

УДК 629.056.8
EDN: CYXUOH

Г. И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ, А. П. СТЕПАНОВ, Е. В. ДРАНИЦЫНА, Б. А. БЛАЖНОВ,
Д. В. ВОЛЫНСКИЙ, Н. С. ПОТЕМИНА

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВЫХ МНОГОАНТЕННЫХ СИСТЕМ. ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ГНСС-ГИРОКОМПАСА

Обсуждаются отдельные достижения в области создания спутниковых многоантенных систем, реализующих интерферометрический принцип определения ориентации объекта. Анализируются существующие системы, и приводятся авторские суждения о направлении их развития для использования в условиях плохого приема или полного отсутствия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Предоставляются сведения о новой разрабатываемой системе, условно названной ГНСС-гироскопом, которая представляет собой единую интегрированную систему ориентации и навигации, конструктивно и информационно объединяющую измерительный модуль на волоконно-оптических гироскопах тактического класса точности и многоантенную приемную аппаратуру ГНСС, установленные на вращающемся основании. На фоне аналогичных разработок описываются отличия ГНСС-гироскопа, которые позволяют преодолеть их недостатки в условиях плохого приема спутникового сигнала, и обсуждается возможная ниша его применения.

Ключевые слова: многоантенные спутниковые системы, многолучевость, условия плохого приема спутникового сигнала, ГНСС-гироскоп.

Емельянец Геннадий Иванович. Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор» (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Степанов Алексей Петрович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»; Университет ИТМО (С.-Петербург).

Драницына Елена Викторовна. Кандидат технических наук, начальник группы, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»; Университет ИТМО. Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0003-2591-5816.

Блажнов Борис Александрович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор».

Волынский Денис Валерьевич. Начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор».

Потемина Наталья Станиславовна. Специалист по развитию и обучению персонала, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»; Университет ИТМО.

1. Введение

Системы, основанные на измерении фазы несущей частоты сигналов ГНСС, имеют основополагающее значение для обеспечения точной навигации и ориентации современных беспилотных автомобилей или безэкипажных судов [1]. Наблюдения фазы несущей характеризуются уровнями шума на два порядка ниже, чем в кодовых измерениях, и позволяют более точно определить пространственное положение объекта. При этом точное позиционирование требует либо значительного времени (десятки минут) до первого определения (метод PPP, [2, 3]), либо наличия базовой станции рядом с транспортным средством (метод RTK [4]). Одновременно для определения ориентации объекта необходимо, чтобы транспортное средство было оснащено несколькими приемными антеннами ГНСС [5–7].

Решение последней задачи многоантенной приемной аппаратурой (ПА) ГНСС осуществляется на основе интерферометрического принципа [8]. Т. е. измеряемая разность фаз на несущей частоте для сигналов, которые принимаются от навигационных спутников (НС) на антенные устройства (AU_i), разнесенные в пространстве на расстояние $L_{i,i+1}$ (между фазовыми центрами AU_i и AU_{i+1}), несет в себе информацию об ориентации объекта относительно направления на НС. Такие системы, как правило, называют ГНСС-компасами [9–22]. В документах Международной морской организации, Российского морского регистра судоходства (РМРС) они обозначаются как Attitude Heading Reference Systems (AHRS) и системы дистанционной передачи курса соответственно. ГНСС-компас обладает уникальными возможностями точного определения как навигационных параметров, так и параметров ориентации.

Основными достоинствами ГНСС-компасов являются отсутствие нарастания погрешности по курсу с увеличением широты места, стабильная долговременная точность и относительно низкая стоимость [10, 23]. Вместе с тем их применение накладывает некоторые ограничения на габариты объекта. С одной стороны, необходимо установить по крайней мере три АУ ГНСС для определения пространственной ориентации объекта. С другой – точность вычисления ее параметров обратно пропорциональна расстоянию между антеннами, что делает эту систему непрактичной для небольших транспортных средств, таких, например, как беспилотные летательные аппараты. Так, приведенный в [10] обзор современного состояния ГНСС-компасов показывает, что для достижения погрешности определения курса на уровне $0,2-0,3^\circ$ длина антенной базы (расстояние между двумя приемными АУ) должна быть не менее 1 м. При этом погрешность определения углов наклона оказывается в 2-3 раза выше, что можно объяснить малым поперечным разнесением антенн по сравнению с продольным, а также большим значением VDOP, чем HDOP [24].

Зависимость погрешности ΔK определения угла истинного курса ГНСС-компасом от длины антенной базы $L_{i,i+1}$ [м] может быть выражена следующим образом:

$$\Delta K \approx \Delta \phi_{i,i+1} / L_{i,i+1} \text{ [радиан]}, \quad (1)$$

где $\Delta \phi_{i,i+1}$ – погрешность разности фаз в единицах длины [м] сигнала на несущей частоте между AU_i и AU_{i+1} .

За счет варьирования расстояния между антеннами можно построить ГНСС-компасы с разными точностными характеристиками без увеличения их стоимости и изменения элементной базы [11, 12, 20, 25–28]. Это является их преимуществом при использовании на объектах, которые не накладывают ограничения на габариты системы.

В настоящее время ГНСС-компасы широко применяются на автомобилях, кораблях, самолетах, космических аппаратах, в военной технике и т.д. [5, 7, 29], см. рис. 1.



Рис. 1. Примеры применения ГНСС-компасов и угломерных систем с использованием сигналов ГНСС:

- а) аппаратура АСН-К с четырьмя АУ на космическом корабле «Прогресс М-25М» (на фото видны 3 АУ под белыми кожухами на корпусе корабля) [7];
- б) аппаратура МРК-11 на автожире А-002М [5];
- в) безэкипажный надводный аппарат OceanAlpha USV SL2 с двухантенной аппаратурой ГНСС [29]

Несмотря на ряд очевидных преимуществ, которыми обладают ГНСС-компасы как радионавигационные и радиоинтерферометрические системы [25], следует отметить и их недостатки. Точность и надежность этих устройств резко снижаются по следующим причинам:

- перерывы в наблюдении спутниковых сигналов;
- неблагоприятная геометрия при слежении за наблюдаемым созвездием НС [30];
- многолучевость распространения сигнала НС [25];
- сбои в слежении за сигналами НС соответствующих следящих систем ПА ГНСС [8, 26, 30, 31].

Во многом возникновение указанных особенностей радионавигационного поля является неизбежным, особенно при высокой динамике объекта, движении в сложных условиях (волнение моря, ледовая обстановка) или внутри плотной городской застройки и при наличии естественных и искусственных подавляющих (Jamming) или уводящих (Spoofing) радиопомех [30, 32].

Таким образом, основным направлением развития угломерных систем, в том числе ГНСС-компасов, по мнению авторов, является решение следующих наиболее значимых задач:

- поиск и исключение из последующей обработки фазовых измерений с аномальными погрешностями (вследствие многолучевости [25–26, 33, 34, 35], по причине потери циклов в ПА ГНСС [30] либо воздействия преднамеренных помех);
- сохранение возможности выработки параметров ориентации ГНСС-компасом в случае резкого снижения количества наблюдаемых НС (менее 4-5) [26, 33] (ввиду преднамеренных помех, выхода из строя спутников ГНСС, нахождения в сложнопереесеченной местности, волнения на море, что может быть характерно для низкопрофильных беспилотных морских объектов, морских буев);
- повышение частоты выработки выходной информации ГНСС-компаса (до десятков и сотен герц) [16–21, 36].

С целью решения сформулированных выше задач в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разрабатывается новая интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации с двухантенным фазовым интерферометром и инерциальным измерительным блоком, установленными на одноосную поворотную платформу, – ГНСС-гироскомпас. ГНСС-гироскомпас представляет собой вариант развития ГНСС-компасов, предназначенный для применения на малоразмерных подвижных объектах в условиях ограниченной видимости или полного отсутствия спутниковых сигналов. В настоящей статье описываются особенности разрабатываемого ГНСС-гироскомпаса, которые позволяют преодолеть некоторые недостатки имеющихся многоантенных спутниковых систем в условиях плохого приема или полного отсутствия сигналов ГНСС, и возможная ниша его применения.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 рассматриваются современные подходы к решению проблемы фазовой неоднозначности при построении спутниковых многоантенных систем. В разделе 3 приводится анализ факторов, влияющих на точность определения параметров ориентации. В разделе 4 обсуждаются основные подходы к интеграции многоантенных спутниковых систем с показаниями инерциального модуля, позволяющие повысить надежность в условиях плохого приема или полного отсутствия сигналов ГНСС. В разделе 5 дан обзор имеющихся на рынке ГНСС-компасов. В разделе 6 описываются разрабатываемый ГНСС-гироскомпас, его особенности и возможная ниша применения; здесь же представлены результаты испытаний макета в условиях плохого приема и многолучевости распространения спутникового сигнала, а также при его полном отсутствии. В заключении приведены общие выводы по работе.

2. Современные подходы к решению проблемы неоднозначности фазовых измерений

Ключом к высокоточному определению пространственного положения объекта по данным ГНСС является разрешение неоднозначности фазовых измерений. Приемник сигналов ГНСС может измерять только дробную часть фазы несущей. Целое число длин волн между АУ и НС нельзя измерить напрямую. Для исключения неоднозначности фазовых измерений при решении задачи ориентации в ГНСС-компасах можно использовать две группы методов: основанные на изменении положения антенной базы по отношению к направлению на НС и на поиске наиболее вероятного решения [10, 37, 38].

Методы, основанные на изменении положения антенной базы по отношению к направлению на НС, требуют либо получения измерений за длительный период

времени (от 30 мин), в течение которого произошли значительные изменения положения видимой группировки НС, либо вращения объекта, на котором установлены АУ. Точность решения задачи во втором случае зависит от скорости вращения объекта и времени накопления измерений. Недостатком такого подхода является необходимость специального маневрирования объекта, что не всегда доступно. Тем не менее известны технические решения, которые позволяют быстро устранить фазовые неоднозначности в рамках задачи стохастической фильтрации (так называемое плавающее решение, не использующее целочисленный характер неоднозначности) с помощью вращающейся антенной базы с двумя АУ [33, 34, 39, 40].

Для алгоритмов, основанных на поиске, для получения наиболее вероятного решения крайне нежелательны длительные перерывы в наблюдении НС, смена состава наблюдаемого рабочего созвездия НС. Их эффективность снижается из-за шумов измерений, многолучевости распространения спутникового сигнала. Этому вопросу посвящено множество исследований [25, 30, 38, 41–45], в которых предлагается исключать неоднозначность в два этапа:

- в рамках задачи стохастической фильтрации неоднозначность оценивается без учета ее целочисленного характера (так называемое плавающее решение);
- с использованием оценок ковариационного канала предыдущего этапа выполняется поиск наиболее вероятного целочисленного значения неоднозначности фазовых измерений (так называемое фиксированное решение).

В научных публикациях описываются различные подходы к разрешению целочисленной неоднозначности [10], такие как поиск неоднозначности методом наименьших квадратов (LSAST) [46], быстрое разрешение неоднозначности (FARA) [47], модифицированное разложение Холецкого [48], декорреляция неоднозначности (LAMBDA) [49], быстрый фильтр поиска неоднозначности (FASF) [50], каскадное целочисленное разрешение (CIR) [51] и другие.

Наиболее распространенным методом разрешения целочисленной неоднозначности фазовых измерений является LAMBDA. Основная его особенность заключается в том, что измерения с помощью целочисленного преобразования приводятся к виду, в котором ковариационная матрица погрешностей оценок вектора неоднозначности близка к диагональной [49], однако он не учитывает ограничения, накладываемые длиной антенной базы. Лучшие результаты удается получить, если воспользоваться ограничениями, накладываемыми длиной антенной базы, что позволяет одновременно оценивать целочисленную неоднозначность и параметры ориентации, а также ускоряет разрешение фазовой неоднозначности [52]. Вместе с тем модель с ограничениями значительно увеличивает вычислительные затраты ввиду своей нелинейности [9]. В условиях наблюдения максимально возможного числа НС алгоритмы поиска [41–44, 53–55] позволяют точно устранить неоднозначность фазовых измерений.

В дополнение к этому следует также упомянуть метод, основанный на использовании разности двух соседних во времени первых разностей фаз принимаемого на разнесенные АУ сигнала наблюдаемого НС [7, 52]. В этом случае неоднозначность не оценивается в силу ее полного исключения уже при формировании фазовых измерений – по аналогии с тем, как это происходит при формировании третьих разностей [6–7, 37].

Многочастотные приемники, в свою очередь, способны обрабатывать сигналы НС на нескольких диапазонах частот, например L1/L2, что приводит к улучшению разрешения неоднозначности фазовых измерений благодаря получаемой избыточности

измерений и устранению дисперсионных ионосферных задержек [10]. В настоящее время проблему исключения неоднозначности фазовых измерений ГНСС-компасов можно считать практически решенной. Проводятся исследования [45], чтобы сократить длительность получения фиксированного решения при двухэтапной обработке фазовых измерений. При этом основные усилия разработчиков сосредоточены на поисках устойчивого решения в условиях плохой видимости НС или воздействия помех.

3. Анализ факторов, влияющих на точность ГНСС-компасов

Влияние численного состава группировки ГНСС

На точность ГНСС-компасов существенное влияние оказывает количественный состав наблюдаемого созвездия ГНСС, что во многом сопряжено с доступностью информации от спутников [56]. Чтобы увеличить надежность определения параметров ориентации ГНСС-компасом, требуется интеграция приемников, способных принимать данные от различных ГНСС, таких как GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (ЕС) и BeiDou (КНР).

Как указано в [56], по состоянию на 2023 г. существующие группировки спутниковых систем содержат следующее количество действующих (не находящихся в резерве) НС: ГЛОНАСС – 24; GPS – 31; Galileo – 23; BeiDou – 44.

Судя по ранее приводимым данным из открытых источников, группировка ГЛОНАСС развивается менее интенсивно, чем зарубежные ГНСС, число спутников старше 7 лет составляет более половины от их общего количества. Схожую характеристику можно дать ГНСС GPS.

Количество одновременно наблюдаемых НС (при высотах более 5°), от чего в конечном итоге зависят геометрический фактор созвездия НС и точность координатно-временного обеспечения потребителя по данным ГНСС-компаса, приведено на примере систем ГЛОНАСС и BeiDou на рис. 2 и рис. 3 соответственно по состоянию на 2023 г.

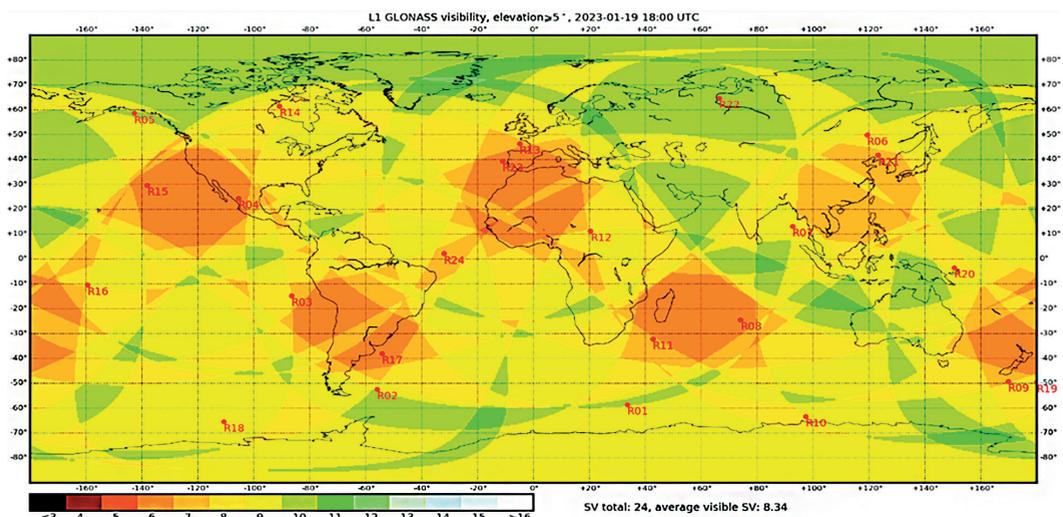


Рис. 2. Изменение количества одновременно наблюдаемых НС ГЛОНАСС в благоприятных условиях приема сигналов НС в масштабах Земли (по осям ординат и абсцисс отложены соответственно географические широта и долгота места) [56]

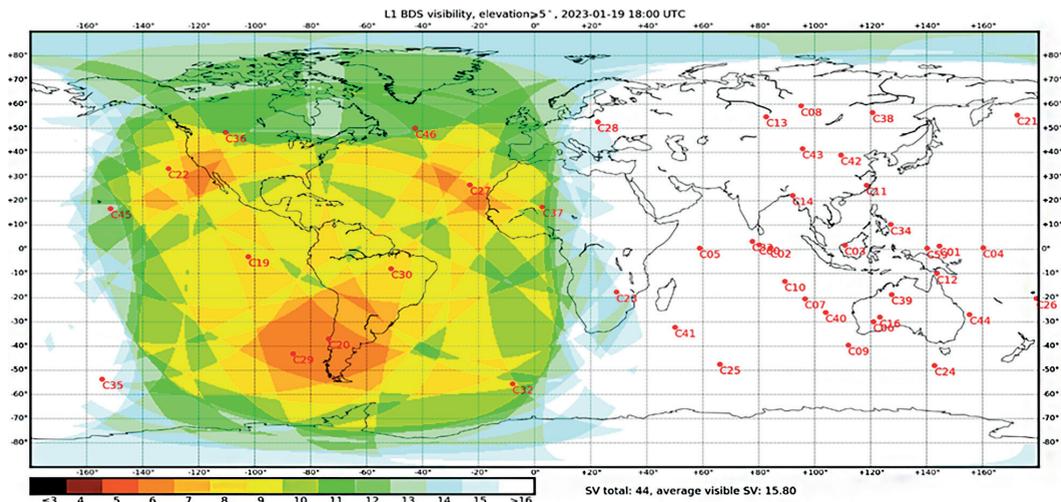


Рис. 3. Изменение количества одновременно наблюдаемых НС BeiDou в благоприятных условиях приема сигналов НС в масштабах Земли (по осям ординат и абсцисс отложены соответственно географические широта и долгота места) [56]

Многочастотные и мультиГНСС-технологии постепенно совершенствуются, а их аппаратная и программная реализация на рынке становится более доступной и экономичной [53, 57, 58], однако на сегодняшний день нельзя говорить о повсеместной возможности использования всех доступных избыточных данных для наблюдений.

Рядом особенностей отличается эксплуатация ГНСС-компасов в районах крайнего Севера. Здесь резко снижается количество одновременно наблюдаемых НС, кроме того, ледовая обстановка (наличие ледового покрова, торосов, айсбергов) увеличивает вероятность многолучевого распространения спутникового сигнала. Освоение северных районов мирового океана, картографирование, активное применение роботизированной техники, беспилотных летательных аппаратов, морских катеров и других малоразмерных объектов – все это требует решения задачи ориентации подвижных объектов с учетом особенностей высоких широт. Традиционно для этих целей используются как гирокомпасы, так и бескарданные инерциальные измерительные модули (ИМ) и бескарданные инерциальные навигационные системы (БИНС) навигационного класса точности, которые полностью автономны, но, к сожалению, отличаются существенной погрешностью по курсу в высоких широтах и значительной стоимостью.

Влияние взаимного положения антенной базы и направления на НС

К числу факторов, существенно ограничивающих количество НС, по сигналам которых возможно определение истинного курса объекта, относится также влияние взаимного положения направления на НС и вектора антенной базы ГНСС-компаса [33]. Это сводится к некому аналогу геометрического фактора, от которого во многом зависит погрешность курсоуказания ГНСС-компаса, как это имеет место при решении навигационной задачи с помощью ГНСС [8, 30]. В [59] показано, что, несмотря на значительное количество НС в зоне видимости, далеко не все они позволяют эф-

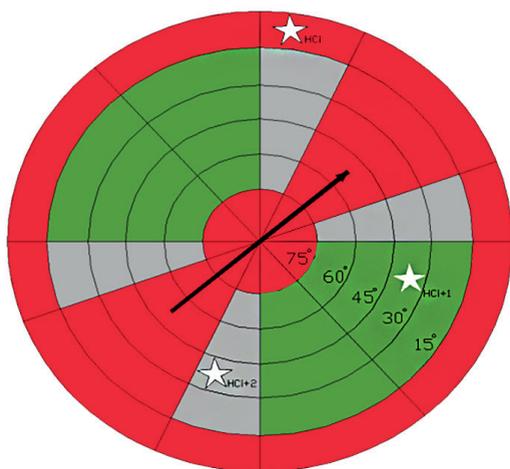


Рис. 4. Диаграмма эффективности наблюдаемых НС для определения угла курса. Зеленым цветом обозначены области эффективных для определения угла курса НС, серым – малоэффективных, красным – неэффективных. Стрелкой обозначен вектор антенной базы

эффективно определить курс. Наилучшим образом для этого подходят только НС с высотами от 15° до 75° и азимутами, лежащими в секторах, границы которых отстоят от нормали к вектору базы на угол 45° в обе стороны.

Стоит отметить малое время пребывания НС в области, удовлетворяющей описанным выше условиям, из-за его движения относительно антенного модуля ГНСС-компыа. Таким образом, количество используемых НС ограничено даже в благоприятных условиях приема, поскольку существуют зоны, где они неэффективны, не говоря уже о сложных условиях, например при волнении моря на малых беспилотных катерах, когда прием сигналов ГНСС в принципе затруднен. Более наглядно это продемонстрировано диаграммой на рис. 4 [33].

Влияние многолучевости распространения сигнала НС

Погрешности ГНСС-компыа, кроме того, обусловлены многолучевостью, вызванной тем, что распространение сигналов НС порождает радиоволны, которые отражаются и переотражаются от окружающих AU_i объектов, включая городскую застройку, подстилающую поверхность (земля, вода, лед), элементы конструкции самого объекта. Влияние многолучевости на точность определения ГНСС-компыа параметров ориентации необходимо парировать. Дело в том, что ложный (не из-за относительного движения объекта и НС) набег фазы [7, 25, 30] из-за этого может достигать четверти длины волны несущей [7, 25], что для сигналов НС на частотах диапазона L1 означает величину порядка $0,05$ м [22]. К таким искажениям фазы несущей приводят, как правило, расположенные рядом с AU_i (в пределах нескольких метров) элементы конструкции объекта [7, 25]. С учетом (1) и длины антенной базы $L_{i,i+1} = 1$ м можно оценить погрешность определения угла курса при максимальных искажениях фазы несущей по причине многолучевости: $\Delta K \approx \Delta\phi_{i,i+1}/L_{i,i+1} = 0,05$ [радиан], или 3° .

Сигналы, переотраженные, как правило, от подстилающей поверхности, можно подавить за счет применения конструктивных элементов AU_i со специальным орбренением и экранов, направленных на подавление сигналов с поляризацией, отличной от исходной поляризации принимаемого сигнала НС [5, 25, 27, 30]. С этой целью можно также нанести на поверхность AU_i специальный токопроводящий рисунок, например по технологии PinWheel [19, 23]. При этом не предусматривается изменение диаграммы направленности AU_i . Снизить влияние многолучевого распространения спутникового сигнала позволяет и использование фазированных многоэлементных АУ (так называемых фазированных антенных решеток). В этом случае диаграмма

направленности формируется за счет либо управления расположенными на одном основании отдельными АУ, тогда помехи подавляются на уровне 30–40 дБ [5, 30, 60], либо цифрового управления отдельными приемными элементами, т.е. приемным элементом фазированной АУ. Это дает возможность подавить помехи до уровня 40 дБ [5, 30]. К настоящему времени технологии изготовления АУ достаточно отработаны. Примеры АУ, способных подавлять помехи, приведены на рис. 5, 6.

Исключить из обработки фазовые измерения НС, чьи сигналы подвержены моголучевости распространения, можно при использовании специальных автономных алгоритмов (без привлечения данных ИМ или иной внешней по отношению к ГНСС-компасу информации) [6–7, 26, 30].

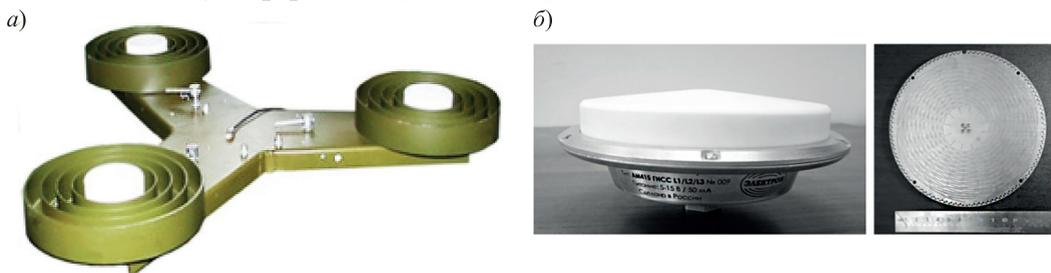


Рис. 5. Три АУ, каждая из которых снабжена кольцевым пространственным фильтром для подавления переотраженного сигнала: а) по данным [23]; б) по данным [61]

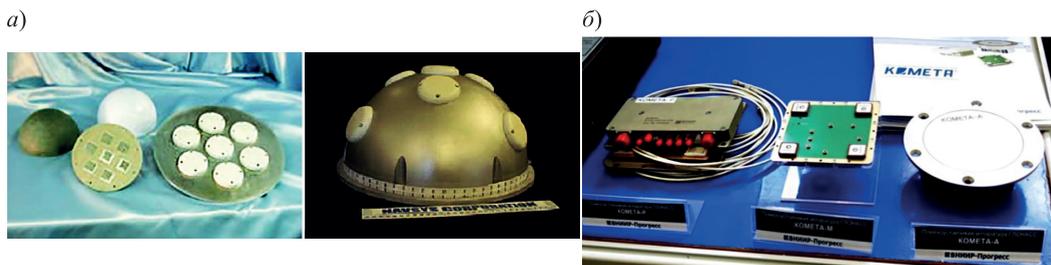


Рис. 6. Фазированные антенные решетки на основе готовых АУ: а) по данным [5]; б) по данным [60]

К погрешностям определения ориентации приводит также нестабильность фазового центра приемного АУ. Согласно [62], АУ геодезического класса точности, наиболее пригодные для применения в ГНСС-компазах, имеют случайную нестабильность фазового центра (точки, относительно которой и исчисляется расстояние $L_{i,i+1}$ между АУ_i) на уровне не менее 0,002 м, что также отмечается в [7]. В этом случае погрешность определения курса составит (при длине антенной базы 1 м) $\Delta K \approx \Delta\phi_{i,i+1}/L_{i,i+1} = 0,002$ [радиан], или порядка 0,1°, что фактически во многом обуславливает достижимую точность нахождения угла курса существующими ГНСС-компасами.

4. Основные подходы к построению многоантенных интегрированных инерциально-спутниковых систем

В настоящее время одним из основных направлений исследований при создании систем позиционирования и определения ориентации подвижных объектов является интеграция измерений ГНСС с данными ИМ, содержащих акселерометры и гироскопы. При совместной обработке данных в рамках задачи стохастической фильтра-

ции ИМ позволяет значительно повысить надежность и точность выработки параметров ориентации ГНСС-компасом за счет сглаживания шумов фазовых измерений [12, 15, 20, 26, 34, 40]. В случае построения ГНСС-компаса как сильносвязанной интегрированной системы измерения ИМ используются для разрешения целочисленной неоднозначности, выявления подверженных многолучевому распространению измерений, обнаружения проскальзывания цикла. Гироскопы при этом вырабатывают высокочастотные показания угловой скорости, которые можно использовать для кратковременной непрерывной выработки параметров ориентации, если слежение за сигналами НС ГНСС прервано [9, 12–14, 16, 63–66].

Вместе с тем применение в таких ГНСС-компасах более дешевых MEMS-датчиков сравнительно невысокой точности не позволяет существенно увеличить время их работы при длительном пропадании сигналов НС. Данные об угле курса с погрешностью не более 1° хранятся, как правило, 2–5 мин. Например, время хранения курса с указанной точностью в ГНСС-компасе Vector V123&V133 не превышает 3 мин, в СРТ7 [19] этот показатель несколько выше – порядка 6 мин [20]. При этом время хранения курса у дорогостоящих двухантенных MEMS-систем типа APOGEE-D [16] практически не ограничено в силу высокой точности MEMS-датчиков, дрейф которых составляет порядка $0,05^\circ/\text{ч}$. Следует также отметить, что ИМ на базе недорогих MEMS не может использоваться для начальной выставки ГНСС-компаса по углу курса, поэтому для запуска изделия необходимо получить спутниковое решение. Это, в свою очередь, требует наличия минимум двух АУ и по меньшей мере четырех наблюдаемых НС в случае применения одной ГНСС.

Фильтр Калмана (ФК) является широко распространенным способом комплексирования данных при построении интегрированных систем ориентации и навигации (ИСОИ) [26, 30, 32, 38]. Из-за нелинейности модели интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы в практических приложениях точность оценки параметров может снижаться. В связи с этим широко применяются нелинейные методы фильтрации, такие как обобщенный (ЕКФ) [33, 67], сигма-точечный (УФК) [68], кубатурный (СКФ) [69], полиномиальный фильтры Калмана [70].

В зависимости от того, как используются данные НС, ИСОИ можно разделить на два вида: слабосвязанные и сильносвязанные. В сильносвязанной схеме используются фазовые и псевдодальномерные измерения ПА ГНСС. Это означает, что в отличие от слабосвязанной схемы по измерениям НС непосредственно не вырабатываются данные о местоположении и ориентации объекта. Измерения поступают в комплексную обработку для коррекции параметров, вычисляемых инерциальной навигационной системой на базе ИМ. Такая схема построения позволяет использовать все данные НС даже в том случае, когда общее количество одновременно наблюдаемых спутников меньше, чем требуется для определения местоположения и ориентации, вплоть до одного [65].

Что касается ПА многоантенных спутниковых систем, то необходимо отметить следующее. Такая аппаратура может использовать как один общий приемник сигналов ГНСС, так и независимые приемники. Первый вариант предполагает построение единой шкалы времени угломерной системы на основе одного опорного генератора и дает возможность одновременно принимать сигналы от нескольких АУ. Второй предназначен изначально для решения только навигационной задачи и потому, как правило, предполагает подключение только одного АУ [12, 26, 30].

Использование двойных разностей фаз (разностей первых разностей фаз от двух НС) наиболее распространено в настоящее время, так как на этапе их формирования серийно выпускаемая аппаратура ГНСС, предназначенная для решения навигационной задачи (каждый такой приемник содержит свой тактирующий опорный генератор и один вход для подключения АУ [15]), позволяет исключить погрешности часов независимых приемников ГНСС. Кроме того, для случая двойных разностей наиболее развиты методы исключения фазовой неоднозначности. Тем не менее использование двойных разностей требует большего числа наблюдаемых НС. Снижение необходимого количества наблюдаемых НС до минимально возможного достигается применением общего для приемников ГНСС опорного генератора [71]. Это позволяет непосредственно обрабатывать первые разности фаз, получаемые по данным только одного НС, для формирования в дальнейшем разностных фазовых измерений (разности измеренных и расчетных значений первых разностей фаз), которые уже не содержат погрешности расхождения шкал системного времени и времени потребителя [26, 30, 72].

Следует также отметить, что при работе с общим опорным генератором первые разности фаз предпочтительнее использовать в ГНСС-компасе по причине меньшего уровня шума, поскольку они формируются по данным только одного НС. Так, в [73] показано, что погрешность определения углов ориентации снижается в разы при использовании первых разностей с общим опорным генератором по сравнению со вторыми разностями фаз.

С помощью ИМ в ГНСС-компасе можно также существенно (как правило, с 1–50 Гц до 200 Гц и более) повысить частоту выработки выходных параметров ориентации системы [12–13, 16] за счет исключения из обработки фазовых измерений корреляторов ПА ГНСС [36]. В этом случае исходные [30] сигналы НС в месте приема AU_i сравниваются со сформированной заранее базой данных их возможных значений, которая получена для всех известных НС исходя из известной траектории их движения. База данных указанных сигналов формируется с учетом возможных координат места AU_i и значений углов ориентации, включая курс, в известных диапазонах их изменения с заранее заданным шагом сетки по углам ориентации, который определяет точность получаемого решения ГНСС-комписа.

Значительно увеличить время работы ГНСС-комписа с сохранением точности выработки параметров ориентации во время полного пропадания спутникового сигнала можно за счет применения более точного ИМ, содержащего гироскопы с уровнем дрейфа не хуже $0,1^\circ/\text{ч}$, что, в свою очередь, влечет за собой заметное увеличение стоимости изделия. Снизить требования к гироскопам позволяет использование модуляционного вращения антенной базы и ИМ. Это не приведет к существенному удорожанию системы, но придаст ей компасные свойства при использовании гироскопов с уровнем дрейфа $1\text{--}6^\circ/\text{ч}$.

5. Обзор имеющихся ГНСС-комписов

Рассмотрим некоторые ГНСС-комписы, производимые фирмами SBG (Франция), Novatel/Hexagon (Канада, Швеция), Hemisphere (США, Канада), Furuno (Япония), Javad (США) [74], см. табл. 1.

Характеристики нескольких ГНСС-компасов, произведенных за рубежом

	SBG (APOGEE-D)	Novatel (CPT7)	Hemisphere (Vector vs-i8)	Furuno (SCX-21)
				
Наличие ИМ (шумы гироскопов (1σ), стабильность их дрейфа (1σ))	Есть ($0,7^\circ/\text{ч}/\sqrt{\text{Гц}}$, $0,05^\circ/\text{ч}$)	Есть (-)	Есть (-)	Нет
Длина антенной базы L [м]	2	2	2	Несколько баз: $\sim 0,3$ и $\sim 0,1$
Погрешность определения курса ($P=0,997$) [$^\circ$]	0,06	0,24	0,09	3
Частоты выдачи данных, [Гц]	200	400	100	50
Время работы без сигналов ГНСС [с]	60	60	60	-

Как следует из таблицы, во всех системах с ИМ используются две антенны, при этом точность определения курса достигается за счет существенного увеличения длины антенной базы (до 2 м и более). Углы качки вычисляются по данным ИМ, что исключает необходимость задействовать большее число АУ. Время работы без доступа к сигналам НС ГНСС ограничено точностью ИМ (как правило, дрейфом и шумами гироскопов). Во всех системах применяются гироскопы типа MEMS, чем достигается уменьшение габаритов системы. Частота выдачи данных потребителю также увеличивается за счет использования ИМ. С помощью ИМ удается существенно сгладить шумовую составляющую погрешности определения истинного курса, что видно при сравнении ГНСС-компаса SCX-21 фирмы Furuno, у которого нет ИМ, с устройствами других производителей.

Тем не менее прибор SCX-21 характеризуется достаточно низкой погрешностью определения угла курса для такой короткой длины антенной базы, что обусловлено большим числом антенных баз при четырех АУ. Это позволяет получить лучшее (чем при использовании меньшего числа баз) значение геометрического фактора при интерферометрическом принципе определения ориентации по данным НС ГНСС. Следует отметить, что оптимальный геометрический фактор в течение времени функционирования ГНСС-компаса достигается при вращении одной или нескольких антенных баз [28].

Среди отечественных фирм – производителей ГНСС-компасов следует отметить АО «Навис» [12], ООО «Радиокомплекс» [15], АО «НПП «Радиосвязь» [11], см. табл. 2.

Характеристики отечественных ГНСС-компасов

	«Навис» (БРИЗ-КМ)	«Радиокомплекс» (РК-2306)	НПП «Радиосвязь» (МРК-101)
			
Наличие ИМ	Нет	Нет	Нет
Длина антенной базы L [м]	Произвольная	~0,7	~0,7
Погрешность определения курса (P=0,997) [°]	0,45/L	0,6	1,0
Частоты выдачи данных, [Гц]	10	10	10
Время работы без сигналов ГНСС [с]	–	–	–

Из табл. 2 следует, что во всех системах без ИМ используются три или четыре АУ для определения пространственной ориентации объекта, включая угол курса, при этом точность определения курса достигается за счет существенного увеличения длины антенной базы (до 1 м и более). Эксплуатация таких систем без доступа к сигналам НС ГНСС фактически невозможна. Диапазон изменения частоты выдачи данных потребителю ограничен частотой получения ПА ГНСС готового решения по параметрам ориентации (1–10 Гц).

6. ГНСС-гироскомпас как интегрированная система с режимом автономной работы

На основании приведенных ранее материалов (разделы 2–5) можно сформулировать ряд важных задач, которые касаются создания высокоточных помехоустойчивых ГНСС-компасов, в том числе предназначенных для применения в средах с ограниченным числом видимых НС (при этом предполагается, что используемые АУ не являются фазированными и не оснащены системой цифрового управления):

- обеспечение функционирования устройств при одновременном наблюдении минимального числа НС;
- повышение точности определения параметров ориентации;
- повышение частоты выдачи информации потребителю, в том числе для решения задачи косвенной стабилизации различных технических средств;
- снижение массогабаритных характеристик.

Для решения указанных задач в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» ведется работы по созданию ИСОН с двухантенным фазовым интерферометром.

Чтобы преодолеть трудности, связанные с использованием в интегрированных системах типа ГНСС-гироскомпаса сравнительно грубых инерциальных чувствительных элементов (волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) низкой точности,

микромеханических гироскопов), в разрабатываемой системе применено одновременное принудительное вращение ИМ и антенного модуля ПА ГНСС-гироскопа. Такой подход приводит к некоторому увеличению массогабаритных характеристик ИСОН и незначительному снижению ее надежности при использовании коллекторных электрических машин и/или токоподводов неограниченного вращения. При этом существенно, в несколько раз, повышается точность системы и увеличивается время ее работы без доступа к сигналам ГНСС [72].

Результаты исследований показывают [72], что одновременное принудительное вращение ИМ на малогабаритных ВОГ и двухантенного модуля ПА ГНСС с расстоянием между АУ₁ (антенной базой) на уровне длины волны несущей и общим опорным генератором, задающим единую шкалу времени ПА ГНСС и ИМ, позволяет существенно снизить погрешности ГНСС-гироскопа, даже если доступны сигналы лишь минимально допустимого числа НС, вплоть до одного [34, 37, 40]. Кроме того, с использованием ИМ в составе ГНСС-гироскопа можно с опорой на его данные сглаживать шумы фазовых измерений ПА ГНСС, обусловленные, например, влиянием элементов конструкции объекта [6–7, 26]. Кроме того, эффективно отбраковываются фазовые измерения с искажениями, вызванными многолучевостью при распространении сигналов НС и повышенным уровнем шумов [19, 20, 33, 35].

Повышение точности достигается также в значительной степени за счет улучшения геометрического фактора при решении задачи ориентации с помощью фазовых измерений НС [33] и применения специальных алгоритмов многоальтернативной фильтрации (при различных информационных нарушениях в фазовых измерениях) [67].

Ниже кратко описывается макет такой ИСОН и приводятся некоторые результаты его испытаний.

Конструктивные особенности макета системы

ГНСС-гироскоп предназначен для малоразмерных объектов, функционирующих в условиях ограниченной видимости НС, так как позволяет определять курс при наблюдении за сигналами всего лишь одного НС. В отличие от известных ГНСС-компасов, ГНСС-гироскоп работает в двух режимах: наблюдательном (при наличии измерений от одного и более НС ГНСС) и автономном (без данных НС ГНСС, но с привлечением показаний измерителя путевой скорости). Прибор способен функционировать в автономном режиме длительное время с сохранением уровня точности выработки параметров ориентации [33].

Преимущества ГНСС-гироскопа достигаются за счет применения в его составе одноосной поворотной платформы, на которой установлены ИМ и две спутниковые приемные антенны с индивидуальной ПА ГНСС. Существенно, что ПА обеих антенн использует общий внешний опорный генератор (ОГ), за счет чего снижаются погрешности фазовых измерений при формировании первых разностей фаз [71]. Вращение ИМ и применение даже сравнительно грубых малогабаритных ВОГ позволяют также сохранить точность выработки курса и углов качки при длительном отсутствии сигналов НС. На рис. 7 представлен центральный прибор разрабатываемой системы.

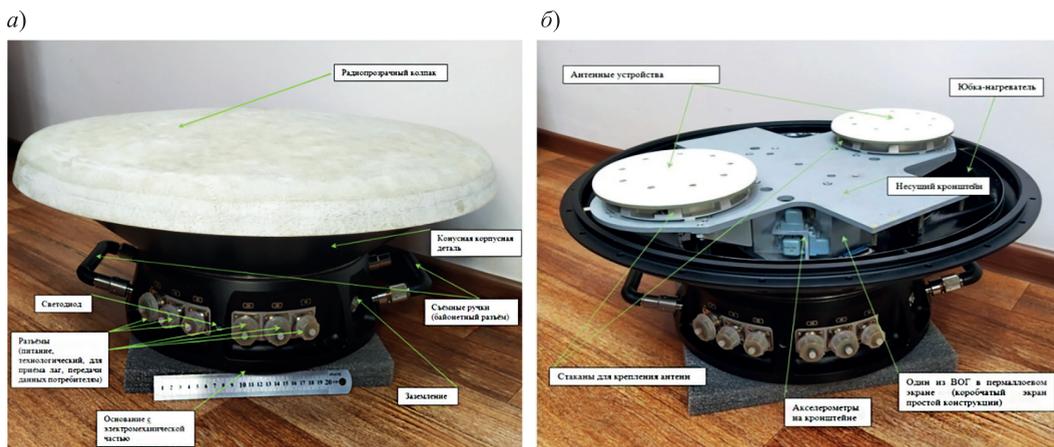


Рис. 7. Внешний вид центрального прибора ГНСС/ИМ-компаса с надетым (а) и снятым (б) радиопрозрачным колпаком (по данным [35])

Условия испытаний макета системы

Как уже отмечалось ранее, точность существующих ИСОИ на MEMS-гироскопах после пропадания сигналов НС сохраняется не дольше единиц минут, что недостаточно, когда прием сигналов ГНСС затруднен. Такая ситуация возникает, например, в условиях города или холмистой местности при движении по земле, во время прохода узкостей и в порту при движении по воде, а также при наличии искусственных радиопомех.

При приеме сигналов от НС GPS (кодированное разделение сигналов НС) или ГЛОНАСС (частотное разделение сигналов НС) ГНСС-гироскопас работает в обзорном режиме и выдает потребителям все кинематические параметры движения объекта. При этом осуществляется калибровка гироскопов и акселерометров ИМ, включая и их так называемые «румбовые» дрейфы, обусловленные влиянием магнитных полей Земли и объекта [33].

При решении навигационной задачи в обзорном режиме в интегрированной системе формируются разностные измерения либо по линейным скоростям и географическим координатам, либо по псевдодальностям и радиальным скоростям для каждого i -го наблюдаемого НС, а при решении задачи ориентации – разностные измерения по первым разностям фаз для i -го НС [71]. В отсутствие сигналов от НС система переходит в автономный режим с «жестким» демпфированием по скорости от относительного лага (в море) или одометра (для наземной техники), что приводит к стационарному характеру погрешностей по курсу и углам качки и выработке, по существу, числимых координат. Для обработки разностных измерений по навигационным параметрам и первым разностям фаз в ГНСС-гироскопасе используется обобщенный ФК.

Чтобы испытать систему и проанализировать ее погрешности, был разработан макетный образец (рис. 8). В его состав вошли построенный



Рис. 8. Размещение аппаратуры на общем основании в кузове автомобиля: 1 – ГНСС-компас «Орион-М», 2 – ИМ, 3 – эталонная БИНС на ВОГ (по данным [33])

ранее ГНСС-компас «Орион-М» [71], содержащий двухантенный спутниковый модуль с базой 0,18 м и приемники ГНСС 2К-363Е-62 фирмы РИРВ с внешним общим ОГ. Кроме того, конструкция была оснащена ИМ на ВОГ VG 910 производства АО «Физоптика», измерительный блок которого совершал реверсивное модуляционное вращение с угловой скоростью порядка $2^\circ/\text{с}$, а спутниковый измерительный модуль «Орион-М» – модуляционное вращение со скоростью $8^\circ/\text{с}$.

Частота съема данных гироскопов, акселерометров и датчиков угла поворота измерительных модулей ГНСС-гироскопа составляла 100 Гц, а ПА ГНСС – 5 Гц. Эталонные значения параметров ориентации были получены с использованием данных эталонной БИНС на ВОГ навигационного класса точности.

Испытания макета проводились на автомобиле в условиях городской застройки (Санкт-Петербург), чтобы проверить его работоспособность в сложной для приема сигналов НС среде. Данные относительного измерителя скорости имитировались с помощью информации о путевой скорости от ПА ГНСС. При моделировании автономного режима работы в морских условиях составляющие морских течений были описаны марковскими процессами первого порядка с интервалом корреляции 2 ч и среднеквадратичным отклонением (СКО) 0,3 м/с, СКО инструментальных погрешностей лага составляло 0,1 м/с на частоте 1 Гц.

Результаты автомобильных испытаний

В разделе приводятся результаты испытаний макета системы с антенной базой 0,18 м в реальных условиях движения по городу.

Погрешность определения курса была получена в результате камеральной обработки в пакете MALAB (Simulink) данных испытаний макетного образца системы для одного из участков маршрута при использовании НС как GPS, так и ГЛОНАСС [33]. Начальная погрешность по курсу при каждом запуске системы составляла около 100° . Предварительно перед обработкой фазовых измерений НС и GPS, и ГЛОНАСС осуществлялось ранжирование НС в каналах спутниковых приемников. Обработывались сигналы до пяти НС GPS или ГЛОНАСС с минимальными значениями высот в диапазоне от 15° до 75° .

На рис. 9, а, б приведены погрешности определения курса на стоянке и во время движения с помощью фазовых измерений от 5 НС.

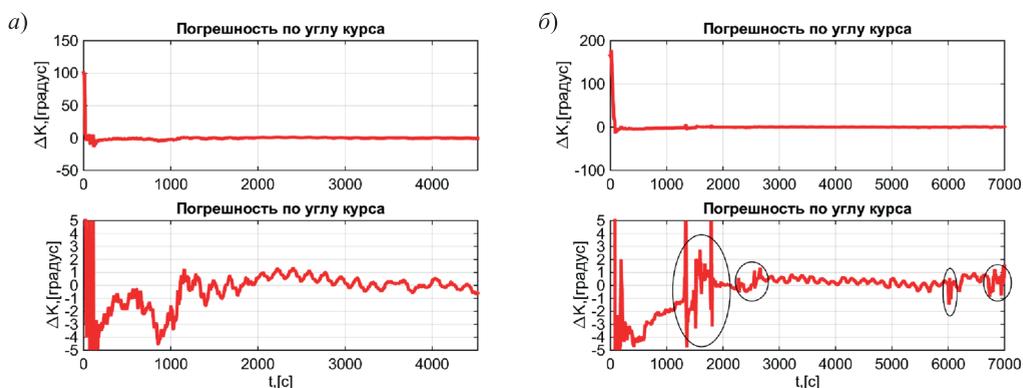


Рис. 9. Погрешность определения курса при использовании данных 5 НС:
а) на стоянке автомобиля, б) во время движения автомобиля

Как видно из рис. 9, предельная погрешность по курсу после завершения переходных процессов в системе (к моменту времени 1000-1500 с), включая прогрев, на стоянке (рис. 9, а) и в движении (рис. 9, б) достигает соответственно $1,2^\circ$ и 1° . При этом вклад погрешности синхронизации измерений эталонной БИНС и макета ГНСС-гироскопа не учитывался. Погрешность синхронизации составляла около 0,1-0,2 с и вносила ощутимый вклад в погрешность определения курса в момент маневра (рис. 9, б, выделено овалом).

Предполагается, что разница в погрешностях по курсу на стоянке и в движении обусловлена главным образом многолучевостью распространения. Во время испытаний имели место сбои в приеме данных от НС, особенно в городской черте.

Отработка алгоритмов, позволяющих снизить влияние многолучевости распространения сигналов НС на погрешности системы

Представлены результаты отработки на макете ГНСС-гироскопа с антенной базой порядка 0,18 м на статичном основании алгоритмов, которые позволяют уменьшить воздействие многолучевости распространения сигналов НС на погрешности системы.

Благодаря наличию в составе описываемой системы ИМ на ВОГ отбраковка недостоверных фазовых измерений происходит с опорой на данные ИМ. В ходе стендовых испытаний макета, чтобы искусственно воспроизвести условия появления многолучевости при распространении сигналов НС, использовались соответствующие отражатели, установленные на некотором расстоянии от антенного модуля.

В [33] предложен пороговый критерий для исключения из обработки недостоверных фазовых измерений от любого i -го НС благодаря имеющемуся в макете ГНСС-гироскопа автономному режиму работы.

Результаты оценки эффективности такого решения при задействовании группировки из трех НС приведены на рис. 10, 11.

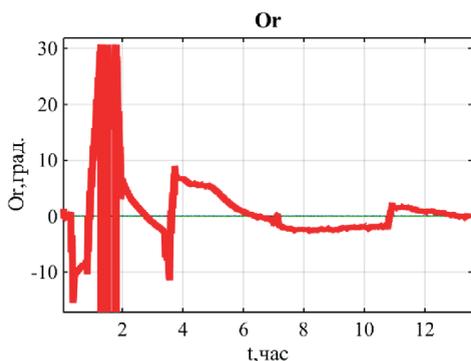


Рис. 10. Погрешности ($^\circ$) ориентации по курсу (красн.) и углам качки (син., зел., практически совпадают) без отбраковки недостоверных фазовых измерений

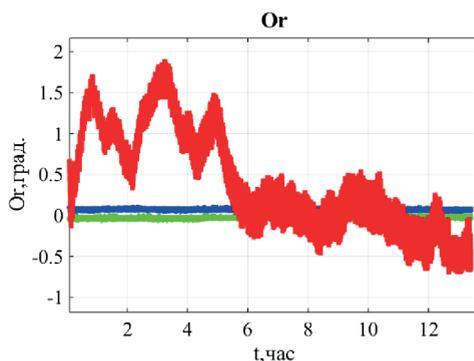


Рис. 11. Погрешности ($^\circ$) ориентации по курсу (красн.) и углам качки (син., зел.) при отбраковке недостоверных фазовых измерений

Из полученных результатов следует, что воздействие многолучевости приводит к существенным искажениям фазовых измерений и, как следствие, к значительным

погрешностям по курсу. Применение предложенного порогового критерия при опоре на данные ИМ позволяет существенно снизить влияние многолучевости на точность системы. При этом для решения задачи ориентации возможно использование ограниченного числа НС как GPS, так и ГЛОНАСС.

Автономный режим работы

Представлены результаты испытаний макета ГНСС-гироскопаса в автономном режиме.

Начальная выставка системы осуществлялась в автономном режиме как с привлечением фазовых измерений спутникового модуля, так и без них. В модели дрейфов гироскопов ИМ учитывались румбовые составляющие. При воспроизведении морских условий в показаниях относительного лага имитировалось наличие восточной и северной составляющих V_{TE} , V_{TN} морских течений.

Результаты испытаний макета в автономном режиме с использованием данных лага и фазовых измерений спутникового модуля (только в течение первых 5-6 мин) при начальной выставке приведены на рис. 12, 13. При этом в исходные данные ИМ дополнительно был введен систематический дрейф $\Delta\omega_E^r = 0,1$ °/ч.

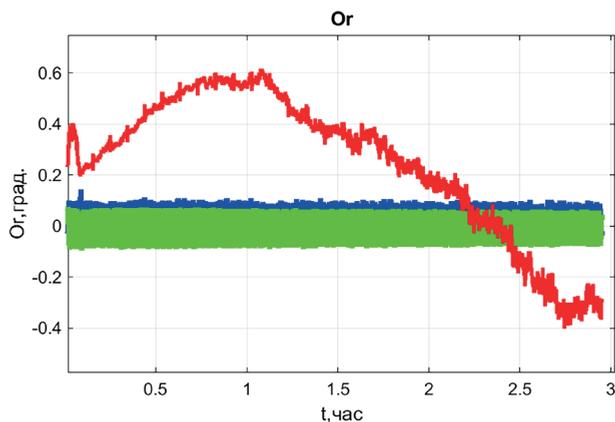


Рис. 12. Погрешности (°) ориентации по курсу (кр.) и углам кочки (син., зел.)

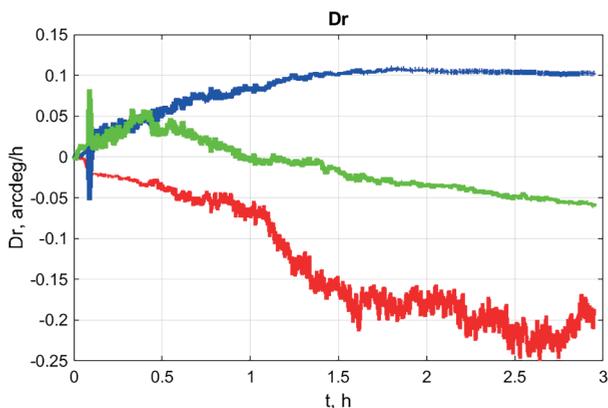


Рис. 13. Оценки (°/ч) дрейфов $\Delta\hat{\omega}_{zb}^\Sigma = \Delta\bar{\omega}_{zb} + \Delta\omega_H^r$ (кр.), $\Delta\hat{\omega}_E^r$ (син.) и $\Delta\hat{\omega}_N^r$ (зел.) (здесь $\Delta\bar{\omega}_{zb}$ – собственный корпусной дрейф азимутального гироскопа)

Погрешности по курсу в автономном режиме на широте 60° после оценки румбовых дрейфов в условиях неподвижного основания не превышают $0,4^\circ$ - $0,5^\circ$ (рис. 12).

Использование при начальной выставке ИМ фазовых измерений спутникового модуля в течение 5-6 мин обеспечивает наблюдаемость (рис. 13) и оценку в автономном режиме восточной составляющей $\Delta\omega_r$ румбовых дрейфов гироскопов ИМ, обусловленных влиянием магнитного поля Земли. Время оценивания $\Delta\omega_r$ составило около 2 ч (рис. 13). Для оценки остальных дрейфов ИМ требуется не менее 3-5 ч.

Сравнение рис. 9 и 13 показывает, что уровень погрешностей в автономном режиме достигнут на неподвижном основании при оценивании румбовых составляющих дрейфов ВОГ, что было бы невозможно без начальной выставки по данным ГНСС-компаса и для широты 60° . При постоянном использовании данных ГНСС широтная зависимость погрешности курсоуказания как таковая не существует, а ее уровень в значительной мере определяется влиянием условий прохождения сигналов НС по линии НС-АУ ГНСС-гироскопаса.

Заключение

К настоящему времени многие принципиальные вопросы, связанные с исследованием погрешностей и технической реализацией ГНСС-компасов и других многоантенных спутниковых систем успешно решены. Определенные новые результаты получены при использовании поворота антенных баз многоантенной системы относительно направления на НС за счет маневрирования объекта или принудительного вращения антенного модуля с помощью электромеханического привода. В [6, 53] приводятся результаты использования приращения первых разностей фаз во времени, что дополняет методы обработки, описанные ранее. Совершенствование ГНСС-компасов также идет по пути усиления интеграции измерений ИМ и ПА ГНСС при создании ИСОН, позволяющих максимально полно использовать преимущества как ИМ, так и ПА ГНСС. Основным вопросом, требующим решения, остается сохранение точности выработки параметров в условиях многолучевого распространения, плохого приема или полного отсутствия сигналов ГНСС.

Разработан перспективный малогабаритный ГНСС-гироскопас – сильносвязанная интегрированная система с двухантенным фазовым интерферометром, размещенным на вращающемся основании вместе с ИМ на ВОГ тактического класса точности. Система представляет собой вариант развития ГНСС-компасов для применения на малоразмерных подвижных объектах в условиях ограниченной видимости или полного отсутствия спутниковых сигналов. Представлены конструкция ГНСС-гироскопаса с длиной антенной базы $0,35$ м и ее прототип с укороченной до $0,18$ м базой.

Разработанная система функционирует в двух режимах – наблюдационном и автономном. Точность выработки курса в наблюдационном режиме при ограниченной видимости НС (до одного НС) как с частотным, так и с кодовым разделением сигналов находится на уровне 1° .

В автономном режиме (при полном отсутствии спутниковых сигналов) с использованием данных от измерителя линейной скорости движения объекта ГНСС-гироскопас обладает свойствами обычного гироскопаса и удовлетворяет требованиям к точности Морского регистра судоходства. Погрешности по курсу при наличии данных измерителя скорости носят стационарный характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Medina, D., Vilà-Valls, J., Hesselbarth, A., Ziebold, R., García, J., On the Recursive Joint Position and Attitude Determination in Multi-Antenna GNSS Platforms, *Remote Sensing*, 2020, 12(12):1955, <https://doi.org/10.3390/rs12121955>.
2. Пасынков В.В. Состояние и перспективы глобальных систем прецизионной навигации (дифференциальных подсистем с глобальной рабочей зоной) // XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2015. С. 417–421.
3. Bisnath, S. and Gao, Y., Precise Point Positioning: A powerful technique with a promising future, *GPS World*, 2009, vol. 20, no. 4, pp. 42–49.
4. Teunissen, P.J.G., Montenbruck, O. (Eds.), *Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Springer: Cham, Switzerland, 2017.
5. Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 260 с.
6. Микрин Е.А., Михайлов М.В., Рожков С.Н., Семенов А.С. Результаты летного эксперимента на МКС по исследованию влияния переотражений на решение задач навигации, ориентации и сближения по измерениям аппаратуры спутниковой навигации // *Гироскопия и навигация*. 2012. №1. С. 42–56.
7. Микрин Е.А., Михайлов М.В. Ориентация, выведение, сближение и спуск космических аппаратов по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем : учебное пособие. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 357 с.
8. Иванцевич Н.В., Дмитриев П.П., Шебшаевич В.С. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы, под ред. В.С. Шебшаевича / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
9. Teunissen, P.J.G., Integer Least-squares theory for the GNSS compass, *J. Geod.*, 2010, 84, 433–447.
10. Raskaliyev, A., Patel, S.H., Sobh, T.M., Ibrayev, A., GNSS-Based Attitude Determination Techniques – A Comprehensive Literature Survey, *IEEE Access*, 2020, 8, 24873–24886.
11. <https://krtz.su/node/256>.
12. www.navis.ru.
13. https://cirspb.ru/pdf/GPC-400_Spec.pdf.
14. <https://orkkniikp.ru/upload/iblock/a99/a99c272f3960381c2d2ff937b5249ab2.pdf>.
15. http://www.radiocomplex.ru/files/images/article/RK-2106_2306s.pdf.
16. www.sbg-systems.com.
17. www.imar-navigation.de.
18. www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/.
19. www.novatel.com.
20. www.hgnss.com.
21. www.furuno.com.
22. www.simrad-yachting.com.
23. Бердышев В.П., Стучилин А.И., Помазуев О.Н., Кордюков Р.Ю., Попов П.Г. Методика сравнительной оценки и выбора образцов навигационной аппаратуры потребителей спутниковой радионавигационной системы на основе метода попарных сравнений Саати // *Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России*. 2014. №1. С. 59–67.
24. Chen, W., Yu, C., Dong, D., Cai, M., Zhou, F., Wang, Z., Zhang, L., Zheng, Z., Formal Uncertainty and Dispersion of Single and Double Difference Models for GNSS-Based Attitude Determination, *Sensors*, 2017; 17(2):408, <https://doi.org/10.3390/s17020408>.
25. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография в 2 тт. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. Т. 1. 334 с.
26. Емельянцева Г.И., Степанов А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / под общей ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. СПб.: ГИЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», НИУ ИТМО, 2016. 394 с.
27. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография в 2 тт. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. Т. 2. 360 с.
28. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли / под общей ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». 2017. 390 с.

29. **Makar, A.**, Determination of USV's Direction Using Satellite and Fluxgate Compasses and GNSS-RTK, *Sensors*, 2022, 22, 7895, 17 p.
30. **Бакитко Р.В., Болденков Е.Н., Булавский Н.Т., Дворкин В.В., Ефименко В.С. и др.** ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
31. **Блажнов Б.А., Емельянец Г.И., Жилинский В.М., Коротков А.Н., Кошаев Д.А. и др.** Интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации, построенная по связно-связанной схеме // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009. С. 153–162.
32. **Groves, P.D.**, Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, *GNSS technology and application series*, 2nd ed., Artech House:Boston, 2013.
33. **Emel'yantsev, G., Stepanov, O., Stepanov, A., Blazhnov, V., Dranitsyna, E., Evstifeev, M., Eliseev, D., and Volynskiy, D.**, Integrated GNSS/IMU-Gyrocompass with Rotating IMU. Development and Test Results, *Remote Sens.*, 2020, 12(22), 3736.
34. **Cai Tijing, Zhao Zichao, Zhang Chunxia**, Algorithm of Rotating GNSS Dual Antenna/MIMU Tight Integrated System, *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2022, vol. 44, no.1, pp. 166–170.
35. **Степанов О.А., Кошаев Д.А.** Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 1999. №2(25). С. 30–55.
36. **Емельянец Г.И., Степанов А.П., Блажнов Б.А., Семенов И.В.** О построении миниатюрного GPS-компыа для малоразмерных объектов // Материалы XXI конф. памяти Н.Н. Острякова. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 118–126.
37. **Емельянец Г.И., Степанов О.А., Блажнов Б.А., Степанов А.П., Драницына Е.В.** О снижении влияния многолучёвости распространения спутникового сигнала на погрешности СНС-гироскомпыа при использовании фазовых измерений // Гироскопия и навигация. Том 30. №2(117). 2022. С. 43–57.
38. **Давыденко А.С.** Метод эталонных разностей фаз в определении пространственной ориентации высокодинамичных объектов. Диссертация ... кандидата технических наук. СПб.: ФГАОУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2017.
39. **Tijing Cai, Qimeng Xu, Emelyantsev, G.I., Stepanov, A.P., Daijin Zhou, Shuaipeng Gao, Yang Liu, Junxiang Huang**, A Multimode GNSS/MIMU Integrated Orientation and Navigation System, *26th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2019.
40. **Parkinson B.W., Spilker J.J., Axelrad P.** Global Positioning System: Theory and Applications, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996, vol. I, II.
41. **Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., Liu, J.**, Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations, *J. Geod.*, 2008, 82, 389–399.
42. **Teunissen, P.J.G.**, Integer least-squares theory for the GNSS compass, *J. Geod.*, 2010, 84, 433–447.
43. **Xiao, G., Li, P., Gao, Y., Heck, B.**, A Unified Model for Multi-Frequency PPP Ambiguity Resolution and Test Results with Galileo and BeiDou Triple-Frequency Observations, *Remote Sens.*, 2019, 11, 116.
44. **He, H., Li, J., Yang, Y., Xu, J., Guo, H., Wang, A.**, Performance assessment of single- and dual-frequency BeiDou/GPS single-epoch kinematic positioning, *GPS Solut.*, 2014, 18, 393–403.
45. **Кошаев Д.А.** Проблемы избытка и недостатка измерений ГНСС в специальных задачах вторичной обработки // Гироскопия и навигация. 2015. №2(89). С.67–91.
46. **Hatch, R.**, Instantaneous ambiguity resolution, Proc. Kinematic Syst. Geodesy, Surveying, Remote Sens., Symp., Banff, AB, Canada, 1991, no. 107, pp. 299–308.
47. **Frei, E. and Beutler, G.**, Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach FARA: Theory and first results, *Manuscripta Geodaetica*, 1990, vol. 15, no. 6, pp. 325–356.
48. **Euler, H.-J. and Landau, H.**, Fast GPS ambiguity resolution on-the-fly for real-time applications, *Proc. 6th Int. Geodesy Symp. Satell. Positioning*, Columbus, OH, USA, 1992, pp. 650–659.
49. **Teunissen, P.J.G.**, Least-squares estimation of the integer GPS ambiguities, *Proc. IAG Gen. Meeting, IV Theory Methodol.*, Beijing, China, 1993, pp. 1–16.
50. **Chen, D. and Lachapelle, G.**, A comparison of the FASF and least squares search algorithms for on the fly ambiguity resolution, *Navigation*, 1995, vol. 42, no. 2, pp. 371–390.
51. **Jung, J., Enge, P., and Pervan, B.**, Optimization of cascade integer resolution with three civil GPS frequencies, Proc. ION GPS, Salt Lake City, UT, USA, 2000, pp. 2191–2200.
52. **Ding, W., Sun, W., Gao, Y., Wu, J.**, Carrier Phase-Based Precise Heading and Pitch Estimation Using a Low-Cost GNSS Receiver, *Remote Sensing*, 2021; 13(18):3642, <https://doi.org/10.3390/rs13183642>.

53. Li, T., Zhang, H., Gao, Z., Niu, X., El-sheimy, N., Tight Fusion of a Monocular Camera, MEMS-IMU, and Single-Frequency Multi-GNSS RTK for Precise Navigation in GNSS-Challenged Environments, *Remote Sens.*, 2019, 11, 610, doi:10.3390/rs11060610.
54. Gao, Z., Shen, W., Zhang, H., Ge, M., Niu, X., Application of Helmert Variance Component Based Adaptive Kalman Filter in Multi-GNSS PPP/INS Tightly Coupled Integration, *Remote Sens.*, 2016, 8, 553.
55. Nadarajah, N., Teunissen, P.J.G., Raziq, N., Instantaneous GPS-Galileo Attitude Determination: Single-Frequency Performance in Satellite-Deprived Environments, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2013, 62, 2963–2976.
56. <https://glonass-iac.ru> (Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения).
57. He, H., Li, J., Yang, Y., Xu, J., Guo, H., Wang, A., Performance assessment of single- and dual-frequency BeiDou/GPS single-epoch kinematic positioning, *GPS Solut.*, 2014, 18, 393–403, doi:10.1007/s10291-013-0339-3.
58. Chen, C., Chang, G., PPPLib: An open-source software for precise point positioning using GPS, BeiDou, Galileo, GLONASS, and QZSS with multi-frequency observations, *GPS Solut.*, 2020, 25, 18.
59. Emel'yantsev, G.I., Stepanov, A.P., Dranitsyna, E.V., Blazhnov, B.A., Radchenko, D.A., Vinokurov, I.Yu., Eliseev, D.P., Petrov, P.Yu., Dual-mode GNSSgyrocompass using primary satellite measurements, *Proceedings of the 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, IEEE, 2018, pp. 1–3.
60. <https://www.arms-expo.ru/news/vystavki-i-konferentsii/nepodvlastnaya-pomekham-kometa>.
61. Асеев А.Л., Владимиров В.М., Фатеев Ю.Л., Филиппов А.И., Шабанов В.Ф., Шепов В.Н. Точность угломерных измерений по сигналам ГЛОНАСС/GPS // Космические аппараты и технологии. 2013. № 3–4 (6). С. 29–34.
62. <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=ngs14.003>.
63. Gao, M., Liu, G., Wang, S., Xiao, G., Zhao, W., Lv, D., Research on Tightly Coupled Multi-Antenna GNSS/MEMS Single-Frequency Single-Epoch Attitude Determination in Urban Environment, *Remote Sensing*, 2021, 13(14):2710, <https://doi.org/10.3390/rs13142710>.
64. Zhu, J., Li, T., Wang, J., Hu, X., Wu, M., Rate-Gyro-Integral Constraint for Ambiguity Resolution in GNSS Attitude Determination Applications, *Sensors*, 2013, 13, 7979–7999.
65. Emel'yantsev, G., Dranitsyna, E., Stepanov, A., Blazhnov, B., Vinokurov, I., Kostin, P., Petrov, P., Radchenko, D., Tightly-coupled GNSS-aided inertial system with modulation rotation of two-antenna measurement unit, *Proceedings of the DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, IEEE, Karlsruhe, 2017, pp. 1–18.
66. Жарков М.В., Веремеенко К.К., Антонов, Кузнецов И.М. Вычисление параметров ориентации по интерферометрическим неоднозначным фазовым измерениям спутниковых навигационных систем и измерениям абсолютной угловой скорости // Гироскопия и навигация. 2018. Том 26. №3 (102). С. 54–68.
67. Кошаев Д.А. Многоальтернативный метод обнаружения и оценки нарушений на основе расширенного фильтра Калмана // Автоматика и Телемеханика. 2010. №5. С. 70–83.
68. Аль Битар Н., Гаврилов А.И., Халаф В. Методы на основе искусственного интеллекта для повышения точности интегрированной навигационной системы при отсутствии сигнала ГНСС. Аналитический обзор // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №4. С. 3–28. DOI 10.17285/0869-7035.0014.
69. Pan, C., Qian, N., Li, Z., Gao, J., Liu, Z., Shao, K., A Robust Adaptive Cubature Kalman Filter Based on SVD for Dual-Antenna GNSS/MIMU Tightly Coupled Integration, *Remote Sensing*, 2021, 13(10):1943, <https://doi.org/10.3390/rs13101943>.
70. Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Васильев В.А., Торопов А.Б., Басин М.В. Алгоритм полиномиальной фильтрации в задачах обработки навигационной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть II. Примеры решения задач // Гироскопия и навигация. 2021. Том 29. №4 (115). С. 56–77. DOI 10.17285/0869-7035.0074.
71. Emel'yantsev, G.I., Stepanov, A.P., Blazhnov, B.A., Radchenko, D.A., Vinokurov, I.Yu., Petrov, P.Yu., Using Satellite Receivers with a Common Clock in a Small-Sized GNSS Compass, *24th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, IEEE, 2017, pp. 1–2.
72. Емельянцева Г.И., Блажнов Б.А., Степанов А.П. Особенности построения двухрежимного СНС-гироскопа как сильносвязанной интегрированной системы // Гироскопия и навигация. 2017. №4 (99). С. 3–17.

73. Zhang, C., Dong, D., Chen, W., Cai, M., Peng, Y., Yu, C., Wu, J., High-Accuracy Attitude Determination Using Single-Difference Observables Based on Multi-Antenna GNSS Receiver with a Common Clock, *Remote Sensing*, 2021, 13(19):3977, <https://doi.org/10.3390/rs13193977>.
74. <https://www.javad.com/jgnss/products/oem/TRE-Quattro/specifications.html>.
-

Emel'yantsev, G.I. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia), **Stepanov, A.P., Dranitsyna, E.V.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC;ITMO University, St. Petersburg, Russia), **Blazhnov, B.A., Volynskii, D.V.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC), and **Potemina, N.S.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC;ITMO University) State-of-the-Art Satellite Multi-Antenna Systems. Specific Features and Results of GNSS Compass Development, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2023, vol. 31, no. 2 (121), pp. 3–25.

Abstract. The paper discusses some achievements in the development of satellite multi-antenna systems which implement the interferometric principle of determining an object attitude. The existing systems are considered, and the authors' vision of the development trend of these systems in terms of their use in the conditions of poor reception of complete outage of signals from global navigation satellite systems (GNSS) is presented. Information about a new system being developed is given; it is conventionally called a GNSS compass and represents a combination of a measuring unit based on fiber-optic gyroscopes of tactical accuracy grade and a multi-antenna GNSS receiver, installed on a rotary base and representing an integrated system of orientation and navigation with a single structure and information functions. The distinctive features of the GNSS compass, which overcome its disadvantages in case of poor GNSS signal, are described against the existing developments. A potential niche for GNSS compass application is also discussed.

Key words: multi-antenna satellite systems, multipath effect, GNSS signal outage, GNSS gyrocompass.

Материал поступил 26.02.2023