

УДК 550.388.2

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

Оценка качества алгоритма контроля доступности WAAS в условиях умеренной геомагнитной бури

В. В. Демьянов^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-2893-9522, sword1971@yandex.ru

Д. С. Халиманов^а, аспирант, orcid.org/0000-0002-9389-6701

М. Э. Федоров^а, старший преподаватель, orcid.org/0000-0002-4043-4730

О. Б. Имарова^а, магистрант, orcid.org/0000-0001-7087-4000

^аИркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского ул., 15, Иркутск, 664074, РФ

Введение: известно, что американская широкозонная дифференциальная система WAAS характеризуется повышенной вероятностью ложной тревоги о нарушении доступности требуемых навигационных характеристик в условиях геомагнитных возмущений. Следствием этого может стать снижение эффективности работы WAAS из-за несоответствия выходной информации системы контроля доступности требуемых навигационных характеристик фактическому качеству навигационно-временного обеспечения. **Цель:** сравнительный анализ фактического качества навигационно-временного обеспечения пользователей спутниковой навигационной системы GPS и выходной информации системы контроля доступности требуемых навигационных характеристик WAAS в условиях умеренной магнитной бури, а также при наличии технических сбоев в работе отдельных сегментов систем GPS и WAAS. **Результаты:** по региону США, для 82 опорных станций, оборудованных навигационными приемниками GPS, были рассчитаны погрешности местоопределения. При расчетах использовались геометрические дальности видимых навигационных спутников и соответствующие реальные значения ионосферной дальномерной погрешности, которые определялись методом двухчастотных измерений. На основании этих же данных и с использованием известного типового алгоритма контроля доступности WAAS вычислялись уровни защиты пользователей в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Результаты этих вычислений представлены в виде временного графика зависимости процента зоны покрытия рабочей зоны WAAS, который сравнивался с соответствующими графиками, представленными в официальных отчетах о работе WAAS. Установлено, что имеют место случаи существенного рассогласования между прогнозами доступности требуемых навигационных характеристик по данным WAAS и реальным качеством позиционирования в рабочей зоне этой системы. Обнаружены рассогласования в результатах расчетов уровней защиты в горизонтальной и вертикальной плоскостях, полученных из официальных отчетов о работе системы и вычисленных на основе геометрической дальности и реальной ионосферной дальномерной погрешности. **Практическая значимость:** предложенные рекомендации для пересмотра концепции построения системы контроля доступности требуемых навигационных характеристик широкозонных дифференциальных систем с разделением расчета «локально зависимых» и «глобально зависимых» компонент дифференциальных поправок дальномерных погрешностей позволят снизить вероятность появления ложной тревоги или опасного рассогласования информации в системе.

Ключевые слова – контроль доступности, целостность, требуемые навигационные характеристики, WAAS, дифференциальные системы.

Для цитирования: Демьянов В. В., Халиманов Д. С., Федоров М. Э., Имарова О. Б. Оценка качества алгоритма контроля доступности WAAS в условиях умеренной геомагнитной бури. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 46–59. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

For citation: Demyanov V. V., Khalimanov D. S., Fedorov M. E., Imarova O. B. Evaluating the quality of WAAS availability control algorithm under geomagnetic storm conditions. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 46–59 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

Введение

Широкозонная дифференциальная система (ШДС) является средством повышения точности определения местоположения пользователей спутниковых радионавигационных систем и обеспечивает контроль доступности требуемых навигационных характеристик (ТНХ) пользователей различных категорий в пределах рабочей зоны. Максимально допустимые погрешности определения местоположения образуют границы «цилиндра безопасности» — области пространства, в пределах которой должен фактически находиться пользователь, чтобы не нарушить ТНХ, соответствующие данной категории

пользователя и решаемой им задачи. Средства ШДС позволяют формировать вектор дифференциальных поправок, содержащий компоненты погрешности текущих дальномерных измерений спутников радионавигационной системы, а также передавать пользователям оперативную информацию, которая помогает оценивать фактическую текущую доступность заданных ТНХ с некоторой доверительной вероятностью [1]. Текущая доступность ТНХ оценивается в аппаратуре пользователя системы в виде «уровней защиты», т. е. ожидаемой с определенной вероятностью погрешности определения местоположения в плане и по высоте с учетом погрешностей дальномерных измерений и геометрии наблюдаемого

навигационного созвездия спутников [2]. В зависимости от группы ТНХ, которая определяется категорией пользователя, пользовательское оборудование вычисляет только горизонтальный уровень защиты (Horizontal Protection Level — HPL) либо и горизонтальный и вертикальный (Vertical Protection Level — VPL) уровни защиты. Выход вычисленного значения HPL или VPL за границы области пространства допустимых погрешностей («цилиндра безопасности») сигнализирует о недоступности ТНХ в текущий момент времени. При этом гарантируется, что фактическая ошибка определения местоположения пользователя должна быть меньше значений уровней защиты в течение 99,99999 % времени.

В настоящее время наиболее известным и открытым для независимых исследований типом ШДС является американская система WAAS (Wide Area Augmentation System), которая поддерживает высокие ТНХ пользователей GPS в пределах рабочей зоны, охватывающей территорию США и Канады. В частности, при использовании средств WAAS для поддержания ТНХ авиационных потребителей на континентальной территории США (CONUS) и Аляски вводятся следующие пределы «цилиндра безопасности» [3]:

— полет в зоне аэродрома (режим LP) — ТНХ доступны, если $HPL \leq 40$ м;

— некатегоризированный заход на посадку без введения в вертикальной плоскости (режим LPV) — ТНХ доступны, если $VPL \leq 50$ м и $HPL \leq 40$ м;

— категоризированный заход на посадку с введением в вертикальной плоскости до высоты принятия решения, равной 60 м (200 футов) (режим LPV200) — ТНХ доступны, если $VPL \leq 35$ м и $HPL \leq 40$ м.

Входными данными для определения уровней защиты HPL и VPL, которые сообщаются пользователям системы через геостационарные спутники WAAS, являются компоненты относительной дальномерной погрешности (User Differential Range Error — UDRE) по каждому из видимых спутников GPS и соответствующая ионосферная дальномерная погрешность (User Ionospheric Range Error — UIRE). Величина UDRE характеризует остаточную погрешность после учета кратковременных и долговременных дифференциальных поправок погрешности частотно-временного и эфемеридного обеспечения. Величина UIRE соответствует остаточной ионосферной дальномерной погрешности, возникающей после коррекции этой погрешности [3].

Очевидно, что надежность контроля доступности ТНХ средствами WAAS зависит от того, насколько модели компонент дальномерных погрешностей UDRE и UIRE соответствуют реальным условиям определения местоположения. «Если говорить о погрешностях эфемеридного и

частотно-временного обеспечения, можно сказать, что данные погрешности носят «глобальный» характер, который не зависит от местных условий наблюдения. Этот тип погрешностей имеет монотонный закон изменения во времени (дрейф погрешности), который в большинстве случаев хорошо известен, и текущая величина такой погрешности прогнозируется и корректируется с высокой точностью. В то же время ионосферная дальномерная погрешность имеет локальный характер, ярко выраженную ракурсную зависимость и часто непредсказуемо изменяется в значительных пределах, особенно в условиях геомагнитных возмущений, а также в условиях высокоширотной и низкоширотной ионосферы» [2]. Соответственно, точность определения местоположения пользователя на плоскости и, особенно, по высоте уязвима к возмущениям в ионосфере. В средних широтах такие возмущения в большинстве случаев возникают в течение основной фазы геомагнитной бури и вызывают рост дальномерной погрешности, а также кратковременные сбои в приеме сигналов отдельных спутников.

Самыми главными для вычисления текущей ионосферной дальномерной погрешности по каждому из видимых спутников в произвольной точке наблюдений в пределах рабочей зоны WAAS являются значения «вертикальных» ионосферных погрешностей дальномерных измерений (Grid Ionospheric Vertical Error — GIVE). Значения GIVE рассчитываются в узлах равномерной интерполяционной сети в пределах рабочей зоны WAAS на главной опорной станции WAAS и транслируются всем пользователям системы через геостационарный спутник (INMARSAT, AORE). Точки этой интерполяционной «ионосферной сети», покрывающей весь Северо-Американский континент, размещены равномерно с расстоянием 5° по широте и 5° по долготу. Текущая величина GIVE в каждом из узлов интерполяции оценивается с помощью интерполяции на неравномерной сети первичных измеренных «вертикальных» ионосферных дальномерных погрешностей. Последние, в свою очередь, получены путем пересчета из текущего набора «наклонных» измерений ионосферной дальномерной погрешности от всех видимых спутников GPS на контрольно-корректирующих станциях наземного сегмента WAAS. При этом пересчете принята модель сферически слоистой ионосферы с фиксированной высотой максимума ионизации 350 км. В конечном итоге пользователь WAAS определяет текущую ионосферную дальномерную погрешность в произвольной точке своего расположения с помощью линейной интерполяции по значениям GIVE, взятым из ближайших трех или четырех точек опорной «ионосферной сети». Таким образом, пользователь системы может оценить

текущую ионосферную погрешность по каждому из видимых спутников в пределах всей рабочей зоны, независимо от своего удаления от опорных станций наземного сегмента WAAS.

Можно видеть, что дифференциальные поправки на ионосферную погрешность определяются путем двойной интерполяции, да еще и с пересчетом из «наклонных» погрешностей в «вертикальные» на основе простой сферически-слоистой модели ионосферы. Поэтому они часто плохо соответствуют реальному состоянию возмущенной ионосферы. В силу сказанного оценка величины GIVE во всей рабочей зоне WAAS по одному и тому же алгоритму может оказаться некорректной и вести к завышенным значениям уровней защиты VPL и HPL и, соответственно, к неоправданно заниженной ожидаемой доступности THX в сравнении с реальной ситуацией.

Целью данной работы является оценка фактической эффективности работы алгоритма контроля доступности WAAS в условиях умеренной магнитной бури и при наличии технических сбоев в работе систем GPS и WAAS. Эта оценка проводится нами путем наблюдения соответствия между прогнозами ожидаемой доступности THX в пределах рабочей зоны WAAS и фактическими показателями точности позиционирования пользователя GPS. Выполнено сравнение официальных отчетов мониторинга целостности WAAS [4] и реального качества позиционирования в зоне покрытия WAAS. Реальное качество позиционирования пользователей GPS анализируется для случая автономной навигации с использованием одночастотных измерений радионавигационных параметров по стандартному C/A-коду без ионосферной коррекции (режим Standard Point Positioning — SPP). Результаты исследований позволяют наметить возможности дальнейшего развития технологии широкозонной дифференциальной навигации на основе комбинированного использования принципов работы локальной и широкозонной дифференциальных систем для раздельного оценивания «глобально зависимых» и «локально зависимых» дифференциальных поправок.

Источники данных и методы их обработки

Исследования проводились в условиях умеренной геомагнитной бури, которая началась 14.02.2011 в 19:12 UT (Universal Time) и характеризовалась максимальным планетарным индексом $K_p = 4$ [4]. Основная фаза продолжалась примерно до 03:00 UT следующего дня и сопровождалась длительной фазой восстановления. В большинстве случаев такая умеренная геомагнитная буря не вызывает сильных возмущений в средних широтах ионосферы. Как было установлено ранее

[5], многомасштабные ионосферные возмущения распространяются в сторону среднеширотной зоны от расширяющейся южной границы аврорального овала, которая рассматривается как источник акустико-гравитационных волн, передающих возмущения в ионосферу. Размер области расширения аврорального овала напрямую зависит от силы геомагнитной бури. Поэтому маловероятно, что умеренная геомагнитная буря способна вызвать распространение сильных ионосферных возмущений на всю область средних широт. Однако во время наблюдений имели место и следующие технические сбои функционирования сегментов WAAS и GPS, представленные в отчете.

1. 14.02.2011. Кратковременная потеря связи с геостационарным спутником связи GEO-138 с 12:01:14 UT до 12:01:27 UT — частичная деградация сервисов LPV и LPV200 в областях рабочей зоны.

2. 15.02.2011. Недоступен спутник GPS PRN 21 с 11:15 UT до 20:05 UT; предупреждение о нарушении целостности данных спутника GPS PRN 04 с 11:32 UT до 11:43 UT — частичная деградация сервисов LPV и LPV200 в областях рабочей зоны.

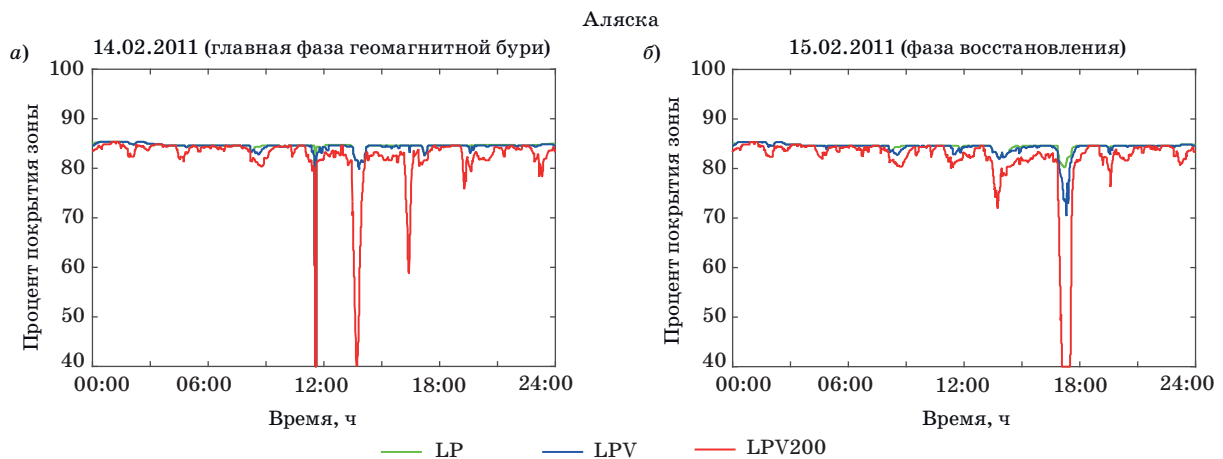
Как можно видеть, прогнозируется частичная деградация качества работы WAAS только по причине возникновения технических сбоев системы, а возможное влияние геомагнитных возмущений, прежде всего на высоких широтах, не принимается во внимание. В связи со всем вышесказанным для проведения исследования были выбраны именно эти дни, чтобы проследить, связаны ли негативные прогнозы WAAS об ожидаемом снижении качества навигации с геомагнитным возмущением. При этом сразу нужно отметить, что первый технический сбой из отчета не повлияет на результаты нашего анализа качества позиционирования в режиме SPP, а также при проведении расчетов уровней защиты HPL и VPL с использованием геометрической дальности и реальных значений ионосферной дальномерной погрешности [см. выражения (1) и (2) далее]. С другой стороны, возможен эффект деградации качества позиционирования за счет временной потери сопровождения спутников GPS PRN 04 и PRN 21 в периоды времени, которые указаны в отчете.

Согласно соответствующему официальному отчету о работе WAAS [6] было выдано предупреждение о снижении области покрытия WAAS сервисом с THX по требованиям LPV200 для территории Аляски на период с 11:30 UT до 17:00 UT 14.02.2011. На рис. 1, а изображен график, показывающий процент области покрытия Аляски на протяжении всего этого дня. Для сравнения на рис. 1, б отображены те же данные за следующий день 15.02, который соответствовал восстановительной фазе геомагнитного возмущения.

ния. Согласно этим рисункам следует ожидать резкого сокращения зоны покрытия WAAS в течение нескольких коротких интервалов времени в районе 11:30 UT, 14:00 UT и 17:00 UT в условиях геомагнитной бури 14.02.2011 и в 17:40–18:00 UT 15.02.2011.

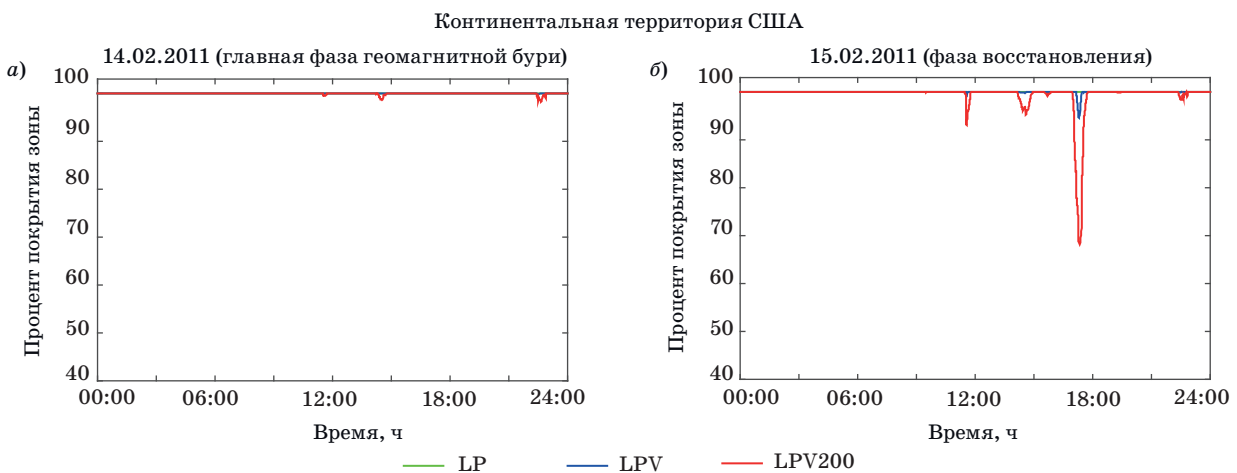
В отличие от территории Аляски, для зоны покрытия континентальной территории США (CONUS) были предоставлены более позитивные предупреждения системы WAAS. Графики отображают процент зоны покрытия CONUS относительно времени UT 14.02.2011 (рис. 2, а) и 15.02.2011 (рис. 2, б). В соответствии с отчетом WAAS 14.02 зона покрытия CONUS не сокращается, но есть предупреждение WAAS о ее резком сокращении примерно в 17:40 UT 15.02.2011.

Оценка реального качества позиционирования пользователей GPS выполняется в режиме SPP без ионосферной коррекции (наихудший вариант ожидаемой точности позиционирования). Вычисление уровней защиты HPL и VPL также выполнялось нами на каждой GPS-станции в исследуемой области на основе использования измеренных ионосферных дальномерных погрешностей без ионосферной коррекции. Таким образом, наши результаты и в случае оценки реального качества позиционирования, и в случае модельного расчета уровней защиты HPL и VPL будут отражать ожидаемое качество позиционирования с учетом воздействия реальной ионосферы без использования дифференциальной коррекции этой погрешности, а также возможной деградации ка-



■ **Рис. 1.** Процент зоны покрытия Аляски относительно времени UT в период основной фазы геомагнитной бури 14.02.2011 (а) и в день фазы восстановления геомагнитной бури 15.02.2011 (б)

■ **Fig. 1.** The percentage of the Alaska coverage area relative to UT during the main phase of the geomagnetic storm on February 14, 2011 (а) and on the day of the geomagnetic storm recovery phase on February 15, 2011 (б)



■ **Рис. 2.** Процент зоны покрытия CONUS относительно времени UT во время основной фазы геомагнитной бури 14.02.2011 (а) и в день фазы восстановления геомагнитной бури 15.02.2011 (б)

■ **Fig. 2.** The percentage of CONUS coverage area relative to UT time during the main phase of the geomagnetic storm on February 14, 2011 (а) and on the day of the geomagnetic storm recovery phase on February 15, 2011 (б)

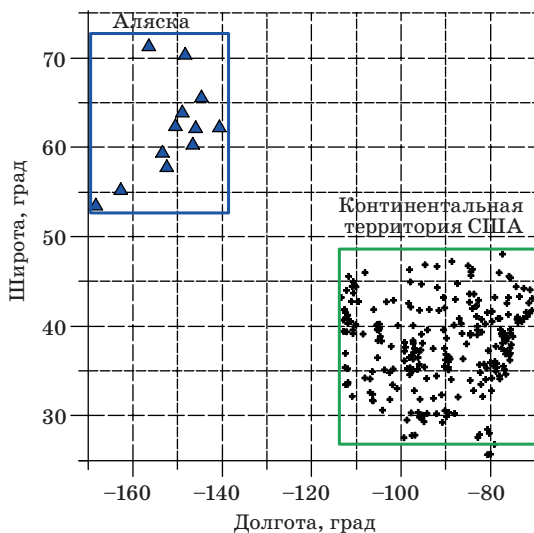
чества позиционирования от потери сопровождения спутников PRN 04 и PRN 21. Очевидно, что ожидаемое качество позиционирования в данном случае будет хуже, чем полученное средствами WAAS после использования дифференциальной коррекции. Однако такой подход позволяет дать независимую оценку фактического соответствия прогнозов WAAS конкретным условиям наблюдения в ионосфере в течение суток.

Для проведения исследований мы использовали файлы данных, которые содержали суточные измерения всех видимых спутников GPS на одной из стационарных станций (GPS-станций), расположенных в двух областях зоны покрытия WAAS — Аляски и CONUS. Для исследования были выбраны доступные нам данные от 12 GPS-станций на территории Аляски и 70 на территории CONUS (рис. 3).

Процесс обработки данных включал следующие шаги.

Шаг 1. Расчет рядов погрешностей определения местоположения для каждой из GPS-станций с 30-секундным временным разрешением [7]. Счет координат каждой станции производился на основании данных, которые содержатся в соответствующем этой станции RINEX-файле, с помощью программной утилиты TEQC [8]. Полученные таким образом координаты и погрешности их определения пересчитывались далее из прямоугольной геоцентрической системы координат в локальную топоцентрическую систему координат.

Шаг 2. Расчет текущих значений HPL и VPL с учетом реальных ионосферных погрешностей для каждого из видимых спутников и на каждой GPS-станции в области Аляски или CONUS. Для



■ Рис. 3. Карта местоположения GPS-станций в зоне покрытия WAAS

■ Fig. 3. The map of the location of GPS stations in the WAAS coverage area

этого была использована математическая модель дальности (ρ_i) в виде суммы геометрической дальности до спутника и ионосферной дальномерной погрешности, которая вычислялась для этого же спутника с помощью двухчастотных дальномерных кодовых измерений следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_i &= R_{GEOM,i} + \Delta R_{ion,i}; \\ R_{GEOM,i} &= \sqrt{(x_{0,i} - x_{US})^2 + (y_{0,i} - y_{US})^2 + (z_{0,i} - z_{US})^2}; \\ \Delta R_{ion,i} &= \frac{40,308}{f_1^2} TEC_i; \\ TEC_i &= \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (C1_i - P2_i), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x_{0,i}$, $y_{0,i}$, $z_{0,i}$ и x_{US} , y_{US} , z_{US} — координаты i -го спутника и GPS-станции в прямоугольной геоцентрической системе координат; TEC_i — полное электронное содержание в ионосфере вдоль линии видимости « i -й спутник — GPS-станция» (в единицах TECU, 1 TECU = 10^{16} 1/м²); $f_1 = 1575,25$ ГГц и $f_2 = 1227,75$ ГГц — рабочие частоты GPS; $C1_i$ — псевдодальность, измеренная с помощью дальномерного C/A-кода открытого доступа на частоте f_1 для i -го спутника; $P2_i$ — псевдодальность, измеренная с помощью точного дальномерного кода ограниченного доступа (P-кода) на частоте f_2 .

Расчет уровней защиты HPL и VPL для каждой GPS-станции выполнялся с использованием дальномерных измерений (1) и с учетом реальной наблюдаемой геометрии спутников для каждой из групп требований LP, LPV и LPV200 [9]:

$$\begin{aligned} HPL &= \begin{cases} K_{HNPA} \cdot D_{mjr} \\ \text{or} \\ K_{HPA} \cdot D_{mjr} \end{cases}; \quad VPL = K_{VPA} \cdot D_V; \\ D_{mjr} &= \sqrt{\frac{D_X^2 + D_Y^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{D_X^2 - D_Y^2}{2}\right)^2 + D_{XY}^2}}; \\ D_X^2 &= \sum_{i=1}^N S_{X,i}^2 \cdot \sigma_i^2; \quad D_Y^2 = \sum_{i=1}^N S_{Y,i}^2 \cdot \sigma_i^2; \\ D_V^2 &= \sum_{i=1}^N S_{V,i}^2 \cdot \sigma_i^2; \quad D_{XY} = \sum_{i=1}^N S_{X,i} \cdot S_{Y,i} \cdot \sigma_i^2; \\ S &= \begin{bmatrix} S_{X,1} & S_{X,2} & \dots & S_{X,N} \\ S_{Y,1} & S_{Y,2} & \dots & S_{Y,N} \\ S_{V,1} & S_{V,2} & \dots & S_{V,N} \\ S_{t,1} & S_{t,2} & \dots & S_{t,N} \end{bmatrix} = \\ &= (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{W}, \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_i — среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренных ионосферных дальномерных погрешностей для i -го спутника; $K_{HNPA} = 6,18$ — коэффициент доверительной вероятности для THX LP; $K_{HPA} = 6,0$ — для THX LPV; $K_{VPA} = 5,33$ — для THX LPV200; G — текущая геометрическая матрица направляющих косинусов «спутники — пользователь»; W — диагональная матрица дисперсии дальномерных погрешностей.

Для вычисления значений σ_i для каждого спутника использовалось усреднение измерений со скользящим временным интервалом $\Delta T = 5$ мин, что соответствует времени обновления дифференциальных поправок в системе WAAS [9].

Шаг 3. Сравнение границ допустимых погрешностей HAL и VAL для режимов LP, LPV и LPV200 и реальных погрешностей позиционирования, которые были рассчитаны на шаге 1 с последующей оценкой процентного соотношения зоны покрытия для Аляски и CONUS, в которых выполняются требования LP, LPV и LPV200, по формуле

$$\% \text{ зоны покрытия} = \frac{N_{TOT}}{N_{FLT}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где N_{TOT} — полное количество GPS-станций в исследуемой области; N_{FLT} — количество GPS-станций, на которых зафиксировано превышение уровней HAL (VAL) для какой-либо из групп требований LP, LPV или LPV200.

Шаг 4. Сравнение вычисленных значений HPL и VPL (2) и соответствующих границ допустимых погрешностей HAL и VAL для групп THX LP, LPV и LPV200 для каждой GPS-станции на территории Аляски и CONUS с последующей оценкой процентного соотношения зоны покрытия, в которой выполняются требования данных сервисов.

Использование двухчастотных измерений для моделирования измерений дальности (1) означает, что текущее значение ионосферных дальномерных погрешностей ($\Delta R_{ion,i}$) содержит не только чистые ионосферные погрешности, но и все другие, зависящие от частоты, дальномерные погрешности. Основными из них являются погрешность многолучевости и дифференциальные задержки сигнала в аппаратуре спутника и приемника [10]. Оценим ожидаемые дальномерные погрешности, которые фактически содержатся в модели измерения дальности (1). Известно, что наиболее вероятное значение «вертикальной» ионосферной погрешности пользователя (UIRE), которое принято в расчетной части алгоритмов WAAS, составляет [9]

$$\Delta R_{UIRE,V} = \begin{cases} 9,0 \text{ м} & 0^\circ \leq \varphi_{PP} \leq 20^\circ \\ 4,5 \text{ м} & 20^\circ < \varphi_{PP} \leq 55^\circ, \\ 6,0 \text{ м} & 55^\circ < \varphi_{PP} \end{cases} \quad (4)$$

где φ_{PP} — широта подионосферной точки, к которой пересчитывается «вертикальная» ионосферная погрешность.

Для преобразования этой величины в соответствующее значение «наклонной» дальномерной погрешности с учетом угла возвышения навигационного спутника можно использовать выражение [11]

$$\Delta R_{UIRE,SLT} = \Delta R_{UIRE,V} \left(1 - \left(\frac{R_E \cos(LEL)}{R_E + h_{F2}} \right)^2 \right)^{-0,5}, \quad (5)$$

где $h_{F2} = 350$ км — уровень самой большой концентрации электронной плотности слоя F2 ионосферы; $R_E = 6378,1363$ км — радиус Земли; LEL — угол возвышения спутника.

На основе той же многолетней статистики наблюдений установлено, что СКО ионосферной дальномерной погрешности колеблется в пределах 2–9 TECU, что соответствует величине UIRE от 0,32 до 1,44 м.

В соответствии с Interface Control Document GPS абсолютная средняя величина дифференциальной задержки сигнала в аппаратуре спутника не должна превышать 15 нс (4,5 м). Величина этой погрешности может быть как положительной, так и отрицательной. При этом СКО данной погрешности, как правило, не превышает 3 нс, т. е. 0,9 м. В действительности величина данной погрешности существенно различается для разных спутников и может варьировать в пределах ± 12 нс (т. е. $\pm 3,6$ м) от одного спутника к другому [12, 13].

Абсолютная средняя величина дифференциальной задержки сигнала в аппаратуре приемника также может иметь положительные и отрицательные значения и существенно зависит как от типа приемника, так и от температуры окружающей среды. Например, согласно [13] указанная погрешность может находиться в пределах ± 40 нс (т. е. ± 12 м) для навигационных приемников типа Trimble 5700 и Trimble NETP. СКО данной погрешности не превышает 2 нс (0,6 м).

Существует множество оценок дальномерных погрешностей, вызванных шумами многолучевости в точке приема сигналов навигационных спутников [14, 15]. Этот вид погрешности обычно считается центрированным гауссовым шумом, СКО которого зависит от угла возвышения спутника. Здесь мы опирались на результаты, полученные в работе [16], согласно которым СКО данной погрешности находится в пределах 0,13–0,4 м в зависимости от угла возвышения спутника.

Учитывая все вышеизложенное, можно ожидать, что абсолютные значения погрешности $\Delta R_{ion,i}$, вычисленной двухчастотным методом по формуле (1), группируются в интервале $-3,2...28$ м

с доверительной вероятностью 99,7 %, а соответствующие значения СКО варьируют в пределах от 0,8 до 4,2 м.

Сравнительная экспериментальная оценка качества оповещений WAAS

Процент области покрытия был рассчитан отдельно для уровней защиты по требованиям LP, LPV и LPV200. На рис. 4 представлены суточные ряды, показывающие вариации процента области покрытия CONUS навигационным сервисом в режиме SPP, который удовлетворяет ТНХ по требованиям LP, LPV или LPV200. Видно, что ни 14.02, ни 15.02 процент области покрытия не опускался ниже 82 % для групп требований LP, LPV или LPV200. Здесь и далее красные вертикальные линии обозначают моменты времени, соответствующие предупреждениям WAAS.

После сравнения полученных нами результатов (см. рис. 4) с отчетами WAAS (см. рис. 2) можно сделать следующие выводы:

- в целом качество позиционирования в режиме SPP 15.02 ниже по сравнению с предыдущим днем, что соответствует предупреждениям WAAS;

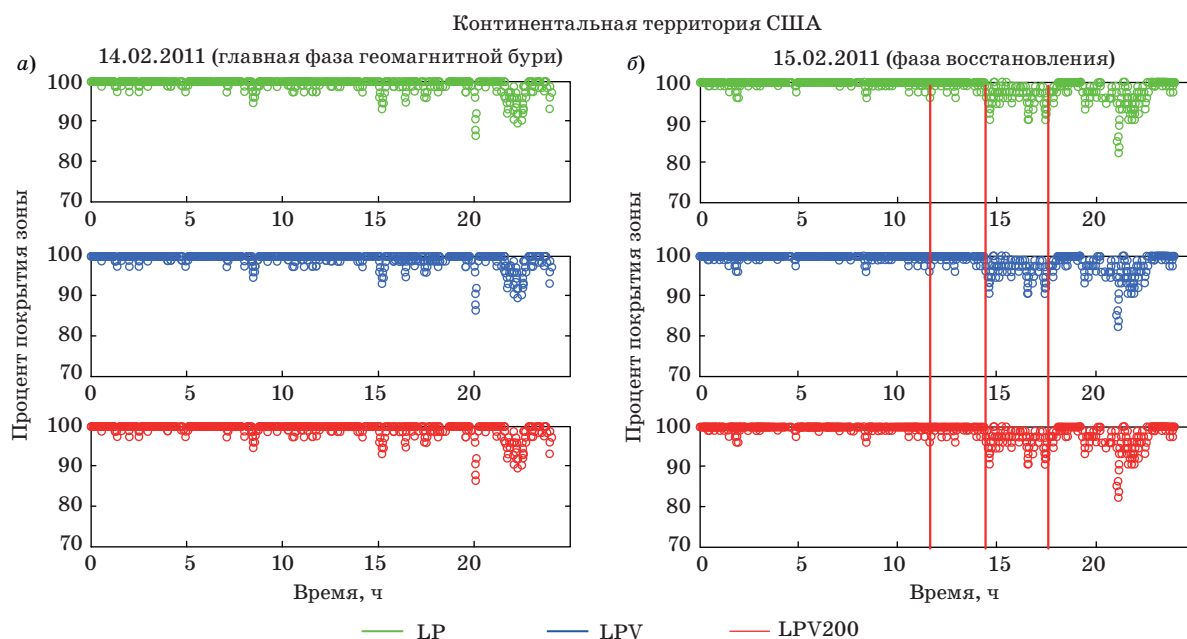
- 15.02.2011 наблюдается два явных интервала сокращения области покрытия навигационным сервисом в режиме SPP, который удовлетворяет требованиям LP, LPV или LPV200 в обла-

сти CONUS. Первый интервал длится с 14:30 до 18:00 UT, в течение которого данные официального отчета WAAS и данные на рис. 4 в основном не противоречат друг другу. Однако качество позиционирования в режиме SPP во втором интервале с 19:30 до 22:00 UT оказывается хуже, чем в первом. При этом, согласно отчету WAAS, нет никаких предупреждений о снижении качества позиционирования на этот временной промежуток;

- в отчете WAAS (см. рис. 2, б) есть предупреждение о сокращении области покрытия ниже 70 % для сервиса LPV200 на территории CONUS в 17:40 UT. Это значение намного ниже по сравнению с оценками области покрытия при использовании навигационного сервиса в режиме SPP для этого же интервала времени (см. рис. 4). Такое несоответствие говорит о возможной ложной тревоге в системе WAAS.

В целом, как и ожидалось, качество позиционирования в режиме SPP, удовлетворяющее требованиям групп LP, LPV или LPV200, показывает более низкий процент области покрытия в сравнении с позиционированием с использованием WAAS (см. рис. 4, а и рис. 2, а). Однако не наблюдается такого глубокого снижения процента области покрытия для требований сервиса LPV200 до уровня < 70 %. Это демонстрирует повышенную ложную тревогу в системе WAAS.

Проведем далее расчет уровней защиты HPL и VPL с использованием модели дальномерных из-



■ **Рис. 4.** Качество позиционирования в режиме SPP в области покрытия CONUS относительно времени UT 14 февраля (а) и 15 февраля (б) 2011 года

■ **Fig. 4.** The quality of positioning in the SPP mode in the CONUS coverage area relative to the UT time on February 14 (а) and February 15 (б), 2011. Red lines indicate time points that correspond to WAAS warnings (see Fig. 2)

мерений (1), содержащих реальную ионосферную дальномерную погрешность. Результат расчета отображен на рис. 5, где показаны суточные ряды вариаций процента области покрытия навигационным сервисом по требованиям групп LP, LPV или LPV200.

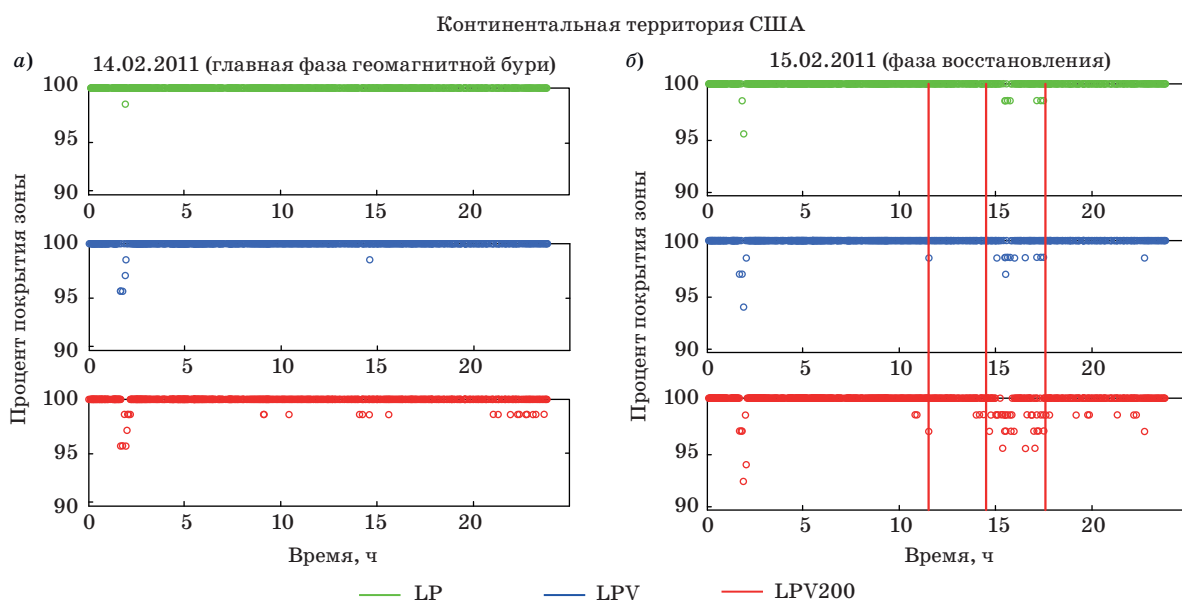
Сравнивая полученные графики на рис. 5, а и официальный отчет WAAS 14.02 (см. рис. 2, а), мы видим лучшее соответствие в отличие от предыдущих результатов (см. рис. 4), особенно для режима LP. Однако также наблюдается и явное расхождение во времени и по абсолютным величинам между предупреждениями WAAS и расчетными значениями с использованием модели (1), особенно для режима LPV200. Самый низкий процент покрытия, полученный в результате моделирования для 14.02.2011, составил около 95 % для режима LPV200 (см. рис. 5, а). Это ниже по сравнению с соответствующими показателями по отчету WAAS (см. рис. 2, а), но вполне ожидаемо, поскольку для своих расчетов мы использовали реальные ионосферные дальномерные погрешности без дифференциальной коррекции.

На диаграммах рис. 2 и 5 видно, что некоторая часть полученных нами данных из официального отчета WAAS имеет совпадения с результатами модельных расчетов по времени в период между 14:30 и 18:00 UT для 15.02.2011 (см. рис. 5, б) для сервисов LPV и LPV200. Но, согласно результатам моделирования, самый низкий процент охватываемой области покрытия за этот период

составил около 92 % (см. рис. 5, б). Это намного выше по сравнению с ожидаемым предупреждением WAAS за тот же период времени (до 70 %) (см. рис. 2, б). Данный факт также может свидетельствовать о возможной ложной тревоге в системе WAAS.

Результаты моделирования (см. рис. 5) и результаты оценки качества навигационного сервиса в режиме SPP (см. рис. 4) также показывают, что область покрытия снизилась до 93 % в период 20:00–20:30 UT для групп THX LP, LPV или LPV200 14.02 и 15.02 (см. рис. 4) и до 96–98 % в период 20:00–23:30 UT для THX LPV200 по результатам моделирования (см. рис. 5). Однако в отчетах WAAS за тот же период времени ничего подобного нет (см. рис. 2). Такое несоответствие между данными WAAS и нашими результатами показывает, что возможна вероятность появления опасного рассогласования информации на выходе WAAS при учете технических сбоев в системе, но при игнорировании реального состояния ионосферы.

В отличие от области CONUS, предупреждения WAAS, выданные для рабочей зоны на территории Аляски, носят случайный характер с сильными провалами ожидаемого процента области покрытия навигационным сервисом по требованиям LP, LPV LPV200 (см. рис. 1). При этом 14.02 с 11:40 до 17:00 UT указано три периода времени с режимами сокращения зоны покрытия до уровня 40 %. 15.02 также ожидается резкое сни-



■ **Рис. 5.** Суточные ряды вариаций процента области покрытия CONUS навигационным сервисом по требованиям групп LP, LPV или LPV200, рассчитанные с учетом реальных ионосферных погрешностей, 14 февраля (а) и 15 февраля (б) 2011 года

■ **Fig. 5.** Daily series of variations in the percentage of CONUS coverage area by the navigation service according to the requirements of the LP, LPV or LPV200 groups, calculated taking into account real ionospheric errors, February 14 (a) and February 15 (b), 2011. Red lines indicate time points that correspond to WAAS warnings (see Fig. 2)

жение качества работы системы в период 17:40–18:00 UT. В целом такое резкое различие ожидаемых прогнозов для территории Аляски и CONUS не противоречит известным особенностям ионосферы на средних и высоких широтах [17].

На рис. 6 представлены суточные ряды, показывающие вариации процента области покрытия территории Аляски навигационным сервисом в режиме SPP, который удовлетворяет ТНХ по требованиям LP, LPV или LPV200. Можно видеть, что и 14.02, и 15.02 процент области покрытия варьирует случайным образом. При этом минимальное значение составляет 78 % для наблюдений 15.02 (рис. 6, б) и 80 % 14.02.2011 (рис. 6, а). Сравнение между предупреждениями WAAS (см. рис. 1) и выходными данными на рис. 6 в указанных условиях, кроме сказанного, показывает, что:

- прогнозы WAAS дают более значительное ожидаемое сокращение зоны покрытия сервисом LPV200 (до 40 %, см. рис. 1, а) в сравнении с реальным качеством позиционирования в режиме SPP;

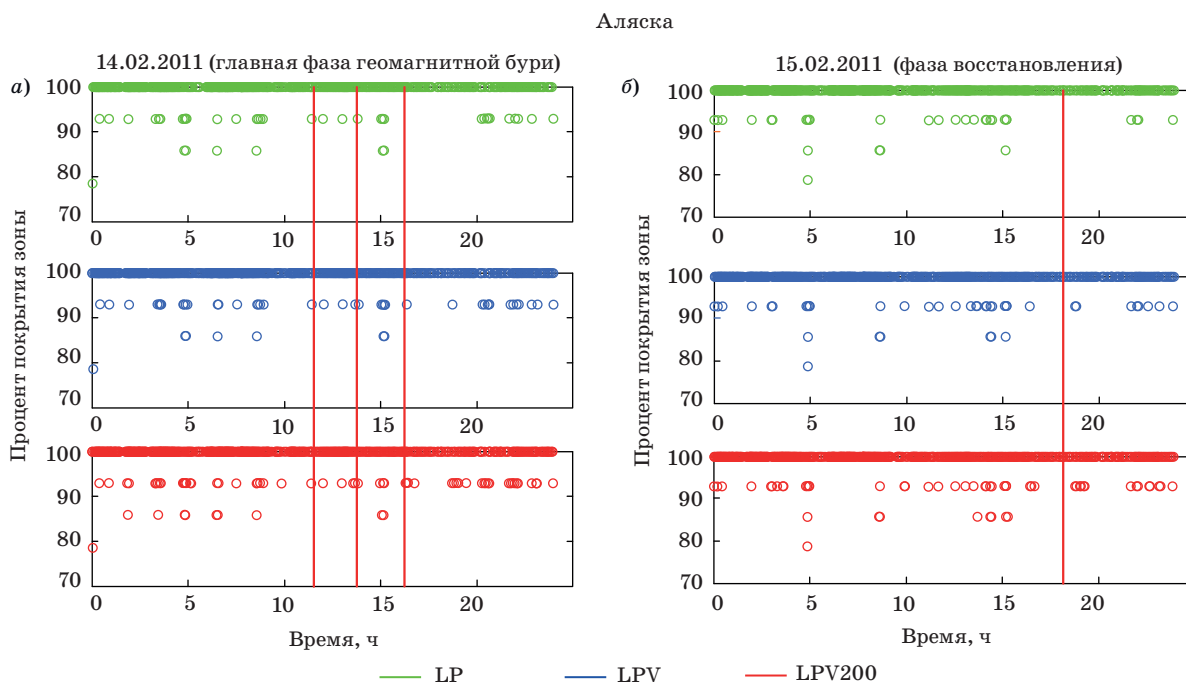
- нет согласования во времени между моментами деградации качества работы системы, которые обнаружены по прогнозам WAAS, и по результатам оценки реального качества позиционирования в режиме SPP. Возможно, это вызвано недостаточной плотностью сети станций GPS, которые нами использованы для анализа ситуации на территории Аляски;

- характер распределения случаев резкого сокращения рабочей зоны по результатам оценки реального качества позиционирования в режиме SPP носит случайный характер, как и прогнозы качества работы WAAS для территории Аляски. Это может говорить о том, что имеется одна и та же физическая причина, вызывающая деградацию качества работы системы в условиях высоких широт.

Далее проведено сравнение между результатами, представленными выше для территории Аляски, и модельными вычислениями уровней защиты HPL и VPL с помощью выражений (1), (2) для тех же условий. Результат расчетов с использованием модели дальномерных измерений (1) отображен на рис. 7, где показан процент области покрытия территории Аляски относительно времени UT.

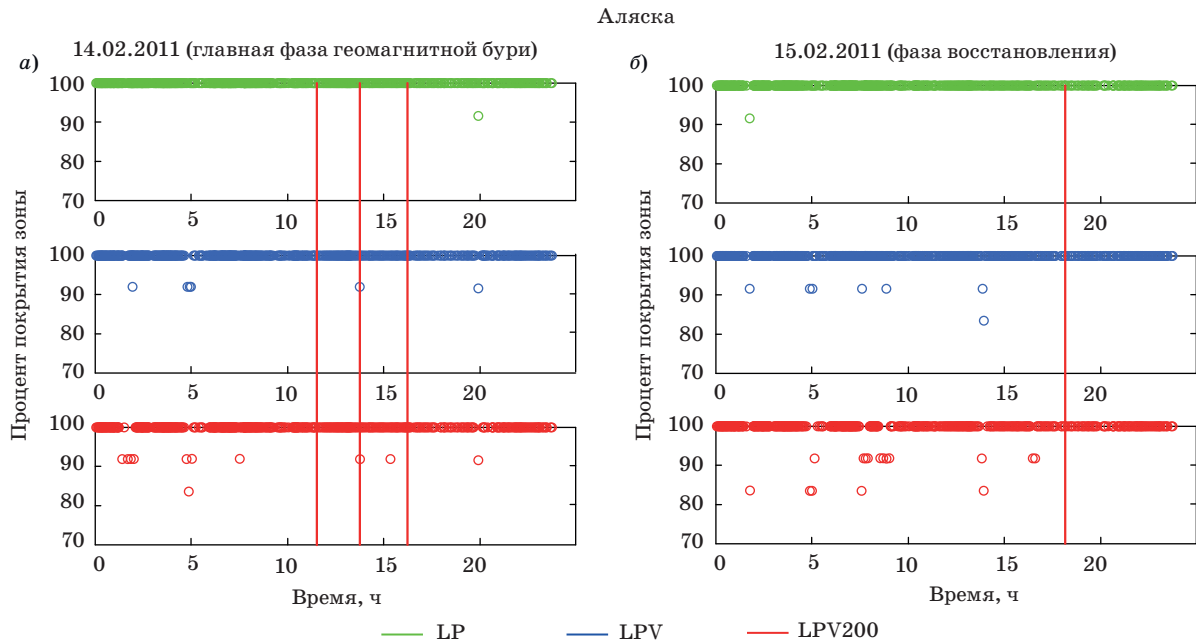
Сравнение между предупреждениями WAAS, качеством позиционирования в режиме SPP и результатами модельных расчетов показывает следующее:

- прогнозы WAAS дают намного большее ожидаемое сокращение зоны покрытия сервисом LPV200 (до 40 %, см. рис. 1) в сравнении с реальным качеством позиционирования (см. рис. 6, до 78 %) и в сравнении с результатами моделирования (см. рис. 7, до 82 %). Это может говорить о достаточно высокой вероятности ложной тревоги, которая выдается прогнозами WAAS в условиях ионосферы высоких широт;



■ Рис. 6. Качество позиционирования в режиме SPP в области покрытия Аляски 14 февраля (а) и 15 февраля (б) 2011 года

■ Fig. 6. The quality of positioning in the SPP mode in the Alaska coverage area on February 14 (а) and February 15 (б), 2011. Red lines indicate time points that correspond to WAAS warnings (see Fig. 1)



■ **Рис. 7.** Суточные ряды вариаций процента области покрытия Аляски навигационным сервисом по требованиям LP, LPV или LPV200, рассчитанные с учетом реальных ионосферных погрешностей, 14 февраля (а) и 15 февраля (б) 2011 года

■ **Fig. 7.** Daily series of variations in the percentage of Alaska coverage area by the navigation service according to LP, LPV, or LPV200 requirements, calculated taking into account real ionospheric errors, on February 14 (a) and February 15 (б), 2011. Red lines indicate time points that correspond to WAAS warnings (see Fig. 1)

— нет согласования во времени между моментами деградации качества работы системы, которые обнаружены по прогнозам WAAS (см. рис. 1), по результатам на рис. 6 и по результатам моделирования (см. рис. 7). Это может быть объяснено двумя причинами. С одной стороны, недостаточным количеством станций и измерений ионосферных дальномерных погрешностей, которые были использованы в нашем исследовании для территории Аляски. С другой стороны, прогнозы WAAS базируются на типовом алгоритме расчета HPL и VPL [формулы (2)], который не дифференцирует ионосферные условия распространения сигнала на средних и высоких широтах. И, напротив, использование в нашем анализе реальных измерений ионосферной дальномерной погрешности может лучше соответствовать местным условиям формирования данного вида погрешности и, соответственно, более корректным значениям уровней защиты HAL и VAL на основе этих данных.

Заключение

Результаты нашего исследования показали случаи существенного рассогласования между прогнозами доступности требуемых навигационных характеристик WAAS, реальным качеством позиционирования в режиме SPP без ионосфер-

ной коррекции и оценками HPL и VPL, полученными на основе реальных измерений ионосферных погрешностей в двух областях США (центральной части США и Аляски). Прогнозы WAAS дают значительно худший сценарий ожидаемого качества работы системы в рабочей зоне в сравнении с реальным качеством позиционирования и результатами расчетов на основе реальных значений ионосферной дальномерной погрешности.

Некоторые случаи в работе WAAS можно интерпретировать как события «ложной тревоги». В частности, ни 14.02, ни 15.02 процент области покрытия не снижался ниже 82 % для сервисов LP, LPV или LPV200 по результатам оценки реального качества позиционирования в центральной части США. В то же время и в этой же области прогноз WAAS дает сокращение зоны покрытия сервисом LPV до 70 %. Еще хуже ситуация наблюдается на территории Аляски в условиях ионосферы высоких широт. Так, минимальное значение зоны покрытия сервисами LPV или LPV200 при оценке реального качества позиционирования составляет 78 % для наблюдений 15.02.2011 и 80 % 14.02.2011 (см. рис. 6, а). Прогнозы WAAS в этих же условиях дают более значительное ожидаемое сокращение зоны покрытия сервисом LPV200 — до 40 %.

Результаты расчетов HPL и VPL с использованием модели псевдодальности и реальных

ионосферных дальномерных погрешностей (1) в рассмотренных ситуациях в количественном отношении удовлетворительно согласуются с результатами оценок по реальному качеству позиционирования. В области CONUS имеется и качественное согласование: сокращение зоны покрытия сервисами LP, LPV или LPV200 происходит примерно в одно и то же время. Однако такого согласования нет для территории Аляски, которая качественно отличается от территории CONUS с точки зрения формирования ионосферных дальномерных погрешностей. В отличие от среднеширотной ионосферы, ионосфера в авроральной области содержит многомасштабные возмущения электронной концентрации не только в условиях магнитных бурь, но и в невозмущенных условиях [17–19].

Сказанное, вероятно, побуждает пересмотреть структуру и решающие правила алгоритма расчета «локально зависимых» дифференциальных поправок и прогнозов контроля целостности системы, который используется в составе WAAS, принимая во внимание текущее локальное состояние условий распространения радиоволн. Основной концепцией такой работы должно быть то, что доверительные интервалы ожидаемой локально зависимой дальномерной погрешности должны быть достаточно широкими, чтобы соответствовать реальным условиям формирования этой погрешности. Но, с другой стороны, размеры этого интервала не должны приводить к появлению «ложной тревоги», когда фактически ТНХ могут быть достигнуты.

Если существующий алгоритм контроля целостности WAAS в рассматриваемой части остается без изменений, то наилучшим выходом для модернизации самой системы является привлечение сигналов (в том числе на новых частотах, например, L5) и измерений других систем позиционирования, таких как GLONASS, BeiDou, GALILEO, QZSS, а также геостационарных спутниковых группировок. Такое дополнение позволило бы существенно улучшить качество оценки и интерполяции значений GIVE и, соответственно, сузить доверительные интервалы оценок локально зависимых дальномерных погрешностей и снизить вероятность появления ложной тревоги или опасного рассогласования информации.

В реальности это очевидное и эффективное решение наталкивается на серьезные ограничения. Так, на конечную точность вычисления величин GIVE оказывают серьезное влияние плавающие дифференциальные погрешности в аппаратуре навигационных спутников разных типов и поколений и навигационных приемников различных типов и марок [18–22]. При использовании разнотипных спутниковых радионавигационных систем, которые находятся под управлением адми-

нистраций различных стран, весьма непросто обеспечить согласование и поддержание технических стандартов на соответствующую аппаратуру на уровне общих однотипных требований.

Другая не менее серьезная проблема здесь состоит в том, что имеется существенное расхождение в финальной точности дальномерных измерений, которая обеспечивается разными спутниковыми радионавигационными системами. Например, долговременный анализ полной дальномерной погрешности (SISREs) показал, что величина SISRE существенно варьирует от системы к системе. Соответствующие величины составляют: $(0,7 \pm 0,02)$ м (GPS), $(1,5 \pm 0,1)$ м (BeiDou), $(1,6 \pm 0,3)$ м (Galileo), $(1,9 \pm 0,1)$ м (GLONASS) и $(0,6 \pm 0,2)$ м (QZSS) [21].

Кроме этого, необходимо иметь в виду, что вероятность возникновения аномальных явлений при измерении радионавигационных параметров по сигналам отдельных спутников возрастает при увеличении количества спутников. Это требует совершенствования качества и разрешающей способности системы мониторинга качества сигналов.

Принимая все сказанное во внимание, мы полагаем, что при формировании оценок HPL и VPL необходимо разделить локально зависимые и глобально зависимые дальномерные погрешности. Существующий алгоритм и средства оценивания глобально зависимых дальномерных погрешностей WAAS (погрешности эфемерид, погрешности частотно-временного обеспечения, дифференциальные погрешности в аппаратуре спутника) могут обеспечить эффективную дифференциальную коррекцию и контроль целостности системы по данной группе погрешностей.

С другой стороны, как показано во множестве исследований, а также в настоящей работе, локально зависимые дальномерные погрешности не всегда могут быть эффективно оценены средствами и алгоритмами WAAS. Вероятно, лучшим решением здесь будет привлечение средств локальной дифференциальной коррекции для формирования выборочных оценок и дифференциальных поправок для локально зависимых дальномерных погрешностей, которые через сети и спутники связи будут сообщаться пользователям широкозонной дифференциальной системы в зонах доступности этих поправок с учетом возможностей расширения этих зон за счет экстраполяции.

Отметим, что предполагается использование не только «штатных» локальных дифференциальных систем, которые сосредоточены точно по своему назначению (районы аэропортов, портов, строительства или проведения проектных изысканий), но и иных опорных станций и сетей, которые в настоящее время получают большое

распространение и активно развиваются. Так, «за последние 15–20 лет в мире развернут ряд опорных измерительных сетей и центров обработки информации, которые пока используются для решения научных и некоторых прикладных задач. Сюда входят сеть международной геодезической службы [“International GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service” — IGS], сети непрерывно действующих опорных станций (“Continuously Operating Reference Stations” — CORS), которые развернуты рядом государственных агентств, и даже частных компаний, именно для поддержки высокоточных координатно-временных определений на определенных территориях (административный округ или государство). Ввиду высокой востребованности, в настоящее время рядом государств уже ставится задача, во-первых, рас-

ширять существующие и создавать опорные новые сети и, во-вторых, рассмотреть вопрос о том, как использовать возможности и базы данных указанных опорных сетей, чтобы наилучшим образом обеспечить реализацию высокоточной «глобальной» навигации в рамках единой универсальной всемирной концепции GNSS» [23]. В рамках данной концепции развития технологий спутниковой навигации можно рассматривать и наше предложение по модернизации широкозонных дифференциальных систем.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 17-77-20005.

Литература

1. Demyanov V., Likhota R. The method of GNSS positioning availability control for transportation applications. *Machines, Technologies, Materials*, 2015, vol. 9, iss. 5, pp. 11–13.
2. Демьянов В. В., Халиманов Д. С., Имарова О. Б. Контроль доступности требуемых навигационных характеристик ГЛОНАСС на железнодорожном транспорте. *Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Десятой Междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, 21–24 мая 2019 г.: в 2 т. Иркутск, ИрГУПС, 2019, т. 1, с. 243–248.*
3. *Global positioning system wide area augmentation system (WAAS) performance standard. Appendix B: Key Terms, Definitions, Abbreviations and Acronyms. 1st Edition, 2008.* <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf> (дата обращения: 12.11.2019).
4. *Wide-area augmentation system performance analysis report, Report # 36. Reporting Period: January 1 to March 31, 2011.* <http://www.nstb.tc.faa.gov/DisplayArchive.htm> (дата обращения: 16.12.2019).
5. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., and Gamayunov I. F. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips. *Advances in Space Research*, 2009, vol. 43, no. 6, pp. 964–972. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.015>
6. *Federal Aviation Administration. Reports.* www.nstb.tc.faa.gov/reports.htm (дата обращения: 16.12.2019).
7. *Rinex data.* <http://lox.ucsd.edu/pub/rinex/2011> (дата обращения: 16.12.2019).
8. Estey L., and Meertens C. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, 1999, vol. 3(1), pp. 42–49. doi:10.1007/PL00012778
9. *SARPS Amendment 91, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Aeronautical Telecommunications: International Standards and Recommended Practices. Vol. 1. Radio Navigation Aids,* July, 2006. https://code7700.com/pdfs/icao/icao_annex_10_vol_i_6th_edition_july_2006_.pdf (дата обращения: 21.01.2020).
10. Themens D. R., Jayachandran P. T., Langley R. B., MacDougall J. W., and Nicolls M. J. Determining receiver biases in GPS-derived total electron content in the auroral oval and polar cap region using ionosonde measurements. *GPS Solutions*, 2013, vol. 17, pp. 357–369. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0284-6>
11. *Minimum Operation Performance Standard: MOPS DO-229E. Version C, Appendix A: Wide Area Augmentation System Signal Specification.* RTCA Inc., Paper No. 283-16/PMC-1548, December, 2016. <https://standards.globalspec.com/std/10072422/rtca-do-229-tool> (дата обращения: 23.01.2020).
12. Mylnikova A. A., Yasyukevich Y. V., Kunitsyn V. E., Padokhin A. M. Variability of GPS/GLONASS differential code biases. *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 9–10. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.11.002>
13. Schaer S. *Overview of GNSS Biases. International GNSS Service. Workshop on GNSS Biases.* 2012. http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12_1_3.1.pdf (дата обращения: 23.01.2020).
14. Hilla S., Cline M. Evaluating pseudorange multipath effects at stations in the National CORS Network. *GPS Solutions*, 2004, vol. 7, pp. 253–267. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0073-3>
15. Xia L. Multipath in GPS navigation and positioning. *GPS Solutions*, vol. 8, pp. 49–50. <https://doi.org/10.1007/s10291-004-0085-7>
16. Sieradzki R., and Paziewski J. Study on reliable GNSS positioning with intense TEC fluctuations at high latitudes. *GPS Solutions*, 2016, vol. 20, pp. 553–563. doi:10.1007/s10291-015-0466-0
17. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V. Ionosphere geomagnetic variations and GPS positioning errors during the major magnetic storm on 29–31 October 2003. *International Reference Ionosphere News*, 2004, vol. 11 (3–4), pp. 10–14.

18. Demyanov V. V., Yasyukevich Y. V., Ishin A. B., Astafyeva E. I. Effects of ionosphere super-bubble on the GPS positioning performance depending on the orientation relative to geomagnetic field. *GPS Solutions*, 2012, vol. 16, pp. 181–189. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0217-9>
19. Veetil S. V., Haralambous H., Aquino M. Observations of quiet-time moderate midlatitude L-band scintillation in association with plasma bubbles. *GPS Solutions*, 2017, vol. 21, pp. 1113–1124. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0598-x>
20. El-Mowafy A. GNSS multi-frequency receiver single-satellite measurement validation method. *GPS Solutions*, 2014, vol. 18(4), pp. 553–561. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0352-6>
21. Montenbruck O., Steigenberger P., and Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solutions*, 2015, vol. 19, pp. 321–333. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0390-8>
22. Hakansson M., Jensen A. B. O., Horemuz M., and Hedling G. Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning. *GPS Solutions*, 2017, vol. 21, pp. 849–860. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0572-7>
23. Демьянов В. В., Имарова О. Б. Тенденции развития технологий GNSS и направлений их применения на транспорте. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2018, т. 58, № 2, с. 82–90. doi:10.26731/1813-9108/2018/2(58)/82-90.

UDC 550.388.2

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

Evaluating the quality of WAAS availability control algorithm under geomagnetic storm conditionsV. V. Demyanov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-2893-9522, sword1971@yandex.ruD. S. Khalimanov^a, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0002-9389-6701M. E. Fedorov^a, Senior Lecturer, orcid.org/0000-0002-4043-4730O. B. Imarova^a, Researcher, orcid.org/0000-0001-7087-4000^aIrkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky St., 664074, Irkutsk, Russian Federation

Introduction: The Wide Area Augmentation System (WAAS) is vulnerable to false alarms about the violation of the required navigation parameter availability under geomagnetic disturbances. As a consequence, the system operation efficiency might decrease because of a mismatch between the output of the control system and the actual quality of the navigation-time support. **Purpose:** Comparative analysis of the actual quality of navigation-and-time support for GPS users and the output information of the system for monitoring the availability of the required WAAS navigation parameters under a moderate magnetic storm and with technical failures during the operation of separate segments of GPS and WAAS systems. **Results:** Location errors were calculated for 82 reference stations in the USA equipped with GPS navigation receivers. The calculations used the geometric ranges of visible navigation satellites and the corresponding real values of the ionospheric range-measurement error determined by the method of two-frequency measurements. Based on the same data and through the use of the conventional standard WAAS availability control algorithm, the user protection levels were calculated in the horizontal and vertical planes. The results of these calculations are presented as a time graph of WAAS operating area coverage percentage, which was compared with the respective graphs presented in the official WAAS work reports. It is established that there are cases of significant discrepancy between the forecasts about the availability of the required navigation parameters according to the WAAS data and the real quality of positioning in the operating area of this system. There are discrepancies in the results of calculations of protection levels in the horizontal and vertical planes obtained from official reports on the operation of the system and in calculations based on the geometric range and real ionospheric range-measurement error. **Practical relevance:** Recommendations are proposed in order to reconsider the development of a navigation parameter availability control for wide-area augmentation systems, splitting the calculation into “locally dependent” and “globally dependent” components of differential corrections of range-measurement errors. It will reduce the likelihood of false alarms or dangerous inconsistencies in information within the system.

Keywords — availability control, integrity, required navigation parameters, WAAS, differential systems.

For citation: Demyanov V. V., Khalimanov D. S., Fedorov M. E., Imarova O. B. Evaluating the quality of WAAS availability control algorithm under geomagnetic storm conditions. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 46–59 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

References

1. Demyanov V., Likhota R. The method of GNSS positioning availability control for transportation applications. *Machines, Technologies, Materials*, 2015, vol. 9, iss. 5, pp. 11–13.
2. Demyanov V. V., Khalimanov D. S., Imarova O. B. Monitoring the integrity of the positioning service GLONASS on railway transport. *Materiály Desyatoy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona”* [Proc. 10th Int. Conf. “Transport infrastructure of the Siberian region”]. Irkutsk, 2019, vol. 1, pp. 243–248 (In Russian).
3. *Global positioning system wide area augmentation system (WAAS) performance standard*. Appendix B: Key Terms, Definitions, Abbreviations and Acronyms. 1st Edition, 2008. Available at: <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf> (accessed 12 November 2019).
4. *Wide-area augmentation system performance analysis report, Report # 36*. Reporting Period: January 1 to March 31, 2011. Available at: <http://www.nstb.tc.faa.gov/DisplayArchive.htm> (accessed 16 December 2019).
5. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., and Gamayunov I. F. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips. *Advances in Space Research*, 2009, vol. 43, no. 6, pp. 964–972. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.015>

6. *Federal Aviation Administration. Reports.* Available at: www.nstb.tc.faa.gov/reports.htm (accessed 16 December 2019).
7. *Rinex data.* Available at: <http://lox.ucsd.edu/pub/rinex/2011> (accessed 16 December 2019).
8. Estey L., and Meertens C. TEC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, 1999, vol. 3(1), pp. 42–49. doi:10.1007/PL00012778
9. *SARPS Amendment 91, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Aeronautical Telecommunications: International Standards and Recommended Practices. Vol. 1. Radio Navigation Aids*, July, 2006. Available at: https://code7700.com/pdfs/icao/icao_annex_10_vol_i_6th_edition_july_2006_.pdf (accessed 21 January 2020).
10. Themens D. R., Jayachandran P. T., Langley R. B., MacDougall J. W., and Nicolls M. J. Determining receiver biases in GPS-derived total electron content in the auroral oval and polar cap region using ionosonde measurements. *GPS Solutions*, 2013, vol. 17, pp. 357–369. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0284-6>
11. *Minimum Operation Performance Standard: MOPS DO-229E. Version C, Appendix A: Wide Area Augmentation System Signal Specification.* RTCA Inc., Paper No. 283-16/PMC-1548, December, 2016. Available at: <https://standards.global-spec.com/std/10072422/rtca-do-229-tool> (accessed 23 January 2020).
12. Mylnikova A. A., Yasyukevich Y. V., Kunitsyn V. E., Padokhin A. M. Variability of GPS/GLONASS differential code biases. *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 9–10. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.11.002>
13. Schaer S. *Overview of GNSS Biases. International GNSS Service. Workshop on GNSS Biases.* 2012. Available at: http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12_1.3.1.pdf (accessed 23 January 2020).
14. Hilla S., Cline M. Evaluating pseudorange multipath effects at stations in the National CORS Network. *GPS Solutions*, 2004, vol. 7, pp. 253–267. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0073-3>
15. Xia L. Multipath in GPS navigation and positioning. *GPS Solutions*, vol. 8, pp. 49–50. <https://doi.org/10.1007/s10291-004-0085-7>
16. Sieradzki R., and Paziewski J. Study on reliable GNSS positioning with intense TEC fluctuations at high latitudes. *GPS Solutions*, 2016, vol. 20, pp. 553–563. doi:10.1007/s10291-015-0466-0
17. Afraimovich E. L., Astafieva E. I., Demyanov V. V. Ionosphere geomagnetic variations and GPS positioning errors during the major magnetic storm on 29–31 October 2003. *International Reference Ionosphere News*, 2004, vol. 11 (3–4), pp. 10–14.
18. Demyanov V. V., Yasyukevich Y. V., Ishin A. B., Astafyeva E. I. Effects of ionosphere super-bubble on the GPS positioning performance depending on the orientation relative to geomagnetic field. *GPS Solutions*, 2012, vol. 16, pp. 181–189. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0217-9>
19. Veetil S. V., Haralambous H., Aquino M. Observations of quiet-time moderate midlatitude L-band scintillation in association with plasma bubbles. *GPS Solutions*, 2017, vol. 21, pp. 1113–1124. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0598-x>
20. El-Mowafy A. GNSS multi-frequency receiver single-satellite measurement validation method. *GPS Solutions*, 2014, vol. 18(4), pp. 553–561. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0352-6>
21. Montenbruck O., Steigenberger P., and Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solutions*, 2015, vol. 19, pp. 321–333. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0390-8>
22. Hakansson M., Jensen A. B. O., Horemuz M., and Hedling G. Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning. *GPS Solutions*, 2017, vol. 21, pp. 849–860. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0572-7>
23. Demyanov V. V., Imarova O. B. Trends in the development of GNSS technologies and directions of their application in transport. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2018, vol. 58, no. 2, pp. 82–90 (In Russian). doi:10.26731/1813-9108.2018.2(58).109-90