

УДК 623.624.2

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ СЕТИ СВЯЗИ И  
ЭФФЕКТОВ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ  
В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ СИГНАЛЬНО-  
ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ**

**С. И. Макаренко,<sup>1</sup> О. В. Афанасьев,<sup>2</sup> И. А. Баранов,<sup>2</sup> Д. В. Самофалов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

<sup>2</sup>АО «Концерн «Созвездие»

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2016 г.

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния периодического изменения сигнально-помеховой обстановки на эффективность функционирования протоколов канального и сетевого уровней в системе связи. В качестве протокола сетевого уровня рассматривается протокол маршрутизации, а в качестве протокола канального уровня – протокол контроля соединения в Wi-Fi сети со случайным множественным доступом. Для имитации изменения сигнально-помеховой обстановки используется генератор преднамеренных помех импульсного типа с временными параметрами, согласованными с временными параметрами протоколов связи. Проведенное исследование показало, что изменение сигнально-помеховой обстановки существенно влияет на устойчивость сети связи, в которых имеются радиосегменты. Данное изменение ведет к изменению маршрутов в сети связи вследствие того, что помеха повреждает служебные пакеты, передающиеся по радиосегменту, что ведет к разрыву соединений в радиосегменте. При этом наиболее эффективной является периодическая помеха, длительность и период которой согласованы с длительностью и периодом отправки служебных пакетов в сети связи. Полученные экспериментальные результаты подтверждают ранее теоретически обоснованные эффекты снижения эффективности протоколов

случайного множественного доступа и протоколов маршрутизации и могут быть использованы как для разработки новых видов помех, так и для обоснования новых способов помехозащиты сетей связи.

**Ключевые слова:** маршрутизация, система связи, сеть связи, помеха, сигнально-помеховая обстановка.

**Abstract.** Results of experimental study of the influence of periodic change of the interference intensity on the channel efficiency and network protocols are presented in the paper. Routing protocols are considered as network layer protocols. The protocol of control connection of the communication network with random multiple access is considered as Protocol link layer. The intensity of the interference pulse type is consistent with the temporal parameters of routing protocol. The results show that the intensity of the interference greatly affects routing in network in which there are radio segments. Interference affecting leads to changing of routes in the network. This effect arises from the fact that the disturbance impairs the transfer packets transmitted in the radio segment, which leads to the breakdown of compounds in them. Periodic disturbance, the duration and period of which is coordinated with the duration and period of the send of the routing packets is the most complex for network. Experimental results confirm the effects of reducing the effectiveness of the protocols in random multiple access and routing protocols that have been theoretically justified earlier. These results can be used to develop new types of interference, and to explain new ways of anti-jamming communication networks.

**Ключевые слова:** routing, communication system, network, noise, interference, signal and noise situation, noise-to-signal ratio.

## **Введение**

Развитие современных сетей связи, высокие скорости передачи информации, а также высокие требования к надежности и устойчивости сетей актуализируют исследование процессов восстановления сетей после отказов. Несмотря на то, что

современное активное сетевое оборудование относится к высоконадежным элементам, отказы в сетях не так уж редки. При этом отказы в сетях, имеющих радиосегменты, обусловлены, прежде всего, воздействием на них дестабилизирующих факторов, таких как многолучевое распространение радиоволн, быстрые и медленные замирания сигналов, наличие естественных и преднамеренных помех. Таким образом, высокие требования к устойчивости функционирования телекоммуникационных сетей вступают в противоречие с низкой помехоустойчивостью каналов радиосвязи. Для обеспечения высокой помехоустойчивости современных радиоканалов связи используются сигналы с различными видами модуляции и помехоустойчивого кодирования с переменной скоростью, схемы применения которых адаптируются к сигнально-помеховой обстановке. Вместе с тем, в работе [1] показано, что изменение пропускной способности отдельных каналов связи или их отказ под воздействием дестабилизирующих факторов негативно отражаются на эффективности функционирования протоколов маршрутизации на сетевом уровне OSI. Такое негативное влияние обусловлено жесткой реакцией протоколов маршрутизации на изменение метрики отдельных каналов связи в составе сети. При обнаружении такого изменения протокол маршрутизации прекращает передачу информации, оповещает смежные маршрутизаторы об изменении метрики отдельных каналов в сети и пересчитывает топологию сети в соответствии с новой метрикой канала. Подробное теоретическое исследование устойчивости сетей связи в условиях динамического изменения сигнально-помеховой обстановки под воздействием преднамеренных дестабилизирующих факторов выполнено в ранее опубликованных работах С.И. Макаренко [2-5]. В этих работах показано, что если выбор временных параметров дестабилизирующего воздействия происходит в зависимости от временных параметров протокола маршрутизации, то возникает эффект снижения эффективности маршрутизации в сети. Однако практические исследования по проверке реакции протоколов маршрутизации в сети на

динамическое изменение сигнально-помеховой обстановки до сих пор не проводились. В данной статье представлены результаты таких практических исследований на основе серии экспериментов. В качестве объекта, на основе которого проводились исследования, была выбрана IP сеть с адаптивно-лавинным дистанционно-векторным алгоритмом маршрутизации [6] на основе протоколов AODV+TBRPF. Предмет исследования:

- оценка влияния параметров изменения сигнально-помеховой обстановки на процесс передачи данных в радиосегменте сети;
- оценка влияния параметров изменения сигнально-помеховой обстановки в радиосегменте на процесс изменения маршрутов передачи в сети, в целом.

Для количественной оценки влияния изменения сигнально-помеховой обстановки использовался показатель коэффициента готовности сети [4].

В процессе экспериментов исследовались влияние двух вариантов динамики изменения сигнально-помеховой обстановки:

- медленная (с секундными таймерами изменения);
- быстрая (с милли- и микро- секундными таймерами изменения).

Карта экспериментальных исследований приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Карта экспериментальных исследований

Номер эксперимента	Задачи и особенности эксперимента
Эксперимент 1	<p><b>Цель:</b> проверка гипотезы о разрыве соединения между ЭВМ при воздействии на канал связи внешнего дестабилизирующего фактора малой длительности (<math>\approx 1</math> мс), но с временными параметрами, согласованными с параметрами протокола маршрутизации в сети.</p> <p><b>Основные условия эксперимента.</b>                      В соединении используется только проводная технология – 100BASE-TX. Имитатор воздействия внешнего дестабилизирующего фактора – периодический цикл «разрыв – соединение» одной пары UTP-5 в цепи соединителя RJ-45. Длительность разрыва (имитация воздействия) – <math>T_{разр}=1</math> мс. Длительность соединения (имитация наличия связи) – <math>T_{соед}=5</math> с.</p>

Эксперимент 2	<p><b>Цель:</b> аналогично эксперименту 1, но эффект разрыва соединения проверяется в сети с линейной топологией.</p> <p><b>Основные условия эксперимента.</b> В целом условия аналогичны эксперименту 1. Дополнительно используется сеть на основе маршрутизаторов. Рассматриваются расширенные диапазоны длительности соединения (имитация наличия связи) – <math>T_{соед}=5, 10, 20</math> с.</p>
Эксперимент 3	<p><b>Цель:</b> проверка гипотезы о нарушении нормального режима функционирования сети и изменении маршрутов передачи данных в ней, при воздействии на канал связи сети внешнего дестабилизирующего фактора малой длительности (<math>\approx 1</math> мс) и с временными параметрами согласованными с временными параметрами протокола маршрутизации.</p> <p><b>Основные условия эксперимента.</b> В сети связи используется только проводная технология – 100BASE-TX. Имитатор воздействия внешнего дестабилизирующего фактора – периодический цикл «разрыв – соединение» одной пары UTP-5 в цепи соединителя RJ-45. Длительность разрыва (имитация воздействия) – <math>T_{разр}=1-20</math> мс, с шагом 1 мс. Длительность соединения (имитация наличия связи) – <math>T_{соед}=4, 5, 4,75, 5, 10, 20</math> с.</p>
Эксперимент 4	<p><b>Цель:</b> аналогично эксперименту 3, но рассматривается сеть с более сложной топологией.</p> <p><b>Основные условия эксперимента.</b> Условия аналогичны эксперименту 3, за исключением, длительность соединения (имитация наличия связи) – <math>T_{соед}=5, 10, 20</math> с.</p>
Эксперимент 5	<p><b>Цель:</b> аналогично эксперименту 3, но в сеть добавлен радиосегмент, а в качестве дестабилизирующего воздействия выступает радиопомеха с длительностью сопоставимой с длительностью времени соединения.</p> <p><b>Основные условия эксперимента.</b> Топология сети соответствует используемой в эксперименте 4. В сети связи используется проводная технология – 100BASE-TX и Wi-Fi радиосегмент на основе стандарта IEEE 802.11g. Имитатор воздействия внешнего дестабилизирующего фактора – периодический цикл «разрыв – соединение» за счет воздействия генератора шума в полосе частот стандарта IEEE 802.11g с мощностью 20-30 дБмВ. Длительность разрыва (имитация воздействия) – <math>T_{разр}=0,75-2</math> с. Длительность соединения (имитация наличия связи) – <math>T_{соед}=1,5-2</math> с.</p>
Эксперимент 6	<p><b>Цель:</b> проверка гипотезы о нарушении нормального режима функционирования сети и изменении маршрутов передачи данных в ней при воздействии на радиосегмент сети внешнего дестабилизирующего фактора сверхмалой длительности (<math>\approx 1</math> мкс) направленного на нарушение обмена служебными сигналами в радиосети на канальном уровне.</p> <p><b>Основные условия эксперимента.</b> Топология сети и имитация воздействия соответствует используемой в эксперименте 5, за исключением микросекундных параметров воздействия. Длительность разрыва (имитация воздействия) – <math>T_{разр}=1-8</math> мкс. Длительность соединения (имитация наличия связи) – <math>T_{соед}=1-5</math> мс.</p>

## 1. Реакция сети связи на изменение сигнально-помеховой обстановки с медленной динамикой

### Эксперимент 1.

Для проведения экспериментальных исследований влияния внешних дестабилизирующих факторов на одиночный маршрут в сети был использован стенд, схема которого представлена на рис. 1.

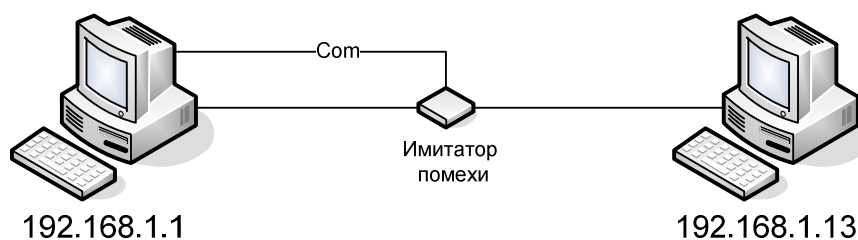


Рис. 1. Схема стенда для проведения эксперимента № 1

Условия эксперимента:

- ЭВМ с предустановленной ОС Windows 7;
- технология канала связи: Ethernet 100BASE-TX с наложенный IP-сетью;
- имитатор воздействия внешнего дестабилизирующего фактора – периодический цикл «разрыв–соединение» одной пары UTP-5 в цепи соединителя RJ-45;
- длительность разрыва (имитация воздействия) –  $T_{разр}=1$  мс (соответствует поражению  $\approx 8,2$  пакетов Ethernet объемом 1518 байт);
- длительность соединения (имитация наличия связи) –  $T_{соед}=5$  с (что соответствует коэффициенту готовности канала связи  $K_{зКС}\approx 1$ );
- контроль наличия связи ведется по командам ping и tracert, а также через наличие соединения в «Центре сетевых подключений» ОС Windows 7.

Наблюдаемый эффект. При наличии периодического воздействия в виде цикла «разрыв–соединение» наблюдается пропадание сетевого соединения между

ЭВМ. Данный эффект может наступить не сразу, а спустя 2...10 циклов работы имитатора воздействия. После пропадания сетевого соединения, его возобновление происходит через инициализацию нового сетевого соединения, которое занимает 7-14 с.

### **Эксперимент 2.**

Для проверки достижимости эффекта разрыва соединения при работе в сети не только отдельных ЭВМ, но и маршрутизаторов был проведен эксперимент № 2. Условия эксперимента, в общем, совпадают с условиями эксперимента № 1, за исключением следующих исходных данных:

- используются IP маршрутизаторы на основе протоколов AODV+TBRPF образующие линейную топологию (рис. 2);
- временные параметры протокола маршрутизации: период рассылки Hello-сообщений (Hello Interval)  $T_{hello}=1$  с, интервал времени ожидания восстановления связи, после которого принимается решение об отказе маршрута (Dead Interval)  $T_{DI}=5 \times T_{hello}=5$  с;
- длительность разрыва  $T_{разр}$  (имитация воздействия) – от 1 мс до 20 мс с шагом 1 мс (воздействие в течении 1 мс соответствует поражению  $\approx 8,2$  пакетов Ethernet объемом 1518 байт);
- длительность соединения  $T_{соед}$  (имитация наличия связи) – 4,6 с; 4,75 с; 5 с; 10 с; 20 с (все значения соответствуют коэффициенту готовности канала связи  $K_{гКС} \approx 1$ );
- контроль наличия связи ведется по командам ping и tracer;
- с каждым набором временных параметров выполнялось не менее 4 опытов.

Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента, сведены в таблицу 2.

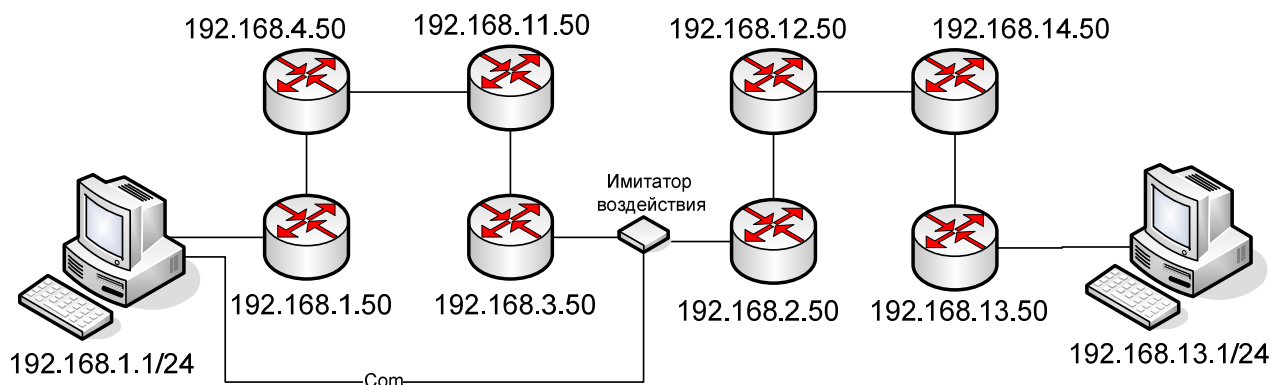


Рис. 2. Схема стенда для проведения эксперимента № 2

Таблица 2 – Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента № 2

Длительность разрыва, $T_{разр}$	Длительность соединения, $T_{соед}$	Среднее время наличия связи в цикле $T_{разр} + T_{соед}$	Среднее время отсутствия связи в цикле $T_{разр} + T_{соед}$	Расчетный коэффициент готовности сети $K_2$
1-20 мс с шагом 1 мс	20 с	15,05 с ( $\pm 19,6\%$ )	2,4 с ( $\pm 16,7\%$ )	0,86 ( $\pm 10\%$ )
	10 с	6,87 с ( $\pm 19\%$ )	2,28 с ( $\pm 21\%$ )	0,75 ( $\pm 12\%$ )
	5 с*	2,63 с ( $\pm 25\%$ )	2,26 с ( $\pm 26\%$ )	0,54 ( $\pm 16\%$ )
	4 с*	1,75 с ( $\pm 18\%$ )	2,29 с ( $\pm 26\%$ )	0,43 ( $\pm 13\%$ )

Примечание к таблице:

\* – почти при каждом третьем опыте обнаруживалось пропадание данных на время порядка 10 с. При этом после снятия прекращения воздействия через некоторое время (примерно 5-10 с) передача данных вновь возобновлялась.

Исследование проведенное в экспериментах 1 и 2 показало, что существует принципиальная возможность нарушения соединений в сети при воздействии на канал связи внешнего дестабилизирующего фактора малой длительности ( $\approx 1$  мс). Эффект нарушения соединения, а также длительность этого эффекта (2,1-2,4 с) не зависит от длительности воздействия  $T_{разр}=1-20$  мс и периодичности воздействия  $T_{соед}=5-20$  с. Однако снижая периодичность воздействия  $T_{соед} \rightarrow 2,5$  с, можно обеспечить снижение коэффициента готовности соединения, до значений  $K_2 \rightarrow 0$ .



Предположительно, эффект нарушения соединения связан с нарушением передачи служебных пакетов сетевого и/или канального уровня.

На рис. 3 приведены результаты моделирования времен наличия и отсутствия связи в сети, а также расчетное значение коэффициента готовности сети, полученное по этим временным параметрам.

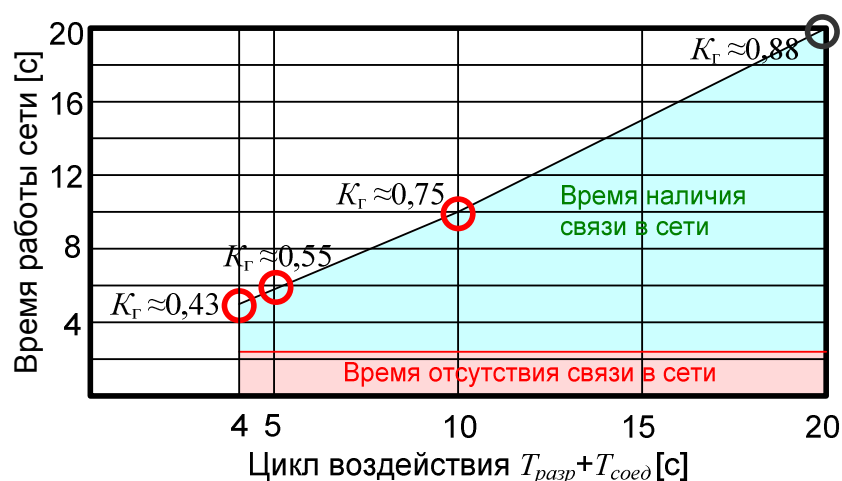


Рис. 3. Результаты моделирования времени наличия и времени отсутствия связи в системе, а также расчетное значение коэффициента готовности сети

На рис. 4 приведено сравнение полученных экспериментальных результатов для коэффициента готовности сети в условиях периодического воздействия и значений для этого же параметра, рассчитанного по методикам, представленным в работах [4, 5]. Синими столбцами обозначены диапазоны расчетных значений коэффициента готовности сети по экспериментальным данным. Красные линии ограничивают диапазон значений для коэффициента готовности, рассчитанного по методикам, представленным в работах, при различных значениях времени диагностики состояния канала связи [4, 5]. Сходимость данных результатов позволяет сделать вывод о практическом подтверждении теоретических результатов и эффектов, представленных в работах [4, 5].

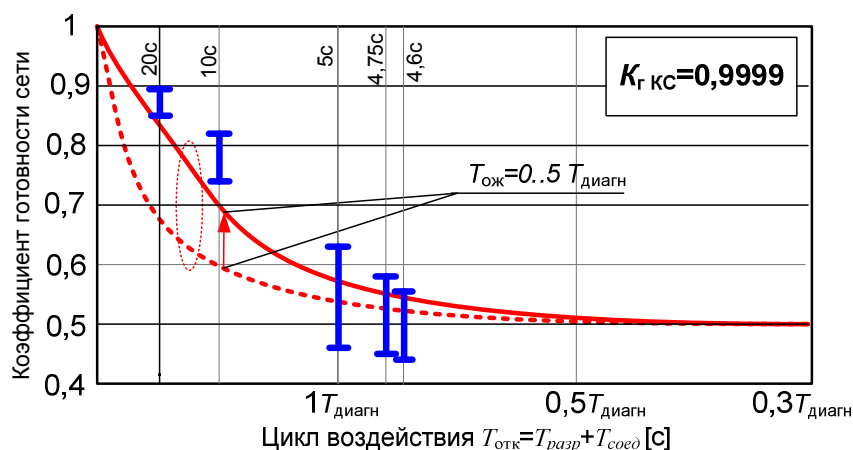


Рис. 4. Сравнение полученных экспериментальных результатов для коэффициента готовности сети (представлены синими вертикальными линиями) и значений для этого же параметра, рассчитанного по теоретическим методикам [4, 5] (обозначены красными линиями)

Для более полного выявления возможностей использования такого воздействия потребовались дополнительные исследования, которые были проведены в экспериментах 3-4.

### Эксперимент 3.

В работах [2-5] теоретически обосновывается гипотеза о том, что эффект нарушения сетевого соединения распространяется на всю сеть за счет оповещения соседними маршрутизаторами друг-друга об изменении метрики сети. В результате, нарушение соединения между двумя маршрутизаторами ведет к пересчету таблиц маршрутизации всех маршрутизаторов в сети и изменению маршрутов передачи данных в ней. Для проверки этой гипотезы было проведено исследование на стенде, схема которого представлена на рис. 5.

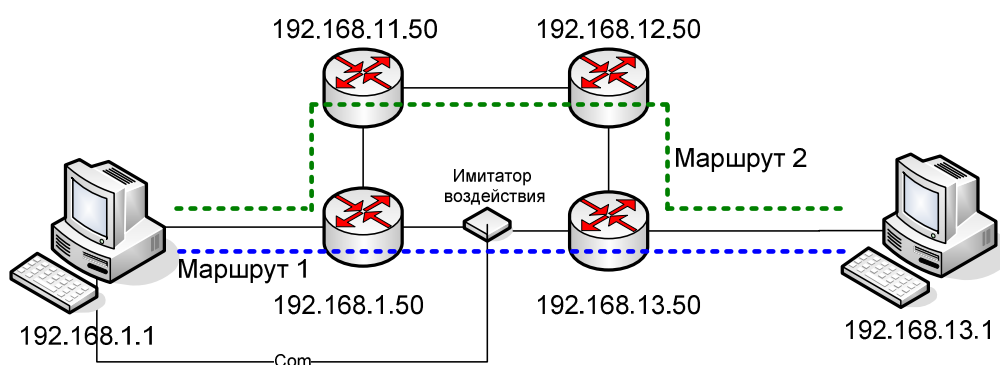


Рис. 5. Схема стенда для проведения эксперимента № 3

Условия эксперимента:

- ЭВМ с предустановленной ОС Windows 7;
- используются маршрутизаторы на основе протоколов AODV+TBRPF образующие IP сеть, топология которой соответствует схеме на рис. 5;
- временные параметры протокола маршрутизации: период рассылки Hello-сообщений (Hello Interval)  $T_{hello}=1$  с, интервал времени ожидания восстановления связи, после которого принимается решение об отказе маршрута (Dead Interval)  $T_{DI}=5 \times T_{hello}=5$  с;
- технология каналов связи: Ethernet 100BASE-TX;
- имитатор воздействия внешнего дестабилизирующего фактора – периодический цикл «разрыв–соединение» одной пары UTP-5 в цепи соединителя RJ-45;
- длительность разрыва  $T_{разр}$  (имитация воздействия) – от 1 мс до 20 мс с шагом 1 мс (воздействие в течении 1 мс соответствует поражению  $\approx 8,2$  пакетов Ethernet объемом 1518 байт);
- длительность соединения  $T_{соед}$  (имитация наличия связи) – 4,6 с; 4,75 с; 5 с; 10 с; 20 с (все значения соответствуют коэффициенту готовности канала связи  $K_{зКС} \approx 1$ );
- контроль наличия связи ведется по командам ping и tracert;

- с каждым набором временных параметров выполнялось не менее 4 опытов.

Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента, сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента 3

Длительность разрыва, $T_{разр}$	Длительность соединения, $T_{соед}$	Среднее время наличия связи в цикле $T_{разр} + T_{соед}$	Среднее время отсутствия связи в цикле $T_{разр} + T_{соед}$	Расчетный коэффициент готовности сети $K_2$	Статистическая частота перехода передачи с маршрута 1 на маршрут 2	Дополнительные сведения по наблюдаемым эффектам
1-20 мс с шагом 1 мс	20 с	17,7 с ( $\pm 2,5\%$ )	2,3 с ( $\pm 16\%$ )	0,88 ( $\pm 2\%$ )	0	Пакеты передаются по первоначальному маршруту № 1, перехода на маршрут № 2 не происходит. Передача пакетов пропадает после начала работы имитатора воздействия на $\approx 2,8$ с.
1-20 мс с шагом 1 мс	10 с	7,8 с ( $\pm 6\%$ )	2,17 с ( $\pm 19\%$ )	0,78 ( $\pm 5,5\%$ )	0	Пакеты передаются по первоначальному маршруту № 1, перехода на маршрут № 2 не происходит. Передача пакетов пропадает после начала работы имитатора воздействия на $\approx 2,8$ с.
1-20 мс с шагом 1 мс	5 с	2,76 с ( $\pm 17\%$ )	2,22 с ( $\pm 20\%$ )	0,55 ( $\pm 16\%$ )	5%	Пакеты в основном передаются по первоначальному маршруту № 1. При значениях $T_{разр}=12$ мс наблюдался переход на маршрут № 2. Передача пакетов пропадает после начала работы имитатора воздействия на $\approx 3$ с. При передаче речи (программы SIP) фрагменты речи пропадают на время пропадания пакетов.
1-20 мс с шагом 1 мс	4,75 с	2,5 с ( $\pm 14\%$ )	2,24 с ( $\pm 15\%$ )	0,53 ( $\pm 13,6\%$ )	10%	Пакеты в основном передаются по первоначальному маршруту № 1. При значениях $T_{разр}=9$ мс и $T_{разр}=16$ мс наблюдался переход на маршрут № 2. Передача пакетов пропадает после начала работы имитатора воздействия на $\approx 3$ с.

1-20 мс с шагом 1 мс	4,6 с	2,31 с (±13,5%)	2,25 с (±11%)	0,5 (±12%)	35%	Пакеты в основном передаются по первоначальному маршруту № 1, переход на маршрут № 2 происходит с вероятностью 0,35. Эффект перехода на маршрут №2 наблюдается при параметрах $T_{разр}=2, 3, 6, 7, 8, 10, 15$ мс. Передача пакетов пропадает после начала работы имитатора воздействия на $\approx 3$ с.
----------------------------	-------	--------------------	------------------	---------------	-----	---

Примечание к таблице:

1. Во время перестройки маршрута передача пакетов не велась.
2. При продолжении воздействия на длительном интервале времени передача пакетов периодически пропадала (время между пропаданиями  $\approx 10$  циклов  $T_{разр}+T_{соед}$ ), потом снова восстанавливалась.

Для подтверждения наблюдаемых эффектов перемаршрутизации информационных потоков в сети, был проведен эксперимент № 4, в котором использовалась сеть с более сложной топологией.

#### Эксперимент 4.

Условия эксперимента, в общем, совпадают с условиями эксперимента 3, за исключением того, что используется топология сети представленная на рис. 6. Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента, сведены в таблицу 4.

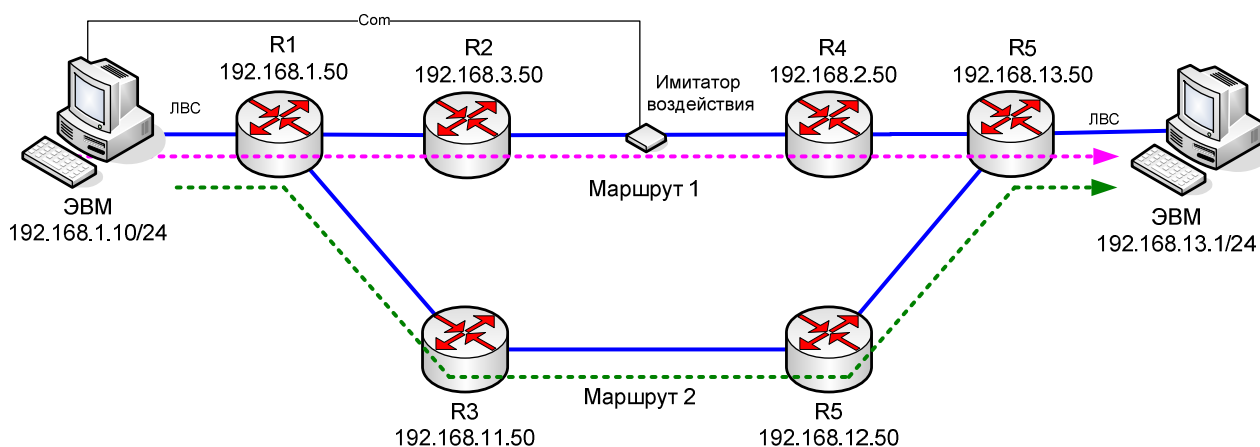


Рис. 6. Схема стенда для проведения эксперимента № 4

Таблица 4 – Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента 4

Длительность разрыва, $T_{разр}$	Длительность соединения, $T_{соед}$	Среднее время наличия связи в цикле $T_{разр} + T_{соед}$	Среднее время отсутствия связи в цикле $T_{разр} + T_{соед}$	Расчетный коэффициент готовности сети $K_2$	Статистическая частота перехода передачи с маршрута 1 на маршрут 2	Дополнительные сведения по наблюдаемым эффектам
1-20 мс с шагом 1 мс	20 с	15,1 с (±19%)	2,3 с (±16%)	0,86 (±2%)	5%	Пакеты в основном передаются по первоначальному маршруту № 1. При значениях $T_{разр}=13$ мс наблюдался переход на маршрут № 2. Передача пакетов пропадает после начала работы имитатора воздействия на $\approx 2,8$ с.
1-20 мс с шагом 1 мс	10 с	6,8 с (±19%).	2,23 с (±11%)	0,75 (±5%)	40%	Наблюдаются переходы с маршрута № 1 на маршрут № 2 с вероятностью 0,4. Эффект перехода на маршрут №2 наблюдается при параметрах $T_{разр}=5, 6, 7, 10, 12, 15, 19, 20$ мс. Передача пакетов пропадает после начала работы имитатора воздействия на $\approx 2,8$ с.
1-5 мс с шагом 1 мс	5 с	2,7 с (±10%)	2,13 с (±12%)	0,55 (±16%)	100%	При воздействии наблюдается переход с маршрута № 1 на маршрут № 2. Данный эффект перехода на маршрут №2 наблюдается при всех значениях параметра $T_{разр}=1, 2, 3, 4, 5$ мс. Передача пакетов пропадает после начала работы имитатора воздействия на $\approx 3$ с.

Анализ результатов экспериментов 3 и 4 подтвердил эффект перемаршрутизации информационных потоков в сети на которую оказываются рассматриваемые воздействия. Также, был подтвержден эффект отсутствия связи в сети на интервале времени, в течение которого идет перестройка маршрутов. Длительность данного интервала составляет 2,1-2,4 с. Таким образом, при согласовании периода воздействия с временными параметрами рассылки сообщений Hello маршрутизаторами ( $T_{соед} + T_{разр} \approx T_{DI}$ ) наблюдается эффект

нарушения сетевого соединения между ЭВМ. При этом на физическом уровне длительность разрыва соединения очень мала, и соответствует высокому коэффициенту готовности канала связи  $K_{з\text{КС}} = T_{\text{соед}} / (T_{\text{соед}} + T_{\text{разр}}) \approx 1$ . Также выявлен факт того, что эффект нарушения соединения наступает не сразу после начала работы имитатора воздействия, а спустя некоторый интервал времени – 2,8-3 с. Временная задержка в проявлении эффекта подавления объясняется тем, что необходимо некоторое время для согласования временных параметров воздействия и интервалов отправки маршрутизаторами Hello-пакетов, в целях обеспечения одновременной потери всех Hello пакетов, которые следуют подряд в пределах интервала времени ожидания восстановления связи (рис. 7).

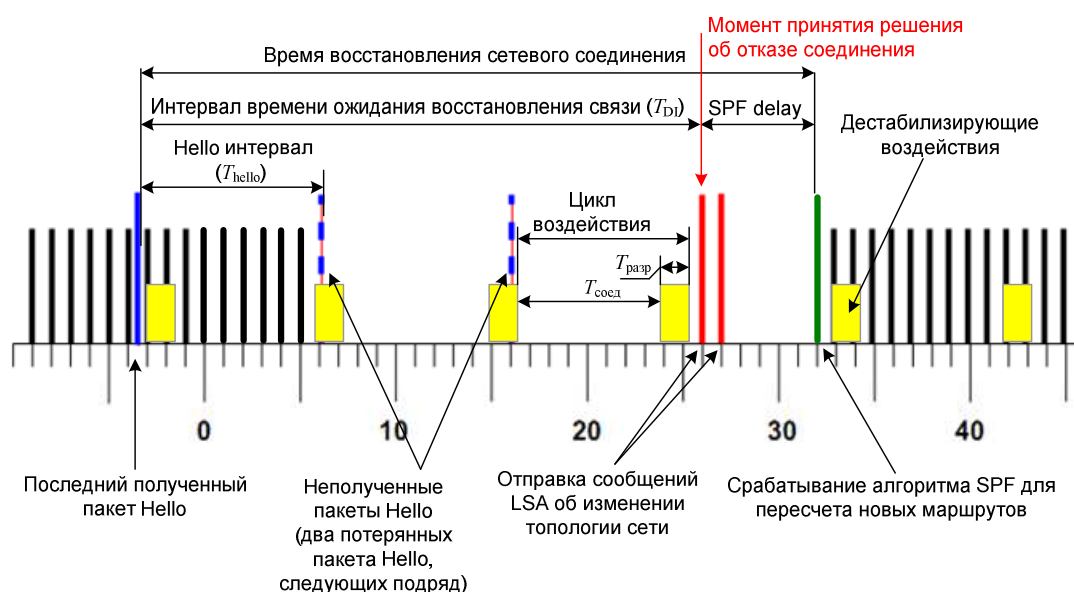


Рис. 7. Согласованность временных параметров протокола маршрутизации и дестабилизирующего воздействия при восстановлении сетевого соединения

Выявленный эффект перехода передачи на другой маршрут, только при определенных комбинациях значений времени разрыва соединения  $T_{\text{разр}}$  и периодичности такого разрыва  $T_{\text{соед}}$  позволяет сделать вывод о необходимости поисковых режимов воздействия за счет динамического изменения  $T_{\text{разр}}$  при

$T_{соед} \Leftrightarrow T_{DI}$ . При этом длительность  $T_{разр}$  должна быть достаточной для нарушения передачи пакета Hello сетевого уровня. Судя по результатам эксперимента, для этого достаточно воздействие длительности 2-3 мс, что соответствует поражению  $\approx 16-25$  пакетов канального уровня Ethernet объемом 1518 байт каждый, куда инкапсулируется Hello пакет сетевого уровня.

Кроме того, исследование такого воздействия выявило циклический характер проявления эффекта нарушения сетевого соединения, с периодом порядка  $\approx 10$  циклов воздействия (25-30 с). Сопоставление наблюдаемой периодичности с данными в работе [1] позволило предположить, что подобная периодичность обусловлена динамическим изменением временных параметров протокола маршрутизации (а именно: времени отправки пакетов Hello и интервала Dead Interval) вследствие потери пакетов Hello. Это приводит к рассогласованию временных параметров периода воздействия и периодичности отправки пакетов Hello, в результате чего пакеты Hello не теряются и связь восстанавливается. Однако в течение некоторого времени, реагируя на то, что новых потерь пакетов Hello не происходит, система связи возвращает значения временных параметров протокола маршрутизации к начальным значениям. В результате этого пакеты Hello опять начинают подавляться помеховым воздействием. Таким образом, данный процесс носит циклический характер.

### **Эксперимент 5.**

Для подтверждения вышеприведенных эффектов при использовании в качестве воздействия радиосредств был использован экспериментальный стенд, включающий в себя Wi-Fi радиосегмент на основе стандарта IEEE 802.11g (рис. 8). Особенностью данного эксперимента было использование длительности воздействия помехи  $T_{разр}$  сопоставимой с длительностью времени соединения  $T_{соед}$ .



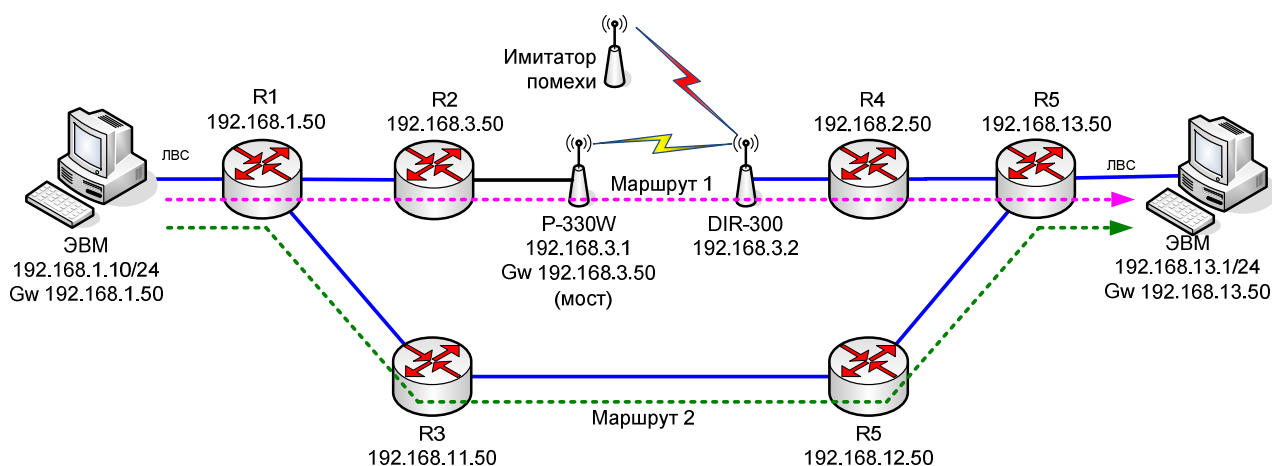


Рис. 8. Схема стенда для проведения эксперимента № 5

Условия эксперимента:

- ЭВМ с предустановленной ОС Windows 7;
- используются маршрутизаторы на основе протоколов AODV+TBRPF образующие IP сеть, топология которой соответствует схеме на рис. 8;
- временные параметры протокола маршрутизации: период рассылки Hello-сообщений (Hello Interval)  $T_{hello}=1$  с, интервал времени ожидания восстановления связи, после которого принимается решение об отказе маршрута (Dead Interval)  $T_{DI}=5 \times T_{hello}=5$  с;
- технологии каналов связи: проводной сегмент – Ethernet 100BASE-TX; радиосегмент – Wi-Fi на основе стандарта IEEE 802.11g с использованием маршрутизаторов ZyXEL P-330W и DLink DIR-300 (тип связи маршрутизаторов по Wi-Fi – клиент-сервер);
- воздействие внешнего дестабилизирующего фактора – периодический цикл «разрыв–соединение» за счет воздействия генератора шума в полосе частот стандарта IEEE 802.11g с мощностью 20-30 дБмВ, позволяющий обеспечить такое отношение сигнал/шум в радиоканале, которое исключает прием полезного сигнала.

- контроль наличия связи ведется по командам ping и tracert, а также с использованием программы измерения скорости трафика в сети Mikro Tik Bandwidth Test.

Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента № 5

Длительность воздействия помехи, $T_{разр}$	Длительность соединения, $T_{соед}$	Среднее время отсутствия связи в цикле $T_{разр} + T_{соед}$	Среднее время наличия связи в цикле $T_{разр} + T_{соед}$	Расчетный коэффициент готовности сети $K_2$	Переход передачи с маршрута 1 на маршрут 2	Дополнительные сведения о наблюдаемых эффектах
2 с	2 с	2 с	2 с	0,5	Отсутствуют	Пакеты передаются по первоначальному маршруту № 1, перехода на маршрут № 2 не происходит. Уровень потерянной информации при воздействии $\approx 50\%$ . После прекращения воздействия в течение некоторого времени наблюдалась более интенсивная передача речевой информации
2,5 с	1,5 с	2,5 с	1,5 с	0,625	Отсутствуют	Пакеты передаются по первоначальному маршруту № 1, перехода на маршрут № 2 не происходит. Потеря речевой информации происходит во время воздействия. При отсутствии воздействия передача информации происходит.
3 с	1,5 с	3 с	1,5 с	0,667	Присутствуют	Наблюдается переход передачи трафика с маршрута 1 на маршрут 2. Через некоторое время (даже при наличии воздействия) происходит обратный переход на маршрут 1. Потеря речевой информации происходит во время воздействия. При отсутствии воздействия передача информации происходит.
1,5 с	0,75	1,5 с	0,75	0,333	Циклически повторяются переходы передачи между маршрутами	Наблюдаются постоянные циклические смены маршрутов 1 и 2 при передаче трафика. Потеря речевой информации происходит во время воздействия. При отсутствии воздействия передача информации происходит.

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод, что эффект снижения коэффициента готовности сети может быть достигнут и за счет длительного воздействия на канал связи в сети. Кроме того, при увеличении интенсивности воздействия на радиосегмент достигается эффект смены маршрута передачи пакетов, а также снижение коэффициента готовности сети (рис. 9).

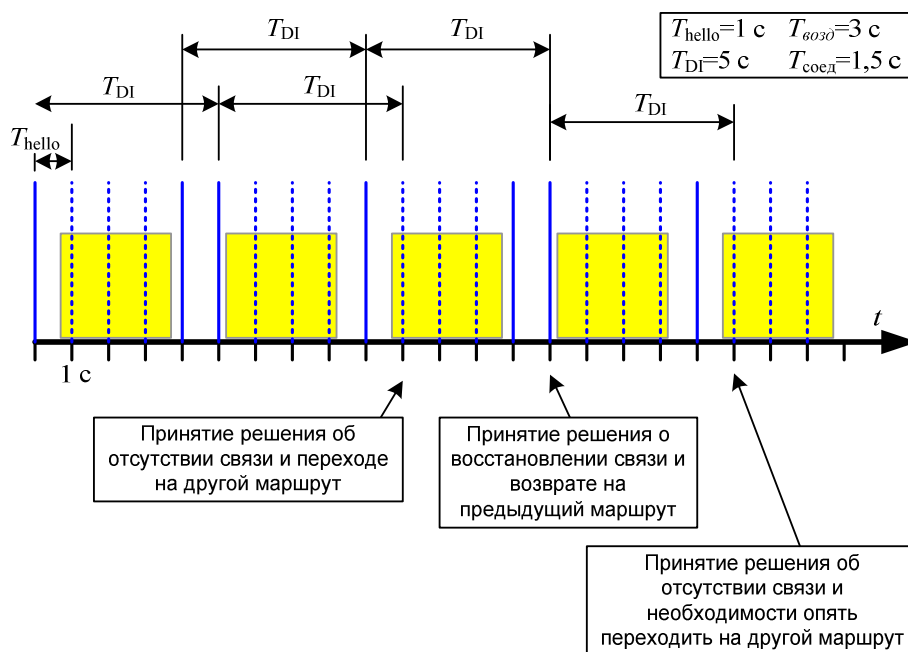


Рис. 9. Эффект периодического перехода маршрутов передачи

Эффект периодической смены маршрутов передачи объясняется согласованием длительности воздействия с временными параметрами протокола маршрутизации. При этом эффект постоянного периодического изменения маршрутов передачи, достигаемого при комбинации параметров  $T_{разр}=1,5$  с,  $T_{соед}=0,75$  с, может быть объяснен следующим образом. Как показано в работе [1], при наличии потерь Hello пакетов, протокол маршрутизации начинает наращивать временные параметры ожидания восстановления связи по экспоненте. По мере наращивания значений этого параметра, возникает ситуация, когда эти параметры настолько «загрубляются», что маршрутизатор перестает учитывать оказываемые

на канал связи помеховые воздействия. В этом случае канал связи снова считается исправным, и передача возвращается на предыдущий маршрут. Однако после того, как временные параметры «сбросятся» в исходное значение, воздействие снова начнет учитываться, и, после накопления необходимого количества потерянных пакетов Hello, передача снова изменит свой маршрут.

Эффект более интенсивной передачи пакетов после прекращения воздействия (в частности наблюдаемой при значениях параметров  $T_{разр} = T_{соед} = 2$  с) можно объяснить, тем что во время воздействия пакеты передаются и теряются. Вследствие отсутствия квитанций об успешной доставки, пакеты не удаляются, а накапливаются в буферной памяти R-330W. После прекращения воздействия пакеты начинают передаваться с более высокой интенсивностью, пока не опустеет буфер R-330W. После этого, передача пакетов ведется со стандартной интенсивностью.

Необходимо отметить, что при таком долговременном воздействии, на длительности в несколько секунд, в отличие от прицельного воздействия на пакеты Hello рассмотренных в эксперименте 1 и 2, средства управления параметрами сети будут иметь возможность определить факт снижения надежности канала связи и исключить данный канал из маршрута передачи данных.

### **3. Реакция сети связи на изменение сигнально-помеховой обстановки с быстрой динамикой**

Анализ результатов экспериментов 3-5 показал, что эффект нарушения связности между маршрутизаторами в сети может быть достигнут за счет нарушения обмена служебными Hello-пакетами протокола маршрутизации на сетевом уровне. Вместе с тем, на канальном уровне функционирования каждого канала связи также имеются служебные пакеты протокола канального уровня. Обмен этими пакетами позволяет поддерживать соединение в отдельном канале

связи. Подавление этих пакетов должно приводить к подобному эффекту – разрыву соединения в канале связи, и, как следствие, – к переходу информационного обмена на другой маршрут.

### Эксперимент 6.

Для проверки данной гипотезы был построен экспериментальный стенд, включающий в себя Wi-Fi радиосегмент на основе стандарта IEEE 802.11g (рис. 10). Особенностью данного эксперимента было использование микросекундной длительности воздействия помехи.

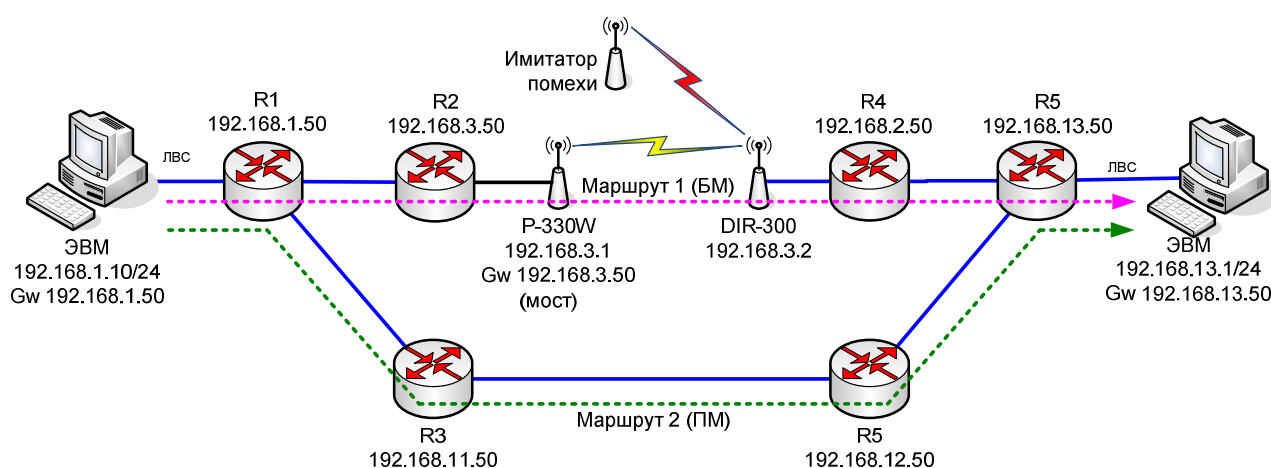


Рис. 10. Схема стенда для проведения эксперимента № 6

Условия эксперимента:

- ЭВМ с предустановленной ОС Windows 7;
- используются маршрутизаторы на основе протоколов AODV+TBRPF образующие IP сеть, топология которой соответствует схеме на рис. 10;
- временные параметры протокола маршрутизации: период рассылки Hello-сообщений (Hello Interval)  $T_{hello}=1$  с, интервал времени ожидания восстановления связи, после которого принимается решение об отказе маршрута (Dead Interval)  $T_{DI}=5 \times T_{hello}=5$  с;

- технологии каналов связи: проводной сегмент – Ethernet 100BASE-TX; радиосегмент – Wi-Fi на основе стандарта IEEE 802.11g с использованием маршрутизаторов ZyXEL P-330W и DLink DIR-300 (тип связи маршрутизаторов по Wi-Fi – клиент-сервер);
- воздействие внешнего дестабилизирующего фактора – периодический цикл «разрыв–соединение» за счет воздействия генератора шума в полосе частот стандарта IEEE 802.11g с мощностью помехи 20-30 дБмВ, что позволяет исключить прием полезного сигнала.
- контроль наличия связи ведется по командам ping и tracert, а также с использованием программы измерения скорости трафика в сети Mikro Tik Bandwidth Test.

Изначально передача данных между ЭВМ была настроена на использование беспроводного маршрута 1. Воздействуя помехой с длительностью 1 мкс и с различной скважностью, фиксировался эффект перемаршрутизации в сети (перехода передачи на проводной маршрут 2), а также эффект снижения скорости передачи. Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента, сведены в таблицу 6. В таблице 6 маршрут 1 на рис. 7 обозначен как БМ (беспроводной маршрут), а маршрут 2 – как ПМ (проводной маршрут).

Таблица 6 – Эффекты, наблюдаемые при проведении эксперимента № 6

Длительность воздействия помехи, $T_{разр}$	Длительность соединения, $T_{соед}$	Наблюдаемые эффекты от воздействия			
		Передача UDP-пакетов			Передача TCP-пакетов
		Размер пакета –60 байт.	Размер пакета – 1400 байт.	Передаваемые пакеты 774, 834, 1554 байта. В основном – 1554 байта.	Передаваемые пакеты 1454, 2854 байта. В основном – 2854 байта.
-	всегда	Скорость без помехи на БМ – 1,2 Мбит/с.	Скорость без помехи на БМ – 14 Мбит/с.	Скорость без помехи на БМ – 5,7 Мбит/с.	Скорость без помехи на БМ – 7,3 Мбит/с.

1 мкс	100 мкс	Переход БМ→ПМ. Возврата на БМ не происходит. Скорость соединения на ПМ: 2-3 Мбит/с.	Переход БМ→ПМ. Возврата на БМ не происходит. Скорость соединения на ПМ: 14 Мбит/с.	Переход БМ→ПМ. Возврата на БМ не происходит. Скорость соединения на ПМ: 7,6 Мбит/с.	Переход БМ→ПМ. Возврата на БМ не происходит. Скорость соединения на ПМ: 10 Мбит/с.
1 мкс	500 мкс	Переход БМ→ПМ. Возврата на БМ не происходит. Наблюдалась потери AODV-пакетов. Ошибки в маршрутизации. Скорость соединения на ПМ: 2-3 Мбит/с.	Переход БМ→ПМ. Возврата на БМ не происходит. Скорость соединения на ПМ: 14 Мбит/с.	Переход БМ→ПМ. Возврата на БМ не происходит. Скорость соединения на ПМ: 7,8 Мбит/с.	Переход БМ→ПМ. Возврата на БМ не происходит. Скорость соединения на ПМ: 10 Мбит/с.
1 мкс	1000 мкс	Переходы между БМ↔ПМ. Доля времени передачи по маршрутам: БМ – 25%, ПМ – 75%. На БМ скорость – 0,6 Мбит/с. На ПМ увеличение скорости до 3 Мбит/с.	Переходы между БМ↔ПМ. Доля времени передачи по маршрутам: БМ – 12,5%, ПМ – 87,5%. После начала воздействия некоторое время (≈1 мин) оставался БМ, потом переход на ПМ (через ≈1 мин). На БМ скорость – 5 Мбит/с. На ПМ увеличение скорости до 14 Мбит/с.	Переходы между БМ↔ПМ. Доля времени передачи по маршрутам: БМ – 50%, ПМ – 50%. Наблюдаются переповторы и дубликаты управляющих ТСР-пакетов. Скорость соединения: 7 Мбит/с. Иногда опускается до 2 Мбит/с.	Переходы между БМ↔ПМ. Доля времени передачи по маршрутам: БМ – 50%, ПМ – 50%. Время нахождения на одном маршруте не постоянное и изменяется от 10 с до 2 мин.
1 мкс	1500 мкс	Переход БМ→ПМ→БМ. Доля времени передачи по маршрутам: БМ – 87,5%, ПМ – 12,5%. Длительность БМ: ≈0,5-1 мин. Длительность ПМ: ≈20-30 с. Скорость: 1-4 Мбит/с.	Передача только по БМ. Скорость: 13 Мбит/с.	Переходы между БМ↔ПМ. Доля времени передачи по маршрутам: БМ – 87,5%, ПМ – 12,5%. Скорость: 4-6 Мбит/с.	Переходы между БМ↔ПМ. Доля времени передачи по маршрутам: БМ – 87,5%, ПМ – 12,5%. Скорость: 7,3 Мбит/с.
1 мкс	2000 мкс	Переходы между БМ↔ПМ. Доля времени передачи по маршрутам: БМ – 87,5%, ПМ – 12,5%. Скорость: 1 Мбит/с.	Передача только по БМ. Скорость: 14 Мбит/с.	Передача только по БМ. Скорость: 5,7 Мбит/с.	Передача по БМ. Очень редко, на короткое время, наблюдаются переходы на ПМ. Скорость 7,3 Мбит/с.

1 мкс	5000 мкс	Передача только по БМ. Скорость: 1 Мбит/с. Чуть чаще, по сравнению с полным отсутствием воздействия, идут переповторы и дубликаты ТСР-пакетов управления.	Передача только по БМ. Скорость: 14 Мбит/с. Эффектов от воздействия не наблюдается.	Передача только по БМ. Скорость: 5,7 Мбит/с. Эффектов от воздействия не наблюдается.	Передача только по БМ. Скорость: 7,5 Мбит/с. Эффектов от воздействия не наблюдается.
-------	----------	---	---	--	--

Таблица 7 – Эффекты, наблюдаемые при проведении дополнительного исследования с увеличенной длительностью воздействия

Длительность воздействия помехи, $T_{разр}$	Длительность соединения, $T_{соед}$	Передача UDP-пакетов	
		Размер пакета 60 байт	Размер пакета 1400 байт
		Скорость без помехи 1,2 Мбит/с.	Скорость без помехи 14 Мбит/с.
2 мкс	1000 мкс	Переход БМ→ПМ. Скорость соединения: 0-4 Мбит/с. Иногда наблюдаются повторы и дубликаты ТСР-пакетов управления.	Переход БМ→ПМ. Скорость 14 Мбит/с. Повторы ТСР-пакетов управления не наблюдаются. Скачков изменения скорости обмена не наблюдается.
4 мкс	2000 мкс	Переходы между БМ↔ПМ. Скорость соединения: 1 Мбит/с.	Переходы между БМ↔ПМ. Скорость соединения: 14 Мбит/с.
8 мкс	2000 мкс	Переходы между БМ↔ПМ.	--

Для более подробного исследования процесса перемаршрутизации с беспроводного маршрута 1 на проводной маршрут 2 были проведены дополнительные исследования с увеличенной длительностью воздействия (до 2-8 мкс). При этом выбиралась скважность воздействия, которая соответствовала значениям с наиболее явными эффектами, в соответствии с таблицей 6. Результаты этого дополнительного исследования представлены в таблице 7.

Кроме того, были проведены исследования влияния на радиоканал помехи с мощностью, обеспечивающей не полное подавление радиоканала, а воздействия с последовательным ступенчатым увеличением мощности помехи, для подтверждения эффектов, ранее теоретически рассмотренных в работах [2, 7]. Результаты такого исследования приведены в таблице 8.



Таблица 8 – Эффекты, наблюдаемые при проведении дополнительного исследования воздействия с последовательным ступенчатым увеличением его мощности

Длительность воздействия помехи, $T_{разр}$	Длительность соединения, $T_{соед}$	Мощность помехи	Скорость соединения	Наблюдаемые эффекты от воздействия
Исследование для $T_{разр}=2$ мкс и $T_{соед}=20$ мкс				
2 мкс	20 мкс	-10 дБмВт	3-4 Мбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
2 мкс	20 мкс	-9 дБмВт	1,6 Мбит/с	Переходы между БМ↔ПМ. Снижение скорости соединения.
2 мкс	20 мкс	-8 дБмВт	14 Мбит/с	Окончательный переход на ПМ и передача только по ПМ.
Исследование для $T_{разр}=4$ мкс и $T_{соед}=40$ мкс				
4 мкс	40 мкс	-10 дБмВт	1 Мбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
4 мкс	40 мкс	-9 дБмВт	14 Мбит/с	Переходы между БМ↔ПМ. При этом наиболее более частым является передача по ПМ.
Исследование для $T_{разр}=3$ мкс и $T_{соед}=60$ мкс				
2 мкс	40 мкс	-12 дБмВт	3 Мбит/с	Передача только по БМ.
2 мкс	40 мкс	-11 дБмВт	1 Мбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
2 мкс	40 мкс	-10 дБмВт	700 кбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
2 мкс	40 мкс	-9 дБмВт	600 кбит/с	Передача только по БМ Снижение скорости соединения.
2 мкс	40 мкс	-8 дБмВт	-	Переходы между БМ↔ПМ. Передача фактически не ведется.
Исследование для $T_{разр}=3$ мкс и $T_{соед}=60$ мкс				
3 мкс	60 мкс	-12 дБмВт	13 Мбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
3 мкс	60 мкс	-10 дБмВт	12,5 Мбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
3 мкс	60 мкс	-5 дБмВт	10 Мбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
3 мкс	60 мкс	0 дБмВт	10 Мбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
3 мкс	60 мкс	5 дБмВт	7 Мбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
3 мкс	60 мкс	10 дБмВт	1,3 Мбит/с	Передача только по БМ. Снижение скорости соединения.
3 мкс	60 мкс	15 дБмВт	1,3 Мбит/с	Переходы между БМ↔ПМ. Снижение скорости соединения.

Оба исследования проводились на экспериментальном стенде, представленном на рис. 10, и с начальными условиями, соответствующими ранее используемым в эксперименте 6.

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблицах 7 и 8, позволяют сделать следующие выводы. Стандарт IEEE 802.11g, на основе которого построен радиосегмент экспериментальной сети (рис. 10), предусматривает периодический обмен служебными пакетами с целью контроля качества соединения. По результатам измерений средствами радиомониторинга данные служебные пакеты имеют вид специфичного сигнала, который повторяется в течение времени наблюдения и имеет периодичность 101,1 мс и длительность 1 мс. В результате, при воздействии даже помехи малой длительности (~1 мкс), но с периодом воздействия менее 1 мс, происходит повреждение целостности служебного пакета и снижение достоверности его правильного приема. Как следствие, на логическом уровне наблюдается разрыв соединения между маршрутизаторами, подключенными к радиосегменту сети, при этом передача переходит на другой существующий в сети маршрут, который проходит по проводному сегменту. При воздействии с периодом  $T_{\text{соед}}=1000$  мкс (1 мс), или с еще большим периодом, существует вероятность прохождения таких служебных пакетов, и соединение между маршрутизаторами, подключенными к радиосети, не нарушается. Беспрепятственное прохождение служебных пакетов контроля качества соединения WiFi приводит к росту доли времени, при котором передача ведется через беспроводной маршрут.

При последовательном увеличении периода воздействия (длительности времени соединения  $T_{\text{соед}}$ ) до значений 1,5 мс → 2 мс → 5 мс вероятность повреждения служебных пакетов уменьшается, и воздействие помехи, в большей степени, приходится на повреждение информационных пакетов и пакетов квитанций. Этот вывод подтверждается тем, что эффекты от воздействия, судя по данным таблицы 6, в большей степени выражены при малом размере

информационных пакетов (а, соответственно, и их малой длительности), что соответствует большей доли служебных пакетов в общем объеме передаваемого трафика.

Вместе с тем, рост интенсивности повреждения именно информационных пакетов при увеличении периода воздействия  $T_{\text{соед}}$  хотя и не ведет к разрыву соединения на беспроводном маршруте, но существенно снижает его скорость. Снижение скорости передачи через беспроводное соединение происходит из-за необходимости повторной передачи поврежденных пакетов и квитанций об успешной доставке, а также в связи сохранением малого объема «окна» в TCP протоколе на соединениях с высоким уровнем повреждения пакетов.

## **Выводы**

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие обобщенные выводы.

Изменение сигнально-помеховой обстановки существенно влияет на сети связи, в которых имеются радиосегменты. Изменение сигнально-помеховой обстановки ведет к изменению маршрутов в сети связи вследствие того, что помеха повреждает служебные пакеты, передающиеся по радиосегменту, что ведет к разрыву соединений в радиосегменте. При этом, наиболее эффективной (по показателю снижения коэффициента готовности сети) является периодическая помеха, длительность и период которой согласованы с длительностью и периодом отправки служебных пакетов в сети связи. Эффект разрыва соединения в радиосегменте сети, который ведет к перемаршрутизации путей передачи данных, может быть достигнут как при медленной периодичности воздействия помехи (с секундными таймерами изменения), так и при быстрой периодичности воздействия помехи (с милли- и микро- секундными таймерами изменения). При этом, в первом случае воздействие помехи ведет к повреждению служебных

пакетов Hello сетевого уровня, а во втором случае – к повреждению служебных пакетов контроля соединения канального уровня.

Проведенные экспериментальные исследования на практике полностью подтвердили теоретически обоснованный эффект качественного снижения эффективности маршрутизации в сети при согласовании временных параметров дестабилизирующего воздействия с временными параметрами протокола маршрутизации, представленные в работах [2-5], а также эффекты снижения эффективности функционирования протоколов множественного доступа канального уровня в радиосетях в условиях периодических помеховых воздействий, которые были ранее теоретически обоснованы в работах [2, 7, 8].

Кроме того, результаты проведенного эксперимента № 6 согласуются и подтверждают отдельные теоретические эффекты снижения эффективности функционирования протоколов множественного доступа, рассмотренные ранее в работах [9-17]. Также полученные экспериментальные результаты согласуются с теоретическими работами по исследованию изменения топологии, снижению структурной живучести и надежности сети связи, а также эффектов перемаршрутизации информационных потоков в ней под влиянием преднамеренных помех, которые представлены в работах [18-29].

Отдельные результаты эксперимента № 6 подтвердили эффекты снижения эффективности ТСР протокола в условиях периодических помех, ранее обоснованные в работах [30-32]. Данные результаты могут быть использованы для разработки новых режимов импульсных помеховых воздействий, специально ориентированных на снижение эффективности функционирования ТСР протокола, а также других протоколов, использующих «оконный механизм» управления скоростью передачи.

В общем, представленные в статье результаты могут быть использованы для:

- разработки новых видов помех, ориентированных на функциональное подавление сетей связи, обоснование которых представлено в работах [33-35];
- обоснования новых способов помехозащиты сетей связи от помеховых воздействий, ориентированных на нарушение функционирования систем связи на сетевом уровне, например, обоснованных в работе [36].

*Авторы выражают признательность доктору технических наук профессору Ю.М. Перунову за рекомендации и направляющие воздействия, которые способствовали получению новых интересных результатов, а также доктору технических наук профессору М.Л. Артёмову за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований.*

*Исследования эффективности функционирования протоколов маршрутизации в сетях связи в условиях преднамеренных деструктивных воздействий выполнены при государственной поддержке РФФИ инициативного научного проекта № 13-07-97518 и поддержке Департаментом приоритетных направлений науки и технологий Минобрнауки РФ – грантом Президента РФ № МК-755.2012.10.*

### **Литература**

1. Макаренко С.И. Время сходимости протоколов маршрутизации при отказах в сети // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 45-98. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2015-02/03-Makarenko.pdf>
2. Макаренко С.И., Михайлов Р.Л., Новиков Е.А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. [электронный журнал] 2014. № 10. С. 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf>

3. Макаренко С.И., Михайлов Р.Л. Модель функционирования маршрутизатора в сети в условиях ограниченной надежности каналов связи // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 2. С. 44-49.

4. Макаренко С.И., Рюмшин К.Ю., Михайлов Р.Л. Модель функционирования объекта сети связи в условиях ограниченной надежности каналов связи // Информационные системы и технологии. 2014. № 6 (86). С. 139-147.

5. Макаренко С.И., Михайлов Р.Л. Адаптация параметров сигнализации в протоколе маршрутизации с установлением соединений при воздействии на сеть дестабилизирующих факторов // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 1. С. 98-126. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2015-01/07-Makarenko.pdf>

6. Новиков С.Н. Классификация методов маршрутизации в мультисервисных сетях связи // Вестник СибГУТИ. 2013. № 1. С. 57-67.

7. Макаренко С.И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2012. № 6. С. 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf>

8. Макаренко С.И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2011. № 9. С. 2. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf>

9. Перегудов М.А., Бойко А.А. Модель процедуры случайного множественного доступа к среде типа S-Aloha // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6. С. 75-81.

10. Вавилов В.А., Назаров А.А. Исследование устойчивых сетей множественного доступа с источником повторных вызовов, функционирующим в случайной среде // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. № 5. С. 14-18.

11. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И. Оценка производительности беспроводной сети в условиях помех // Автоматика и телемеханика. 2000. № 12. С. 87-103.

12. Елесин М.Е., Ходаревский Д.Н. Аналитическая модель влияния вероятности ошибки в радиоканале на характеристики пакетной передачи сети беспроводного доступа // Актуальные проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения: VIII Всероссийская межведомственная научная конференция: материалы и доклады (Орёл, 13–14 февраля 2013 г.). – Орёл: Академия ФСО России, 2013. С. 36-40.

13. Ковальков Д.А. Динамический анализ радиоканала случайного доступа системы связи с расширением спектра и ретрансляцией сигналов // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 1. С. 23-29.

14. Осипов Д.С. Система множественного доступа, использующая некогерентный пороговый прием, частотно-позиционное кодирование и динамически выделяемый диапазон частот, в условиях подавления полезного сигнала // Информационно-управляющие системы. 2010. № 6. С. 28-32.

15. Спирина Е.А. Оптимизация распределения информации в фиксированных сетях широкополосного радиодоступа с учётом внутрисистемных помех // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. № 9. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/5/text.pdf>

16. Чакрян В.Р. Многомерные стохастические и имитационные модели телетрафика и каналов передачи данных в условиях помех. Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Чакрян Вячеслав Робертович – Ростов-на-Дону, 2009. – 157 с.

17. Шабалин Е.А. Управление информационными потоками сетей радиосвязи в условиях радиоэлектронного противодействия. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Шабалин Евгений Арьевич – Н. Новгород, 2008. – 18 с.

18. Попков В.К. Математические модели связности. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2006. 490 с.

19. Попков В.К., Блукке В.П., Дворкин А.Б. Модели анализа устойчивости и живучести информационных сетей // Проблемы информатики. 2009. № 4. С. 63-78.

20. Сорокин А.А., Дмитриев В.Н., Чан Куок Тоан, Резников П.С. Оценка результатов использования протокола RIP в системах связи с динамической топологией сети методом имитационного моделирования // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 4. С. 85-93.

21. Перепелкин Д.А. Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 1 (47). С. 84-91.

22. Перепелкин Д.А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола IGRP при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 4 (42). С. 33-38.

23. Мейкшан В.И. Анализ влияния отказов оборудования на функционирование мультисервисной сети с адаптивной маршрутизацией // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. Технические науки. 2010. № 2 (15). С. 69-80.

24. Горев П.Г., Назаров А.С., Пасечников И.И. Определение связности в путевом пространстве состояний телекоммуникационной сети // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2012. Т. 17. № 5. С. 1360-1363.

25. Литвинов К.А., Пасечников И.И. Подходы к решению задачи маршрутизации в современных телекоммуникационных системах // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 1. С. 64-69.



26 Ковальков Д.А. Математические модели оценки надежности мультисервисного узла доступа // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 64-71.

27. Егунов М.М., Шувалов В.П. Анализ структурной надёжности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54-60.

28. Ластовченко М.М., Зубарева Е.А., Саченко В.О. Метод анализа эффективности реконфигурации топологии построения беспроводных мультисервисных сетей повышенной помехозащищенности // Управляющие системы и машины. 2009. № 6. С. 79-86.

29. Стромов А.В., Нечаев Ю.Б., Баев А.Д. Моделирование маршрутизации в беспроводной ячеистой сети с адаптацией к воздействию нескольких источников помех // Теория и техника радиосвязи. 2014. № 4. С. 46-52.

30. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Якимова И.А., Косарева Л.Н. Нахождение границ применимости протокола TCP в сетях связи с низкоскоростными каналами // XXIII Всероссийская научно-техническая конференция. – Серпухов: ВА РВСН (филиал г. Серпухов), 2014. – С. 290-259.

31. Тоискин В.Е., Цимбал В.А., Якимова И.А., Кабанович С.Г. Марковская модель доведения многопакетных сообщений по стеку протоколов TCP/IP с процедурой «скользящее окно» // Международная конференция RES-2014. – М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова, 2014. – С. 112–114.

32. Свинцов А.А., Солодуха Р.А. Аналитическая модель функционирования линии передачи данных с решающей обратной связью и оконным управлением потоком в условиях воздействия помех // Вестник Воронежского института МВД России. 2007. № 2. С. 197-202.

33. Паршуткин А. В. Концептуальная модель взаимодействия конфликтующих информационных и телекоммуникационных систем // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 5 (8). С. 2-6.

34. Антонович П.И., Макаренко С.И., Михайлов Р.Л., Ушанев К.В. Перспективные способы деструктивного воздействия на системы военного управления в едином информационном пространстве // Вестник Академии военных наук. 2014. № 3 (48). С. 93-101.

35. Макаренко С.И. Динамическая модель системы связи в условиях функционально-разноуровневого информационного конфликта наблюдения и подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 122-185. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2015-03/07-Makarenko.pdf>

36. Михайлов Р.Л. Модели и алгоритмы маршрутизации в транспортной наземно-космической сети связи военного назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 52-82. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2015-03/04-Mikhailov.pdf>