
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 623.623:519.876.5:004.045

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ «ЗВЕЗДНОМ» АВИАНАЛЕТЕ НА НАЗЕМНЫЙ ОБЪЕКТ

А. В. Дубатовская

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

Поступила в редакцию 25.05.2019 г.

Аннотация. Рассмотрена имитационная модель радиоэлектронной обстановки, формируемой потоками радиосигналов бортовых радиолокационных средств самолетов на входах средств радиомониторинга, в ходе конфликтного взаимодействия двух противоборствующих сторон с проведением одной из них авианалета на наземный объект другой стороны. Модель разработана применительно к «звездному» авианалету со сложной траекторией движения самолетных групп. Предложены два варианта моделирующего алгоритма, проведен их сравнительный анализ. С использованием языка C++ и кроссплатформенной среды разработки Qt Creator выполнена объектно-ориентированная реализация имитационной модели. Приведены результаты моделирования. Разработанная модель может применяться в задачах обоснования требований к аппаратуре средств радиомониторинга в гражданской и военной сферах.

Ключевые слова: радиомониторинг, радиоэлектронная обстановка, авианалет, бортовая РЛС, радиосигнал, имитационное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных типов взаимодействия сложных систем в настоящее время является конфликт. Исход конфликта во многом определяется информационным обеспечением сторон, необходимым для применения боевых ресурсов. Особенно актуальным этот вопрос становится в военной сфере, где конфликтующими сторонами выступают радиоэлектронные системы, входящие в состав радиоэлектронных комплексов противоборствующих держав. Наиболее важным видом информационных систем, от качества работы которых во многом зависит исход конфликта радиоэлектронных систем, являются системы радиомониторинга [1–3]. Одним из направлений их совершенствования является создание технологий обработки радиосигналов

с пространственно-временной селекцией и определением принадлежности источникам. Решение данной задачи связано с выявлением закономерностей формирования и оценкой статистических характеристик потоков радиозлучений в фиксированных диапазонах частот на основе исследования радиоэлектронной обстановки (РЭО). Наиболее сложные условия характерны для ситуаций контроля состояний радиолокационных средств, размещаемых на бортах летательных аппаратов, вследствие высокой плотности потока принимаемых сигналов и динамики изменения пространственного положения излучателей на интервале анализа.

Известно, что одним из наиболее эффективных инструментов анализа и синтеза сложных информационных систем является имитационное моделирование [4]. Целью данной работы является построение имитационной модели и оценка радиоэлектронной

обстановки, создаваемой бортовыми радиолокационными средствами (БРЛС) в процессе авианалета на объекты прикрытия противоборствующей стороны. Модель РЭО предназначена для формирования и воспроизведения поля радиосигналов радиоэлектронных средств, а также для оценки характера потока радиосигналов в заданном участке диапазона частот для типового боевого эпизода.

В основу разработки положены результаты предыдущих разработок в данной области, в частности, [1]. При построении модели РЭО в [1] использовалась устаревшая к настоящему моменту процедурная парадигма программирования и рассматривается случай неподвижных наземных источников радиоизлучения. В данной работе исследуются вопросы моделирования потока радиоизлучений от БРЛС самолетов, участвующих в авианалете на наземный объект, с использованием современной объектно-ориентированной парадигмы программирования. Представляет интерес ранее не рассматривавшийся наиболее сложный, так называемый «звездный» вариант налета (несколько самолетных групп с нескольких направлений), причем для уменьшения вероятности обнаружения самолетов применяются вертикальные маневры со снижением на предельно малую высоту полета, приводящие к срыву приема сигналов БРЛС средствами мониторинга.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Основные этапы решения задачи и используемые математические модели

Типовой профиль полета самолетной группы в вертикальной плоскости представ-

лен на рис. 1. В соответствии с рисунком самолеты выходят в район предполагаемого размещения наземного объекта – цели – на оптимальной высоте полета $H_{опт}$. Типичным примером цели в военных конфликтах выступает зенитно-ракетный комплекс (ЗРК), имеющий в своем составе РЛС ЗРК [5]. Вокруг цели на земной поверхности рассредоточены дополнительные средства радиомониторинга, принимающие зондирующие радиоизлучения БРЛС в интересах вскрытия источников и создания противодействия для защиты РЛС ЗРК. В точках расположения этих средств проводится моделирование РЭО.

На предполагаемой дальней границе зоны радиолокационного обнаружения РЛС ЗРК самолеты снижаются (2) на минимально возможную высоту полета $H_{мин}$ и затем, используя маскирующие свойства местности, осуществляют полет к цели (3). Для определения координат и распознавания цели самолеты совершают маневр типа «горка» (4). После определения параметров цели производится подъем на высоту, необходимую для пуска ракеты (5), и разворот на 180° (6). Выход самолетов на оптимальную высоту полета на обратном курсе происходит на безопасном расстоянии от ЗРК.

Моделирование авианалета включает имитацию динамики полета с пересчетом координат самолетов с заданным шагом в каждой временной точке и одновременным излучением радиосигналов БРЛС. Для постановки задачи имитации авианалета необходимо задание конкретного боевого эпизода (сценария налета).

Информацию о боевом эпизоде составляют следующие данные: количество самолет-

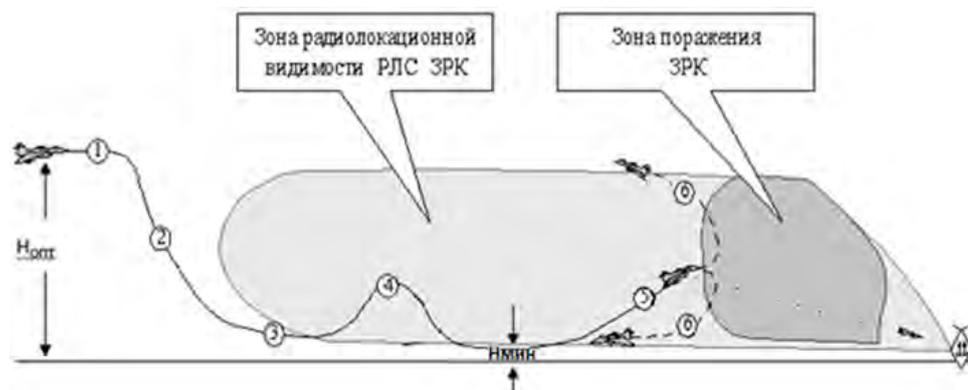


Рис. 1. Типовой профиль полета самолетной группы при налете на цель

ных групп, количество пунктов приема генерируемых радиосигналов; параметры пункта приема; параметры самолетной группы, включая боевые порядки [6]. Типовая траектория движения самолетной группы в вертикальной плоскости (профиль полета) упрощенно аппроксимируется ломаной линией, состоящей из нескольких участков. Информация о траектории включает в себя количество участков и параметры каждого участка, включая и режим работы БРЛС.

Смена режимов работы БРЛС применяется совместно с вертикальными маневрами для снижения заметности самолетов и представляет собой смену значений параметров излучений, а также размеров и направлений секторов обзора антенн при смене участков траекторий движения самолетных групп. К основным режимам работы БРЛС относятся следующие: обзор воздушного пространства – на участках 1 и 5 траектории движения самолетной группы; обеспечение полета на малых высотах (ОПМВ) – на участках 2, 3; прицеливание – на участке 4.

Выделим следующие требования к имитационной модели РЭО:

- воспроизведение динамики авианалета с учетом вертикальных маневров самолетов и смены режимов работы БРЛС на определенных участках траекторий движения;

- детальное воспроизведение тонкой структуры диаграмм направленности антенн БРЛС и сканирование пространства главным лучом антенны излучателя в азимутальной и угломестной плоскостях;

- формирование смешанного потока радиосигналов от БРЛС в точках расположения модулей радиомониторинга (точках наблюдения) с учетом зависимости уровня мощности сигналов от расстояния до точки наблюдения, угла рассогласования между направлениями главных лучей антенн излучателя и приемника, влияния трассы распространения;

- учет срыва приема сигналов БРЛС в силу различных причин (пролет самолетов на участках траекторий, где не выполняются требования прямой видимости; переход БРЛС в режим «молчания»).

Количественным показателем эффективности, оцениваемым на модели, выступает интенсивность потока сигналов в точке приема в единицу времени. Интенсивность потока позволяет обосновать требования к пропускной способности аппаратуры радиомониторинга, под которой понимается количество единиц входной информации, которое может быть обработано за единицу реального времени.

В соответствии с принципами системного анализа, разработка имитационной модели включает структурно-функциональную декомпозицию задачи, а также введение временных этапов синтеза [4]. Процесс структурной декомпозиции позволяет выделить структурную модель рассматриваемой задачи как иерархическую систему классов – элементов модели. Диаграмма классов с указанием логических связей между ними, выполненная на языке моделирования UML, в обобщенном виде представлена на рис. 2.

Центральное место на диаграмме занимает класс «Модель», являющийся контейнером для всех прочих объектов (самолетных групп, точек наблюдения, очередей радиосигналов). Класс инкапсулирует общие для модели РЭО задачи: загрузка исходной информации из базы данных, выработка начальных состояний объектов и общее управление процессом моделирования полета самолетных групп по типовым траекториям с одновременным излучением радиосигналов и их приемом в точках наблюдения. В задаче создается единственный экземпляр этого класса.

Создание математической модели РЭО включало создание математического описания тонкой структуры ДНА излучающих объектов, а также расчет уровня мощности радиосигналов на входе приемоанализирующей аппаратуры. В модели принята следующая аппроксимация зависимости излучаемой энергии от направления излучения, являющаяся адекватным выражением структуры диаграмм направленности реальных антенн [1, 7]:

$$\frac{G(\theta)}{G_0} \approx \begin{cases} \exp[-2,78(\theta/\theta_0)^2] & \text{при } 0 \leq \theta < \theta_0; \\ \frac{0,0625}{(\theta/\theta_0)^4} \cdot 10^{\frac{\xi(\theta)}{10}} & \text{при } \theta_0 \leq \theta \leq \pi, \end{cases} \quad (1)$$

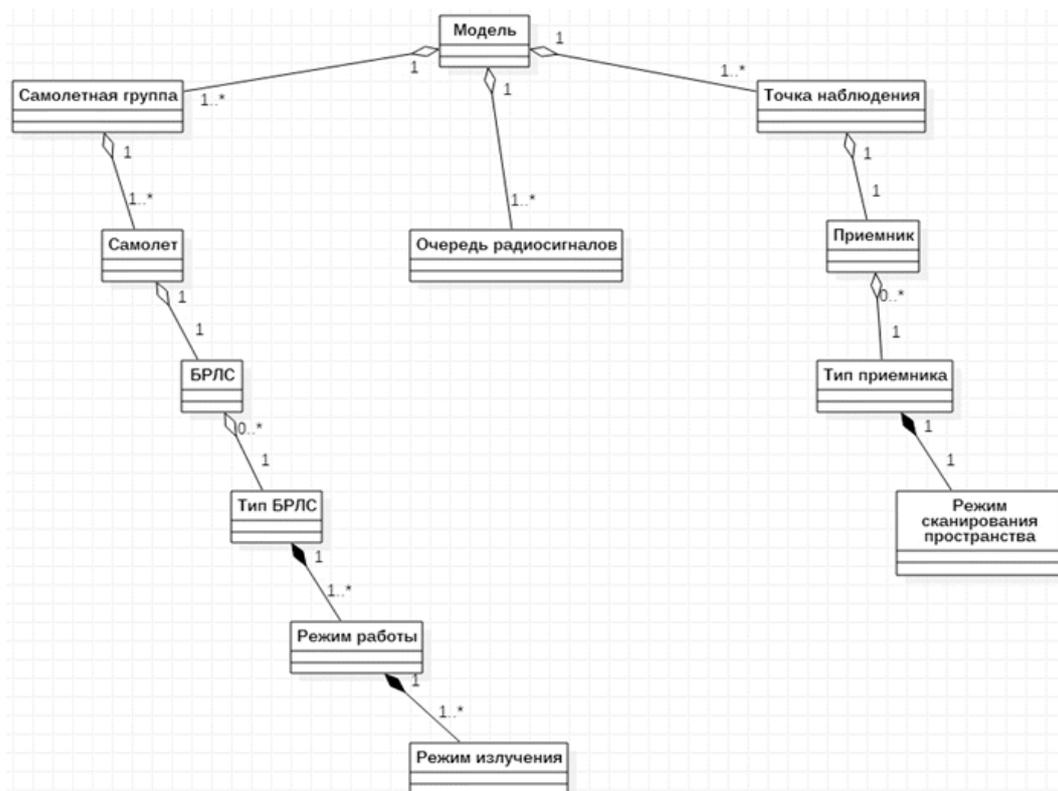


Рис. 2. Диаграмма классов модели РЭО в обобщенном виде

где θ – угол между направлением рассеивания мощности антенны и направлением главного луча; $G(\theta)$ – функция, описывающая ДНА излучателя в зависимости от угла θ ; G_0 – значение мощности, излучаемой в направлении главного луча; θ_0 – ширина главного луча на уровне половинной мощности; μ – коэффициент, учитывающий влияние местных предметов (обычно он равен 1 или 2); $\xi(\theta)$ – значение стационарного случайного процесса по оси углов θ с интервалом корреляции, соизмеримым с шириной главного лепестка, с нормированным гауссовским распределением и корреляционной функцией вида $R(\tau) = \exp(-\alpha\tau)$, реализации которого накладываются на среднее значение уровня мощности боковых лепестков для получения «изрезанности» ДНА.

С учетом (1) имеем:

$$P_{изл} = P_{имп} \frac{G(\theta)}{G_0}, \quad (2)$$

$$P_{i\delta} = \frac{P_{изл}}{(4\pi R)^2} \left(\frac{c}{f}\right)^2 \frac{КНД_{изл}}{2} F^2, \quad (3)$$

где $P_{имп}$ – импульсная мощность излучающего генератора; $P_{изл}$ – мощность излучателя;

$P_{пр}$ – мощность радиосигнала на входе приемника; R – расстояние от излучателя до приемника; c – скорость распространения электромагнитных волн, f – несущая частота сигнала; $КНД_{изл}$ – коэффициент направленного действия антенны излучателя; F – интерференционный множитель, характеризующий влияние Земли на распространение поля радиоволны.

Интерференционный множитель F для большинства практических случаев вычисляется следующим образом [8]:

$$F = 2 \left| \sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r} \right|, \quad (4)$$

где h_1 и h_2 – высоты излучающей и приемной антенн; λ – длина волны излучаемого сигнала; r – расстояние между излучателем и приемником.

2. Предлагаемые подходы к построению моделирующего алгоритма

Программная реализация имитационной модели выполнялась с использованием кроссплатформенного фреймворка Qt. Моделирующий алгоритм задавался на основе функции-

ональной декомпозиции модели РЭО, включающей такие функциональные процессы, как генерация потока радиосигналов БРЛС и прием этого потока в точках наблюдения. Эти два процесса – генерация и прием – должны происходить одновременно и независимо друг от друга. В то же время очевидно, что необходимо программно некоторым образом организовать взаимодействие излучающих и принимающих излучение объектов.

Простейшим вариантом решения этой задачи представляется использование механизма *событий*, заключающегося в том, что один объект может оповестить все остальные о каком-то происшествии путем отсылки события. Так, источник излучения может отсылать события о том, что был излучен радиосигнал, и эти события будут принимать точки наблюдения. Событие представляет собой структуру определенного формата, позволяющую передавать внутри себя различные параметры [9]. Для реализации отправки и получения событий (сообщений) фреймворк Qt предоставляет удобный механизм *сигнально-слотовых соединений*. Объект, генерирующий некое *событие*, высылает сигнал о том, что событие произошло, а объекты-приемники обрабатывают высылаемый сигнал в теле функции-слота. Наиболее естественным вариантом применения этого механизма к решаемой задаче было бы высылать сигнал от объектов класса «БРЛС» объектам класса «Точка наблюдения» всякий раз при излучении очередного радиосигнала. Однако реализация данного варианта показала крайне низкое быстродействие в силу временных и вычислительных затрат на отсылку большого количества сигналов, а также того, что имеет место синхронный характер взаимодействия объектов: излучатели «ждут» окончания приема перед тем, как перейти к следующей временной точке. Это является упрощением модели, т. к. в реальной системе функционирование излучателей и приемников происходит асинхронно.

Идея модернизации рассмотренного варианта взаимодействия объектов заключается в том, что вместо отсылки сигнала точкам наблюдения в момент излучения радиосигнала следует заносить его дескриптор в модель-

ную очередь, созданную в текущей временной точке. После заполнения очереди (излучения пачек радиосигналов всеми излучающими объектами) следует отсылать *единственный* сигнал точкам наблюдения, передавая в качестве параметра указатель на очередь. Просматривая очередь, точки наблюдения создают свои собственные очереди, упорядоченные по времени прихода радиосигналов, и передают на обработку уже их, а не модельную очередь. После просмотра всеми точками наблюдения модельная очередь очищается. В каждой временной точке формируется новая модельная очередь, что позволяет не ждать окончания приема, т. е. реализовать асинхронное функционирование излучателей и приемников.

Достоинство представленного алгоритма – простота и ясность. Программная реализация описанного способа показала увеличение быстродействия за счет значительного сокращения числа отсылок сигналов. С другой стороны, при увеличении числа излучающих объектов в задаче размер генерируемых очередей быстро возрастает, как возрастает и время их просмотра в точках наблюдения, что снова приводит к плохому быстродействию. Причина заключается в попытке сохранить естественную независимость функционирования излучающих и принимающих излучение объектов.

Рассмотрим пример. Пусть БРЛС излучает 1000 радиосигналов в секунду. Для наглядности примем время дискретизации модели также равным 1 с. Антенна приемника работает в режиме последовательного обзора пространства в круговом азимутальном секторе 360°. Ширину главного луча антенны приемника примем равной 3°, а скорость сканирования пространства – 72° в секунду. Тогда легко вычислить, что в одном положении луч антенны приемника будет находиться время $\Delta t = 3 / 72 \approx 41.7$ мс, после чего луч перемещается в следующее положение. Конечно, надо иметь в виду, что подобные допущения – всего лишь модельная аппроксимация алгоритма вращения приемной антенны; в действительности антенна вращается непрерывно. Зная, что в горизонтальной плоскости направления движения самолетных групп не меняются,

легко понять, что большую часть времени БРЛС будут излучать «впустую», т. к. из всего потока радиосигналов, излученных за 1 с, приемная антенна заведомо способна воспринять лишь небольшое количество, попавшее в «окно» приема 41.7 мс, пока луч антенны «смотрит» в направлении на источник излучения. Таким образом, из 1000 радиосигналов от одной БРЛС в точке наблюдения будет принят лишь 41. Если количество источников излучения велико, то становится очевидным нерациональный характер разработанного способа взаимодействия объектов. Обработчик очереди радиосигналов в точке наблюдения будет вынужден просматривать длинную очередь, чтобы в итоге «отсеять» 96 % радиосигналов. Также надо заметить, что при формировании очередей в точках наблюдения осуществляется упорядочивание пришедших радиосигналов во времени, что сильно сказывается на быстродействии при больших размерах очередей. Применение быстрых алгоритмов сортировки списков позволяет ускорить процесс формирования очередей, однако быстродействие рассматриваемого варианта все еще остается весьма низким даже при небольшом количестве излучающих объектов.

В связи с этим рассмотрим способ оптимизации данного варианта по критерию быстродействия с сохранением результирующей интенсивности потока радиосигналов в точках наблюдения. Оптимизация может быть достигнута за счет отказа от условия *независимого* функционирования источников излучения и приемников. Цель состоит в том, чтобы добиться такого способа организации излучения радиосигналов, при котором в каждой временной точке излучается только такое их количество, которое может быть принято антеннами приемников. Для этого необходимо, чтобы в каждой временной точке излучатели уже «знали», сколько и в какие моменты времени радиосигналов им нужно сгенерировать и в какие точки наблюдения отправить. Последнее обстоятельство очень важно, поскольку в общем случае антенны приемников, расположенных в разных точках пространства, вращаются независимо друг от друга и один и тот же источник излучения бу-

дут «видеть» при разных положениях лучей.

Обоснование целесообразности изложенного способа оптимизации заключается в следующих соображениях. За одну временную точку авианалета антенна приемника при вращении проходит определенный сектор, называемый текущим сектором приема. Как правило, для типовых сценариев авианалетов размер сектора приема не превышает 90° , т. е. одну координатную четверть. Самолетные группы рассредоточены по четвертям координатной сетки таким образом, что на каждую четверть приходится одна-две группы. Отсюда легко увидеть, что за одну временную точку приемник способен принять радиосигналы только от одной-двух самолетных групп. Если знать номера этих групп и направления на них из точки наблюдения, можно значительно сократить число актов излучений радиосигналов.

Для реализации описанного способа оптимизации удобно воспользоваться уже упоминавшимся механизмом сигнально-слотовых соединений. Изменение логики алгоритма по сравнению с ранее рассматривавшимся вариантом заключается в том, что взаимодействовать с точками наблюдения будут не излучающие объекты, а сама модель (объект контейнерного класса «Модель»).

Логика взаимодействия объектов для двух рассмотренных вариантов представлена на рис. 3 в виде диаграммы последовательности UML. Объекты обозначаются в виде прямоугольников, от которых тянутся вниз линии шкалы времени. Передача сообщений (сигналов) от одних объектов другим обозначена в виде стрелок. Сплошная стрелка означает синхронное сообщение (вызывающий объект ждет ответа), пунктирная стрелка – асинхронное (вызывающий объект продолжает выполнение) или ответ на полученное синхронное сообщение. Стрелка, замкнутая на сам объект, означает выполнение некой операции внутри объекта.

На диаграммах продемонстрирована картина взаимодействия объектов в пределах одной временной точки авианалета. Из рис. 3 можно видеть асинхронный характер взаимодействия модели и точек наблюдения (мо-

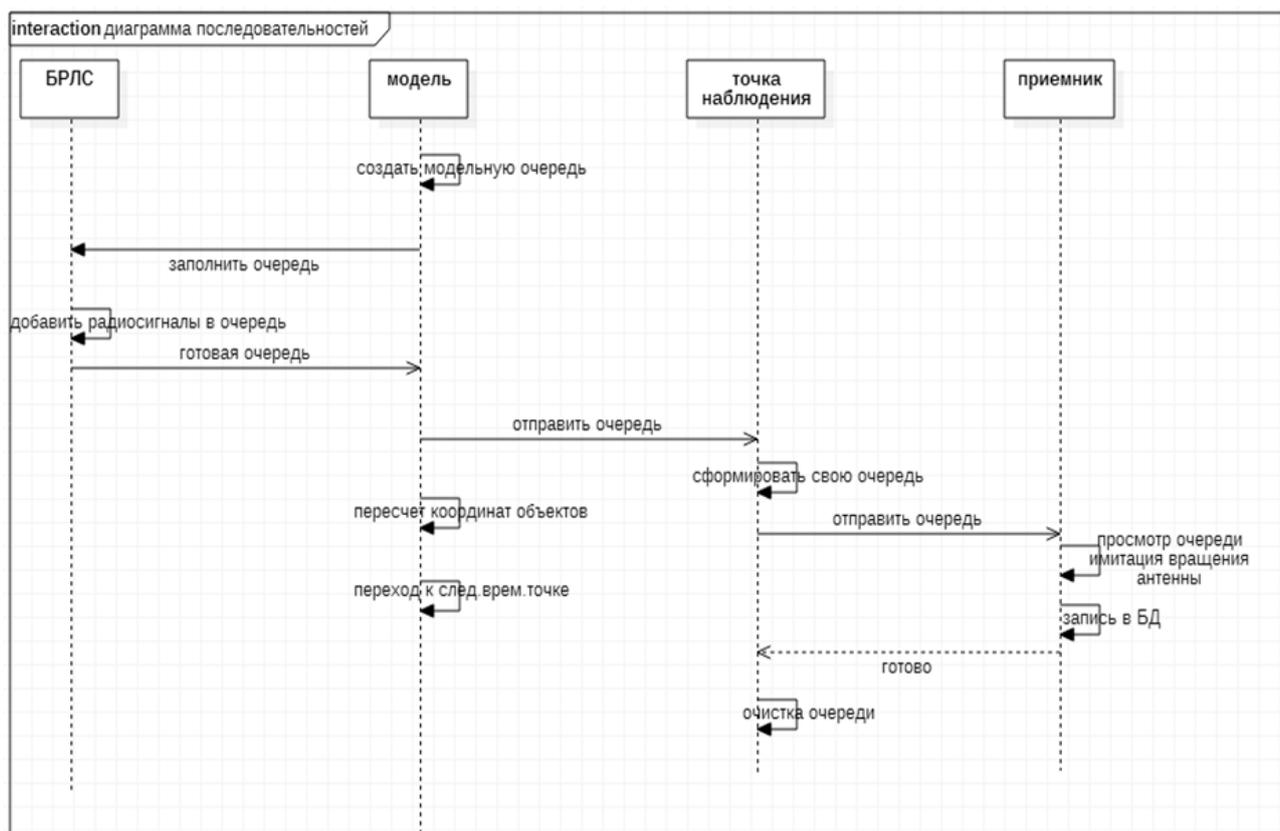


Рис. 3а. Диаграмма последовательностей для первого варианта алгоритма моделирования

дель отправляет очередь точкам наблюдения, после чего переходит к выполнению других операций и далее – к следующей временной точке). На рис. 3б взаимодействие модели и точек наблюдения синхронное (модель не переходит к выполнению других операций, пока точки наблюдения не «отработают» в текущей временной точке). Это является недостатком, от которого удалось уйти в предыдущем варианте взаимодействия объектов.

Еще одним недостатком является имеющая место зависимость объектов: генерация и прием потока радиосигналов оказываются сильно связанными, и в этом отношении выполненная оптимизация носит искусственный характер и снижает наглядность модели в смысле подобия реальной системе, поскольку в модели уже не воспроизводится в полной мере логика причинно-следственных связей, имеющая место в реальной системе [2]. Однако главным достоинством здесь является высокое быстродействие. Точки наблюдения помечаются отработавшими, если по тем или иным причинам прием радиосигналов невозможен (отсутствуют излучающие объекты в

секторе приема или не выполняется условие прямой видимости), а значит, такие точки наблюдения выбрасываются из рассмотрения, и «холостые» просмотры очередей радиосигналов исключаются.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Сравнительный анализ вариантов моделирующего алгоритма

Для сравнения быстродействия двух вариантов моделирующего алгоритма были проведены тестовые испытания на четырехъядерном процессоре Intel Core CPU 3.4GHz, 8 Gb RAM. В программе изменялось количество самолетов в налете (от 1 до 80) и измерялось время имитации налета. Результаты измерения приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что второй вариант моделирующего алгоритма работает значительно быстрее при любом количестве излучающих объектов. Для небольших самолетных групп (до 5 самолетов в группе) выигрыш в быстродействии при использовании второго варианта алгоритма составляет до 30 раз. При

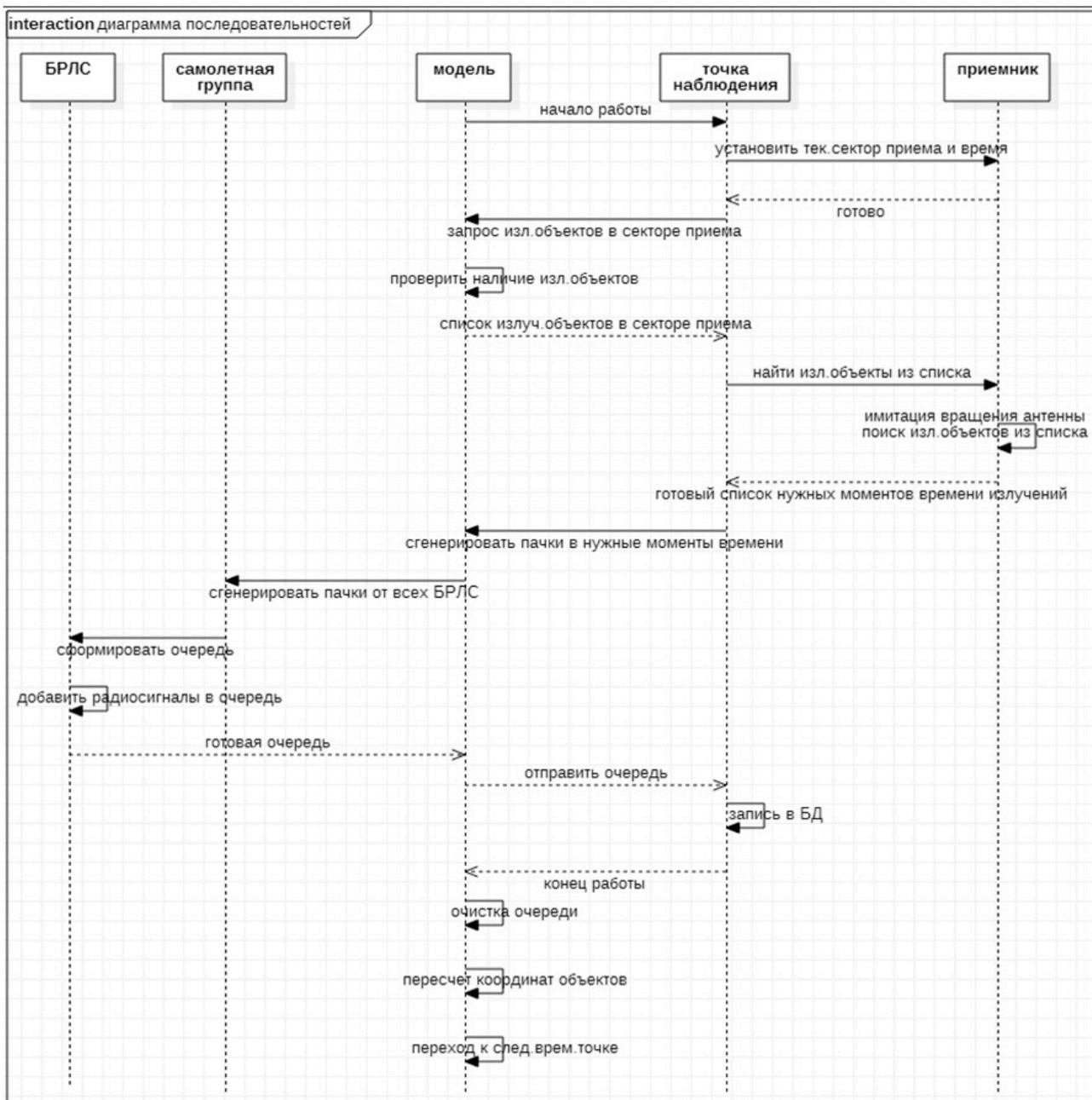


Рис. 36. Диаграмма последовательностей для второго варианта алгоритма моделирования

Таблица 1

Сравнение быстродействия двух вариантов алгоритма моделирования

количество самолетов	время работы 1-го варианта, с	время работы 2-го варианта, с
1	77	3
4	310,5	12,9
10	775	15
20	1536,8	20,7
40	3800	28,8
80	7700	45,7

увеличении размера самолетных групп время работы первого варианта нарастает линейно как функция вида $y \approx 97x$, время работы второго варианта растет линейно как функция вида $y \approx 0,42x + 11,6$, где x – количество самолетов в налете, y – время работы программы в секундах.

Из приведенных соображений ясно, что асимптотическая сложность двух вариантов совпадает и будет равна $T(n) = O(n)$, где $T(n)$ – время выполнения программы, n – число входных элементов (самолетов, или, что то же самое, бортовых РЛС). Однако надо иметь в виду, что программа имитационной модели РЭО будет работать при «малых» входных данных, т. е. количество самолетов в авианалете всегда ограничено сверху. С учетом этих условий выигрыш в быстродействии при использовании второго варианта алгоритма оказывается существенным и будет тем больше, чем больше число входных элементов.

Важно отметить, что все преимущества описанного моделирующего алгоритма становятся реализуемыми в условиях «истинной параллельности» вычислений, что возможно только на мультипроцессорной системе или многоядерном процессоре (не менее четырех ядер). При этом приемник каждой точки наблюдения осуществляет прием и обработку очереди радиосигналов в отдельном вычислительном потоке. Еще один поток выделяется для процесса генерации радиосигналов и визуализации процесса авианалета.

2. Программная реализация имитационной модели

Программная реализация проводилась с использованием объектно-ориентированного языка программирования C++, кроссплатформенной среды разработки Qt Creator и СУБД PostgreSQL. Главное окно программы в процессе моделирования представлено на рис. 4.

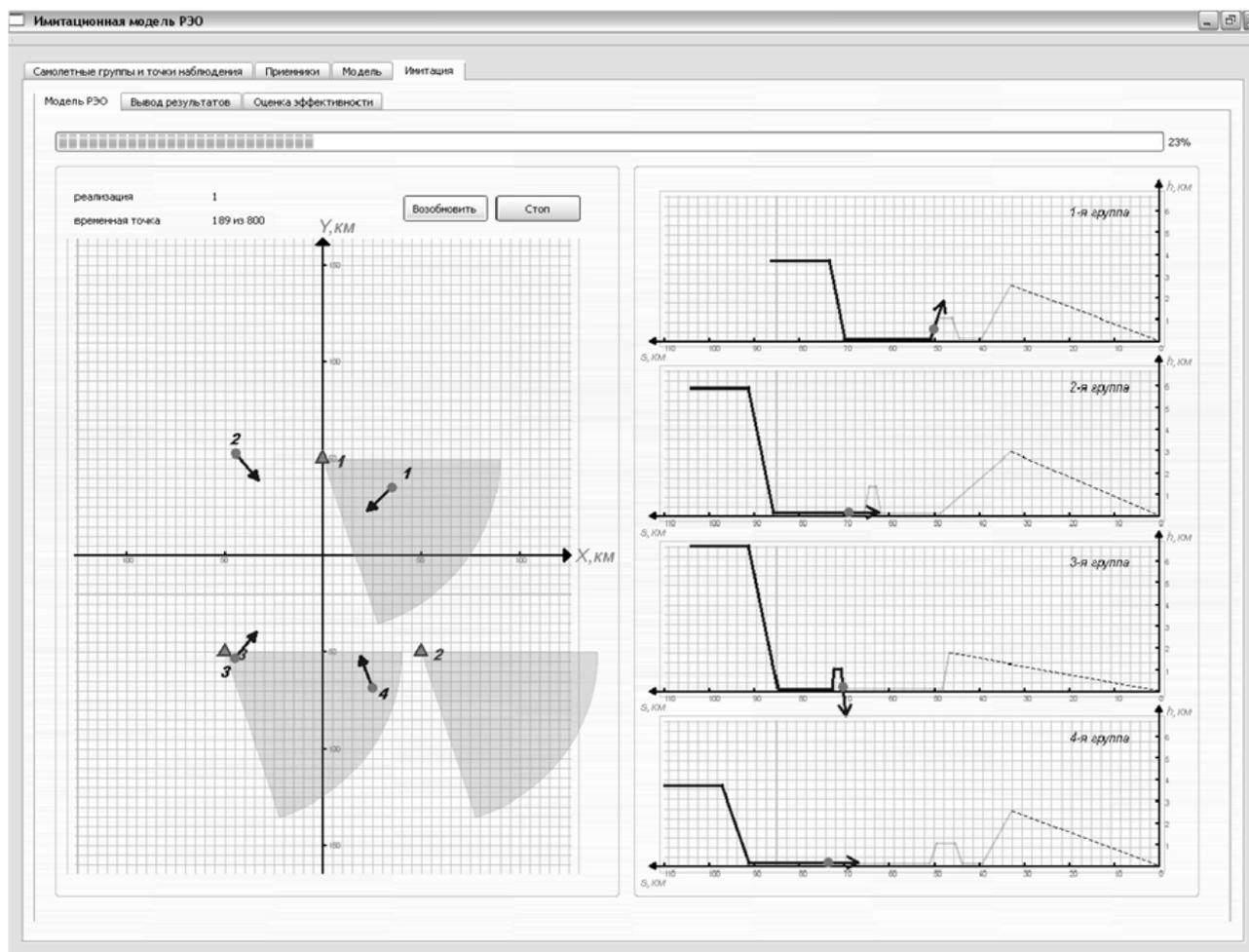


Рис. 4. Вид главного окна программы имитационной модели

Главное окно программы имитационной модели РЭО состоит из нескольких вкладок, предназначенных для ввода информации о текущем боевом эпизоде, редактирования базы данных, содержащих сведения о самолетах и тактико-технических характеристиках используемых типов БРЛС, изменения модельных настроек, а также для отображения процесса моделирования и вывода результатов. После задания всех исходных данных оператор осуществляет запуск процесса моделирования. При этом на вкладке «Имитация: Модель РЭО» можно визуальнo наблюдать за ходом процесса (рис. 4) и при необходимости приостанавливать или прерывать его.

В левой части рис. 4 показан «вид сверху» на самолетные группы (изображены в виде кружков со стрелками, соответствующими направлению движения) и станции радиомониторинга (показаны в виде треугольников с соответствующими направлениями текущих секторов обзора приемников). В правой части рис. 5 показан профиль полета каждой самолетной группы и текущее положение группы на участке траектории движения. Визуализация вращения антенн приемников и движения самолетных групп в вертикальной и горизонтальной плоскостях выполнена средствами низкоуровневой графики фреймворка Qt.

По окончании моделирования выдается сообщение об успешном окончании работы программы, включающее информацию о средней интенсивности потоков радиосигналов, принимаемых в каждом пункте приема. Оператор имеет возможность ознакомиться с графиком зависимости интенсивности потоков от времени налета для каждого пункта приема сигналов на вкладке «Имитация: Оценка эффективности». Наконец, вкладка «Имитация: Вывод результатов» предназначена для просмотра таблицы дескрипторов сгенерированных радиосигналов (дескриптор содержит основные параметры радиосигнала, такие, как несущая частота, длительность, мощность, время и направление прихода), распечатки этой таблицы и сохранения в файл. Результаты генерации потока радиосигналов в виде массива дескрипторов занос-

ятся в таблицу базы данных и в дальнейшем могут быть считаны оттуда для проведения первичной обработки радиосигналов и вторичной и третичной обработки информации в интересах определения координат источников радиоизлучения и траекторий движения самолетов-носителей.

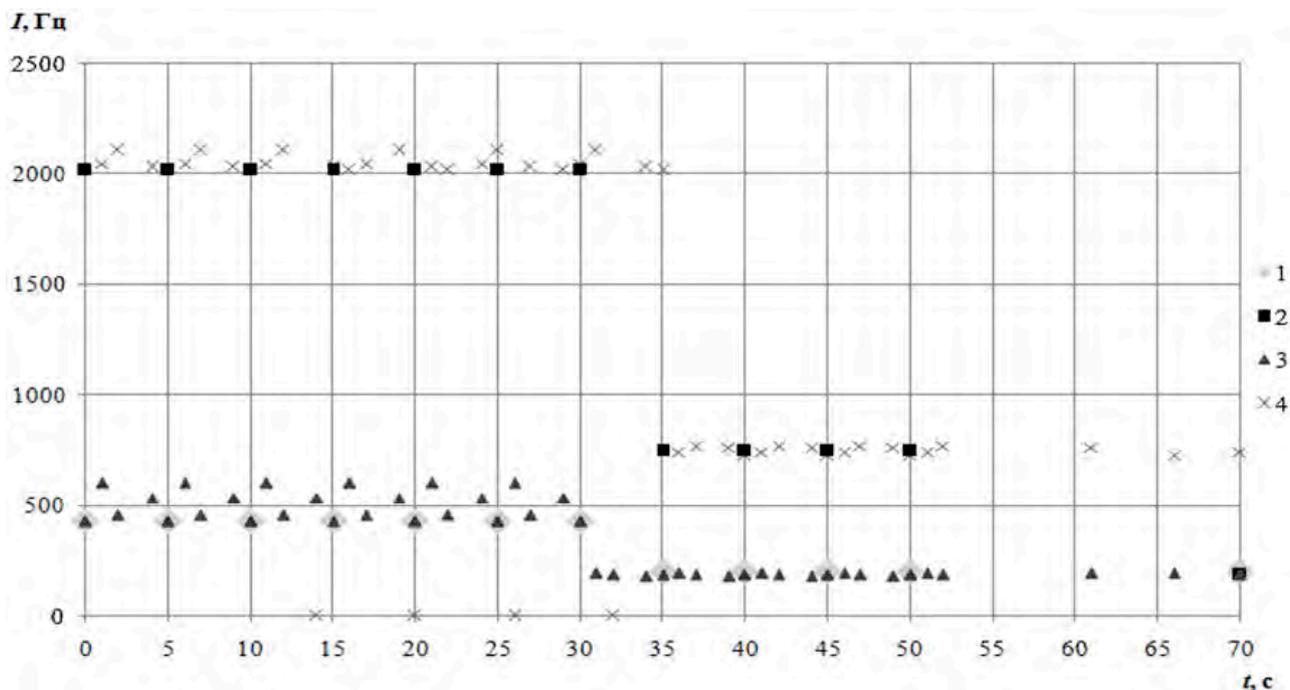
3. Пример практического использования имитационной модели

Рассмотрим эпизод «звездного» авианалета на наземный объект (вариант). Число самолетных групп 1 или 4, число самолетов в группе 1 или 4. Группы начинают налет с расстояния 85 км от наземного объекта на высоте полета 3,7 км. В горизонтальной плоскости группы распределены по координатным четвертям (I-IV), в процессе налета угол подлета к объекту прикрытия остается постоянным. В целях уменьшения заметности группы снижаются на высоту 100 м, для выполнения маневра типа «горка» поднимаются на высоту 1 км, пуск ракеты производится также с высоты 1 км.

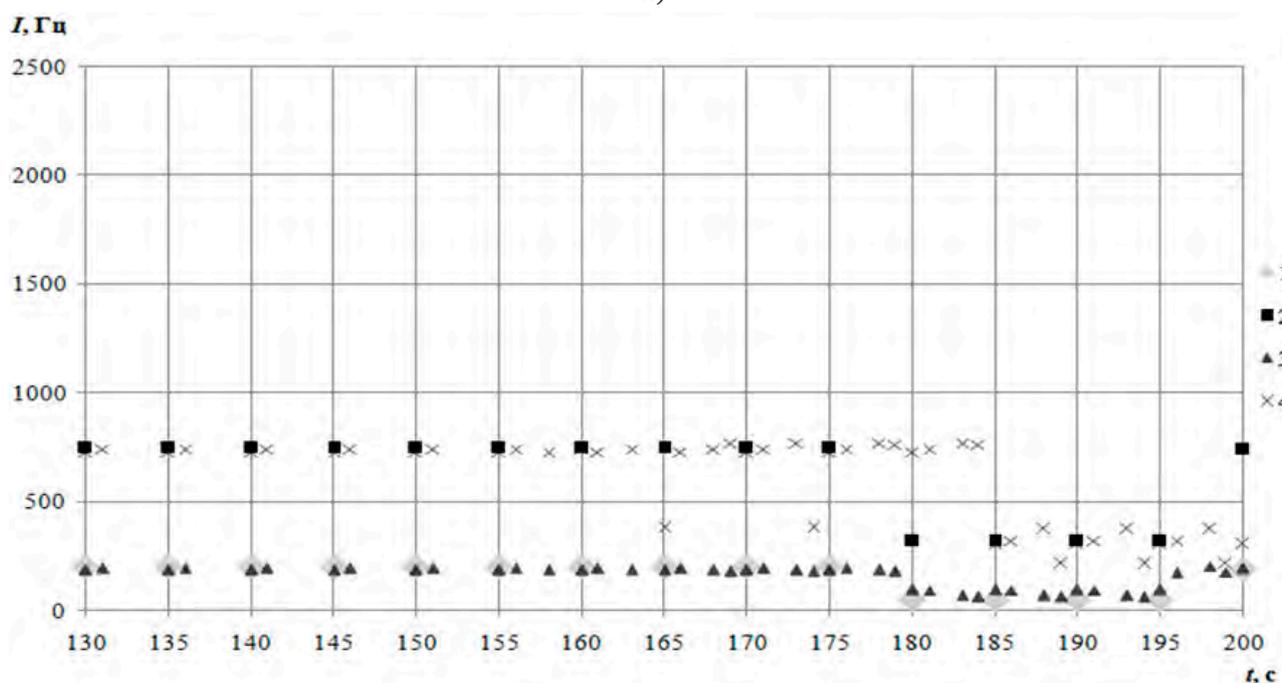
Вокруг объекта на расстоянии 20 км друг от друга рассредоточены три пункта наблюдения, оснащенные средствами радиомониторинга. Антенны приемников вращаются в азимутальной плоскости в секторе 360° со скоростью 12 об./мин. Прием осуществляется в диапазоне частот 3–18 ГГц.

По итогам моделирования была получена общая картина зависимости интенсивности потока радиосигналов, принимаемых в точке наблюдения, от времени налета, представленная на рис. 5. По оси абсцисс отложено время t в секундах, по оси ординат – интенсивность потока радиосигналов I в Гц. Для удобства восприятия рисунок разделен на два наиболее интересных фрагмента: а – время налета от 0 до 70 с; б – время налета от 130 до 200 с. На рисунке использованы соответствующие обозначения для каждого случая количества самолетов и групп в налете.

Из рис. 5 видно, что зависимость интенсивности от времени носит дискретный характер, что связано с режимом сканирования пространства главным лучом антенны приемника (в круговом секторе). При скорости



а)



б)

1 – 1 группа из 1 самолета; 2 – 1 группа из 4 самолетов;

3 – 4 группы по 1 самолету; 4 – 4 группы по 4 самолета

Рис. 5. Зависимость интенсивности потоков радиосигналов от времени налета для разного количества ИРИ

сканирования 12 об./мин. главный луч проходит 72° за одну секунду, следовательно, каждая самолетная группа обнаруживается раз в пять секунд. Ширина главного луча антенны приемника составляет 3° , поэтому длительность пачки радиосигналов, которая мо-

жет быть принята от одного БРЛС за секунду, составит около 42 мс. В зависимости от частоты следования радиосигналов в каждом режиме работы БРЛС в эту пачку попадет от 30 до 600 радиосигналов от одного БРЛС. Первая смена режима работы происходит

при $t = 30$ с, частота следования радиосигналов снижается (переход в режим ОПМВ), что хорошо заметно на рис. 6а по уменьшению интенсивности потока. Срыв принятия сигналов в период с 50-й по 70-ю секунду обусловлен невыполнением условия прямой видимости источников радиоизлучения из точки наблюдения (самолеты снижаются на предельно малую высоту полета при большой дальности). Аналогичную картину изменения интенсивности потока при смене режима работы БРЛС можно наблюдать на рис. 6б при $t = 180$ с (переход в режим прицеливания) и $t = 200$ с (переход в режим ОПМВ).

В случае нескольких самолетных групп, распределенных по координатным четвертям, главным лучом антенны будет обнаруживаться каждая группа в разное время, что иллюстрируется рис. 6; поток в единицу времени при этом не увеличивается. При росте количества самолетов в группе суммарный поток радиосигналов в единицу времени пропорционально увеличивается.

Среднюю интенсивность потоков радиосигналов на входе приемника за время оборота его антенны можно получить усреднением значений интенсивностей в каждой временной точке за все время налета. Для рассмотренных случаев она составит 220.28 Гц (1 группа из 1 самолета), 877.16 Гц (1 группа из 4-х самолетов), 225.9 Гц (4 группы по 1 самолету) и 860.2 Гц (4 группы по 4 самолета).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана имитационная модель генерации потоков радиосигналов бортовых радиолокационных средств самолетов на входах аппаратуры радиомониторинга в ходе актуального в военной сфере боевого эпизода «звездного» авианалета самолетных групп на наземный объект. Выполнена программная реализация модели с использованием объектно-ориентированной парадигмы и технологий многопоточного программирования. Выходные данные модели (смешанный поток радиосигналов) в виде массива дескрипторов записываются в единую таблицу базы данных, при этом не требуется специальной

процедуры перемешивания радиосигналов от разных источников и упорядочивания их во времени. Путем SQL-запросов к базе данных возможно производить селекцию принимаемых радиосигналов по различным параметрам (номер приемного пункта, время и направление прихода, несущая частота и др.), что облегчает их дальнейшую обработку.

Разработанная имитационная модель является первичным звеном единой системы моделей и методик извлечения и обработки информации. Объектно-ориентированный подход позволяет дополнить разработанную модель соответствующими моделями систем обработки (первичной, вторичной, третичной) радиосигналов и информации. Результаты моделирования радиоэлектронной обстановки применительно к указанному боевому эпизоду целесообразно использовать в качестве входных данных для имитационных моделей обработки сигналов и информации, осуществляемой в реальных средствах радиомониторинга воздушного пространства. Основная область внедрения модели – военная сфера, задачи обоснования требований к аппаратуре средств радиомониторинга, работающих в составе наземных радиоэлектронных комплексов в условиях отражения групповых и массированных налетов авиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Радзиевский, В. Г.* Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта / В. Г. Радзиевский, А. А. Сирота. – М. : ИПРЖР, 2001. – 456 с.
2. *Вартанесян, В. А.* Радиоэлектронная разведка. – М. : Воениздат, 1991. – 254 с.
3. *Атражев, М. П.* Борьба с радиоэлектронными средствами / М. П. Атражев, В. А. Ильин, Н. П. Марьин. – М.: Воениздат, 1972. – 272 с.
4. *Сирота, А. А.* Компьютерное моделирование сложных систем: учебное пособие / А. А. Сирота. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. – 248 с.
5. *Тимофеев, Н. П.* Тактическая авиация ВВС США и НАТО в локальных конфликтах:

учебное пособие / Н. П. Тимофеев, Ю. Ф. Куприянов, Ю. П. Самохвалов, С. Г. Чурбанов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 176 с.

6. Пилотирование в группе. – Режим доступа: http://lockon.spb.ru/group_basic.html. – (Дата обращения: 20.05.2019).

7. Алгазинов, Э. К. Анализ и компьютерное моделирование информационных про-

цессов и систем: учебное пособие для вузов / Э. К. Алгазинов, А. А. Сирота. – М. : Диалог-Мифи. – 416 с.

8. Долуханов, М. П. Распространение радиоволн: учебник для вузов / М. П. Долуханов. – М. : Связь, 1972. – 336 с.

9. Шлее, М. Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++ / М. Шлее. – СПб. : БХВ-Петербург, 2015. – 928 с.

Дубатовская Анна Вячеславовна – научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), e-mail: vsu810nj1@yandex.ru

ELECTRONIC ENVIRONMENT SIMULATION DURING THE 'STAR-TYPE' AIR RAID ON THE GROUND-BASED OBJECT

A.V. Dubatovskaya

Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh)

Annotation. Electronic environment simulation model is considered. Electronic environment is formed with the streams of the aircraft onboard radar system radiosignals and received by the ground-based radiomonitoring equipment during the conflict of the two confronting parties with one of them making the air raid on the ground-based objects belonged to the other. The model is created in context of 'star-type' air raid with the complicated aircraft trajectories. Two variants of modeling algorithm are proposed with their comparative analysis having been done. With use of C++ language and cross-platform IDE Qt Creator, the object-oriented program realization of the model is performed. The results of modeling are given. The proposed model can be used in the civil and military fields for radiomonitoring equipment requirements grounding.
Keywords: radiomonitoring, electronic environment, air raid, onboard radar system, radiosignal, simulation.

Dubatovskaya Anna V. – research assistant of the Research test center of radio-electronic struggle, Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh), e-mail: vsu810nj1@yandex.ru