

Оптимальное использование космических аппаратов ГНСС в функциональных дополнениях SBAS и GBAS

В. В. Куршин, *д. т. н.*, vkurshin@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. В. Филимонова, filimonova.dv@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается метод повышения качества навигационного сервиса потребителей с повышенными требованиями к характеристикам точности и надежности с использованием систем функционального дополнения космического базирования (SBAS) и наземных систем функционального дополнения (GBAS). Системы функционального дополнения передают пользователям корректирующие поправки, которые используются для коррекции измерений ГНСС, и информацию о целостности. В силу существующих ограничений на число спутников, для которых передаются корректирующие поправки, в статье предложено оптимальное использование спутников системы GPS, представляющей собой неполный набор из 27 спутников, которые будут применяться в навигационном сервисе ГЛОНАСС/GPS/SBAS, в то время как будут использоваться измерения полной группировки спутников ГЛОНАСС. Выбор 27 из существующей группировки 32 спутников GPS предлагается осуществить таким образом, чтобы подсистема обеспечивала максимальную эффективность использования сигналов ГНСС. Оптимизационная задача решается нахождения оптимального набора исключаемых спутников ГНСС по алгоритму Р. Беллмана. Найденный оптимальный набор исключаемых спутников ГНСС позволяет снизить VDOP по сравнению с неоптимальным практически на 24% и тем самым повысить характеристики навигации с использованием сигналов ГЛОНАСС/GPS и корректирующих поправок SBAS.

Ключевые слова: спутниковая навигация, системы функционального дополнения космического базирования, SBAS, наземные системы функционального дополнения, GBAS, оптимальное созвездие, ГНСС, ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BDS

Optimal Use of GNSS Spacecraft in SBAS and GBAS Functional Augmentations

V. V. Kurshin, *Dr. Sci. (Engineering)*, vkurshin@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. V. Filimonova, filimonova.dv@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article discusses a method for improving the quality of navigation services for consumers with increased requirements for accuracy and reliability using satellite-based augmentation systems (SBAS) and ground-based augmentation systems (GBAS). Augmentation systems provide users with corrections that are used to correct GNSS measurements and integrity information. Due to the existing restrictions on the number of satellites for which corrections are transmitted, the article proposes the optimal use of GPS satellites, which is an incomplete set of 27 satellites that will be used in the GLONASS/GPS/SBAS navigation service, while measurements of the full constellation of GLONASS satellites are used for positioning. It is proposed to carry out the choice of 27 from the existing constellation of 32 GPS satellites in such a way that the subsystem provides the maximum efficiency of using the GNSS signals. The optimization problem or finding the optimal set of excluded GNSS satellites is solved according to R. Bellman's algorithm. The found optimal set of excluded GNSS satellites makes it possible to reduce VDOP in comparison with the non-optimal one by almost 24% and thereby improve navigation performance using GLONASS/GPS signals and SBAS corrections.

Keywords: satellite navigation, satellite-based augmentation systems, SBAS, ground-based augmentation systems, GBAS, optimal constellation, GNSS, GLONASS, GPS, Galileo, BDS

Введение

Существующие в настоящее время глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BDS (BeiDou System) позволяют удовлетворить потребности обширного круга потребителей в навигационном обслуживании. Однако, по мере совершенствования технологий применения систем позиционирования, потребители ГНСС предъявляют повышенные требования к координатно-временному навигационному обеспечению. Существует большое количество задач, которые требуют более высокой точности навигации. ГНСС в полной мере не обеспечивают необходимую точность определения местоположения и данные о времени предупреждения.

Развитие систем ГНСС создает предпосылки повышения показателей точности, однако комплексное решение задач местоопределения потребителей с заданными характеристиками точности и надежности на данном этапе развития может быть обеспечено исключительно с использованием систем функционального дополнения космического базирования (SBAS) и наземных систем функционального дополнения (GBAS).

Основой систем функциональных дополнений является сеть станций сбора измерений в SBAS и сеть локальных контрольно-корректирующих станций в GBAS. В SBAS информация, принимаемая сетью станций, передается в центр обработки данных для совместной обработки с целью выработки общих поправок и информации о целостности навигационных определений. Корректирующие дифференциальные поправки в SBAS передаются потребителям при помощи геостационарных спутников, а в GBAS — самой корректирующей станцией по радиоканалу. Максимальный размер рабочей зоны наземных систем функционального дополнения составляет 50–200 км, в то время как может достигать порядка 5000 км в случае систем функционального дополнения космического базирования. Сообщения функциональных дополнений корректируют навигационные измерения ГНСС, поэтому предполагаемая точность определения координат с использованием систем SBAS составляет 0,5–1 м и 1–2 м в зоне обслуживания GBAS, что значительно лучше точности номинального режима систем ГНСС.

В первую очередь системы функциональных дополнений нужны авиационным потребителям, и именно они определяют требования по точности, целостности и достоверности навигации. Помимо улучшения качества навигационного обслуживания, системы SBAS и GBAS передают данные, позволяющие оценить точность определения положения потребителя, поскольку для авиационного потребителя необходимо знать степень достоверности навигационных данных. Потребителями систем функциональных дополнений космического базирования также могут быть железнодорожные поезда, автобусы, специальные машины.

Поиск оптимального использования спутников ГНСС в функциональных дополнениях SBAS и GBAS

В силу существующего ограничения корректирующая информация SBAS в диапазоне L1 передается максимум для 51 спутника [1]. В перспективной двухчастотной многосистемной технологии DFMC SBAS также существует ограничение на максимальное число спутников, для которых будет передаваться корректирующая информация и информация о целостности: дифференциальные поправки будут передаваться для 92 спутников основных созвездий GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BDS. Аналогично GBAS передает поправки для 18 спутников [1], а общее число видимых может достигать 20–25.

В системах SBAS для передачи дифференциальных поправок для всех спутников ГЛОНАСС зарезервировано 24 слота. В настоящее время система GPS состоит из 32 спутников [2], поэтому в системе SBAS при приоритетном использовании спутников ГЛОНАСС остается возможность передавать корректирующую информацию только для 27 спутников GPS. В DFMC SBAS общее число спутников может достигать 110 (GPS — 32, ГЛОНАСС — 24, Galileo — 27 и BDS — 27), а ограничение на передачу дифференциальных поправок составляет 92 спутника, следовательно, необходимо будет осуществить выбор оптимальной подсистемы ГНСС из 92 спутников, входящих в систему из 110.

В статье рассматривается задача определения подсистемы ГНСС, представляющей собой неполный набор из 27 спутников, которые будут использоваться в навигационном сервисе ГЛОНАСС/GPS/SBAS. Выбор 27 из существующей группировки 32 спутников ГНСС необходимо осуществить таким образом, чтобы подсистема обеспечивала максимальную эффективность использования сигналов ГНСС. Следует отметить, что подобная оптимизационная задача является уникальной для систем, передающих поправки одновременно для нескольких ГНСС. Выбор оптимального состава спутников совершенно не зависит от технологии формирования дифференциальных поправок, поэтому предлагаемая методика — универсальна для применения в системах SBAS и GBAS.

В качестве критерия эффективности подсистемы предлагается использовать величину VDOP (ухудшение точности позиционирования по вертикали) для навигации на территории Российской Федерации по уровню доверительной вероятности $P = 0,95$ и осредненной по времени на 30-суточном интервале. При навигации авиационного потребителя ошибки по вертикали составляют основную проблему, поэтому и был выбран данный критерий. Алгоритм вычисления VDOP с доверительной вероятностью $P = 0,95$ базируется на следующей известной методике расчета доступности.

1. Сферическая Земля разбивается на элементы поверхности по параллелям φ_i (φ — широта от -90° до $+90^\circ$) и меридианам λ_j (λ — долгота от 0° до 360°).

2. В каждой из точек $\{\varphi_i, \lambda_j\}$ рассчитывается мгновенный геометрический фактор $VDOP_{\text{moment}}(\varphi_i, \lambda_j, t_m)$, где $t_m = t_1, \dots, t_M$, M — число 15-минутных интервалов на n сутках. Далее массив $VDOP_{\text{moment}}$ для каждой позиции сортируется по возрастанию и из него выбирается n_p значений с доверительной вероятностью $p = 0,95$.

3. Локальный геометрический фактор в точке $\{\varphi_i, \lambda_j\}$ равен:

$$VDOP_{\text{local}}(\varphi_i, \lambda_j) = \frac{1}{n_p} \sum_{n_p=1}^{n_p} VDOP_{\text{moment}}(\varphi_i, \lambda_j, t_{n_p}). \quad (1)$$

4. Далее рассчитывается глобальный геометрический фактор по поверхности Земли:

$$VDOP_{\text{global}} = \frac{\sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j VDOP_{\text{local}}(\varphi_i, \lambda_j) \Delta S_{ij}}{\sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j \Delta S_{ij}}, \quad (2)$$

где $\Delta S_{ij} = \frac{\cos(\varphi_i) + \cos(\varphi_i + h_\varphi)}{2} h_\varphi h_\lambda$ — элемент площади поверхности,

h_φ, h_λ — шаги по широте и долготе (5°).

Далее решается оптимизационная задача нахождения оптимального набора исключаемых спутников ГНСС по алгоритму Р. Беллмана [3, 4]. Его реализация заключается в том, что на каждом шаге путем перебора спутников исключается каждый из спутников, участвующих в вычислении VDOP с доверительной вероятностью $P = 0,95$ на территории РФ. Выбирается тот спутник, для которого значение VDOP при его исключении минимальное по отношению к другим исключаемым. Затем данный спутник исключается из обработки и процедура производится вновь, до тех пор, пока число исключенных спутников не будет равно 5.

Введем следующие обозначения:

$E(S)$ — критерий эффективности орбитальной группировки или подсистемы ГНСС;

F_N — множество из N спутников, представляющее полную орбитальную группировку системы GPS (F — full, полная);

D_K — множество из K спутников ГНСС, для которых не будет передаваться корректирующая информация SBAS (D — deleted, удаленные).

Нетрудно видеть, что математическая запись задачи выбора подсистемы S_{N-K} ГНСС, состоящей из $N-K$ спутников, для которых будет передаваться корректирующая информация SBAS, выглядит следующим образом:

$$S_{N-K} = \arg \max_{D_K} E(F_N \setminus D_K), \quad (3)$$

где «\» — операция вычитания множеств.

Иными словами, необходимо осуществить оптимальное исключение K спутников из существующей группировки из N спутников ГНСС. Если решать задачу (3) простым перебором всех возможных вариантов, то число вариантов без повторов

при условии, что число спутников системы GPS $N = 32$, а число исключаемых спутников $K = 5$, равно $C_{32}^5 = 201\,376$, а это означает, что надо перебрать свыше 200 тысяч вариантов. Для случая системы DFMC SBAS число возможных вариантов выбора 18 спутников из 110 составляет $C_{110}^{18} = 199\,439\,701\,243\,274\,033\,850$.

Для решения оптимизационной задачи по выбору исключаемых спутников ГНСС применяется метод динамического программирования, предложенный Р. Беллманом [3, 3], не требующий большого объема вычислений:

$$\max_{D_K} E(F_N \setminus D_K) = \max_{D_J} \dots \left[\max_{D_2} \left[\max_{D_1} \mathcal{E}(F_N \setminus D_J) \right] \right], \quad (4)$$

$$J = 1, \dots, K,$$

где $D_J = \{d_1, d_2, \dots, d_J\}$ — набор спутников GPS, для которых не будет передаваться корректирующая информация, на каждом шаге оптимизации.

Для нахождения оптимальной подсистемы ГНСС был разработан комплекс программ в среде Microsoft Visual Studio, использующий функции библиотеки RTKlib с открытым исходным кодом [5]. В качестве исходных данных отбираются файлы, опубликованные на сервере Национальной школы географических наук [6] и содержащие данные высокоточных эфемерид спутников GPS с дискретностью 15 мин за интервал 30 сут. Также отбраковываются измерения спутников с углом возвышения, меньшим 15° . В результате были найдены номера спутников GPS, составляющие оптимальный набор из 5 исключаемых спутников для 32-спутниковой группировки, при котором достигается минимальное значение $VDOP_{\min} = 2,01525$ с доверительной вероятностью $P = 0,95$ на территории Российской Федерации:

$$D_5^{\text{опт}} = \{14, 19, 21, 22, 23\}.$$

Помимо этого был использован обратный критерий максимального значения VDOP, при котором получен неоптимальный набор из 5 исключаемых спутников и соответствующее ему максимальное значение $VDOP_{\max} = 2,64649$:

$$D_5^{\text{неопт}} = \{2, 10, 18, 24, 32\}.$$

На рисунке представлено значение глобального усредненного VDOP на каждом шаге оптимизации методом Р. Беллмана для критериев минимального VDOP (нахождение оптимального набора исключаемых спутников ГНСС) и максимального VDOP (нахождение неоптимального набора спутников ГНСС).

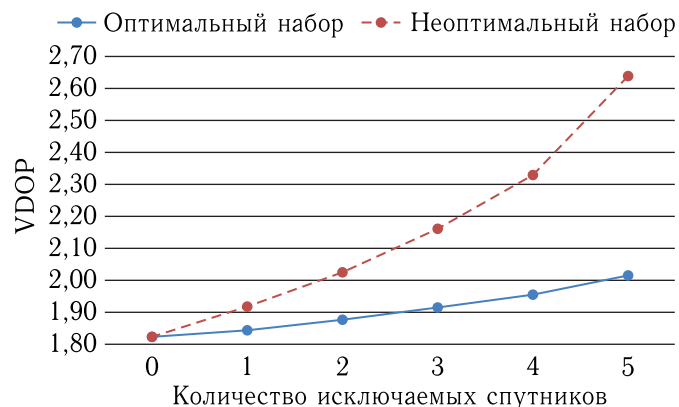


Рисунок. Значение глобального усредненного VDOP на каждом шаге оптимизации по методу Р. Беллмана для поиска оптимального и неоптимального набора исключаемых спутников ГНСС

Найденный оптимальный набор исключаемых спутников ГНСС позволяет снизить VDOP по сравнению с неоптимальным практически на 24% и тем самым повысить характеристики навигации с использованием сигналов ГЛОНАСС/GPS и корректирующих поправок SBAS. Оценка характеристик навигации при использовании найденной оптимальной маски будет проведена в рамках следующих исследований.

Заключение

Системы SBAS и GBAS предлагают эффективное и зарекомендовавшее себя решение для авиационных потребителей в части выполнения заходов на посадку, в том числе на необорудованные взлетно-посадочные полосы. Была разработана технология поиска оптимальной подсистемы ГНСС, которая заключается в решении оптимизационной задачи по Р. Беллману. Были найдены наилучшая и наихудшая подсистемы, приводящие к наименьшему и наибольшему ухудшению точности

позиционирования по вертикали соответственно. Использование наилучшей подсистемы позволяет повысить точность навигации по вертикали на 24 % по сравнению с наихудшим вариантом.

Список литературы

1. Международные стандарты и Рекомендуемая практика (SARPs). Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации «Авиационная электро-связь». Т. 1. Радионавигационные средства, ИКАО, изд. 7, июль 2018 г., включая поправку 91 к т. 1 Приложения 10.
2. Состав группировки КНС GPS // ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИмаш: [сайт]. <https://www.glonass-iac.ru/GPS/index.php> (Дата обращения 15.09.2021).
3. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. М.: Мир, 1967. 506 с.
4. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. М.: Наука, 1969. 118 с.
5. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, April 29, 2013. http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf
6. ENSG, l'école de la géomatique: [сайт]. Каталог FTP: <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products> (Дата обращения 15.09.2021).