

Алгоритъм за съвместна обработка на сигнали от GPS и INS с използване на филтър Монте Карло

Живо Петров

In this paper a GPS/INS integration with Particle Filter is proposed. The filter is based on the Monte Carlo method, and it approximates the posterior distribution by single Gaussians. The researches of the accuracy in determining the location of UAV are made.

Key words: Particle Filter, UAV, IMU, GPS, model, errors, particles, integration.

ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременните навигационни системи най-често се използва съвместна обработка на измерванията от инерциална навигационна система (INS) и приемник на спътникова навигационна система (GPS). В Последните няколко години усилено се използва добре познатия метод за статистически симулации и изследвания Монте Карло за обработка на различни процеси. Основна трудност при реализирането на филтър по метода Монте Карло е големия брой изчислителни операции. Когато вероятностните плътности на обработваните процеси са разпределени по нормален закон, този брой операции може да бъде намален, което позволява използването му при синтезирането на навигационни системи за БЛА.

Предложен е алгоритъм за съвместна обработка на измерванията от INS и GPS с филтър Монте Карло. Основно предимство на този алгоритъм е възможността за обработка на нестационарни случайни процеси, каквито са на практика грешките на определяне на координатите от INS. Направени са изследвания на точността при определяне на местоположението на БЛА, при различен брой отчети на филтъра за ниско точна INS и траектории със силна интензивност на маневриране [4].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Когато оценявания процес е нестационарен и неговата вероятностната плътност е различна от нормално разпределената, използването на линеаризация води до неоптимални резултати. В тези случаи е подходящо да се използва филтрация по метода Монте Карло [7,6,5]. Целта на този метод е да се генерира достатъчен брой от независими отчети от търсената апостериорна вероятностна плътност, които да позволят точно определяне на статистическите ѝ параметри [6,9]. Тези независими отчети се използват за намиране на Бейсовската оценка [7,8,5].

На практика е невъзможно генерирането на дискретни директно от апостериорното разпределение. Един от най-използваните начини е да се генерират дискретни от зададена вероятностна плътност, които да се използват за апроксимиране на търсената апостериорна вероятност на плътност (АВП), чрез подходящи теглови коефициенти [8,9,5].

Двете основни операции, които се изпълняват при разглеждания метод е генерирането на новия набор от дискретни и обновяването на тегловата функция на всяка една времева стъпка. Използването на рекурсивен алгоритъм води до намаляване на броя на отчетите. Това се дължи на факта, че дисперсията на тегловата функция нараства с времето [7,8,9,5]. В резултат стойностите на тегловата функция намаляват. Това води до загуба на изчислително време за обновяване на отчети с пренебрежимо участие в АВП, което може да доведе до сиване на алгоритъма при продължителна работа, тъй като в няколко отчета е съсредоточена основната част от вероятността на оценявания процес. За решаване на този проблем се използва повторно вземане на отчети, като се ползва критерий, определен от нормираните тегла [7,9,5].

Има разработени модели на грешките на INS и наблюденията от GPS [3,6,1], които показват, че вероятностната плътност на тези процеси е гаусова. При тях АВП също ще бъде нормално разпределена, което позволява за вероятностната плътност на стойностите на дискретите (ВПСД) да се използва нормално разпределение. На базата на моделите на наблюдениято и съобщението, предложени в [7,8,9] е синтезиран алгоритъм за оценяване на грешките на INS.

Синтезиран е следния алгоритъм:

1. Задават се ВПСД на отчетите за ускоренията по трите оси, като нормално разпределение $N(m_{ax}(k), \sigma_{ax}^2(k))$, $N(m_{ay}(k), \sigma_{ay}^2(k))$, $N(m_{az}(k), \sigma_{az}^2(k))$, където: $m_{ax}(k), m_{ay}(k), m_{az}(k)$ са математическите очаквания на грешките от измерванията на ускоренията, които са равни на биасите на измервателното устройство с инерциални датчици и жирокопи (IMU); $\sigma_{ax}^2(k), \sigma_{ay}^2(k), \sigma_{az}^2(k)$ са дисперсиите на случайните грешки на ускоренията по трите координати.

2. Задава се ВПСД, като съвместна нормална плътност на грешките на INS по местоположение:

$$q(\mathbf{x}(k) | \mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{Y}_k) = N(m_x(k), \sigma_x^2(k)) N(m_y(k), \sigma_y^2(k)) N(m_z(k), \sigma_z^2(k)), \quad (1)$$

където: \mathbf{X}_{k-1} е набор от случайни променливи до предходния момент; \mathbf{Y}_k е набор данни от наблюдението до текущия момент; $m_x(k), m_y(k), m_z(k)$ са математическите очаквания на грешките по координати, предизвикани от биасите на IMU; $\sigma_x^2(k), \sigma_y^2(k), \sigma_z^2(k)$ са дисперсиите на грешките по трите координати.

3. За грешките по ускорения, скорости и координати, по всяка ос се генерират N отчети от нормално разпределение по следните съотношения:

$$\mathbf{pr}_a(k) = \mathbf{m}_a(k-1) + \boldsymbol{\sigma}_a(k) \mathbf{un}(k); \quad (2)$$

$$\mathbf{pr}_v(k) = \mathbf{pr}_v(k-1) + T \cdot \mathbf{pr}_a(k); \quad (3)$$

$$\mathbf{pr}_s(k) = \mathbf{pr}_s(k-1) + T \cdot \mathbf{pr}_v(k), \quad (4)$$

където: $\mathbf{pr}_a(k)$ е матрицата на генерираните отчети за грешките по ускорението в текущия момент k и е с размерност $3 \times N$; $\mathbf{m}_a(k-1)$ е вектор на оценените биаси по ускорение в предходния момент от време и е с размерност 3×1 , като $\mathbf{m}_a(0) = 0$; $\boldsymbol{\sigma}_a(k)$ е диагонална матрица на средноквадратичните отклонения (СКО) на грешките по ускорения за всяка ос с размерност 3×3 ; $\mathbf{un}(k)$ е матрица с размерност $3 \times N$, всеки ред на която е отделна реализация на генерирани случайни числа с нормално разпределение в диапазона от 0 до 1; $\mathbf{pr}_v(k)$ е матрицата на генерираните отчети за грешките по скоростта в текущия момент k и е с размерност $3 \times N$; $\mathbf{pr}_s(k)$ е матрицата на генерираните отчети за грешките по координати в текущия k и е с размерност $3 \times N$; T е времевата стъпка.

4. По генерираните отчети за грешките по координати се изчислява матрицата на оценените далечини, $\mathbf{pp}(k)$ с размерност $N_{sat} \times N$, с елементи:

$$\rho_{p_{i,r}}(k) = \sqrt{[x_i(k) - x_{INS}(k) + pr_{S1,r}(k)]^2 + [y_i(k) - y_{INS}(k) + pr_{S2,r}(k)]^2 + [z_i(k) - z_{INS}(k) + pr_{S3,r}(k)]^2}, \quad (5)$$

където: $x_i(k), y_i(k), z_i(k)$ са координатите на i -тия спътник в текущия момент от време; $x_{INS}(k), y_{INS}(k), z_{INS}(k)$ са измерените от INS координати на потребителя в текущия момент; $pr_{S1,r}(k), pr_{S2,r}(k), pr_{S3,r}(k)$ са r -тите отчети по трите координати.

5. Определя се стойността на функцията на правдоподобие за r -тия отчет за текущия момент от време от съотношението:

$$p_r(\mathbf{y}(k)/\mathbf{pr}_S(k)) = \prod_{i=1}^{N_{Sat}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\rho GPS}^2}} \exp\left(-\frac{(y_i(k) - \rho p_{i,r}(k) + \rho_{i INS}(k))^2}{2\sigma_{\rho GPS}^2}\right), \quad (6)$$

където: $\rho_{i INS}(k)$ е псевдодалечината до i -тия спътник изчислена по измерванията на INS; $\sigma_{\rho GPS}^2$ е дисперсията на грешките на измерванията от GPS приемника псевдодалечини; $y_i(k) = \rho_i(k) - \rho_{i INS}(k)$ е наблюдението за i -тия спътник.

6. Определя се стойността на ненормираната теглова функция за r -тия отчет в текущия момент от време от израза:

$$W_r(k) = W_r(k-1) \times \frac{p_r(\mathbf{y}(k)/pr_{S1,r}(k), pr_{S2,r}(k), pr_{S3,r}(k))}{q_r(pr_{S1,r}(k), pr_{S2,r}(k), pr_{S3,r}(k)/\mathbf{Y}_k)}. \quad (7)$$

7. Определя се стойността на нормираната теглова функция за r -тия отчет в текущия момент от време от израза:

$$Wn_r(k) = \frac{W_r(k)}{\sum_{r=1}^N W_r(k)}. \quad (8)$$

8. Намира се условното математическо очакване на АВП:

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \sum_{r=1}^N \mathbf{pr}_S(k) \cdot Wn_r(k). \quad (9)$$

9. От нормираната теглова функция се определя ефективния брой на отчетите в текущия момент от време:

$$N_{eff}(k) = \frac{1}{\sum_{r=1}^N Wn_r^2(k)}. \quad (10)$$

10. Задава се минимален ефективен брой на отчетите $N_{min} = \frac{2}{3} N$ [7].

11. Когато ефективният брой на отчетите е по-малък от зададения минимален ефективен брой, се извършва предискретизация:

- намира се кумулативната сума от стойностите на тегловата функция:

$$p(m) = \sum_{r=1}^N Wn_r(k). \quad (11)$$

- генерират се N на брой подредени по големина случайни числа с равномерно разпределение:

$$\hat{u}_r = \frac{u_r + (r-1)}{N}, \quad r = 1 \div N, \quad (12)$$

където u_r са случайно разпределени числа в диапазона то 0 до 1.

- за всяко генерирано случайно число се извършва сравнението:

$$\begin{cases} p(m) \leq \hat{u}_r < p(m+1), & m = 1 \div (N-1); \\ \hat{u}_r = p(m), & m = N \end{cases} \quad (13)$$

- при изпълнение на условието се извършва пренареждане на отчетите по скорост и координати:

$$pr_{S1,r}(k) = pr_{S1,m}(k); \quad pr_{S2,r}(k) = pr_{S2,m}(k); \quad pr_{S3,r}(k) = pr_{S3,m}(k) \quad (14)$$

$$pr_{V1,r}(k) = pr_{V1,m}(k); \quad pr_{V2,r}(k) = pr_{V2,m}(k); \quad pr_{V3,r}(k) = pr_{V3,m}(k); \quad (15)$$

12. Преизчисляват се стойностите на нормираната теглова функция за текущия момент по съотношението:

$$Wn_r(k) = \frac{1}{N} \quad (16)$$

13. Изчисляват се математическите очаквания на грешките по координати дължащи се на биасите на IMU:

$$m_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N pr_{S1,r}(k); m_y(k) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N pr_{S2,r}(k); m_z(k) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N pr_{S3,r}(k). \quad (17)$$

14. Изчисляват се математическите очаквания на грешките от измерванията на ускорението, които се явяват оценка на биасите на IMU по ускорение:

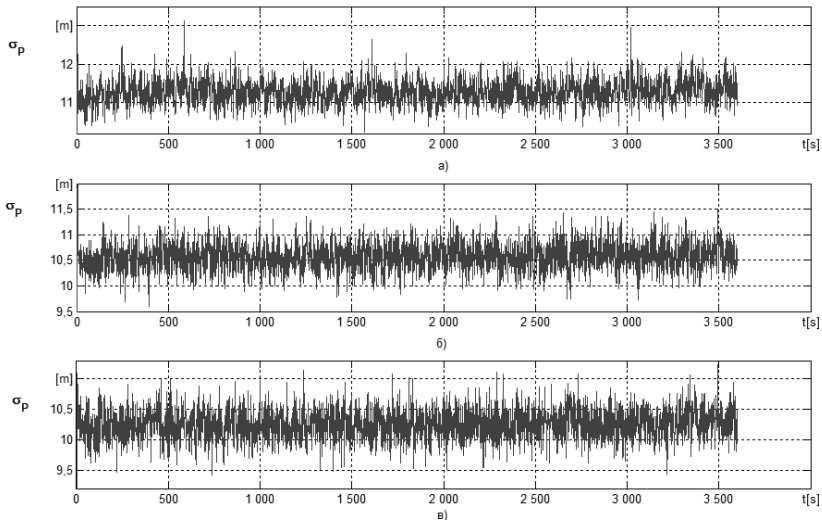
$$m_{ax}(k) = \frac{2m_x(k)}{(k.T)^2}; m_{ay}(k) = \frac{2m_y(k)}{(k.T)^2}; m_{az}(k) = \frac{2m_z(k)}{(k.T)^2}. \quad (18)$$

15. За всеки следващ момент от време се повтарят операциите от началото на алгоритъма до края на полетния интервал.

Алгоритъмът позволява да се синтезира блокова схема на навигационна система за съвместна обработка на сигнали от INS и GPS реализирана с филтър Монте Карло.

Направени са изследвания за СКО на оценките на грешките по координати на INS при използване на 100, 150 и 200 отчета [8]. Извършено е усредняване на 400 реализации на траекториите и грешките от измерванията при условията на изследване описани в [2].

На фиг. 1 са показани резултатите от изследванията.



Фиг.1. СКО на грешките по координати с различни стойности на отчетите

От фиг. 1а се вижда, че СКО на грешките при 100 отчета не превишава 13,5 m. При 150 отчета от фиг. 1б σ_p не превишава 12 m, а при фиг. 1в за 200 отчета σ_p не превишава съответно 11,5 m. Резултатите показват че средноквадратичната стойност на разстоянието между действителното и оцененото местоположение на потребителя намалява с 1,5 m, при увеличаване на отчетите от 100 на 150 и намалява с още 0,6 m, при увеличаване на отчетите от 150 на 200.

Получените резултати показват, че увеличаването на броя на отчетите над 150 не носи съществено подобряване в точността и същевременно изисква допълнителни изчислителни ресурси. Това показва, че за решаване на навигационната задача е целесъобразно да се използва филтър Монте Карло със 150 отчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложения алгоритъм осигурява висока точност, позволяваща изпълнение на различни навигационни задачи. За разлика от използването на калманов филтър [2], грешките при определяне на местоположението остават постоянни по време на целия полет, независимо от наличието на нестационарните флуктуации на постоянните грешки на IMU.

Алгоритъма осигурява висока точност при използване на INS и GPS с нисък клас, което позволява реализирането на навигационна система с по ниска цена.

Предложения филтър бързо преминава в устойчиво състояние, без това да оказва влияние на точността на местоопределяне, което го прави подходящ за използване в БЛА.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Димитров Д., Повишаване достоверността на данните от спътниковите навигационни системи., Дисертация, Д.Митрополия, 2006г.

[2] Петров Ж.. Алгоритъм за съвместна обработка на сигнали от GPS И INS с използване на калманов филтър, НК на Русенски Университет 2010 – в печат

[3] Петров Ж.П Иванов И.В. Анализ модела на грешките на акселерометри. ЮНС Д. Митрополия. 2010.

[4] Ярлыков М.С., Статистическая теория радионавигации, – М.: Радио и связь, 1985.

[5] Arulampalam M., Maskell S., Gordon N., Clapp T., A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking, IEEE Transactions on signal processing vol. 50, No 2, 2002

[6] Carvalho H., Del Moral P., Monin A., Salut G., Optimal Nonlinear Filtering in GPS/INS Integration. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 33, No3, 1997

[7] Gustafsson F., Gunnarsson F., Bergman F., Forssell U., Jansson J., Karlsson R., Nordlund P. Particle Filters for Positioning, Navigation, and Tracking. IEEE Transactions on signal processing vol. 50, No. 2, 2002

[8] Kotecha J., Djuric P., Gaussian Particle Filtering., IEEE Transactions on signal processing vol. 51, No 10, 2003

[9] James,V., Bayesian signal processing: Clasical, Modern, and Particle Filtering Metods. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

За контакти:

ст.ас. инж. Живо Божидаров Петров, Катедра “Електроника, комуникационна и навигационна техника в авиацията”, НВУ”В. Левски” - Авиационен Факултет гр. Долна Митрополия, e-mail: zhivo@vip.bg

Докладът е рецензиран.