

## СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ

Математическое моделирование с применением пакета программ SystemView\* в настоящее время превратилось в универсальный метод, широко используемый во всех областях систем связи. Он является мощным средством интенсификации анализа и синтеза различных процессов и систем. Так, например, эффективная разработка сложных радиосистем и систем радиуправления космических аппаратов, стала возможной лишь после широкого внедрения методов моделирования с применением языков спецификаций.

Моделирование позволяет оценить количественно характеристики различных систем, сравнить их между собой и выбрать наилучшую на стадии проектирования, когда еще не вложены средства в разработку образцов и сравнительно легко отказаться от ошибочно принятого принципа построения системы сотовой связи.

По сравнению с другими широко распространенными цифровыми стандартами GSM обеспе-

чивает лучшие энергетические характеристики, более высокое качество связи, ее безопасность и конфиденциальность. В результате анализа различных вариантов построения цифровых сотовых систем подвижной связи в стандарте GSM принят многостанционный доступ с временным разделением каналов. Для описания работы сотовой системы стандарта GSM используем следующие понятия.

Абонентское устройство (АУ) – подключаемое к сети оператора сотовой связи техническое средство индивидуального использования, формирующее сигналы электросвязи для передачи или приема заданной абонентом информации по радиоканалам. Базовая станция (БС) – сухопутная станция сухопутной подвижной службы.

Многозональные системы сотовой связи стандарта GSM характеризуются тем, что при включении АУ сотовой связи, а также в процессе перемещения абонента по территории обслуживания сети необходима процедура регистрации или,

---

\*Загидуллин Р.Ш., Карутин С.Н., Стешенко Б.В. SystemView. Системотехническое моделирование устройств обработки сигналов / Под ред. к. т. н. В. Б. Стешенко. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 294 с.

соответственно, перерегистрации АУ сотовой связи в одной из зон обслуживания. Во многом от того, насколько верно будет принято решение по выбору радиоканала, относящегося к определенной зоне обслуживания, зависит качество связи, как при входящем, так и при исходящем соединении. При этом связь осуществляется именно в той зоне, где в данный момент зарегистрирован АУ сотовой связи стандарта GSM.

В сотовых системах передача сообщений от БС к АУ осуществляется по прямому каналу, где в качестве управляющего параметра может выступать номер БС в которой производится регистрация АУ. В силу подвижности абонента качество связи в значительной степени зависит от его местоположения относительно существующих БС и от мощностей их передатчиков. Следовательно, возникает задача исследования информационных сотовых систем стандарта GSM методами математического моделирования для регистрации в наиболее подходящей БС с целью обеспечения наилучшего качества связи.

Каждая БС сотовой сети постоянно излучает контрольный сигнал на одном из своих прямых частотных каналов. Такой канал называется вызывным. По нему передается информация, идентифицирующая сеть, а также сигнал входящего вызова с требуемым номером абонента. На терминале имеется возможность отслеживать по прямым каналам качество связи во всех зонах обслуживания и, в случае его ухудшения в зоне регистрации, автоматически перенастраиваться на другую БС.

Следовательно, возникает необходимость решить задачу синтеза оптимальных алгоритмов управления параметрами цифровой сотовой системы связи стандарта GSM. Задачу можно решать как в общем виде, так и для частного случая. В этом случае при разработке процесса управления необходимо исходить из наложенных на модель ограничений, учитывающих конечность алгебраических структур цифровой сотовой системы стандарта GSM.

Для описания модели канала сотовой связи воспользуемся методом переменных состояний. Достоинством этого метода является возможность построения рекуррентных алгоритмов оценки и управления, что позволяет учесть нестационарность канала сотовой связи. В системе сотовой связи стандарта GSM используется цифровой

сигнал с фиксированной длиной блока. Множество допустимых комбинаций образует группу над полем Галуа  $GF(2)$ .

Для начала опишем математическую модель канала сотовой связи стандарта GSM с автономным источником сообщений в виде системы разностных уравнений сообщения и наблюдения:

$$\vec{X}_{k+1}(g) = A(k+1, k)\vec{X}_k(g), \quad (1)$$

$$\vec{Z}_{k+1}(g) = \vec{X}_{k+1}(g) \oplus B(k+1, k)\vec{W}_k(g), \quad (2)$$

где  $\vec{X}(g)$  – вектор сообщения;  $\vec{Z}(g)$  – вектор наблюдения;  $\vec{W}(g)$  – вектор аддитивной ошибки;  $A(k+1, k)$  – переходная матрица источника сообщения;  $B(k+1, k)$  – переходная матрица источника ошибок канала связи;  $g$  – элемент группы;  $\oplus$  – групповая операция сложения по модулю 2;  $k = 0, 1, \dots$  – отсчет времени.

На модель накладываются следующие ограничения.

1. В каждый момент времени  $k = 0, 1, \dots$  заданы распределения вероятностей векторов сообщения и ошибки:

$$P_{k+1}[\vec{X}(g)] = \Pi_A^T P_k[\vec{X}(g)],$$

$$P_{k+1}[\vec{W}(g)] = \Pi_B^T P_k[\vec{W}(g)],$$

где  $\Pi_A, \Pi_B$  – матрицы переходных вероятностей векторов сообщения и ошибок соответственно.

2. Множество допустимых комбинаций векторов образует группу над полем Галуа  $GF(2)$ .

3. Размерность векторов имеет длину  $n$ .

Начальные условия:

$$\vec{X}_0(g), \vec{W}_0(g), P_0[\vec{X}(g)], P_0[\vec{W}(g)].$$

Априорные данные:

$$P[\vec{X}(g) \cdot \vec{W}(g)] = P[\vec{W}(g)] \cdot P[\vec{X}(g)].$$

$$\Pi_A, \Pi_B$$

Здесь и в дальнейшем ограничимся рассмотрением поля Галуа 2-го порядка  $GF(2)$ , следовательно, групповая операция  $\oplus$  есть поэлементное сложение по модулю 2.

Матрица переходных вероятностей  $A(k+1, k)$  определяется словарем используемого кода. Информационная последовательность вектора сообщения  $\vec{X}_k(g)$  формируется исходя из заданных

начальных условий и априорных данных  $(\vec{X}_0(g), \Pi_A)$ .

На каждом шаге  $k$  вид матриц  $A$  и  $B$  изменяется в соответствии с матрицами переходных вероятностей  $\Pi_A$  и  $\Pi_B$ . Таким образом, рассматриваемая модель позволяет в динамике описать систему, учитывая нестационарный характер канала связи.

Рассмотрим модели канала связи с неавтономным источником сообщений, описывающей управление цифровых информационных сотовых систем (ЦИСС) стандарта GSM. Цифровая сотовая система стандарта GSM характеризуется тем, что управляющее воздействие представлено цифровым кодом параметра, посредством которого производится управление.

Пусть вектор сообщения имеет длину  $n = m + r$  разрядов, где  $m$  – длина информационного блока;  $r$  – длина блока управляющего воздействия.

Следовательно, следует различать информационный вектор  $\vec{x}_k(g)$  и вектор сообщения  $\vec{X}_k(g)$ . Тогда информационный вектор, вектор управления и вектор сообщения имеют следующие форматы:

$$\vec{x} : xxx_m 00_r, \quad (3)$$

$$\vec{u} : 000_m uuu_r, \quad (4)$$

$$\vec{X} : xxx_m uuu_r, \quad (5)$$

где  $x \in \{0,1\}$ ;  $u \in \{0,1\}$ ;  $X \in \{0,1\}$ .

Уравнение сообщения (5) преобразуется к виду

$$\vec{X}_{k+1}(g) = A(k+1, k)\vec{x}_k(g) \oplus \Gamma(k+1, k)\vec{u}_k(g), \quad (6)$$

где  $\vec{u}_k(g)$  – вектор управления;  $\Gamma(k+1, k)$  – переходная матрица вектора управления.

С учетом этого на модель канала связи с управлением ЦИСС накладываются следующие дополнительные ограничения.

1. Распределение вероятности вектора управления  $\vec{u}_k(g)$  может быть определено в каждый момент времени  $k = 0, 1, \dots$

$$P_{k+1}[\vec{u}(g)] = \Pi_{\Gamma}^T P_k[\vec{u}(g)],$$

где  $\Pi_{\Gamma}$  – матрица переходных вероятностей вектора управления.

2. Размерность вектора управления  $\vec{u}_k(g)$  имеет длину  $n$ .

Начальные условия:

$$\vec{u}_0(g), P_0[\vec{u}(g)].$$

Вектор управления  $\vec{u}_{k+1}(g)$  и, следовательно, переходная матрица управления  $\Gamma(k+1, k)$  формируются в соответствии с разработанными алгоритмами управления. Управляющая последовательность может задаваться детерминировано или стохастически.

Структурная схема модели канала связи адаптивной ЦИСС с управлением представлена на рис. 1.

Однако сотовая система работает в дуплексном режиме и имеет два канала связи: прямой и обратный. По прямому каналу осуществляется передача сообщений от БС к АТ.

Здесь управляющим параметром, определяющим качество канала сотовой связи, является номер выбираемой зоны при установлении связи. По обратному каналу осуществляется передача сообщений от АТ к БС, где в качестве управляющего параметра, определяющего качество этого канала связи, выступает мощность сигнала на выходе передатчика АУ сотовой связи (рис. 2).

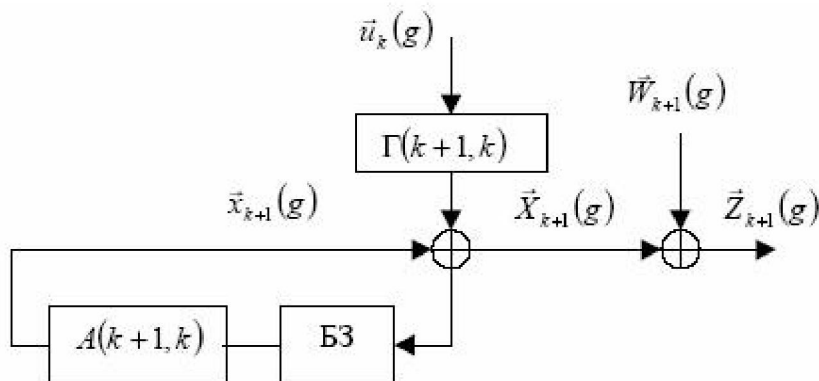


Рис. 1. Структурная схема модели канала связи с управлением: БЗ – блок задержки на 1 такт

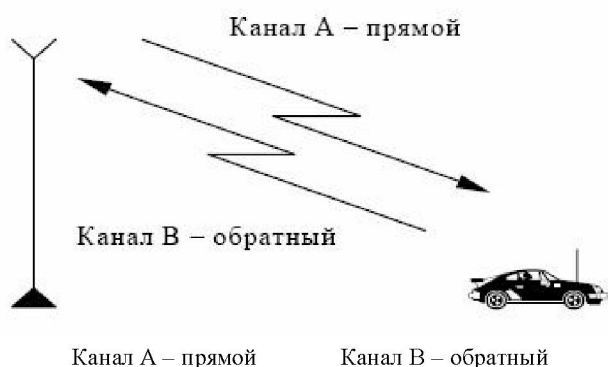


Рис. 2. Прямой и обратный каналы в ЦИСС стандарта GSM

Следует отметить, что по прямому каналу передается команда по управлению качеством обратного канала связи и наоборот.

С учетом этого, математическую модель адаптивной ЦИСС можно записать в виде системы уравнений для прямого и обратного каналов:

$$\hat{X}_{k+1}^a(g) = A^a(k+1, k)\hat{x}_k^a(g) \oplus \Gamma^b(k+1, k)\hat{u}_k^b(g), \quad (7)$$

$$\hat{Z}_{k+1}^a(g) = \hat{X}_{k+1}^a(g) \oplus B^a(k+1, k)\hat{w}_{k+1}^a(g), \quad (8)$$

$$\hat{X}_{k+1}^b(g) = A^b(k+1, k)\hat{x}_k^b(g) \oplus \Gamma^a(k+1, k)\hat{u}_k^a(g), \quad (9)$$

$$\hat{Z}_{k+1}^b(g) = \hat{X}_{k+1}^b(g) \oplus B^b(k+1, k)\hat{w}_{k+1}^b(g), \quad (10)$$

где  $\hat{X}(g)$  – вектор сообщения;  $\hat{Z}(g)$  – вектор наблюдения;  $\hat{W}(g)$  – вектор аддитивной ошибки;  $\hat{u}(g)$  – вектор управления;  $A(k+1, k)$  – переходная матрица информационного источника;  $B(k+1, k)$  – переходная матрица источника ошибок канала связи;  $\Gamma(k+1, k)$  – переходная матрица вектора управления;  $g$  – элемент группы;  $\oplus$  – групповая операция сложения по модулю 2;  $k = 0, 1, \dots$  – отсчеты времени;  $a$  и  $b$  – индексы прямого и обратного канала соответственно.

На модель накладываются следующие ограничения.

1. В каждый момент времени  $k = 0, 1, \dots$  для каждого из направлений связи заданы распределения вероятностей информационного вектора, вектора ошибки и вектора управления:

$$P_{k+1}[\hat{X}(g)] = \prod_A^T P_k[\hat{X}(g)], \quad (11)$$

$$P_{k+1}[\hat{W}(g)] = \prod_B^T P_k[\hat{W}(g)]. \quad (12)$$

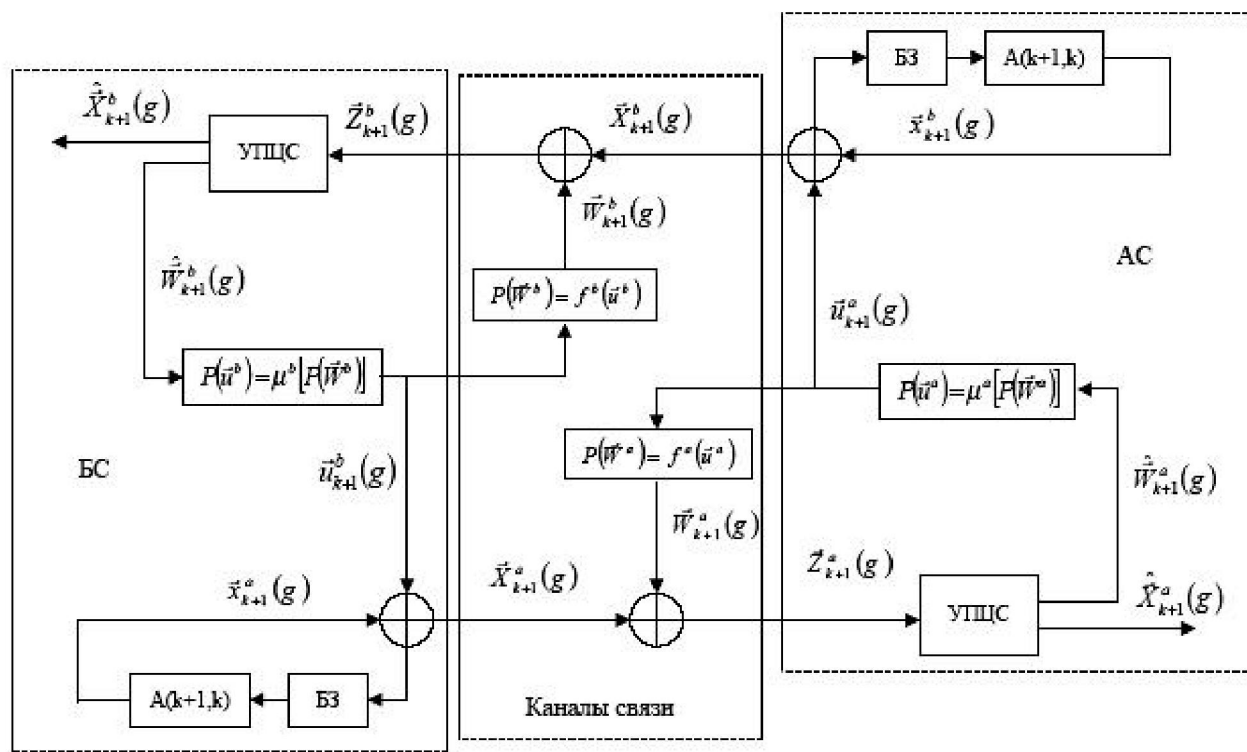


Рис. 3. Структурная схема модели адаптивной ЦИСС стандарта GSM

$$P_{k+1}[\vec{u}(g)] = \Pi_{\Gamma}^T P_k[\vec{u}(g)], \quad (13)$$

где  $\Pi_A, \Pi_B, \Pi_{\Gamma}$  – матрицы переходных вероятностей информационного вектора, вектора ошибок и вектора управления соответственно.

2. Множество допустимых комбинаций векторов образует группу над полем Галуа  $GF(2)$ .

3. Размерность векторов имеет длину  $n$ .

Начальные условия:

$$\vec{X}_0(g), \vec{W}_0(g), P_0[\vec{X}(g)], P_0[\vec{W}(g)], \vec{u}_0(g), P_0[\vec{u}(g)]. \quad (14)$$

Априорные данные:

$$P[\vec{X}(g)] \cdot \vec{W}(g) = P[\vec{X}(g)] \cdot \vec{W}(g). \quad (15)$$

Структурная схема предложенной модели адаптивной ЦИСС стандарта GSM представлена на рис. 3.

Оценку принимаемого сообщения и отклика на управляющее воздействие выполняет устройство приема цифровых сигналов (УПЦС). На

основе полученного отклика вырабатывается вектор управления в соответствии с законом, который представлен как функция  $\mu$ . Для описания отклика на управляющее воздействие используется функция  $f$ , представляющая собой зависимость распределения вероятностей вектора ошибок от вектора управления.

Необходимо отметить, что предложенная модель универсальна и может использоваться для управления различными параметрами цифровых систем. При этом модель может описывать как систему в целом, так и каждый канал в отдельности, учитывая его нестационарность и ошибки. Распределения вероятностей векторов системы меняются на каждом шаге в соответствии с матрицами переходных вероятностей  $\Pi_A, \Pi_B, \Pi_{\Gamma}$ .

УДК 621.396.946 (075)

Евразийский национальный университет им. Л. Гумилева,  
г. Астана

Поступила 10.09.07г.