

В. Г. ПЕШЕХОНОВ

ВЫСОКОТОЧНАЯ НАВИГАЦИЯ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

В последние годы отчетливо проявилась недостаточная помехозащищенность глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В связи с этим в статье рассматриваются возможные методы и средства обеспечения высокоточных навигационных определений без использования ГНСС и современное состояние их разработки.

Ключевые слова: помехи ГНСС, интегрированные инерциально-спутниковые системы, автономные средства навигации, радионавигация.

Введение

ГНСС совершили революцию в навигации благодаря уникальному сочетанию характеристик: метровой (в дальнейшем дециметровой) точности определения координат места, глобальной доступности информации в любой точке на земной поверхности, в любое время и в любых метеоусловиях, компактности и низкой стоимости аппаратуры потребителей.

К настоящему времени развернуты четыре ГНСС: ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), BeiDou (Китай), Galileo (Европейский союз) – всего более 130 космических аппаратов. Обеспечивается одновременное наблюдение до 30 из них, притом что для определения координат и времени достаточно четырех. Нарастает число локальных навигационных спутниковых систем, крупнейшими из которых являются QZSS, MSAS (Япония), GAGAN и NAVIC (Индия), EGNOS (Европейский союз), WAAS (США), BDSBAS (Китай).

Современные транспортные средства и системы управления транспортными потоками немыслимы без ГНСС. Большинство жителей Земли пользуются ГНСС

Пешехонов Владимир Григорьевич. Академик РАН, научный руководитель, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Директор, Институт информационно-навигационных систем Университета ИТМО (С.-Петербург). Президент международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

в повседневной жизни. В вооруженных силах боевые платформы (самолеты, корабли, танки и т.п.), высокоточное оружие и даже отдельные бойцы получают координатно-временную информацию от ГНСС. Зависимость от систем спутниковой навигации стала всеобщей.

Тем не менее проблема существует. Для потребителей важно получать координатно-временную информацию непрерывно и без искажений, однако ГНСС не всегда может обеспечить выполнение этого требования.

Во-первых, сигнал ГНСС излучается в дециметровом диапазоне волн, он не проникает в морскую воду, под землю, через стены сооружений, его затеняют высокие здания и стены узких каньонов, ослабляет густая листва деревьев.

Во-вторых, из-за ограниченного энергетического ресурса космических аппаратов мощность сигнала у поверхности Земли составляет всего 10^{-16} Вт, и создать помеху такому слабому сигналу нетрудно. Примеров тому много.

В-третьих, легко осуществим спуфинг – внесение изменений в сигнал (точнее, в псевдодальность), поступающий от ГНСС. В результате искаженные координаты могут быть любыми.

По-видимому, впервые на государственном уровне проблема недостаточной помехоустойчивости ГНСС была сформулирована в США комиссией Д.Рамсфельда (2001 г.), изучавшей развитие спутниковой навигации с точки зрения национальной безопасности.

Разработчики GPS повысили помехоустойчивость системы за счет кодирования сигналов. Гражданский код C/A обеспечивает устойчивый прием сигналов при соотношении «помеха–сигнал» до 250. При использовании кода P(Y) уверенный прием информации обеспечивается при соотношении «помеха–сигнал», равном 2500. Однако если мощность помехи вблизи приемника превышает $2 \cdot 10^{-12}$ Вт, то возникает риск потери сигнала [1].

В связи с этим ведется поиск методов дополнения или замещения ГНСС помехоустойчивыми средствами навигации. В США в 2018 году был принят закон, обязывающий Министерство транспорта создать систему резервирования GPS, которая была бы наземной, беспроводной, неразрушаемой, сигнал которой был бы доступен под землей и внутри зданий. Министерство выбрало 11 организаций, предложивших различные пути решения проблемы. В представленном в начале 2021 года отчете [2] предлагается использовать ряд технологий: сигналы спутникового вещания в L-диапазоне, наземные навигационные системы низкочастотного и сверхвысокочастотного диапазонов, оптоволоконные линии для передачи точного времени и синхронизации передатчиков. Универсального помехоустойчивого средства, полноценно заменяющего ГНСС, предложено не было.

Министерство обороны США не проявило активности в данном поиске, вероятно ориентируясь на перспективу использования M-кода повышенной помехозащищенности и узконаправленных антенн, повышающих уровень сигнала на два порядка. Кроме того, агентство DARPA Минобороны США финансирует программу Blackjack корпорации Northrop Grumman [3], которая направлена на создание системы низкоорбитальных космических аппаратов высокоскоростной связи и навигации.

Тем не менее Комитет сената США по вооруженным силам, ссылаясь на требование армейских командиров, включил в акт о государственной обороне 2021 года требование к Министерству обороны к 2023 году подготовить, протестировать и приобрести

для приоритетных миссий аппаратуру, обеспечивающую генерирование устойчивых к помехам альтернативных сигналов позиционирования, навигации и времени [4].

Журнал «Гироскопия и навигация» уже обращался к проблеме повышения помехоустойчивости ГНСС [1]. В настоящей статье оцениваются возможные методы замещения ГНСС. При этом замещение должно обеспечиваться необязательно с метровой точностью. Во многих задачах удовлетворительной является и на порядок бóльшая погрешность.

Рассматриваются три группы средств, способные заменить ГНСС: на коротком временном интервале; глобально, на всем земном шаре; в локальных районах.

Замещение ГНСС на коротком временном интервале

Исторически первый метод, обеспечивший непрерывное получение навигационной информации при кратковременном затенении аппаратов ГНСС, например при проезде по узким улицам с высокими домами, заключается в построении интегрированных инерциально-спутниковых систем. Сочетание свойств ГНСС (высокая точность определения координат без накопления погрешности во времени, но отсутствие пространственной памяти) и инерциальной навигационной системы (пространственная память, но накопление погрешности во времени) использовано для построения интегрированной системы, обеспечивающей непрерывное получение информации.

Однако есть еще одно условие, которому полностью удовлетворяет аппаратура пользователя ГНСС и которое трудновыполнимо для инерциальной системы, – крайне малые габариты, энергопотребление и стоимость. Единственный вид гироскопических элементов, сопоставимый по этим параметрам с аппаратурой потребителей ГНСС, – микромеханические гироскопы (ММГ) и акселерометры (ММА). На их основе строится инерциальный измерительный модуль (ИИМ), состоящий из триады ММГ и триады ММА. Дрейф ММГ велик, и ИИМ может использоваться только для кратковременного замещения ГНСС.

Функционирует интегрированная система следующим образом: пока доступен сигнал ГНСС, он транслируется на выход системы и одновременно используется для калибровки ММГ. При пропадании сигнала ГНСС система автоматически переходит на выдачу информации от ИИМ.

Первые интегрированные системы строились на миниатюрных роторных вибрационных гироскопах (РВГ). Испытания, проведенные в середине 90-х годов при поездке на автомобиле по улицам города [5] с ИИМ, построенном на РВГ и акселерометре класса точности 10 град/час и 10^{-3} м/с² соответственно, показали, что при пропадании сигнала ГНСС на 100 секунд погрешность интегрированной системы не превышала 50 метров, при этом в 95% отсчетов она составляла не более 20 м.

В настоящее время имеются ММГ с дрейфом нуля порядка 1÷10 град/час и созданы многомассовые ММГ, которые имеют на порядок меньший дрейф [6, 7] с соответствующим увеличением времени замещения ГНСС.

Еще один резерв увеличения времени замещения ГНСС заключается в привлечении дополнительно к инерциальным данным измерений путевой скорости. Результирующая погрешность будет нарастать значительно медленнее, чем погрешность инерциальной системы. Используются методы коррекции БИНС по нулевой скорости (ZURТ-коррекция) и интеграции БИНС и одометра [8].

Лабораторией Ч. Дрейпера (США) предложена новая глубокосвязанная интегральная схема для повышения помехоустойчивости [1]. Она построена с использованием нелинейного фильтра Калмана, коэффициенты которого непрерывно подстраиваются к изменениям соотношения «сигнал–помеха» (рис. 1). Экспериментально подтверждено повышение помехоустойчивости на 10-15 Дб.

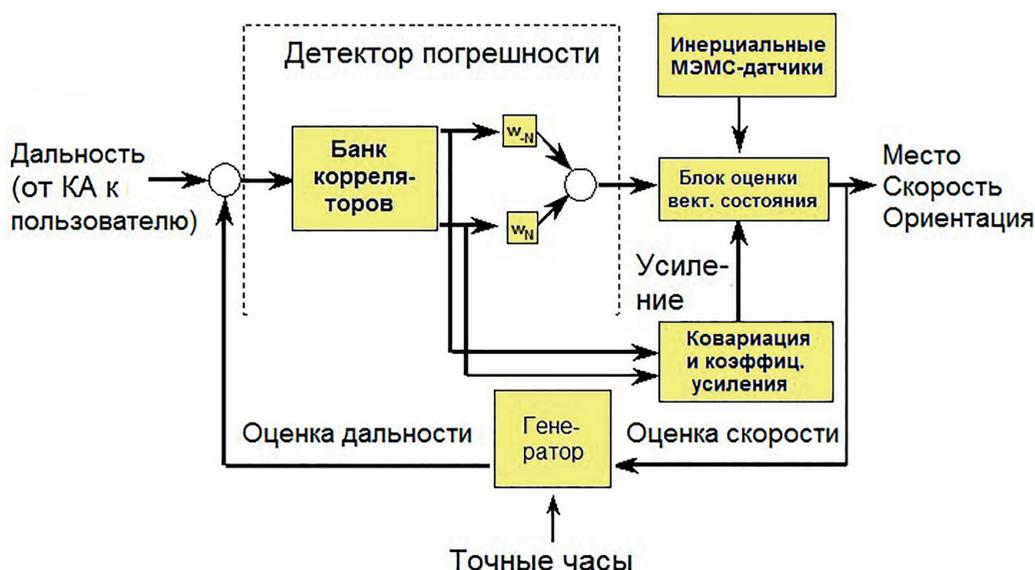


Рис. 1. Глубоко интегрированная система [1]

Интегрированные инерциально-спутниковые системы применяются в частности для обеспечения помехоустойчивости тактического оружия. По такой схеме построено навигационное обеспечение артиллерийского снаряда Excalibur [9], который армия США использовала в войнах в Ираке и Афганистане. Однако применение его было ограниченным из-за высокой стоимости.

Возможность глобального замещения ГНСС

Глобальное, без ограничений по координатам и времени замещение ГНСС помехоустойчивым средством навигации возможно либо при создании спутниковых систем с более мощным (на несколько порядков) сигналом, либо при использовании автономных средств навигации.

В первом случае очевидный способ повысить мощность сигнала заключается в снижении орбиты космических аппаратов. Так как при одной и той же направленности антенны сигнал изменяется обратно пропорционально квадрату высоты орбиты космического аппарата, то снижение высоты со стандартных для ГНСС 20 тыс. км до 600 км повысит уровень сигнала на 3 порядка, и создать помеху такому сигналу (особенно с учетом кодирования сигнала) будет значительно сложнее.

Однако с уменьшением высоты орбиты уменьшится область на земной поверхности, в которую поступает сигнал, и необходимо увеличить число космических аппаратов для непрерывного покрытия всей поверхности земного шара. Задача решится,

если использовать созвездие низкоорбитальных космических аппаратов, например обеспечивающих широкополосную связь. В настоящее время формируются группировки из сотен низкоорбитальных космических аппаратов, и подобная постановка задачи обеспечения помехоустойчивости спутниковой навигации представляется вполне реальной.

Автономным средством навигации, не имеющим ограничения по выработке координат места, является инерциальная навигационная система (ИНС). Исходной информацией для ИНС служат угловая скорость вращения Земли и ускорение платформы, параметры движения которой ИНС определяет. Создать помехи такой системе нереально.

В последние десятилетия широко применяются бесплатформенные ИНС (БИНС) на волновых оптических гироскопах, лазерных (ЛГ) и волоконно-оптических (ВОГ), имеющих дрейф нуля на уровне 10^{-2} - 10^{-3} град/час. Они могут замещать ГНСС в течение порядка 10 минут. При этом ожидается снижение дрейфа ВОГ на порядок [10] и, соответственно, увеличение времени замещения ГНСС до часа. Однако по габаритам, энергопотреблению и стоимости БИНС превосходят аппаратуру потребителей ГНСС на два порядка. Более высокой точностью, чем БИНС на ВОГ, обладает ИНС на прецизионных электростатических гироскопах (ИНС ЭГ), но ее габариты, энергопотребление и стоимость еще выше, чем у БИНС на ВОГ. Поэтому ИНС ЭГ применяется только там, куда сигналы ГНСС не проникают, – на подводных лодках.

Перспектива снижения габаритов и энергопотребления БИНС связана с использованием новых видов гироскопов (рис. 2). Волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) обеспечит снижение объема БИНС примерно вдвое по сравнению с БИНС на ЛГ и ВОГ при сопоставимой в настоящее время точности [10, 11]. Прототип гироскопа на эффекте ядерно-магнитного (ЯМГ) резонанса приближается по габаритам к ММГ и имеет дрейф нуля по крайней мере на порядок ниже последнего [12]. При этом необходимо иметь в виду, что стоимость ЯМГ будет безусловно выше стоимости ММГ.

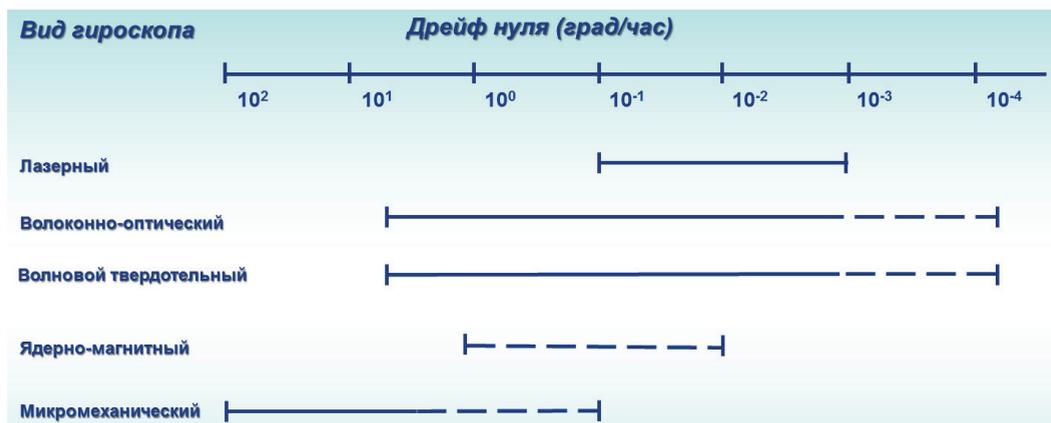


Рис. 2: — точностные характеристики современных гироскопов;
 --- перспектива повышения точностных характеристик

Радикально приблизиться к ГНСС удастся, если будет создан гироскоп на волнах материи (волнах де Бройля) [13]. Однако сегодня имеются лишь лабораторные установки и многие вопросы, принципиальные для реализации этого гироскопа, не решены.

Еще один метод замещения ГНСС основывается на принципах астронавигации. Этот метод давно используется на флоте и в некоторых случаях в ракетно-космической технике. Однако до недавнего времени его точность не соответствовала точности ГНСС. Положение изменилось с изобретением регистрирующего устройства – астротелескопа на базе КМОП-матрицы и корреляционно-экстремального метода определения положения отображения звезд на ней с погрешностью в десятые доли угловой секунды при времени наблюдения до 1 часа [14]. Серьезным ограничением астронавигационного метода, кроме достаточно длительного сеанса наблюдения звезд, является необходимость оптической видимости звезд.

Замещение ГНСС в локальных районах

До создания ГНСС активно развивалась радионавигационная система Logan-C (российский аналог – «Чайка»), зоны действия цепей которой перекрывали значительную часть поверхности Земли (см. рис. 3). Однако система Logan-C не выдержала конкуренции с ГНСС, обеспечившей на два порядка более высокую точность и доступной глобально. В результате системы Logan-C были повсеместно выведены из эксплуатации, часть станций законсервирована, часть ликвидирована.

Среднеквадратичная погрешность определения места	
«Чайка»	Logan-C
100-700 м	≤230 м
Дифференциальный метод – погрешность 50 м в радиусе 150-200 км	
Рабочая площадь	
20 млн кв. км	95 млн кв. м



Рис. 3

Когда началось обсуждение проблемы дополнения/замещения ГНСС, была предложена разработка усовершенствованной системы e-Logan [15]. Высокая помехоустойчивость системы e-Logan должна обеспечиваться за счет мощности генераторов (порядка 1 МВт против 50 Вт у ГНСС). Низкая частота сигнала (100 кГц) сделает возможным навигационные определения в зданиях, в лесу, под поверхностным слоем земли.

Система e-Logan должна обеспечить точность определения координат 8-20 м, точность определения времени – 50 нс [15]. Оценка затрат на развертывание системы e-Logan в США составляет 400 млн долларов, но пока нет информации о выделении соответствующих средств.

Великобритания уже в 2014 г. включила станции e-Logan, обеспечивающие навигацию у восточного побережья и заходы в порты этого побережья. В Южной Корее, кроме побережья, цепи e-Logan задействованы на части территории страны из-за неблагоприятной помеховой обстановки при использовании ГНСС.

Из других радиотехнических средств не вызывает сомнения возможность использования точек доступа Wi-Fi и радиомаяков для навигационных определений в зданиях и сооружениях. Под водой применяются гидроакустические маяки. Погрешность определения координат при расстоянии до маяка 100 м составляет 5 м,

при расстоянии 10 км – сотни метров. Следует, однако, отметить, что радионавигационные средства неавтономны, легко могут быть обнаружены и выведены из строя.

Предлагается также [16] мобильная наземная псевдоспутниковая система, состоящая из трех маяков-псевдоспутников, обеспечивающих в зависимости от высоты подъема антенн зону покрытия диаметром 20-40 км.

В последние десятилетия развиваются корреляционно-экстремальные методы навигации по геофизическим полям Земли: поверхностным – рельефу местности и дна морей и океанов и потенциальным – гравитационному и магнитному.

Точность навигационных определений корреляционно-экстремальным методом зависит от погрешности съемки карты геофизического поля Земли, величины его градиента и погрешности навигационных измерительных средств. В свою очередь, погрешность съемки карты зависит от погрешностей измерителя и координирования съемки.

Анализ морских гравиметрических карт показал, что на большей части акваторий Мирового океана градиент гравитационного поля недостаточен для высокоточного определения координат, но имеются ограниченные районы, где градиент составляет 3 мГал/км и более. При погрешности современных морских относительных гравиметров порядка 0,1 мГал в этих районах обеспечивается определение координат места с погрешностью порядка менее 100 м [12]. Следует отметить, что приведена не инструментальная погрешность чувствительного элемента гравиметра, а полная величина погрешности с учетом поправок на эффекты Этвеша, Гэрисона и кросс-каплинг-эффект.

Современные абсолютные гравиметры имеют на один-два порядка меньшую инструментальную погрешность, чем относительные, но опыта их эксплуатации на подвижных платформах нет, и оценить полную погрешность в этих условиях затруднительно.

Батиметрические поля (рельефа дна) коррелированы с гравитационным полем и обеспечивают близкую к гравиметрическим полям точность навигационных определений.

Что касается магнитного поля Земли (МПЗ), то можно заметить следующее. Современные инструментальные средства измерения его параметров обеспечивают чувствительность на уровне 1 нТл. Это могло бы, в принципе, обеспечить погрешность определения координат места менее 100 м. К сожалению, наличие временных вариаций, а также необходимость разделения МПЗ и магнитного поля носителя создают ряд проблем, затрудняющих реализацию этого метода на практике. Следует отметить, что в ближайшей перспективе речь можно вести о переходе к измерителям градиентов МПЗ, возможность применения которых для целей навигации требует дополнительных исследований [17, 18].

Заключение

Современные ГНСС обладают ограниченной помехоустойчивостью, и для критически важных применений необходимы помехозащищенные навигационные средства, дополняющие или замещающие ГНСС.

В настоящее время подобными средствами являются:

- кодирование сигналов в защищенных каналах ГНСС;
- интегрированные инерциально-спутниковые системы (глобальное кратковременное замещение ГНСС);

- высокоточные бесплатформенные инерциальные навигационные системы (глобальное замещение ГНСС продолжительностью до часа);
- аппаратура для навигации по аномалиям геофизических полей – поверхностных и потенциальных (локальная навигация);
- системы радио- и гидроакустических маяков (локальная навигация, в том числе в закрытых помещениях и под водой).

Могут быть созданы новые средства:

- усовершенствованная система e-Logan (региональная навигация);
- низкоорбитальная система спутниковой навигации (глобальная навигация).

Полное замещение ГНСС (глобальное и по точностным характеристикам) пока невозможно, но набор средств значителен и для конкретных условий применения могут быть выбраны достаточно близкие к оптимальным средства.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 18-19-00627, <https://rscf.ru/project/18-19-00627/>.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Шмидт Дж.Т. Эксплуатация навигационных систем на основ GPS в сложных условиях окружающей среды // Гироскопия и навигация. 2019. №1 (104). С. 3–21. DOI 10.17285/0869-7035.2018.27.1.003-021. <https://www.gpsworld.com/dot-report-1-band-uhf-1f-and-fiber-pnt-needed-to-protect-us/>
2. <https://insidegnss.com/darpa-plans-to-put-pnt-in-leo/>
3. <https://breakingdefense.com/2020/06/sasc-wants-alternative-gps-by-2023/>
4. Блажнов Б.А., Несенюк Л.П., Пешехонов В.Г., Старосельцев Л.П. Миниатюрная интегрированная инерциальная спутниковая система навигации и ориентации // Гироскопия и навигация. 1998. №1(20). С. 56–62.
5. Towards a navigation grade Si-MEMS gyroscope, *Inertial Sensors and Systems*, 2019, Braunschweig, Germany, doi 978-1-7281-1935-9/19/31.00.
6. Jonson, B. et al., Development of a Navigation-Grade MEMS IMU, *2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, doi 978-1-7281-5099-4/21/31.00.
7. Голован А.А. Интеграционное решение «БИНС–одометр»: позиционный вариант // Гироскопия и навигация. 2021. №2(113). С. 110–125. DOI 10.17285/0869-7035.0066.
8. <https://www.raytheon.com/capabilities/product/excalibur/>
9. Lefevre, H., The fiber optics gyro adventure at photonics iXBlue, *Optical Waveguide and Laser Sensors*, 2020, vol. 11405, p. 1140505.
10. Folopp, E., Lenoir, Y., HRG Crystal™ Dual Core; Rebooting the INS Revolution, *DGON Inertial Sensors and Systems*, IEEE, 2019, pp. 1–14.
11. Мейер Д., Ларсен М. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе для инерциальной навигации // Гироскопия и навигация. 2014. №1 (84). С. 3–13.
12. Воронов А.С., Ривкин Б.С. Гироскоп на волнах де Бройля. Просто о сложном // Гироскопия и навигация. 2021. №2 (113). С. 126–139. DOI 10.17285/0869-7035.0067.
13. *Современные методы и средства измерения гравитационного поля Земли / под ред. В.Г. Пешехонова, О.А. Степанова.* СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
14. Балов А.В. Радионавигация – настоящее и будущее // Гироскопия и навигация. 2009. №4 (67). С. 84–102.
15. Коротыношко А.Н. Псевдоспутниковая навигация наземных транспортных объектов // Новости навигации. 2021. №1. С. 20.
16. Минлигареев В.Т., Сазонова Т.В., Арутюнян Д.А., Трегубов В.В., Хотенко Е.Н. Геофизическое обеспечение перспективных автономных магнитометрических навигационных систем // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 4 (111). С. 95–105. DOI 10.17285/0869-7035.0052.
17. Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Тхоренко М.Ю., Папуша И.А. Перспективные системы навигации летательных аппаратов с использованием измерений потенциальных физических полей // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 1 (112). С. 32–51. DOI 10.17285/0869-7035.0055.

Peshkhonov, V.G. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, Russia)

High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 1 (116), pp. 3–11.

Abstract. In recent years, it has become clear that global navigation satellite systems (GNSS) have insufficient immunity to noises. In this regard, the paper discusses possible methods and tools ensuring high-precision navigation measurements without using GNSS, and their current development status.

Key words: GNSS interference, integrated INS/GNSS systems, autonomous navigation tools, radio navigation.

Материал поступил 19.01.2022