

Повышение точности навигации по ГНСС на геостационарной орбите за счет коррекции частоты опорного генератора по измерению внешней метки времени

И.А. Соколов

Аннотация — В статье рассматривается метод повышения точности координатно-скоростного определения вектора состояния космических аппаратов на геостационарной орбите с использованием глобальных навигационных спутниковых систем. Внимание уделяется применению фильтра Калмана с учетом дополнительного измерения внешней метки времени. Показано, что использование внешней метки времени от внешнего высокостабильного опорного генератора позволяет значительно улучшить качество навигационного решения за счет снижения погрешностей, вызванных дрейфом частоты внутреннего генератора. Для оценки эффективности предложенного подхода проведено сравнение встроенных алгоритмов двух вариантов фильтра Калмана: с учетом и без учета внешней метки времени. Моделирование выполнено на модуле спутниковой навигации АСН с использованием имитаторов сигналов в условиях, максимально приближенных к реальным. В качестве критериев оценки использовались модуль вектора ошибки координат на конец интервала навигации и ошибка прогноза на 24 часа решения с конца интервала навигации. Результаты показали, что применение внешней метки времени обеспечивает в среднем улучшение точности на 25%.

Ключевые слова — фильтр Калмана, спутниковая навигация, аппаратура спутниковой навигации, опорный генератор, математическое моделирование, повышение точности, геостационарная орбита.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие космических технологий приводит к увеличению числа космических аппаратов (КА) на околоземных орбитах [1]. Точное определение их положения является критически важным для выполнения различных миссий, таких как наблюдение за Землей [2], связь [3], навигация и научные исследования [4]. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, предоставляют возможность определения координат КА с высокой точностью в режиме реального времени. Однако,

влияние внешних факторов, таких как атмосферное сопротивление, гравитационные возмущения и давление солнечного света, требует применения сложных алгоритмов обработки данных для повышения точности навигации [5].

Развивающийся интерес к геостационарным орбитам (ГСО) и высоким эллиптическим орбитам [6]-[9] ставит задачу преодоления такой проблемы как снижение точности навигации из-за ограничения радиовидимости (рис. 1) навигационных космических аппаратов ГНСС (НКА).

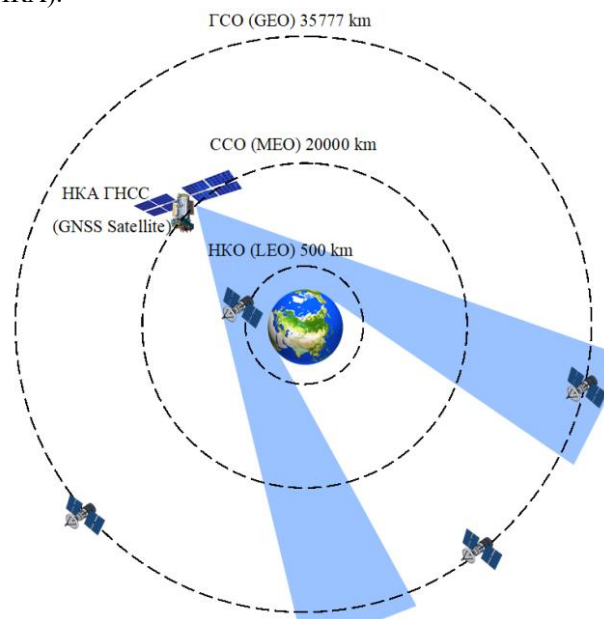


Рис. 1. Ограничение радиовидимости на ГСО. КА вне окрашенной области не могут принимать сигнал с НКА

При навигации на НКО при постоянном и хорошем геометрическом факторе (GDOP – geometric dilution of precision) в аппаратуре спутниковой навигации (АСН) можно использовать простые опорные генераторы (ОГ), т.к. в силу постоянного большого числа видимых НКА шкала времени будет определяться по ГНСС. В объектах на ГСО с этой целью используют высокостабильные опорные генераторы (ВОГ) для понижения требовательности к геометрическому фактору, и рекурсивные методы (из-за высокой предсказуемости орбиты), которые могут уточнять решение при числе НКА, недопустимых для классических схем.

Статья получена 25 марта 2025

Соколов Иван Александрович, Санкт-Петербургский государственный университет, акционерное общество «Конструкторское бюро навигационных систем», Россия (ivansokolof1997@mail.ru).

Фильтр Калмана (ФК) [10] — рекурсивный алгоритм, сочетающий прогноз движения на основе математической модели с коррекцией по данным измерений (рис. 2). Он учитывает динамику системы, что делает его предпочтительным для космических приложений, работающих в режиме реального времени, что критически важно для оперативного управления.

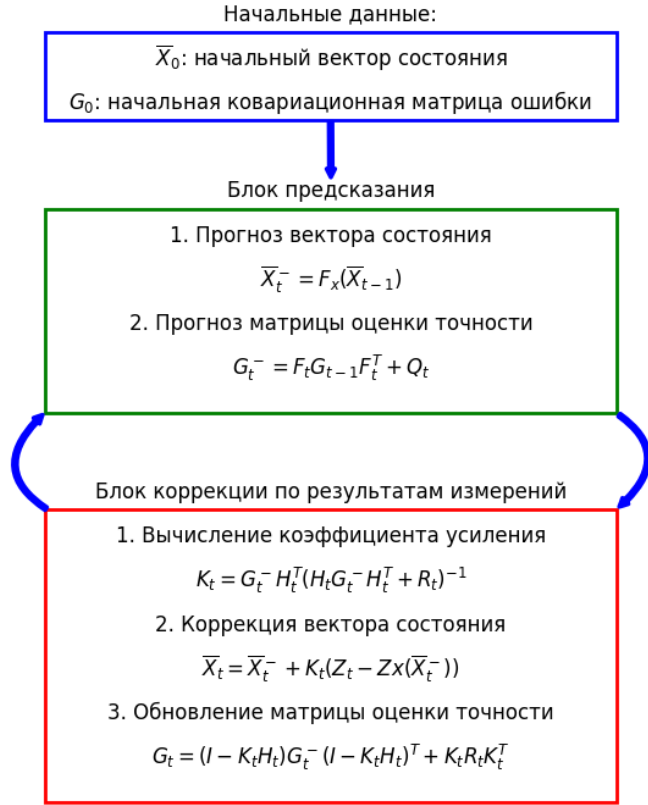


Рис. 2. Алгоритм фильтра Калмана

Существует несколько направлений увеличения точности определения вектора состояния КА:

1. работа по боковым лепесткам антенного устройства НКА [6];
2. работа по боковым лепесткам антенного устройства региональной навигационной спутниковой системы QZSS [7];
3. использование ВОГ.

Целью данной работы является разработка и моделирование способа увеличения точности координатно-скоростного решения на ГСО за счет учета дополнительного измерения положения внешней метки времени в фильтре Калмана.

II. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для определения вектора оцениваемых параметров $\bar{X}_t$ (координат, скоростей, поправки по времени и по частоте) и его оценки точности (матрицы ковариации G_t) ФК внедрен в ПО АСН, который оснащен термостатированным кварцевым ОГ [11] с относительной нестабильностью $1e-7$. В АСН подается внешняя метка времени (МВ) от ВОГ [12] с нестабильностью $1e-9$. Измерение dt_a разности положений МВ внутреннего кварцевого ОГ и внешнего

ВОГ происходит ежесекундно с равномерно распределенной на интервале $[-10,10]$ нс погрешностью. В отличие от поправок к ГНСС, с помощью измерения dt_a напрямую определяется поправка времени к внешней высокостабильной МВ dt_A .

III. ДОПОЛНЕНИЕ ФК ИЗМЕРЕНИЕМ МВ

Для учета этого измерения нужно включить в вектор состояния поправку времени к внешней МВ:

$$\bar{X}_t^{MB} = [\bar{X}_t \ dt_A]^T \quad (1)$$

Вектор измерений Z_{u3M} (Z_t на рис. 2, а Z_x — вектор модели измерения) и матрица шума измерений R_t ФК без учета внешней МВ набора псевдодальностей и псевдоскоростей дополняется аналогично:

$$Z_{u3M}^{MB} = \begin{bmatrix} Z_{u3M} \\ dt_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_t^{MB} = \begin{bmatrix} R_t & 0 \\ 0 & \sigma_a \end{bmatrix} \quad (3)$$

где $\sigma_a = 1.7309 \text{ м} / c = 5.7735 \text{ нс}$ (аппроксимация равномерного распределения $[-10,10]$ нормальным).

С учетом нового $\bar{X}_t^{MB}$ и Z_{u3M}^{MB} изменится и матрица H_t :

$$H_t^{MB} = \begin{bmatrix} & 0 \\ H_t & \vdots \\ & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Из-за стабильности внешней МВ и нестабильности внутреннего ОГ необходимо задать закон изменения нового элемента вектора состояния:

$$[dt_A]_t = F_x([dt_A]_{t-1}) = [dt_A]_{t-1} + df \cdot (\tau_t - \tau_{t-1}) \quad (5)$$

$$F_t^{MB} = \begin{bmatrix} & 0 \\ F_t & \vdots \\ & 0 \\ 0 & \dots & 0 & T & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

где df частота ОГ, в предпоследнем столбце матрицы F_t^{MB} $T = \tau_t - \tau_{t-1}$ показывает зависимость нового изменения от частоты согласно (5). Аналогичным образом прогнозируются поправки по частоте к шкалам времени ГНСС.

Начальное значение dt_A равно начальному измерению dt_a , а начальная оценка точности нового измерения $\sigma_A = 500 \text{ м}$ предполагается на границе линейной области, которая исходит из необходимой

точности, устанавливаемой техническим заданием на аппаратуру спутниковой навигации:

$$G_0^{MB} = \begin{bmatrix} G_0 & 0 \\ 0 & \sigma_A^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Из-за связи dt_A с частотой ОГ и поправок к шкалам ГНСС через частоту опорного генератора в матрице ошибки динамики необходимо указать эту корреляцию:

$$Q_t^{MB} = \begin{bmatrix} 0 & \vdots & 0 & \sigma_f^2 T^2 & \vdots & \sigma_f^2 T^2 & \sigma_f^2 T & \sigma_f^2 T^2 \\ & Q_t & & & & & & \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_f^2 T^2 & \dots & \sigma_f^2 T^2 & \sigma_f^2 T & \sigma_f^2 T^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

где $\sigma_f = 0.015 \frac{M}{c}$ ошибка прогноза частоты ОГ. Из-за

того что новое измерение это аналог измерения НКА, которое имеет только временную составляющую, то корреляция с поправками по времени к шкалам ГНСС будет $\sigma_f^2 T^2$, а к частоте $\sigma_f^2 T$.

Все остальные параметры и формулы аналогичны ФК без учета dt_a (рис. 2).

IV. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ СРАВНЕНИЯ

Методика проведения сравнения алгоритмов основана на использовании специализированного оборудования и критериев оценки. Моделирование выполняется на АСН с применением имитаторов сигналов К2-100 и СН3805М, что позволяет воспроизводить контролируемые условия эксперимента (рис. 3 и рис. 4).

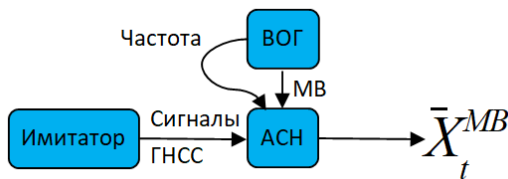


Рис. 3. Стенд моделирования

Для обеспечения корректности сравнения на имитаторах запускается одинаковый сценарий, который включает заданные параметры для ГСО, альманахи на 20.05.2024 и эфемеридные ошибки в псевдодальностях. Использование единого сценария гарантирует идентичность начальных условий для всех алгоритмов и наборов ГНСС, что исключает влияние внешних факторов на результаты тестирования.

Оценка эффективности алгоритмов проводится как визуально, так и численно. Визуальное сравнение осуществляется путем анализа графиков ошибок

решения относительно эталонной траектории, записанной в файле сценария.

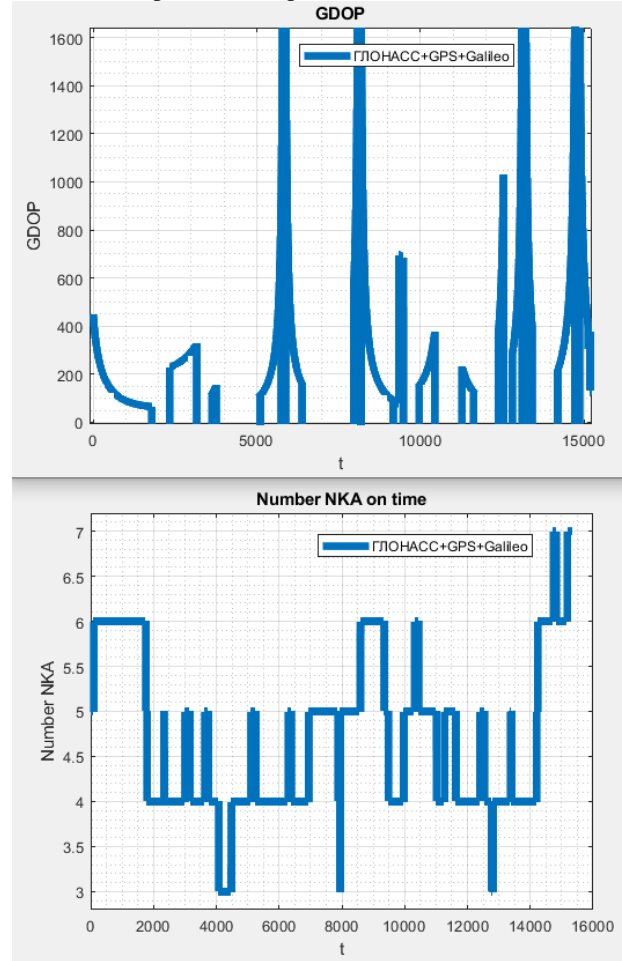


Рис. 4. GDOP и число НКА на сеансе сценария при работе по ГЛОНАСС+GPS+Galileo

Для количественной оценки используются два численных критерия:

1. модуль вектора ошибки координат объекта относительно эталонной траектории на конец указанного интервала, что отражает точность текущего решения;
2. модуль вектора ошибки координат прогноза состояния КА с конца указанного интервала на 24 часа (время одного обращения КА вокруг Земли на ГСО) относительно эталонной траектории, демонстрирующий долгосрочную устойчивость и точность предсказания.

Такая методика позволяет объективно сравнивать алгоритмы, выявляя их сильные и слабые стороны в условиях, максимально приближенных к реальным.

V. СРАВНЕНИЕ РАБОТЫ АСН С РАЗНЫМИ ОГ

В первую очередь нужно показать, что улучшение стабильности ОГ влияет на точность определения координат и скоростей. Для этого используется ФК без дополнительного измерения (1)-(8). С этой целью погрешности координатно-скоростного определения АСН с встроенным ОГ (рис. 5) сопоставлены с АСН,

который синхронизирован по частоте с внешним ВОГ (рис. 6), чтобы смоделировать встроенный ВОГ.

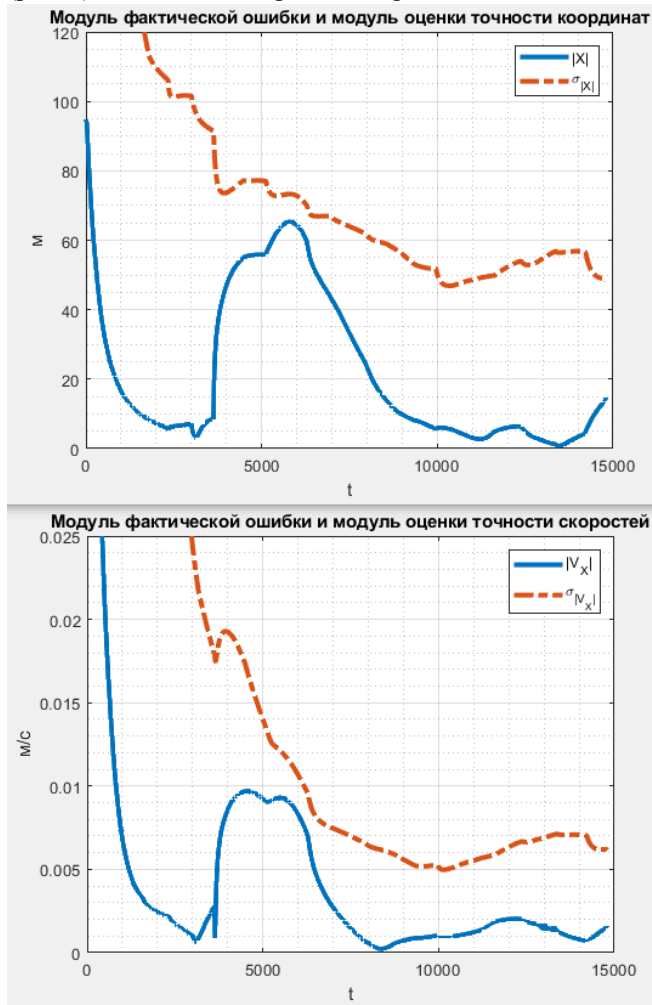


Рис. 5. Фактические погрешности координат и скоростей и их оценка точности при работе ФК в АСН с внутренним ОГ на сеансе ГЛОНАСС+GPS+Galileo

Отличие конфигурации ФК в АСН в том, что во втором варианте на 2 порядка меньше ошибка прогноза частоты ОГ (т.к. стабильность ВОГ лучше на 2 порядка).

Оценка точности демонстрирует соответствие представленной выборке данных, что исключает значимость фактора случайного совпадения фактических погрешностей при анализе выводов.

По фактическим ошибкам и их оценке координаты и скорости стали точнее на 10% (рис. 5 и рис. 6). Однако, такая конфигурация АСН в большинстве случаев не реализуема по следующим причинам:

1. стоимость – технологическая сложность, редкие и дорогие материалы, требование к калибровке и тестированию и другие причины мешают широкому внедрению ВОГ.
2. большая шумовая погрешности частоты ВОГ мешает слежению за НКА (в этом исследовании большая шумовая погрешность частоты не моделировалась).

Поэтому целесообразно использовать внутренний малозумный ОГ в АСН, и получать высокостабильную

внешнюю МВ, но для полноты исследования приведены результаты для варианта АСН с ВОГ.

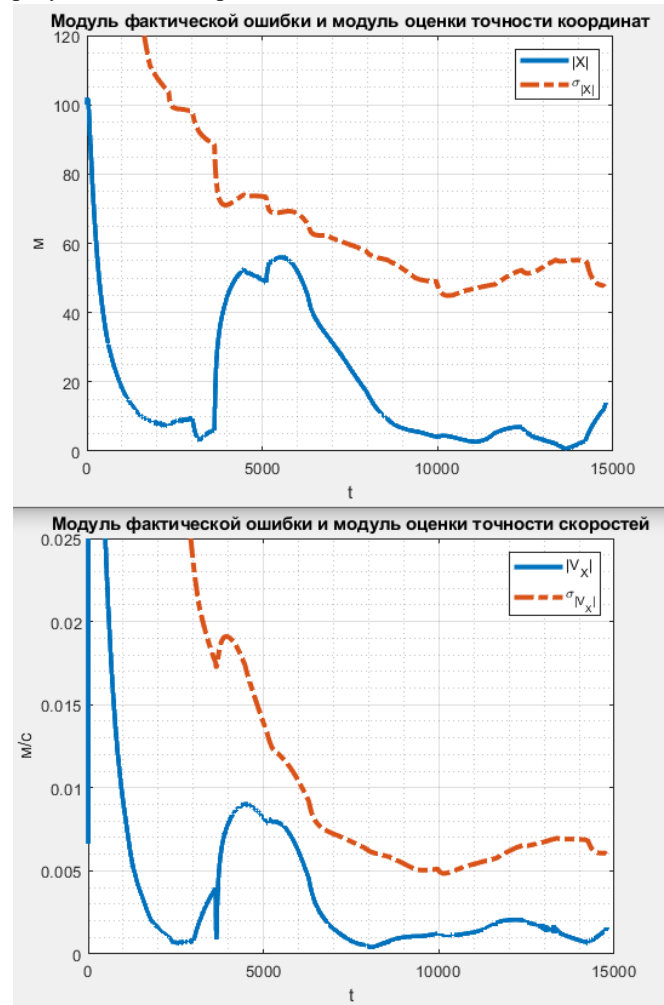


Рис. 6. Фактические погрешности координат и скоростей и их оценка точности при работе ФК в АСН с внешним ВОГ на сеансе ГЛОНАСС+GPS+Galileo

VI. РАБОТА АСН С ВЫСОКОСТАБИЛЬНОЙ МВ

Конкретная равномерная погрешность измерения разницы МВ и шкалы АСН связана с реализованным измерителем в АСН. Это измерение в ФК (1)-(8), благодаря корреляции с частотой будет напрямую ее определять. В случае с встроенным ВОГ без МВ погрешность измерения псевдоскоростей раскладывается на погрешность скорости и частоты, это дает большую погрешность в определении скорости, чем в случае дополнительного измерения МВ (рис. 7), которое напрямую определяет частоту. Вариант ФК с учетом МВ и встроенным ОГ АСН дает улучшение точности на 50% (рис. 5 и рис. 7). При использовании ВОГ и учете внешней МВ (рис. 8) наблюдается улучшение точности, однако в большинстве случаев эта небольшая прибавка (1% в сравнении рис. 7) не будет оправдана из-за ранее обозначенных проблем.

В условиях значительного количества наблюдаемых НКА (при работе по нескольким ГНСС) можно предположить, что дополнительные измерения окажут ограниченное влияние на точность определения вектора состояния, включая координаты и скорости, вследствие достаточности объема уже имеющейся информации.

Тем не менее, при работе на ГСО, как в случае использования трех ГНСС так и при сокращенных конфигурациях наборов ГНСС (таблица I),

скоростей и их оценка точности при работе ФК с МВ в АСН с внутренним ОГ на сеансе ГЛОНАСС+GPS+Galileo

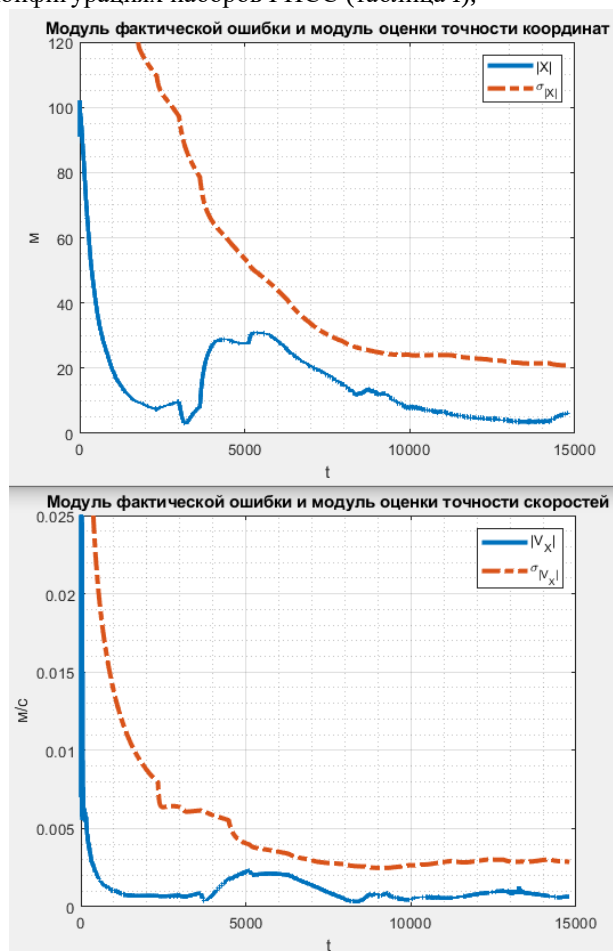


Рис. 7. Фактические погрешности координат и

Таблица I. Сравнение усредненных фактических погрешностей ФК без и с учетом МВ без и с ВОГ

Конфигурация набора ГНСС	Интервал накопления данных, мин	Погрешность на конец интервала, м				Погрешность прогноза на 24 часа ,м			
Вариант ФК		Без МВ		С МВ		Без МВ		С МВ	
Внутренний ОГ или ВОГ		ОГ	ВОГ	ОГ	ВОГ	ОГ	ВОГ	ОГ	ВОГ
ГЛОНАСС +GPS+ GALILEO	25	10.3	10.56	11.4	13.7	301.4	328.7	248.4	308.1
	60	8.4	5.91	7.7	7.4	658.5	613.0	415.0	393.9
	120	35.4	25.49	18.5	20.1	1103.2	802.1	467.7	501.0
	240	16.7	14.17	6.8	4.9	497.4	446.5	267.0	272.0
ГЛОНАСС +GPS	25	11.1	10.35	13.2	16.4	505.5	534.1	174.1	374.8
	60	7.1	6.88	7.1	8.8	602.0	553.8	423.9	466.1
	120	24.2	27.68	17.8	18.8	762.6	844.5	438.9	446.8
	240	16.2	13.02	7.0	5.8	489.5	387.8	258.7	273.5
ГЛОНАСС	25	28.6	21.78	16.0	33.1	2139.6	1827.2	1086.3	1783.7
	60	6.7	6.96	5.1	6.5	133.9	122.8	119.2	87.8
	120	3.6	5.24	6.5	6.1	80.5	112.4	81.7	64.3
	240	3.9	5.68	4.6	4.8	39.7	83.8	125.1	101.8
GPS	25	6.6	6.11	11.3	5.9	256.2	291.9	847.7	216.4
	60	10.5	12.39	10.6	8.9	377.9	346.2	207.9	66.7
	120	24.0	13.80	10.0	7.0	713.8	276.1	56.8	77.6
	240	10.3	20.95	9.3	5.1	265.2	260.5	29.2	84.6

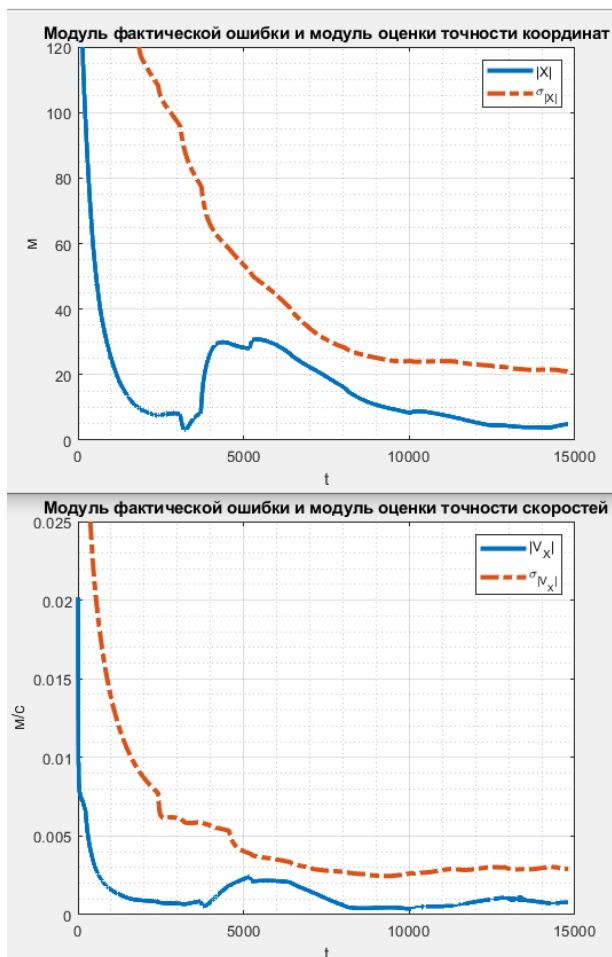


Рис. 8. Фактические погрешности координат и скоростей и их оценка точности при работе ФК с МВ в АСН с внешним ВОГ на сеансе ГЛОНАСС+GPS+Galileo

отмечается улучшение гладкости определения скорости. Данное явление, в свою очередь, оказывает положительное влияние на точность определения координат объекта, что подтверждает значимость учета всех доступных измерений даже в условиях обилия НКА.

На основе данных (таблица I) можно сделать вывод, что при работе по внутреннему ОГ в среднем ФК с учетом дополнительного измерения внешней МВ лучше ФК без ее учета на 20% в рамках критерия ошибки на конец интервала и 30% в рамках критерия ошибки прогноза на 24 часа. По этим же критериям ФК с ВОГ без МВ лучше ФК без ВОГ и без МВ на 5% и 2% соответственно. Преимущество ФК с ВОГ и учетом МВ перед вариантом с внутренним ОГ и без МВ составляет в среднем 15% и 32%.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование демонстрирует потенциал повышения точности навигации за счет учета дополнительного измерения внешней МВ в алгоритме фильтра Калмана. Использование внешней МВ, полученной от внешнего высокостабильного опорного генератора, позволяет компенсировать нестабильность внутреннего кварцевого генератора и, как следствие, увеличить точность навигационного определения.

Сравнительный анализ показал, что включение внешней МВ в вектор состояния ФК обеспечивает в среднем улучшение точности определения координат и скоростей на 25%.

Предложенный подход может быть особенно полезен для задач, требующих высокой точности и долгосрочной устойчивости навигационных решений, таких как управление КА на ГСО.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию данных от других типов датчиков и совершенствование алгоритмов обработки информации для минимизации влияния внешних возмущений и повышения надежности навигационных систем.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Левандович А. В., Мосин Д. А., Синявский В. В. Тютюкин А.Е., Уртминцев И.А. Концептуально-проектные исследования электроракетного разгонного блока для развёртывания многоплоскостной орбитальной группировки малых космических аппаратов // Космическая техника и технологии. – 2021. – № 2(33). – С. 76-87.
- [2] Власов С. А., Житников Т. А., Кульвиц А. В. Формирование облика баллистически связанной группы космических аппаратов наблюдения земной поверхности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2016. – № 651. – С. 113-118.
- [3] Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 4. – С. 190-255
- [4] Kassas Z. M., Hayek S., Ahmad J. -H., LEO Satellite Orbit Prediction via Closed-Loop Machine Learning With Application to Opportunistic Navigation // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 40, no. 1, pp. 34-49, Jan. 2025
- [5] Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы: Учебное пособие. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. — 178 с.
- [6] Ashman B.W., Bauer F.H., Parker J. J. K., Donaldson J.E. GPS Signal Reception and Utilization in Space // 15th International Conference on Space Operations. Session: GNC - Flight Dynamics and Navigation II. AIAA 2018-2568. June 2018.
- [7] Nakajima Yu, Yamamoto T. Enhancing Navigation accuracy in a geostationary orbit by utilizing a regional navigation satellite system // Journal of the Institute of Navigation. June 2024, 71 (2)
- [8] Lay E. H., Romero L., Peterson M., Nag A., Behnke S., Pailoor N., Radio frequency sensor: Very high frequency radio frequency lightning detection in geostationary orbit // Radio Science, vol. 59, no. 6, pp. 1-13, June 2024.
- [9] Ющенко В.А. Семейства ракетносителей России: “Ангара” и “Протон” // Наука и молодежь в XXI веке: материалы III Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Омск: Омскбланкиздат, 2017. – С. 208-211.
- [10] Lefferts, E.J., Markley, F.L., Shuster, M.D. (1982) Kalman filtering for spacecraft attitude estimation. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 5:417–429.
- [11] Генератор кварцевый М32021. Технические условия УИЯД.433532.031 ТУ. МОРИОН СПб
- [12] SA.45s Chip-Scale Atomic Clock. User's Guide [Электронный ресурс] URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Chip-Scale-Atomic-Clock-CSAC-SA.45s-Users-Guide-DS50003041.pdf> (дата доступа 10.01.2025)

Соколов Иван Александрович. Аспирант Санкт-Петербургского государственного университета кафедры моделирования электромеханических и компьютерных систем, ведущий инженер лаборатории базового программного обеспечения навигационной аппаратуры пользователей космического назначения акционерного общества «Конструкторского бюро навигационных систем». Область научных интересов: математическое моделирование, комплексы программ, космическая навигация. E-mail: ivansokolof1997@mail.ru. 2025

Improving the accuracy of GNSS navigation on geostationary orbit through frequency correction of the reference generator based on external time stamp measurements

I.A. Sokolov

Abstract — The article examines a method to enhance the accuracy of coordinate-velocity state vector determination for spacecraft on geostationary orbits using Global Navigation Satellite Systems. Emphasis is placed on applying a Kalman filter incorporating an additional measurement of an external time stamp. It is demonstrated that utilizing an external time stamp from a high-stability reference generator significantly improves navigation solution quality by reducing errors caused by frequency drift in the internal generator. To evaluate the proposed approach, a comparison was conducted between two built-in Kalman filter algorithms: one accounting for the external time stamp and one without. Simulations were performed on an ASN satellite navigation module using signal simulators under near-real conditions. Evaluation criteria included the modulus of the coordinate error vector at the end of the navigation interval and the 24-hour prediction error from the end of the navigation interval. Results showed that the external time stamp provided an average accuracy improvement of 25%.

Keywords — Kalman filter, satellite navigation, satellite navigation equipment, reference oscillator, mathematical modeling, accuracy improvement, geostationary orbit.

REFERENCES

- [1] Levandovich A. V., Mosin D. A., Sinyavsky V. V., Tyutyukin A. E., Urtmintsev I. A. Conceptual and design studies of an electric rocket upper stage for deploying a multi-plane orbital grouping of small spacecraft // *Space Engineering and Technology*. - 2021. - No. 2 (33). - P. 76-87.
- [2] Vlasov S. A., Zhitnikov T. A., Kulvits A. V. Formation of the appearance of a ballistically linked group of spacecraft for observing the earth's surface // *Proceedings of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy*. - 2016. - No. 651. - P. 113-118.
- [3] Pekhterev S. V., Makarenko S. I., Kovalsky A. A. Descriptive model of the Starlink satellite communication system // *Control, Communication and Security Systems*. - 2022. - No. 4. - P. 190-255
- [4] Kassas Z. M., Hayek S., Ahmad J. -H., LEO Satellite Orbit Prediction via Closed-Loop Machine Learning With Application to Opportunistic Navigation // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 40, no. 1, pp. 34-49, Jan. 2025
- [5] Bordovitsyna T.V., Avdyushev V.A. *Teoriya dvizheniya iskusstvennykh sputnikov Zemli. Analiticheskie i chislennyye metody* [Theory of motion of artificial Earth satellites. Analytical and numerical methods]: Tutorial. - Tomsk: Publishing house of Tomsk. University, 2007. - 178 p
- [6] Ashman B.W., Bauer F.H., Parker J. J. K., Donaldson J.E. GPS Signal Reception and Utilization in Space // 15th International Conference on Space Operations. Session: GNC - Flight Dynamics and Navigation II. AIAA 2018-2568. June 2018.
- [7] Nakajima Yu, Yamamoto T. Enhancing Navigation accuracy in a geostationary orbit by utilizing a regional navigation satellite system // *Journal of the Institute of Navigation*. June 2024, 71 (2)
- [8] Lay E. H., Romero L., Peterson M., Nag A., Behnke S., Pailoor N., Radio frequency sensor: Very high frequency radio frequency lightning detection in geostationary orbit // *Radio Science*, vol. 59, no. 6, pp. 1-13, June 2024.
- [9] Yushchenko V.A. Families of Russian launch vehicles: "Angara" and "Proton" // *Science and youth in the 21st century: materials of the III All-Russian student scientific and technical conference*, Omsk: Omskblankizdat, 2017. - P. 208-211.
- [10] Lefferts, E.J., Markley, F.L., Shuster, M.D. (1982) Kalman filtering for spacecraft attitude estimation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 5:417-429.
- [11] Quartz generator M32021. Technical conditions UIYAD.433532.031 TU. MORION SPb
- [12] SA.45s Chip-Scale Atomic Clock. User's Guide [Electronic resource] URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Chip-Scale-Atomic-Clock-CSAC-SA.45s-Users-Guide-DS50003041.pdf> (access date 10.01.2025)

Sokolov Ivan, Aleksandrovich. Postgraduate student of the St. Petersburg State University, Department of Modeling Electromechanical and Computer Systems, leading engineer of the laboratory of basic software for navigation equipment for space users of the joint-stock company "Design Bureau of Navigation Systems". Research interests: mathematical modeling, software packages, space navigation. E-mail: ivansokolof1997@mail.ru.