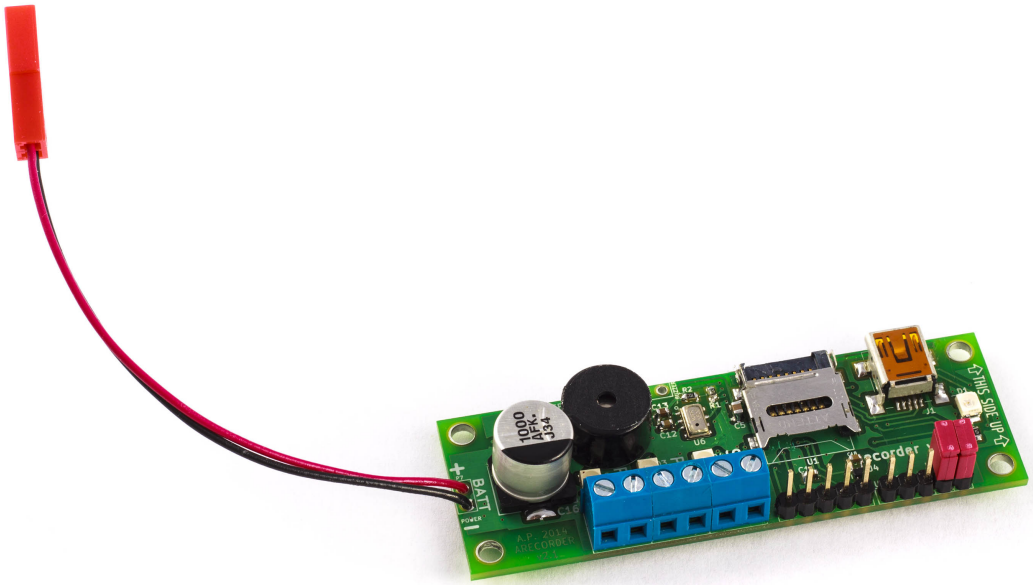
Arecorder

v. 2.1



Arkadiusz Paliński

Gdańsk, 2015 rok

Podziękowania

Specjalne podziękowania dla Andrzeja i Roberta Magiery,
bez których nie udałoby mi się stworzyć Arecordera.

Spis treści

Podziękowania 1

1. Wstęp 4

2. Opis wyprowadzeń 6

2.1. Zasilanie 6
2.2. Złącze dodatkowego brzęczyka 7
2.3. Złącze wyboru programu 7
2.4. Złącze karty micro SD 8
2.5. Złącze programujące mikrokontroler 9
2.6. Złącze programujące parametry Arecordera 9
2.7. Wyzwalanie zapalników 9

3. Format danych zapisywanych na karcie SD 10

3.1. Format danych pliku z danymi pomiarowymi 10
3.1.1. Nagłówek 10
3.1.2. Właściwe dane pomiarowe 12
3.1.3. Dane podsumowujące 12
3.1.4. Konwersja danych 12
3.2. Format danych pliku z danymi podsumowującymi 13

4. Opis działania 16

4.1. Obliczenia dokonywane przez Arecorder 16
4.2. Stan 0 - oczekiwanie na inicjalizację 17
4.2.1. Tryb konfiguracji 18
4.2.2. Tryb Lotu 18
4.3. Stan 1 - oczekiwanie na start rakiety 19
4.4. Stan 2 - silnik pierwszego stopnia aktywny 20
4.5. Stan 3 - silnik pierwszego stopnia się wyczerpał, oczekiwanie na minięcie opóźnienia odpalenia silnika drugiego stopnia 20
4.6. Stan 4 - oczekiwanie na odpalenie silnika drugiego stopnia i jednoczesne oczekiwanie na osiągnięcie pułapu 21
4.7. Stan 5 - silnik drugiego stopnia aktywny 21
4.8. Stan 6 - oczekiwanie na osiągnięcie pułapu 21
4.9. Stan 7 - wyzwolono spadochron-pilot, oczekiwanie na wystąpienie warunku wyzwolenia spadochronu głównego 22
4.10. Stan 8 - oczekiwanie na lądowanie 23
4.11. Stan 9 - rakieta wylądowała 23
4.12. Stan 10 - zatrzymanie zapisywania danych 23
4.13. Stan 11 - pikanie brzęczyka 23

5. Parametry techniczne 24
5.1. Absolutnie maksymalne parametry 24
5.2. Parametry elektryczne 25
5.3. Parametry fizyczne i mechaniczne 26
6. Wymiarowanie 27
7. F.A.Q. - Najczęściej zadawane pytania 29
A. Słownik pojęć 31
B. Siły działające na rakietę 33
B.1. Siły działające na rakietę w czasie postoju na wyrzutni 33
B.2. Siły działające na rakietę w czasie lotu 34
C. Historia zmian 37

1. Wstęp

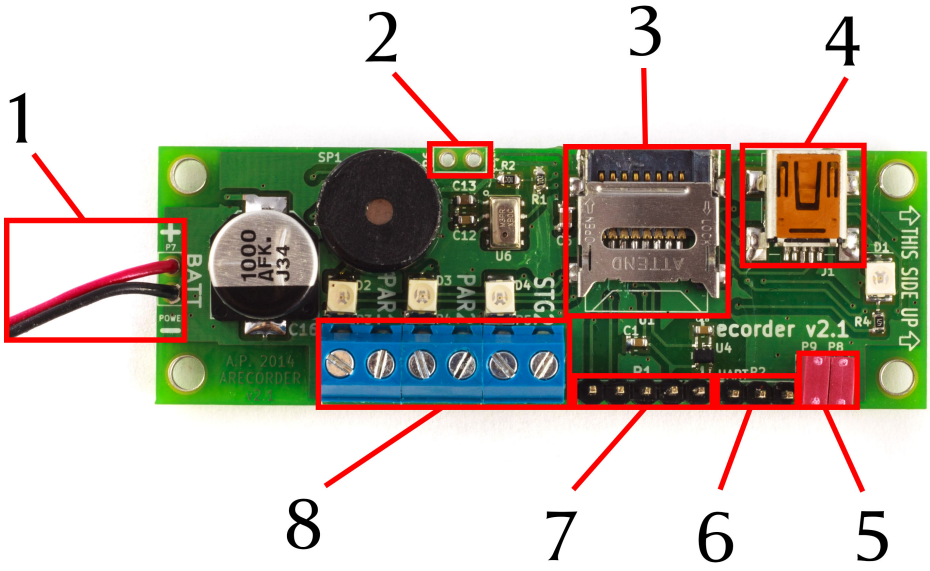
— pomiar ciśnienia w zakresie 0 - 110 kPa (w zakresie 50 - 110 kPa z dokładnością 100 Pa),
— pomiar przyspieszenia - trzy osie $\pm$ 24 g, jedna oś (wzdłuż osi rakiety) $\pm$ 80 g,
— pomiar temperatury wewnątrz rakiety w zakresie -50 do +130 [°C],
— zapis danych na karcie micro SD,
— próbkowanie danych z częstotliwością 100 $\frac{Sa}{s}$,
— zaimplementowany filtr Kalmana do odszumienia pomiarów ciśnienia,
— wykrywanie i sygnalizowanie podpiętych zapalników,
— wyzwalanie trzech zapalników - dwóch spadochronów i drugiego stopnia rakiety,
— wyzwalanie spadochronu głównego po wykryciu awarii spadochronu-pilota,
— wykrywanie i zapis kąta pochylenia rakiety na wyrzutni,
— pomiar napięcia zasilania Arecordera,
— programowalny czas opóźnienia pomiędzy końcem pracy pierwszego silnika a odpaleniem silnika drugiego stopnia,
— wybór jednego z czterech zestawów parametrów konfiguracyjnych Arecordera,
— programowanie parametrów konfiguracyjnych Arecordera oraz imienia, nazwiska i numeru telefonu właściciela za pomocą programu na komputerze PC,
— zapis podsumowania lotu w formie kilkunastu najważniejszych parametrów lotu.

Arecorder jest urządzeniem przeznaczonym do rejestrowania danych podczas lotu rakiety oraz wyzwalania zapalników w określonych chwilach. Urządzenie jest przeznaczone do rakiet modelarskich średnich i dużych, również dwustopniowych i naddźwiękowych. Zastosowane algorytmy pozwalają na wykrycie sytuacji nietypowych (np. lot pod dużym kątem) i odpowiednio na nie zareagować zmniejszając ryzyko zniszczenia rakiety.

Nie jest konieczne przeczytanie całej instrukcji. Użytkownik powinien jednak przeczytać rozdziały 1, 2, 4.2 i 4.3 oraz 7.

UWAGA - Jeśli działanie Arecordera w dowolnym momencie odbiega od zamierzonego, należy przesłać wszelkie informacje o locie (w szczególności pomiary Arecordera oraz filmy z lotu rakiety) na adres konstruktora arekpalinski@gmail.com w celu weryfikacji działania Arecordera i ewentualnej korekcji błędów. Konstruktor zastrzega sobie prawo do uaktualnienia instrukcji bez uprzedniego powiadomienia

2. Opis wyprowadzeń



Rysunek 2.1. Opis wyprowadzeń Arecordera.

1. złącze zasilania,
2. złącze dodatkowego brzęczyka,
3. złącze karty micro SD,
4. złącze programujące parametry Arecordera (obecnie nieaktywne),
5. złącze wyboru zestawu ustawień,
6. złącze dodatkowe programujące parametry Arecordera,
7. złącze programujące mikrokontroler,
8. złącze do podłączenia zapalników.

2.1. Zasilanie

Jako zasilanie może być wykorzystane dowolne źródło napięcia w zakresie 4 - 10 V o niskiej impedancji (tj. mogące oddać duży prąd). Jeśli Arecorder jest wykorzystywany wyłącznie jako rejestrator danych (nie ma wyzwalać zapalników i nie są one do niego podłączone), to zasilać go można dowolnym źródłem napięcia w zakresie 3,8 - 10 V.

Zalecane zasilanie to jedno lub dwa ogniwa LiPo (w przypadku pojedynczego ogniwa powinno ono być w pełni naładowane).

Zobacz też podrozdziały 5.1 i 5.2.

2.2. Złącze dodatkowego brzęczyka

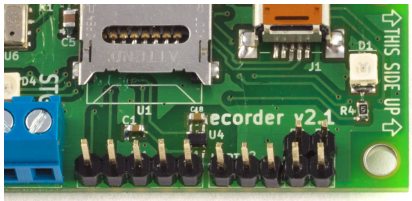
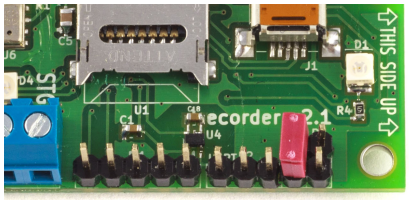
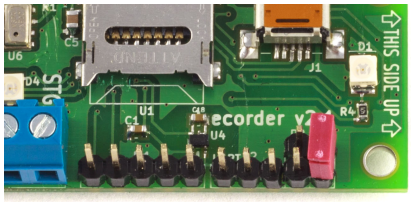
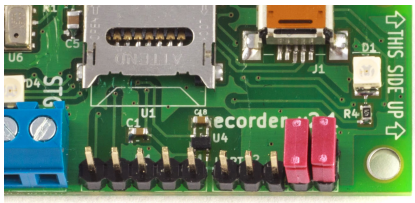
Do złącza dodatkowego brzęczyka można dołączyć dowolny brzęczyk, który może być zasilany stałym napięciem. Maksymalne napięcie zasilania dołączanego brzęczyka musi być większe niż napięcie zasilania Arecordera. Dodatkowy brzęczyk powinien być stosowany jedynie w sytuacji, gdy głośność wbudowanego brzęczyka jest niewystarczająca.

2.3. Złącze wyboru programu

Złącze wyboru zestawu ustawień służy do wyboru jednego z czterech programów - zestawów zaprogramowanych wcześniej ustawień, za pomocą zworek. Ustawienia, które są zmieniane w zależności od wyboru programu to:

— wysokość, na jakiej ma zostać wyzwolony spadochron główny,
— wysokość wyrzutni,
— opóźnienie włączenia silnika drugiego stopnia po zakończeniu pracy silnika pierwszego stopnia.

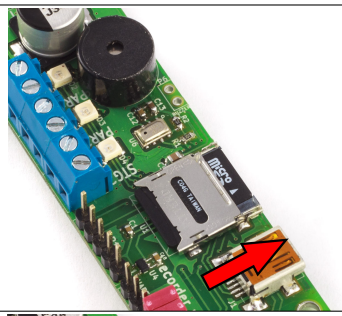
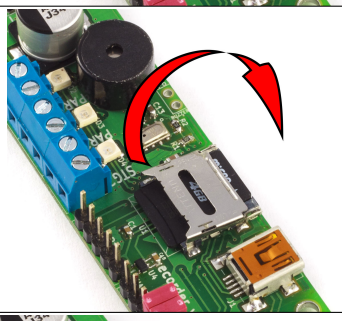
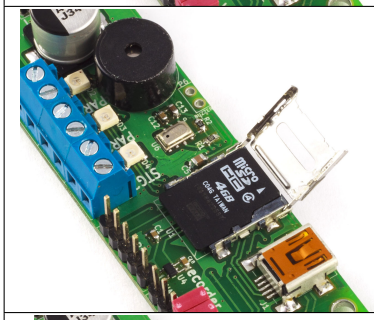
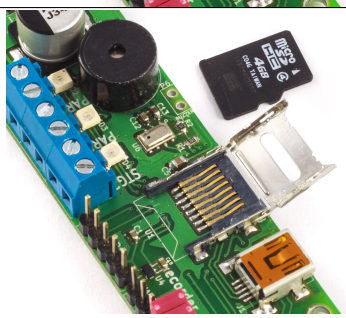
Tabela 2.1. Wybór numeru programu za pomocą zworek

	numer programu
	1
	2
	3
	4

Arecorder próbkuje złącze tylko raz, podczas włączenia. Późniejsze wyjęcie lub włożenie zworek nie spowoduje zmiany ustawień.

2.4. Złącze karty micro SD

Tabela 2.2. Wkładanie i wyjmowanie karty SD

	Należy przesunąć górną klapkę w kierunku krawędzi Arecorderza oraz wskazywanym przez napis “OPEN” na klapce, aby otworzyć zatrzask.
	Następnie należy otworzyć klapkę podnosząc koniec klapki położony bliżej środka Arecordera.
	Po podniesieniu klapki można wyjąć kartę SD.
	Aby zamknąć klapkę należy wykonać wszystkie czynności w kolejności odwrotnej (należy pamiętać o zatrzaśnięciu gniazda poprzez przesunięcie górnej klapki w kierunku “CLOSE”). Przy braku karty SD zaleca się pozostawienie Arecordera z zamkniętą klapką.

Do złącza karty SD należy włożyć kartę micro SD (bardzo zalecana jest karta micro SDHC). Na tę kartę będą zapisywane wszystkie pomierzone dane. Arecorder jest w stanie zapisać pliki o numerach od 1 do 99 na jednej karcie (każde włączenie Arecordera powoduje utworzenie dwóch plików o takich samych numerach - jednego pliku z danymi i jednego pliku z podsumowaniem lotu), zaleca się jednakże formatowanie karty przed każdym lotem.

Zaleca się formatowanie karty SD przed każdym lotem, jednakże nie jest to konieczne.

2.5. Złącze programujące mikrokontroler

Złącze programujące mikrokontroler jest używane do aktualizacji oprogramowania Arecordera. Użytkownik nie powinien używać tego złącza.

2.6. Złącze programujące parametry Arecordera

Do złącza programującego parametry Arecordera można podłączyć komputer PC, na którym został zainstalowany program AreConfig. Umożliwi to zmiany nastaw konfiguracyjnych Arecordera, wpisanie imienia, nazwiska oraz numeru telefonu właściciela oraz przetestowanie wyzwalania zapalników.

W nowej wersji oprogramowania będzie możliwe połączenie się przez port USB. Złącze to w obecnej wersji jest nieaktywne, można jednak zaprogramować parametry Arecordera poprzez dodatkowe złącze. Do tego złącza zostało wyprowadzone wyjście UART mikrokontrolera, które wysyła dane w standardzie RS-232 (poziomy logiczne CMOS). Parametry połączenia to baudrate 115200, 8 bitów danych, brak parzystości, jeden bit stopu, brak kontroli przepływu.

2.7. Wyzwalanie zapalników

Zapalniki powinny być dołączone do odpowiedniego wyjścia (PAR1, PAR2 lub STG2, które oznaczają wyzwolenie zapalników odpowiednio spadochronu-pilota, spadochronu głównego oraz drugiego członu rakiety).

Każdy z zapalników jest dołączony do zasilania dodatniego oraz do drenu odpowiadającego mu tranzystora. W przypadku wyzwolenia zapalnika, tranzystor jest włączany, co powoduje dołączenie do zapalnika masy zasilania i przepływ prądu o dużym natężeniu (zależnym od źródła zasilania).

Do każdego z zapalników dołączony jest także dodatkowy tranzystor, którego włączenie powoduje przepływ niewielkiego prądu przez zapalnik oraz diodę LED. Prąd ten jest zależny od napięcia zasilania i wynosi ok. 2 - 8 mA. Jest to zbyt mały prąd, aby spowodował wyzwolenie zapalnika, a wystarczający aby dioda LED zaświeciła się informując, że do danego wyjścia dołączony jest zapalnik.

3. Format danych zapisywanych na karcie SD

Dane są zapisane w formacie CSV, tj. poszczególne kolumny danych są oddzielone przecinkami a wiersze są oddzielone znakami nowej linii. Dane s takim formacie można otworzyć w dowolnym arkuszu kalkulacyjnym (przy importowaniu danych należy wybrać język angielski - spowoduje to prawidłowe rozpoznanie kropek jako znaków separujących części ułamkowe.

3.1. Format danych pliku z danymi pomiarowymi

Plik z danymi pomiarowymi dzieli się na trzy części - nagłówek, właściwe dane pomiarowe oraz dane podsumowujące.

3.1.1. Nagłówek

W nagłówku zapisane są dane konfiguracyjne oraz kalibracyjne Arecordera oraz imię, nazwisko i numer telefonu właściciela a także informacje o wersji zarówno układu jak i oprogramowania Arecordera.

```
Hardware version,2.1
Software version,Apr 19 2015 09:57:44
Serial number,45
Owner name,Arkadiusz Palinski
Owner phone,+48 697-541-538
Configuration selected,4
X_1_g (24g),85
Hx_1_g (80g),24
X_0_g (24g),-4
Hx_0_g (80g),-47
Y_0_g (24g),-1
Z_0_g (24g),1
Hacc present,1
SecondEngineDelayTrigger [s],0
MainParachuteTriggerHeight [m],200
LaunchpadHeight [m],1
TemperatureOffset1 [deg],1
Pressure coefficient #1,44330.77
Pressure coefficient #2,0.1902632
Pressure at sea level [Pa],101325
Samples per second,100
```

```

seconds,1/100 of second,X_acc,Y_acc,Z_acc,HX_acc...
```

1. linia informująca o wersji płytki Arecordera,
2. linia informująca o wersji oprogramowania Arecordera (jest to czas, kiedy został skompilowany kod),
3. numer seryjny,
4. nazwisko właściciela tego egzemplarza Arecordera,
5. numer telefonu właściciela,
6. numer zestawu ustawień wybranych w chwili włączenia Arecordera,
7. liczba działek, o które zmieniają się wskazania akcelerometru ± 24 g przy zmianie przyspieszenia o 1 g,
8. liczba działek, o które zmieniają się wskazania akcelerometru ± 80 g przy zmianie przyspieszenia o 1 g,
9. dana kalibracyjna - wartość, jaką wskazuje oś X akcelerometru ± 24 g, gdy mierzone przyspieszenie wynosi 0 g,
10. dana kalibracyjna - wartość, jaką wskazuje oś X akcelerometru ± 80 g, gdy mierzone przyspieszenie wynosi 0 g,
11. dana kalibracyjna - wartość, jaką wskazuje oś Y akcelerometru ± 24 g, gdy mierzone przyspieszenie wynosi 0 g,
12. dana kalibracyjna - wartość, jaką wskazuje oś Z akcelerometru ± 24 g, gdy mierzone przyspieszenie wynosi 0 g,
13. informacja o wykryciu czujnika ± 80 g,
14. opóźnienie odpalenia silnika drugiego stopnia rakiety po zakończonej pracy silnika pierwszego stopnia (w sekundach),
15. wysokość, na której powinien zostać wyzwolony spadochron główny (w metrach),
16. wysokość wyrzutni, z której rakieta startuje (w metrach),
17. dana kalibracyjna - wartość, która jest odejmowana od wskazań czujnika temperatury (dane zapisywane są już po korekcie, w stopniach Celsjusza),
18. wartość pierwszego współczynnika używanego przy obliczaniu wysokości z ciśnienia,
19. wartość drugiego współczynnika używanego przy obliczaniu wysokości ciśnienia,
20. ciśnienie na poziomie morza (w Pa), wartość stała,
21. liczba zapisywanych pomiarów w ciągu sekundy,
23. opis poszczególnych kolumn właściwych danych.

3.1.2. Właściwe dane pomiarowe

Dane właściwe składają się z następujących po sobie linii z danymi. W każdej linii poszczególne wartości są oddzielone od siebie przecinkami, wartości ułamkowe zapisywane są po kropce. Linia danych kończy się znakiem nowej linii (czyli "enterem").

Przykładowa linia danych wygląda następująco:

48,81,145,34,-28,-10,102186,102182,14.9,2.4,0,0.3,1,0.0,0

gdzie:

48,81	— czas w sekundach oraz w setnych częściach sekund,
145,34,-28,-10	— surowe dane przyspieszenia w osi X, osi Y, osi Z akcelerometru ± 24 g oraz w osi X akcelerometru ± 80 g (patrz sekcja 3.1.4),
102186,102182	— ciśnienie pomierzone bezpośrednio przez czujnik ciśnienia oraz ciśnienie po uśrednieniu przez filtr Kalmana, dane w [Pa],
14.9	— temperatura pomierzona przez czujnik temperatury znajdujący się na Arecorderze, dane w [°C]
2.4	— prędkość w osi rakiety obliczona przez Arecorder, dane w [$\frac{m}{s}$]
0	— wysokość wyliczana z ciśnienia, dane w [m],
0.3	— wysokość wyliczana z przyspieszenia, dane w [m],
1	— numer stanu, w którym aktualnie znajduje się Arecorder (patrz tabela 4.1),
0.0	— prędkość wyliczana z ciśnienia, zmienna pomocnicza obliczana tylko w stanie 7,
0	— zmienna pomocnicza obliczana tylko w stanie 7,

3.1.3. Dane podsumowujące

Jest to kopia danych z pliku podsumowującego, patrz opis danych podsumowujących w sekcji 3.2.

3.1.4. Konwersja danych

Aby pomierzone surowe dane z akcelerometrów były użyteczne, należy dokonać konwersji na wybraną jednostkę.

Aktualne wartości X_1_g, Hx_1_g, X_0_g, Y_0_g, Z_0_g oraz Hx_0_g są zawsze zapisywane w nagłówku pliku z danymi pomiarowymi.

$$a\,[g] = \frac{a_{meas} - a_{offset}}{a_{gain}}, \tag{3.1}$$

gdzie:
$a\ [g]$ - obliczone przyspieszenie w [g],
a_{meas} - surowe dane z akcelerometrów,
a_{offset} - offset odpowiedni dla wybranego akcelerometru i osi odpowiednio X_0_g, Y_0_g, Z_0_g dla akcelerometru ±24 g lub Hx_0_g dla akcelerometru ±80 g,
a_{gain} - współczynnik wzmocnienia, odpowiednio X_1_g dla akcelerometru ±24 g lub Hx_1_g dla akcelerometru ±80 g.

$$a\ [\frac{m}{s^2}] = g \cdot a\ [g], \tag{3.2}$$

gdzie:
$a\ [\frac{m}{s^2}]$ - obliczone przyspieszenie w $[\frac{m}{s^2}]$,
$a\ [g]$ - obliczone przyspieszenie w [g],
g - przyspieszenie grawitacyjne (9,81 $\frac{m}{s^2}$).

3.2. Format danych pliku z danymi podsumowującymi

Dane podsumowujące są to lista kilkudziesięciu najważniejszych parametrów charakteryzujących lot rakiety. Dane są zapisywane po wykryciu lądowania rakiety.

```
        Rocket angle at launch,80.7,[deg]
    Velocity at the moment of leaving launchpad,10.6,[m/s]
    Pressure at ground level,100552,[Pa]
    Pressure at apogee,95664,[Pa]
    Maximum velocity at rocket axis,91.2,[m/s]
    Maximum altitude (acc),426,[m]
    Maximum altitude (pressure),417,[m]
    Velocity at first engine burnout,91.2,[m/s]
    Altitude  at first engine burnout,154,[m]
    Pressure at first engine burnout,98368,[Pa]
    Rocket angle at first engine burnout,76.3,[deg]
    Velocity at second engine burnout,0,[m/s]
    Altitude  at second engine burnout,0,[m]
    Pressure at second engine burnout,0,[Pa]
    Rocket angle at second engine burnout,0,[deg]
    Rocket launch,94.18,[s]
    Burnout of first stage engine,95.52,[s]
    Ignitting second stage engine fuse,95.63,[s]
    Firing second stage engine,95.63,[s]
    Burnout of second stage engine,95.63,[s]
```

```
Apogee detection,103.72,[s]
Minimum velocity around apogee,103.99,[m/s]
Firing drogue parachute,104.70,[s]
Firing main parachute,125.76,[s]
Rocket landing,161.00,[s]
First engine burning time,1.34,[s]
Second engine burning time,0,[s]
Time to apogee,9.54,[s]
Total flight time,66.82,[s]
```

1. kąt, pod jakim pochylona jest rakieta na wyrzutni w chwili startu w stosunku do płaszczyzny podłoża, dane w [°],
2. prędkość w chwili opuszczenia wyrzutni, dane w [$\frac{m}{s}$],
3. pomierzone ciśnienie na poziomie ziemi w chwili startu, w [Pa], dane po filtrze Kalmana,
4. pomierzone ciśnienie w najwyższym punkcie lotu, w [Pa], dane po filtrze Kalmana,
5. maksymalna wartość prędkości w osi rakiety wyliczanej przez Arecorder z przyspieszenia, dane w [$\frac{m}{s}$],
6. maksymalna wysokość osiągnięta przez rakietę, w [m], dane wyliczone na podstawie przyspieszenia,
7. maksymalna wysokość osiągnięta przez rakietę, w [m], dane wyliczone na podstawie ciśnienia,
8. prędkość w chwili wykrycia końca pracy silnika pierwszego stopnia, dane w [$\frac{m}{s}$],
9. wysokość w chwili wykrycia końca pracy silnika pierwszego stopnia, dane w [m],
10. ciśnienie w chwili wykrycia końca pracy silnika pierwszego stopnia, dane w [Pa],
11. kąt pochylenia rakiety do pionu w chwili wykrycia końca pracy silnika pierwszego stopnia, dane w [°],
12. prędkość w chwili wykrycia końca pracy silnika drugiego stopnia, dane w [$\frac{m}{s}$],
13. wysokość w chwili wykrycia końca pracy silnika drugiego stopnia, dane w [m],
14. ciśnienie w chwili wykrycia końca pracy silnika drugiego stopnia, dane w [Pa],
15. kąt pochylenia rakiety do pionu w chwili wykrycia końca pracy silnika drugiego stopnia, dane w [°],
16. czas, w którym został wykryty start rakiety, dane w [s],
17. czas, w którym został wykryty koniec pracy silnika pierwszego stopnia, dane w [s],

18. czas, w którym został odpalony zapalnik rozpoczynający pracę silnika drugiego stopnia, dane w [s],
19. czas, w którym został wykryty początek pracy silnika drugiego stopnia - wyzwolenie zapalnika nie jest jednoznaczne z rozpoczęciem pracy silnika drugiego stopnia, więc te dwa czasy są rozdzielone, dane w [s],
20. czas, w którym został wykryty koniec pracy silnika drugiego stopnia, dane w [s],
21. czas, w którym zostało wykryte osiągnięcie pułapu maksymalnego, dane w [s],
22. czas, w którym została wykryta minimalna prędkość rakiety po skończeniu pracy silników a przed wyzwoleniem spadochronu, dane w [s],
23. czas, w którym został odpalony zapalnik spadochronu-pilota, dane w [s],
24. czas, w którym został odpalony zapalnik spadochronu głównego, dane w [s],
25. czas, w którym zostało wykryte wylądowanie rakiety na ziemi (wykrycie następuje kilka sekund po faktycznym wylądowaniu), dane w [s],
26. czas pracy silnika pierwszego stopnia (różnica czasów początku i końca pracy silnika), dane w [s],
27. czas pracy silnika drugiego stopnia (różnica czasów początku i końca pracy silnika), dane w [s],
28. czas od chwili startu do osiągnięcia przez rakietę pułapu, dane w [s],
29. całkowity czas lotu rakiety (czas od chwili wykrycia startu do chwili wykrycia lądowania, z powodu opóźnienia w wykrycia lądowania, ten czas może być o kilka sekund za długi), dane w [s],

Dla danych od pozycji 16 do 21 oraz od 23 do 25 czas jest podawany od chwili włączenia Arecordera.

4. Opis działania

Po włączeniu Arecorder jest w jednym ze zdefiniowanych stanów. Każdy stan oznacza inną część lotu rakiety i inne decyzje podejmowane przez Arecorder.

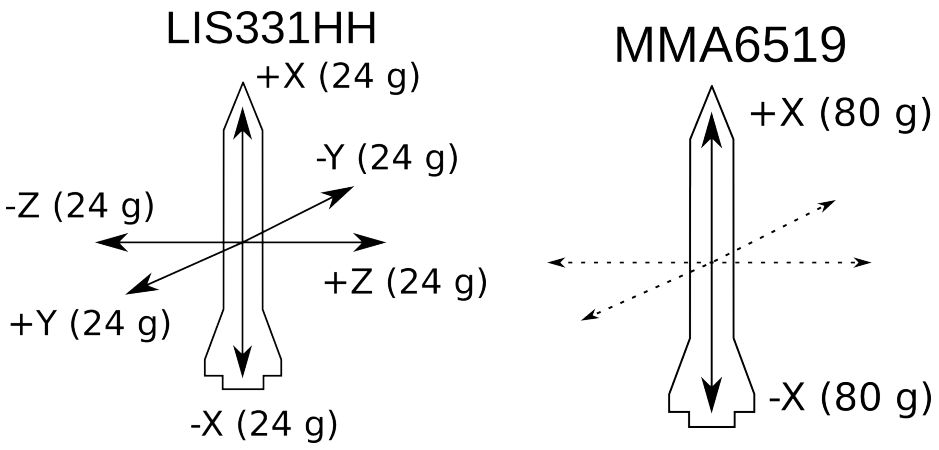
Tabela 4.1. Stany Arecordera

numer stanu	opis
0	oczekiwanie na inicjalizację
1	oczekiwanie na start rakiety
2	silnik pierwszego stopnia aktywny
3	silnik pierwszego stopnia się wyczerpał, oczekiwanie na minięcie opóźnienia odpalenia silnika drugiego stopnia
4	oczekiwanie na odpalenie silnika drugiego stopnia i jednoczesne oczekiwanie na osiągnięcie pułapu
5	silnik drugiego stopnia aktywny
6	silnik drugiego stopnia się wyczerpał, oczekiwanie na osiągnięcie pułapu
7	wyzwolono spadochron-pilot, oczekiwanie na wystąpienie warunku wyzwolenia spadochronu głównego
8	oczekiwanie na lądowanie
9	rakieta wylądowała
10	zatrzymanie zapisywania danych
11	pikanie brzęczyka

4.1. Obliczenia dokonywane przez Arecorder

Surowe dane pomierzone przez Arecorder to pomiary przyspieszenia w trzech osiach (± 24 g w trzech osiach oraz ± 80 g w osi rakiety), pomiary ciśnienia oraz pomiary temperatury (pomiar temperatury jako jedyny nie jest używany przez Arecorder do jakichkolwiek obliczeń). Te dane są zapisywane w postaci surowej (bezpośrednio odczytanej z czujników przez Arecorder, bez żadnej obróbki), jedynie temperatura jest konwertowana z pomierzonego napięcia na czujniku do wartości temperatury w [°C] oraz dodawana jest do niej wartość korekcji.

Przed startem, Arecorder wylicza z przyspieszenia kąt, pod jakim rakieta jest pochylona na wyrzutni. Jest to kąt pomiędzy osią rakiety a powierzchnią prostopa-



Rysunek 4.1. Osie, w których poszczególne akcelerometry mierzą przyspieszenia.

dłą do lokalnego pionu. Kąt ten jest używany do wyliczania wysokości osiągniętej przez rakietę oraz prędkości rakiety w czasie lotu; ważne jest więc dokładne umiejscowienie Arecordera we wnętrzu rakiety, aby oś Arecordera i oś rakiety były jak najbardziej do siebie zbliżone. Zobacz także rysunek A.1.

Kąt pochylenia rakiety jest cały czas aktualizowany, jeśli więc po włączeniu Arecordera a przed startem kąt pochylenia rakiety ulegnie zmianie, to kąt pochyłu rakiety zostanie zaktualizowany a zmiana uwzględniona. Po wykryciu startu rakiety kąt jest blokowany do czasu, aż rakieta opuści wyrzutnię. Następuje wtedy obliczanie kąta na podstawie przyspieszeń działających na rakietę (czyli ciągu silnika oraz grawitacji) i wcześniejszego kąta. Zobacz także wzór B.12.

Na podstawie przyspieszenia w osi rakiety oraz kąta pochyłu rakiety podczas lotu, Arecorder wylicza prędkość rakiety w osi rakiety, prędkość wznoszenia się rakiety, wysokość, na jaką rakieta zdołała się wznieść oraz aktualizuje kąt pochyłu rakiety względem powierzchni ziemi. Prędkość rakiety jest wyliczana z akcelerometru ± 24 g, ale w przypadku, gdy pomierzone przez ten akcelerometr przyspieszenie będzie większe niż 20 g, to Arecorder będzie wyliczał prędkość korzystając z danych z akcelerometru ± 80 g.

Ciśnienie jest na początku filtrowane filtrem Kalmana, aby je odszumić. Następnie z ciśnienia wyliczana jest wartość wysokości pozycji startowej nad poziomem morza, względem której będzie obliczana wysokość, na którą wzleciała rakieta.

4.2. Stan 0 - oczekiwanie na inicjalizację

Po włączeniu zasilania, Arecorder wysyła poprzez złącze programujące parametry Arecordera informację, że został włączony. Po ok. jednej sekundzie Arecor-

der przechodzi albo w tryb “Lotu” albo w tryb “Konfiguracji” i pozostaje w tym trybie do wyłączenia zasilania.

Przed decyzją o wyborze trybu działania, Arecorder piszczy za pomocą brzęczyka numer wybranego zestawu ustawień, inicjalizuje czujniki, odczytuje zaprogramowane ustawienia, zapisuje wartość ciśnienia odniesienia (z której jest wyliczana wysokość bezwzględna wyrzutni) oraz rozpoczyna testowanie obecności zapalników (gdy testowanie obecności zapalników jest włączone, czerwone diody LED zaczynają się świecić przy zapalnikach, które zostały wykryte).

4.2.1. Tryb konfiguracji

Aby przejść w tryb konfiguracji, do Arecordera musi zostać dołączona przejściówka UART-USB, która będzie dołączona do komputera. Na komputerze musi być włączony program Areconfig i wybrany odpowiedni port, poprzez który będzie następowała konfiguracja. Zobacz instrukcję do programu Areconfig w celu uzyskania dokładniejszego opisu.

W trybie konfiguracji można dokonać edycji ustawień Arecordera:

— wysokość, na której ma zostać wyzwolony spadochron główny,
— wysokość wyrzutni,
— czas pomiędzy końcem pracy silnika pierwszego stopnia a odpaleniem silnika drugiego stopnia,
— imię, nazwisko oraz numer telefonu właściciela.

Pomijając ostatnią pozycję, wszystkie ustawienia programuję się osobno dla czterech różnych zestawów ustawień wybieranych zworkami.

W trybie konfiguracji Arecorder pozostaje cały czas w stanie AWAITING_FOR_ARECORDER_READY.

Szczegółowy opis konfiguracji jest zamieszczony w instrukcji obsługi programu Areconfig - `http://www.palinski.org/Areconfig`.

4.2.2. Tryb Lotu

Gdy Arecorder nie nie wykryje dołączonej przejściówki i komputera ze skonfigurowanym programem Areconfig, to włącza tryb lotu. W tym trybie inicjalizowana jest karta SD i następuje utworzenie dwóch plików, do których będą zapisywane dane - pliku o nazwie “MEASxx.CSV” oraz “SUMMxx.CSV”, gdzie xx to numer nadawany kolejnym zapisywanym plikom z danymi na karcie SD; numery odpowiadających sobie plików MEAS i SUMM są zawsze takie same. Przy każdym włączeniu Arecorder odczytuje czy na karcie są zapisane jakieś poprzednie pliki z danymi i tworzy nowe pliki z numerem większym o jeden od poprzednio zapisanego; Arecorder może w ten sposób zapisać do 99 plików, zarówno MEAS

jak i SUMM, na jednej karcie SD. Zaleca się jednak każdorazowe formatowanie karty przed każdym lotem.

Po utworzeniu plików na karcie, następują trzy piski brzęczyka - każdy z tych pisków oznacza obecność lub brak odpowiedniego zapalnika. Krótkim piskiem sygnalizowana jest obecność zapalnika, natomiast długim jego brak. Pierwszy pisk oznacza zapalnik spadochronu-pilota, drugi zapalnik spadochronu głównego, natomiast trzeci zapalnik drugiego stopnia rakiety.

Następnie następuje zapis do pliku MEAS danych konfiguracyjnych oraz jeden długi pisk informujący użytkownika, że od tej chwili Arecorder dokonuje pomiarów i wykrywa start; od tej chwili również dioda zielona dioda LED zaczyna migać. Po dziesięciu sekundach wyłączane jest testowanie zapalników (czerwone diody przestają migać). Arecorder przechodzi do stanu 1.

UWAGA - Po włączeniu Arecordera i zasygnalizowaniu rozpoczęcia wykrywania startu, zalecane jest odczekanie około dwóch minut na ustabilizowanie wskazań czujnika ciśnienia.
W przypadku wcześniejszego startu różnica błędnych wskazań wysokości obliczona z czujnika ciśnienia może wynieść nawet kilka metrów.
W celu skompensowania tego błędu należy do obliczeń wysokości jako ciśnienia odniesienia (wysokości wyrzutni) użyć wartości średniej z dwóch pomiarów ciśnienia - jednego z danych lotu tuż przed startem rakiety oraz drugiego z miejsca startu rakiety czujnikiem po ustabilizowaniu wskazań, w niedługim czasie po wylądowaniu.

Arecorder za pomocą pisków brzęczyka informuje o wybranym zestawie ustawień, o dołączonych zapalnikach oraz o rozpoczęciu wykrywania startu rakiety. Przykładowo, następująca sekwencja pisków (krótka linia to krótki pisk, a długa linia to długi pisk, dłuższa przerwa oznacza zauważalnie dłuższą przerwę między kolejnymi sekwencjami pisków):

oznacza, że aktywny jest program drugi (wybrany jest drugi zestaw ustawień), wykryto zapalniki podłączone do obu spadochronów, ale nie do silnika drugiego stopnia, oraz, że Arecorder rozpoczął pomiary i rakieta może startować.

4.3. Stan 1 - oczekiwanie na start rakiety

W tym stanie Arecorder jest zainicjalizowany i próbkuje dane z czujników w celu wykrycia startu rakiety.

Start rakiety jest wykrywany, gdy rakieta wzniesie się na wysokość większą niż wysokość wyrzutni (wysokość wyrzutni jest programowana wcześniej). Na podstawie pomiarów przyspieszenia jest wyliczana prędkość rakiety oraz wysokość, na jaką rakieta się wzniosła. Dodatkowo, jeśli pomierzone przyspieszenie jest większe niż 1,2 g (tzn. rakieta wznosi się do góry z przyspieszeniem większym niż 0,2 g), to zostanie włączony brzęczyk informujący o potencjalnym starcie (aż do potwierdzenia startu poprzez osiągnięcie wysokości wyższej niż wysokość wyrzutni).

W tym stanie, jeśli nie jest wykrywany start, następuje aktualizacja ciśnienia odniesienia oraz kąta pochylenia rakiety.

Jeśli zostanie wykryty start rakiety, Arecorder zacznie zapisywać dane na kartę SD wraz z kilkunastoma próbkami danych przed startem. W chwili wykrycia startu zostanie również zapisany czas startu rakiety (do późniejszego pliku podsumowującego).

Po wykryciu startu, Arecorder przechodzi do stanu 2.

4.4. Stan 2 - silnik pierwszego stopnia aktywny

W stanie drugim rakieta leci i silnik pierwszego stopnia jest aktywny, tj. siła ciągu silnika jest większa od oporu aerodynamicznego rakiety (czyli przyspieszenie w osi rakiety jest większe od zera a rakieta zwiększa swoją prędkość). Jeśli przyspieszenie rakiety będzie mniejsze niż zero, zostanie wykryty koniec pracy silnika. Przyspieszenie jest filtrowane, przez co pojedynczy pomiar nie spowoduje fałszywego zadziałania algorytmu.

Po wykryciu końca pracy silnika, zapisywany jest czas końca pracy silnika pierwszego stopnia i Arecorder przechodzi do stanu 3.

4.5. Stan 3 - silnik pierwszego stopnia się wyczerpał, oczekiwanie na minięcie opóźnienia odpalenia silnika drugiego stopnia

Stan trzeci to oczekiwanie, aż minie zaprogramowany czas opóźnienia; po tym czasie zostaje wyzwolony zapalnik drugiego stopnia rakiety.

Również i tym razem jest zapisywany czas - czas wyzwolenia zapalnika drugiego stopnia rakiety.

Po minięciu opóźnienia Arecorder przechodzi do stanu 4.

4.6. Stan 4 - oczekiwanie na odpalenie silnika drugiego stopnia i jednoczesne oczekiwanie na osiągnięcie pułapu

Stan czwarty to jednocześnie oczekiwanie na odpalenie silnika drugiego stopnia i oczekiwanie na osiągnięcie pułapu.

Jeśli ciąg silnika będzie większy niż opór aerodynamiczny rakiety, to znaczy, że silnik drugiego stopnia jest aktywny. W czasie gdy silnik drugiego stopnia jest aktywny, blokowane jest wyzwolenie spadochronu-pilota. Jeśli silnik drugiego stopnia będzie aktywny przez co najmniej pół sekundy, to Arecorder przechodzi do stanu 5.

W przypadku braku silnika drugiego stopnia lub nieodpalenia silnika drugiego stopnia, przez cały czas badany jest warunek wyzwolenia spadochronu-pilota. Ten warunek został opisany w stanie 6 - sekcja 4.8, gdyż są one identyczne. W przypadku wyzwolenia spadochronu-pilota, Arecorder przechodzi do stanu 7.

W tym stanie jest zapisywany czas początku pracy silnika drugiego stopnia lub, w przypadku braku silnika drugiego stopnia (lub nieodpalenia silnika drugiego stopnia) zapisywany jest czas osiągnięcia maksymalnego pułapu oraz czas minimalnej prędkości rakiety.

4.7. Stan 5 - silnik drugiego stopnia aktywny

W stanie piątym Arecorder wykrył włączenie silnika drugiego stopnia i oczekuje na koniec jego pracy. W tym stanie nie jest możliwe wyzwolenie spadochronu.

Podobnie jak w stanie drugim, jeśli siła ciągu silnika jest większa od oporu aerodynamicznego rakiety, to Arecorder pozostaje w stanie 5, w przeciwnym przypadku Arecorder przechodzi do stanu 6.

W tym stanie zapisywany jest czas końca pracy silnika drugiego stopnia.

4.8. Stan 6 - oczekiwanie na osiągnięcie pułapu

Stan szósty to wykrywanie osiągnięcia pułapu rakiety. Arecorder bada czy ciśnienie zaczyna się zwiększać (co oznacza obniżanie wysokości, na której znajduje się rakieta). Jeśli ciśnienie po filtrze Kalmana przez jedną sekundę będzie większe niż najmniejsze zarejestrowane ciśnienie, to Arecorder podejmuje decyzję co do dalszego postępowania na podstawie wysokości wyliczonej z ciśnienia. Jeśli wysokość jest mniejsza niż 200 metrów, to spadochron-pilot jest wyzwalany natychmiast. Jeśli wysokość rakiety jest większa niż 200 metrów, to Arecorder czeka z wyzwoleniem spadochronu-pilota, aż wyliczona prędkość w osi rakiety spadnie do minimum.

W przypadku, gdy kąt pochylenia rakiety jest niewielki, prędkość osiowa rakiety po przekroczeniu pułapu może osiągnąć wartość na tyle dużą, że wyzwolenie spadochronu-pilota spowodowałoby jego zerwanie. Po osiągnięciu pułapu, tarcie powietrza może być na tyle duże, że prędkość w osi rakiety zmniejsza się mimo opadania rakiety (tuż po przekroczeniu pułapu oś rakiety jest niemal równoległa do płaszczyzny ziemi, przez co składowa grawitacji w osi rakiety jest mniejsza niż opór aerodynamiczny). Opóźnienie wyzwolenia spadochronu-pilota do czasu, aż prędkość w osi rakiety osiągnie wartość minimalną ma na celu zmniejszenie ryzyka zerwania spadochronu-pilota.

W tym stanie zapisywany jest czas osiągnięcia pułapu, czas osiągnięcia minimalnej prędkości oraz minimalne pomierzone ciśnienie, które jest używane do obliczenia maksymalnej wysokości.

Po wyzwoleniu spadochronu-pilota, Arecorder przechodzi do stanu 7.

4.9. Stan 7 - wyzwolono spadochron-pilot, oczekiwanie na wystąpienie warunku wyzwolenia spadochronu głównego

W stanie siódmym Arecorder bada zachowanie się rakiety po wyzwoleniu spadochronu-pilota. Jeśli rakieta opada na spadochronie, to spadochron główny jest wyzwalany, gdy rakieta opadnie poniżej zaprogramowanej wcześniej wysokości wyzwolenia spadochronu głównego (domyślnie 200 metrów).

UWAGA - Arecorder wyzwoli spadochron główny na zaprogramowanej wcześniej wysokości w odniesieniu do punktu startowego. Jeśli rakieta będzie opadać w miejscu, które jest położone wyżej nad poziomem morza niż miejsce startu, faktyczna wysokość względna, na której zostanie wyzwolony spadochron może być niższa niż zaprogramowana. Analogicznie, jeśli rakieta opada nad miejscem położonym niżej nad poziomem morza niż miejsce startu, faktyczna wysokość względna, na której zostanie wyzwolony spadochron główny może być wyższa niż zaprogramowana. Użytkownik powinien wziąć pod uwagę ukształtowanie terenu w okolicy miejsca startowego podczas programowania wysokości, na której ma zostać wyzwolony spadochron główny.

Po wyzwoleniu spadochronu-pilota działa równocześnie algorytm, który ma za zadanie wykrycie czy spadochron-pilot został wyzwolony prawidłowo. Jeśli Arecorder wykryje, że rakieta opada coraz szybciej, zostaje natychmiast wyzwo-

lony spadochron główny. Po pięciu sekundach od wyzwolenia spadochronu-pilota algorytm jest wyłączany ze względów bezpieczeństwa. Jeśli spadochron-pilot się nie wyzwolił, to algorytm wykryje to w przeciągu pięciu sekund. Jeśli zaś spadochron-pilot został wyzwolony, to wyłączenie algorytmu po pięciu sekundach zapobiega fałszywym wykryciom awarii spadochronu-pilota, gdy rakieta bezpiecznie opada.

W tym stanie Arecorder zapisuje czas wyzwolenia spadochronu głównego.

Po wyzwoleniu spadochronu głównego, Arecorder przechodzi do stanu 8.

4.10. Stan 8 - oczekiwanie na lądowanie

W tym stanie następuje badanie zmian ciśnienia w celu określenia czy rakieta wylądowała na ziemi. Ponieważ algorytm bada dane z filtru Kalmana, lądowanie może zostać wykryte nawet kilka sekund po faktycznym wylądowaniu rakiety.

W tym stanie Arecorder zapisuje czas wykrytego lądowania rakiety.

Po wykryciu lądowania, Arecorder przechodzi do stanu 9.

4.11. Stan 9 - rakieta wylądowała

Po wykryciu wylądowania rakiety, dla bezpieczeństwa Arecorder zapisuje jeszcze dziesięć sekund danych, po czym przechodzi do stanu 10. W stanie dziewiątym następuje również włączenie pikania brzęczyka.

4.12. Stan 10 - zatrzymanie zapisywania danych

W stanie dziesiątym następuje zatrzymanie zapisywania danych na kartę SD oraz zapisanie danych podsumowujących zarówno do pliku z danymi podsumowującymi jak i do pliku z danymi pomiarowymi. Gdy wszystkie dane zostaną zapisane, Arecorder przechodzi do stanu 11.

4.13. Stan 11 - pikanie brzęczyka

W tym stanie co sekundę pika brzęczyk. Arecorder pozostaje w tym stanie dopóki nie zostanie wyłączony.

5. Parametry techniczne

5.1. Absolutnie maksymalne parametry

UWAGA Obciążenia większe niż opisane jako *Absolutnie maksymalne parametry* mogą spowodować trwałe uszkodzenie Arecordera. To są tylko maksymalne obciążenia - prawidłowa praca Arecordera pod tymi obciążeniami lub większymi niż opisanymi jako *Parametry elektryczne* nie jest gwarantowana. Długotrwałe wystawienie Arecordera na działanie maksymalnych obciążeń może wpłynąć na niezawodność urządzenia.

Tabela 5.1. Absolutnie maksymalne parametry

Parametr	Min	Maks	Jednostka	Uwagi
Napięcie zasilania	-0,7	10,5	V	
Przyspieszenie	-	1000	g	1), 2)
Ciśnienie	0	110	kPa	
Temperatura podczas pracy	-50	85	[°C]	
Temperatura podczas przechowywania	-50	125	[°C]	

1) nie przetestowane w praktyce,

2) w dowolnej osi.

5.2. Parametry elektryczne

Tabela 5.2. Parametry elektryczne

Parametr	Min	Typ	Maks	Jednostka	Uwagi
Napięcie zasilania	4 3,8	4,2 4,2	10,5 10,5	V V	1) 2)
Pobór prądu	28 32,1 -	- - 35	30,8 36,3 -	mA mA mA	3) 4) 3) 5) 6)
Zakres mierzonego przyspieszenia	0 0	- -	24 80	g g	7) 8)
Rozdzielczość mierzonego przyspieszenia	- -	0,042 0,012	- -	g g	7) 8)
Zakres mierzonego ciśnienia	00	-	110	kPa	
Rozdzielczość mierzonego ciśnienia	-	1,5	-	Pa	
Zakres mierzonej temperatury	-55	-	130	[°C]	9)
Rozdzielczość mierzonej temperatury	-	0,25	-	[°C]	

1) w przypadku, gdy Arecorder wyzwala zapalniki,

2) w przypadku, gdy Arecorder jedynie mierzy parametry lotu,

3) pomijając chwilę, gdy zapalnik jest wyzwalany,

4) pobór prądu gdy dane nie są zapisywane na kartę SD,

5) pobór prądu gdy dane są zapisywane na kartę SD,

6) średni pobór prądu w stanie 11 - pikanie brzęczyka,

7) akcelerometr LIS331HH, wszystkie trzy osie,

8) akcelerometr MMA6519, jedna oś,

9) zakres pomiarowy czujnika temperatury przekracza zakres pracy całego Arecordera,

5.3. Parametry fizyczne i mechaniczne

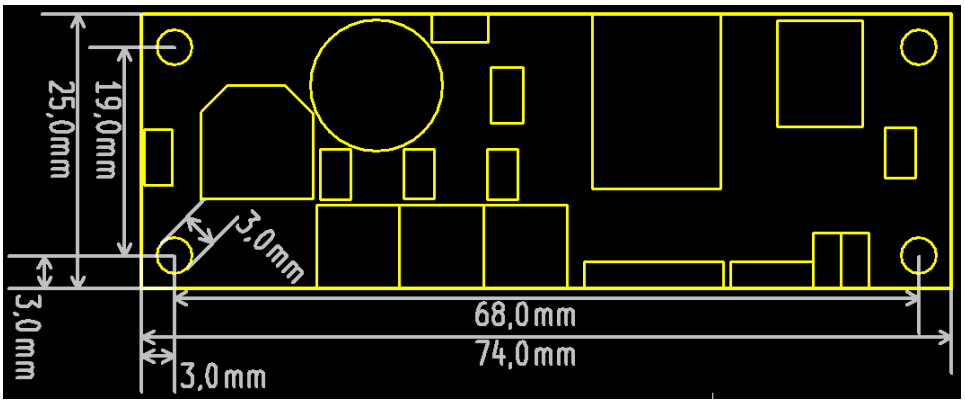
Tabela 5.3. Parametry fizyczne i mechaniczne

Parametr		Jednostka	Uwagi
Szerokość	25	mm	1)
Długość	74	mm	
Wysokość	14,5	mm	2)
Masa	16,4	g	

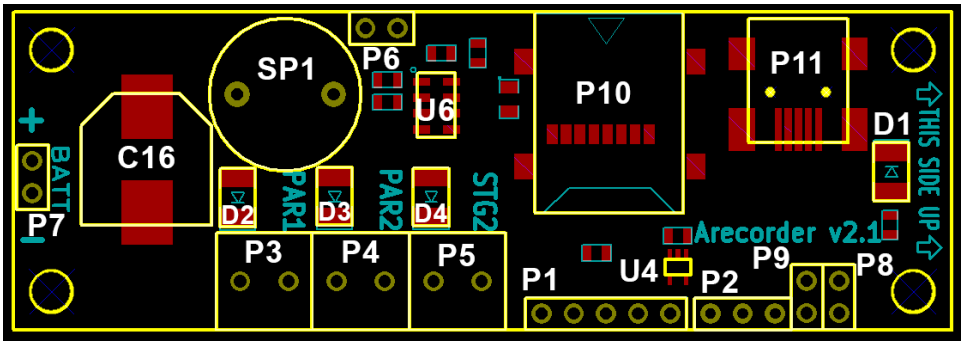
1) w przypadku podłączenia zapalników, należy zostawić dodatkową przestrzeń z boku Arecordera,

2) maksymalna wysokość elementu nad płytką wynosi 11 mm, pod płytką 2 mm, płytka ma grubość 1,5 mm,

6. Wymiarowanie



Rysunek 6.1. Wymiarowanie Arecordera z zaznaczonymi konturami ważniejszych elementów strony górnej.



Rysunek 6.2. Położenie ważniejszych elementów na stronie górnej Arecordera.

C16 - kondensator,

D1 - pomarańczowa dioda LED,

D2, D3, D4 - czerwone diody LED,

P1 - złącze programujące mikrokontroler,

P2 - dodatkowe złącze programujące parametry Arecordera,

P3, P4, P5 - złącza do podłączenia zapalników,

P6 - złącze dodatkowego brzęczyka,

P7 - złącze zasilania,

P8, P9 - złącza wyboru zestawu ustawień,

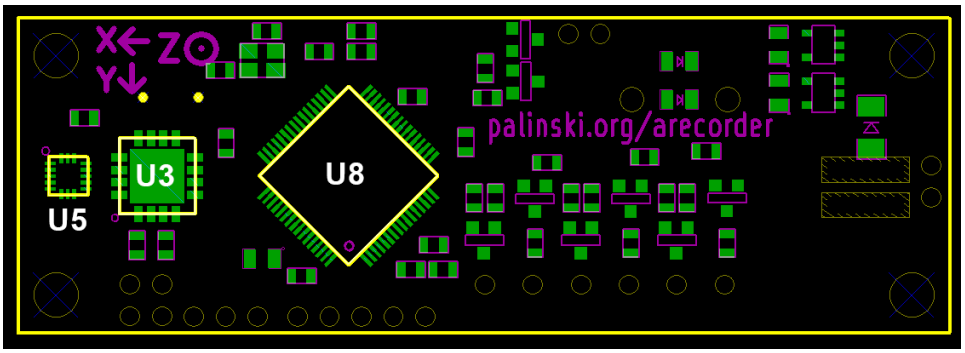
P10 - gniazdo do karty micro SD,

P11 - złącze programujące parametry Arecordera,

SP1 - brzęczyk,

U4 - czujnik temperatury,

U6 - czujnik ciśnienia.



Rysunek 6.3. Położenie ważniejszych elementów na stronie dolnej Arecordera.

U3 - akcelerometr ±80 g,

U5 - akcelerometr ±24 g,

U8 - mikrokontroler.

7. F.A.Q. - Najczęściej zadawane pytania

Czy trzeba izolować komorę, w której znajduje się Arecorder, od przedziału spadochronowego?

Nie jest to konieczne. Wysokość maksymalna jest zapisywana przed wyzwoleniem zapalnika i zmiana ciśnienia spowodowana wyzwoleniem zapalnika nie zmieni tej wartości. Zaleca się jednakże izolowanie komory Arecordera od przedziału spadochronowego, gdyż może to zaburzać działanie algorytmu awaryjnego wyzwalania spadochronu głównego i, na małych wysokościach, przedwczesne wyzwolenie spadochronu głównego.

Czy zostaną zapisane jakieś dane jeśli podczas lotu rakiety nastąpi katastrofa i Arecorder ulegnie zniszczeniu?

Tak. Arecorder zapisuje dane na kartę SD co 200 ms. Jeśli podczas lotu Arecorder ulegnie zniszczeniu, to (zakładając, że karta micro SD ocaleje) zostaną zapisane wszystkie dane oprócz ostatnich 200 — 800 ms.

Czy przed lotem rakiety trzeba specjalnie przygotować Arecorder do lotu czy wystarczy go po prostu włożyć do rakiety?

Wystarczy po prostu włożyć Arecorder do rakiety tak, aby był skierowany właściwą stroną w kierunku głowicy rakiety i był sztywno przymocowany do rakiety. Zaleca się jednakże po każdorazowym locie skopiować dane pomiarowe z karty SD i sformatować kartę SD. Przed każdym lotem należy również upewnić się, że bateria podłączona do Arecordera jest naładowana.

Jeśli nie chcę podłączać zapalników do Arecordera, to czy w ich miejsce muszę podłączyć jakieś obciążenie?

Nie. Jeśli zapalniki nie zostaną podłączone do Arecordera to tuż po włączeniu zasygnalizuje on brak zapalników. Niezależnie od tego czy zapalniki zostały wykryte czy nie Arecorder i tak podejmie próbę odpalenia ich w odpowiednim momencie (zabezpieczenie na wypadek ewentualnego błędnego wykrycia zapalnika). Jeśli nie będzie zapalników impuls elektryczny nie zostanie wyzwolony. Arecorder nie wykrywa czy zapalnik faktycznie został odpalony (a więc również czy w trakcie odpalenia zapalnik był podłączony), zapisywany

jest jedynie moment w czasie, gdy Arecorder wyzwala impuls odpalający zapalnik.

A. Słownik pojęć

Pułap

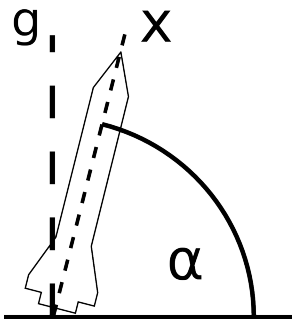
Punkt lotu rakiety o najwyższej wysokości.

Oś rakiety

Prosta przechodząca od czubka głowicy do środka podstawy rakiety. W tej osi silnik rakiety wytwarza ciąg. W tej instrukcji poprzez termin “przyspieszenie rakiety” będzie rozumiane przyspieszenie w osi rakiety.

Kąt pochylenia rakiety

Najmniejszy kąt, jaki tworzy oś rakiety z płaszczyzną prostopadłą do lokalnego pionu.



Rysunek A.1. Wizualizacja kąta pochylenia rakiety - α. x to oś rakiety, natomiast g to lokalny pion.

Wysokość względna

Wysokość nad poziomem terenu. To jest wysokość najbardziej interesująca dla użytkownika. W dalszej części instrukcji poprzez termin “wysokość” będzie rozumiana wysokość względna.

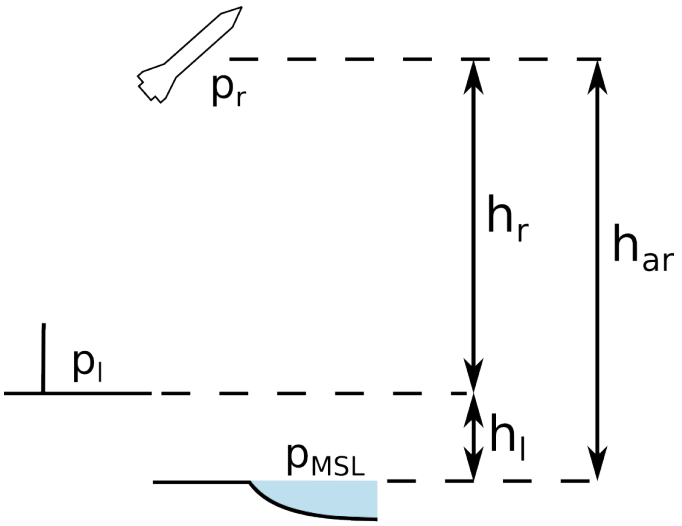
Wysokość bezwzględna

Wysokość nad poziomem morza.

Ciśnienie odniesienia

To jest ciśnienie pomierzone na wyrzutni; jest ono używane przez Arecorder do wyliczenia wysokości bezwzględnej wyrzutni. Wysokość bezwzględna

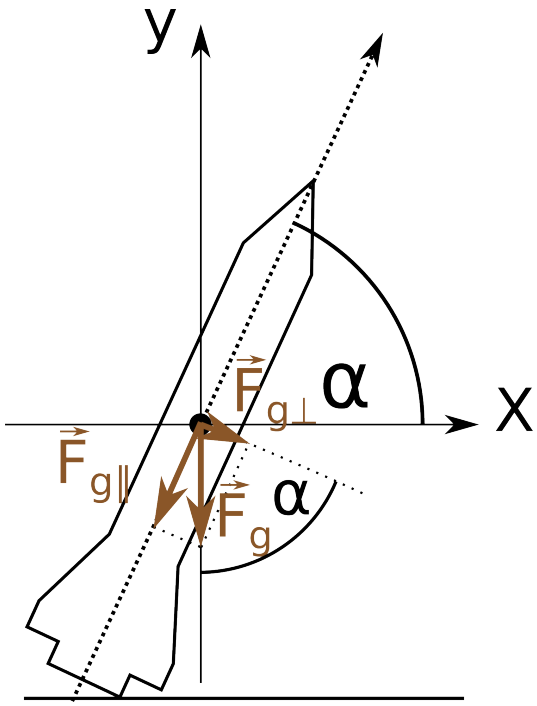
wyrzutni będzie odejmowana od wyliczonej wysokości bezwzględnej rakiety, aby uzyskać wysokość względną, na jaką wzniosła się rakieta.



Rysunek A.2. Wizualizacja zależności ciśnienia i wysokość. p_{MSL} to ciśnienie na poziomie morza (101,325 kPa), p_l to ciśnienie na poziomie wyrzutni (ciśnienie odniesienia), z którego jest wyliczana h_l, wysokość bezwzględna wyrzutni. p_r to ciśnienie powietrza pomierzone przez Arecorder podczas lotu rakiety; z tego ciśnienia jest wyliczana wysokość bezwzględna rakiety (h_{ar}).

B. Siły działające na rakietę

B.1. Siły działające na rakietę w czasie postoju na wyrzutni



Rysunek B.1. Siły działające na rakietę w czasie postoju na wyrzutni.

gdzie:
$\vec{F}_g$ - siła grawitacji,
$\vec{F}_{g\parallel}$ - składowa siły grawitacji równoległa do osi rakiety,
$\vec{F}_{g\perp}$ - składowa siły grawitacji prostopadła do osi rakiety,
α - kąt pochyłu rakiety.

Gdy rakieta stoi na ziemi działa na nią tylko siła grawitacji. Ponieważ przyspieszenia mierzone przez akcelerometry są proporcjonalne do składowych sił grawitacji prostopadłych i równoległych do (por. wzory B.1, B.2 i B.3), Arecorder jest w stanie obliczyć kąt pochylenia rakiety korzystając ze wzoru B.4 lub B.5.

$$\vec{a}_{g\parallel} = \frac{\vec{F}_{g\parallel}}{m} \tag{B.1}$$

$$\vec{a}_{g\perp} = \frac{\vec{F}_{g\perp}}{m} \tag{B.2}$$

$$\vec{a}_{g} = \frac{\vec{F}_{g}}{m} \tag{B.3}$$

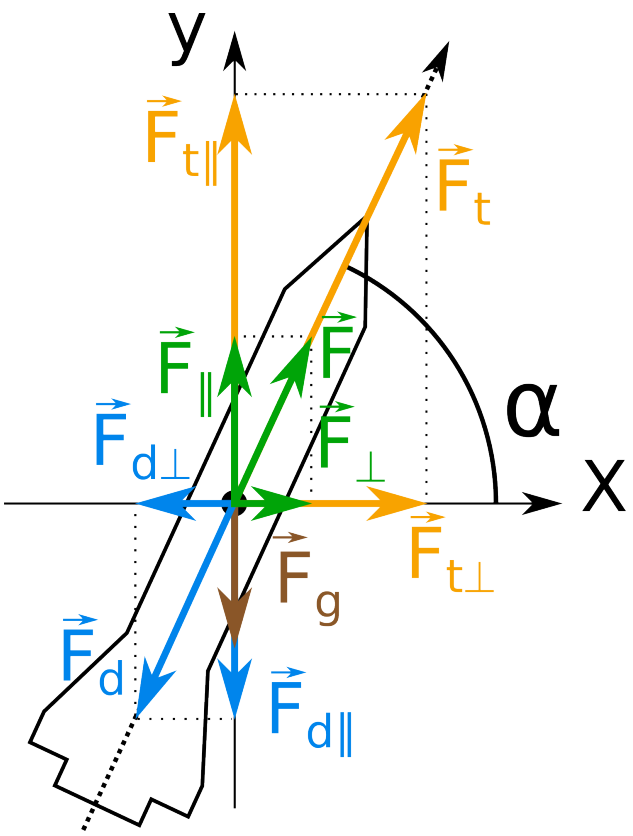
gdzie:
$\vec{a}_g$ - przyspieszenie grawitacyjne, $\vec{a}_{g\|}$ - składowa przyspieszenia grawitacyjnego prostopadła do osi rakiety, $\vec{a}_{g\perp}$ - składowa przyspieszenia grawitacyjnego równoległa do osi rakiety, $\vec{F}_g$ - siła grawitacyjna, $\vec{F}_{g\|}$ - składowa siły grawitacyjnej prostopadła do osi rakiety, $\vec{F}_{g\perp}$ - składowa siły grawitacyjnej równoległa do osi rakiety, m - masa rakiety.

$$\cos(\alpha) = \frac{\|\vec{a}_{g\perp}\|}{\|\vec{a}_{g}\|} \tag{B.4}$$

lub

$$\sin(\alpha) = \frac{\|\vec{a}_{g\|}\|}{\|\vec{a}_{g}\|} \tag{B.5}$$

B.2. Siły działające na rakietę w czasie lotu



Rysunek B.2. Siły działające na rakietę w czasie lotu

gdzie:
$\vec{F}_t$ - siła ciągu rakiety,

$\overrightarrow{F}_d$ - siła oporów aerodynamicznych,
$\overrightarrow{F}_g$ - siła grawitacji,
$\overrightarrow{F} = \overrightarrow{F}_d + \overrightarrow{F}_t$ - siła wypadkowa ciągu rakiety i oporów aerodynamicznych,
$\overrightarrow{F}_{t\|}$, $\overrightarrow{F}_{d\|}$, $\overrightarrow{F}_{\|}$ - składowe pionowe sił,
$\overrightarrow{F}_{t\perp}$, $\overrightarrow{F}_{d\perp}$, $\overrightarrow{F}_{\perp}$ - składowe poziome sił.
α - kąt pochyłu rakiety w czasie lotu.

Istnieją trzy zasadnicze siły działające na rakietę w czasie lotu - siła ciągu $\overrightarrow{F}_t$, siła oporu aerodynamicznego $\overrightarrow{F}_d$ oraz siła grawitacji $\overrightarrow{F}_g$, co pokazane jest na rysunku B.2. Siła ciągu i siła oporu aerodynamicznego mają ten sam kierunek, ale przeciwny zwrot; działają zawsze wzdłuż osi rakiety. Siła grawitacji jest zawsze równoległa do lokalnego pionu, skierowana w kierunku ziemi.

Przyspieszenie mierzone przez akcelerometry w czasie lotu jest proporcjonalne do siły wypadkowej ciągu rakiety i oporów aerodynamicznych.

$$a = \frac{\|\overrightarrow{F}\|}{m} \tag{B.6}$$

Akcelerometry nie są w stanie pomierzyć przyspieszenia grawitacyjnego, gdyż w rzeczywistości akcelerometry scalone mierzą jedynie różnicę pomiędzy przyspieszeniem działającym na obudowę akcelerometru a przyspieszeniem działającym na strukturę wewnątrz akcelerometru - grawitacja działa na całość akcelerometru, więc nie wytwarza żadnej różnicy przyspieszeń (w czasie postoju na wyrzutni akcelerometry mierzą w rzeczywistości siłę wywieraną przez podłoże na rakietę, przeciwdziałającą grawitacji). Działanie grawitacji jest aproksymowane przez założenie, że na maksymalnej wysokości działania Arecordera przyspieszenie grawitacyjne jest w przybliżeniu równe przyspieszeniu grawitacyjnemu przy powierzchni ziemi i wynosi 9,81 $\frac{m}{s^2}$.

W czasie lotu przyspieszenie poziome i pionowe jest wyliczane z przyspieszenia wzdłuż osi rakiety dodając korektę na przyspieszenie grawitacyjne w przypadku przyspieszenia pionowego.

$$a_{\|} = a \sin\alpha - g \tag{B.7}$$

gdzie:
$a_{\|}$ - przyspieszenie pionowe,
a - przyspieszenie wzdłuż osi rakiety,
α - kąt pochyłu rakiety w czasie lotu,
g - przyspieszenie grawitacyjne (9,81 $\frac{m}{s^2}$).

$$a_{\perp} = a \cos\alpha \tag{B.8}$$

gdzie:
$a_{\|}$ - przyspieszenie poziome,
a - przyspieszenie wzdłuż osi rakiety,
α - kąt pochyłu rakiety w czasie lotu.

Arecorder liczy prędkość w składowej pionowej (czyli prędkość wznoszenia się rakiety) i składowej poziomej (czyli prędkość lotu na zasięg) zgodnie ze wzorami odpowiednio B.9 i B.10. Prędkości pionowe i poziome są w każdej jednostce czasu aktualizowane o wyliczoną zmianę - prędkości składowe są sumą wszystkich zmian od chwili startu rakiety.

$$\triangle V_{\|} = a_{\|} \triangle t \tag{B.9}$$

gdzie:
$\triangle V_{\|}$ - zmiana prędkości pionowej w jednostce czasu,
$a_{\|}$ - przyspieszenie pionowe,
$\triangle t$ - zmiana w czasie pomiędzy kolejnymi aktualizacjami prędkości (10 ms).

$$\triangle V_{\perp} = a_{\perp} \triangle t \tag{B.10}$$

gdzie:
$\triangle V_{\perp}$ - zmiana prędkości poziomej w jednostce czasu,
$a_{\perp}$ - przyspieszenie poziome,
$\triangle t$ - zmiana w czasie pomiędzy kolejnymi aktualizacjami prędkości (10 ms).

Prędkość w osi rakiety jest wyliczana ze składowych pionowych i poziomych prędkości zgodnie ze wzorem B.11.

$$V = \sqrt{V_{\|}^2 + V_{\perp}^2} \tag{B.11}$$

gdzie:
V - prędkość w osi rakiety,
$V_{\|}$ - składowa pionowa prędkości,
$V_{\perp}$ - składowa pozioma prędkości.

Natomiast kąt pochyłu rakiety jest wyliczany w oparciu o zaktualizowane składowe prędkości, zgodnie ze wzorem B.12.

$$\alpha = \arccos(\frac{V_{\perp}}{V}) \tag{B.12}$$

gdzie:
α - kąt pochyłu rakiety,
$V_{\perp}$ - składowa pozioma prędkości,
V - prędkość w osi rakiety.

C. Historia zmian

2013.09.18

— Pierwsze wydanie instrukcji.

2013.09.25

— Dodana historia zmian.
— Dodane wartości poboru prądu przez Arecorder.
— Dodanie informacji o zaleceniu odczekania dwóch minut po włączeniu Arecordera przed startem rakiety w celu ustabilizowania wskazań czujnika ciśnienia oraz o sposobie skompensowania błędu w przypadku lotu z nieustabilizowanym czujnikiem.

2013.12.27

— Dodana instrukcja wkładania i wyjmowania karty SD.
— Dodany słownik pojęć.
— Uaktualnienie instrukcji do najnowszej wersji oprogramowania Arecordera.
— Dodane wymiarowanie Arecordera wraz z położeniami ważniejszych elementów na płycie drukowanej.
— Dodane wiele rysunków.
— Dodane nowe pytania do F.A.Q.
— Dodany załącznik o siłach działających na rakietę i sposobie obliczania prędkości rakiety.

2014.03.16

— Dodano sekcję 3.1.4 o sposobie konwersji surowych danych z akcelerometrów na wartości wyrażone w [g] i [$\frac{m}{s^2}$].

2015.05.03

— Uaktualniono instrukcję dla Arecordera w wersji 2.1.