УДК 621.391.28

ДИФФУЗИОННАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОСЕТЯХ

С. Е. Ададуров,
доктор техн. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения
Г. Н. Мальцев,
доктор техн. наук, профессор
Н. М. Моторин,
адъюнкт
Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского
А. С. Ададуров
научный сотрудник
2-й Научно-исследовательский центр 4-го Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны РФ

Рассмотрены общий подход и основные соотношения для диффузионной аппроксимации процессов информационного обмена в спутниковых радиосетях, построенных на основе низкоорбитальных многоспутниковых систем связи. Приводится обобщенная структурная схема алгоритмов управления информационными потоками, использующих метод диффузионной аппроксимации процессов информационного обмена в узлах спутниковой радиосети.

The paper describes a general approach to diffusion approximation of information exchanging processes in satellite radio networks built on low-orbit multisatellite communication systems. We give a general structural scheme of the information flow control algorithms based on the method of diffusion approximation of information exchanging processes in the nodes of the satellite radio network.

Низкоорбитальные спутниковые радиосети на основе многоспутниковых систем связи рассматриваются в настоящее время как важное дополнение к системам спутниковой связи на основе высокоорбитальных спутников-ретрансляторов (СР). Основной областью применения низкоорбитальных спутниковых радиосетей является предоставление абонентам услуг персональной спутниковой связи и передачи данных с последующей интеграцией с наземными сетями фиксированной и мобильной связи [1, 2].

Специфика функционирования низкоорбитальных многоспутниковых систем связи в качестве радиосетей предполагает реализацию в них распределенных динамических процедур маршрутизации, адаптирующихся к быстрым изменениям топологии и нагрузки сети, обусловленным орбитальным движением СР. Наиболее конструктивным подходом к построению адаптивных алгоритмов маршрутизации в этих условиях является выбор в качестве метрик путей (маршрутов) величин, отражающих не только их длину, но и степень их загруженности в текущий момент времени. Более нагруженной линии приписывается бóльшая метрика, менее нагруженной – меньшая метрика, и алгоритм поиска кратчайшего пути стремится найти в сетевой структуре СР-узлов радиосети путь с общей минимальной метрикой.

Для анализа сетевых систем связи на сетевом уровне информационного взаимодействия широкое распространение получают методы и модели теории систем массового обслуживания (СМО) [3, 4]. При этом в качестве критериев эффективности маршрутизации используются критерии, базирующиеся на представлении процессов функционирования узлов сети в пространстве состояний. Состояние узлов сети определяется количеством заявок на обслуживание, которые он выполняет и которые находятся в очереди на обслуживание в данном узле на анализируемый момент времени.

Однако при описании процессов информационного обмена в низкоорбитальных спутниковых радиосетях простейшими моделями СМО возникают значительные трудности. Действительно, традиционные подходы, развитые в рамках теории массового обслуживания, в случае анализа динамических сетевых систем оказываются несостоятельными, так как большое количество узлов сети и возможных их состояний ведет к серьезному увеличению размерности задач анализа и синтеза, а непрерывное изменение топологии сети приводит к непрерывному изменению связности и начальных условий, для которых необходимо определять состояние сети. При числе СР-узлов до нескольких десятков, количестве состояний сети в сотни и тысячи и динамическом изменении топологии сети при орбитальном движении СР-узлов проблема определения состояния низкоорбитальной спутниковой радиосети для произвольного момента времени существенно усложняется.

Для конструктивного описания процессов функционирования низкоорбитальных спутниковых радиосетей представляется необходимым существенно снизить размерность модели системы без потери степени ее адекватности. Анализ стохастических моделей информационных систем показывает, что для получения адекватных моделей низкоорбитальных спутниковых радиосетей приемлемой размерности могут быть использованы методы диффузионной аппроксимации дискретных процессов [5, 6]. Диффузионная аппроксимация позволяет понизить размерность задачи таким образом, что состояние каждого узла сети определяется в результате интегрирования одномерного уравнения состояния. Далее, имея диффузионную модель функционирования каждого узла, можно перейти к многомерному дифференциальному уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова, определяющему эволюцию состояния сети в целом. Состояние спутниковой радиосети в этом случае будет определяться совокупностью параметров диффузионной аппроксимации состояний всех СР-узлов – их коэффициентами сноса и диффузии.

Для решения задачи диффузионной аппроксимации процессов функционирования СР-узлов низкоорбитальной спутниковой радиосети рассмотрим дискретный процесс $Y(t, u)$, элементы которого зависят от параметра u – расстояния между возможными значениями координаты процесса Y, а параметр времени t непрерывен. Дискретный процесс $Y(t, u)$, описывающий поступление и выполнение в СР-узле заявок на обслуживание, задан на пространствах координаты и времени, обозначаемых соответственно Ω_u и Ω_t. Искомым предельным процессом является непрерывный диффузионный процесс $Y(t)$, определенный на пространствах Ω_u и Ω_t.

Непрерывный случайный процесс, имеющий плотность вероятности перехода $W(y, t|y_0, t_0)$, $t > t_0$, называется диффузионным, если моменты

$$M[(Y(t+\tau)-Y(t))^n|Y(t)=y] =$$

$$= \int (x-y)^n W(y, t+\tau|y_0, t_0)\mathrm{d}x,\ n = 1, 2...$$

условного приращения координаты y за время τ удовлетворяют следующим условиям:

$$M[(Y(t+\tau)-Y(t))|Y(t)=y] = \alpha(y, t)\tau + \mathrm{o}(t); \quad (1)$$

$$M[(Y(t+\tau)-Y(t))^2|Y(t)=y] = \beta(y, t)\tau + \mathrm{o}(t); \quad (2)$$

$$M[(Y(t+\tau)-Y(t))^n|Y(t)=y] = \mathrm{o}(t),\ n \geq 2. \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3) функции $\alpha(y, t)$ и $\beta(y, t)$ называются коэффициентами сноса и диффузии, а $\mathrm{o}(t)$ – некоторая функция, значения которой имеют более высокий порядок малости, чем остальные слагаемые. В дальнейшем коэффициенты сноса и диффузии $\alpha(y, t)$ и $\beta(y, t)$ будут определяться для заданного момента времени t и условий, при которых их значения могут полагаться на интервале анализа процессов информационного обмена в сети постоянными. Если при этом существуют непрерывные производные $\frac{\partial W}{\partial t}$, $\frac{\partial(\alpha W)}{\partial y}$ и $\frac{\partial^2(\beta W)}{\partial y^2}$, то плотность вероятности $W(y, t|y_0, t_0)$ как функция y и t удовлетворяет уравнению состояния

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial(\alpha W)}{\partial y} + \frac{\partial^2(\beta W)}{2\partial y^2}, \quad (4)$$

позволяющему описать состояние анализируемого процесса коэффициентами сноса и диффузии $\alpha = \alpha(y)$ и $\beta = \beta(y)$.

Известно, что диффузионные процессы обладают свойством фрактальности [7]. Под фрактальностью в данном случае подразумевается сохранение вероятностных свойств процесса при согласованном изменении масштабов значений процесса и временно́й шкалы, на которой процесс рассматривается. Это означает, что если сходимость по распределению выполняется для больших интервалов времени, то при уменьшении временны́х промежутков наблюдается сохранение свойств сходимости по распределению дискретного и диффузионного процессов.

Для решения практических задач необходимо иметь возможность получения характеристик аппроксимирующего процесса и на продолжительных, и на достаточно коротких интервалах времени. Свойство фрактальности позволяет использовать двухэтапную схему, обеспечивающую аппроксимацию на всей временно́й шкале. На первом этапе реализуется поиск диффузионного аналога СМО для больших временны́х промежутков $t = \tau T$, где величина T задает анализируемый масштаб времени. На втором этапе результаты аппроксимации экстраполируются на интервалы времени, соизмеримые по величине со средним временем между сменой состояния системы путем выбора величины шага u и изменения масштаба времени T. Такая схема может использоваться при диффузионной аппроксимации процессов информационного взаимодействия между СР-узлами низкоорбитальной спутниковой радиосети при их описании моделями СМО.

Основным условием корректности диффузионной аппроксимации является обеспечение невырожденности параметров диффузионного процесса. Условия, при которых аппроксимирующий диффузионный процесс не вырождается (т. е. параметры процесса не оказываются равными нулю или бесконечности), называются условиями согласованности [6, 8]. Анализ выполнения условий согласованности показывает, что корректная аппроксимация диффузионным процессом обеспечивается, если на рассматриваемом интервале времени анализируемый процесс претерпевает большое количество изменений состояния в положительном и отрицательном направлениях. Практически это соответствует работе СР-узлов спутниковой радиосети при большой нагрузке и наличии очередей заявок на обслуживание – как раз в тех условиях, когда диффузионная аппроксимация необходима для описания процессов функционирования СР-узлов и конструирования алгоритмов управления информационными потоками в радиосети.

Рассмотрим способ построения диффузионных моделей СР-узлов спутниковой радиосети как СМО. Пусть заданы две независимые между собой последовательности T_i^+ и T_j^-, $i, j = 1, 2, ...$, независимых и одинаково распределенных случайных интервалов времени между моментами поступления и выполнения СР-узлом заявок на обслуживание. Элементы последовательностей имеют функции распределения, зависящие от параметра u. Пусть процесс $Y(t, u)$ при $\Omega_u = \{y = 0, \pm u, \pm 2u, ...\}$ и $\Omega_t = \{t_0 \le t \le \infty\}$ управляется данными процессами восстановления в следующем смысле. В моменты восстановления $S_k^+ = T_1^+ + ... + T_k^+$ и $S_l^- = T_1^- + ... + T_l^-$ (k и l – действительные целые числа) координата Y возрастает (уменьшается) скачком на величину шага u.

Воспользуемся следующим способом аппроксимации исходного процесса диффузионным, при котором имеет место сходимость функции распределения приращений. Обозначим через $N^+(t, u)$ и $N^-(t, u)$ числа восстановлений за время t. Тогда имеем очевидное равенство

$$Y(t, u) = uN^+(t, u) - uN^-(t, u). \qquad (5)$$

Рассмотрим приращение координаты $Y(t, u)$ за время $\tau \in [t_0, t]$, значительно превышающее величины математических ожиданий τ^+ и τ^- интервалов T_k^+ и T_k^-, а затем определим, как должны изменяться параметры диффузионного процесса при $\tau \to 0$, чтобы выполнялись условия согласованности. Приращение координаты процесса $Y(t, u)$ за фиксированный интервал времени τ составляет

$$\Delta Y(\tau, u) = u[\Delta N^+(\tau) - \Delta N^-(\tau)], \qquad (6)$$

где $\Delta N^+(\tau)$ и $\Delta N^-(\tau)$ – приращения за время τ процессов $N^+(t, u)$ и $N^-(t, u)$ соответственно. Поскольку процессы $N^+(t, u)$ и $N^-(t, u)$ в общем случае не являются марковскими, распределения приращений $\Delta N^+(\tau)$ и $\Delta N^-(\tau)$ зависят от предыстории развития процессов. Длительность предыстории, которую необходимо учитывать при описании развития процессов восстановления после момента t_0, имеет порядок величины интервала между восстановлениями.

Пусть первые два момента распределения величин T_k^+ и T_k^- конечны, тогда математическое ожидание и дисперсия приращений $\Delta N^+(\tau)$ и $\Delta N^-(\tau)$ при $u \to 0$ определяются выражениями вида [5]

$$m_{\Delta N}(\tau) = \lambda\tau + \frac{c^2 - 1}{2} + o(\tau); \qquad (7)$$

$$\sigma_{\Delta N}(\tau) = c^2\lambda\tau + O(\tau), \qquad (8)$$

где $\Delta N = (\Delta N^+, \Delta N^-)$; $\lambda = (\lambda^+, \lambda^-)$; $c = (c^+, c^-)$; значения функции $o(\tau)$ имеют более высокий порядок малости, чем остальные слагаемые, а значения функции $O(\tau)$ имеют величину порядка других слагаемых. Величины λ^+ и λ^- представляют собой интенсивности переходов процессов восстановления – поступления и обслуживания заявок.

Известно [5, 6], что процесс является диффузионным лишь в том случае, если распределение условного приращения координаты (переходная плотность) является нормальным. Рассмотрим характеристическую функцию $\varphi_{\Delta Y}(u, h)$ приращения координаты $\Delta Y(\tau, u)$. В силу независимости процессов $\Delta N^+(\tau)$ и $\Delta N^-(\tau)$ она может быть представлена в виде произведения

$$\varphi_{\Delta Y}(u,h) = \varphi_{\Delta N}^+(u,h)\varphi_{\Delta N}^-(u,h), \qquad (9)$$

где $\varphi_{\Delta N}^+(u, h)$ и $\varphi_{\Delta N}^-(u, h)$ – характеристические функции приращений $\Delta N^+(\tau)$ и $\Delta N^-(\tau)$ соответственно.

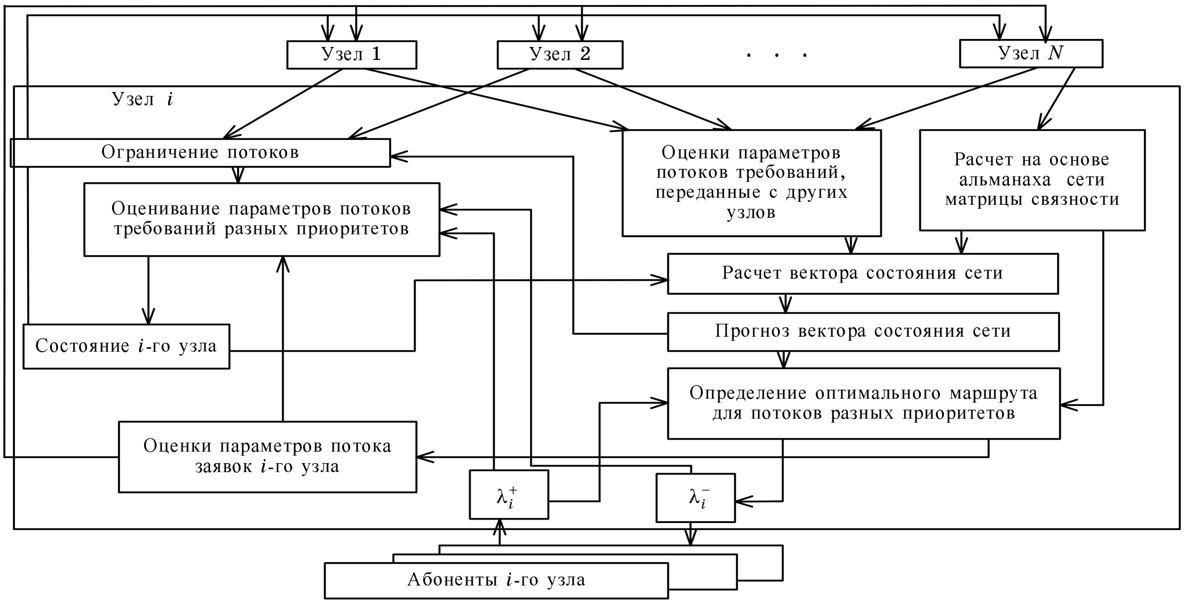
При нормировке (центрировании и делении на среднеквадратическое отклонение) приращений $\Delta N^+(\tau)$ и $\Delta N^-(\tau)$ в соответствии с выражением

$$\Delta\tilde{N}(\tau, u) = [\Delta N(\tau, u) - m_{\Delta N}(\tau)]/\sigma_{\Delta N}(\tau) \qquad (10)$$

характеристическая функция $\varphi_{\Delta Y}(u, h)$ вида (9) сводится к характеристической функции нормального закона распределения $\tilde{\varphi}_{\Delta N}(h) = \exp\left(-h^2/2\right)$. В выражении (8) $\Delta N = (\Delta N^+, \Delta N^-)$.

Свойства характеристической функции нормального закона распределения $\tilde{\varphi}_{\Delta N}(h)$ определяются первыми двумя моментами приращения величин $\Delta N^+(\tau)$ и $\Delta N^-(\tau)$. На основании этого и с учетом выражений (7) и (8) для первых двух моментов процесса $\Delta Y(t, u)$ могут быть записаны выражения

$$M[\Delta Y(\tau, u)] = u\left[(\lambda^+ - \lambda^-)\tau + \frac{(c^+)^2 - (c^-)^2}{2} + o(\tau)\right]; \qquad (11)$$



■ *Обобщенная структурная схема алгоритмов управления информационными потоками, использующих метод диффузионной аппроксимации*

$$M[\Delta Y(\tau,\ u)^2] = u^2\left\{[(c^+)^2\lambda^+ + (c^-)^2\lambda^-]\tau + \mathrm{O}(\tau)\right\}. \quad (12)$$

Переход к диффузионному описанию процесса $\Delta Y(t,u)$ возможен, если при $u \to 0$ выполняются условия $M[\Delta Y(\tau,u)] = \alpha\tau$, $M[\Delta Y(\tau,\ u)^2] = \beta\tau$, что предполагает

$$u(\lambda^+ - \lambda^-) = \alpha; \quad (13)$$

$$u^2[(c^+)^2\lambda^+ + (c^-)^2\lambda^-] = \beta. \quad (14)$$

Из соотношений (13) и (14) следует, что при $u \to 0$ и $\tau \to 0$ интенсивности переходов должны изменяться следующим образом:

$$\lambda^+(u) = \frac{\beta + \alpha u}{u^2[(c^+)^2 + (c^-)^2]}; \quad (15)$$

$$\lambda^-(u) = \frac{\beta - \alpha u}{u^2[(c^+)^2 + (c^-)^2]}. \quad (16)$$

Плотность вероятности перехода за время τ является нормальной плотностью вероятности с параметрами $\alpha\tau$ и $\sqrt{\beta\tau}$. При этом, как только временной интервал τ, на котором рассматривается поведение системы, становится сопоставимым с величинами $1/\lambda^+$ и $1/\lambda^-$, то для перехода от диффузионного процесса обратно к дискретному следует согласованно изменять параметры u, λ^+ и λ^-.

Аппроксимация состояния СР-узлов коэффициентами сноса и диффузии α и β позволяет описать состояние спутниковой радиосети, состоящей из N СР, N-мерным уравнением Фоккера–Планка–Колмогорова. На структурной схеме показаны операции, выполняемые на i-м СР-узле спутниковой радиосети при управлении проходящими через него информационными потоками.

Оценка состояния i-го СР-узла с использованием диффузионной модели осуществляется по результатам оценивания параметров потоков требований разных приоритетов, поступающих и обслуживаемых в данном узле, и с учетом возможного ограничения потоков через данный узел. Эти потоки требований характеризуются параметрами λ^+ и λ^-, контролируемыми по текущему взаимодействию СР-узла с абонентами – поступлению и выполнению заявок на обслуживание.

На каждом СР-узле поддерживается альманах системы, на основании которого рассчитывается (обновляется) матрица связности радиосети для данного узла. Совместно с оценками параметров потоков требований, передаваемыми с других СР-узлов в виде служебной информации, матрица связности используется для расчета и прогноза вектора состояния сети. Эта информация используется для определения оптимальных маршрутов для потоков разных приоритетов и при необходимости – для ограничения потоков через данный узел. В данном случае для ограничения потоков требований при неравномерной загрузке СР-узлов могут быть использованы традиционные оконные процедуры [9].

Рассмотренные метод диффузионной аппроксимации процессов информационного обмена в низкоорбитальных спутниковых радиосетях и обобщенная структурная схема алгоритмов управления информационными потоками предполагают возможность управления информационными потоками нескольких различных (высших и низших) приоритетов. В зависимости от приоритета сообщения могут изменяться метрика оценки состояния СР-узлов и критерий оптимальности (целевая функция) при выборе маршрута передачи, но сохраняется основное достоинство диффузионной аппроксимации – возможность адекватного описания состояния СР-узлов и спутниковой радиосети в целом со значительным снижением размерности модели по сравнению с традиционным описанием процессов информационного обмена в сети в пространстве состояний.

Литература

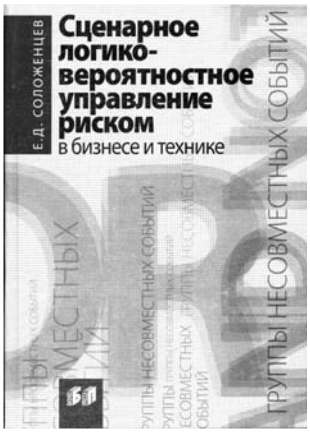
1. Спутниковая связь и вещание: Справочник / В. А. Бартенев, Г. В. Болотов, В. Л. Быков и др.; Под ред. Л. Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.
2. **Невдяев Л. М., Смирнов А. А.** Персональная спутниковая связь. М.: Эко-Трендз, 1998. 216 с.
3. **Казаков И. Е., Мальчиков С. В.** Анализ стохастических систем в пространстве состояний. М.: Наука, 1983. 420 с.
4. **Советов Б. Я., Яковлев С. А.** Построение сетей интегрального обслуживания. Л.: Машиностроение, 1990. 332 с.
5. **Крылов Н. В.** Управляемые процессы диффузионного типа. М.: Наука, 1977. 275 с.
6. **Боровков А. А.** Асимптотические методы в теории массового обслуживания. М.: Наука, 1980. 380 с.
7. **Бестугин А. Р., Богданова А. Ф., Стогов Г. В.** Контроль и диагностирование телекоммуникационных сетей. СПб.: Политехника, 2003. 174 с.
8. **Казаков И. Е.** Статистическая динамика систем с переменной структурой. М.: Наука, 1977. 420 с.
9. Управление информационными потоками в спутниковых радиосетях / Н. А. Важенин, Ю. М. Галантерник, В. М. Тамаркин, Д. В. Усков / МАИ. М., 1993. 48 с.

Е. Д. Соложенцев

СЦЕНАРНОЕ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ В БИЗНЕСЕ И ТЕХНИКЕ.

Издание второе, исправленное и дополненное.

СПб.: Бизнес-пресса, 2006. 560 с.



Рассмотрены методологические аспекты сценарного логико-вероятностного (ЛВ) управления риском неуспеха в бизнесе и технике на стадиях проектирования, испытаний и эксплуатации.

Изложены теоретические основы ЛВ-управления риском , включающие в себя ЛВ-исчисление, структурно-логическое моделирование и ЛВ-теорию риска неуспеха с группами несовместных событий (ГНС).

Изложены ЛВ-теория риска неуспеха с ГНС, методики идентификации модели риска по статистике и анализа риска по вкладам инициирующих событий и их градаций в риск итогового события, средний риск множества событий и в точность ЛВ-модели риска.

Приведены ЛВ-модели риска неуспеха и примеры исследований для кредитных рисков физических и юридических лиц, риска мошенничеств в бизнесе и взаимодействия компаний, риска портфеля ценных бумаг, риска потери качества и эффективности, риска неуспеха менеджмента компании.

Рассматриваются новые задачи оценки, анализа и управления риском. ЛВ-модели кредитного риска показали почти вдвое бóльшую точность, в семь раз бóльшую робастность и бóльшую прозрачность, чем западные методики.

Описаны программные средства для оценки, анализа и управления риском на основе ЛВ-теории риска с ГНС.

Книга имеет прикладную направленность и предназначена для специалистов в области управления риском в финансовых, банковских, организационных и технических системах, а также студентов, аспирантов и преподавателей соответствующих университетов и школ бизнеса.

Заказать книгу можно по E-mail: risk@sapr.ipme.ru и тел. (812) 321-47-66.

Подробнее – на сайте http://www.ipme.ru/ipme/labs/iisad/sapr1.htm