

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕЦЕПТОРНОГО ПОДХОДА В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ ЗОН ПОДАВЛЕНИЯ РАДИОСВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.П. Богомолов, А.А. Молев, С.Н. Подрезов (Воронеж)

Опыт оперативной и боевой подготовки Вооруженных Сил Российской Федерации, результаты научных исследований, а также опыт вооруженных конфликтов последних лет подтверждает решающее влияние радиоэлектронной борьбы на ход и исход боя, операции и войны в целом. Успех радиоэлектронной борьбы (РЭБ) всецело зависит от подготовленности штабов и войск к ее организации и ведению, грамотному использованию сил и средств РЭБ.

Для выполнения боевых задач подразделению РЭБ в зависимости от предназначения назначаются зона ответственности. На основании проводимых оперативно-тактических расчетов определяются зоны радиоразведки, зоны (сектора) радиоподавления.

Эффективность подавления радиосредств может оцениваться достаточно большим количеством показателей, но наиболее часто в качестве критерия эффективности применяется размер зоны гарантированного подавления (неподавления).

Для того чтобы приемное устройство не могло выделять полезную информацию из принятой смеси сигнала и помех, в зоне подавления должны выполняться условия эффективности помех: частотное, структурное, временное, пространственное и энергетическое.

В данной статье рассматриваются только пространственное и энергетическое условия, так как принято, что сигналы и помехи совпадают по частоте и структуре и излучение осуществляется одновременно.

При этом *пространственное условие* требует такой расстановки средств подавления, чтобы зона подавления создавалась на необходимом участке района (полосы) боевых действий, а *энергетическое условие* состоит в том, что помеха считается эффективной при превышении отношения ее мощности к мощности полезного сигнала на входе приемного устройства в требуемое число раз (больше коэффициента подавления). При этом значение коэффициента подавления зависит от вида помехи и сигнала, а также от характеристик приемника подавляемого радиоэлектронного средства (РЭС). Чем он меньше, тем при прочих равных условиях легче подавить РЭС помехой. Пространство, в пределах которого отношение мощности полезного сигнала к мощности помехи превышает коэффициент подавления, называется зоной подавления РЭС, то есть при перемещении приемного устройства в пределах этой зоны линия связи от источника сигнала будет подавлена с заданной эффективностью.

Как показано в [1], в зависимости от энергетических потенциалов, форм диаграммы направленности антенны станций радиосвязи и станции активных помех (САП) и их взаимного пространственного положения, вид зоны подавления относительно заданной позиции станции будет иметь различный вид, который определяется значением подкоренного выражения формулы

$$D_{\Pi} = D_{\text{св}} \sqrt{\frac{P_{\Pi, \Pi} G_{\Pi, \Pi} \Delta F_{\Pi \Pi} \nu_{\Pi}}{P_{\Pi, \text{с}} G_{\Pi, \text{с}} \Delta f_{\Pi}}} \quad (1)$$

---

где  $P_{п.с}$ ,  $P_{п.п}$  – мощность передатчика радиосигнала и помех, соответственно;

$G_{п.с}$ ,  $G_{п.п}$  – коэффициенты усиления антенны передатчика радиосигнала в направлении на радиоприемник и передатчика помех САП в направлении приемной антенны, соответственно;

$\Delta F_{пр}$ ,  $\Delta f_{п}$  – полоса пропускания приемного устройства и ширина спектра помехового сигнала САП, соответственно;

$V_{п}$  – коэффициент, учитывающий различие поляризации помехи и сигнала (может иметь значение от единицы, при совпадении поляризации помехи и сигнала, до нуля, когда поляризации ортогональны или различны по направлению вращения — при круговой поляризации);

$D_{св}$  – расстояние между САП и приемником линии радиосвязи (дистанция связи);

$D_{п}$  – расстояние между САП и приемником линии радиосвязи (дистанция помех).

При этом на практике проведение соответствующих расчетов связано с рядом трудностей, к которым в первую очередь можно отнести сложность учета динамики перемещения исследуемых объектов и динамики изменения ориентации их антенных систем в пространстве в процессе конфликтного взаимодействия. Так результаты расчетов с использованием формулы (1) позволяют лишь получить значение коэффициента подавления в выбранной точке пространства, а для построения зоны радиоподавления радиосвязи необходимы либо значения коэффициента подавления во всех точках пространства, либо в некоторых точках, количество которых будет обусловлено требуемой точностью проведения расчетов.

Кроме того, даже при создании совпадающей по поляризации прицельной по частоте помехи (ширина спектра помехового сигнала равна полосе пропускания приемного устройства) внешний вид зоны подавления будет определяться отношением значений коэффициентов усиления антенных систем, что составляет, ввиду сложности аналитического описания, большую трудность ее программной реализации в задачах оперативно-тактических расчетов традиционными методами.

Для решения задачи построения зон гарантированного подавления радиосвязи в среде имитационного моделирования AnyLogic был разработан ряд имитационных моделей, как для различных типов средств радиосвязи (подавления), так и для различных способов их функционирования (способов перемещения, режимов работы и т.д.). Ниже приводится описание результатов разработки имитационных моделей, а также описание основных принципов их разработки, используемых подходов моделирования.

Для расчета параметров, а также визуализации результатов моделирования предложено использование рецепторного подхода [3], суть которого заключается дискретизации пространства и представлении геометрического объекта в поле или пространстве рецепторов. Для плоского случая поле рецепторов представляет собой однородную прямоугольную сеть  $m * n$ , каждая клетка которой рассматривается, как отдельный рецептор (агент), который может иметь два состояния – подавлен или не подавлен. Математически рецепторная геометрическая модель описывается множеством

$$A = \{a_{i,j}\}, \quad i \in \overline{1, I}; \quad j \in \overline{1, J}, \quad (2)$$

где  $a_{i,j} = \begin{cases} true, & \text{если рецептор возбужден,} \\ false, & \text{если рецептор не возбужден.} \end{cases}$

Рецептор считается возбужденным, если в нем выполняется условие радиоэлектронного подавления.

Популяция агентов *poles* описывает совокупность рецепторов, где каждому агенту соответствует отдельный рецептор, описываемый пространственными координатами ( $x, y, z$ ) и состоянием, описываемым переменной булевого типа (*podavlen*).

На рисунке 1 приведен фрагмент основного окна имитационной модели, на котором показаны ее основные элементы (агенты, функции, параметры и переменные). Популяции агентов *saps* и *ress* описывают, соответственно, средства создания помех и источники сигнала, каждый из которых описывается пространственными координатами, мощностью и коэффициентом направленного действия антенной системы. Табличные функции *dn\_azim*, *dn\_um* реализуют задание нормированных диаграмм направленности антенных систем, подробнее их специфика приведена ниже.

Таймер *calc\_kp* инициирует выполнение функции *kp*, реализующей выполнение основного алгоритма расчета коэффициента подавления в каждом из агентов – рецепторов *poles* с заданной интенсивностью.

Вспомогательные функции *GET\_UGOL* и *rasst* осуществляют, соответственно, расчет угла, образуемого прямой, содержащей две произвольные точки и осью абсцисс и расстояния между двумя произвольными точками.

Коллекция *col\_element* хранит в себе совокупность рецепторов (агентов *pole*), принадлежащих зоне подавления. Коллекция *col\_ris* хранит в себе часть элементов коллекции *col\_element*, необходимых для визуального представления зоны подавления. То есть при необходимости визуализируются не все рецепторы, принадлежащие зоне подавления, а лишь рецепторы внешнего слоя, граничащие с областью зоны неподавления. Предложенный подход к визуализации зоны подавления позволил существенно снизить время, потребное на визуализацию результатов моделирования.

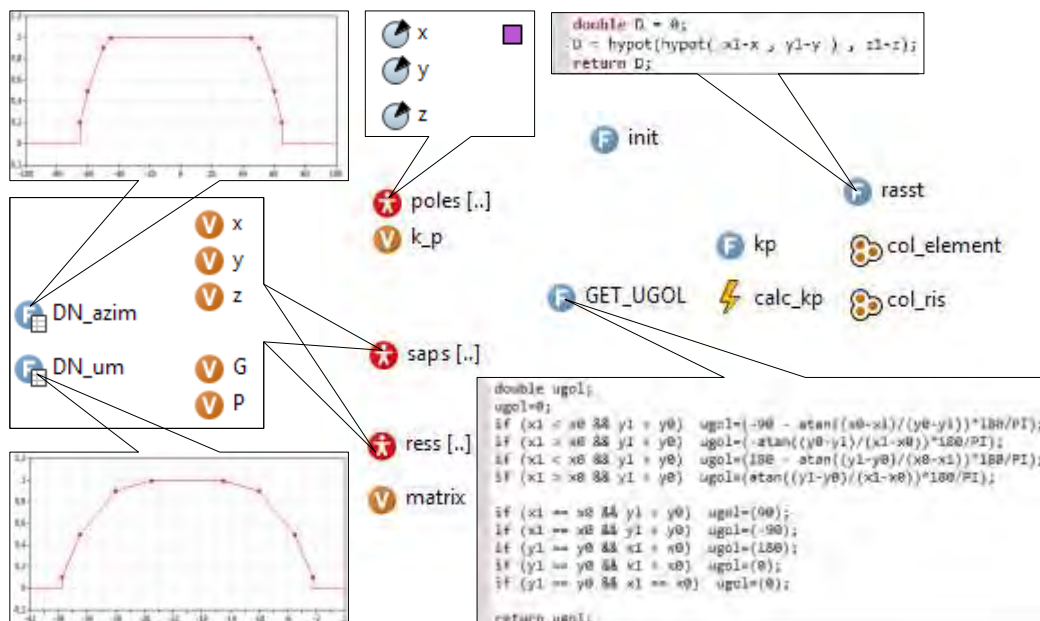


Рис.1 – Фрагмент программной реализации имитационной модели формирования зон подавления радиосвязи

Использование рецепторного метода, как метода геометрического моделирования зон подавления радиосвязи имеет как свои преимущества, так и свои

недостатки. К основным преимуществам метода относятся уникальная легкость определения принадлежности объекта рассчитанной зоне подавления, а также описания параметров ее параметров, к недостаткам – принципиальная невозможность построения зон с высоким порядком «гладкости». При этом, учитывая тот факт, что на границах зоны подавления (факт подавления (неподавления) того или иного объекта имеет вероятностный характер), указанный недостаток не является существенным.

К преимуществам метода также стоит отнести простоту интеграции результатов моделирования в сторонние приложения (модели верхнего уровня) как в виде описания массива рецепторов, так и в упрощенном виде.

Перемещение объектов в пространстве описывается совокупностью двух подходов имитационного моделирования: дискретно-событийным и системной динамики. Для задания общего алгоритма поведения агента (САП или РЭС) используется диаграмма состояний, где описываются основные его состояния и условия переходов между ними. При этом системная динамика отвечает за управление перемещением агента в очередную точку. Переменные  $tx$ ,  $ty$  хранят координаты очередной точки (точки назначения), накопители  $x$ ,  $y$  рассчитывают текущие координаты агента в зависимости от значений компонент вектора скорости  $vx$ ,  $vy$ , а динамическая переменная  $dist$  осуществляет расчет расстояния агента до точки назначения и позволяет отследить факт прибытия агента в точку назначения. На рисунке 2 представлен фрагмент имитационной модели, иллюстрирующий описание процесса перемещения агентов (САП, РЭС).

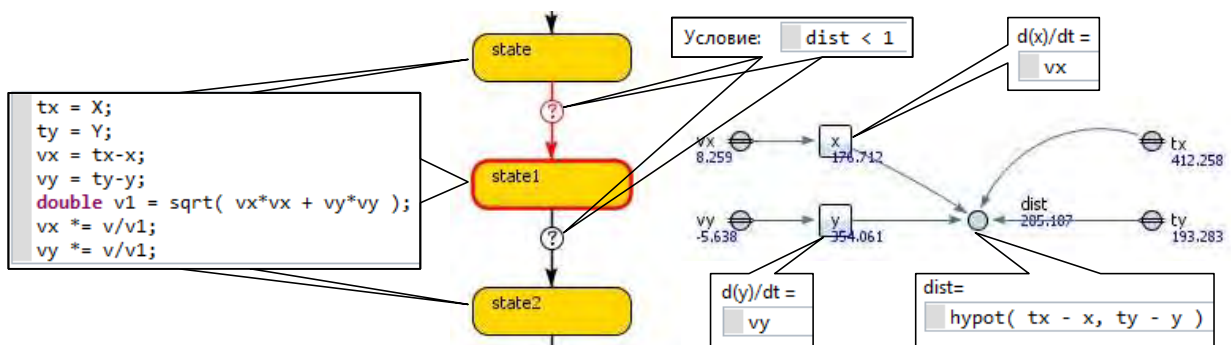


Рис.2 – Фрагмент имитационной модели, иллюстрирующий формализацию процесса перемещения агентов

При переходе агента в очередное состояние  $state1$  переменным  $tx$  и  $ty$  задаются соответственно координаты очередной точки следования агента, а также осуществляется перерасчет компонент вектора скорости  $vx$ ,  $vy$  по известному значению модуля вектора скорости  $v$ . Переход к следующему состоянию  $state2$  осуществляется, когда значение переменной  $dist$ , расчет которой осуществляется с помощью модели системной динамики, приближается к нулю (в примере – меньше 1).

Модель предусматривает возможность задание диаграмм направленности антенных систем, как средств радиосвязи, так и станций помех с помощью «табличной функции». То есть, задав набор точек – значений коэффициента усиления антенны для некоторых углов и выбрав способ интерполяции для области определения. Данный подход удобен тем, что появляется возможность интуитивно-понятного задания параметров реальных антенных систем.

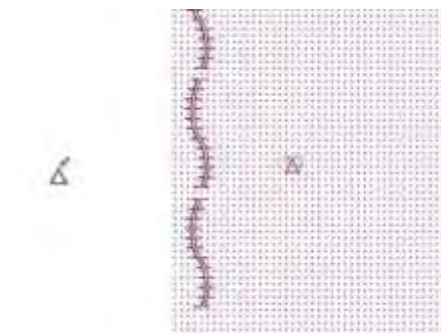
На рисунке 3 приведен внешний вид результата работы имитационной модели с исходными данными, соответствующими основным теоретическим положениям [1, 2] (рисунок 3,а – энергетический потенциал САП больше, чем потенциал

радиопередатчика линии связи,  $\Delta_{\text{б}}$  – энергетический потенциал САП равен потенциалу передатчика связи,  $\Delta_{\text{в}}$  – энергетический потенциал САП меньше, чем потенциал радиопередатчика линии связи). Результаты моделирования [4, 5, 6] полностью соответствуют теоретическим положениям [1, 2], что подтверждает адекватность модели.

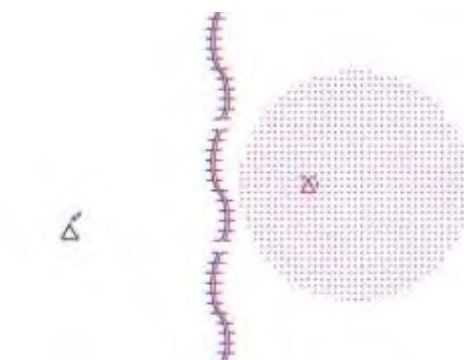
Модель предусматривает возможность задание диаграмм направленности антенных систем, как средств радиосвязи, так и станций помех с помощью «табличной функции». То есть, задав набор точек – значений коэффициента усиления антенны для некоторых углов и выбрав способ интерполяции для области определения. Данный подход удобен тем, что появляется возможность интуитивно-понятного задания параметров реальных антенных систем. Внешний вид табличных функций, реализующих задание диаграмм направленности различного вида, и результаты работы модели представлены на рисунках 4 и 5 [4, 5, 6]. Так, на рисунке 4 показана работа модели для САП с круговой в азимутальной плоскости диаграммы направленности антенны, а на рисунке 5 – с диаграммой направленности типа «диполь».



а) энергетический потенциал САП больше, чем потенциал передатчика связи



б) энергетический потенциал САП равен потенциалу передатчика связи



в) энергетический потенциал САП меньше, чем потенциал передатчика связи

Рис.3 – Результат работы модели

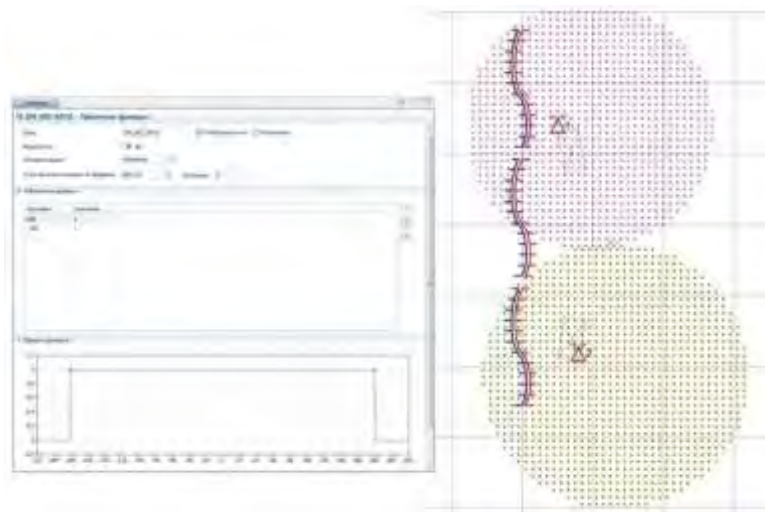


Рис.4 – Табличная функция диаграммы направленности штыревой антенны и результаты работы модели

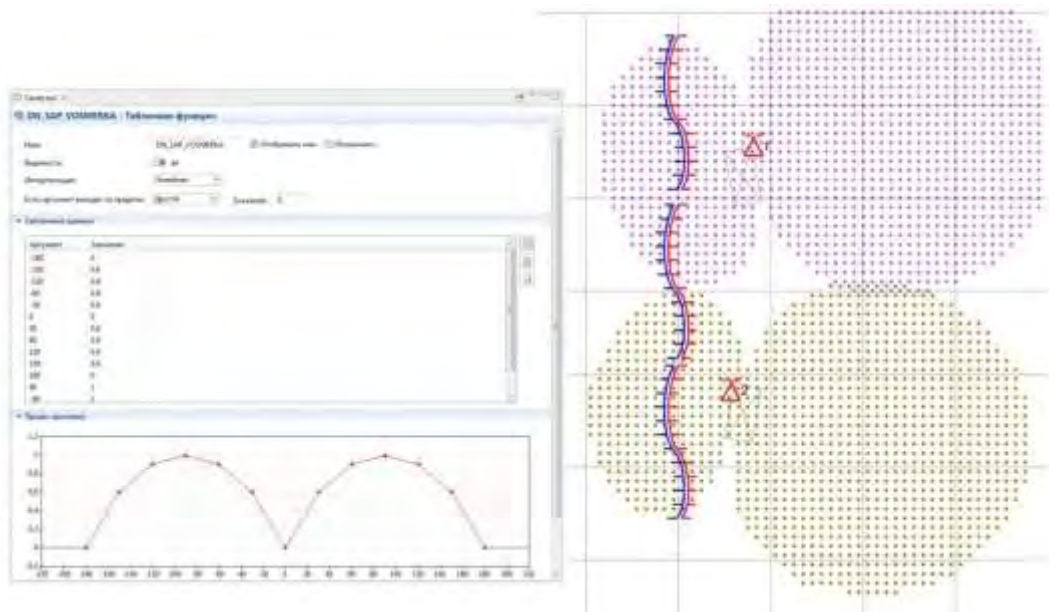


Рис.5 – Табличная функция диаграммы направленности антенны (диполь) и результаты работы модели

Разработанные модели могут быть использованы для проведения оперативно-тактических расчетов при обосновании выбора позиций средств радиопомех, задания их режимов работы, оценки эффективности подавления, а также в учебном процессе для проведения тактических расчетов и наглядной визуализации процессов радиоэлектронного подавления. Главными достоинствами моделей являются наглядная визуализация результатов моделирования, а также универсальность их вычислительных алгоритмов, что позволяет использовать модели как самостоятельно в виде отдельных программных продуктов [4, 5, 6], так и в виде набора алгоритмов (библиотек) других (сторонних) приложений. Модели, благодаря их программной реализации в среде имитационного моделирования AnyLogic, являются кроссплатформенными и корректно работают как в операционных системах семейства Windows, так в операционных системах на базе Linux.

---

Адекватность и достоверность разработанных моделей подтверждаются полным соответствием теоретическим положениям [1, 2]. Модель была апробирована и использована в мероприятиях боевой подготовки береговых частей РЭБ Балтийского и Северного флотов в 2019-2020 г.г. и получила положительную оценку специалистов, что подтверждено соответствующими актами.

Таким образом, предложенный подход, базирующийся на трех подходах имитационного моделирования (агентный, дискретно-событийный и системная динамика), и разработанные на его основе имитационные модели позволили решить задачу по построению зон гарантированного подавления для средств связи и средств создания помех различного назначения.

### Литература

1. **Палий А.И.** Радиоэлектронная борьба. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.: ил.
2. **Вакин С.А., Шустов, Л.Н.** Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. – М.: Сов.радио, 1968. – 448 с.
3. **Мухин А.В.** Исследование радиотехнических характеристик зеркальных антенн космических аппаратов: дис. к-та. техн. наук: 05.12.07 / Мухин Александр Васильевич – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 140 с.
4. Модель расчета и визуализации энергетических характеристик источников сигналов с различной диаграммой направленности антенны. / Богомоллов А.П., Подрезов С.Н., Черников Ю.А. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664589 от 19.11.2018 г.
5. Модель формирования зон подавления радиосвязи. / Подрезов С.Н. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612841 от 01.03.2019 г.
6. Модель расчета и построения зон подавления радиосвязи в трехмерном пространстве. / Богомоллов А.П., Подрезов С.Н., Черников Ю.А. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619931 от 12.07.2019 г.