

**ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК БОРТОВЫХ РАДИОВЫСОТОМЕРНЫХ
СИСТЕМ НА БАЗЕ ИМИТАТОРА ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ**

**А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков,
А. А. Иофин, В. В. Мухин**

Существующие комплексы полунатурного моделирования (ПНМ) для радиовысотомеров (РВ) и бортовых радиовысотомерных систем (БРВС) способны решать задачи имитации радиолокационных сигналов, отраженных только от одного отражателя либо от нескольких отражателей на несущей частоте, но без управления их характеристиками или без учета смены параметров модуляции излучаемого сигнала. При непрерывном зондирующем сигнале (например с частотной модуляцией) смена параметров модуляции может производиться в начале каждого периода модуляции. Современный уровень техники позволяет реализовать комплекс ПНМ с динамическим управлением параметрами моделирования с помощью ПЭВМ и современных модулей цифровой обработки сигналов (ЦОС) даже при переменных параметрах модуляции, когда отраженный сигнал должен формироваться на основе текущего излучаемого сигнала.

Для качественного исследования точностных характеристик БРВС требуется симитировать условия: траекторию и эволюции летательного аппарата (ЛА), тип подстилающей поверхности, близкие к реальным. При этом для снижения аппаратных требований к имитатору отраженного от подстилающей поверхности сигнала можно учесть, что достаточным условием является идентичность усредненных характеристик в течение периода модуляции, так как схемотехника БРВС всегда проводит усреднение по длительности периода модуляции. Например, для РВ с анализатором дальномерного спектра имитируемый сигнал может иметь различные временные параметры внутри периода модуляции, но получаемый на входе частотного дискриминатора сигнал должен иметь тот же спектр. При практической реализации комплекса ПНМ целесообразно учесть, что имитация отражения от статистически однородной шероховатой поверхности с достаточной степенью точности может быть обеспечена при использовании ограниченного числа имитируемых блестящих точек по причине наличия ненулевых ошибок и ограниченности разрешающей способности самой исследуемой БРВС.

Имитатор отраженного сигнала, построенный на базе ПЭВМ и модулей ЦОС, предлагаемый далее на примере комплекса ПНМ для РВ с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), позволяет осуществить имитацию канала распространения сигнала от передатчика до приемника: распространение в окружающей среде и отражение сигнала от протяженной подстилающей поверхности с заданными характеристиками.

***Обзор возможностей и требований для реализации алгоритмов имитации
с использованием методов цифровой обработки сигналов***

Сформулируем общие требования для построения комплекса ПНМ для имитации отраженных сигналов для БРВС с использованием методов ЦОС:

1. Качественное преобразование излучаемого сигнала с возможностями управления всеми параметрами имитации непосредственно на СВЧ сложно для реализации, поэтому формирование лучше выполнять на низкой частоте в рабочей полосе блоков ЦОС, но с сохранением всей полосы частот. Соответствующее требование к аппаратуре ЦОС (при работе с типовыми РВ): диапазон частот обрабатываемых сигналов не меньше $F_b = 200$ МГц. Тогда требуемая частота дискретизации АЦП $\Delta t \leq (2F_b)^{-1} = 2,5$ нс.

2. Для БРВС непрерывного излучения форма зондирующего сигнала является переменной, поэтому для имитации отраженного сигнала остается только одна возможность – формировать отраженный сигнал в виде сумм нескольких копий излучаемого сигнала с задержками, амплитудами, доплеровскими сдвигами, соответствующими заданным параметрам моделирования.

3. Необходимое число слагаемых – сигнальных каналов может быть определено из знания параметров модуляции БРВС и параметров обстановки и движения ЛА. Основными параметрами являются высота, ширина ДНА и ДОР, разрешающая способность РВ по высоте. Для типовых ЛЧМ РВ высотам 50–500 м соответствуют 20–200 требуемых гармоник дальномерного спектра сигнала биений.

4. Значения имитируемых высот при ЦОС реализуются с помощью линий задержки (ЛЗ) на базе массива в памяти ОЗУ. Для БРВС с непрерывным излучением рабочий диапазон высот до 5 км. Тогда с учетом расширения спектра на 30 % требуемая максимальная величина задержки $\tau_{\max} \geq 44$ мкс. Требуемый размер памяти ОЗУ для ЛЗ, с учетом частоты дискретизации Δt АЦП, составит $\tau_{\max} / \Delta t \geq 17,6$ К ячеек соответствующей АЦП разрядности.

5. При проверке функциональных характеристик БРВС желательна проверка движения ЛА с заданными скоростями. Для корректного формирования отраженного сигнала требуется аппаратная имитация доплеровских сдвигов, соответствующих относительной скорости ЛА и длине волны излучения. Для наиболее скоростных ЛА достаточная величина значений $\Delta f_{\max} \geq \pm 32$ кГц.

6. Для формирования имитируемого сигнала имитатор должен обеспечивать не только задержку и преобразование частот спектра, но и вносить ослабление сигнала в соответствии с параметрами моделирования. Требуемый диапазон значений коэффициента затухания для управления аттенуатором определяется диапазоном высот БРВС. Для оценки потенциала (чувствительности) БРВС требуются большие значения коэффициента затухания: $E_{\max} \geq 160$ дБ для типового ЧМ РВ.

7. Для корректной цифровой обработки сигналов и максимального использования динамического диапазона АЦП/ЦАП общее ослабление сигнала целесообразно выполнять двумя управляемыми аттенуаторами: 1-й обеспечит подачу на вход АЦП оптимального по уровню сигнала, а второй установит общую степень затухания до необходимой величины уже после ЦАП.

8. Для упрощения аппаратной реализации и улучшения качества моделирования суммирование копий излучаемого сигнала может быть заменено на микширование с частотой выше верхней частоты пропускания фильтра преобразованного на смесителе сигнала исследуемого РВ.

Вариант структуры комплекса ПНМ, отвечающий перечисленным требованиям, приведен на рис. 1.

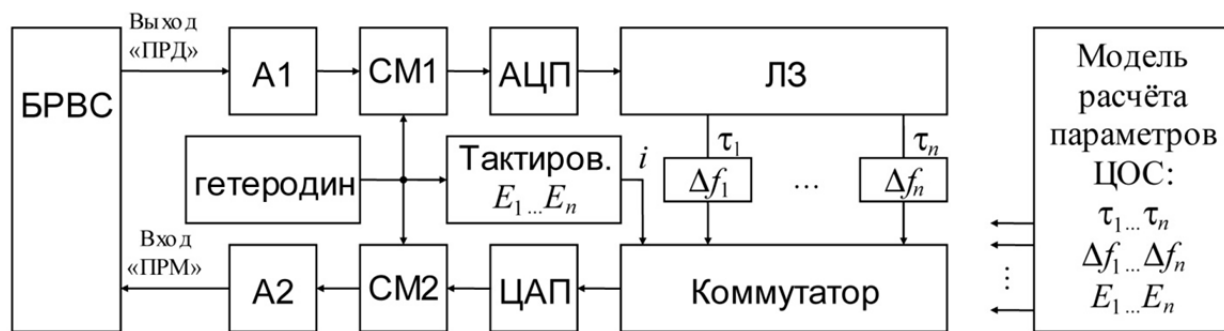


Рис. 1. Структура комплекса ПНМ с использованием методов ЦОС

Модель расчета параметров ЦОС в режиме реального времени проводит расчет и установку значений задержек $\tau_1 \dots \tau_n$, амплитуд $E_1 \dots E_n$ и доплеровских сдвигов $\Delta f_1 \dots \Delta f_n$, соответствующих заданным параметрам моделирования. Коммутатор осуществляет микширование во времени – подключение i -го входного сигнала ко входу ЦАП, с очередностью и длительностью, заданной блоком тактирования, на основе значений $E_1 \dots E_n$ для n сигналов.

Общая точность и качество моделирования будут зависеть от числа уровней квантования сигналов и параметров модели, частоты дискретизации, собственных шумов аналоговых цепей и преобразователей, такта расчета и обновления параметров имитации.

Основу всех быстродействующих цифровых систем запоминания сигнала составляет *DRFM* (*digital radio frequency memory*) – цифровая память радиосигнала. Основное назначение таких СБИС – комплексы радиоэлектронной борьбы. Например, в [1] описан имитатор ложной цели корабля. В данном имитаторе применялась «связка» из *DRFM* и *ASIC* архитектуры под управлением высокопроизводительного микропроцессора.

Созданная для аналоговичных применений отечественная СБИС 1879ВМ3 предназначена для предварительной обработки широкополосных радиосигналов, формирования потока данных для вторичной обработки цифровым процессором сигналов, восстановления радиосигнала после вторичной обработки. СБИС представляет собой быстродействующую систему запоминания и обработки сигналов класса «система на кристалле» со встроенными аналого-цифровыми (АЦП) и цифроаналоговыми (ЦАП) преобразователями, которая может использоваться в системах цифровой обработки сигналов.

Применение такой элементной базы может применяться и для построения имитаторов отраженных сигналов для БРВС в режиме реального времени.

В 2004 г. совместно в НИИ РАСЛА УрФУ и на предприятии ОАО «УПКБ "Деталь"» был создан имитатор одиночной точечной цели ИЦ-БСУ для РЛС на базе СБИС 1879ВМ3(DSM) [2]. ИЦ-БСУ успешно эксплуатируется в составе комплекса полунатурного моделирования в ГосНИИАС и на предприятия ОАО «УПКБ "Деталь"». Использование в нем указанной СБИС позволило достаточно просто решить задачу имитации сигналов, отраженных точечной целью в диапазоне дальностей до десятков километров и скоростей до 1500 м/с при произвольной модуляции зондирующего сигнала.

Имитация сигналов, отраженных от протяженных поверхностей, является существенно более сложной задачей, так как требуется формирование сигнала, образованного суммой парциальных сигналов, отраженных различными элементами поверхности с задержками и доплеровскими сдвигами, непрерывно распределенными в некотором диапазоне задержек и частот. Прямой метод имитации, основанный на суммировании сигналов, отраженных всеми элементами поверхности, приводит к недопустимо большому числу слагаемых – сигнальных каналов. Для ограничения числа сигнальных каналов целесообразно не исключать слабые отражения, а сгруппировать (и объединить по средней мощности) все близкие по параметрам сигналы, ограничив общее количество требуемых сигнальных каналов.

Структура программно-аппаратного комплекса полунатурного моделирования

Описанный подход к полунатурному моделированию отраженного сигнала для функциональной проверки и оценки характеристик БРВС можно реализовать на базе *PCI*-модуля MC23.01 [3], использующего СБИС 1879ВМ3(DSM).

Комплекс полунатурного моделирования состоит из блоков сопряжения БРВС с модулем ЦОС, самого модуля MC23.01 с интерфейсом *PCI*, ПЭВМ управления ходом эксперимента с контролем измеренной высоты и разовых команд, выдаваемых БРВС. Преобразование сигнала в модуле MC23.01 проводится на нулевой частоте с сохранением всей занимаемой им полосы, т.е. 100–200 МГц в зависимости от типа БРВС (рис. 2).



Рис. 2. Структура комплекса ПНМ на базе модуля ЦОС MC23.01

В структуре комплекса можно выделить два канала прохождения сигнала – входного и выходного (для высотомера) сигналов. При этом для реализации функций сдвига частоты в MC23.01 каждый сигнал представлен двумя квадратурными последовательностями: отсчетами вещественной и мнимой составляющей.

В верхнем на схеме канале сигнал с выхода БРВС поступает на аттенюатор «А1», необходимый для настройки оптимального для обработки уровня входного сигнала. Далее сигнал поступает в смеситель «СМ1», где переносится на нулевую частоту сигналом от гетеродина. С выхода смесителя сигнал поступает на вспомогательные согласующие усилители квадратур «Уi» и «Уq», с них – на квадратурные входы модуля MC23.01: входы мнимой составляющей «Вход I» и реальной – «Вход Q».

В нижнем канале с квадратурных выходов «Выход I» и «Выход Q» модуля MC23.01 сигнал поступает на входы согласующих усилителей «Уi», «Уq», осуществляющих предварительное усиление сигнала. С выхода усилителей сигнал поступает на второй смеситель «СМ2», который переносит его с нулевой частоты на исходную частоту несущей. Далее сигнал поступает на второй аттенюатор «А2», необходимый для задания требуемого затухания сигнала.

Для эффективного управления аттенюаторами и гетеродином в макетном образце имитатора сигналов предложено использовать микроконтроллер *Philips LPC214x* с USB интерфейсом. Измеренная высота и разовые команды поступают через модули сопряжения (в зависимости от типа РВ) в ПЭВМ для контроля и возможности последующего анализа результатов моделирования.

Основные принципы формирования отраженного сигнала на базе 1879BM3(DSM) показаны на рис. 3.

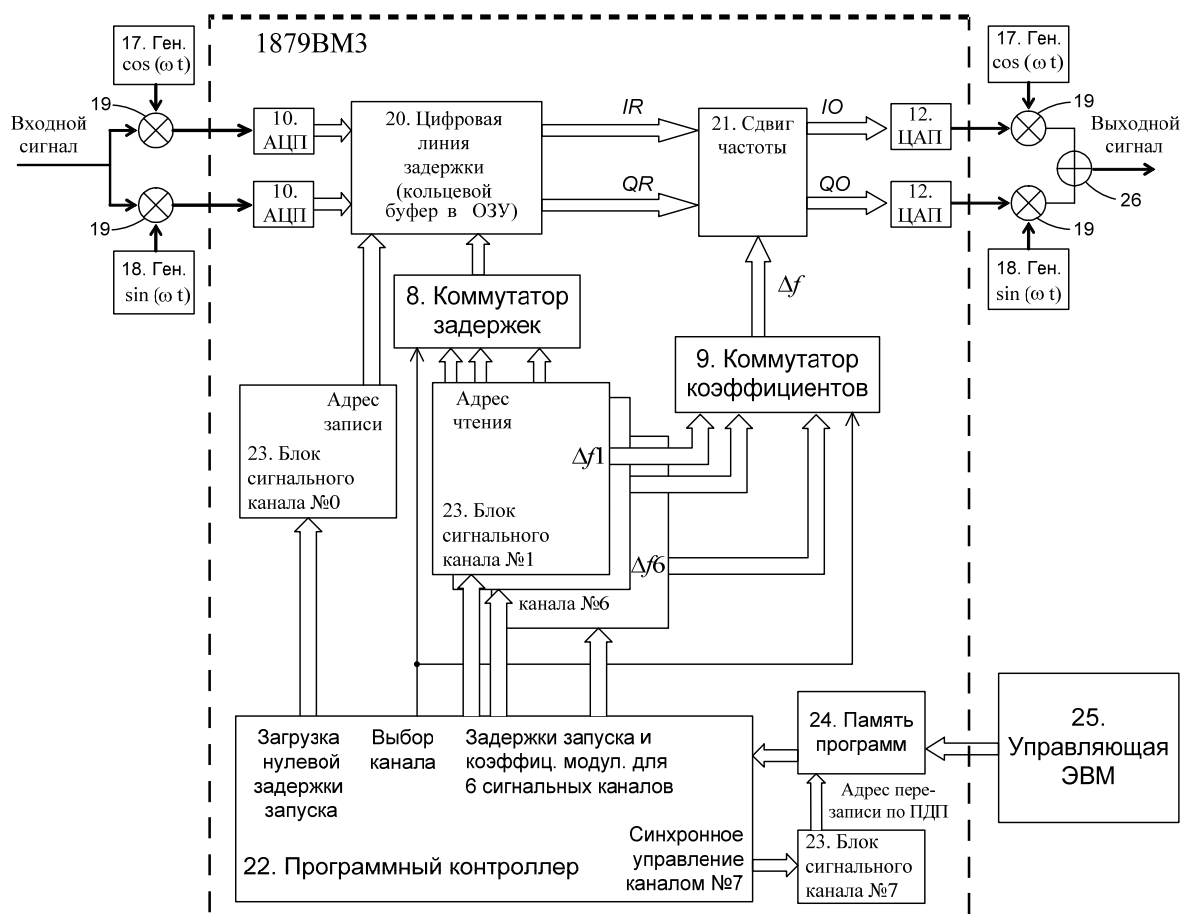


Рис. 3. Блок-схема цифровой обработки и формирования сигнала

В СБИС для реализации функций сдвига частоты входной и выходной сигналы должны быть представлены двумя квадратурными последовательностями – отсчетами вещественной и мнимой составляющей [3], поэтому входной сигнал предварительно умножается на сигналы с ге-

нератора $\cos(\omega t)$ и генератора $\sin(\omega t)$, а затем поступает на входы двух АЦП. Цифровая линия задержки реализуется в виде кольцевого буфера во внутреннем ОЗУ с отдельными портами для записи и чтения отсчетов сигнала. Аппаратная архитектура СБИС позволяет оперировать восемью сигнальными каналами с помощью одинаковых программируемых блоков сигнальных каналов, функция суммирования сигналов разных каналов отсутствует, поэтому к выходным ЦАП в одно время поступают квадратурные составляющие, преобразованные по параметрам одного выбранного блока сигнального канала.

Для имитатора радиолокационной цели при программной коммутации можно использовать шесть или семь сигнальных каналов, так как один канал всегда занят записью оцифрованного входного сигнала в кольцевой буфер в ОЗУ и еще один канал можно периодически или постоянно использовать для обновления данных моделирования из массивов параметров, размещенных в ОЗУ СБИС, например, в памяти программ. Программный контроллер работает по командам из памяти программ, выполняя основную функцию синхронизатора, путем поочередного выбора номера канала для управления коммутатором задержек и коммутатором коэффициентов с учетом параметров сигналов блестящих точек (интервалы смены выбранного канала пропорциональны амплитудам $E_1 \dots E_n$), размещенных в памяти программ.

Коммутатор задержек выдает в цифровую ЛЗ «адрес чтения» из кольцевого буфера в ОЗУ квадратурных составляющих оцифрованного сигнала, с выхода «адреса чтения» выбранного по номеру блока. «Адрес чтения» соответствует значению задержки из набора параметров $\tau_1 \dots \tau_n$. Коммутатор коэффициентов выдает в блок сдвига частоты значение доплеровского смещения частоты, с выхода « Δf » выбранного по номеру блока из набора коэффициентов модуляции – сдвига частоты $f_1 \dots f_n$.

В блоке сдвига частоты выполняется преобразование квадратурных составляющих сигнала IR, QR в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} IO &= IR \cdot \cos(2\pi\Delta f t) + QR \cdot \sin(2\pi\Delta f t), \\ QO &= QR \cdot \cos(2\pi\Delta f t) - IR \cdot \sin(2\pi\Delta f t), \end{aligned}$$

где Δf – доплеровское смещение частоты; t – значение счетчика реального времени.

Полученные в блоке сдвига частоты отсчеты вещественной и мнимой составляющей IO, QO поступают на входы двух ЦАП и далее умножаются на сигналы с генератора $\cos(\omega t)$ и генератора $\sin(\omega t)$, а затем поступают на сумматор, формирующий аналоговый выходной сигнал.

При этом СБИС 1879BM3(DSM) работает в циклическом режиме с воспроизведением на выходе задержанного и преобразованного входного сигнала сколь угодно большой длительности без разрывов, что дает возможность имитировать сигнал, отраженный от цели, при произвольном законе модуляции зондирующего сигнала без дополнительных синхронизирующих связей между имитатором и радиолокатором.

Характеристики комплекса полунатурного моделирования на базе 1879BM3(DSM)

Предложенная аппаратная реализация комплекса ПНМ может обеспечить имитацию работы БРВС в широком диапазоне параметров с ограничением высот до 19 км – при имитации протяженных поверхностей, 24,5 км – при имитации точечных отражателей (с шагом 2 м), 29 км при имитации точечных отражателей при снижении тактовой частоты модуля MC23.01 с 600 до 500 МГц. Результаты испытаний ИОС-РВ [4] для модели «точечного отражателя» и протяженной поверхности подтвердили возможность использования комплекса ПНМ для исследования точностных характеристик БРВС в статическом и динамическом режимах, в том числе при нестационарном движении над произвольной поверхностью.

Диапазон имитируемых скоростей ЛА до ± 10 км/с, с шагом 0,3 м/с. Динамический диапазон, обеспечиваемый пятью аттенюаторами выходного сигнала ИОС-РВ, 5:31,5 дБ = 157,5 дБ, с шагом 0,5 дБ. Такт обновления параметров моделирования ≥ 10 мс.

Погрешности представления эквивалентного дальномерного спектра сигнала биений набором гармоник в общем случае различны для разных типов БРВС и высот. По показаниям измеренной высоты можно оценить величины систематической, флуктуационной и динамической ошибок. Более полную оценку погрешностей с анализом влияния изменения параметров подсти-

лающей поверхности, эволюций ЛА, при движении по заданной траектории можно делать, анализируя выборочные дальномерные спектры сигналов биений исследуемых БРВС с ЧМ.

Заключение

Показано, что для реализации имитаторов сигналов для БРВС, с различными принципами измерения высоты, возможно и целесообразно использование современных процессоров цифровой обработки сигнала с функцией суммирования или коммутации выходных сигналов, получаемых путем задержки и ослабления излучаемого сигнала.

Имитация отражения от поверхности с достаточной степенью точности может быть обеспечена при использовании ограниченного числа каналов задержки зондирующего сигнала. Каналы задержки зондирующего сигнала могут быть реализованы в режиме разделения времени с помощью одного модуля ЦОС MC23.01 с переключением задержки с частотой коммутации, зависящей от ширины имитируемого эквивалентного спектра сигнала биений БРВС [5]. Параметры сигнальных каналов – задержка, амплитуда (или длительность коммутации) – обеспечивают заданные моделью положение и форму огибающей спектра сигнала биений, соответствующие требуемому значению высоты, типу БРВС и типу подстилающей поверхности.

Полученные с использованием ИОС-РВ методики полунатурного моделирования обеспечивают эквивалентные натурным испытаниям исследования технических решений и алгоритмов работы БРВС в статике и в динамических режимах, так как они основаны на изученных принципах многолучевого распространения и изменения параметров реальных радиолокационных сигналов.

Полунатурное моделирование системы с использованием ИОС-РВ обеспечивает проведение:

- исследований, отработки и оценки точностных характеристик дальномерного канала РВ и радиовысотометрных датчиков с ЛЧМ;
- исследований и оценки качества алгоритмов помехозащищенности для БРВС;
- отработки информационного взаимодействия БРВС с бортовой навигационной системой, в том числе в реальном масштабе времени;
- отработки математического обеспечения вычислительных алгоритмов бортовой аппаратуры с учетом динамики движения ЛА.

Для БРВС высокого разрешения для больших высот повышение числа каналов задержки зондирующего сигнала возможно с использованием нескольких модулей MC23.01 с суммированием выходных сигналов либо с помощью «размывания» спектра отдельных гармонических составляющих спектра флуктуациями их амплитуд или частотных сдвигов. Для «размытия» гармоник спектра сигнал каждого канала можно модулировать шумом с шириной спектра равной интервалу между частотами группировки.

Общая точность и качество моделирования будут зависеть от числа уровней квантования сигналов и параметров модели, частоты дискретизации, собственных шумов аналоговых цепей и преобразователей, такта расчета и обновления параметров имитации.

Как известно, характеристики ЭРИ и надежность РЭС сильно зависят от внешних воздействующих факторов, причем наибольшее число отказов элементной базы (более 21 % от общего числа отказов) приходится на повышение температуры корпуса ЭРИ или окружающей их среды. Поэтому для обеспечения оптимального теплового режима ИОС-РВ использованы современные методы теплофизического конструирования [6, 7], которые в заданных условиях эксплуатации позволили добиться максимального снижения перегревов примененной элементной базы и ИОС-РВ в целом и тем самым повысить его надежность.

Список литературы

1. Mixed-Signal ASIC Design for Digital RF Memory Applications / Michael J. Groden LNX Corporation 8B Industrial, James R. Mann Mann VLSI Research. – URL: <http://www.lnxcorp.com/Files/DRFM.pdf>
2. Имитатор отраженных сигналов радиолокационных систем / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Л. П. Воробьев, Н. А. Дядьков, В. В. Мухин, Ю. Г. Нестеров, А. И. Сиротин // Радиовысотометрия : тр. Первой Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : Изд. АМБ, 2004. – С. 164–168.
3. Инструментальный модуль MC23.01. – URL: http://www.module.ru/catalog/micro/instrument_23/
4. Боков, А. С. Оценка качественных характеристик бортовых радиовысотометров / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков [и др.] // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2010. – Т. 1. – С. 16–18.

5. Пат. RU 2486540 Имитатор ложной радиолокационной цели при зондировании сигналами с линейной частотной модуляцией / Боков А. С., Дядьков Н. А., Важеннин В. Г., Мухин В. В., Щербаков Д. Е., Пономарев Л. И. ; заявл. 05.12.2011 ; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18. – 13 с.
6. Иофин, А. А. Некоторые аспекты теплофизического конструирования РЭС / А.А. Иофин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2009. – Т. 1. – С. 63–65.
7. Иофин, А. А. Методика ускоренной комплексной оценки тепловых режимов РЭС / А. А. Иофин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 261–263.

Боков Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники информационных систем,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)

Важеннин Владимир Григорьевич

кандидат технических наук, доцент
кафедра радиоэлектроники информационных систем,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)

Дядьков Николай Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники информационных систем,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)

Иофин Александр Аронович

кандидат технических наук,
заместитель главного конструктора,
Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь»
(623409, Россия, г. Каменск-Уральский,
ул. Пионерская, 8)
E-mail: upkb@nexcom.ru

Мухин Владимир Витальевич

заместитель генерального директора-главного
конструктора по НИОКР,
Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь»
(623409, Россия, г. Каменск-Уральский,
ул. Пионерская, 8)
E-mail: upkb@nexcom.ru

Bokov Aleksandr Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics
of information systems,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Vazhenin Vladimir Grigor'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics
of information systems,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Dyad'kov Nikolay Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics
of information systems,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Iofin Aleksandr Aronovich

candidate of technical sciences, deputy chief designer,
Ural design bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky, Russia)

Mukhin Vladimir Vital'evich

deputy general director-chief designer,
Ural design bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky, Russia)

Аннотация. Имитатор сигналов для бортовых радиовысотометрических систем позволяет проводить наземные испытания и наладку с возможностью проверки функционирования в условиях, приближенных к реальным. Отраженный сигнал может быть получен как сумма либо как комбинация многих зондирующих сигналов, соответствующих отражению от основных блестящих точек подстилающей поверхности. Рассмотренный имитатор даже при переменных параметрах модуляции может формировать сигнал с учетом динамики движения летательного аппарата в режиме реального времени.

Abstract. A signal simulator for on-Board altimeters allows carrying out laboratory tests and adjustments, checking functioning in close to real conditions. The reflected signal may be obtained as sum or as combination lot of backscattering signals, corresponding to the reflection from many underlying surface bright points. Semi simulation platform, that can generate a real-time mode signal taking into account vehicle motion dynamics, even at variable modulation parameters, is discussed.

Ключевые слова: радиовысотомер, полунатурное моделирование, протяженная поверхность, частотная модуляция, цифровая обработка сигналов.

Key words: altimeter, semi simulation modeling, continuous surface, frequency modulation, digital signal processing.

УДК 629.7.058.42

Возможности исследования точностных характеристик бортовых радиовысотомерных систем на базе имитатора отраженных сигналов / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 86–93.