

УДК: 004.942

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

М.Д. Гулиев (Воронеж)

Поддержание необходимого уровня информационного обеспечения (ИО) аппаратуры радиотехнической разведки (РТР) является ключевым аспектом для повышения эффективности функционирования систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ) [1]. Это связано со следующим. Системы РТР должны обеспечивать адекватную информацию о радиоэлектронной обстановке (РЭО), включая характеристики сигналов, тип и данные о местоположении разведываемых РЛС. Качество ИО позволяет более точно идентифицировать типы радиоэлектронных средств (РЭС), что необходимо для определения степени угрозы и выбора оптимальных мер противодействия. Надежное ИО способствует улучшению координации между различными системами, включая средства поражения и РЭБ. Выявление и анализ информации о радиосигналах противника позволяет предсказывать его действия и заблаговременно принимать меры для их нейтрализации. Эффективное использование информации позволяет оптимизировать распределение ограниченного ресурса системы РЭБ, включая выбор направлений подавления и использования средств защиты. Одним из направлений повышения эффективности радиотехнических систем является углубленный анализ РЭО, который возможен благодаря созданию имитационных моделей.

Основными достоинствами применения имитационного моделирования как инструмента для повышения эффективности систем радиотехнической разведки и радиоэлектронной борьбы являются:

1. имитационные модели позволяют воспроизвести различные сценарии РЭО;
2. модели могут использоваться для тестирования новых алгоритмов обработки данных и методов анализа, что позволяет произвести предварительную оценку их эффективности;
3. используя имитационные модели, можно оптимизировать алгоритмы обработки информации при идентификации сигналов, уменьшив время реакции на разные РЭС противника;
4. имитационная модель может использоваться для прогнозирования изменений в радиоэлектронной обстановке, позволяя адаптировать тактику и методы РЭБ в ходе развития конфликта.

Целью статьи является описание разработанной имитационной модели РЭО [2], основным функционалом которой является формирование и воспроизведение поля радиосигналов РЭС с учетом динамики их функционирования, а также выполнение оценки интенсивности потока сигналов на входе приемника РТР в заданном диапазоне частот в различных точках пространства.

Разработанная модель обладает следующими ключевыми особенностями. Модель организована так, чтобы формировался полный набор исходных данных для решения задач оценки эффективности первичной обработки, к которым относятся прием сигналов, фильтрация для снижения влияния шумов и помех, анализ спектра, сравнение с эталонами для идентификации типа сигнала и источника, а также запись и хранение обработанных сигналов для последующего анализа. Модель РЭО интегрирована с базой данных о тактико-технических характеристиках (ТТХ) РЭС, что позволяет полноценно моделировать работу систем с учетом всех особенностей их функционирования, включая детальное воспроизведение ДНА. При генерации поля радиосигналов учитываются

характеристики конкретного эпизода применения средств РТР, возможности по приему (обнаружению) сигналов РЭС и условия их использования. Эпизод формируется на основе исходных данных, описывающих взаимное пространственное положение РЭС и средства разведки. Разработанные функции (написанные на языке программирования Java) отвечают за обеспечение функционирования средств радиотехнической разведки и позволяют моделировать работу не только на стационарных постах, но и с размещением средств на мобильных носителях, включая воздушные.

Модель разработана в среде имитационного моделирования AnyLogic. Одной из ключевых особенностей выбранной среды является возможность комбинирования различных подходов к моделированию, что позволяет более точно отражать сложность и неоднородность систем реального мира.

Основой разработанной модели является агентный подход к моделированию. В практическом применении агентное моделирование можно рассматривать как метод имитационного моделирования, который позволяет изучить децентрализованных агентов и влияние их поведения на функционирование всей системы в целом. При создании агентной модели определяются параметры агентов, алгоритмы их поведения и способы взаимодействия между ними. Индивидуальные действия каждого агента формируют общее поведение моделируемой системы. Кроме того, использование агентного подхода позволяет создавать внутри объекта переменные, диаграммы состояний, задавать события и потоковые диаграммы системной динамики, а также интегрировать в агента другие объекты из библиотек AnyLogic.

На рисунке 1 представлен фрагмент результатов вычислительного эксперимента разработанной модели. В качестве исследуемых РЭС в эпизоде используются радиолокационные станции (РЛС) кругового обзора и стационарная станция радиотехнической разведки.

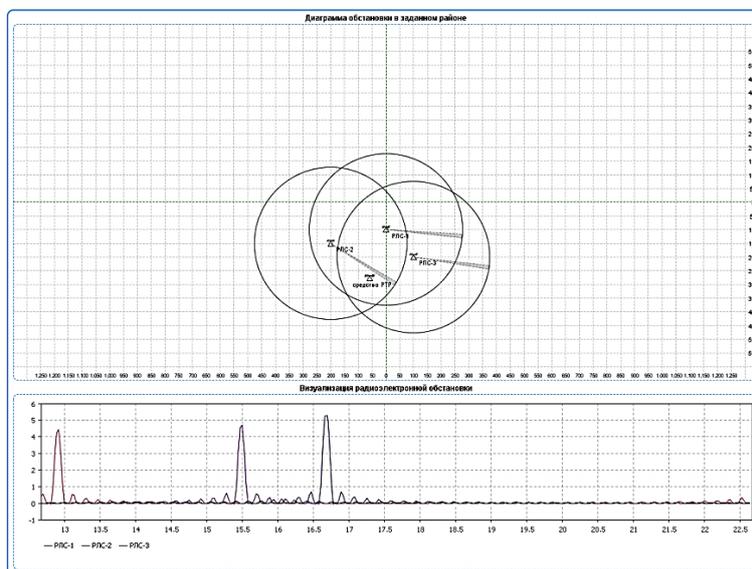


Рис. 1 – Фрагмент результатов вычислительного эксперимента (окно визуализации)

Окно визуализации работы модели состоит из двух областей. Верхняя область необходима для отображения взаимного расположения объектов исследования и процесса их функционирования в выбранном масштабе. Область ниже предназначена для оценки мощности входных сигналов от источников радиоизлучения (ИРИ) на входе приемника радиотехнической разведки. Для моделирования объектов исследования были созданы два нестандартных класса – «ИРИ» и «приемник РТР», с использованием

объектно-ориентированного подхода в Java. На основе данных классов были сформированы соответствующие типы агентов, описание которых приведено ниже.

На рисунке 2 представлен внешний вид агента «ИРИ», который является универсальным для всех типов средств используемых в модели. Поведение и работа его алгоритмов зависят от исходных данных заложенных в базе данных о ТТХ РЭС.

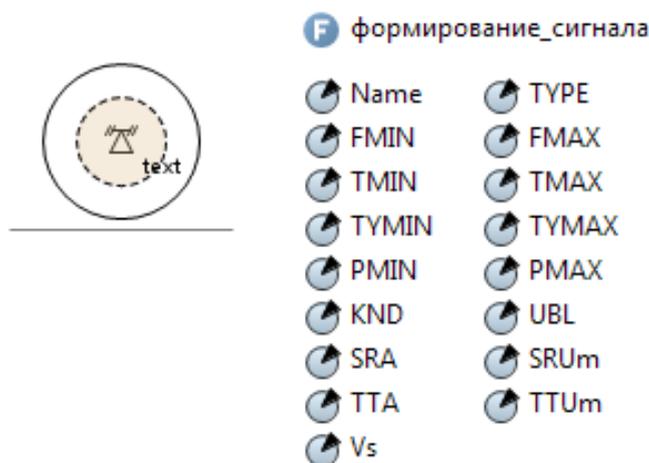


Рис. 2 – Внешний вид агента «ИРИ»

Основными элементами агента являются:

- визуализация размещения на планшете обстановки;
- функция «формирование сигнала», основанная на формуле расчета мощности сигнала, излучаемого РЭС, в зависимости от его параметров [4]; она отвечает за создание сигнала источника радиоизлучения и его распространение в пространстве (фрагмент кода функции представлен на рисунке 3);
- параметры РЭС, соответствующие ТТХ и обеспечивающие полноценное моделирование [3] (описание условных обозначений агента приведено в таблице 1).

```
// Генерация синусоидального сигнала
int totalSamples = (int) (samplingRate * duration);
double[] signal = new double[totalSamples];
for (int i = 0; i < totalSamples; i++) {
    signal[i] = Math.sin(2 * Math.PI * frequency * (i / samplingRate));
}

// Распространение сигнала с затуханием
double[] propagatedSignal = new double[signal.length];
for (int i = 0; i < signal.length; i++) {
    // Затухание сигнала
    propagatedSignal[i] = signal[i] * Math.exp(-attenuationFactor * distance);
}
```

Рис. 3 – Фрагмент кода функции «формирование сигнала»

Таблица 1 – Условные обозначения ТТХ РЭС, используемые в агенте «ИРИ»

№ п/п	Условные обозначения	Описание
1	Name	Наименование РЭС

2	TYPE	Тип РЭС
3	FMIN, FMAX	Частотный диапазон РЭС (МГц)
4	TMIN, TMAX	Период следования импульсов (мкс)
5	TYMIN, TYMAX	Длительность импульсов (мкс)
6	PMIN, PMAX	Импульсная мощность (кВт)
7	KND	КНД антенны (раз)
8	UBL	Уровень боковых лепестков (дБ)
9	SRA, SRUm	Сектор обзора по азимуту и углу места (град)
10	VS	Скорость сканирования антенны (град/с)
11	TTA, TTUm	Ширина ДНА по азимуту и углу места (град)

На рисунке 4 представлен внешний вид агента «приемник РТР».

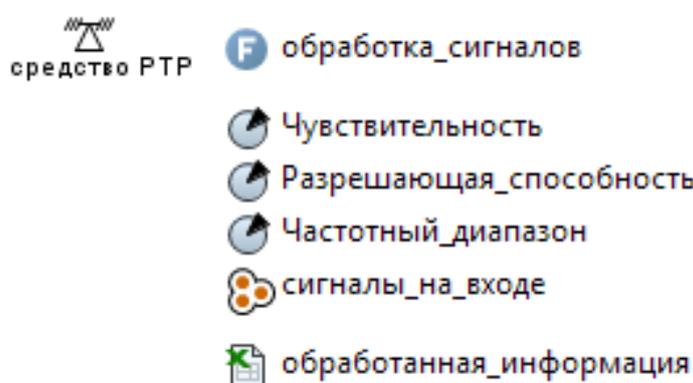


Рис. 4 – Внешний вид агента «приемник РТР»

Основными элементами агента являются:

- визуализация размещения на планшете обстановки;
- функция «обработка сигналов», отвечающая за выполнение задач первичной обработки сигнала и его последующего анализа (фрагмент кода функции приведен на рисунке 5);
- параметры средства РТР;
- массив хранения информации об обработанных сигналах и их параметрах для последующего анализа;
- файл хранения выходных данных с результатами анализа принятых сигналов (фрагмент данных в формате Excel файла приведен в таблице 2, условные обозначения выходных параметров приведены в таблице 3).

```

// Расчет для скользящего среднего
double[] result = new double[signal.length - windowSize + 1];
for (int i = 0; i <= signal.length - windowSize; i++) {
    double sum = 0;
    for (int j = 0; j < windowSize; j++) {
        sum += signal[i + j];
    }
    result[i] = sum / windowSize;
}

// Нормализации сигнала
double min = Arrays.stream(signal).min().orElse(0);
double max = Arrays.stream(signal).max().orElse(1);
double range = max - min;

double[] normalized = new double[signal.length];
for (int i = 0; i < signal.length; i++) {
    normalized[i] = (signal[i] - min) / range;
}
    
```

Рис. 5 – Фрагмент кода функции «обработка сигналов»

Таблица 2 - Фрагмент выходных данных с информацией о сигналах на входе приемного устройства средства радиотехнической разведки

Name	tn	tk	T	NA	NUm	bg	F	P
РЛС-2	125,115	125,597	0,482	211	120	0	8120	3,7E-0005
РЛС-1	125,134	125,385	0,251	2	92	1	9150	1,2E-0003
РЛС-3	125,135	125,64	0,505	82	135	0	5720	2,8E-0005
РЛС-2	125,144	125,626	0,482	212	120	0	8118	3,9E-0005

Таблица 3 – Условные обозначения выходных параметров

№ п/п	Условные обозначения	Описание
1	Name	Наименование РЭС
2	tn	Время прихода импульса (мс)
3	tk	Время окончания импульса
4	T	Период следования импульсов (мкс)
5	NA, NUm	Направление главного луча ДНА по азимуту и углу места при излучении импульса
6	bg	Признак приема импульса по главному лепестку ДНА (1) или боковому (0),
7	F	Частота (МГц)
8	P	Мощность импульса (мВт)

В функции «обработка сигналов» воспроизводятся процессы по обнаружению и определению параметров РЭС при приеме и анализе их сигналов [5]. Для расчета мощности сигналов на входе приемника РТР ( $P_c$ ) используется известное соотношение:

$$P_c = \frac{P_i G_i g_i(\theta) G_p g_p(\varphi) \lambda_i^2}{(4\pi R)^2} \eta e^{-a_3 R}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – излучаемая ИРИ мощность;  $G_i$  – коэффициент направленного действия антенны излучателя;  $g_i(\theta)$  – функция описывающая ДНА излучателя;  $G_p$  – коэффициент направленного действия антенны приемника РТР;  $g_p(\varphi)$  – функция ДНА приемника;  $\varphi$  – угол между направлением ориентации главного луча приемника и направлением на источник излучения;  $\lambda_i$  – длина волны излучаемого радиосигнала;  $\eta$  – коэффициент потерь при рассогласовании излучаемого сигнала и приемного тракта;  $R$  – расстояние от излучателя до приемника;  $a_3$  – коэффициент затухания.

Применение нестандартных классов для описания агентов в имитационной модели позволило более точно и детально смоделировать исследуемые объекты и систему их взаимодействия, а также реализовывать разные стратегии поведения агентов с помощью наследования и полиморфизма.

Кроме того, модель содержит набор служебных переменных и функций, отвечающих за корректную работу модели, а также позволяющих хранить результаты промежуточных расчетов во внешнем Excel файле. В целях повышения эффективности работы и взаимодействия с моделью была разработана функция, которая позволяет выполнять перемещение объектов с использованием компьютерной мыши непосредственно в процессе моделирования. Функция основана на библиотеках языка программирования Java – MouseAdapter и MouseMotionAdapter, которые используются для отслеживания событий мыши (нажатие, отпускание, перемещение).

### Заключение

В результате разработки имитационной модели РЭО на входе приемника РТР создана универсальная платформа, позволяющая эффективно анализировать и прогнозировать радиосигналы в любой точке пространства не только на стационарных постах, но и на мобильных носителях (в том числе и на воздушных), что обеспечивает высокую гибкость и адаптивность изменяющейся обстановки, а также способствует более глубокому пониманию динамики РЭО. Модель предоставляет инструменты для визуализации данных и анализа результатов, что значительно упрощает процесс принятия решений.

### Литература

1. **Радзиевский В.Г., Сирота А.А.** Теоретические основы радиоэлектронной разведки, Радиотехника, 2004 г.
2. **Гулиев М.Д., Радзиевский В.Г., Синяткин Д.А., Казимирова Е.В.** Имитационная модель оценки радиоэлектронной обстановки источников радиоизлучения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663309 от 05.06.2024 г.
3. **Баргон Д., Вард Г.** Справочник по радиолокационным измерениям. Пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбейна М., Советское радио, 1976 г.
4. **Шифрин Я.С.** Антенны, военная инженерная радиотехническая ордена Отечественной войны академия противовоздушной обороны имени Маршала Советского Союза Говорова Л.А., 1976 г.
5. **Вакин С.А., Шустов Л.Н.** Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки, Советское радио, 1968 г.