

УДК 629.78
EDN MAGKZR

ЧЖАОЯНЬ ЛИ, ЛИХУН ФАНЬ, ДЭЦАЙ ЦЗОУ, ЖУЙ ТУ, ЖУЙ ЧЖАН, ЦЗЮНЬЦЯН ХАНЬ,
СЯЮ ВАН, ЖУНЖУН ДУН

АВТОНОМНЫЙ КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОМБИНАЦИЙ GPS/BEIDOU/GALILEO

В таких сферах, как, например, гражданская авиация, где критическую роль играет безопасность, применяются алгоритмы автономного контроля целостности (Receiver Autonomous Integrity Monitoring – RAIM) навигационного поля на этапах полета на эшелоне и неточного захода на посадку. Для повышения качества работы RAIM все чаще привлекаются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) на гражданских частотах. В настоящей статье анализируются данные наблюдений и эфемеридно-временная информация от 18 станций, задействованных в эксперименте по интегрированию ГНСС (Multi-GNSS Experiment – MGEX), для оценки эффективности RAIM при использовании многочастотных сигналов от нескольких ГНСС – в данном случае GPS, BDS и Galileo. Полученные результаты указывают на более высокую эффективность определения координат места и контроля целостности спутниковых данных при использовании комбинаций из нескольких ГНСС.

Ключевые слова: RAIM, комбинация многочастотных ГНСС, доступность, уровень защиты HPL/VPL.

1. Введение

С выходом на полную мощность система BDS-3 (третье поколение китайской спутниковой системы BeiDou) стала четвертой из основных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), работающих на нескольких гражданских частотах. Наличие нескольких многочастотных ГНСС позволяет увеличить число

Ли Чжаоянь. Аспирант, Национальный центр службы времени, Китайская академия наук (Сиань, КНР); Университет Китайской академии наук (Пекин, КНР). ORCID 0009-0007-0615-1589.

Фань Лихун. Доктор наук, младший научный сотрудник, Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук. ORCID 0009-0004-1232-8465.

Цзоу Дэцай. Доктор наук, научный сотрудник, Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук. ORCID 0000-0002-8489-339X.

Ту Жуй. Профессор, Колледж геоматики, Шаньдунский университет науки и технологий (Циндао, КНР). ORCID 0000-0003-4706-5373.

Чжан Жуй. Доктор наук, младший научный сотрудник, Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук. ORCID 0000-0002-8489-339X.

Хань Цзюньцян. Доктор наук, младший научный сотрудник, Национальный центр службы времени, Китайская академия наук. ORCID 0000-0002-8707-9297.

Ван Сяю. Доктор наук, младший научный сотрудник, Национальный центр службы времени, Китайская академия наук. ORCID 0000-0002-1549-2672.

Дун Жунжун. Аспирант, Национальный центр службы времени, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук. ORCID 0009-0000-3155-3933.

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

видимых спутников и улучшить геометрию рабочего созвездия, что повышает надежность контроля целостности спутниковых данных.

Современные исследования, посвященные автономному контролю целостности (RAIM) навигационного поля, сосредоточены на двух аспектах: отслеживание и диагностика нарушений и доступность сигналов для контроля их целостности. К традиционным алгоритмам идентификации сбоев относятся сопоставление псевдодальностей, методы наименьших квадратов и равенства векторов. Эти три подхода применяются, чтобы выявить отказ одного спутника [1]. Для обнаружения выхода из строя нескольких спутников был предложен ряд других методов [2–4], например на основе w -критерия с двухпроходной схемой для обнаружения аномальных измерений [2]. В работе [4] для определения неисправного спутника в составе группировки был построен алгоритм CIPSO-FCM (Chaotic Immune-vaccine Particle Swarm Optimization Fuzzy C-means), сочетающий оптимизированный метод роя частиц на основе теории хаоса в приложении к иммунной системе и метод нечетких C -средних. В случае комбинаций многочастотных ГНСС [5–8] может быть задействован усовершенствованный алгоритм RAIM (advanced RAIM – ARAIM) с функцией вертикальной навигации, которая полезна при заходе воздушного судна на посадку [5–6]. Авторы [7] предложили метод многочастотного мониторинга для одночастотных приемников на базе виртуальной ионосферной модели. Кроме того, некоторые успехи были достигнуты при исследовании алгоритмов контроля целостности для интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем [9–10].

Для обеспечения доступности сигналов ГНСС в исследованиях рассматривается, как правило, классический параметр HPL [11], поэтому возможность применения RAIM в системе из нескольких ГНСС – это новое научное направление. Для одиночной ГНСС в [12] было предложено оптимизировать алгоритм RAIM за счет данных BDS от Международной службы ГНСС (IGS). Для двух ГНСС в [13–17] был выполнен анализ с использованием эфемеридно-временной информации BDS и GPS, полученной с одной из станций MGEX, который показал, что на территории Китая RAIM гораздо менее эффективен, если задействуются сигналы GPS, а не BDS [13]. В [17] оценивалась работа одночастотного алгоритма RAIM в случае одиночной GPS и комбинации GPS/Galileo; при этом другие спутниковые системы не обсуждались. Что касается многокомпонентных систем, рассмотренных в [18–20], то в ходе исследования с привлечением данных моделирования авторы [18] пришли к выводу, что система из трех двухчастотных ГНСС удовлетворяет требованиям к заходу на посадку с вертикальным наведением по протоколу II (Approach Procedure with Vertical Guidance – APV-II). В [19] были задействованы измерения GPS и GLONASS в сочетании с моделированными данными BDS и Galileo. Результаты продемонстрировали, что глобальный алгоритм RAIM подходит для комплексной системы при заходе на посадку с вертикальным наведением по протоколам I и II (APV-I и APV-II) и по радиолокационной станции в соответствии с категорией I (Category I precision approach – CAT-I).

Наконец, следует отметить, что гарантированно RAIM может использоваться главным образом в системах из нескольких одночастотных ГНСС. Применимость RAIM в двухчастотных системах при точном заходе на посадку разных категорий (CAT) исследована в меньшей степени. В настоящей работе изучены различные комбинации многочастотных ГНСС и их роль в обеспечении доступности RAIM. В качестве источников экспериментальных данных приняты спутниковые системы GPS, BDS

и Galileo с кодовым разделением сигналов. В связи с этим ГЛОНАСС, имеющая частотное разделение сигналов, не рассматривается. Проанализированы такие параметры, как средние значения HPL/VPL и возможность применения RAIM в одно-, двух- и трехкомпонентных системах как в одночастотном, так и в многочастотном режимах.

2. Принципы работы алгоритма RAIM

Основополагающие принципы одноточечного ГНСС-позиционирования с помощью дальномерных кодов описаны в [21]. При этом наиболее распространенный метод RAIM обычно называют глобальным тестированием [22], где главной переменной служит квадратичная форма невязок:

$$D = \frac{v^T P v}{\sigma^2}. \quad (1)$$

Здесь v – остаточный вектор псевдодальности, P – матрица весов наблюдений в линейаризованной модели наблюдений псевдодальности ГНСС. Составляющие вектора погрешности псевдодальности ε – взаимно независимые нормально распределенные случайные погрешности со средним значением, равным 0, и дисперсией σ^2 . Согласно теории статистического распределения, D подчиняется хи-квадрат-распределению со степенью свободы $m - n$, где m – количество измерений, а n – число неизвестных. Если среднее значение не равно нулю, D подчиняется нецентрализованному хи-квадрат-распределению со степенью свободы $m - n$, а параметр нецентральности равен λ .

P_{FA} определяется как вероятность ложной тревоги, равная 1×10^{-5} . Вероятность, соответствующая пороговому значению T , имеет вид:

$$Pr(D < T | no\ fault) = \int_0^T f_{\chi^2_{(n-4)}}(x) dx = 1 - P_{FA}. \quad (2)$$

Если $D > T$, то предполагается наличие аномального измерения. В контексте алгоритмов обнаружения неисправностей срабатывает сигнал тревоги.

Прежде чем реализовывать автономный контроль целостности, необходимо определить, удовлетворяет ли конфигурация спутников требованиям к идентификации сбоев, и оценить работоспособность алгоритмов выявления дефектов. Именно этот процесс обеспечивает эффективность применения RAIM.

При возникновении у спутника неисправностей количество их обнаружений соответствует нецентрализованному хи-квадрат распределению. Если $D < T$, это указывает на пропущенное обнаружение, вероятность которого P_{MD} устанавливается равной 1×10^{-3} и может быть выражена следующим образом:

$$Pr(D < T | fault) = \int_0^T f_{\chi^2_{(n-4), \lambda}}(x) dx = P_{MD}. \quad (3)$$

Параметр нецентральности λ можно рассчитать с помощью приведенного выше уравнения. Соотношение пределов изменения $\delta HDOP_T$ (фактор снижения точности в горизонтальной плоскости), HAL (horizontal alert level – горизонтальный уровень предупреждения) и параметра нецентральности λ запишем как

$$\delta HDOP_T = HAL / (\sigma \sqrt{\lambda}). \quad (4)$$

Перед выявлением дефекта вычисляются соответствующие значения $\delta HDOP_i$ для каждого спутника в реальном времени по формуле (5). Максимальные значения это-

го параметра обозначим как $\delta HDOP_{\max}$. Если $\delta HDOP_{\max} < \delta HDOP_T$, это означает, что дефект спутника будет обнаружен даже в тех условиях, когда его идентификация крайне затруднена. Следовательно, $\delta HDOP_{\max}$ обеспечивает достоверность обнаружения дефекта.

Формула (5) имеет вид:

$$\delta HDOP_i^2 = HDOP_i^2 - HDOP^2 = \frac{A_{1i}^2 + A_{2i}^2}{Q_{vii}}, \quad (5)$$

где Q – адьюнкт матрицы вектора невязки псевдорасстояния, $A_i = (H_i^T P_i H_i)^{-1} H_i^T$, H – матрица коэффициентов для матрицы наблюдений псевдодальности. Параметр $HDOP$ указывает на точность определения горизонтальных координат всех наблюдаемых спутников, а параметр $HDOP_i$ обозначает снижение точности по горизонтали после исключения i -го спутника.

Подставив $\delta HDOP_{\max}$ в уравнение (4), определим уровень защиты по горизонтальным координатам (HPL):

$$HPL = \delta HDOP_{\max} \times \sigma \sqrt{\lambda}. \quad (6)$$

Если $HPL < HAL$, то к RAIM можно прибегнуть, и наоборот, если $HPL > HAL$, то нельзя. Вертикальный уровень защиты (VPL) аналогичен HPL:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta VDOP_i^2 = \frac{A_{3i}^2}{Q_{vii}}, \\ \delta VDOP_{\max} = \max(\delta VDOP_i), \\ VPL = \delta VDOP_{\max} \times \sigma \sqrt{\lambda}. \end{array} \right. \quad (7)$$

3. Анализ доступности RAIM

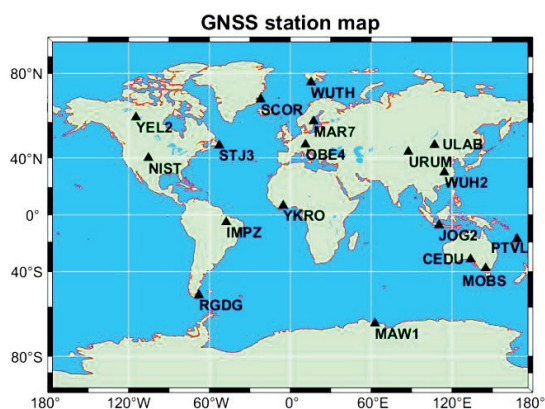


Рис. 1. Карта распределения станций MGEX

Для анализа доступности RAIM при комбинациях многочастотных систем GPS/BDS/Galileo были отобраны данные наблюдений и эфемеридно-временная информация, полученные от 18 глобально распределенных мониторинговых станций MGEX 29 мая 2024 г. (с интервалом выборки 30 с). Возможность применения RAIM в одно- и двухчастотном режимах была проанализирована для сценариев с одно-, двух- и трехкомпонентными системами соответственно. Распределение станций мониторинга представлено на рис. 1, а программа экспериментов – в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Программа экспериментов

Программа I. Одиночная ГНСС					
Одночастотный режим			Двухчастотный режим		
GPS_L1	BDS_B1C	GAL_E1	GPS_L1/L2	BDS_B1C/B2a	GAL_E1/E5a

Программа II. Комбинация из двух ГНСС					
Одночастотный режим			Двухчастотный режим		
GPS_L1, GAL_E1	GPS_L1, BDS_B1C	BDS_B1C, GAL_E1	GPS_L1/L2, GAL_E1/E5a	GPS_L1/L2, BDS_B1C/B2a	BDS_B1C/B2a, GAL_E1/E5a

Программа III. Комбинация из трех ГНСС	
Одночастотный режим	Двухчастотный режим
GPS_L1, BDS_B1C, GAL_E1	GPS_L1/L2, BDS_B1C/B2a, GAL_E1/E5a

Оцениваемые параметры для каждой станции мониторинга в рамках каждой программы экспериментов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Оцениваемые параметры

Показатели	Определение
HPL	Среднее значение HPL, м
VPL	Среднее значение VPL, м
PDOP	Среднее значение PDOP (Position Dilution of Precision – коэффициент снижения точности позиционирования) при реализации RAIM
Видимые спутники	Количество видимых спутников в рабочем созвездии
Доступность RAIM	Отношение времени, в течение которого RAIM доступен, ко всему рассматриваемому интервалу времени (24 ч)

3.1. Доступность RAIM при использовании одиночной ГНСС

3.1.1. Одночастотный режим

HPL и VPL были вычислены по данным от 18 станций мониторинга для GPS, BDS и Galileo в одночастотном режиме, как показано на рис. 2. Для простоты восприятия здесь и далее на графиках показаны результаты расчетов для четырех выбранных станций. Статистика по каждой станции приведена в табл. 3.

На основании вычислений для одиночной одночастотной ГНСС и данных, приведенных на рис. 2 и в табл. 3, можно заключить:

- 1) HPL для GPS и BDS варьируется в диапазоне от 30 до 70 м, что отвечает требованию к горизонтальному уровню предупреждения (HAL), равному 556 м на

- этапе неточного захода на посадку (non-precision approach – NPA). Доступность RAIM на этапе неточного захода на посадку составляет 100%;
- 2) в случае Galileo ограниченное количество видимых спутников, более высокий показатель PDOP (неблагоприятная геометрическая конфигурация спутников) влекут за собой увеличение HPL/VPL для станций, в частности WUH2. При этом HPL на некоторых интервалах превышали 556 м, что не соответствует требованиям к HAL на этапе неточного захода на посадку;
 - 3) геостационарные и квазигеостационарные орбиты спутников BDS позволяют увеличить количество видимых спутников в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Станции в этом регионе, в частности WUH2, регистрируют больше видимых спутников BDS, чем GPS. При этом по сравнению с GPS у BDS отмечаются более низкие значения PDOP (лучшие геометрические конфигурации спутников) и более низкие пороги HPL и VPL. Станция IMPZ, так же как и другие европейские и американские станции, позволяет видеть больше спутников GPS и Galileo и получать более низкие значения среднего HPL и PDOP, чем у BDS;
 - 4) в целом можно заключить, что средние значения HPL/VPL ниже для тех станций, которые находятся на низких широтах, например IMPZ, возрастают для станций мониторинга, расположенных на средних широтах, и уменьшаются для станций на высоких широтах, таких как RGDG.

Т а б л и ц а 3

Результаты экспериментов для одиночной ГНСС, работающей в одностотном режиме

Станция		IMPZ	RGDG	SCOR	WUH2
GPS	HPL, м	33	44	40	52
	VPL, м	99	84	99	98
	PDOP	1,6	1,6	1,8	2,2
	Видимые спутники	8–13	8–14	7–13	6–10
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
BDS	HPL, м	58	69	47	39
	VPL, м	131	118	127	75
	PDOP	1,9	1,7	2,0	2,0
	Видимые спутники	7–10	6–11	7–12	7–11
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
GAL	HPL, м	61	71	47	447
	VPL, м	134	113	332	744
	PDOP	2,1	1,8	2,1	4,6
	Видимые спутники	7–9	6–11	4–12	2–9
	Доступность при NPA	1,00	0,9983	0,9232	0,8093

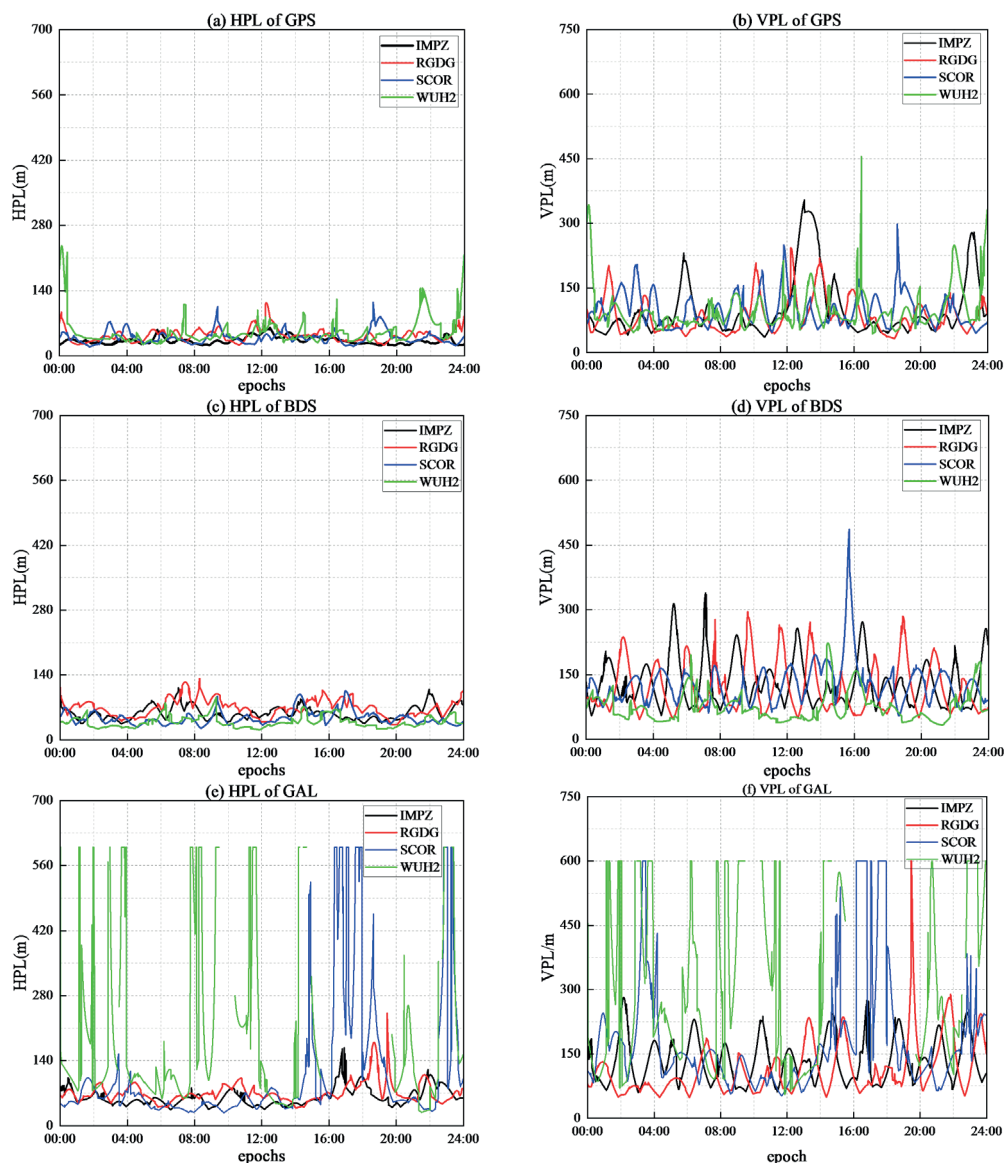


Рис. 2. VPL/HPL в случае одиночной ГНСС, работающей в одночастотном режиме

3.1.2. Двухчастотный режим

HPL и VPL вычислялись по данным от 18 станций мониторинга для GPS, BDS и Galileo в двухчастотном режиме, как показано на рис. 3. Результаты по каждой станции даны в табл. 4.

На основании вычислений для однокомпонентной двухчастотной ГНСС, а также по данным рис. 3 и табл. 4 можно сделать следующие выводы:

- 1) разница между средними значениями HPL/VPL в двух- и одночастотном режиме одиночной ГНСС невелика – не более 1 м. Это связано с тем, что если при двухчастотной ГНСС на одних и тех же интервалах времени на одной частоте сигнал спутника отсутствует, количество рабочих спутников, сигналы которых

учитываются в расчетах, уменьшается. В результате значение HPL/VPL возрастает, а доступность RAIM снижается. И наоборот, привлечение двухчастотных безионосферных комбинаций для расчета одночастотных ионосферных задержек может существенно уменьшить последние, что, в свою очередь, снижает HPL/VPL и повышает доступность RAIM. Таким образом, сокращение числа видимых спутников компенсируется за счет безионосферных комбинаций, что сохраняет определенный баланс целостности данных, а в конечном итоге получаем близкие средние значения HPL/VPL для одиночных одно- и двухчастотных ГНСС;

- 2) при комбинации GPS и BDS, работающих в двухчастотном режиме, среднее значение HPL составляет порядка 30–70 м, что соответствует требованиям к системе при неточном заходе на посадку, для которой RAIM доступен на 100%. Для двухчастотной системы Galileo доступность RAIM при неточном заходе на посадку варьируется от 80 до 100%. В частности, станция WUH2 на некоторых временных интервалах фиксирует HPL свыше 556 м, в результате чего доступность RAIM сокращается до 81,02%;
- 3) при сравнении результатов, полученных при использовании одиночных одно- и двухчастотной систем, следует учитывать влияние географических различий на характеристики целостности. Станции мониторинга в Азиатско-Тихоокеанском регионе фиксируют более низкие значения HPL/VPL, если привлекается система BDS, а на территории Европы, в Северной и Южной Америке, напротив, значения HPL/VPL ниже в случае задействования GPS и Galileo.

Таблица 4

Результаты экспериментов при использовании одиночной двухчастотной ГНСС

Станция		IMPZ	RGDG	SCOR	WUH2
GPS	HPL, м	33	44	40	53
	VPL, м	99	84	99	100
	PDOP	1,6	1,6	1,8	2,2
	Видимые спутники	8–13	7–14	7–13	5–10
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
BDS	HPL, м	58	69	47	39
	VPL, м	131	118	127	75
	PDOP	1,9	1,7	1,9	2,0
	Видимые спутники	7–10	6–11	7–12	7–11
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
GAL	HPL, м	61	71	47	446
	VPL, м	135	113	332	740
	PDOP	2,1	1,8	2,1	4,6
	Видимые спутники	7–9	6–11	4–12	2–9
	Доступность при NPA	1,00	0,9983	0,9232	0,8102

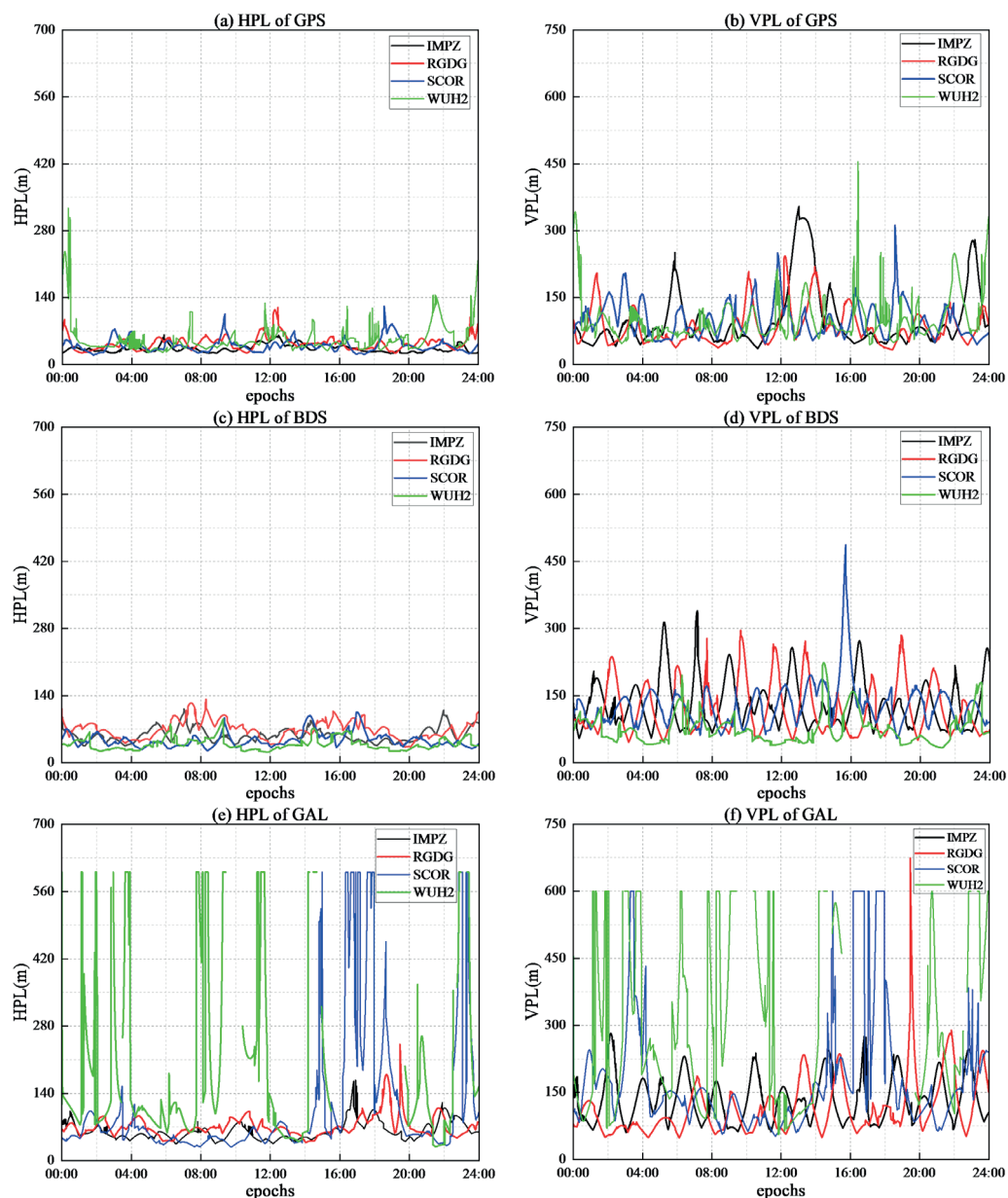


Рис. 3. VPL/HPL для одиночной двухчастотной ГНСС

3.2. Возможность реализации RAIM при совместном использовании двух ГНСС

3.2.1. Одночастотный режим

С помощью RAIM в одночастотном режиме были вычислены значения HPL/VPL для комбинаций из двух ГНСС – GPS/Galileo, GPS/BDS и BDS/Galileo, как показано на рис. 4. Полученные для каждой станции мониторинга результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты экспериментов при использовании комбинаций из двух одночастотных ГНСС

Станция		IMPZ	RGDG	SCOR	WUH2
GPS/Galileo	HPL, м	6	8	6	9
	VPL, м	14	13	15	18
	PDOP	1,2	1,1	1,3	1,6
	Видимые спутники	16–21	15–22	13–23	9–18
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV I	1,00	1,00	1,00	1,00
GPS/BDS	HPL, м	6	7	7	6
	VPL, м	16	13	21	12
	PDOP	1,2	1,1	1,2	1,4
	Видимые спутники	16–22	15–23	14–24	14–21
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV I	1,00	1,00	0,995	1,00
BDS/Galileo	HPL, м	8	9	8	8
	VPL, м	18	14	22	15
	PDOP	1,3	1,2	1,3	1,5
	Видимые спутники	14–19	14–21	13–22	10–19
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV I	1,00	1,00	0,979	1,00

Вычисления для системы из двух одночастотных ГНСС, а также данные рис. 4 и табл. 5 позволяют прийти к выводам:

- 1) по сравнению с одиночной ГНСС комбинации из двух систем дают возможность увеличить рабочее созвездие на 3–20 спутников, при этом уменьшается PDOP. Кроме того, средние значения HPL и VPL снижаются на несколько десятков и даже сотен метров. Доступность RAIM при неточном заходе на посадку составляет 100%, а при точном по протоколу APV I – свыше 97%;
- 2) в случае двухкомпонентных комбинаций GPS/Galileo, GPS/BDS и BDS/Galileo среднее значение HPL для каждой станции мониторинга находится в пределах 5–9 м, а VPL – 12–23 м. Эти показатели отвечают требованиям к горизонтальному (HAL) и вертикальному (VAL) пределам предупреждения – 40 и 50 м соответственно – при заходе на посадку по протоколу APV I;
- 3) комбинации GPS/BDS и BDS/GAL позволяют уменьшить среднее значение HPL, вырабатываемое станциями мониторинга в Азиатско-Тихоокеанском регионе, в частности WUH2, на 0,6–1,5 м по сравнению со станциями в Америке и Европе, а среднее значение VPL – на 2–9 м. В то же время при комбинации GPS/Galileo среднее значение HPL, определяемое станциями мониторинга в Америке и Европе, в том числе IMPZ, на 1–2,5 м ниже, чем в Азиатско-Тихоокеанском регионе, а VPL – меньше на 2,5–5 м.

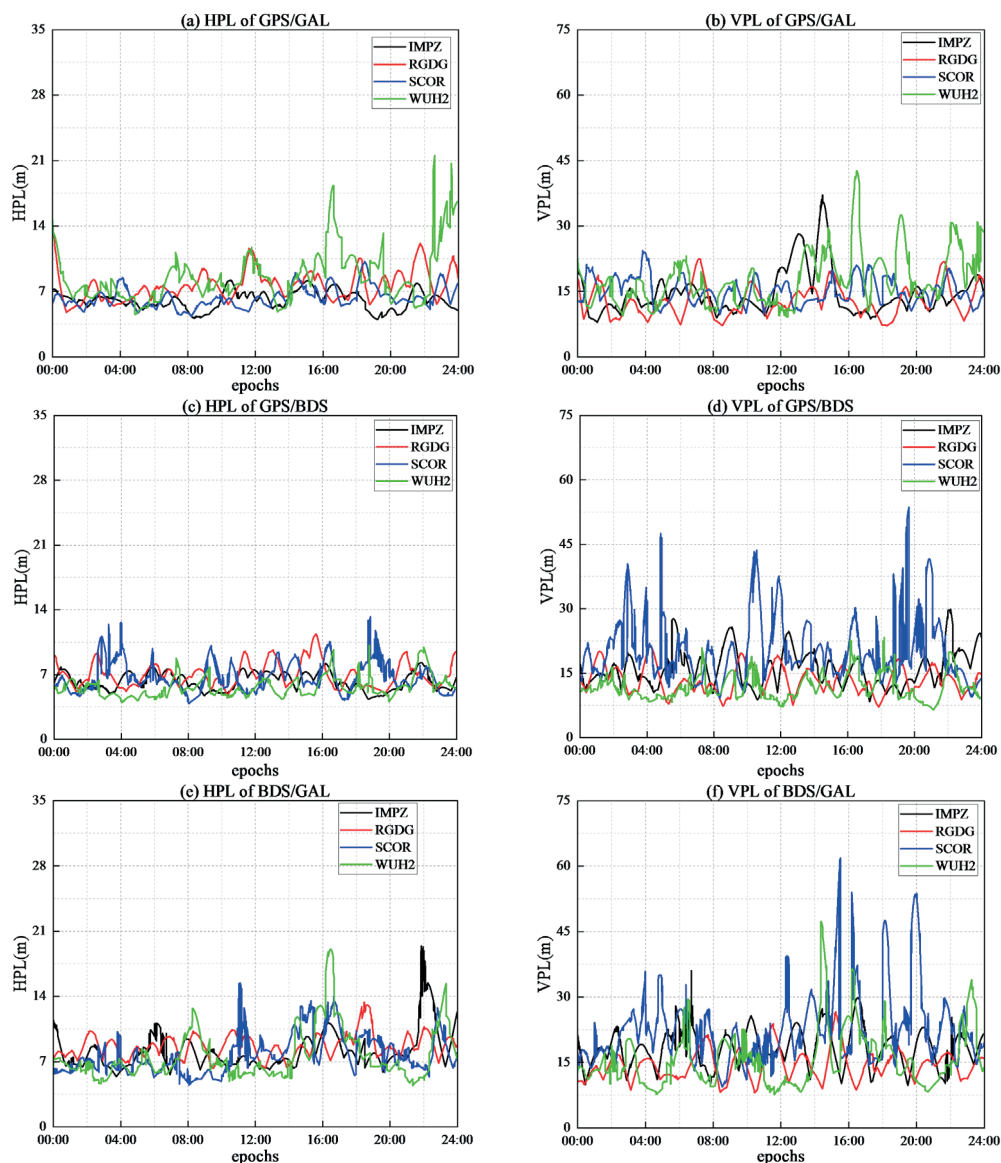


Рис. 4. VPL/HPL для комбинаций из двух одночастотных ГНСС

3.2.2. Двухчастотный режим

Уровни защиты были вычислены с использованием RAIM для двухкомпонентных комбинаций GPS/Galileo, GPS/BDS и BDS/Galileo в двухчастотном режиме, как показано на рис. 5. Результаты для каждой станции мониторинга представлены в табл. 6.

Исходя из расчетов, выполненных для комбинации из двух двухчастотных ГНСС, а также по данным рис. 5 и табл. 6 можно сделать следующие заключения:

- 1) для комбинаций из двух ГНСС – GPS/Galileo, GPS/BDS и BDS/Galileo – среднее значение HPL, полученное для каждой станции мониторинга, варьируется от 5 до 9 м, а среднее значение VPL – от 11 до 19 м. Эти величины отвечают требованиям при заходе на посадку по протоколу APV I;

- 2) две двухчастотные ГНСС обеспечивают целостность сигнала лучше, чем одностотные. Разница между средними значениями VPL для комбинации GPS/Galileo в одно- и двухчастотном режиме составляет до 0,1 м. Среднее значение VPL для GPS/BDS и BDS/Galileo в двухчастотном режиме на 0,1–5 м меньше, чем в одностотном, причем станция SCOR зафиксировала снижение примерно на 5 м. При этом доступность RAIM при заходе на посадку по протоколу APV I достигла 100%;
- 3) для комбинаций GPS/BDS и BDS/Galileo среднее значение HPL, зафиксированное станциями мониторинга в Азиатско-Тихоокеанском регионе (WUH2), на 0,5–1,5 м меньше, чем в Америке и Европе, а среднее значение VPL – меньше на 2–4 м. Напротив, в случае GPS/Galileo на территории Америки и Европы (станция IMPZ) среднее значение HPL меньше на 1–2,5 м, а среднее значение VPL – на 2,7–5 м, чем в Азиатско-Тихоокеанском регионе.

Таблица 6

Результаты экспериментов при использовании комбинаций из двух двухчастотных ГНСС

Станция		IMPZ	RGDG	SCOR	WUH2
GPS/Galileo	HPL, м	6	8	6	9
	VPL, м	14	13	15	18
	PDOP	1,2	1,1	1,3	1,6
	Видимые спутники	16–21	15–22	12–24	7–18
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV I	1,00	1,00	1,00	0,9997
GPS/BDS	HPL, м	6	7	6	6
	VPL, м	16	13	16	11
	PDOP	1,2	1,1	1,2	1,4
	Видимые спутники	16–22	15–23	16–23	14–21
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV I	1,00	1,00	1,00	1,00
BDS/Galileo	HPL, м	8	9	7	7
	VPL, м	18	14	18	15
	PDOP	1,3	1,2	1,3	1,7
	Видимые спутники	14–19	14–21	13–22	10–19
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV I	1,00	1,00	1,00	1,00

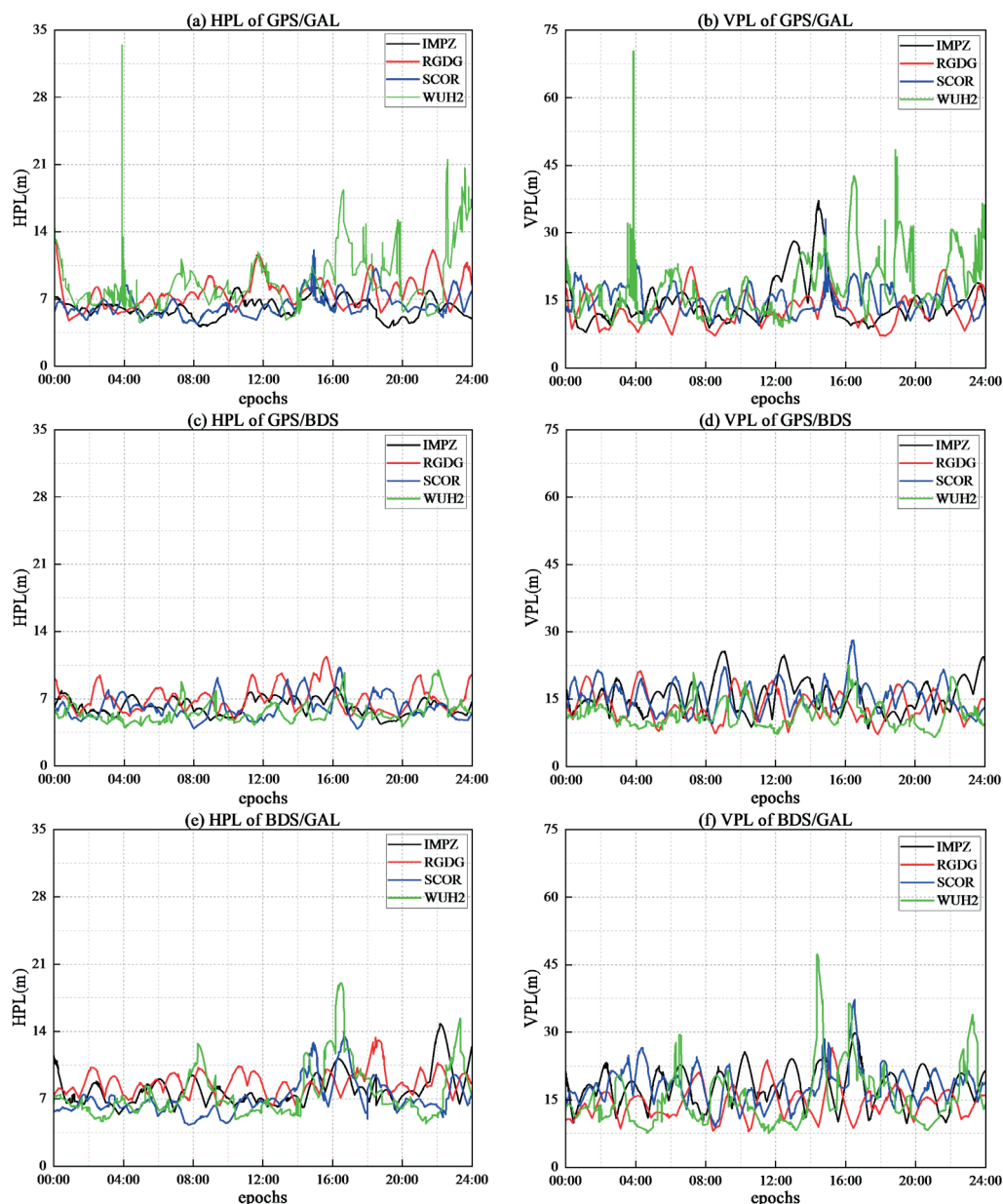


Рис. 5. VPL/HPL для комбинаций из двухчастотных систем

3.3. Доступность RAIM при использовании комбинаций из трех ГНСС

3.3.1. Одночастотный режим

С применением RAIM были вычислены уровни защиты для комбинации из трех ГНСС – GPS/BDS/Galileo в одночастотном режиме, как показано на рис. 6. Результаты для каждой станции мониторинга представлены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты экспериментов при использовании комбинации из трех одночастотных ГНСС

Станция		IMPZ	RGDG	SCOR	WUH2
GPS/BDS/Galileo	HPL, м	4	5	4	4
	VPL, м	11	9	12	10
	PDOP	1,0	0,9	1,0	1,2
	Видимые спутники	23–30	23–32	20–33	17–28
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV I	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV II	0,9896	1,00	1,00	1,00
	Доступность для CAT I	0,9649	1,00	0,8549	0,9538
	Доступность для CAT II	0,4035	0,6226	0,1625	0,6153

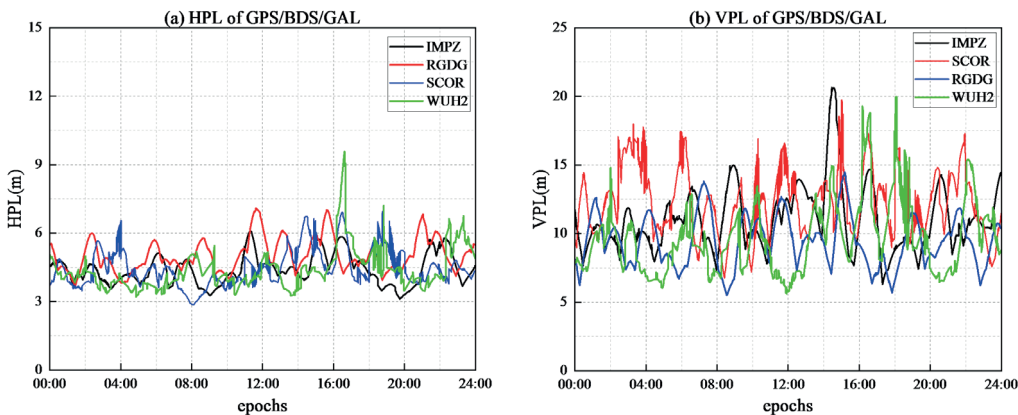


Рис. 6. VPL/HPL для трех одночастотных ГНСС

Расчеты, произведенные для комбинации из трех одночастотных ГНСС, а также данные рис. 6 и табл. 7 позволяют прийти к следующим выводам:

- 1) для комбинации из трех ГНСС средние значения HPL и VPL уменьшаются на 1–5 м по сравнению с комбинациями из двух систем, а значение PDOP – примерно на 0,2. Это менее существенные улучшения по сравнению с переходом от одиночных ГНСС к двум ГНСС;
- 2) среднее значение HPL по данным каждой станции при использовании комбинации из трех одночастотных систем – GPS/BDS/Galileo – находится в пределах 4–6 м, а VPL – 9–13 м. Доступность RAIM при NPA и заходе на посадку по протоколу APV I достигает 100%, а по протоколу APV II превышает 98,9%. Станции мониторинга RGDG и другие отвечают требованиям для CAT I, согласно которым значение HAL составляет 40 м, а VAL – 10–15 м. Вместе с тем требуемые при CAT II величины 17 м для HAL и 10 м для VAL здесь не достигнуты.

3.3.2. Двухчастотный режим

На рис. 7 приведены уровни защиты, найденные с помощью RAIM для комбинации из трех ГНСС – GPS/BDS/Galileo в двухчастотном режиме. Статистические результаты для каждой станции мониторинга даны в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

Результаты экспериментов при использовании комбинации из трех двухчастотных ГНСС

Станция		IMPZ	RGDG	SCOR	WUH2
GPS/BDS/GAL	HPL, м	4	5	4	4
	VPL, м	11	9	11	9
	PDOP	1,0	0,9	1,0	1,2
	Видимые спутники	24–30	23–32	22–32	17–28
	Доступность при NPA	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV I	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для APV II	1,00	1,00	1,00	1,00
	Доступность для CAT I	0,9649	1,00	0,9764	0,9681
	Доступность для CAT II	0,4135	0,6205	0,3326	0,6552

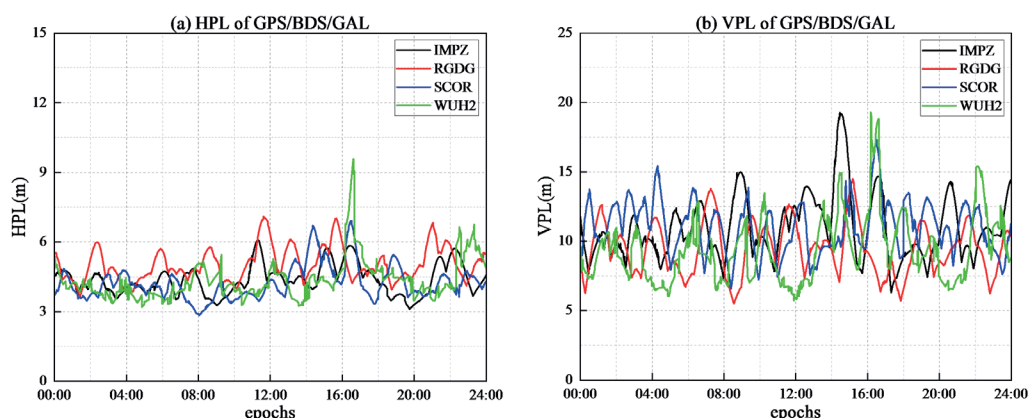


Рис. 7. VPL/HPL для комбинации из трех двухчастотных ГНСС

На основании вычислений для комбинации из трех двухчастотных ГНСС, а также по данным рис. 7 и табл. 8 можно сделать следующие выводы:

- 1) среднее значение HPL, зафиксированное каждой станцией, при комбинации двухчастотных GPS/BDS/Galileo составляет 4–5,1 м, а среднее значение VPL – порядка 9–12 м. Доступность RAIM для APV II достигает 100%, а в случае CAT I – более 96%. Требования для CAT II все-таки не могут быть выполнены;
- 2) в отличие от одночастотного двухчастотный режим обеспечивает уменьшение среднего значения VPL на величину до 1 м. При этом доступность RAIM повышается: достигает 100% для APV II и увеличивается на 1–17% для CAT.

Статистические данные по HPL/VPL, полученные от 18 станций MGEX в одночастотном режиме, представлены на рис. 8, а в двухчастотном режиме – на рис. 9. На каждом графике обоих рисунков имеются по две вертикальные оси, из них по левой (черного цвета) отложены результаты, полученные для одиночной ГНСС, а по правой (красного цвета) – для комбинаций из двух и трех ГНСС. График для одиночной ГНСС – усредненный результат для GPS, BDS и Galileo; график для комбинаций из двух ГНСС – усредненный результат для GPS/Galileo, GPS/BDS и BDS/Galileo.

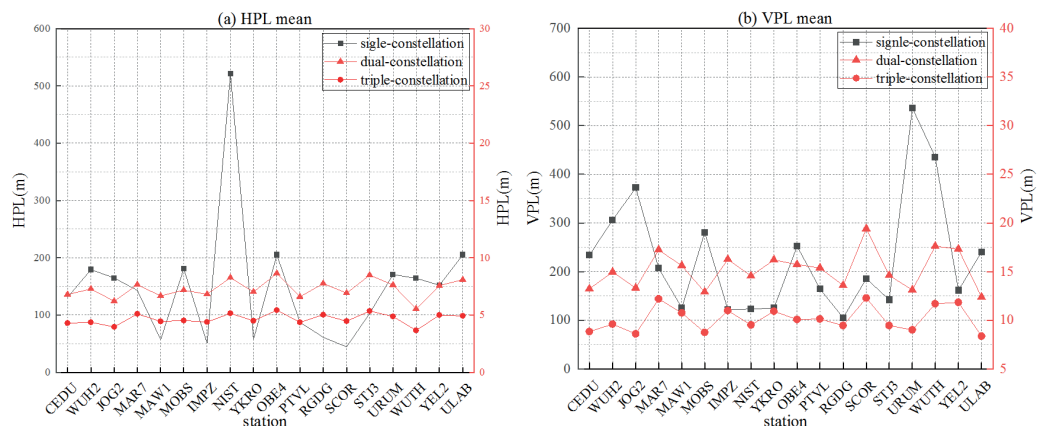


Рис. 8. Статистические данные по HPL/VPL в одночастотном режиме

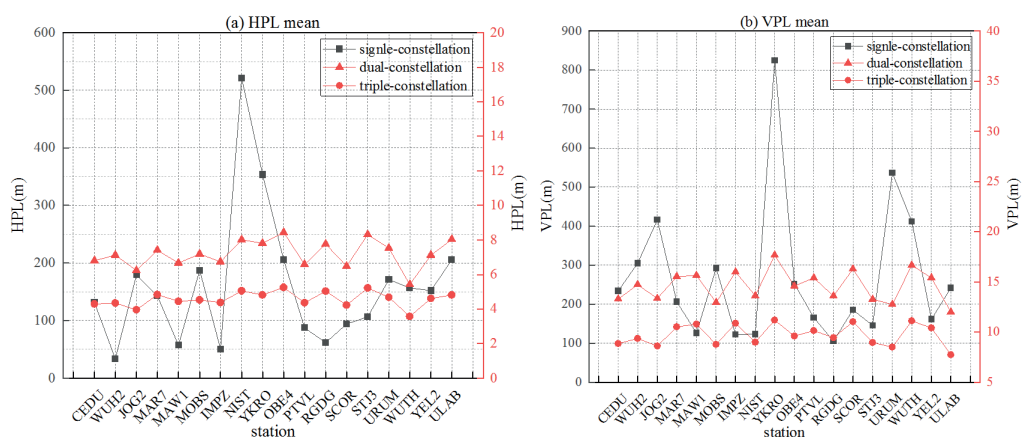


Рис. 9. Статистические данные по HPL/VPL в двухчастотном режиме

Как видно из рис. 8 и 9, среднее значение HPL в случае комбинаций из нескольких ГНСС уменьшается примерно на 46,22–516,31 м по сравнению с одиночными ГНСС, а среднее значение VPL снижается на 95,61–527,68 м. Эти результаты достигнуты благодаря увеличению числа видимых спутников и улучшению PDOP. Доступность RAIM при использовании комбинаций ГНСС достигает 100% для APV I. При комбинации из трех ГНСС среднее значение HPL уменьшается на 1,85–3,2 м, а среднее значение VPL – на 4,01–7,13 м по сравнению с комбинациями из двух ГНСС, тогда как доступность RAIM повышается лишь незначительно. Дело в том, что в этом случае добавление новых спутников мало влияет на общую геометрическую конфигурацию. Вместе с тем большее количество спутников приводит к увеличению вычислительной нагрузки, и этот факт уже отмечался в литературе [23]. Таким образом, на практике целесообразно задействовать наиболее экономичные комбинации из двух ГНСС.

Закключение

В работе проанализирована эффективность применения алгоритма RAIM с учетом средних значений HPL/VPL, вычисленных с помощью систем GPS, BDS

и Galileo, и данных, полученных от 18 станций мониторинга MGEX, распределенных по всему миру. Рассматривались сценарии с одиночными ГНСС и их двух- и трехкомпонентными комбинациями как в одночастотном, так и в двухчастотном режимах. Результаты свидетельствуют о том, что при использовании комбинаций из нескольких многочастотных систем доступность RAIM улучшается. Кроме того, сделан ряд выводов.

1. На этапе неточного захода на посадку одиночные системы GPS и BDS могут обеспечить доступность RAIM, и лишь в случае одной Galileo не все станции способны удовлетворять этим требованиям. При комбинациях из двух ГНСС доступность RAIM составляет 99% при заходе на посадку по протоколу APV I. Если задействовать комбинации из трех ГНСС, доступность RAIM при APV I достигает 100%, а некоторые станции способны отвечать требованиям к эффективности RAIM при APV II, CAT I и CAT II.
2. По сравнению с одиночными ГНСС комбинации из нескольких систем позволяют увеличить количество видимых спутников, снизить средние значения HPL/VPL и PDOP, а также повысить точность определения местоположения и надежность контроля целостности. При использовании комбинации из двух ГНСС в одночастотном режиме среднее значение HPL/VPL уменьшается на 50–523 м, а при трех ГНСС в одночастотном режиме – на 52–527 м. В случае двухкомпонентных систем большинство станций мониторинга способны поддерживать требуемые значения HPL/VPL при заходе на посадку по протоколу APV I. HPL/VPL при комбинациях из трех и двух ГНСС отличаются незначительно – на 2–4 м. Пользователи могут выбирать комбинации из двух или трех ГНСС в соответствии со своими возможностями и предпочтениями.
3. Разница между средними значениями HPL/VPL для одной и двух ГНСС в одночастотном режиме составляет 0–7 м; комбинация из нескольких систем в двухчастотном режиме позволяет снизить эти значения на величину до 3 м по сравнению с одночастотным режимом. С одной стороны, для определения местоположения в двухчастотном режиме не годятся спутники, транслирующие сигналы только на одной частоте, вследствие чего количество видимых спутников уменьшается, а это в свою очередь влияет на точность и надежность контроля целостности. С другой стороны, с помощью двухчастотной безионосферной комбинации эффективно решается проблема ионосферной задержки, благодаря чему повышается точность и надежность контроля целостности. По-видимому, для одиночных ГНСС меньшее число видимых спутников компенсируется за счет безионосферной двухчастотной комбинации, в итоге разница между средними значениями HPL/VPL в одно- и двухчастотном режимах минимальна. В случае комбинаций из двух и трех ГНСС количество видимых спутников достаточно велико, поэтому его сокращение в условиях двухчастотного режима на общие показатели влияет незначительно. Таким образом, комбинации из нескольких двухчастотных систем позволяют уменьшить среднее значение HPL/VPL по сравнению с одночастотными.
4. Возможности контроля целостности сигналов одиночной ГНСС и комбинаций из двух систем зависят от географических факторов. При использовании одиночных ГНСС наименьшие значения HPL/VPL были получены для BDS в Азиатско-Тихоокеанском регионе и для GPS в Северной и Южной Аме-

рике и в Европе. В случае комбинаций из двух ГНСС наименьшие значения HPL/VPL наблюдались для GPS/Galileo в Северной и Южной Америке и в Европе и GPS/BDS и BDS/Galileo в Азиатско-Тихоокеанском регионе. При комбинации из трех ГНСС такие географические различия отсутствуют.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hossam-E-Haider, M.**, *Research on Check Space Method in RAIM Technology*, Beijing: Beihang University, 2000.
2. **Zhang, Y., Li, D.R.**, Multi-star failure monitoring algorithm based on RAIM, *Command Control and Simulation*, 2020, vol. 42, no. 3, pp. 47–51, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2020.03.009>.
3. **Zhang, Q., Zhao, L., and Zhou, J.**, Improved method for single and multiple GNSS faults exclusion based on consensus voting, *Journal of Navigation*, 2019, vol. 72, no. 4, pp. 987–1006, <https://doi.org/10.1017/S0373463318001133>.
4. **Luo, M., Dang, J., Hao, Z., and Zhang, Z.**, A CIPSO-FCM-based RAIM algorithm for the GPS/BDS integrated navigation system, *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 140983–140990, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119704>.
5. **Fan, L., Tu, R., Zhang, R., et al.**, ARAIM availability of BDS-2 and BDS-3 in the global LPV-200 approach, *Gyroscopy and Navigation*, 2022, vol. 13, pp. 294–303, <https://doi.org/10.1134/S2075108722040058>.
6. **Liu, L., et al.**, Review of receiver autonomous integrity monitoring in aircraft approach phase, *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2023, vol. 44, no. 6, pp. 605–615 (in Chinese), <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3193.2023.06.004>.
7. **Han, L., Lu, H., Xie, Y., and Chen, C.**, A novel RAIM algorithm for single-frequency GNSS receiver based on virtual triple-frequency techniques, *Proc. China Satellite Navigation Conference (CSNC)*, Volume II, Lecture Notes in Electrical Engineering, Berlin: Springer, 2015, vol. 341, https://doi.org/10.1007/978-3-662-46635-3_13.
8. **Guo, J., Lu, M., Cui, X., and Feng, Z.**, A new RAIM algorithm for triple-frequency GNSS receivers, *Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, CA, January 2011, pp. 271–278.
9. **Liu, B., Gao, Y., and Zhan, X.**, Code phase tracking error based autonomous integrity monitoring for GNSS/INS ultra-tightly integrated system, *Advances in Space Research*, 2022, vol. 69, no. 10, pp. 3785–3797, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.040>.
10. **Yang, S., Zhang, X., Tan, Z. et al.**, Optimization of RAIM based on dual-frequency dual-system INS integrated navigation system, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2024, vol. 26, pp. 1279–1292. <https://doi.org/10.1007/s42405-024-00788-4>.
11. **Brown, R.G., Kraemer, J.H., and Nim, G.C.**, Comparison of FDE and FDI RAIM algorithms for GPS, *Proceedings of ION NTM-94*, 1994, pp. 51–60.
12. **Wang, E., Deng, X., Guo, J., Qu, P., and Pang, T.**, Improved BDS RAIM algorithm based on M-estimation, *Proc. China Satellite Navigation Conference (CSNC)*, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Singapore: Springer, 2021, vol. 773, https://doi.org/10.1007/978-981-16-3142-9_15.
13. **Ma, X., Yu, K., Wang, E., et al.**, Evaluation of BDS and GPS RAIM availability based on data collected in June 2020, *Geodesy and Geodynamics*, 2021, vol. 12, no. 3, pp. 181–189, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.03.003>.
14. **Chen, K., et al.**, An improved integrity monitoring algorithm for GNSS receiver, *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2021, vol. 26(03), pp. 103–107, <https://doi.org/10.15938/j.jhust.2021.03.015>.
15. **Wang, E., Yang, F., Pang, T., et al.**, BDS/GPS combined navigation receiver autonomous integrity monitoring algorithm, *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, vol. 44(4), pp. 684–690 (in Chinese), <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0277>.
16. **Yang, Y., Xu, J.**, GNSS receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) algorithm based on robust estimation, *Geodesy and Geodynamics*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 117–123, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.04.004>.
17. **Angrisano, A., Gaglione, S., Crocetto, N. et al.**, PANG-NAV: a tool for processing GNSS measurements in SPP, including RAIM functionality, *GPS Solutions*, 2020, vol. 24, p. 19, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0935-y>.

18. Hao, A., et al., Integrity analysis of GNSS single system and multi-system combination, *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, vol. 45(1), pp. 72–80, <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180425>.
19. Jiang, H., Yuan, Y., Wang, H., Ou, J., and Jiang, Z., Multi-GNSS RAIM availability algorithms and analysis for precise approach, *Journal of Chinese Space Science and Technology*, 2016, vol. 36(3), pp. 32–40, <https://doi.org/10.16708/j.cnki.1000-758X.2016.0028>.
20. Xu, J., Yang, Y., Li, J. et al., Integrity analysis of COMPASS and other GNSS combined navigation, *Science China Earth Sciences*, 2013, vol. 56, pp. 1616–1622, <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4647-9>.
21. Li, Z., Huang, J., *GPS Measurement and Data Processing*. Wuhan: Wuhan University Press, 2010.
22. Kuusniemi, H., Lachapelle, G., and Takala, J.H., Position and velocity reliability testing in degraded GPS signal environments, *GPS Solutions*, 2004, vol. 8, pp. 226–237, <https://doi.org/10.1007/s10291-004-0113-7>.
23. Wang, H., Cheng, Y., Cheng, C., Li, S., and Li, Z., Research on satellite selection strategy for receiver autonomous integrity monitoring applications, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13(9), p. 1725, <https://doi.org/10.3390/rs13091725>.

Li Zhaoyan, Fan Lihong, Zou Decai (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, China; University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China), **Tu Rui** (College of Geomatics of Shandong University of Science and Technology, Qingdao, China), **Zhang Rui** (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences; University of Chinese Academy of Sciences), **Han Junqiang, Wang Siyao** (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences), **Dong Rongrong** (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences; University of Chinese Academy of Sciences)

RAIM Availability of GPS/BDS/Galileo Multi-Frequency Combination, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 2 (129), pp. 72–90.

Abstract. In critical safety domains like civil aviation, Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) supports integrity services from oceanic routes to non-precision approaches (NPA). The expansion of GNSS (Global Navigation Satellite System) civil frequencies improves these services. To evaluate RAIM availability enhancements from Multi-Frequency Multi-System (MFMS) integration, observation data and broadcast ephemeris from 18 global Multi-GNSS Experiment (MGEX) stations were analyzed for GPS/BDS/Galileo (Global Positioning System/BeiDou Navigation Satellite System/Galileo Navigation Satellite System) combinations. The results indicate that MFMS integration significantly improves positioning and integrity performance compared to single-system operation.

Key words: RAIM, Multi-Frequency Multi-System, availability, HPL/VPL.

Материал поступил 10.02.2025