

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЮ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ**

**А.И. Анисимов, С.Н. Подрезов, Д.А. Синяткин (Воронеж)**

Анализ современных условий проведения крупных операций различного рода (поисково-спасательных, военных, по ликвидации техногенных и природных катастроф) указывает на то, что их успех в значительной степени определяется надежностью систем управления в информационно-телекоммуникационном пространстве.

Одним из ключевых элементов таких систем управления являются системы связи с адаптивной обработкой сигналов.

Так каналобразующие оборудование современных систем связи использует технологию управления мощностью и спектром передаваемых сигналов, а также технологию их адаптивной обработки. Данные технологии позволяют каналобразующей аппаратуре в режиме реального времени контролировать сигнально-помеховую обстановку и при необходимости перераспределять полосы используемых частот в интересах наилучшего обслуживания абонентских терминалов (АТ), а также блокировать частоты, пораженные помехами как природного, так и техногенного характера [1, 2].

Однако одной из слабых сторон систем связи с адаптивной обработкой сигналов является «переходный процесс», промежуток времени в который система перенастраивает работу каналов в сложной РЭО.

В этих условиях возникает угроза последовательного воздействия на элементы системы помех различного происхождения с параметрами, позволяющими вынудить систему спутниковой связи включить не менее 70% каналов в «переходный процесс» с соответствующей блокировкой трафика всей системы.

Наиболее критично воздействие таких помех для систем узкополосной связи УВЧ-диапазона, где оперативная ценность информации минимальна, и, следовательно, возрастает ущерб от воздействия помех [2].

Таким образом, возникает задача определения параметров наиболее опасной помехи (ширина полосы радиоподавления и время непрерывного воздействия), при которых вероятность обслуживания заявок (пропускная способность) в линиях систем связи с адаптивной обработкой сигналов будет минимальна.

То есть, необходимо при заданных параметрах спутниковой линии и возможностях по деструктивному воздействию среды определить: пропускную способность элементов системы спутниковой связи – группы линий систем связи, время, затрачиваемое на передачу каждого сообщения и время релаксации системы (времени восстановления после начала воздействия помех).

Поставленную задачу требуется решить в условиях априорной неопределенности состояния системы спутниковой связи и параметров деструктивного воздействия помех.

В итоге предлагается определить полосу радиоподавления и время непрерывного воздействия помех, при которых пропускная способность элементов системы спутниковой связи (вероятность обслуживания заявок) будет минимальна.

Математическая постановка этой задачи формулируется следующим образом:  
при заданных:  $\lambda^{\text{сист}}, t_k^{\text{обсл}}, t^{\text{релакссист}}$ ,  
определить:

$$x^0 = [f_0^{\text{пом}}, t_0^{\text{пом}}] = \text{Arg} \min_{\substack{f_i^{\text{пом}} \in F(\mathcal{E}^{\text{СП}}) \\ t_j^{\text{пом}} \in T(t^{\text{релакссист}})}} P(\lambda^{\text{сист}}, t_k^{\text{обсл}}, t^{\text{релакссист}}, t_j^{\text{пом}}, f_i^{\text{пом}}) \quad (1)$$

в условиях ограничений:  $f_i^{\text{пом}} \leq f^{\text{СП}}$ , (2)

где:

$\lambda^{\text{сист}}$  – пропускная способность элементов системы спутниковой связи (линий СпС);

$t_k^{\text{обсл}}$  – время на передачу k-го сообщения;

$t^{\text{релакссист}}$  – время релаксации системы (время восстановления элементов системы после воздействия помех);

$t_j^{\text{пом}}$  – j-й вариант времени непрерывного воздействия помехи в полосе  $f_i^{\text{пом}}$ ;

$f_i^{\text{пом}}$  – i-й вариант ширины полосы воздействия помехи;

$\mathcal{E}^{\text{СП}}$  – энергопотенциал станции помех.

Данная задача является одной из частных задач теории массового обслуживания, а элементы системы связи могут быть представлены как система массового обслуживания с ограниченной очередью и отказами, заявкой в которой является передаваемое сообщение на одной из линий системы связи.

Аналитическое решение данной задачи связано с известными трудностями [3].

Во-первых, в системе протекают как марковские, так и полумарковские процессы, результатом чего является необходимость решения, как классических дифференциальных уравнений, так и дифференциальных уравнений с частными производными.

Во-вторых, переход от марковских к полумарковским процессам происходит по псевдослучайному закону, статистические параметры которого неизвестны. Кроме того, использование аналитических методов исследования затруднительно ввиду необходимости учета неопределенности исходной информации, наличия корреляционных связей между большим числом параметров, характеризующих внутрисистемные процессы, множества случайных факторов, воздействующих на элементы системы связи.

Таким образом, разработка приемлемых аналитических моделей элементов современных и перспективных систем связи с адаптивными методами обработки сигналов без ряда упрощений, и как следствие, без снижения точности расчетов, наталкивается на существенные трудности.

Вместе с тем, известно [4-6], что для принятия адекватного решения по организации работы сложной системы достаточен анализ ее упрощенного или приближенного представления в виде имитационной модели.

В последние годы широкое применение получили современные средства (пакеты программ) имитационного моделирования, которые позволяют работать не с самим объектом (явлением, процессом), а с его приближенной моделью. Это дает возможность, опираясь на современные вычислительные методы и технические инструменты подробно и глубоко изучать объекты в достаточной полноте, недоступной чисто теоретическим подходам.

В [6] показано, что для исследования процесса функционирования системы связи возможно использование имитационного моделирования, например, в среде имитационного моделирования AnyLogic.

Упрощенная схема разработанной в среде AnyLogic имитационной модели функционирования элементов ССПС в условиях воздействия преднамеренных помех [7] приведена на рисунке 1.

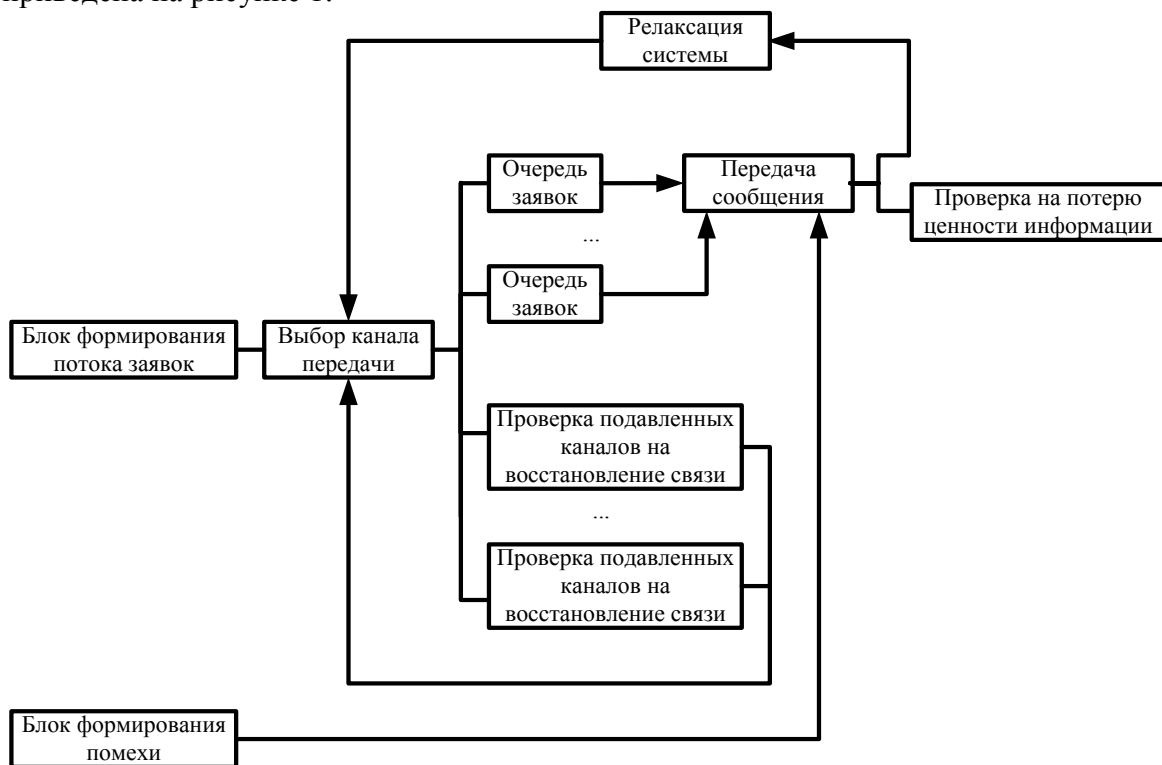


Рис.1 – Упрощенная схема модели

Блок формирования потока заявок с интенсивностью  $\lambda^{\text{заявк}}$  случайного числа  $n \in \mathbb{N}$  заявок с различной длительностью  $d_i^{\text{заявк}}$ , оперативной ценностью  $c_i^{\text{заявк}}$  и важностью  $g_i^{\text{заявк}}$ .

Сгенерированные заявки передаются в блок выбора канала передачи. В данном блоке заявки за время  $t^{\text{распрзаяв}}$  равномерно распределяются по всем не подверженным воздействию помех каналам с наименьшей загрузкой  $z = n_k \cdot d_j^{\text{заявк}}$  где  $n_k$  – число заявок в  $k$ -том канале, а  $d_j^{\text{заявк}}$  – длительность  $j$ -ой заявки в  $k$ -том канале. Далее заявки сортируются по важности в очереди.

Блок формирования помехи случайным образом выбирает  $f_i^{\text{пом}}$  соседних каналов и передает в блок передачи сообщения данные о том, что канал подавлен в течение  $j$ -го варианта времени непрерывного воздействия помехи  $t_j^{\text{пом}}$ .

В блоке передачи сообщения происходит проверка. Если канал в данный момент времени подавлен, то сообщение через  $t^{\text{релаксист}}$  попадает в блок выбора канала передачи. При этом канал помечается как подавленный и информация о нем передается в блок проверки подавленных каналов для восстановления связи. Если канал не подавлен, то сообщение передается в течение времени  $t_k^{\text{обсл}}$ .

После отправки сообщение проходит проверку на потерю оперативной ценности. Если оперативная ценность сообщения потеряна, то переданное сообщение помечается, как «устаревшее». Блок проверки подавленных каналов с целью восстановления связи с периодичностью  $t^{\text{проверки}}$  осуществляет проверку подавленных каналов, осуществляется контроль восстановления работоспособности. В случае снятия помехи с канала, данные о канале передаются в блок выбора канала передачи. После этого работоспособность канала учитывается при распределении заявок.

В качестве заявки в исследуемой системе будет выступать сообщение, обладающее заданным набором параметров. Сама система связи будет представлена в виде многоканальной СМО. Ниже приводится описание программной реализации разработанной имитационной модели.

Основными параметрами и функциями сообщения (*soobshenie*), являющегося наследником класса *entity* (заявки), приведенными на рисунке 2, являются:

- *t\_start* – время появления сообщения в системе связи (время начала обслуживания);
- *dlitelnost* – длительность сообщения, характеризующая время передачи;
- *vajnost* – важность сообщения, характеризующая приоритетность обслуживания заявки системой;
- *t\_cennost* – время оперативной ценности сообщения;
- *way* – служебная переменная используемая для хранения информации о номере канала системы связи, по которому передается сообщение;
- *getTTime* – функция отвечающая за генерацию значений параметров сообщения, имеющих стохастическую природу.

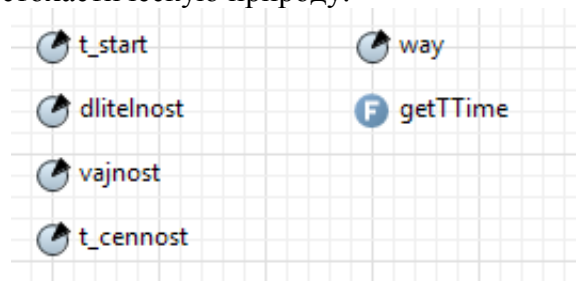


Рис.2 – Схематичное представление основных параметров и функций сообщения (*soobshenie*)

На рисунке 3 приведен внешний вид программной реализации СМО описывающей элементы системы связи.

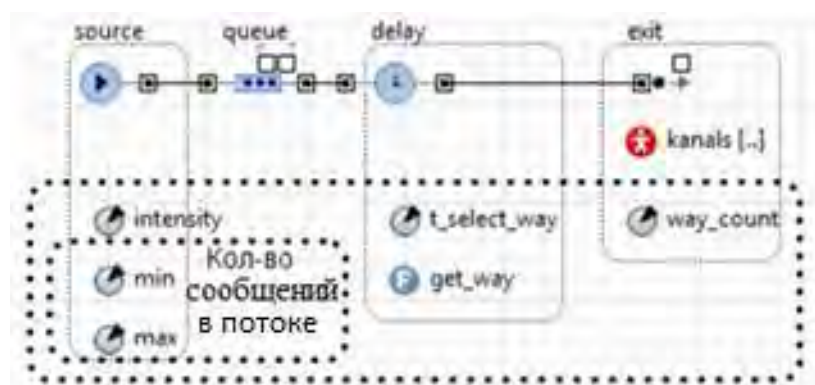


Рис.3 – Схематическое представление программной реализации СМО, описывающей элементы системы связи

Элемент *source* является источником (генератором) сообщений, а параметры *intensity* характеризуют, соответственно, интенсивность и количество *min*, *max* формируемых сообщений.

Очередь *queue* отвечает за хранение и сортировку по важности поступивших в систему сообщений.

Таймер delay вызовом функции `get_way` осуществляет выбор канала для передачи сообщения с присвоением переменной `way` индекса соответствующего канала. При этом время, потребное на выбор канала задается параметром `t_select_way`.

Элемент `exit` осуществляет передачу сообщения в соответствующий канал.

Переменная `way_count` характеризует канальность системы связи. При этом совокупность каналов связи программно реализованна в виде «популяции агентов» (`kanals`) внешний вид которых приведен на рисунке 4.

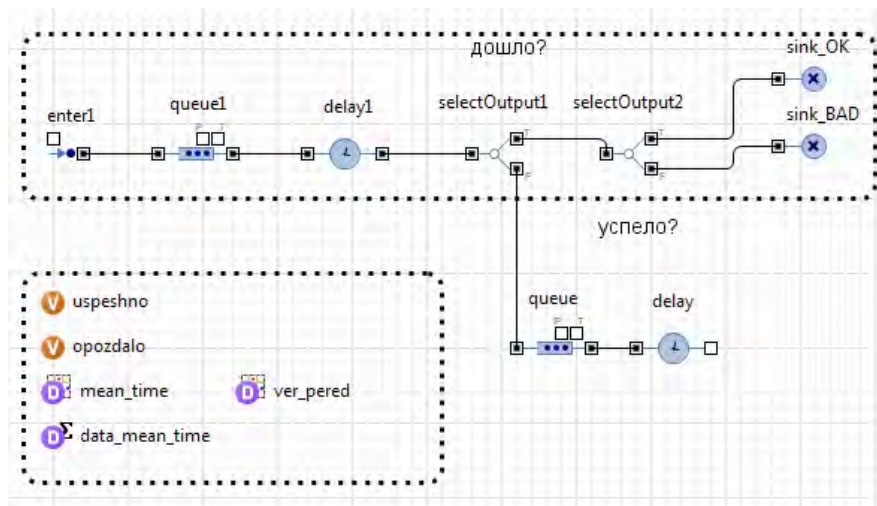


Рис.4 – Схематическое представление программы реализации совокупности каналов связи в виде «популяции агентов» (`kanals`)

Элемент `enter1` отвечает за получение сообщений, а очередь `queue1` отвечает за хранение и сортировку сообщений по важности, поступивших в канал.

Таймер `delay1` имитирует передачу сообщения, со временем передачи пропорциональным его длительности (`dlitelnost`).

Элемент `selectOutput1` осуществляет распределение, на полученные сообщения, типа - канал не подавлен, а так же не полученные сообщения, типа - канал подавлен, которые принимает абонент. В случае, когда сообщение не доходит до абонента, после задержки `delay`, то сообщение перенаправляются на вход основной очереди системы связи `queue` для повторной маршрутизации и отправки.

В случае, когда сообщение дошло до абонента элемент `selectOutput2` осуществляет сортировку данных сообщений по критерию, который фиксирует время передачи сообщения и сравнивает со временем оперативной ценности, с целью его не превышения.

Элементы `sink_OK` и `sink_BAD` отвечают за сбор статистики по количеству своевременно и несвоевременно полученных сообщений, а также фиксирует время передачи сообщений. Переменные `uspeshno` и `opozdalo` сохраняют количество своевременно и несвоевременно полученных сообщений. Элементы сбора статистики `mean_time` и `ver_pered` сохраняют статистические данные о среднем времени передачи сообщения в канале, а так же вероятности своевременной передачи сообщения в канале. Результаты передачи сообщений в каждом канале также передаются с последующим обобщением на главную форму программы, что позволяет получать статистические оценки среднего времени передачи сообщения в канале и вероятности своевременной передачи сообщения в канале за все линии системы связи (рисунок 5).



На рисунке 6 приведено схематическое представления блока имитационной модели, показывают воздействие помех на элементы системы связи стандартов MIL-STD-188-182 и MIL-STD-188-183 [2].

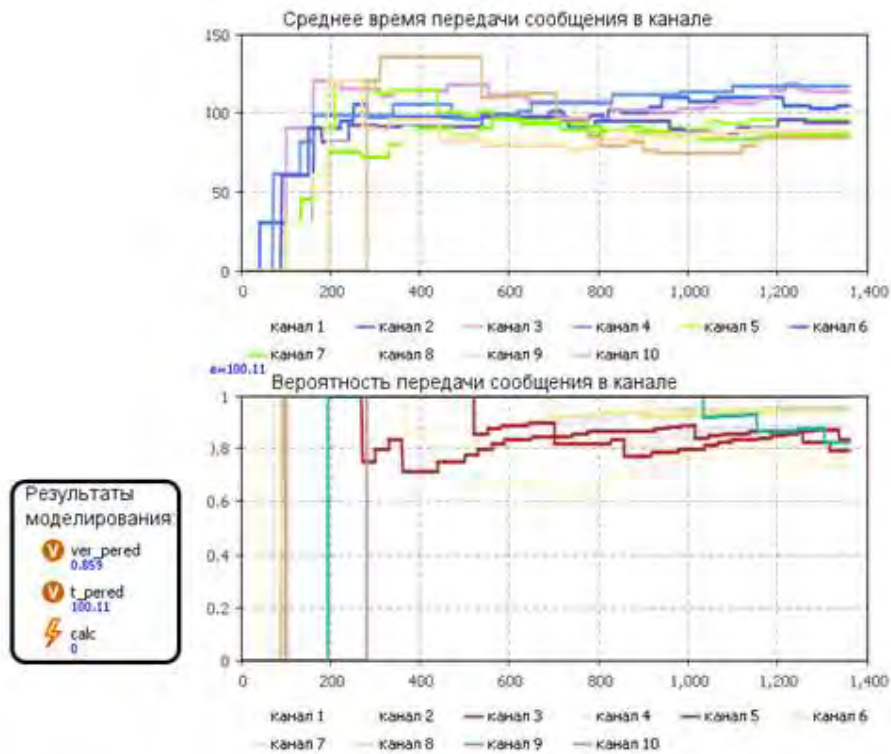


Рис.5 – Результаты имитационного моделирования передачи сообщений в канале по двум параметрам в виде графиков зависимостей

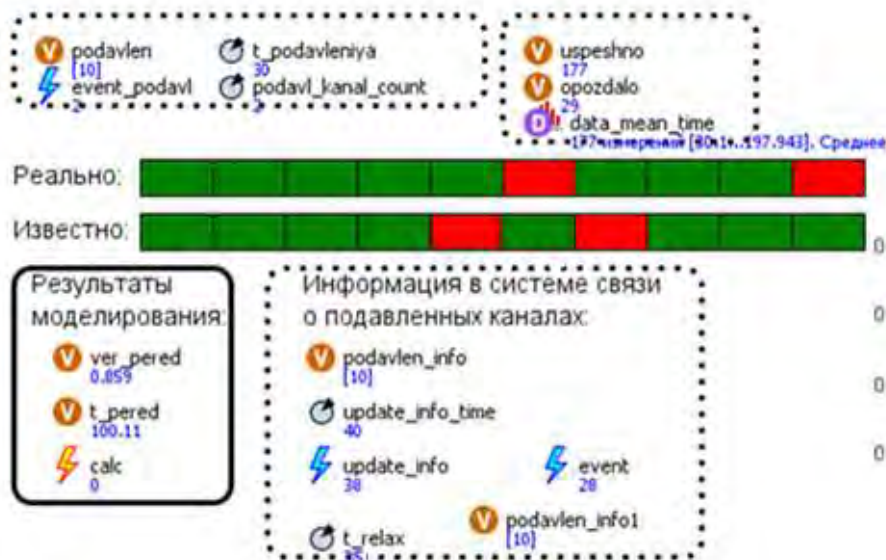


Рис.6 – Схематическое представление блока имитационной модели, показывающей воздействие помех на элементы системы связи

Таймер event\_podavl осуществляет с частотой t\_podavleniya выбор индексов подавляемых каналов, количество которых задается параметром podavl\_kanal\_count. Информация о текущем состоянии элементов системы связи (подавленных каналах)

---

хранится в массиве булевых переменных `podavlen` размерностью соответствующей количеству линий системы связи. Информация о текущем состоянии линии системы связи хранится в массиве булевых переменных `podavlen_info`, получая информацию о безуспешной попытке передачи сообщения в данном канале.

Получив данные о подтверждении воздействия помех на линии системы связи, имитационная модель инициирует адаптацию к новым условиям, протекающих в течение времени `t_relax`, а также по таймеру `update_info` с периодичностью `update_info_time` и отправляет в канал тестовое сообщение для актуализации информации о наличии помехи в линии связи.

Таким образом, система связи получает информацию о сигнально-помеховой обстановке с некоторой задержкой, что при определенных параметрах помехи приводит к наличию в системе неактуальной информации о состоянии линий связи.

Так на рисунке 6 показано состояние имитационной модели, при воздействии помех на две из десяти возможных линий связи, когда время воздействия между скачками составляло 30 секунд, а время релаксации системы 35 секунд.

Как видно из рисунка 6 в таких условиях элементы системы связи не успевают перестроиться до очередного воздействия помех на другие частоты, а, следовательно, при воздействии помехой на два канала связи, блокированными оказывается четыре канала. Данное обстоятельство позволило увеличить время передачи сообщения до 100 секунд и снизить вероятность своевременной передачи сообщения с 1 до 0,86 (из 206 отправленных сообщений, своевременно полученными оказались 177 из них 29 сообщений получены после потери их оперативной ценности).

Таким образом, данная имитационная модель функционирования систем связи наилучшим образом адаптирована под стандарты связи с технологией адаптивной обработки сигналов и позволит проводить как оценки помехоустойчивости систем связи, так и определение оптимальных параметров деструктивного воздействия на них.

## Литература

1. **Макаренко С.И.** Описательная модель системы спутниковой связи MUOS // Системы управления, связи и безопасности. 2019. №3. – С.89-116.
2. **Oetting J.D., Jen T.** The Mobil User Object System.// John Hopkins APL Technical Digest, 2011, – С.103-112.
3. **Вентцель Е.С.** Исследование операций. – М.: Соврадио, 1972.
4. **Карпов Ю.Г.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – М.: Издательство: ВHV, 2006.
5. **Боев В.Д., Кирик Д.И., Сыпченко Р.П.** Компьютерное моделирование: Пособие для курсового и дипломного проектирования. – СПб: ВАС, 2011.
6. **Oscar M. Bull.** System Dynamics Applied to Combat Models (Lanchester Laws), Universidad Andrés Bello, Chile, 2004.
7. **Анисимов А.И.** «Модель функционирования систем связи с технологией адаптивной обработки сигналов в условиях преднамеренных деструктивных воздействий», свидетельство о государственной регистрации программных продуктов № 2020619339 от 17.08.2020.