

УДК 621.39

*И.З. Климов, О.В. Меркушев***ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ИНТЕРФЕЙСА СЕТЕВОГО УЗЛА РАДИОСЕТИ С НЕСТАЦИОНАРНЫМИ КАНАЛАМИ СВЯЗИ**

Приведены методы оценки надежности нестационарных каналов связи, предложен метод повышения надежности передачи данных за счет организации интерфейсов сетевых узлов. Оценка надежности приема в канале выполнена по значению допустимой вероятности ошибки. Интерфейс узла представлен входящими каналами. Текущий канал переходит в состояние восстановления после отказа. Поведение полученной интерфейсом системы соответствует процессам «гибели» и «размножения». Отказ интерфейса в целом наступает в случае отказа всех используемых узлом интерфейсных каналов. Статья содержит описание метода оценки надежности интерфейса, используемой при формировании весовой оценки линии связи в составе пути передачи данных. Имитационное моделирование проектируемой радиосети передачи данных проводилось в системе дискретного моделирования событий. В статье приведены результаты имитационного моделирования радиосети с нестационарными каналами связи.

Ключевые слова: радиосеть, помехи, канал, вероятность, надежность, интерфейс, линия связи, сетевой узел, моделирование.

Для непосредственной передачи данных между узлами проектируемой радиосети организуются интерфейсы. Интерфейс создается на базе каналов группы передачи данных. В ходе обмена управляющими кадрами и прослушивания каналов установления соединения каждый сетевой узел определяет качество сигналов, принимаемых от соседних узлов. Оценка качества сигналов, принимаемых на каналах установления соединения, соотносится с предполагаемым качеством сигналов, принимаемых на каналах передачи данных. На основе полученной статистики определяются стационарные характеристики качества принимаемых сигналов. Полученные качественные оценки принимаемых сигналов позволяют определить весовые коэффициенты линий связи соседних узлов.

Для оценки качества принимаемого сигнала используем величину средней вероятности ошибки элемента сигнала $\overline{p_{ош}}$, характеризующей отношение уровня сигнала к уровню помехи на входе принимающего устройства. Примем в качестве исходного, что условия распространения сигнала и действие аддитивных помех, приводящие к появлению ошибок элемента сигнала, согласуются с законом распределения вероятностей Рэлея. Для рэлеевских замираний величина вероятности ошибки элемента сигнала определяется выражением [1]:

$$p_{ош} = \frac{1}{h_0^2 + 2}, \quad (1)$$

где h_0^2 – отношение средней энергии сигнала к спектральной плотности помехи на входе приемного устройства. Для интегрального представления отношения сигнал — помеха в канале при действии рэлеевских замираний было использовано выражение, полученное в [1]:

$$z = 10Lg \left(\frac{1 - 2 * p_{ош}}{p_{ош}} \right). \quad (2)$$

Оценки надежности приема в заданном канале выполнялась по величине допустимой вероятности ошибки, превышение которой на заданном интервале измерения квалифицируется как отказ канала. Следовательно, исправное состояние канала характеризуется выполнением условия:

$$\overline{p_{ош}} < p_{ош.дон}. \quad (3)$$

Выполнение данного условия прогнозирует возможность успешного приема передаваемых блоков данных с вероятностью $P_{пр.к}$. Для вычисления $P_{пр.к}$ было использовано выражение, полученное в [1]:

$$P_{пр.к}(\overline{p_{ош}} \leq p_{ош.дон}) = \int_0^{p_{ош.дон}} w(p_{ош}) dp_{ош} = P_{пр.к}(\bar{z} > z_{дон}) = \int_{z_{дон}}^{\infty} w(z) dz = F\left(\frac{\bar{z} - z_{дон}}{\sigma_z}\right), \quad (4)$$

где w – плотность распределения вероятностей случайных величин $p_{ош}$, z ; $F(x)$ – функция Лапласа.

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dx. \quad (5)$$

Соответственно, вероятность неудачного приема блока данных, что является отказом канала, определяется выражением:

$$P_{ош.к} = 1 - P_{пр.к}. \quad (6)$$

Для увеличения надежности передачи данных между соседними узлами частотные каналы были организованы в логическую структуру – интерфейс. Интерфейс состоит из группы частотных каналов, для которых выполняется условие качества принимаемого сигнала (3). Каналы интерфейса сортируются в порядке убывания $P_{пр.к.}$.

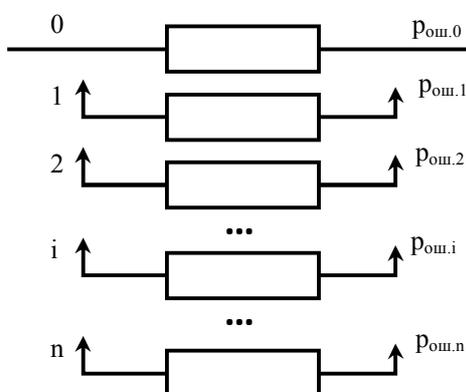


Рис. 1. Структурная схема интерфейса сетевого узла с параллельным резервированием методом замещения из n элементов

На рис. 1 представлена структурная схема организации интерфейса в виде системы, состоящей из n элементов, с параллельным резервированием методом замещения [2]. Интерфейс узла представлен входящими интерфейсными каналами, один из которых выбран принимающим узлом из списка вероятных интерфейсов для приема данных от соседнего узла. Так как все узлы сети имеют различные условия распространения и приема сигналов, каждый узел формирует свои группы интерфейсных каналов для каждого соседнего узла. Количество каналов в группах различается. В ходе передачи данных принимающим узлом ведется мониторинг качества принимаемого сигнала. При изменении качества принимаемого сигнала так, что $\overline{p_{ош.}} > p_{ош.дон}$, принимающий узел ответит передающему узлу кадром, содержащим команду замены канала. Текущий канал переходит в состояние восстановления после отказа. При этом интерфейс узла остается в работоспособном состоянии. Отказ интерфейса в целом наступает в случае отказа всех используемых узлом интерфейсных каналов. На рис. 2 отказ i-го канала обозначен переходом из состояния i в состояние i+1 с вероятностью $P_{ош.к}^{i,i+1}$, которая определяется выражением (6). В случае отказа канала, выбранного для организации интерфейса, система заменяет его резервным. Далее модуль управления сетевого узла выполняет поиск частотного канала, удовлетворяющего условию (3). Поиск канала на множестве каналов, не вошедших в список интерфейсных. Тогда вероятность обнаружения канала, удовлетворяющего требованию (3), определяется по формуле полной вероятности:

$$P_{о.к.} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \frac{i}{l}, \tag{7}$$

где l – количество каналов, из которых выполняется выбор. Вероятность восстановления заданного канала будет определяться выражением:

$$P_{в.к.} = 1 - (1 - P_{о.к.}) = 1 - \prod_{i=L}^1 [1 - (1 - P_{о.к.i})]. \tag{8}$$

На рис. 2 восстановление интерфейсного канала показано переходом из состояния i в состояние i-1 с вероятностью $P_{в.к}^{i,i-1}$.

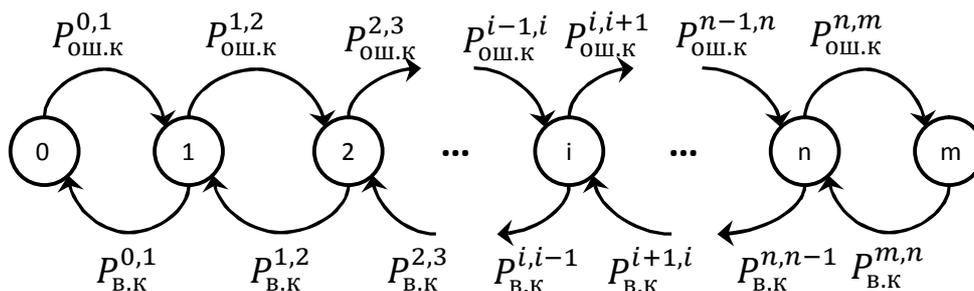


Рис. 2. Граф изменения состояний интерфейса сетевого узла при отказе и восстановлении интерфейсных каналов

Поведение полученной системы интерфейса соответствует процессам «гибели и размножения». Для расчета вероятности исправной работы интерфейса следует определить предельную вероятность нахождения системы в состоянии отказа. Нахождение системы-интерфейс в одном из m состояний описывается системой уравнений (10):

$$\begin{cases} -P_{ош.к}^{0,1} * S_0 + P_{в.к}^{1,0} * S_1 = 0 \\ P_{ош.к}^{0,1} * S_0 - (P_{в.к}^{1,0} + P_{ош.к}^{1,2}) * S_1 + P_{в.к}^{2,1} * S_2 = 0 \\ \dots \\ P_{ош.к}^{i-1,i} * S_{i-1} - (P_{в.к}^{i,i-1} + P_{ош.к}^{i,i+1}) * S_i + P_{в.к}^{i+1,i} * S_{i+1} = 0 \\ \dots \\ P_{ош.к}^{n,m} * S_n - P_{в.к}^{m,n} * S_m = 0 \end{cases} \quad (10)$$

где S_i – стационарная вероятность нахождения системы в состоянии i . При этом

$$S_0 + S_1 + \dots + S_m = 1. \quad (11)$$

Тогда, вероятность нахождения системы в исправном состоянии равна:

$$P_{и.с.} = 1 - S_m. \quad (12)$$

Для определения стационарной вероятности нахождения системы в состоянии m используем выражения (10), (11) и условие, что изначально система исправна и находится в состоянии S_0 . Для нахождения S_0 и S_m используем выражения, приведенные в [3]:

$$S_0 = \left[1 + \frac{P_{ош.к}^{0,1}}{P_{в.к}^{1,0}} + \frac{P_{ош.к}^{1,2} * P_{ош.к}^{0,1}}{P_{в.к}^{2,1} * P_{в.к}^{1,0}} + \dots + \frac{P_{ош.к}^{n,m} * \dots * P_{ош.к}^{1,2} * P_{ош.к}^{0,1}}{P_{в.к}^{m,n} * \dots * P_{в.к}^{2,1} * P_{в.к}^{1,0}} \right]^{-1}, \quad (13)$$

$$S_m = S_0 * \frac{P_{ош.к}^{n,m} * \dots * P_{ош.к}^{1,2} * P_{ош.к}^{0,1}}{P_{в.к}^{m,n} * \dots * P_{в.к}^{2,1} * P_{в.к}^{1,0}}. \quad (14)$$

Имитационное моделирование проектируемой радиосети передачи данных выполнялось в системе дискретного моделирования событий OMNeT++. В системе OMNeT++ была создана модель радиосети передачи данных. В состав сети входили модели сетевых узлов. Физическому уровню сетевых узлов были заданы следующие параметры:

- несущая частота = 3.0015 МГц;
- битовая скорость передачи = 2400б/с;
- мощность передатчика = 2000мВт;
- базовый уровень шума = -70дБ;
- порог чувствительности приемника (сигналы с мощностью, ниже пороговой, игнорируются приёмником) = -60дБ;
- максимальная дистанция распространения сигнала = 500000м;
- пороговое значение принимаемого сигнала = 40дБ.

В ходе моделирования каждым узлом сети выполнялись измерения качества принимаемых сигналов, передаваемых соседними узлами. Полученные статистические данные использовались для вычисления вероятностей исправной работы сетевых интерфейсов. Далее указаны исходные условия запуска модели в ходе выполнения одного из экспериментов:

- количество соседних узлов = 4;
- расстояние между соседними узлами = 150км (212км);
- время работы модели = 10000с;
- узлы используют конкурентный доступ к среде установления соединения на основе Slotted Aloha;
- количество используемых каналов установления соединения = 8;
- количество используемых каналов передачи данных = 8;
- максимальное количество каналов передачи данных, составляющих интерфейс узла = 4;
- мощность передатчика = 2000мВт;
- пороговое значение допустимой ошибки элемента сигнала = 1e-03.

Далее в табл. 1-4 приведены значения $\overline{p_{ош.к}}$, полученные в результате измерения качества принимаемых сигналов в каждом канале связи каждым узлом сети от соседних с ним узлов в ходе выполнения имитационного моделирования.

Табл. 5-8 содержат сортированные в порядке убывания вероятности исправной работы выбранных интерфейсных каналов, количество отобранных интерфейсных каналов и вероятность исправной работы интерфейса, созданного каждым узлом в отношении каждого соседнего с ним узла.

Таблица 1

**Значения средней вероятности ошибки элемента сигнала, определенной узлом N0
от соседних узлов N1, N2, N3**

Узел N0	Средняя вероятность ошибки при приеме сигнала от соседнего узла		
Номер канала	N1	N2	N3
1	3.437406e-03	2.811491e-04	2.827597e-04
2	1.046520e-02	1.072521e-02	3.020655e-04
3	5.480249e-04	2.165404e-03	2.847898e-04
4	1.093896e-02	2.756049e-04	9.652037e-04
5	2.241381e-03	6.095683e-03	3.266751e-04
6	3.885630e-04	2.738298e-03	3.216605e-04
7	3.804113e-04	8.820120e-03	3.194916e-04
8	6.835774e-03	6.326892e-03	2.985699e-04

Таблица 2

**Значения средней вероятности ошибки элемента сигнала, определенной узлом N1
от соседних узлов N0, N2, N3**

Узел N1	Средняя вероятность ошибки при приеме сигнала от соседнего узла		
Номер канала	N0	N2	N3
1	5.828643e-03	2.929342e-04	7.866997e-04
2	6.887375e-03	2.984952e-04	7.887490e-03
3	6.792555e-03	3.076909e-04	9.167709e-03
4	6.550447e-03	3.256290e-04	2.994666e-04
5	7.212087e-03	3.083575e-04	1.357985e-03
6	2.991196e-04	2.964206e-04	1.338018e-02
7	4.716949e-04	3.058224e-04	1.173584e-02
8	6.833412e-04	3.142091e-04	5.090636e-03

Таблица 3

**Значения средней вероятности ошибки элемента сигнала, определенной узлом N2
от соседних узлов N0, N1, N3**

Узел N2	Средняя вероятность ошибки при приеме сигнала от соседнего узла		
Номер канала	N0	N1	N3
1	9.693289e-04	3.132142e-04	5.066188e-04
2	6.818120e-04	3.067062e-04	8.636675e-03
3	1.059616e-03	6.097523e-04	5.282595e-04
4	6.930832e-04	3.052571e-04	1.863070e-03
5	2.878773e-04	3.173923e-04	2.832342e-04
6	7.992984e-04	3.321040e-04	2.657194e-04
7	9.935282e-04	3.236752e-04	5.994104e-03
8	2.832038e-04	2.954154e-04	2.918243e-04

Таблица 4

Значения средней вероятности ошибки элемента сигнала, определенной узлом N3 от соседних узлов N0, N1, N2

Узел N3	Средняя вероятность ошибки при приеме сигнала от соседнего узла		
Номер канала	N0	N1	N2
1	3.312109e-04	1.553679e-03	6.472865e-03
2	3.213929e-04	2.803389e-04	2.797596e-04
3	3.057321e-04	3.987290e-04	2.848989e-04
4	3.156059e-04	3.050166e-04	4.463841e-04
5	2.772410e-04	3.430478e-03	2.779618e-04
6	3.108542e-04	5.229434e-04	2.804053e-04
7	3.464782e-04	3.569275e-04	7.785319e-03
8	3.087028e-04	9.801508e-03	2.938562e-04

Таблица 5

Значения вероятностей исправной работы интерфейсов узла N0 при приеме данных от соседних узлов N1, N2, N3. Количества интерфейсных каналов для связи узла N0 с соседними узлами N1, N2, N3. Вероятности исправной работы интерфейсных каналов приема данных узла N0 от соседних узлов N1, N2, N3

Узел N0	Вероятность исправной работы интерфейса при приеме данных от соседнего узла				
	N1		N2		N3
	5.740308e-01		6.572813e-01		6.403024e-01
	Количество каналов составляющих интерфейс соседнего узла				
	N1		N2		N3
	3		2		4
	Вероятности исправной работы интерфейсных каналов приема данных от соседнего узла				
Номер канала	N1	Номер канала	N2	Номер канала	N3
7	6.628616e-01	4	7.123773e-01	1	7.085681e-01
6	6.594895e-01	1	7.094191e-01	3	7.075006e-01
3	6.031823e-01	-	-	8	7.004044e-01
-	-	-	-	2	6.986445e-01

Таблица 6

Значения вероятностей исправной работы интерфейсов узла N1 при приеме данных от соседних узлов N0, N2, N3. Количества интерфейсных каналов для связи узла N1 с соседними узлами N0, N2, N3. Вероятности исправной работы интерфейсных каналов приема данных узла N1 от соседних узлов N0, N2, N3

Узел N1	Вероятность исправной работы интерфейса при приеме данных от соседнего узла				
	N0		N2		N3
	4.419637e-01		6.280325e-01		5.011555e-01
	Количество каналов составляющих интерфейс соседнего узла:				
	N0		N2		N3
	3		4		2
	Вероятности исправной работы интерфейсных каналов приема данных от соседнего узла				
Номер канала	N0	Номер канала	N2	Номер канала	N3
6	7.001266e-01	1	7.032756e-01	4	6.999514e-01
7	6.280898e-01	6	7.014944e-01	1	5.415648e-01
8	5.657790e-01	2	7.004422e-01	-	-
-	-	7	6.967705e-01	-	-

Таблица 7

Значения вероятностей исправной работы интерфейсов узла N2 при приеме данных от соседних узлов N0, N1, N3. Количества интерфейсных каналов для связи узла N2 с соседними узлами N0, N1, N3. Вероятности исправной работы интерфейсных каналов приема данных узла N2 от соседних узлов N0, N1, N3

Узел N2					
Вероятность исправной работы интерфейса при приеме данных от соседнего узла					
N0		N1		N3	
3.096264e-01		6.136757e-01		5.597495e-01	
Количество каналов составляющих интерфейс соседнего узла:					
N0		N1		N3	
4		4		4	
Вероятности исправной работы интерфейсных каналов приема данных от соседнего узла					
Номер канала	N0	Номер канала	N1	Номер канала	N3
8	7.083340e-01	8	7.020063e-01	6	7.177652e-01
5	7.058882e-01	4	6.970513e-01	5	7.083180e-01
2	5.661624e-01	2	6.963322e-01	8	7.038460e-01
4	5.633553e-01	1	6.931348e-01	1	6.162887e-01

Таблица 8

Значения вероятностей исправной работы интерфейсов узла N3 при приеме данных от соседних узлов N0, N1, N2. Количества интерфейсных каналов для связи узла N3 с соседними узлами N0, N1, N2. Вероятности исправной работы интерфейсных каналов приема данных узла N3 от соседних узлов N0, N1, N2

Узел N3					
Вероятность исправной работы интерфейса при приеме данных от соседнего узла					
N0		N1		N2	
6.221420e-01		5.468166e-01		6.651277e-01	
Количество каналов составляющих интерфейс соседнего узла					
N0		N1		N2	
4		4		4	
Вероятности исправной работы интерфейсных каналов приема данных от соседнего узла					
Номер канала	N0	Номер канала	N1	Номер канала	N2
5	7.114997e-01	2	7.098486e-01	5	7.111143e-01
3	6.968153e-01	4	6.971709e-01	2	7.101563e-01
8	6.953457e-01	7	6.729159e-01	6	7.098134e-01
6	6.942883e-01	3	6.553647e-01	3	7.074434e-01
4	5.633553e-01	1	6.931348e-01	1	6.162887e-01

Использование интерфейсов по сравнению с использованием отдельных каналов позволяет повысить надежность передачи данных. Полученные в результате моделирования оценки вероятностей исправной работы интерфейсов позволяют получить коэффициенты надежности интерфейсов передачи данных, которые в дальнейшем будут использованы в качестве составляющих весовой оценки линий связи сетевых узлов. Полученные вероятности исправной работы интерфейсов характеризуют прогнозируемое (ожидаемое) поведение интерфейсов до их реального использования. Оценка прогноза строится на обработке ранее собранных статистических данных. Ожидаемая величина вероятности исправной работы интерфейса имеет меньшее значение по сравнению с вероятностями исправной работы отдельных каналов, что объясняется низкими расчетными (ожидаемыми) значениями вероятностей исправной работы каналов, не вошедших в состав интерфейсных каналов, но использующихся для расчета вероятности восстановления отказавших каналов интерфейса.

* * *

1. Комарович В.Ф., Сосунов В.Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ радиосвязи. М.: Связь, 1977.
2. Половков А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ, 2006.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 1999.

Поступила в редакцию 21.08.16

*I.Z. Klimov, O.V. Merkushev***EVALUATION OF THE RELIABILITY OF THE INTERFACE OF THE NETWORK NODE WITH UNSTEADY RADIO COMMUNICATION CHANNELS**

Methods of evaluating the reliability of nonstationary communication channels are presented. A method for improving data transmission reliability due to the organization of network nodes interface is proposed.

The reliability of channel reception is estimated from the value of permissible error probability. The interface of the node is represented by inbound channels. The current channel goes into failover. The behavior of the resulting system interface corresponds to the process of "death" and "reproduction". Failure of the interface as a whole occurs in the case of failure of all the channels used by the interface node. The article describes the method for estimating the reliability of the interface used in the formation of a weighted estimate link as part of the data path. The simulation of the projected data radio system was carried out in a discrete event simulation.

The results of the simulation with nonstationary radio communication channels are presented.

Keywords: radio network, interference, channel, probability, reliability, interface, communication line, network node, simulation.

Климов Игорь Зенонович,
доктор технических наук, профессор

Меркушев Олег Владимирович,
заведующий лабораторией правовой информатики

ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1 (корп. 4)

Klimov I.Z.,
Doctor of Technical Sciences, Professor

Merkushev O.V.,
Head of the Laboratory of Legal Informatics

Udmurt State University
Universitetskaya st., 1/4, Izhevsk, Russia, 462034