

# Оценка качества функционирования спутниковых навигаторов при наличии помех с использованием векторных генераторов R&S SMW200A и R&S SMBV100B

Часть 1

Н. Лемешко, д. т. н.<sup>1</sup>, А. Патшин<sup>2</sup>

УДК 621.396:621.317 | ВАК 05.11.08

Спутниковые навигаторы часто работают в условиях воздействия различных помех, что может значительно снижать точность выдаваемых ими результатов. В статье рассматривается вопрос об оценке качества функционирования спутниковых навигационных приемников при наличии многолучевого приема и промышленных радиопомех, а также сигналов, несущих ложную навигационную информацию, с использованием имитаторов навигационных сигналов на базе векторных генераторов компании Rohde & Schwarz (R&S).

**В** настоящее время ведущими мировыми государствами создано несколько систем спутниковой навигации (ССН), обеспечивающих глобальный охват радионавигационным полем не только земной поверхности, но и околоземного пространства [1]. К ним относятся GPS (США), Galileo (Европейский союз), BeiDou (Китай), а также разработанная Российской Федерацией система ГЛОНАСС. Свои собственные ССН планируют создать Индия, Пакистан и ряд других государств. Существующие ССН постоянно модернизируются: вводятся в эксплуатацию новые спутники, совершенствуются навигационные сигналы, улучшаются характеристики навигационных приемников.

Большая часть навигаторов, продаваемых на мировом рынке, являются мультисистемными, то есть работают с сигналами нескольких ССН, что обеспечивает получение навигационно-временных определений (НВО) в любой точке земного шара и гарантирует их весьма высокую точность. Несмотря на разнообразие ССН, система GPS еще долго будет оставаться важнейшей не только по причине наибольшей развитости и проработанности, но и в связи с тем, что многим навигаторам для работы с другими системами требуется первоначальная синхронизация по сигналу L1С/A [2].

За последнее время роль ССН в обеспечении функционирования различных технических систем заметно возросла, что во многом связано с высокой степенью совершенства средств радионавигации. В технологически развитых странах ССН применяются для управления беспилотными объектами, автоматизации сельскохозяйственных работ и т. д. Передача временных меток позволяет с высокой точностью синхронизировать процессы в разных частях мира, обеспечить высокоточное функционирование источников опорных частот, геодезические измерения с миллиметровыми погрешностями.

С учетом широких возможностей ССН навигационные приемники (НП) классифицируются по назначению и техническому исполнению, и в последнем случае их принято разделять на самостоятельные изделия и встраиваемые модули. Различаются НП и по уровню ответственности применения, которая определяет схемотехнические решения и алгоритмы работы, а также надежность и стойкость изделий к внешним воздействиям.

Поскольку принцип действия навигационных приемников основан на приеме радиосигналов из эфира, то, очевидно, наибольшая точность получения НВО будет достигнута тогда, когда принимаемые навигационные сигналы (НС) в широком смысле обладают наилучшим качеством, что во многом определяется условиями приема. Здесь принято выделять две проблемы:

- воздействие промышленных помех, непреднамеренно порождаемых техническими средствами,

<sup>1</sup> АО «Корпорация «Комета», в. н. с., nlem83@mail.ru.

<sup>2</sup> ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС», руководитель направления генераторов сигналов, Aleksandr.Patshin@rohde-schwarz.com.

а также многолучевой прием НС, например, в условиях городской застройки;

- воздействие одновременно с истинным постороннего навигационного поля, работа по которому приводит к получению неправильных НВО.

Названные причины ухудшения качества сигналов в зарубежной литературе принято называть соответственно джамингом (jamming) и спуфингом (spoofing). Наиболее часто, очевидно, встречается первая из них, однако разработчики НП должны обычно учитывать и возможность имитации навигационного поля. Поскольку пользователь НП ожидает получения достоверных НВО, то НП обычно снабжаются алгоритмическими средствами защиты от спуфинга и джаминга, и в ходе отладки НП должно оцениваться качество их функционирования при наличии таких воздействий.

При проведении испытаний такого рода использование эфирных НС оказывается невозможным из-за неизвестности точных мощностей НС от каждого спутника заданной ССН, наличия помех непрогнозируемого характера, а также сложности обеспечения движения носителя НП по требуемой траектории, в особенности для аэрокосмической сферы. Решением обозначенных проблем является использование имитаторов навигационных сигналов для тестирования НП в лабораторных условиях.

Одним из новых в сфере имитации НС является решение, реализуемое на базе векторных генераторов R&S SMBV100B и R&S SMW200A компании Rohde & Schwarz, которое, как будет показано ниже, предоставляет удобные и простые возможности для тестирования НП на устойчивость к спуфингу и джамингу.

## ДЕЙСТВИЕ ДЖАМИНГА НА НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИЕМНИКИ

Как было отмечено выше, джаминг включает две составляющие – многолучевость и промышленные помехи, однако они оказывают принципиально разное действие на НС.

Источником многолучевого приема обычно является высотная городская застройка, которая формирует большое количество взаимно смещенных по времени эхосигналов, отличающихся по поляризации и мощности. Наличие столь большого количества лучей может приводить к заметному уменьшению энергии сигнала от конкретного космического аппарата ССН за счет замираний, а также изменять фазочастотную характеристику канала приема, формируя выбросы и провалы в спектре [3].

Влияние многолучевого приема следует рассматривать с позиции обработки НС в НП. Известно, что местоположение НП определяется путем измерения псевдодальностей до аппаратов ССН, находящихся в зоне видимости. При этом каждый из них формирует соответствующий код, который обнаруживается находящимся в режиме

поиска НП на основе корреляционной обработки. После синхронизации в каждом канале приема решение навигационной задачи осуществляется по значениям псевдодальностей, которые рассчитываются НП с заданной частотой, причем их изменения, вызванные движением носителя НП, отслеживаются по изменению положения пиков корреляционных функций. Исходя из этого, прием дополнительных лучей от тех же самых космических аппаратов будет приводить к расширению полосы слежения корреляторов и, соответственно, к повышению фактической погрешности определения координат. Таким образом, отраженные НС могут быть включены НП в обработку за счет появления конкурирующих пиков корреляционных функций, принципиально не отличимых от аналогичных для НС прямой видимости.

Для защиты от многолучевости НП используют специальные алгоритмы [4]. На этапе вхождения в синхронизацию используется широкая область поиска по доплеровскому сдвигу и запаздыванию, что обеспечивает захват НС за разумное время. После синхронизации полоса слежения значительно сужается, тем самым удается обеспечить исключение из рассмотрения отраженных сигналов с запаздыванием сверх некоторого значения. Однако сужение полосы слежения увеличивает вероятность потери синхронизации при резких перемещениях носителя НП, и поэтому лучшим вариантом являются такие алгоритмы, в которых полоса слежения является адаптивной по отношению к динамике движения.

Что касается второй составляющей джаминга, промышленных помех, то их источником являются побочные и внеполосные излучения передающих устройств, а также различные технические средства. При приеме НС из эфира мощность полезного сигнала на входе приемного тракта оказывается на 10–15 дБ ниже уровня теплового шума, а ее абсолютное минимальное значение для сигнала L1C/A составляет –128,5 дБм при приеме на антенну с усилением –3 дБи [5]. Ввиду этого перед проведением корреляционной обработки НС вначале поступают на маломощный усилитель, имеющий сравнительно небольшой входной динамический диапазон и наиболее подверженный действию промышленных помех. Их наличие способно приводить к перегрузке радиотракта НП и возникновению интермодуляции, блокирующей прием НС. В общем случае вероятность восприятия помех как НС ничтожно мала за счет их некоррелированности с псевдослучайными сигналами на основе C/A-кода, P-кода и других кодов, применяемых для формирования НС. В отсутствие перегрузки наличие помех шумового характера ведет к снижению энергопотенциала НС, рассчитываемого в НП в качестве характеристики качества приема в каждом канале.

Для защиты НП от промышленных помех применяют различного рода фильтры, препятствующие перегрузке

входного тракта, а также – в специальных случаях – антенны с особыми характеристиками направленности, также снижающие восприимчивость к многолучевости.

Таким образом, при работе НП джаминг может проявляться в снижении точности выдачи навигационно-временных определений, а в случае существенного уровня помех и многолучевости – в прекращении их выдачи и переходе НП в режим поиска НС.

## ДЕЙСТВИЕ СПУФИНГА НА НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИЕМНИКИ

Как отмечалось выше, спуфинг проявляется во включении в обработку НС, порожденных посторонними источниками для намеренной модификации НВО. В отличие от джаминга, спуфинг является результатом преднамеренных действий, целью которых является навязывание потребителю ложных навигационно-временных определений. Поскольку встраивание отдельного НС с произвольной структурой в процесс обработки в НП весьма затруднено, то для реализации спуфинга применяют имитаторы ССН, формирующие комплексный НС, имитирующий группу космических аппаратов [6]. Спуфинг применяется в первую очередь для защиты от беспилотных летательных аппаратов, получающих НВО от ССН, которые могут быть использованы в целях незаконной фотосъемки объектов особого режима, а также в террористических целях.

Техническая реализация спуфинга оказывается весьма проста. В качестве источника ложного навигационного поля могут выступать генераторы ССН, а также средства воспроизведения записанных сигналов, например, из IQ-массива. Поскольку НП за исключением случаев использования сигналов военного назначения не защищены от подмены сигналов, то они могут выполнять обработку ложного НС так же, как истинного. Если уровень ложного сигнала на входе НП окажется выше, чем истинного, то он может перейти на слежение за ложными сигналами из-за большего значения корреляционной функции и спустя некоторое время выдаст ложные НВО, что является наихудшим случаем.

Возможные последствия захвата ложных НС определяются конечным потребителем. Очевидно, что уровень защиты НП от имитационных помех будет зависеть от уровня ответственности его применения и потенциальных рисков. Наиболее защищенными оказываются приемники, работающие по кодам закрытого характера [1]. В худшем случае гражданские НП переходят на выдачу НВО по ложному НС, и тогда появляются широкие возможности по имитации перемещения носителя НП. Навигационные приемники профессионального уровня всегда имеют алгоритмы контроля целостности [7], которые направлены на блокирование использования ложных НС в процессе расчета НВО. В их основе обычно

лежит анализ изменения НВО во времени, причем возникновение любых аномалий приводит к отказу от выдачи координатной информации либо установке признака ее недостоверности. Поскольку ложное навигационное поле формируется обычно в пределах некоторой локальной зоны, то при появлении в ее пределах носителя НП его расчетное положение меняется физически невозможным скачком. Дополнительно могут контролироваться уровень входного сигнала, системное время ССН, аномалии в расчете местоположения, характеристики группировки космических аппаратов в составе созвездия.

Таким образом, джаминг и спуфинг представляют собой явления, которые всегда снижают качество выдаваемых НВО. Ввиду этого в общем случае в состав тестовых процедур для НП необходимо включать соответствующие испытания.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕСТИРОВАНИЯ НП НА СТОЙКОСТЬ К СПУФИНГУ И ДЖАМИНГУ

Оценка качества работы НП при наличии джаминга и спуфинга имеет важные особенности, которые следует учитывать при ее проведении. Основная из них заключается в том, что тестирование является провоцирующим, то есть намеренно создаются условия для ухудшения качества функционирования НП.

При работе имитаторов НС задействованы весьма сложные алгоритмы, что обусловлено потребностью в формировании суммарного сигнала, эквивалентного поступающему на антенну от реальной группировки космических аппаратов, причем для каждого аппарата имитируется движение по орбите, доплеровский сдвиг несущей из-за наличия радиальной скорости, дальномерный код, эфемериды, ионосферные и тропосферные ошибки и т. д. Ввиду этого само формирование имитируемого НС может сопровождаться неточностями, которые могут являться потенциально значимыми для ухудшения работы НП даже в отсутствие имитации деградации или подмены НС.

При тестировании НП в части влияния джаминга и спуфинга пользователь должен быть уверен в том, что измененные показатели стойкости являются объективными, а дополнительные погрешности определения НВО не связаны с работой имитатора полезного сигнала. Ввиду этого следует ориентироваться на продукцию ведущих мировых производителей средств измерений.

Результатом тестирования на джаминг и спуфинг являются оценки ухудшения качества выдаваемых НВО при заданной модификации НС. В первом случае критерием обычно служит увеличение погрешности определения координат, привязанное к уровню помех либо выбранной модели многолучевости. Во втором случае обычно определяют превышение отношения мощностей ложного и истинного НС, при котором НП переходит на выдачу

НВО, полученных в результате обработки ложного НС, либо выдает признак недостоверности.

Имитация спуфинга, как следует из сказанного выше, требует использования двух имитаторов НС либо одного, но с большим количеством каналов, причем время перехода на ложный НС будет определяться не только соотношением мощностей, но и расположением спутников в имитируемых созвездиях, а также принятыми сценариями движения. С учетом этого во многих имитаторах [4] имеются библиотеки сценариев, соответствующих типовому перемещению носителей НП заданного класса (самолеты, корабли, автомобили и т. д.), которые рекомендуются к применению для тестирования НП в наиболее простых случаях.

С тестированием на стойкость к джамингу дела обстоят несколько иначе. Имитация многолучевости должна реализовываться с использованием специальных опций имитатора ССН. С другой стороны, имитация действия индустриальных помех, например со стороны базовых станций, может быть выполнена с использованием сторонних генераторов телекоммуникационных сигналов. Но такое решение не всегда дает объективные результаты измерений по причине того, что носитель НП обычно является подвижным, и в силу этого электромагнитная обстановка в точке приема НС также не является статичной. Изменяется и картина многолучевости. Именно поэтому для тестирования такого рода целесообразно использовать специальные опции, учитывающие эти, а также многие другие, особенности имитации движения носителя НП.

Из изложенного следует, что тестирование НП на стойкость к джамингу и спуфингу целесообразно проводить с привлечением специализированных средств измерений и аппаратно-программных опций. В этом смысле перспективным решением являются имитаторы ССН, построенные на аппаратной платформе векторных генераторов SMBV100B и SMW200A.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Карлащук В. И., Карлащук С. В.** Спутниковая навигация. Методы и средства. – М.: СОЛОН-Пресс, 2006. 176 с.
2. **Соловьев Ю. А.** Спутниковая навигация и ее приложения. – М.: Эко-Трендз, 2003. 326 с.
3. **Бұзов А. Л., Быховский М. А., Васехо Н. В. и др.** Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / Под ред. Быховского М. А. – М.: Эко-Трендз, 2006. 376 с.
4. **Шахтарин Б. И., Сизых В. В., Сидоркина Ю. А. и др.** Синхронизация в радиосвязи и радионавигации / Под ред. Сизых В. В. – М.: Горячая линия-Телеком, 2011. 278 с.
5. Спецификация GPS. Документ IRN-IS-200J-001. – Интернет-ресурс <https://www.gps.gov>.
6. **Кривенков Д. В., Миронов К. В.** GPS-спуфинг. Принцип работы, его воздействие и слабые места. – Материалы V студенческой международной заочной научно-практической конференции «Технические и математические науки. Студенческий научный форум № 5 (5)». – М.: МЦНО, 2018. С. 38–44.
7. **Липкин И. А.** Спутниковые навигационные системы. – М.: Вузовская книга, 2001. 288 с.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1600 руб.

### НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ

**Дансмор Джоэль П.**

*Издание осуществлено при поддержке компании Keysight Technologies*

*Пер. с англ. и науч. ред. Е. Ю. Харитоновна, Е. В. Андропова, А. С. Бондаренко*

В книге рассмотрен широкий круг измерительных задач в СВЧ-диапазоне. В центре внимания – измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов. Приведены практические примеры измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители и др.

Автор книги – инженер-разработчик с 30-летним стажем – работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне: от компонентов сотового телефона до спутниковых мультиплексоров.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ- / СВЧ-устройств, занимающихся моделированием и тестированием как отдельных узлов радиоэлектронной аппаратуры, так и законченных изделий, к примеру систем спутниковой связи, радиолокации и радионавигации. Крайне полезной данная книга будет и в процессе обучения студентов радиотехнических специальностей.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2019. – 736 с.,  
ISBN 978-5-94836-505-3

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)