

П.А. Горев, В.Г. Костиков**СИСТЕМА ВЫСОКОТОЧНОЙ СПУТНИКОВОЙ
НАВИГАЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ
ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ**

Целью исследования является разработка системы высокоточной спутниковой навигации на основе фазовых измерений с поддержкой от инерциальной системы на базе микроэлектромеханических датчиков (МЭМС ИНС). В данной работе рассмотрен метод фазовых измерений без использования опорной станции и рассмотрена структурная схема навигационного комплекса, использующего данный метод. Также выполнен анализ текущих внедренных и разрабатываемых автоматических систем, требующих высокоточной навигации и возможностью ее применения в горных машинах с целью автоматизации и роботизации открытых горных работ. Описаны основные области применения систем высокоточной навигации для автоматизации технологических процессов в различных областях реального сектора экономики: промышленности и сельском хозяйстве. Описаны преимущества и недостатки метода РТК (кинематика в реальном времени), являющимся основным в системах автоматизации и кратко описан метод, предлагающийся авторами в качестве альтернативы. Описаны основные проблемы использования навигационных систем в открытых карьерах и пути их решения. Описаны недостатки представленного нового метода применительно к задачам позиционирования и автоматизированного управления в карьерах при проведении открытых горных работ и пути их решения в рамках применения указанного метода.

Ключевые слова: спутниковая навигация, ИНС, МЭМС, интегрированная навигация, фазовые измерения, открытые горные работы, Simulink.

Обзор систем управления промышленными транспортными средствами

В настоящее время нарастают тенденции по увеличению автономности различных подвижных средств в промышленности и сельском хозяйстве. Важнейшей задачей, решение которой необходимо для построения интеллектуальных систем управления движущимися средствами, является создание эффективной высокоточной системы навигации.

В настоящее время задачи автоматизации управления горными машинами сводятся к диспетчеризации и мониторингу транспортного комплекса. Для решения большинства задач данного класса не требуются высокоточные данные о позиционировании объ-

екта; требуемая точность варьируется в пределах 5–15 м для местоположения, требования по угловой ориентации не предъявляются [3].

Тем не менее, уже сейчас существуют задачи, требующие высокой точности позиционирования подвижных объектов, а именно – задачи построения плана разработки плана горизонта работы экскаватора и корректировки его работы [3].

Кроме того, в настоящее время разрабатываются и готовятся к внедрению системы автоматического движения карьерного транспорта, для которых требуются системы навигации класса точности порядка нескольких миллиметров [3, 4]. Отдельно следует отметить богатый опыт разработки и применения автономных систем

управления подвижными объектами, предназначенными для полевых работ в сельском хозяйстве. В данной области успешно применяются и развиваются системы, которые обеспечивают в автоматическом режиме не только управление движением, но также и выполнение различных технологических задач; таких, как обработка почвы, посадка культур, сбор урожая и пр. [8]. Также находятся в разработке различные системы автономного движения по территории промышленных предприятий [5].

Абсолютное большинство систем навигации для автономных подвижных комплексов используют метод кинематики в реальном времени (RTK, real time kinematic), основанный на фазовых измерениях с использованием корректирующей станции. Данный метод основан на принципе фазовой интерферометрии, то есть измерения разности фаз между опорной станцией и подвижным объектом. RTK является наиболее подходящим методом позиционирования в реальном времени, так как, с одной стороны, предоставляет навигационные данные высокой точности, а с другой – не требует времени для инициализации. В предыдущих работах [1, 2] представлен новый принцип совместной обработки данных фазовых спутниковых из-

мерений и инерциальной системы, позволяющий исключить из навигационного комплекса корректирующую станцию при сохранении требуемой точности измерений. В данной работе представлены результаты дальнейших исследований данного метода и рассмотрены способы и особенности его применения при открытых горных работах.

Метод навигационных измерений

В предыдущих работах [1, 2] представлен метод навигационных измерений, позволяющий проводить обработку фазовых навигационных измерений без использования базовой станции. Отличие данного метода от классического отличается тем, что он оценивает фазу на передающей антенне с использованием измерений ИНС. Целочисленная неоднозначность решается методом двухчастотных измерений. Начальная фаза приемника оценивается в фильтре Калмана при использовании пяти навигационных спутников.

Структурная схема карьерного навигационного комплекса

Использование глобальных навигационных систем (ГНСС) в условиях открытых карьеров имеет ряд специфических особенностей. Наличие кру-



Структурная схема карьерного навигационного комплекса

тых склонов влечет за собой не только уменьшение количества видимых спутников, но и увеличение углов визирования, а следовательно, и увеличение коэффициента DOP (геометрическое снижение точности).

Одним из возможных способов решения данной проблемы является использование псевдоспутников, представляющих собой наземные устройства, излучающие сигналы, аналогичные сигналам ГНСС [6, 7].

Другой вариант решения проблемы – использование интегрированных сильносвязанных навигационных систем, способных функционировать при отсутствии достаточного количества навигационных спутников. Тем не менее, данный подход плохо применим в задачах управления, так как при использовании меньшего числа спутников снижается точность измерений [5].

Представленный метод навигационных измерений требует использо-

вания как минимум пяти источников навигационного сигнала. Таким образом, использование псевдоспутников позволяет решить данную проблему в условиях открытых горных работ. Предлагаемая структурная схема карьерного навигационного комплекса представлена на рисунке.

Выводы

В данной статье описан принцип обработки фазовых навигационных измерений и рассмотрены особенности его применения в составе систем управления процессами открытых горных работ. Основной особенностью структурной схемы является отсутствие базовой станции, вместо которой используются данные системы широкозонной дифференциальной коррекции. Это позволяет снизить стоимость и повысить эффективность высокоточной навигационной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горев П.А. Метод повышения точности определения координат подвижного объекта инерциальной навигационной системы // Научный вестник МГТУ. – 2014. – № 3(48). – С. 39–49.
2. Горев П.А. Жестко связанная инерциально-спутниковая радионавигационная система на основе фазовых измерений // Пятая научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов. – М.: изд-во ГСКБ «Алмаз-Антей». – 2014. – С. 233–242.
3. Клебанов Д., Макев М. Применение технологий высокоточной спутниковой навигации в горнодобывающей отрасли // Недоропользование XXI. – 2010. – № 5 ноябрь. – С. 34–36.
4. Mena R. et al. Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints // International Journal of Mining Science and Technology. – 2013. – no 23. – pp. 113–119.
5. Meguro J. et al. Development of an Autonomous Mobile Surveillance System Using a Network-based RTK-GPS // Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain, April 2005. – pp. 3096–3101.
6. Stone J.M. et al. GPS Pseudolite Transceivers and their Applications // ION National Technical Meeting 99, San Diego, California, January 25–27, 1999. – pp. 21–31.
7. Shan Zh., Han H., Jiang K. Optimization model of GNSS/pseudolites structure design for open-pit mine positioning // Trans. Nonferrous Met. Soc. China 23(2013). – pp. 2201–2208.
8. Takai R., Yang L., Noguchi N. Development of a crawler-type robot tractor using RTK-GPS and IMU // Engineering in Agriculture, Environment and Food. – 2014. – 7. – pp. 143–147. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Горев Павел Александрович¹ – аспирант, инженер «ОАО НИИ ТП»,
e-mail: gorev.pv@yandex.ru,

Костиков Владимир Григорьевич¹ – доктор технических наук, профессор,
начальник отдела ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», e-mail: kvg303@yandex.ru,

¹ НИТУ «МИСиС».

PRECISION NAVIGATION SYSTEM FOR THE CONTROL OF THE OPEN PIT MINING PROCESSES

Gorev P.A.¹, Graduate Student, Engineer, «JSC RIPI», Moscow, Russia, e-mail: gorev.pv@yandex.ru,
Kostikov V.G.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, JSC «GSKB «Almaz-Antey», Moscow, Russia, e-mail: kvg303@yandex.ru, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

The purpose of the current investigation is the development of the precision carrier-phase based satellite navigation system, aided by an inertial system based on microelectromechanical sensors (MEMS INS). The new method of the carrier-phase measurements without the use of the reference station is considered in the given paper, and the structure circuit of the navigation complex, applying this method, is considered. Also, the analysis of the current automatic systems: maintained and under development – requiring the high precision navigation data and the opportunities of its implementation in the mining machines with the purpose of automation and robotization of the open pit mining was carried out. The main fields of the implementation of high precision systems for the automation of technological processes in the different areas of the real sector of the economics: industry and agriculture. Basic problems related to the implementation of the precision systems in the open pits and the ways to solve them, including issues of the presented method implementation.

Key words: satellite navigation, INS, MEMS, integrated navigation, carrier-phase measurements, open-pit mining, Simulink.

REFERENCES

1. Gorev P.A. *Nauchnyy vestnik MGGU*. 2014, no 3(48), pp. 39–49.
2. Gorev P.A. *Pyataya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov* (V Scientific-Technical Conference of Young Scientists and Experts), Moscow, izd-vo GSKB «Almaz-Antey». 2014, pp. 233–242.
3. Klebanov D., Makev M. *Nedropol'zovanie XXI*. 2010, no 5 November, pp. 34–36.
4. Mena R. et al. Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013, no 23, pp. 113–119.
5. Meguro J. et al. Development of an Autonomous Mobile Surveillance System Using a Network-based RTK-GPS. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain, April 2005, pp. 3096–3101.
6. Stone J.M. et al. GPS Pseudolite Transceivers and their Applications. *ION National Technical Meeting 99*, San Diego, California, January 25–27, 1999, pp. 21–31.
7. Shan Zh., Han H., Jiang K. Optimization model of GNSS/pseudolites structure design for open-pit mine positioning. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 23(2013), pp. 2201–2208.
8. Takai R., Yang L., Noguchi N. Development of a crawler-type robot tractor using RTK-GPS and IMU. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2014, 7, pp. 143–147.



Гордиться своими предками благородно, а прикрываться их авторитетом недопустимо. Инженер вынужден самостоятельно и кропотливо завоевывать собственный авторитет в профессиональной среде.