

BALONY STRATOSFERYCZNE

TANIA PLATFORMA TESTOWANIA SYSTEMÓW KOSMICZNYCH

Marcin Stolarski

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Instytut Radioelektroniki
Politechnika Warszawska
M.Stolarski@elka.pw.edu.pl

Streszczenie: Autor zajmuje się tematyką testowania systemów kosmicznych. Przedstawia możliwe przyczyny awarii satelitów. W dalszej części artykułu przedstawia szczegółową analizę kilku misji stratosferycznych przeprowadzonych przy wykorzystaniu balonów. Wykazuje problemy systemów pokładowych w gondolach balonowych oraz ich podobieństwo do problemów w misjach kosmicznych. W końcowej części artykułu przedstawia porównanie problemów i testów przeprowadzonych w misjach kosmicznych oraz balonowych broniąc tezy, że możliwe jest wykorzystanie balonów stratosferycznych jako uzupełnienie testów komponentów satelitarnych w procesie prototypowania, zanim zostaną one poddane procesowi certyfikacji. Wskazuje też, że misje balonowe mogą być szczególnie przydatne przy realizacji projektów studenckich.

1. WSTĘP

Jednym z ważniejszych procesów podczas budowania satelitów jest prototypowanie komponentów oraz ich testowanie. Proces ten związany jest zwykle z cyklicznym procesem budowania prototypu, wprowadzania poprawek, testowania itd. Podczas tego procesu wykonuje się testy w specjalistycznych laboratoriach, bazują one na zastosowaniu komór klimatycznych oraz próżniowych, wytrząsarek oraz komór do testów radiowych. Czasami niektóre koncepcje testuje się w postaci misji kosmicznych takich jak misja YES2 [1]. Proces ten jest niezwykle kosztowny. Autor proponuje zastosowanie balonów stratosferycznych, aby obniżyć koszty przeprowadzenia części testów. Pozwalają one na wychwycenie części błędów przed kolejnymi testami. Testy takie mogą być szczególnie przydatne w misjach studenckich, które mają ograniczony budżet.

2. PROBLEMY ZWIĄZANE Z PROTOTYPOWANIEM I TESTOWANIEM

Jednym z powodów, dla których budowanie satelitów jest bardzo trudne, to brak dostępności do satelity po jego wyniesieniu na orbitę. Warunek ten powoduje, że czasami trywialna awaria na orbicie unieruchamia całkowicie satelitę. Jako przykład może tu posłużyć satelita SSETI EXPRESS [2], który z powodu zwarcia w systemie zasilania po rozładowaniu akumulatora całkowicie się wyłączył. Przyczyn takich awarii może być wiele.

Przyczyny uszkodzeń satelitów na orbicie:

1. Uszkodzenia mechaniczne (od wstrząsów spowodowanych wyniesieniem na orbitę).
2. Uszkodzenia termiczne (związane z brakiem konwekcji, nagrzania przez słońce, zamrznięcia).
3. Uszkodzenia związane z promieniowaniem kosmicznym [13].
4. Uszkodzenia związane z gazowaniem elementów w próżni.
5. Problemy związane z mikrogravitacją.
6. Problemy związane z niedoskonałością modelu teoretycznego badanych zjawisk (nieprzewidziane problemy nieuwzględnione w symulacjach).
7. Problemy związane z komunikacją międzyludzka (niejednakowe zrozumienie dokumentacji).
8. Problemy związane z systemami zasilania.
9. Problemy związane z komunikacją pomiędzy komponentami satelity.

10. Problemy związane z systemami komunikacyjnymi.
11. Problemy związane z kompatybilnością elektromagnetyczną.
12. Błędy ludzkie związane ze stresem, ograniczeniami czasowymi itp.

Aby minimalizować awarie satelity przeprowadza się odpowiednie testy [3].

Testy satelity (odpowiednio do wcześniej przedstawionych przyczyn awarii):

1. Wytrząsanie urządzeń na wytrząsarkach, testy w komorach dźwiękowych.
2. Testy w komorze termicznej (test pracy urządzeń przy wysokiej oraz niskiej temperaturze, testy przy zmianie temperatury, uruchamianie urządzenia w skrajnych temperaturach).
3. Używanie komponentów odpornych na promieniowanie. Testy komponentów testowych w komorach promieniotwórczych. Modelu lotnego satelity nie testuje się na wytrzymałość na promieniowanie.
4. Testy w komorze próżniowej. Dodatkowo podczas tych testów przeprowadza się testy temperaturowe jak w komorze klimatycznej.
5. Testy mikrograwitacyjne podczas lotów parabolicznych.
6. Uruchamianie urządzeń w symulowanych warunkach naziemnych. Czasami wysyła się satelitę, aby potwierdzić model teoretyczny.
7. Testy osobowe. Urządzenie budowane przez jedną osobę testowane jest przez inną osobę.
8. Testy integracyjne i kwalifikacyjne.
9. Testy z wykorzystaniem symulatorów urządzeń.
10. Testy w radiowej komorze bezdechowej.

Realizacja tych testów jest kosztowna i czasochłonna. W przypadku satelitów studenckich często testy są robione niestarannie albo wręcz są pomijane.

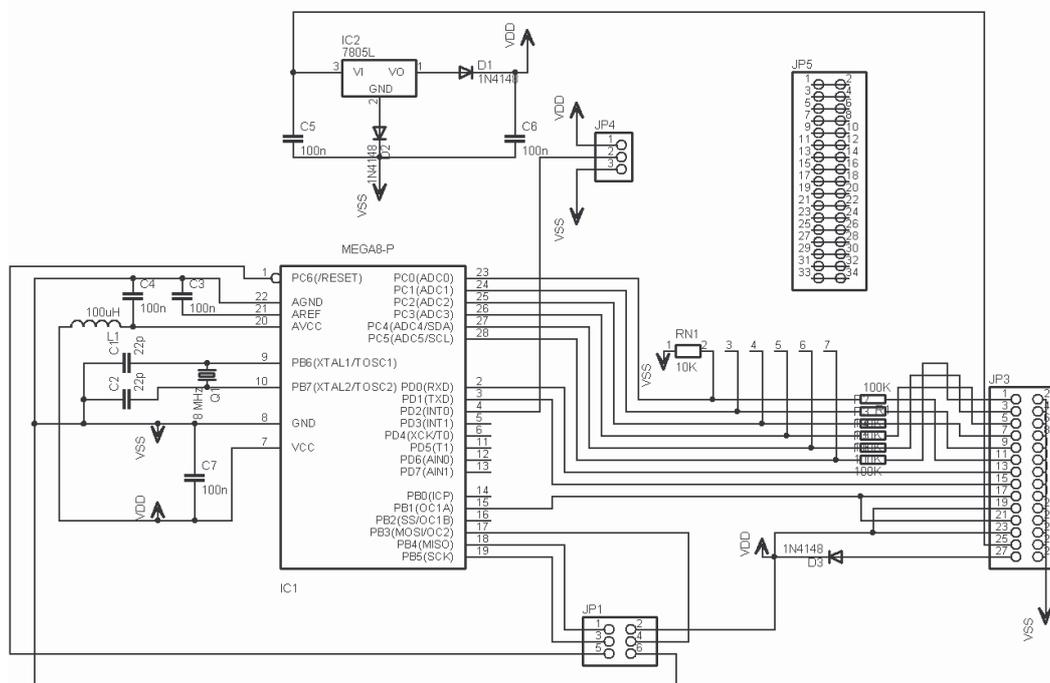
3. MISJE BALONOWE

Podczas własnych prac badawczych związanych z technikami satelitarnymi autor często posługiwał się balonami stratosferycznymi w procesie prototypowania komponentów. Balon stratosferyczny [4] pozwala na wyniesienie komponentu na wysokość około 40km nad powierzchnię Ziemi. Podczas lotu urządzenia mogą zostać poddane ekstremalnym warunkom środowiskowym takimi jak temperatury poniżej -70 stopni Celsjusza, ciśnienie 5Pa, zwiększonemu napromieniowaniu (np. na wysokości 40km urządzenia narażane są na 10-krotnie większą dawkę promieniowania protonowego niż na Ziemi [13]) czy mikrograwitacja. Taka misja ma też znamiona misji kosmicznej, ponieważ podczas misji nie ma dostępu do urządzenia, a jego sterowanie może się odbywać jedynie drogą radiową.

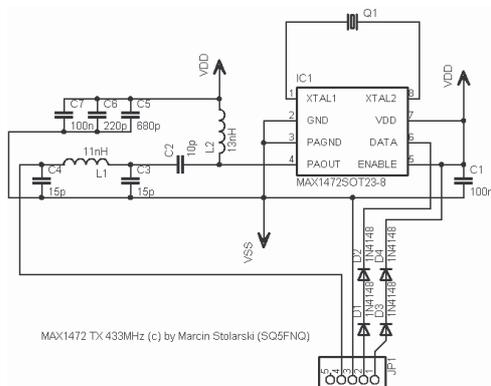
3.1. Opis modułu Świerszcz

Do 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 [Rys1]. Do niego został dołączony cyfrowe termometry po magistrali 1wire, DALLAS DS18S20 (mierzącego temperaturę w zakresie od -50 do 125 stopni Celsjusza) oraz nadajnika CW (ASK) pracującego w paśmie 70cm [Rys2] z mocą 10mW. Całość była dostosowana do zasilania przez ogniwo paliwowe, które dostarczało napięcie około 12V 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

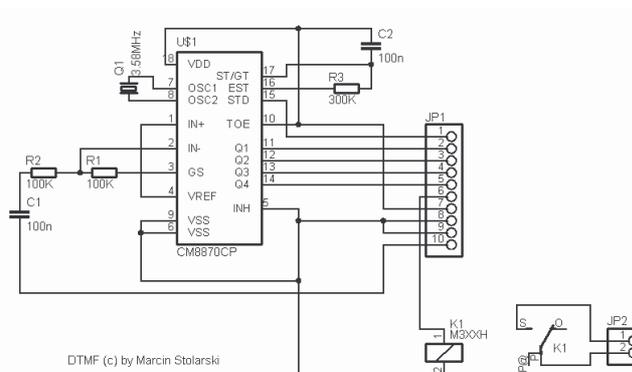
[Rys3] oraz przekaźników, które pozwalały na zdalne uwalnianie ładunków. Ostatnią zastosowaną modyfikacją było dodanie wysyłania SMS-ów z telemetrią za pomocą telefonu GSM. W kolejnych wersjach modułu poprawiano także protokół komunikacyjny, aby ułatwiać eksperymenty związane z Rozproszoną Stacją Naziemna DGSS [5,6,7,8]. System ten wykorzystując jednoczesny odbiór danych przez wiele stacji naziemnych poprawia jakość łącza, ale wymaga dodania do protokołu mechanizmów synchronizujących system.



Rys 1. Schemat modułu Świerszcz 2.



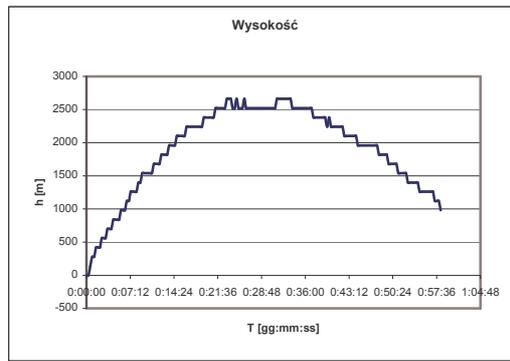
Rys2. Schemat nadajnika opartego na układzie MAX1472.



Rys3. Schemat dekodera DTMF.

3.2. Misja Świerszcz 1

Misja Świerszcz 1 była pierwszym projektem balonowym realizowanym przez autora. Za pomocą balonu gronowego udało się osiągnąć wysokość około 2.5 km [Rys4]. 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 40km, co pokazało, że taki opracowany system transmisji jest rozwiązaniem dobrym.

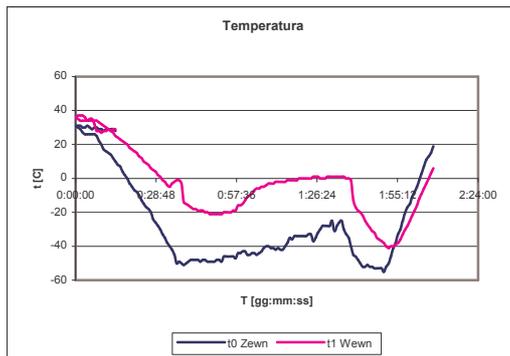


Rys 4. Wysokość lotu misji Świerszcz 1.

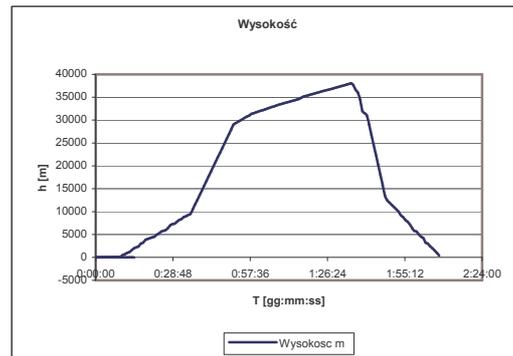
3.3. Misja BOBAS

Misja BOBAS miała składać się z kilku modułów. Miały to być:

- Modułu Świerszcz 2 (ulepszona wersja modułu Świerszcz 1; dodano pomiar napięć pokładowych oraz obsługę dwóch termometrów do pomiaru temperatury zewnętrznej oraz wewnętrznej).
- Systemu GPS.
- Modułu komunikacyjnego satelity PW-Sat [9].
- Modułu komunikacyjnego satelity YES2.
- Kamery TV wraz z nadajnikiem 2.4GHz FM.
- Systemu zasilania opartego o ogniwo paliwowe oraz baterie alkaiczne.



Rys 5. Temperatura podczas misji BOBAS.



Rys 6. Wysokość lotu misji BOBAS.

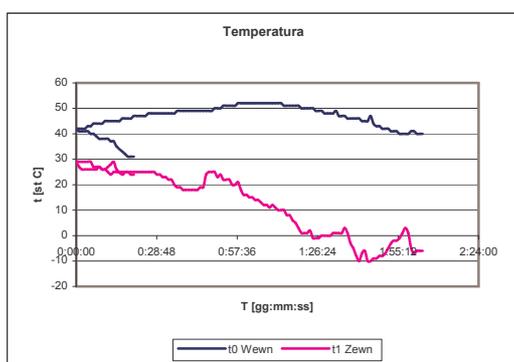
Niestety poważna awaria zasilania podczas testów kwalifikacyjnych doprowadziła do uszkodzenia większości modułów przeddzień startu. W dniu startu został użyty jedynie moduł Świerszcz 2. Wykorzystano także profesjonalny balon stratosferyczny, który pozwolił na osiągnięcie wysokości 40 km [Rys6]. Podwójny system zasilania pozwalał na podgrzewanie elektroniki podczas lotu oraz długotrwałą pracę nadajnika po wylądowaniu, co było podyktowane próbą odnalezienia gondoli metodą radiopelengacji. Podczas lotu telemetria pozwoliła wykryć nieszczelność gondoli. Nieszczelność ta pozwoliła na zbadanie działania komputera pokładowego w niskich temperaturach dochodzących do -40 stopni Celsjusza [Rys5] (pomiarów temperatury poniżej -50 stopni obarczone są błędem ze względu na nieprawidłową pracę czujnika w tak niskich temperaturach; na wykresie temperatury pomiary w czasie bliskim zeru mają podwójne wartości; są to wartości przed startem gdzie oś czasu narasta w kierunku zera (czas ma wartości ujemne) oraz po starcie gdzie oś czasu narasta w kierunku nieskończoności). Z balonu odbierano cały czas telemetrie, 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.

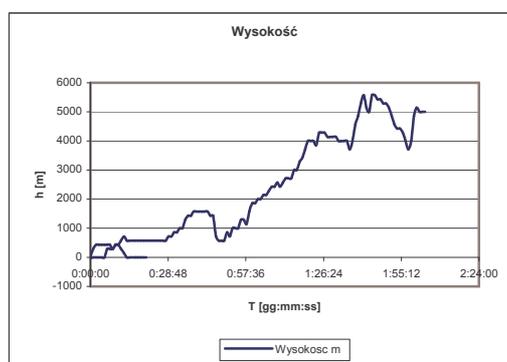
3.4. Misja BOBAS 2

Misja BOBAS 2 była niejako powtórzeniem misji BOBAS. System składał się z:

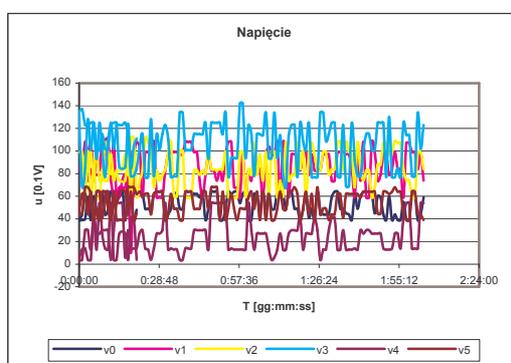
- Modułu Świerszcz 3 (dodano obsługę GPS, poprawiono protokół komunikacyjny, aby poprawić własności systemu DGSS).
- Urządzenia GPS.
- Kamery TV i nadajnika na 2.4GHz 300mW FM.
- Modułów OBC (komputer pokładowy) i COMM (system komunikacyjny) satelity PW-Sat.
- Baterii litowych.



Rys 7. Temperatura podczas misji BOBAS 2.



Rys 8. Wysokość lotu misji BOBAS 2.



Rys 9. Napięcia pokładowe podczas misji BOBAS 2.

Start balonu był poważnie opóźniony z powodu wprowadzania poprawek, co uniemożliwiło przeprowadzenie testów przedstartowych. Bezpośrednim skutkiem takiej polityki stało się stwierdzenie zaraz po starcie nie działania podsystemu GPS. Niestety nie było już możliwości wprowadzania poprawek. Brak działającego GPS-a uniemożliwił poszukiwanie gondoli po zakończeniu misji. Późniejsza analiza wykazała niekompatybilność elektromagnetyczną podsystemów. Zobrazowane jest to na Rys 9, gdzie widać duże skoki napięcia mierzone przez moduł Świerszcz 3. Jednoczesna praca 3 nadajników (Świerszcz 3, PW-Sat, kamera TV) skutecznie uniemożliwiły synchronizację modułu GPS. Zakłócenia na liniach zasilających doprowadziły do zawieszenia się modułu Świerszcz 3 po 2 godzinach misji. Wprowadzone poprawki w protokole transmisji (dodano licznik ramek na początku i na końcu pakietu) bardzo ułatwiło łączenie odebranej przez wiele stacji naziemnych telemetrii i

dalsze prace nad systemem DGSS. Duże upakowanie elementów blisko siebie doprowadziło do wzrostu temperatury w gondoli do ponad 50 stopni Celsjusza [Rys7]. Balon, zanim wyleciał z horyzontu radiowego, osiągnął pułap ponad 5 km [Rys8]. Przez ten czas doskonale odbierano obraz TV z kamery pokładowej, co wykazało poprawne działanie tego systemu pomimo dużej odległości. Odebrano też część telemetrii z modułów PW-Sat, pokazało to, że systemy te działają, ale wymagają dalszej pracy.

3.5. Misja BOBAS 3

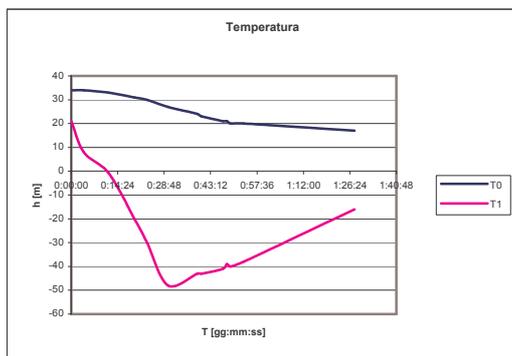
Celem kolejnej misji (BOBAS 3) było przetestowanie lądownika kosmicznego Fotino biorącego udział w misji YES2. Planowane było wyniesienie lądownika na wysokość 25 km a następnie jego zdalne zrzucenie z tej wysokości. Kiedy misja została przygotowana, firma Delta-Utec [10] (realizująca misję YES2) przekazała informację, że nie będzie w stanie dostarczyć lądownika do testów ze względu na inne nagłe testy misji YES2. Wobec takiej sytuacji zamiast lądownika przygotowano drugą kapsułę z kamerą TV. W misji wykorzystano następujące komponenty:

- Moduł Świerszcz 4 (dodano obsługę telefonu GSM, odbiór komend w standardzie DTMF, obsługę dwóch przekaźników).
- Moduł GPS.
- Telefon GSM (do wysyłania wiadomości SMS z pozycją gondoli).
- Moduł APRS [11] TiniTrack [12] (służący do przekazywania pozycji GPS przez zwykły nadajnik radiowy FM).
- Transceiver LPD (do odbierania komend DTMF i nadawania telemetrii APRS, moc 300 mW FM 433 MHz).
- Dwa moduły sterowane elektrycznie do zrzucania ładunków.
- Kamera TV z nadajnikiem 2.4GHz 300mW FM.

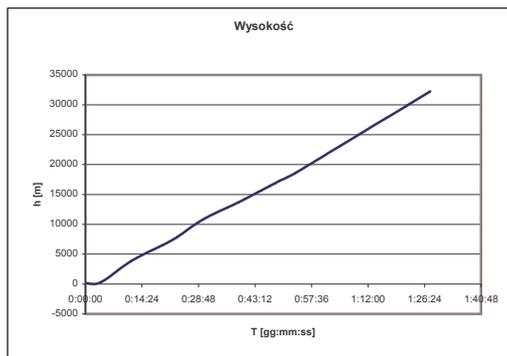
Wykorzystując doświadczenia z poprzednich misji wprowadzono poprawki w instalacji podsystemów. W głównej gondoli zainstalowano moduły Świerszcz 4, telefon GSM, GPS, oraz systemy zdalnego uwalniania ładunków. W drugiej gondoli (powieszona metr pod pierwszą) zainstalowano kamerę TV oraz nadajnik TV. Dodatkowo w samej gondoli zamocowano dodatkowe osłony aluminiowe, aby maksymalnie odseparować antenę GPS od nadajnika TV. Do komunikacji wykorzystano potrójną redundancję systemów komunikacyjnych. Składała się ona z nadajnika CW oraz telefonu GSM (przekazujących telemetrię z modułu Świerszcz 4), a także z nadajnika FM podłączonego do modułu APRS. Dodatkowo system pozwalał na przesyłanie komend do modułu Świerszcz 4 za pomocą nadajnika FM i kodera DTMF. W trakcie misji gondola dotarła na wysokość około 35km. [Rys11] Sprawdzono działanie systemu zrzucania ładunków na Ziemi oraz na wysokości 20km. 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 telefonu komórkowego) zostały skompensowane przez systemy zapasowe. Z powodzeniem odebrano obraz video pomimo dużej odległości między stacją naziemną a gondolą oraz nadajnika małej mocy (300mW). Zbadano też jakość izolacji termicznej wykorzystanej do budowy gondoli. Podczas lotu zmierzono temperatury [Rys10] wewnątrz (15 stopni Celsjusza) i na zewnątrz gondoli (<-50 stopni Celsjusza), co wykazało wystarczającą skuteczność zastosowanych materiałów i ogrzewania wnętrza przez samą pracującą elektronikę.

Misja BOBAS 3 okazała się pełnym sukcesem. System zdalnego uwalniania ładunków zadziałał prawidłowo w ekstremalnych warunkach. Oznacza to, że będzie on mógł być wykorzystywany do testowania lądowników kosmicznych z wykorzystaniem balonów

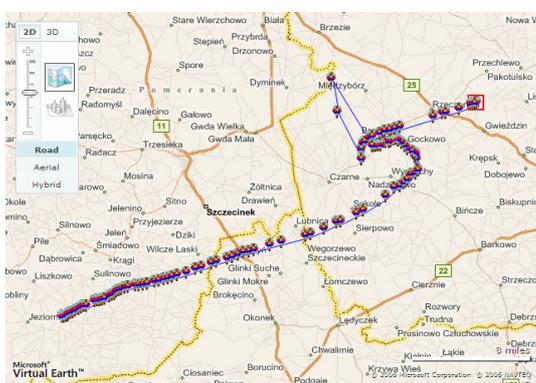
stratosferycznych. Potrójna redundancja systemu komunikacji pozwoliła pomimo nieprzewidzianych trudności i awarii na prawidłowe przeprowadzenie misji i odzyskanie ładunku. Przy okazji nagrano ciekawy materiał filmowy pokazujący widok Ziemi z 35 km [Rys13] (widać krzywiznę Ziemi, czarny kosmos, oraz cienką warstwę atmosfery).



Rys 10. Temperatura podczas misji BOBAS 3.



Rys 11. Wysokość lotu misji BOBAS 3.



Rys 12. Trasa lotu misji BOBAS 3.



Rys 13. Widok z kamery pokładowej misji BOBAS 3

4. SYSTEM ROZPROSZONEJ STACJI NAZIEMNEJ (DGSS)

System Rozproszonej Stacji Naziemnej DGSS [5,6,7,8] polega na równoległym odbiorze sygnału z tego samego nadajnika przez wiele stacji naziemnych. Wykorzystując wielokrotny odbiór tego samego źródła wieloma odbiornikami z określoną jakością łącza, to poprzez porównanie otrzymanych pakietów otrzymujemy dane z mniejszą ilością błędów. Zjawisko to wynika z tego 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. Założenie to można przedstawić w postaci formuły 1, gdzie B_i to procentowy udział błędów nieskorelowanych w kolejnych odbiornikach, a B_x to procentowy błąd wynikowy po porównaniu strumieni danych.

$$B_x = \prod_{i=1}^n B_i \quad (1)$$

W misjach BOBAS i BOBAS 2 odbierano dane przy wykorzystaniu wielu stacji naziemnych. Wyniki przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1 Jakość odbieranych danych podczas misji balonowych.

Nazwa misji	Nazwa stacji odbiorczej	Procentowy udział błędów (Bi)
BOBAS	SQ5FNQ	10%
	SQ5GVY	95%
	SQ5LTT	99%
	Błąd sumaryczny (DGSS)	9%
	Błąd wyliczony (Bx)	9%
BOBAS 2	SQ5FNQ	38%
	SQ5FG	44%
	SQ5GVY	85%
	SP4XYD	100%
	Błąd sumaryczny (DGSS)	11%
	Błąd wyliczony (Bx)	14%

Przedstawione wyniki pokazują, że po zastosowaniu mechanizmu DGSS sumaryczny błąd jest mniejszy niż błędy pojedynczych stacji. W misji BOBAS tylko stacja SQ5FNQ odbierała dane z dobrą jakością. Pozostałe stacje odbierały głównie błędne dane. Mimo tak dużej ilości 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 jeszcze lepsze wyodrębnienie danych z nieskorelowanych zakłóceń pokazując że zastosowanie systemu DGSS poprawia jakość łącza.

5. PODSUMOWANIE

Autor niniejszego artykułu przedstawił przebieg kilku misji stratosferycznych. Wykorzystywane one były między innymi do przetestowania modeli laboratoryjnych komponentów kosmicznych. Misje te pokazały, że realizacja testów z wykorzystywaniem misji balonowych pozwoliły wykryć część błędów w podsystemach. Badania prowadzono w ramach misji studenckich, które mimo określonych norm prowadzenia projektów mają tendencję do większej ilości usterek i błędów w procesie projektowania satelity. Loty balonowe pozwalają na przeprowadzenie szeregu testów zanim gotowy element zostanie poddany certyfikacji do lotu w kosmos. Testy takie pozwalają na zmniejszenie ryzyka wykonywania wielokrotnego testów certyfikacyjnych. Szczegółowe porównanie można znaleźć w zestawieniach poniżej.

Przyczyny uszkodzeń satelitów na orbicie w porównaniu z testami balonowymi:

1. Uszkodzenia mechaniczne (od wstrząsów spowodowanych wyniesieniem na orbitę). Testy balonowe nie są odpowiednie do tego typu testów.
2. Uszkodzenia termiczne (związane z brakiem konwekcji, nagrzania przez Słońce, zamrażnięcia). Balony latają w ekstremalnym środowisku (do -70 stopni Celsjusza i ciśnienie 5Pa), co pozwala na testy wychładzania struktur a zarazem

przez brak czynnika konwekcyjnego (niskie ciśnienie powietrza) na testy przegrzewania się struktur. Za przykład może posłużyć nieplanowane wychłodzenie elektroniki w misji BOBAS.

3. Uszkodzenia związane z promieniowaniem kosmicznym. Promieniowanie kosmiczne na 40 km jest dużo większe niż na Ziemi [13]. Czas, jaki przebywa elektronika w tym środowisku, jest jednak zbyt krótki, aby przeprowadzić prawidłowe testy odporności na promieniowanie.
4. Uszkodzenia związane z gazowaniem elementów w próżni. Niskie ciśnienie na wysokości 40 km pozwala na wyłapanie szybkich uszkodzeń związanych z niskim ciśnieniem (np. wyciek z kondensatorów). Krótki czas ekspozycji i dynamiczne środowisko raczej uniemożliwiają przeprowadzenie kompleksowych testów odgazowania.
5. Problemy związane z mikrogravitacją. Swobodny spadek z wysokości 40 km pozwala przez kilka minut symulować stan mikrogravitacji. Podczas misji BOBAS 3 po pęknięciu balonu obserwowano swobodne obracanie się kamery wynikające z braku naprężenia linki pomiędzy kapsułą a spadochronem. Możliwe jest przeprowadzenie misji polegającej na wyniesieniu ładunku na wysokość 40km, jego swobodne uwolnienie i otwarcie spadochronu na wysokości 30km. Podczas lotu bez spadochronu możliwe jest przeprowadzanie eksperymentów w warunkach mikrogravitacji przez okres ponad 30 sekund.
6. Problemy związane z niedoskonałością modelu teoretycznego badanych zjawisk (nieprzewidziane problemy nieuwzględnione w symulacjach). Misja balonowa to doskonałe miejsce do przeprowadzania takich eksperymentów. Za przykład mogą posłużyć eksperymenty związane z komunikacją DGSS, czy zrzucanie ładownika kosmicznego z dużej wysokości.
7. Problemy związane z komunikacją międzyludzką (niejednakowe zrozumienie dokumentacji). Każda z przedstawionych misji balonowych wykazywała duże problemy komunikacyjne pomiędzy zespołami. Misje balonowe są czynnikiem sprawdzającym tę komunikację jeszcze na etapie prototypowania zmniejszając ich znaczenie przy integracji satelity. Takie problemy nie powinny mieć miejsca na etapie integracji i testy balonowe powinny jedynie potwierdzać taki stan rzeczy po wcześniejszych testach laboratoryjnych.
8. Problemy związane z systemami zasilania. Misja BOBAS pokazała, że problemy w systemie zasilania mogą być przyczyną poważnych awarii podsystemów. W przypadku misji balonowych możliwe jest łatwe powtórzenie eksperymentu. W przypadku misji kosmicznej jest to bardzo kosztowne.
9. Problemy związane z komunikacją pomiędzy komponentami satelity. Przykładem takiego testu była misja BOBAS 2, gdzie różne komponenty komunikowały się ze sobą. Misje balonowe mogą być kamieniami milowymi podczas realizacji projektu, kiedy wstępna integracja komponentów sprawdza tę komunikację. Takie problemy nie powinny mieć miejsca na etapie integracji i testy balonowe powinny jedynie potwierdzać taki stan rzeczy po wcześniejszych testach laboratoryjnych.
10. Problemy związane z systemami komunikacyjnymi. Każda z misji wymagała systemu komunikacji z Ziemią. W szczególnych przypadkach sama komunikacja była swego rodzaju testem (np. test modułów komunikacyjnych satelity PW-Sat). Misje balonowe pozwalają na dość dobre badanie systemów komunikacyjnych dzięki wykorzystaniu dużej wysokości, a zarazem dużej wielkości wolnej przestrzeni pomiędzy testowanymi systemami radiowymi, a stacją naziemną. Należy zwrócić uwagę, że system balonowy nie symuluje efektu Dopplera związanego z szybkim przemieszczaniem się satelity. Efekt taki należy symulować za pomocą symulowanego rozstrajania systemów radiowych.

11. Problemy związane z kompatybilnością elektromagnetyczną. Duże upakowanie elementów na niewielkiej powierzchni wymaga kompatybilności elektromagnetycznej. Misja BOBAS 2 pokazała, że brak takiej kompatybilności może być przyczyną wielu problemów wykazując użyteczność balonów w takich testach. Testy tego typu powinny się realizować w warunkach laboratoryjnych, a eksperyment balonowy powinien być tylko potwierdzeniem takiej kompatybilności.
12. Błędy ludzkie związane ze stresem, ograniczeniami czasowymi itp. W zasadzie każda z misji miała problemy związane ze stresem przed startem. Powodowało to opóźnienia startu, czy awarie podczas lotu. Misje balonowe pozwalają przenieść część tych problemów z okresu startu satelity na okres prototypowania, co jest zdecydowanie bezpieczniejsze dla projektów kosmicznych. Tego typu problemy to domena głównie misjach z udziałem studentów, dla których praca w takim projekcie nie jest głównym zajęciem. W misjach profesjonalnych zarządzanie czasem oraz zasobami ludzkimi niwelują tego typu problemy i jeśli się zdarzają bardzo źle świadczą o szefach projektu.

Zestawienie to pokazuje, że choć misje balonowe nie pozwalają na przeprowadzenie wszystkich testów, to jednak pozwalają na przeprowadzenie znacznej ich części. Należy jednak pamiętać, że testy te nie zastępują certyfikacji komponentów przed lotem w kosmos. Służą one jedynie do testowania komponentów zanim poddane zostaną certyfikacji. Loty balonowe wydają się też szczególnie zalecane w misjach studenckich. Pozwalają na przetestowanie komponentów misji w prawdziwych warunkach bojowych pozwalając ujawnić ukryte niedoskonałości projektu.

LITERATURA

- [1] <http://www.yes2.info>, Strona WWW projektu YES2
- [2] <http://www.sseti.net>, Strona stowarzyszenia SSETI
- [3] Piotr Orleański, Technologie Kosmiczne, CBK PAN
- [4] Henryk Ordakowski, Kazimierz Stefanicki, Pomiar Radiosondażowe w IMGW, Ośrodek Aerologii
- [5] K. Dąbrowska, M. Stolarski, Ground Segment of Distributed Ground Station System, Materiały konferencyjne CD-ROM z IEEE Region 8 EUROCON 2007, Warszawa, 9-12 września 2007
- [6] M. Stolarski, System porównywania pakietów jako metoda poprawiania jakości łącza satelitarne w Rozproszonej Stacji Naziemnej, Materiały VII Seminarium stypendystów Fundacji Wspierania Rozwoju Radiokomunikacji i Techniki Multimedialnych, Warszawa, 6 grudnia 2006, s. 35-42
- [7] M. Stolarski, The Use of Distributed Ground Station System for very low power communication, Materiały konferencyjne CD-ROM z The 1st International Workshop on Ground Station Network Tokyo 2006, 18-19 Lipca 2006, Japonia
- [8] M. Stolarski, W. Winiecki, Building Distributed Ground Station With Radio Amateurs, Materiały konferencyjne ze Space Technology Workshop STW 2006, Kraków, 23 maja 2006, Polska, str. 49-54
- [9] Grzegorz Niemirowski, Cubesat microsatellite with balloon, 56th International Astronautical Congress in Fukuoka, Październik 2005
- [10] <http://www.delta-utec.com/>, Strona firmy DELTA-UTEC
- [11] <http://www.aprs.pl>, Strona WWW systemu APRS
- [12] <http://www.byonics.com/tinytrak/>, Strona WWW projektu TinyTrack
- [13] Mike Maher and others, Radiation Owner's Manual, National Semiconductors