

ФАНЬ ЛИХУН, ТУ ЖУЙ, ЧЖАН ЖУЙ, ХАНЬ ЦЗЮНЬЦЯН, ЧЖАН ПЭНФЭЙ, ВАН СЫЯО,
ХУН ЦЗЮЙ, ЧЖАН ШИСЮАНЬ, ЛУ СЯОЧУНЬ

АНАЛИЗ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ДОСТУПНОСТИ РАСШИРЕННОГО КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ BDS-2 И BDS-3 ПРИ ЗАХОДЕ НА ПОСАДКУ ПО LPV-200

Благодаря увеличению количества навигационных спутниковых систем и расширению номенклатуры их сигналов с помощью аппаратуры спутниковой навигации стало возможным выполнять заход на посадку в условиях отсутствия визуального контакта с Землей до высоты принятия решения 200 футов (61 м), т.е. в соответствии с процедурой LPV-200. Необходимый для этого уровень надежности навигационных решений обеспечивает алгоритм расширенного автономного контроля целостности спутниковых данных – Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring (ARAIM). В статье рассматривается ARAIM для двухчастотных безыоносферных комбинаций псевдодальностей BeiDou второго и третьего поколений (BDS-2 и BDS-3). Для расчета уровня безопасности по высоте (vertical protection level – VPL) в ARAIM использовалось гипотетическое сообщение для поддержки контроля целостности (integrity support message – ISM). Выполнена оценка влияния различных параметров ISM на доступность ARAIM в зависимости от места расположения потребителя. Результаты показывают, что географическая доступность ARAIM для BDS-2+BDS-3 несколько выше по сравнению с одной BDS-3 главным образом благодаря большему числу видимых спутников. Доступность системы BeiDou в Северной и Южной Америке зависит от точности измерения дальности от спутника до потребителя (user range accuracy – URA). При сокращении URA с 2,0 до 0,5 м доступность ARAIM для BDS-2+BDS-3 в Северной и Южной Америке увеличивается с 50 до 99,9%.

Ключевые слова: ARAIM, VPL, BDS-2, BDS-3, LPV-200, доступность.

Фань Лихун. Национальный центр службы времени, Китайская академия наук (Сиань, КНР); Главная лаборатория точной навигации и хронометража, Китайская академия наук (Сиань, КНР).

Ту Жуй. Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Главная лаборатория точной навигации и хронометража, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук (Пекин, КНР).

Чжан Жуй. Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Главная лаборатория точной навигации и хронометража, Китайская академия наук.

Хань Цзюньцян. Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Главная лаборатория точной навигации и хронометража, Китайская академия наук.

Чжан Пэнфэй. Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Главная лаборатория точной навигации и хронометража, Китайская академия наук.

Ван Сыяо. Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Главная лаборатория точной навигации и хронометража, Китайская академия наук.

Хун Цзюй. Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Главная лаборатория точной навигации и хронометража, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук.

Чжан Шисюань. Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Главная лаборатория точной навигации и хронометража, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук.

Лу Сяочунь. Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Главная лаборатория точной навигации и хронометража, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук.

Научный редактор перевода д.т.н. Д.А. Кошаев.

1. Введение

Безопасность жизни пользователей во время полетов летательных аппаратов напрямую зависит от целостности навигационных данных, поэтому навигационная система должна иметь возможность выдавать пользователям своевременные сигналы тревоги [1]. Если требования к целостности системы выполнить невозможно, безопасность системных сервисов будет снижена. Для обнаружения и идентификации нарушений в спутниковых данных используется алгоритм автономного контроля целостности измерений приемника (autonomous integrity monitoring algorithm – RAIM) [2, 3]. RAIM отличается простотой реализации и может обеспечивать контроль целостности в режиме реального времени без помощи внешних устройств. Этот весьма популярный алгоритм особенно подходит для районов, которые не обслуживаются вспомогательными системами. Вместе с тем RAIM можно применять только для горизонтального позиционирования на дальнемагистральных рейсах при неточном заходе на посадку (non-precision approach – NPA). На более ответственных этапах захода на посадку используются спутниковые системы дифференциальной коррекции и мониторинга (satellite-based augmentation systems – SBAS) или их наземные аналоги (ground-based augmentation systems – GBAS) [4].

С модернизацией GPS и ГЛОНАСС и созданием новых глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) BeiDou и Galileo многорежимные и многочастотные ресурсы были значительно расширены. Предполагалось, что спутниковые системы будут применяться в качестве основного способа навигации для заходов на посадку, требующих высокой точности, поэтому расширенные алгоритмы RAIM (ARAIM) стали предметом интенсивных исследований для развития пользовательских технологий контроля [5]. Алгоритм ARAIM должен был обеспечивать точное вертикальное позиционирование в любой географической точке с использованием двухчастотных измерений псевдодалности, поступающих от нескольких спутниковых систем. Тем не менее для выявления сложных отказов необходимы более строгие требования к рабочим характеристикам спутниковой навигационной системы.

Соответствующие концепции ARAIM-алгоритмов обсуждались в многочисленных исследованиях. Так, в «Исследовании эволюции структуры ГНСС» (GNSS Evolutionary Architecture Study – GEAS) были изучены прогнозируемые возможности глобальной поддержки LPV-200 системами GPS и Galileo с 2020 по 2025 г. и получен соответствующий пользовательский алгоритм [1]. В работе [4] рассматривались методы обнаружения нарушений в данных от одного или нескольких спутников или спутников целой системы. Авторы [6, 7] проанализировали эффективность ARAIM-алгоритмов для сочетания GPS и ГЛОНАСС. В работах [4, 8] были подробно изучены вспомогательные переменные в ARAIM-алгоритмах, уровни безопасности и процесс обнаружения и исключения неисправностей (fault detection and exclusion – FDE). Авторы [9, 10] проанализировали характеристики целостности системы GPS/Galileo при различных параметрах ARAIM-алгоритма и разработали соответствующий FDE-модуль.

В [11] исследовался принцип действия ARAIM-алгоритмов с учетом сдвигов шкал времени для разных спутниковых систем, что привело к созданию в [12] нового способа оптимизации VPL. В [13–16] анализировалась работа ARAIM-алгоритма для комбинации многорежимных и многочастотных ГНСС с использованием измерений в реальном времени (в двухчастотном и трехчастотном режимах), а также рассмотрены соответствующая модель погрешностей, режим отказа и параметры априорной ве-

роятности отказа спутника. Стремясь решить проблему чрезмерного количества типов нарушений в ARAIM, авторы [17] предложили метод оптимизации возможных вариантов по плоскостям орбит спутников и подтвердили осуществимость этого метода путем моделирования. Кроме того, в [18] был предложен метод группировки нарушений для сокращения вычислительных затрат в ARAIM.

Навигационная спутниковая система BeiDou (BDS) была разработана силами КНР. Она прошла несколько стадий развития – от экспериментальной системы (BDS-1) до региональной (BDS-2) и, наконец, до глобальной навигационной системы (BDS-3) [19]. В настоящее время BDS-3 полностью развернута и обслуживает пользователей по всему миру. Группировка спутников в BDS-3 включает 3 геостационарных (GEO), 3 геосинхронных (IGSO) и 24 среднеорбитных (MEO) спутников [20]. Коллектив авторов [21–23] выполнил моделирование и анализ вклада BeiDou в глобальное координатно-временное обеспечение пользователей с учетом количества видимых спутников и эффективности их использования при определении координат, а также оценил перспективы глобальной системы BeiDou по качеству сигналов экспериментальной системы BDS-3.

Исследование алгоритмов ARAIM для систем BDS было сосредоточено на изучении влияния параметров гипотетического сообщения ISM для моделирования доступности ARAIM при работе с BeiDou [24, 25]. В работах [13, 14] была рассмотрена возможность применения трехчастотного ARAIM-алгоритма для региональной группировки спутников BDS; при этом частота отказов спутников BeiDou была вычислена путем консервативного оценивания, а доступность ARAIM оценивалась для системы BDS совместно с GPS/ГЛОНАСС. Вариант отказа всей группировки спутников в данном исследовании не рассматривался. В [26] был выполнен анализ влияния различных параметров ISM на доступность ARAIM и дана оценка доступности ARAIM для группировки спутников BDS в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Авторы исследования [19] изучили проблему определения и прогнозирования орбит спутников системы BDS-3. В работе [27] предложен оптимизированный алгоритм выбора спутников для ARAIM в нескольких спутниковых системах, а в [28] изучены стратегии распределения рисков целостности и непрерывности в ARAIM с помощью алгоритма оптимизации на основе роя частиц.

Система BDS-2 обслуживает Азиатско-Тихоокеанский регион, а система BDS-3 способна работать на глобальном уровне. Вопрос соответствия BDS-3 современным требованиям глобальной навигации при заходах на посадку по LPV-200 требует дальнейшего изучения. В настоящей статье исследуется доступность ARAIM для BDS-3 и BDS-2+BDS-3 на примере существующей группировки спутников этих систем. Рассматривается ARAIM для безыоносферных комбинаций, сформированных по псевдодальностям на двух частотах. Проанализирована зависимость доступности ARAIM от различных параметров ISM.

2. Конкретизация ARAIM

ARAIM, как правило, реализуется путем сравнения навигационного решения, полученного с использованием всех доступных спутников, с решениями по сокращенному созвездию спутников, которые предполагают реализацию гипотезы об аномальных данных от тех или иных спутников (Multiple Hypothesis Solutions Separation – MHSS). В отличие от алгоритма RAIM, который может обеспечивать только горизонтальное наведение во время неточного захода на посадку, ARAIM нацелен на обеспечение

вертикального и горизонтального наведения на этапе захода на посадку по процедуре LPV-200 в любой точке мира. Таким образом, важно определить возможные режимы отказа и распределение рисков [29].

2.1. Типы потенциальных угроз

Типы нарушений, учитываемые в ARAIM-алгоритмах, можно грубо разделить на четыре категории: номинальное, одиночное, множественное и глобальное [30]. К номинальному нарушению относятся ситуации, когда пользователь подвержен влиянию погрешности измерений, но не настолько, чтобы при этом вырабатывалась опасно искаженная информация (hazardous misleading information – HMI). Одиночное нарушение предполагает разовое нарушение в данных от одного спутника или несколько нарушений, возникших независимо друг от друга [5]. Как правило, $P_{sat,j}$ в сообщении ISM отражает вероятность такого типа нарушения. Множественное нарушение затрагивает несколько спутников одновременно в пределах одной системы, а глобальное – спутники разных систем. В случае применения одной системы или комбинации двух систем приемнику пользователя сложно отслеживать и идентифицировать глобальное нарушение. Вместе с тем априорная вероятность такого нарушения низка, и ею можно пренебречь, а связанное с этим распределение рисков целостности – не учитывать.

Сообщение ISM содержит следующую информацию, которую можно использовать в ARAIM:

- априорную вероятность нарушения в одном спутнике (P_{sat});
- априорную вероятность нарушения в нескольких спутниках системы (P_{const});
- точность определения расстояния от спутника до потребителя / точность измерения расстояния, зависящая от условий распространения сигнала (user ranging accuracy / signal in space accuracy – URA/SISA);
- погрешность определения расстояния от спутника до потребителя / погрешность измерения расстояния, зависящая от условий распространения сигнала (user ranging error / signal in space error – URE/SISE);
- номинальное отклонение псевдодальности (b_{nom});
- максимальное отклонение, используемое для контроля целостности (b_{max}).

При этом первые две априорные вероятности нарушений обычно определяются путем долгосрочного мониторинга эффективности конкретной системы. Так, согласно техническим нормативам для GPS [13], количество нарушений в спутниках этой системы не должно превышать трех в год. Таким образом, вероятность возникновения нарушений в одном спутнике в течение одного часа обычно устанавливается равной $P_{sat} = 10^{-5} (\approx 3/[365 \cdot 24 \cdot 31])$ [4]. Для спутников BDS в большинстве исследований используются консервативные оценки порядка 10^{-4} [13, 16]. Вероятность нарушений в системе P_{const} не рассматривалась, поскольку множественные нарушения в расчет не принимались. Параметр URA/SISA является основой для определения порога целостности и применяется главным образом при расчете матрицы ковариаций W_{URA} в модели погрешности определения псевдодальности для контроля целостности и расчета VPL. Параметр URE/SISE представляет собой проекцию погрешности знания эфемерид и проекцию погрешности шкалы времени спутника на псевдодальность; с его помощью оцениваются точность и непрерывность. Как правило, значение URE/SISE устанавливается равным половине или двум третям от значения URA/SISA [31].

2.2. Опасные искажения информации в процедуре LPV-200

В гражданской авиации и других отраслях, связанных с обеспечением безопасности жизни, ГНСС должны иметь функцию быстрого мониторинга нарушений [1]. В настоящее время точность определения местоположения и целостность, как правило, обеспечиваются с помощью систем дифференциальной коррекции и мониторинга SBAS или GBAS [5]. Нормативные технические требования, предъявляемые Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) к навигационному обеспечению полетов, различаются в зависимости от стадии полета [26]. Процедура LPV-200 предусматривает вертикальное наведение при заходе на посадку с высотой принятия решения 200 футов (около 61 м) [1, 31]. Соответственно, при заходе по LPV-200 ARAIM должен обеспечивать выполнение следующих требований:

- к уровням безопасности по высоте (vertical protection level – VPL) и по горизонтальным координатам (horizontal protection level – HPL) – в зависимости от соответствующих уровней тревоги по вертикали (vertical alert level – VAL) и по горизонтали (horizontal alert level – HAL): $VPL < VAL = 35$ м и $HPL < HAL = 40$ м;
- к погрешности выработки высоты (vertical positioning error – VPE): $P\{VPE < 4 \text{ м}\} \geq 95\%$ и $P\{VPE \geq 10 \text{ м} \mid \text{нет нарушений}\} < 10^{-7}$;
- к эффективному порогу контроля (effective monitoring threshold – EMT): $EMT < 15$ м;
- к вероятностям ложной тревоги (P_{fa}) и опасного искажения информации (probability of hazardous misleading information – PHMI): $P_{fa} < 4 \times 10^{-6}$ в течение интервала 15 с, $Pr\{HMI\} < 2 \times 10^{-7}$ для одного захода на посадку.

В целом алгоритм ARAIM сосредоточен на обеспечении целостности в вертикальном направлении, к которому предъявляются более строгие требования, чем к горизонтальной плоскости. Поэтому для вертикального направления обычно выбирают стандартные значения $VPL < VAL = 35$ м и $PHMI < 1 \times 10^{-7}$ / заход.

Для захода на посадку по LPV-200 требуемая PHMI определяется тремя сценариями: нет нарушений, нарушение в одном спутнике и нарушения в нескольких спутниках [1], как показано на рис. 1.



Рис. 1. Формирование требований к вероятностям опасного искажения информации $Pr\{HMI\}$ в LPV-200

2.3. Расчет VPL в ARAIM

Линеаризованное уравнение невязок двухчастотных безионосферных комбинаций псевдодальностей для N спутников BeiDou имеет вид

$$y = Gx + \varepsilon, \quad (1)$$

где y – N -мерный вектор невязок, т.е. разница между измеренными и расчетными значениями псевдодальностей; G – матрица коэффициентов с n -й строкой вида $G_n = [-\cos\theta_n \sin\alpha_n \ -\cos\theta_n \cos\alpha_n \ -\sin\theta_n \ 1]$; θ_n , α_n – угол восхождения и азимут спутника; x – вектор оцениваемых параметров – трех координат и смещения шкалы времени приемника относительно системного времени; ε – вектор погрешности. Диагональная матрица весов для (1) обозначается как W_{URA} . Вычисление n -го диагонального элемента W_{URA} выполняется по формуле

$$W_{URA,n} = \frac{1}{URA_n^2 + \sigma_{n,user}^2 + \sigma_{n,tropo}^2},$$

где $\sigma_{n,user}^2$ – дисперсия погрешности, вызванной эффектом многолучевости и шумом приемника пользователя, которая рассчитывается по формуле

$$\sigma_{n,user} = \sqrt{\frac{f_1^4 + f_2^4}{(f_1^2 - f_2^2)^2}} \cdot \sqrt{\sigma_{noise}^2 + \sigma_{mp}^2},$$

где f_1 , f_2 – частоты несущих, $\sigma_{mp} = 0,13 + 0,53 \cdot \exp(-\theta_n / 10[\text{град}])$ и $\sigma_{noise} = 0,15 + 0,43 \cdot \exp(-\theta_n / 6,9[\text{град}])$, $\sigma_{n,tropo}^2$ – дисперсия остаточной погрешности компенсации тропосферной задержки с помощью тропосферной модели EGNOS

$$\sigma_{n,tropo}^2 = 0,12 \cdot \frac{1,001}{\sqrt{0,002001 + (\sin(\theta_n \cdot \pi / 180))^2}} \quad [32],$$

где θ_n – угол возвышения спутника в градусах, а все σ выражены в метрах.

В номинальном (без нарушений) случае решение уравнения (1) взвешенным методом наименьших квадратов определяется как [1]

$$\hat{x}^{(0)} = (G^T W_{URA} G)^{-1} G^T W_{URA} y = S_0 y. \quad (2)$$

В случае нарушения в n -м спутнике решение имеет вид

$$\hat{x}^{(n)} = (G^T M_n W_{URA} G)^{-1} G^T M_n W_{URA} y = S_n y, \quad (3)$$

где M_n – матрица, образованная из единичной $N \times N$ матрицы, в которой n -й диагональный элемент заменен нулем.

Тестовая статистика d_n для проверки нарушения в n -м спутнике представляет собой

$$d_n = \left| \hat{x}^{(n)} - \hat{x}^{(0)} \right|. \quad (4)$$

Порог обнаружения Dn этого нарушения вычисляется по формулам:

$$\Delta S_n = S_n - S_0, \quad (5)$$

$$D_n = K_{ffd,n} \times \sigma_{dV,n} + \sum_{i=1}^N \left| \Delta S_n(3,i) \right| \times b_{nom}. \quad (6)$$

В уравнении (6) $K_{ffd,n}$ соответствует требованиям непрерывности для всех $n = 1, 2, \dots, N$, а $\sigma_{dV,n}$ представляет собой однократное среднеквадратическое отклонение по вертикали:

$$K_{ffd,n} = -Q^{-1}\left(\frac{P_{fa}}{2 \times N}\right), \quad (7)$$

$$\sigma_{dV,n} = \sqrt{dP_n(3,3)}, \quad (8)$$

где Q^{-1} – функция, обратная интегралу вероятности Гаусса; P_{fa} – заданная вероятность ложной тревоги с установленным значением 4×10^{-6} ; $dP_n = \Delta S_n W_{URE}^{-1} \Delta S_n^T$.

Следует учесть, что S_n и S_0 получены с помощью одной и той же диагональной матрицы весов W_{URE} , n -й диагональный элемент которой $W_{URE,n}$ определяется аналогично $W_{URA,n}$:

$$W_{URE,n} = \frac{1}{URE_n^2 + \sigma_{n,user}^2 + \sigma_{n,tropo}^2}.$$

Значения VPL в предположении об отсутствии нарушений (VPL_0) и при нарушении в n -м спутнике (VPL_n) рассчитываются по следующим формулам:

$$VPL_0 = K_{md,0} \times \sigma_{V,0} + \sum_{i=1}^N |S_0(3,i)| \times b_{\max}, \quad (9)$$

$$\sigma_{V,0} = \sqrt{P_0(3,3)}, \quad (10)$$

$$P_0 = (G^T W_{URA} G)^{-1}, \quad (11)$$

$$VPL_n = D_n + K_{md,n} \times \sigma_{V,n} + \sum_{i=1}^N |S_n(3,i)| \times b_{\max}. \quad (12)$$

Чтобы выполнялось требование целостности, $K_{md,n}$ и $K_{md,0}$ в VPL_n , VPL_0 определяются как

$$\sigma_{V,n} = \sqrt{P_n(3,3)}, \quad (13)$$

$$P_n = (G^T M_n W_{URA} G)^{-1}, \quad (14)$$

$$K_{md,0} = -Q^{-1}\left(\frac{\Pr\{HMI\}}{2 \times (N+1)}\right), \quad (15)$$

$$K_{md,n} = -Q^{-1}\left(\frac{\Pr\{HMI\}}{P_{sat} \times (N+1)}\right). \quad (16)$$

Вероятность $\Pr\{HMI\}$ для высоты при заходе на посадку принимается равной 1×10^{-7} на один заход, что соответствует одиночному нарушению в (16) и отсутствию нарушений в (15) с вероятностью $8,7 \times 10^{-8}$ за один заход на посадку.

В результате VPL вычисляется по следующей формуле

$$VPL = \max \{VPL_0, \max (VPL_n) (n = 1, 2 \dots, N)\}. \quad (17)$$

3. Результаты и обсуждение

3.1. Источник данных и задание параметров

Точечные траектории подспутниковых точек BDS-2 и BDS-3 показаны на рис. 2.

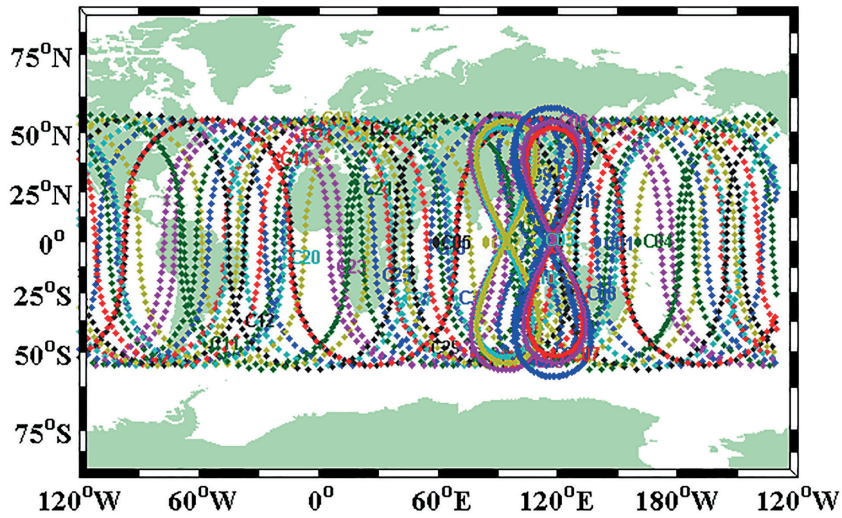


Рис. 2. Траектории подспутниковых точек BDS-2 и BDS-3

Соответствующие доступные спутники BeiDou представлены в табл. 1.

Таблица 1

Доступные спутники BeiDou по состоянию на конец 2020 г.

Группировка	GEO	IGSO	MEO
BDS-2	C01, C02, C03, C04, C05	C06, C07, C08, C09, C10, C13, C16	C11, C12, C14
BDS-3	C59, C60	C38, C39, C40	C19, C20, C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28, C29, C30, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C41, C42, C43, C44, C45, C46

Транслируемые потребителям эфемериды спутников BeiDou, предоставленные службой MGEX 15 декабря 2020 г., были выбраны для оценки доступности алгоритма ARAIM применительно к BDS в глобальном масштабе (по всей земной поверхности). Чтобы проанализировать географическую доступность системы BeiDou при заходе на посадку по LPV-200, были рассмотрены схемы, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Схемы, используемые при анализе доступности ARAIM

Схема	Спутниковые системы	P_{sat} (один заход на посадку)	URA (м)	URE (м)	b_{max} (м)	b_{nom} (м)
1	BDS-3 ----- BDS-2+BDS-3	10^{-4}	2,0	$\frac{URA}{2}$	0,75	0,1
2	BDS-3 ----- BDS-2+BDS-3	10^{-4}	1,5			
3	BDS-3 ----- BDS-2+BDS-3	10^{-4}	1,0			
4	BDS-3 ----- BDS-2+BDS-3	10^{-4}	0,5			
5	BDS-3 ----- BDS-2+BDS-3	10^{-5}	0,5			

Следует добавить, что рассматривались местоположения потребителя на широте от 90° ю.ш. до 90° с.ш и долготе от 180° з.д. до 180° в.д. с шагом 5°×5°. Временная дискретность составляла 600 с.

3.2. Анализ доступности алгоритма ARAIM

На основании параметров, представленных в табл. 2, сначала был выполнен расчет количества видимых спутников и значения VPL на каждом временном интервале только для BDS-3 и для комбинации BDS-2+BDS-3. Затем было рассчитано среднее количество видимых спутников и средний VPL в каждой точке сетки в течение одних суток. Наконец, была выполнена оценка доступности алгоритма ARAIM в каждой точке сетки за одни сутки в соответствии с VPL в каждой точке сетки в каждый момент времени, а также определен критерий доступности.

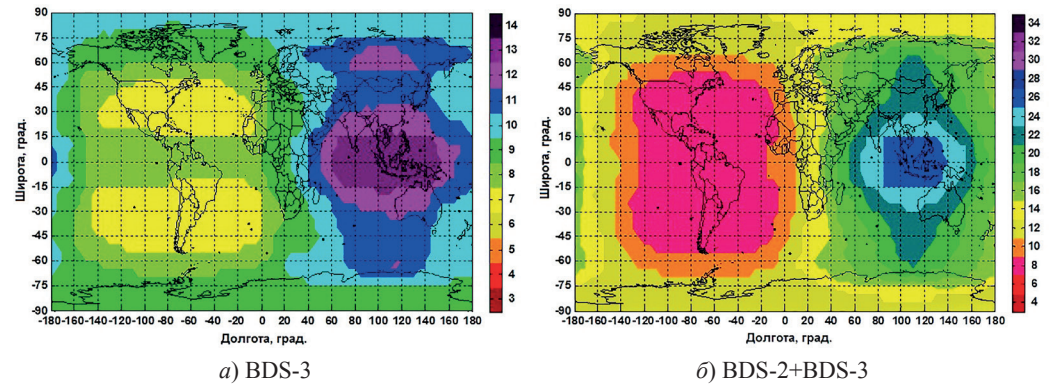


Рис. 3. Среднее количество видимых спутников систем BDS-3 (а) и BDS-2+BDS-3 (б) на карте мира

Как видно из рис. 3, среднее количество спутников глобальной системы BDS-3, видимых для пользователей, составляло приблизительно 7-13 (рис. 3, а). В целом это

соответствует требуемому количеству видимых спутников для реализации ARAIM. Благодаря присутствию спутников GEO и IGSO количество видимых спутников в Азиатско-Тихоокеанском регионе выше, чем в других регионах. После добавления BDS-2 (рис. 3, б) среднее количество видимых спутников системы BDS в каждой точке глобальной сетки возросло до 8-26, из них примерно 14-26 в Азиатско-Тихоокеанском регионе и около 20 – в Центральном. В остальных регионах находятся порядка 8-14 видимых спутников, примерно 8 спутников видимы в центральной области. Таким образом, в глобальном масштабе количество видимых спутников соответствует априорным требованиям для обнаружения и идентификации сбоев с помощью алгоритма ARAIM.

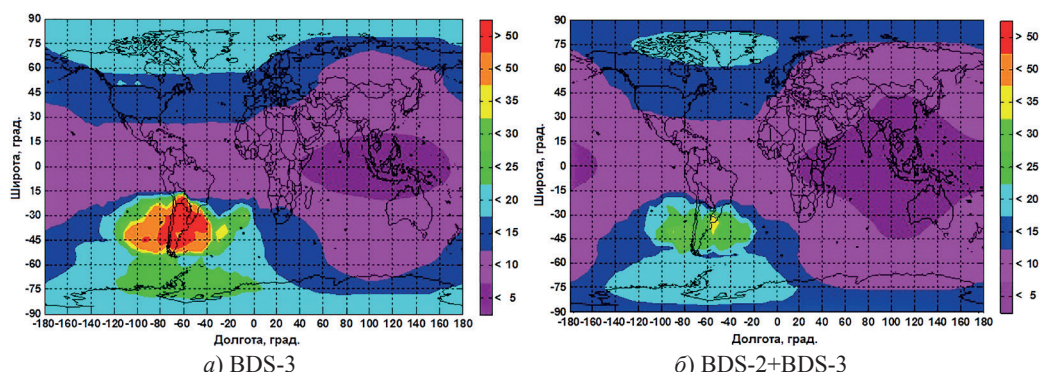


Рис. 4. Среднесуточное значение VPL по схеме 4 на карте мира

Для системы BDS-3 (рис. 4, а) большинство зон соответствует требованиям к пределу уровня срабатывания тревоги по вертикали ($VAL = 35$ м). В некоторых районах Южной Америки, напротив, VPL составляет более 50 м, что не соответствует требованиям к доступности ARAIM. Судя по рис. 3, а и 4, в этом районе находятся 7 видимых спутников, что соответствует требованиям. Вероятно, VPL превышает установленный предел из-за неблагоприятной геометрической конфигурации спутников. Для системы BDS-2+BDS-3 среднее значение VPL менее 15 м наблюдается в Азиатско-Тихоокеанском регионе и в Центральной Америке, а в других регионах Америки VPL составляет менее 35 м, что в целом удовлетворяет требованиям к доступности ARAIM.

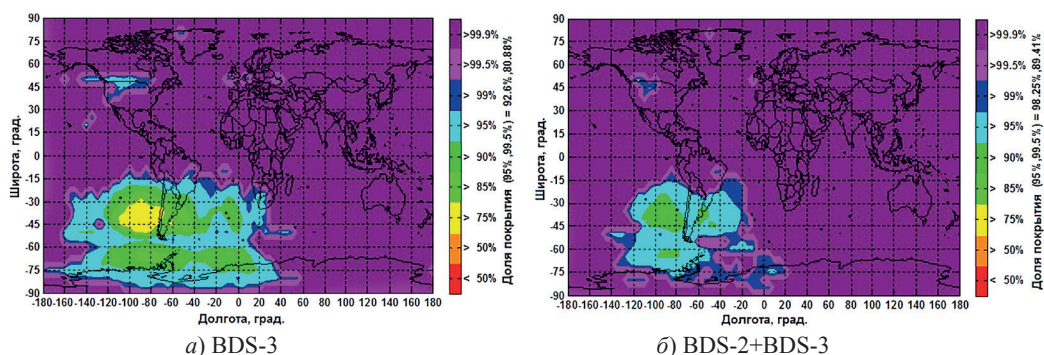


Рис. 5. Доступность ARAIM при глобальном распределении по схеме 4

Соответствующая доступность ARAIM по схеме 4 показана на рис. 5.

Как видно из рисунка, при использовании только BDS-3 (рис. 5, а) глобальная доступность ARAIM составляет свыше 99,9% в большинстве регионов мира. Доля земной поверхности с доступностью ARAIM свыше 95 и 99,5% составляет соответственно 92,6 и 80,88%. В Южной Америке этот показатель равен примерно 75-99%. Для BDS-2+BDS-3 (рис. 5, б) доля поверхности с доступностью ARAIM свыше 95 и 99,5% составляет соответственно 98,25 и 89,41%. Доступность в Южной Америке также находится в пределах 90-99,5%.

На следующем этапе исследований была изучена доступность ARAIM при уменьшении априорной вероятности отказа спутника P_{sat} с 10^{-4} до 10^{-5} . Доступность ARAIM для системы BDS-2+BDS-3 по схеме 5 показана на рис. 6.

Если сравнить рис. 6 и рис. 5, б, то можно заметить, что при уменьшении вероятности нарушений с 10^{-4} до 10^{-5} доля поверхности с доступностью 95 и 99,5% увеличивается с 98,25 и 89,41% до 98,53 и 90,11% соответственно.

Чтобы проверить влияние URA на доступность алгоритма ARAIM, была определена доступность системы BDS-2+BDS-3 при различных значениях параметра URA (схемы 1–4), как показано на рис. 7.

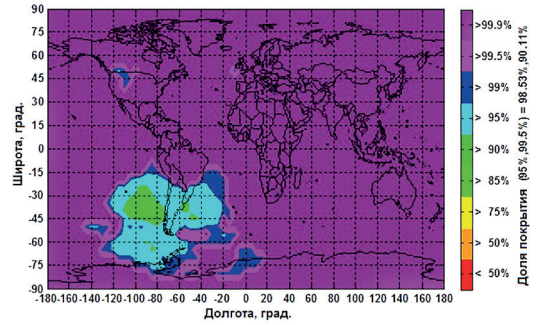


Рис. 6. Доступность ARAIM по схеме 5 для системы BDS-2+BDS-3

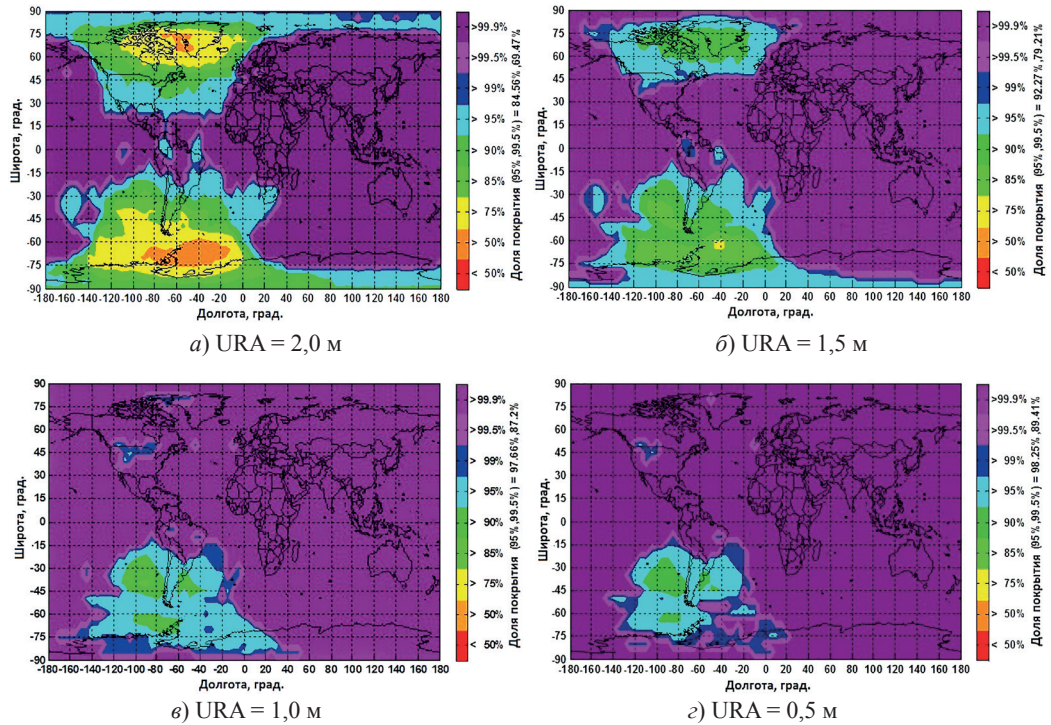


Рис. 7. Доступность ARAIM при различных значениях URA

Как видно из рис. 7, когда значение URA увеличивается с 0,5 до 2,0 м, доступность ARAIM системы BeiDou в Северной и Южной Америке понижается с 99,9 до 50%, тогда как в Азиатско-Тихоокеанском регионе общая доступность составляет 99,9%. Таким образом, URA существенно влияет на доступность системы BeiDou в Северной и Южной Америке.

Статистические данные по доступности системы BeiDou для различных схем представлены в табл. 3 и на рис. 8.

Таблица 3

Доля земной поверхности с различной доступностью ARAIM

Схемы	Спутниковые системы	Доступность (95%)	Доступность (99,5%)
1	BDS-3	72,26	55,97
	BDS-2+BDS-3	84,56	69,47
2	BDS-3	80,78	66,56
	BDS-2+BDS-3	92,27	79,21
3	BDS-3	89,05	77,10
	BDS-2+BDS-3	97,66	87,20
4	BDS-3	92,60	80,88
	BDS-2+BDS-3	98,25	89,41
5	BDS-3	93,36	81,69
	BDS-2+BDS-3	98,53	90,11

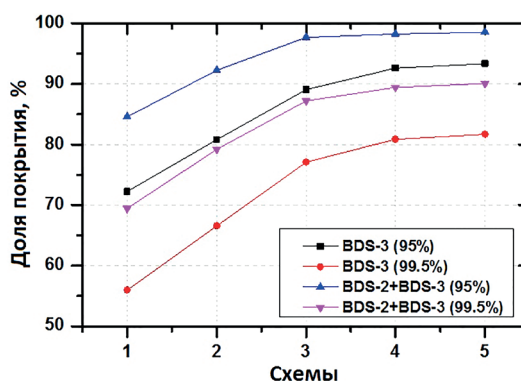


Рис. 8. Доля земной поверхности с доступным ARAIM

Как показано в табл. 3 и на рис. 8, при уменьшении значения URA с 2,0 (схема 1) до 0,5 м (схема 4) и при пороге доступности 95% доля поверхности Земли для BDS-2+BDS-3 увеличивается с 84,56 до 98,25%. При пороге доступности 99,5% эта доля возрастает с 69,47 до 89,41%.

4. Выводы

В работе проанализированы требования к доступности (возможности реализации) алгоритма ARAIM при заходе на посадку по процедуре LPV-200 для BDS. Рас-

смотрены случаи использования только BDS-3 и совместного применения BDS-2 и BDS-3. Получены следующие результаты.

1. При использовании только BDS-3 среднее количество видимых спутников по всему миру составляет около 7-13, а значение VPL – менее 35 м в большинстве районов. Доля земной поверхности с доступностью ARAIM в 95% может достигать 92,6%.

2. Для варианта BDS-2+BDS-3 среднее количество видимых спутников по всему миру составляет 8-26. Значение VPL в Азиатско-Тихоокеанском регионе меньше 10 м, а в Северной и Южной Америке – меньше 35 м. Доля земной поверхности с доступностью ARAIM в 95% может достигать 98,25%.

3. Параметр URA оказывает большое влияние на доступность системы BeiDou в Северной и Южной Америке. Если уменьшить его значение с 2,0 до 0,5 м, доступность ARAIM для варианта BDS-2+BDS-3 в этих частях света повышается с 50 до 99,9%. Вместе с тем доля земной поверхности с доступностью ARAIM в 95% для BDS-2+BDS-3 возрастает с 84,56 до 98,25%.

Благодарность

Работа выполнена при частичной поддержке программы Китайского национального фонда естественных наук (National Natural Science Foundation of China) (гранты №№ 41974032, 41674034), программы «Свет Запада» (Light of the West) Китайской академии наук (гранты №№ E017YR1R04, E123YR1R03, XAB2019B21), Китайского национального плана ключевых исследований и разработок (грант № 2016YFB0501804), а также программ «Таланты высокого уровня» (High Level Talents) (грант № Y923YC1701) и «Передовые научно-исследовательские проекты» (The Frontier Science Research Project) (грант № QYZDB-SSW-DQC028) Китайской академии наук. Выражаем благодарность руководству IGS и Потсдамскому центру исследования Земли им. Гельмгольца (GFZ) за информацию и оборудование, предоставленные для этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **FAA, GEAS Panel**, Phase II of the GNSS Evolutionary Architecture Study, *GNSS Evolutionary Architecture Study Panel*, 2010, February, https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/library/documents/media/GEASPhaseII_Final.pdf (2018/04 available).
2. **Brown, R.G.**, A baseline GPS RAIM scheme and a note on the equivalence of three RAIM methods, *Navigation*, 1992, vol. 39, no. 3, pp. 301–311.
3. **Lee, Y., Dyke, K. V., Declene, B., Studenny, J., and Beckmann, M.**, Summary of RTCA SC-159 GPS Integrity Working Group activities, *Navigation*, 1996, vol. 43, no. 3, pp. 307–338.
4. **Blanch, J., Walter, T., and Enge, P.**, RAIM with optimal integrity and continuity allocations under multiple failures, *IEEE Trans. Aerosp. Electro. Syst.*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 1235–1247.
5. **Blanch, J., Walter, T., Enge, P., Lee, Y., Pervan, B., Rippl, M., and Spletter, A.**, Advanced RAIM user algorithm description: Integrity support message processing, fault detection, exclusion, and protection level calculation, *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville, TN, 2012, pp. 2828–2849.
6. **Choi, M., Blanch, J., Akos, D., Heng, L., Gao, G., Walter, T., and Enge, P.**, Demonstrations of multi-constellation advanced RAIM for vertical guidance using GPS and GLONASS signals, *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, Portland, OR, 2011, pp. 3227–3234.
7. **Choi, M.**, Evaluation of ARAIM for vertical guidance using GPS and GLONASS signals, *Graduate Thesis*, Stanford University, 2014.

8. Blanch, J., Walter, T., Enge, P., Wallner, S., Fernandez, F., Dellago, R., Ioannides, R., Hernandez, I., Belabbas, B., Spletter, A., and Rippl, M., Critical elements for a multi-constellation advanced RAIM, *Navigation*, 2013, vol. 60, no. 1, pp. 53–69.
9. Rippl, M., Spletter, A., and Günther, C., Parametric performance study of advanced receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) for combined GNSS constellations, *Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, CA, 2011, pp. 285–295.
10. Rippl, M., Real time Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring in DLR's multi-antenna GNSS receiver, *Proceedings of 2012 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, Newport Beach, CA, 2012, pp. 1767–1776.
11. Wu, Y., Wang, J., and Jiang, Y., Advanced receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) schemes with GNSS time offsets, *Adv. Space Res.*, 2013, vol. 52, no. 1, pp. 52–61.
12. Jiang, Y., and Wang, J., A new approach to calculate the vertical protection level in A-RAIM, *The Journal of Navigation*, 2014, vol. 67, no. 4, pp. 711–725.
13. El-Mowafy, A., RAIM for vertical guidance using GPS and BeiDou, *Journal of Global Positioning Systems*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 28–37.
14. El-Mowafy, A., Pilot evaluation of integrating GLONASS, Galileo and BeiDou with GPS in RAIM, *Artificial Satellites*, 2016a, vol. 51, no. 1, pp. 31–44.
15. El-Mowafy, A., and Yang, C., Limited sensitivity analysis of RAIM availability for LPV-200 over Australia using real data, *Adv. Space Res.*, 2016b, vol. 57, no. 2, pp. 659–670.
16. El-Mowafy, A., Advanced receiver autonomous integrity monitoring using triple frequency data with a focus on treatment of biases, *Adv. Space Res.*, 2017, vol. 59, no. 8, pp. 2148–2157.
17. Ge, Y., Wang, Z., Zhu, Y., Reduced RAIM monitoring subset method based on satellites in different orbital planes, *GPS Solut.*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 1443–1456.
18. Blanch, J., Walter, T., and Enge, P., Fixed subset selection to reduce Advanced RAIM complexity, *Proceedings of the 2018 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Reston, Virginia, 2018, pp. 88–98.
19. Yang, Y., Gao, W., Guo, S., Mao, Y., and Yang, Y., Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system, *Navigation*, 2019, vol. 66, no. 1, pp. 7–18.
20. China Satellite Navigation Office (CSNO), BeiDou navigation satellite system signal. Space Interface Control Document Open Service Signal B1C/B2a/B3I/B1I, 2018. <http://en.beidou.gov.cn>.
21. Yang, Y., Li, J., Xu, J., Tang, J., Guo, H., and He, H., Contribution of the Compass satellite navigation system to global PNT users, *Chinese Sci Bull*, 2011, vol. 56, no. 26, pp. 2813–2819.
22. Yang, Y., Li, J., Wang, A., Xu, J., He, H., Guo, H., Shen, J., and Dai, X., Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of BeiDou regional navigation satellite system, *Sci. China Earth Sci.*, 2014, vol. 57, no. 1, pp. 144–152.
23. Yang, Y., Xu, J., Li, J., and Yang, C., Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-S demonstration system, *Sci. China Earth Sci.*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 614–624.
24. Peng, L., Jiang, K., Duan, X., Zhen, Y., and Yang, W., Receiver autonomous integrity monitoring parameter design and analysis for multi-constellation navigation, *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2012 Proceedings*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, pp. 15–27.
25. Liu, Y., and Zhu, Y., Design and performance evaluation of airspace-ground cooperative GPS/BeiDou dual-constellation RAIM algorithm, *Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, California, 2014, pp. 127–136.
26. Wang, L., Luo, S., Tu, R., Fan, L., and Zhang, Y., RAIM with BDS in the Asia-Pacific region, *Adv. Space Res.*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 707–720.
27. Luo, S., Wang, L., Tu, R., Zhang, W., Wei, J., and Chen, C., Satellite selection methods for multi-constellation advances RAIM, *Adv. Space Res.*, 2020, vol. 65, no. 5, pp. 1503–1517.
28. Wang, E., Shu, W., Deng, X., Wang, Z., Xu, S., and Wang, H., Vertical protection level optimization and availability analysis for Advanced RAIM, *Front. Energy Res.*, 2022, vol. 10, p. 890095.
29. ICAO, Annex 10: GNSS standards and recommended practices (SARPs), Section 3.7, Appendix B, and Attachment D, *Aeronautical Telecommunications*, 2009, Vol. 1 (Radio Navigation Aids), Amendment 84.
30. Walter, T., Blanch, J., and Enge, P., Reduced subset analysis for multi-constellation RAIM, *Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, CA, 2014, pp. 89–98.
31. EU-US, Cooperation on Satellite Navigation Working Group: C-RAIM Technical Subgroup, Milestone 3 Report, 2016. <https://www.gps.gov/policy/cooperation/europe/2016/working-group-c/RAIM-milestone-3-report.pdf> (2018/04 available).
32. EU-US, Cooperation on Satellite Navigation Working Group: C-RAIM Technical Subgroup, Interim Report, 2012. <https://www.gps.gov/policy/cooperation/europe/2013/working-group-c/RAIM-report-1.0.pdf>

Lihong Fan (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, China; Key Laboratory of Precision Navigation Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, China), **Rui Tua** (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Precision Navigation Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences; University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China), **Rui Zhang, Junqiang Han, Pengfei Zhang, Siyao Wang** (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Precision Navigation Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences), **Ju Honga, Shixuan Zhanga, Xiaochun Lu** (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Precision Navigation Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences; University of Chinese Academy of Sciences)
ARAIM Availability of BDS-2 and BDS-3 in the Global LPV-200 Approach, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 4 (119), pp. 169–183.

Abstract. With the addition of multi-frequency and multi-constellation systems, the Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring (ARAIM) algorithm is expected to provide a global vertical and horizontal guidance for the localizer performance of vertical guidance (LPV)-200 approach phase in aeronautical navigation worldwide. Currently, the second and third generations of the BeiDou navigation satellite system (BDS-2 and BDS-3) provide their services to users. We consider ARAIM for dual-frequency iono-free BDS pseudorange combinations. With the aim to improve the service performance of the BDS-2 and BDS-3 systems, the assumed integrity support message (ISM) was used to calculate the vertical protection level (VPL) for the LPV-200 approach. The impact of the different parameters of ISM on the ARAIM availability was evaluated. The results demonstrate that, compared with BDS-3, the global coverage of availability for BDS-2+BDS-3 is slightly higher, mainly due to the increase of the number of visible satellites. The availability of BeiDou in the Americas is affected by user range accuracy (URA). With URA decreasing from 2.0 to 0.5 m, the ARAIM availability of BDS-2+BDS-3 in the Americas increased from 50 to 99.9%.

Key words: ARAIM, VPL, BDS-2, BDS-3, LPV-200, availability.

Материал поступил 29.07.2022