

УДК 550.388.2

ГЛОБАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ КАК СРЕДСТВО КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ ОШИБКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Ю. В. Ясюкевич*, А. М. Веснин, В. И. Куржин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

Глобальные навигационные спутниковые системы, такие как GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou/Compass, активно используются для решения различного рода научных и прикладных задач. В данной работе рассматривается использование сигналов глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга ионосферы в интересах коррекции ионосферных ошибок радиотехнических систем в квазиреальном времени. Обсуждаются проблемы, возникающие при решении данной задачи, среди которых ключевой является проблема определения абсолютных ионосферных параметров.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы постоянно растут требования, предъявляемые к радиотехническим системам, использующим ионосферный канал, в том числе к системам связи и радиолокации [1]. В этих условиях ошибки, вносимые средой распространения, не могут не учитываться. В прикладных задачах это требует своевременного получения информации о состоянии ионосферы, для чего используются различные радиофизические средства. В частности, развёртываются сети ионозондов вертикального и наклонного зондирования [2], в том числе ионозондов с линейной частотной модуляцией [3]. Радары некогерентного рассеяния [4, 5], обеспечивая максимальную информативность, как правило, используются не для мониторинга ионосферы, а для решения фундаментальных ионосферных задач, что обусловлено их малым количеством, сложностью развёртывания и поддержания работоспособности. До недавнего времени (также больше для решения фундаментальных задач) применялись методы низкоорбитальной радиотомографии [6]. На сегодняшний день в связи с деградацией спутниковой группировки этот метод оказался малоинформативен, хотя в ближайшем будущем он может оказаться одним из наиболее перспективных средств в связи с планами учёных из Китая по запуску крупной группировки низкоорбитальных спутников [7]. Для задач мониторинга состояния авроральной области была запущена сеть когерентных радаров SuperDARN [8]. Они могут использоваться для решения задач мониторинга радиоканала, но, как показано в работе [9], не всегда (оптимальными в указанной работе называют зимние месяцы при низкой и умеренной солнечной активности). В последние годы в связи с активным развитием инфраструктуры глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) достаточно много работ для мониторинга ионосферы проводится с их использованием.

Для фундаментальных задач изучения ионосферы и ионосферных неоднородностей ГНСС используются достаточно давно (см. работу [10] и обзор в ней). Первоначально ГНСС-измерения привлекли особое внимание в связи с большим числом станций, находящихся в свободном доступе. На рис. 1 представлено распределение числа станций, данные которых находятся в свободном доступе на 1 января 2019 года (данные от ряда станций попадают в свободный доступ с большим запаздыванием). Наиболее плотные сети расположены на территории США, Европы и Японии. Достаточно плотные сети находятся в американском секторе (как в северном, так и южном

* yasukevich@iszf.irk.ru

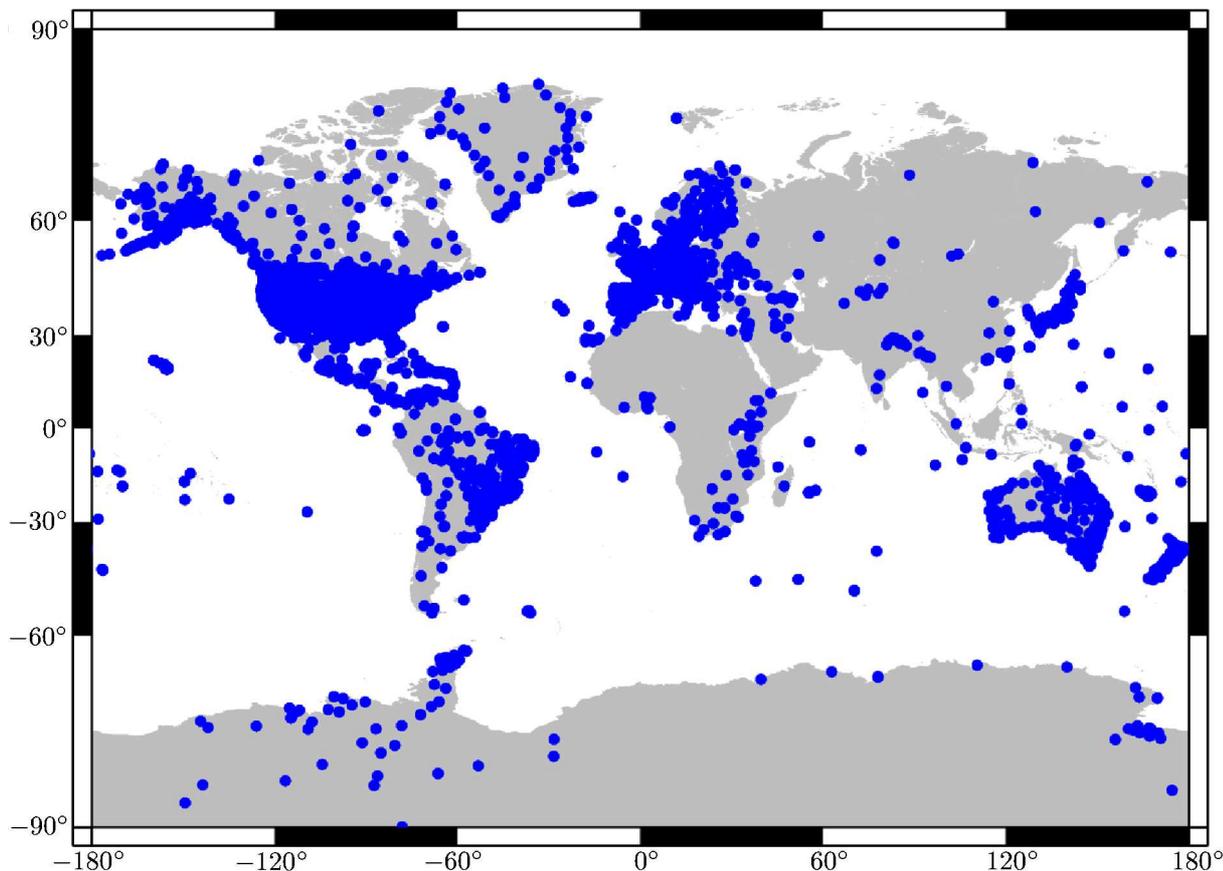


Рис. 1. Расположение приёмников, находящихся в открытом доступе. Данные на 1 января 2019 года

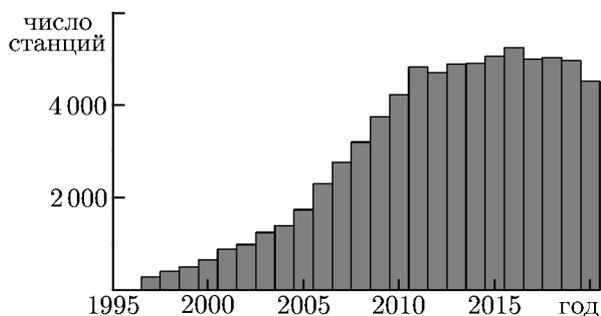


Рис. 2. Динамика числа станций в свободном доступе

полушарии), Австралии и Новой Зеландии. При этом до 2011 года шёл бурный (практически линейный) рост числа приёмников по миру. Без учёта Японской сети GSI данные о числе приёмников приведены на рис. 2. Безусловно, в реальном времени таких данных гораздо меньше. В свободный доступ в режиме реального времени предоставляются данные отдельных приёмников (в основном в штате Калифорния и в Австралии).

При этом основные усилия по ГНСС-исследованиям были направлены на изучение ионосферных неоднородностей с использованием относительных фазовых измерений полного электронного содержания (ПЭС), а также картирование двумерной структуры ионосферы [11]. Для технических задач большой интерес представляют абсолютные измерения критической частоты (а в идеале трёхмерного распределения электронной концентрации) [12], которые в дальнейшем могут использоваться для калибровки радиотехнических систем. Оценка критической частоты на основе данных о ПЭС возможна либо с использованием томографических методов [13] на основе данных сетей приёмников, либо с использованием тех или иных моделей ионосферы [14] на основе измерения абсолютного ПЭС [15], в том числе и с использованием отдельных станций.

В данной работе обсуждаются перспективы и ограничения использования отдельных приём-

Таблица 1. Особенности ГНСС-измерений

Особенность	Характеристика
большое число измерений	+
стабильность измерений	+
пассивность измерений	+/?
малая потребляемая мощность	+/?
отсутствие влияния поглощения в атмосфере	+/-
проблемы оценки абсолютных значений	-
интегральный характер измерений и отсутствие точной связи ПЭС и параметров радиоканала (влияние формы профиля, влияние градиентов, влияние плазмосферы)	-
невозможность учёта слоёв E , E_s , D	-

ников ГНСС для решения задач мониторинга радиоканала, при этом за её пределами остаётся обсуждение возможностей сетей ГНСС.

1. ОСОБЕННОСТИ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ

Особенности измерений, предоставляющие преимущества (+) или являющиеся в той или иной мере недостатками (-) представлены в табл. 1 (знак вопроса указывает на незначительность для основного класса задач).

Рассмотрим указанные особенности по порядку.

1.1. Большое число измерений

Каждый приёмник ГНСС принимает в любой точке земного шара сигналы не менее 4 спутников каждой из систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou/Compass. Помимо этого, регистрируются сигналы спутников региональных систем (Япония, Индия), а также дифференциальных дополнений ГНСС (Satellite Based Augmentation System, SBAS). Конечно, возможность приёма различных систем связана с характеристиками самого приёмника, но потенциально современные приёмники могут принимать сигналы всех возможных навигационных систем. При этом 4 спутника для каждой системы — это оценка снизу. На рис. 3 приведена динамика числа наблюдения различных спутников в Сибири (52° с. ш., 104° в. д.) и Канаде (52° с. ш., 100° з. д.) на 1 января 2020 года. Можно видеть, что ионосферу в регионе расположения приёмника может одновременно зондировать $25 \div 40$ (а в отдельные моменты более 50) спутников различных систем. Следует отметить большой вклад в измерения китайской системы BeiDou/Compass, число наблюдаемых спутников для которой в азиатском секторе сопоставимо с наблюдаемой совместной группировкой GPS и ГЛОНАСС.

Статистика измерений характеризуется достаточно хорошим распределением в различных азимутальных секторах. На рис. 4 приведено распределение ионосферных точек (ionosphere pierce point, IPP) за 1 час на восточной долготе 100° для северных широт от 0° до 80° с шагом 20° (снизу вверх) для систем GPS (синий), ГЛОНАСС (оранжевый), Galileo (зелёный), BeiDou/Compass (красный). Распределения построены на основе эфемеридной информации за 1 января 2020 года в условиях идеального приёма. Ключевым фактором является то, что существует принципиальная возможность получать одновременные измерения из различных секторов. При этом большинство измерений проводятся на расстоянии $150 \div 500$ км от станции. На рис. 5 представлено

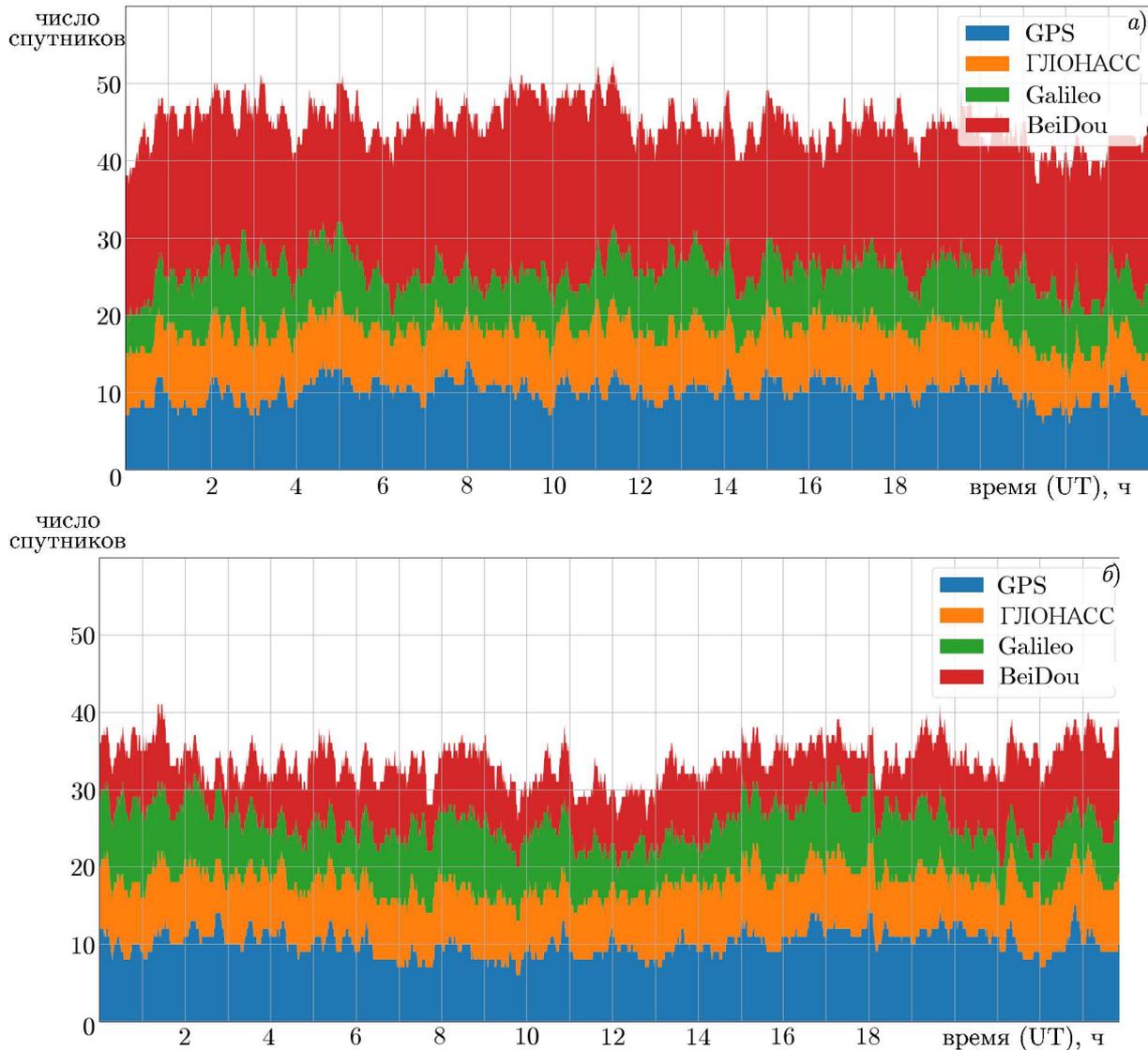


Рис. 3. Динамика числа спутников различных систем в Сибири (а, 52° с. ш., 104° в. д.) и Канаде (б, 52° с. ш., 100° з. д.). Последовательность систем на панели: GPS (синий цвет), ГЛОНАСС (оранжевый), Galileo (зелёный), BeiDou/Compass (красный)

распределение расстояний от ионосферных точек спутников ГЛОНАСС (а) и GPS (б) до станций в долготном секторе $100 \pm 5^\circ$ в. д. Распределение построено за 1 сутки на основе эфемеридной информации за 1 января 2020 года.

Хорошее пространственное покрытие позволяет использовать только часть измерений для получения более точных оценок в интересующей области [16]. Наличие измерений на большом расстоянии от станции позволяет более корректно подходить к решению задачи оценки ионосферных параметров на удалении от станции. При этом для калибровки приёмника [17] может использоваться полный набор данных.

Для решения научных и прикладных задач существует значительный потенциал использования информации, получаемой неспециализированными приёмниками, интегрированными в смартфоны. Ряд современных процессоров имеет встроенную поддержку ГНСС, что позволяет рассчитывать на рост количества устройств, поддерживающих ионосферные исследования.

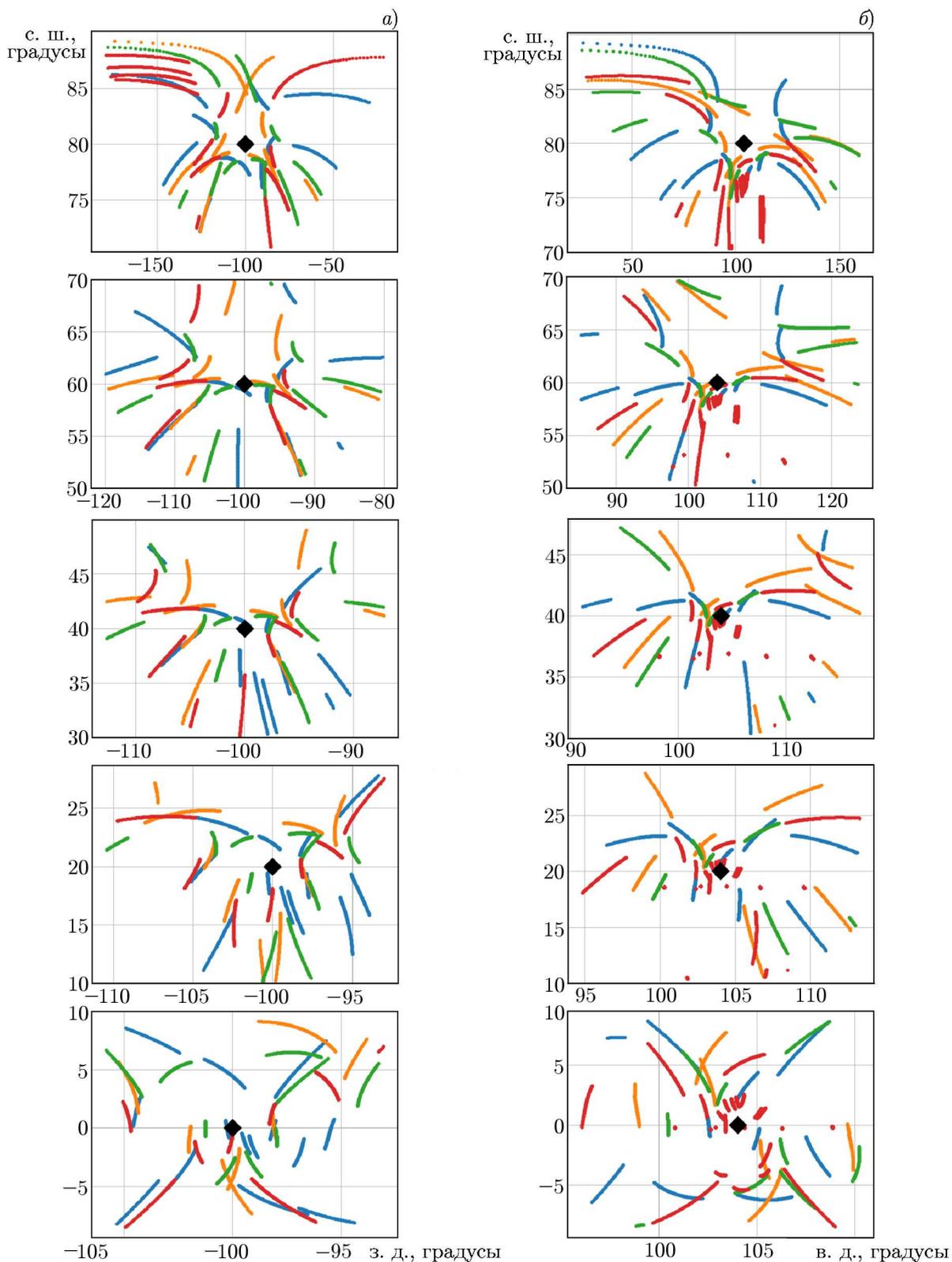


Рис. 4. Распределение ионосферных точек за 1 час для станций на 100° з. д. (а) и 104° в. д. (б) для северных широт от 0° до 80° с шагом 20° для систем GPS (синий цвет), ГЛОНАСС (оранжевый), Galileo (зелёный), BeiDou/Compass (красный). Данные на 1 января 2020 года

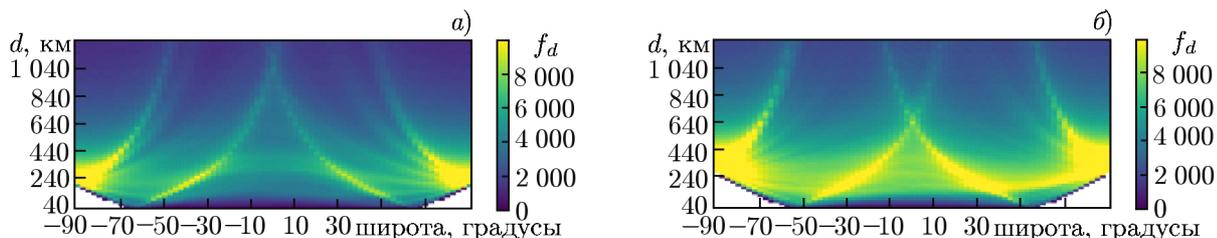


Рис. 5. Распределение f_d расстояний d от ионосферных точек спутников ГЛОНАСС (а) и GPS (б) до станций в долготном секторе $100 \pm 5^\circ$ в. д. Данные на 1 января 2020 года. Число измерений указано на шкале. Шаг по широте $2,5^\circ$, по долготе 1° . Размер бина по высоте 20 км

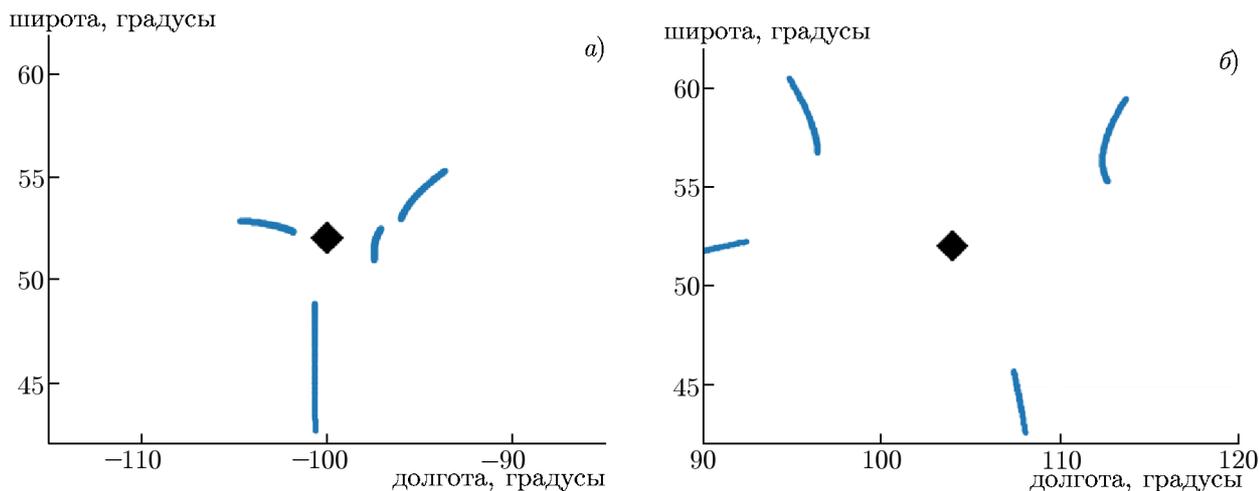


Рис. 6. Распределение ионосферных точек для спутников GPS, одновременно излучающих сигналы L1, L2 и L5, за 1 час для двух пунктов на 100° з. д. (а) и 104° в. д. (б) и 52° с. ш. Данные на 1 января 2020 года

В настоящее время существуют такие приёмники, способные осуществлять двухчастотные фазовые измерения. В частности, для приёмника на базе чипа bcm47755 такие измерения возможны на частотах L1 и L5 GPS и не возможны на L2 (в силу закрытости дальномерного кода и низкого результирующего отношения сигнал/шум при бескодовой/полукодовой обработке) [18]. Сигнал L5 излучают только модернизированные спутники, начиная с блоков PR-M. Поскольку в настоящее время не все спутники излучают сигнал на частоте L5, то число доступных двухчастотных измерений ПЭС по комбинации L1/L5 гораздо меньше, чем аналогичных измерений в специализированных приёмниках по комбинации L1/L2. Покрытие подыоносферными точками можно видеть на рис. 6. Потенциально сравнительно малое количество наблюдаемых спутников может быть компенсировано большим количеством приёмников.

1.2. Стабильность измерений

Стабильность измерений ГНСС обусловлена высокими требованиями к точности, глобальности, непрерывности и целостности навигационных определений [19]. В результате этого измерения ПЭС также достаточно стабильны. Имеется некоторый фоновый уровень сбоев измерения радионавигационных параметров (фазы и псевдозадержки сигнала), а также увеличение таких сбоев в результате воздействия тех или иных факторов. Ключевым фактором стабильности ГНСС является космическая погода. В ней следует выделить

- 1) магнитные бури [20];
- 2) ионосферные мерцания [21, 22], обусловленные интенсивными ионосферными неоднородностями (в том числе и на средних широтах);
- 3) солнечное радиоизлучение [23, 24].

Первые два фактора связаны с появлением мелкомасштабных неоднородностей и резких градиентов электронной концентрации. Вследствие этого возникают случайные флуктуации амплитуды и фазы сигнала, а также формы его огибающей, что приводит к появлению потерь энергии, в том числе при обработке сигнала [25]. Имеется прямая связь между амплитудными мерцаниями сигнала и срывами измерений радионавигационных параметров. Вероятность срывов резко возрастает при интенсивности мерцаний больше 10 дБ [26]. Третий фактор связан с возрастанием уровня шума на входе приёмника [24, 27]. При этом основная часть сбоев сопровождения сигнала происходит на вспомогательной частоте GPS и ГЛОНАСС [28, 29]. Последний факт связан с более низкой мощностью передатчика на этой частоте, а также неизвестной (для GPS) структурой кода. Следует отметить, что, согласно интерфейсному контрольному документу GPS [30], на новых спутниках мощность передатчика на вспомогательной частоте была повышена, а также был введён открытый код L2C.

На рис. 7 для магнитной бури 22 июня 2015 года представлено распределение сбоев измерения фазы на частотах L1 ($a-z$), L2 ($\partial-z$), L5 (L3 для ГЛОНАСС) ($u-m$), а также пропусков эпох измерений отдельных приёмников ($n-p$) для систем GPS (a, ∂, u, n), ГЛОНАСС (b, e, κ, o), Galileo ($v, ж, л, n$), SBAS ($z, з, м, p$). Данные получены путём усреднения по всем станциям за данный день. Общее число станций 5 080. Следует отметить отсутствие выраженного изменения сбоев сигнала после начала и развития бури.

Ещё одним важным параметром являются сбои измерений ПЭС. В работе [20] под этим термином изначально предполагались нефизичные значения вариаций ПЭС, вызванные срывом сопровождения фазы на одной из частот. В дальнейшем стало понятно, что в ряде случаев имеют место ситуации, при которых срыв измерения фазы на обеих рабочих частотах ГНСС отсутствует, при этом получаемая величина ПЭС меняется не типично для реальных ионосферных условий [31]. Появление таких сбоев в измерениях ПЭС является негативным фактором при использовании ГНСС для мониторинга ионосферы, т. к. такие измерения дают не вполне адекватную информацию об ионосферной динамике.

Рисунок 8 показывает распределение сбоев ПЭС для мощнейших бурь 24-го цикла солнечной активности (красная кривая): 17–18 марта 2015 года (a) и 22–23 июня 2015 года (b). Синей кривой представлены сбои измерений ПЭС в контрольные дни: 16 марта 2015 года и 21 июня 2015 года. Серая кривая показывает динамику индекса SYM/H (шкала слева). Можно видеть, что сбои измерений ПЭС хорошо коррелируют с динамикой SYM/H. Наибольшие всплески наблюдаются в локальных минимумах SYM/H. При этом общий уровень сбоев измерений ПЭС выходит на фоновые значения (около 0,1%) значительно раньше восстановления магнитного поля до невозмущенного состояния. Даже во время столь интенсивных бурь число сбоев измерений ПЭС, как правило, не превышало 1%.

1.3. Пассивность измерений, малая потребляемая мощность и отсутствие влияния поглощения в атмосфере

Пассивность измерений является несомненным плюсом при создании скрытного канала. Поскольку приёмник не общается со спутником, то уровень его скрытности определяется уровнем скрытности канала передачи получаемых данных в центр обработки, который может быть достаточно хорошим.

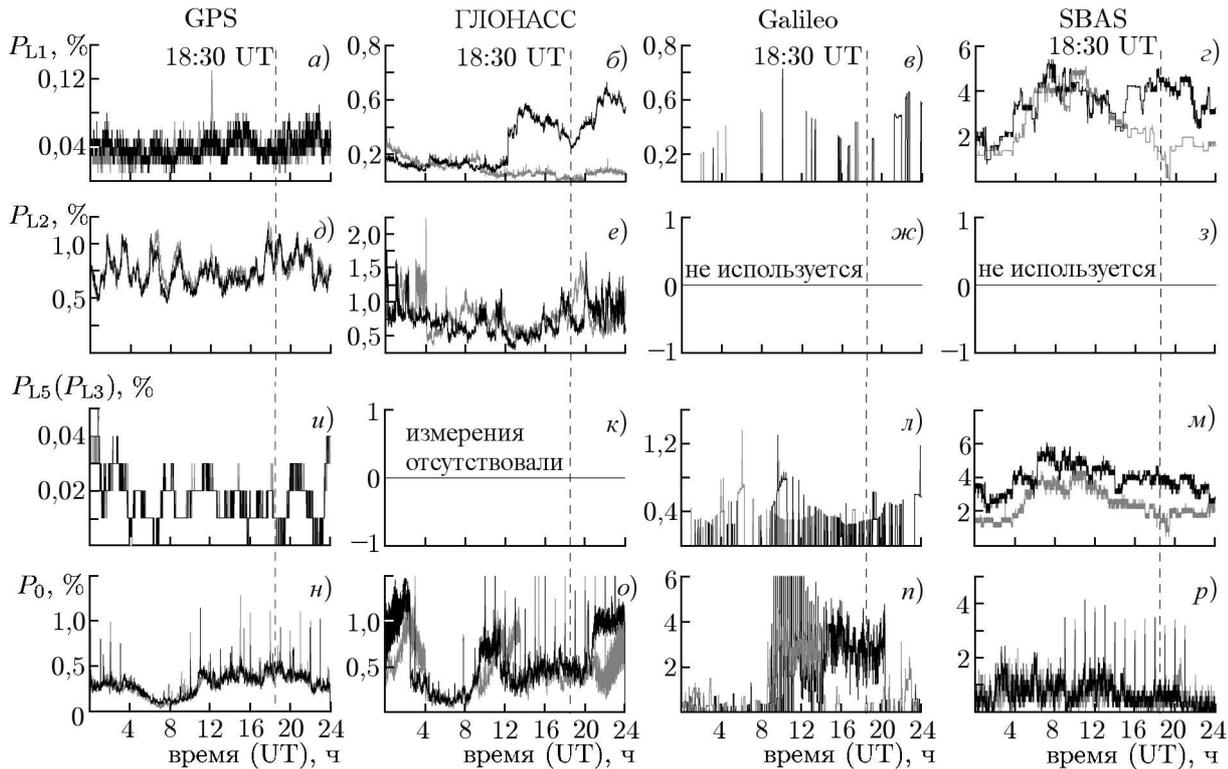


Рис. 7. Динамика сбоев измерения фазы на частотах L1 (а-г), L2 (д-з), L5/L3 (у-м), а также пропусков эпох измерений отдельных приёмников (н-р) для систем GPS (а, д, у, н), ГЛОНАСС (б, е, в, о), Galileo (в, ж, л, п) и SBAS (г, з, м, р). Данные представлены за 22 июня 2015 года (чёрная кривая) и 21 июня (контрольный день, серая кривая). Вертикальной штриховой линией отмечено начало главной фазы бури в 18:30 UT

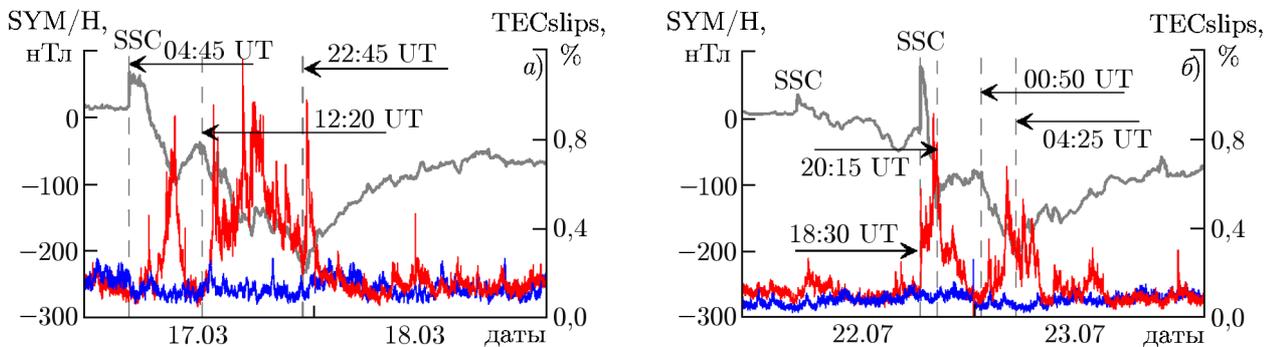


Рис. 8. Распределение сбоев измерений ПЭС для 17–18 марта 2015 года (а) и 22–23 июня 2015 года (б). Штриховыми линиями обозначены ключевые моменты бури. Серая кривая — индекс SYM/H (шкала слева), красная кривая — сбои измерений ПЭС, синяя кривая — сбои измерений ПЭС в контрольные дни (16 марта 2015 года и 21 июня 2015 года)

Малая потребляемая мощность и простота установки приёмников ГНСС являются преимуществами при развёртывании выносных пунктов в условиях ограниченной инфраструктуры.

В связи с тем, что ГНСС работают на высоких частотах, поглощение в D-области ионосферы практически не сказывается на их функционировании. С одной стороны, это является безусловным плюсом. ГНСС позволяют получать оценки ионосферных параметров даже в условиях сильных магнитных бурь, когда большое поглощение в D-области приводит к «блэкауту» на ионо-

зондах. С другой стороны, полученные оценки могут не иметь ничего общего с возможностью приёма коротковолнового радиосигнала и работы радарных станций, т.к. возникшее поглощение, в отличие от влияния на сигналы ГНСС, на прохождении волн более низких частот будет сказываться значительно.

1.4. Проблемы оценки абсолютных значений

Хорошо известные формулы [32, 33] позволяют получать интегральное содержание электронов вдоль луча «спутник—приёмник» на основе фазовых,

$$I = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + \text{const} + \sigma \phi] \quad (1)$$

и групповых,

$$I = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [P_2 - P_1 + \text{DCB}c + \sigma P], \quad (2)$$

измерений. Здесь f_1 и f_2 — пара рабочих частот ГНСС; $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ (P_1 и P_2) — фазовые псевдодальности (групповые псевдодальности), измеренные на частотах f_1 и f_2 соответственно, const — константа, связанная с неоднозначностью фазовых измерений; DCB — дифференциальная кодовая задержка двух сигналов совместно в аппаратуре спутников и приёмников; $\sigma \phi$ и σP — случайные шумы фазовых и групповых измерений; c — скорость света.

Формулы (1) и (2) включают в себя неизвестные константы const и DCB, не позволяющие ни по фазовым, ни по групповым измерениям получать абсолютные параметры напрямую. Слагаемое const является уникальным для некоторой пары спутник—приёмник и постоянным для непрерывного интервала наблюдений спутника в условиях отсутствия срыва сопровождения фазы. Слагаемое DCB обусловлено различной задержкой для каждой из частот в трактах спутника и приёмника. Как правило, DCB стабильны в течение по крайней мере суток [34], но могут характеризоваться значительной изменчивостью на более длительном масштабе [17, 35]. Для спутников BeiDou/Compass DCB могут быть нестабильны внутри суток [36]. На рис. 9 приведена динамика фазового (серая кривая) и группового (чёрная кривая) ПЭС на луче «ISTP—G08» 22 июня 2015 года. Станция ISTP сети SibNet [37] расположена в г. Иркутске (52° с. ш., 104° в. д.). Данные фазового ПЭС сдвинуты примерно на 10 TECU вверх для удобства.

Получение абсолютного ПЭС связано с оценкой DCB (или const) и требует введения модели измерений, включающей в том числе модельные предположения о среде [17]. Возникающие ошибки в совместных уравнениях (как ошибки измерений, так и ошибки модельных предположений) будут приводить к неточностям в оценке ПЭС.

Сложность оценки абсолютного ПЭС особенно актуальна при решении задач в условиях реального времени. На рис. 10 приведены ошибки оценки вертикального ПЭС и производной ПЭС над станцией ГНСС (а), а также широтного и долготного градиента (б). Оценки получены с использованием станции TORY сети SibNet. Рисунок 10 демонстрирует существенный рост ошибки

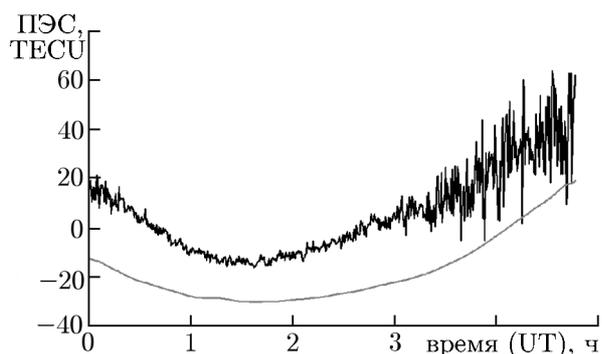


Рис. 9. Динамика фазового (серая кривая) и группового (чёрная кривая) ПЭС на луче «ISTP—G08» 22 июня 2015 года

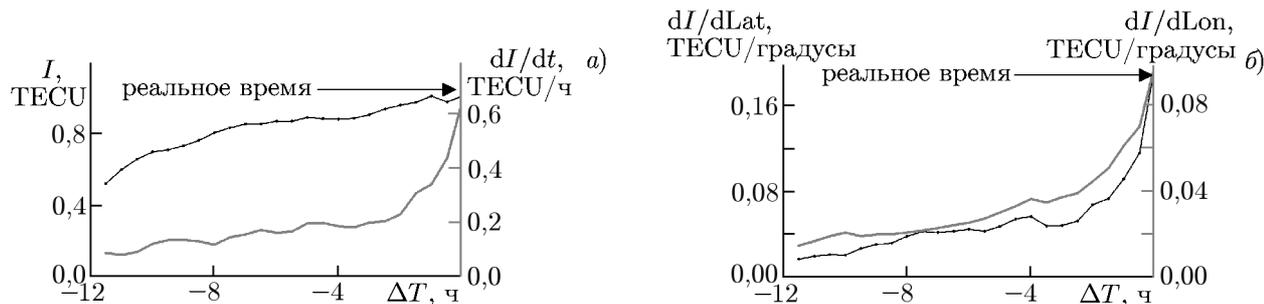


Рис. 10. Ошибки определения ионосферных параметров в зависимости от времени заблаговременности ΔT

в режиме реального времени. В результате, в наиболее важном в практическом аспекте режиме возникают дополнительные сложности.

1.5. Интегральный характер измерений и отсутствие точной связи ПЭС и параметров радиоканала

Значимым минусом в ГНСС-измерениях является их интегральный характер и отсутствие точной связи ПЭС и параметров радиоканала. Указанные выше формулы (1) и (2) позволяют оценить, причём с неоднозначностью, только интеграл от числа электронов вдоль луча спутник—приёмник. Использование глобальных ионосферных карт для оценки критической частоты [38] также не решает проблемы. В результате возникает сложность с пересчётом интегральных измерений ПЭС в параметры радиоканала. Как правило, для этого применяются ионосферные модели (см., например, [16]). Для получения распределения электронной концентрации или критической частоты используют локальную или глобальную коррекцию модели [15]. Однако связь ПЭС и параметров радиоканала, например критической частоты слоя F_2 , является сильно обусловленной используемой моделью.

Прежде всего на точность влияет форма профиля электронной концентрации N_e в области F . На рис. 11 представлены разные профили N_e при одном и том же значении ПЭС (20 TECU). Профили получены на основе модели IRI-2016 [39] (чёрная кривая), IRI-plas [40] (красная кривая) и NeQuick2 [41] (синяя кривая). Расчёты выполнены для 52° с. ш., 104° в. д. и момента времени 01:30 UT 1 января 2000 года. Даже при корректной оценке вертикального ПЭС в интересующей нас точке значения максимальной электронной концентрации в слое F_2 (критической частоты) могут значительно отличаться, что существенно для моделирования распространения радиоволн. Для моделей NeQuick2 и IRI-2016 отличие профилей ниже максимума слоя F_2 компенсируется более медленным (но достаточно мало различающимся) спаданием профиля выше 500 км. Простая оценка максимальной применимой частоты для данных условий может быть получена для трасс с протяжённостью 3000 км на основе фактора распространения $M(3000)F_2$. Указанные модели используют стандарт Сектора радиосвязи Международного телекоммуникационного союза (ITU-R) [42] для оценки $M(3000)F_2$, поэтому для всех вариантов модельных расчётов его значения близки и составляют около 3,1. Оценка максимальной применимой частоты на трассах 3000 км составляет 20,6 МГц для модели IRI-plas, 23,0 МГц для модели NeQuick2 и 23,8 МГц для модели IRI-2016. Таким образом, расхождение составляет около 4 МГц. Также стоит отметить, что расчёты максимальной применимой частоты на основе $M(3000)F_2$ являются достаточно приближёнными, в то время как ГНСС могут обеспечить более точное её определение при оценках распределения N_e вдоль траектории распространения коротковолновых сигналов.

С точки зрения перспективы развития технологии и снижения ошибок оценки ионосферных

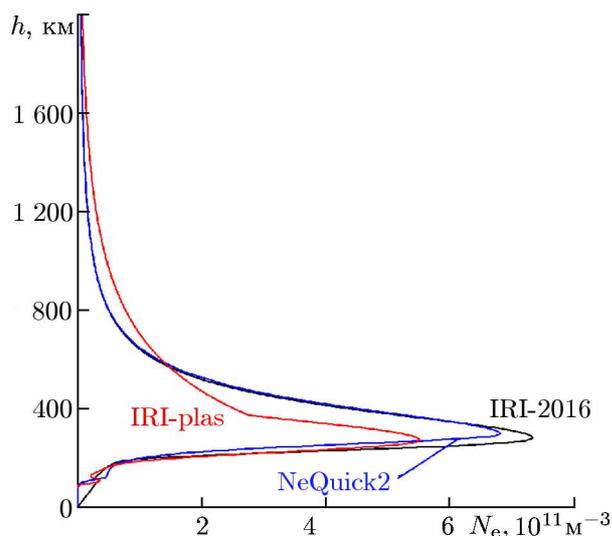


Рис. 11. Профиль электронной концентрации при одном и том же значении ПЭС (20 TECU) для моделей IRI-2016 (чёрная кривая), IRI-plas (красная кривая), NeQuick2 (синяя кривая)

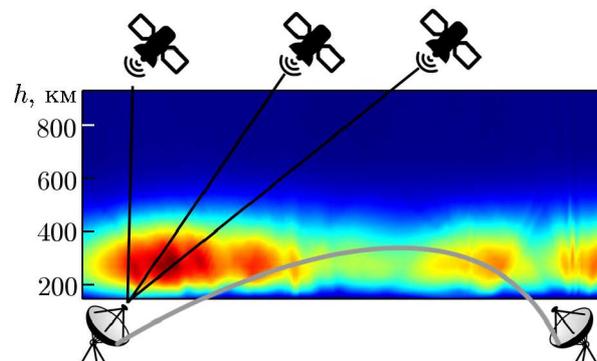


Рис. 12. Геометрия зондирования ионосферы приёмником ГНСС при наличии ионосферных градиентов и неоднородностей. В качестве подложки использована 2D-реконструкция ионосферы из работы [52]

параметров, возникающих за счёт интегрального характера измерений, имеет смысл комбинирование приёмников ГНСС с другими средствами. Одним из возможных устройств, наиболее простым в развёртывании и согласовании работы, является ионозонд. Современные ионозонды характеризуются малыми излучающими мощностями (10 Вт в режиме вертикального зондирования) [43] и возможностью получения данных с высоким временным разрешением (до 5 с). Ионозонд позволяет измерять профиль электронной концентрации до максимума слоя F_2 в одной точке (над станцией при вертикальном зондировании). Данные ионозонда, например, могут быть использованы для коррекции параметров нижней части ионосферы, а данные ГНСС — для оценки пространственных градиентов и осуществления пространственной экстраполяции в интересующую область. Работы [44, 45] показывают высокую эффективность объединения сетей ГНСС и ионозондов наклонного зондирования для получения достаточно точной ассимиляционной модели, позволяющей успешно работать даже в условиях наличия перемещающихся ионосферных возмущений.

Ещё одним фактором, усложняющим оценку параметров радиоканала и ПЭС, является влияние плазмосферы [46]. Последняя может вносить значительный вклад в ПЭС, при этом её точный учёт достаточно затруднителен и большинство моделей её не включают. Исключением является модель IRI-plas.

Градиенты электронной концентрации [47] и ионосферные неоднородности [48] значительно влияют на форму лучевых траекторий радиосигналов. С другой стороны, градиенты ПЭС [46] и ионосферные неоднородности могут существенно влиять на оценку параметров радиоканала. При экстраполяции (интерполяции) данных ПЭС из области наблюдения в интересующую область (рис. 12) результаты могут искажаться. Следует отметить, что открытым остаётся важный вопрос о радиусе пространственной корреляции.

При этом для определения, например, максимальной применимой частоты методы расчёта на основе входного распределения электронной концентрации также могут вносить свои ошибки. Так, метод передаточных характеристик (метод Смита), часто используемый на практике,

не учитывает градиенты электронной концентрации [49]. Метод геометрической оптики [50, 51] лишён этого недостатка, но требует информации о распределении электронной концентрации вдоль радиотрассы, что, в свою очередь, налагает существенные требования на точность оценки градиентов электронной концентрации.

1.6. Невозможность учёта слоёв E , E_s , D

Невозможность учёта слоёв E , E_s , D обусловлена малым вкладом указанных областей в ПЭС, а также отличием фотохимии области F , плазмосферы и областей E/D . В результате этого взаимосвязь электронной концентрации в области F и электронной концентрации в областях E и D невелика, а взаимосвязь с электронной концентрацией в слое E_s практически отсутствует. При этом слои E , E_s и D значительно влияют на распространение коротковолновых сигналов и, следовательно, на параметры радиоканала. В случае комбинирования ГНСС и ионозонда эта проблема может решаться оценкой электронной концентрации в указанных слоях с помощью ионозондовых измерений при вертикальном зондировании с пространственной интерполяцией на основе моделей.

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные ГНСС могут использоваться для оценки параметров ионосферы в интересах коррекции ионосферных ошибок радиотехнических систем, однако с рядом ограничений. Достоинством ГНСС является большое число измерений и их стабильность даже в условиях магнитных бурь. При этом существует ряд проблем, которые необходимо учитывать при использовании данных, включая сложности пересчёта измерений ПЭС в ионосферные поправки и особенности измерений в реальном времени. Развитие технологии ГНСС для решения указанных задач заключается, по всей видимости, в их совместном использовании с другими радиотехническими средствами, нивелирующими недостатки ГНСС. При этом при реализации комплекса оперативного мониторинга перспективно использование дополнительных средств с низким уровнем излучаемой мощности и возможностью быстрого развёртывания, какими являются, в частности, ионозонды.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16, а также при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20–45–383010 и частично РФФИ (проект 18–35–00218). Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckprf.ru/ckpr/3056/>.

Авторы выражают благодарность Б. Нава за программный код NeQuick2, Д. Билитце и обществу IRI за коды модели IRI, Т. Л. Гуляевой за код IRI-plas, А. В. Ойнацу за помощь с корректировкой кода IRI-plas, а также М. В. Клименко, Д. С. Котовой, В. Б. Оводенко за обсуждения работы и совместные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткачёв Г. Н. Проблема оперативного обеспечения современных средств дальней радиолокации геофизическими данными // Тезисы докл. Международной байкальской молодёжной научной школы по фундаментальной физике. 11–16 сентября 2017 г. Иркутск, С. 7–9.
2. Reinisch B., Galkin I., Belehaki A., et al. // Radio Sci. 2018. V. 53, No. 3. P. 365–378. <https://doi.org/10.1002/2017RS006263>

3. Подлесный А. В., Брынько И. Г., Куркин В. И. и др. // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 24–31.
4. Evans J. V. // Planetary Space Sci. 1970. V. 18, No. 8. P. 1 225–1 253. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(70\)90214-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(70)90214-X)
5. Потехин А. П., Медведев А. В., Заворин А. В. и др. // Космич. исслед. 2008. Т. 46, вып. 4. С. 356–362.
6. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М. : Физматлит, 2007. 255 с.
7. Su M., Su X., Zhao Q., Liu J. // Sensors. 2019. V. 19. No 1. Art. no. 198. <https://doi.org/10.3390/s19010198>
8. Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., et al. // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 761–796. <https://doi.org/10.1007/BF00751350>
9. Bland E. C., McDonald A. J., de Larquier S., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119, No. 7. P. 5 830–5 846. <https://doi.org/10.1002/2014JA020076>
10. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., et al. // J. Space Weather Space Clim. 2013. V. 3. Art. no. A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013049>
11. Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., et al. // J. Geodesy. 2009. V. 83, No. 3–4. P. 263–275. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>
12. Zolesi B., Belehaki A., Tsagouri I., Cander L. R. // Radio Sci. 2004. V. 39, No. 2. Art. no. RS2011. <https://doi.org/10.1029/2003RS002936>
13. Nesterov I. A., Kunitsyn V. E. // Adv. Space Res. 2011. V. 47, No. 10. P. 1 789–1 803. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.11.034>
14. Kotova D. S., Ovodenko V. B., Yasyukevich Y. V., et al. // GPS Solut. 2020. V. 24, No. 1. Art. no. 25. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0936-x>
15. Ясюкевич Ю. В., Оводенко В. Б., Мыльников А. А. и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017. № 2 (34). С. 19–31. <https://doi.org/10.15350/2306-2819.2017.1.19>
16. Ovodenko V. B., Trekin V. V., Korenkova N. A., Klimenko M. V. // Adv. Space Res. 2015. V. 56, No. 5. P. 900–906. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.017>
17. Ясюкевич Ю. В., Мыльникова А. А., Куницын В. Е., Падохин А. М. // Геомагн. аэрон. 2015. Т. 55, вып. 6. С. 790–796. <https://doi.org/10.7868/S0016794015060176>
18. Robustelli U., Baiocchi V., Pugliano G. // Electronics. 2019. V. 8, No. 1. Art. no. 91. <https://doi.org/10.3390/electronics8010091>
19. Харисов В. Н., Перов А. И., Болдин В. А. Глобальная спутниковая радионавигационная система GLONASS. М. : ИПРЖР, 1998. 400 с.
20. Afraimovich E. L., Lesyuta O. S., Ushakov I. I., Voeykov S. V. // Ann. Geophys. 2002. V. 45, No. 1. P. 55–71. <https://doi.org/10.4401/ag-3494>
21. Conker R. S., El-Arini M. B., Hegarty C. J., Hsiao T. // Radio Sci. 2003. V. 38. No. 1. Art. no. 1001. <https://doi.org/10.1029/2000RS002604>
22. Kintner P. M., Ledvina B. M., de Paula E. R. // Space Weather. 2007. V. 5. Art. no. S09003. <https://doi.org/10.1029/2006SW000260>
23. Klobuchar J. A., Kunches J. M., Van Dierendonck A. J. // GPS Solut. 1999. V. 3, No. 2. P. 69–71. <https://doi.org/10.1007/PL00012794>
24. Afraimovich E. L., Demyanov V. V., Ishin A. B., Smolkov G. Y. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2008. V. 70, No. 15. P. 1 985–1 994. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.09.008>
25. Маслов О. Н., Пашинцев В. П. Модели трансionoсферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи // Приложение к журналу «Инфокоммуникационные техно-

- логии». 2006. Вып. 4. Самара : ПГАТИ. 357 с.
26. Rama Rao P. V. S., Gopi Krishna S. G., Vara Prasad J., et al. // *Ann Geophys.* 2009. V. 27. P. 2101–2110. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-2101-2009>
27. Yue X., Wan W., Yan L., et al. // *Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability, and Consequences* / Ed. by N. Buzulukova. Amsterdam : Elsevier, 2018. P. 541–554. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812700-1.00022-4>
28. Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. 349 с.
29. Захаров В. И., Ясюкевич Ю. В., Титова М. А. // *Космич. исслед.* 2016. Т. 54, вып. 1. С. 23–33.
30. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200J.pdf>.
31. Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. // *Space Weather.* 2014. V. 12. No. 7. P. 508–525. <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>
32. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice.* 5th ed. New York, NY, USA : Springer-Verlag, 2001. 412 p.
33. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ РВЧ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
34. Sardon E., Zarraoa N. // *Radio Sci.* 1997. V. 32, No. 5. P. 1899–1910. <https://doi.org/10.1029/97RS01457>
35. Themens D. R., Jayachandran P. T., Langley R. B. // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120, No. 9. P. 8155–8175. <https://doi.org/10.1002/2015JA021639>
36. Li Z., Yuan Y., Li H., et al. // *J. Geodesy.* 2012. V. 86, No. 11. P. 1059–1076. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0565-4>
37. Ясюкевич Ю. В., Веснин А. М., Перевалова Н. П. // *Солнечно-земная физика.* 2018. Т. 4, № 4. С. 82–94. <https://doi.org/10.12737/szf-44201809>
38. Gerzen T., Jakowski N., Wilken V., Hoque M. M. // *Ann. Geophys.* 2013. V. 31. P. 1241–1249. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-1241-2013>
39. Bilitza D. // *Adv. Radio Sci.* 2018. V. 16. P. 1–11. <https://doi.org/10.5194/ars-16-1-2018>
40. Gulyaeva T., Bilitza D. Towards an ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model // In: *New Developments in the Standard Model*, (R. J. Larsen ed.). Hauppauge, New York : NOVA, 2012. P. 1–39.
41. Nava B., Coisson P., Radicella S. M. // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2008. V. 70, No. 15. P. 1856–1862. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.015>
42. Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR). *CCIR Atlas of ionospheric characteristics* // Rep. 340, Geneva : Int. Telecommun. Union, 1967.
43. Podlesny A. V., Kurkin V. I., Medvedev A. V., Ratovsky K. G. // *Proc. XXX URSI General Assembly, Istanbul, Turkey, August 13–20, 2011.* P. 605–1145. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6051145>
44. Fridman S. V., Nickisch L. J., Hausman M., Zunic G. // *Radio Sci.* 2016. V. 51, No. 3. P. 176–183. <https://doi.org/10.1002/2015RS005890>
45. Nickisch L. J., Fridman S., Hausman M., et al. // *Radio Sci.* 2016. V. 51, No. 3. P. 184–193. <https://doi.org/10.1002/2015RS005902>
46. Котова Д. С., Оводенко В. Б., Ясюкевич Ю. В. и др. // *Химическая физика.* 2018. Т. 37, № 7. С. 87–92. <https://doi.org/10.1134/S0207401X18070129>
47. Bernhardt P. A., Hei M. A., Siefring C. L., Wilkens M. R. // *Radio Sci.* 2014. V. 49, No. 7. P. 506–517. <https://doi.org/10.1002/2014RS005409>
48. Падохин А. М., Андреева Е. С., Назаренко М. О. и др. // *Вестник Московского университета.*

- Серия 3: Физика. Астрономия. 2019. Т. 74, Вып. 3. С. 57–64.
49. Котович Г. В., Ким А. Г., Михайлов С. Я. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 4. С. 547–551.
50. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М. : Наука, 1980. 304 с.
51. Крюковский А. С., Лукин Д. С., Кирьянова К. С. // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 9. С. 1 028–1 034.
52. Kunitsyn V., Andreeva E., Nesterov I., Padokhin A. // Geodetic Sciences — Observations, Modeling and Applications / ed. S. Jin, IntechOpen, 2013. 344 p. Croatia. <https://doi.org/10.5772/54589>

Поступила в редакцию 24 марта 2020 г.; принята в печать 21 апреля 2020 г.

GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS FOR IONOSPHERIC ERROR CORRECTION IN RADIO-ENGINEERING SYSTEMS: CHALLENGES AND PROSPECTS

Yu. V. Yasyukevich, A. M. Vesnin, and V. I. Kurkin

Global navigation satellite systems (GNSS), such as GPS, GLONASS, Galileo, and Bei-Dou/Compass are widely used for solving a variety of research and applied problems. This work considers the use of GNSS signals for monitoring of the ionosphere to provide an ionospheric error correction in radio-engineering systems in quasireal time. The problems arising in this case, among which the absolute ionospheric parameter estimation is the key problem, are discussed.