

SYSTEM KOMUNIKACJI I STEROWANIA SATELITY PW-SAT

Streszczenie: Satelita PW-SAT to edukacyjny projekt małego satelity budowany przez studentów i doktorantów Politechniki Warszawskiej. W artykule opisano szczegółowo system komunikacji i sterowania satelity C&CS (*Communications and Control System*) realizujący funkcje łączności radiowej ze stacjami naziemnymi oraz zarządzania pozostałymi systemami satelity. Przedstawiono budowę sprzętową (płytkę elektroniczną wraz z systemem antenowym) oraz opisano funkcje realizowane przez oprogramowanie. W końcowej części przedstawiono wyniki pomiarów modelu inżynierskiego systemu C&CS.

1. Wstęp

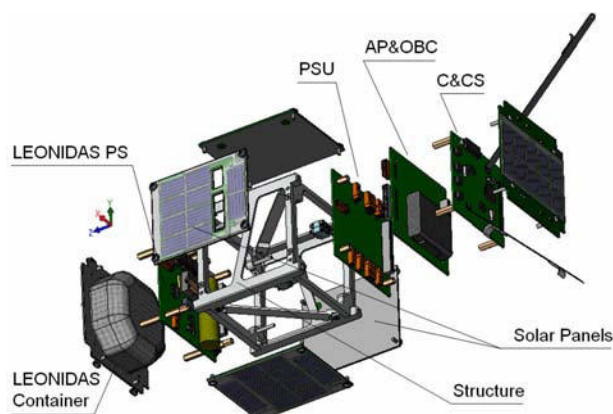
PW-Sat jest studenckim projektem budowy małego satelity standardu „cubesat” [9], będącym kostką sześcienną o wymiarach 10x10x10 cm i masie poniżej 1 kg, realizowanym w Instytucie Radioelektroniki i Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej. Celem projektu jest przeprowadzenie dwóch eksperymentów w przestrzeni kosmicznej:

- Test nowej metody stopniowego przerywania poruszenia 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* [3, 4, 5, 6]), 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 [5]) w systemach naziemnych. Artykuł ten opisuje system komunikacji i sterowania C&CS, który będzie realizował komunikację satelity z Ziemią oraz zarządzał pracą innych systemów satelity.

Satelita PW-Sat składa się z czterech podsystemów elektronicznych oraz ładunku użytecznego realizującego założone eksperymenty (Rys. 1). Są to:

- 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 Computer*).
- 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. 1. Budowa satelity PW-SAT

2. Opis systemu C&CS

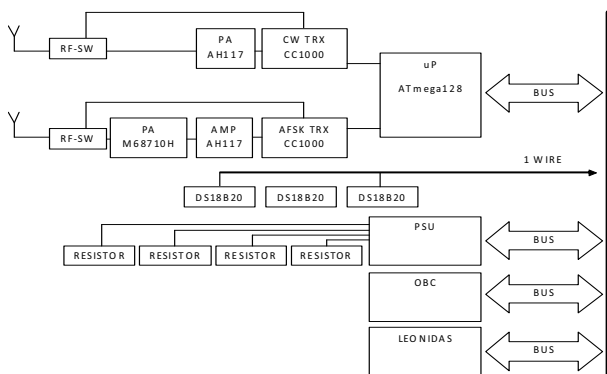
System C&CS realizuje zadania dwóch systemów satelity: systemu łączności z Ziemią i systemu sterowania satelitą. Zadaniem systemu łączności jest prowadzenie komunikacji radiowej między satelitą a stacjami naziemnymi w tym stacją kontrolno-sterującą. Przewidziano dwa kanały łączności między satelitą a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

- Nadajnik znacznika (*beacon*) - kanał transmisji podstawowych danych o satelicie.
- Układ nadawczo-odbiorczy pracujący w trybie APRS (*Automatic Packet Reporting System*) [1], 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 przemiennej 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.

Schemat blokowy systemu przedstawiono na Rys. 2. Zawiera on dwa torry 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.



Rys. 2. Diagram połączeń w systemie C&CS oraz jego połączeń z innymi podsystemami

Tory radiowe systemu C&CS składają się (Rys. 2, Rys. 4) 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 70cm (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: ciągle modulacją CW (*beacon*) oraz raz na 30 sekund modulacją FM AFSK (*beacon2*). Pakiety nadawane modulacją FM AFSK będą realizowane w standardzie APRS [1] i w tym standardzie będzie też możliwość wysyłania telekomend do satelity. 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 oprogramo-

wanie wysyła komendy 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 [2], który transportuje ramki w standardzie APRS [1]. 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 b/s 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).

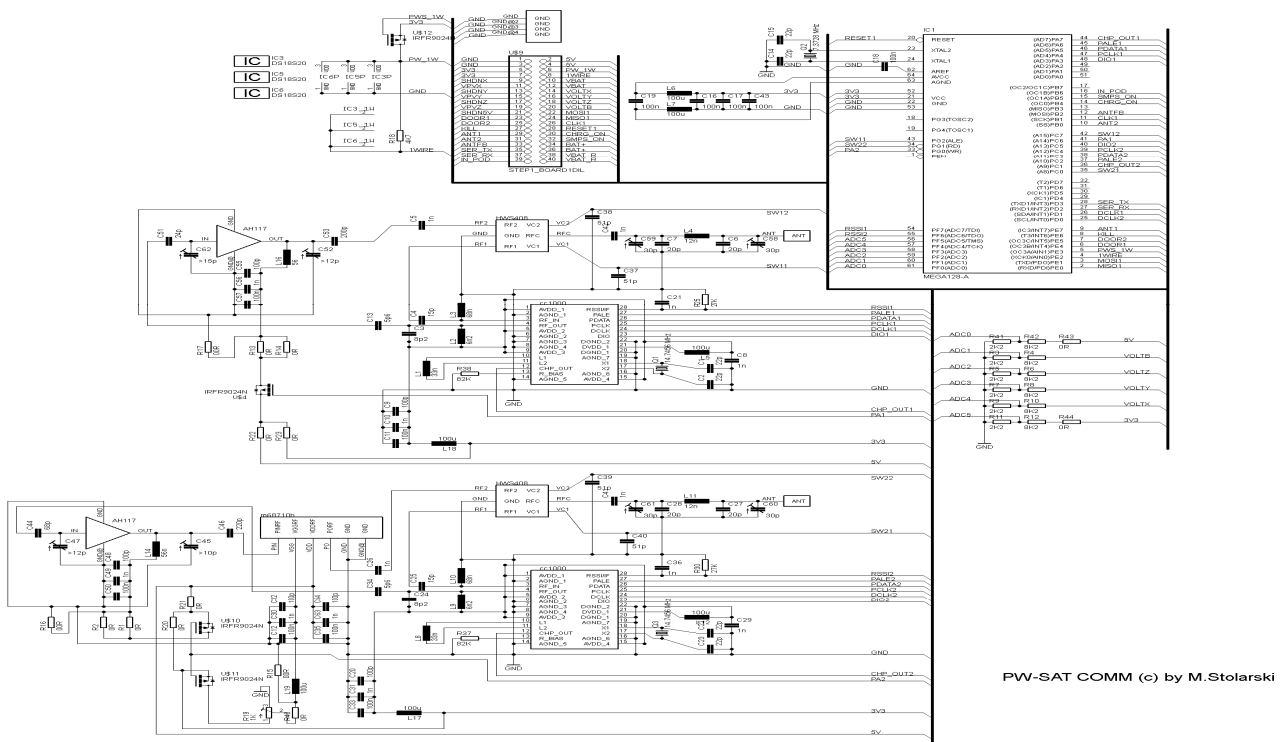
Through - board connector: ESO.120.14-S.0
Bottom - board connector: ESO.120.12-S.0
Manufactured by SAMTEC, www.samtec.pl
ver. B 15.01.2009

	ROW A	ROW B		
Ground	GND	A1	5V	
	GND	A2	5V	
power supp. 3V3	3V3	A3	B3	5V.1W
SMP'S X shutdown	SHDX	A4	B4	1WIRE
X sides power line	VPVX	A5	B5	VBAT
SMP'S Y shutdown	SHDY	A6	B6	VBAT
Y sides power line	VPVY	A7	B7	VOLTZ
SMP'S Z shutdown	SHDZ	A8	B8	VOLTZ
Z sides power line	VPVZ	A9	B9	VOLTB
SMP'S 3V shutdown	SHD3V	A10	B10	VOLTB
antenna resistor ctrl line 1	DOOR1	A11	B11	MODE
door resistor ctrl line 2	DOOR2	A12	B12	MISO
shutdown 5V & 3V3 supply	KILL	A14	B14	CLK
antenna resistor ctrl line 1	ANT1	A15	B15	RESET
antenna resistor ctrl line 2	ANT2	A16	B16	CHRG ON
antenna monitor	ANTFB	A17	B17	SMP'S ON
serial line TX	SER TX	A18	B18	BAT+
serial line RX	SER RX	A19	B19	BAT R
power access time	IN-POD	A20	B20	VBAT R

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

Rys. 3. Opis magistrali systemowej PW-SAT

Do komunikacji z innymi podsystemami wykorzystywana jest czterdziesto stykowa szyna systemowa (BUS - Rys. 3), 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 (Rys. 2).



Rys. 4. Schemat ideowy podsystemu C&CS

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 wzmacniaczy mocy w torze radiowym. W Tab. 1 oraz Tab. 2 przedstawiono wyniki pomiarów zużycia prądu przez układ oraz uzyskanej mocy radiowej.

Tab. 1. 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. 2. 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

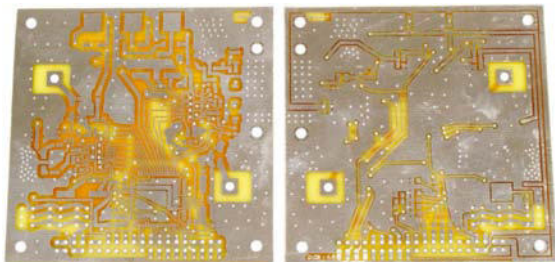
W torze FM AFSK udało się uzyskać maksymalną moc radiową 31 dBm. W torze CW maksymalną uzyskana mocą było 18 dBm. Ponieważ moc ta była mniejsza od oczekiwanego minimum, końcowy wzmacniacz AH117 zasilono napięciem 5 V. W tym przypadku maksymalna zmierzona moc radiowa wyniosła 24 dBm. W trybie wyłączenia układów CC1000 (pd) układ pobie-

ra 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 [2], APRS [1], siecią APRS-IS, siecią uniwersyteckich stacji naziemnych GENSO [7, 8] oraz systemem Rozproszonej Stacji Naziemnej DGSS [3, 4, 5, 6]. 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 nadawał sygnał o szerokości pasma około 50Hz. 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 spalanie się satelity w atmosferze Ziemi.

3. Płytki PCB

System C&CS zrealizowany jest na dwustronnym laminacie FR4 o wymiarach 80x80x1 mm (Rys. 5).



Rys. 5. Płytki PCB systemu C&CS

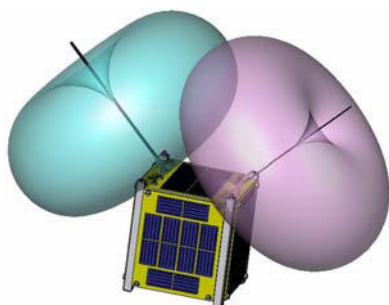
Elementy montowane są głównie na górnej warstwie (Rys. 6), aby dolna warstwa zawierała jak największą powierzchnię masy. Jest to niezbędne, aby zachować odpowiednią impedancję linii sygnałowych.



Rys. 6. Zmontowany układ C&CS

4. System antenowy

System antenowy stanowią dwa ćwierćfalowe monopole (wykonane z paska blachy sprężystej). Są one zamontowane bezpośrednio do laminatu (Rys. 8), 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. 7).



Rys. 7. Model charakterystyki promieniowania anten systemu C&CS

Przebiegi anten przez górną ścianę satelity (Rys. 8) następuje poprzez materiał dielektryczny (aby przebiegi zachowały charakter linii koncentrycznej szkieletów oraz ścianka górna satelity nie zawiera żadnych metalowych powierzchni oraz elementów w promieniu jednego cm od anten).



Rys. 8. System antenowy, przejście przez ścianę satelity

5. Podsumowanie.

System C&CS to przemyślana konstrukcja, która łączy zalety systemów redundancyjnych przy zachowaniu niewielkich rozmiarów oraz niewielkim zapotrzebowaniu na energię. W artykule przedstawiono szczegóły budowy systemu, opis jego działania oraz wyniki przeprowadzonych testów. W momencie pisania artykułu sprzętowa część systemu była całkowicie zaprojektowana i budowany był jej model kwalifikacyjny. Oprogramowanie było na etapie modelu inżynierskiego.

SPIS LITERATURY

- [1] The APRS Working Group, *APRS protocol reference. Protocol Version 1.0.*, TAPR Publication Number: 99-4
- [2] Amateur Packet-Radio Group, *AX.25 Amateur Packet-Radio Link-Layer Protocol*, <http://sq2foa.republika.pl/AX25.txt>
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Neil Melville, *A Global Educational Network for Satellite Operations*, http://www.genso.org/component/option.com_domain/task.doc_downloading/gid.54/Itemid.28/
- [8] Neil Melville, *A European Perspective on a Global Educational Ground Station Network*, The 1st International Workshop on Ground Station Network, 18 July 2006, Tokyo
- [9] California Polytechnic State University, *CubeSat Design Specification*, http://cubesat.atl.calpoly.edu/media/CDS_rev11.pdf