

---

**ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
КОГНИТИВНЫХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ИХ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANYLOGIC****И.В. Зайцев, А.А. Молев, А. С. Колесников (Воронеж)**

В настоящее время одной из тенденций развития беспроводных систем связи является расширение их возможностей в направлении интеграции различных технологий радиодоступа, например, на основе стандартов IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.16 (WiMAX), GSM/UMTS и др., в единую систему, обеспечивающую передачу разнородного трафика между отдельными пользователями с исключением операций по их соединению через маршрутизаторы (базовые станции) высокого уровня. Для реализации указанной возможности, сети радиосвязи формируются по принципу мобильных самоорганизующихся сетей, не имеющих фиксированной и заранее заданной топологии (ad hoc-сети, Mobile Ad Hoc Network – MANET) [1]. С учетом необходимости адаптивного выбора и подстройки частотных, временных, энергетических параметров и режимов работы радиостанций, наиболее эффективных для текущей сигнально-помеховой обстановки, такая возможность должна реализовываться с использованием управляющей структуры («надсистемы»). Для описания радиосистем, имеющих указанные свойства, используется термин «*когнитивная система радиосвязи*» [2], под которым понимается *интеллектуальная система связи, способная анализировать помехово-сигнальную информацию и адаптироваться к ней посредством обучения, реагируя на изменения в эфире в реальном времени изменением своих собственных параметров (диапазона частот, вида и формы сигнала, выходной мощности) с целью увеличения эффективности использования спектрального ресурса.*

В силу сложности когнитивных систем связи, решение даже простых частных задач (оценка вариантов построения, анализ выбранных протоколов маршрутизации и др.) с использованием аналитических методов является затруднительным, поскольку позволяет сделать лишь общие качественные выводы о характере процессов протекающих в системе связи и ее свойствах. Применительно к системам связи, имеющим адаптивную структуру и характеристики, варьируемые в процессе функционирования, аналитические методы не позволяют оценить влияние преднамеренных и непреднамеренных помех на систему связи. Поэтому, для проведения исследований по анализу особенностей построения и алгоритмов функционирования когнитивных систем связи, необходимо применять имитационное моделирование.

*Целью* данной работы является разработка программного комплекса имитационного моделирования когнитивных систем связи, позволяющего оценивать показатели качества функционирования когнитивных систем радиосвязи в условиях воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех.

Разработанный программный комплекс состоит из следующих основных компонентов (рисунок 1):

- модель когнитивной системы связи [3], включающая частные модели:
  - функционирования многоинтервального направления связи,
  - функционирования подсистемы маршрутизации,
  - оценки состояния системы связи и адаптации к изменению сигнально-помеховой обстановки;

модель источника радиопомех,  
 модули управления процессом моделирования и планирования эксперимента,  
 база данных, содержащая информацию о структуре и параметрах работы системы связи, характеристики размещения узлов связи на местности, типы и характеристики радиостанций.

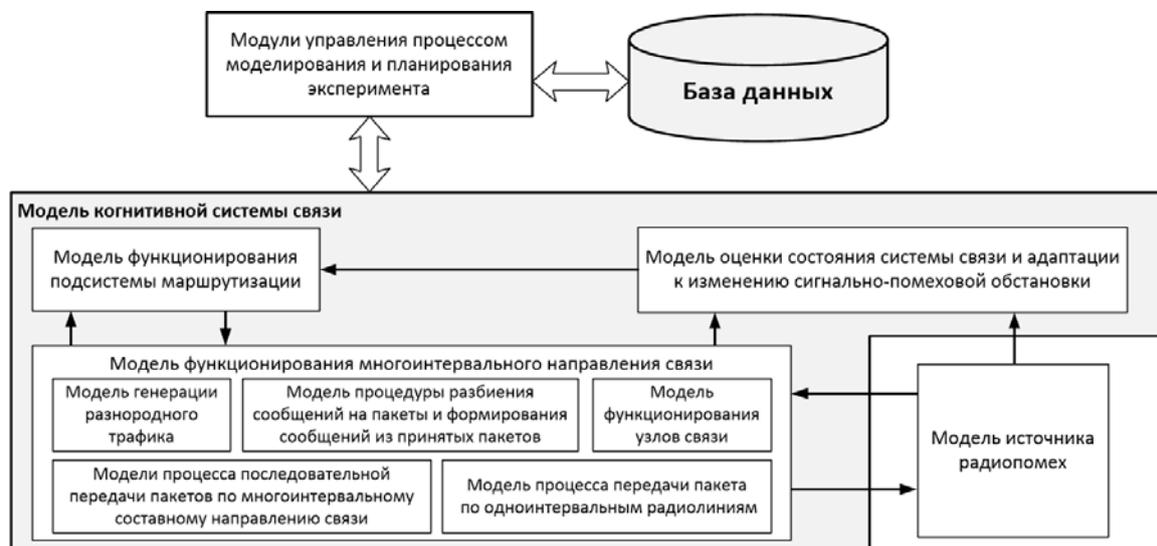


Рис. 1 – Структура программного комплекса имитационного моделирования когнитивной радиосвязи

Программный комплекс разработан в среде Anylogic на основе применения элементов библиотеки Enterprise Library, предоставляющей возможность моделирования систем, состояния которых могут быть представлены как последовательность операций (прибытие, задержка, захват ресурса, разделение, обслуживание в очереди) над «сущностями» (заявками), представляющими сообщения, пакеты данных, управляющую информацию и т.д. Благодаря тому, что Anylogic базируется на архитектуре Eclipse SDK, расширение проекта среды Anylogic (*rp\_isspd.alp*) реализуется путем внедрения модулей собственной разработки (*rp\_isspd.kla.jar*), используемых в разных классах проекта. Ядро платформы функционирует на наборе плагинов, общих как для Anylogic, так и для среды разработки Eclipse.

Каждая из частных моделей представлена активным объектом, реализованным с использованием механизма наследования от класса *ActiveObject*, имеющим интерфейс взаимодействия с другими моделями для обмена входными и выходными данными, реализованный в виде объектов класса *Port*. Пользовательский интерфейс для управления ходом моделирования, вводом начальных данных предоставляется средой Anylogic, редактирование информации в базе данных реализовано с использованием разработанных классов, входящих в состав пакета *rp\_isspd.kla*. Также этот пакет включает классы, соответствующие нормативному описанию системы связи, в том числе ее структуры. Кроме того, в пакете *rp\_isspd.kla* содержатся классы, используемые для обмена входными и выходными сигналами каждой из частных моделей, являющиеся наследниками класса «заявка» *Entity*. Пример реализации частной модели процесса последовательной передачи пакетов по многоинтервальному составному направлению связи приведен на рисунке 2.

С целью наиболее полного рассмотрения процесса функционирования

когнитивной системы связи в условиях помех, ее функционирование воспроизводится на различных уровнях модели взаимодействия открытых систем, с соответствующим распределением функций и процедур, воспроизводимых частными моделями.

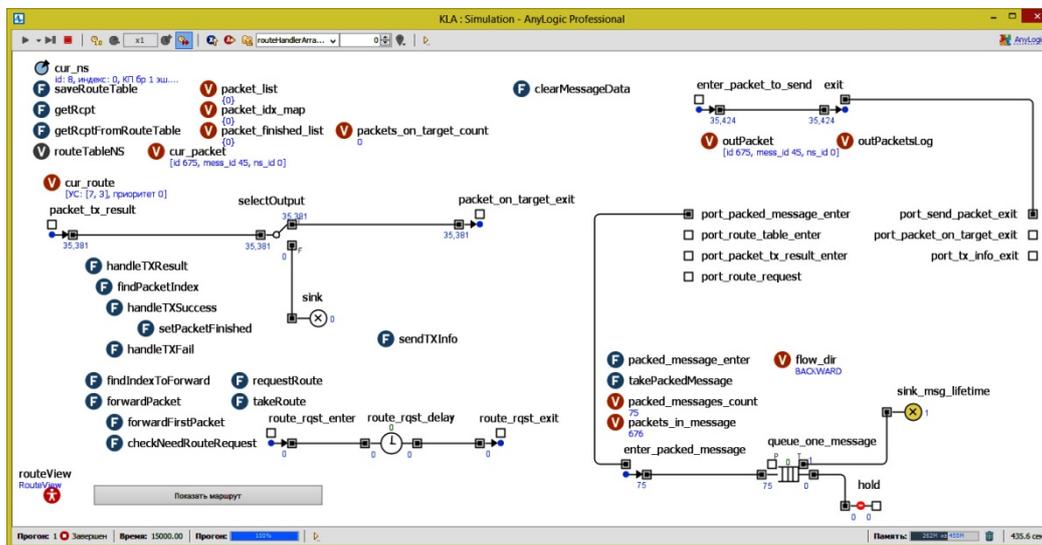


Рис. 2 – Схема модели процесса последовательной передачи пакетов по многоинтервальному составному направлению связи *PacketRouter*

Оценка качества функционирования системы связи в разработанной модели производится по показателю «реализуемая пропускная способность»  $Q_c$ , которая характеризует производительность системы связи, достигаемую в процессе ее функционирования с учетом возможностей по маршрутизации пакетов данных и адаптации к сигнально-помеховой обстановке и вычисляется как отношение общего количества успешно переданных сообщений либо их объема к длительности интервала моделирования  $t_{mod}$ :

$$Q_{врем}[час^{-1}] = \frac{\sum_j^{N_{HC}} N_{nepj}^+}{t_{mod}}, \quad Q_c[кбит/с] = \frac{\sum_j^{N_{HC}} S_{успnepj}}{t_{mod}}, \quad (1)$$

$N_{HC}$  – количество направлений связи,  $N_{nepj}^+$ ,  $S_{успnepj}$  – количество и объем успешно переданных сообщений в  $j$ -м направлении связи, соответственно.

Исследования по оценке  $Q_c$  проводились в среде Anylogic с созданием эксперимента, в ходе выполнения которого в автоматическом режиме фиксировались значения показателей и строились необходимые зависимости, что существенно сократило временные затраты и упростило интерпретацию результатов. Процесс выполнения модели с автоматическим построением зависимостей проиллюстрирован на рисунке 3. С целью оценки необходимого и достаточного объема реализаций для получения достоверных результатов, проведено планирование эксперимента, применительно к типовой системе связи со следующими характеристиками (рисунок 4):

- количество уровней иерархии – 3;
- количество узлов связи на каждом уровне иерархии 2, 3 и 9;
- пропускная способность радиостанций по уровням – 512, 1000 и 2000 кбит/с;
- топология сети связи – динамически изменяемая, в зависимости от

пространственных характеристик УС и сигнально-помеховой обстановки.

Для определения объема проводимых имитационных экспериментов (количество реализаций и необходимая их продолжительность) [5] предварительно оценивались границы временного интервала, на котором обеспечивается сходимость значения показателя  $Q_c(t)$  к реализуемому в стационарном режиме при достаточно больших интервалах моделирования.

Проводилось 10 экспериментов, достаточно большой продолжительности ( $t_{mod} = 8-10$  часов), в ходе которых фиксировалась динамика изменения *текущей* пропускной способности системы связи  $Q_c(t)$  и ее значения, *усредненного* за интервал моделирования.

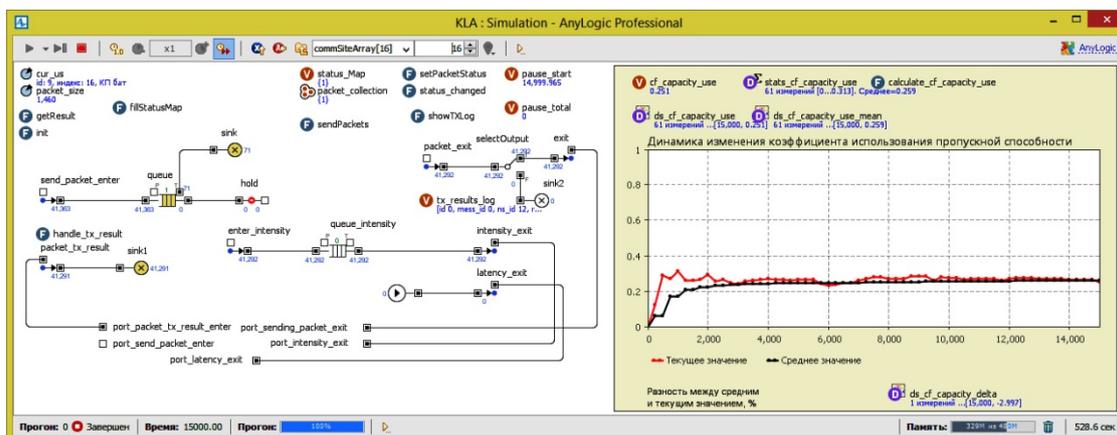


Рисунок 3 – Иллюстрация выполнения эксперимента с автоматической фиксацией результатов

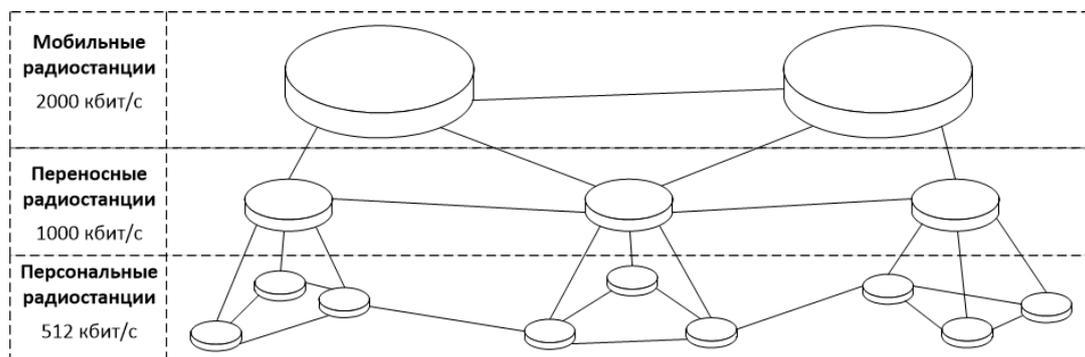


Рис. 4 – Структура моделируемой системы радиосвязи

Для сокращения времени на получение результатов, определялись значения  $t_{стац0}$  и  $Q_c(t)$ , соответствующие стационарному режиму, т.е. типовым условиям функционирования системы связи, при которых значения показателя  $Q_c(t)$  практически не изменяются (отклонение  $Q_c$  от стационарного значения составляет не более 5-7%). В связи с тем, что целью моделирования является оценка влияния воздействия помех, определялись границы интервала ( $t_{mod0}$ ,  $t_{стац0}$ ), на котором текущее значение  $Q_c(t)$  соизмеримо со стационарным значением, либо составляет величину одного порядка, что позволяет оценивать степень снижения пропускной способности системы вследствие воздействия помех, в режиме, близком к стационарному, с допустимой точностью.

Процедура определения длительности реализации моделирования проиллюстрирована на рисунке 5 (кривые А), содержащем характерную зависимость реализуемой пропускной способности  $Q_c(t)$ . Видно, что условие стационарности

$$|Q_c(t) - \langle Q_c(t) \rangle| \leq 5...7\%, \text{ где } \langle \dots \rangle - \text{ операция усреднения,}$$

соответствует реализации продолжительностью не менее  $t_{стаци0} = 7000$  с,  $Q_{стаци} \approx 200$  кбит/с, т.е. для получения значений показателей, соответствующих установившемуся режиму работы, длительность реализации моделирования, должна равняться или превышать полученное значение  $t_{стаци0}$ . В момент времени  $t_{мод0} = 1000$  с, значение  $Q_c(t) = 210$  кбит/с составляет величину одного порядка с  $Q_{стаци}$ . Следовательно, оценку воздействия помех можно осуществлять после моделирования в течение  $t_{мод0} = 1000$  с. В этом случае получаемые значения показателей будут близки к типовым условиям функционирования системы связи. В том случае, если будет моделироваться другая структура системы связи, например, с количеством узлов большим, чем в исходной системе (рисунок 5, кривые Б, В), значение  $Q_{стаци}$  и границы интервала ( $t_{мод0}$ ,  $t_{стаци0}$ ) будут отличаться, что также потребует уточнения требований к объему реализации перед проведением экспериментов. В рассматриваемом примере количество узлов связи в случаях Б и В, больше чем в исходной системе в 2 и 3 раза соответственно. Причем, значение реализуемой пропускной способности возрастает прямо пропорционально масштабу системы связи:  $Q_{стаци}$  исходной системы составляет  $\approx 200$  кбит/с, для систем, имеющих в два и три раза больше узлов – 420 и 630 кбит/с, соответственно. Продолжительность моделирования при этом должна составлять не менее 4250 и 3750 с, т.е. результаты соответствующие стационарному режиму, для систем большего масштаба будут получены быстрее. Как видно из рисунка 6, при изменении масштаба системы связи с 14 до 70 узлов минимальная длительность реализации снижается более чем в 2 раза (с 7000 до 3250 секунд).

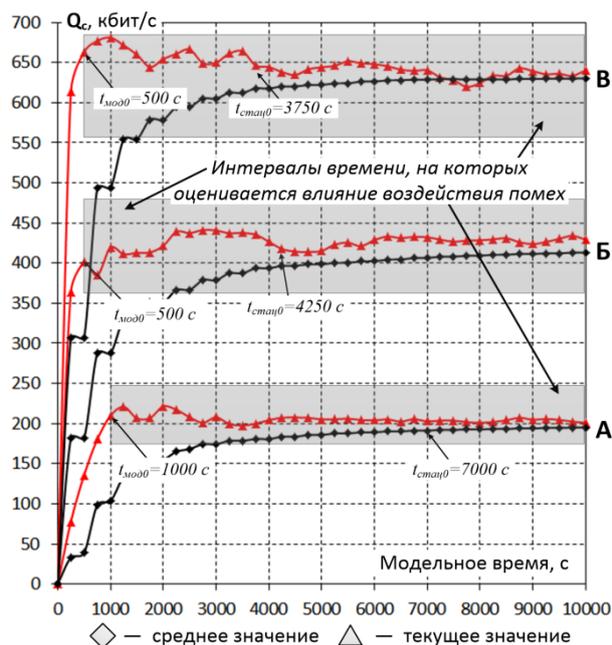


Рис. 5 – Иллюстрация определения длительности реализации моделирования

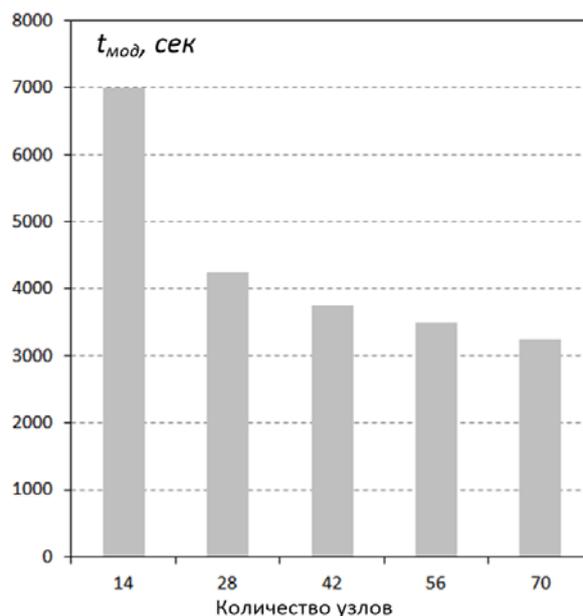


Рис. 6 – Зависимость продолжительности реализации от масштаба системы связи

**Вывод**

Таким образом, в среде Anylogic на основе применения библиотеки Enterprise Library разработан программный комплекс дискретно-событийного моделирования когнитивных систем радиосвязи, функционирующих в условиях воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех. Приведено описание подхода к оценке необходимого и достаточного объема имитационных экспериментов для получения достоверных результатов исследований. Показано, что минимальная достаточная длительность реализации существенно зависит от масштаба моделируемой системы связи: при увеличении количества узлов связи в 5 раз она может быть сокращена более чем в 2 раза.

**Литература**

1. Basagni S. - Mobile Ad Hoc Networking, – IEEE Press, Wiley Interscience, 2004.
2. Отчет МСЭ-R SM.2152. Определения системы радиосвязи с программируемыми параметрами (SDR) и системы когнитивного радио (CRS), Женева, 2010.
3. Молев А.А., Колесников А.С. Моделирование в среде Anylogic систем радиосвязи, построенных на основе когнитивных технологий. – Материалы XV международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». Воронеж, ВГУ, 2015 г., том I, с. 349-354, 489 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей.– М.: Высшая школа, 1998. – 576 с.
5. Строгалева В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование: Учеб. пособие. – М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 280 с.