

КОМПЛЕМЕНТАРЕН ФИЛТЪР ЗА СЪВМЕСТЯВАНЕ НА ДАННИ ОТ СЕНЗОРИ

Емил, Йончев¹, Росен Милетиев², Лъчезар Христов¹
e_iontchev@yahoo.com, miletiev@tu-sofia.bg, Lachezar.Hristov@outlook.com

¹ ВТУ “Тодор Каблешков”, ул. “Гео Милев” 158, София 1574

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

Ключови думи: *комплементарен филтър, филтър на Калман, инерциални сензори, Ойлерови ъгли.*

Резюме: *Сензорите произведени по MEMS технологията са с ниски цени, което определя и тяхното широко приложение в мобилните телефони, системите за виртуална реалност, роботиката, безпилотните летателни средства, автономните автомобили и т.н. Същевременно техните изходни сигнали имат много шумови компоненти и са нестабилни във времето. Един от начините за подобряване на характеристиките им е като се използват данни от два или повече сензора, които взаимно се допълват. Това най-често се прави с помощта на комплементарен филтър или филтър на Калман. Обект на разглеждане в статията са алгоритми на комплементарни филтри използвани за определяне ъгъла на завъртане на детско столче в автомобил. Двата алгоритъма са с различна сложност, единият е с по-проста структура и е подходящ за вграждане в системи реализирани с микроконтролери, вторият е с по-сложна структура и моделира по-добре физичните процеси. Интерес представлява само ъгъла на завъртане спрямо надлъжната ос на автомобила, който може да бъде определен с използването на данни само от два сензора – акселерометър и жирокоп. Тези два сензора имат комплементарни честотни характеристики – акселерометъра ще определя промяната на ъгъла за дълъг период от време, докато данните от жирокопа ще определят неговата моментната стойност. Филтрите са реализирани в средата Матлаб и тяхното действие е верифицирано с данни получени от статични и динамични реални измервания на отклонението на детско столче монтирано в автомобил.*

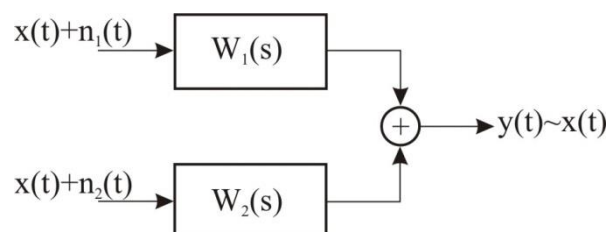
ВЪВЕДЕНИЕ

Определянето на положението на обект в пространството е задача, която може да бъде решена като се използват различни методи и технически средства. В последните години когато става въпрос за определяне на местоположение в открито пространство несъмнено това се извършва с използването на глобалните навигационни сателитни системи[1]. В закрити помещения все по-често се използват наличните локални и персонални безжични мрежи като Wi-Fi, ZigBee, Zwave, BlueTooth[2, 3]. За осигуряване на висока степен на наличност, готовност и широка зона на покритие към горе посочените системи се включва за съвместна работа обикновено и инерциална

навигационна система. Такава система се използва и при необходимост за определяне на пространственото положение на тяло спрямо инерциална координатна система. Такъв е случаят при космическите апарати, самолетите, дроните, роботите и други.. Основните елементи за реализиране на тези системи са акселерометрите, жирокопите, магнитометрите, барометрите. Благодарение на МЕМС технологията цената на тези елементи е ниска, което позволява да се реализират разнообразни системи. Един основен недостатък на технологията, е че параметрите на елементите са нестабилни във времето и изходният сигнал освен полезния сигнал съдържа и много шумови компоненти. Всичко това налага да се използват различни схемотехнически и софтуерни методи за намаляване на тези недостатъци. Един от основните начини е като се използва съвместната работа на различните сензори при определяне на един и същи параметър. Почти във всички системи това съвместяване се извършва с помощта на филтъра на Калман[4]. Друг начин е като се използва комплементарен филтър. Той е с по-малко сложна структура и може по-лесно да се вгради в системи реализирани с микроконтролери. Структурата и използването на такива филтри е разгледано в [5,6,7,8]. В настоящата статия е разгледана принципа на работа на такъв филтър, представени са структурни схеми за съвместяване на данни от акселерометър и жирокоп с цел определяне на Ойлеровите ъгли на обект. Филтрите са реализирани в програмната среда Матлаб. Тяхната работоспособност е верифицирана с данни получени от реални статични и динамични измервания на ускоренията и ъгловите скорости на детско столче монтирано в автомобил.

2. КОНЦЕПЦИЯ НА КОМПЛЕМЕНТАРЕН ФИЛТЪР

Комплементарният филтър съвместява данни от различни сензори с цел намаляване на нежеланите съставки в изходните им сигнали и получаване на резултат по-близък до истинската стойност. Това обаче може да се случи само ако честотните характеристики на сензорите са комплементарни една на друга. Структурната схема на такъв филтър е показана на фигура 1.



Фиг.1. Структурна схема на комплементарен филтър

За измерване на една и съща физична величина се използват два различни сензора, като сигналите на всеки от тях се обработват в отделни филтри след което се сумират за получаване на крайния резултат. На фигурата с $x(t)$ е означена истинската стойност на измерваната величина, с $n_1(t)$ и $n_2(t)$ са означени шумовете включени в измерванията на всеки от сензорите. $W_1(s)$ и $W_2(s)$ са предавателните функции на филтрите използвани за обработка на отделните сигнали и $y(t)$ е крайният резултат от измерването.

Филтрите трябва да бъдат проектирани съобразно шумовите характеристики на сензорите, ако те са комплементарни това се извършва съгласно изрази (1) и (2):

$$(1) W_1(s) = 1 - W(s)$$

$$(2) W_2(s) = W(s)$$

Където $W(s)$ е предавателната функция на нискочестотен или високочестотен филтър. Трансформация на Лаплас на изходния сигнал може да бъде получена като се използва факта, че той е резултат от умножението на лапласовата трансформация на входния сигнал и предавателната функция на филтрите, израз (3):

$$(3) Y(s) = X(s) + [1 - W(s)]N_1(s) + W(s)N_2(s)$$

От израза се вижда, че истинската стойност $X(s)$ не е повлияна от шум и тя не е повлияна от използваните филтри. Повлияни от филтрите са само шумовите компоненти на всеки един от сензорите. Това е възможно да се случи само ако шумовите компоненти са в различни честотни диапазони, например $N_1(s)$ е в нискочестотна лента, а $N_2(s)$ е във високочестотната лента. В този случай ако $W(s)$ е предавателната функция на нискочестотен филтър, то тогава компонентата $W(s)N_2(s)$ ще стане много малка. От друга страна $[1 - W(s)]$ е предавателна функция на високочестотен филтър и той ще минимизира компонентата $[1 - W(s)]N_1(s)$.

Предавателната функция на нискочестотен филтър се дава с израза (4):

$$(4) W(s) = \frac{b}{s+b}$$

Предавателната функция на високочестотен филтър се дава с израза (5):

$$(5) W(s) = \frac{s}{s+b}$$

Където b е положителна константа, а s е комплексна променлива.

3. СТРУКТУРНА СХЕМА НА КОМПЛЕМЕНТАРЕН ФИЛТЪР ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОЙЛЕРОВИТЕ ЪГЛИ НА ТЯЛО В РАВНИНА

Определянето на ъглите ще стане с използване на данни от жироскоп и акселерометър. С тези два сензора може да се определят два от Ойлеровите ъгли – ϕ (ъгъла на завъртане спрямо надлъжната ос на тялото - X) и θ (ъгъла на завъртане спрямо напречната ос - Y). Ориентацията на осите ще бъде показана при експерименталните резултати. За определяне на третия ъгъл са необходими данни от трети сензор.

Ъглите определени от данните получени от жироскопа са действителни(точни) за кратък период от време, след което точността силно се влошава. Това е равносилно на наличието на нискочестотен шум в изходният му сигнал. Ъглите определен с данните от акселерометъра са действителни(точни) за дълъг период от време, променят се само когато ускорението се промени внезапно, което е равносилно на наличието на високочестотен шум в изходният му сигнал. Следователно двата сензора са подходящи за реализиране на комплементарен филтър.

Ще бъдат представени две структурни схеми, с които се реализира такъв филтър. Първата е значително опростена, което я прави подходяща за вграждане в системи реализирани с микроконтролери.

Ъглите ϕ и θ се определят с данните от акселерометъра като се използват изрази (6), (7):

$$(6) \phi_{acc} = \sin^{-1} \left(\frac{-f_y}{g \cos \theta} \right)$$

$$(7) \theta_{acc} = \sin^{-1} \left(\frac{f_x}{g} \right)$$

Където с f_x и f_y са представени ускоренията по съответната ос.

Същите ъгли се определят и с данните получени от жироскопа, като се използва числено интегриране на ъгловите скорости по съответната ос. Ще бъде представен само израз (8) за определяне на ъгъла ϕ , като ъгъла θ може да бъде определен със същият израз като се използват данните от сензорите по оста Y.

$$(8) \phi_{k+1} = \phi_k + \text{int}(\text{gyro}(x)_k)$$

Където с *int* е представен метод за числено интегриране. Стойностите *gyro*(*x*) трябва да са преизчислени от координатната система на тялото към инерциалната система, като използват определените ъгли от предходната стъпка.

Съвместяване на данните от двата сензора се извършва с израза (9):

$$(9) \phi_{k+1} = a[\phi_k + \text{int}(\text{gyro}(x)_k)] + (1 - a)\phi_{acc}$$

Където *a* е (положителна константа) коефициент на високочестотния филтър, а $(1 - a)$ е коефициента на нискочестотния филтър. Сумата от двата коефициента е равна на единица. Съотношението между тях определя и времеконстантата на филтъра определена с израз(10):

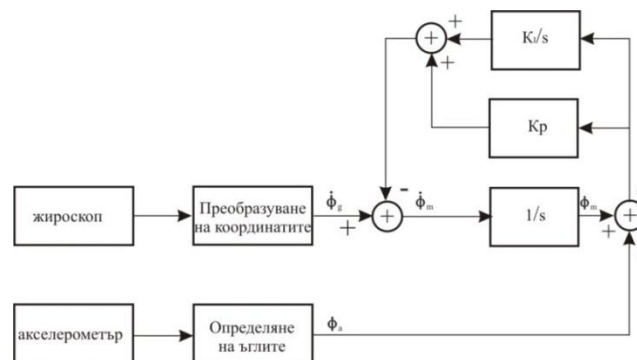
$$(10) \tau = \frac{a}{(1-a)F_s}$$

Влияние върху времеконстантата оказва стойността на *a* и честотата на дискретизация на сигнала F_s . Времеконстантата определя границата на смяна на преобладаващото действие на един от двата филтъра, следователно и на измерванията на кой от сензорите ще имат преобладаващо действие. За времеви периоди по-малки от времеконстантата преобладаващото действие ще има ъгъла определен с данните от жирокопа. Когато времеви периоди са по-големи от времеконстантата преобладаващо действие има ъгъла определен с данните от акселерометъра.

Втората възможна структурна схема се реализира на базата на израза (11)[9]:

$$(11) \phi_m = [1 - W(s)] \left(\frac{1}{s} \dot{\phi}_g \right) + W(s)\phi_a$$

Структурната схема на филтъра получена на базата на този израз е показана на фигура 2.



Фиг.2. Структурна схема на комплементарен филтър

Предавателната функция на нискочестотния филтър се определя с израза (12):

$$(12) W(s) \equiv W(s)_{нчф} = \frac{sK_p + K_I}{s^2 + sK_p + K_I}$$

Като използваме зависимостта $[1 - W(s)]$, се получава предавателната функция на високочестотния филтър, (13):

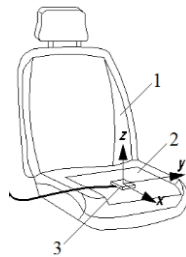
$$(13) W(s)_{вчф} = \frac{s^2}{s^2 + sK_p + K_I}$$

Параметрите за настройка на филтъра са коефициента на усилване на пропорционалната съставка K_p и коефициента на интегралната съставка K_I .

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

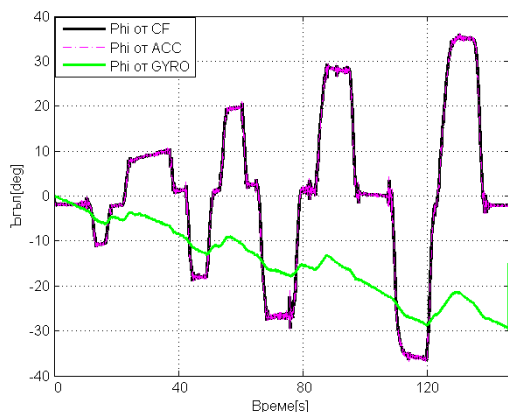
За проверка действието на филтрите са извършени статични и динамични измервания на отклоненията на детско столче, предназначено за монтиране в автомобил. То е проектирано специално за определяне ъгъла на отклонение спрямо надлъжната ос на автомобила[10, 11]. На фигура 3 е показано столчето с позиция 1, с

позиция 2 е означена подложката, върху която е монтирана инерциална измервателна система позиция 3.

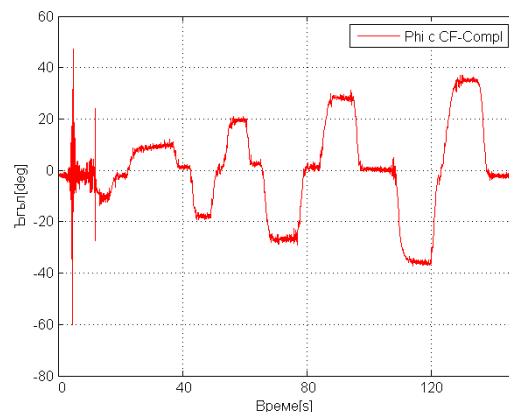


Фиг.3. Схема на монтиране на инерциалната измервателна система

Данните от статичните измервания са получени като столчето е отклонявано на определен ъгъл (по оста Y) и е оставало в това състояние известно време, след което е отклонявано на същия ъгъл, но в другата посока. Стойностите на ъгъла ϕ определени с израза (9) са показани на фигура 4. Със зелен цвят е показан ъгъла ϕ определен само от данните на жироסקопа. Вижда се неговото постоянно нарастване вследствие натрупването на грешките от случаен дрейф на ъгъла, шум от дрейф на нулата и нестабилност на нулевото отклонение. Њгъла ϕ определен с данните на акселерометъра почти съвпада с ъгъла определен от комплементарния филтър. Това е така, защото в този случай липсват внезапни високочестотни смущения, които биха повлияли на резултата. Стойността на коефициента a е 0.8.



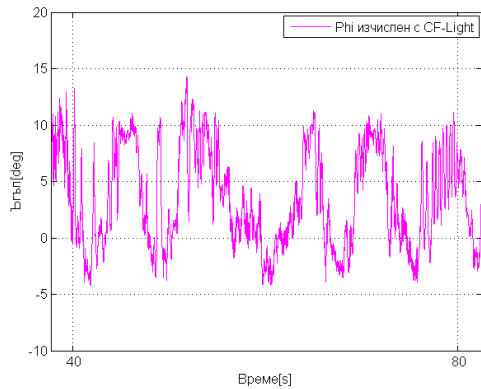
Фиг.4. Њгъл ϕ определен от различните сензори



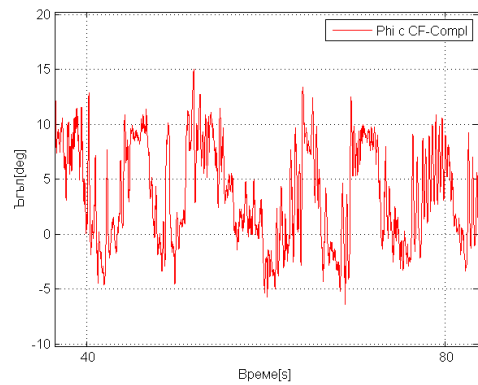
Фиг.5. Њгъл ϕ определен с израз (11)

Стойности на ъгъла ϕ определени с израза (11) са показани на фигура 5. За правилна оценка на ъгъла е необходимо да се извърши правилен подбор на стойностите на пропорционално–интегралното звено от фигура 2. В конкретният случай стойностите на коефициентите са $K_P=20$ и $K_I=10$.

Данните за динамично оценяване на ъгъла ϕ са получени като столчето е монтирано в автомобил, който се е движел в направление София-Сапарева баня. Монтирането на сензорите и детското столче е показано в [12]. За по-добра база за сравнение анализа е направен за част от данните. Стойностите на ъгъла ϕ оценени с филтъра реализиран на базата на израз (9) са показани на фигура 6. Оценените стойности на ъгъла с филтъра реализиран по израза (11) са показани на фигура 7.



Фиг.6. Ъгъл ϕ определен израз (9)



Фиг.7. Ъгъл ϕ определен с израз (11)

Получените стойности на ъгъла ϕ определени с двата алгоритъма са почти идентични. Филтърът реализиран на базата на израз (11) отчита повече краткотрайните моментни отклонения на столчето.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада е представена концепцията за реализиране на комплементарен филтър за съвместяване на данни от акселерометър и жирокоп. На тази база са предложени две структурни схеми на такъв филтър. Едната от тях има несложна структура, което я прави подходяща за вграждане в системи реализирани с микроконтролери. Втората структура е по-сложна, но моделира физичните процеси по-точно. Тя е за предпочитане когато данните се обработват впоследствие на персонален компютър. За верифициране на алгоритмите на двата филтъра са проведени статични и динамични измервания на отклонението на детско столче. Оценените стойности на ъгъла ϕ са представени графично. Няма съществена разлика в получените резултати от двата филтъра. За получаване на правилни оценки на ъгъла от филтъра с по-сложна структура е необходима внимателна настройка на стойностите на параметрите K_p и K_I .

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Hofmann-Wellenhof Bernhard, Herbert Lichtenegger, Elmar Wasle, GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more, SpringerWienNewYork, , 2008, ISBN 978-3-211-73012-6
- [2] Stephen Statler, Beacon Technologies: The Hitchhiker’s Guide to the Beacosystem, Apress, 2016, ISBN-13 (pbk): 978-1-4842-1888-4
- [3] David Munoz, Frantz Bouchereau, Cesar Vargas, Rogerio Enriquez, Position Location Techniques and Applications, Elsevier Inc., 2009, ISBN 13: 978-0-12-374353-4
- [4] 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}>
- [5] R. Mahony, Tarek Hamel, Jean-Michel Pflimlin. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group. IEEE Transactions on Automatic Control, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, 53 (5), pp.1203-1217. [ff10.1109/TAC.2008.923738ff](https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923738ff). [ffhal-00488376ff](https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923738ff)
- [6] A. Jouybaria, A. A. Ardalana, M-H. Rezvan, Experimental comparison between mahoney and complementary sensor fusion algorithm for attitude determination by raw sensor data of xsens imu on buoy, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W4, 2017 Tehran's Joint ISPRS Conferences of GI Research, SMPR and EOEC 2017, 7–10 October 2017, Tehran, Iran

[7] Kenneth W. Eure, Cuong Chi Quach, and Sixto L. Vazquez, An Application of UAV Attitude Estimation Using a Low-Cost Inertial Navigation System, NASA/TM-2013-218144, <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140002398> 2019-04-26T09:08:59+00:00Z

[8] Fakhri Alam, Zhou ZhaiHe, Hu JiaJia, A Comparative Analysis of Orientation Estimation Filters using MEMS based IMU, 2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014), March 21-22, 2014 Dubai (UAE)

[9] Kim Phil, Kalman Filter for Beginners with Matlab Examples, A-JIN Publishing company, 2011, ISBN-13: 978-1463648350

[10] N. L. Pavlov, E. E. Sokolov, M. H. Peychev and D. I. Dacova ,Numerical simulation of free and forced oscillations for pendulum type child travel seat, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) Volume 10, Issue 03, March 2019, pp. 172-177, Article ID: IJMET_10_03_017 Available online at <http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?JType=IJMET&VType=10&IType=3> ISSN Print: 0976-6340 and ISSN Online: 0976-6359

[11] Nikolay Pavlov, Evgeni Sokolov, Mihail Peychev, Diana Dacova, Design and test of a tilting seat for improving children's comfort during traveling, Second International Scientific Conference ITEMA 2018 – Conference Proceedings, ISBN 978-86-80194-13-4, pp 305-312

[12] Iontchev Emil, Rosen Miletiev, Petar Kapanakov, Lachezar Hristov, Sensor data fusion for determine object position, 54th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, Ohrid, Macedonia 2019, 26-29 June 2019

COMPLEMENTARY FILTER FOR SENSOR DATA FUSION

Emil Iontchev¹, Rosen Miletiev², Lachezar Hristov¹

e_iontchev@yahoo.com, miletiev@tu-sofia.bg, Lachezar.Hristov@outlook.com

¹ **Todor Kableshkov University of Transport, 158, Geo Milev Str., 1574, Sofia,**
² **Technical University of Sofia, 8 Kl. Ohridski Blvd, 1000, Sofia,**
BULGARIA

Key words: *complementary filter, Kalman filter, inertial sensors, Euler angles*

Abstract: *MEMS sensors are low price products which determines their widespread use in mobile phones, virtual reality, unmanned vehicle, robots and etc. In the same time theirs output signals have a lot of noise components and are unstable over time. One way to make their characteristics better is to combine data from two or more sensors that are mutually complementary. This is usually done using a complementary filter or Kalman filter. The object of this article are algorithms of complementary filters used to determine the angle of rotation of a child seat in a car. The two algorithms are with different complexity. One of them is with a simpler structure and is suitable for embedding in systems realized by microcontrollers. On the other hand the second one has a more complex structure and describes better the physical processes. Our interest is stopped only on the angle of rotation relative to the longitudinal axis of the vehicle, which can be determined using data from only two sensors - an accelerometer and a gyroscope. These two sensors have complementary frequency characteristics - the accelerometer will determine the change of the angle for a long period of time, while the gyro-data will determine its instantaneous value. The filters are implemented in the Matlab environment and their operation is verified with data obtained from static and dynamic real measurements of the deviation of a child seat, mounted in a car.*