УДК 629.7.058.42, 621.396.96 DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-9

УЧЕТ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ В ИМИТАТОРЕ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ РАДИОВЫСОТОМЕРОВ

А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. В. Гусев, Д. Ж. Нагашибаев, А. А. Иофин

Введение

Для надежной всепогодной навигации летательных аппаратов (ЛА) применяют различные бортовые радиолокационные системы (БРЛС). Например, для измерения высоты полета ЛА относительно подстилающей поверхности используют радиовысотомеры (РВ).

Для качественной предполетной проверки функционирования БРЛС и РВ, в том числе при взаимодействии с другим бортовым оборудованием, могут использоваться комплексы полунатурного моделирования (ПНМ) или имитаторы отраженного сигнала. Для современных БРЛС и РВ характерно использование сложных видов модуляции с переменными или случайными параметрами, поэтому для корректной имитации при сохранении когерентности формируемого сигнала необходима адаптация работы имитаторов к параметрам излучаемого сигнала.

Основная часть

Один из вариантов построения имитаторов отраженных «эхо-сигналов» основан на выполнении непрерывного преобразования зондирующего СВЧ-сигнала с антенны передатчика БРЛС или РВ в некоторый отраженный сигнал, подаваемый на антенну приемного устройства, с учетом имитации движения ЛА по заданной траектории над имитируемой поверхностью. Подключение к БРЛС или РВ возможно с использованием пар приемо-передающих антенн (в том числе в безэховой камере), а также для повышения точности и исключения излучений, непосредственно СВЧ-кабелями.

Для возможности быстрого и точного управления параметрами имитации необходимо использовать методы цифровой обработки сигналов (ЦОС). Тогда для имитации отражения от точечной цели (для БРЛС) или зеркального отражения от подстилающей поверхности (для РВ) эквивалентность формируемого СВЧ-сигнала может быть обеспечена при выполнении следующих основных преобразований:

1) перенос зондирующего сигнала в область низких частот (в рабочую зону Найквиста – полосу работы аналого-цифрового преобразователя АЦП) и его оцифровка (с частотой дискретизации не менее удвоенной ширины полосы частот сигнала);

2) переменная задержка для имитации заданной переменной дальности (высоты для РВ);

3) переменное ослабление сигнала для имитации затухания в соответствии с дальностью распространения и типом отражающей поверхности;

4) для имитации эффектов доплеровского смещения частоты реализуется возможность переменного сдвига частоты (или фазы) формируемого сигнала;

5) цифроаналоговое преобразование (ЦАП) полученного сигнала и его перенос в исходную область СВЧ.

Пункты 2–4 для точечного (зеркального) отражателя могут быть выполнены в произвольном порядке, пункт 3 может быть распределен и частично реализован с помощью аналоговых атенюаторов до выполнения АЦП и/или после выполнения ЦАП.

Для многоточечных (распределенных по площади или объему) целей в зависимости от сложности дальностного и/или доплеровского портрета цели все или часть пунктов 2–4 могут быть реализованы для каждого точечного отражателя, а затем просуммированы. При этом возможны варианты экономии аппаратных ресурсов за счет временного разделения и совмещения ряда преобразований [1].

Для имитации доплеровского смещения частоты при ЦОС (пункт 4) сигнал предварительно должен быть разделен на квадратурные составляющие (возможные методы: квадратурный гетеродин, преобразователь Гильберта и др.).

Имитация переменной задержки может быть реализована на основе «цифровой сигнальной памяти» (digital signal memory – DSM), которая может содержать набор одинаковых последовательных ячеек задержки либо быть реализована в виде буфера *FIFO*-типа (*First Input – First Output*) в оперативной памяти устройства обработки сигнала.

Для построения имитатора эхо-сигнала по описанному принципу для пунктов 1–5 можно использовать отдельные микросхемы либо выбрать комплексное решение – «систему на кристалле», например специализированную СБИС 1879ВМ3(DSM) от ЗАО НТЦ «Модуль», г. Москва. С использованием этой СБИС, размещенной на инструментальном модуле МС23.01 [2], в 2000-х гг. разработаны ретрансляционные имитаторы отраженных сигналов для бортовых радиовысотомеров, работающих в диапазоне частот 4200–4400 МГц: ИЦ-БСУ и ИОС-РВ [3, 4]. Они позволяют имитировать переменную высоту полета ЛА путем изменения ослабления, задержки и доплеровского сдвига формируемого «отраженного» сигнала.

По результатам исследований, несмотря на невысокую эффективную разрядность двух АЦП (работающих с тактовой частотой до 600 МГц в составе СБИС 1879ВМ3), характеристики ИОС-РВ позволяют работать с различными серийными бортовыми РВ, включая РВ с импульсным и непрерывным линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом в диапазоне высот до 24 км и вертикальных скоростях до 1500 м/с, в том числе при имитации отражений от протяженных (многоточечных) целей [1, 3].

Поскольку линия задержки представляет собой *FIFO*-буфер заданной целочисленной длины, то возникает характерная дискретность имитации дальности (высоты для РВ). При блочной потоковой обработке дискретность может увеличиться в 2–4–8 раз в зависимости от шага адресных счетчиков. Для образца ИОС-РВ фактический дискрет по высоте составил $\Delta H \approx 2{,}3$ м (до 2,0 м при максимальной тактовой частоте ЦОС 600 МГц).

Второй важный для тестирования радиовысотомеров параметр – минимальная имитируемая высота, составила порядка 14 м. Это значение минимальной имитируемой высоты для типовых «следящих» (с переменной длительностью периода модуляции, зависящей от высоты) и неследящих ЛЧМ РВ может быть уменьшено практически до 0 при применении метода дополнительного сдвига частоты формируемого сигнала [4].

Отсутствие функции суммирования сигналов для имитации многоточечных и протяженных целей может быть компенсировано использованием программной коммутации аппаратных сигнальных каналов (всего их восемь в каждой СБИС 1879ВМ3) [3, 5] и/или одновременным применением до четырех модулей МС23.01 в составе одного ИОС-РВ.

Однако модуль МС-23.01 и СБИС 1879ВМ3 сняты с поставок их разработчиком [2]. Поэтому для работы с произвольными зондирующими сигналами и потенциальной возможностью имитации более сложных условий отражения (от сложных рельефных подстилающих поверхностей) для различных типов радиовысотомерных и радиолокационных систем была предложена структура имитатора ИОС-РВМ с «вариативным» принципом формирования величины задержки сигнала [6]. Для реализации функций ЦОС использована система на кристалле XC7Z045 семейства *Zynq*-7000 *AP SoC* (*All-Programmable System on Chip*), включающая двухъядерный процессор *ARM CORTEXA*9 1 ГГц и программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) семейства *Kintex*-7.

Испытания первых версий программного обеспечения (ПО) имитатора ИОС-РВМ показали предварительные возможности ЦОС и линии задержки на ПЛИС: дискрет линий задержки (ЛЗ) соответствует $\Delta H \approx 0{,}6$ м, минимальная имитируемая высота без использования сдвига частоты – около 65 м. Значение минимальной высоты обусловлено достаточно большой собственной задержкой алгоритмов квадратурной ЦОС в ИОС-РВМ. Поэтому для имитации малых высот до 65 м, в текущей версии ПО используется метод положительного сдвига частоты входного сигнала. Этот метод эффективен для РВ с несимметричной ЛЧМ (НЛЧМ) при известной зависимости крутизны ЛЧМ сигнала от высоты (рис. 1).

Для снижения минимальной имитируемой высоты и компенсации собственной задержки в любой аппаратной реализации возможно использование сдвига частоты: РВ с НЛЧМ будет регистрировать эквивалентную малую высоту, если при формировании сигнала выполнить дополнительный частотный сдвиг в сторону «сближающую» на измерительном участке графики $f_{\text{излуч}}(t)$ и $f_{\text{форм}}(t)$. Для разных периодов модуляции: $T_{\text{М}}1 < T_{\text{М}}2$ на рис. 1, требуется разный дополнительный частотный сдвиг $Fsh1 > Fsh2$.

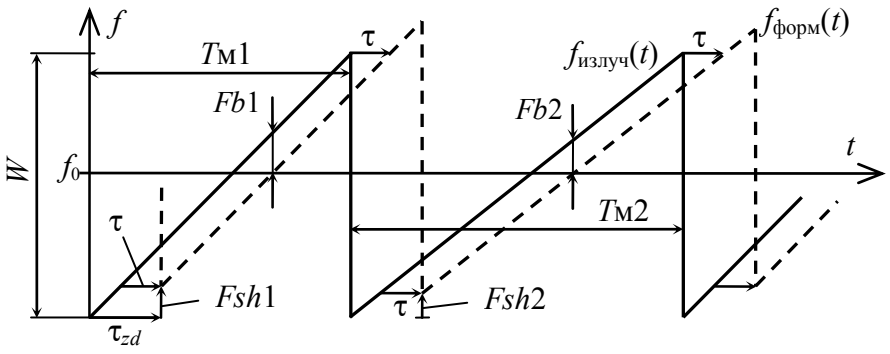

Рис. 1. Имитация эквивалентных малых высот при несимметричной ЛЧМ при переменном периоде модуляции

Разностная частота на выходе смесителя РВ, называемая частотой биений, является разностью частот двух сигналов: излучаемого и отраженного: $f(t) = f_{\text{излуч}}(t) - f_{\text{форм}}(t)$. При несимметричной нарастающей силе ЛЧМ в основной части измерительного участка (исключая участки скачкообразного изменения параметров модуляции $f_{\text{излуч}}(t)$, $f_{\text{форм}}(t)$) в установившемся режиме слежения должно обеспечиваться

$$f(t) = Fb \approx F\text{o} = \text{const}, \tag{1}$$

где Fb – текущее значение разностной частоты – частоты биений в основной части измерительного интервала; Fo – переходная частота частотного дискриминатора РВ (стабилизируемая частота биений).

Видно, что положительный сдвиг частоты Fsh для сигнала, задержанного на τ_{zd} (здесь индекс zd означает «нулевую» задержку “*zerodelay*”), приведет к уменьшению значения частоты биений Fb и соответственно к уменьшению измеряемой высоты, вычисляемой в РВ:

$$H_{\text{Т}} = \frac{c\,Fb}{2\,W} T_{\text{М}} - H_{\text{С}}, \tag{2}$$

где $H_{\text{Т}}$ – текущая измеренная высота РВ; $T_{\text{М}}$ – текущее значение рабочего хода (периода) модуляции; W – девиация частоты излучаемых радиоволн; c – скорость распространения радиоволн; Hс – высота компенсации остаточной высоты РВ (для учета внутренних задержек и используемых кабелей для соединения РВ с антеннами).

Для адаптации к сигналу и расчета требуемого сдвига частоты Fsh от требуемой имитируемой высоты H при известной переходной частоте частотного дискриминатора, можно использовать следующую аналитическую зависимость, верную для «следящих за высотой» типов РВ:

$$Fsh = \frac{Hzd - H}{H\text{c} + H} F\text{o}, \tag{3}$$

где Hzd – высота, соответствующая задержке τ_{zd} (zd~ “*zerodelay*”); H – имитируемая (заданная) высота РВ.

Для учета сдвига Доплера за счет вертикального движения ЛА выражение (3) для несимметричной нарастающей ЛЧМ требуется дополнить известным «доплеровским сдвигом частоты» равным $2V_y/\lambda$. Тогда получим

$$Fsh = \frac{Hzd - H}{H\text{c} + H} F\text{o} - \frac{2V_y}{\lambda}, \tag{4}$$

где V_y – имитируемая скорость движения ЛА вдоль вертикали (при снижении значение скорости V_y отрицательное); λ – средняя длина волны излучения РВ.

Для корректного формирования отраженного сигнала для ЛЧМ РВ с переменными параметрами, без априорной информации о стабилизируемой частоте биений выражения (3)–(4) не подходят, так как значение Fo точно неизвестно.

Кроме того, описанный метод недостаточно эффективен для ЛЧМ РВ, у которых имеется вобуляция длительности периода модуляции, так как измеренная в РВ высота должна обрабатываться и усредняться для получаемых разных частот сигналов биений: *F*о1 > *F*о2 для рис. 1. При большом несоответствии частоты сигнала биений такой сигнал может не попасть в требуемый диапазон частот фильтров частотного дискриминатора, что приведет к переходу такого РВ в режим «поиска» сигнала.

Поэтому необходима синхронизация работы имитатора либо по дополнительному сигналу от РВ (с текущим значением *F*о), либо путем косвенной оценки текущего значения *F*о по получаемому СВЧ сигналу.

Одним из таких параметров является скорость линейного изменения частоты зондирующего сигналаV_f:

$$V_f = W/T_{\text{М}} . \tag{5}$$

Во многих современных РВ с ЛЧМ для повышения помехоустойчивости работы может варьироваться и знак, и значение скорости линейного изменения частоты даже при постоянном значении высоты.

Непосредственное измерение текущих значений W и $T_{\text{М}}$ возможно, однако даже в случае применения сигнальных процессоров результат измерения станет известен по окончании текущего периода модуляции.

Но оценка скорости линейного изменения частоты зондирующего сигнала возможна и по более коротким интервалам времени:

$$V_f = \Delta f/\Delta t , \tag{6}$$

где Δf – измеренное изменение частоты зондирующего сигнала за интервал времени Δt (внутри рабочего хода модуляции).

Тогда из (4), (6) с учетом вертикальной скорости можно получить

$$Fsh \approx \frac{2}{c} V_f (Hzd - H) - \frac{2V_y}{\lambda} = \frac{2\,\Delta f}{c\,\Delta t}(Hzd - H) - \frac{2V_y}{\lambda} . \tag{7}$$

Подставляя $\lambda = c/f_0 \approx c/f$, где f_0 – средняя частота зондирующего сигнала, а f – мгновенная частота ЛЧМ сигнала, получим

$$Fsh = \frac{2}{c}\left(\frac{\Delta f}{\Delta t}(Hzd - H) - V_y f \right). \tag{8}$$

Ситуация корректного формирования сигнала приведена на рис. 1. Значения *Fb*1 > *Fb*2 (так как *F*о1 > *F*о2, а *Fb*1 ≈ *F*о1 и *Fb*2 ≈ *F*о2), и главное, что τ = const, что и нужно для корректной работы РВ в режиме слежения.

Таким образом, на высотах $H < Hzd$ для корректной работы имитатора с реализацией независимого определения параметров линейной частотной модуляции необходимо знать текущие значения скорости линейного изменения частоты $V_f = \Delta f /\Delta t$, заданные значения высоты H и вертикальной скорости V_y, а также значение высоты Hzd, которая соответствует минимальной собственной задержке в имитаторе τ_{zd}. Значение частоты $f \approx f_0$ для РВ известно с достаточной степенью точности: порядка ±2 % для серийных ЛЧМ РВ диапазона 4300 МГц.

Вариант схемы ретрансляционного имитатора для реализации алгоритма формирования СВЧ сигнала, отраженного от точечной цели, приведен на рис. 2. Входной $A(t)$ и выходной $X(t)$ аналоговые сигналы проходят аттенюаторы А1-А2, смесители См1-См2 и полосовые фильтры Ф с полосой 1200 ±100 МГц. Блоки, выделенные штриховой линией, реализуются программно в ПО процессора *ARM CORTEXA*9.

На схеме E_0 – сигнал управления затуханием (определяется при автокалибровке) в аттенюаторе А1; $E_{\text{ЭПР}}$ – переменный сигнал управления затуханием в аттенюаторе А2 (соответствует ЭПР отражающей поверхности/цели, а также учитывает величину ослабления во всех цепях имитатора и в радиотракте, включая E_0); Δa – блок контроля работы *FIFO*.

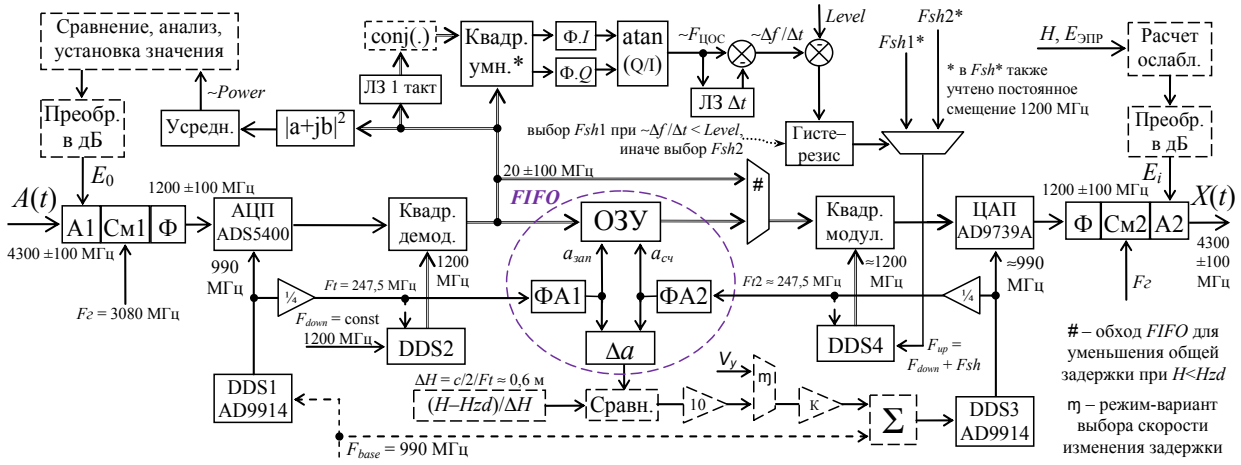

Рис. 2. Схема имитатора сигнала для ЛЧМ РВ с формированием ретрансляционного сигнала на малых высотах с учетом переменной крутизны ЛЧМ сигнала

Средняя и нижняя часть схемы реализуют вариативный метод изменения задержки [6], для этого в основе схемы ЦОС присутствует двухпортовая (для одновременных операций записи и считывания) память выборок в ОЗУ, которая позволяет реализовать *FIFO*-буфер для задержки сигнала на разность циклических адресов с двух формирователей адресов ФА: записи $a_{зап}$ и считывания $a_{сч}$. Если в блоке сравнения $\Delta a = (a_{зап} - a_{сч})$ не соответствует $nDelay = \mathrm{round}((H - Hzd)/\Delta H)$, где $\Delta H = c/2/Ft \approx 0{,}6$ м, H – заданная высота, то блок прямого цифрового синтеза DDS3 изменяет тактовую частоту работы квадратурного модулятора и ЦАП.

На малых высотах $H < Hzd$, и $\Delta a = 0$, поэтому ПО имитатора должно автоматически определять текущие параметры ЛЧМ-сигнала и корректировать сдвиг частоты формируемого сигнала с помощью сигнала с DDS4 (см. далее сигнал *Fsh*).

Для уменьшения тактовой частоты ЦОС и для получения возможности квадратурной обработки после АЦП применен сдвиг частоты на величину F_{down} = const = 1200 МГц: реализован в квадратурном демодуляторе. Обратное повышение частоты реализовано аналогично в квадратурном модуляторе. При этом в квадратурном модуляторе реализована возможность внести дополнительный переменный сдвиг частоты с помощью квадратурного гармонического сигнала с DDS4: для имитации малых высот и для имитации доплеровского сдвига частоты: $F_{up}=F_{down} + Fsh$.

Для получения положительного сдвига частоты для ЛЧМ сигнала с положительной крутизной ЛЧМ один входной сигнал квадратурного умножителя, поступающий с ЛЗ, должен быть комплексно сопряжен. Подробности такой обработки изложены в [7]. Некоторые сигналы требуют усреднения (в том числе с повышением разрядности результата) на некотором интервале, в частности выходы квадратурного умножителя «Кв. умн.*» перед вычислением арктангенса в блоке «atan(Q/I)» проходят фильтрацию – усреднение (по массиву 256 отсчетов в текущей версии ПО ПЛИС).

Для учета возможного, встречающегося в практике, более сложного случая недостаточно высокого отношения сигнал/шум и для РВ с переменной (одной из двух) крутизной ЛЧМ сигнала (см. рис. 1), где фактически стабилизируется либо 1-я либо 2-я частота сигнала биений, для расчета требуемого сдвига частоты можно использовать выражение (4), как и для РВ с одной известной стабилизируемой частотой биений.

Таким образом, для защиты от шума в дополнение к усреднениям сигналов на рис. 2 приведена пороговая обработка для оценки крутизны изменения частоты: вычисленное значение $\Delta ATAN$ (измеренная в ПЛИС крутизна изменения частоты сигнала за время Δt = 1 мкс) в ПЛИС автоматически сравнивается с величиной *Level* (пороговое значение на компаратор) для выбора одной из двух частот сдвига при пороговой обработке. При $\Delta ATAN > Level$ на DDS4 выдается большее значение сдвига частоты *Fsh*2, при $\Delta ATAN < Level$ выдается меньшее значение сдвига частоты *Fsh*1.

На рис. 3 приведен пример имитации простой траектории снижения ЛА в области высот 65 м.

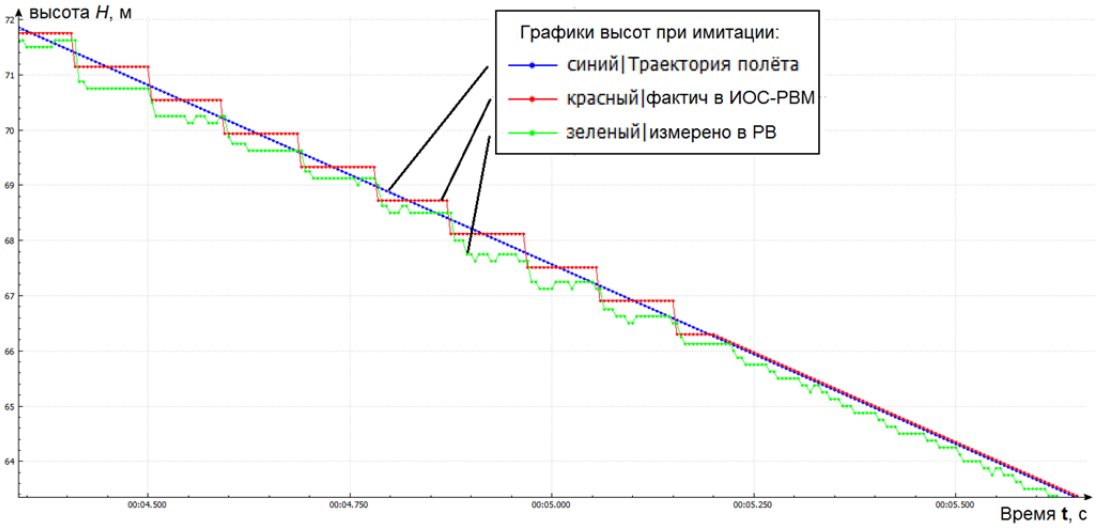

Рис. 3. Пример графика траектории при имитации снижения ЛА

Здесь не задействовано плавное изменение задержки в соответствии с вариативным методом (при включении все графики практически совпадают). Поэтому на рис. 3 зеленый график измеренной в РВ высоты «повторяет» ступеньки высоты, заданной в ИОС-РВМ.

На высотах менее 65 м дискретная ошибка задания высоты ΔH отсутствует, так как выполняется компенсация собственной задержки с использованием сдвига частоты по выражению (8).

Пример сигнала биений и сигнала измерительного интервала РВ с учетом подстройки – адаптации ИОС-РВМ к переменной крутизне ЛЧМ сигнала РВ показан на рис. 4. Видно, что в двух соседних периодах модуляции частоты сигнала биений отличаются, имеется задержка появления сигнала биений, вызванная частично временем анализа (оценка + усреднение) и реакции ИОС-РВМ на изменение крутизны ЛЧМ зондирующего сигнала от РВ.

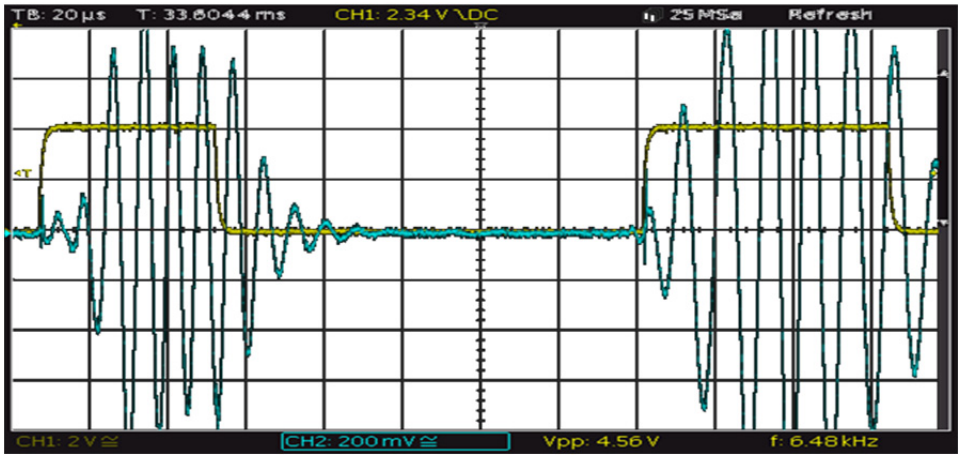

Рис. 4. Осциллограмма сигнала биений и сигнала измерительного интервала РВ

Заключение

Только при ретрансляционном методе имитации с уточнением параметров модуляции могут быть автоматически учтены изменения амплитуд, фаз и длительностей сигналов конкретного радиопередатчика реальной БРЛС для формирования когерентного эхо-сигнала.

В соответствии с выражением (8) для корректной работы имитатора сигнала для РВ с ЛЧМ необходимо знать текущие значения скорости ЛЧМ $V_f = \Delta f / \Delta t$, заданные значения высоты H и вертикальной скорости V_y, а также значение высоты Hzd, которая уточняется экспериментально и соответствует минимальной собственной задержке в имитаторе τ_{zd}.

Для реализации адаптации к параметрам излучаемого сигнала радиовысотомера значение крутизны ЛЧМ сигнала $\Delta f / \Delta t$ определяется по известным методам ЦОС и схемным решениям по

квадратурным составляющим сигнала [7] в специальном «ЦОС-детекторе» параметров модуляции, который позволяет выполнить синхронное изменение параметров преобразования и формирования сигнала, имитирующего отражение от точечной или распределенной цели или поверхности.

Библиографический список

1. Пат. № 2568899 РФ Имитатор радиолокационной цели при зондировании преимущественно длительными сигналами / Боков А. С., Важенин В. Г., Дядьков Н. А., Мухин В. В., Щербаков Д. Е., Пономарев Л. И. – Опубл. в Б. И., 2015. – № 32. – 10 с. – URL: http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty = 29&docid = 2568899 (дата обращения 31.03.2017).
2. Инструментальный модуль МС23.01. – URL: https://www.module.ru/catalog/micro/instrument_23/ (дата обращения 07.04.2017).
3. 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.
4. 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.
5. Пат. № 2486540 РФ Имитатор ложной радиолокационной цели при зондировании сигналами с линейной частотной модуляцией / Боков А. С., Важенин В. Г., Дядьков Н. А., Мухин В. В., Щербаков Д. Е., Пономарев Л. И. – Опубл. в Б. И., 2013. – № 18. – 13 с. – URL: http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty = 29&docid = 2486540 (дата обращения 31.03.2017).
6. Пат. № 2522502 РФ Имитатор сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой / Валов С. В., Сиротин А. И., Щербаков С. В. Дата приоритета: 10.12.2012. – URL: http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty = 29&docid = 2522502 (дата обращения 07.04.2017).
7. Юрков, Н. К. Системный анализ проблем управления процессом повышения радиолокационного контраста / Н. К. Юрков // Радиовысотометрия – 2013 : тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. Каменск-Уральский ; Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2013. – С. 324–328.

Боков Александр Сергеевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники информационных систем,
Институт радиоэлектроники
и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

Bokov Alexander Sergeevich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics of information systems,
Institute of Radioelectronics and Information Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Важенин Владимир Григорьевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники информационных систем,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: v.g.vazhenin@urfu.ru

Vazhenin Vladimir Grigor'evich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics of information systems,
Institute of Radioelectronics and Information Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Гусев Андрей Викторович
старший преподаватель, ведущий инженер,
кафедра радиоэлектроники информационных систем,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.v.gusev@urfu.ru

Gusev Andrey Victorovich
senior teacher, principal engineer,
sub-department of radio electronics of information systems,
Institute of Radioelectronics and Information Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Нагашибаев Дмитрий Жубатканович
начальник отдела,
АО «Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область, г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: dmitriy.nagashibaev@gmail.com

Иофин Александр Аронович
кандидат технических наук,
заместитель главного конструктора,
АО «Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область, г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: tehdep630@yandex.ru

Аннотация. Для проверки бортовых радиовысотомеров с применением сложных видов модуляции зондирующих сигналов имитатор отраженных сигналов в ряде случаев должен подстраивать некоторые параметры формирования эхо-сигнала в реальном масштабе времени. Предложенный имитатор позволяет проводить проверку характеристик радиовысотомеров, включая СВЧ-тракт, алгоритмы обработки сигнала и измерения высоты до имитируемой подстилающей поверхности (на примере точечного отражателя). При экспериментальном исследовании показано, что имитатор в режиме реального времени может преобразовать копию зондирующего сигнала в сигнал с переменными задержкой, затуханием и доплеровским сдвигом частоты с автоматической адаптацией к переменной крутизне линейной частотной модуляции и амплитуде сигнала только по самому излучаемому сигналу.

Ключевые слова: полунатурное моделирование, линейная частотная модуляция, бортовой радиовысотомер, цифровая сигнальная память, цифровая обработка сигналов.

Nagashibaev Dmitry Zhubatkanovich
head of department,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

Iofin Alexander Aronovich
candidate of technical sciences, deputy chief designer,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

Abstract. To test onboard radio altimeters, which use complex types of probing signal modulation, the reflected signal simulator in some cases should adjust some echo formation parameters in real time. The proposed simulator makes it possible to conduct an end-to-end test of an operation of radar altimeters, including microwave parts, signal processing algorithms of measuring aircraft altitude above simulated underlying surface (with example of a point reflector). Experimental study of the simulator showed that the simulator can convert a probing signal copy into a signal with variable delay, attenuation and Doppler frequency shift with automatic adaptation to the slope of a linear frequency modulation and to the signal amplitude by using only probing altimeter signal.

Key words: seminatural modeling, chirp, linear frequency modulation, onboard altimeter, digital signal memory, digital signal processing.

УДК 629.7.058.42, 621.396.96

Учет переменных параметров линейной частотной модуляции в имитаторе отраженных сигналов для радиовысотомеров / А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. В. Гусев, Д. Ж. Нагашибаев, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 60–67. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-9.