

Б. С. РИВКИН

НАВИГАЦИЯ БЕЗ GPS ЗА РУБЕЖОМ

В статье рассматриваются проблемы использования за рубежом глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS (США) и технологии, парирующие ее недостатки. Обсуждаются возможности применения сигналов космических аппаратов, размещенных на низких околоземных орбитах, радионавигационной системы eLogan и подходов, не имеющих на сегодня аналогов.

Ключевые слова: координатно-временное обеспечение, низкие околоземные орбиты, eLogan, альтернативные сигналы, R-режим, мюонные технологии.

Введение

Во второй половине 2023 г. в США прошла череда мероприятий, посвященных празднованию 50-летия со дня получения разрешения на полномасштабную демонстрацию образца GPS. Одним из наиболее интересных событий было выступление признанного «отца» GPS 88-летнего Брэдфорда Паркинсона (Bradford Parkinson) в рамках проходившего в Стэнфордском университете 17-го ежегодного симпозиума, посвященного проблемам координатно-временного обеспечения (Positioning, Navigation and Timing – PNT*) [1].

По его воспоминаниям, созданию системы предшествовали работы, проводившиеся ВВС США и завершившиеся в 1966 г., в ходе которых был рассмотрен широкий набор способов навигации с использованием космических аппаратов (КА). При этом при реализации была выбрана наиболее сложная из имевшихся 12 альтернатив. Продвижению в жизнь этой идеи способствовали многие талантливые инженеры, и Паркинсон во время своего выступления отдал должное значительному числу из них, в том числе Малколму Карри (Malcolm Currie), которого он назвал «крестным отцом» GPS.

Когда в 1973 г. Паркинсон выступил в Пентагоне, чтобы представить Совету по обзору закупок оборонных систем (Defense Systems Acquisition Review Council) аргументы в пользу GPS, именно Карри сидел за столом с принимавшими решение адмиралами и генералами, которые отвергли эту идею. После встречи тот поговорил с Паркинсоном, сказав, что представленный вариант системы не является оптимальным, но после соответствующей корректировки у него есть хорошие шансы получить одобрение. Чтобы это произошло, позднее 12 человек собрались в Пентагоне в выходные, посвященные Дню труда (Labor Day). Они подтвердили уточненную концепцию системы вначале с использованием четырех спутников, но предложили

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

*Здесь и далее вместе с русскими приводятся и соответствующие широко употребляемые английские аббревиатуры, традиционно не расшифровываемые в англоязычной литературе.

перейти на новую схему модуляции. В состав системы были также добавлены часы, стойкие к космическим условиям, и сигналы множественного доступа с кодовым разделением каналов (Code Division Multiple Access – CDMA), которые сегодня, через 50 лет, внедряются и в отечественную ГНСС ГЛОНАСС. Наибольший вклад в создание GPS, по мнению Паркинсона, внесли обладавшие большим инженерным талантом Гейлорд Грин (Gaylord Green), Стив Гилберт (Steve Gilbert) и Мел Бирнбаум (Mel Birnbaum).

Когда отгремели праздничные литавры, все вернулось на круги своя, и пользователи GPS остались один на один с главными проблемами применения системы: банальным глушением сигнала и гораздо более изощренным спуфингом (spoofing) – подменной реальной системы его фальшивой копией, что приводит к ложному решению задачи местоопределения потребителя.

Слабая помехозащищенность сигналов GPS обусловлена их низкой мощностью: так, мощность сигнала L1 составляет 50 Вт, а L2 – и вовсе 8 Вт. Для сравнения мощность сигнала ГНСС Galileo (Евросоюз), разработка которой началась в 1994 г., на 20 лет позднее GPS, – уже 1600 Вт.

Очевидно, что глушению и спуфингу, в принципе, подвержены и остальные ГНСС (Galileo, BeiDou (КНР) и ГЛОНАСС), однако именно в силу только что указанного факта и несоизмеримо большего по сравнению с остальными ГНСС числа пользователей GPS в мире на практике в англоязычной технической литературе обсуждается помехозащищенность только GPS. По этой причине автором данной статьи было принято решение сосредоточиться на проблемах исключительно GPS, что нашло отражение и в заголовке, и ограничиться зарубежными публикациями. Тем же читателям, кого интересуют продвигаемые в России подходы к решению задач позиционирования в отсутствие сигналов ГНСС, рекомендуется к прочтению статья академика РАН В.Г. Пешехонова [59].

Следствием маломощности излучаемых сигналов являются результаты эксперимента, приведенные в докладе [2] профессора Дэвида Ласта (David Last), как-то сказавшего, что по интенсивности сигнал GPS напоминает светимость фар автомобиля, находящегося на расстоянии в 20000 км. В процессе испытаний на борту научно-исследовательского судна «Галатей» (Galatea) был размещен всего лишь милливаттный постановщик помех, при включении которого местоположение по GPS было определено неверно, в силу чего авторулевой увел судно с заданного курса, а установленная на объекте автоматическая идентификационная система (АИС, AIS) начала выдавать в эфир ложные данные о параметрах его движения. Сегодня в Интернете рекламируют гораздо более мощное устройство, стоящее всего 101 британский фунт и способное подавить все сигналы не только GPS, но и Galileo. Примечательно, как сообщил Д. Ласт, что детектор, размещенный в окрестностях одного из региональных аэропортов Великобритании, фиксирует до 200 попыток использования различных «глушилок» в месяц.

На деле [3] еще в 1997 г. на авиасалоне в Москве было продемонстрировано, что самый примитивный 4-ваттный передатчик способен подавить сигнал GPS в радиусе 200 км. С годами ситуация усугубилась. В 2010 г. автоугонщики начали задействовать передатчики для подавления сигналов GPS, чтобы парализовать работу систем спутникового слежения за местонахождением автомобилей, а еще через 2 года случился самый масштабный инцидент у берегов Южной Кореи, когда экипажи 553 самолетов двух крупнейших аэропортов страны и сотен судов сообщили об отказе системы GPS.

С помощью же спуфинга, позволяющего, например, вводить преднамеренную помеху в псевдодальности до КА, можно привести беспилотный летательный аппарат, навигация которого осуществляется с использованием приемника сигналов GPS, в любую заданную точку. Интересные данные о спуфинге приводятся в исследовании Бьорна Бергмана (Bjorn Bergman) из некоммерческой организации SkyTruth, выявившем в различных частях мира морские суда, GPS-аппаратура которых определяет их местоположение за тысячи миль от истинного [4]. Например, находившееся в феврале 2019 г. на стоянке у берегов Калифорнии судно *Beagle* по данным GPS 37 часов позиционировалось в районе Бергена (Норвегия), а судно *Princess Janice*, стоявшее там же в июне 2019 г., – уже у нигерийского берега в течение 392 часов.

В последние годы судоводители сталкиваются и вовсе с неведомым ранее явлением. В настоящее время все торговые суда оснащены приемопередатчиком АИС, транслирующим, в том числе окружающим участникам движения, координаты своего местоположения, определяемые по данным сигналов ГНСС. В результате при плавании по Янцзы в районе Шанхая, вывода на экран электронной картографической навигационной информационной системы (ЭКНИС, ECDIS) данные АИС любого из соседних судов, можно наблюдать [5] следующую картину (см. рис. 1)

Т.е. судно, находящееся в текущий момент в одной точке, начинает по информации ГНСС (в данном случае GPS) под воздействием спуфинга перемещаться по кругу со скоростью 21-31 узел. При этом специалисты удивляются не столько факту применения спуфинга в этом районе, сколько тому, каким именно хитроумным способом китайцам удалось создать эту мистическую картину.

Если проанализировать сложившуюся ситуацию, становится очевидным, что прежде всего необходимо бороться со спуфингом, воздействие которого в отличие от традиционного глушения сигнала выявить гораздо сложнее. Сегодня на уровне приемной аппаратуры эффективной защиты от спуфинга не существует. В принципе, можно ввести в ее состав адаптивную фазированную решетку, способную формировать диаграмму направленности, практически удаляющую помехи с направлений, которые не предусмотрены расположением КА на небе, однако в коммерческой аппаратуре это вряд ли будет реализовано. Что касается проблемы в целом, то есть отчет Европейского агентства по ГНСС (European Global Navigation Satellite Systems Agency), в котором отражены наблюдения за 18 месяцев в 2016–2017 гг. По данным агентства, за это время было выявлено более 160000 сбоев в работе ГНСС на территории 14 стран Европейского союза. Какие из них следует отнести к категории технических сбоев, а какие к внешним вмешательствам, в том числе спуфингу, в отчете не уточнено.

Естественно, такая ситуация не может не беспокоить тех, кто отвечает за навигацию подвижных объектов, будь то гражданские средства передвижения или относящиеся к военным технологиям. Так, отказ от сигналов GPS в военных применениях является парадигмой Управления перспективных исследований и разработок мини-



Рис. 1. Виртуальная траектория судна, стоящего на якоре, под воздействием спуфинга

стерства обороны США (Defense Advanced Research Project Agency – DARPA). Вот что говорила по этому поводу еще в 2012 г. Арати Прабхакар (Arati Prabhakar) [6], возглавлявшая тогда управление: «Позиционирование, навигация и точное время важны, как кислород, при ведении нами военных операций. Ныне мы используем новые физические принципы, создаем новые устройства и алгоритмы, чтобы освободиться от GPS-зависимости».

Несколько иной посыл в отношении разработки резервной системы, желательной эквивалентной по точности GPS, обсуждается в работе [7], где отмечается, что только реализация помехоустойчивого координатно-временного обеспечения (КВО) позволит внедрить в практику выдвинутую Международной морской организацией (ММО, ИМО) концепцию e-Navigation, которая предполагает среди прочего наличия на судне двух абсолютно независимых, работающих на различных принципах и практически равнозначных систем КВО. В связи с этим резолюция А.1046(27) ММО не только установила требования к характеристикам КВО, но и предписала при выборе средств КВО учитывать их устойчивость к помехам, естественным или специально поставленным. Применительно к гражданскому флоту в соответствии с резолюцией необходимая погрешность местоопределения в районах прибрежного плавания (не должна превышать 10 м в 95% случаев) и доступность сигнала системы в 99,8% случаев достигаются при совместном использовании GPS и отечественной ГНСС ГЛОНАСС (примечательно, что при раздельном их применении ни одна из них не удовлетворяет требованиям по доступности сигнала). При этом помехоустойчивость не обеспечивается ни при какой комбинации ГНСС.

Ранее, говоря об уязвимости GPS, мы сконцентрировали свое внимание на глушении и спуфинге. На деле на работу приемной аппаратуры этой системы оказывает существенное непреднамеренное влияние окружающая среда, что выходит за рамки данной статьи. Тем не менее с основными аспектами этого вопроса можно ознакомиться в работе [60].

Нельзя не упомянуть и о том, что проблема помехозащищенности GPS, как и любой другой ГНСС, частично в значительной степени (все зависит от конкретной ситуации и таланта разработчика) парируется при интегрировании приемника сигналов GPS с инерциальной навигационной системой. Однако обилие литературы по этому вопросу предполагает написание отдельной статьи.

Далее в статье обсуждаются технологии, предназначенные на замену GPS и основанные на тех же спутниковых измерениях, использовании радионавигационной системы eLogan и новейших подходах, подчас весьма экзотических.

Спутниковые технологии

Во всех работах по решению задач КВО с применением вместо сигналов GPS все тех же спутниковых измерений используется идея размещения КА не на средних, а на низких околоземных орбитах (Low Earth Orbit – LEO), когда мощность принимаемого на Земле сигнала многократно превышает мощность посылки GPS. Такими, кстати, были первая спутниковая навигационная система «Транзит» (Transit, США), введенная в эксплуатацию в 1964 г., и последовавшая за ней отечественная система «Циклон» (гражданский вариант – «Цикада»), заработавшая в 1976-м.

1. Одними из первых, кто начал развивать эту идею, были компании Orolia и Satelles (обе – США), объявившие в декабре 2016 г. об объединении усилий с целью создания КВО-технологии на базе спутниковой системы «Иридиум» (Iridium) [8]. При этом предполагалось использовать принадлежащий Satelles продукт STL (Satellite Time and Location Signal), обеспечивающий выработку позиционных и временных данных без опоры на сигналы каких-либо ГНСС, включая GPS. Спецификой STL-сигнала, транслируемого низкоорбитными КА системы «Иридиум», является его мощность, превышающая в 1000 раз сигнал любой ГНСС и не только гарантирующая невозможность его глушения, но и обеспечивающая его прием внутри зданий и в других ситуациях, где сигналы ГНСС обычно недоступны. Существенно также, что STL-сигнал криптографирован.

Предполагалось получение следующих характеристик (в скобках – данные для GPS) [16]:

- погрешность выработки времени – 200 нс (20 нс);
- погрешность позиционирования – 30-50 м (3 м);
- время первого местоопределения – 10 мин (100 с);
- борьба со спуфингом обеспечивается криптографированным сигналом (для гражданских потребителей не обеспечивается);
- борьба с глушением сигнала обеспечивается его мощностью (не обеспечивается).

Позднее сообщалось, что обе эти компании вошли в состав альянса Open PNT Industry Alliance, объединяющего, кроме того, компании Iridium Communications, infiniDome, Jackson Labs Technologies, NAVSYS Corporation, NextNav, OPNT, Qulsar и Seven Solutions [17]. Альянс намеревается поддержать усилия США по внедрению не опирающихся на сигналы ГНСС резервных КВО-систем для критически важных инфраструктур, к которым относятся транспортные системы, сети связи, платформы производства и распределения энергии, структуры финансовых услуг.

2. Примечательно, что можно, оказывается, разработать собственную систему спутниковой навигации и не заботясь о запуске каких-либо КА. Об этом на ежегодной конференции по ГНСС в Сент-Луисе (St. Louis, США) рассказал Зак Кассас (Zak Kassas) – инженер-электротехник, работающий в Университете штата Огайо (The Ohio State University) [9]. Возглавляемая им группа энтузиастов-любителей уже на протяжении ряда лет ведет обработку сигналов спутниковых систем связи, построенных компаниями Orbcomm и той же Iridium Communications (обе – США), с целью решения задач навигации. В последнее время они переключились на систему Starlink. С помощью приемника собственной разработки и соответствующего ПО при приеме сигналов шести КА системы Starlink можно определить координаты неподвижного наблюдателя с погрешностью, не превышающей 7-8 м. При этом, учитывая, что сигнал КА Starlink, расположенного на LEO-орбите, в тысячу раз превосходит по мощности сигналы GPS, удастся решить задачу позиционирования в условиях, когда использовать GPS нельзя, например под пологом леса.

Рассмотрим, как воплощается в жизнь идея применения LEO-позиционирования в различных локациях.

Европейский союз

1. В 2018 г. Франсис Суаль (Francis Soualle, Airbus, Франция), выступая на международном симпозиуме в Тулузе, обратил внимание участников на возрождение

интереса к большим LEO-системам и космическим инфраструктурам с применением более дешевых спутников меньшего размера – так называемым мегасозвездиям, состоящим из сотен спутников и наноспутников и обеспечивающим глобальное покрытие [10]. К ним в первую очередь относятся системы OneWeb (720 КА, гарантирующих на разных широтах прием сигналов от 30 до 90 КА при минимальном угле возвышения в 5°), Telesat (117, от 8 до 10 в тех же условиях) и Starlink (4425, от 150 до 300), характеристики которых приведены на момент публикации.

В работе показано следующее:

- 1) такая система обладает высокой стабильностью так называемого геометрического фактора HDOP, существенным образом влияющего на точность позиционирования. Например, если объект находится на экваторе и обрабатывает данные от КА с минимальным углом возвышения в 5° , то на двухчасовом интервале наблюдений величина HDOP для ГНСС Galileo будет меняться в диапазоне 0,9–1,5, тогда как для OneWeb она будет постоянной и равной 0,35. Значимость этого параметра проистекает из того факта, что погрешность определения плановых координат с использованием любой ГНСС задается соотношением $\Delta = UERE \times HDOP$, где UERE – погрешность определения дальности до КА потребителем, характеризующая инструментальную погрешность системы, а HDOP – фактор снижения точности позиционирования в горизонте;
- 2) величина HDOP для ГНСС Galileo в зависимости от широты места наблюдателя и времени суток меняется в диапазоне 0,9–1,5, тогда как для OneWeb, например, этот диапазон составляет 0,25–0,40;
- 3) для систем с мегасозвездием оказывается возможным перейти к доплеровскому алгоритму решения задачи позиционирования с погрешностью (при определенных условиях) в единицы метров.

2. В ноябре 2022 г. Европейское космическое агентство (ESA) на заседании совета министров Евросоюза запросило несколько сотен миллионов евро для новых технологий спутниковой навигации на низкой околоземной орбите и на Луне [11].

Официальные лица ESA заявили, что они предлагают потратить около 500 млн евро (518 млн \$) в течение следующих трех лет на проекты по разработке передовых технологий. Инициатива под названием FutureNAV будет поддерживать создание двух миссий по развитию технологий спутниковой навигации. Одна, Genesis, предполагает запуск спутника на орбиту высотой 6000 км с целью как уточнения системы координат, связанной с Землей (Terrestrial Reference Frame), с погрешностью до 1 мм, так и прецизионного определения орбит КА Galileo, что одновременно резко повысит точность позиционирования с использованием сигналов этой ГНСС.

Другой проект, LEO-PNT, на который предполагается потратить 100 млн евро, нацелен на создание спутниковой навигационной группировки на низкой околоземной орбите с участием от 6 до 12 малых спутников. КА этой системы будут находиться на орбите всего в 222 километрах от Земли, дополняя КА европейской ГНСС Galileo, удаленные от Земли на 23222 км. Работа аппаратов, находящихся на LEO-орбите, обеспечит более сильные сигналы и большую устойчивость к помехам, особенно если задействовать частотные диапазоны, отличные от используемых в ГНСС. Приближая спутниковую навигацию к Земле, LEO-PNT может сделать спутники более дешевыми и эффективными, а запуски – более экономичными.

План ESA [12] состоит в том, чтобы запустить первоначальную мини-группировку для тестирования ключевых технологий, а также для демонстрации сигналов и частотных диапазонов, которые будут использоваться в последующем оперативной группировкой, – таким же образом, как европейские испытательные спутники GIOVE проложили путь для Galileo. Каждый отдельный спутник будет сравнительно небольшим, массой менее 70 кг, по сравнению с текущим эксплуатационным спутником Galileo весом 700 кг. Предполагается, что за счет применения ретранслируемых со спутников Galileo сигналов времени удастся обойтись в аппаратуре КА без прецизионных атомных стандартов.

Как заявили представители ESA, целью LEO-PNT является программа ускоренного запуска, которая позволит запустить малые спутники в 2026 г., чтобы продемонстрировать потенциальные возможности такой группировки. Это бы способствовало будущему планированию развития навигационной группировки LEO, в том числе – будет ли она использовать автономные спутники или полезные нагрузки, размещенные на существующих КА на LEO-орбитах.

Великобритания

Одним из последствий Брексита, в результате которого Великобритания была исключена из европейского пула, владеющего Galileo, стала необходимость решать проблему GPS с опорой на собственные силы. В последнее время все больше сторонников находит идея создания национальной системы с привлечением британской компании-стартапа OneWeb, КА которой работают на отличной от GPS и Galileo частоте и располагаются на более низкой орбите, что обеспечивает более сильный сигнал, чем это доступно при использовании GPS [13]. В этом случае стоимость системы не должна превысить 1 млрд фунтов стерлингов, однако в марте 2020 г. OneWeb объявила о своем банкротстве – как сообщается, из-за проблем, порожденных пандемией. На настоящий момент нет ясности, кто будет финансировать столь дорогостоящий проект, как создание глобального широкополосного Интернета. Правда, есть информация, что Минобороны США рассматривает возможность инвестирования в компанию OneWeb хотя бы для того, чтобы ее КА и 44 наземные станции не были куплены китайцами.

Тем не менее [14], как сообщает газета The Daily Telegraph, представители компании заявляют о готовности к сотрудничеству, которое станет возможным в случае вывода на орбиту второго поколения ее спутников. «Всегда существовало понимание, что первое поколение не сможет полноценно обеспечивать КВО-услуги, однако, эволюционировав и пополнившись вторым поколением аппаратов, глобальная спутниковая группировка OneWeb будет вполне готова к тому, чтобы наладить работу надежной системы PNT», – заявил представитель OneWeb Крис Маклохлин (Chris McLaughlin), отвечающий за взаимодействие компании с госструктурами.

В британском правительстве рассматривают различные варианты сотрудничества с OneWeb. Один из них предполагает, что ее низкоорбитальные спутники будут использоваться для дублирования сигналов американской GPS и европейской Galileo, это обеспечит дополнительную защиту от вмешательства в работу навигационных систем извне. По оценкам комиссии, в 2017 году подготовившей доклад по этой теме для британского правительства, ущерб для экономики королевства от масштабного сбоя в работе GPS будет достигать 1,4 млрд \$ в сутки.

Китай

О создании Китайской аэрокосмической научно-технической корпорацией (China Aerospace Science and Technology Corporation) еще одной спутниковой системы сообщается в работе [15]. Система Hongyan строится на базе 60-ти малых КА, размещаемых на LEO-орбитах, и предназначена прежде всего для обеспечения глобальной связи и снабжения потребителей рядом информационных сервисов.

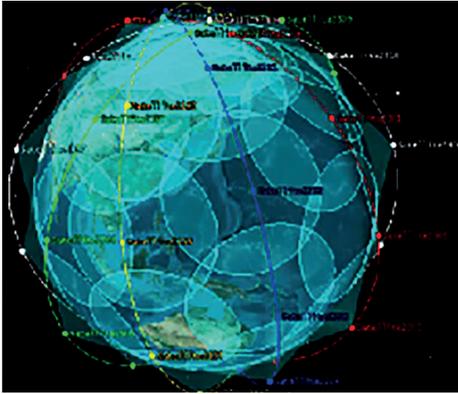


Рис. 2. Архитектура спутниковой системы Hongyan

Авторы предлагают использовать Hongyan для решения задач, традиционно возлагаемых на SBAS (Satellite Based Augmentation System – спутниковая система дифференциальной коррекции), позволяющую повысить эффективность функционирования ГНСС. КА системы Hongyan предполагается вывести на 5 равномерно размещенных относительно Земли круговых орбит высотой 900 км, на каждой из которых также эквидистантно позиционируются 10 рабочих КА и 2 резервных (см. рис. 2). Наземный сектор системы состоит из контрольных и процессинговых станций, а также сети станций передачи данных.

Принцип действия системы в обеспечение решения задач, возлагаемых на SBAS, таков (вопрос о трансляции данных потребителям для расчета ионосферных задержек в статье не обсуждается). Установленные на КА Hongyan приемники осуществляют мониторинг сигналов КА ГНСС, передавая соответствующие данные через межспутниковые линии связи на центральную процессинговую станцию. Последняя с учетом этих данных и информации, поставляемой наземными контрольными станциями, вырабатывает поправки часов и уточняет параметры орбит КА ГНСС, которые в конечном счете транслируются потребителям. Предполагается, что с опорой на эти данные и стандартные фазовые измерения ГНСС удастся достичь прецизионного позиционирования (PPP) потребителя в динамике с погрешностью в субдециметровом диапазоне и в статике – в субсантиметровом. При этом время до получения первого PPP-решения не превысит 5 мин (в случае задействования существующих SBAS это время составляет от 30 мин до часа).

Чтобы оценить эффективность предлагаемого варианта применения КА Hongyan, в работе приведены результаты моделирования, когда в качестве ГНСС рассматривалась система BeiDou (КНР). При этом привлекались измерения 8 контрольных станций, установленных на территории Китая, и последовательно данные трех и десяти КА Hongyan.

Изучался геометрический фактор снижения точности позиционирования HDOP. Так, в Сиане (Xi'an), где HDOP для системы BeiDou в среднем за сутки равен 2,32, привлечение LEO-данных снижает эту величину до 2,09. Наибольший выигрыш от использования КА Hongyan в части HDOP наблюдается в приполярных районах.

Наконец, подчеркивается, что на базе данных КА Hongyan для военных применений будут созданы специальные сервисы, благодаря которым возрастает эффективность задействования ГНСС в условиях пересеченной местности и сложной помеховой обстановки.

США

1. США финансируют целый ряд проектов, базирующихся на использовании сигналов КА, размещенных на LEO-орбитах. Одними из первых стартовали в 2017–2018 гг. работы, инициированные DARPA по созданию навигационной спутниковой системы Blackjack на низкоорбитных КА. С этой целью DARPA выделила в 2019 г. компании Northrop Grumman 13,3 млн \$ [18]. Предполагалось, что за эту сумму будут созданы аванпроект системы и первая версия полезной загрузки для ее КА, а первый аппарат будет запущен в 2021 г.

И хотя разработка ведется прежде всего в интересах минобороны США, создатели системы предполагают развивать и коммерческий ее сектор, включая обеспечение потребителей широкополосным Интернетом. При этом, как заявил вице-президент Northrop Grumman Николас Параскевопулос (Nicholas Paraskevopoulos), для военных потребителей система будет транслировать навигационный сигнал с быстрой перестройкой частоты, никак не связанный с сигналами существующих ГНСС. Чрезвычайно важной задачей аванпроекта является подтверждение того факта, что по своим точностным характеристикам Blackjack не будет уступать существующим ГНСС, при том что стоимость выведения одного КА системы на орбиту не превысит 6 млн \$.

Вместе с тем, судя по всему, проект забуксовал, более того, изменился и основной исполнитель работ, о чем свидетельствует факт выделения DARPA в апреле 2020 г. 5,8 млн \$ компании Lockheed Martin [19]. Опираясь на последние данные, можно ожидать запуск первых КА системы в 2024 г.

2. Аналогичные технологии, опирающиеся на малые низкоорбитные КА, предполагает использовать для поддержки наземных сил и армия США, имеющая опыт применения в 2017–2018 гг. обзорного микроспутника «Глаз пустельги» (Kestrel Eye) [20]. В связи с этим в ближайшее время будут инициированы три опытно-конструкторские разработки – Gunsmoke («Дымок из ствола»), получившая свое название по одноименному телесериалу, Lonestar («Одинокая звезда») и Polaris («Полярис»). Главная их цель – выяснить возможности КВО на базе низкоорбитных КА для поддержки наземных боевых операций.

Больше всего известно о программе Gunsmoke, которая реализуется с ноября 2018 года, когда армия заключила двухлетний контракт на сумму 8,3 млн долларов с компанией Dynetics, базирующейся в Хантсвилле (Huntsville), штат Алабама, на разработку, тестирование, интеграцию и демонстрацию двух «тактических КА для поддержки наземных сил».

3. Еще одну систему на низкоорбитных КА патронирует Агентство космического развития США (Space Development Agency – SDA), подчиняющееся офису заместителя министра обороны по исследованиям и инженерии Майку Гриффину (Mike Griffin) [21, 25]. В основе этой системы – несколько сотен малогабаритных КА, стоимость их изготовления и выведения на орбиту будет несоизмеримо меньше, чем КА GPS.

Все КА системы будут связаны оптическими межспутниковыми линиями связи (МЛС), обеспечивающими обмен данными о временной шкале каждого КА и определение их взаимного положения. Внедрение этих линий позволит системе функционировать практически независимо от ее наземного сегмента.

Главное ее назначение – определение координат наземных и морских целей, а также выявление пусков и предоставление данных слежения за гиперзвуковыми

аппаратами и новейшими поколениями ракет. Решение задач КВО возлагается на КА так называемого «транспортного уровня» (Transport Layer), в состав которого поначалу будет входить до 150 спутников. Первые 20 из них уже изготавливаются компаниями Lockheed Martin и York Space Systems в рамках транша T0. Предполагается вывести их на орбиты высотой 1000 км двумя запусками.

Перед КА транша T0 ставится лишь задача отработать прежде всего лазерные МЛС. При положительных результатах этих работ будет осуществлен переход к созданию КА транша T1, и SDA сейчас ищет трех изготовителей еще 144 КА, которые должны быть размещены в шести орбитальных плоскостях в 2024 г.

Полное развертывание системы предполагается завершить в 2028 г. запуском КА транша T3, обеспечивающих необходимой информацией бойцов в любой точке мирового пространства.

4. В последнее время всеобщее внимание привлекает стартап Xona Space Systems, основанный лишь в 2019 г. и тем не менее собирающийся в обозримом будущем разместить на LEO-орбитах 300 своих собственных навигационных кубсатов [22]. Удивительно, но разработчики Xona анонсируют погрешность позиционирования создаваемой ими системы навигации на порядок меньшую, чем у стандартной GPS, которая опосредованно была подтверждена в процессе проведенных наземных экспериментов. Передача информации потребителям будет осуществляться криптографированным сигналом.

В мае 2022 г. Xona запустила на LEO-орбиту в рамках миссии Transporter 5 Илона Маска (Elon Musk) тестовый спутник, чтобы продемонстрировать возможность реализации высокоточного КВО [23]. В поддержку этого начинания выступила компания Hexagon/NovAtel (Швеция/Канада), подрядившаяся разработать приемник для создаваемой Xona навигационной спутниковой системы под названием «Пульсар» (Pulsar). В силу того что КА этой системы будут располагаться гораздо ближе к Земле, чем КА GPS, транслируемый ими сигнал окажется несоизмеримо мощнее сигнала последних, что обеспечит значительный уровень помехозащищенности от внешних воздействий и потенциально повышенную точность позиционирования за счет быстро меняющейся геометрии в LEO-системах.

«Пульсар» будет транслировать криптографированные сигналы на двух частотах с обеспечением их аутентификации. При передаче КВО-данных предполагается использовать симметричный алгоритм блочного шифрования (Advanced Encryption Standard), а при аутентификации – схему криптографии на основе эллиптических кривых (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm).

Ближайшими планами Xona поделился ее технический директор Тайлер Рейд (Tyler Reid). Прежде всего это миссия Huggin. В ее рамках будут транслироваться сигналы в L- и S-диапазонах, что позволит снабдить потребителей навигационными данными, в том числе поправками в ГНСС-измерения. Ожидается, что при наличии на LEO-орбите хотя бы одного КА системы за счет быстро меняющейся геометрии удастся как минимум в два раза сократить время получения первого PPP-решения.

Вместе с тем Рейд отметил, что крупным недостатком LEO-системы является необходимость запустить примерно в 10 раз больше КА, чем это требуется на средних околоземных орбитах (Medium Earth Orbit – МЕО), чтобы обеспечить сопоставимые покрытие и геометрический фактор. Вторая особенность заключается в том, что КА этого типа будут располагаться ниже над горизонтом, это также снизит эффективность применения LEO-системы.

5. Чрезвычайно интересные исследования ведет группа Тодда Хамфриса (Todd Humphreys), который предложил Илону Маску использовать его мегасозвездие Starlink для навигации. «Нет, спасибо!» – ответил тот, однако исследователей это не остановило [24]. По их мнению, с помощью нескольких настроек ПО быстро растущее созвездие Starlink может обеспечить точное позиционирование, навигацию и синхронизацию. И эта идея полностью соответствует намерениям армии США, которая финансирует работу Хамфриса в Техасском университете в Остине (University of Texas at Austin – UT Austin) в надежде получить резервный вариант своей уязвимой системы GPS. Может ли Starlink выступить в этом качестве?

Когда эта идея была впервые предложена в 2020 г., руководители SpaceX были открыты для нее. Затем пришло указание свыше. Маск объяснил: все коммуникационные сети, базирующиеся, как и Starlink, на LEO-технологиях, обанкротились, и поэтому SpaceX должна полностью сосредоточиться на том, чтобы избежать такой участи.

Хамфрис утверждает, что обладает наиболее полными на сегодняшний день знаниями о характеристиках сигналов Starlink. Эта информация, по его словам, является первым шагом на пути к разработке новой глобальной навигационной технологии, которая будет работать независимо от GPS или ее европейских, российских и китайских аналогов. «Сигнал системы Starlink – это тщательно охраняемый секрет, – говорит Хамфрис. – Даже в наших ранних обсуждениях, когда SpaceX была более сговорчивой, они не раскрыли нам никакой структуры сигнала. Мы были вынуждены начать с нуля, построив, по сути, небольшой радиотелескоп, чтобы подслушивать их сигналы». Чтобы запустить проект, UT Austin приобрел терминал Starlink и использовал его для трансляции видеороликов в высоком разрешении с YouTube. Терминал обеспечил постоянный источник сигналов, которые могла прослушивать ближайшая антенна.

Хамфрис быстро понял, что в основе технологии Starlink лежит так называемое мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM). OFDM – это метод кодирования цифровых передач, первоначально разработанный в Bell Labs в 1960-х гг. и в настоящее время используемый в Wi-Fi и 5G, поскольку позволяет упаковать наибольшее количество бит в секунду в заданную полосу пропускания. Исследователи из университета в Остине не пытались взломать шифрование Starlink или получить доступ к каким-либо пользовательским данным, поступающим со спутников. Вместо этого они искали последовательности синхронизации – предсказуемые, повторяющиеся сигналы, передаваемые спутниками на орбите, чтобы скоординировать с ними работу приемников. Каждая последовательность также содержит подсказки о расстоянии до спутника и скорости его движения. Если наземный приемник имеет доступ к информации о перемещениях спутников, которой SpaceX делится онлайн, чтобы снизить риск орбитальных столкновений, он способен определить, с какого спутника они пришли, а затем рассчитать расстояние до этого спутника. Повторяя этот процесс для нескольких спутников, приемник может найти свое местоположение с погрешностью до 30 м.

Если бы SpaceX решила сотрудничать, включив дополнительные сведения о точном местоположении каждого спутника в транслируемые Starlink данные, эта погрешность теоретически могла быть снижена до менее метра, что позволило бы ей конкурировать с GPS.

Более полное понимание сигналов Starlink имеет значение не только для навигации. Например, спутники системы в настоящее время, похоже, не используют два

из восьми каналов, на которые у SpaceX есть лицензия. Хамфрис предполагает, что это может быть связано с тем, что Маск стремится не создавать помех радиотелескопам, работающим на соседних частотах. Орбитальные спутники Starlink с их яркими полосами уже были обвинены в создании препятствий для астрономических наблюдений. В выводах UT Austin также подчеркивается возможность преднамеренного вмешательства в саму Starlink. Хамфрис отмечает, что, хотя последовательности синхронизации многообещающи для навигации, тот факт, что они абсолютно предсказуемы и используются во всем созвездии, является уязвимостью в системе безопасности. Однако следует учитывать, что любая навигационная система, работающая с последовательностями с открытым исходным кодом, определенно может быть подделана, потому что каждый будет знать, как обнаружить эти сигналы и имитировать их.

Радионавигационная система eLoran

Все громче и громче становятся голоса тех, кто считает, что единственной системой, чьи характеристики КВО близки к характеристикам GPS, является радионавигационная система (РНС) eLoran, к достоинствам которой относится и то, что ее сигналам невозможно поставить эффективную помеху. Связано это с тем, что если сигнал GPS, излучаемый в гигагерцевом диапазоне частот, имеет мощность максимум 50 Вт, то eLoran работает на частоте 100 кГц и излучает сигнал мощностью 250 кВт.

Соответствие точности местоопределения с использованием сигналов eLoran в дифференциальном режиме точности GPS было подтверждено еще в 2014 г. – с вероятностью 0,95 погрешность определения координат не должна превысить 10 м [26].

Одновременно испытания, проведенные в январе 2017 г. разработчиком системы eLoran – компанией UrsaNav (США), чтобы оценить выработку всемирного координированного времени (UTC), показали следующее [27]:

- в 95% случаев погрешность в его выработке не превышала 156 нс;
- без дифференциальных поправок погрешность в передаче данных об UTC на расстояния до 800 миль не превышала 172 нс, а с дифпоправками – 15 нс.

Как же обстоят дела с внедрением аппаратуры eLoran в различных регионах Мирового океана?

США

В декабре 2015 г. Департамент транспорта правительства США (United States Department of Transportation – DoT) опубликовал документ DOT-OST-2015-0105, в котором изложил намерение выключить, переведя в резерв, 62 корректирующие станции Национальной дифференциальной системы GPS США (NDGPS) [28]. Это свое решение DoT как раз и объяснял тем фактом, что намеревается создать национальную КВО-систему на базе eLoran, принципиальную позицию по которой как по системе, резервирующей GPS и к тому же отказоустойчивой, было принято правительством США еще в 2008 г. и подтверждено в 2014-м. И лишь вмешательство ряда конгрессменов США, заявивших, что план этот не подлежит реализации, пока не будет принято окончательное заключение по системе eLoran, приостановило его воплощение.

Дальнейшее подтвердило правильность этого выбора, ибо никаких конкретных шагов правительством США по внедрению системы eLoran предпринято не было. Более того (см. [29]), после отказа в 2010 г. США от использования РНС Loran-C

на сегодня лишь 8 из 25 станций этой системы, подлежащих переоборудованию в eLogan и принадлежащих США, сохранили мачты, передающие сигнал, не говоря уж о повсеместно изъятых генераторах, трансформаторах и прочем оборудовании. И это в то время, как отмечается в [30], когда Россия, Китай, Иран, Саудовская Аравия и Южная Корея имеют подобные Logan-C системы для защиты своей инфраструктуры на случай локального или глобального нарушения приема сигналов ГНСС.

В связи с этим несомненный интерес вызывает постановление палаты представителей конгресса США H.R.2825 от июля 2017 г., в разделе 807 которого, посвященном КВО, постулируется необходимость создания на территории США системы eLogan. К ней предъявляются следующие основные требования:

- она должна гарантировать доступность неискаженного решения задачи позиционирования, навигации и выработки времени для военных и гражданских потребителей в случае, когда сигнал GPS не соответствует требованиям к системе;
- система должна быть наземной, широкозонной и транслировать сигнал в беспроводном варианте;
- должен транслироваться точный, мощный сигнал в частотном диапазоне 100 кГц с погрешностью передачи временной информации, синхронизированной с UTC, не превышающей 1 микросекунды;
- сигнал системы должен приниматься как под землей, так и внутри зданий.

Европа

1. При использовании радионавигационной системы eLogan в обеспечение прибрежного плавания и захода в гавань к ее точностным характеристикам предъявляются весьма жесткие требования, сопоставимые с характеристиками ГНСС. Анализу их выполнимости посвящена работа [31].

Очевидно, что лишь наличие адекватной модели погрешностей eLogan позволяет прогнозировать точность местоопределения с ее помощью в том или ином районе Земли. В упомянутой работе исследуется влияние двух задержек при распространении радиосигнала:

- первичной (Primary Factor – PF), порождаемой влиянием атмосферы;
- дополнительной вторичной (Additional Secondary Factor – ASF), порожденной отклонением фазовой скорости распространения радиоволн от принятой и связанной прежде всего с прохождением сигнала над участками суши.

Ранее, в системе Logan-C, для парирования влияния PF-задержки использовалась модель П. Брунавса (P. Brunavs); применительно к eLogan соответствующая модель отсутствовала. К достоинствам работы относится создание на базе обширных эмпирических данных новой модели погрешностей eLogan, учитывающей не только ASF, но и PF-задержку.

На основании этой модели была спрогнозирована и погрешность системы на регион Европы. Было показано, что в районе Северного моря она не превысит 20 м, в ряде портов Европы составит 10 м, однако на территории Ирландии возрастет до 80 м и может быть снижена до требуемых ИМО 10-20 м за счет размещения в этом регионе еще двух станций eLogan.

2. Состоянию разработки eLogan в Европе был посвящен обширный материал, опубликованный в июньском номере журнала Inside GNSS за 2017 г. (заметим, что

этот журнал специализируется на спутниковой тематике, но в данном случае находит место и для статьи об РНС).

Начнем с того, что в отличие от США все европейские цепочки РНС Logan-C (по одной в Великобритании, Германии и Дании, две во Франции и три из четырех в Норвегии) находятся в «добром здравии». Да, они не используются, но в любой момент могут быть задействованы. Более того [32], Великобритания уже в октябре 2014 г. включила станции eLogan в Дувре (Dover) и Харвиче (Harwich), обеспечившие навигацию вдоль восточного побережья страны. К 2020 г. заработали еще 5 станций системы, которые сняли вопрос о необходимости применения сигналов GPS в прилегающих к Великобритании районах Северного моря и Атлантического океана.

С 2015 г. Великобритания, являющаяся лидером в продвижении eLogan, ведет исследовательские работы на станции в Анторне (Anthorn). Вот что в свое время сообщил журналу Inside GNSS упоминавшийся выше Дэвид Ласт, ранее занимавший пост президента Королевского института навигации Великобритании (Royal Institute of Navigation): «Станция уже транслирует временной сигнал с погрешностью в микросекунду. Да, мы стремимся получить 100 наносекунд, что потребует использования дифференциального режима, но 1 микросекунда вполне удовлетворяет требованиям существующего рынка». Результат этот достигается за счет того, что в состав аппаратуры eLogan, как и аппаратуры КА ГНСС, входят три атомных датчика времени.

3. Выше уже сообщалось о том, что погрешность определения координат с помощью системы не должна превысить 10 м. Тем не менее лоцманы, работающие в районе Роттердама – крупнейшего речного порта в мире (длина его причальных стенок составляет 45 км), посчитали эти требования недостаточными. В связи с этим инновационное решение для построения дифференциального варианта системы eLogan предложила фирма Reelektronika (Нидерланды), основатель которой Дирк ван Виллиген (Dirk van Willigen) и доложил о полученных результатах [33]. Выполненные коллективом фирмы исследования показали, что наибольший вклад в погрешность работы eLogan в дифференциальном режиме вносят:

- задержка в передаче корректирующих поправок через систему Eurofix, достигающая 15 мин, в силу чего они устаревают;
- погрешность, вносимая ASF.

Проблема состоит в том, что попытки создать модель для ASF, адекватную состоянию атмосферы и подстилающей поверхности (песок, каменистая поверхность и т.д.), пока не увенчались успехом, а для того чтобы устранить ее влияние на результат, необходимо измерять ASF с погрешностью нескольких наносекунд, что практически недостижимо.

На основании этих результатов Reelektronika разработала оригинальный комплект аппаратуры системы eDLogan, содержащий в том числе набор контрольных станций и сервер, выполняющий одновременно функции центра управления системой. При этом предполагается, что у потребителя установлен приемник сигналов Logan-C (и, следовательно, нет необходимости дорабатывать передающие станции до требований eLogan) с оригинальным программным обеспечением. Коммуникация между всеми абонентами такой системы осуществляется через стандартный канал мобильной связи GSM (контрольные станции могут быть подключены к серверу и через Интернет), что сразу уменьшило время задержки в передаче дифференциальных поправок до 2 секунд.

По оригинальному пути пошли разработчики и в борьбе с ASF. В их варианте вычисленные приемником потребителя по данным Loran-C «грубые» координаты его местоположения передаются на сервер, где обрабатываются совместно с данными, поступившими от контрольных станций. При комплексировании этой информации удается выделить погрешность, вносимую ASF в «грубые» координаты, и потребителю передаются соответствующие поправки в координаты (вместо традиционно вводимых в псевдодальности поправок за ASF, о точности определения которых говорилось выше).

В результате испытаний в районе Роттердама при использовании сигналов передающих станций РНС Loran-C, расположенных в Лессе (Lessay, Франция), на о. Зюльт (Sylt, Германия) и в Анторне (Великобритания), удалось установить, что погрешность местоопределения даже для движущегося судна посредством аппаратуры фирмы Reelektronika в 95% случаев не превышает 5 м, что соответствует требованиям лоцманской проводки в данном регионе.

Южная Корея

1. Ранее уже упоминалась Южная Корея, на большей части территории которой практически не удается использовать сигналы GPS, так как они эффективно глушатся ее северным соседом. По этой причине специалисты Южной Кореи намереваются в ближайшие годы развернуть сеть из пяти базовых станций eLoran и 43 дифференциальных, чтобы закрыть вопрос с навигацией в этом регионе Юго-Восточной Азии [34].

2. В связи с этим представляют интерес результаты, полученные южнокорейскими разработчиками при применении для местоопределения аппаратуры стандартной системы Loran-C, работающей в специальном режиме. Как известно, в основе алгоритма местоопределения по системе Loran-C лежит гиперболическая навигация, опирающаяся на временные разности прихода (time difference of arrival – TDOA) сигналов от сети станций, одна из которых является ведущей, а остальные – ведомыми. При этом синхронизация всех измерений осуществляется в пределах лишь этой сети станций, а потому задействовать TDOA других сетей в стандартном варианте оказывается невозможным.

Это ограничение было снято в [35], где описывается оригинальный алгоритм обработки TDOA сигналов, полученных при позиционировании от разных сетей станций. Там же были приведены результаты эксперимента по его использованию при местоопределении неподвижного объекта с одновременным учетом временных задержек при распространении радиосигнала.

И если PF- и SF-задержки (SF-задержки – вторичные), возникающие при прохождении сигнала над морской поверхностью, легко компенсируются в приемнике за счет сигналов системы Loran-C модели П. Брунавса, то для учета ASF придется предпринимать специальные меры. В рассматриваемом случае, так как объект был неподвижен, достаточно было задействовать единственное меняющееся во времени значение ASF, которое вырабатывается корректирующей станцией, реализующей дифференциальный режим системы (dLoran). В результате этого эксперимента на интервале наблюдения 21 час погрешность местоопределения в 95% случаев не превысила 15 м.

В работе [36] был рассмотрен вариант применения этого алгоритма для подвижного объекта, для чего потребовалось создать уже карту ASF на район испытаний.

Для их проведения был взят комплексированный приемник GPS/Loran-C (GPS-канал использовался для эталонирования), размещенный на автомобиле, который перемещался по трассе длиной 4,5 км со скоростью до 60 км/час.

На первом этапе позиционирование осуществлялось с учетом сигналов лишь одной цепочки системы Loran-C с опорой на стандартный алгоритм местоопределения, при котором погрешность в 95% случаев составила не более 87 м. Когда же были привлечены данные второй цепочки, доступные в районе испытаний, ее удалось снизить до 37 м.

Да, это не те единицы метров, что дают ГНСС, и даже не 10 м, обещанные при развертывании системы eLoran, тем не менее это весьма достойный результат. Одновременно следует учесть вот что. Эти данные были получены при наземных испытаниях, когда влияние ASF максимально. Очевидно, что в морских приложениях следует ожидать существенно меньших погрешностей позиционирования.

3. Одновременно получением реальных характеристик системы eLoran озаботились специалисты все той же Южной Кореи. В ноябре 2018 г. они представили доклад на 16-м Всемирном конгрессе Международной ассоциации институтов навигации (International Association of Institutes of Navigation), в котором подтвердили возможность удовлетворить с помощью этой системы требования ИМО к погрешности местоопределения 10 м при подходе к гаваням и на их территории (harbor entrance and approach – HEA) [62]. На первом этапе выполнялось моделирование решения задачи, имитирующее eLoran-позиционирование с использованием сигналов станций системы Loran-C в Пхохане (Pohang), Кванджу (Gwangju) и временно установленной станции в Инчхоне (Incheon). В результате такого моделирования было установлено, что гарантированной может быть лишь погрешность в 20 м.

На втором моделировалось решение на основе мультимедийного подхода, когда действовались сигналы не только станций в Пхохане и Кванджу, но и еще 5 станций системы Loran-C, входящих в цепочки, установленные в КНР и РФ (в Уссурийске). Однако и в этом случае погрешность в 10 м обеспечивалась лишь в тех позициях, где был невелик геометрический фактор HDOP и соответствующие линии положения пересекались практически под прямым углом.

4. Южная Корея делает ставку на eLoran, в связи с чем Министерство океанов и рыболовства (Ministry of Oceans and Fisheries) объявило эту систему опорной технологией четвертой индустриальной революции и важнейшей составной частью перспективной КВО-системы для морского флота [37].

Предполагается, что система заработает в ближайшие годы. Две существующие станции Loran-C будут переоборудованы под требования eLoran, а также введена в строй новая передающая станция (две дифференциальные корректирующие станции системы уже запущены и проходят стадию тестирования). С этой целью был заключен контракт с отделением фирмы UrsaNav в Биллерике (Billerica, США), в рамках которого планируется не только поставка новой станции в Инчхоне, но и разработка интегрированного GPS/eLoran-приемника. Испытания прототипа такого прибора в условиях глушения сигнала GPS и спуфинга подтвердили высокое качество решения задачи позиционирования, тогда как стандартный GPS-приемник не обеспечивал при этом решение задачи местоопределения.

В планах правительства Южной Кореи – обеспечить с использованием eLoran погрешность позиционирования, не превышающую 20 м на удалении до 30 км от диффе-

ренциальных контрольных станций. Аналогичные работы ведет и Китай, предполагающий разместить еще три передающие станции eLogan в западной части страны [38].

Новые веяния

1. В последние годы в США был проведен целый ряд мероприятий по резервированию GPS [39]:

2015 г. – остановлено уничтожение инфраструктуры системы Logan-C с целью дальнейшего ее использования в системе резервирования GPS;

2016 г. – подписан закон об ассигнованиях на национальную оборону, предписывающий министерствам обороны, внутренней безопасности и транспорта представить к концу 2017 г. согласованные требования к национальной системе резервирования GPS;

2017 г. – выделены 10 млн \$ на разработку графика по созданию системы резервирования, предполагающего ее демонстрационные испытания не позднее апреля 2018 г. и завершение работ к июню 2019 г.;

2018 г. – в марте, августе и сентябре тремя траншами выделяется суммарно 20 млн \$ на проведение демонстрационных испытаний, которые до конца 2018 г. так и не были завершены.

В декабре 2018 г. было принято постановление, обязывающее министерство транспорта США создать до конца 2020 г. систему резервирования GPS, которая должна быть [40]:

- наземной;
- беспроводной;
- синхронизированной со шкалой UTC;
- неразрушаемой;
- способной работать внутри зданий и проникать под землю;
- кооперируемой с работой аналогичных систем, например eLogan.

Особо подчеркивается тот факт, что вновь создаваемая система должна обеспечивать не только позиционирование и навигацию подвижных объектов, но и доступ к отказоустойчивому и недеградирующему временному сигналу в случае отсутствия такого от GPS.

Активные меры по борьбе с глушением и спуфингом наконец предприняло министерство транспорта США, выделившее в 2019 г. американским компаниям 2,5 млн \$ на разработку технологий, обеспечивающих решение задачи КВО без использования спутниковых измерений. Более того, оно выбрало 11 фирм, которым и поручило эту разработку, и объявило, что их число может быть расширено до 20 [41].

Предполагалось, что демонстрация результатов с имитацией внешних воздействий должна пройти в первой половине 2020 г. При этом допускалось, что созданная система будет решать хотя бы одну из задач (выработки точного времени или позиционирования) с погрешностью, соизмеримой с GPS. На что же рассчитывали эти 11 фирм-счастливчиков [42]?

PhasorLab искала решение на основе наземного аналога GPS, способного поддерживать высокоточную синхронизацию по всей сети с погрешностью существенно меньше 1 нс, стационарные узлы которой привязаны к 3D-карте на данный район. Прорабатывался вариант и с мобильной сетью.

Skyhook Technology полагалась на огромную базу данных, которая содержала 5 млрд геодезически привязанных точек доступа Wi-Fi и 200 млн идентификаторов базовых станций сотовой связи, способных осуществлять геолокацию различных гаджетов, на чем и строится позиционирование потребителя.

Решения Hellen Systems базировались на использовании РНС eLoran. Специалисты фирмы предполагали разработать твердотельный приемник сигналов системы, интегрированный с высокостабильным датчиком времени фирмы Microsemi. Сигналы eLoran в той или иной степени собирались задействовать в своих технологиях и ряд других конкурсантов, в частности UrsaNav и Serco.

Globalstar-Echo Ridge, как уже следует из названия, делала ставку на сигналы не навигационной, а спутниковой системы связи Globalstar, насчитывающей в своем составе 24 КА LEO. По похожему пути собиралась пойти и компания Satelles – воспользоваться мощными сигналами 66 КА LEO системы Iridium, которые в отличие от GPS не только не подвержены глушению и спуфингу, но и могут приниматься даже внутри зданий.

NextNav опиралась на наземную сеть маяков, представляющих собой псевдоспутники и излучающих GPS-подобные сигналы для измерения дальностей в суб-гигагерцевом диапазоне. К достоинствам этой технологии относится то, что соответствующий сигнал можно получить с помощью уже существующих на рынке чипсетов. Более того, она может быть пригодна и для навигации внутри зданий и в стесненных городских условиях, а при применении в системе барометрических данных удастся определить и вертикальную координату.

Наконец, в начале 2021 г. были подведены итоги выполненных работ [43]. Выяснилось, что ни один из участников не смог полноценно резервировать возможности позиционирования, реализуемые с использованием ГНСС GPS и ее дополнений. При этом все участники выдвинули любопытные идеи, но лишь предложение фирмы NextNav интересно с практической точки зрения: система TerraPoiNT предполагает размещение на территории страны наземных устройств, передающих сигналы, в 100000 раз превышающие по мощности сигнал GPS, на частоте 900 МГц.

Не ограничившись участием в тендере, компания NextNav, основанная в 2007 г., в штате которой в 2021 г. насчитывался лишь 61 сотрудник, летом 2023 г. протестировала свою систему PNT TerraPoiNT, опирающуюся на сигналы LTE (обеспечивает передачу данных на скорости порядка 100 Мбит/с) и 5G, продемонстрировав, что это решение является жизнеспособной альтернативой GPS [57]. Результаты испытаний появились после опубликованного ранее отчета Научно-исследовательского центра ЕС (Joint Research Centre – JRC), в котором подчеркивается значение TerraPoiNT среди других технологий, которые соответствуют критериям, выработанным для существующих технологий GPS, или превосходят их. Предлагаемое NextNav решение обеспечивает локализацию как по горизонтали, так и по вертикали, оставаясь при этом для конечных пользователей коммерчески доступным и экономически эффективным.

Согласно пресс-релизу, в ходе испытаний TerraPoiNT продемонстрировала позиционирование, синхронизацию и навигацию в помещении, включая погрешность определения вертикального местоположения в пределах 2 м в 90% случаев. Одновременно была доказана стабильность синхронизации, поддерживаемая в пределах 15 наносекунд в 90% случаев.

2. ВВС США рассматривали возможность использования вместо GPS магнитных полей, и прежде всего над водной поверхностью [44]. С этой целью в Технологиче-

ском институте BBC (Air Force Institute of Technology – AFIT) исследовалась технология навигации по магнитным аномалиям MAGNAV.

Руководитель проекта Аарон Дж. Канчиани (Aaron J. Sanchiani) сообщил, что проект базируется на четырех столпах: магнитных картах, датчиках, алгоритмах позиционирования и калибровке датчиков. При этом он не считает правильным сравнивать MAGNAV с GPS: «Наихудшее, что можно сделать при обсуждении альтернативных КВО-систем, – это делать вид, что во всех случаях нам необходима точность GPS», – говорит он.

В идеальных условиях (точная карта, малая высота, быстродвижущаяся платформа) MAGNAV может обеспечить и 10-метровую погрешность местоопределения, но в других обстоятельствах и при грубой карте эта погрешность возрастает до 1 км и ни о каком резервировании GPS речь уже не идет.

3. Свои исследования рассматриваемой проблемы проводит с 2021 г. и ЕС усилиями шести компаний, каждая из которых получила в среднем по 70000 евро [45]. Среди участников – Locata Corporation (Австралия), Satelles Inc. (США), GMV Aerospace (Испания), OPNT BV (Нидерланды), Seven Solutions SL (Испания) и SPCTime (Франция).

Часть из них исследовали возможность решения лишь задачи позиционирования или обеспечения высокоточным временем, а несколько занимались и той и другой проблемой. Результаты были рассмотрены в JRC в Испре (Италия), после чего был опубликован итоговый отчет по проекту, выводы которого найдут отражение в очередной версии европейского «радионавигационного плана».

И в этом случае, как и в ходе исследования, проводившегося министерством транспорта США, был выявлен единственный участник, справившийся с задачей, – фирма Locata [58], использующая технологии, базирующиеся на семействе радиомаяков, каждый из которых транслирует сигнал точного времени и своего местоположения.

Отчетом JRC было подтверждено, что Locata продемонстрировала высокую точность позиционирования и синхронизации в каждой тестовой среде, обеспечив:

- сантиметровой уровень погрешности местоопределения во всех испытаниях – в помещении и на открытом воздухе, в статических и кинематических условиях;
- передачу времени на пикосекундном уровне посредством нескольких типов носителей, включая радиочастотные, с использованием собственной технологии TimeLoc на расстояние более 105 км и по оптоволоконным и/или коаксиальным кабелям без привлечения спутников или атомных часов.

4. Выпавшая из европейской системы космических разработок Великобритания ищет оригинальные пути решения задач КВО. С этой целью команда DE&S (Defence Equipment and Support – оборудование и средства обеспечения обороны), входящая в состав министерства обороны, в рамках исследования «Альтернативная навигация» выявило три возможности изучения проблемы [46]:

- обеспечение устойчивой синхронизации;
- использование «альтернативных сигналов» (signals of opportunity), к которым относятся в том числе сигналы Wi-Fi, телевизионных и радиовышек;
- применение визуальной навигации.

Работа, которая в настоящее время находится на стадии фиксации концепции, продлится до марта 2024 г. Затем предполагается сузить список доступных вариантов, продемонстрировать и оценить прототипы, чтобы определить, какие идеи достойны воплощения.

С целью реализации заявленных технологий были заключены семь контрактов на общую сумму около 3,8 млн фунтов стерлингов с шестью компаниями, базирующимися в Великобритании: Teledyne UK Ltd (займется устойчивой синхронизацией), QinetiQ Ltd и Roke Manor Research Ltd (изучат применение альтернативных сигналов), Forsberg Services Ltd, Horiba Mira Ltd и MBDA UK Ltd (исследуют потенциальные возможности визуальной навигации).

Не снята с повестки дня и идея создания на замену ГНСС наземной навигационной системы с аналогичными характеристиками хотя бы на район Великобритании и прилежащие территории. Подстегнула ее обсуждение публикация шести британских академических и аналитических организаций, на 1174 страницах рекомендуемая объединить наземные и космические системы с целью обеспечить функционирование критически важной для Великобритании отрасли морской торговли вне зависимости от солнечных вспышек или глушения космических сигналов [47].

5. Все нарастающий ком проблем с использованием сигналов ГНСС, порожденных их глушением и спуфингом, вынуждает не только военных потребителей, но и ММО искать нестандартные способы решения задачи КВО. В последнее время значительное внимание уделяется режиму R-Mode, в основе которого лежит применение специальных сигналов, излучаемых в радиочастотном диапазоне.

Идея метода заключается в возможности измерения на их основе дальности до излучателя с известными координатами. При наличии нескольких сигналов этого типа удается решить задачу позиционирования методом триангуляции. На первом этапе исследования R-Mode осуществлялись с привлечением среднечастотных сигналов, транслируемых располагаемыми на морском побережье маяками системы дифференциальной коррекции ГНСС, и высокочастотных сигналов АИС [50]. Как те, так и другие сигналы по мощности многократно превышают сигналы ГНСС, что делает их менее уязвимыми к внешним воздействиям.

Выяснилось, что структура сигнала АИС, применяемого и для синхронизации маяков, удовлетворяет предъявляемым при этом требованиям (правда, сигналы эти могут быть задействованы на дальностях не более нескольких десятков километров), а в посылку системы дифференциальной коррекции необходимо встроить два сигнала с амплитудной модуляцией, что обеспечивает устойчивое слежение за сигналом в дневных условиях на расстояниях до 550 км. В ночное время эта дистанция уменьшается. Погрешность измерения дальности с использованием R-Mode составляет менее 10 м в дневное время и не более 20 м ночью.

Естественно, что точность местоопределения при этом существенным образом будет зависеть от того, под каким углом при решении задачи триангуляции пересекаются линии положения, порождаемые измерениями, т.е. величиной HDOP. Исследования, проведенные в работе [51], показали, что маяки системы дифференциальной коррекции, установленные на берегах Северного моря, обеспечивают в этом регионе величину HDOP = 2 и, соответственно, предельную погрешность ($P = 0,997$) местоопределения в режиме R-Mode на уровне 7 м в дневное время суток. В ночное время она достигает 20-30 м.

Еще больший интерес стал вызывать режим R-Mode при появлении пришедших на замену АИС VDES-систем, обладающих дополнительными связными каналами полосой до 100 кГц. И если скорость передачи данных АИС составляет 9,6 килобит/с, то у VDES-систем она достигает 307,2 килобит/с. И именно на них ориентируются сейчас разработчики режима R-Mode.

Немного экзотики

1. Все ранее рассмотренные способы решения задачи КВО в целом не выходили за рамки традиционных радиоэлектронных технологий. В последнее время исследователи двинулись и вовсе неизведанными путями.

Оригинальный подход к преодолению проблем, обусловленных применением ГНСС, демонстрирует Армейская исследовательская лаборатория США (Army Research Laboratory) [48], специалисты которой пытаются использовать идеи квантовой физики для достижения следующих целей:

- обеспечение КВО с точностями ГНСС на интервале не менее 7 суток без привлечения спутниковых технологий;
- повышение точности выработки времени в обеспечение киберопераций и радиоэлектронной борьбы;
- беспутниковое обеспечение КВО всех родов войск с погрешностью позиционирования не более 10 м;
- создание GPS-антенны, не подверженной глушению сигнала.

Первая идея – использование так называемых перепутанных частиц, которые, даже находясь на большом расстоянии друг от друга, ведут себя как единое целое. При возмущении одной из них вторая реагирует идентичным образом. Эйнштейн называл связь между перепутанными частицами «призрачным дальнедействием». Они могут быть созданы расщеплением какой-либо из них. Так, два спутанных фотона могут быть получены из одного воздействием лазера на определенный вид кристалла. Лаборатория пытается задействовать такие частицы для решения задач синхронизации и построения ультраширокополосных систем связи, к тому же и беспомеховых.

Вторая – применение эффекта Ридберга (Rydberg), при котором возбужденные атомы при изменении энергетического уровня испускают фотон. Возникла концепция антенны, способной оптически выделять и интерпретировать поток таких фотонов, порождаемых сигналами GPS-спутников. Естественно, что такая антенна будет значительно эффективнее существующих в части стойкости к внешним воздействиям.

2. Управление военно-морских исследований (Office of Naval Research) ВМС США подвело итоги конкурса по созданию альтернативной GPS навигационной системы, предназначенной для использования прежде всего в Арктике и обеспечивающей погрешности позиционирования, сопоставимые с точностями ГНСС [49].

Победителем стала команда исследователей из Японии, Англии, США и Финляндии под руководством доктора Криса Стира (Dr. Chris Steer) из спин-компании Geoptics. Они рассчитывают привлечь в качестве альтернативы спутниковым сигналам естественный источник излучения – мюоны космических лучей. Уникальность идеи в том, что эти субатомные частицы проходят через скалы, здания и землю, проникая в области, где невозможно получить данные ГНСС.

«В ближайшие десятилетия возможность навигации в полярных регионах будет приобретать все большее значение, поскольку изменение климата открывает арктические водные пути для коммерческой и военной деятельности, – говорит ведущий научный директор по этому проекту доктор Чарльз Эдди (Charles Eddy). – Наш проект, в котором используются космические релятивистские частицы, постоянно падающие на всю поверхность Земли, предлагает новаторский подход к пробле-

ме навигации в высоких широтах с минимальным задействованием услуг ГНСС, а в перспективе – и вовсе без них».

Согласно заявлению разработчиков, «каждую минуту через один квадратный метр земли проходит около 10000 мюонов космических лучей; мы используем их для изображения интерьера исследуемой инфраструктуры. Поместив детекторы космических лучей под объектом, мы можем определить, сколько из них поглощается при прохождении через интересующую область».

Ранее мюонная технология привлекалась для построения изображений железнодорожной инфраструктуры (туннелей), а также на местах строительства, добычи полезных ископаемых, разведки нефти и газа и для проверки ядерных отходов.

«Как и в случае с эхолокацией, разница во времени между «пингами» – сигналами от выявляемого в наших детекторах мюона – позволит пользователю измерить расстояние от одного детектора до другого, после чего будет возможно определить местоположение с помощью триангуляции, – говорит доктор Сtir. – Этот метод уже был ранее испытан в лаборатории, где мы продемонстрировали процесс преобразования времени пересечения частиц для определения положения детектора».

После первоначальных испытаний системы в водно-погружном резервуаре в Англии проект переместится в Финляндию для развертывания в арктическом озере, покрытом льдом толщиной в один метр. На высоких широтах обычные измерения ГНСС проблематичны из-за их орбитальных ограничений.

Проект направлен на решение проблемы развертывания ряда датчиков, таких как высоко синхронизированный набор распределенных часов (с уходом до 10 миллиардных долей секунды), чтобы минимизировать предполагаемую неопределенность их положения, а также их интеграцию с мюонными детекторами.

«Нам также необходимо развернуть нашу систему в арктических погодных условиях (обычно -20° по Цельсию), в изолированной среде и частично под водой, – добавил Сtir. – Холодная среда влияет на многие аспекты проекта – от персонала до обеспечения устойчивости электроники к холоду. Море в целом прозрачно для мюонов космических лучей, поэтому мы ожидаем, что появится возможность и для подводной навигации».

Читателям, заинтересовавшимся проблемами мюонной навигации, будет полезно ознакомление со статьей [61].

3. Целям резервирования GPS служил и проект ASPN (All Source Positioning and Navigation), предполагающий использование так называемых альтернативных сигналов (signals of opportunity), до того не применявшихся широко при решении навигационных задач. Считается, что такие сигналы гораздо многочисленнее предоставляемых GPS и, главное, гораздо мощнее последних, что позволяет решить задачу КВО объекта в условиях, когда сигналы GPS недоступны.

Примечательно, что к альтернативным сигналам относят и вспышки молнии, сопровождающиеся миллисекундными импульсами на частоте 3–30 кГц, которые распространяются на расстояния в тысячи километров и могут быть обработаны методами геолокации с помощью сети специальных приемников. В качестве таковой может выступать система грозопеленгации и грозового оповещения ENTLN (Earth Networks Total Lightning Network), оборудованная 800 датчиками. В остальном к ним относят менее экзотические сигналы, прежде всего теле- и радиостанций.

Философию этой программы Лин Хаас (Lin Haas) [52], программный менеджер отдела стратегических технологий DARPA, изложил следующим образом: «Можем ли

мы создать навигационную систему, способную извлекать пространственную и временную информацию из любого сенсора, к примеру, связанных или визуальных систем? Безусловно!» Здесь и далее с очевидностью под сенсорами понимаются источники навигационной информации, в том числе и излучатели альтернативных сигналов.

Тем не менее требования DARPA простираются гораздо дальше: предполагается, что в результате разработки будет достигнута быстрая реконфигурация системы по мере движения объекта и изменения состава обрабатываемых сенсоров, не требующая длительной перестройки навигационного фильтра. При этом должна быть обеспечена блокировка данных от сенсоров, с которыми система никогда не сталкивалась.

Работы по проекту ASPN развернуты достаточно широко [53]. На первом этапе DARPA подключила Лабораторию им. Ч. Дрейпера (Charles Stark Draper Laboratory, США) (600 тыс. \$) и фирму Argon ST Inc. (1,9 млн \$), являющуюся многопрофильным отделением компании Boeing. Они сконцентрировали свои усилия на построении архитектуры системы и алгоритмов фильтрации навигационной информации, обеспечивающих комплексирование навигационных датчиков и быструю реконфигурацию системы. При этом удалось показать, что адаптация системы к различным сенсорам и придание ей свойства plug-and-play достижимы.

На втором этапе к исследованиям были подключены компании SAIC Inc. (2,9 млн \$), Vesperix Corp. (100 тыс. \$), SRI International (1,3 млн \$) и Systems & Technology Research (314 тыс. \$), которым предстояло не только завершить начатые работы, но и создать прототип системы и подтвердить на нем возможность обработки произвольного набора входных сигналов вне зависимости от того, каково традиционное использование соответствующих датчиков. Естественно, что, как и во всех прочих проектах, финансируемых DARPA, при этом должны быть подтверждены и соответствующие жесткие требования к SWaP+C-характеристикам образца (объему, весу, потребляемой мощности и стоимости).

Развитием работ по ASPN стал проект STOIC (Spatial, Temporal and Orientation Information in Contested Environments), финансировавшийся DARPA через научно-исследовательскую лабораторию BBC США (U.S. Air Force Research Laboratory) с 2015 г. Исполнителями были фирмы Rockwell Collins (5,4 млн \$), Raytheon BBN Technologies (1,7 млн \$) и Expedition Technology (524 тыс. \$) [54].

Целью программы STOIC является создание системы КВО, не использующей сигналы GPS, но приближающейся к ее характеристикам и основанной на длинноволновых сигналах, ультрастабильных источниках времени и многофункциональных системах, которые обеспечивают обмен данными о КВО между потребителями. Последнее, кстати, опирается на идеи, развиваемые Доротой Грейнер-Бжезинской (Dorota Grejner-Brzezinska) при реализации так называемой групповой навигации (см., например, [55]) в случае отсутствия возможности принимать сигналы GPS в городских условиях.

Вице-президент фирмы Rockwell Collins Джон Боргезе (John Borghese) утверждал буквально следующее: «Разрабатываемые нами технологии передачи временных и навигационных данных нацелены на обеспечение возможности решения задачи относительного позиционирования распределенной группы платформ при отсутствии сигналов GPS».

4. Работы, посвященные применению альтернативных сигналов, активно вела и компания BAE Systems (Великобритания) в рамках проекта NAVSOP (Navigation

via Signals of Opportunity) [56]. В попытках определить положение потребителя с погрешностью, не превышающей единицы метров, разработчики NAVSOP наряду с сигналами GPS задействовали сигналы Wi-Fi, телевизионных и радиовышек, а также мобильных телефонов и, самое удивительное, «глушилок» сигналов GPS (см. рис. 3). Эта технология оказывается чрезвычайно эффективной, например, в районах плотной городской застройки, где сигналы GPS по тем или иным причинам недоступны.

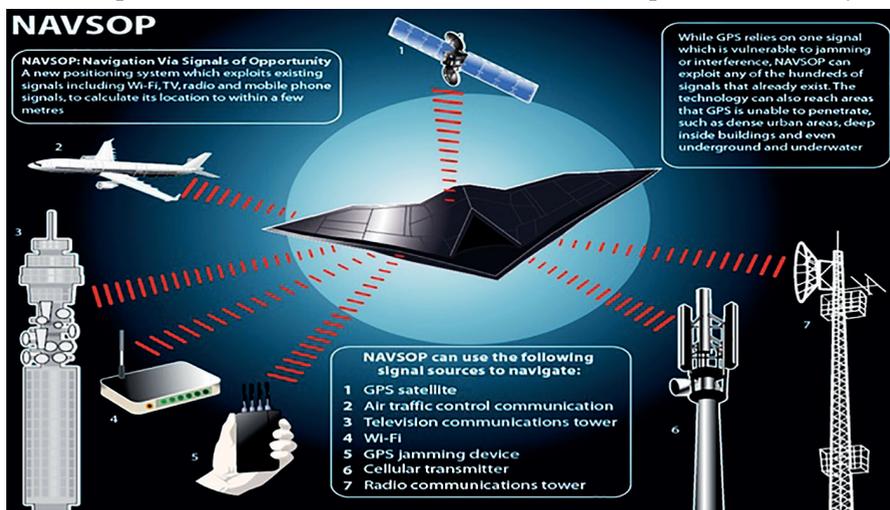


Рис. 3. Структура системы NAVSOP

Преимуществом такой системы является то, что вся инфраструктура для нее уже существует, нужно только научиться эффективно ее применять. Учитывая, что в NAVSOP используются сигналы радиоволн различных диапазонов, система может функционировать не только в лесу или внутри зданий, где сигналы GPS блокируются, но и в самых отдаленных точках планеты, включая Арктику и Антарктику, и принимать сигналы различных спутников, не предназначенных для решения задач навигации.

Заключение

Подводя итоги изложенному ранее, можно констатировать следующее.

1. Применительно к ГНСС GPS, обладающей малой мощностью передаваемого сигнала, не только спуфинг, но и глушение являются на практике серьезными проблемами, с которыми разработчики ГНСС борются прежде всего за счет создания специальных типов приемных антенн и использования новых типов сигналов. В интегрированных системах решению их способствует привлечение прецизионных инерциальных технологий.

2. Если говорить о точности местоопределения, эквивалентной точности GPS, то лишь предложения фирм NextNav (США) и Locata Corporation (Австралия) заслуживают внимания. Тем не менее, учитывая необходимость для решения задачи покрыть район позиционирования полем своеобразных радиомаяков, становится очевидным, что речь при этом может идти только о локальном случае КВО.

3. Если увеличить погрешность позиционирования до порядка 10-20 м и забыть о нуждах беспилотных подвижных платформ, что позволит в более чем 80-90% случаев обслужить решение задач местоопределения, то можно воспользоваться:

- модернизированным вариантом систем типа Starlink и OneWeb при их полном развертывании – на глобальном уровне;
- дифференциальным вариантом системы eLogan – на региональном уровне.

4. Что касается методов, обсуждавшихся в разделе «Немного экзотики», то они с очевидностью относятся к поисковым, могут обеспечить решение задачи КВО только на локальном уровне и сегодня не способны гарантировать точности, в какой-либо мере сопоставимые с точностями GPS. Последнее относится и к методам навигации по геофизическим полям, будь то магнитное, гравиметрическое или поле глубин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Knight, R.**, Stanford PNT Symposium Marks 50 Years of GPS, Covers Various Emerging Topics, *Inside GNSS*, November 20, 2023, URL: <https://insidegnss.com/stanford-pnt-symposium-marks-50-years-of-gps-covers-various-emerging-topics/>.
2. **Last, D.**, The Navigation of Navigation, *IAIN World Congress, Proceedings Non-IEEE Full Papers*, 2015, pp. 8–13.
3. **At ENC 2014: A GNSS Wake Up Call for Europe**, *Inside GNSS*, 2014, April 16, URL: <https://insidegnss.com/at-enc-2014-a-gnss-wake-up-call-for-europe/>.
4. **New GPS ‘circle spoofing’ moves ship locations thousands of miles**, *GPS World*, 2020, May 26, URL: <https://rntfnd.org/2020/05/26/new-gps-circle-spoofing-moves-ship-locations-thousands-of-miles-gps-world/>.
5. **Harris, M.**, Ghost ships, crop circles, and soft gold: A GPS mystery in Shanghai, *MIT Technology Review*, 2019, November 15.
6. **Beyond GPS: 5 Next-Generation Technologies for Positioning**, *Navigation & Timing (PNT)*, DARPA, 7/24/2014, URL: www.darpa.mil/news-events/2014-07-24.
7. **Ward, N., Bransby, M.**, Requirements for Resilient PNT, *Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Dana Point, California, January 2015, pp. 234–238, URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=12621>.
8. **Oroliа fortifies resilient PNT with Satelles satellite time and location signal**, *GPS World*, 2016, December 15, URL: <http://gpsworld.com/orolia-fortifies-resilient-pnt-with-satelles-satellite-time-and-location-signal>.
9. **Scientists create their own GPS by spying on internet satellites**, PM ETBYADAM MANN, 2021, 27 Sep., URL: science.org/content/article/scientists-create-their-own-gps-spying-internet-satellites
10. **Perspectives of PNT Services Supported by Mega-Constellations** Francis Soualle. Airbus Defence and Space – Germany, *International Technical Symposium on Navigation and Timing (ITSNT)*, Toulouse, 14th November 2018, ENAC, URL: https://itsnt.recherche.enac.fr/application/files/2315/4385/5515/IG14_Soualle_Perspectives_of_PNT_Services_Supported_by_Mega-Constellations_F_Soualle_Airbus_Final_2.pdf.
11. **Европейское космическое агентство ищет финансирование для программ навигационных технологий** // Вестник ГЛОНАСС. 24 Ноября 2022. URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/intro/evropeyskoe-kosmicheskoe-agentstvo-ishchet-finansirovanie-dlya-programm-navigatsionnykh-tekhnologiy/>.
12. **Европейские планы по созданию низкоорбитальных навигационных спутников** // Вестник ГЛОНАСС. 1 Ноября 2022. URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/intro/evropeyskie-plany-po-sozdaniyu-nizkoorbitalnykh-navigatsionnykh-sputnikov/>.
13. **FT: Великобритания может создать систему спутниковой навигации на платформе OneWeb TACC**. Новости ВПК. 22.06.2020. URL: https://vpk.name/news/412705_ft_velikobritaniya_mozhet-sozdat-sistemu-sputnikovoi-navigacii-na-platforme_oneweb.html.
14. **Великобритания может создать систему спутниковой навигации с помощью OneWeb**. TACC. 04 мая 2021. URL: <https://news.rambler.ru/tech/46352531-telegraph-velikobritaniya-mozhet-sozdat-sistemu-sputnikovoy-navigatsii-s-pomoschyu-oneweb>.
15. **Meng, Y. et al.**, A Global Navigation Augmentation System Based on LEO Communication Constellation, *European Navigation Conference (ENC)*, Gothenburg, Sweden, 2018, pp. 65–71, doi: 10.1109/EURONAV.2018.8433242.

16. https://www.orolia.com/ws-dev/wp-content/uploads/2021/07/STL-infographic_0-1.pdf.
17. **Новый альянс** намерен продвигать резервные навигационные системы // Вестник ГЛОНАСС. 8 Декабря 2020. URL: vestnik-glonass.ru/news/corp/novyy-alyans-nameren-prodvigat-rezervnye-navigatsionnye-sistemy/.
18. **DARPA Plans to Put PNT in LEO**, *Inside GNSS*, 2021, May 25, URL: <https://insidegnss.com/darpa-plans-to-put-pnt-in-leo/>.
19. https://defence.nridigital.com/global_defence_technology_jul20/blackjack-darpa-satellites.
20. <https://breakingdefense.com/2019/08/army-seeks-small-satellites-to-support-ground-troops/>.
21. <https://rntfnd.org/2022/02/09/gps-independent-navigation-at-the-core-of-space-development-agency-cys-new-leo-constellation-navigation-outlook/>.
22. **Rainbow, J.**, Xona Space Systems fully funds GPS-alternative demo mission, *Space News*, September 22, 2021, URL: spacenews.com/xona-space-systems-fully-funds-gps-alternative-demo-mission/.
23. **Knight, R.**, NovAtel Receivers to Support New Xona Commercial LEO Constellation, *Inside GNSS*, May 31, 2022, URL: <https://insidegnss.com/novatel-receivers-to-support-new-xona-commercial-leo-constellation/>.
24. **Когнитивная оппортунистическая навигация** включается в войну с Маском // Вестник ГЛОНАСС. 24 Октября 2022. URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/corp/kognitivnaya-opportunistscheskaya-navigatsiya-vklyuchaetsya-v-voynu-s-maskom>.
25. **Divis, D.A.**, Space Development Agency Plans to Create an Alternative GPS Constellation, *Inside GNSS*, June 24, 2019, URL: <https://insidegnss.com/space-development-agency-plans-to-create-an-alternative-gps-constellation>.
26. **Ривкин Б.С.** Европейская конференция по навигации ENC-GNSS 2014 // Гироскопия и навигация. 2014. № 2. С. 151–160.
27. **eLoran Time** – Results fm 2016 Tests & Demos, Resilient Navigation and Timing Foundation, Jan 25, 2017, URL: <http://rntfnd.org/2017/01/25/loran-time-results-fm-2016-tests-demos>.
28. **Congressmen Oppose** NDGPS Plan Pending “Resilient PNT Architecture”, *Resilient Navigation and Timing Foundation*, Mar 30, 2016, URL: <http://rntfnd.org/2016/03/30/congressmen-oppose-ndgps-plan-pending-resilient-pnt-architecture>.
29. **House Passes** Bill Requiring eLoran to Safeguard GPS, *Resilient Navigation and Timing Foundation*, Jul. 24, 2017, URL: <https://rntfnd.org/2017/07/24/house-passes-bill-requiring-loran-to-safeguard-gps/>.
30. <https://rntfnd.org/2023/06/09/saudi-arabia-upgrading-to-loran/>.
31. **Lebekwe, C.K., Zungeru, A.M., and Astin, I.**, Meteorological Influence on eLoran Accuracy, *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 167162–167172, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135707.
32. **Ривкин Б.С.** Аналитический обзор состояния исследований и разработок в области навигации за рубежом. Вып. 1. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
33. **eDLoran: The Next-Gen Loran**, *GPS World*, June 28, 2014. URL: <https://www.gpsworld.com/edloran-the-next-gen-loran/>.
34. https://rntfnd.org/wp-content/uploads/2018/04/ENC2013_JiwonSeo_revised.pdf.
35. **Son, P.-W., Rhee J.R., and Seo J.**, Novel multichain-based Loran positioning algorithm for resilient navigation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, vol. 43, no.2, pp. 628–644.
36. **Son, P.-W., Rhee, J.H., Han, Y., Seo, K., and Seo, J.**, Preliminary study of multichain-based Loran positioning accuracy for a dynamic user in South Korea, *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Monterey, CA, USA, 2018, pp. 1034–1038, doi: 10.1109/PLANS.2018.8373482.
37. **Goward, D.**, South Korea partners with broadcaster on eLoran and 10-cm GPS, *GPS World*, November 23, 2020, URL: <https://www.gpsworld.com/south-korea-partners-with-broadcaster-on-loran-and-10-cm-gps/>.
38. **Goward, D.**, China expanding Loran as GNSS backup, *GPS World*, October 12, 2020, URL: <https://www.gpsworld.com/china-expanding-loran-as-gnss-backup/>.
39. **Goward, D.**, \$15M for GPS backup demo part of Congress’ march to terrestrial PNT, *GPS World*, January 16, 2019, URL: <https://www.gpsworld.com/15m-for-gps-backup-demo-part-of-congress-march-to-terrestrial-pnt/>.
40. **Goward, D.**, GPS to get terrestrial backup system, *GPS World*, December 5, 2018, URL: <https://www.gpsworld.com/gps-to-get-terrestrial-backup-system/>.
41. **11 Firms Chosen** to Demonstrate GPS Backup Technologies, *Inside GNSS*, Nov 9, 2019, URL: <https://rntfnd.org/2019/11/09/11-firms-chosen-to-demonstrate-gps-backup-technologies-inside-gnss>.
42. **Goward, D.**, GPS backup demonstration projects explained, *GPS World*, January 9, 2020, URL: <https://www.gpsworld.com/gps-backup-demonstration-projects-explained/>.

43. **DOT Report** on Backup PNT Technologies Finds NextNav Performs Best, Calls for Synthesis and Synergy, *Inside GNSS*, January 22, 2021, URL: <https://insidegnss.com/dot-report-on-backup-pnt-technologies-finds-nextnav-performs-best-calls-for-synthesis-and-synergy/>.
44. **ВВС США** рассматривают возможность использования магнитных полей для навигации вместо GPS // Вестник ГЛОНАСС, 19 Июня 2020. URL: vestnik-glonass.ru/news/tech/vvs-ssha-rassmatrivayut-vozmozhnost-ispolzovaniya-magnitnykh-poley-dlya-navigatsii-vmesto-gps/.
45. **Six Companies** to Demonstrate Alternative PNT to European Union, *Inside GNSS*, October 19, 2021, URL: <https://insidegnss.com/six-companies-to-demonstrate-alternative-pnt-to-european-union/>.
46. **Великобритания попытается** исследовать альтернативные навигационные технологии // Вестник ГЛОНАСС. 30 Сентября 2021. URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/tech/velikobritaniya-popytaetsya-issledovat-alternativnye-navigatsionnye-tekhnologii/>.
47. **Намечается конкуренция** спутниковой и наземной навигационных систем // Вестник ГЛОНАСС. 24 Июня 2020. URL: vestnik-glonass.ru/news/tech/namechaetsya-konkurentsia-sputnikovoy-i-nazemnoy-navigatsionnykh-sistem/.
48. <https://www.army-technology.com/features/quantum-sensing-atoms-military/?cf-view>.
49. **Исследования альтернативной навигации** для высоких широт на мюонах // Вестник ГЛОНАСС. 10 Декабря 2021. URL: vestnik-glonass.ru/news/tech/issledovaniya-alternativnoy-navigatsii-dlya-vysokikh-shirot-na-myuonakh/.
50. **Grundhöfer, L., Rizzi, F.G., Gewies, S., Hoppe, M., Bäckstedt, J., Dziewicki, M., and Del Galdo, G.**, Positioning with medium frequency R-Mode, *Navigation*, 2021, 68(4), 829–841, doi: <https://doi.org/10.1002/navi.450>.
51. **Rizzi, F.G.**, *Master Degree Thesis Phase Locked Loop for R-Mode navigation system*, URL: webthesis.biblio.polito.it/14408/1/tesi.pdf.
52. **Kramer, D.**, DARPA looks beyond GPS for positioning, navigating, and timing, *Physics Today*, 2014, 67 (10): 23–26, <https://doi.org/10.1063/PT.3.2543>.
53. **Keller, J.**, Three Join DARPA ASPN Navigation Sensor-fusion Program to Reduce U.S. Need for GPS, *Military & Aerospace Electronics*, February 2013.
54. **Keller, J.**, Three companies set sights on precision navigation that works independently of GPS, *Military & Aerospace Electronics*, Sept. 25, 2015, URL: www.militaryaerospace.com/articles/2015/09/navigation-without-gps.html.
55. **Lee, J.K., Grejner-Brzezinska, D., Toth, Ch.**, Network-based Collaborative Navigation in GPS-Denied Environment, *Journal of Navigation*, 2012, 65, no. 3, pp. 445–457, doi: 10.1017/S0373463312000069.
56. **Navigation via Signals of Opportunity (NAVSOP)**, URL: www.baesystems.com/en/product/navigation-via-signals-of-opportunity-navsop.
57. **NextNav Tests Alternative PNT Solution**, Achieves Accurate 3D Position with LTE and 5G Signals, *Inside GNSS*, July 25, 2023, URL: <https://insidegnss.com/nextnav-tests-alternative-pnt-solution-achieves-accurate-3d-position-with-lte-and-5g-signals/>.
58. **Luccio, M.**, Centimeters and picoseconds without satellites or atomic clocks, April 4, 2023, URL: <https://www.gpsworld.com/centimeters-and-picoseconds-without-satellites-or-atomic-clocks/>.
59. **Пешехонов В.Г.** Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных систем // Гироскопия и навигация 2022. Том 30. №1. С.3–11. DOI 10.17285/0869-7035.0084.
60. **Шмидт Дж.Т.** Эксплуатация навигационных систем на основе GPS в сложных условиях окружающей среды // Гироскопия и навигация. 2019. Том 27. №1. С. 3–21. DOI 10.17285/0869-7035.2019.27.1.003-021.
61. **Степанов А.П.** Достижения ядерной физики в свете решения задачи определения местоположения подвижного объекта с помощью релятивистских частиц // Навигация и гидрография. 2023. №72. С. 24–57.
62. **Seo, K., Park, S.H., Fang, T.H., and Lee, S.H.**, Analysis of Positioning Performance to Meet HEA Requirement in eLoran Testbed, *International Association of Institute of Navigation (IAIN)*, 2018.

B.S. Rivkin (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia)

Navigation without GPS Abroad, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32, no. 1 (124), pp. 115–142.

Abstract. The article focuses on the problems of GPS application and offers an overview of different GPS backup technologies and approaches proposed in the USA, the European Union, the UK, China and some other countries to overcome its shortcomings. Also considered are some well-known PNT services using LEO satellite signals, e-Loran radio navigation system, as well as some exotic approaches.

Key words: Positioning, Navigation and Timing (PNT), low Earth orbits (LEO), e-Loran, signals of opportunity, R-mode, muon technology.

Материал поступил 06.02.2024