



**PROJEKT SYSTEMU REJESTRACJI TORU LOTU OBIEKTU
LATAJĄCEGO I LOKALIZACJI PUNKTU UPADKU**
**CONCEPT OF A SYSTEM DETERMINING
TRAJECTORY AND FALL SITE OF FLYING OBJECTS**

Szymon ELERT, Tomasz KUCZERSKI

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka
Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszyński St., 05-220 Zielonka, Poland
Author's e-mail address: elerts@witu.mil.pl.; ORCID: 0000-0003-2491-650X

DOI 10.5604/01.3001.0014.2700

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wstępny projekt systemu rejestracji toru lotu obiektu latającego z wykorzystaniem algorytmu rejestracji danych (działającego w oparciu o zarejestrowane nieprzetworzone dane) oraz modułów transmisji radiowej. Przedstawiono działanie zaprojektowanego systemu opartego o mikrokontroler Atmega, moduł wyposażony w magnetometr, żyroskop, akcelerometr, miniaturowy nadajnik RF oraz odbiornik SDR. Zaprezentowany został wstępny zakres działania aplikacji do analizy zarejestrowanych danych. Ponadto dokonano przeglądu dostępnych na rynku podzespołów i wybrano moduły wchodzące w skład systemu. Dokonano analizy możliwości transmisji danych nawigacyjnych w celu ich rejestracji. Zaproponowano zastosowanie odbiornika SDR połączonego z aplikacją komputerową do monitorowania kanału transmisji danych na odległości do 1 kilometra oraz układ systemu, schemat modułu pomiarowo-nadawczego i odbiorczego oraz kontrolę jakości transmisji danych. Omówiono podstawowy algorytm działania aplikacji wykorzystującej odebrane dane do odtwarzania toru lotu i predykcji punktu upadku obiektu latającego. Przedstawiono również analizę możliwości zastosowania powyższego systemu.

Słowa kluczowe: telekomunikacja, śledzenie obiektów, rejestracja lotu, lokalizacja, transmisja danych

Abstract: The paper presents an initial concept of a flying object trajectory recording system employing a data recording algorithm (operating on the base of the raw recorded data) and radio transmission modules. Operation of developed system is based on microcontroller Atmega, a magnetometer module, a gyroscope and acceleration meter, and a RF miniature transmitter and SDR receiver. The initial performance of application analysing and recording the data is provided. Moreover, subunits available on the market have been reviewed to select the modules dedicated to the system. A possibility for recording the transmitted navigation data was studied. Application of SDR receiver in combination with a computer application monitoring the data transmission channel up to 1 kilometre is described with the configuration of the system, and the schematic of measurement transmitting and receiving modules, and the surveillance of transmitted data quality. The basic algorithm of application using the received data for reconstruction of object's flying path and prediction of a fall point is presented. Moreover an analysis is included for possible applications of the above mentioned system.

Keywords: telecommunication, object tracking, flight registration, location, data transmission

1. Wstęp

Podczas realizacji zadań badawczo-projektowych w dziedzinie konstrukcji latających pojawia się potrzeba ciągłej obserwacji toru lotu obiektu, pomiaru wybranych parametrów oraz określania współrzędnych upadku. Badania i obserwacje wymagają rejestracji różnego rodzaju sygnałów, które następnie mogą być poddawane szczegółowym i wielokrotnym analizom w celu prowadzenia dalszych badań rozwojowych danej konstrukcji. Współczesna miniaturyzacja modułów elektronicznych wraz z ich wielką różnorodnością daje możliwości realizacji powyższych potrzeb. Celem tego artykułu jest przedstawienie koncepcji budowy wyżej opisanego systemu z zastosowaniem wybranych, dostępnych podzespołów.

W celu zarejestrowania toru lotu obiektu, a następnie zlokalizowania jego punktu upadku niezbędne są przyrządy pomiarowe, które potrafią określić lokalizację w przestrzeni, wykonać pomiary wybranych parametrów, a także moduły bezprzewodowej transmisji danych na określoną odległość. Podstawowym zadaniem projektowanego systemu jest rejestracja i przesyłanie nieprzetworzonych pomierzonych wartości i parametrów do części naziemnej, gdzie zostaną one odebrane i zarejestrowane w celu ich dalszej obróbki. Na system składają się dwa moduły posiadające oddzielne algorytmy. W przypadku pomiarowo-nadawczego będzie znajdować się algorytm gromadzenia mający za zadanie zgromadzić surowe dane w paczkę, a następnie je wysłać. W związku z tym, że pomiary są wykonywane bez przerwy dane te nie są obrabiane lecz pakowane w ramkę danych i wysyłane tak, aby nie stracić kolejnych wartości pomiarowych i uniknąć obciążenia procesora.

Natomiast moduł odbiorczy ma za zadanie odbierać dane weryfikując ich poprawny odbiór przez sprawdzenie sumy kontrolnej. Nieobrobione dane można wykorzystać wielokrotnie i przetwarzać różnymi algorytmami nawi-

1. Introduction

Research and development projects of flying platforms demand a continuous recording of object's flying trajectory with the measurements of some characteristics and determination of fall site coordinates. The researches and investigations require the registration of different types of signals to be made in order to perform a post-trial detailed and multiple analysis needed for further development of the specific design. The miniaturisation of contemporary electronic modules facilitates the fulfilment of the above mentioned demands. The paper presents a concept of a structure for the above described system by using some available subunits.

In order to record the object's flying path and localise the spot of its fall the modules of distance wireless data transmission are needed with measurement instruments for space localisation and measurement of selected characteristics. The system is mainly designed for recording and transmission of raw values and characteristics to a ground station where they are received and recorded for further processing. The system contains two modules with separate algorithms. The measurement-transmitting module has a data acquisition algorithm that collects the raw data into a package and then sends it out. Regarding the fact that the measurements are performed continuously the data is not processed but packed into a data package to be next sent out in a way preventing any loss of consecutive measurement data and any overloading of the processor.

The receiving module has to collect the data and verify its proper reception by checking the transmission protocol sum. The raw data may be used many times and processed by various navigating algorithms.

gacyjnymi.

Realizacja projektowanego systemu została podzielona na trzy fazy: projekt wstępny, badania rozwojowe i budowa systemu. Projekt wstępny systemu zakłada, że w pierwszej fazie nastąpi uruchomienie przekazywania minimalnej ilości danych potrzebnych do określenia toru lotu obiektu na podstawie danych z czujników nawigacyjnych.

Istnieje wiele rodzajów czujników i metod nawigacji, z czego najbardziej rozpowszechnioną jest satelitarna (GPS) określająca położenie obiektu na podstawie obliczenia odległości odbiornika GPS od satelitów.

W rozwiązaniach militarnych lub w sytuacji braku dostępu do sygnału GPS, interesującym rozwiązaniem jest system nawigacji, określający położenie bez pomocy GPS, czyli nawigacja inercyjna (inercyjna, bezwładnościowa).

W układach nawigacji inercyjnej pozycję obiektu określa się na podstawie pomiaru przyspieszeń, które oddziałują na obiekt. Układy te wyposażone są w żyroskopy i akcelerometry, a także mają magnetometry do pomiaru pola magnetycznego Ziemi. Dzięki tym danym możemy określić przemieszczenie obiektu w przestrzeni wykorzystując metodę zliczeniową, polegającą na pomiarze przyspieszeń działających na obiekt oraz prędkości kątowych. Co więcej, możliwe jest korygowanie błędów pomiarowych powyższych czujników rozbudowując system o dodatkowy trzyosiowy czujnik, mierzący pole magnetyczne Ziemi. Ten rozbudowany o magnetometr system IMU nazywany jest systemem AHRS.

2. Moduł nawigacji inercyjnej

Czujniki inercyjne są używane w lotnictwie oraz szeroko rozumianych systemach nawigacyjnych od wielu lat. Profesjonalne rozwiązania systemów inercyjnych charakteryzują się wysoką ceną. W przypadku badań niszczących są nieopłacalne. Jednak ostatnio

The preparation of the designed system was divided on three phases: provisional concept, developing investigations and fabrication of the system. The provisional concept assumes that the first phase ends in transmission of minimum data needed for determination of the object flying path on the base of signals received from navigational sensors.

There are many types of navigational sensors and methods but GPS system, determining the object position through the distances between GPS receiver and satellites, is the most commonly used.

In some military solutions or when the GPS signal is missed the inertial navigation system determining the position without GPS is an interesting solution.

In inertial navigation system the position of an object is determined by measurements of accelerations acting against the object. These systems are equipped with gyroscopes and accelerometers and they additionally have the magnetometers measuring the Earth magnetic field. Due to this data the movement of the object in the space may be established using a counting up method based on the measured accelerations acting against the object and its angular velocities. What's more, the measurement errors of the above mentioned sensors may be corrected by adding a three axial sensor measuring the Earth magnetic field. Such inertial system extended by a magnetometer is named as AHRS system.

2. Inertial Navigation Module

Inertial sensors are used in aviation and various navigational systems over many years. Professional solutions of inertial systems are characterised by high costs. Their application at destructive tests is unreasonable. Nevertheless, a dynamical progress

dynamiczny rozwój i nowe technologie spowodowały, że ceny oraz rozmiary czujników stały się dostępne dla większej grupy konsumentów z branży elektronicznej. Szczególnie istotną zaletą technologii MEMS jest pojawienie się na rynku niewielkich, tanich oraz wydajnych sensorów. W ramach tego opracowania autorzy dokonali przeglądu dostępnych modułów tego typu. We wstępnej fazie projektu do określania położenia wybrano moduł IMU GY-80. Zaletą tego modułu jest jego niski koszt oraz posiadanie 10 stopni swobody składających się z 3-osiowego akcelerometru, 3-osiowego żyroskopu, 3-osiowego magnetometru oraz barometru.

Pierwszym rodzajem czujników wchodzących w skład systemu są akcelerometry, które umożliwiają pomiar przyspieszeń liniowych. Akcelerometry stosowane w układach MEMS posiadają wyjścia cyfrowe, do transmisji danych najczęściej wykorzystują znane szyny typu SPI oraz I²C. Ważnymi parametrami są zakres i czułość czujnika, od których zależy dokładność pomiaru przyspieszenia. W wybranym module wykorzystywany jest akcelerometr ADXL345. Z noty katalogowej wynika, że umożliwia on pomiar przyspieszenia w trzech osiach w zakresie $\pm 16g$. Posiada regulator napięcia oraz komunikuje się poprzez magistralę SPI lub I²C. Akcelerometr jest umieszczony w obudowie typu LGA, ponadto ma wbudowane algorytmy detekcji uderzenia, wykrywania ruchu (aktywności) a także stanu swobodnego spadania. Akcelerometr ADXL345 mierzy przyspieszenie z dokładnością do 0,1g w trzech osiach (Nwe, T.T, Htike, T., Mon, K.M. i Naing, Z.M., 2008).

Odczytując poszczególne wartości przyspieszeń dla każdej z osi, możliwe jest wyznaczenie kątów Φ oraz θ na podstawie wprowadzonych wzorów (1 i 2), przeliczając następnie otrzymane wartości z radianów na stopnie (Pedley, 2013):

and new technologies of recent years have caused that the prices and sizes of the sensors became available for a greater group of customers in the electronic sector. Inexpensive and efficient sensors have appeared in the market especially due to the MEMS technology. The authors of the paper have reviewed the accessible modules of this type. IMU GY-80 module has been selected at the initial phase of the project for determination of position. The module is preferable as apart of its low cost it has 10 degrees of freedom and contains a three-axial accelerometer, three-axial gyroscope, three-axial magnetometer and a barometer.

The accelerometers belong to the first group of sensors which provide the measurement of linear accelerations. The accelerometers used in MEMS systems have the digital outputs and data transmission is usually secured by the common SPI and I²C buses. The range and sensitivity of the sensor are important characteristics affecting the accuracy of acceleration measurements. The deployed module uses the ADXL345 accelerometer. The catalogue informs that it measures the acceleration in three axes within the range of $\pm 16g$. It has a voltage controller and communicates via SPI or I²C buses. The accelerometer is embedded in LGA type casing, and additionally it includes the algorithms detecting an impact, and a movement (activity), and a free dropping. The accelerometer ADXL345 measures the acceleration with the accuracy up to 0.1g in three axes (New, T.T, Htike, T., Mon, K.M. & Naing, Z.M., 2008).

By reading out the particular values of accelerations for each axis it is possible to establish the angles Φ and θ on the basis of prepared formula (1 and 2) by recalculation of received values from radians into degrees (Pedley, 2013):

$$\tan \theta_{xyz} = \left(\frac{-G_{px}}{G_{py} \sin \phi + G_{pz} \cos \phi} \right) = \frac{-G_{px}}{\sqrt{G_{py}^2 + G_{pz}^2}} \quad (1)$$

$$\tan \phi_{xyz} = \left(\frac{G_{py}}{G_{pz}} \right) \quad (2)$$

gdzie: ϕ - określa kąt przechylenia się na boki wokół osi X (Roll), θ - kąt nachylenia góra/dół wokół osi Y (Pitch).

Kolejnym czujnikiem są żyroskopy, sensory ruchu, które mierzą prędkość kątową obiektu, dzięki czemu możliwe jest określenie zmiany orientacji przestrzennej. Podobnie jak wyżej opisane akcelerometry, żyroskopy stosowane w układach MEMS posiadają identyczny interfejs komunikacyjny, co znacznie ułatwia współpracę z mikrokontrolerami. Moduł GY-80 posiada wbudowany 3-osiowy żyroskop L3G4200D, który pozwala na pomiar prędkości kątowej w zakresie pomiarowym $\omega \pm 2000^\circ/\text{s}$. Do komunikacji z mikrokontrolerem wykorzystuje interfejs SPI lub I²C. Ważnym zastosowaniem żyroskopu w układzie z akcelerometrem jest wspomaganie wyznaczenia parametrów przemieszczenia obiektu przez akcelerometr: θ oraz ϕ , umożliwiając skompensowanie błędów wynikających z jednoczesnego przemieszczenia i obrotu. Kolejnym czujnikiem, który pozwala na korekcję błędów pomiarów uzyskanych z poprzednich układów jest używany w module GY-80 magnetometr HMC5883L. Czujnik ten jest cyfrowym sensorem, który umożliwia pomiar pola magnetycznego w 3 osiach w zakresie ± 8 Gaussa. Charakteryzuje się on niskim poborem energii. Podobnie jak akcelerometry i żyroskopy posiada wyjście cyfrowe. Komunikacja odbywa się poprzez magistralę I²C. Głównym celem stosowania magnetometru jest pomiar pola

where: ϕ - is the roll angle around the main axis X (Roll), θ - is the pitch angle around the axis Y (Pitch).

Next sensors are the gyroscopes and sensors of movement measuring the object angular velocity to determine the change of spatial orientation. Similarly as the above described accelerometers, the gyroscopes used in MEMS units have the identical communicating interface facilitating their work with microcontrollers. The module GY-80 has integrated three-axial gyroscope L3G4200D which measures the angular velocities in the range of $\omega \pm 2000^\circ/\text{s}$. The interface SPI or I²C is used for communication with microcontroller. The gyroscope operating together with the accelerometer plays an important role in improving the process of establishing the object displacement parameters by the accelerometer: θ and ϕ , by compensation of errors caused by concurrent displacement and rotation. Magnetometer HMC5883L deployed in module GY-80 is a next sensor used for correction of measurement errors provided by the former units. It is a digital sensor measuring the magnetic field in three axes in the range of ± 8 Gauss. It is characterised by a low consumption of energy and similarly to accelerometers and gyroscopes has a digital output. The communication is provided by data bus I²C. The magnetometer is used in general to meas-

magnetycznego Ziemi. Znając wartości pola magnetycznego Ziemi możliwe jest uzyskanie aktualnego kierunku południka magnetycznego. W celu określenia kursu rzeczywistego należy uwzględnić deklinację magnetyczną, którą przedstawia się jako kąt przemieszczenia bieguna magnetycznego względem bieguna geograficznego (Welker, 2013).

ure the magnetic field of Earth. The current direction of the magnetic meridian may be established on the ground of Earth's magnetic field values. In order to establish the real trajectory the magnetic declination, represented by displacement between magnetic and geographic poles, has to be accounted (Welker, 2013).

$$KR_r = KM + d \quad (3)$$

gdzie: KR_r – kurs rzeczywisty w radianach,
 KM – kurs magnetyczny,
 d – kąt deklinacji magnetycznej.

where: KR_r – the real course in radians,
 KM – magnetic course,
 d – angle of magnetic declination.

Kąt deklinacji odczytany z map może przyjmować wartości dodatnie dla kierunku wschodniego oraz ujemne dla zachodniego. Ze względu na fakt, że kurs magnetyczny odczytywany jest z magnetometru w radianach, deklinację magnetyczną przyjmuje się w tych samych jednostkach. Po otrzymaniu odpowiedniego zakresu kierunku bieguna magnetycznego KR_r wyniki zamieniane są na stopnie w celu łatwiejszego odczytu. Podobnie jak żyroskop zwiększa dokładność wyznaczenia parametrów θ i Φ , tak magnetometr pozwala skompensować błędy pomiaru wartość ψ . Używając ADXL345 oraz HMC5883L możliwe jest zminimalizowanie błędów pomiarów przy niewielkich kątach odchylenia magnetometru. Zastosowanie 3 różnych czujników oraz możliwość realizowania wielu różnych algorytmów nawigacji inercyjnej na sygnałach zarejestrowanych podczas eksperymentu pozwala na przeprowadzenie wielu dodatkowych badań. Ponadto w układzie możliwe jest rejestrowanie danych z dodatkowego czujnika - barometru, co może udokładnić pomiar wysokości. Zarejestrowane dane pozwalają na wielokrotne przetwarzanie ich za pomocą różnych algorytmów inercyjnych oraz porównywanie wyników.

The angle of declination read out from maps may take positive values for eastern direction and negative values for western direction. As the magnetic course provided by the magnetometer is measured in radians then the magnetic declination is also taken in this unit. After receiving a suitable range of the magnetic pole direction KR_r the results are converted into the degrees to be easily read out. Similarly to the gyroscope, which increases the measurement accuracy of parameters θ and Φ , the magnetometer compensates the measurement errors of parameter ψ . Using ADXL345 and HMC5883L may minimise the measurement errors for low angles of magnetometer declinations. The application of three different sensors and possibility for execution of various algorithms of inertial navigation over the signals recorded during the trial gives a chance for carrying out many additional investigations. Moreover the system gives a possibility for recording the data from a barometer, which is an additional sensor, and the altitude measurements may be more accurate. The recorded data may be used many times for processing by different inertial algorithms and for comparison of results.

3. Projekt koncepcyjny

Celem opisywanego systemu jest odtworzenie toru lotu, lokalizacji upadku lub lądowania obiektu powietrznego na podstawie zebranych, przesłanych do odbiornika, zarejestrowanych i następnie wielokrotnie przetwarzanych różnymi algorytmami nawigacyjnymi danych. Projekt koncepcyjny systemu zakłada, że system będzie wykonany w postaci dwóch modułów: pomiarowo-nadawczego oraz odbiorczego. Pierwszy z nich odpowiedzialny jest za zbieranie danych nawigacyjnych z czujników a następnie przesyłanie ich w postaci nieprzetworzonej bezpośrednio do modułu odbiorczego na ziemi. Powyższy układ systemu przedstawiono w tabeli 1.

3. Conceptual Design

The presented system is designed to reconstruct flying path, and localise the point of falling or landing of an aerial object, basing on the acquired data sent to the receiver to be recorded and next subjected to multiple processing by different navigational algorithms. The conceptual design of the system assumes that it has to be performed in the form of two modules including measurement-transmission and receiver parts. The first one is responsible for acquisition of navigating data from the sensors and sending the raw data directly to the receiving module on the ground. The above layout of the system is presented in table 1.

Tabela 1. Układ systemu

Table 1. System layout

Moduł pomiarowo-nadawczy <i>Measurement-transmitter module</i>	Moduł odbiorczy <i>Receiving module</i>
<ul style="list-style-type: none"> - moduł IMU GY-80 - mikrokontroler ArduinoUno Rev3 - moduł radiowy HC-12 <ul style="list-style-type: none"> - <i>Module IMU GY-80</i> - <i>Microcontroller ArduinoUno Rev3</i> - <i>Radio link module HC-12</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - moduł radiowy HC-12 - mikrokontroler ArduinoUno Rev3 - komputer PC z aplikacją do odbioru i przetwarzania danych - odbiornik SDR RT820T2 <ul style="list-style-type: none"> - <i>Radio link module HC-12</i> - <i>Microcontroller ArduinoUno Rev3</i> - <i>PC with application for data reception and processing</i> - <i>Receiver SDR RT820T2</i>

3.1. Moduł pomiarowo-nadawczy

W module pomiarowo-nadawczym znajduje się algorytm gromadzenia, który służy do zbierania danych w paczkę, a następnie ich wysyłania. Zadaniem modułu IMU GY-80 jest odczyt danych z 3 sensorów a następnie przesłanie ich do modułu głównego, gdzie użyty został mikrokontroler Atmega w postaci ArduinoUno Rev3 połączony z GY-80. W zależności od rodzaju czujnika ilość danych przesyłanych jest różna. Dane z czujników (wektory pomiarowe) składane są w ramkę danych. Jeden wektor pomiarowy do-

3.1. Measurement-transmitter Module

The measurement-transmitter module includes an acquisition algorithm for packing and sending the data out. The module IMU GY-80 is designated for reading out the data from 3 sensors and for sending it to the main module which deploys the microcontroller Atmega in configuration ArduinoUno Rev3 connected with GY-80. Depending on the type of the sensor the amount of sent data is different. Data from the sensors (measurement vectors) is packed into a measurement frame. One measurement vector comprises

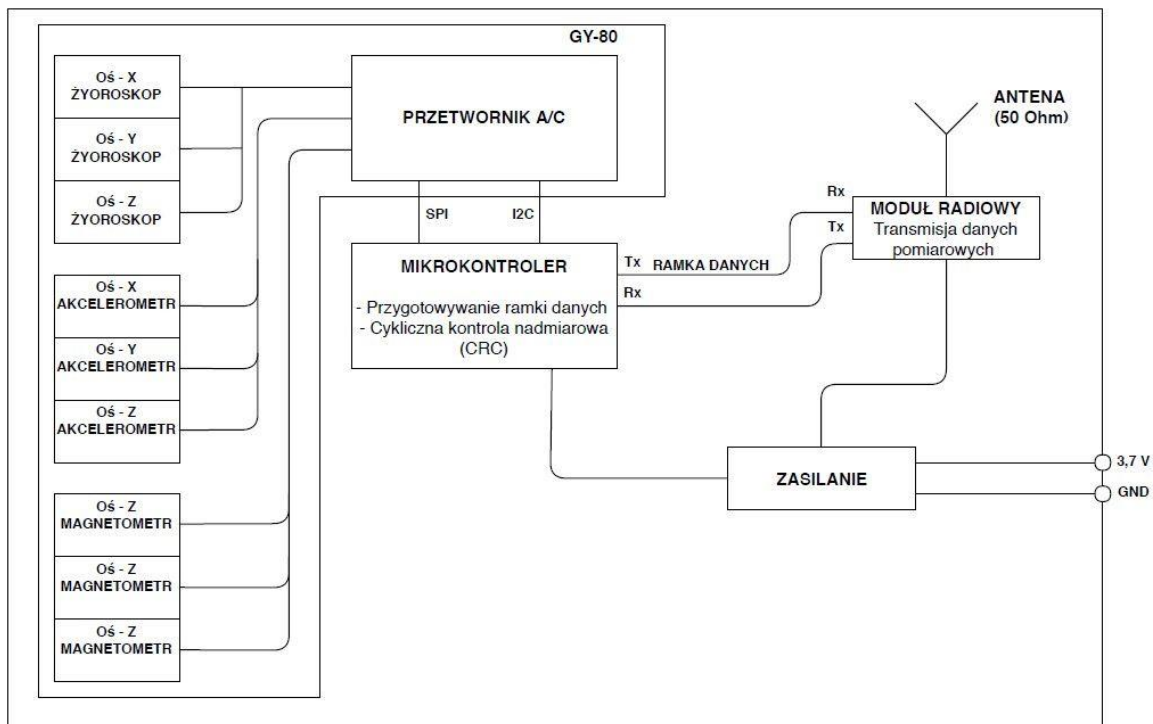
tyczy danych w 3 osiach z jednego czujnika. Wartości pomiarowe, wchodzące w skład wektora zapisywane są na 16 bitach. Tworząc macierz, składającą się z odczytanych wartości wektorów pomiarowych, powstaje ramka danych o łącznej sumie bitów.

the data for 3 axes from one sensor. The measured values, being components of the vector, are recorded in 16 bytes. The data frame with summarised quantity of bytes is created by a matrix comprising the readout values of measured vectors.

$$\text{Akcelerometr} \rightarrow \{16 \text{ bit}\}\{16 \text{ bit}\}\{16 \text{ bit}\} \quad (5)$$

$$\text{Żyroskop} \rightarrow \{16 \text{ bit}\}\{16 \text{ bit}\}\{16 \text{ bit}\} \quad (6)$$

$$\text{Magnetometr} \rightarrow \{16 \text{ bit}\}\{16 \text{ bit}\}\{16 \text{ bit}\} \quad (7)$$



Rys. 1. Schemat funkcjonalny modułu pomiarowo-nadawczego

Fig. 1. Functional diagram of the transmitter module

Żyroskop – *gyroscope*

Akcelerator – *accelerometer*

Magnetometr – *magnetometer*

Przetwornik A/C – *A/C converter*

Mikrokontroler – *microcontroller*

Przygotowanie ramki danych – *preparation of data frame*

Cykliczna kontrola nadmiarowa (CRC) – *cyclic redundancy control*

Ramka danych – *data frame*

Moduł radiowy – *radio link module*

Transmisja danych pomiarowych – *measurement data transmission*

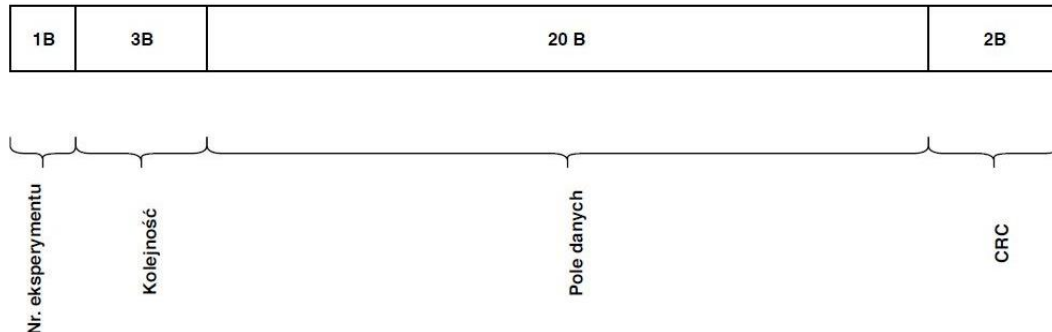
Zasilanie – *power supply*

Transmisja danych pomiarowych z IMU odbywa się przez magistrale SPI oraz I²C w zależności od czujnika, z którego przesyłane są pomiary. Następnie po otrzymaniu danych procesor zapisuje je w postaci ramki danych (rys. 2). Łącznie na dane pomiarowe przeznaczona jest suma bitów otrzymanych ze wszystkich czujników oraz dodatkowo 16 bitów sumy kontrolnej. Ze względu na zastosowanie transmisji radiowej, w celu eliminacji błędów transmisji, zaimplementowany został algorytm CRC określany jako cykliczna kontrola nadmiarowa.

Gotowy pakiet danych w postaci ramki jest nadawany za pomocą modułu HC-12, przesyłającego dane na odległość do 1 kilometra. Komunikacja odbywa się w pasmie ISM na częstotliwości 433,4 MHz. Powyższy moduł (w warstwie transmisji danych) automatycznie dostosowuje szybkość przesyłania informacji, dostosowując ją do prędkości transmisji portu szeregowego.

The measurement data is sent from IMU via SPI and I²C buses depending on the sensor delivering the data. In the next step processor records the data in the form of a data frame (Fig. 2). In aggregate, the measurement data has the dedicated sum of bytes received from all sensors plus additional 16 bytes of the control sum. Because of the deployment of the radio link the algorithm CRC for cyclic redundancy control was used.

A completed package of data in the form of the frame is sent by HC-12 module at the distance up to 1 km. The communication takes place on ISM range at frequency 433.4 MHz. The above mentioned module (regarding data transmission) tailors automatically the rate of data transmission to the serial port rate.



Rys. 2. Zawartość ramki danych

Fig. 2. Contents of data frame

Nr eksperymentu – *number of trial*

Kolejność – *order*

Pole danych – *data field*

Prędkość transmisji może być zmieniana za pomocą komend i będzie dobierana eksperymentalnie w zależności od ilości danych w ramce (tab. 2). Ponieważ mikrokontroler posiada 8 wejść analogowych i 8 cyfrowych, możliwe jest przesyłanie dodatkowych parametrów (np. z wbudowanego barometru, ze-

The rate of transmission may be changed by commands and will be adjusted experimentally depending on amount of data in the frame (tab. 2). As the microcontroller has 8 analogue and 8 digital inputs then it is possible to send additional parameters (e.g. from the integrated barome-

wewnętrznego czujnika wilgotności, temperatury, napięcia, prądu). Dodatkowe czujniki, które można podłączyć do wyżej wymienionych 16 wejść spowodują jednak zwiększenie rozmiaru ramki danych (w zakresie pola danych), a w konsekwencji zmniejszenie prędkości transmisji.

ter, external sensor of moisture, temperature, voltage, current). But additional sensors which may be connected to the above mentioned 16 inputs increase the size of the data frame (concerning the data field) and in consequence reduce the data transmission rate.

Tabela 2. Szybkość transmisji bezprzewodowej modułu HC-12 (HC-12..., 2012)

Table 2. The wireless transmission speed of the HC-12 module

Transmisja portu szeregowego <i>Serial port transmission</i> [b/s]	1200 – 2400	4800 – 9600	1920 – 38400	57600 – 115200
Transmisja bezprzewodowa <i>Wireless transmission</i> [b/s]	5000	15000	58000	236000

Podczas badań systemu zostaną doświadczalnie dobrane parametry transmisyjne (odstęp czasu między ramkami i długość pola danych) w taki sposób, aby uzyskać maksymalnie dużą częstość przesyłania ramek bez pogarszania dokładności pomiarów na odległość kilkuset metrów. Należy również brać pod uwagę fakt, że czujniki podczas odczytywania wartości z poszczególnych kanałów pomiarowych nie zawsze wykorzystują pełne 16 bitów. Dzięki temu możliwe jest zastosowanie algorytmów kompresji danych. Przykładem jest wybrany akcelerometr, który mierząc przyspieszenia wykorzystuje tylko 13 bitów. Dzięki temu rozmiar ramki danych może być zmniejszony (stosując przesuwanie bitów lub kompresję danych). Mniejsza ilość danych pozwoli na uzyskanie większej prędkości transmisji. Możliwe jest również wykorzystanie wolnych bitów do przesyłania informacji z dodatkowych czujników lub umieszczania tam bitów synchronizacji.

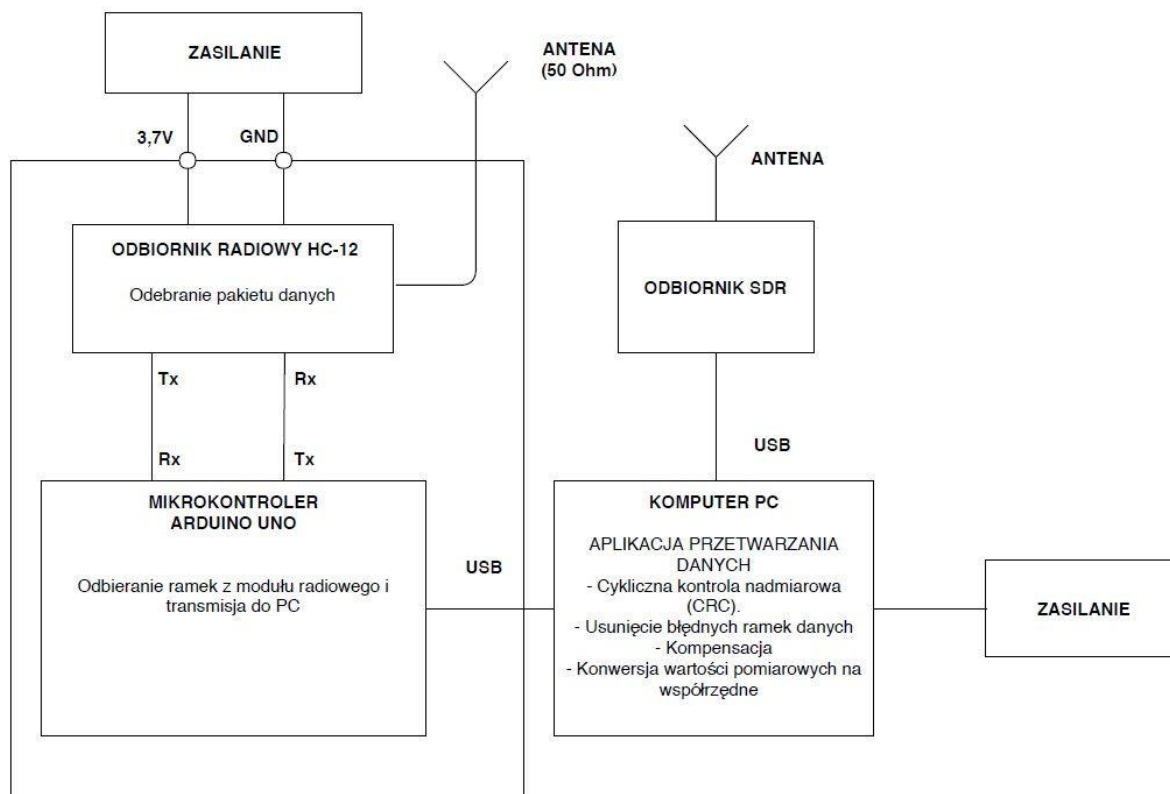
Parameters of transmission (time gaps between frames and length of data field) will be adjusted experimentally during the investigations of the system to get possibly high rate of frame transmission without jeopardising the measurement accuracy for distances of a few hundred metres. Moreover it has to be considered that the sensors sometimes use not complete 16 bytes at reading the values from particular measurement channels. Due to this it is possible to apply data compression algorithms. The selected accelerometer is an example as it uses only 13 bytes to measure the acceleration. For this reason the size of data frame may be decreased (using the shifting of bytes or the data compression). Smaller number of data increases the rate of data transmission. It is also possible to employ the free bytes for sending the information from additional sensors or for putting there the synchronisation bytes.

2.2. Moduł odbiorczy

Wysyłane ramki danych z modułu nadawczego są odbierane w odbiorniku HC-12 połączonym do mikrokontrolera ArduinoUno Rev3 (Atmega). Prędkość transmisji jest taka sama jak w module nadawczym. Warstwą protokołu transmisji danych zarządza moduł HC-12.

1.2. Receiving Module

The data frames sent out from the transmitting module are received by receiver HC-12 connected to microcontroller ArduinoUno Rev3 (Atmega). The data transmission rate is identical as for the transmitting module. Data transmission protocol is controlled by module HC-12.



Rys. 3. Schemat funkcjonalny modułu odbiorczego

Fig. 3. Functional diagram of the receiver module

Zasilanie – supply

Odbiornik radiowy – radio receiver

Odebranie pakietu danych – reception of data package

Odbieranie ramek z modułu radiowego i transmisja do PC – reception of data from radio module and transmission to PC

Odbiornik – receiver

Aplikacja przetwarzania danych – data processing application

Cykliczna kontrola nadmiarowa – cyclic redundancy check

Usunięcie błędnych ramek danych – removal of false data frames

Konwersja wartości pomiarowych na współrzędne – conversion of measurement parameters into coordinates

Odebrane dane (odczytywane z modułu radiowego do mikrokontrolera Atmega) trafiają do komputera PC poprzez port USB, gdzie odbiera je aplikacja rejestrująca i zapisująca dane w postaci pliku arkusza kalkulacyjnego programu Microsoft Excel. Następnie ponownie wykonywana jest operacja obliczania sumy kontrolnej dla każdej ramki danych (wiersza). Uzyskana suma porównywana jest (za pomocą makra w Excelu) z sumą odebraną z pakietem danych. Dzięki zastosowaniu sum kontrolnych CRC możliwe jest określenie czy odebrane dane nie uległy przekłamaniu i nie zostały zmienione w wyniku oddziaływania czynników zewnętrznych zakłócających transmisję.

Błędne ramki danych zostaną usunięte, natomiast sprawdzone dane w postaci pliku programu Excel zostaną przekazane do aplikacji, w której zostanie uruchomiony algorytm inercyjny. W wyniku działania algorytmu nastąpi przeliczenie zmierzonych wartości z poszczególnych sensorów na wielkości umożliwiające określenie trajektorii (przy pomocy algorytmów nawigacji inercjalnej). Dodatkowo aplikacja może wykonywać obliczenia innych parametrów zarejestrowanych dla badanego obiektu (np. wysokości przeliczonej z czujnika ciśnienia).

Dodatkowym elementem modułu odbiorczego jest odbiornik SDR (Software Defined Radio), którego zadaniem jest monitorowanie jakości wybranego do komunikacji zakresu (kanałów) pasma wykorzystywanego przez moduły HC - 12. Odbiornik SDR wyposażony jest w antenę teleskopową. Do współpracy z odbiornikiem SDR wykorzystywana będzie dedykowana przez producenta aplikacja komputerowa. Odbiornik będzie połączony z komputerem za pomocą USB. Dzięki odbiornikowi SDR możliwe jest dodatkowo określenie poziomu zakłóceń transmisji. W projekcie wykorzystany został odbiornik z tunerem RTL2832U i R820T2, który można przestrajać za pomocą dedykowanej aplikacji w zakresie 24 MHz - 1850 MHz. Na podstawie porówna-

The received data (read out from the radio module to Atmega microcontroller) is shifted to PC via USB port where it is received by an application which records the data and stores it in the form of a calculating file of Microsoft Excel program. In the next step the checking sum is calculated for each data frame (line). The received sum is compared (by using Excel macro application) with the sum received with the data package. The application of the CRC checking sums helps to establish if the received data is not interfered and changed due to the action of any external effects affecting the transmission.

The false data frames will be removed whereas the data which pass the examination is shifted in the form of Excel program file to the application running the inertial algorithm. The run of the algorithm recalculates the parameters measured by particular sensors into the values which can be used to determine the trajectory (by inertial navigation algorithms). Additionally the application may calculate other parameters recorded for the investigated object (e.g. the altitude recalculated from the pressure sensor).

Receiver SDR (Software Defined Radio) is an additional part of the receiving module monitoring the quality of selected communication band (channels) used by modules HC - 12. Receiver SDR is equipped with a folded antenna. A computer application provided by the manufacturer will be used for working together with the SDR receiver. The receiver will be connected to computer via USB. The SDR receiver can be additionally used for determination of transmission interference level. The receiver with tuner RTL2832U and R820T2 which could be tuned by the dedicated application on the band 24 MHz - 1850 MHz is used in the

nia otrzymanych poziomów sygnałów z modułu HC-12 oraz z odbiornika SDR możliwe będzie porównanie skuteczności kanału transmisji danych z zastosowaniem modułów HC-12. W dalszych etapach rozwijania systemu autorzy przewidują testowanie innych modułów komunikacyjnych. Umożliwia to wybranie najefektywniejszych modułów transmisji bezprzewodowej (radiowej) na odległość do 1 km.

Przedstawiony zaprojektowany system może znaleźć zastosowanie w badaniach różnego rodzaju obiektów latających. Jego podstawowa cecha polegająca na rejestracji nieprzetworzonych danych drogą radiową, pozwala na prowadzenie badań niszczących. Zarejestrowane dane można niezależnie i wielokrotnie przetwarzać z wykorzystaniem różnych algorytmów. W wyniku badań porównawczych można np. wskazać najbardziej skuteczne i tanie metody nawigacji bez wykorzystania GPS. W systemach badań niszczących istotnym elementem jest znalezienie kompromisu pomiędzy jakością i dokładnością, a ceną. Na rynku istnieje wiele systemów, które umożliwiają określenie położenia obiektów. W zależności od potrzeb ich zastosowania wybierane są z różnych przedziałów cenowych, wynika to z wymagań jakie muszą spełniać. Jednym z głównych kryteriów są dokładność oraz czas trwania eksperymentu. Niskokosztowe moduły IMU posiadają mniejszą dokładność zależną od jakości zastosowanych czujników oraz niewielkie zakresy pomiarowe, gdyż nie są odporne na wysokie przeciążenia. W przypadku długich czasów trwania eksperymentu następuje kumulacja błędów pomiarowych, a więc im dłuższy jest ten czas tym dokładniejszy musi być czujnik. Innym istotnym czynnikiem wpływającym na dokładność jest prędkość odczytu oraz transmisji danych. Wiele z nich zostaje po drodze przekłamanych (przy zastosowaniu komunikacji radiowej), co skutkuje wzrostem poziomu błędów odczytu, a w konsekwencji zwiększa błędy podczas analizy danych. Stosując dodatkowe algorytmy korekcji danych lub choćby

discussed design. The assessment of HC-12 data transmission efficiency is done by comparing the levels of received signals for HC-12 module and SDR receiver. In the next stages of system development the authors are going to test other communication modules. This has to be done to choose the most efficient wireless transmission modules (radio links) operating to 1 km range.

The discussed design may be used for testing different flying objects. Its basic feature of recording the raw data via the radio link allows for carrying out the destructive tests. The recorded data may be processed independently and many times by different algorithms. The comparison of tests may indicate for instance the most efficient and inexpensive navigation methods without GPS. For the destructive tests it is essential to find out a trade-off between the quality and accuracy and cost. There are many systems on the market determining the position of objects. Depending on their application requirements they are taken out from various cost levels. The main criteria concern the accuracy and experiment duration time. Inexpensive IMU modules have a lower accuracy depending on the quality of deployed sensors and limited measurement ranges as they are not resistant against high overloads. For the trials lasting over a significant time the measurement errors are cumulated and thus the longer times require more accurate sensors. The rate of data reading out and transmission is another important factor affecting the accuracy. Some pieces of information are deformed during the transmission (by using radio links) what increases the level of errors at reading out and finally increases the errors at analysis of data. The interfered or deformed data may be eliminated by using

kontroli CRC eliminujemy zakłócone lub przekłamane dane, jednak zmniejszamy szybkość transmisji wskutek wzrostu liczby danych. Do realizacji takich algorytmów korekcyjnych potrzebna jest większa moc obliczeniowa. Bardziej wydajna praca w krótkim czasie wiąże się często z koniecznością wykorzystania układu o większych gabarytach, kosztach, wzmocnionym zasilaniu a także masie, której zwiększenie jest niekorzystne dla obiektów latających. Podobne problemy występują podczas dobierania podzespołów odpowiedzialnych za transmisję danych. Wraz ze zwiększoną liczbą pomiarów w jednostce czasu oraz jej precyzją wymagana jest wyższa prędkość transmisji. W związku z tym konieczna może okazać się praca modułów radiowych na wyższych częstotliwościach lub mocach (ewentualnie budowa bardziej skutecznych systemów anten odbiorczych).

3. Podsumowanie

Celem artykułu było przedstawienie projektu systemu rejestracji danych nawigacyjnych, służących do określenia trajektorii obiektu latającego i lokalizacji jego punktu upadku z wykorzystaniem różnych algorytmów nawigacyjnych. Powyższy projekt ma na celu przedstawienie koncepcji taniego rozwojowego systemu, który umożliwi pozyskanie i bezprzewodowe zarejestrowanie „surowych” danych z czujników MEMS (i innych dodatkowych) w postaci pierwotnej. Dzięki temu możliwa jest ich wielokrotna obróbka, a więc zwiększa się możliwość wykorzystania tych danych, ponieważ w przypadku, gdy odbierane dane byłyby przetworzone przed wysłaniem do urządzenia odbiorczego na dane nawigacyjne (co powoduje wydłużenie czasu pracy procesora w urządzeniu nadawczym), to uzyskana zostanie mniejsza ilość danych oraz zmniejszy się zakres możliwości przeprowadzania wszelkich analiz ruchu i położenia badanego obiektu. Dysponując danymi nieprzetworzonymi mo-

additional algorithms of data correction or even CRC but at the same time the rate of transmission is reduced due to greater amount of data. A greater calculating power is needed for such correcting algorithms. More efficient operation within a short time usually requires employment of units with greater dimensions, costs, power consumption, and the weight what is not preferred for the flying objects. Similar problems arise at selection of subunits responsible for data transmission. The higher rate of transmission is needed for increased accuracy and rate of measurements. Regarding the above it could be necessary to use the radio modules of higher frequency or power (more efficient systems of receiving antennas may be used optionally).

3. Summary

The paper is aimed to present a concept of solution of the navigation data recording system for establishing the trajectory of a flying object and its point of fall by using different navigational algorithms. The above mentioned solution is designed to present a concept of a cheap perspective system for acquisition and wireless recording of raw data from sensors MEMS (and additional ones) in original form. Due to this, the data may be processed many times and it is a better solution because when the received data were processed into the navigational data (what extends the time needed by processor in the transmitting device) before sending it to the receiving device then it would reduce the volume of data and chances for performing any analyses of movement and position for investigated object. When the raw data is possessed then the calculations may be repeated using different, even

żemy wykonać obliczenia powtórnie z wykorzystaniem różnych, nawet równoległe działających algorytmów. Niski koszt podzespołów systemu umożliwi przeprowadzanie większej ilości badań niszczących, a także możliwość wstępnego zastosowania w obiektach latających jednokrotnego użytku, wymagających określenia trajektorii, położenia czy też rejestracji innych parametrów. W projektowanym systemie jest możliwość dołączenia dowolnego zewnętrznego czujnika np. do pomiaru temperatury lub napięcia. Tego rodzaju pomiary mogą być pomocne podczas badania prototypów. Pierwsze badania systemu pozwolą oszacować wartości błędów spowodowanych transmisją radiową. Kolejnym elementem, który będzie optymalizowany to sposób komunikacji pomiędzy modułem IMU a procesorem, który odpowiedzialny jest za przesyłanie danych do układu nadajnika. Kiedy zachodzi potrzeba implementacji komunikacji pomiędzy układami scalonymi, na przykład mikrokontroler – moduł GY-80, który jest względnie wolnym urządzeniem peryferyjnym, z wielu względów nie jest opłacalne stosowanie złożonych protokołów, takich jak USB, SATA czy Ethernet. W przypadku, gdy dane muszą być przesyłane z dużą prędkością, SPI jest lepszym protokołem niż I²C. SPI nie definiuje ograniczenia prędkości, gdzie I²C często wymaga specyficznych buforów I/O, przez co transmisja jest wolniejsza. Nie wszystkie czujniki posiadają możliwość komunikacji przez SPI. Jednak kluczowe układy pomiarowe modułu GY-80 mają taką możliwość. W przypadku magnetometru, wolniejsza komunikacja z mikrokontrolerem (po szynie I²C) nie stanowi problemu, gdyż dane korekcyjne z magnetometru mogą być uwzględniane rzadziej.

Podsumowując, przedstawiony projekt pokazuje sposób rejestrowania w czasie lotu i przetwarzania danych pomiarowych po zakończeniu lotu szybko przemieszczających się obiektów. Dużą jego zaletą jest przesyłanie surowych danych z czujników w czasie lotu

concurrently running, algorithms. The greater number of destructive tests can be realised at lower cost of system's subunits, and beside that they can be provisionally applied in disposable flying objects for which the trajectory and position has to be established, or some other parameters have to be recorded. Proposed system can accept any external sensor, measuring for instance the temperature or voltage. Such measurements may be useful at investigations of prototypes. The first tests of the system could estimate the values of errors caused by the radio transmission. A way of communication between IMU module and the processor responsible for sending the data to the transmitter is a next component which has to be optimised. When a need for communication between integrated digital units appears, for instance between microcontroller and module GY-80 which is a relatively slow peripheral device, then for many reasons it is not profitable to use the complex protocols such as USB, SATA or Ethernet. In the case when the data has to be transmitted at the high rate then SPI protocol is better than I²C. The SPI does not define the limitation of the speed whereas the I²C often demands specific I/O buffers slowing the transmission. Communication via SPI is not available for every sensor but the crucial measurement units of GY-80 system have such capability. In the case of magnetometer a slower transmission rate with microcontroller (via I²C bus) is not problematic as the correcting data from magnetometer may be accounted rarely.

Summing up, the presented solution describes a way of data recording during the flight and post-trial processing for high speed objects. Transmission of raw data from the sensors during the flight of the high speed object by using inexpen-

obiektu przemieszczającego się z dużą prędkością, wykorzystując niskokosztowe moduły.

Omawiany projekt systemu rejestracji toru lotu obiektu latającego, z wykorzystaniem inercyjnego algorytmu nawigacyjnego oraz modułów transmisji radiowej, powinien być zrealizowany z wykorzystaniem niskokosztowych modułów: GY-80 i HC-12, dzięki którym możliwe będzie uzyskanie danych niezbędnych do realizacji algorytmów nawigacji inercyjnej w oparciu o zarejestrowane sygnały i określenie parametrów lotu obiektu z zadowalającym poziomem dokładności. Planowane w kolejnym etapie przeprowadzenie badań pozwoli uszczegółowić prace nad systemem, określić jego dokładność oraz możliwości analizy otrzymanych danych opisujących trajektorię lotu z wykorzystaniem różnych algorytmów nawigacyjnych w oparciu o zarejestrowane dane.

sive modules is the advantage of the solution.

Discussed design of the system, recording the object flight path by using the inertial navigation algorithms and radio transmission modules, has to be performed with implementation of low cost modules: GY-80 and HC-12 which provide data needed for application of inertial navigation algorithms on the basis of recorded signals to establish the object flying characteristics with demanded level of accuracy. In the next stage some investigations will be carried out to specify the system more precisely and establish its accuracy and the possibility of analysing the received data, describing the flight trajectory, with the use of different navigational algorithms.

Literatura / Literature

- HC-12 Wireless Serial Port Communication Module. User Manual v1.18. (2012). Pobrane z <http://electrow.com/download/HC-12.pdf>.
- Nwe, T.T, Htike, T., Mon, K.M., Naing, Z.M. (2008). Application of an Inertial Navigation System to the Quad-rotor UAV using MEMS Sensors, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 18, 578-582.
- Pedley, M. (2013). Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. Freescale Semiconductor. *Application note: AN3461, Rev. 6*. Pobrane z <http://anp.com/docs/application-note/AN3461.pdf>.
- Welker, E. (2013). *Sposoby pozyskiwania informacji o elementach pola magnetycznego Ziemi i ich wykorzystanie w geodezji i nawigacji*, Seria Monograficzna Nr 17. Warszawa: Instytut Geodezji I Kartografii.

