

**КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ.
РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ**

УДК 629.78 EDN RMGMXV

**Повышение целостности ГНСС за счет совместного
использования СДКМ с другими системами SBAS**

Ю. В. Исаев, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Бабурин, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. А. Сербин, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. Г. Сернов, *к. т. н., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Системы широкозонных функциональных дополнений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), или SBAS-системы, позволяют повысить целостность ГНСС. Совместное одновременное использование поправок от различных систем SBAS позволяет еще больше повысить целостность ГНСС по сравнению с использованием только одной SBAS-системы подобно тому, как совместное использование нескольких ГНСС позволяет повысить точность.

В настоящей статье рассмотрен пример использования российской Системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) совместно с зарубежными системами SBAS: EGNOS, BDSBAS, KASS, MSAS.

Предлагается одновременно обрабатывать измерения, скорректированные различными SBAS-поправками в рамках одной системы линейных уравнений.

Обработка измерений реальных приемников, находящихся в области пересечения зон действия СДКМ с другими системами SBAS, показывает повышение целостности ГНСС по сравнению со случаем раздельного использования соответствующих систем.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, системы широкозонных функциональных дополнений, СДКМ, EGNOS, BDSBAS, KASS, MSAS, точность, целостность, местопределение, дифференциальные поправки

**GNSS Integrity Improvement Based on Sharing SDCM
with other SBAS systems**

Yu. V. Isaev, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. A. Baburin, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

D. A. Serbin, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

V. G. Sernov, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The wide area augmentation system (WAAS) for global navigation satellite systems (GNSS) or SBAS systems allow improving GNSS integrity. The simultaneous use of augmentations from different SBAS systems permits increasing positioning integrity even more in comparison with the use of only one SBAS system just as joint use of several GNSS allows increasing the accuracy.

This paper considers an example of using satellite-based augmentation system (SDCM) together with foreign SBAS systems: EGNOS, BDSBAS, KASS, and MSAS.

It is proposed to process measurements adjusted by various SBAS augmentations within the framework of one system of linear equations. The processing of measurements from real receivers located in the area of intersection of SDCM coverage zones with other SBAS systems shows an increase in the integrity of positioning compared to the case of separate use of the corresponding systems.

Keywords: global navigation satellite systems, wide area augmentation systems (WAAS), SDCM, EGNOS, BDSBAS, KASS, MSAS, accuracy, integrity, positioning, differential augmentations

Введение

Рассматривается задача повышения целостности ГНСС при местопределении навигационной аппаратуры потребителя (НАП) за счет совместного использования СДКМ с другими системами SBAS (от англ. Satellite Based Augmentation System).

SBAS — широкозонная система дифференциальной коррекции для российской навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и американской GPS, создавалась в первую очередь для обеспечения точности и целостности ГНСС при местопределении воздушного судна во время захода на посадку. К настоящему времени в мире существуют и продолжают развиваться следующие системы SBAS: WAAS, EGNOS, BDSBAS, MSAS, GAGAN, KAAS. Российской системой широкозонного функционального дополнения является система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ-КФД) [1].

SBAS представляет собой сеть наземных станций сбора измерений, которые осуществляют измерения по сигналам ГНСС и передают их в распределенный центр обработки данных (ЦОД). ЦОД вычисляет корректирующие поправки и передает их на геостационарные спутники. Спутники ретранслируют корректирующие поправки пользователям. Корректирующая информация включает в себя поправки к местоположению и показаниям часов спутника, вычисленным по широкоэваторным эфемеридам, информацию целостности, а также сетку вертикальных ионосферных задержек. Применение приемником пользователя поправок SBAS позволяет кардинально улучшить точность, целостность, непрерывность и доступность навигационного обслуживания по сигналам ГНСС. На рис. 1 приведены существующие и перспективные системы SBAS.

Одной из основных характеристик местопределения в режиме SBAS, помимо точности

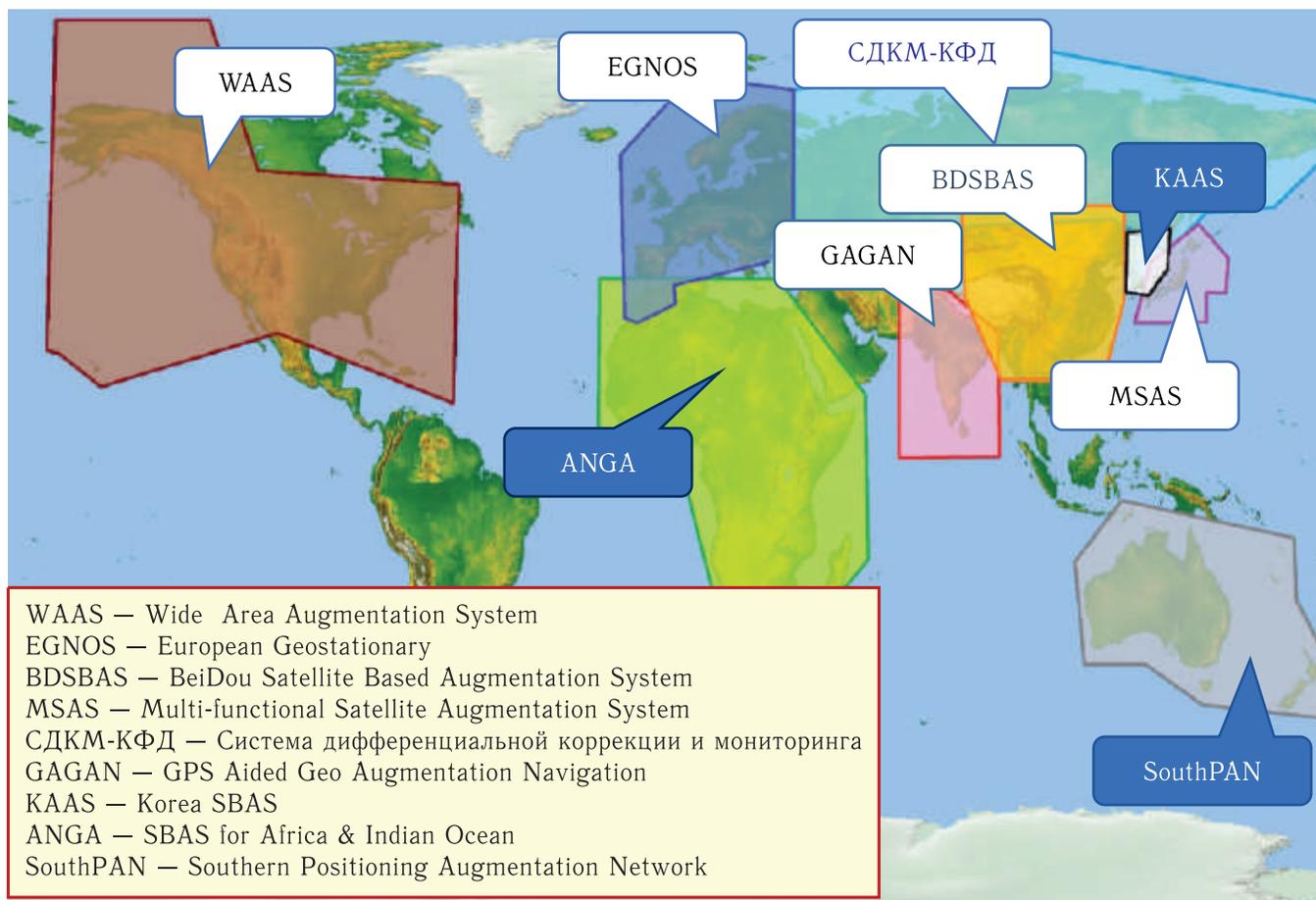


Рис. 1. Существующие и перспективные системы SBAS и зоны их действия

и непрерывности, является целостность ГНСС. Целостность — это способность системы выдавать предупреждения пользователю, когда система недоступна для конкретной операции. Системы SBAS предоставляют пользователям информацию о целостности для вычисления вертикального и горизонтального уровня защиты (horizontal protection level, HPL и vertical protection level, VPL), которые представляют собой верхнюю границу ошибки [2]. Если расчетное значение HPL или VPL превышает заданный порог, то целостность ГНСС недостаточна для поддержания данного навигационного определения. Пороговые значения HPL и VPL задаются в зависимости от категории захода на посадку воздушного судна [3].

В литературе описан опыт совместного использования СДКМ и EGNOS [4]. Авторы данной статьи независимо определяют местоположение потребителя по каждой системе SBAS, а далее усредняют полученные результаты. Недостатком такого подхода является необходимость вычисления независимых SBAS-решений по каждой системе SBAS, то есть требует наличия в обработке не менее четырех спутников для каждой системы. В связи с ограниченностью зон действия систем SBAS, как правило, их совместное использование возможно только на границах этих зон действия. В таких условиях не всегда возможно получить два независимых SBAS-решения из-за того, что на границах зон действия систем число доступных для обработки спутников может быть менее четырех. Кроме того, такой подход не учитывает взаимную ковариацию двух SBAS-решений (они полагаются независимыми). Фактически эти решения получены по одним и тем же измерениям, хотя и с применением различных SBAS-поправок. Учет этих измерений как независимых (пренебрежением ковариационными связями) может приводить к некорректной (оптимистичной) оценке уровней защиты HPL, VPL.

В настоящей статье предлагается более «глубокая» интеграция дифференциальных поправок от различных SBAS-систем. Предлагается использовать различные SBAS-поправки в одной системе уравнений подобно тому, как используются измерения различных ГНСС при их совместном использовании для повышения точности местоопределения. Как показывает опыт обработки реальных

измерений, такой подход позволяет повысить целостность ГНСС в режиме SBAS и не требует вычисления независимых SBAS-решений.

Так как дифференциальные поправки для ГЛОНАСС вычисляются только в СДКМ, рассмотрение в настоящей статье проводится на примере системы GPS. При этом следует отметить, что в СДКМ передаются поправки для всех спутников ГЛОНАСС, но не для всех спутников GPS. Это связано с ограничением по допустимому времени обновления информации в канале SBAS: в каждом потоке цифровой информации возможно передать информацию максимум по 51 спутнику. В СДКМ приоритет отдается спутникам ГЛОНАСС, поэтому поправки передаются для 24 спутников ГЛОНАСС и 27 спутников GPS [1]. Спутники GPS, для которых в СДКМ передаются SBAS-поправки, выбраны с учетом обеспечения оптимального геометрического фактора [5].

Алгоритм обработки измерений

Для измерений псевдодальности p^j (м) j -го спутника GPS в диапазоне L1 по сигналу C/A используется следующая математическая модель:

$$p^j = R^j + T_{\text{троп}}^j + I^j + dT + B - dt^j - b^j + \varepsilon^j, \quad (1)$$

где R^j — расстояние между фазовыми центрами антенны НАП в момент измерения и антенны j -го спутника в момент времени, предшествующий моменту измерения на время распространения сигнала, м;

$T_{\text{троп}}^j$ — тропосферная задержка сигнала, м;

I^j — ионосферная задержка сигнала, м;

dT — смещение показаний часов приемника относительно показаний часов системы, выраженное в метрах;

B — кодовая аппаратная задержка в приемнике, м;

dt^j — смещение показаний часов j -го спутника относительно показаний часов системы, выраженное в метрах;

b^j — кодовая аппаратная задержка на спутнике, м;

ε^j — случайная ошибка измерения, м.

В математической модели (1) в явном виде не указаны следующие систематические смещения

измерений: смещения и вариации фазовых центров антенн, приливные, гравитационные и релятивистские смещения. Эти смещения хорошо моделируются, и их необходимо учитывать при обработке.

Из результатов обработки сообщений SBAS для каждого спутника известны следующие величины [1]:

– I^j – ионосферная задержка сигнала, вычисленная по ионосферной карте и дисперсия ошибки ее определения $(\sigma_I^j)^2$;

– $\Delta \mathbf{r}_{3 \times 1}^j$ – трехмерный вектор SBAS-поправок к координатам j -го спутника, вычисляемым по широкоэваторным эфемеридам $\mathbf{r}_{3 \times 1}^{\text{BRDC},j}$. Таким образом, координаты j -го спутника, вычисленные с использованием SBAS-поправок $\mathbf{r}_{3 \times 1}^j$, определяются выражением

$$\mathbf{r}_{3 \times 1}^j = \mathbf{r}_{3 \times 1}^{\text{BRDC},j} + \Delta \mathbf{r}_{3 \times 1}^j; \quad (2)$$

– $\Delta t^j = dt^j + b^j + \Delta T_{\text{SBAS}}$ – смещение показаний спутниковых часов в сумме с аппаратурными задержками спутника и некоторым смещением, одинаковым для всех спутников, но различающимся для систем SBAS;

– $(\sigma_{\Delta r, \Delta t}^j)^2$ – дисперсия ошибки определения SBAS-поправок к показаниям часов и координатам j -го спутника.

Величину тропосферной задержки $T_{\text{троп}}^j$ и дисперсию ошибки ее определения $(\sigma_{\text{троп}}^j)^2$ можно рассчитать с помощью модели, приведенной в ИКД СДКМ [1] вне зависимости от SBAS-поправок.

После внесения в математическую модель измерения псевдодальности p^j (1) перечисленных поправок и линеаризации полученного выражения относительно некоторой грубой оценки положения НАП $\mathbf{r}_{c, 3 \times 1} = [x_c \ y_c \ z_c]^T$ получается следующее линеаризованное выражение для невязок измерений псевдодальности dp^j (м) j -го спутника GPS:

$$dp^j = \left(\mathbf{h}_{3 \times 1}^j \right)^T \Delta \mathbf{r}_{3 \times 1} + dT' + \varepsilon_{dp}^j, \quad (3)$$

где $dp^j = p^j - R_c^j - T_{\text{троп}}^j - I^j + \Delta t^j$ – невязка измерений псевдодальности, м;

– $R_c^j = \left| \mathbf{r}_{3 \times 1}^j - \mathbf{r}_{c, 3 \times 1} \right|$ – дальность до j -го спутника GPS из точки $\mathbf{r}_{c, 3 \times 1}$, м;

$$\mathbf{h}_{3 \times 1}^j = \left(\frac{x_c - x^j}{R_c^j} \quad \frac{y_c - y^j}{R_c^j} \quad \frac{z_c - z^j}{R_c^j} \right)^T \text{ – вектор}$$

направляющих косинусов единичного вектора, направленного из точки $\mathbf{r}_{c, 3 \times 1}$ в точку $\mathbf{r}_{3 \times 1}^j$;

– $\Delta \mathbf{r}_{3 \times 1} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$ – вектор поправок к грубым координатам НАП $\mathbf{r}_{c, 3 \times 1}$, м;

– $dT' = dT - B + \Delta T_{\text{SBAS}}$ – оцениваемое смещение показаний часов приемника, смещенное на величину кодовых аппаратурных задержек в приемнике B и величину общего смещения ΔT_{SBAS} SBAS-поправок к показаниям спутниковых часов Δt^j , м;

– ε_{dp}^j – случайная ошибка невязки измерений, м.

Если в зоне видимости НАП находится $J \geq 4$ спутников, решая систему из J уравнений (3) можно получить оценку $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$ поправок к грубым координатам потребителя и смещения показаний его часов dT' . Для повышения целостности такой оценки предлагается одновременно использовать SBAS-поправки от нескольких SBAS-систем. При этом, так как поправки к показаниям часов спутника Δt^j различаются для разных систем SBAS смещением ΔT_{SBAS} , разницу этих смещений между различными системами SBAS в таком случае необходимо оценивать при решении системы уравнений.

Рассмотрим одновременное использование двух систем SBAS, обозначенных 1 и 2. Величины, относящиеся к первой системе, будут далее иметь нижний индекс 1, а ко второй – нижний индекс 2. Так как список спутников, для которых по этим системам передается корректирующая информация, может в общем случае различаться, введем понятия числа спутников J_1, J_2 , для которых доступна информация по соответствующим системам SBAS 1 и 2. Для совместного использования двух систем SBAS система уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} dp_1^{j_1} = \left(\mathbf{h}_{3 \times 1}^{j_1} \right)^T \Delta \mathbf{r}_{3 \times 1} + dT' + \varepsilon_{dp1}^{j_1}, & j_1 = \overline{1, J_1}, \\ dp_2^{j_2} = \left(\mathbf{h}_{3 \times 1}^{j_2} \right)^T \Delta \mathbf{r}_{3 \times 1} + dT' + & j_2 = \overline{1, J_2}, \\ + (\Delta T_{\text{SBAS}2} - \Delta T_{\text{SBAS}1}) + \varepsilon_{dp2}^{j_2}, & \end{cases} \quad (4)$$

где используются те же обозначения, что и в (3), но с уточнением: нижние индексы 1 и 2 означают

принадлежность соответствующих величин к системам SBAS 1 и 2;

j_1, j_2 — номера спутников, для которых передаются поправки в системах SBAS 1 и 2.

Разность $(\Delta T_{\text{SBAS2}} - \Delta T_{\text{SBAS1}})$ включена в список оцениваемых переменных. Поправки к грубым координатам НАП $\Delta \mathbf{r}$ и смещение показаний часов НАП dT' являются общими для всех уравнений системы (4), благодаря чему повышается избыточность такой системы по сравнению со случаем использования поправок только от одной системы SBAS.

При совместном использовании корректирующей информации от нескольких SBAS-систем различные корректирующие поправки $I_1^{j_1}, \Delta \mathbf{r}_1^{j_1}, \Delta t_1^{j_1}$ и $I_2^{j_2}, \Delta \mathbf{r}_2^{j_2}, \Delta t_2^{j_2}$ вносятся в одни и те же исходные измерения p^j . Поэтому необходимо корректно учитывать ковариационную матрицу случайных ошибок объединенного вектора невязок системы (4). Для этого необходимо учесть статистическую зависимость между измерениями, скорректированными различными SBAS-поправками. Рассмотрим процесс коррекции измерений и получения выражения для ковариационной матрицы \mathbf{R}_{dp12}

вектора ошибок скорректированных измерений $[\varepsilon_{dp1}^1 \quad \varepsilon_{dp1}^{J_1} \quad \varepsilon_{dp2}^1 \quad \varepsilon_{dp2}^{J_2}]^T$.

Обозначим вектор исходных измерений С/А псевдодальности в диапазоне L1 как $\mathbf{p} = [p^1 \quad \dots \quad p^J]^T$, а ковариационную матрицу вектора $[\varepsilon^1 \quad \dots \quad \varepsilon^J]^T$ ошибок измерений как \mathbf{R}_p , где J — общее число видимых в НАП спутников GPS (таким образом, $J_1 \leq J, J_2 \leq J$).

Коррекция тропосферной задержки не зависит от информации SBAS, поэтому тропосферную поправку в измерения можно внести до внесения SBAS-поправок:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{\text{trop}} &= \mathbf{p} - \mathbf{T}_{\text{trop}}^j, \\ \mathbf{R}_{p,\text{trop}} &= \mathbf{R}_p + \mathbf{R}_{\text{trop}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \mathbf{p}_{trop} , $\mathbf{R}_{p,\text{trop}}$ — скорректированный на величину тропосферной задержки вектор измерений и ковариационная матрица его ошибок;

$\mathbf{T}_{\text{trop}}^j$, \mathbf{R}_{trop} — вектор тропосферных задержек, вычисленный по модели, и ковариационная матрица его ошибок.

Так как рассматривается совместное использование систем SBAS 1 и 2, в одни и те же измерения \mathbf{p}_{trop} (5) будут вноситься различные SBAS-поправки. Поэтому далее необходимо рассмотреть совместный (объединенный) вектор измерений $[\mathbf{p}_1^T \quad \mathbf{p}_2^T]^T$ и его ковариационную матрицу \mathbf{R}_{p12} , где \mathbf{p}_1 — вектор, состоящий из

тех элементов вектора \mathbf{p}_{trop} , для которых в НАП имеются SBAS-поправки от системы 1, а \mathbf{p}_2 —

вектор, состоящий из тех элементов вектора \mathbf{p}_{trop} , для которых в НАП имеются SBAS-поправки от системы 2. В частном случае векторы \mathbf{p}_1 и \mathbf{p}_2 могут совпадать, но в общем случае они имеют разный размер, хотя формируются на основе одного и того же вектора измерений \mathbf{p}_{trop} (5).

Найдем связь вектора $[\mathbf{p}_1^T \quad \mathbf{p}_2^T]^T$ и его ковариационной матрицы \mathbf{R}_{p12} с исходным вектором \mathbf{p}_{trop} и матрицей $\mathbf{R}_{p,\text{trop}}$ (5):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{(J_1+J_2) \times J} \mathbf{p}_{\text{trop}}, \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_{p12} = \mathbf{T}_{(J_1+J_2) \times J} \mathbf{R}_{p,\text{trop}} \mathbf{T}_{J \times (J_1+J_2)}^T,$$

где $\mathbf{T}_{(J_1+J_2) \times J}$ — матрица, полученная из матрицы

$\begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix}$ путем вычеркивания из ее верхнего и нижнего блоков строк, соответствующих спутникам,

для которых в 1 и 2 системе соответственно отсутствуют SBAS-поправки, а $\mathbf{E}_{J \times J}$ — единичная матрица.

Далее в каждый из подвекторов \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 вносятся соответствующие SBAS-поправки от систем 1 и 2. Получается общий вектор невязок измерений и ковариационная матрица его ошибок:

$$\begin{bmatrix} d\mathbf{p}_1 \\ d\mathbf{p}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 - \mathbf{R}_{c1} - \mathbf{I}_1 + \Delta\mathbf{t}_1 \\ \mathbf{p}_2 - \mathbf{R}_{c2} - \mathbf{I}_2 + \Delta\mathbf{t}_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{dp12} = \mathbf{R}_{p12} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 & \\ & \mathbf{D}_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\mathbf{R}_{c1} = \begin{bmatrix} |r_1^{j1} - r_c| & \dots & |r_1^{J1} - r_c| \\ 3 \times 1 & 3 \times 1 & 3 \times 1 \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{R}_{c2} = \begin{bmatrix} |r_2^{j2} - r_c| & \dots & |r_2^{J2} - r_c| \\ 3 \times 1 & 3 \times 1 & 3 \times 1 \end{bmatrix}^T$ — векторы дальностей до спутников от точки грубого приближения положения НАП r_c , вычисленные с использованием SBAS-поправок Δr_1^{j1} и Δr_2^{j2} от соответствующих систем SBAS 1 и 2;

\mathbf{I}_1 , \mathbf{I}_2 — векторы ионосферных поправок от соответствующих систем SBAS 1 и 2;

$\Delta\mathbf{t}_1$, $\Delta\mathbf{t}_2$ — векторы поправок к смещениям показаний спутниковых часов от соответствующих систем SBAS 1 и 2;

\mathbf{D}_1 , \mathbf{D}_2 — диагональные матрицы, у которых на главной диагонали стоят суммы соответствующих дисперсий $(\sigma_{\Delta r1, \Delta t1}^{j1})^2 + (\sigma_{I1}^{j1})^2$, $j_1 = \overline{1, J_1}$ и $(\sigma_{\Delta r2, \Delta t2}^{j2})^2 + (\sigma_{I2}^{j2})^2$, $j_2 = \overline{1, J_2}$.

Таким образом, с использованием введенных обозначений систему (4) можно переписать в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} d\mathbf{p}_1 \\ d\mathbf{p}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_2 & \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{dp1} \\ \varepsilon_{dp2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{r} & dT' & (\Delta T_{SBAS2} - \Delta T_{SBAS1}) \end{bmatrix}^T$.

Максимально правдоподобная оценка по обобщенному методу наименьших квадратов для системы (8) с учетом ковариационной матрицы \mathbf{R}_{dp12} (7) содержит более точные и целостные оценки координат НАП.

Повышение целостности ГНСС при совместном использовании нескольких SBAS-систем достигается за счет того, что:

- разные SBAS-поправки получены из независимых источников (каждая система имеет свою сеть станций и центр обработки);

- в системе СДКМ число спутников GPS, для которых вычисляются поправки, ограничено спутниковой маской, а использование других SBAS-систем позволяет увеличить число спутников GPS в обработке.

Результаты обработки реальных измерений

Число систем SBAS, которые можно использовать в приемнике одновременно, ограничено зоной действия соответствующих систем. В настоящей статье использовались системы SBAS СДКМ, EGNOS, BDSBAS, KASS, MSAS и суточные измерения за 09.07.2023 с частотой 1 секунда приемников, расположенных в Чите, Калининграде, Владивостоке и Южно-Курильске. Так как эти системы являются региональными, при этом самая большая область действия у системы СДКМ, рассматривается совместное использование СДКМ с каждой из перечисленных систем SBAS для приемника, расположенного в пересечении зон действия соответствующих систем. Так как SBAS-поправки для системы ГЛОНАСС передаются только в СДКМ, приведенные результаты относятся к обработке только измерений GPS.

На рис. 2 приведены так называемые «стенфордские диаграммы» [6]. По горизонтальной оси этой диаграммы откладываются ошибки местоположения, а по вертикальной — уровни защиты HPL или VPL. Цветом (вдоль воображаемой оси, направленной перпендикулярно плоскости рисунка вверх) показана относительная доля таких эпох среди всех обработанных эпох измерений,

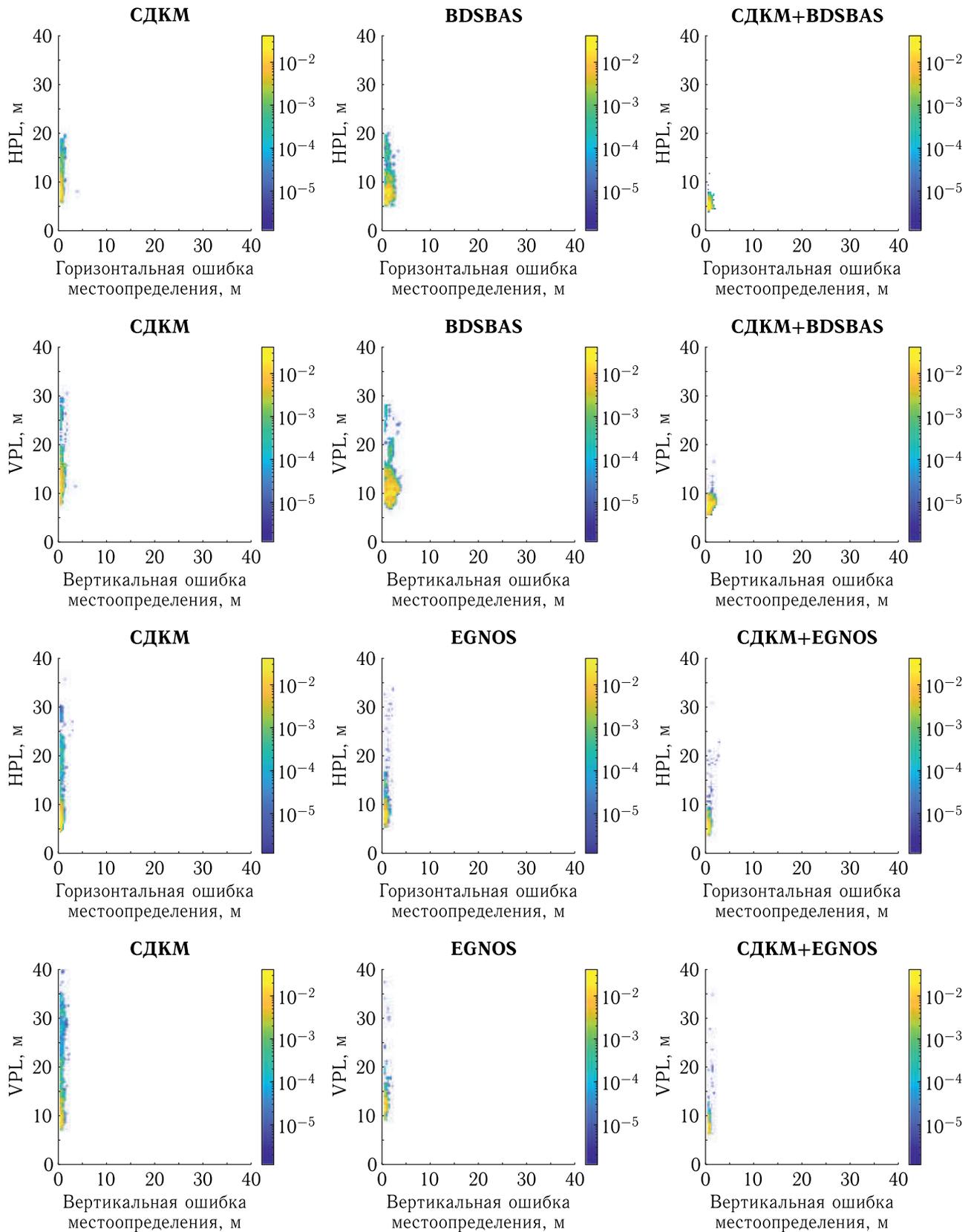


Рис. 2. Стэнфордские диаграммы для систем СДКМ, BDSBAS, EGNOS

когда ошибка местоопределения и уровень защиты были равны соответствующим значениям по осям абсцисс и ординат. По таким диаграммам можно визуально оценить прирост целостности ГНСС за счет совместного использования СДКМ с различными системами SBAS (для удобства сравнения все графики представлены в одинаковом масштабе).

Как видно из рис. 2 при совместном использовании SBAS существенно уменьшает значения параметров HPL и VPL т.е. повышается целостность ГНСС.

Для количественной оценки целостности предлагается использовать отношение числа эпох $N_{HPL<HAL,VPL<VAL}$, при которых уровни защиты HPL и VPL не превышали некоторого заданного

значения HAL и VAL, к общему числу обработанных эпох N_{Σ} :

$$\frac{N_{HPL<HAL,VPL<VAL}}{N_{\Sigma}} \leq 1. \tag{9}$$

Предлагается использовать несколько вариантов пороговых значений уровней защиты HAL и VAL, соответствующих различным категориям захода на посадку, они представлены в табл. 1.

В табл. 2 для каждого варианта решения задачи местоопределения представлены характеристики целостности (9). Столбцы, обозначенные APV-I, LPV-200, APV-II и Cat. 1, соответствуют определенной в табл. 1 комбинации пороговых значений HAL и VAL.

Таблица 1. Пороговые значения HAL и VAL для различных категорий захода на посадку

Категория захода на посадку	HAL, м	VAL, м
APV-I	40	50
LPV-200	40	35
APV-II	40	20
Cat. 1	40	15

Таблица 2. Целостность ГНСС при совместном и раздельном использовании СДКМ с различными системами SBAS. В решении использовались только измерения GPS

Расположение НАП	Система SBAS	APV-I	LPV-200	APV-II	Cat. 1
Чита	СДКМ	1,00000000	0,99998841	0,99078699	0,89071861
	BDSBAS	1,00000000	1,00000000	0,99271071	0,97378637
	СДКМ+BDSBAS	1,00000000	1,00000000	1,00000000	0,99998841
Калининград	СДКМ	0,99938313	0,99853778	0,96381000	0,92674039
	EGNOS	0,99996546	0,99990789	0,99879110	0,94950263
	СДКМ+EGNOS	0,99998837	0,99998837	0,99983717	0,99825537
Владивосток	СДКМ	0,99998830	0,99597651	0,87813750	0,70608669
	KASS	0,92045335	0,76685732	0,00128659	0,00000000
	СДКМ+KASS	1,00000000	1,00000000	0,99604669	0,83996117
Южно-Курильск	СДКМ	0,99461126	0,98713655	0,80671217	0,55784497
	MSAS	0,86199024	0,37597200	0,00000000	0,00000000
	СДКМ+MSAS	1,00000000	0,99997682	0,94314889	0,72385776

Как видно из табл. 2, совместное решение SBAS позволяет значительно повысить целостность ГНСС. Так как в СДКМ из-за ограничения формата SBAS используются только 27 спутников GPS из 32, то в ряде случаев целостность ГНСС, вычисленная только по данным СДКМ, незначительно уступает ряду систем.

На рис. 3 приведены суточные графики ошибки местоопределения в плане для приемника, расположенного в г. Чите, при раздельном и совместном использовании СДКМ и BDSBAS (для удобства сравнения все графики представлены в одном масштабе).

На рис. 3 наглядно продемонстрировано, что совместное использование СДКМ и BDSBAS

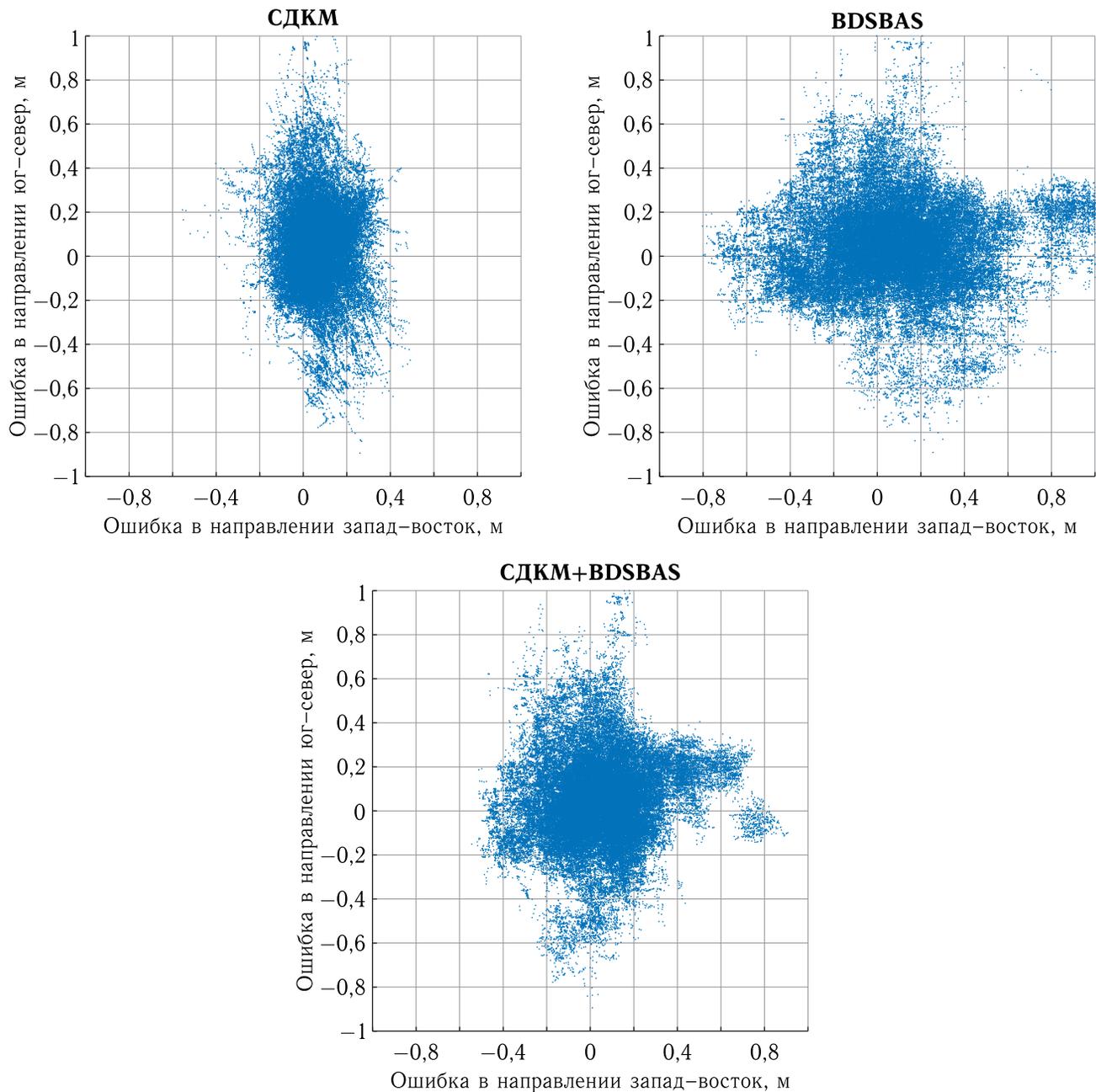


Рис. 3. График типа «мишень» ошибки местоопределения в плане при раздельном и совместном использовании СДКМ и BDSBAS (НАП в г. Чите). В решении использовались только измерения GPS

Таблица 3. Точность местоопределения при совместном и раздельном использовании СДКМ с различными системами SBAS. Решение навигационной задачи осуществлялось только по спутникам GPS

Расположение НАП	Система SBAS	МО			СКО		
		Е, м	N, м	U, м	Е, м	N, м	U, м
Чита	СДКМ	0,068	0,048	-0,189	0,104	0,200	0,373
	BDSBAS	0,090	-0,652	1,041	0,312	0,571	0,870
	СДКМ+BDSBAS	0,046	-0,249	0,360	0,196	0,336	0,510
Калининград	СДКМ	0,051	0,144	-0,022	0,159	0,181	0,333
	EGNOS	-0,028	0,066	-0,439	0,257	0,316	0,490
	СДКМ+EGNOS	0,002	0,103	-0,200	0,190	0,208	0,320
Владивосток	СДКМ	0,180	-0,017	0,058	0,196	0,307	0,484
	KASS	-0,206	-0,395	0,722	0,424	0,606	1,345
	СДКМ+KASS	0,105	-0,080	0,126	0,181	0,257	0,524
Южно-Курильск	СДКМ	-0,025	-0,099	0,265	0,188	0,310	0,503
	MSAS	-0,203	-0,122	-0,457	0,435	0,494	1,127
	СДКМ+MSAS	-0,058	-0,149	0,103	0,183	0,269	0,516

в навигационном решении позволяет значительно повысить точность местоопределения по сравнению с использованием только системы BDSBAS. Точность местоопределения СДКМ в г. Чите выше, что, вероятнее всего, обусловлено отсутствием на территории РФ станций BDSBAS.

В табл. 3 приведены характеристики точности местоопределения при раздельном и совместном использовании различных систем SBAS. Приведены математические ожидания (МО) и среднеквадратические отклонения (СКО) для ошибок местоопределения в направлениях запад-восток (Е), юг-север (N) и вертикальная ошибка (U).

Из табл. 3 видно, что использование СДКМ в совместном решении SBAS позволяет увеличить точность местоопределения таких систем, как BDSBAS, EGNOS, KASS и MSAS на территории РФ. При корректных значениях дисперсий передающихся поправок зарубежных сервисов совместное решение SBAS должно давать точность не хуже или выше, чем при использовании только СДКМ.

На рис. 4 приведен график зависимости от времени оцениваемого параметра $\Delta T_{\text{BDSBAS}} - \Delta T_{\text{СДКМ}}$

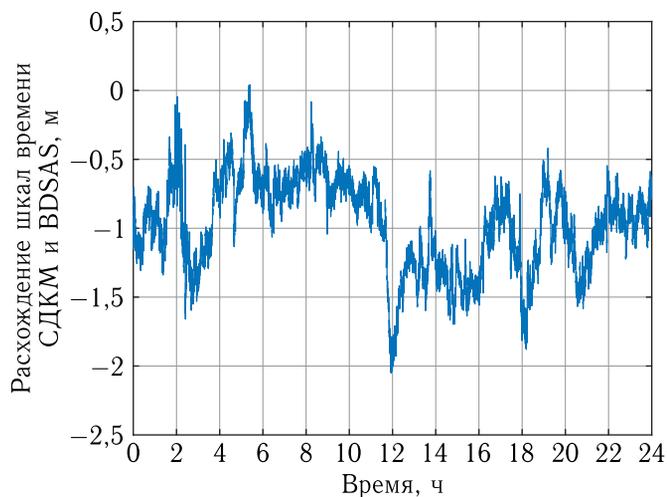


Рис. 4. График зависимости от времени оцениваемого параметра $\Delta T_{\text{BDSBAS}} - \Delta T_{\text{СДКМ}}$ расхождения шкал времени СДКМ и BDSBAS

расхождения шкал времени СДКМ и BDSBAS, продемонстрировано, что расхождения шкал времени СДКМ и BDSBAS на суточном интервале в среднем составляет 1,2 м или 4 нс, и это значение необходимо учитывать при решении навигационной задачи.

Заключение

Продemonстрировано совместное использование СДКМ с различными SBAS-системами. Предложенный способ не требует вычисления независимых SBAS-решений от используемых систем SBAS, что позволяет получить совместное решение при меньшем количестве доступных навигационных спутников.

Показано, что совместное использование систем SBAS позволяет повысить целостность ГНСС. Приведены результаты, демонстрирующие, что использование СДКМ в совместном решении SBAS увеличивает точность местоопределения таких систем, как BDSBAS, EGNOS, KASS и MSAS на территории РФ.

Дальнейшее увеличение целостности ГНСС возможно за счет совместного использования SBAS-поправок для системы GPS от разных систем SBAS и поправок для системы ГЛОНАСС от СДКМ.

Список литературы

1. Система дифференциальной коррекции и мониторинга. Интерфейсный контрольный документ / Редакция 2.0. Москва, 2020.
2. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment — Document NO. RTCA/DO-229D, Washington, September 2006.
3. SARPS Amendment 77, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Aeronautical Telecommunications: International Standards and Recommended Practices, Volume 1, Radio Navigation Aids, November 2002.
4. *Krasuski K., Wierzbicki D., Bakuta M.* Improvement of UAV Positioning Performance Based on EGNOS+SDCM Solution // Remote Sens. 2021, 13.
5. *Куришин В.В., Филимонова Д.В.* Оптимальное использование космических аппаратов ГНСС в функциональных дополнениях SBAS и GBAS // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2021, т. 8, вып. 4. С. 31–35.
6. Navipedia. [Электронный ресурс] The Stanford ESA Integrity Diagram: Focusing on SBAS Integrity. http://www.navipedia.net/index.php?title=The_Stanford_%E2%80%93%93_ESA_Integrity_Diagram:_Focusing_on_SBAS_Integrity&oldid=13148. (Дата обращения 07.11.2023).

Дата поступления рукописи
в редакцию 16.09.2023
Дата принятия рукописи
в печать 09.11.2023