Модель и алгоритм функционирования системы повышения достоверности информации в сетях передачи данных с использованием контрольных пакетов

Model and operation algorithm of the augmented information reliability system for data transmission networks by means of watchdog packets

Саенко / Saenko I.
Игорь Борисович
(ibsaen@mail.ru)
доктор технических наук, профессор.
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи» (ЛО ЦНИИС),
советник директора.
г. Санкт-Петербург

Неижмак / Neizhmak A.
Алексей Владимирович
(a.v.neizhmak@mail.ru)
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ (ВАС им. С. М. Буденного),
адъюнкт.
г. Санкт-Петербург

Ясинский / Yasinsky S.
Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
ЛО ЦНИИС,
научный консультант.
г. Санкт-Петербург

Зюзин / Zyuzin A.
Александр Николаевич
(alexz01@bk.ru)
кандидат технических наук.
ВАС им. С. М. Буденного,
преподаватель.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: система повышения достоверности – augmented information reliability system; контрольный пакет – watchdog packet; граф переходных состояний – state-transition graph; случайный процесс – random process; вызывающий абонент – calling subscriber; отвечающий абонент – responding subscriber.

В статье описываются модель и алгоритм функционирования системы повышения достоверности с использованием контрольных пакетов. Сформулированы и описаны рабочие состояния вызывающего и отвечающего абонентов. Определен перечень потенциальных, разрешенных и редуцированных состояний. Модель рассмотрена для радиолинии, функционирующей без учета влияния системы радиоэлектронного подавления.

This article describes a model and an operation algorithm of the augmented information reliability system by means of watchdog packets. The article defines and describes operating statuses of the calling and replying subscribers along with a list of potential, authorized and reduced states. The model under discussion is applicable to a radio communication line that operates regardless of the impact of an electronic warfare system.

Введение

Системы повышения достоверности (СПД) информации – это комплекс мероприятий по обнаружению и исправлению ошибок, возникающих при передаче информации по каналам связи в сетях передачи данных. К системам такого рода в настоящее время предъявляются повышенные требования, которые обусловлены воздействием на СПД как преднамеренных, так и непреднамеренных помех. При передаче данных по каналам связи всегда возникают ошибки [1, 2].

Одним из перспективных подходов к повышению достоверности с минимальным влиянием на скорость передачи данных является разработка и реализация модели и двойного алгоритма функционирования СПД с использованием контрольных пакетов. Рассмотрение основных положений этого подхода является настоящей целью данной работы.

Алгоритм функционирования СПД с использованием контрольных пакетов

Рассмотрим алгоритм функционирования СПД с использованием контрольных пакетов для двух типов абонентов: вызывающего абонента (ВА) и отвечающего абонента (ОА).

Контроллер ВА может находиться в одном из шести возможных состояний. Первое состояние – «Ожидание».

3 2018.indd 21 26.09.2018 10:03:02

При включении контроллера он переходит в это состояние. С вероятностью $(1 - pm)$ контроллер в следующий момент времени остается в этом состоянии. С вероятностью pm он переходит в состояние 2. Состояние 2 – «Определение содержания кольцевого буфера». В нем контроллер формирует содержание канальных блоков (информационных или контрольных пакетов), записываемых в кольцевой буфер.

При этом выполняются следующие действия:

– пришедшее сообщение записывается в буферное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ);

– запись со стороны абонента в ОЗУ следующего сообщения блокируется;

– сообщение разбивается на информационные пакеты (блоки);

– вычисляются контрольные пакеты;

– вычисляются контрольные суммы для контрольных пакетов;

– реализуется битстаффинг;

– подставляются начальный и конечный флаги для цикловой синхронизации;

– формируется очередь канальных блоков на запись в кольцевой буфер.

Оптимизируемыми параметрами являются: длина канального блока; количество блоков в горизонтальном слое; количество блоков в вертикальном слое; дисциплина постановки в очередь к кольцевому буферу информационных и контрольных пакетов.

Далее контроллер изменяет содержимое кольцевого буфера. При этом выполняется:

– запись в буфер информационных пакетов при наличии в нем свободных ячеек;

– запись контрольных пакетов при наличии запроса от ОА и наличии свободных ячеек;

– стирание ячеек при наличии квитанции от приемника ВА.

При записи канальных блоков в кольцевой буфер им присваиваются циклические номера. Оптимизируемым параметром является размер кольцевого буфера.

При очистке всех ячеек кольцевого буфера система переходит в состояние 1. В противном случае система переходит в состояние 3 «Передача», которое означает последовательную передачу канальных блоков, находящихся в кольцевом буфере. Из этого состояния по окончании передачи канального блока система может перейти в состояние 2, 4 («Подтверждение передачи канального блока»), 5 («Прием запроса передачи контрольных пакетов») или 6 («Прием запроса повторной передачи информационных пакетов»). Состояние 4 – «Подтверждение передачи канального блока». Из него система переходит в состояние 2 для стирания канального блока из кольцевого буфера. Состояние 5 – «Прием запроса передачи контрольных пакетов». Из него осуществляется переход в состояние 2 для добавления контрольного пакета в очередь к кольцевому буферу. Состояние 6 – «Прием запроса повторной передачи информационных пакетов». Из него система переходит в состояние 2 для повторной отправки определенного, ранее записанного в кольцевой буфер имеющегося информационного пакета.

Контроллер ОА может находиться в одном из пяти состояний. Первое состояние – «Ожидание». Как и для ВА, при включении контроллера ОА он переходит в это состояние и с вероятностью $(1-pm)$ остается в этом состоянии, а с вероятностью pm – переходит в состояние 2. Состояние 2 – «Прием канальных блоков из канала связи». Из него происходит переход в состояние 3 «Подтверждение приема канальных блоков» для формирования квитанции об успешном приеме канальных блоков. Из состояния 3 осуществляется переход в состояния 1, 4 («Запрос отправки контрольных пакетов») или 5 («Запрос повторной отправки информационных пакетов»). Из состояния 4 «Запрос отправки контрольных пакетов» происходит переход в состояние 2 для приема сформированных контрольных пакетов первого и (или) второго типа от контроллера СПД ВА. Из состояния 5 «Запрос отправки информационных пакетов» система переходит в состояние 2 для приема конкретно запрошенного информационного пакета [4].

Модель функционирования СПД с использованием контрольных пакетов

Система повышения достоверности, функционирующая в соответствии рассмотренными выше алгоритмами, относится к классу стохастических [3]. Для оценки эффективности ее функционирования целесообразно использовать аппарат теории случайных процессов. Наиболее общее описание такого рода систем дает аппарат теории полумарковских процессов (ПМП). Он позволяет получить точные модели систем при использовании небольшого числа состояний, в то время как более развитый аппарат Марковских процессов (МП) для увеличения точности (обеспечения адекватности) представления требует увеличения числа состояний в экспоненциальной прогрессии. Поэтому для общего описания системы будем использовать аппарат ПМП в непрерывном времени. Для частных моделей может оказаться обоснованным и вполне корректным вырождение ПМП в МП. В этом случае функционирование системы будем рассматривать в дискретном времени. Для упрощения модели длительность одного состояния будем полагать равной времени, необходимому для успешной либо неуспешной передачи информационного пакета или квитанции между радиостанциями.

Для пояснения принципов построения модели рассмотрим радиолинию, функционирующую без учета влияния системы РЭП. В нее входят два объекта – ВА и ОА. Так как ВА имеет шесть потенциально возможных состояний, а ОА – пять, количество всех возможных состояний системы равно 6 x 5 = 30. Однако некоторые из этих состояний принципиально невозможны [4]. Перечень потенциальных и возможных состояний радиолинии приведен в табл. 1.

3 2018.indd 22 26.09.2018 10:03:02

Таблица 1

Перечень потенциальных, разрешенных и редуцированных состояний

№ потенциального состояния	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ВА	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6
ОА	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Признак разрешенного состояния	+	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+
№ разрешенного состояния	1					2		3	4	5		6		7	8			9						10						11
№ состояния после редукции	1					2		3	4	5		2		6	7			8						9						10

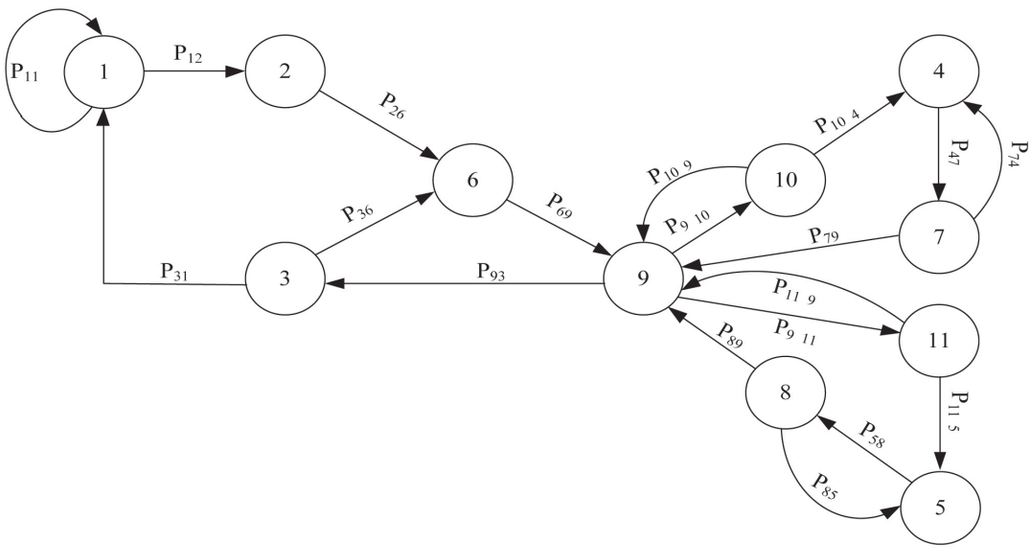

Рис. 1. Граф переходных состояний случайного процесса

Данные табл. 1 позволяют построить граф переходных состояний случайного процесса, приведенный на рис. 1.

Переходные вероятности имеют следующий физический смысл:

p_{12} – вероятность возникновения потребности в передаче пакета у ВА;

p_{11}– вероятность отсутствия потребности в передаче пакета у ВА ($p_{11} = 1 - p_{12}$);

p_{26} – вероятность передачи пакетов из кольцевого буфера;

p_{31} – вероятность завершения передачи после получения квитанции;

p_{36} – вероятность продолжения передачи после получения квитанции;

p_{93} – вероятность приема ВА квитанции от ОА;

p_{69} – вероятность приема ОА передаваемого пакета;

$p_{9\,10}$ – вероятность запроса ОА контрольного пакета от ВА;

$p_{10\,9}$ – вероятность неприема запроса ОА контрольного пакета от ВА;

$p_{9\,11}$ – вероятность запроса ОА информационного пакета от ВА;

$p_{11\,9}$ – вероятность неприема запроса ОА информационного пакета от ВА;

$p_{10\,4}$ – вероятность передачи ВА контрольного пакета ОА;

p_{47} – вероятность успешного приема ОА контрольного пакета от ВА;

p_{74} – вероятность неприема ОА контрольного пакета от ВА;

p_{79} – вероятность устранения ошибок приема кодограммы у ОА с помощью полученного контрольного пакета;

3 2018.indd 23 26.09.2018 10:03:04

$p_{11\,5}$ – вероятность передачи ВА информационного пакета ОА;

p_{58} – вероятность успешного приема ОА информационного пакета от ВА;

p_{85} – вероятность неприема ОА информационного пакета от ВА;

p_{89} – вероятность устранения ошибок приема кодограммы у ОА с помощью полученного информационного пакета [1].

Граф, представленный на рис. 1, можно упростить. Отметим, что одно из состояний, а именно состояние 9 (см. табл. 1), является транзитным. Приход в него означает детерминированный переход в следующие состояния. Следовательно, из графа, представленного на рис. 1, можно исключить это транзитное состояние. Редуцированный граф переходных состояний случайного процесса представлен на рис. 2.

Обозначим множество переходных вероятностей в редуцированном графе через $\{Pr_{ij}\}$, $i,j = 1,...,10$. Из переходных вероятностей исходного графа они определяются следующим образом: $Pr_{11} = p_{11}$; $Pr_{12} = p_{12} + p_{26}$; $Pr_{28} = p_{69}$; $Pr_{83} = p_{93}$; $Pr_{32} = p_{36}$; $Pr_{31} = p_{31}$; $Pr_{89} = p_{9\,10}$; $Pr_{98} = p_{10\,9}$; $Pr_{94} = p_{10\,4}$; $Pr_{46} = p_{47}$; $Pr_{64} = p_{74}$; $Pr_{68} = p_{79}$; $Pr_{8\,10} = p_{9\,11}$; $Pr_{10\,8} = p_{11\,9}$; $Pr_{10\,5} = p_{11\,5}$; $Pr_{57} = p_{58}$; $Pr_{75} = p_{85}$; $Pr_{78} = p_{89}$.

Вероятностно-временные характеристики (ВВХ) доставки пакетов определят вероятность перехода случайного процесса из состояния 1 в состояние 8 за требуемое время. Аналогично, ВВХ доставки квитанций определят вероятность перехода случайного процесса из состояния 8 в состояние 1, а ВВХ доставки пакетов с подтверждением определят вероятность возврата случайного процесса из состояния 1 в него же. Данные вероятности определяются известными соотношениями уравнения Колмогорова-Чепмена для МП и аналогичными уравнениями для ПМП [5].

Представленный редуцированный граф является основой для строгого формального описания модели функционирования СПД как ПМП. Отметим основные компоненты этой модели.

1. Вектор начальных вероятностей имеет следующий вид: $\vec{P}_i = (1,0,0,0,0,0,0,0,0,0)$. Иными словами, функционирование процесса всегда начинается с первого состояния.

2. Матрица переходных вероятностей имеет следующий вид:

$$P = \begin{vmatrix} Pr_{11} & Pr_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{28} & 0 & 0 \\ Pr_{31} & Pr_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{57} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Pr_{64} & 0 & 0 & 0 & Pr_{68} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{75} & 0 & 0 & Pr_{78} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Pr_{83} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{89} & Pr_{810} \\ 0 & 0 & 0 & Pr_{94} & 0 & 0 & 0 & Pr_{98} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{105} & 0 & 0 & Pr_{108} & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

3. Плотности распределения времен пребывания процесса в его состояниях в зависимости от преды-

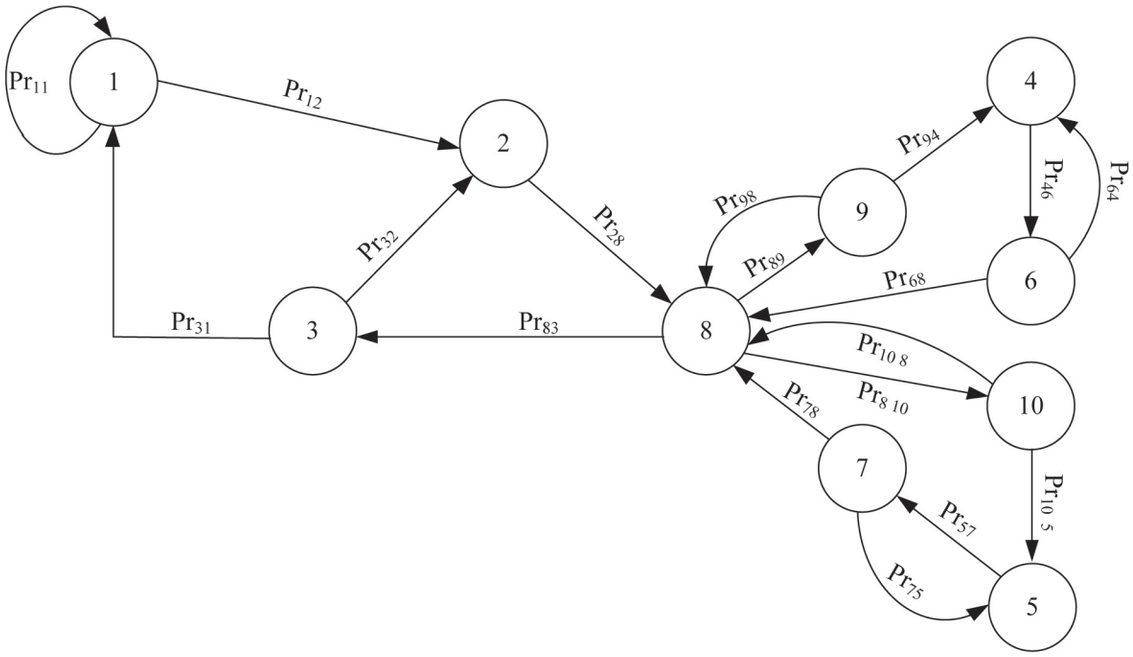

Рис. 2. Редуцированный граф переходных состояний случайного процесса

3 2018.indd 24 26.09.2018 10:03:05

дущего состояния являются элементами следующей матрицы:

$$\rho = \begin{vmatrix} p_{11}(t) & p_{12}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{28}(t) & 0 & 0 \\ p_{31}(t) & p_{32}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{46}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{57}(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{64}(t) & 0 & 0 & 0 & p_{68}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{75}(t) & 0 & 0 & p_{78}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{83}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{89}(t) & p_{810}(t) \\ 0 & 0 & 0 & p_{94}(t) & 0 & 0 & 0 & p_{98}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{105}(t) & 0 & 0 & p_{108}(t) & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Заключение

Полученные выше вероятности определяются из соотношений переходных вероятностей в редуцированном графе *Pr*, представленных выше. Плотности распределения матрицы ρ определяются из частных алгоритмов взаимодействия радиостанций и радиоэлектронного подавления (РЭП). Аналогичным способом происходит рассмотрение и формализованное описание СПД с использованием контрольных пакетов в терминах теории стохастического управления с учетом воздействия РЭП.

Таким образом, в статье предлагается один из вариантов реализации идеи построения СПД с исправлением стираний в принятых информационных пакетах, которая основана на использовании контрольных пакетов. Реализация описанных модели и алгоритмов позволит существенно уменьшить время передачи сообщения с требуемой достоверностью по каналам низкого качества, функционирующих в условиях весьма значительных помех, в том числе и преднамеренных.

Литература

1. Чуднов, А. М. Оптимизация порога стирания при приеме псевдослучайных сигналов / А.М. Чуднов, А.В. Овчинников // Информационные технологии. – 2013. – № 9. – С. 42–44.

2. Реализация критериев безопасности при построении единой системы разграничения доступа к информационным ресурсам в облачных инфраструктурах / И.Б. Саенко [и др.] // Информация и Космос. – 2018. – № 1. – С. 81–85.

3. Гук, И. И. Комплекс технических средств (КТС) адаптивной КВ-радиосвязи с использованием псевдослучайной перестройки рабочей частоты / И.И. Гук, А.Н. Путилин, Т.С. Филиппова // Радиолокация, навигация и связь : матер. XX Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж : НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2014. – С. 948–958.

4. Чуднов, А. М. Алгоритмы классификации и идентификации ситуаций на основе взвешивания / А.М. Чуднов // Дискретная математика. – М.: Математический институт им. В. А. Стеклова РАН, 2014. – С. 119–134.

5. Урясьев, С. П. Адаптивные алгоритмы стохастической оптимизации и теории игр / С.П. Урясьев ; под ред. Ю.М. Ермольева. – М. : Наука, 1990. – 182 с.

3 2018.indd 25 26.09.2018 10:03:06