

УДК 629.058

DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0001

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ НАЗЕМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

© 2021

Киселев Сергей Константинович, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Измерительно-вычислительные комплексы»

Чан Ван Туан, аспирант

Ульяновский государственный технический университет

(432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, e-mails: ksk@ulstu.ru, bhkqvn@gmail.com)

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы определения случаев нарушения целостности навигационных данных при движении наземных мобильных роботов, использующих для управления спутниковую навигационную систему. Указаны особенности движения наземного робота, которые влияют на организацию контроля целостности данных. Предложен алгоритм контроля, реализующий методы автономного бортового контроля целостности данных навигационных систем. Алгоритм построен на основе уравнений соответствия сигналов в различных частях системы управления. Алгоритм предназначен для определения неработоспособности спутниковой навигационной системы, выражающейся в потере сигнала и невозможности решения навигационной задачи. Алгоритм учитывает недетерминированный характер движения наземного робота с возможными остановками в процессе следования по траектории. Рассмотрены варианты реализации алгоритма оценки достоверности для системы управления, содержащей дополнительные датчики перемещения робота и для аппаратно-безызыточной системы, не содержащей дополнительных датчиков. Представлены результаты моделирования движения наземного мобильного робота по произвольной траектории при возникновении случаев нарушения целостности навигационных данных. По результатам моделирования показаны особенности работы алгоритма. Предложены возможные варианты использования алгоритма для уменьшения отклонений робота от желаемой траектории.

Ключевые слова: наземный мобильный робот, система управления, спутниковая навигационная система, движение, навигационные данные, целостность, моделирование, алгоритм.

DATA ACCURACY ASSESSMENT SATELLITE NAVIGATION SYSTEM FOR CONTROLLING THE MOTION OF GROUND MOBILE ROBOTS

© 2021

Kiselev Sergey Konstantinovich, doctor of Technical Sciences, associate Professor,
head of the Department of Measuring and Computing Complexes

Van Tuan Tran, PhD student

Ulyanovsk State Technical University

(432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets St., 32, e-mails: ksk@ulstu.ru, bhkqvn@gmail.com)

Abstract. The article deals with the issues of determining cases of violation of the integrity of navigation data during the movement of ground mobile robots using a satellite navigation system for control. The features of the movement of the ground robot, which affect the organization of data integrity control, are indicated. A monitoring algorithm is proposed that implements the methods of Airborne Autonomous Integrity Monitoring of navigation systems data. The algorithm is based on the equations of the correspondence of signals in various parts of the control system. The algorithm is designed to determine the inoperability of the satellite navigation system, which is expressed in the loss of signal and the impossibility of solving the navigation problem. The algorithm takes into account the non-deterministic nature of the movement of the ground robot with possible stops in the process of following the trajectory. Variants of the implementation of the algorithm for assessing the reliability for the control system containing additional sensors of the robot's displacement and for the hardware-redundant system that does not contain additional sensors are considered. The results of modeling the movement of a ground mobile robot along an arbitrary trajectory in the event of violation of the integrity of navigation data are presented. Based on the simulation results, the features of the algorithm are shown. Possible options for using the algorithm to reduce deviations of the robot from the desired trajectory are proposed.

Keywords: ground mobile robot, control system, satellite navigation system, movement, navigation data, integrity, modeling, algorithm.

Введение. В настоящее время в системах управления тракторным движением наземных автономных мобильных роботов для определения местоположения часто используется приемник спутниковой навигационной системы (СНС). Основными преимуществами использования СНС являются высокая точность опре-

деления координат, малое время готовности устройства, отсутствие накопления погрешностей, простота использования и относительно низкая стоимость бортового приемника СНС [1, 2].

При этом есть и определенные недостатки - результаты измерений подвержены случайным помехам

и потере сигнала. Информация о текущем положении робота на выходе приемника СНС не обновляется, когда количество доступных спутников недостаточно для решения навигационной задачи. Причиной этого может быть, например, потеря связи со спутниками, которая возникает достаточно часто при движении робота по существенно неровной местности или в условиях городской застройки либо при его перемещении внутри некоторого помещения [3].

Таким образом, потери сигнала СНС приводят к нарушению целостности навигационных данных, что может существенно повлиять на точность следования робота по заданной траектории и нарушить выполнение им своих функций [4].

В наиболее ответственных применениях, например, в авиации, для контроля целостности навигационных данных реализуют так называемые функциональные дополнения СНС – внешние методы контроля, когда контроль проводится либо на главной станции управления СНС, либо на контрольно-корректирующей станции. Процедура внешнего контроля достаточно сложна, поскольку требует создания и использования наземной сети [5].

Для мобильных роботов более приемлемым является использование методов, которые позволяют автономно контролировать целостность навигационных данных – методов бортового контроля целостности *AAIM* (*Airborne Autonomous Integrity Monitoring*) [6]. Большинство существующих алгоритмов автономного контроля целостности навигационных данных основано на методах статистической теории радиотехнических устройств, например, методе оценок (максимального отличия решения; сравнения дальности; сравнения местонахождения; невязки по методу наименьших квадратов) и фильтрационных методах [7].

Движение наземного робота при выполнении функциональной задачи является, как правило, недетерминированным процессом. В структуре системы управления роботом обычно присутствуют устройства, которые обеспечивают оценку складывающейся ситуации и изменение параметров и траектории движения. Так, например, в мобильных роботах «Инженер» производства компании «Сервосила» в системе управления используются лазерный сканер, инерциальные датчики, датчики одометрии, система стереозрения и приемник спутниковой навигации [8]. При этом лазерный сканер и система стереозрения предназначены для обнаружения препятствий и корректировки траектории движения для избегания столкновений с ними. Для локализации робота в пространстве используются инерциальные датчики, датчики одометрии, приемник спутниковой навигации.

Таким образом, задача управления плоским движением наземного робота имеет ту особенность, что в процессе выполнения функций робот может неоднократно останавливаться на неопределенное время в разных, заранее неизвестных точках траектории и затем продолжать движение. Такие остановки могут

привести к тому, что при использовании автономных алгоритмических методов оценки навигационных данных может быть сформирован ложный сигнал об их недостоверности.

Для корректного обнаружения недостоверности навигационных данных СНС необходимо учитывать дополнительную информацию о параметрах движения мобильного робота. Для решения задачи оценки достоверности навигационных данных, получаемых с СНС в системе управления наземным мобильным роботом, предлагается использовать методы обнаружения неисправностей на основе уравнений соответствия [9, 10].

Материалы и результаты исследования. Если, например, робот приводится в движение двумя независимыми ведущими колесами, каждое из которых приводится во вращение собственным электродвигателем, то величина продольной скорости движения робота V_{np} определяется как средняя скорость линейного перемещения каждого из колес:

$$V_{np} = \frac{(\omega_n + \omega_k)}{2} r_k.$$

где: ω_n, ω_k — угловые скорости вращения правого и левого ведущих колес, соответственно; r_k — радиус колеса. Тогда за некоторое время $\Delta t = t_2 - t_1$ робот преодолит расстояние приблизительно равное $S_1 = V_{np} \Delta t$.

Когда СНС работает без потери сигнала, то на выходе приемника в момент t_1 будут координаты X_1, Y_1 , а в момент t_2 , соответственно, X_2, Y_2 , и расстояние, на которое переместится робот за Δt будет равно S_2 :

$$S_2 = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}.$$

Необходимо в процессе движения робота постоянно отслеживать отношение $S = S_2/S_1$, которое при правильной работе СНС будет приблизительно постоянным ($S \approx const$). Если же нарушится целостность данных, причиной которой будет потеря приемником СНС сигнала, то координаты на выходе приемника не изменятся и S_2 , а, соответственно, и S , будут равны нулю. Для вычисления S необходимо знать угловые скорости вращения правого и левого ведущих колес ω_n, ω_k , т.е. использовать информацию с одометров.

Алгоритм не изменится, если вместо угловых скоростей вращения колес использовать управляющие напряжения на двигатели U_n и U_k , соответственно, т.к. при равномерном движении скорости вращения колес пропорциональны управляющим напряжениям. Оценка достоверности данных СНС в этом случае ведется по сигналу $S' = S_2/S'_1$, где

$$S'_1 = \frac{(U_n + U_k)}{2} \Delta t.$$

Такой вариант алгоритма может быть реализован, когда система управления робота является аппаратно-безызбыточной и не содержит дополнительных датчиков перемещения робота.

Описание модели наземного мобильного робота с системой управления на базе СНС. Для оценки работы предложенного алгоритма в среде в систем *Simulink* и *MatLab* [11] был смоделирован наземный мобильный робот с системой управления на базе СНС

(рис. 1). Моделировалось движение трехколесного робота с двумя независимыми ведущими колесами (блок "Модель робота"), подобного описанному в [12]. Модель робота была дополнена моделью СНС (блок "Модель СНС") [13]. При движении робота по заданной траектории в данные о его координатах модели СНС в случайные моменты времени вводились случайные по длительности интервалы потери сигнала ("Блок моделирования потери сигнала") [14]. Моделировалось движение робота по произвольной траектории (блок "Заданная траектория") [15]. Оценка достоверности навигационных данных СНС проводилась по сигналу S' , полученному через управляющие напряжения на двигателях робота по его модели.

Результаты моделирования алгоритма. При нор-

мальном без пропусков сигнале СНС робот следовал по заданной траектории на плоскости XU с допустимыми погрешностями, определяемыми, во-первых, собственной динамикой робота, и, во-вторых, погрешностями определения положения, заданными в модели СНС. При задании интервалов потери сигнала СНС траектория движения робота отличалась от заданной, так как в этих интервалах координаты робота на выходе "Блока моделирования потери сигнала" не обновлялись в соответствии с его перемещением и, следовательно, управляющий сигнал в системе формировался неправильно (рис. 2). При восстановлении правильных координат на выходе СНС робот возвращается к заданной траектории и погрешность его позиционирования уменьшается.

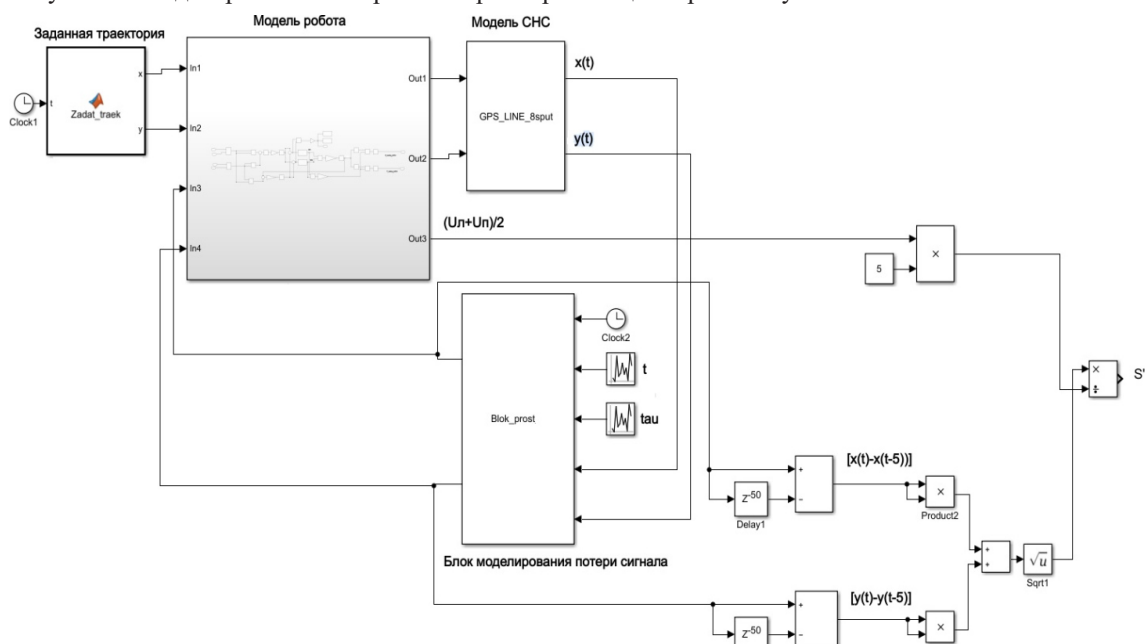


Рисунок 1 – Модель мобильного робота с системой управления на базе СНС

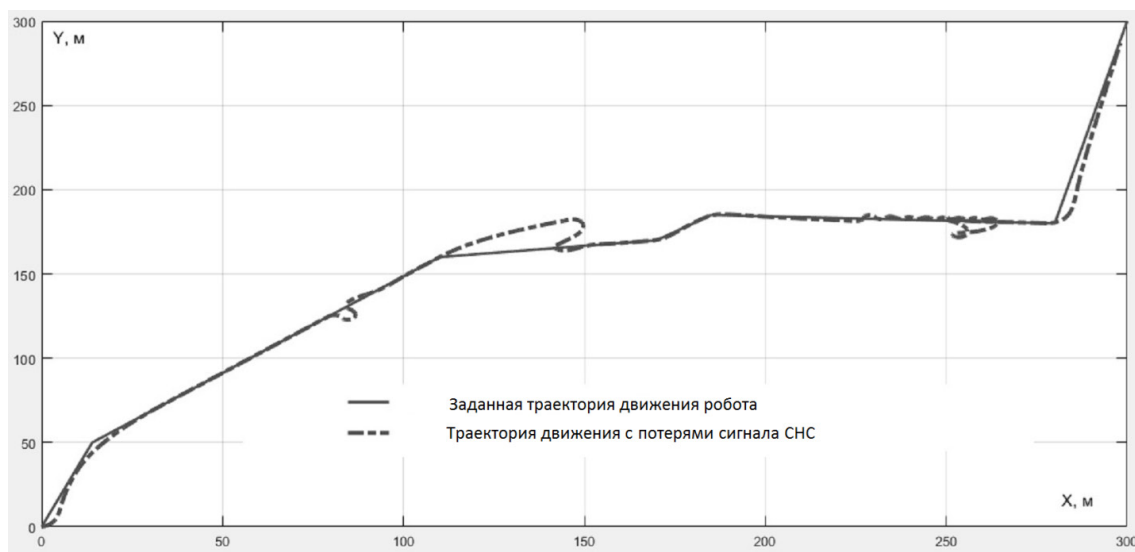


Рисунок 2 – Траектории движения робота

Общее время движения робота по траектории, приведенной на рисунке 2, составляло 7000 секунд. Для вычисления S_2 и S'_1 использовался интервал $\Delta t = 5$

секундам. Результаты работы алгоритма оценки достоверности навигационных данных СНС приведены на рисунке 3.

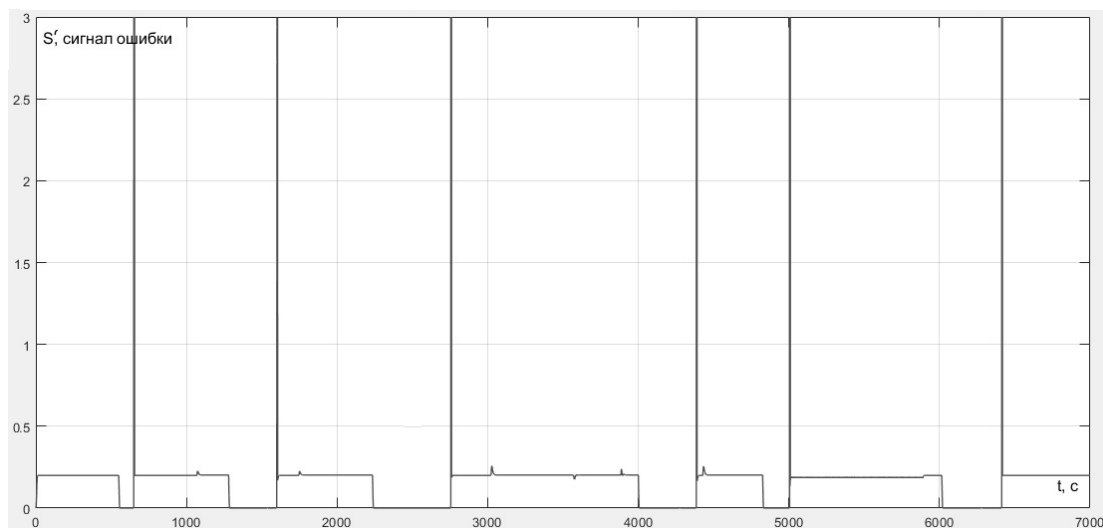


Рисунок 3 – Результаты определения интервалов недостоверности данных в СНС

На рисунке 3 видно, что в те моменты, когда в данных с СНС возникали потери сигнала величина $S' = 0$. В конце каждого интервала потери сигнала СНС восстанавливает работоспособность и измеряет положение робота, в которое он успел переместиться за время потери сигнала, что вызывает импульсное изменение S' .

Закключение. По результатам моделирования движения наземного мобильного робота можно сделать вывод, что предложенный алгоритм оценки достоверности данных СНС позволяет определять интервалы потери сигнала. По значению сигнала S (или S') можно своевременно переходить на управление от других датчиков, например, одометров, а при восстановлении корректности данных снова возвращаться к управлению от СНС.

Если система управления движением робота является аппаратурно-безызбыточной и не содержит дополнительных датчиков перемещения робота, то для исключения слишком больших отклонений от заданной траектории, можно, например, на время потери сигнала в СНС прекращать движение робота, а при восстановлении целостности данных продолжать движение. Такой вариант управления движением будет эффективен, если потеря сигнала на выходе СНС произошла по причине отсутствия связи с достаточным количеством спутников. По прошествии некоторого времени спутники изменят свое положение, сигнал восстановится, координаты будут определены, и робот сможет продолжить движение по траектории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Jurišica, Ladislav & Duchoň, František & Kastan, Dusan & Babinec, Andrej. (2012). High Precision GNSS Guidance for Field Mobile Robots. International Journal of Advanced Robotic Systems. 9.1.10.5772/52554.
2. Сурков, В. О. Системы навигации подвижных наземных объектов и их характеристики // Молодой ученый. – 2015. – № 9 (89). – С. 298-302. – URL: <https://moluch.ru/archive/89/18270/> (дата обращения: 18.04.2021).
3. Серапинас Б.Б. Глобальные системы позиционирования. – М.: Каталог, 2002. – 106 с.
4. Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В. Информа-

ционная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. – СПб: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ Электроприбор", 2004. – 208 с.

5. Михайлов С. Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам / С. Михайлов, В. Кульнев // Беспроводные технологии. – 2006. – №3 (04). – С. 61 – 69.

6. Иванов, А. В. Автономные системы контроля целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем / А. В. Иванов // Радиотехника. – 2014. – № 7. – с. 55–64.

7. Иванов, А.В. Автономный контроль целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем методами сравнения и невязок / А.В Иванов, А.П. Негуляева, С.П. Москвитин // Вестник ТГТУ. – 2016. – Том 22. № 3. – С. 358–367.

8. Мобильные роботы Сервосила «Инженер». [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.servosila.com/media/doc-ru/Servosila-Mobile-Robots-Engineer-Brochure-Rus.pdf> (дата обращения: 11.03.2021).

9. Изерман, Р. Перспективные методы контроля, обнаружения и диагностики неисправностей и их применение / Р. Изерман // Приборы и системы управления, 1998. – № 4. – С. 56 – 70.

10. Gertler J. Analytical redundancy methods in fault detection and isolation // Proc. IFAC Symp. SAFEPROCESS (Baden-Baden, 1991). – Oxford: Pergamon Press, 1991. – Vol. 1. – P. 9 – 21

11. Тугашова Л. Г., Затонский А.В. Моделирование объектов управления в MatLab. – Лань, 2020. – 144 с.

12. Власов С.М., Бойков В.И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. — СПб: Университет ИТМО, 2017. – 169 с.

13. Конин В.В., Харченко В.П. Системы спутниковой радионавигации. – Национальный авиационный университет. – К.: Холтех, 2010. – 520 с.

14. Чан, В.Т. Контроль целостности навигационных данных, используемых для управления мобильным роботом / В.Т. Чан, С.К. Киселев // Информатика и вычислительная техника. XII Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2020 (Россия, г. Ульяновск. 15-15 июня 2020 г.): сборник научных трудов. Под общей ред. В.Н. Негоды. – Ульяновск : УлГТУ, 2020. – С. 260 – 270 .

15. Чан, В.Т. Формирование траектории для исследования движения мобильных роботов / В.Т. Чан, С.К. Киселев // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 54-й научно-технической конф. В 3 ч. Ч.2. – Ульяновск : УлГТУ, 2020. – С. 133-136.

Статья поступила в редакцию 16.03.2021

Статья принята к публикации 16.06.2021