

УДК 621.39

ИМИТАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАРАНЕЕ ПОДГОТОВЛЕННЫХ ДАННЫХ

А.В. Киселев, Д.А. Безрученко*Новосибирский государственный технический университет*

В современной практике разработки сложных радиоэлектронных систем и комплексов, в частности радиолокационных станций, широко используется моделирование, в том числе на завершающих этапах разработки программных средств, применяется имитация реальной радиоэлектронной обстановки, включающая моделирование комплекса входных эхосигналов и помех. При этом ключевым моментом обеспечения адекватности моделирования является требование имитации в реальном времени, что при использовании цифровых методов приводит к высоким требованиям к аппаратным ресурсам средств вычислительной техники, применяемым для формирования имитируемых сигналов и помех. Ниже рассмотрено решение, позволяющее снизить эти требования. Оно основано на использовании заранее подготавливаемых данных. Показано, что применительно к задачам имитации сигналов наземных обзорных радиолокационных станций оно позволяет ограничить вычисления простейшими преобразованиями с помощью аппаратных средств имитатора. Получены алгоритмы имитации, обеспечивающие моделирование в реальном времени. Показано, что в реальном времени может выполняться ограниченное число преобразований, реализуемых аппаратными средствами программируемых интегральных микросхем. Приведен пример реализации имитационного комплекса. Представлены его основные характеристики, подтверждающие возможность использования заранее подготовленных данных для имитации сигналов и помех в реальном времени.

Ключевые слова: имитация, радиолокация, эхосигналы, помехи, реальное время.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-3-20-31

Введение

Высокие требования к характеристикам современных радиолокационных станций (РЛС) и комплексов на их основе предусматривают применение для обработки сигналов и помех алгоритмов обработки, отличающихся высокой сложностью, адаптивностью и рядом других факторов. Это ограничивает использование при их создании традиционных подходов, основанных на измерении основных параметров и характеристик. Обязательным дополнением к ним выступают методы испытаний, основанные на многоуровневом моделировании внешней по отношению к РЛС электронной обстановки, позволяющие, с одной стороны, проводить разработку алгоритмического и программного обеспечения, не прибегая к полноценным натурным

экспериментам, а с другой – прогнозировать поведение объекта разработки в сложной, приближенной к реальной обстановке [1, 2].

Традиционно задача имитации эхосигналов и помех РЛС решается следующим образом [3–5].

Для текущих значений параметров траектории цели и носителя станции, а также параметров ее зондирующего сигнала, параметров активных (организованных) и пассивных помех, а также ряда других факторов рассчитываются текущие значения параметров эхосигналов от целей и пассивных помех, а также параметры активных радиопомех. В соответствии с ними рассчитываются отсчеты имитируемых эхосигналов и помех, которые затем преобразуются в аналоговые сигналы, переносимые на радиочастоту.

Перечисленные вычисления должны выполняться, по сути, в реальном времени, что требует применения вычислительных средств с колоссальным быстродействием. В результате затраты на создания имитатора могут превысить экономический эффект от его применения.

Ниже рассмотрен альтернативный вариант решения задачи имитации. Он основан на том, что данные, подготовленные заранее, до начала моделирования, заносятся в память имитатора, а затем в реальном времени извлекаются из нее. При этом в реальном времени осуществляются лишь относительно простые вычисления, реализуемые на программируемых логических интегральных схемах.

Цель работы – обосновать методы формирования сигналов, имитирующих радиолокационные эхосигналы и помехи, на основе использования предварительной подготовки данных.

Рассмотрено решение двух задач:

- 1) оценить выполнение условий применимости предварительной подготовки данных для имитации эхосигналов и помех наземных РЛС;
- 2) разработать алгоритмы имитации радиочастотных эхосигналов и помех для наземных РЛС обзора воздушного пространства, построенные на принципе предварительной подготовки данных.

1. Постановка задачи

Рассмотрим имитацию сигналов и помех применительно к наземной неподвижной РЛС управления воздушным движением, осуществляющей обнаружение воздушных точечных целей на фоне пассивных помех от поверхности земли и метеорологических образований. Предположим также, что РЛС использует периодический импульсный зондирующий сигнал с неизменными известными: комплексной огибающей и частотой повторения. Рабочая частота РЛС известна. Траектория движения цели и ее параметры заранее известны.

Таким образом, требуется показать, что применительно к данной станции способы вычисления отсчетов комплексной огибающей эхосигналов от точечных воздушных целей, от пассивных помех от поверхности земли и от пассивных помех от метеорологических образований можно разделить на три группы.

Первая группа – это вычисления, которые могут быть выполнены заранее и результаты которых неизменны в течение всего времени проводимого полунатурного эксперимента.

Вторая группа – вычисления, результаты которых могут быть получены заранее, но в процессе имитации изменяются. Причем эти изменения могут осуществляться с шагом по времени (обозначим его $T_{\text{обн}}$ – темп обновления), многократно превышающим шаг дискретизации отсчетов имитируемого сигнала или помехи (обозначим его T_d). Это позволяет выполнить вычисления заранее, результат занести в память имитатора, из которой они будут извлекаться по мере необходимости с шагом $T_{\text{обн}}$.

Третья группа – вычисления, выполняемые в реальном времени с шагом по времени, равным T_d .

2. Решение

2.1. Имитация точечной воздушной цели

Как известно [6, 7], эхосигнал от точечной воздушной цели, визируемой РЛС в свободном пространстве в момент времени t , в символическом виде можно записать:

$$\dot{i}(t) = A(t)\dot{S}_z(t - t_z(t))\exp\left(-j\left[\int_0^t \omega_D(t)dt + \omega_0 t + \varphi_0\right]\right), \quad (1)$$

где $A(t)$ – амплитуда эхосигнала; $\dot{S}_z(t)$ – комплексная огибающая зондирующего сигнала РЛС; t_z – задержка эхосигнала относительно момента начала излучения зондирующего импульса; j – мнимая единица; $\omega_D(t)$ – значение доплеровского сдвига эхосигнала от цели в момент времени t ; ω_0 – рабочая частота РЛС; φ_0 – случайная начальная фаза.

С учетом того, что перенос сигнала на рабочую частоту обычно выполняется аналоговым трактом, задача имитации будет заключаться в формировании отсчетов комплексной огибающей имитирующего сигнала, их преобразовании в аналоговый сигнал, переносе на рабочую частоту исследуемой РЛС, а также в установлении среднего уровня мощности этого сигнала (обычно осуществляется аналоговыми аттенюаторами, входящими в состав тракта переноса).

Комплексную огибающую, дискретизированную с шагом, равным T_d , нетрудно получить из выражения (1):

$$\dot{i}(nT_d) = A(nT_d)\dot{S}_z((n - m_z(n))T_d)\exp\left(-j\left[\sum_{i=0}^n \omega_D(iT_d)T_d + \varphi_0\right]\right), \quad (2)$$

где n – порядковый номер отсчета; $m_z(n) = \text{int}(t_z(nT_d)/T_d)$; $\text{int}(x)$ – функция округления аргумента до ближайшего целого.

Рассмотрим функции, входящие в выражение (2). Оценим темп их обновления, необходимый для адекватного моделирования эхосигнала.

В соответствии с принятыми допущениями комплексная огибающая зондирующего импульса и ее отсчеты неизменны. Это позволяет провести их расчет заранее, занести его результаты в память имитатора и затем извлекать из нее по мере необходимости с темпом T_d . Безусловно, их формирование может быть отнесено к первой группе.

Амплитуда эхосигнала $A(t)$ зависит от расстояния до цели (обозначим его $R_c(nT_d)$) и при его изменении также будет изменяться [7]:

$$A(nT_d) \sim 1 / R_c(nT_d)^2,$$

или в относительных величинах:

$$A(nT_d) \sim (R_c(nT_d + T_{обн}) / R_c(nT_d))^2.$$

Например, при $t_z = 10$ мкс (что соответствует наклонной дальности до цели 1,5 км) за время $T_{обн} = 10$ мс для радиальной составляющей скорости сближения 300 м/с (обозначим ее V_c) получим изменение амплитуды приблизительно на 0,04 %, а при $t_z = 100$ мкс (что соответствует наклонной дальности до цели 15 км) получим изменение амплитуды приблизительно на 0,0004 %.

Изменение задержки эхосигнала относительно начала излучения зондирующего импульса РЛС за время $T_{обн}$ (обозначим его Δt_z)

$$\Delta t_z = 2(R_c(nT_d + T_{обн}) - R_c(nT_d)) / c,$$

где c – скорость света.

За $T_{обн} = 10$ мс значение Δt_z составит 3 м.

Доплеровское смещение частоты $\omega_D(t)$ при изменении радиальной составляющей вектора скорости также будет меняться:

$$\omega_D(t) = 2V_c(t) / \lambda, \quad \omega_D(nT_d) = 2V_c(nT_d) / \lambda,$$

$$\Delta \omega_D(nT_d) = 2(V_c(nT_d) + anT_d) / \lambda,$$

где a – ускорение.

Для $a = 10$ м/с² получим относительное изменение доплеровского смещения частоты за $T_{обн} = 10$ мс порядка 1/3 %.

Полученные результаты и численные оценки позволяют сделать следующие выводы.

При имитации эхосигналов от точечной воздушной цели формирование имитирующего сигнала может быть разделено:

– на вычисление отсчетов комплексной огибающей зондирующего импульса, его занесение в память имитатора и ее многократное дальнейшее использование (первая группа);

– предварительные вычисления отсчетов функций $A(nT_d)$, $t_z(nT_d)$ и $\omega_D(nT_d)$ с последующим занесением результатов в память имитатора (вторая группа);

– вычисление отсчетов комплексной огибающей имитируемого сигнала [по формуле (2)], сводящееся к извлечению из памяти (с шагом по времени $T_{обн}$) параметров имитируемого сигнала, отсчетов комплексной огибающей зондирующих импульсов (с шагом по времени T_d) и последующее преобразование в соответствии с формулой (2) (третья группа).

Как видно, основной объем вычислений может выполняться заранее и не в реальном времени. Действия, осуществляемые в реальном времени, сводятся к введению доплеровского сдвига и вычислениям по формуле (2), что вполне реализуемо с помощью программируемых интегральных микросхем.

2.2. Имитация эхосигналов от поверхности земли

Поверхность земли является классическим случаем поверхностно распределенной пассивной помехи [6]. Она протяжена по следующим координатам: наклонная дальность, азимут и угол места. Используя выражение (1), для нее можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{i}(t, \alpha) = & \sum_{k=1}^K A_k(\alpha, k, t) \dot{S}_z(t - t_{zk}(t)) \times \\ & \times \exp \left(-j \left[\int_0^t \omega_{Dk}(\alpha, t) dt + \omega_0 t + \varphi_{\alpha, k} \right] \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где K – количество элементов дальности, для которых имитируется эхосигнал от поверхности земли; $\dot{i}(t, \alpha)$, $A_k(\alpha, k, t)$, $t_{zk}(t)$, $\omega_{Dk}(\alpha, t)$, $\varphi_{\alpha, k}$ – соответственно мгновенное значение эхосигнала, его амплитуда для k -го элемента дальности в направлении зондирования, заданного азимутальным направлением α , задержка эхосигнала от k -го элемента дальности, доплеровский сдвиг и начальная фаза эхосигнала от него.

Ограничимся имитацией сигнала для одного углового направления (зададим $\alpha = \alpha_0$) и перейдем от формулы (3) к отсчетам комплексной огибающей:

$$\begin{aligned} i(nT_d, \alpha_0) = & \sum_{k=1}^K A_k(\alpha_0, k, nT_d) \dot{S}_z(t - t_{zk}(n \cdot T_d)) \times \\ & \times \exp \left(-j \left[\sum_{i=0}^n \omega_{Dk}(\alpha_0, iT_d) T_d + \varphi_{\alpha_0, k} \right] \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим частные случаи.

2.2.1. Имитация эхосигналов для статичных земных покровов

В этом случае доплеровское смещение частоты отсутствует, как и доплеровские флуктуации эхосигнала. Это позволяет записать выражение (4) в виде

$$\begin{aligned} i(nT_d, \alpha_0) &= \sum_{k=1}^K A_k(\alpha_0, k, nT_d) \dot{S}_z(t - t_{zk}(nT_d)) \times \\ &\times \exp\left(-j \left[\sum_{i=0}^n \omega_{Dk}(\alpha_0, iT_d) T_d + \varphi_{\alpha_0, k} \right]\right) = \\ &= \sum_{k=1}^K A_k(\alpha_0, kT_d) \dot{S}_z(t - t_{zk}(nT_d)) \exp(-j\varphi_{\alpha_0, k}). \end{aligned}$$

2.2.2. Использование простого зондирующего сигнала

В этом случае

$$i(nT_d, \alpha_0) = \sum_{k=1}^K A_k(\alpha_0, kT_d) \exp(-j\varphi_{\alpha_0, k}).$$

Нетрудно заметить, что в рассмотренных частных случаях имитация эхосигналов отличается от имитации отражений от точечной цели тем, что вместо комплексной огибающей зондирующего импульса выступает ее свертка с распределением амплитуд эхосигналов по поверхности земли. Ее отсчеты могут быть рассчитаны заранее и занесены в память имитатора.

2.3. Имитация пассивных помех от метеорологических образований

Метеорологические образования являются классическим случаем обильно распределенных пассивных помех. Выражение для расчета отсчетов комплексной огибающей имитируемого сигнала во многом аналогично имеющему место для поверхности земли. Это позволяет использовать для имитации те же подходы и решения, что и для земли.

2.4. Выводы

В целом полученные соотношения и численные оценки позволяют сделать следующие выводы.

Вычисления отсчетов комплексной огибающей эхосигналов от точечных воздушных целей, поверхности земли и метеорологических образований могут быть разделены на три группы: 1) не обновляемых во время моделирования и выполняемых заранее однократно; 2) выполняемых заранее для моментов времени, кратных $T_{обн}$; 3) выполняемых в реальном времени с темпом T_d .

Нецелесообразность предварительного вычисления отсчетов комплексной огибающей имитируемого сигнала определяется следующими факторами.

Во-первых, темп извлечения отсчетов $T_{\text{обн}} / T_d$ превышает $T_{\text{обн}}$, и для их хранения необходимо применение быстродействующего оперативного запоминающего устройства (ОЗУ).

Во-вторых, объем проводимого эксперимента будет пропорционален его продолжительности.

Например, при $T_d = 20$ нс и продолжительности эксперимента 8 ч объем вычислений составит порядка $144 \cdot 10^{10}$ комплексных отсчетов, подготовка которых даже на быстродействующей ЭВМ займет много времени. Разделение хранимых данных при тех же условиях дает возможность снизить темп обновления до $T_{\text{обн}}$, а объем – приблизительно до $9 \cdot 10^7$, т. е. почти в 50 000 раз, что позволяет использовать для хранения относительно медленную флеш-память.

3. Практическая апробация

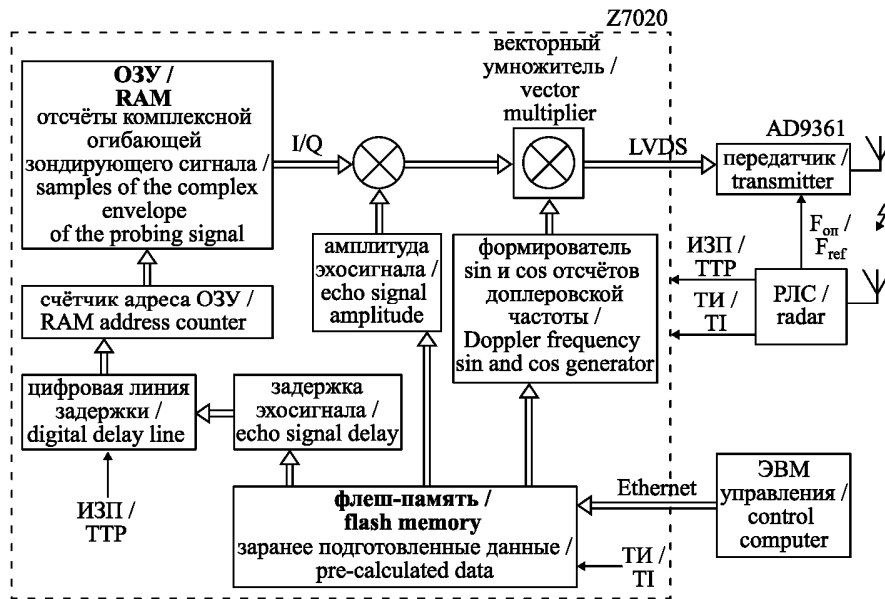
Апробация полученных результатов осуществлялась путем их использования для создания экспериментального образца имитатора [8]. Он выполнен на основе системы на кристалле ZYNQ Z-7020 фирмы Xilinx/AMD и микросхемы SDR-приемопередатчика AD9361 фирмы Analog Devices. Выбор платформы обоснован наличием в системе на кристалле двухъядерного ARM Cortex-A9 процессора с тактовой частотой работы до 866 МГц для обработки команд управления и конфигурирования имитатора, а также для работы с внешними интерфейсами, такими как Ethernet и флеш-накопитель. Помимо процессорной части присутствует полноценная программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) на 85 тысяч логических элементов, блок памяти размером 4,9 Мбит, 220 блоков цифровой обработки сигналов. Система на кристалле объединяет процессорную часть и ПЛИС посредством шины AXI, что позволяет обмениваться данными между ними.

Выбор SDR-приемопередатчика обоснован наличием в одной микросхеме полноценного цифрового двухканального дуплексного приемопередатчика с возможностью выбора центральной частоты в широком диапазоне от 70 МГц до 6 ГГц от встроенного синтезатора частот и шириной полосы пропускания выходного сигнала до 56 МГц со встроенными перестраиваемыми фильтрами нижних частот. Выходные каналы оснащены управляемыми аттенюаторами с вносимым затуханием до 90 дБ и шагом 0,25 дБ.

Для формирования эхосигнала предложена блок-схема, приведенная на рисунке.

На имитатор от РЛС поступают импульсы начала излучения зондирующих импульсов (на рисунке обозначены как ИЗП), опорной частоты $F_{\text{оп}}$, а также тактовые импульсы (ТИ), синхронизирующие время имитатора со временем станции и определяющие темп обновления параметров моделируемой ситуации.

При имитации эхосигналов от точечных воздушных целей и рассмотренных пассивных помех работа имитатора осуществляется следующим образом.



Укрупненная блок-схема имитатора
An enlarged block diagram of the simulator

ЭВМ осуществляет:

- ввод исходных данных (скорости движения и ускорения цели, начальной амплитуды эхосигнала и т. д.) и формирование сценария эксперимента;
- расчет заранее подготавливаемых данных (отсчетов комплексной огибающей зондирующего импульса, кода задержки эхосигнала, его амплитуды и доплеровского сдвига) и занесение по каналу Ethernet его результатов: S_z – в ОЗУ; $m_z(n)$, A , ω_D – во флеш-память имитатора;
- после записи всего объема подготовленных данных ЭВМ формирует команду «Пуск», по которой начинается процесс имитации сигналов и помех.

При этом имитатор работает полностью автономно.

Из флеш-памяти извлекаются актуальные значения кода задержки, амплитуды и доплеровского сдвига $m_z(n)$, A , ω_D , а из ОЗУ с задержкой относительно импульсов ИЗП, соответствующей $m_z(n)$, извлекаются отсчеты комплексной огибающей зондирующего импульса. В ПЛИС устанавливается их амплитуда, вводится частотное смещение на величину текущего значения доплеровского сдвига.

Таким образом, цифровые данные в имитаторе можно разделить на «быстрые» – идущие с частотой дискретизации цифро-аналогового преобразователя (темп их обновления равен T_d), и «медленные» – меняющие свое значение не чаще чем сигнал синхронизации ТИ (порядка 10 мс). Темп следования ТИ равен $T_{обн}$.

К «быстрым» данным относится комплексная огибающая зондирующего сигнала. К «медленным» относятся коды задания амплитуды, задержки,

доплеровского смещения частоты и затухания аттенюаторов. Для хранения комплексной огибающей зондирующего сигнала используется двухпортовая ОЗУ, построенная из блоков памяти, и имеющая разрядность 12 бит и глубину 32 768 ячеек на каждую квадратуру каждого передающего канала, что при $T_d = 20$ нс позволяет хранить зондирующий сигнал длительностью до 655 мкс. Изменение амплитуды зондирующего сигнала выполнено путем умножения отсчетов комплексной огибающей на $A(t)$, которая хранится во флеш-памяти и обновляется с каждым ТИ. Умножение выполняется в реальном времени за счет использования умножителей блоков цифровой обработки сигналов ПЛИС.

Имитация задержки сигнала по дальности реализуется цифровой линией задержки (ЦЛЗ). На вход ЦЛЗ с каждым ТИ поступает код необходимой задержки из флеш-памяти, а также импульс запуска передатчика (ИЗП) радиолокатора. Цифровая линия задержки разрешает работу счетчика адреса выбора отсчетов комплексной огибающей зондирующего сигнала, поступающего на ОЗУ.

Подстройка частоты выходного сигнала, имитирующая эффект Доплера, выполнена на аппаратном векторном умножителе и работает в реальном времени. Векторный умножитель построен на блоках цифровой обработки сигналов ПЛИС. Управление частотой Доплера происходит за счет установки приращения фазы заранее рассчитанных отсчетов функций синуса и косинуса. Приращение фазы хранится и обновляется с каждым ТИ.

Полученные отсчеты поступают на вход микросхемы приемопередатчика AD9361. В микросхеме происходит преобразование цифровых отсчетов в аналоговый сигнал и его перенос на рабочую частоту.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Априорная определенность условий имитации сигналов и помех является ключевым моментом, определяющим возможности использования при моделировании в реальном времени предварительно подготовленных данных.

2. Использование разделения вычислений отсчетов имитируемых сигналов и помех на группы: расчетов, осуществляемых до начала имитации и осуществляемых аппаратными средствами в реальном времени, позволяет свести имитацию к предварительной подготовке данных с сохранением ее результатов. При этом формирование отсчетов имитируемого сигнала сводима к извлечению этих данных из памяти, а также к простейшим вычислениям, осуществляемым аппаратными средствами имитатора в реальном времени.

3. В качестве аппаратных средств могут быть использованы доступные средства, включающие систему на кристалле и SDR-модуль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полунатурное моделирование радиотехнических информационно-измерительных систем комплекса управления летательных аппаратов с использованием имитаторов / В.А. Щаренский, И.П. Прощицкий, В.Х. Рисенберг и др. // Вопросы кибернетики. Вып. 67. Проблемы авиационной и космической кибернетики (интегрированные системы активного управления). – М., 1981. – С. 121–131.
2. **Урсатьев А.А., Погребня Н.П.** Полунатурная модель сигнально-помеховой радиолокационной обстановки // Управляемые системы и машины. – 1991. – № 4. – С. 102–111.
3. **Тверской Г.Н., Харченко Г.К., Терентьев И.П.** Имитаторы эхо-сигналов судовых радиолокационных станций. – Л.: Судостроение, 1973.
4. **Hill D.J., Morgan J.R., Sherlock P.E.** Simulation of radar returns from land using a digital technique // International Conference Radar-82, 18–20 October. – London, 1982. – P. 240–244.
5. Portable RF Target Simulator / D. Wayne, A. Schlegel, S. Nichols, D. Bodnar, D. Hess, G. Cawthon, A. Tellakula, J. Skinner, T. Dam, B. Myles, H. Gratt // AMTA 2009 Proceedings. – Englewood, USA, 2009.
6. **Бакулев П.А., Степин В.М.** Методы и устройства селекции движущихся целей. – М.: Радио и связь, 1986.
7. **Skolnik M.** Radar handbook. – 3rd ed. – Boston: McGraw-Hill, 2008. – 1352 p.
8. Натурный эксперимент: информационное обеспечение экспериментальных исследований / под ред. Н.И. Баклашова. – М.: Радио и связь, 1982. – 292 с.

**SIMULATION OF RADAR SIGNALS AND INTERFERENCE BASED
ON THE USE OF PRE-CALCULATED DATA****Kiselev A.V., Bezruchenko D.A.***Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Modern practice in developing complex electronic systems and complexes, particularly radar stations, includes an extensive use of simulation. Simulation of a real electronic environment, including modeling of a set of input echo signals and interference, is particularly useful in the final stages of software development. A key factor in ensuring adequate simulation is the requirement for real-time simulation, which, when using digital methods, places high demands on the hardware resources of the computing equipment used to generate the simulated signals and interference. A solution that reduces these requirements is discussed below. It is based on the use of pre-calculated data. It is shown that, when applied to tasks of simulating signals from ground-based surveillance radars, this allows for limiting calculations to the simplest transformations achievable by the simulator hardware. Simulation algorithms are obtained that provide real-time simulation. It is shown that a limited number of transformations implemented by the hardware of programmable integrated circuits can be performed in real time. An example of the implementation of the simulation complex is provided. Its main characteristics confirming the possibility of using pre-calculated data to simulate signals and interference in real time are presented.

Keywords: Simulation, radar, echo signals, interference, real time.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-3-20-31

REFERENCES

1. Shcharenskii V.A., Proshchitskii I.P., Risenberg V.Kh., et al. Polunaturnoe modelirovanie radiotekhnicheskikh informatsionno-izmeritel'nykh sistem kompleksa upravleniya letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniem imitatorov [Semi-naturalistic modeling of radio-technical information-measuring systems of the aircraft control complex using simulators]. *Voprosy kibernetiki*. Vyp. 67. *Problemy aviatsionnoi i kosmicheskoi kibernetiki (integrirovannye sistemy aktivnogo upravleniya)* [Cybernetics. Iss. 67. Problems of aviation and space cybernetics (integrated active control systems)]. Moscow, 1981, pp. 121–131.
2. Ursat'ev A.A., Pogrebnya N.P. Polunaturnaya model' signal'no-pomekhovoi radiolokatsionnoi obstanovki [A semi-naturalistic model of the signal-jamming radar environment]. *Upravlyaemye sistemy i mashiny*, 1991, no. 4, pp. 102–111. (In Russian).
3. Tverskoi G.N., Kharchenko G.K., Terent'ev I.P. *Imitatory ekho-signalov sudovykh radiolokatsionnykh stantsii* [Simulators of echo signals of ship radar stations]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973. 224 p.
4. Hill D.J., Morgan J.R., Sherlock P.E. Simulation of radar returns from land using a digital technique. *International Conference Radar-82*, 18–20 October, London, 1982, pp. 240–244.
5. Wayne D., Schlegel A., Nichols S., Bodnar D., Hess D., Cawthon G., Tellakula A., Skinner J., Dam T., Myles B., Gratt H. Portable RF Target Simulator. *AMTA 2009 Proceedings*, Englewood, USA, 2009.
6. Bakulev P.A., Stepin V.M. *Metody i ustroistva seleksii dvizhushchikhsya tselei* [Methods and devices for selecting moving targets]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 286 p.
7. Skolnik M. *Radar handbook*. 3rd ed. Boston, McGraw-Hill, 2008. 1352 p.
8. Baklashov N.I., ed. *Naturnyi eksperiment: informatsionnoe obespechenie eksperimental'nykh issledovaniy* [Natural experiment: information support for experimental research]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 292 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Киселев Алексей Васильевич – родился в 1958 году, д-р техн. наук, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитационное моделирование сложной радиоэлектронной обстановки, радиолокация, радиосвязь. Имеет более 200 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nil_rtu@mail.ru).

Kiselev Alexey Vasilevich (b. 1958) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on simulation of complex electronic environment, radar detecting and ranging, and radio communication. He is the author of over 200 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nil_rtu@mail.ru).



Безрученко Даниил Александрович – родился в 1998 году, аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: встраиваемые системы, радиолокация, радиосвязь. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nil_rtu@mail.ru).

Bezruchenko Daniil Aleksandrovich (b. 1998) – postgraduate student at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on embedded systems, radar, and radio communication. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073. Russia, E-mail: nil_rtu@mail.ru).

*Статья поступила 20 апреля 2026 г.
Received April 20, 2026*

To Reference:

Kiselev A.V., Bezruchenko D.A. Imitatsiya radiolokatsionnykh signalov i pomekh na osnove ispol'zovaniya zaranee podgotovlennykh dannykh [Simulation of radar signals and interference based on the use of pre-calculated data]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2026, no. 3 (72), pp. 20–31. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-3-20-31