

ОПРЕДЕЛЯНЕ ОРИЕНТАЦИЯТА НА ОБЕКТ С ИНЕРЦИАЛЕН МОДУЛ И ФИЛТЪР НА КАЛМАН

Емил Йончев¹⁾, Росен Милетиев²⁾, Тодор Тодоров¹⁾, Лъчезар Христов¹⁾ Емил Михайлов¹⁾

*e_iontchev@yahoo.com, miletiev@tu-sofia.bg, Lachezar.Hristov@outlook.com, t.todorov@valbis.com,
emil_mihaylov@abv.bg*

*¹⁾ Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”,
ул. “Гео Милев”, 158, София 1574*

*²⁾ Технически Университет – София
София 1000, бул. “Кл. Охридски” 8
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** филтър на Калман, акселерометър, жirosкоп, магнитометър, инерциална измервателна единица, ъгли на Ойлер, кватерниони*

***Резюме:** Определяне ориентацията на обект в пространството е задача, която се поставя в много области от човешкият живот – въздушния транспорт, управлението на дронове, военната техника, роботиката, компютърните игри, позиционирането в затворени помещения и други.*

В статията е предложен модел на филтър на Калман за определяне ориентация на обект на базата на инерциални сензори и магнитометър. Определени са променливите на състоянието и са избрани параметрите за наблюдение. За получаване на необходимите параметри за филтъра е използван инерциалния измервателен модул за абсолютна ориентация BNO055 на фирмата Bosch. Използвана е възможността предоставена от модула, да се отдели гравитационната компонента на измереното ускорение от акселерометъра. Това дава възможност за по-точно изчисляване на ъглите за ориентация и при динамични въздействия върху обекта. За определяне на ъгъла на завъртане около ос, която е успоредна на земното ускорение е използван магнитометъра от модула. От BNO055 директно се получават кватерниони, които са използвани, като променливи на състоянието, за предсказване на бъдещо състояние на модела. Филтърът е реализиран в програмната среда Матлаб. За точно задаване ориентация на обект в лабораторни условия и за целите на тестване на филтъра е разработен уред за задаване на наклон спрямо изходно вертикално положение. Реализирана е измервателна система с BNO055 и са получени експериментални резултати за ориентацията на обект с предложения филтър на Калман.

ВЪВЕДЕНИЕ

Определяне ориентацията на обект в пространството е задача, която се поставя в много области от човешкият живот – въздушния транспорт, управлението на дронове, военната техника, роботиката, компютърните игри, позиционирането в затворени

помещения и други. Позицията на тялото се определя от координатите му спрямо избрана координатна система (свързана с обекта), но за ориентацията на тяло е необходимо да се знае и неговото завъртане спрямо началото на координатната система в евклидовото пространство. Това се извършва посредством трите ъгъла на Ойлер. Два от ъглите може да бъдат определени с използване на акселерометри, имащи възможност да измерват земното ускорение. То се изменя в границите от $-1g$ до $+1g$, което съответства на изменение на ъгъла от 0 до 180° [1]. Третият ъгъл не може да бъде определен с акселерометър, тъй като въртенето му около вертикалната ос не предизвиква промяна в земното ускорение, т.е. липсва промяна в изходния сигнал в случая когато дадена ос е успоредна на земното ускорение. За определяне на ъгъла на завъртане се използва магнитометър, който измерва земното магнитно поле в конкретната точка [2]. Трите ъгъла може да бъдат определени също като се използва жирокоп и получените ъглови скорости се интегрират [3]. Всеки един от сензорите има предимства и недостатъци спрямо останалите. За подобряване на точността, с която се определят ъглите на Ойлер се прилага обединяване на данните от отделните сензори. Една възможност това да стане е като се използва филтър на Калман [4].

Производителите на интегрални схеми предлагат инерциални измервателни модули, в които под един корпус са разположени акселерометър, жирокоп, магнитометър, а често и барометър. Тяхната работа се управлява от вграден микроконтролер, който се използва и за извършване на предварителна обработка на получаваните данни. Пример за такова решение е модула BNO055 на фирмата Bosch [5]. Той има възможност да определя ориентацията на тяло в тримерно пространство, спрямо референтна координатна система, като директно извежда трите ъгъла на Ойлер. Има възможност ориентацията на тяло да се определя и посредством кватерниони, които също са определени и може да бъдат прочетени. Освен статичните ускорения (с включена съставка на земното ускорение), модула има възможност да измерва само линейните ускорения предизвикани от движение. Това е особено полезно когато се изчислява ориентацията на обект по време на движение, за премахване на ускоренията от самото движение.

В статията е предложен модел на филтър на Калман за определяне ориентация на обект на базата на инерциалния измервателен модул за абсолютна ориентация BNO055. Определени са променливите на състоянието, избрани са параметрите за наблюдение и е представен алгоритъма на филтъра. Той е реализиран в програмната среда Матлаб. За точно задаване ориентация на обект в лабораторни условия и за целите на тестване на филтъра е разработен уред за задаване на наклон спрямо изходно вертикално положение. Реализирана е измервателна система с BNO055 и са получени експериментални резултати за ориентацията на обект с предложени филтър на Калман.

ЛИНЕЕН МОДЕЛ НА ФИЛТЪР НА КАЛМАН ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ОРИЕНТАЦИЯТА НА ОБЕКТ

Филтърът на Калман оценява състоянията $x_k \in R^n$ на дискретна система за управление, чието функциониране се описва с диференциални уравнения в пространството на състоянията [6]:

$$(1.1) \quad x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}$$

Матрицата A свързва променливите на състоянието от предишната стъпка $k-1$ със състоянието в стъпка k . Тази матрица може да се променя във всяка времева стъпка. Матрицата B свързва u_k входните параметри и променливите на състоянието x_k на системата, фигура 1.

Измервани параметри на системата са $z_k \in R^n$, които са свързани с променливите на състоянието с израза:

$$(1.2) z_k = Hx_k + v_k$$

Матрицата H свързва състоянието x_k с измерването z_k . Тази матрица може да променя във всяка времева стъпка.

В уравненията са включени шума на модела w_k и измерването v_k .

Алгоритъмът на функциониране на филтъра на Калман за всяка конкретна задача е съставен от две основни действия – априорно и апостериорно оценяване.

От предварителната информация за процеса на стъпка k се извършва априорна оценка на състоянието, която се записва с \hat{x}_k^- .

$$(1.3) \hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + w_{k-1}$$

$$(1.4) z_k^- = H\hat{x}_k^-$$

Апостериорната оценка на състоянието на стъпка k е на база на измерванията z_k и е означена с \hat{x}_k . На тази база се дефинира априорна и апостериорна грешка на оценката:

$$(1.5) e_k^- = x_k - \hat{x}_k^-$$

$$(1.6) e_k = x_k - \hat{x}_k$$

Априорната стойност на ковариацията на грешката се определя с:

$$(1.7) P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}]$$

$$(1.8) P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$$

Апостериорната ковариация на грешката се определя с:

$$(1.9) P_k = E[e_k e_k^T]$$

$$(1.10) P_k = P_k^- - K_k H P_k^-$$

Апостериорната оценка на състоянието \hat{x}_k , като линейна комбинация на априорната оценка \hat{x}_k^- и претеглената разлика между актуалното измерване z_k и предсказаното измерване $H\hat{x}_k^-$ се определя с изрази:

$$(1.11) \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-)$$

Матрицата K_k се нарича коефициент на усилване на Калман и се определя с израза:

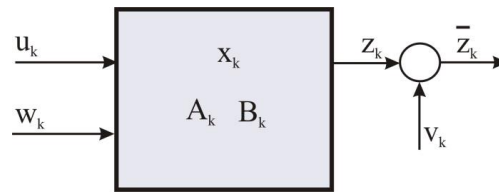
$$(1.12) K_k = \frac{P_k^- H^T}{H P_k^- H^T + R}$$

В зависимост от стойността на коефициента K се определя дали актуалното измерване да бъде с по-голяма тежест или предсказаното измерване. Когато ковариацията на грешката от измерването R клони към нула, на актуалното измерване се „вярва“ повече и повече. От друга страна ако априори оценената ковариация на грешката P_k^- стане нула, на направеното измерване се „вярва“ все по-малко и по-малко, докато на предсказаното измерване се вярва все повече.

Ковариацията на шума от измерването R обикновено се определя преди работата на филтъра и може да бъде определена от каталожните данни на фирмата производител. Определяне на ковариацията на шума на процеса Q е по-трудна задача, защото няма директна възможност да се наблюдава процеса, той е оценяван. В статията е предложен линеен модел на филтъра на Калман на базата на кватерниони. Те се изчисляват като се използват изчислените ъгли ϕ , θ и ψ от измерванията направени от акселерометъра и магнитометъра:

$$(1.13) \tan\phi = \left(\frac{a_y}{\text{sign}(a_z)\sqrt{a_z^2 + 0.01a_x^2}} \right)$$

Членът $\text{sign}(a_z)$ е въведен за да въведе знака на ускорението a_z , който се губи при въвеждането на квадратния корен.



Фиг. 1. Параметри на линейна система

$$(1.14) \quad \tan\theta = \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}$$

Ъгълът ψ се определя от показанията на магнитометъра след като данните от него се подложат на предварителна обработка за премахване на влиянието на смущаващи магнитни полета и се определи ъгъла на инклинация от данните на акселерометъра [7].

$$(1.15) \quad \tan(\psi) = \left(\frac{-B_{fy}}{B_{fx}} \right)$$

$$(1.16) \quad B_{fx} = (B_{bx}) \cos(\theta) + (B_{by}) \sin(\theta) \sin(\phi) + (B_{bz}) \sin(\theta) \cos(\phi)$$

$$(1.17) \quad B_{fy} = (B_{by}) \cos(\phi) - (B_{bz}) \sin(\phi)$$

Връзката между предсказаната \hat{x}_k^- и текущата стойност на кватернионите \hat{x}_{k-1} се осъществява с матрицата A:

$$(1.18) \quad \hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + w_{k-1}$$

Матрицата A в дискретна форма има вида [8]:

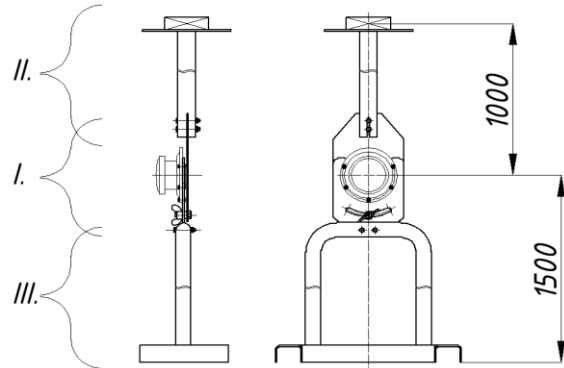
$$(1.19) \quad A = I + \Delta t \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix}$$

p, q и r са измерените ъгловите скорости на обекта получени от жирокопа, Δt е периода на дискретизация на данните от сензорите.

От определените стойности на кватернионите с израз 1.18, се изчисляват ъглите на Ойлер ϕ , θ и ψ .

УРЕД ЗА ЗАДАВАНЕ НА ЪГЪЛ НА НАКЛОН СПРЯМО ИЗХОДНО ВЕРТИКАЛНО ПОЛОЖЕНИЕ

За проверка способността на инерциалните измервателни модули да регистрират минимални изменения в наклона на обект, спрямо зададеното му изходно положение, е проектирана и изработена конструкция на уред за задаване на определен ъгъл на наклон. Той се използва за провеждане на опити в лабораторни условия, за проверка характеристиките на модулите и избор на оптимална конфигурация на измервателната система. Конструкцията на уреда е показана на фигура 2. Звеното за задаване на ъгъл на наклон I е закрепено към рамката на основата III. На подвижното рамо II се закрепва изследвания сензор. Със звеното I има възможност да се задават части от ъгловия градус в диапазона $\pm 30^\circ$.



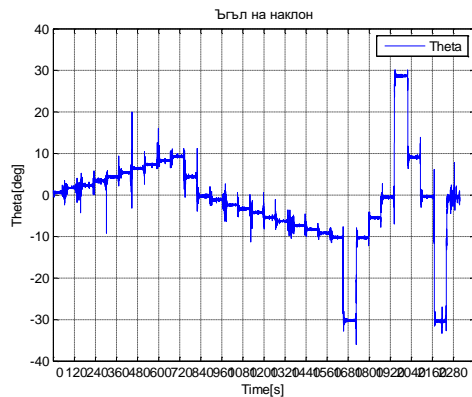
Фиг. 2. Конструкция на уреда за задаване на наклон

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

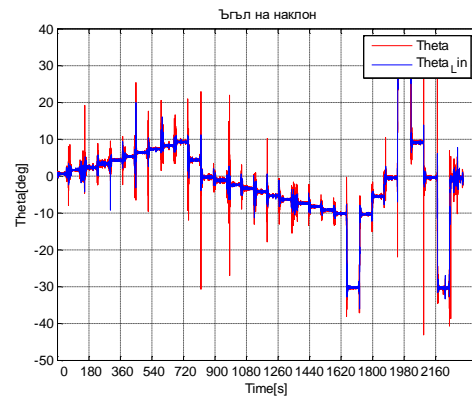
За тестване на работоспособността на предложеният модел на филтъра на Калман е реализирана измервателна система на базата на сензора BNO055 и микрокомпютъра Raspberry Pi 3A.

Представеният алгоритъм на филтъра е реализиран в програмната среда Матлаб. Данните са записани в текстови формат и впоследствие превърнати във вид на матрица за обработката им с филтъра на Калман. Сензора е монтиран върху подвижното рамо и е наклоняван първоначално надясно през един ъглов градус до десет градуса. След това е върнат на пет градуса наляво, след това на нула градуса. Стремежа е бил във всяка позиция да престоява по една минута, като времето за пренастройване е променливо в

зависимост от конкретната ситуация. След това е направено същото като сензора е наклоняван наляво до десет градуса, през един градус, а след десет директно на тридесет градуса. Последващата промяна в наклона може да се проследи от графиката фигура 3.

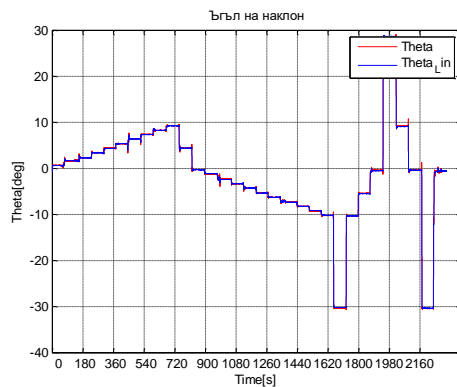


Фиг. 3. Оцененият ъгъл θ от филтъра на Калман



Фиг. 4. Оцененият ъгъл θ от филтъра на Калман със и без линейни ускорения

За да се оцени влиянието на линейните ускорения при определянето на ъглите, от получените данни за ускоренията с наличие на земното ускорение, са извадени



Фиг. 5. Оцененият ъгъл θ от филтъра на Калман с филтър с пълзящо средно

линейните ускорения и отново са определени трите ъгъла на Ойлер, фигура 4. Отскоците в стойностите на ъгъла са получени в моментите на пренастройване в нова стойност. Те значително намаляват с премахване на линейните ускорения (графиката в синьо). За тяхното намаляване е разработен и филтър с пълзящо средно. Той е приложен върху вече получените стойности на ъглите на Ойлер, като е избран прозорец с дължина петдесет отчета, което превърнато във време е една секунда. Резултата от прилагането на този филтър е показан на фигура 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложеният модел на филтър на Калман за определяне ориентация на обект на базата на инерциални сензори и магнитометър е реализиран в програмната среда Матлаб. Данните от отделните сензори са събрани с помощта на измервателна система на базата на Raspberry Pi 3A. Получени са стойностите на трите ъгъла на Ойлер от данните на акселерометъра със земно ускорение и от данни когато от тези ускорения са извадени линейните ускорения. Получените резултати показват намаляване на промените в ъглите при динамични въздействия. Това е вариант който следва да се използва за повишаване на точността за определяне на ъглите при движещ се обект. Получаваните стойности на ъглите са стабилни във времето и с много добра разделителна способност, под един ъглов градус. Точността на определяне на ъглите се повишава при допълнително филтриране на изходните данни с филтър с пълзящо средно.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Vitali Andrea, Tilt computation using accelerometer data for inclinometer applications, November 2020, DT0140 Rev 1 1/19, www.st.com
- [2] Caruso Michael J. , Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems, Honeywell, SSEC
- [3] Rate Gyro Application Note, Grossbow
- [4] Kalman R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, ASME Journal of Basic Engineering, series D: 35–45, 1960
- [5] <https://www.bosch-ensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bstbno055-ds000.pdf>
- [6] Welch Greg, Gary Bishop, An Introduction to the Kalman Filter, University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, NC 27599-3175, <http://www.cs.unc.edu/~{welch,gb}>
- [7] Ozyagcilar Talat, Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors, Freescale Semiconductor, Application Note Document Number:135 AN4248, Rev. 4.0, 11/2015
- [8] Kim Phil, Kalman Filter for Beginners with Matlab Examples, A-JIN Publishing company, 2011, ISBN-13: 978-1463648350

DETERMINING THE ORIENTATION OF AN OBJECT WITH AN INERTIAL MODULE AND A KALMAN FILTER

Emil Iontchev¹⁾, Rosen Miletiev²⁾, Todor Todorov¹⁾, Lachezar Hristov¹⁾, Emil Mihaylov¹⁾

1) Todor Kableshkov University of Transport 158, Geo Milev Str., 1574, Sofia, BULGARIA

2) Technical University of Sofia, Faculty of Telecommunications, 8 Kl. Ohridski Blvd, 1000, Sofia, BULGARIA

***Keywords:** Kalman filter, accelerometer, gyroscope, magnetometer, inertial measurement unit, Euler angles, quaternions*

***Abstract:** Determining the orientation of an object in space is a challenge that is encountered in many areas of human life - air transport, drone control, military technology, robotics, computer games, indoor positioning, etc.*

In this article, a model of Kalman filter is proposed for determining object orientation based on inertial sensors and magnetometer. The state variables are specified and the observation parameters are selected. The inertial measurement module for absolute orientation BNO055 from Bosch was used to obtain the required parameters for the filter. The capability provided by the module was used to separate the gravity component of the measured acceleration from the accelerometer. This makes it possible to calculate orientation angles more accurately and under dynamic influences on the object. The magnetometer from the module was used to determine the angle of rotation about an axis parallel to the earth's acceleration. Quaternions were directly obtained from BNO055 and used, as state variables, to predict the future state of the model. The filter is developed in the Matlab programming environment. To accurately set the orientation of an object in laboratory conditions and for the purpose of testing the filter, a device for setting the tilt relative to the initial vertical position was developed. A measurement system with BNO055 has been successfully implemented and experimental results for object orientation with the proposed Kalman filter have been obtained.