

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

Часть 2

Н. Лемешко, д. т. н.¹, А. Патшин²

УДК 621.396:621.317 | ВАК 05.11.08

В первой части статьи, опубликованной в третьем номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2020 год, было рассказано о действии на навигационные приемники различных помех (индустриальных; возникающих в результате многолучевого приема; сигналов, несущих ложную навигационную информацию) и об особенностях тестирования НП на стойкость к таким помехам. В данном номере рассматриваются функциональные возможности векторных генераторов компании Rohde & Schwarz для имитации навигационных сигналов при оценке качества работы НП в условиях помех и приводятся примеры тестирования НП.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЕКТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ R&S В ЧАСТИ ИМИТАЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ НП В УСЛОВИЯХ ДЖАМИНГА И СПУФИНГА

Имитаторы сигналов ССН могут выпускаться как самостоятельные приборы либо функционировать на базе векторных генераторов. Последнее решение является более универсальным, так как векторные генераторы специально предназначены для создания радиосигналов со сложными видами модуляции и потому являются универсальными приборами. Основные требования, которым должна удовлетворять их аппаратная платформа, состоят в достаточности полосы модуляции и стабильности опорного генератора на уровне 10^{-10} – 10^{-12} , обычно не требующейся для других областей радиоизмерений за исключением разве что тестирования ретрансляторов для телекоммуникационных сетей поколения 4G+.

Имитаторы на базе приборов R&S SMBV100B и R&S SMW200A поддерживают ССН GPS, Galileo, BeiDou и ГЛОНАСС, включая режим дифференциальной коррекции, осуществляемой по сигналам земных станций

радионавигации [8]. Они предназначены для проверки навигационного оборудования на соответствие требованиям спецификаций ССН путем выполнения стандартных и специализированных тестов, а также для оценки эффективности алгоритмов контроля целостности информации (receiver autonomous integrity monitoring, RAIM). Решение на основе векторного генератора R&S SMW200A имеет более широкие возможности, позволяя, например, имитировать прием на две, три или четыре разнесенные антенны за счет соответствующей конструкции радиотракта НП, а также моделировать наличие джаминга и спуфинга при помощи того же прибора. Во многом сходные возможности предоставляет имитатор на базе векторного генератора R&S SMBV100B.

Для ССН GPS векторные генераторы обоих типов формируют НС в диапазонах L1, L2, L5 с использованием кодов свободного доступа. Общее количество каналов формирования НС зависит от опций расширения и в приборах перечисленных типов составляет от 6 до 60 в зависимости от набора установленных опций. Наибольшее возможное их количество среди названных средств измерений обеспечивает генератор SMW200A, оно составляет 144, то есть достаточно для имитации НС видимых из данной точки пространства космических аппаратов, например НС всех диапазонов GPS и ГЛОНАСС

¹ АО «Корпорация «Комета», в. н. с., nlem83@mail.ru.

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

одновременно, а также – при необходимости – многолучевости. Имитаторы ССН позволяют учитывать ионосферные искажения и тропосферные эффекты.

Имитаторы снабжены библиотеками стандартных сценариев движения, которые соотносятся с типовыми областями применения НП и используются для проведения основных тестов, также они применимы для оценки качества работы НП при джаминге. Для имитации многолучевости используются специальные опции, например R&S SMBV-K108 или R&S SMW-108. Характеристики многолучевости могут задаваться в ручном или автоматическом режиме. В первом случае пользователь задает затухание сигнала, задержку/временной сдвиг, доплеровский сдвиг частоты и фазы несущей для каждого спутника по отдельности. Второй вариант предусматривает формирование пользователем сценария движения носителя НП в условиях близкого расположения отражающих объектов, в этом случае пользователь задает характеристики и координаты этих объектов. Имеется возможность формировать траектории с участками прекращения приема НС, позволяющие имитировать движение носителя НП в тоннеле, под мостами и в арках зданий.

Для упрощения и ускорения выполнения испытаний на устойчивость НП к джамингу в имитаторах ССН производства R&S имеются не только типовые сценарии движения, но и сопоставленные им типовые сценарии многолучевости, соответствующие, например, движению в городском квартале или городском «ущелье» (средняя высота застройки 20 и 30 м соответственно). Аналогичное решение предложено и для затенений в форме мостов, крытых паркингов и тоннелей. Это существенно ускоряет выход на готовность к тестированию НП, поскольку исключена необходимость формирования пользователем соответствующих сценариев [9].

Важно подчеркнуть, что, в отличие от характерного для систем наземного вещания единичного источника радиоизлучений, ССН имеют множество спутников, расположенных под разными угловыми направлениями по отношению к точке приема. Это существенно ограничивает непосредственное использование характерной для многих векторных генераторов функции фединга, например, в виде двенадцатилучевой модели с формированием канала Релея [10]. По этой причине для имитации многолучевости, однозначно связанной с рельефом местности, целесообразно использование отдельных каналов имитатора, в связи с чем для измерений такого рода наиболее подходящим является векторный генератор SMW200A как имеющий наибольшее их количество среди рассматриваемого оборудования.

Что касается промышленных помех в виде радиошума, а также сигналов вещательных станций, то для такого тестирования НП есть два варианта. Первый из

них – наиболее простой и продемонстрированный ниже – состоит в том, что векторный генератор формирует ССН с аддитивным широкополосным шумом с уровнем, обеспечивающим заданный пользователем энергетический потенциал. Второй вариант, предназначенный для наиболее ответственных случаев, предусматривает формирование ССН вместе с мешающими сигналами с учетом перемещения носителя НП относительно их источников. Такое решение принципиально реализуемо как на основе записей сигналов, полученных в ходе оценки электромагнитной обстановки в некоторой области пространства, так и с использованием специального программного обеспечения компании R&S.

Для оценки стойкости НП к спуфингу может быть использован один векторный генератор R&S SMW200A, способный при достаточном количестве каналов формировать как мешающий, так и полезный НС. Из описания [8] следует, что генератор данного типа позволяет одновременно имитировать практически любые причины ухудшения качества навигационных сигналов, что необходимо для наиболее ответственных областей применения средств спутниковой навигации, в том числе и тех, для которых носители НП характеризуются широким диапазоном скоростей и повышенной маневренностью.

Далее рассмотрим наиболее простые случаи тестирования НП на воздействие джаминга и спуфинга.

ПРИМЕРЫ ТЕСТИРОВАНИЯ НП НА СТОЙКОСТЬ К ДЖАМИНГУ И СПУФИНГУ

Объект исследований, оборудование и измерительная оснастка. Для проведения измерений был выбран навигационный приемник профессионального класса NovAtel OEM729, предназначенный для интегрирования в системы беспилотного управления транспортными средствами различного класса. Схема измерений и фотография измерительной установки представлены на рис. 1. В ее состав входили векторные генераторы R&S SMBV100B и R&S SMW200A, сигналы которых смешивались при помощи моста сложения SW2-900/2700 и далее подавались на вход НП. Потери в плечах моста при суммировании составляют 3,2 дБ, и для целей описанных ниже измерений их можно считать симметричными.

Для управления навигационным приемником и отображения результатов использовалось специальное программное обеспечение NovAtel Connect 2.3.2 [11], установленное на ноутбуке HP mini 110-370er. Подключение НП OEM729 к компьютеру выполнялось через USB-интерфейс и преобразователь ST Lab US4. Все измерения проводились без излучения в эфир с передачей сигналов в коаксиальном тракте.

Поскольку имеющийся навигационный приемник не предназначен для самостоятельного использования и не

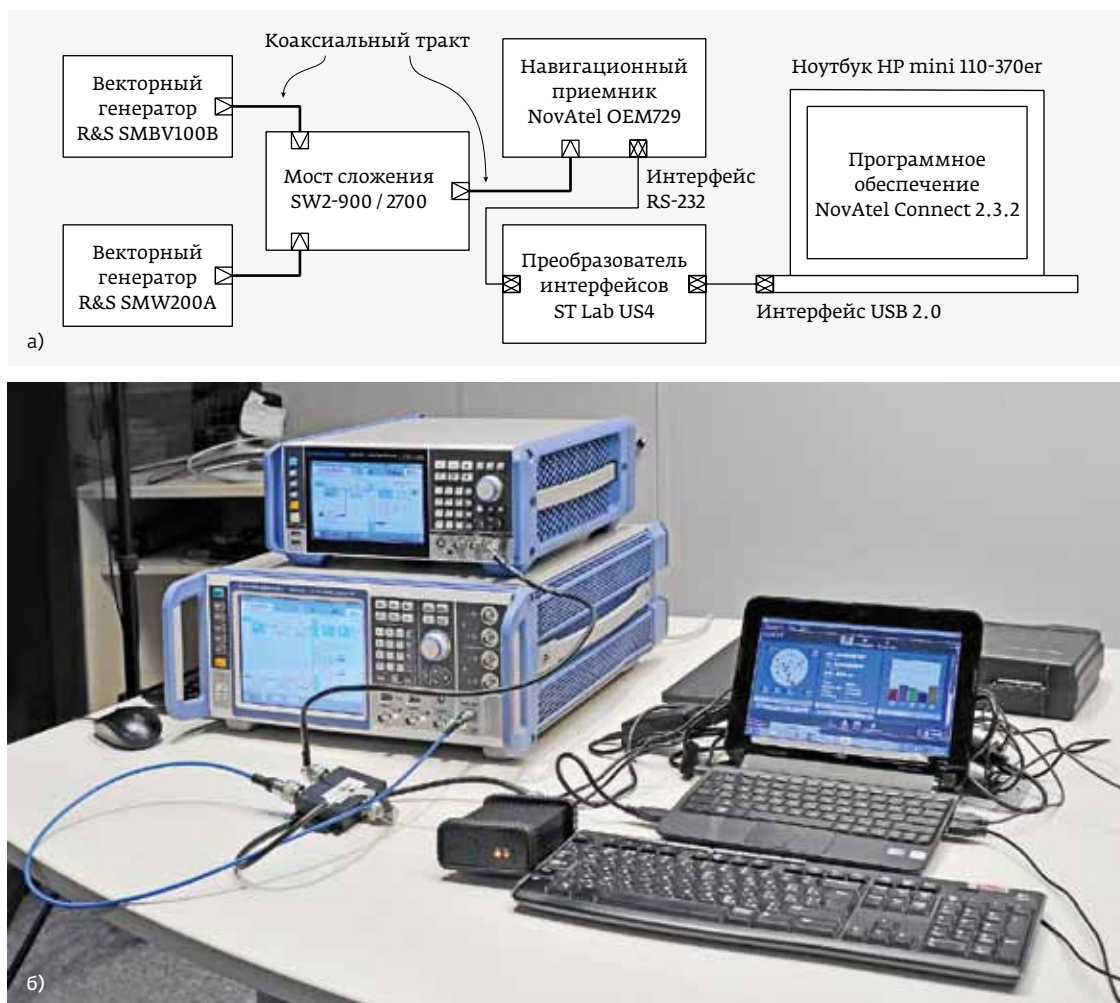


Рис. 1.
Измерительная установка:
а – схема;
б – фотография

имеет встроенных карт, то для оценки качества его работы, помимо значений текущих координат, использовались следующие параметры:

- HDOP – точность в горизонтальной плоскости, 2D-координаты;
- PDOP – точность положения в пространстве, 3D-координаты;
- VDOP – точность определения высоты;
- TDOP – точность по времени;
- GDOP – полная геометрическая точность, учитывающая координатные и временные погрешности.

Наиболее важным из перечисленных показателей является последний. В программном обеспечении NovAtel Connect 2.3.2 пороговые значения сигнализации ухудшения условий расчета навигационно-временных определений при измерениях были установлены по умолчанию.

Настройка режимов имитации ССН для векторных генераторов R&S SMBV100B и R&S SMW200A. Для работы в качестве имитаторов ССН данные векторные генераторы должны иметь подходящий набор опций в соответствии с описанием [8]. Генератору R&S SMBV100B также необходима опция R&S SMBVB-K520, генератору

R&S SMW200A – опции R&S SMW-B10 и SMW-B13 для формирования сигналов в реальном времени.

Оба названных прибора имеют одинаковый интерфейс управления в режиме имитации сигналов ССН, позволяющий интуитивно понятным образом задать основные параметры имитации. Первой операцией здесь является выбор режима работы векторного генератора, соответствующего имитации ССН, который выполняется в поле Baseband, как это показано на рис. 2. В общем случае генераторы R&S SMW200A имеют более широкие функциональные возможности как приборы высшего класса.

На рис. 3 представлено окно настройки видов имитируемых ССН и частотных диапазонов. В качестве примера показана настройка, при которой будут имитированы сигналы GPS L1 C/A, L2C и L5; Galileo E1 OS, E5a, E5b. В дальнейших экспериментах использовались только сигналы системы GPS.

Поскольку видимость тех или иных навигационных космических аппаратов определяется не только местом, но и временем, то на следующем этапе необходимо задать его для начала исполнения сценария движения.

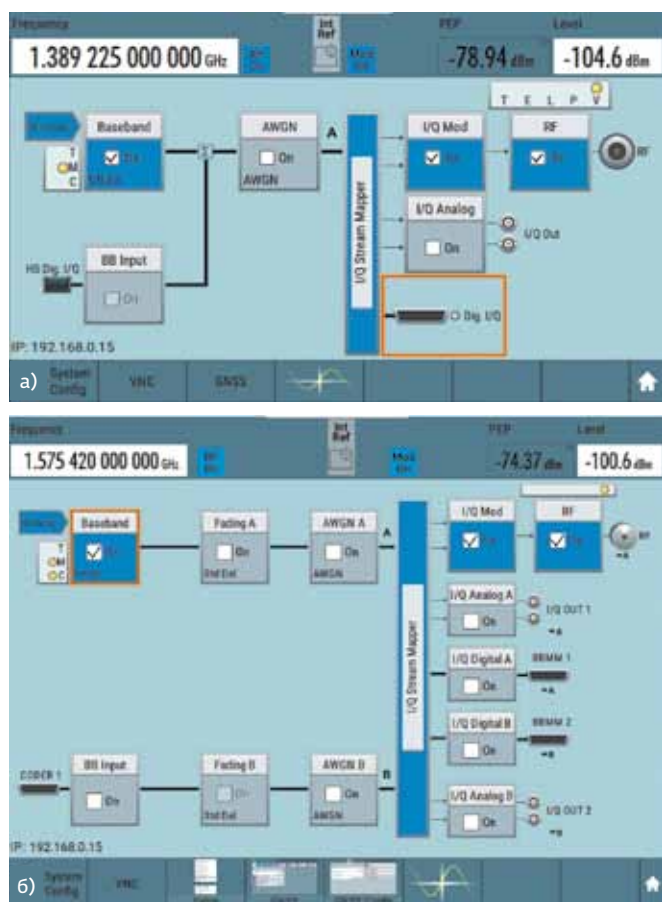


Рис. 2. Выбор имитации ССН в качестве режима работы векторного генератора: а – R&S SMBV100B; б – R&S SMW200A

В качестве примера на рис. 4 установлены дата 19.02.2014 и время 06:00. На основе этих данных рассчитывается время начала моделирования в системах отсчета времени соответствующих ССН. Важно отметить, что время начала сценария не привязано к какому-либо физическому времени, что дает возможность имитировать движение в будущем и прошлом времени.

На следующем этапе настройки выбирается сценарий имитируемого движения носителя НП. Векторные генераторы R&S SMBV100B и R&S SMW200A, как отмечалось выше, имеют библиотеку типовых сценариев. В экспериментах, результаты которых описаны ниже, полезный НС формировался для перемещения автомобиля по г. Мюнхен по траектории, имеющей форму квадрата со стороной 1000 м, как это показано на рис. 5. Длительность сценария составила 560,2 с. Сообразно выбранному сценарию, дате и времени начала его реализации для каждой ССН определяются видимые космические аппараты, часть из которых может быть при необходимости отключена (рис. 6). На этом настройку режимов имитации можно считать законченной.

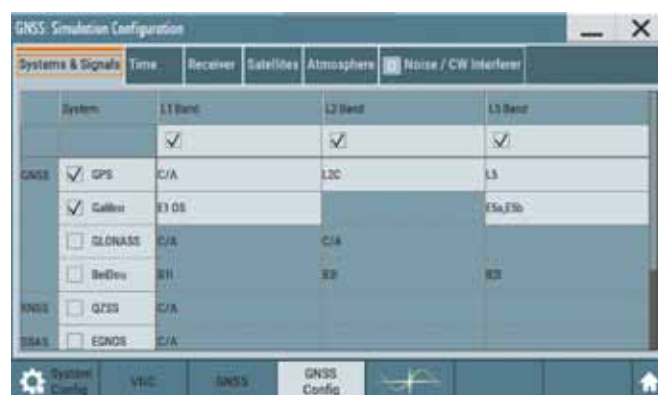


Рис. 3. Выбор ССН и диапазонов частот



Рис. 4. Установка даты и времени начала сценария

После запуска сценария на исполнение текущее состояние имитации ССН удобно контролировать по информации, представляемой в окне Simulation Monitor (рис. 7). В нем отображается созвездие навигационных космических аппаратов, уровень сигналов по диапазонам для каждого из них, а также текущие координаты и скорость движения.

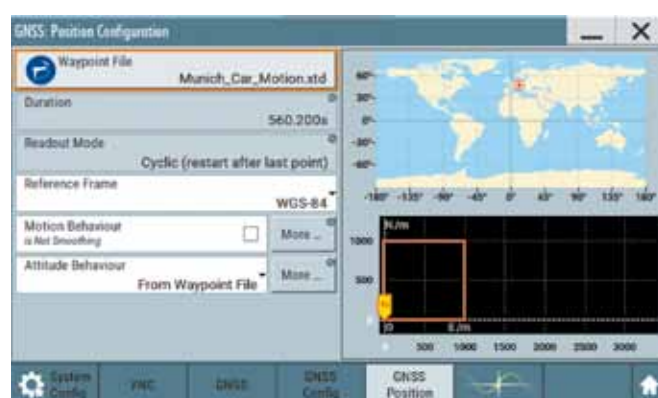


Рис. 5. Выбор сценария движения



Рис. 6. Настройка видимости космических аппаратов ССН GPS

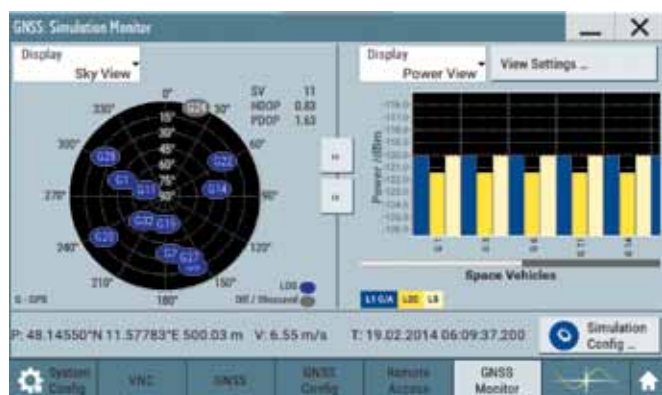


Рис. 7. Окно Simulation Monitor

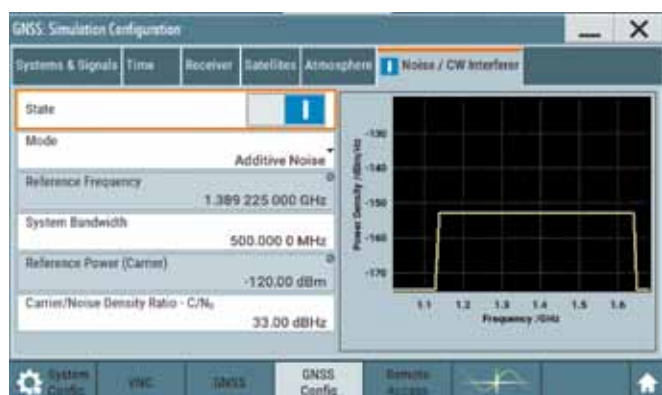


Рис. 8. Окно задания энергетического потенциала

Оценка стойкости НП к джамингу. Для проведения эксперимента был выбран наиболее простой вид джаминга в виде аддитивного гауссового шума, который может быть сформирован любым из использованных в схеме измерений векторных генераторов одновременно с НС. В схеме на рис. 1 для этого использовался генератор R&S SMBV100B, выход второго генератора

был отключен. Дата и время начала сценария были выбраны равными 05.10.2033, 05:30. Выполнение сценария носило циклический характер. Имитатор работал в режиме формирования сигналов GPS L1 C/A, L2C, L5. Мощность полезного сигнала L1 C/A составляла около -110 дБм.

Настройка уровня шума может производиться в категории отношения «сигнал / шум», однако для НС принято использовать понятие энергетического потенциала [12], равного отношению мощности несущей к спектральной плотности шума. Его значение может быть задано при помощи окна, представленного на рис. 8. Важно подчеркнуть, что шум может генерироваться в полосе до 500 МГц, то есть, например, для GPS он перекрывает одновременно диапазоны L1, L2 и L5. Результаты измерений представлены на рис. 9, причем установлено, что для помех рассматриваемого типа пороговое значение энергетического потенциала составляет 33 дБГц. При таком его значении имеющийся НП еще выдавал НВО при значении GDOP менее 2 м, что ниже предустановленного порога индикации ухудшения качества НС.

Как следует из рис. 9б, снижение энергетического потенциала до 32 дБГц приводит к резкому возрастанию погрешностей (значение GDOP увеличивается до 3,2 м), причем НС некоторых космических аппаратов в созвездии воспринимаются имеющими ошибки (подсвечены желтым цветом). В общем случае тестирование на

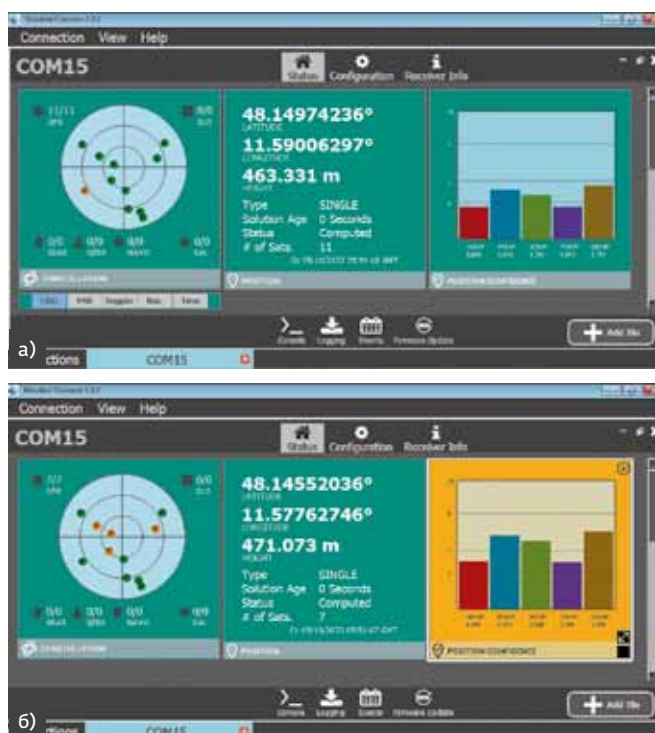


Рис. 9. Результаты обработки НС с энергетическим потенциалом, равным: а – 33 дБГц; б – 32 дБГц

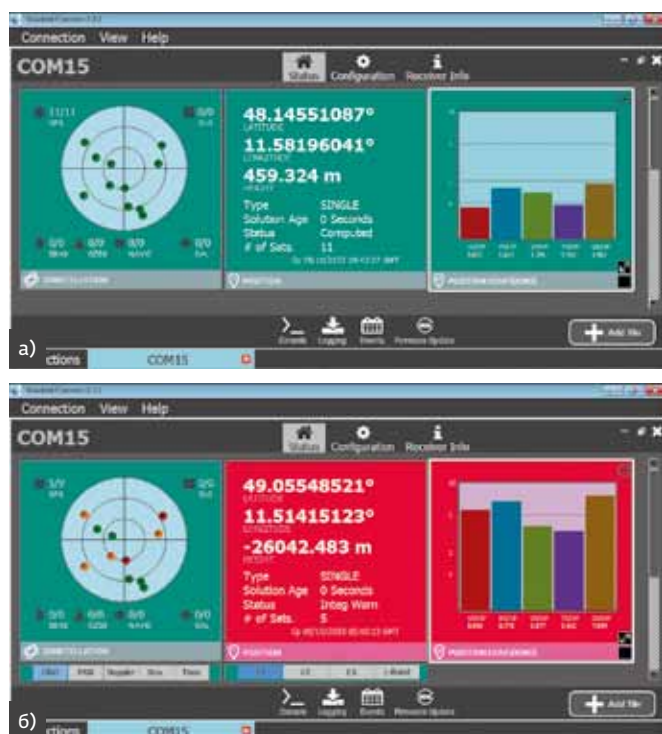


Рис. 10. Результаты обработки НС: а – при уровне ложного НС менее –90 дБм; б – при уровне ложного НС, равном –88 дБм

стойкость к джамингу, вызванному другими видами воздействий, следует оценивать в категориях защитных отношений [3], учитывая наличие собственного шума в радиотракте НП.

Оценка стойкости НП к спуфингу выполнялась с использованием двух различных сценариев, которые запускались одновременно на генераторах R&S SMBV100B и R&S SMW200A, причем совпадали дата и время начала имитации, а генератор R&S SMW200A формировал мешающий сигнал, соответствующий движению самолета над г. Мюнхен на высоте около 2500 м над уровнем моря. В этом случае имитируемое расположение навигационных аппаратов для обоих случаев будет весьма близким. Измерения выполнялись в следующей последовательности. После одновременного запуска названных сценариев вначале на вход НП подавался полезный сигнал с фиксированным уровнем –105 дБм. После выдачи навигационным приемником НВО включался альтернативный сигнал с мощностью –110 дБм, после чего по показаниям НП оценивалось качество выдаваемых НВО для ее значений, изменяемых в сторону увеличения с шагом в 1 дБ. При этом использовались сигналы GPS L1 C/A без дополнительных помех.

Результаты оценки качества работы НП при наличии спуфинга, представленные на рис. 10, свидетельствуют о том, что наличие постороннего сигнала GPS

мало влияет на значения оценок погрешностей НВО до тех пор, пока мощность ложного НС не достигнет –88 дБм. При таком соотношении мощностей резко возрастает значение GDOP, высота перестает определяться правильно, определяемая НП широта меняется примерно на 0,9°, что соответствует смещению примерно на 50 км. Однако НП следует отдать должное – смешанный сигнал не воспринимается им как истинный, выдается признак недостоверности НВО. Оценка значения GDOP составляет около 8 м.

Таким образом, после захвата НС исследованный образец НП нормально функционирует, если мощность ложного НС не более чем на 20 дБ выше, чем НС, принятого в качестве полезного.

Представленные примеры демонстрируют простоту и удобство реализации тестирования навигационных приемников на устойчивость работы при наличии джаминга и спуфинга при имитации НС векторными генераторами R&S SMBV100B и R&S SMW200A.

Таким образом, оценка качества работы НП при воздействии джаминга и спуфинга должна проводиться с использованием специальных аппаратно-программных опций, способных предельно близко к реальности имитировать соответствующие деструктивные воздействия на НС. При этом полный цикл тестирования НП может быть реализован с минимальным объемом подготовительных операций при применении векторного генератора R&S SMW200A, на сегодняшний день являющегося одним из самых совершенных приборов этого класса. Дальнейшее эволюционное развитие систем спутниковой навигации, являющееся важной задачей общемирового масштаба, несомненно, будет сопровождаться появлением соответствующих средств имитации и измерений, обеспечивающих отладку и сервисное обслуживание элементов ССН, например, работающих с дальномерными кодами новых типов.

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.
8. GNSS and Avionics Simulation for Rohde & Schwarz. Signal Generators Specifications. R&S®SMBV100B Vector Signal Generator. R&S®SMW200A Vector Signal Generator. – Version 08.00, February 2020. – 32 p.
9. Моделирование автоматического затенения и многолучевости для проведения испытаний приемников ГНСС в реалистичных условиях. Указания по применению. – 09.2013-1GP101_OE. – 48 с.
10. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. 1104 с.
11. Интернет-ресурс <https://novatel.com> (дата обращения 15.02.2020)
12. **Ширман Я. Д., Багдасарян С. Т., Маляренко А. С. и др.** Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Под ред. Ширмана Я. Д. – М.: Радиотехника, 2007. 512 с.

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 975 руб.

РАДИОЛОКАЦИЯ ДЛЯ ВСЕХ

**Верба В. С., Гаврилов К. Ю., Ильчук А. Р.,
Татарский Б. Г., Филатов А. А.**

Под ред. Вербы В. С.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 504 с.,
ISBN 978-5-94836-555-8

Настоящая книга одобрена научным советом Российской академии наук «Научные основы построения вычислительных, телекоммуникационных и локационных систем» отделения нанотехнологий и информационных технологий, возглавляемого академиком РАН Ю. В. Гуляевым, как научно-популярное издание

Представленный в научно-популярной книге материал можно назвать начальным курсом по радиолокации. В издании рассмотрены основные физические и теоретические вопросы радиолокации, принципы построения радиолокационных систем и основные области их практического использования. Рассмотренные в книге примеры типовых радиолокаторов и области их применений не исчерпывают весь возможный диапазон использования радиолокационной техники и принципов получения информации радиолокационными методами в повседневной жизни человека.

Изложение материала ведется в форме беседы специалиста в области радиолокации – профессора кафедры радиолокации, и студента, мало знакомого с радиотехникой и ее областью радиолокации.

Книга ориентирована в первую очередь на выпускников школ и студентов младших курсов технических вузов, может быть интересна и для студентов старших курсов радиотехнических факультетов, а также для всех интересующихся радиолокацией.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

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



ПАТРОНАЖ ТПИ РФ

21-23

СЕНТЯБРЯ 2020

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

Radel

XX МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА РАДИОЭЛЕКТРОНИКА & ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И КОМПЛЕКТУЮЩИЕ
- ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И ДРУГИЕ НОСИТЕЛИ СХЕМ
- СВЕТОДИОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ
- РОБОТОТЕХНИКА
- КОНСТРУКТИВЫ
- МАТЕРИАЛЫ
- ТЕХНОЛОГИИ
- ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТЫ
- КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ



radelexpo.ru (812) 777-04-07

ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ:

