

## СЛАБОЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА С КВАТЕРНИОННЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ОРИЕНТАЦИИ

Н. Н. Василюк

**Аннотация.** Отмечено, что в предложенном комплексировавшем фильтре вектор наблюдения содержит только спутниковые измерения координат антенны. Ошибки кватерниона ориентации учитываются в виде вектора малого поворота, из которого строится кватернион апостериорной ошибки ориентации. Кватернион ошибки применяется для мультипликативной коррекции априорной оценки кватерниона ориентации, полученной решением уравнений инерциальной навигации. Априорные оценки остальных компонент вектора состояния фильтра корректируются аддитивным способом. Приведены результаты экспериментальной отработки комплексировавшего фильтра. Выполнен численный анализ наблюдаемости вектора состояния фильтра на экспериментальных траекториях.

**Ключевые слова:** комплексирование, навигационные данные, слабая интеграция, расширенный фильтр Калмана.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования* / А. И. Петров и др. – М.: Радиотехника, 2005. – 688 с. [GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya / A. I. Petrov i dr. – Moscow: Radiotekhnika, 2005. – 688 s. (In Russian)]
2. *Grewal, M. S., Weill, L. R., Andrews A. P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, 2nd Edition.* – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2007. – 517 p.
3. *Лебедев Р. К. Стабилизация летательного аппарата бесплатформенной инерциальной системой.* – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с. [Lebedev, R. K. Stabilizatsiya letatel'nogo apparata besplatformennoi inertsiyal'noi sistemoi. – Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 144 s. (In Russian)]
4. *Анучин О. Н., Емельянцева Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов.* – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 390 с. [Anuchin, O. N., Emel'yantseva, G. I. Integrirovannye sistemy orientatsii i navigatsii dlya morskikh podvizhnykh ob'ektov. – 2-e izd., pererab. i dop. – SPb.: GNTS RF – TSNII «Ehlektropribor», 2003. – 390 s. (In Russian)]
5. *Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии* / Б. С. Алёшин и др. – М.: Физматлит, 2006. – 424 с. [Orientatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob'ektov: sovremennye informatsionnye tekhnologii / B. S. Aleshin i dr. – Moscow: Fizmatlit, 2006. – 424 s. (In Russian)]
6. *Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения.* – М.: Физматлит, 2006. – 512 с. [Chelnokov, Yu. N. Kvaternionnye i bikvaternionnye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniya. Geometriya i kinematika dvizheniya. – Moscow: Fizmatlit, 2006. – 512 s. (In Russian)]
7. *Markley, F. L. Multiplicative versus additive filtering for spacecraft attitude determination* / NASA Technical Reports Server, 2003. (URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20040037784>).
8. *Markley, F. L. Attitude error representations for Kalman filtering* // Journal of guidance, control, and dynamics. – 2003. – Vol. 26, No. 6. – P. 311 – 317.
9. *IEEE Std 1431-2004 IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros* / Published 20.12.2004.
10. *What are the major error sources for inertial sensors?* URL: [https://www.analog.com/en/education/education-library/faqs/faq\\_what\\_are\\_the\\_major\\_error\\_sources\\_for\\_inertial.html](https://www.analog.com/en/education/education-library/faqs/faq_what_are_the_major_error_sources_for_inertial.html) (дата обращения 26.12.2018).
11. URL: [https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika\\_doc105.pdf](https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf).
12. *IEEE Std 1293-1998 (R2008) IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear Single-Axis, Nongyroscopic Accelerometers* / Published 25.09.1998.

13. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с. [Chelnokov, Yu. N. Kvaternionnye i bikvaternionnye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniya. Geometriya i kinematika dvizheniya. – Moscow: Fizmatlit, 2006. – 512 s. (In Russian)]
14. MPU-9150 Nine-Axis (Gyro + Accelerometer + Compass) MEMS MotionTracking(NV) Device. (URL: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9150/>).
15. Терешков В. М. Прямой метод оценивания погрешностей датчиков бесплатформенных ИНС // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2010. – № 3. С. 68–78. [Tereshkov, V. M. Pryanoi metod otsenivaniya pogreshnoei datchikov besplatformennykh INS // Vestnik MGTU im. N. Eh. Baumana. Ser. Priborostroenie. – 2010. – No. 3. – S. 68–78. (In Russian)]
16. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с. [Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya / pod red. A. A. Krasovskogo. – Moscow: Nauka, 1987. – 712 s. (In Russian)]

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Л. Б. Рапопортом.*

**Васильюк Николай Николаевич** – канд. физ.-мат. наук, ООО «Топкон Позиционинг Системз», г. Москва, ✉ [nik-vasilyuk@yandex.ru](mailto:nik-vasilyuk@yandex.ru).

*Поступила в редакцию 16.07.2018, после доработки 17.01.2019.  
Принята к публикации 6.02.2019.*

## **LOOSE COUPLING OF INERTIAL AND SATELLITE NAVIGATION MEASUREMENTS WITH THE AID OF EXTENDED KALMAN FILTER WITH ATTITUDE QUATERNION**

N. N. Vasilyuk

Topcon Positioning Systems, LLC, Moscow, Russia, ✉ [nik-vasilyuk@yandex.ru](mailto:nik-vasilyuk@yandex.ru)

**Abstract.** It is noted that the observation vector of the proposed coupling filter contains only antenna coordinates, measured by GNSS receiver. The errors of the attitude quaternion are considered as a small rotation vector which is used to construct an a-posteriori attitude error quaternion. The error quaternion is used for multiplicative correction of an a-priori estimate of an attitude quaternion obtained by solving inertial navigation equations. A-priori estimates of the remaining components of the filter's state vector are corrected in an additive way. An experimental testing results of the coupling filter are provided. A numerical observability analysis of the filter's state vector on experimental trajectories has been performed.

**Keywords:** navigation data coupling, loose coupling, extended Kalman filter.