

**ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА
ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЙ «УМНОГО ГОРОДА»
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

А.Г. Коробейников

*Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкиова
Российской академии наук, 199034, Санкт-Петербург, Менделеевская линия, д. 1*

E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

Аннотация. Геомагнитная активность проявляется в виде сильных (магнитные бури и суббури) и слабых (различные типы магнитных пульсаций) возмущений магнитного поля Земли с частотами от тысячных долей герца до нескольких герц. Геомагнитные возмущения, вызванные солнечной активностью, нарушают функциональность глобальных спутниковых систем, снижая точность позиционирования до нескольких метров, что, например, увеличивает риски возникновения аварийных ситуаций в процессе перемещения беспилотных объектов (дронов) в городских условиях с интенсивным движением. На фоне стремительного развития концепции «умного города», базирующейся на интеграции информационных технологий и Интернета вещей, беспилотные объекты транспортной инфраструктуры, такие как беспилотники и автономные транспортные средства, становятся неотъемлемой частью мультимодальных транспортных систем. Отсюда следует актуальность исследований связанных с интеграцией методов обработки данных мониторинга геомагнитной активности и технологий «умного города»

Ключевые слова: беспилотные объекты транспортной инфраструктуры, геомагнитные возмущения, ГНСС, транспортная безопасность, Умный город, управление движением.

**INTEGRATION OF GEOMAGNETIC ACTIVITY MONITORING DATA
PROCESSING METHODS AND SMART CITY TECHNOLOGIES TO ENSURE
THE REQUIRED SAFETY OF UNMANNED TRANSPORT INFRASTRUCTURE
OBJECTS**

A.G. Korobeynikov

Abstract. Geomagnetic activity manifests itself as strong (magnetic storms and substorms) and weak (various types of magnetic pulsations) perturbations of the Earth's magnetic field with frequencies ranging from thousandths of hertz to several hertz. Geomagnetic disturbances caused by solar activity disrupt the functionality of global satellite systems, reducing the accuracy of positioning to several meters, which, for example, increases the risk of accidents during the movement of unmanned objects (drones) in urban areas with heavy traffic. Against the background of the rapid development of the concept of "smart city" based on the integration of information technologies and the Internet of Things, unmanned transportation infrastructure objects, such as drones and autonomous vehicles, are becoming an integral part of multimodal transportation systems. Hence the relevance of research related to the integration of geomagnetic activity monitoring data processing methods and smart city technologies

Keywords: Geomagnetic Disturbances, GNSS, Smart City, Traffic Management, Transportation Security, Unmanned Transportation Infrastructure Objects.

Введение

Геомагнитная активность проявляется в виде сильных (магнитные бури и суббури) и слабых (различные типы магнитных пульсаций) возмущений магнитного поля Земли. Геомагнитные возмущения (ГМВ) лежат в диапазоне от тысячных долей герца до нескольких герц. ГМВ, вызванные солнечной активностью, нарушают функциональность глобальных спутниковых систем (ГНСС), снижая точность позиционирования до нескольких метров, что, повышает риски аварийных ситуаций в процессе перемещения беспилотных объектов транспортной инфраструктуры (БОТИ) в городских условиях с интенсивным движением.

В настоящее время регулирование движения БОТИ быстрыми темпами передается системам диспетчеризации, входящими в «умный город» (Smart City), являющейся

развивающейся и широко внедряемой системой управления городами, основанной на интеграции информационно-коммуникационных технологий и Интернета вещей (IoT). Smart City поддерживают мультимодальный транспорт, включая БОТИ [1]. Интеграция Smart City с БОТИ подчеркивает острую необходимость обеспечения безопасной эксплуатации, в том числе с учетом внешних угроз, возникающих при ГМВ [2]. В данной работе рассмотрен подход, основанный на интеграции анализа данных мониторинга ГМВ и Smart City.

Анализ состояния вопроса

Последние достижения в области технологий Smart City и управления БОТИ демонстрируют значительный прогресс в интеграции искусственного интеллекта и IoT для повышения транспортной безопасности в городских условиях. Текущие исследовательские тенденции в основном сосредоточены на трех основных направлениях: (1) разработка многоуровневых систем управления дорожным движением, (2) повышение точности позиционирования ГНСС в различных условиях окружающей среды и (3) уменьшение влияния космической погоды на автономные навигационные системы в составе БОТИ. Однако, несмотря на эти достижения, в решении проблемы влияния ГМВ на работу БОТИ в экосистемах Smart City остаются нерешенными множество различных задач.

Основные недостатки ГНСС в случае “плохой” космической погоды

Современные исследования достоверно показывают влияние ГМВ на спутниковую навигацию: - «Одночастотные приемники» испытывают до 30% ухудшения сигнала во время умеренной геомагнитной активности ($Kp = 4-5$) [3]; - «Двухчастотные системы», хотя и более устойчивы, все равно показывают ошибки на 5-15 метров во время сильных бурь ($Kp \geq 7$) [4]. - «Сцинтиляция сигнала» приводит к полному отключению ГНСС в регионах в высоких широтах [5].

Модель общего содержания электронов (ТЕС) остается стандартом для количественной оценки ионосферных задержек. Современная инфраструктура Smart City обычно применяет коррекцию ТЕС после обработки, что может создавать опасные ситуации.

Вышесказанное подчеркивает необходимость в комплексном подходе, предложенном в данном исследовании, который сочетает в себе обработку геомагнитных наблюдений с помощью Big Data [6,7] и адаптивную фильтрацию Калмана [8] для создания надежного решения для обеспечения безопасности БОТИ во время ГМВ.

Методы исследования

Предлагаемый подход включает в себя следующие этапы:

Сбор данных ГМВ

Для мониторинга ГМВ используются данные сетей вариационных станций, Международной сети магнитных обсерваторий в реальном времени (INTERMAGNET) [6] и геостационарных спутников, например, предоставляемые NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований - <https://www.noaa.gov/>). Индекс Kp , количественно характеризующий уровень геомагнитной активности, служит ключевым параметром для оценки воздействия ГМВ на ГНСС. Значения Kp могут быть получены, например, на сайте ИЗМИРАН (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/currents.html>), где в процессе ежедневного прогнозирования анализируются и хранятся в базах данных все доступные данные, как полученные в ИЗМИРАН, так и из многочисленных информационных ресурсов, представленных в Интернете. Кроме того, там же представлены методики прогнозирования различных аспектов космической погоды на определенные периоды времени.

Большие данные

Из-за сложной внутренней структуры, сильной изменчивости, нерегулярности и большого объема данных, регистрируемых ГМВ, задача их обработки и анализа является достаточно сложной. В предлагаемом подходе используются методы, основанные на Big Data [6,7].

Математическая модель воздействия ГМВ на ГНСС

ГНСС подвержены возмущающему воздействию физических процессов в околосземном пространстве. Так, точность навигационных систем, использующих сигналы очень низкой частоты (LORAN, OMEGA), зависит от знания фактической высоты нижней границы

ионосферы. Быстрые вертикальные изменения этой границы во время солнечных вспышек и магнитных бурь могут вносить ошибки порядка нескольких километров в определение местоположения. При сильном возмущении ионосферы может произойти потеря сигналов глобальных навигационных систем GPS/ГЛОНАСС. Таким образом, использование данных ГНСС для достижения требуемой точности требует хорошего обеспечения информацией о состоянии космической погоды, чтобы избежать возникающих ошибок.

Математическая модель влияния GMD на точность ГНСС основана на уравнении задержки ионосферного сигнала с учетом общего содержания электронов (TEC) [3]:

$$\Delta t = \frac{40.3}{cf^2} \cdot TEC, \quad (1)$$

где: Δt – задержка сигнала (с); c – скорость света (м/с); f – частота сигнала ГНСС (Гц); TEC – общее содержание электронов (электронов/м²), зависящее от ГМВ; 40.3 – размерный коэффициент [Гц], соответствующий критической частоте.

При высоких значениях Kp ($Kp > 5$) TEC увеличивается, что приводит к ошибкам позиционирования в 5-10 м.

Математическая модель движения БОТИ

Динамика движения БОТИ описывается следующим уравнением:

$$r(t) = r_{true}(t) + \Delta r$$

где: $r(t) = [x(t), y(t), z(t)]$ — наблюдаемое пространственное положение БОТИ; $r_{true}(t)$ – истинное положение; Δr - ошибка, обусловленная ГМВ.

Для коррекции предлагается использовать инерциальную навигационную систему (ИНС), основанную на математической модели (1):

$$r_{corrected}(t) = r(t) + K \cdot (r_{INS}(t) - r_{GNSS}(t))$$

где K – матрица фильтра Калмана [8]; $r_{INS}(t), r_{GNSS}(t)$ – положение, полученное от ИНС и ГНСС соответственно.

Коррекция координат местоположения (состояния системы) с помощью фильтра Калмана, который является рекурсивным фильтром, позволяет определить оптимальную оценку состояния системы в динамике с учетом шума в данных и предыдущей информации о состоянии системы.

Математическая модель вероятности столкновения БОТИ

Анализ столкновений БОТИ играет очень важную роль для безопасности управления движением БОТИ, поскольку любое столкновение приводит к различным потерям. В данном проекте вероятность столкновения БОТИ рассчитывается по следующей формуле:

$$P = 1 - \alpha e^{-\lambda \Delta r^2}$$

где: λ – плотность БОТИ на единицу площади (БОТИ/м²); α – коэффициент.

Значение вероятности в данной модели нелинейно зависит от величины плотности БОТИ и квадрата ошибки расчета местоположения БОТИ, задаваемой ГНСС и зависящей от ГМВ. Таким образом, за простым представлением формулы для расчета вероятности скрывается сложная взаимосвязь между различными факторами.

Алгоритм управления БОТИ при помощи Smart City

Для управления БОТИ при помощи Smart City был разработан алгоритм, обобщенными шагами которого являются:

- **Step 1:** Сбор данных ГМВ в реальном времени.
- **Step 2:** Оценка ошибки ГНСС на основе рассчитанной задержки сигнала Δt .
- **Step 3:** Корректировка маршрутов БОТИ с использованием данных INS и наземных датчиков.
- **Step 4:** Перераспределить трафик в зонах с высоким Kp ($Kp > 5$), изменив приоритеты движения или временно приостановив БОТИ.

Моделирование

При проведении научных и практических исследований компьютерное моделирование на сегодняшний день является одним из основных инструментов познания мира. Например, с

помощью компьютерного моделирования можно оценить влияние различных эффектов представленного подхода на мегаполис. Компьютерное моделирование сочетает в себе низкую стоимость исследования и высокую эффективность.

Для проверки рассматриваемого подхода была смоделирована транспортная сеть Smart City с 10 000 БОТИ. Сценарии включали умеренные условия ($Kp = 3$) и сильные ГМВ ($Kp = 7$).

Результаты

В результате расчетов, проведенных с помощью компьютерного моделирования, были получены следующие результаты:

Точность позиционирования:

– при $Kp = 3$ (слабое ГМВ) средняя ошибка GNSS без корректировки составила 1.46 м., а среднеквадратичное отклонение (СКО) – 0.29 м. При использовании INC средняя ошибка GNSS составила 0.48 м., а среднеквадратичное отклонение (СКО) – 0.14 м. (Рис. 1 а).

– при $Kp = 7$ (сильное ГМВ) ошибка без корректировки выросла до 7.85 м. и СКО – 1.6 м.

При использовании INC средняя ошибка GNSS составила 2.6 м., а СКО – 0.54 м. (рис. 1 б).

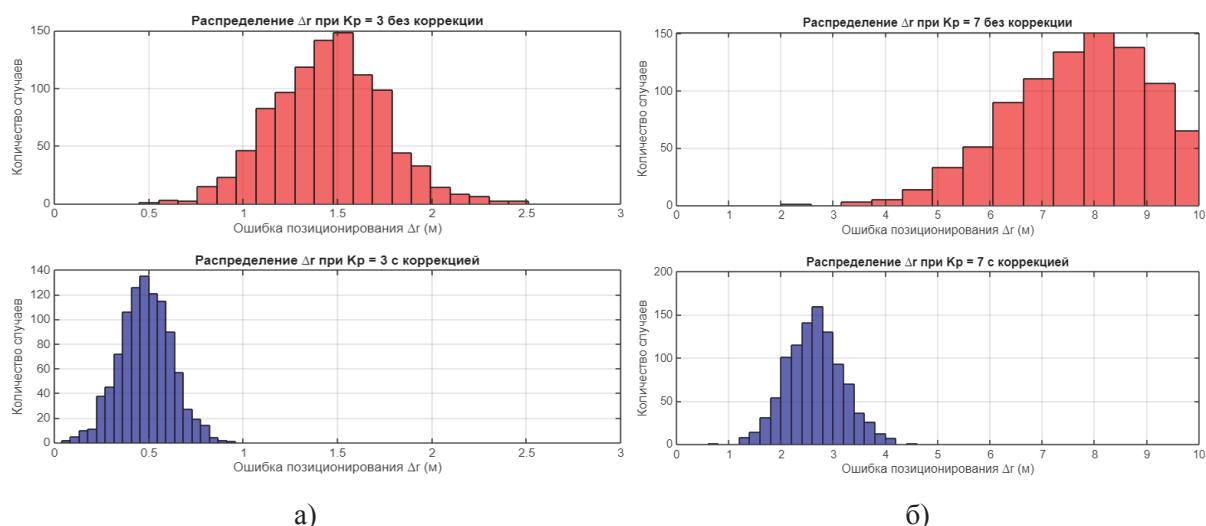


Рис. 1. Распределение ошибки позиционирования при $Kp = 3$ и $Kp = 7$

Безопасность движения

На Рис. 2 представлены результаты моделирования количества столкновений БОТИ в зависимости от интенсивности магнитных бурь, оцениваемых введенной NOAA пятибалльной шкале (G1-G5), и использованием/не использованием INC.

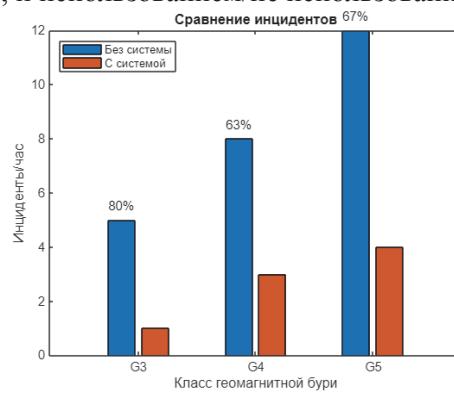


Рис. 2. Сравнение столкновений

Расчеты показывают, что во время протекания магнитных бурь со значением “тяжелые” – класс G4 (соответствует $Kp = 9$), без INC – может происходить за час в среднем 8 столкновений. Применение INC позволяет снизить это значение до 3.

Заключение

Результаты моделирования подтверждают, что интеграция данных мониторинга ГМВ в системы управления Smart City повышает безопасность и надежность движения БОТИ. Визуализация данных и статистический анализ подтверждают эффективность подхода. По сравнению с существующими методами, такими как [9], данный подход обладает хорошей адаптивностью. Он может быть интегрирован в системы управления движением БОТИ и дополнен метеорологическими данными для повышения точности. Будущие исследования могут быть направлены на оптимизацию алгоритма и тестирование в реальных городских условиях. Таким образом, предлагаемый подход, связанный с интеграцией данных мониторинга ГМВ с технологиями управления БОТИ Smart City, представляет собой важное направление в обеспечении транспортной безопасности и надежности движения БОТИ.

Список литературы

1. Vincent Ng, Hyung Min Kim. Autonomous vehicles and smart cities: A case study of Singapore // Smart Cities for Technological and Social Innovation, Academic Press, 2021. – P. 265–287. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818886-6.00014-9>.
2. Hanane Ait-Lakbir, Analysis of the sources of the systematic errors in GNSS precise positioning: contribution of the constellation Galileo. Earth Sciences // Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2023. <https://theses.hal.science/tel-04474903v1/file/2023TOU30209.pdf>
3. O.A. Oladipo, Torben Schüller. GNSS single frequency ionospheric range delay corrections: NeQuick data ingestion technique //Advances in Space Research. – 2012. – Vol. 50. – Issue. 9. – P. 1204–1212, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.035>.
4. Etchells, T., Aplin, K.L., Berthoud, L., Kalavana, A., & Larkins, A. Extreme space weather impacts on GNSS timing signals for electricity grid management // Space Weather. – 2024, 22, e2023SW003770. <https://doi.org/10.1029/2023SW003770>
5. Dongsheng Z., et al. Analysis of global ionospheric scintillation and GPS positioning interference triggered by full-halo CME-driven geomagnetic storm // Advances in Space Research. – 2024. – Vol. 74. – Iss. 5. – P. 2492–2509. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.06.001>
6. Коробейников А.Г. Применение реализованных в MATLAB методов Big Data в задаче выделения геомагнитных пульсаций типа Рс3 из данных INTERMAGNET//Программные продукты и системы. – 2024. – № 3. – С. 318–323. – DOI 10.15827/0236-235X.147.318-323.
7. Коробейников А.Г. Методы BIG DATA для предобработки данных УНЧ-диапазона, полученных с геомагнитных обсерваторий, входящих в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ // Распространение радиоволн : Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции, Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. – С. 313–316.
8. Cheng Y.; Zhang S.; Wang X.; Wang H.; Yang H. Kalman Filter with Adaptive Covariance Estimation for Carrier Tracking under Weak Signals and Dynamic Conditions // Electronics. – 2024, 13, 1288. <https://doi.org/10.3390/electronics13071288>
9. Afrin, T., Yodo, N., Dey, A., Aragon, L.G., Advancements in UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems: A Three-Layered Framework and Future Directions // Applied Sciences. – 2024, 14, 9455. <https://doi.org/10.3390/app14209455>