

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ И ПРОГНОЗИРУЕМОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ГНСС

Масленников А.Л., Цыганкова И.С.

Ключевые слова: глобальные спутниковые навигационные системы, комплексирование, селективное комплексирование, фильтр Калмана, федеративный фильтр Калмана.

Аннотация. Рассматривается задача комплексирования фактической, получаемой непосредственно от приемника, и прогнозируемой (отдельно по данным альманаха и эфемерид) навигационной информации ГНСС. Применяется селективный метод комплексирования на базе федеративного фильтра Калмана, где выбор наиболее достоверной навигационной информации из трех источников реализуется по нескольким критериям.

INTEGRATION OF ACTUAL AND PREDICTED GNSS DATA

Maslennikov A.L., Tsygankova I.S.

Key words: global navigation satellite system, selective integration, Kalman filter, federated Kalman filter.

Abstract. The problem of integrating actual (collected directly from GNSS receiver) and predicted (computed from almanac and ephemeris data) navigation data is considered. The selective integration method, which based of the idea of federated Kalman filter is used. Selection of most reliable navigation data is realized by utilizing several criteria.

Введение

Получение надежной и достоверной навигационной информации (координаты и скорости объекта) в технических системах продолжает быть актуальным и по сей день. Общеизвестные недостатки решения задачи навигации в бесплатформенных инерциальных (БИНС) и глобальных спутниковых (ГНСС) навигационных системах не дают возможности получить достоверную навигационную информацию используя только один вид навигационных систем. Для повышения надежности и достоверности навигационной информации используют различные схемы комплексирования БИНС и ГНСС.

Классическая схема комплексирования заключается в постоянной коррекции БИНС по ГНСС [1]. Известны схемы коррекции БИНС в автономном режиме, т.е. без данных от ГНСС, где-либо используются алгоритмы оценивания ошибок БИНС, либо алгоритмы построения моделей ошибок (или измерений) БИНС и их идентификации [2-4]. Более совершенные методы комплексирования – так называемые, селективные. В этих методах задача навигации решается по данным от нескольких источников информации (БИНС, ГНСС, и т.д.) раздельно, а затем выбирается наиболее достоверная навигационная информация, которая используется для коррекции БИНС [5-6]. Селективные методы комплексирования могут реализовываться с использованием федеративным фильтра Калмана [7-8].

Очевидно, что для получения надежной и достоверной навигационной информации в первую очередь необходимо повышать точность

навигационной информации, получаемой от ГНСС. Для решения этой задачи в данной работе рассматривается применение селективного метода комплексирования к одному источнику навигационной информации – ГНСС, где выбор осуществляется между фактической (получаемой от приемника непосредственно) и прогнозируемой (рассчитываемой на основании данных альманаха и эфемерид) навигационной информацией.

Описание метода комплексирования

Фактическая навигационная информация рассчитывается в приемнике ГНСС и выдается конечному потребителю по стандартному протоколу NMEA. Прогнозируемая навигационная информация вычисляется потребителем как по данным альманаха, так и эфемерид [9]. Для этого сначала вычисляется прогноз координат спутников ГНСС, которые должны находиться в зоне видимости, затем прогнозируются значения псевдодальностей, после чего решается задача определения координат объекта, т.е. определение X , Y , Z для заданной системы уравнений:

$$\rho = \sqrt{(X_{sat} - X)^2 + (Y_{sat} - Y)^2 + (Z_{sat} - Z)^2} + c\Delta t,$$

а скорости объекта можно рассчитывать численными методами дифференцирования полученных координат объекта.

Выбор наиболее достоверной навигационной информации осуществляется между фактической и прогнозированной навигационной информацией, т.е. между тремя источниками. Схема описанного селективного метода комплексирования представлена на рис. 1, где: ДА – данные альманаха, ДЭ – данные эфемерид, АПНИ – алгоритмы прогноза навигационной информации, ЛФК – локальные фильтры Калмана, БВНИ – блок выбора навигационной информации, $\vartheta_{gnss}, \vartheta_{alm}, \vartheta_{eph}$ – вектора с навигационной информацией, $\hat{\vartheta}_{gnss}, \hat{\vartheta}_{alm}, \hat{\vartheta}_{eph}$ – вектора с оценкой навигационной информации, $\hat{P}_{gnss}, \hat{P}_{alm}, \hat{P}_{eph}$ – соответствующие ковариационные матрицы, ϑ^* – наиболее достоверная навигационная информация.

Селективный метод комплексирования основывается на идее федеративного фильтра Калмана. На каждом шаге работы навигационной системы формируются три вектора с навигационной информацией (один – по фактической информации, два – по прогнозируемой). Затем с помощью одинаковых ЛФК реализуется вычисление оценок векторов с навигационной информацией и ковариационных матриц [10-11]. Полученные оценки вместе со значениями показателей точности (HDOP, VDOP, PDOP, TDOP, GDOP) поступают в БВНИ, где реализуется выбор наиболее достоверной информации, т.е. определение вектора ϑ^* .

Отметим, что под шагом работы всей навигационной системы понимается момент времени поступления фактической навигационной информации. В случае ее отсутствия на некотором интервале времени,

прогнозируемая навигационная информация продолжает вычисляться с некоторым заданным шагом, а фактическая считается нулевой.

HDOP, VDOP, PDOP, TDOP, GDOP

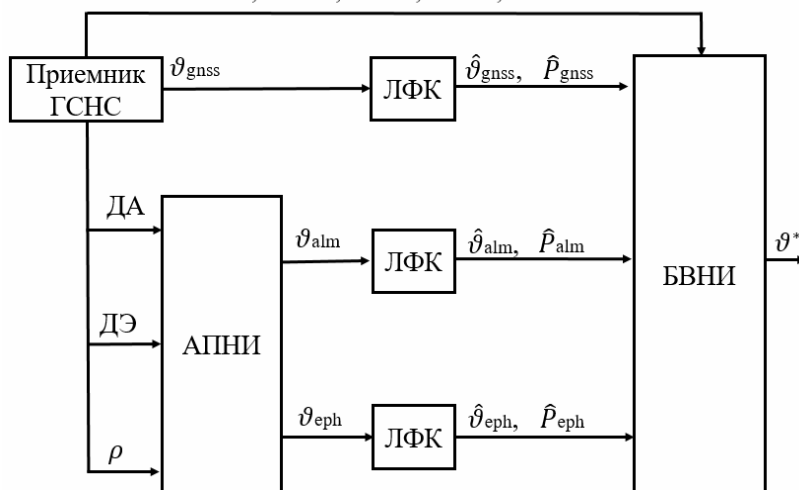


Рис. 1. Схема селективного метода комплексирования фактической и прогнозируемой навигационной информации

Критерии выбора навигационной информации

Для выбора наиболее достоверной навигационной информации из множества источников T (1 – ГНСС, 2 – прогноз по альманаху, 3 – прогноз по эфемеридам) можно использовать нормы ковариационных матриц, как меры разброса соответствующих оценок, т.е. первый критерий можно сформулировать следующим образом:

$$\varepsilon_1 = \min_T (\|\hat{P}_{gnss}\|, \|\hat{P}_{alm}\|, \|\hat{P}_{eph}\|).$$

Помимо этого, целесообразно учитывать значения снижения точности HDOP, VDOP, PDOP, TDOP, GDOP, что можно реализовать двумя способами. В первом случае – ранжированный критерий, при котором фактическая навигационная информация считается недостоверной если одно из значений DOP превышает некоторый заданный порог. Во втором случае в АПНИ дополнительно вычисляются соответствующие ковариационные матрицы и прогнозируются DOP значения, которые сравниваются с фактическими DOP значениями, полученными с приемника ГНСС. Второй критерий (для второго случая) можно записать следующим образом:

$$\varepsilon_2 = \min_T (d_{gnss} \cdot w_d, d_{alm} \cdot w_d, d_{eph} \cdot w_d),$$

где $d_{gnss}, d_{alm}, d_{eph}$ – вектора-столбцы со значениями DOP, w_d – вектор весовых коэффициентов для каждого значения DOP, который может формироваться исходя из конкретной практической задачи.

Необходимо также учитывать медленно нарастающую ошибку прогноза, ввиду устаревания данных альманаха и эфемерид, и резкое изменение (на достаточно постоянное значение, т.е. не статистический выброс), которое

может быть вызвано получением свежих данных альманаха и эфемерид. Резкое изменение также может быть характерно и для фактической навигационной информации, например, при попадании приемника в область действия подмены сигнала ГНСС. Для определения медленных уходов прогнозируемой навигационной информации можно использовать величины ошибок:

$$e_{alm} = \hat{\vartheta}_{gnss} - \hat{\vartheta}_{alm},$$

$$e_{eph} = \hat{\vartheta}_{gnss} - \hat{\vartheta}_{eph},$$

а для определения резких изменений можно использовать численно рассчитываемые скорости изменения оценок, что можно сформулировать в виде двух критериев:

$$\varepsilon_3 = \begin{cases} \min_{T_{2,3}}(e_{alm} \cdot w_e, e_{eph} \cdot w_e), & \|e_{alm}\| < \alpha, \|e_{eph}\| < \alpha, \\ 0, & \|e_{alm}\| > \alpha, \|e_{eph}\| > \alpha, \end{cases}$$

$$\varepsilon_4 = \min_T(\hat{\vartheta}_{gnss} \cdot w_{\vartheta}, \hat{\vartheta}_{alm} \cdot w_{\vartheta}, \hat{\vartheta}_{eph} \cdot w_{\vartheta}),$$

где w_e – вектор весовых коэффициентов для каждого элемента вектора ϑ , w_{ϑ} – вектор весовых коэффициентов для каждого элемента вектора ϑ (по скорости изменения), α – некоторое пороговое значение.

Обобщенный критерий выбора можно сформулировать следующим образом:

$$\varepsilon = \min_T(\beta_1 \varepsilon_1, \beta_2 \varepsilon_2, \beta_3 \varepsilon_3, \beta_4 \varepsilon_4),$$

где β_k – некоторые весовые коэффициенты, учитывающие важность каждого критерия в зависимости от практической задачи. Отметим, что выбранная в результате наиболее достоверная навигационная информация может быть использована для коррекции БИНС по одному из известных методов комплексирования.

При практической реализации необходимо учитывать, что приемнику ГНСС потребуется около получаса (с «холодного» старта) для получения необходимых данных альманаха и эфемерид, без которых невозможно сформировать прогноз. Помимо этого, поиск координат объекта, как правило, для переопределенного случая, решается с помощью методов оптимизации, например методом наименьших квадратов, что предъявляет высокие требования к быстродействию вычислителя.

Заключение

В статье предложен метод комплексирования фактической и прогнозируемой навигационной информации ГНСС. Подход основывается на идее селективного метода комплексирования на базе федеративного фильтра Калмана, но с расширенным критерием выбора наиболее достоверной навигационной информации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор №13183ГУ/2018 от 31.05.2018).

Список литературы

1. Salychev O.S. Inertial systems in navigation and geophysics. Moscow, Bauman MSTU Press, 1998, 352 p.
2. Шэнь К., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2016. №2.
3. Шэнь К., Белявская А.Д. Разработка способа повышения точности алгоритмов оценивания погрешностей навигационных систем // Молодежный научно-технический вестник, 2014, вып. 10 URL: <http://ainsnt.ru/doc/737071.html>
4. Неусыпин К.А., Пролетарская В.А., Алексеева Е.Ю. Алгоритмические методы коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Инженерный вестник, 2013, вып. 3 URL: <http://engsi.ru/doc/547962.html>
5. Neusyypin K.A., Selezneva M.S., Proletarsky A.V., Shen K. Algorithm for building models of INS/GNSS integrated navigation system using the degree of identifiability. Proceedings of 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2018, May 25, 2018, pp. 1-5.
6. Тупысев В.А., Литвиненко Ю.А. Комплексирование показаний нескольких ИНС с использованием принципа репродукции измерений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 7. С. 83-93.
7. Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В. Использование федерального фильтра Калмана для коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Вып. 9. С. 428-432.
8. Пролетарский А.В., Чжан Л., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Способы использования критерия степени наблюдаемости переменных состояния в федеративном фильтре Калмана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. Вып. 8. С. 9-18.
9. Микрин Е.А., Михайлов М.В. Навигация космических аппаратов по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем // МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. С. 348.
10. Листеренко Р.Р., Бекасов Д.Е. Применение фильтра Калмана для обработки последовательности GPS-координат // Молодежный научно-технический вестник, 2015, вып. 9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24310259>
11. Cooper S., H. Durrant-Whyte. A Kalman filter model for GPS navigation of land vehicles. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94), 2002, pp. 157-163.

References

1. Salychev O.S. Inertial systems in navigation and geophysics. Moscow, Bauman MSTU Press, 1998, 352 p.
2. Shen Kai, Proletarskiy A.V., Neusypin K.A. The research into correction algorithms for aircraft navigation systems. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrum. Eng, 2016, no. 2, pp. 28–39.
3. Shen Kai, Belyavskaya A.D. Design of an approach for increasing accuracy of navigation errors estimation algorithms. Youth herald of the Bauman Moscow State Technical University, 2014, vol. 10. Available at: <http://ainsnt.ru/doc/737071.html>
4. Neusypin K.A., Proletarskaya V.A., Alexeeva E.Yu. Algorithms for correcting inertial navigation systems for aircrafts. Engineering Herald, 2013, no. 3. Available at: <http://engsi.ru/doc/547962.html>
5. Neusypin K.A., Selezneva M.S., Proletarsky A.V., Shen K. Algorithm for building models of INS/GNSS integrated navigation system using the degree of identifiability. Proceedings of 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2018, May 25, 2018, pp. 1-5.
6. Tupusev V.A., Litvinenko Yu.A. Integration of readings from several INS with the use of measurement reproduction principle. Bulletin of Tula State University. Technical Sciences, 2012, no. 7, pp. 83-93.
7. Klychnikov V.V., Selezneva M.S., Neusypin K.A., Proletarsky A.V. Using the federal Kalman filter to correct aircraft navigation systems. Automation. Modern technologies, 2018, no. 9. pp. 428-432.
8. Proletarsky A.A., Chzan L., Selezneva M.S., Neusypin K.A. Methods of the state variables criterion of the degree of observability using of in the federative Kalman. Devices and systems. Control and diagnostics, 2018, no. 8. pp. 9-18.
9. Mikrin E.A., Mikhailov M.B. Spacecrafts navigation based on data from global navigation satellite system. Bauman Moscow State Technical University Publ, 2017, p. 348.
10. Listerenko P.P., Bekasov D.E. Kalman filter application to processing GPS data. Youth herald of the Bauman Moscow State Technical University, 2015, vol. 10. (In Russian). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24310259>
11. Cooper S., H. Durrant-Whyte. A Kalman filter model for GPS navigation of land vehicles. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94), 2002, pp. 157-163.

Масленников Андрей Леонидович – ассистент кафедры «Системы автоматического управления», amas@bmstu.ru	Maslennikov Andrey Leonidovich – teaching assistant, Dept. “Automatic Control Systems”, amas@bmstu.ru
Цыганкова Ирина Сергеевна – магистрантка	Tsygankova Irina Sergeevna – master’s student
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия	Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Received 04.04.2019