

МОДЕЛ НА ГРЕШКИТЕ НА СЕНЗОР ADIS 16405

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

¹Висше транспортно училище "Тодор Каблешков", катедра "СОТС"
ул. "Гео Милев" 158, София 1574

²ТУ- София, катедра "Радиокомуникации и видеотехнологии"
бул. "Кл. Охридски" 8, София 1000,
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: инерциални сензори, стохастично моделиране, дисперсия на Алън, спектрална плътност на мощността

Резюме: Сензорът ADIS 16405 представлява завършена инерциална система. В общ корпус са вградени триосни, акселерометър, жирокомпас и магнитометър. Изработен е по технологията iMEMS®. Въпреки сравнително ниската си цена, малък размер, ниска консумация на енергия и висока надеждност, когато сензорът се използва в инерциални системи за навигация или за измерване на динамични параметри на обекти е особено важно случайните грешки в изходния сигнал да бъдат надлежно обработени и намалени с възможно най-голяма стойност. Добре известно е, че инерциалните системи за навигация могат да предоставят с висока точност информация за позицията, скоростта и надморската височина за кратък период от време но тяхната точност драстично намалява с напредване на времето. Необходимостта от точна оценка на информацията изисква прилагане на метод за моделиране на шумовите параметри на сензора. Анализът на грешките може да бъде направен във времевата област, уточняващ стохастичните вариации както и произхода и естеството им. В статията се прави кратък обзор на различните видове шум, както и методите за тяхното оценяване. На тази база е избран модел за оценяване на грешките на сензора. Получени са експериментални данни от сензора, които са използвани за количествена оценка на различните видове шум и дават пример за ефективността на избрания модел.

ВЪВЕДЕНИЕ

В контраст с малките си размери и ценово предимство, MEMS базираните инерциални сензори се характеризират с висока честота на грешки в изходните данни, които се натрупват във времето. Тези грешки трябва да бъдат обработени с подходящ алгоритъм така, че суровите данни от измерванията на сензорите да се превърнат в използвани и надеждни, да повишат точността на инерциалната система. Основни типове грешки са детерминистичните (отклонение от нулата и мащабен фактор) и стохастичните (случаен шум). Разбирането на стохастичните вариации е от съществено значение за разработването на методи за тяхното оценяване.

2. МОДЕЛ НА ГРЕШКИТЕ И СТОХАСТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ

Две са основните направления, които трябва да се разгледат в анализа на грешки при използването на MEMS базирани сензори: анализ на грешките за да се определи тяхното естество – детерминистични или стохастични; и избор на метод за стохастично моделиране, с който се определя характера на случайните грешки.

2.1 Източници и видове грешки:

За MEMS базирани акселерометри и жирокопи междуосовия фактор и грешката от вибрации, която е налична при конвенционалните, ще бъдат твърде незначителни и модела за грешки ще бъде във вида [1]:

$$(1) \sigma^2_{\text{total}}(T) = \sigma^2_{\text{rw}}(T) + \sigma^2_{\text{bi}}(T) + \sigma^2_{\text{rrw}}(T) + \dots$$

където общата грешка е сбор от всички натрупани по време на периода T.

2.2 Стохастично моделиране:

Чрез използване на Дисперсионен анализ, Автокорелационна функция (АКФ), Спектрална плътност на мощността (СПМ) или Адаптивен Калманов филтър [1], се избира подходящ метод за стохастично моделиране. Такива от групата на Дисперсионния анализ са: Дисперсия на Алън (ДА) и модифицирана Дисперсия на Алън. В честотната област методите се основават на използването на СПМ. При изследване на характеристики на инерциални сензори е прието да се използват моделите на базата на СПМ и Дисперсията на Алън [1]. В статията е използвана ДА за идентифициране и количествено определяне на шумовите параметри на конкретен инерциален сензор.

В рамките на методите за анализ на шума, ДА е приета като едно от предпочитаните средства за анализ в изследването на инерциалните системи за по-общо приложение на стохастични модели [2]. Анализът в честотната област с ДА е сравнително лесна за изчисляване, тълкуване и разбиране, както и достатъчно точна в моделирането на шумове.

2.3 Дисперсия на Алън:

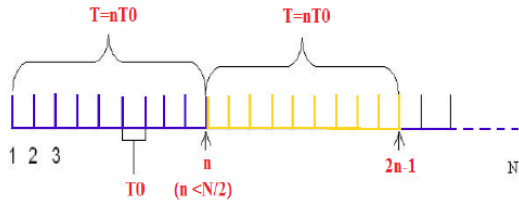
Методът ДА е предложен от Дейвид Алън през 1966 г. като прост метод за анализ на вариациите и е широко използван за характеризирание на фазовата и честотната нестабилност на прецизните генератори [3]. През 1998 г. институтът IEEE въвежда Allan VARiance (AVAR) като метод за разпознаване на шума за линеен акселерометър в стандарта IEEE Std1293-1998. За първи път методът е приложен за разпознаване на шума от MEMS базирани сензори от Hou и El-Sheimy през 2003 г. [4].

ДА е метод за анализ на времеви домейни, първоначално предназначена за характеризирание на шума и стабилността на часовниковите системи и е приет като IEEE стандарт за жирокопични спецификации [3]. Методът може да бъде приложен към всеки сигнал, за да се определи характерът на основните шумови процеси и може да се приложи за анализиране на характеристиките на грешките на всички точни измервателни уреди [5].

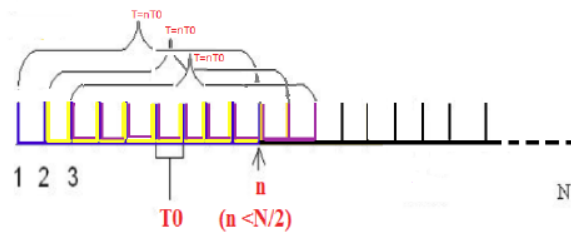
Това е метод за представяне грешката от средно квадратичното случайно отклонение като функция от средното време и може да се използва за определяне на характера на основните случайни процеси, които пораждат шума в данните. Чрез извършване на определени операции по цялата дължина на данните се характеризират различни типове шум в данните от инерционния сензор [6]. Нейната стойност, обаче, зависи от степента на разбиране на физиката на уреда. Предполага се, че несигурността в данните се генерира от източници на шум със специфичен характер. Ключова

характеристика на метода е, че той позволява по-лесно охарактеризиране и идентифициране на източниците на грешки и техния принос към цялостната шумова статистика.

ДА се основава на метода на клъстерния анализ. Потокът от данни е разделен на клъстери със специфична дължина. При дадени N последователни отчета, всеки от които отстои от съседния на интервал от време T_0 . Създавайки група от n последователни отчета ($n < N/2$), всяка група е клъстер, както е показано на фигура 1. Броят на клъстерите е $K = N/n$.



Фиг. 1 Схема на структурата на данните, използвана при ДА



Фиг. 2 Схема на структурата на данните, използвана при модифицирана версия на анализ чрез ДА

Модифицирана версия на анализ чрез ДА, е ДА с припокриване, който е изобразен на Фигура 2.

В тази версия един клъстер се припокрива с предишния, като постига пълноценно използване на набора от данни. Анализът тук е същият като в случая на стандартна ДА. Свързан с всеки клъстер, има период T , който е равен на nT_0 . Ако моментната изходяща стойност на инерциалния сензор е $\Omega(t)$, средната стойност на клъстера се изчислява като [7]

$$(2) \sigma^2_{total}(T) = \sigma^2_{rw}(T) + \sigma^2_{bi}(T) + \sigma^2_{rrw}(T) + \dots$$

където $\bar{\Omega}_k(T)$ представлява средната изходна скорост на клъстера, която започва от k -та точка и съдържа n точки за данни.

Следващата средна стойност на клъстера се получава от:

$$(3) \bar{\Omega}_{next}(T) = \frac{1}{T} \int_{t_k+T}^{t_k+2T} \Omega(t) dt$$

ДА с дължина T , изчислена от два съседни клъстера, е [1]:

$$(4) \sigma^2(T) = \frac{1}{2} \langle [\bar{\Omega}_{next}(T) - \bar{\Omega}_k(T)]^2 \rangle = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} [\bar{\Omega}_{next}(T) - \bar{\Omega}_k(T)]^2$$

Като краен резултат се получава средноквадратично отклонение на Алън (СКОА).

Чрез избор на различна дължина на клъстера или време на корелация за всяко изчисление на ДА е възможно да се получи ДА като корелационна функция на времето. Този метод, може да разграничи различните грешки чрез изследване на различен наклон на правата, който обикновено се изобразява като корен квадратен на ДА спрямо T . Ако стойностите на времето на корелация са подбрани правилно, могат да бъдат намерени случаен дрейф на скоростта, случаен дрейф на ъгъла, нестабилност на нулевото отклонение, дрейф на нулата, шум от квантуване, промяна на стойността на наклона, синусоидален шум и експоненциално корелиран (Марковски) шум.

Възможно е да се установи връзка между ДА и СПМ. СПМ е често срещан начин за представяне на спектралното разлагане на времевата област, превръщайки я в мощен инструмент за анализиране на данни от стохастични модели. Еквивалентната връзка между ДА и СПМ, определяща дисперсията се дава с израза [5]:

$$(5) \sigma^2(T) = 4 \int_0^\infty df S_\Omega(f) \frac{\sin^4(\pi f T)}{(\pi f T)^2}$$

Където $S_\Omega(f)$ е СПМ на процеса $\Omega(T)$, който е стационарен във времето. Уравнение (5) се използва за изчисляване на ДА от стойността на СПМ шума. СПМ на

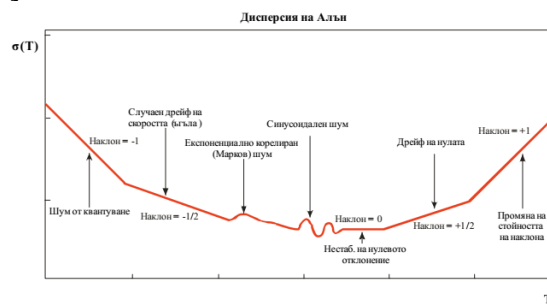
всеки физически значим случаен процес може да бъде заместен в интеграла и да се получи израз за ДА $\sigma^2(T)$ като функция на дължината на клъстера.

Точност на оценката с ДА - може да бъде генериран ограничен брой клъстери от всеки краен набор от данни. ДА на всеки шум се оценява като се използва общият брой на клъстерите с определена дължина, които могат да бъдат създадени. Точността на оценката на отклонението на Алън за дадено τ , от друга страна, зависи от броя на независимите клъстери в набора от данни [1].

Точността при оценката на σ се увеличава с броя на клъстерите. Процента на грешка при изчисляването на клъстерите K е:

$$(6) \sigma = \frac{100}{\sqrt{2(K-1)}}$$

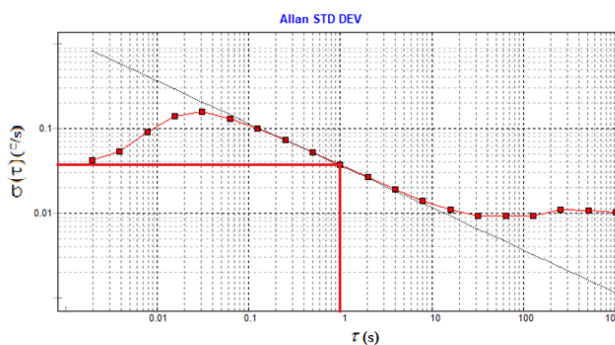
На фигура 3 е показана графиката на ДА при наличие на всички видове шум, изчертаваща зависимостта на $\sigma(T)$ от дължината на клъстера T в логаритмичен мащаб. Така може директно да се покаже вида на случайния процес, съществуващ в обработваните данни[8].



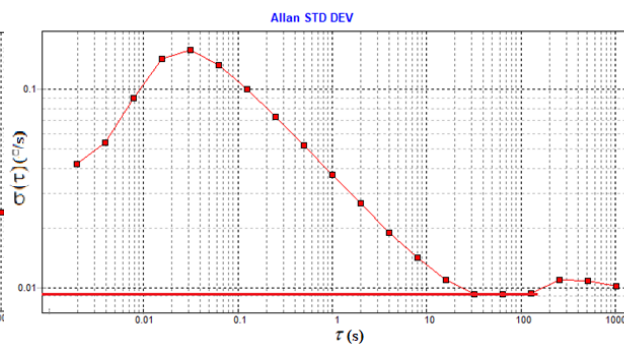
Фиг. 3 Графично представяне на СКОА

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Необходимите данни за анализ са получени от сензор ADIS 16405, който по време на експеримента е в покой, при стайна температура. Честотата на дискретизация е 204Hz, а продължителността на записа е 1 час. Записани са данните за ускорението и ъгловата скорост по трите оси. Обект на анализ в статията са данните от ъгловата скорост по оста Z.



Фиг. 4 СКОА и апрокс. права с наклон -0.5



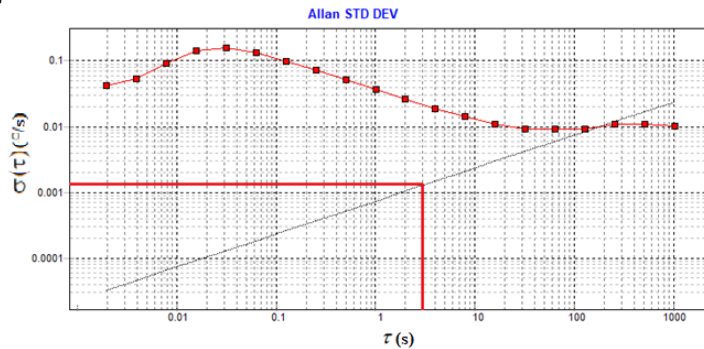
Фиг. 5 СКОА и апрокс. права с наклон 0

Анализа на данните от фигура 4 показва, че наклона на апроксимиращата права на СКОА за интервала $\tau = 0.125 \div 2s$ е -0.5, което означава източник на шум породен от случаен дрейф на ъгъла. Стойността на $\sigma = 0.0368 \text{ }^\circ/\sqrt{s}$ е отчетена при $\tau_0 = 1s$ като е използван изразът [1]:

$$(7) \sigma_{rw} = \frac{\sigma(\tau_0)}{\sqrt{\tau_0}}$$

Фигура 5 показва, че наклона на апроксимиращата права на СКОА за интервала $\tau = 32 \div 128s$ е равен на 0 и показва източник на шум породен от нестабилност на нулевото отклонение със стойност на $\sigma = 0.0093 \text{ } ^\circ/s$. Отклонението е изчислено при минимално отчетено $\tau_1 = 32s$ чрез израза [1]:

$$(8) \sigma_{bi} = \sigma(\tau_1) \sqrt{\frac{\pi}{2 \ln(2)}}$$



Фиг. 6 СКОА и апроксимираща права с наклон +0.5

Фигура 6 показва, че наклона на апроксимиращата права на СКОА за интервала $\tau = 120 \div 230s$ е равен на +0.5 и показва източник на шум породен от дрейф на нулата със стойност на $\sigma = 0.0013 \text{ } ^\circ/s^{3/2}$. Отклонението е отчетено при $\tau_2 = 3s$ като е използван израза [1]:

$$(9) \sigma_{rrw} = \sigma(\tau_2) \sqrt{\frac{3}{\tau_2}}$$

Заклучение

Разработени са различни методи за стохастично моделиране на шума от инерциални сензори. Всеки от тях е приложим, но всеки има и свой недостатък. Адаптивният филтър на Калман е един от най-използваните методи за оценка на шума на инерциални сензори, но първо трябва да е известна формата на модела. Подходът с честотна област използва спектралната плътност на мощността за оценка на трансферните функции. Моделът е прост, но е по-труден за разбиране. Методът с използване на корелационна функция във времевата област е много чувствителен към използвания модел. Техниките на отклонение са основно много сходни и се различават главно само поради това, че в аналитичните алгоритми са включени разнообразни обработки на сигнали чрез функции за претегляне, функции на прозореца и т.н., за да се постигне специфичен желан резултат за подобряване на характеристиките на модела. Най-простата техника е методът ДА.

Използвания метод ДА за определяне на модела на грешките при сензор от типа ADIS 16405 позволява систематично характеризирание на различните грешки от случаен тип проявяващи се в изходните данни. ДА е метод за представяне на средноквадратичната случайна грешка като функция на времето. Методът е лесен за изчисление и сравнително прост за интерпретация и разбиране. Обработката на експериментални данни събрани за период от 1 час показват различните типове грешки и тяхната големина. Получените резултати са близки с данните предоставени от производителя и показват че избраният и приложен метод е надежден. Според получените резултати преобладаващи са грешките при по-дълги кълъстерни времена - случаен дрейф на ъгъла, шум от дрейф на нулата и нестабилност на нулевото отклонение. Най-високи стойности има грешката от случаен дрейф на ъгъла.

Литература

- [1] IEEE Std 952-1997, IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single Axis Interferometric Fiber Optic, 16 Sept. 1997, ISBN 1-55937-961-8
- [2] L. B. Pupo, "MSc Characterization of Errors and Noises in MEMS Inertial Sensors Using Allan Variance Method", Polytechnic University of Catalonia, 2016
- [3] D. Allan, "Statistics of atomic frequency standards," Proceedings of the IEEE , Vol. 54 , Is. 2, pp.221-230, 1966.
- [4] H. Hou and N. El-Sheimy, "Inertial sensors errors modelling using Allan Variance," Proceedings of ION GNSS 2003, 2003.
- [5] C. N. Lawrence, "On the application of Allan variance method for ring laser gyro performance characterization," Lawrence Livermore National Laboratory, Tech. Rep., 1993.
- [6] M. Marinov and Z. Petrov, "Allan variance analysis on error characters of low-cost MEMS accelerometer MMA8451Q," in International Conference of Scientific Paper AFASES 2014, 2014.
- [7] N. El-Sheimy, H. Haiying, and N. Xiaoji, "Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 1, 2008.
- [8] Йончев Е., Оценка на шумовите параметри на инерциални сензори, "Механика, транспорт, комуникации", бр. 3, 2011, София.

ERROR MODELING OF MEMS ADIS 16405

Lachezar Hristov¹, Emil Iontchev^{1, 2}, Rosen Miletiev²

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

¹*Todor Kableshkov University of Transport, Geo Milev str.158, Sofia 1574,*

²*Technical University of Sofia,*

Faculty of Telecommunications, 8 Kl. Ohridski Blvd, 1000, Sofia 1000,

BULGARIA

Key words: *Inertial sensors, stochastic modeling, Allan variance, spectral power density*

Abstract: *ADIS 16405 sensor is a complete inertial system. Sharing common housing there are triaxial inertial sensor, gyroscope and magnetometer based on MEMS technology. In spite of low inherent cost, small size, low power consumption, and solid reliability, when used by inertial systems for navigation or object's dynamic parameters measurement it is highly important the random errors in the output signal to be appropriately treated and reduced. It is well known that Inertial Navigation Systems can provide high accuracy information on the position, velocity, and attitude over a short time period. However, their accuracy degrades rapidly with time. The requirements for accurate estimation of navigation information necessitate the modeling of the sensors' noise components. The error analysis can be conducted in the time domain specifying the stochastic variation as well as error sources of systematic nature. The article gives a resume of different noise types as well as methods for their assessment. Collected sensor's experimental data was used to quantitative assess different noise types detected and gives an example of effectiveness of the chosen Allan variance error modeling method. It is simple to compute and relatively simple to interpret and understand. Allan variance method can be used to determine the character of the underlying random processes that give rise to the data noise. This technique can be used to characterize various types of noise terms in the inertial sensor data by performing certain operations on the entire length of data.*