

ДЖ. Т. ШМИДТ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ GPS В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Данные координатно-временного обеспечения (КВО), поступающие от глобальной навигационной спутниковой системы GPS, используются во всем мире, но при этом как в гражданских, так и военных применениях существует проблема их доступности и надежности в различных условиях окружающей среды. В статье описываются направленные на решение этой проблемы последние достижения в области технологий навигационных датчиков, в том числе GPS, инерциальных измерителей и других средств навигации. Обсуждаются разработки в области комплексирования датчиков, например для глубоководного автономного аппарата «Bluefin-21».

Ключевые слова: ГНСС, GPS, инерциальные датчики, интеграция, доплеровская скорость.

Введение

GPS является самой распространенной и наиболее развитой глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС). Сигналы GPS используются в различных сферах государственной инфраструктуры: на транспорте (навигационное обеспечение), в средствах связи (временное обеспечение), банковско-финансовых структурах (временное обеспечение) и в энергетических сетях (временное обеспечение). Ежедневно сигналы GPS находят новое применение. Например, в феврале 2012 г. Конгресс США принял постановление о модернизации и реформировании Федерального управления гражданской авиации (FAA), согласно которому FAA должно разработать «комплексный проект безопасного ускоренного внедрения гражданских беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)

Шмидт Джордж Т. Независимый консультант (США).

Статья по докладу на Юбилейной XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2018.

Научный редактор перевода к.т.н. Б. С. Ривкин.

Гироскопия и навигация. Том 27, № 1 (104), 2019

в национальную аэрокосмическую систему к 2015 году». Предполагается, что навигация этих БПЛА будет осуществляться с помощью незашифрованного кода C/A GPS на гражданской частоте L1.

Вскоре после принятия упомянутого постановления по запросу Министерства национальной безопасности США Техасский университет продемонстрировал воздействие спуфинга, позволяющего ввести в бортовую навигационную систему БПЛА ложную информацию GPS [1]. Естественно, это усилило беспокойство в отношении безопасности использования БПЛА в национальной аэрокосмической системе и полетах в целом в случае применения гражданских сигналов GPS. В 2013 г. группе исследователей Техасского университета удалось установить с использованием спуфинга контроль над навигационной системой на основе GPS на борту яхты в Средиземном море и в результате заставить ее отклониться на сотни метров от заданного курса [2].

В сентябре 2017 г. в ходе исследований глобальных данных по отслеживанию траекторий кораблей за последние два года было выявлено несколько случаев, когда согласно данным GPS судно оказывалось в аэропорту на суше, хотя на самом деле оно было в море, на большом расстоянии от указанной точки [28]. Этот факт снова подтвердил наличие проблемы спуфинга в сфере гражданского применения GPS. Вместе с тем проблема спуфинга достаточно эффективно решается с помощью антиспуфингового модуля с селективным доступом, которым оснащены военные GPS-приемники, использующие зашифрованный код P(Y).

Представляется, что единственным средством защиты от спуфинга в гражданском применении является наличие нескольких независимых источников навигационной информации. Например, на борту магистрального гражданского самолета типа B-787 уже имеется несколько инерциальных навигационных систем, данные которых можно сравнивать с информацией, поступающей от GPS. Другим, менее дорогостоящим, решением может быть использование приемников, способных принимать сигналы от всех действующих ГНСС (GPS, BeiDou, ГЛОНАСС, «Галилео» и др.). При наличии такого большого количества сигналов спуфинг практически невозможен.

Еще один серьезный инцидент с сигналами C/A GPS на частоте L1 произошел в ноябре 2009 года при установке первой наземной системы дифференциальных поправок (GBAS) в составе локальной системы коррекции (LAAS) в аэропорту г. Ньюарка [3]. В первые же дни после установки была обнаружена радиочастотная помеха, из-за которой возникали ошибки в обработке сигналов GBAS. Источник помехи сразу выявить не удалось. Управление гражданской авиации начало расследование с целью обнаружения и определения характеристик радиочастотной помехи. Оборудование, развернутое 20 января 2010 года, за один день зафиксировало свыше 25 отдельных случаев возникновения радиочастотной помехи на частоте L1 GPS, причем иногда эта помеха была настолько сильной, что приемник LAAS терял способность следить за спутниками GPS с низким углом возвышения. Только через много месяцев удалось установить, что источниками помех были различного рода глушилки дорожных радаров, установленные на автомобилях, которые проезжали по автомагистрали рядом с аэропортом. В 2010 году юридическая служба Федеральной комиссии по связи США возбудила 21 дело против интернет-магазинов в 12 штатах по факту незаконной продажи более 215 моделей беспроводных глушилок, из которых почти 80 могли подавлять сигналы GPS; однако в настоящее время такие устройства, по всей вероятности, по-прежнему можно приобрести [4].

Преднамеренное подавление GPS-сигналов наблюдается с 2010 года в демилитаризованной зоне в Северной Корее. В марте 2016 года было зафиксировано продолжавшееся в течение недели радиоэлектронное подавление сигналов посредством 5 передатчиков, под воздействие которого попало примерно 1000 летательных аппаратов и 700 кораблей [29].

Применение GPS в военной сфере также связано с КВО, и помехи в диапазоне частот GPS представляют серьезную проблему. К тому моменту, когда сигнал GPS (который часто сравнивают со светом лампы накаливания мощностью 25 Вт на расстоянии 12500 миль) достигает поверхности Земли, он ослабевает и составляет примерно $1,6 \times 10^{-16}$ Вт. Одним из показателей способности приемника распознавать сигнал от спутника GPS и синхронизироваться с ним в присутствии фоновых шумов является максимальное соотношение уровня фонового шума (сигнала помехи) J и мощности сигнала от спутника S , при котором приемник способен продолжить обработку сигнала GPS. Это соотношение, часто обозначаемое как «помеха–сигнал», значительно больше единицы.

Например, в GPS-приемнике DAGR (Defense Advanced GPS Receiver) максимальное соотношение «помеха–сигнал» для обнаружения сигнала GPS с кодом C/A на гражданской частоте L1 составляет 250 [5]. Для обнаружения сигнала с кодом P(Y) максимальное соотношение «помеха–сигнал» гораздо выше – до 2500. Как только приемник поймает сигнал P(Y), он может его удерживать в присутствии помех в 12600 раз увереннее, чем сигнал C/A GPS; но если глушилка мощностью чуть более 2×10^{-12} Вт располагается рядом с приемником, этого будет достаточно, чтобы возник риск потери сигнала GPS. При этом мощность персональных приборов подавления сигналов обычно составляет 300 Вт, что превышает указанный уровень. Таким образом, в условиях помех сигнал GPS может быть недоступен.

Сигнал GPS могут ослаблять деревья, здания, а также ориентация антенны, в результате соотношение «сигнал–шум» уменьшается даже в отсутствие помех. К потере сигнала приводит и повышение уровня «помеха–сигнал» даже при неумышленном подавлении сигнала или создании помех. В таком случае могут потребоваться более чувствительные приемники GPS [6]. Для получения дополнительной навигационной информации можно использовать псевдолиты, радиомаяки и другие устройства [7]. Зачастую в таких ситуациях необходимы дополнительные датчики для корректировки сигналов GPS или целые автономные навигационные приборы для интеграции с GPS, например инерциальные системы [8, 9]. Для применения этих датчиков могут потребоваться новые методы интеграции [10, 11].

В статье описываются текущее состояние и перспективы использования системы GPS, рассматриваются проблемы преднамеренного создания помех, инерциальные системы, способы интеграции и моделирование систем.

Текущее состояние системы GPS и ее перспективы

Министерство обороны постоянно осуществляет модернизацию GPS, приобретая новые спутники и обновляя соответствующие системы управления. Точности, достижимые при использовании приемника GPS, зависят от погрешностей данных, полученных и передаваемых спутником, атмосферных воздействий и других факторов. Армейские приемники обычно обеспечивают погрешность определения места менее 3 м с использованием имеющихся в наличии спутников. В будущем, когда будут введены в эксплуатацию спутники типа Block III, ожидается, что эта

величина не превысит 1 м. Когда же эти спутники будут оснащены высокоскоростными каналами межспутниковой связи, благодаря которым информация будет непрерывно обновляться, они будут передавать более точные данные, что позволит определять местоположение пользователя с погрешностью до 0,15 м. Такие возможности появятся всего через несколько лет, когда будет развернуто созвездие новых спутников и построены новые приемники [5]. Кроме того, предполагается создание новой наземной системы управления (ОСХ), которая обеспечит управление этими и другими передовыми функциями.

Еще одним важным усовершенствованием GPS для армейских систем будет внедрение М-кода, который более безопасен и помехоустойчив по сравнению с существующим Y-кодом [5]. Система модернизируется таким образом, чтобы сигнал большей мощности (+20 дБВт к текущим уровням сигнала) был доступен в пределах локальной зоны действия, чтобы повысить его устойчивость к помехам. Данное усовершенствование (сфокусированный сигнал с М-кодом) планируется внедрить на более позднем этапе модернизации GPS – на стадии внедрения спутников типа Block III [5]. К сожалению, процесс планирования, реализации и получения финансирования на усовершенствование GPS может растянуться на многие годы. В настоящее время реконструкция созвездия спутников GPS, которая в любом случае окажет существенное влияние на спутники Block III GPS, находится на этапе первичного обсуждения [12].

GPS и помехи

Типовая схема действия источников помех представлена на рис. 1 [5]. Мощные глушилки легко обнаружить и обезвредить благодаря высокой интенсивности излучения. Менее мощные источники помех найти сложнее. Важно бороться с ними путем применения улучшенных противопомеховых технологий в приемниках, усовершенствования антенны или интеграции с инерциальной навигационной системой или другими устройствами, нечувствительными к помехам. Сторонники использования высокоточных инерциальных систем в целом считают, что в приемнике GPS с высокой устойчивостью к помехам нет необходимости. Те же, кто ратует за использование этого приемника, убеждены, что его применение существенно снизит требования к точности инерциальной системы и ее стоимость. Справедливость и того и другого мнения полностью зависит от предполагаемой задачи и сценария создания помех.

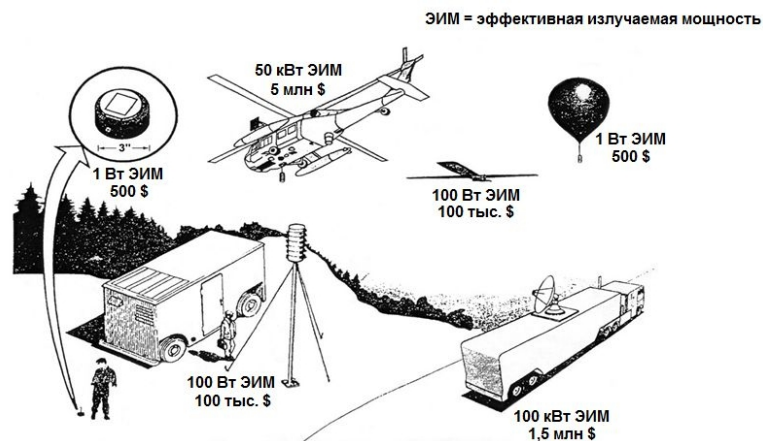


Рис. 1. Варианты создания помех

Общепринятым является мнение, что GPS весьма чувствительна к помехам в фазе распознавания кода C/A, когда традиционный приемник обладает лишь ограниченной сопротивляемостью помехам (среднее соотношение «помеха–сигнал» – 27 дБ) [13–15]. Источник помех мощностью 1 Вт (эффективная излучаемая мощность), расположенный на расстоянии 100 км от антенны GPS, может воспрепятствовать приему кода C/A на территории крупного города, например такого, как Пекин. Рис. 2 может помочь в определении баланса между требуемым пределом помехоустойчивости и мощностью источника помех. Источник помех мощностью 1 Вт достаточно дешев и размером примерно с хоккейную шайбу. Таким образом, высока вероятность того, что приемник GPS не распознает код C/A в неблагоприятных условиях.

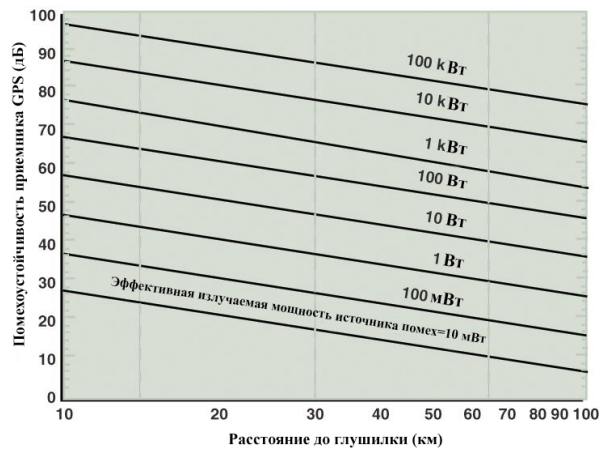


Рис. 2. Расчет подавления сигнала GPS

В военных применениях приемники старого образца принимали код C/A за пределами территории противника, после чего переходили в режим синхронизации с кодом P(Y), который обладает более высоким уровнем помехоустойчивости. Современные приемники с несколькими блоками корреляции способны принимать код P(Y) напрямую. В этом случае источник помех с эффективной излучаемой мощностью 1 кВт, находящийся на расстоянии около 100 км, должен нарушить синхронизацию слежения кода P(Y) приемником в диапазоне от 54 до 57 дБ. По мере приближения приемника к источнику помех мощностью около 10 Вт прерывание синхронизации кода P(Y) произойдет на расстоянии 10 км (см. рис. 3).

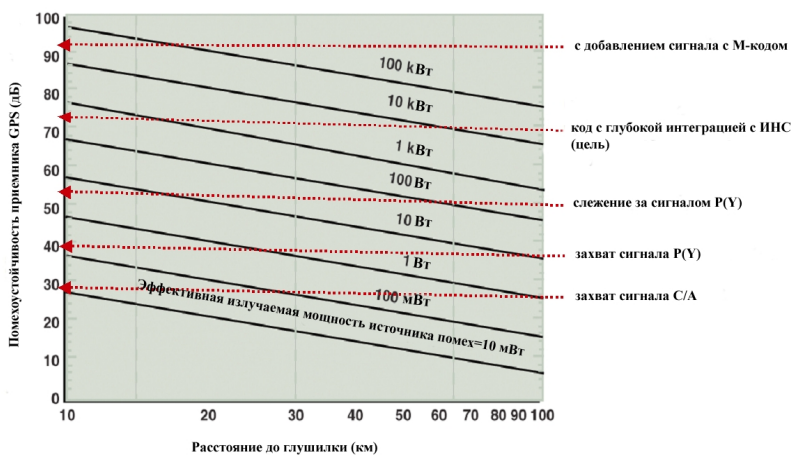


Рис. 3. Потенциальные возможности обеспечения помехоустойчивости

Ниже будет рассмотрена схема «глубокой интеграции» ИНС и GPS, которая позволит отслеживать спутники GPS при соотношении «помеха–сигнал» до 70-75 дБ, то есть разница по сравнению с обычным диапазоном отслеживания кода P(Y) 54-57 дБ составляет 15-20 дБ. Если при этом мощность передачи сигнала спутником увеличится на 20 дБ еще и за счет будущего использования узконаправленного M-кода, будет получен дополнительный запас помехоустойчивости порядка 40 дБ, и, чтобы прервать синхронизацию P(Y) на расстоянии 10 км, источник помех должен обладать мощностью около 100 кВт (рис. 3).

Кроме того, в системе могут быть использованы новейшие приемники, работающие на основе передовых алгоритмов, и современные антенны, что также существенно повысит ее помехоустойчивость [5, 15]. Фильтрация в приемнике не пропустит внеполосные сигналы. Адаптивная антенна с функцией подавления помех может формировать глубокие провалы в диаграмме направленности в местах расположения нескольких мощных источников помех, в результате чего мощность помех, достигающих приемника, значительно уменьшается. С помощью этого способа уровень помех можно снизить на 20-50 дБ и более при наличии достаточного углового смещения между направлениями сигналов GPS и источника помех.

Значительное повышение помехоустойчивости неминуемо для подавления GPS-сигнала влечет за собой увеличение мощности источника помех. При подлете БПЛА к цели источник помех, расположенный возле нее, будет в конечном итоге заглушать приемник, поэтому БПЛА будет полностью зависеть от инерциальной системы наведения или датчик наведения на цель. Таким образом, важно обеспечить наличие средств точного наведения и навигации, отвечающих требованиям военных задач по борьбе с противником, готовым инвестировать в средства радиоэлектронного противодействия (РЭП). Этот факт не утратит актуальности и в обозримом будущем. На рис. 4 представлены некоторые возможные методы такого обеспечения.

- Недорогие высокоточные инерциальные измерительные модули (ИИМ).
- Улучшение качества сигналов в космосе:
 - повышение точности,
 - M-код, в т.ч. узконаправленный.
- Усовершенствование приемников:
 - глубокая интеграция с ИИМ,
 - антиспуфинговые технологии,
 - электроника с повышенной помехоустойчивостью.
- Недорогие адаптивные антенны с улучшенными характеристиками:
 - цифровое формирование диаграммы направленности.
 - современные алгоритмы.

Рис. 4. Методы борьбы с помехами

Инерциальные навигационные датчики и системы

Инерциальные навигационные системы (ИНС) не подвержены воздействию искусственных помех. Основными источниками погрешностей в ИНС являются погрешности инерциальных датчиков (гироскопов и акселерометров), некорректная инициализация навигационной системы, а также несовершенство

гравитационной модели, используемой для вычислений. При этом практически во всех навигационных системах наибольшие погрешности связаны с инерциальными датчиками [16].

Чем бы ни была вызвана погрешность инерциального датчика: внутренними механическими дефектами, погрешностью электроники или другими факторами, в конечном итоге это приводит к погрешности в выходных данных этих устройств. В гироскопах основная погрешность возникает в измерениях угловой скорости, а в акселерометрах – в измерениях кажущегося ускорения. В обоих случаях наиболее серьезными погрешностями, как правило, являются нестабильность смещения нуля, которая измеряется в $^{\circ}/ч$ для гироскопов или в микро-g для акселерометров, и стабильность масштабного коэффициента, которая обычно измеряется в миллионных долях (ppm) значений инерциальных параметров. Чем меньше погрешность инерциального датчика, тем выше точность навигационной системы. К сожалению, более точные датчики повышают стоимость системы.

В большинстве случаев погрешность в координатах инерциальной навигационной системы, оснащенной гироскопами с нестабильностью смещения нуля $0,01^{\circ}/ч$ и имеющей рабочий цикл в несколько часов, возрастает со скоростью 1 морская миля в час. Если продолжительность операции намного короче по времени, дрейф гироскопа, смещение нуля акселерометра, погрешность начальной выставки ИНС и погрешности исходных данных также приводят к соответствующей погрешности определения местоположения [17]. Требования к характеристикам системы навигации объекта непосредственно влияют на выбор конкретных характеристик инерциальных приборов в соответствии с выполняемой задачей.

Рис. 5 дает исчерпывающее представление о требованиях к стабильности смещения нуля и масштабного коэффициента гироскопа в зависимости от области применения, а также о типах гироскопов, обычно используемых для решения тех или иных современных задач [30]. Требования к гироскопам подразумевают отсутствие обновляемых данных GPS и возможность выполнения задачи без использования данных GPS.

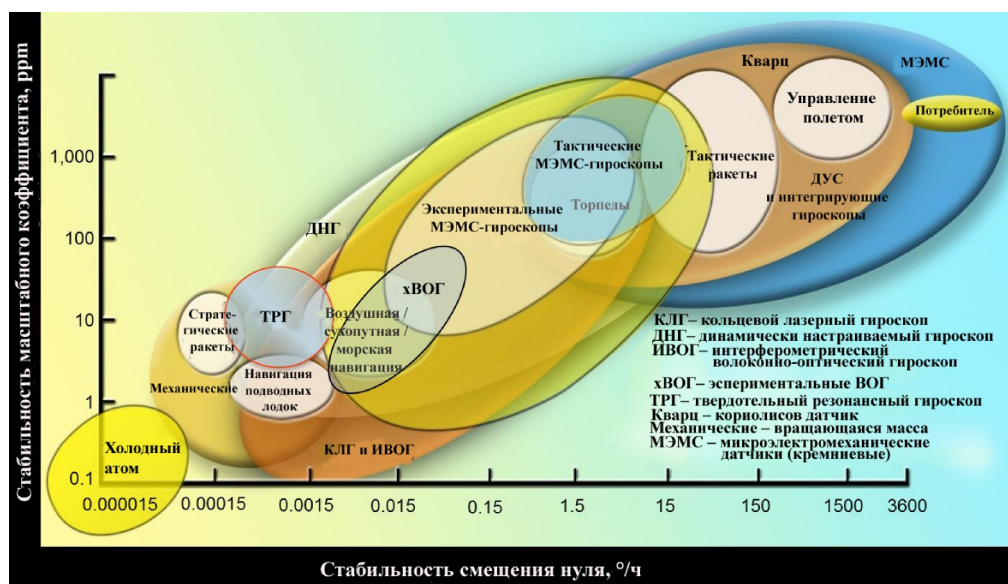


Рис. 5. Современные области применения различных типов гироскопов

Гироскопы на основе микроэлектромеханической системы (МЭМС) выгодно отличаются стоимостью и массогабаритными характеристиками, благодаря чему сфера применения таких устройств неуклонно расширяется. Помимо традиционных военных применений, небольшая стоимость и малые размеры этих датчиков сделали их привлекательными для использования в других сферах, в особенности таких, где не требуются высокие эксплуатационные характеристики.

В ближайшем будущем МЭМС и интерферометрические волоконно-оптические (ВОГ) технологии ожидаемо придут на смену системам на основе кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ) и механических устройств. При этом есть одна область применения, в которой КЛГ сохранит свои лидирующие позиции, – это системы, требующие крайне высокой стабильности масштабного коэффициента. Переход на МЭМС-технологии в целом зависит главным образом от развития гироскопов на МЭМС. Характеристики таких приборов постоянно совершенствуются, в настоящее время они разрабатываются для многочисленных областей применения. Добиться снижения стоимости можно только за счет эффективного наращивания массового производства, которое обеспечит инфраструктуру для поставки МЭМС-датчиков в огромных количествах (миллионами). За счет всего этого будут созданы недорогие, надежные инерциальные датчики малых размеров и массы, а также системы на основе этих датчиков. В тактическом диапазоне применений скорее всего будут преобладать микромеханические инерциальные датчики. Разработку таких датчиков будет стимулировать рынок военной продукции: они будут использоваться для так называемого «интеллектуального» оружия, автопилотов в летательных аппаратах и ракетах, систем наведения тактических ракет ближнего действия, систем управления огнем, систем компенсации движения радиолокационной антенны, «умных покрытий» со встроенными инерциальными датчиками, множественных «интеллектуальных» мелких снарядов, например стреловидных, и даже обычных пуль, а кроме того, для интегрированных инерциально-спутниковых систем (ИНС/ГНСС) на чипе.

В долгосрочной перспективе кремниевые МЭМС и технологии ВОГ/оптических интегральных систем, по всей видимости, займут доминирующие позиции для применения в приложениях низкой и средней точности. Этот прогноз основан на двух предпосылках. Во-первых, рабочие характеристики устройств на основе МЭМС будут и дальше улучшаться с той же скоростью, что и за последние десятилетия. Дальнейшее совершенствование этих устройств весьма вероятно, поскольку уже сегодня разработчики понимают, как геометрия, размеры и свойства электроники влияют на их надежность и рабочие характеристики. Во-вторых, в ряде работ уже была продемонстрирована возможность установки всех шести датчиков (трех гироскопов и трех акселерометров) на один-два кристалла как единственный способ снизить потенциальную стоимость интегрированной системы ИНС/ГНСС до менее чем 1000 долларов США. Кроме того, поскольку многие устройства на МЭМС представляют собой вибрирующие конструкции с емкостным считыванием данных, их рабочие характеристики могут повышаться только до определенных пределов. Именно в этой области наиболее высока вероятность применения технологий оптических интегральных систем для создания полноценного твердотельного микромеханического гироскопа с оптическим считыванием данных. В настоящее время технологии создания малогабаритного точного гироскопа не существует, однако уже достигнуты определенные успехи в области развития интегральной оптики для отрасли связи.

Потенциально перспективной технологией, которая сегодня только зарождается, являются инерциальные датчики, основанные на эффекте интерференции холодных атомов [18, 19]. Стандартная атомная длина волны де Бройля во много раз меньше оптической длины волны, и, поскольку атомы обладают массой и внутренней структурой, интерферометры на холодных атомах чрезвычайно чувствительны. Ускорения, повороты, электромагнитные поля и взаимодействия с другими атомами изменяют интерференционные полосы атома. Это означает, что атомные интерферометры могут обеспечивать значительно более высокую точность гироскопов, акселерометров, гравитационных градиентометров и часов. Если такую технологию будущего удастся создать, появится возможность построения навигационной системы с погрешностью 2-5 м/ч без использования GPS, в которой акселерометры будут также измерять градиенты силы тяжести.

Рис. 6 дает исчерпывающее представление о требованиях к стабильности смещения нуля и масштабного коэффициента акселерометров в зависимости от области применения, а также о типах акселерометров, обычно используемых для решения тех или иных современных задач [30]. Требования к акселерометрам подразумевают недоступность данных GPS во время выполнения задачи.

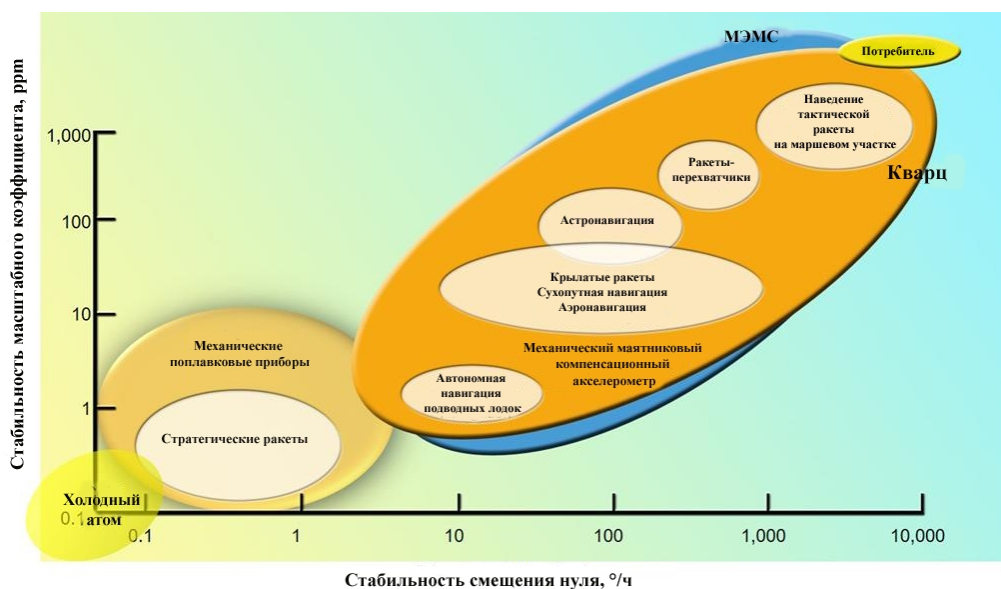


Рис. 6. Современные области применения различных типов акселерометров

Сегодня во многих сферах применения по-прежнему доминируют электро-механические датчики, причем не только потому, что они, как правило, отличаются невысокой стоимостью при требуемых рабочих характеристиках, но и потому, что альтернативных конкурентоспособных технологий пока нет, если не принимать во внимание кварцевые резонаторы, которые используются в тактическом диапазоне и коммерческих продуктах невысокого класса точности. Акселерометры на основе МЭМС оказали влияние на потребительский рынок.

В ближайшем будущем ожидается, что для применений невысокого класса точности будут преобладать микромеханические акселерометры. Как и в случае с гироскопами, развитие этих датчиков будет определять военный рынок,

в частности такие направления, как «интеллектуальное» оружие, автопилоты летательных аппаратов и ракет, системы наведения тактических ракет ближнего действия, компенсация движения антенны радиолокационных систем, «умные покрытия» со встроенными инерциальными датчиками, множественные «интеллектуальные» мелкие снаряды, например стреловидные, и даже обычные пули, а также интегрированные инерциально-спутниковые системы на чипе. В областях, где требуются более высокие рабочие характеристики, будут по-прежнему использоваться механические и, возможно, кварцевые или кремниевые резонансные акселерометры. Кварцевые резонансные акселерометры уже широко используются в тактическом диапазоне и коммерческих сферах (например, автоматизация производства). Кремниевые микромеханические резонансные акселерометры также в настоящее время разрабатываются. Эксплуатационные характеристики обоих типов устройств могут быть улучшены.

Что касается долгосрочных прогнозов, то, как и в случае с гироскопами, МЭМС и интегрально-оптические технологии для использования в акселерометрах, возможно, будут преобладать везде, где требуются невысокие и средние рабочие характеристики. Данный прогноз основывается на тех же предпосылках, что и в случае с гироскопами. Тем не менее весьма вероятно, что долгосрочные прогнозы развития технологий акселерометров сбудутся на несколько лет раньше, чем гироскопов.

Общая стоимость будущих систем зависит от технологий инерциальных приборов и требований к их рабочим характеристикам. Вероятность того, что стоимость интегрированных систем на ВОГ будет снижаться, чрезвычайно высока, в отличие от систем на лазерных гироскопах. Наиболее дешевыми для массового производства являются МЭМС и интегрально-оптические системы.



Рис. 7. МЭМС Honeywell HG1930



Рис. 8. МЭМС Honeywell HR4930

гироскопа по углу $0,04 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ (рис. 8), одобренная Правилами международной торговли оружием [21], что позволяет поставлять ее даже в РФ.

Способность кремниевых МЭМС-устройств выдерживать высокие гравитационные нагрузки была продемонстрирована во время стрельбы артиллерийскими снарядами, когда ускорение достигает 20000 g и более. Эти небольшие по размеру МЭМС-системы послужили доказательством того, что существует возможность создания высокоинтегрированных инерциально-спутниковых систем. Кроме того, их появление повлекло за собой запуск программы, целью которой стала разработка системы объемом порядка 3 куб. дюйма или 2 куб. дюйма только для ИНС [20]. Требуемые габариты были достигнуты, однако функциональные характеристики пока оставляют желать лучшего. Типичным представителем современных ИНС на МЭМС является Honeywell HG1930 массой менее 0,35 фунтов, объемом 5 куб. дюймов, потребляемой мощностью $<3 \text{ Вт}$, с нестабильностью смещения нуля гироскопа $20 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ и случайным уходом по углу $0,09 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. В настоящее время налажено серийное производство системы (рис. 7). Еще один пример – система HG4930 объемом 5 куб. дюймов, с нестабильностью смещения нуля гироскопа $7 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ и случайным уходом

По своим габаритам она сопоставима с системами тактического класса на КЛГ и ВОГ объемом около 34 куб. дюймов. Другие производители тоже выпускают МЭМС. Если производители сумеют улучшить рабочие характеристики изделий, то будут доминировать на рынке.

Интегрированные инерциально-спутниковые системы

Многие поставляемые на вооружение инерциальные навигационные системы можно было бы заменить на менее точные и недорогие, однако для этого необходимо наличие непрерывного сигнала GPS, что позволит постоянно обновлять данные инерциальной системы и тем самым ограничит рост ее погрешности. Однако, учитывая, что гарантировать непрерывность сигнала GPS невозможно, альтернативным способом снизить стоимость комплекса бортового радиоэлектронного оборудования при решении большинства военных задач является непосредственная разработка более дешевых инерциальных датчиков при одновременном повышении их точности и уменьшении шумов, о чем шла речь выше. Преимущества и проблемы использования ИНС с коррекцией их выходных данных посредством обновления данных GPS, в том числе вопросы помехоустойчивости, были предметом многих исследований. Существующие интегрированные системы принято разделять на слабосвязанные и сильносвязанные (рис. 9 и 10) [22]. При наличии других датчиков полученная от них информация используется в качестве дополнительных входных данных для фильтра Калмана.

В последнее время изучается другой подход – «глубокая интеграция» (рис. 11) [23–26]. Здесь проблема формулируется как собственно задача оценки, в рамках которой находится оптимальное (с минимальной дисперсией) решение для каждого компонента многомерного навигационного вектора состояния. Такая постановка задачи позволяет строить навигационные алгоритмы непосредственно по принятым динамическим моделям, моделям измерений и моделям шумов. Для решения используется нелинейный фильтр, который эффективно работает при любом соотношении «помеха–сигнал» и существенно отличается от традиционных вариантов обобщенного фильтра Калмана. В состав навигационного блока входят адаптивные алгоритмы оценки коррелированного сигнала и шума с помощью полного банка корреляции. Коэффициенты фильтра непрерывно адаптируются к изменениям соотношения «помеха–сигнал», а прогноз ковариации погрешностей основан непосредственно на измерениях, что обеспечивает робастность решения в условиях сильных помех.



Рис. 9. Схема слабосвязанной системы

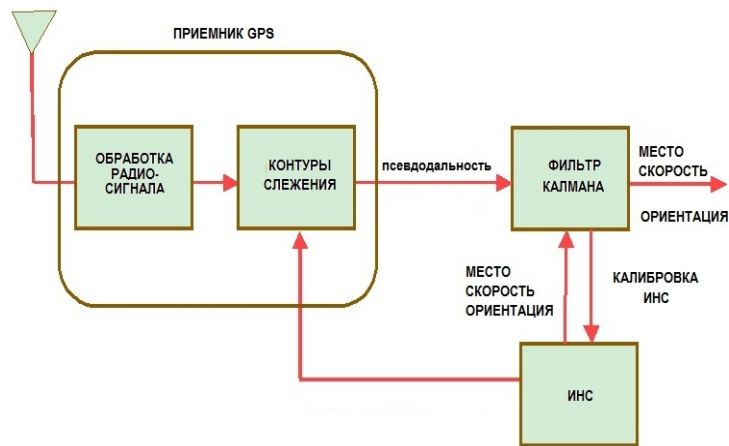


Рис. 10. Схема сильносвязанной системы

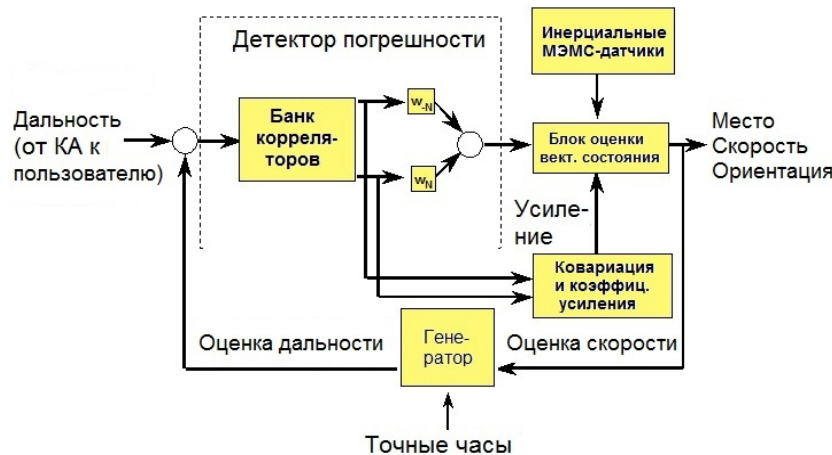


Рис. 11. Глубокая интеграция ИНС/ГНСС

Из такой схемы исключены фазовые детекторы для отдельного спутника и фильтры контура слежения. Сигналы со всех доступных спутников обрабатываются последовательно и автономно, и полностью учитывается корреляция между расстояниями прямой видимости до спутников. Это минимизирует трудности, связанные с немоделируемым сигналом спутника или эфемеридными изменениями, и позволяет обеспечить полностью автономный контроль целостности (RAIM) навигационных определений в приемнике.

Корреляция расширенного диапазона может быть включена дополнительно для увеличения порога потери синхронизации отслеживания кода в условиях сильных помех и при выполнении высокодинамичных задач. При возникновении чрезмерно высоких уровней помех (например, при соотношении «помеха–сигнал» ниже 70-75 дБ на входе приемника при отслеживании кода $P(Y)$) шум в измерениях GPS может стать настолько сильным, что оптимальные веса измерений GPS становятся пренебрежимо малыми. В такой ситуации динамика навигационной погрешности в значительной степени зависит от текущих погрешностей вырабатываемой скорости и параметров любых дополнительно используемых навигационных датчиков, например ИНС. Если в дальнейшем

соотношение «помеха–сигнал» уменьшается настолько, что оптимальные веса становятся значимыми, оптимальные характеристики отслеживания кода поддерживаются без необходимости повторного обнаружения.

Эксперименты показали улучшение отслеживания кода на 10-15 дБ при обеспечении помехоустойчивости в широкополосном диапазоне для данной схемы. Улучшение еще на 5 дБ возможно при фрагментировании данных для обеспечения расширенного додетекторного интегрирования. Таким образом, можно ожидать, что глубокая интеграция будет применяться в будущих реализациях систем при незначительном увеличении аппаратно-программного обеспечения.

Моделирование

В этом разделе будет выполнено моделирование двух конкретных сценариев. Первый демонстрирует значительное улучшение характеристик при вводе измерений доплеровской скорости в систему GPS/ИНС, испытывающую воздействие помех. Второй сценарий показывает преимущества глубокой интеграции в условиях помех для высокоточных управляемых боеприпасов. Оба сценария подробно описаны в [22].

А. Эксплуатация вертолета рядом с источником помех

В этом сценарии представлены характеристики вертолета-разведчика при дополнительном вводе доплеровской скорости в систему ИНС/GPS и без него. Траектория вертолета точно повторяет рельеф местности во избежание обнаружения. Полученный профиль полета характеризуется высокими уровнями ускорения и резкими рывками. Во время выполнения задачи действует следующий сценарий помех. Измерения GPS были доступны до тех пор, пока бортовые оценки процесса калибровки и выставки ИИМ не стабилизировались. С этого момента

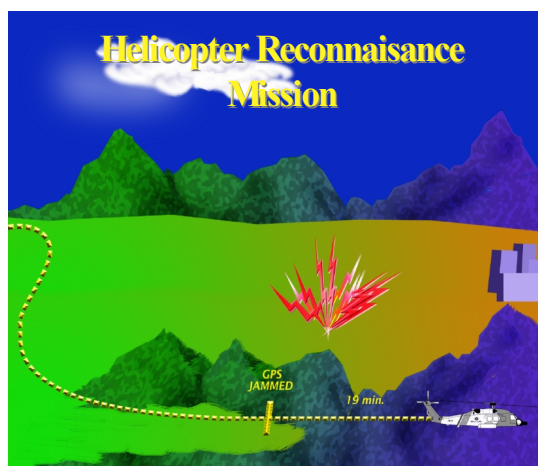


Рис. 12. Разведывательный полет вертолета

считается, что GPS подвергается глушению. Полет продолжается еще 19 минут, как показано на рис. 12. Можно заметить, что полученные в ходе эксплуатации значения скорости существенно различаются.

К концу полета перед вертолетом стоит задача с помощью бортового датчика определить координаты цели, находящейся на некотором расстоянии (8 км) от его собственного местоположения. Наведение датчика в определенном направлении осуществляется с помощью инерциальной системы. Таким образом, погрешность определения координат местоположения цели представляет собой сумму погрешности определения местоположения вертолета и погрешности привязки ИНС к корпусу вертолета, умноженной на расстояние до цели.

На рис. 13 представлены погрешности определения местоположения вертолета и координат цели в зависимости погрешностей двух типов сильносвязан-

ных систем GPS/ИНС, когда доплеровские измерения путевой скорости не включаются в решение навигационной задачи. Смоделированные погрешности ИНС характерны для систем с нарастанием погрешностей на уровне 10 морских миль/ч или 1 морской мили/ч. И в том и в другом случае погрешность выставки пренебрежительно мала по сравнению с погрешностью определения местоположения вертолета, поэтому погрешности определения координат цели и местоположения вертолета в целом одинаковы. Таким образом, погрешности определения координат цели для систем уровня 10 морских миль/ч и 1 морской мили/ч составляют соответственно 2760 и 192 м.

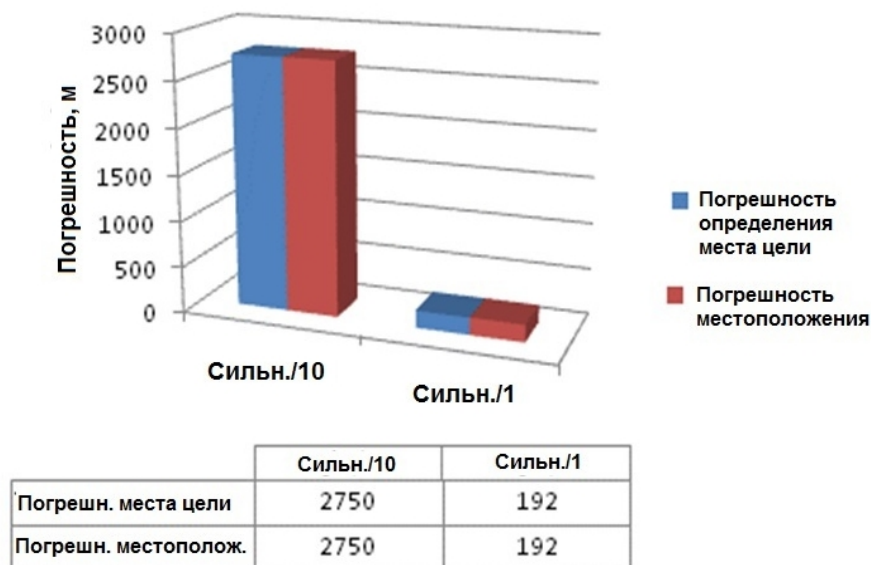


Рис. 13. Погрешности определения местоположения через 19 мин после потери сигнала GPS

На рис. 14 показаны погрешности при использовании в навигационной системе дополнительных доплеровских измерений путевой скорости. Из рисунка видно резкое изменение результатов для инерциальных систем уровня как 10 морских миль/ч, так и 1 морской мили/ч. Как и ожидалось, доплеровские измерения путевой скорости замедляют нарастание погрешности по сравнению с инерциальной системой, не использующей вспомогательные данные. Погрешности этих измерений скорости интегрируются в нарастающие погрешности местоположения, поэтому они не эквивалентны данным GPS, которая определяет как местоположение, так и скорость. Вместе с тем они обеспечивают гораздо лучшие результаты, чем инерциальные приборы, измерения которых необходимо дважды интегрировать, прежде чем местоположение будет определено. Улучшение показателей благодаря доплеровскому датчику путевой скорости очевидно. Следует отметить, что при использовании дополнительных измерений погрешности систем уровня 10 морских миль/ч и 1 одной морской мили/ч в определении местоположения вертолета практически одинаковы – 17 и 14 м соответственно. Поскольку эта погрешность теперь мала, погрешность выставки начинает вносить заметный вклад в погрешность определения координат цели, особенно для ИНС уровня 10 морских миль/ч, в результате для нее погрешность определения координат цели составляет 21 м.

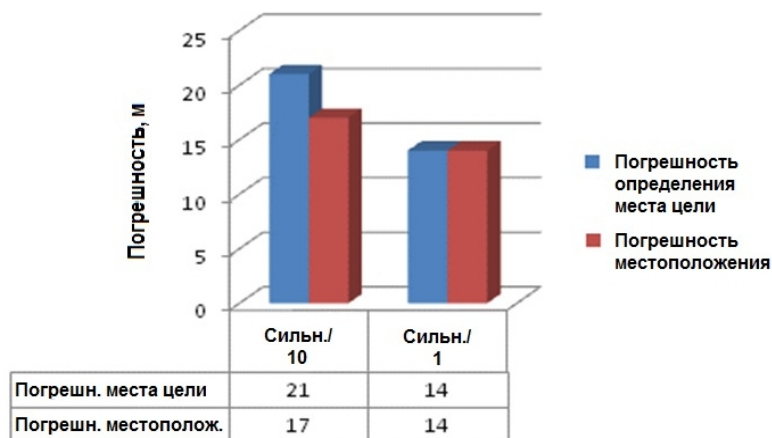


Рис. 14. Погрешности определения местоположения при использовании доплеровских измерений

В. Высокоточные управляемые боеприпасы

Эффективность глубоко интегрированной навигационной системы оценивалась в рамках сценария для высокоточных управляемых боеприпасов, при этом цель находилась на расстоянии 63 морских миль. Кривая профиля высоты представлена на рис. 15.

Одиночный широкополосный источник помех (гауссовского шума) был размещен на расстоянии 5 морских миль перед целью для моделирования наихудшего сценария с одиночным источником помех. Такое размещение обеспечивает максимальное соотношение «помеха–сигнал» до приближения к конечной цели; при этом нарушение работы навигационной системы происходит непосредственно перед поражением цели. Динамика соотношения «помеха–сигнал» для источника помех мощностью 100 Вт представлена на рис. 16.

Эффективность оценивалась путем изменения мощности источника помех от 1 Вт до 10 кВт. Всего было выполнено 25 циклов обработки методом Монте-Карло для каждого уровня мощности. Начальные среднеквадратические навигационные погрешности составляли 10 м и 0,2 м/с на каждую ось. На рис. 17 показана зависимость круговой вероятной погрешности (КВП) в момент поражения цели от мощности источника помех, работающего в широкополосном

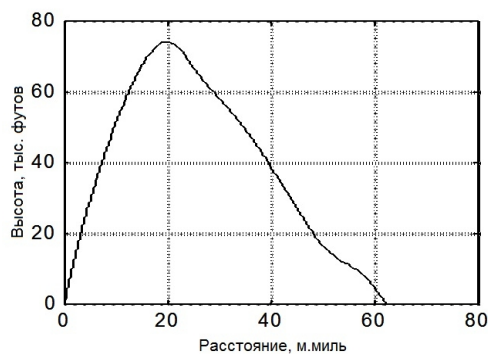


Рис. 15. Профиль высоты высокоточного управляемого боеприпаса

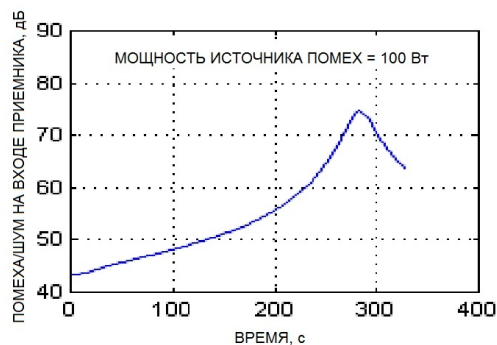


Рис. 16. Сценарий для высокоточных управляемых боеприпасов: временная динамика соотношения «помеха–сигнал»

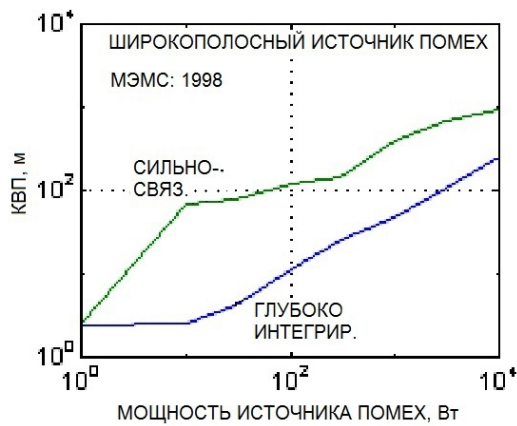


Рис. 17. Зависимость КВП от мощности широкополосного источника помех

диапазоне. Если сравнить результаты, представленные на рисунке, можно увидеть, что глубоко интегрированная система обеспечивает существенное преимущество по сравнению с традиционной сильносвязанной системой в случае широкополосных помех. Например, когда мощность широкополосного источника помех составляет 100 Вт, глубоко интегрированная система обеспечивает КВП на уровне 11 м, а сильносвязанная система – 120 м. Если уменьшить мощность источника помех до 10 Вт, значения КВП будут 2,6 м для глубоко интегрированной системы и 71 м – для сильносвязанной.

Если мощность источника помех стремится к нулю, обе системы демонстрируют сопоставимую эффективность. При увеличении КВП до более чем 100 м также наблюдается менее выраженное улучшение. В этом случае повышение КВП происходит за счет усиления мощности источника помех, и качество слежения с помощью глубоко интегрированной системы начинает ухудшаться. Если мощность передатчика помех стремится к бесконечности, глубоко интегрированная система больше не в состоянии обрабатывать данные измерений, и обе системы работают в свободном инерциальном режиме, когда КВП определяется только по начальным навигационным погрешностям и погрешностям инерциальных датчиков.

Аппарат «Bluefin-21»: потеря сигнала GPS из-за неблагоприятных условий окружающей среды

Глубоководный автономный аппарат «Bluefin-21» использовался для поиска пропавшего авиалайнера МН370. Его длина составляет 5 м, масса – 800 кг, скорость – 7 км/ч, продолжительность автономной работы – 25 ч, рабочая глубина – до 4500 м. Индекс «21» указывает на диаметр аппарата (21 дюйм), который является стандартным для американских торпед [27]. Аппарат может быть оснащен множеством различных датчиков: гидролокатором бокового обзора, гидролокатором с синтезированной апертурой, многолучевыми эхолотами, профиломером твердого дна, видеокамерой, фотоаппаратом для подводной съемки и другими датчиками.

Для достижения высокой навигационной точности на больших глубинах во время продолжительного плавания применяется уникальная комбинация устройств. Во-первых, для инициализации навигационной системы используется армейский приемник GPS с кодом P(Y) в сочетании с бесплатформенной инерциальной навигационной системой на КЛГ, нестабильность смещения нуля которого от пуска к пуску составляет 0,005 °/ч. Для измерения глубины используется датчик давления. Работа систем осуществляется по слабосвязанной схеме. Естественно, при погружении сигнал GPS пропадает, и аппарат полностью зависит от собственной инерциальной навигационной системы во время погружения в заданную поисковую зону. На борту аппарата имеется доплеровский лаг, данные которого используются в фильтре Калмана, как только лаг зафик-

сирует наличие дна океана. Как было описано в предыдущем разделе, доплеровская скорость играет значительную роль в поддержании навигационной точности ИНС в отсутствие сигнала GPS.

Вместе с тем чрезвычайно длительные периоды работы аппарата одновременно требуют высокоточного определения места поиска, обеспечить которое только при помощи ИНС/доплеровского лага невозможно. Для коррекции данных местоположения используется гидроакустическая система с ультракороткой базой (СУКБ) [27]. Чтобы осуществить расчет абсолютных координат аппарата «Bluefin-21» (широту и долготу), система СУКБ посылает акустический сигнал к «Bluefin-21» и принимает ответный. Погрешность местоопределения с использованием СУКБ составляет менее 1% от величины наклонной дальности до аппарата. Далее координаты аппарата передаются через систему гидроакустической связи, что позволяет «Bluefin-21» обновлять оценки своего местоположения. В периоды между сеансами обновления данных с помощью СУКБ навигация «Bluefin-21» осуществляется с опорой на ИНС и доплеровский лаг, которые обеспечивают соответствие требованиям задачи без опоры на данные GPS.

Заключение

Последние достижения в области ИНС/ГНСС ускорили потенциальное применение этих интегрированных систем, одновременно стало уделяться больше внимания проблеме уязвимости GPS к помехам, поэтому можно больше не беспокоиться о сложностях, связанных с отсутствием сигналов GPS. Новые системы найдут применение во многих сферах. Одновременно появятся более дешевые инерциальные компоненты с более высокой точностью. Глубоко интегрированные помехоустойчивые схемы для систем ИНС/ГНСС станут обычным явлением и придут на смену радиоэлектронным схемам на основе функциональных «черных ящиков», в которых приемники и инерциальные системы в настоящее время рассматриваются как самостоятельные системы. Ожидается, что сфера применения систем ИНС/ГНСС будет расширяться, в конечном итоге это приведет к глобальному повышению навигационной точности до 1 м и менее, которую необходимо будет поддерживать при любых условиях. На рис. 18 представлено несколько возможных примеров.



Артиллерийский снаряд



Миниатюрные ЛА



Персональный навигатор



Автомобили

Рис. 18. Потенциальные сферы применения

Благодарность

Автор выражает благодарность Ральфу Хопкинсу из Draper Laboratory за его помощь в написании раздела об инерциальных датчиках и формировании диаграмм на рис. 5 и 6.

Эта статья является обновленной и дополненной версией доклада, представленного на конференции IEEE «Наведение, навигация и управление» (г. Яньтай, Китай) в 2014 году и опубликованного в «Китайском журнале аэронавтики» (Chinese Journal of Aeronautics) в 2015 году.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Shepard, D, Bhatti, J., Humphreys, T.**, Drone Hack, GPS World Aug.2012:30-33.
2. **Divis, D.**, GPS Spoofing Experiment Knocks Ship off Course, Inside GNSS, 31 Jul. 2013: 1–3.
3. **Grabowski, J.**, Personal Privacy Jammers, GPS World, Apr. 2012: 28–37.
4. **Gibbons, G.**, Editor. Online GPS Jammer Sales Draw Attention of FCC, ION Newsletter, vol. 21(3), Fall 2011:5.
5. **Congressional Budget Office.** The Global Positioning System for Military Users: Current Modernization Plans and Alternatives., Oct. 2011.
6. **Lachapelle, G.**, High Sensitivity GNSS Limitations in RF Perturbed Environments, NATO STO Lecture Series SET-197, Navigation Sensors and Systems in GNSS Degraded and Denied Environments, Oct. 2013.
7. **Raquet, J.**, Navigation using Pseudolites, Beacons, And Signals of Opportunity, NATO STO Lecture Series SET-197, Navigation Sensors and Systems in GNSS Degraded and Denied Environments, Oct. 2013.
8. **Hopkins, R., Barbour, N.**, Contemporary and Emerging Inertial Sensor Technologies, NATO STO Lecture Series SET-197, Navigation Sensors and Systems in GNSS Degraded and Denied Environments, Oct. 2013.
9. **Hopkins, R., Gustafson, D., Sherman, P.**, Miniature Augmentation Sensors in GNSS Denied Navigation Applications, NATO STO Lecture Series SET-197, Navigation Sensors and Systems in GNSS Degraded and Denied Environments, Oct. 2013.
10. **Veth, M.**, Nonlinear Estimation Techniques for Navigation, NATO STO Lecture Series SET-197, Navigation Sensors and Systems in GNSS Degraded and Denied Environments, Oct. 2013.
11. **Schmidt, G., Phillips, R.**, INS/GPS Integration Architectures, NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology, Mar. 2011.
12. **Divis, D.**, Air Force Proposes Dramatic Redesign for GPS Constellation, Inside GNSS, May/June 2013: 20–24.
13. **NAVSTAR GPS Joint Program Office.** NAVSTAR GPS User Equipment, Feb. 1991.
14. **Mahmood, S.**, Analysis of Differential Global Positioning System (DGPS) Techniques and GPS Jamming on Precision Guided Munition (PGM) Performance, NATO/AGARD MSP Meeting, Technologies for Precision Air Strike Operations in Rapid Reaction and Localized Conflict Scenarios, Seville, Spain, AGARD CP-576, June 1996.
15. **Sklar, J.**, GPS Capability Projections, Defense Science Board 1996 Summer Study Task Force on Tactics and Technology for 21st Century Military Superiority, vol. 3, Oct. 1996: III.43-III.53.
16. **Schmidt, G.**, INS/GPS Technology Trends, NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology, Mar. 2011.
17. **Groves, P.**, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd ed. Boston: Artech House, 2013: Chapters 5, 12, 18.
18. **Kasevich, M.**, Salomon C.-Editors. Special Issue: Quantum Mechanics for Space Applications: from Quantum Optics to Atom Optics and General Relativity, Applied Physics B, vol. 84, Aug. 2006.
19. **Zatezalo, A., Vuletic, V., Baker, P., Poling, T.**, Bose Einstein Interferometry and Its Applications to Precision Undersea Navigation, IEEE/ION PLANS 2008, Monterey, CA, 2008:940–950.
20. **Barbour, N., Hopkins, R., Kourepenus, A.**, Inertial Navigation Sensors and Inertial MEMS Systems and Applications, NATO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology, Mar. 2011.
21. aerospace.honeywell.com/en/product-listing/sensors. Cited Feb. 9, 2018.
22. **Schmidt, G., Phillips, R.**, INS/GPS Integration Architecture Performance Comparisons, NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology, Mar. 2011.

23. **Gustafson, D., Dowdle, J., Elwell, J., Flueckiger, K.,** A Nonlinear Code Tracking Filter for GPS-Based Navigation, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Vol. 3(4), Aug. 2009: 627-638. Also, see U.S. Patent 6,331,835 B1, December 18, 2001.
24. **Gustafson, D., Dowdle, J.,** Deeply Integrated Code Tracking: Comparative Performance Analysis, Institute of Navigation GPS/GNSS 2003, Portland, OR, 2003. Also Draper Laboratory Report P-4159.
25. **Gustafson, D., Dowdle, J., Flueckiger, K.,** A Deeply Integrated Adaptive GPS-Based Navigator with Extended Range Code Tracking, Draper Laboratory Report P-3791, Cambridge, MA, Jan 2000. Also, IEEE PLANS Conference, San Diego, CA, Mar. 2000.
26. **Gustafson, D., Dowdle, J., Flueckiger, K.,** A High Antijam GPS-Based Navigator, Draper Laboratory Report P-3776, Cambridge, MA, Jan. 2000. Also, Institute of Navigation National Technical Meeting, Anaheim, CA. 2000.
27. <https://t.co/xdXKApumBM> (retrieved June 19, 2014).
28. <http://scl.io/U5pJxpVL> (retrieved Feb. 8, 2018).
29. www.popularmechanics.com/military/weapons/a20289/north-korea-jamming-gps-signals/ (retrieved Feb. 8, 2018).
30. **Hopkins, R.,** Contemporary and Emerging Inertial Sensor Technologies – A Short Course, presented at IEEE/IONPLANS, April 2018, Monterey, CA.
31. **Barbour, N., Elwell, J., Setterlund, R., Schmidt G.,** Inertial Instruments: Where to Now? I Saint Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology, Saint Petersburg, Russia, May 1994.

Schmidt, G.T. (Independent Consultant, Lexington, Massachusetts, USA)

GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 1 (104), pp. 3–21.

Abstract. Position, velocity, and timing (PVT) signals from the Global Positioning System (GPS) are used throughout the world but the availability and reliability of these signals in all environments has become a subject of concern for both civilian and military applications. This presentation summarizes recent advances in navigation sensor technology, including GPS, inertial, and other navigation aids that address these concerns. Also addressed are developments in sensor integration technology with several examples described, including the Bluefin-21 system mechanization.

Key words: GNSS, GPS, Inertial sensors, Integration, Doppler Velocity.

Материал поступил 16.01.2019