

А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. А. Иофин, В. В. Мухин

РЕТРАНСЛЯЦИОННЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ХАРАКТЕРИСТИК БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ¹

A. S. Bokov, V. G. Vazhenin, A. A. Iofin, V. V. Mukhin

RETRANSMITTING SIMULATOR FOR TESTING OF AIRBORNE RADAR SYSTEMS AND DEVICES PERFORMANCE

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные стандарты разработки и выпуска сложных систем требуют выполнения испытаний и подтверждения тактико-технических характеристик на ранних этапах жизненного цикла изделия. Актуальность оценки работы имитатора в составе комплекса полунатурного моделирования подтверждается возможностью учета всех основных параметров фоноцелевой обстановки для функциональной проверки алгоритмов поиска, захвата, наведения и сопровождения целей. В основе программной части комплексов полунатурного моделирования используется модель представления фоноцелевой обстановки с учетом характеристик отражения радиолокационных сигналов от заданного набора типов целей, объектов и подстилающих поверхностей. *Материалы и методы.* Сложный механизм отражения (обратного рассеяния) электромагнитного поля упрощается путем замены пространственно-электрических характеристик поверхностей целей, земли, воды на соответствующие характеристики отраженного сигнала, известные для выбранных диапазонов несущих частот из результатов анализа и обобщения данных натуральных экспериментов. В аппаратной реализации модели пространство распространения прямого и отраженного сигналов между антеннами радиолокационной станции и всей отражающей поверхностью представлено в виде многоканальной модели, что значительно упрощает анализ. *Выводы.* Показано, что для формирования радиолокационных эхо-сигналов типовых радиолокаторов с переменными параметрами необходима реализация суммирования (микширования) копий зондирующего сигнала с разными задержками, амплитудами, частотными сдвигами. Проведен расчет параметров заданного количества каналов формирования, а также их передача в имитатор сигнала на базе модулей в реальном мас-

Abstract. *Background.* Modern standards of development and production of complex systems require you to perform testing and confirmation of the tactical-technical characteristics in the early stages of the product life cycle. The relevance evaluation of the work of the Simulator as a part of a complex of semi-natural simulation confirmed the possibility of taking into account all basic parameters of training Simulator provides possibility of environment for functional verification of algorithms of search, seizure, guidance and accompaniment goals. The basis behind complexes of semi-natural simulation uses the presentation model training Simulator provides possibility of the situation taking into account the characteristics of the reflection of radar signals from a given set of types, objects and purposes underlying surfaces. *Materials and methods.* Complex reflection (backscatter) electromagnetic fields are simplified by replacing the spatial-electrical characteristics of surface targets, Earth, water on the relevant characteristics of the reflected signal, known for the selected carrier frequencies ranges from analysis and synthesis of data field experiments. In a hardware implementation model of space distribution of direct and indirect signals between radar and antennas throughout the reflective surface is presented in the form of a multi-channel model, which greatly simplifies the analysis. *Conclusions.* It is shown that for the formation of the radar echoes model with variable parameters radar implementations of summation (mixing) copies of probing signal with different delays, amplitudes, frequency shifts. Calculation of parameters for the specified number of channels forming, as well as their transfer signal simulator based on modules in real time, allowing the grouping of reflectors on the basis of the simulation of the system taking into account the angle evolutions and speed of aircraft directional aeriels and chart settings properties of the underlying surface.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 8.2538.2017/4.6).

штабе времени, что позволяет осуществить группировку отражателей на основе моделирования системы с учетом угловых эволюций и скорости летательного аппарата, параметров диаграмм направленности антенн и свойств подстилающей поверхности.

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

Keywords: HIL, digital signal processing, radar, altimeter, radar target, linear frequency modulation.

Введение

Летные и натурные испытания различных бортовых РЛС, радиовысотометров (РВ), радиодальномеров (РВД) традиционно используются на заключительных стадиях опытно-конструкторских работ при наличии готовых образцов РЛС и ее носителя. Современные стандарты разработки и выпуска сложных систем требуют выполнения испытаний и подтверждения тактико-технических характеристик еще в стационарных условиях производства или исследовательской лаборатории. Для тестирования таких приемопередающих радиосистем необходима имитация частотно-временной структуры радиолокационных сигналов, отраженных от подстилающей поверхности, от одной или нескольких целей, находящихся или движущихся в пределах диаграмм направленности антенн (ДНА).

Формирование эквивалентных отраженных эхо-сигналов с возможностью сквозных испытаний и контроля параметров СВЧ и НЧ-трактов излучения и обработки сигналов выполняют с помощью специальных устройств – имитаторов. При работе имитатора в составе комплекса полунатурного моделирования (ПНМ) возможен учет всех основных параметров возможной фоноцелевой обстановки для функциональной проверки алгоритмов поиска, захвата, наведения и сопровождения целей в РЛС в условиях, близких к реальным, к критическим и даже запредельным (в том числе по траектории, вибрации, температуре и др.), т.е. невозможным в реальных натурных испытаниях.

Постановка задачи и методы ее решения

Помимо физического моделирования, известны и популярны два основных способа получения сигнала имитирующего радиолокационное отражение: с генератора с заданными характеристиками сигнала, и с ретранслятора-повторителя, с возможными изменениями параметров сигнала [1, 2]. Выполнение преобразования сигнала вместо генерирования позволяет учесть неидеальности всех блоков и СВЧ тракта конкретного образца РЛС, сохраняется возможность последующей когерентной обработки сигнала в РЛС.

В основе программной части комплексов ПНМ должна использоваться модель представления фоноцелевой обстановки с учетом характеристик отражения радиолокационных эхо-сигналов от заданного набора типов целей, объектов и поверхностей [3, 4]. Моделирование принимаемого сигнала, очевидно, должно основываться в том числе и на геометрических параметрах facets и летательного аппарата (ЛА). Поэтому в общем случае геометрия трехмерной модели поверхности при движении ЛА на высоте H со скоростью $V_{\text{ЛА}}$ и точечной цели со скоростью $V_{\text{Ц}}$ на дальности $R_{\text{Ц}}$ может быть представлена в пределах пятна облучения лепестками ДНА и максимальной дальности x_{max} (рис. 1).

Согласно феноменологическому подходу [3, 4], типовые протяженные радиолокационные объекты (подстилающая поверхность, протяженная цель) могут быть представлены в виде набора точечных отражателей или facets с индивидуальными геометрической площадью и ориентацией. Реальные радиолокационные цели не являются точечными, особенно для РЛС высокого разрешения, поэтому считается более корректным представить все цели аналогичными геометрическими facetными моделями [5], дающими при моделировании соответствующую экспериментам эффективную площадь рассеяния (ЭПР) для нужных ракурсов целей.

Тогда для общего случая все facets в дополнение к геометрическим параметрам (относительным координатам, скорости, пространственной ориентации, площади) должны иметь свои «характерные для типа отражателя» значения удельной ЭПР и диаграммы обратного рассеяния (ДОР). Таким

образом, сложный механизм отражения (обратного рассеяния) электромагнитного поля упрощается путем замены пространственно-электрических характеристик поверхностей целей, земли, воды на соответствующие характеристики отраженного сигнала, известные для выбранных диапазонов несущих частот из результатов анализа и обобщения данных натурных экспериментов [6, 7].

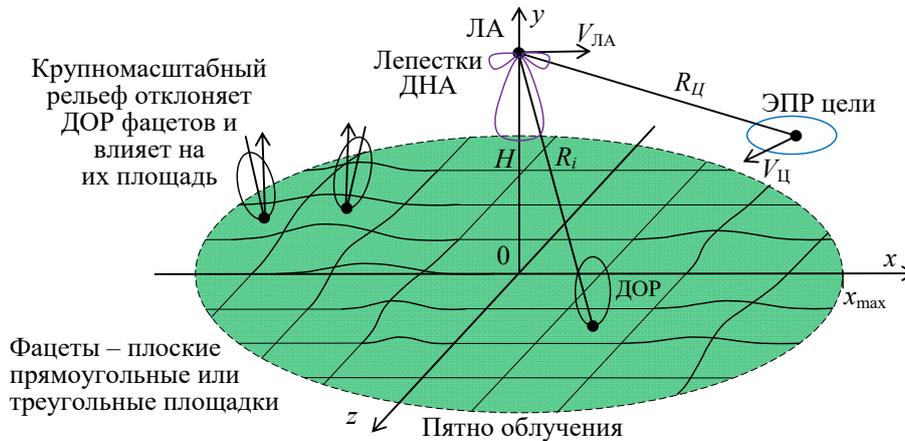


Рис. 1. Геометрия трехмерной модели с фацетной поверхностью и точечной целью

С точки зрения аппаратной реализации модели такое пространство распространения прямого и отраженного сигналов между антеннами РЛС и всей отражающей поверхностью можно представить в виде многоканальной модели (рис. 2), состоящей из n элементарных каналов передачи сигнала с параметрами: задержкой τ_i , затуханием при распространении и отражении сигнала E_i , доплеровским сдвигом частоты Δf_i .

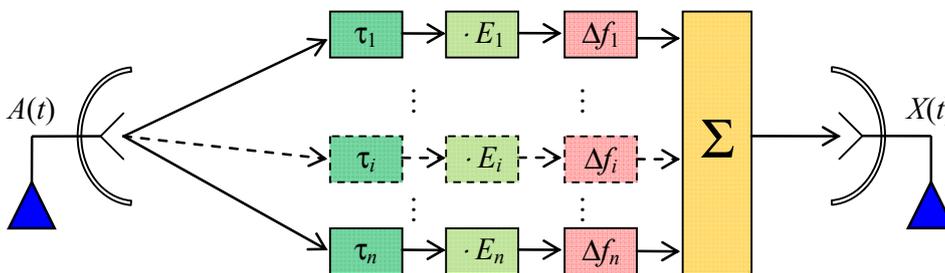


Рис. 2. Многоканальная модель радиолокационного канала распространения сигнала «передающая антенна – отражающая поверхность (цель) – приемная антенна»

Сдвиг частоты Δf_i пропорционален относительной скорости сближения V_i с i -й блестящей точкой и обратно пропорционален длине радиоволны λ :

$$\Delta f_i = 2V_i/\lambda. \tag{1}$$

Все параметры могут меняться во времени. Поэтому зондирующий сигнал $A(t)$ после прохождения канала приобретает в каждый момент времени каждого периода модуляции свою амплитуду, фазу, доплеровский сдвиг частоты, а суммарный отраженный сигнал $X(t)$ будет иметь соответствующие флуктуации амплитуды и фазы, эквивалентные реальной ситуации.

Возможность когерентной обработки сохраняется, так как фаза формируемого сигнала определяется дальностью (задержкой) и исходной фазой зондирующего сигнала, т.е. так же, как и при работе РЛС в обычных условиях.

Качественная реализация имитатора с возможностью смены параметров во времени в аналоговой форме невозможна. В случае использования цифровой обработки сигналов (ЦОС) понадобится организация быстрой последовательной связки высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), цифровой линии задержки (ЛЗ), модулей преобразования сигнала по частоте и

амплитуде, цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). На рис. 3 приведен такой вариант реализации имитатора протяженной цели.

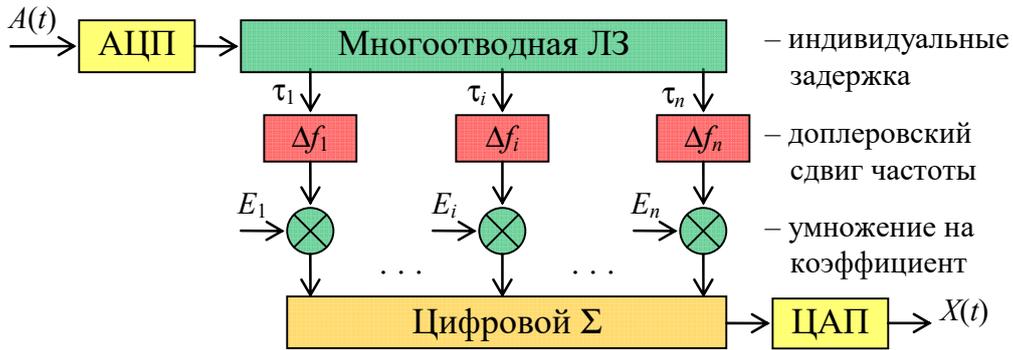


Рис. 3. Формирование отраженного сигнала на базе блоков ЦОС

Непосредственная реализация на СВЧ при современном развитии техники нереализуема, поэтому обработка и формирование сигналов выполняются на низкой частоте в рабочей области частот блоков ЦОС.

Быстродействующий многоходовый цифровой сумматор, набор умножителей и модуляторов Δf для сдвига частоты дорожки для реализации, поэтому в работе [8] предложена конструкция имитатора радиолокационной цели, в которой вместо сумматора и умножителей применены более простые синхронизатор, коммутатор (рис. 4).

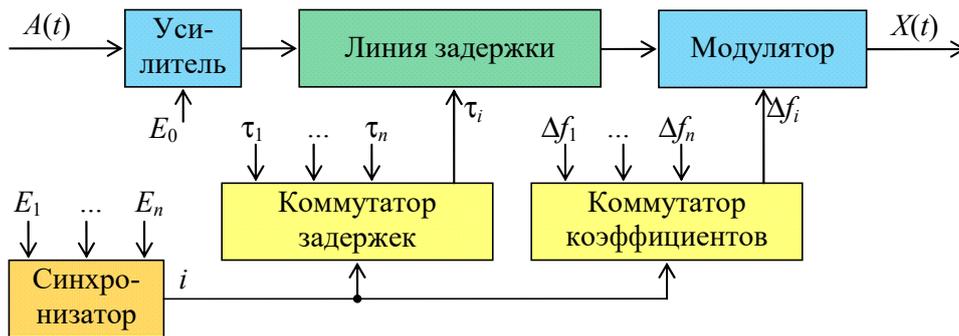


Рис. 4. Схема формирования эквивалентного эхо-сигнала

Здесь коммутаторы подключают к управляющим входам ЛЗ и ЦАП один i -й параметр: τ_i и Δf_i . Возможный принцип работы синхронизатора заключается в последовательном и циклическом наращивании на «+1» его выходного значения i , в диапазоне от 1 до n , причем длительность присутствия значения i пропорциональна соответствующему значению E_i на входе синхронизатора. Поэтому общий амплитудный коэффициент E_0 можно сделать постоянным, но при этом управлять «яркостью» каждой блестящей точки задавая соответствующие значения коэффициентов микширования $E_1 - E_n$. Общее преобразование может быть описано выражением

$$X(t) = K(A(t - \tau_i), \Delta f_i), \quad i = 1 + \sum_{j=1}^n \text{if} \left(\text{cnt}(t) > \sum_{k=1}^j E_k \right), \quad (2)$$

где E_i – относительная амплитуда, соответствующая мощности i -го сигнала; $K(f(t), \Delta f)$ – результат доплеровского сдвига функции $f(t)$ на величину Δf ; τ_i – задержка i -го сигнала; Δf_i – доплеровский сдвиг i -го сигнала; $\text{cnt}(t)$ – значение цифрового счетчика во время t на общем периоде микширования всех сигналов [8]; $\text{if}(\text{условие})$ – функция выдает 1 если «условие» истинно, иначе выдает 0.

При этом выходной сигнал $X(t)$ будет содержать переменные по длительности «кусочки» различных участков входного сигнала $A(t)$, что в частотной области приведет к тому, что к исходным гармоникам сигналов добавятся гармоники, соответствующие сумме и разности частот «полезных»

сигналов и частоты микширования, умноженной на целое число. При выборе базовой частоты работы синхронизатора в несколько раз выше рабочей полосы частот приемника (с учетом фактического наличия во всех РЛС полосового или низкочастотного фильтра сигнала, получаемого после смешивания с гетеродинным сигналом), результирующий сигнал в низкочастотной области будет эквивалентен сигналу, образованному обычным суммированием сигналов.

Допустимое число микшируемых сигналов для примера типового следящего РВ с ЛЧМ зависит и от параметров РВ и от быстродействия цифрового преобразования сигналов:

$$N_{\max} = 1/(\Delta t \cdot (F_{\max} + k_{\text{зап}} \cdot F_{\text{в.б}})), \tag{3}$$

где Δt – средняя длительность интервала микширования; F_{\max} – максимальная частота сигнала в спектре биений РВ; $F_{\text{в.б}}$ – верхняя частота пропускания фильтра сигнала биений; $k_{\text{зап}} \geq 1$ – коэффициент запаса, учитывающий неточное знание параметров РВ.

Существующие на сегодняшний день аппаратные средства не позволяют реализовать имитатор, непосредственно оперирующий с большим числом каналов распространения в режиме реального времени, поэтому для упрощения модели целесообразно сгруппировать отражатели с близкими параметрами: число каналов будет равно числу элементов разбиения на участки близких частот/задержек. При этом эквивалентность основных характеристик и зависимостей моделирования и формирования отраженного сигнала будет определяться аппаратными и программными возможностями выбранной реализации модели.

Возможно сокращение числа блестящих точек путем отбрасывания точек с низкой ЭПР, отстоящих далеко по положению/частоте от основной цели, объединения некоторых близких по параметрам точек и т.п. Например, в [8, 9] приведены способы расчета параметров имитации с сокращением числа имитируемых блестящих точек за счет объединения близких по параметрам отражателей, в том числе близких по дальности и доплеровской частоте.

При короткоимпульсном методе работы радиолокатора или большом числе имитируемых точек микширование (коммутация) параметров основного сигнала в имитаторе приведет к мерцанию (флуктуации по амплитуде) отдельных точек цели. Поэтому для учета особенностей построения, функционирования и применения радиолокатора имитатору желательно определять и подстраиваться под момент начала импульса или смены типа модуляции в зависимости от ассортимента видов сигналов радиолокатора.

На рис. 5 приведена упрощенная схема ретрансляционного имитатора для формирования отраженного сигнала радиодальномера или РВ.

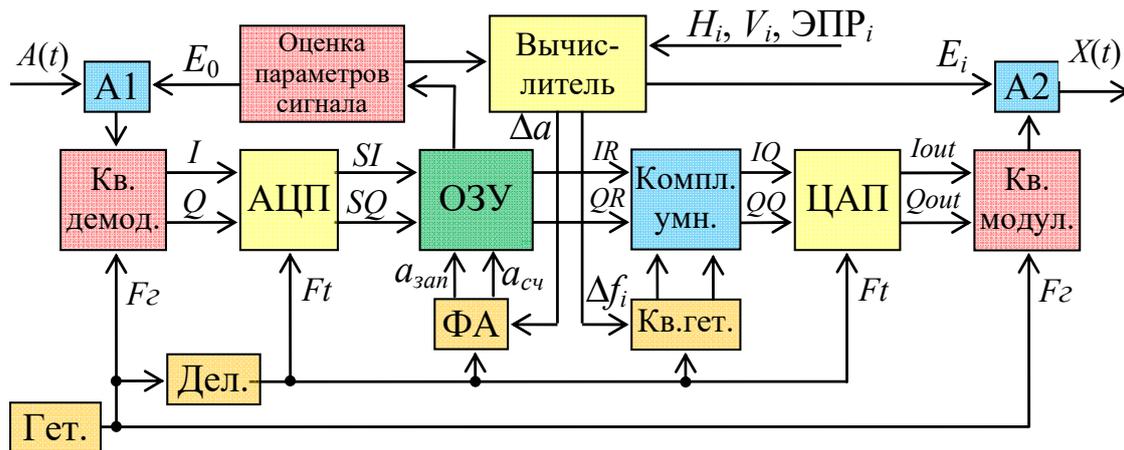


Рис. 5. Схема ретрансляционного имитатора для формирования отраженного сигнала

Зондирующий радиосигнал $A(t)$, поступающий с выхода передатчика, предварительно ослабляется в аттенуаторе А1, затем в квадратурном демодуляторе (Кв. демод.) с использованием сигнала гетеродина (Гет.) частотой $F_Г$ переносится с несущей (или промежуточной) частоты на нулевую с разложением на квадратурные составляющие I и Q , оцифровывается в двухканальном АЦП с частотой дискретизации $F_t = F_Г/n$, где n – коэффициент деления делителя (Дел.). Далее квадратурные со-

ставляющие сигнала SI и SQ запоминаются в ОЗУ, реализующем функцию линии задержки, затем считываются с индивидуальной задержкой τ_i :

$$\tau_i = 2 H_i / c. \tag{4}$$

Для формирования этой задержки в вычислителе и формирователе адресов (ФА) рассчитывается соответствующая требуемая разность циклических адресов записи $a_{\text{зап}}$ и считывания $a_{\text{сч}}$:

$$\Delta a = (a_{\text{зап}} - a_{\text{сч}}) = \tau_i \cdot Ft. \tag{5}$$

Для учета необходимого доплеровского сдвига частоты сигнала в цифровом умножителе происходит смещение сигнала по частоте путем комплексного умножения квадратурных составляющих сигнала на квадратурный гармонический сигнал с частотой Δf_i от блока «Кв.гет.». Этот сигнал может формироваться, например, типовым для ЦОС блоком – прямого цифрового синтеза (DDS), частота которого рассчитывается в вычислителе (1).

Сформированный сигнал, соответствующий отраженному сигналу от подвижной по дальности цели (высоте ЛА над поверхностью), в квадратурном модуляторе переносится на радиочастоту, ослабляется в аттенюаторе А2 на величину E_i (для имитации затухания, соответствующего дальности и ЭПР,) и излучается либо подается непосредственно на вход радиоприемника РВ/РЛС при лабораторном тестировании.

Цифровая часть схемы (см. рис. 5), от АЦП до ЦАП включительно, может быть реализована с использованием отдельных микросхем либо с использованием комплексных решений – «систем на кристалле», например СБИС 1879ВМ3(DSM) [10], разработанная для использования в устройствах с цифровой радиочастотной памятью (DRFM). В указанной специализированной СБИС имеются восемь параллельных «сигнальных каналов» для выполнения базовых функций ЦОС. Поэтому один сигнальный канал программируется на запись в ОЗУ и от 1 до 7 каналов работают на считывание для нескольких имитируемых блестящих точек или сгруппированных по дальности отражателей [8, 11].

Очевидно, что значения адресов $a_{\text{зап}}$ и $a_{\text{сч}}$ – целые числа, что является причиной дискретности такого способа изменения задержки сигнала. Для примера, для СБИС 1879ВМ3 с учетом блочной потоковой обработки сигнальных отсчетов (дискрет умножается на размер блока равный 8 отсчетов в блоке) дискрет $\Delta H = 2$ м при тактовой частоте АЦП, ЦАП $Ft = 600$ МГц.

Исключение этой погрешности имитации возможно путем варьирования тактовой частоты ЦОС (в рассмотренной схеме при изменении частоты гетеродина F_2 пропорционально меняется и дискрет установки имитируемой дальности) либо при использовании двух независимых ФА, работающих от разных гетеродинов (рис. 6): плавное изменение частоты будет сопровождаться плавным «вариативным» изменением имитируемой дальности [12].

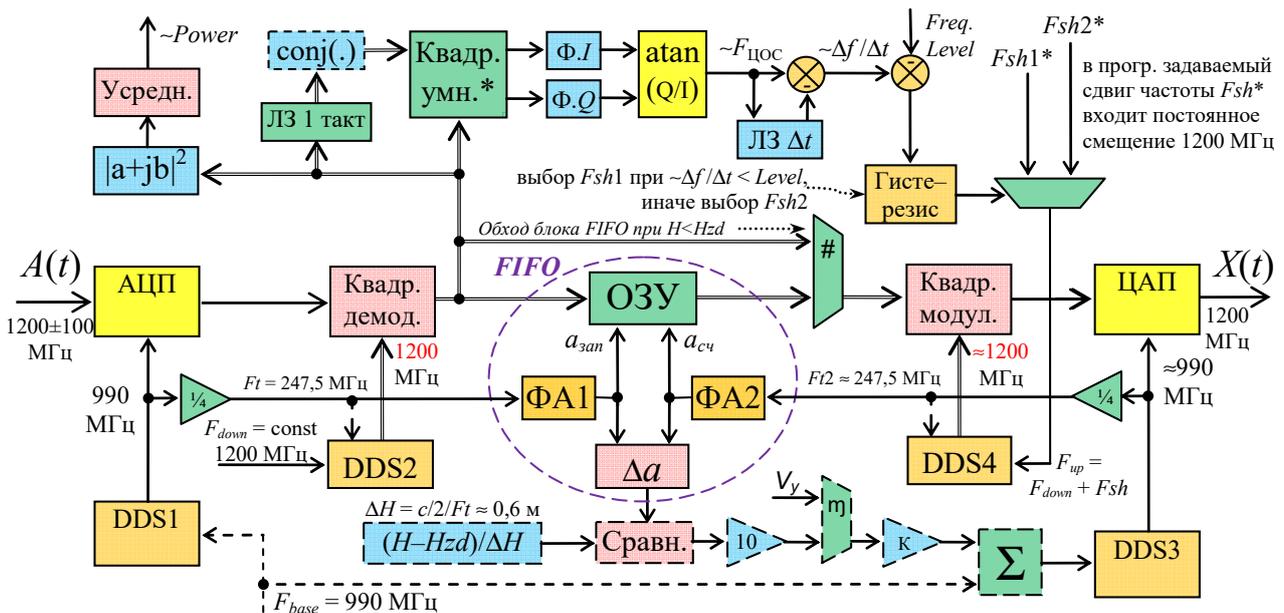


Рис. 6. Схема имитатора с вариативным принципом формирования эхо-сигнала

Здесь блок «Δa» выполняет контроль работы буферной памяти типа *FIFO*, работающий в соответствии с (5). Так как здесь используются два различных формирователя адресов, то дискретная ошибка устраняется, несмотря на целочисленное значение разницы адресов записи $a_{зап}$ и считывания $a_{сч}$. Если в блоке сравнения $\Delta a = (a_{зап} - a_{сч})$ не соответствует заданной задержке $nDelay = \text{round}((H - Hzd)/\Delta H)$, где $\Delta H = c/2Ft \approx 0,6$ м, H – заданная высота, Hzd – минимальная задержка в имитаторе, то блок прямого цифрового синтеза DDS3 изменяет тактовую частоту работы квадратурного модулятора и ЦАП.

Реализация такого имитатора выполнена на модуле «Деталь-ЦОС-В1», содержащего систему на кристалле XC7Z045 семейства *Zynq-7000 All-Programmable System on Chip (AP SoC)*, включающую двухядерный процессор *ARM CORTEX A9* 1 ГГц и ПЛИС семейства *Kintex-7*. Блоки, выделенные на рис. 6 штриховой линией, реализуются программно в процессоре. Более подробное описание схемы и алгоритма ЦОС, а также преимущества работы имитатора с различными ЛЧМ зондирующими сигналами приведены в работе [12].

На рис. 7 приведена схема измерений при полунатурном моделировании работы радиодальномеров с ЛЧМ, позволяющая получать показания РВ по цифровому интерфейсу, исследовать сигнал биений РВ во временной и частотной области. При исследованиях применялся цифровой осциллограф Актакон АСК-4106. С помощью ПО анализа сигналов во временной и частотной областях оценивались параметры спектра сигнала биений, период модуляции и измеренная высота.



Рис. 7. Схема измерений при полунатурном моделировании с помощью ИОС-РВ

По результатам экспериментов для типового следящего РВ с ЛЧМ возможно формирование «сплошных» спектров с шириной до 10 КГц, т.е. 30 % (при анализе одного периода модуляции при средней частоте биений 30 КГц), которых достаточно для имитации протяженных поверхностей при наличии скорости и эволюций ЛА. Пример показан на рис. 8: семь отражателей с дальностями от 500 до 555 м с шагом 9,2 м получены путем чередования семи сигнальных каналов.

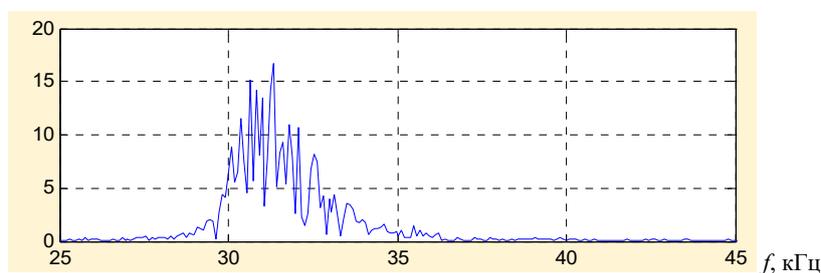


Рис. 8. Спектр сигнала биений при микшировании семи сигнальных каналов

Соответствующий вид сигнала биений показан на рис. 9 (внизу тот же график в увеличенном масштабе). Максимальная амплитуда сигнала биений через каждые 11 мс (длительностью около 0,3 мс) соответствует «обратному ходу» пилы ЧМ и при оценке характеристик РВ не используется. Амплитудная модуляция сигнала носит периодический характер, свидетельствующий о наличии всего нескольких сильных гармоник.

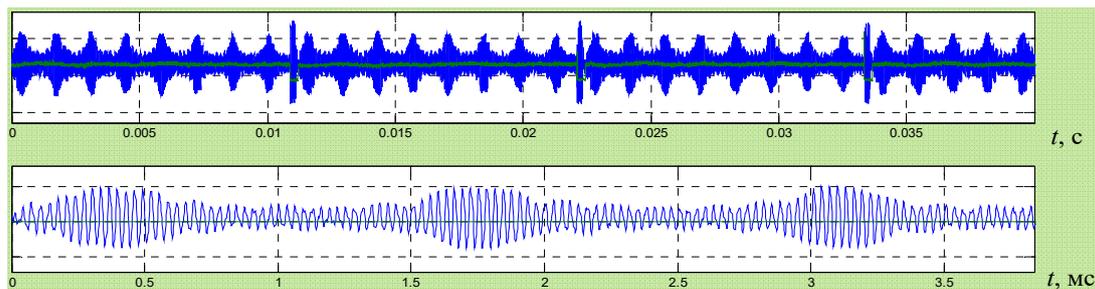


Рис. 9. Вид сигнала биений типового РВ при наличии семи отражателей

Заключение

Показано, что для формирования радиолокационных эхо-сигналов типовых радиолокаторов с переменными параметрами необходима реализация суммирования либо микширования копий зондирующего сигнала с разными задержками, амплитудами, частотными сдвигами. На базе модели и с одновременным учетом угловых эволюций и скорости ЛА, параметров ДНА и ДОР возможна группировка отражателей, расчет параметров заданного количества каналов формирования и передача их в имитатор сигнала на базе модулей ЦОС в реальном масштабе времени.

Использование микширования работы сигнальных каналов показало возможностькратно увеличить число имитируемых блестящих точек либо существенно упростить построение цифровой части имитатора. Возможность когерентной обработки сохраняется, так как фаза формируемого (имитирующего отражение от каждой точки цели) сигнала определяется дальностью (задержкой) и исходной фазой зондирующего сигнала, а возможная флуктуация амплитуд усредняется на нескольких периодах модуляции и сканирования.

Для полной компенсации дискрета по задержке распространения в имитаторе предложено гибко управлять тактовыми частотами блоков ЦОС. Рассмотренный метод относительно прост в реализации для имитации как точечных, так и распределенных целей.

Комплекс ПНМ позволяет многократно воссоздавать и повторять все моделируемые условия, что дает возможности усовершенствования алгоритмов работы и взаимодействия бортовых систем ЛА, выполнения сквозной проверки всей аппаратуры во всех летных режимах для типовых, граничных, а также для «запредельных» сочетаний параметров траектории и фоноцелевой обстановки.

Библиографический список

1. Пат. 2177160 Российская Федерация, МПК G01S7/38. Станция ретрансляционного типа однократных имитирующих помех доплеровским радиолокационным станциям / Блохин В. П., Жмуров Е. А., Быков Ф. М., Артюх В. В., Осыко М. В. – Заявл. 09.01.2001 ; опубл. 20.12.2001.
2. Технология полунатурного моделирования // Сайт ФГУП «ГосНИИАС». – URL: <http://www.gosniias.ru/pages/tpm.html> (проверен 19.03.2019).
3. Применение фацетной модели для имитации радиолокационного сигнала, отраженного от подстилающей поверхности / А. С. Боков, В. Г. Важенин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 7. – С. 55–61.
4. Зубкович, С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности / С. Г. Зубкович. – Москва : Сов. радио, 1968. – 224 с.
5. Борзов, А. Б. Математическое моделирование входных сигналов бортовых систем ближней радиолокации от подстилающих поверхностей на основе их многоточечных моделей / А. Б. Борзов, К. П. Лихоеденко, Ю. В. Каракулин, В. Б. Сучков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – № 4. – С. 48–57.
6. Ulaby, F. T. Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain / F. T. Ulaby, M. C. Dobson. – Artech House, Inc., Dedham, Mass., 1989. – 362 p.
7. Баскаков, А. И. Локационные методы исследования объектов и сред : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / А. И. Баскаков, Т. С. Жутяева, Ю. И. Лукашенко ; под ред. А. И. Баскакова. – Москва : Академия, 2011. – 384 с.
8. Пат. 2568899 Российская Федерация. Имитатор радиолокационной цели при зондировании преимущественно длительными сигналами / Боков А. С., Дядьков Н. А., Важенин В. Г., Мухин В. В., Щербатов Д. Е., Пономарев Л. И. – Оpubл. 20.09.2015, Бюл. № 26.
9. Пат. 2386143 Российская Федерация. Способ имитации радиосигнала, отраженного от пространственно распределенной динамической радиофизической сцены, в реальном времени / Герасимов А. Б., Киселева Ю. В., Кренев А. Н. – Оpubл. 10.04.2010, Бюл. № 10.
10. Процессор 1879BM3. – URL: <http://module.ru/upload/files/vm3.pdf> (проверен 19.03.2019).

11. Возможности исследования точностных характеристик бортовых радиовысотометрических 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.
12. Учет переменных параметров линейной частотной модуляции в имитаторе отраженных сигналов для радиовысотометров / 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.

References

1. Pat. 2177160 Russian Federation, MPK G01S7/38. *Stantsiya retranslyatsionnogo tipa odnokratnykh imitiruyushchikh pomekh doplerovskim radiolokatsionnym stantsiyam* [Pat. 2177160 Russian Federation, IPC G01S7/38. Station a relay type single-simulating interference Doppler radar stations]. Blokhin V. P., Zhmurov E. A., Bykov F. M., Artyukh V. V., Osyko M. V. Appl. 09.01.2001; publ. 20.12.2001. [In Russian]
2. *Tekhnologiya polunaturalnogo modelirovaniya* [Technology of semi-natural modeling]. Sayt FGUP «GosNIAS». Available at: <http://www.gosnias.ru/pages/tpm.html> (accessed 19.03.2019). [In Russian]
3. Bokov A. S., Vazhenin V. G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [Proceedings of higher educational institutions of Russia. Radionics]. 2012, vol. 7, pp. 55–61. [In Russian]
4. Zubkovich S. G. *Statisticheskie kharakteristiki radiosignalov, otrazhennykh ot zemnoy poverkhnosti* [Statistical characteristics of radio signals reflected from the earth's surface]. Moscow: Sov. radio, 1968, 224 p. [In Russian]
5. Borzov A. B., Likhoedenko K. P., Karakulin Yu. V., Suchkov V. B. *Uspekhi sovr. Radioelektroniki* [Advances in modern electronics]. 2017, no. 4, pp. 48–57. [In Russian]
6. Ulaby F. T., Dobson M. C. *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*. Artech House, Inc., Dedham, Mass., 1989, 362 p.
7. Baskakov A. I., Zhutyayeva T. S., Lukashenko Yu. I. *Lokatsionnye metody issledovaniya ob"ektov i sred: uchebnik dlya stud. uchrezhdeniy vyssh. prof. obrazovaniya* [Location methods of objects and media research: a textbook for students. institutions of higher education. Professor of education]. Moscow: Akademiya, 2011, 384 p. [In Russian]
8. Pat. 2568899 Russian Federation. *Imitator radiolokatsionnoy tseli pri zondirovanii preimushchestvenno dlitel'nymi signalami* [Pat. 2568899 Russian Federation. Radar target simulator when probing mainly with long-term signals]. Bokov A. S., Dyad'kov N. A., Vazhenin V. G., Mukhin V. V., Shcherbakov D. E., Ponomarev L. I. Publ. 20.09.2015, bull. no. 26. [In Russian]
9. Pat. 2386143 Russian Federation. *Sposob imitatsii radiosignala, otrazhennogo ot prostranstvenno raspredelennoy dinamicheskoy radiofizicheskoy stseny, v real'nom vremeni* [Pat. 2386143 Russian Federation. A method for real-time simulation of a radio signal reflected from a spatially distributed dynamic radiophysical scene]. Gerasimov A. B., Kiseleva Yu. V., Krenev A. N. Publ. 10.04.2010, bull. no. 10. [In Russian]
10. *Protessor 1879VM3*. Available at: <http://module.ru/upload/files/vm3.pdf> (accessed 19.03.2019).
11. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Dyad'kov N. A., Iofin A. A., Mukhin V. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no.1 (13), pp. 86–93. [In Russian]
12. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Gusev A. V., Nagashibaev D. Zh., Iofin A. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 3 (19), pp. 60–67. [In Russian]

Боков Александр Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
департамент радиоэлектроники и связи,
Институт радиоэлектроники
и информационных технологий,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

Важенин Владимир Григорьевич

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

Bokov Aleksandr Sergeevich

candidate of technical sciences,
senior scientist researcher,
department of radioelectronics and communications,
Institute of Radioelectronics
and Information Technologies,
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,
department of radioelectronics and communications,
Institute of Radioelectronics
and Information Technologies,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Иофин Александр Аронович

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

Мухин Владимир Витальевич

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

Iofin Aleksandr Aronovich

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

Mukhin Vladimir Vital'evich

candidate of technical sciences,
deputy general director-chief designer
for reseach and development,
Ural design bureau "Detal"
(623409, 8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,
Sverdlovsk Region, Russia)

Образец цитирования:

Боков, А. С. Ретрансляционный имитатор сигналов для проверки характеристик бортовых радиолокационных систем и устройств / А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 40–49. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-5.