

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУНАТУРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА****А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков,
А. А. Иофин, В. В. Мухин**

Для проверки точностных и функциональных характеристик, экспериментального исследования показателей качества и надежности различных радиолокационных систем (РЛС), в том числе радиодальномеров и радиовысотометров (РВ) – измерителей высоты полета, можно использовать имитаторы сигналов, формирующих на входе РЛС эхо-сигналы радиолокационных целей и подстилающих поверхностей.

В зависимости от типа сигнала и способов сканирования РЛС оптимальными будут различные методы и алгоритмы формирования имитирующего сигнала. В современных РЛС могут использовать сигналы с переменными параметрами модуляции, зависящими от текущих значений дальности, уровня основного сигнала, уровня помех, соотношения задержек и уровней сигналов при многолучевом распространении. Перечисленные параметры определяются параметрами радиолокационного канала (среды распространения зондирующего сигнала) и на практике не являются постоянными из-за наличия движения целей или самой РЛС. Поэтому формирование отраженного сигнала и последующее его воспроизведение необходимо выполнять в реальном масштабе времени на основе текущей реализации зондирующего сигнала, сохраняя возможность последующей когерентной обработки в РЛС.

Аналогично в большинстве РВ с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в настоящее время реализуется следящий прием отраженного сигнала со стабилизацией дальномерной частоты за счет изменения параметров модуляции. При этом параметры зондирующего сигнала при движении над поверхностью имеют случайные вариации, обусловленные случайным характером даже мелких шероховатостей подстилающей поверхности. Этот факт исключает возможность предварительного расчета отраженного сигнала даже в случае детерминированной траектории движения и имитируемого рельефа подстилающей поверхности. При математическом моделировании отраженный сигнал можно представить и найти как сумму сигналов, отраженных всеми участками поверхности (в пределах облучаемой площади/объема пространства) или эквивалентными блестящими точками.

Известно устройство для имитации радиолокационных портретов – сигналов реальных целей (рис. 1 [1]), в котором зондирующий импульс от радиолокатора, для которого создается радиолокационный портрет, поступает через приемную антенну, усилитель, устройство грубой задержки, устройство точной задержки, набор модуляторов и сумматор на выход имитатора. Устройство грубой задержки осуществляет задержку по времени, соответствующую расстоянию до ближайшей блестящей точки имитируемой цели. Линия задержки с отводами обеспечивает имитацию блестящих точек цели. Амплитудные и фазовые модуляции выполняются с помощью эталонных сигналов, соответствующих характеристикам целей. С выхода модулятора сигналы, имитирующие соответствующие блестящие точки, поступают на сумматор и далее в передающую антенну.

Имитаторы такого типа на основе СБИС 1879ВМ3, размещенной на инструментальном модуле МС-23.01 [2], были созданы в ОАО «УПКБ «Деталь» – ИЦ БСУ, ИОС-РВ [3, 4]. Использование СБИС 1879ВМ3 позволило достаточно просто решить задачу имитации сигналов, отраженных точечной целью, в том числе при движении цели с дискретом по дальности около 2 м. При этом по результатам лабораторных испытаний [4, 5] минимальное значение имитируемой дальности (высоты) ограничивается возможностью модуля МС23.01 и задержкой в аналоговом тракте имитаторов и составляет около 15 м.

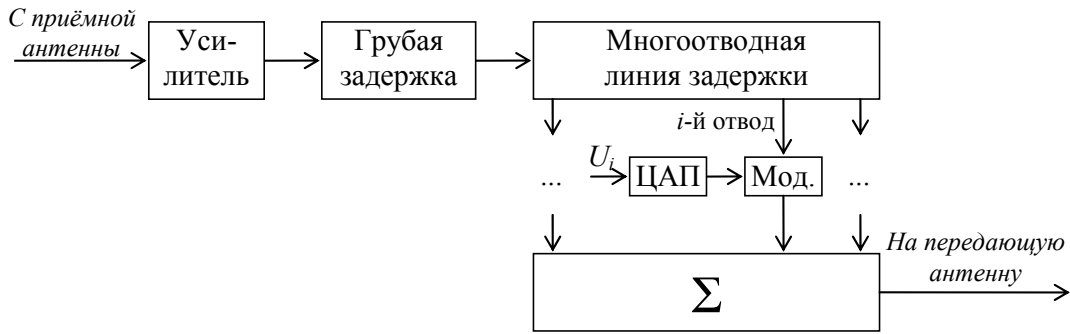


Рис. 1. Имитатор радиолокационной цели с высоким разрешением

Для расширения диапазона и уменьшения дискретности имитируемых параметров радиолокационных каналов с переменными параметрами возможно усложнение алгоритма формирования отраженного сигнала. Например, для уменьшения имитируемой дальности в существующей аппаратной реализации имитаторов сигналов для РВ возможно использование сдвига частоты [6]: РВ несимметричной ЛЧМ (НЛЧМ) будет регистрировать эквивалентную малую высоту, если при формировании сигнала выполнить дополнительный частотный сдвиг Δf в сторону «сближающую» на измерительном участке графики излученного $f_{и}(t)$ и формируемого/принимаемого $f_{с}(t)$ сигналов (рис. 2).

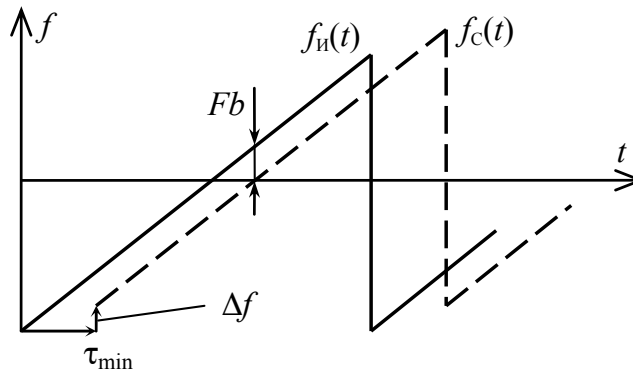


Рис. 2. Имитация эквивалентных малых высот для РВ с НЛЧМ

Дальность/высота в РВ с НЛЧМ оценивается по значению частоты биений на выходе смесителя: $f(t) = f_{и}(t) - f_{с}(t)$.

При несимметричной нарастающей «пиле» ЛЧМ (см. рис. 2) в основной части измерительного участка (исключая зоны обращения) $f(t) = \text{const} = Fb$. Видно, что положительный сдвиг частоты Δf для сигнала, задержанного на τ_{min} , приведет к уменьшению значения средней частоты биений Fb и, соответственно, к уменьшению измеряемой высоты.

Применение этого метода при симметричной ЛЧМ (СЛЧМ) с чередованием в каждом периоде измерительных интервалов с линейным ростом и спадом $f_{и}(t)$ даст два значения частоты биений, т.к. положительный сдвиг частоты Δf для сигнала, задержанного на τ_{min} , приведет к уменьшению значения Fb в одном полупериоде и к такому же увеличению Fb во втором полупериоде. Если бы вычислитель в РВ работал по переднему фронту спектра, то задача уменьшения измеряемой дальности была бы решена, но в серийных СЛЧМ РВ для уменьшения влияния вертикальной скорости (из-за эффекта Доплера происходит аналогичное смещение частоты принимаемого сигнала) выполняется усреднение измерений на всем периоде модуляции.

На рис. 3 приведен принцип формирования гармоник огибающей спектра сигнала биений при СЛЧМ: для уменьшения имитируемой высоты каждая гармоника с $\tau < \tau_{\text{форм}}$ заменяется на две гармоники, формируемые с $\tau = \tau_{\text{форм}}$, причем для первой ($f_{и}-f_{с1}$) делается положительный, а для второй ($f_{и}-f_{с2}$) отрицательный сдвиг по частоте Δf .

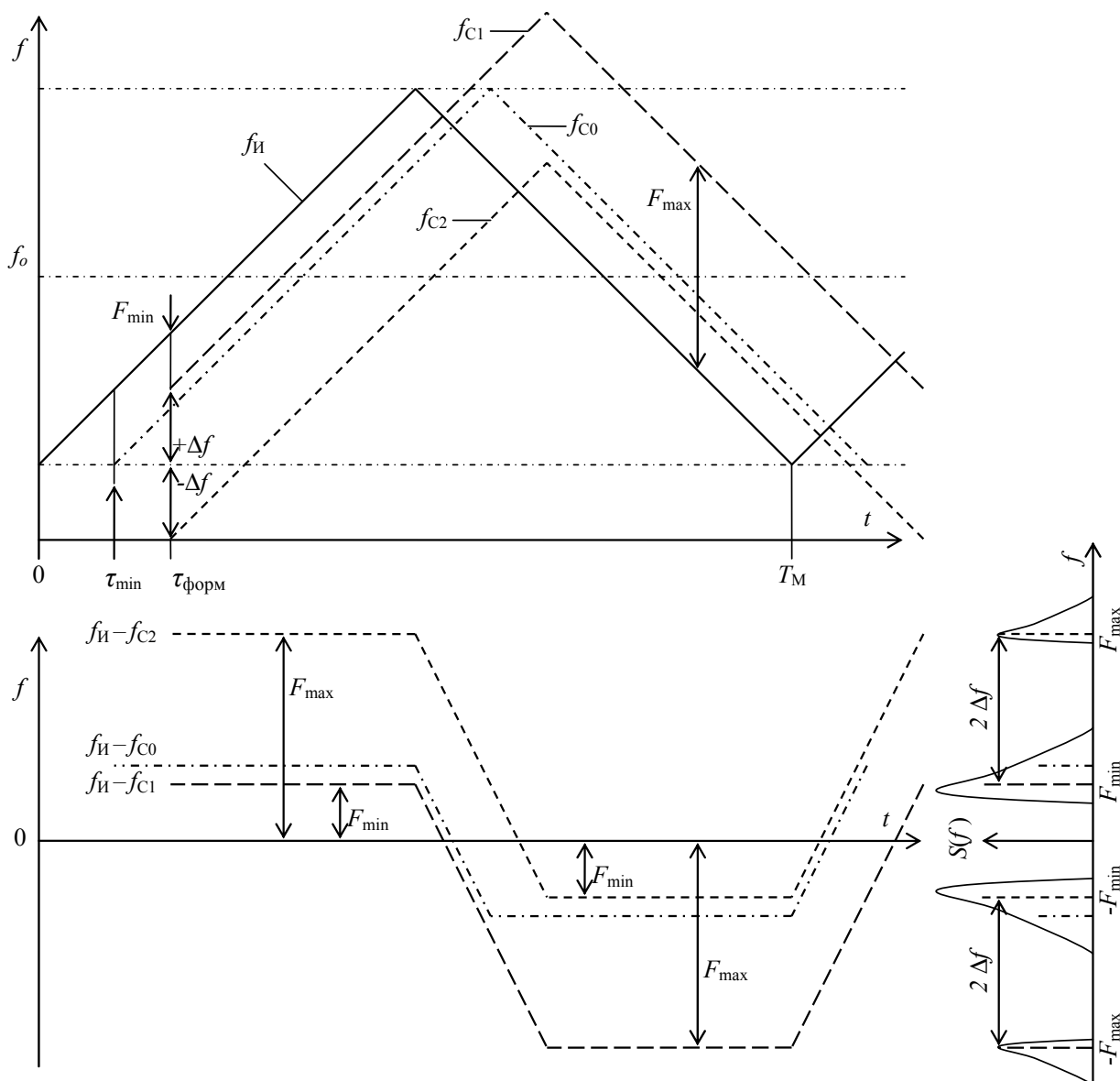


Рис. 3. Принцип формирования дальномерных гармоник спектра сигнала биений для имитации малых высот для РВ с СЛЧМ

В результате такого варианта получается раздвоение спектров в каждый момент времени (и в первом, и во втором полупериодах): гармоники с $t < \tau_{\min}$ сформируют две пары огибающих спектра, разнесенных по оси частот на $2\Delta f$. Варьируя только значение $\tau_{\text{форм}} \geq \tau_{\min}$, можно выбрать постоянное значение Δf , большее половины ширины полосы фильтра сигнала биений; вычислить задержку $\tau_{\text{форм}}$, соответствующую имитируемой высоте.

Необязательная, но улучшающая восприятие гармоника ($f_i - f_{c0}$) на рис. 3 соответствует сигналу с задержкой τ_{\min} без сдвига по частоте, ее положение в обоих полупериодах периода модуляции постоянно, и на рис. 3 она формирует хвостовую часть низкочастотной огибающей спектра сигнала биений.

В итоге при обработке в приемнике непрерывных сигналов высокочастотные гармоники будут подавлены или отброшены (т.к. по имитируемой дальности находятся далеко от цели), а измеренное значение дальности/высоты будет определяться по низкочастотной огибающей спектра с меньшим значением имитируемой высоты.

При этом для упрощения конструкции можно смещать по дальности весь радиолокационный портрет цели без анализа возможности имитации некоторой его части (например, гармоники f_{c0} на рис. 3) с применением только линий задержки.

Тогда для улучшения характеристик имитатора в схему рис. 1 необходимо добавить переменную линию задержки, два устройства сдвига частоты и второй сумматор (рис. 4).

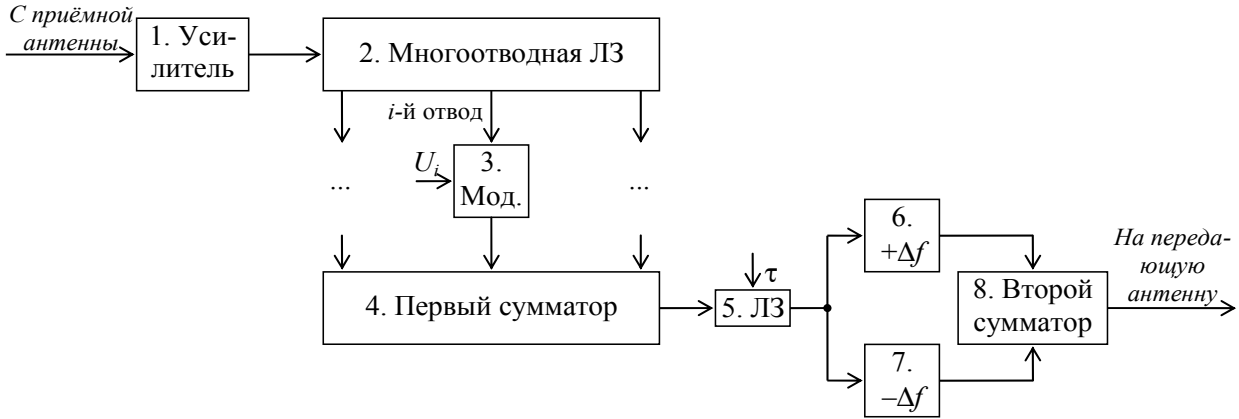


Рис. 4. Имитатор радиолокационной цели при зондировании сигналами с СЛЧМ-модуляцией

В зависимости от значения задержки τ в линии задержки выполняется имитация смещения имитируемой цели по дальности относительно дальности носителя:

- в меньшую сторону при $\tau < \tau_0 = \Delta f / V_f$,
- в большую сторону при $\tau > \tau_0$,

где τ_0 – задержка в имитаторе, при которой смещение цели отсутствует; V_f – модуль скорости линейного изменения частоты; Δf – параметр, выбираемый примерно равным или больше ширины избирательного фильтра захвата и сопровождения цели в РЛС.

При $\tau = 0$ и постоянном значении модуля скорости линейного изменения частоты РЛС положение имитируемой цели по дальности уменьшится на величину

$$\Delta R_{\max} = \frac{c \tau_0}{2} = \frac{c \Delta f}{2 V_f}, \quad (1)$$

где c – скорость света.

Особенностью описанного решения для построения имитатора является то, что независимо от направления и сочетания знаков скорости линейного изменения частоты РВ и РЛС с ЛЧМ имитируются две одинаковые цели, причем первая – основная цель может имитироваться на дальности меньше дальности носителя РЛС, а вторая цель будет отнесена по дальности на $2 \cdot \Delta R_{\max}$ и при соответствующем выборе значения Δf не будет мешать корректному слежению РЛС за основной целью.

При наземных испытаниях СЛЧМ РВ и РЛС описанное решение позволяет скомпенсировать собственную аппаратную задержку в цепях имитатора, уменьшить дискретность и обеспечить имитацию дальностей от 0 м при сохранении всех аппаратных и функциональных возможностей имитационного комплекса.

В современных РВ и РЛС с ЛЧМ для повышения точности работы может варьироваться не только знак, но и само значение скорости линейного изменения частоты. В этом случае зависимость ΔR_{\max} от V_f не является прямо пропорциональной, но может быть найдена при известном принципе работы радиолокатора в случае зависимости параметров линейной частотной модуляции от величины измеряемой дальности цели.

Предположим, что радиолокатор (или ЛЧМ РВ) выполняет слежение за дальностью (высотой над поверхностью РВ) цели H таким образом, чтобы частота сигнала биений была постоянной: $Fb = \text{const}$. Тогда, учитывая, что при СЛЧМ модуль скорости линейного изменения частоты $V_f = 2W/T_M$, где W – девиация частоты; T_M – период модуляции, получим

$$V_f = \frac{c Fb}{2H}. \quad (2)$$

В ряде случаев точные значения Fb , H , V_f не известны, поэтому желательно обеспечить работу имитатора радиолокационной цели с независимой оценкой текущих значений параметров линейной частотной модуляции. Непосредственное измерение текущих значений W и T_M затруднительно, так как требует применения сигнальных процессоров.

Но, в общем случае, возможна оценка значения V_f непосредственно по входному сигналу с использованием образцовой линии задержки на величину τ_{ref} и смесителя задержанного и незадержанного сигналов [7]. Для НЛЧМ и СЛЧМ видов модуляции частота сигнала f_{ref} , формируемого на выходе смесителя, будет пропорциональна искомому значению V_f :

$$V_f = \frac{f_{ref}}{\tau_{ref}}. \quad (3)$$

В качестве сигнала с образцовой линии задержки τ_{ref} может быть взят сигнал с любого удобного для последующей обработки выхода многоотводной линии задержки.

Для реализации независимого определения параметров линейной частотной модуляции, устройство (на рис. 4) дополнительно снабжено последовательно соединенными смесителем и устройством формирования задержки (рис. 5).

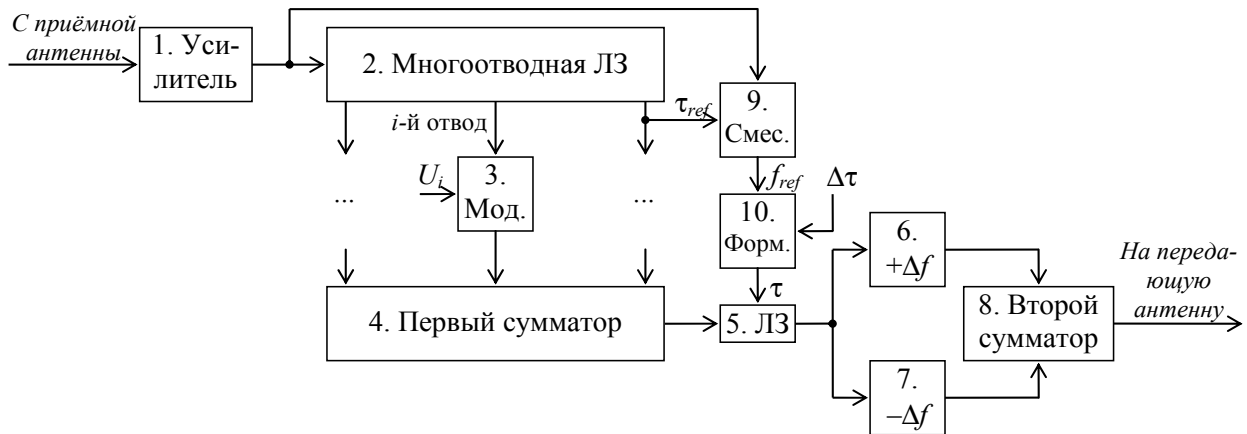


Рис. 5. Имитатор радиолокационной цели при зондировании сигналами с переменными параметрами ЛЧМ-модуляции

Устройство (на рис. 5) работает аналогичным образом, как и ранее описанное на рис. 4, но на входы смесителя поступают сигналы с выхода усилителя и с одного из выходов многоотводной линии задержки, таким образом на выходе смесителя формируется сигнал f_{ref} с помощью которого в устройстве формирования задержки $\Delta\tau$ по выражению (3) находится значение скорости изменения частоты V_f и далее по поступающей из внешнего устройства величине требуемого смещения сигнала по задержке « $\Delta\tau$ » и выражению (4) находится значение задержки τ для переменной линии задержки 5:

$$\tau = \Delta\tau + \Delta f / V_f - \tau_{int} = \Delta\tau + \Delta f \frac{\tau_{ref}}{f_{ref}} - \tau_{int}, \quad (4)$$

где τ_{int} – собственная (внутренняя) задержка в цепях имитатора; $\Delta\tau$ – требуемое смещение сигнала по задержке: при уменьшении имитируемой дальности или компенсации собственной задержки – значение со знаком минус.

Имитатор радиолокационной цели по схеме рис. 4, с заменой сумматора на эквивалентную коммутацию слагаемых сигналов [8, 9], был реализован на основе ИОС-РВ [4, 5] и экспериментально исследован с серийно выпускаемыми в ОАО «УПКБ «Деталь» НЛЧМ и СЛЧМ РВ. Полученные результаты подтверждают возможность имитации малых высот путем сдвига частоты и формирования двух пар огибающих спектра, разнесенных на достаточную величину.

На рис. 6 приведен пример зависимости измеренной высоты от времени, полученный при проведении испытаний СЛЧМ РВ А-052. Имитируемая начальная высота 10 м, вертикальная скорость: взлет 10 м/с, спуск -100 м/с, такт установки значений высоты 150 мс. В общем масштабе графики почти совпадают, а на увеличенном участке видна систематическая ошибка и замедленная реакция высотомера при изменении знака и величины вертикальной скорости.

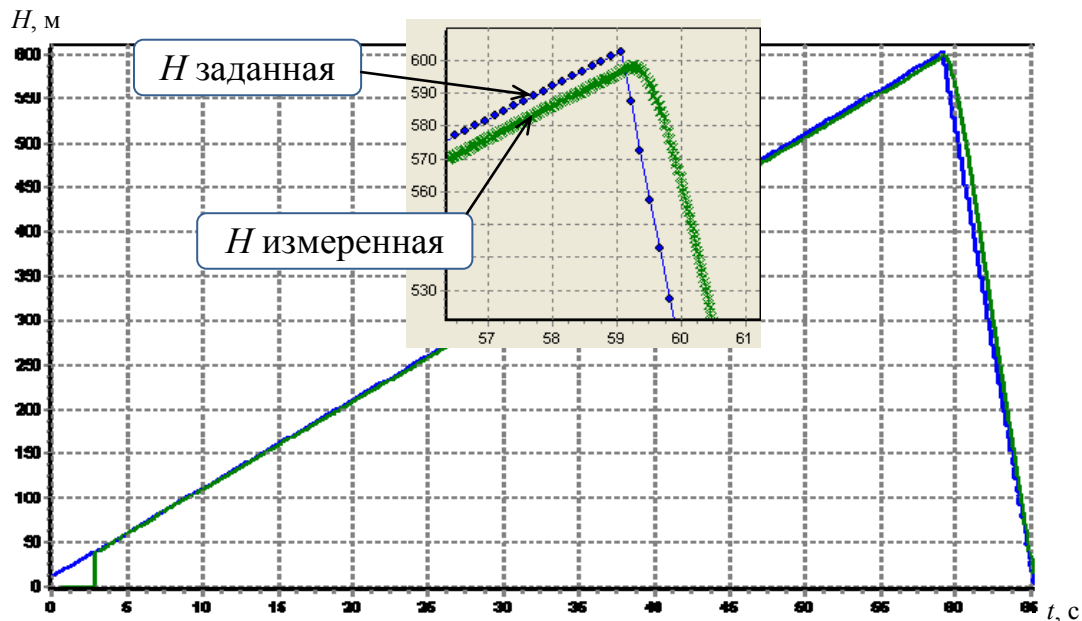


Рис. 6. Пример результатов испытаний РВ «в динамике»

На рис. 7 показан пример результатов проверки РВ при испытаниях вблизи и за пределами диапазона измерений. Приведена зависимость заданной и измеренной высоты от времени с примером отображения вида и времени разовых сигналов в форме автоматических описаний точек: в точке «а» при выходе высоты за рабочий диапазон (H измеренная становится выше 1535 м правее точки «а») «снимается» признак «исправность информации» и выдается нулевая измеренная высота; в точке «б» РВ выходит из режима поиска, признак «исправность информации» восстанавливается, измеренная высота соответствует заданной.

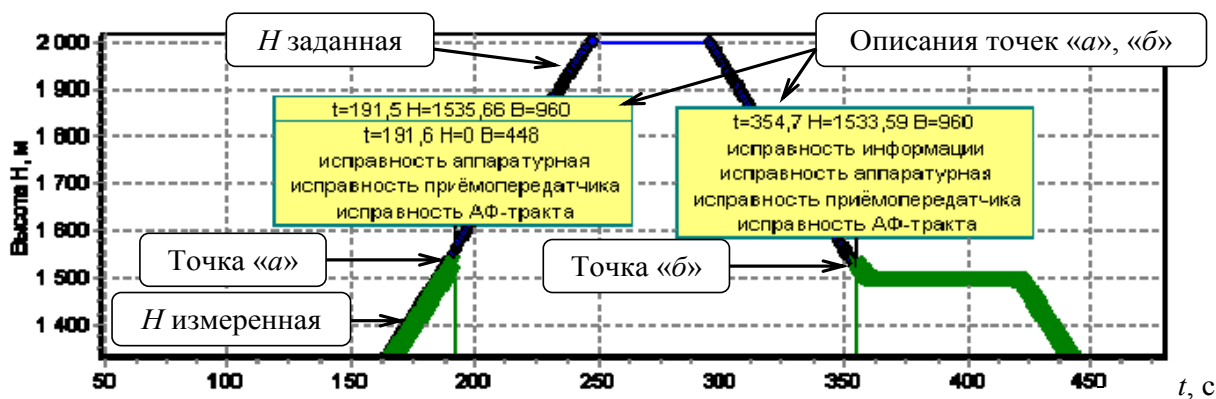


Рис. 7. Пример результатов проверки РВ при полунатурных испытаниях

Таким же образом можно оценивать и другие характеристики: время включения, задержку выхода РВ из режима поиска при временном отключении СВЧ-сигнала, выходе уровня сигнала или уровня помех за рабочие диапазоны значений.

Предложенная аппаратная реализация комплекса полунатурного моделирования обеспечивает имитацию работы РВС в широком диапазоне переменных параметров радиолокационного канала.

1) максимальная дальность до 19 км при имитации протяженных поверхностей, 24,5 км при имитации точечных отражателей, с шагом 2 м для импульсных сигналов или порядка 0,1 м при использовании сдвигов частоты ЛЧМ сигналов;

2) минимальная дальность/высота при имитации сигналов с непрерывной частотной модуляцией от 0 м (зависит от параметров модуляции и общей задержки в цепях имитатора);

3) диапазон имитируемых скоростей ЛА до ± 10 км/с, с шагом 0,3 м/с;

4) динамический диапазон, обеспечиваемый аттенюаторами выходного сигнала ИОС-РВ: до 157,5 дБ, с шагом 0,5 дБ.

Полунатурное моделирование радиолокационного канала с переменными параметрами движения целей и РЛС позволяет экспериментально исследовать показатели качества и надежности радиолокационных систем во всем диапазоне рабочих параметров, что, безусловно, важно для повышения безопасности воздушных полетов.

Список литературы

1. Перунов, Ю. М. Радиозлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю. М. Перунов, К. И. Фомичев, Л. М. Юдин ; под ред. Ю. М. Перунова. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : Радиотехника, 2008. – 416 с.
2. Инструментальный модуль МС23. 01 на базе СБИС «система на кристалле» 1879ВМ3. – URL: http://www.module.ru/catalog/micro/processor_1879bm3_dsm/.
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 – 2004 : тр. I Всерос. науч.-техн. конф. / под ред. А. А. Иофина, Л. И. Пономарева. – Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2004. – С. 164–168.
4. Оценка качественных характеристик бортовых радиовысотомеров / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин, Д. Е. Щербаков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2010. – Т. 1. – С. 16–18.
5. Принципы построения и алгоритмы работы имитатора сигналов бортовых радиовысотомерных систем в режиме реального времени / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 108–111.
6. Саломасов, В. В. Особенности имитации отраженного сигнала для РЛС с ЛЧМ / В. В. Саломасов, А. А. Щербаков // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30. – С. 84–86.
7. Patent 4661818 US. Electronically adjustable delay-simulator for distance-measuring apparatus operating on the frequency-modulated continuous wave principle.
8. Пат. 2504799 РФ. Имитатор радиолокационной цели при зондировании преимущественно длительными сигналами / Боков А. С., Дядьков Н. А., Важенин В. Г., Мухин В. В., Щербаков Д. Е., Пономарев Л. И. – Оpubл. 20.01.2014. – Бюл. № 2. – 12 с.
9. Полунатурное моделирование радиолокационного канала с переменными параметрами / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 125–129.

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)

Важенин 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)

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)

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@pexcom.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@pexcom.ru

Аннотация. Для лабораторных испытаний аппаратуры радиолокационных систем (РЛС) используют различные имитаторы сигналов. Предлагаемый имитатор позволяет проводить проверку функционирования всей системы в целом, включая антенны и приемопередатчики, в том числе при переменных параметрах канала распространения радиолокационного сигнала. Отраженный сигнал может быть получен как сумма либо как комбинация многих зондирующих сигналов, соответствующих отражению от основных блестящих точек подстилающей поверхности или радиолокационной цели. Приведены примеры и результаты экспериментальных исследований полунатурного моделирования работы серийных радиовысотомеров при переменных параметрах формирования отраженного сигнала.

Ключевые слова: полунатурное моделирование, радиолокатор, радиовысотомер, радиолокационная цель, цифровая обработка сигналов.

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)

Abstract. A variety of signals simulators can be use for laboratory testing radar systems (radar) instrumentation. The proposed simulator allows function verification of full system, including antennas, receivers and transmitters, in condition of variable parameters of channel distribution of radar signal. The reflected signal can be obtained as a sum or as combination lots of backscattering signals corresponding to the reflection from the many underlying surface or radar target bright points. Examples and experimental results of seminatural modeling with a serial radio altimeters at variable parameters of the reflected signal formation are given.

Key words: semi-natural modeling, radar, altimeter, radar target, digital signal processing.

УДК 629. 7. 058. 42

Экспериментальное исследование полунатурного моделирования радиолокационного канала /

А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 3 (11). – С. 91–98.