygotowany we wcześniejszym etapie projektu w programie Matlab. Do zapisania danych do pliku wykorzystano funkcje testujące programu, które umożliwiły zapisanie danych do pliku po wybranych etapach przetwarzania sygnału. Próbkki wygenerowanej transmisji zostały zapisane do pliku i wykorzystane także jako wejście odbiornika, co pozwoliło na sprawdzanie zgodności nadajnika z odbiornikiem.

Pierwotnie przygotowany program wymagał optymalizacji, ponieważ dane były przygotowywane zbyt wolno na nadawanie z zadaną prędkością symbolową 1 MSym/s. Aby zmniejszyć czas tworzenia ramki zoptymalizowana została operacja filtracji – wykorzystano fakt, że sygnał nadpróbkowany jest zerami i zredukowano liczbę mnożeń omijając zerowe próbki podczas splotu. Podczas testów wykazano, że jedna ramka (nominalnie trwająca ok. 10 ms) przygotowywana jest w czasie poniżej jednej milisekundy. Oznacza to, że przygotowanie ramki jest znacznie krótsze od czasu trwania ramki nawet dla największej wykorzystywanej prędkości próbkowania. W Tab. 2 oraz Tab. 3 przedstawiono uśrednione czasy wykonywania dla operacji tworzenia ramki powtórzonej 500 razy dla modulacji BPSK, QPSK, 8PSK oraz 16APSK z wykorzystaniem kodu splotowego o sprawności $\frac{1}{2}$.

Tab. 2. Czas trwania poszczególnych operacji dla modulacji BPSK i QPSK

Nazwa bloku	BPSK	QPSK
Wczytanie danych	3.82 us	5.67 us
Obliczanie CRC32	1.82 us	2.11 us
Kodowanie splotowe	52.14 us	107.4 us
Przygotowanie nagłówka	1.84 us	2.18 us
Mapowanie symboli	139 us	143.11 us
Filtracja sygnału	547.14 us	489.45 us
Suma	746.36 us	761.56 us

Tab. 3. Czas trwania poszczególnych operacji dla modulacji 8PSK i 16APSK

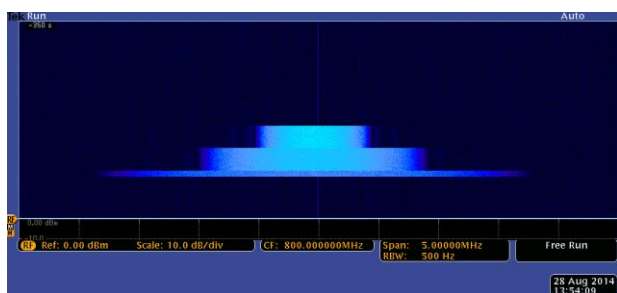
Nazwa bloku	8PSK	16APSK
Wczytanie danych	5.81 us	5.97 us
Obliczanie CRC32	1.82 us	1.92 us
Kodowanie splotowe	178.41 us	208.47 us
Przygotowanie nagłówka	1.81 us	1.77 us
Mapowanie symboli	158.2 us	138.93 us
Filtracja sygnału	521.94 us	526.29 us
Suma	869.07 us	884.05 us

Można zauważyć, że czas wykonywania operacji dotyczących bitów danych wzrósł wraz z wartością modulacji, natomiast czas operacji dokonywanych na symbolach (modulacja, filtracja) jest w przybliżeniu stały. Jednak mimo znacznego uśredniania, wyniki dla kilku uruchomień transmisji pliku potrafiły różnić się od siebie o kilkadziesiąt milisekund.

4.2. Testy części nadawczej

Po sprawdzeniu poprawności przygotowywanych danych zostały podjęte próby nadania oraz odebrania transmisji z wykorzystaniem modułu radia programowalnego. Pierwsze próby zakończyły się niepowodzeniem ze względu na znaczną rozbieżność częstotliwości wynikającej z niestabilności generatorów w obydwu modułach. Różnica częstotliwości była korygowana, jednak zmiany częstotliwości w trakcie trwania ramki, także skokowe o około 60 Hz, powodowały zbyt duży obrót konstelacji, aby ramka została poprawnie odebrana mimo korekcji częstotliwości. Kolejnym problemem zaobserwowanym była niestabilność częstotliwości próbkowania sygnału – mimo synchronizacji ramki za pomocą sekwencji treningowej umieszczonej na początku ramki, dla kolejnych symboli moment próbkowania nie trafiał we właściwy symbol. Dalsze testy przeprowadzane były z wykorzystaniem zewnętrznego generatora z użyciem sygnału o częstotliwości 10 MHz, co rozwiązało problem z niestabilnością częstotliwości sygnału oraz próbkowania.

Nadawany sygnał był także obserwowany na analizatorze widma. Zmiany prędkości transmisji podczas nadawania zostały zilustrowane na spektrogramie na Rys. 6. Nastawy analizatora przedstawiono w Tab. 4.



Rys. 6 Zmiana prędkości transmisji [3]

Tab. 4. Nastawy analizatora widma

Parametr	Wartość	Jednostka
Span	5	[MHz]
RBW	500	[Hz]
Reference level	0	[dBm]
Częst. Środkowa	800	[MHz]
Poziom szumów	-93	[dBm]

Podczas zestawienia nadajnika z odbiornikiem udało się wielokrotnie (dla każdej konfiguracji parametrów minimum 10 razy) odebrać transmisję pliku o rozmiarze 5242880 bajtów dla wszystkich modułów, sprawności kodu splotowego oraz przepływności symbolowych. Sprawdzone zostały także odbiór, gdy w trakcie transmisji zmieniana była modulacja oraz sprawność kodu splotowego.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono budowę adaptacyjnego systemu do komunikacji satelitarnej na potrzeby projektu SACC. Przedstawiono założenia teoretyczne systemu, ogólną budowę systemu, oraz szczegółową budowę nadajnika wraz z jego testami. Nadajnik został podłą-

czony do pozostałych części systemu (symulatora modelu kanału oraz adaptacyjnego odbiornika). Złożony system SACC pozwala na tworzenie stabilnego połączenia radiowego, które aktywnie dostosowuje parametry transmisji w zależności od zakłóceń wprowadzanych przez symulator modelu kanału. Zmiany realizowane są co 1 ramkę danych czyli co około 10 ms pozwalając na utrzymanie maksymalnej przepustowości łącza danych.

Praca jest elementem projektu „SACC – satellite adaptive communication channel”, finansowanego przez rząd Polski poprzez umowę z Europejską Agencją Kosmiczną ESA, w ramach programu PECS (Plan for European Cooperating States).

Opinie wyrażone w niniejszym artykule nie mogą w żaden sposób być uznawane za oficjalne stanowisko Europejskiej Agencji Kosmicznej.

SPIS LITERATURY

- [1] Wiley-Interscience, *Handbook on satellite communications*, 2003
- [2] Ettus Research, *Dokumentacja biblioteki UHD*, dostępne w internecie 2014-07-20
http://code.ettus.com/redmine/ettus/projects/uhd/wiki/UHD_build
- [3] Katarzyna Szczygielska, *Opracowanie nadajnika adaptacyjnego systemu łączności satelitarnej z wykorzystaniem techniki SDR*. Praca magisterska, Warszawa, wrzesień 2014.
- [4] Marcin Stolarski, Grzegorz Woźniak, *Radio communications systems for small satellites based on Polish experience*, Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2012 19th International Conference on, p 413 - 417
- [5] Marcin Stolarski, Krzysztof Kurek, *Third call for outline proposals (ref: ao 1-7021) under the programme for european cooperating states (pecs) in poland - SACC - Satellite Adaptive Communication Channel*, ESA 2011