

Б. С. РИВКИН

**СПУТНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ENC 2017**

*Статья содержит обзор докладов, представленных на международной Европейской конференции по навигации ENC 2017 и посвященных применению спутниковых технологий.*

**Ключевые слова:** ГНСС, RTK, PPP, Galileo, GPS, ГЛОНАСС, SBAS, COSPAS-SARSAT, LOS/NLOS-сигналы, 3D-карта.

**Введение**

9–12 мая 2017 г. в Лозанне (Швейцария) состоялась юбилейная 25-я Европейская конференция по навигации ENC 2017, являющаяся крупнейшим симпозиумом такого рода в Европе и собравшая специалистов со всех континентов.

Конференция эта, традиционно проводимая Европейской группой институтов навигации (European Group of Institutes of Navigation), на этот раз была организована Институтом навигации Швейцарии и проходила в Конгресс-центре Федеральной политехнической школы Лозанны.

Тематика конференции, доклады которой были распределены по 23 секциям, охватывала принципы работы и сервисы, предоставляемые глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС), проблемы навигации в воздухе, на суше и в море, а также пешеходной и в закрытых помещениях. И в абсолютном большинстве работ, где это только было возможно, ставка при решении тех или иных задач делалась на сигналы ГНСС. В силу этого в данном обзоре именно о работах, демонстрирующих эффективность применения спутниковых технологий, и идет речь.

**Galileo**

Особый интерес к ГНСС Galileo был обусловлен следующими событиями. 17.11.2016 г. были выведены на орбиту одновременно четыре космических аппарата (КА) Galileo, после чего общее число КА, выведенных на орбиту, составило 18. При этом на орбитах находилось четыре КА типа IOV, запущенных на этапе орбитальных проверок системы (In Orbit Validation), и 14 штатных типа FOC (Full Operational Capability). Напомним, что для полного развертывания системы их должно быть 30 (24 используются по целевому назначению и шесть должны находиться в орбитальном резерве). Однако это не помешало Европейской комиссии (European Commission) объявить 15.12.2016 г. о введении системы в строй в режиме «начальной эксплуатации» (Initial Operational Capability – IOС), не предполагающей глобальный характер покрытия.

---

**Ривкин** Борис Самуилович. Кандидат технических наук, начальник Центра компетенции в области навигации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

1. В этой связи рассмотрим вопрос о том, каковы точностные характеристики системы Galileo на текущий момент, чему и был посвящен доклад [1] (здесь и далее, если не оговорено особо, приводятся ссылки на доклады, представленные на Европейской конференции по навигации ENC 2017).

Общепринято характеризовать точностные характеристики ГНСС погрешностью определения дальности потребителем (User Range Error – URE). При этом погрешность  $\Delta$  определения плановых координат задается соотношением

$$\Delta = \text{URE} \times \text{HDOP}, \quad (1)$$

где HDOP (Horizontal Dilution of Precision) – так называемый «геометрический фактор». В абсолютном большинстве случаев при анализе погрешностей ГНСС ограничиваются рассмотрением варианта, когда угол возвышения КА превышает  $5^\circ$ . В упомянутой же работе он принят равным  $0^\circ$ , что, с одной стороны, загроубляет приводимые далее точностные характеристики ГНСС Galileo по сравнению с результатами других исследователей, а с другой – позволяет получить оценку URE в наихудшем для потребителя случае.

Полученные авторами работы [1] результаты основаны на экспериментах, проводившихся в период с 15.12.2016 г. по 28.02.2017 г. и использовавших сигналы 11 КА системы Galileo, включая три КА типа IOV. При этом было установлено, что при нахождении потребителя в наихудшей для приема сигналов ГНСС точке на земной поверхности (с учетом тропосферной задержки) и использовании двухчастотных приемников для Galileo величина URE = 70 см ( $P = 0,95$ ), в то время как для GPS эта величина составила 150 см. Разница эта объясняется тем фактом, что обновление навигационного сообщения в системе Galileo осуществляется с интервалом, минимальное значение которого составляет 10 мин, тогда как для GPS типичная его величина – 2 ч при аналогичном с Galileo содержании навигационного сообщения. Более того, КА Galileo снабжаются новыми навигационными данными несколько раз в час, тогда как для КА GPS эта операция выполняется раз в сутки.

Разнятся и другие характеристики систем, влияющие на их точность. Так, погрешность передаваемых в навигационном сообщении параметров знания орбиты КА в трех измерениях для КА Galileo не превышает в полученных экспериментах 95 см ( $P = 0,95$ ), а для КА GPS – 225 см, что как раз вызвано разной периодичностью обновления навигационных данных, передаваемых по системам на борт КА. Уступает GPS и по погрешности выработки времени на борту КА, которая составляет в пересчете в URE до 121 см ( $P = 0,95$ ), тогда как для Galileo она не превышает 46 см. Обусловлено последнее, в частности, тем, что на ряде КА Galileo установлены водородные мазеры, имеющие более стабильные временные характеристики, чем соответствующая аппаратура на КА GPS.

Сопоставляя величины для URE в 70 см и 46 см для Galileo и 150 см и 121 см для GPS, можно сделать вывод о том, что при использовании двухчастотных приемников именно погрешность часов на борту КА вносит определяющий вклад в точностные характеристики рассматриваемых систем.

2. Исследованию эффективности использования сигналов ГНСС Galileo в режиме RTK (Real Time Kinematic) при двухчастотном приеме был посвящен доклад [2], авторы которого приводят результаты эксперимента, когда принимались сигналы 10 КА GPS, 8 КА ГЛОНАСС и 5 КА Galileo. При этом на базе в 1 м в условиях отсутствия переотражений сигналов удалось получить следующие значения среднеквадратических погрешностей (СКП) определения плановых координат: GPS – 2 мм, Galileo – 3 мм, ГЛОНАСС – 5 мм.

В условиях приема сигналов под плотным пологом леса использование сигналов ГНСС Galileo повышает ориентировочно в 2 раза доступность получения навигационного решения по сравнению с ситуацией, когда до того принимались лишь сигналы GPS и ГЛОНАСС.

3. Если в работе [2] исследовалась эффективность применения сигналов ГНСС Galileo в режиме RTK, то доклад [3] был посвящен изучению характеристик системы в режиме PPP (Precise Point Positioning) при поддержке его в реальном времени доступным с 2016 г. сервисом G4 фирмы «Fugro», ориентированным на морских потребителей и обслуживающим также ГНСС GPS, BeiDou и ГЛОНАСС.

Как известно, для получения PPP-решения необходимо наличие у потребителя высокоточной эфемеридно-временной информации (ЭВИ) об орбитах КА и поправках в показания их часов. Именно эти данные, а также величины, позволяющие потребителю рассчитать тропосферные задержки по всем четырем ГНСС, и поставляет с 2016 г. сервис G4, обрабатывая информацию принадлежащих «Fugro» 45 контрольных станций, распределенных по земному шару. Выработанные при этом данные транслируются потребителям через восемь гео-стационарных КА, входящих в состав аппаратуры сервиса.

В самое последнее время разработчики «Fugro» существенно продвинулись в обеспечении решения проблемы целочисленной неоднозначности в фазовых измерениях за счет трансляции потребителям оценки немоделируемых смещений в аппаратуре КА, в англоязычной литературе называемых «некалибруемыми аппаратурными задержками» (UHD). Это позволило существенно повысить точность PPP-решения (соответствующий сервис получил наименование G4+).

Поправки к данным ГНСС Galileo, вырабатываемые сервисом G4+, были доступны с момента перевода системы в фазу ИОС, т.е. с 15.12.2016 г. В докладе приводится ряд примеров использования этих поправок при реализации различных режимов работы системы. Так, в эксперименте, проведенном в Осло в марте 2017 г., при использовании сигналов в среднем пяти КА Galileo удалось в режиме PPP реального времени получить погрешность трехмерного позиционирования, не превышающую 10 см. Время сходимости алгоритма при этом составило порядка часа, что вызвано, по мнению авторов доклада, как ограниченным числом используемых КА, так и относительно большой величиной геометрического фактора (он в эксперименте достигал трех).

Наконец, эффективность использования сигналов Galileo была подтверждена экспериментом в районе Фолклендских островов, где возможен прием сигналов десяти КА GPS, шести КА ГЛОНАСС и лишь трех КА Galileo. При этом, если при изменении помеховой обстановки погрешность определения плановых координат методом PPP-позиционирования в режиме реального времени по системам GPS и ГЛОНАСС достигала 20 см, то введение в обработку сигналов Galileo даже при столь незначительном количестве КА системы позволило снизить эту величину до 5-7 см.

4. Не следует забывать, что Galileo является первой ГНСС, при проектировании которой в нее были заложены функции «поиска и спасения при бедствиях» (Search and Rescue – SAR). Эффективности использования режима SAR/Galileo, полностью интегрированного в концепцию MEOSAR системы COSPAS – SAR-SAT, базирующуюся на использовании среднеорбитных (MEO) КА, был посвящен доклад [4].

Соответствующий сервис носит наименование SAR/Galileo Forward Link Service (FLS). В 2014 г. были завершены квалификационные испытания назем-

ной его компоненты, а в 2016-м – полномасштабные испытания сервиса в целом, открывшие, кстати, дорогу к переводу ГНСС Galileo в режим ИОС.

В настоящее время FLS-сервис, зона действия которого приведена на рис. 1, гарантирует локализацию SAR-маяка, передающего сигнал тревоги, который затем через MEOSAR-спутники транслируется соответствующим службам спасения. В перспективе предполагается не только превратить сервис в глобальный, но и наделить режим SAR/Galileo функцией передачи владельцам SAR-маяка, имеющим приемник сигналов Galileo, информации о том, что их сигнал принят и служба спасения задействована.

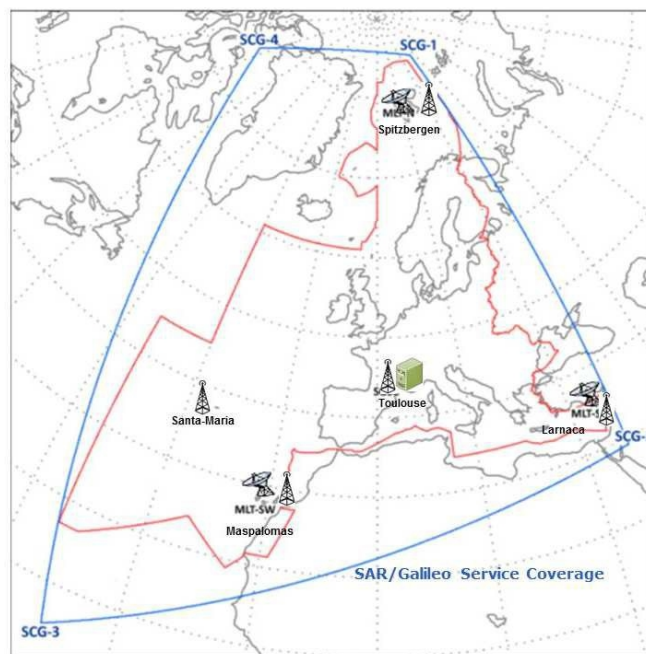


Рис. 1. Зона покрытия FLS-сервиса

В соответствии с заявленными характеристиками FLS-сервис должен обеспечивать обнаружение и локализацию источника сигнала о бедствии с погрешностью не более 5 км ( $P = 0,95$ ) за время не более 10 мин. В том случае, если маяк системы COSPAS – SARSAT оборудован ГНСС-приемником и передает вместе с сигналом бедствия данные о своих координатах, то локализация должна осуществляться с погрешностью не более 100 м практически мгновенно. Если же такое оборудование в составе маяка отсутствует, а именно это и имеет место в абсолютном большинстве случаев (сейчас в системе COSPAS – SRSAT используется свыше миллиона радиомаяков – трансляторов сигнала), то его позиционирование осуществляется с использованием спутниковой трилатерации, опирающейся на методы линейной триангуляции.

Что же показали испытания FLS-сервиса, проведенные в 2016 г.? Выяснилось, что сам сигнал о бедствии обнаруживается с вероятностью, превышающей  $P = 0,99$ , за время не более 100 сек, и с вероятностью свыше  $P = 0,97$  – не более 50 сек. Что касается задачи локализации положения маяка, то она решается с вероятностью более  $P = 0,92$  за время не более одной минуты. Одновременно было показано, что решение этой задачи с заявленными характеристиками FLS-сервиса при отсутствии в составе маяка ГНСС-приемника и при любом его по-

ложении на земной поверхности обеспечивается при условии приема сигналов маяка по меньшей мере девятью КА.

В работе приводится и прогноз эффективности FLS-сервиса при полном развертывании ГНСС Galileo и глобальном его использовании. В этом случае локализация маяка с погрешностью не более 5 км ( $P = 0,95$ ) за время не более 10 мин обеспечивается по всей земной поверхности (за исключением района Новой Зеландии), а для Европы и Северной Атлантики за те же 10 мин погрешность не превысит 2 км ( $P = 0,95$ ).

### Региональные спутниковые системы дифференциальной коррекции

Одним из решений, повышающим точность решения задачи позиционирования с использованием сигналов ГНСС, как известно, являются спутниковые системы дифференциальной коррекции (Satellite Based Augmentation System – SBAS), такие как EGNOS, обеспечивающая европейских потребителей, WAAS (США), QZSS (Япония) и GAGAN (Индия). При этом на конференции было уделено внимание как разработкам новых систем подобного рода, так и анализу эффективности уже существующих.

1. Исследованиям, ведущимся в интересах создания SBAS для региона Австралии и Новой Зеландии, был посвящен доклад [5]. Работы эти, на которые правительство Австралии выделило на два года 12 млн австралийских долларов, выполняет фирма GMV (Испания) с привлечением компаний Lockheed Martin и Zeta Associates (обе – США) в части организации канала связи с КА системы INMARSAT, находящимся на геостационарной орбите (GEO), и компании INMARSAT в части загрузки SBAS-коррекции на ее КА 4F1.

Предполагается, что к концу 2017 г. потребителям региона будут доступны следующие сервисы:

- SBAS L1, транслирующий (аналогично реализованному в системах EGNOS и WAAS) поправки к данным, передаваемым сигналом L1 GPS;
- SBAS L5 DFMS (Dual-Frequency and Multi-Constellation), передающий поправки к данным, содержащимся в сигналах L1/L5 GPS и E1/E5a Galileo. Немаловажно, что в этом случае выработки двухчастотных поправок парирована влияние ионосферной задержки, повышающей погрешность решения задачи местоопределения;
- RT-PPP-сервис, обеспечивающий, как ожидается, позиционирование потребителя в реальном времени с погрешностью не более 10 см.

Заметим, что RT-PPP-данные транслируются как сервисом SBAS L1, так и L5 DFMS. Более того, эти сервисы позволяют потребителю использовать их данные для получения обычных измерений от КА соответствующих ГНСС.

Самое примечательное состоит в том, что ведущиеся работы выполняются в рамках предложенной Lockheed Martin и GMV концепции создания SBAS второго поколения, имеющей глобальный охват (все существующие SBAS являются региональными) и отличающейся двухчастотным приемом поправок и мультисистемным подходом (прочие упомянутые выше SBAS вырабатывают поправки лишь на частоте L1 и только в GPS-измерения).

При этом имитационные испытания концепции, проведенные в лабораторных условиях в обеспечение посадки самолета в соответствии с требованиями Cat I, показали доступность дифпоправок с требуемой точностью с вероятностью  $P = 0,997$  при обработке как сигналов систем GPS + ГЛОНАСС, так и только GPS в любой точке земного шара. Работы, проводимые в рамках контракта

с правительством Австралии, нацелены на то, чтобы подтвердить практическую эффективность разработанных в рамках концепции аппаратно-программных решений.

Архитектура системы в целом состоит из следующих сегментов:

- 1) космического, включая КА ГНСС GPS и Galileo, а также КА 4F1 системы INMARSAT, предназначенный для трансляции SBAS-поправок на частотах L1 и L5;
- 2) наземного, содержащего:
  - сеть контрольных станций, расположенных на территории Австралии и Новой Зеландии для приема навигационных сигналов космического сегмента;
  - процессинговый центр для сбора данных, поступающих с контрольных станций, и выработки SBAS- и PPP-поправок с использованием разработанных GMV продуктов *magicSBAS* и *magicPPP*, обеспечивающих их выработку на любой наперед заданный регион земного шара;
  - канал обмена с КА 4F1 для загрузки на КА выработанных поправок;
- 3) потребителя, содержащего аппаратуру для приема как навигационных сигналов ГНСС GPS и Galileo, так и SBAS- и PPP-поправок;
- 4) обеспечения испытаний, предназначенного для их организации и контроля результатов, а также поддержки функционирования системы в целом.

При проведении испытаний, которые будут завершены в 2019 г., разработчикам системы придется учитывать, что КА GPS L5, как и Galileo E5a, транслирующие сигнал на частоте L5, не будут к этому моменту функционировать в штатном количестве. В связи с этим GMV не только окажет помощь геодезической службе Австралии, проводящей испытания, в определении моментов времени, когда наблюдается максимальное число КА GPS L5 и Galileo E5a, но и попытается использовать вместо сигнала на частоте L5 сигнал КА GPS L2.

Предполагается, что разворачиваемая система обеспечит посадку самолетов в соответствии с требованиями Cat I (определение с  $P = 0,95$  плановых координат с погрешностью не более 16 м и высоты не более 4 м) при использовании сервиса SBAS L5 DFMS. Что касается PPP-позиционирования, то прогнозируется, что погрешность определения координат неподвижного потребителя при отсутствии переотражений сигнала не превысит при двухчастотном режиме 3 см в горизонте и 7 см по вертикали.

2. Созданием собственной SBAS (Korea Regional Navigation Satellite System – KRNSS), состоящей из трех КА типа GEO и четырех КА, располагающихся на наклонных эллиптических геосинхронных орбитах (EIGSO), ведет и Южная Корея (см. рис. 2). Разработку ее предполагается завершить в 2018 г. и ввести в действие в 2020-м. Вопросу точности определения параметров орбиты КА системы, кардинальным образом влияющему на ее точностные характеристики, был посвящен представленный на конференции доклад [6].

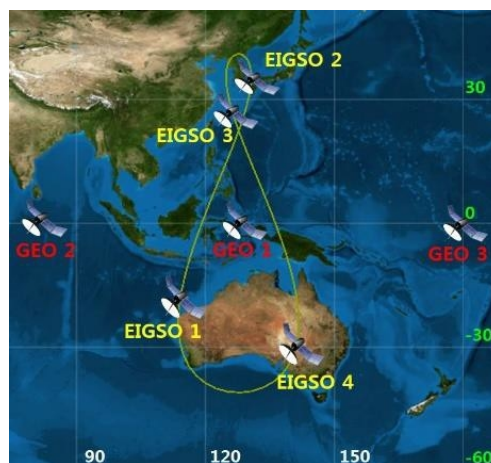


Рис. 2. Положение КА KRNSS на земной поверхности

Разработчикам системы было выдвинуто требование, чтобы все ее наземные контрольные станции располагались на территории страны, в силу чего базовые линии между ними оказываются малыми по сравнению с высотами орбит КА. По этой причине алгоритм высокоточного местоопределения по сигналам КА KRNSS предполагает эффективное использование измерений межспутниковых расстояний. Более того, утверждается, что на их основании без привлечения наземных измерений параметры орбиты КА могут быть определены с погрешностью на субметровом уровне.

Проблема возникает тогда, когда измерения межспутниковых расстояний почему-либо ограничены или недоступны. В этом случае для определения параметров орбит КА KRNSS предлагается использовать сигналы среднеорбитных КА GPS, Galileo, BeiDou и ГЛОНАСС, число которых при полном развертывании этих ГНСС превысит 100. Однако из-за того, что КА KRNSS находятся на орбитах гораздо выше, чем КА остальных ГНСС, транслирующих к тому же сигнал в направлении Земли, на КА KRNSS удастся принять лишь сигналы тех КА перечисленных ГНСС, которые в текущий момент находятся по ту сторону земного шара.

Работа [6] и посвящена вопросам анализа «видимости» среднеорбитных КА GPS, Galileo, BeiDou и ГЛОНАСС с КА KRNSS в предположении, что все системы полностью развернуты. При этом в процессе моделирования:

- учитывается, что для решения задачи определения положения КА KRNSS на орбите необходимо, чтобы он мог принять сигналы не менее трех среднеорбитных КА, принадлежащих одной и той же ГНСС;
- анализируется качество решения этой задачи в зависимости от величины угла  $\alpha$ , где  $\alpha$  – угол между линией, соединяющей КА KRNSS и среднеорбитный КА, и линией, соединяющей этот же среднеорбитный КА с центром Земли.

Результаты моделирования показали следующее:

- 1) для решения задачи в случае наличия ограничений на измерения расстояний между КА KRNSS, вызванных, например, вспышками на Солнце, должно выполняться следующее условие: минимальное значение угла  $\alpha_0 = 26,3^\circ$ , где  $\alpha_0$  – предельное значение угла  $\alpha$ . Если эти измерения недоступны, это условие принимает вид  $\min \alpha_0 = 32,5^\circ$ . При этом в первом случае для каждого КА KRNSS среднее число видимых спутников по всем среднеорбитным ГНСС составляет 4,2, а во втором – 15,9;
- 2) если положение КА KRNSS на орбите в трех измерениях определяется лишь на основании измерения межспутниковых расстояний и их число не превышает трех, то СКП такого трехмерного определения составляет 10,6 м. Если же дополнительно привлекаются среднеорбитные данные, то эта величина составляет 0,82 м;
- 3) если же межспутниковые измерения отсутствуют и обрабатываются лишь GPS-измерения при  $\alpha_0 = 26,3^\circ$ , то аналогичная СКП = 74,7 м. Однако если используется информация от всех среднеорбитных ГНСС, то при  $\alpha_0 = 32,5^\circ$  мы имеем СКП = 0,85 м.

3. Если разработчики SBAS для региона Австралии и Новой Зеландии и KRNSS еще ждут своего «звездного часа», то европейские потребители получили возможность пользоваться благами спутниковой системы дифференциальной коррекции EGNOS, предназначенной изначально для повышения точностных характеристик и получения информации о целостности ГНСС GPS, уже в 2009 г. Эффективности использования этой системы, предназначавшейся

прежде всего для обеспечения автоматизированной посадки самолетов, был посвящен на конференции доклад [7].

В работе прежде всего анализируются характеристики SBAS EGNOS в обеспечение требований Международной организации гражданской авиации (ICAO) к посадке самолетов по критериям APV-1 (заход на посадку с наведением в вертикальной плоскости) и LPV200 (позволяет принять решение о продолжении посадки или уходе на второй круг на высоте 200 футов, или 60 м). И в том и в другом случае по требованиям ICAO погрешность в определении горизонтальных координат (HNSE) с  $P = 0,95$  не должна превышать 16 м, а вертикальной (VNSE) – 20 м для APV-1 и 4 м для LPV200. Кроме того, к LPV200 предъявляется следующее дополнительное требование: при нормальном функционировании системы вероятность того, что VNSE превысит 10 м, не должна быть более  $10^{-7}$  на посадку.

Результаты, полученные в процессе эксплуатации системы в период с 01.01 по 31.12.2016 г., таковы:

- 1) доступность сервиса APV-1 составила 98,4%, а LPV200 – 99,0%;
- 2) с вероятностью  $P = 0,95$  погрешности определения координат не превысили:
  - для APV-1 – 1,1 м по HNSE и 2,3 м по VNSE;
  - для LPV200 – 1,1 м по HNSE и 2,2 м по VNSE, что существенно ниже требований ICAO.

С 2014 г. ведутся работы по обеспечению с использованием сигналов EGNOS судов торгового флота сервисом «Safety of Life» («спасение жизни на море»), к которому Международная морская организация (IMO) предъявляет, в частности, следующие требования:

- 1) погрешность определения координат ( $P = 0,95$ ) – 100 м в открытом море и 10 м при плавании в прибрежных водах и на подходах к гаваням;
- 2) доступность сигнала – 99,8%;
- 3) частота обновления данных по позиционированию – 2 с.

В 2016 г. сигнал EGNOS транслировался двумя GEO-спутниками PRN 120 и PRN 136, и, как показали наблюдения в период с апреля по декабрь 2016 г., по меньшей мере сигнал одного из КА был в распоряжении потребителей, т.е. доступность сигнала составила 100%. В точках размещения станций измерения дальности и мониторинга системы (RIMS) общим числом 34 радиальная погрешность определения координат места с использованием сервиса «Safety of Life» не превысила ( $P = 0,95$ ) 3,1 м, с запасом удовлетворив все требования IMO. Однако не следует забывать, что все это имеет место лишь в зоне действия системы EGNOS.

Приводятся в докладе и результаты использования сигнала EGNOS в сельском хозяйстве. Заметим, что еще в 2013 г. свыше 200000 тракторов были оснащены GPS-приемниками, однако точности лишь GPS оказалось недостаточно для реализации при проведении сельскохозяйственных работ режима «от прохода к проходу», требующего определения относительного положения трактора на интервале движения 15 минут с погрешностью ( $P = 0,95$ ) 30 см. Испытания, проведенные в местах размещения 26-ти RIMS, охватывающих всю континентальную Европу, показали, что при использовании сигнала EGNOS эта погрешность изменяется в пределах 18–45 см.

4. Еще одной идее использования спутниковой системы дифференциальной коррекции EGNOS был посвящен доклад [8], основанный на сервисе EDAS



(EGNOS Data Access Service), предназначенном для трансляции потребителям ГНСС-данных через Интернет. Тем самым обеспечивается доступ к ним потребителей, которые не имеют возможности непрерывно принимать сигналы КА EGNOS и ГНСС GPS, ГЛОНАСС и Galileo, например, в условиях плотной городской застройки.

С этой целью EDAS собирает сырые данные, поступающие от КА GPS, ГЛОНАСС и Galileo на все ГНСС-приемники, расположенные на всех наземных станциях системы EGNOS. К их числу относятся 39 RIMS и 6 станций передачи данных (NLES), расположенных на территории Европы и Северной Африки. Испытания, проведенные с марта 2016 г. по февраль 2017 г., показали, что доступность этого сервиса превышает 99%, а время, измеряемое с момента передачи последнего бита информации до момента передачи данных сервисом EDAS, не превышает одной секунды.

Целью работы является использование EGNOS-поправок, передаваемых сервисом EDAS в режиме реального времени, для формирования виртуальных контрольных станций (VRS) в местах расположения радиомаяков, устанавливаемых Международной ассоциацией маячных служб (IALA).

Эти маяки традиционно используются IALA при реализации режима DGNSS для трансляции дифференциальных поправок, парирующих погрешность в местоопределении по данным ГНСС. Полагается, что для недалеко разнесенных потребителей основная часть этой погрешности, вызванная погрешностями часов КА и знания параметров орбиты КА, а также тропосферной и ионосферной задержками при передаче навигационного сигнала, идентична. Заметим, что по состоянию на март 2017 г. число маяков IALA, установленных на территории 45 стран, включая большинство европейских, превысило 300.

Такую же функцию реализует и система EGNOS за исключением парирования влияния тропосферной задержки (для борьбы с ней в программное обеспечение ГНСС-приемника должна включаться описывающая ее изменчивость модель). Предлагается пересчитать EGNOS-коррекцию, поступающую на вход сервиса EDAS в авиационном формате RTCA, на точку расположения соответствующего радиомаяка, преобразовав ее в формат RTCM SC-104, в котором и транслируются ранее упомянутые поправки режима DGNSS для морских потребителей. Существенно, что такие EGNOS-VRS-поправки могут транслироваться не только через радиомаяки IALA, но и через базовые станции автоматической идентификационной системы (Automatic Identification System – AIS).

Для определения эффективности использования EGNOS-VRS-поправок в августе 2016 г. были проведены испытания, в процессе которых анализировались результаты местоопределения четырех транспортных средств, перемещавшихся по территории Франции, Великобритании, Швеции и Германии. При этом были сформированы девять VRS-станций в местах расположения радиомаяков IALA или контрольных станций системы AIS в этих регионах.

Результаты испытаний показали, что при удалении транспортного средства от места расположения VRS-станции на расстояние до 300 км с вероятностью  $P = 0,95$  обеспечивается погрешность местоопределения не более 1 м, что полностью соответствует самым жестким требованиям ИМО, предъявляемым для случая нахождения судна на территории порта. Доступность EGNOS-VRS-поправок за весь период испытаний превышала 99,9% при требовании ИМО в 99,8%.

## Навигация в городских каньонах

Общеизвестно, что погрешность ГНСС-позиционирования в условиях плотной городской застройки может достигать десятков метров, в связи с чем работы, посвященные решению задачи определения места в этих условиях, всегда вызывают повышенный интерес. Не была исключением и аудитория ENC 2017.

1. Детальному исследованию приема сигналов ГНСС в городских каньонах и новому методу решения задачи позиционирования с их использованием и привлечением информации, поставляемой трехмерной картой города, был посвящен доклад [9].

Прежде всего, авторы анализируют причины деградации решения задачи позиционирования в условиях плотной городской застройки. Во-первых, в ряде случаев сигнал попросту блокируется зданиями. Во-вторых, подчас такой сигнал достигает потребителя в результате непрямого (non-line-of-site – NLOS) распространения, приводя к NLOS-приему. Обычно следствием этого является погрешность в измерении дальности до КА в несколько десятков метров. Наконец, в том случае, когда принимается сигнал как по линии визирования КА (LOS-прием), так и отраженный от близлежащих зданий, мы имеем дело с многолучевым приемом. При этом погрешность в измерении дальности может быть как положительной, так и отрицательной – в зависимости от характеристик сигнала и аппаратно-программной реализации приемника. Зачастую последние два случая сводятся к единому понятию «многолучевость», хотя борьба с ними требует применения различных технологий.

В последние 5-6 лет в рассматриваемом случае активно применяется 3DMA-технология (3D-mapping-aided), использующая для решения задачи позиционирования трехмерную карту окружающих зданий. При этом удается определить минимальный угол возвышения, при котором может быть принят сигнал КА с учетом абриса зданий на соответствующем азимуте, и тем самым оценить, в каком случае мы имеем LOS- или NLOS-прием, исключив сигнал последнего при обработке ГНСС-измерений.

С учетом этого факта в 2012 г. была опубликована статья [10], сформировавшая концепцию «интеллектуального позиционирования в городских условиях» (IUP – Intelligent Urban Positioning). Она предполагает использование мультисистемного ГНСС-приемника, прогнозирование LOS/NLOS-сигналов и применение содержащихся в 3D-карте местности данных о рельефе для уточнения вертикальной координаты. Применению этой концепции и посвящена работа [9]. Предлагаемый в ней способ решения задачи позиционирования в условиях плотной городской застройки предполагает реализацию следующих трех алгоритмов.

Первый из них (LS-3DMA) на начальном этапе предполагает стандартное решение задачи позиционирования по ГНСС-сигналам, используемое для исходного определения местоположения потребителя. Зная его и располагая 3D-картой, можно сформировать (задаваясь некой пороговой дистанцией) окружающий эту точку район, который в дальнейшем будет использоваться для поиска реального местоположения потребителя и где должны наблюдаться только LOS-сигналы. Затем, учитывая данные о рельефе местности и обрабатывая лишь LOS-измерения с использованием метода наименьших квадратов (LS-estimation), мы получаем LS-3DMA-оценку положения потребителя. Алгоритм используется в итерационном режиме, и, в том случае если на первом шаге из-за малого количества LOS-измерений не удастся получить LS-3DMA-оценку, увеличивается величина пороговой дистанции, задающая зону поиска.

На следующем этапе используется алгоритм LB-3DMA, основанный на методе максимума правдоподобия (LB – Likelihood-based) и начинающий поиск местоположения в круге радиусом 40 м с центром в точке, определенной алгоритмом LS-3DMA, где каждое потенциальное положение потребителя задается узлом сетки, построенной с шагом 1 м. При этом определяется вид распределения погрешностей в ГНСС-сигнале для каждой такой точки. Так, если в соответствующем узле ожидается прием NLOS-сигнала, то используется асимметричное гауссово распределение, смещенное в область положительных значений погрешностей измерения дальности. Иначе (прием только LOS-сигнала) используется симметричное нормальное распределение.

В начале поисковой процедуры, опираясь на 3D-карту, для каждого узла сетки ищут КА, поставляющий LOS-измерения при максимальном угле возвышения и принимаемый в данной точке за опорный. Затем в каждой точке определяются LOS-дальности до каждого КА, вычитая которые из измерений псевдодальностей до всех КА и нормализуя результат по отношению к дальности до опорного КА, получают вектор измерений, используемых в алгоритме LB-3DMA. Наконец, в соответствии с алгоритмом вероятностного взвешивания, приведенным в работе [11] и учитывающим характеристики распределения погрешностей компонент этого вектора (для NLOS-измерений принимается ранее упомянутое асимметричное гауссово распределение), определяется LB-3DMA-оценка положения потребителя.

Одновременно для тех же точек, что использовались в предыдущем алгоритме, выполняется процедура «shadow matching», напоминающая процедуру «map matching», при которой место потребителя определяется согласованием его положения по данным карты местности и по ГНСС-измерениям. В основе ее лежит учет затенения («shadow» – тень) ГНСС-сигнала окружающими зданиями. С этой целью на первом этапе для каждой потенциальной точки нахождения потребителя с использованием 3D-карты определяется вероятность приема LOS-измерения. Если на азимуте нахождения КА угол его возвышения превышает высоту зданий, то прогнозируемая вероятность такого приема принимается равной 0,85, в противном случае – равной 0,2. Далее, опираясь на соотношение «сигнал–шум» при реальном приеме сигнала ГНСС, определяют реальную вероятность приема именно LOS-измерения в точке нахождения потребителя. Используя данные о прогнозируемой и реальной вероятности приема LOS-измерения и применяя соответствующий алгоритм вероятностного взвешивания, мы можем найти положение потребителя, соответствующее процедуре «shadow matching».

Необходимость выполнения для одной и той же зоны поиска двух различных процедур вызвана тем, что в общем случае при реализации как одного, так и другого алгоритма вероятностного взвешивания мы можем получить мультимодальное апостериорное распределение для положения потребителя, порождающее различные гипотезы о реальном его местоположении. Однако очевидно, что при наличии двух решений удастся отсеять точки, где гипотезы о положении потребителя не совпадают, и получить конечный ответ, что и реализуется с помощью алгоритма, приведенного в ранее упомянутой работе [11].

Проверка эффективности предложенного метода местоопределения проводилась в августе 2016 г. на территории Лондона. При этом использовался приемник EVT M8T GNSS, способный принимать сигналы GPS, ГЛОНАСС и Galileo, и 3D-карта Лондона, предоставленная картографическим агентством Великобритании Ordnance Survey. Осреднив результаты испытаний в 18 точках, авторы доклада установили следующее:

- 1) СКП определения плановых координат при обработке сигналов GPS и ГЛОНАСС составили: 25,9 м при стандартном ГНСС-местопределении, 8,5 м при использовании процедуры «shadow matching», 7,8 м – LB-3DMA и 3,6 м – IUP, т.е. предложенный авторами метод местопределения позволил повысить точность решения задачи в 7,2 раза;
- 2) при обработке дополнительно сигналов Galileo эти величины составили 24,4; 8,1; 7,5 и 3,4, т.е. повышение точности оказалось незначительным.

2. Аналогичную предыдущей задачу решали авторы доклада [12], привнеся в нее оригинальную постановку и приведя соответствующий метод решения. Специфическим элементом постановки задачи является рассмотрение случая, когда наблюдается прием сигнала, претерпевшего два отражения от окружающих потребителя зданий (см. рис. 3), а также используется оригинальная 3D-карта, которая для отображения поверхности  $300 \times 400 \text{ м}^2$  требует лишь 2 мегабайта памяти.

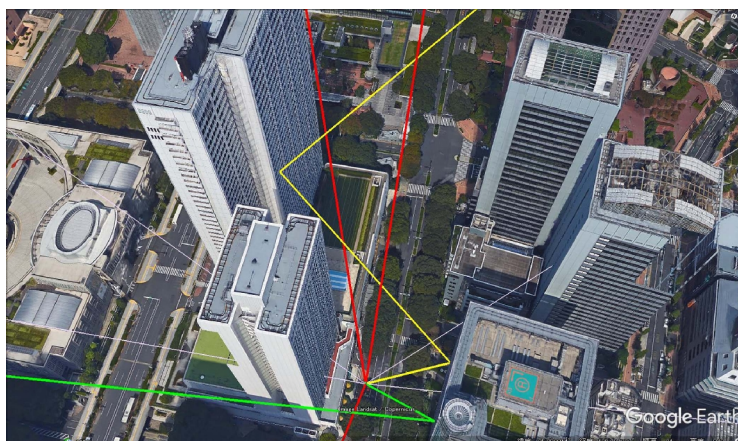


Рис. 3. Пример прохождения сигналов (красный – LOS; остальные – NLOS; зеленый – одно отражение; желтый – двойное)

Для решения задачи авторы используют предложенный ими алгоритм 3D-GNSS, изложенный в работе [13] и опирающийся на тот факт, что в результате применения стандартной процедуры ГНСС-местопределения в дифференциальном режиме результирующая погрешность в определении координат потребителя зависит от наличия NLOS-измерений, приводящих к погрешности в измерении псевдодальности до КА. Основываясь на данных 3D-карты, алгоритм 3D-GNSS определяет расстояние, проходимое сигналом КА на участке переотражений, на базе которого вычисляется задержка в измерениях псевдодальности. С учетом этой задержки определяется расчетное значение псевдодальности до каждого КА в каждой точке в некоторой области, окружающей точку начального местопределения в дифференциальном режиме. Сопоставляя расчетное значение псевдодальности с измеренным ее значением и используя алгоритм статистического взвешивания, и находим искомый результат.

Сам доклад [12] был посвящен проблеме выяснения на практике целесообразности учета двойного отражения сигнала при решении задачи ГНСС-местопределения в условиях плотной городской застройки. С этой целью в Токио был проведен ряд испытаний с использованием приемника EVK-M8 GNSS, принимающего сигналы ГНСС GPS, QZSS и ГЛОНАСС. В качестве эталона служили аэроснимки местности с разрешающей способностью 25 см/пиксель.

Результаты испытаний показали, что среднее значение погрешности местоопределения составило:

- 1) 38,25 м при стандартной процедуре ГНСС-местопределения;
- 2) 5,23 м при использовании 3D-GNSS-алгоритма и учете лишь однократных отражений сигнала;
- 3) 4,25 м при использовании 3D-GNSS-алгоритма и учете двукратных отражений. Иначе говоря, учет двукратных отражений позволяет повысить точность местоопределения на 1 м.

Существенная разница между результатом, полученным с применением стандартной процедуры ГНСС-местопределения, и результатом, опирающимся на 3D-GNSS-алгоритм, поясняется следующими фактами. В процессе испытаний в среднем принимались сигналы пяти КА, из которых не более двух составляли LOS-измерения. При этом стандартная процедура обрабатывала их и NLOS-измерения с равными весами, так как не различала эти измерения. Что касается 3D-GNSS-алгоритма, то он в значительной мере парировал влияние NLOS-измерений.

### Выводы

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы.

1. Дальнейшее развертывание ГНСС Galileo существенно повышает точность решения задачи местоопределения, включая режимы RTK и PPP. Объясняется это прежде всего следующими фактами:

- на КА системы устанавливается высокостабильный генератор для выработки времени, характеристики которого превосходят характеристики аналогичной аппаратуры остальных ГНСС;
- обновление навигационного сообщения в системе Galileo осуществляется с интервалом, минимальное значение которого составляет 10 мин, тогда как, например, для GPS типичная его величина – 2 ч при аналогичном с Galileo содержании навигационного сообщения;
- КА Galileo снабжаются новыми навигационными данными несколько раз в час, тогда как для КА GPS эта операция выполняется раз в сутки.

2. Развитие SBAS-систем идет двумя путями:

- идет разработка новых региональных SBAS – к уже существующим в ближайшем времени добавятся SBAS, обслуживающие территории Южной Кореи, Австралии и Новой Зеландии;
- в практическую плоскость переходит идея создания SBAS второго поколения, являющейся уже глобальной, мультисистемной и двухчастотной.

3. В последнее время эффективно развиваются интеллектуальные технологии решения задачи местоопределения в условиях плотной городской застройки, базирующиеся на использовании ГНСС-измерений и информации, предоставляемой 3D-картами окружающей обстановки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Rouch C., et all.** GNSS Signal-in-Space User Range Error Characterization – Focus on Galileo.
2. **Luo X., et all.** The Benefits of Galileo for High-Precision RTK – What Can Users Expect with the Current Satellite Constellation?
3. **Tegedor J., et all.** Galileo-enabled Real-time Precise Point Positioning for High-accuracy Maritime Navigation.

4. **Ruta C., et al.** SAR/Galileo System Deployment and Performance.
5. **Ostolaza J., et al.** Australian and New Zealand Second Generation Satellite Positioning Augmentation System Supporting Global SBAS Concept.
6. **Choi D., et al.** Korea Regional Navigation Satellite System: Orbit Determination with Multiple GNSS based on Visibility Analysis.
7. **Pintor P., et al.** EGNOS Multimodal Performance.
8. **Moran J., et al.** EDAS for a DGPS Maritime Service: EGNOS-based VRS Performance with Pre-broadcast Integrity Monitoring.
9. **Adjrad M., et al.** 3-D Mapping-aided GNSS Exploiting Galileo for Better Accuracy in Dense Urban Environments.
10. **Groves P.D., et al.** Intelligent Urban Positioning using Multi-constellation GNSS with SD Mapping and NLOS Signal Detection. *ION GNSS 2012*, Nashville, Tennessee.
11. **Adjrad M., et al.** Intelligent Urban Positioning using Shadow Matching and GNSS Ranging. *Proceedings ION GNSS+ 2016*, Portland, Oregon.
12. **Gu Y., Kamijo S.** GNSS Positioning in Deep Urban City with 3D Map and Double Reflection.
13. **Hsu L.-T., Wada Y., Gu Y., Kamijo S.** Study of City Building Model based Positioning Method using Multi-GNSS in Deep Urban Canyon.

---

**Rivkin B.S.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St.Petersburg, Russia).  
Satellite Technologies at ENC 2017. *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2017. Vol. 25. No. 4. P. 108–121.

**Abstract.** This article is an overview of the papers presented at the European Navigation Conference 2017, and dedicated to the application of satellite technologies.

**Key words:** GNSS, RTK, PPP, Galileo, GPS, GLONASS, SBAS, COSPAS-SARSAT, LOS/NLOS signals, 3D map.

Материал поступил 25.09.2017