

ОПРЕДЕЛЯНЕ ОРИЕНТАЦИЯТА НА БЕЗПИЛОТНО ВЪЗДУХОПЛАВАТЕЛНО СРЕДСТВО ЧРЕЗ ВГРАДЕНА СИСТЕМА

Константин Методиев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: komet@space.bas.bg

Ключови думи: *Инерциална курсовертикала, PIC18F2550, Микро – електромеханичен сензор*

Резюме: *Цел: Измерване ориентацията на безпилотно въздухоплавателно средство във функция на Ойлерови ъгли.*

Метод: Използваният сензорен модул е AHRS GY-88 с 10 степени на свобода. Модулът включва триосни акселерометър и скоростен жirosкоп, интегрирани в сензор MPU6050, триосен магнитометър HMC5883L и барометър BMP085. Данните се събират по протокол I²C. Получената информация се предава към персонален компютър чрез микроконтролер PIC18F2550, който от своя страна е свързан с компютъра по сериен порт. Данните от акселерометъра и скоростния жirosкоп се обработват чрез линеен филтър на Калман. Използваните програмни среди са MikroC for PIC, MS Visual Studio, Matlab и Processing.

Резултати: В доклада се демонстрира приложимостта на сензорния модул в дистанционно управляеми авиомодели. Забранява се използването на модула на борда на пилотируем самолет от съображения за сигурност!

EMBEDDED SOLUTION FOR ATTITUDE DETERMINATION OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Konstantin Metodiev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: komet@space.bas.bg

Keywords: *AHRS, PIC18F2550, MEMS*

Abstract: *Objective: An unmanned aerial vehicle attitude is to be measured in terms of Euler angles.*

Method: The used sensor module is a ten degrees of freedom (10 DOF) GY-88 attitude and heading reference system (AHRS) including a three axis accelerometer and a rate gyro integrated within MPU6050 sensor, a three axes magnetometer HMC5883L, and a barometer BMP085. All data are collected through I²C protocol. The data being received are logged further into a PC by means of PIC18F2550 microcontroller unit which in turn interfaces the PC through a serial port. Both the accelerometer and the rate gyro outputs are processed further by means of linear Kalman filter. The utilized development environments are MikroC for PIC, MS Visual Studio, Matlab, and Processing.

Results: In the article hereby, the sensor applicability to a remotely controlled aerial vehicles is demonstrated. It is strictly forbidden to install the sensor onto a piloted aircraft for safety reasons.

Въведение

Разгледаният в доклада модул GY-88 представлява триосна система от сензори, която дава информация в реално време за ориентацията в пространството, а именно Ойлерови ъгли (и/или кватерниони), магнитен курс, както и атмосферно налягане и температура. Модулът спада към т.нар. група „Attitude and Heading Reference System – AHRS“. Най-близкият превод на български е „Инерциална курсовертикала“, с уточнението, че използваните в AHRS сензори са от микро- електромеханичен тип (англ. MEMS – Micro- Electromechanical Sensor).

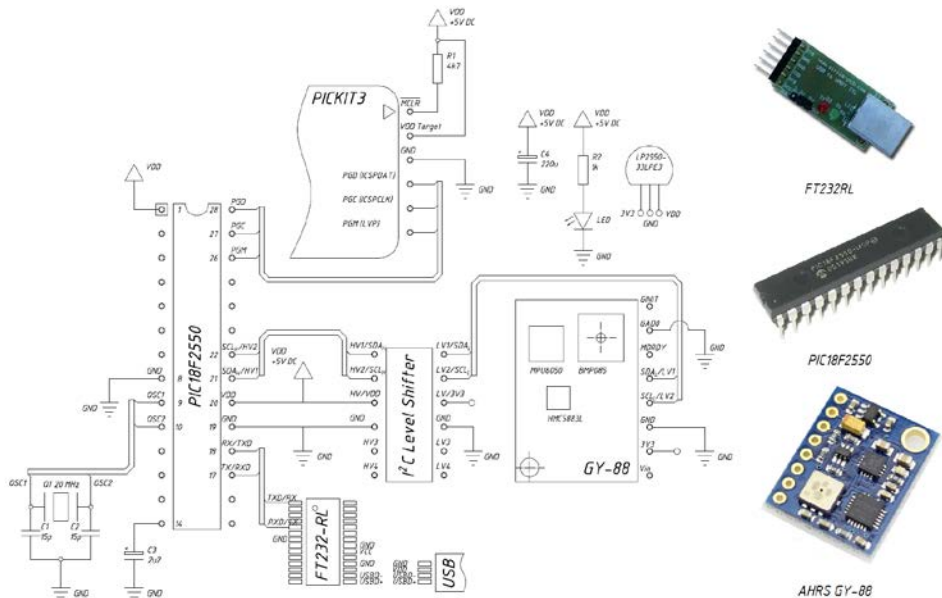
Модулите AHRS са проектирани да заменят традиционните инструменти, базирани на жirosкопи, както и да осигурят по-надеждни и точни данни. Модулите AHRS не приемат

външен радиосигнал, например от GPS или VOR, което ги прави автономни. Приложенията им включват контрол и управление, измерване и корекция, навигация. Примери за приложение на AHRS са жиро стабилизирана платформа за монтаж на камера на борда на въздухоплавателно средство, насочване и стабилизация на бордова камера към наземна цел, източник на пилотажно – навигационна информация.

В настоящия доклад е разгледано използването на AHRS модул GY-88 в безпилотни въздухоплавателни средства. Сензорите на модула се използват в популярния автопилот за авиомодели ArduPilot. В доклада е разгледана в детайли комуникацията между сензорите на модула и приемащата информацията контролер без да се използва цитираният автопилот. Докладът евентуално представлява интерес за авиомоделисти и разработчици на приложения за вграждане (англ. Embedded Applications).

Принципна схема и описание на използвания хардуер

Схемата на проекта включва микроконтролер PIC18F2550, работещ на 20 MHz тактова честота, преходник за логическо ниво за протокол I²C от 3.3V към 5V, преходник FTDI FT232RL от UART към USB и сензорен модул GY-88. Допълнително към контролера се включва и програматор PICKIT 3. Принципната схема на проекта и общият вид на използваните модули са показани на фиг. 1. Преходникът за логическо ниво може да се пропусне ако се използва контролер с MSSP модул за комуникация по I²C, работещ на +3.3V.



Фиг. 1. Принципна схема на проекта и общ вид на основните модули.

Модул GY-88 съдържа сензор MPU6050, състоящ се от триосен акселерометър и скоростен жиро скоп, магнитометър HMC5883L и барометър BMP085. Модулът разполага с вграден регулатор на напрежение до +3.3V, поради което може да се захранва с +5V. Пиновете на модула са следните: **V_{in}** – вход +5V DC към регулатор на напрежение +3.3 V DC; **3V3** – вход +3.3V DC; **GND** – маса; **SCL** – I²C канал за честота; **SDA** – I²C канал за данни; **M_DRDY** – прекъсване от сензор HMC5883L; **G_AD0** – 7-битов I²C адрес за сензор MPU6050: AD0 = 0 (1101000), AD0 = 1 (1101001); **G_INT** – прекъсване от сензор MPU6050.

Механичните и електрически характеристики на сензорите MPU6050, BMP085 и HMC5883L при температура 25 °C са подробно описани в справочната литература [1], [2] и [3]. В настоящото изследване са използвани следните настройки:

- Скоростен жиро скоп (сензор MPU6050): обхват ±250 °/s; чувствителност 131 LSB/(°/s)
- Акселерометър (сензор MPU6050): обхват ±2 g; чувствителност 16384 LSB/g
- Барометър (сензор BMP085): обхват 300 ... 1100 hPa (надм. височина –500 ... +9000 m); резолюция 0.01 hPa; абсолютна точност ±1 hPa
- Магнитометър (сензор HMC5883L): обхват –8 ... +8 gauss; чувствителност 980 (ос Z) и 1100 (оси X, Y) LSB/gauss; резолюция 0.73 ... 4.35 milli-gauss

Линеен филтър на Калман

Линейният филтър на Калман е реализиран в проекта като рекурсивен алгоритъм за оценка на минималната средноквадратична грешка на аритметичната средна на данните, получени от текущо измерване, [4]. Посредством използване на филтъра се получава статистически оптимална оценка на състоянието на системата въз основа на данни, „замърсени“ с шум. Подходът е подходящ за интегриране на данните от акселерометър и жирокоп (англ. Sensor Fusion), тъй като филтърът може да се проектира така, че да оценява както ориентацията на сензорния модул, така и дрейфа на жирокопа (англ. Gyro Bias).

Калмановият филтър може условно да се раздели на два етапа. Стъпка „Предсказване“ (англ. Predictor) оценява текущите променливи на състоянието и съответните грешки. Стъпка „Корекция“ (англ. Update) сравнява получените оценки с ошумените данни, като коригира оценката с комбинация от резултатите, получени на етап Предсказване и измерените данни, умножени с тегловен коефициент. Накрая се изчислява ковариационния момент (англ. Covariance) на оценката, който дава мярка за линейната зависимост между новото състояние и измерените данни.

Линейният филтър на Калман допуска, че процесите, измервани със сензора, са линейни и повлияни само от шумове на процеса и измерването с Гаусово разпределение. Това ограничение се представя математически чрез модел на предсказването и модел на измерването, [5]:

$$(1) \quad \begin{aligned} x_k &= Fx_{k-1} + Bu_k + N(0, Q_k) \\ z_k &= Hx_k + N(0, R_k) \end{aligned}$$

където F е матрица на преходния модел, която трансформира предишното състояние x_{k-1} в следващото състояние x_k ; B е матрица на управлението, която трансформира вектора на управляващите въздействия u_k в състоянието x_k ; H е матрица на модела на наблюдение, която трансформира предсказаното състояние x_k във вектора на наблюдението z_k ; матриците $N(0, Q_k)$ и $N(0, R_k)$ представят източници на Гаусов шум с ковариации Q_k и R_k и аритметична средна 0.

Филтърът на Калман се проектира така, че да оценява ъглите на тангаж и крен на модула GY-88, а така също и дрейфа на скоростния жирокоп по надлъжната и напречна оси. Тогава векторът на състоянието x_k приема вида:

$$(2) \quad x_k = \begin{bmatrix} \vartheta & \gamma & \omega_{xb} & \omega_{yb} \end{bmatrix}_k^T$$

където ϑ е ъгъл на тангаж, γ е ъгъл на крен, ω_{xb} е дрейф на жирокопа по ос x , ω_{yb} е дрейф на жирокопа по ос y .

Векторът на наблюдението z_k се дефинира както следва:

$$(3) \quad z_k = \begin{bmatrix} \vartheta & \gamma & 0 & 0 \end{bmatrix}_k^T$$

Във формули (2) и (3) ъглите на тангаж ϑ и крен γ се определят от необработените данни (англ. Raw Data) според изразите:

$$(4) \quad \vartheta = \text{atan} \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}; \quad \gamma = \text{atan} \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}$$

Тогава моделите на предиктора и измерването са следните:

$$(5) \quad \begin{bmatrix} \vartheta \\ \gamma \\ \omega_{xb} \\ \omega_{yb} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vartheta \\ \gamma \\ \omega_{xb} \\ \omega_{yb} \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} dt & 0 & 0 & 0 \\ 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_k + N(0, Q_k)$$

$$(5) \quad \begin{bmatrix} \vartheta \\ \gamma \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vartheta \\ \gamma \\ \omega_{xb} \\ \omega_{yb} \end{bmatrix}_k + N(0, R_k)$$

Тук ω_x и ω_{xb} представляват респ. ъгловата скорост по ос x и съответния дрейф. В система (5) е направено допускането, че дрейфът на скоростния жироскоп е постоянен във времето.

Филтърът се настройва посредством ковариационните матрици $Q_k = \text{diag}[Q_{\dot{\theta}_x} \ Q_{\dot{\theta}_y} \ Q_{\dot{\theta}_z} \ Q_{\dot{\theta}_b}]$ и $R_k = \text{diag}[R_{\dot{\theta}_x} \ R_{\dot{\theta}_y} \ 0 \ 0]$ и затова е необходимо те да бъдат известни предварително. Смисълът на настройката е в степента на доверие към модела и измерването съответно. Ако се зададат малки стойности на Q_k например, това означава, че моделът е надежден и филтрираните стойности се получават близки до измерените. Добра практика е $Q_k \sim O(1E0)$; $R_k \sim O(1E-2)$.

Етапите на реализация филтъра са описани в табл. 1 ($H = \text{diag}(1 \ 1 \ 0 \ 0)$):

Таблица 1. Последователност на прилагане на линейния филтър на Калман

Екстраполация (предсказване) на вектора за състояние $k k-1$ на системата по оценката от предишното състояние $k-1 k-1$ (априорна оценка)	$x_{k k-1} = F_k x_{k-1 k-1} + B_k u_k$
Определяне на априорна ковариационна матрица на грешката за екстраполирания вектор на състоянието	$P_{k k-1} = F_k P_{k-1 k-1} F_k^T + Q_k$
Определяне на отклонението на наблюдението в стъпка k от априорното състояние в стъпка $k k-1$	$y_k = z_k - H_k x_{k k-1}$
Определяне на матрицата корелационни моменти за вектора на отклонението	$S_k = H_k P_{k k-1} H_k^T + R_k$
Определяне на матрица от коефициенти на усилване на Калман	$K_k = P_{k k-1} H_k^T S_k^{-1}$
Корекция на екстраполирания вектор на състоянието (постериорна оценка)	$x_{k k} = x_{k k-1} + K_k y_k$
Корекция на ковариационната матрица P	$P_{k k} = (I - K_k H_k) P_{k k-1}$

Описаната линейна форма на филтъра е предложена от Калман и Бюси през 1961 г.

Събиране на данните

Данните от измерването се събират от микроконтролера и пренасочват към PC по UART протокол. Обменът на данни между сензорния модул GY-88 и микроконтролера е осъществен по сериен протокол I²C, който е реализиран хардуерно в модул MSSP. Честотата на шина SCL е 100 kHz. Програмата за събиране на данни е разработена в програмна среда Mikro C for PIC (Mikroelektronika, Сърбия). След компилация, полученият hex файл за записване в контролера с програматор PICKIT 3, фиг. 1, от програмна среда MPLAB X IDE (Microchip, САЩ).

Адресът за писане по протокол I²C в сензор MPU6050 е 0xD0. Инициализацията се извършва чрез записване на байт 0x00 в регистри 0x1C и 0x1B съответно за акселерометъра и жироскопа. След издаване на стартов сигнал от контролера, прочитането на данните от акселерометъра следва последователността, показана в табл. 2.

Таблица 2. Прочитане на показанията на акселерометъра по протокол I²C

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Master	S	Write 0xD0		Write 0x3B		RS	Write 0xD1			Read ACK		Read ACK
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		DATA	

Таблица 2. Продължение

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Master		Read ACK		Read ACK		Read ACK		Read NACK	P
Slave	DATA		DATA		DATA		DATA		

Съкращенията, използвани в табл. 2, са следните: S – Start; RS – Repeated start; (N)ACK – (Not) Acknowledge, P – Stop. Данните, които се предават (DATA), имат дължина от 1 байт. Показанието за линейно ускорение по трите оси се предава от сензора в последователност за осите X, Y, Z. Необработените данни от акселерометъра се съхраняват в целочислена променлива с дължина 16 бита signed int. За събиране на данни от трите оси се прочитат общо 6 байта. Събирането на данни спира, когато контролерът предаде бит NACK и сигнал STOP.

По аналогичен начин се събират необработените показания от скоростния жирокоп. Разликата е само в адреса на регистъра от колонка 5, табл. 2. Вместо 0x3B се записва 0x43. Последователността за събиране на данни от сензор MPU6050 е описана подробно в ръководство [1].

Процедурата за прочитане на необработени данни от магнитометъра започва с инициализация на сензора в Continuous Measurement Mode. Събирането на данните е аналогично на посоченото в табл. 2. Разликите са в адреса за писане (колонка 3 – 0x3C) и адреса на регистъра с данни (колонка 5 – 0x03). Последователността на предаване на данните от сензора за трите оси обаче е X, Z, Y. Последователността на събиране на данните е подробно описана в ръководство [3]

Най-трудоемко е събирането на необработени данни от барометъра BMP085, в частност некомпенсираните температура и атмосферно налягане. Адресът за писане е 0xEE. Последователността на комуникация по I²C е описана в табл. 3.

Таблица 3. Прочитане на некомпенсираната температура от барометъра по протокол I²C

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Master	S	Write 0xEE		Write 0xF4		Write 0x2E		P	S	Write 0xEE		Write 0xF6	
Slave			ACK		ACK		ACK				ACK		ACK

Таблица 3. Продължение

15	16	17	18	19	20	21	22	23
Master	RS	Write 0xEF			Read ACK		Read NACK	P
Slave			ACK	DATA		DATA		

Резултатът от измерване на некомпенсирана температура се съхранява в целочислена променлива от тип signed int. По аналогичен начин се прочита некомпенсираното налягане. Разликата е в колонка 7, табл. 3. Вместо числото 0x2E се записва числото 0x34. Сензорът предава три байта, които, след последователни отмествания през 8 бита, се съхраняват в целочислена променлива от тип unsigned long int. Инициализация на барометъра не е необходима, тъй като истинските налягане и температура зависят от уникални за барометъра калибровъчни коефициенти.

Събирането на необработени данни се извършва в среда Visual Studio (Microsoft, САЩ) чрез конзолно приложение под Win32. Програмата прочита сериен порт и съхранява данните в текстов файл. Номерът на порта се задава автоматично от операционната система след инсталиране на драйвер за преходника на FTDI, фиг. 1. Символната скорост (англ. Baud Rate) се задава както в програмата за контролера, така и в програмата за събиране на данните. Логично е, че стойностите трябва да се еднакви и в двете програми, в случая 57600 bps.

Получените посредством контролера необработени данни от акселерометъра и жирокопа на сензор MPU6050 се обработват с линеен филтър на Калман в среда Matlab, следвайки формулите в табл. 1.

Събраните необработени данни от сензор BMP085 за некомпенсираните температура и налягане се обработват следвайки трудоемка процедура, която е изложена подробно в ръководство [2]. Стойностите на действителното налягане и температура зависят от единадесет калибровъчни коефициента, които са уникални за всеки сензор и следва да се прочетат еднократно от контролера. В ръководство за потребителя [2] са показани примерни изчисления с междинни резултати за хипотетични стойности на калибровъчните коефициенти. Това дава възможност на програмиста да тества функцията за обработка на некомпенсираните данни. Поради ограничения обем на доклада тази процедура не е описана. Читателят може да направи справка в ръководство [2], стр. 13.

Както е известно, магнитният север не съвпада с географския. Това налага получените данни от магнитометър HMC5883L да се коригират със стойността на магнитната деклинация. Последната зависи от географското положение на сензора и от времето. Справка за локалната и текуща стойност на деклинацията може да се направи в [6].

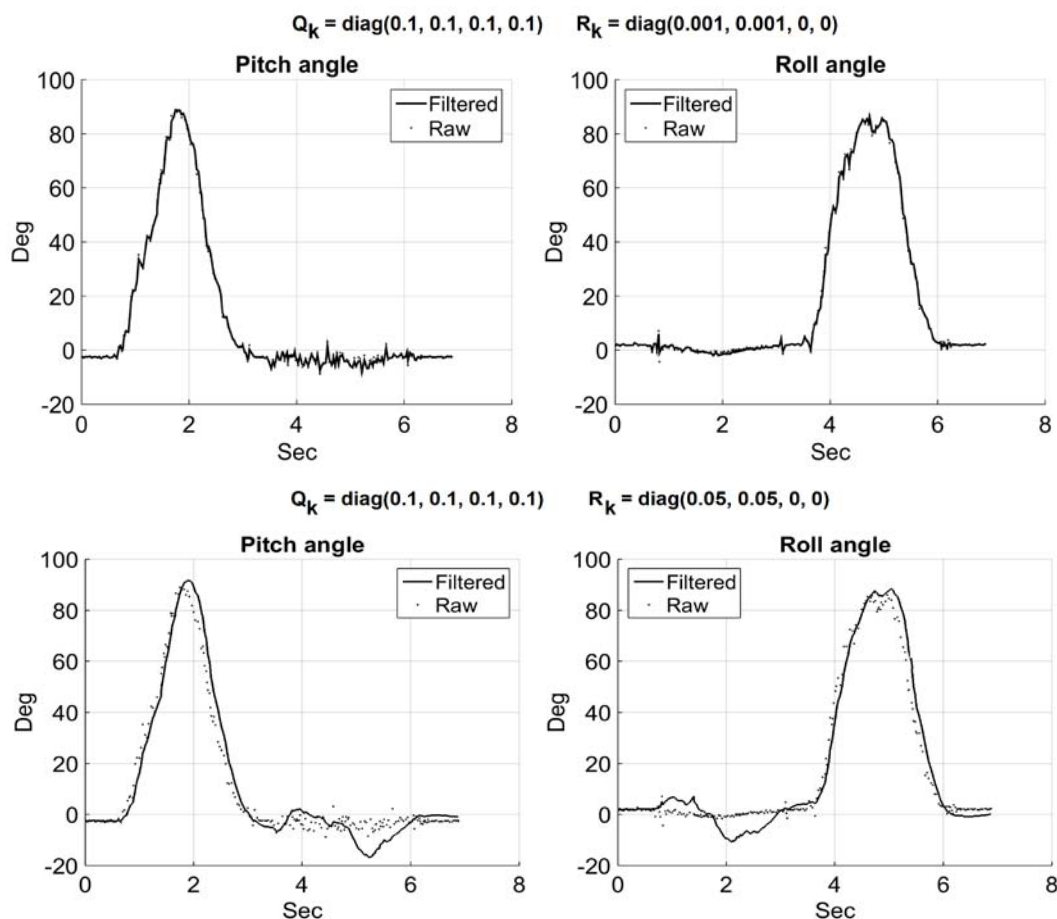
Резултати

За последователно измерени ъгли на тангаж и крен бяха обработени данните с линеен филтър на Калман за различни стойности на матриците от корелационни моменти Q_k и R_k .

Резултатите са показани на фиг. 2. Ясно проличава смисълът на ковариационните матрици, които отразяват степента на доверие в модела и получените данни.

Калибровката на датчиците и точността на измерване се гарантират от производителя. За потребителя е достатъчно да направи еднократно измерване, за да се получи резултат с точност, посочена в документи [1], [2] и/или [3]. Изключение е температурният офсет, като в цитираните документи са описани начини за компенсиране на резултата.

Стойността на действителните температура и атмосферно налягане на 08 септември, 2015 г., 12:30 часа, гр. София се получиха съответно 24.4 °C и 95318.43 Pa, съответстващи на надморска височина 512 m. Грешката на резултатите е посочена в документ [2].



Фиг. 2. Филтриране на измерените ъгли на тангаж (ляво) и крен при различни ковариационни матрици R_k

Заклучение

Приложението на метода за определяне ориентацията на БЛА в пространството във функция на Ойлерови ъгли е ограничено поради редица свойствени недостатъци. За трите Ойлерови ъгли тангаж, крен и рискание съществуват 12 различни последователности на въртене, които не са инвариантни. Например след последователни завъртания с тангаж 90° и крен 90°, БЛА приема ориентация, която е различна при същите ъгли на завъртане, но приложени в обратна последователност. Друг недостатък са сингулярности в математическия модел за стойности на Ойлеровите ъгли, както следва: рискание $\pm 2\pi$, тангаж $\pm \pi/2$, крен $\pm 2\pi$. Недостатък също се наблюдава когато един от Ойлеровите ъгли приема стойност $|\pi/2|$. В този случай БЛА губи една степен на свобода (рус. Складывание рамок, англ. Gimbal Lock). Произволното изменение на останалите два ъгъла води до еднакво отклонение на БЛА в пространството, [7].

Всички споменати недостатъци на метода отпадат при определяне на ориентацията на БЛА чрез кватерниони и т. нар. обобщен филтър на Калман (англ. Extended Kalman Filter). Описаният в доклада метод обаче е по-лесен за реализация и приложим за неманеврени БЛА.

Поради ограничения обем на доклада са спестени подробности относно програмирането на микроконтролера и персоналния компютър. Читателят получава пълен

достъп до изходния код, публикуван от автора в GitHub, [8], но само след цитиране на настоящия доклад. Демонстрация на използването на сензора може да се наблюдава на адрес [9], където данните се събират в РС чрез програмна среда Processing.

Литература:

1. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification, Rev. 3.4, InvenSense Inc., 2013
2. BMP085 Digital Pressure Sensor, Data Sheet, Bosch Sensortec, 2008
3. 3-Axis Digital Compass HMC5883L, Honeywell, Rev. E, 2013
4. Watson, M., The Design and Implementation of a Robust AHRS for Integration into a Quadrotor Platform, MSc Thesis, University of Sheffield, May, 2013
5. Minkler, G., J. Minkler, Theory and Application of Kalman Filtering, Palm Bay, FL: Magellan Book Co., ISBN 0962161829, 1993
6. <http://www.magnetic-declination.com>
7. <http://www.youtube.com/watch?v=zc8b2Jo7mno&t=0m40s>
8. <https://github.com/samolet4e/AHRS-GY-88>
9. <https://www.youtube.com/watch?v=nsk0kRp7GIA>