

УДК 623.624

ИССЛЕДОВАНИЕ КАНАЛЬНЫХ И СЕТЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СИГНАЛЬНО–ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ

С. И. Макаренко, Р. Л. Михайлов, Е. А. Новиков

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Статья получена 9 октября 2014 г.

Аннотация. В статье представлены исследования влияния периодического изменения сигнально–помеховой обстановки на каналные и сетевые показатели каналов связи в условиях использования адаптивных схем выбора вида модуляции сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования. В качестве каналных показателей исследовались пропускная способность и время задержки при передаче. В качестве сетевых показателей исследовались сетевая метрика канала связи и интенсивность сообщений об изменении метрики канала связи. В качестве объекта исследования выбраны спутниковые каналы связи, функционирующие по стандартам DVB–S2 и DVB–S в режимах SCPC, MCPC с TDMA и MCPC с S–Aloha.

Ключевые слова: DVB–S, DVB–S2, помехоустойчивость, канал связи, помехозащищенность, сигнально–помеховая обстановка, метрика сети, сетевые параметры, пропускная способность, радиоэлектронное подавление.

Abstract. The periodical vary of signal and noise situation` influence on data link layer and network layer parameters of communication channel in the conditions of adaptive ways of selection of signal` modulation and type anti–interference coding` rate are introduced in the article. The transfer capability and the time delay were researched as data link layer parameters. The metric of communication channel and the intensity of messages of its variation were researched as network layer parameters. The objects of research are satellite communication channels, which use DVB–S2 and DVB–S standards in SCPC, MCPC with TDMA and MCPC with S–Aloha behavior.

Key words: DVB–S, DVB–S2, anti–interference, noise immunity, communication channel, noise protection, signal and noise situation, metric of network, network layer parameters, transfer capability, radio rejection.

Введение

В настоящее время современные телекоммуникационные системы идут по пути интеграции в свою структуру разнородных каналов связи, основанных на использовании различных физических сред. При этом высокие требования по устойчивости функционирования телекоммуникационных систем вступают в противоречие с низкой помехоустойчивостью каналов радиосвязи к внешним помеховым воздействиям. 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 в интересах достижения максимальной битовой скорости передачи в текущих условиях. Вместе с тем, в работах [1–3] показано, что варьирование эффективной битовой пропускной способности отдельных каналов связи негативно влияет на функционировании протоколов маршрутизации сетевого уровня. 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. В работах [4–6] показано, что подобные периодические изменения пропускной способности отдельных радиоканалов обусловлены радиоэлектронным конфликтом в метасистеме «система связи – средство радиоэлектронного подавления», носят периодический характер и подчинены квазигармоническому закону.

В предыдущих работах авторов [1–9] были исследованы вопросы устойчивости сетей связи в условиях динамического изменения сигнально–

помеховой обстановки под воздействием преднамеренных помех. Однако вопросы реакции схем адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования в условиях изменяющейся сигнально–помеховой обстановки не исследовались. В данной статье представлены результаты таких исследований. В качестве объекта, на основе которого проводились исследования, были выбраны каналы спутниковой связи на основе стандартов DVB–S (Digital Video Broadcasting – Satellite) и DVB–S2. Предмет исследования:

- оценка влияния параметров изменения сигнально–помеховой обстановки на битовую скорость канала связи со схемой адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования;
- оценка влияния параметров изменения сигнально–помеховой обстановки на режимы функционирования спутниковых каналов SCPC (Single Channel per Carrier – один канал на одну несущую) и MCPC (Multiple Channels per Carrier – несколько каналов на одну несущую);
- оценка влияния параметров изменения сигнально–помеховой обстановки на показатели метрики отдельного канала связи в составе сети для протоколов маршрутизации;
- оценка влияния сложности схемы адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования на изменение битовой пропускной способности и показатель метрики отдельного канала связи.

В качестве исходных данных использовались работы [10–15] и результаты математического моделирования спектральной эффективности каналов DVB–S и DVB–S2 [16].

К ранее проведенным исследованиям влияния изменения сигнально–помеховой обстановки на каналные параметры стоит отнести работы [18–25], рассматривающие различные аспекты влияния параметров сигнально–помеховой обстановки, а так же процесса распространения электромагнитных

волн на эффективность передачи по радиоканалам связи. Однако в этих работах преимущественно рассмотрены вопросы оценки параметров канального уровня: пропускной способности и времени задержки. Элементом новизны представленного исследования от вышеуказанных работ является дополнительная оценка параметров сетевого уровня в условиях допущения о квазигармоническом законе изменении пропускной способности каналов связи как результате преднамеренных помеховых воздействий. Также к элементу новизны стоит отнести учет схем адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования.

1. Анализ параметров функционирования каналов связи по протоколам DVB-S и DVB-S2

Особенностью реализации протоколов DVB-S и DVB-S2 для каналов спутниковой связи является наличие режима ACM (Adaptive Coding and Modulation) для адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в зависимости от отношения сигнал/шум+помеха (ОСШП) на входе приемника. Показателем ОСШП является отношение энергии на сигнальный символ к спектральной плотности аддитивного белого гауссовского шума, значение которого соответствует суммарному уровню воздействия как естественных, так и аддитивных преднамеренных помех на канал связи. При этом для случая воздействия мультипликативных преднамеренных помех производится предварительный перерасчет эквивалентного значения ОСШП в соответствии с методиками, представленными в работах [17-18]. Режим ACM позволяет осуществлять гибкое регулирование параметрами кодирования и модуляции передатчика в зависимости от значения ОСШП на входе приемника при заданном уровне достоверности приема. При этом параметры кодирования и модуляции могут изменяться от кадра к кадру. Для достижения высокой спектральной эффективности в стандарте DVB-S определены различные скорости кодирования FEC (Forward Error Correction) при различных видах модуляции: QPSK, 8-PSK, 16-QAM. В стандарте DVB-S2 предусматривается

большее число скоростей кодирования FEC (1/4...9/10) при более ёмких видах модуляции (QPSK, 8-PSK, 16-APSK и 32-APSK). Для защиты от ошибок приема сигналов в стандартах DVB-S и DVB-S2 используется перемежение данных и наложение двухуровневого кода для прямой коррекции ошибок FEC. В стандарте DVB-S в качестве внутреннего кода используется свёрточное кодирование, в качестве внешнего – код Рида-Соломона. В стандарте DVB-S2 в качестве внутреннего кода используется код LDPC, в качестве внешнего – код БЧХ (код Боуза-Чоудхури-Хоквенгема). Таким образом, благодаря возможности адаптивного выбора вида модуляции и скоростей кодирования каналы могут работать в широком диапазоне значений ОСШП с показателем спектральной эффективности, близким к теоретически достижимому. Так, канал связи DVB-S2, может работать при ОСШП от -2,4 дБ до 16 дБ, при этом для этого канала доступны показатели эффективности спектра от 0,5 до 4,5 (бит/с)/Гц. Схемы адаптивного выбора вида модуляции и скорости кодирования для DVB-S и DVB-S2 приведены в таблицах 1, 2 по данным, представленным в работах [11–15].

Таблица 1. Параметры схемы адаптивного выбора созвездия сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования для канала DVB-S [11–15]

| ОСШП в полосе частот канала [дБ] | Тип сигнала | Скорость кодирования | Коэффициент эффективности спектра [(бит/с)/Гц] |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|--|
| 2,7 | QPSK <i>I=2</i> | 1/2 | 1 |
| 4,3 | | 2/3 | 1,33 |
| 5,5 | | 3/4 | 1,5 |
| 6,6 | | 5/6 | 1,67 |
| 7,2 | | 7/8 | 1,75 |
| 8,2 | 8-PSK <i>I=3</i> | 3/4 | 2,25 |
| 10,4 | | 5/6 | 2,5 |
| 11,25 | | 7/8 | 2,625 |
| 11,5 | 16-QAM <i>I=4</i> | 5/6 | 3,33 |
| 13,2 | | 7/8 | 3,5 |

Таблица 2. Параметры схемы адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования для канала DVB-S2 [11–15]

| ОСШП в полосе частот канала [дБ] | Тип сигнала | Скорость кодирования R | Коэффициент эффективности спектра [(бит/с)/Гц] |
|----------------------------------|------------------|--------------------------|--|
| -2,35 | QPSK $I=2$ | 1/4 | 0,49 |
| -1,24 | | 1/3 | 0,66 |
| -0,3 | | 2/5 | 0,79 |
| 1 | | 1/2 | 1 |
| 2,23 | | 3/5 | 1,19 |
| 3,1 | | 2/3 | 1,32 |
| 4,03 | | 3/4 | 1,49 |
| 4,68 | | 4/5 | 1,59 |
| 5,18 | | 5/6 | 1,65 |
| 6,2 | | 8/9 | 1,77 |
| 6,42 | | 9/10 | 1,79 |
| 5,5 | 8-PSK $I=3$ | 3/5 | 1,78 |
| 6,62 | | 2/3 | 1,98 |
| 7,91 | | 3/4 | 2,23 |
| 9,35 | | 5/6 | 2,48 |
| 10,69 | | 8/9 | 2,65 |
| 10,98 | | 9/10 | 2,68 |
| 8,97 | 16-APSK $I=4$ | 2/3 | 2,64 |
| 10,21 | | 3/4 | 2,97 |
| 11,03 | | 4/5 | 3,17 |
| 11,61 | | 5/6 | 3,3 |
| 12,89 | | 8/9 | 3,52 |
| 13,13 | | 9/10 | 3,57 |
| 12,73 | 32-APSK $I=5$ | 3/4 | 3,7 |
| 13,64 | | 4/5 | 3,95 |
| 14,28 | | 5/6 | 4,12 |
| 15,69 | | 8/9 | 4,4 |
| 16,05 | | 9/10 | 4,45 |

На рис. 3 приведены результаты моделирования значений показателя эффективности спектра для заданной вероятности ошибки пакета 10^{-7} для каналов DVB-S2 и DVB-S, представленные в работе [16]. При использовании модели канала с гауссовым шумом увеличение пропускной способности канала DVB-S2 составляет 20–35% в сравнении с DVB-S при тех же условиях передачи. Такое увеличение пропускной способности канала DVB-S2 соответствует улучшению условий приема на 2...2,5 дБ при той же эффективности спектра.

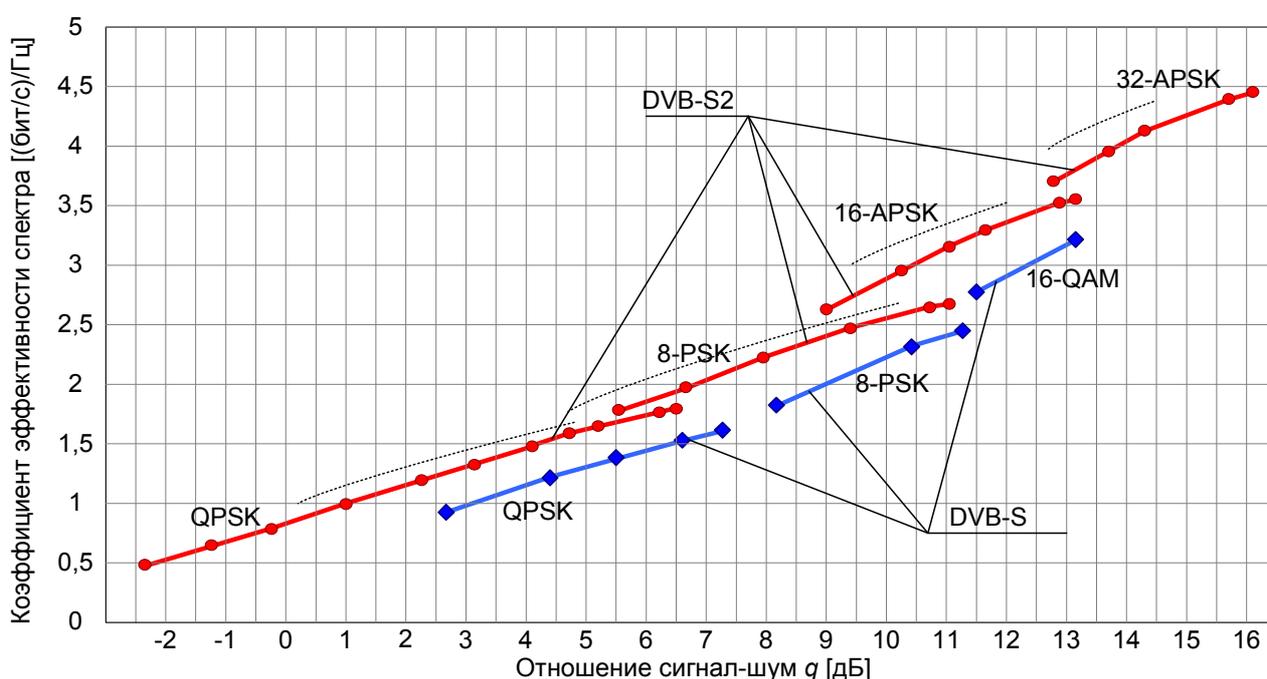


Рис. 1. Результаты моделирования значений показателя эффективности спектра для каналов DVB-S и DVB-S2

2. Параметры изменения сигнально-помеховой обстановки

В работах [4, 6, 17, 18] была рассмотрена динамическая модель радиоэлектронного конфликта, соответствующая метасистеме «система связи – средство радиоэлектронного подавления». В работах [4, 5] показано, что отображением развития радиоэлектронного конфликта на параметры канала связи является периодическое изменение его пропускной способности, которое подчинено квазигармоническому закону. Для формализованного описания

периодического изменения пропускной способности канала связи в работах [4, 5] предложено использовать зависимость показателя отношения сигнал к сумме шум и помеха $q(t)$:

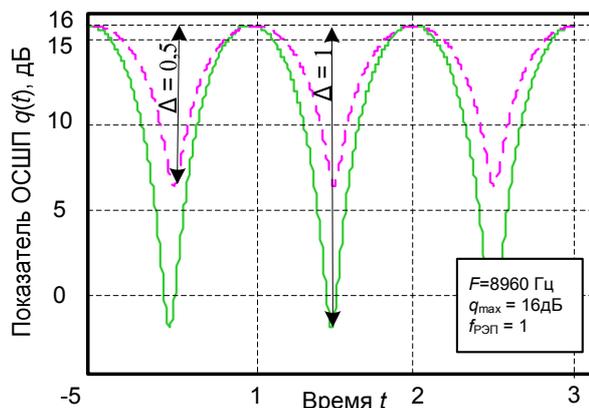
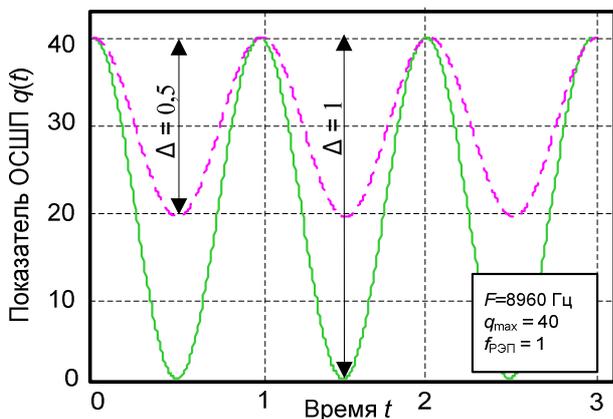
$$q(t) = \begin{cases} q_{\max} \left(\frac{\Delta}{2} \cos(2\pi f_{PЭП} (t - t_{PP})) + \left(1 - \frac{\Delta}{2}\right) \right), & t > t_{PP} \\ q_{\max}, & t \leq t_{PP} \end{cases}, \quad (1)$$

где: q_{\max} – значение ОСШП в условиях отсутствия преднамеренных помех; Δ – значение, определяющее глубину изменения ОСШП $q(t)$ относительно базового значения q_{\max} ($\Delta=0\dots 1$); $f_{PЭП}$ – частота изменения показателя ОСШП $q(t)$; t_{PP} – длительность ведения радиоразведки перед циклом подавления (по умолчанию $t_{PP}=0$).

В дальнейшем расчеты будут выполняться для показателя ОСШП выраженных в децибелах, в связи с чем будет использовано выражение

$$q(t) = \begin{cases} 10 \lg \left(q_{\max} \left(\frac{\Delta}{2} \cos(2\pi f_{PЭП} (t - t_{PP})) + \left(1 - \frac{\Delta}{2}\right) \right) \right), & t > t_{PP} \\ 10 \lg (q_{\max}), & t \leq t_{PP} \end{cases} \text{ [дБ]}. \quad (2)$$

Значения ОСШП в соответствии с выражениями (1) и (2) приведены на рис. 2. Основными параметрами преднамеренных помех, определяющими изменения сигнально–помеховой обстановки, являются: значения Δ , которые определяют глубину изменения ОСШП $q(t)$ относительно базового значения q_{\max} ; значения $f_{PЭП}$, которые определяют периодичность изменения показателя ОСШП $q(t)$.



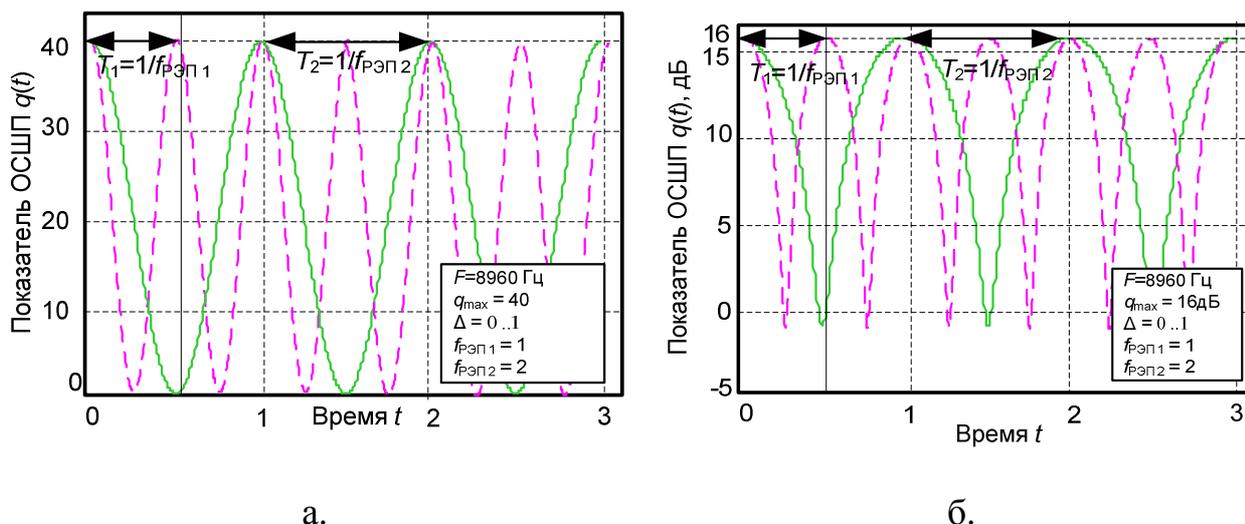


Рис. 2. Изменение сигнально–помеховой обстановки по показателю ОСШП:
 а. – в соответствии с выражением (1); б. – в соответствии с выражением (2)

3. Модель влияния изменения сигнально–помеховой обстановки на канальном уровне

Эффективная битовая пропускная способность канала связи в полосе 1 Гц равна спектральной эффективности канала и зависит от складывающейся сигнально–помеховой обстановки. Таким образом, она определяется значением ОСШП $q(t)$, а также емкостью используемого сигнала $I(q)$ и скоростью кода $R(q)$:

$$C_{1Hz}(q) = I(q) R(q). \quad (3)$$

В режиме работы SCPC вся пропускная способность канала $C(q)$ используется для соединения «точка» – «точка» между двумя абонентами. Соответственно, битовая пропускная способность канала с полосой F будет составлять:

$$C_{SCPC}(q) = F I(q) R(q) \quad (5)$$

В режиме MCPC, при временном разделении абонентов TDMA (Time Division Multiple Access), пропускная способность канала будет снижаться пропорционально информационной нагрузке от абонентов. При этом возможно два варианта временного разделения абонентов:

- фиксированное разделение пропорционально количеству абонентов N или информационной нагрузке отдельных абонентов λ_n ;
- случайный множественный доступ абонентов.

При фиксированном разделении канала пропорционально интенсивности информационного трафика на N абонентов эффективная пропускная способность канала, выделяемая каждому абоненту, составит:

$$C_{MCPC}(q) = F I(q) R(q)/N. \quad (6)$$

Время задержки при передаче сообщения объемом D_{mes} [бит] по такому каналу составит:

$$T_{зад} = \frac{D_{mes}}{C_{MCPC}} + \frac{d_{sot}}{c}, \quad (7)$$

где: d_{sot} – дальность спутникового канала в км (в работе используется допущение о том, что дальность равна высоте орбиты спутника – ретранслятора, что при нахождении спутника у линии горизонта может привести к существенным погрешностям вычислений); $c=300\,000$ км/с.

В случае, когда абоненты совместно используют канал на основе случайного множественного доступа по наиболее распространенному протоколу S–Aloha, пропускная способность разделяемого канала существенно зависит от суммарной информационной нагрузки от всех абонентов ρ ($0 \leq \rho \leq 1$) [26]:

$$C_{S-Aloha}(\rho, q) = \frac{\rho C(q_{max})(K-1)e^{-\rho C(q_{max})/C(q)}}{K - e^{-\rho C(q_{max})/C(q)}} \text{ [бит/с]}, \quad (8)$$

где: $C(q)=F I(q)R(q)$ – пропускная способность канала связи при текущем значении ОСШП q ; $C(q_{max})=F I(q_{max})R(q_{max})$ – пропускная способность канала связи при максимальном значении ОСШП q_{max} ; K – количество попыток передачи пакета в сети S–Aloha в случае, если первая передача завершилась неудачей ($K \geq 15$); ρ – суммарная информационная нагрузка от всех абонентов.

Задержка при передаче сообщения объемом D_{mes} [бит] по каналу со случайным множественным доступом абонентов по протоколу S–Aloha составит [26]:

$$T_{\text{зад}}(\rho, C(q)) = \frac{D_{\text{mes}}}{C(q)} \left(\frac{2d_{\text{сот}} C(q)}{cD_{\text{mes}}} + \frac{K - Ke^{-\frac{\rho C(q_{\text{max}})}{C(q)}}}{(K-1)e^{-\frac{\rho C(q_{\text{max}})}{C(q)}}} \left(\frac{2d_{\text{сот}} C(q)}{cD_{\text{mes}}} + \frac{K-1}{2} + 1 \right) + 1 \right), \quad (9)$$

обозначения имеют тот же физический смысл, что и в выражениях (7) и (8).

Фактически выражения (5–9) определяют зависимость параметров канального спутникового канала от параметров физического уровня при функционировании каналов в режимах SCPC и MCPC.

Рассмотрим показатели сетевого уровня. Метрика M , как основной показатель качества канала связи на сетевом уровне модели OSI определяет количественную меру качественных характеристик канала связи – времени передачи, надежности и скорости. При вычислении пути в сетях протоколы маршрутизации используют критерий минимизации показателя метрики пути

$$\sum_i M_i \rightarrow \min.$$

Различные протоколы маршрутизации используют различные показатели метрики сети. В настоящее время в сетях получили распространение протоколы маршрутизации двух видов [2, 3, 27]:

- протоколы, основанные на учете состояния каналов (Link State Algorithms – LSA), как правило, базирующиеся на алгоритме Дейкстры;
- протоколы, основанные на учете вектора расстояний в сети (Distance Vector Algorithms – DVA), как правило, базирующиеся на алгоритме Беллмана – Форда.

Характерными примерами протоколов маршрутизации соответствующего типа являются протоколы [2, 3, 27]:

- протокол OSPF (Open Shortest Path First), открытый протокол типа LSA, получивший широкое распространение для маршрутизации в глобальных сетях;
- протокол IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), закрытый протокол маршрутизации типа DVA, разработанный компанией Cisco для маршрутизации потоков в сетях, построенных на ее оборудовании.

Метрика отдельного канала связи в протоколе OSPF вычисляется по формуле [3, 27, 28]:

$$M = k_1 \frac{10^8}{C} + k_2 T_{\text{зад}}, \quad (10)$$

где: C – пропускная способность канала связи, определяемая в соответствии с выражениями (5), (6), (8) [бит/с]; $T_{\text{зад}}$ – задержка передачи в канале связи, определяемая в соответствии с выражениями (7) или (9) [с]; k_1, k_2 – коэффициенты, определяющие значимость параметров (по умолчанию для протокола OSPF $k_1=1, k_2=0$).

Метрика отдельного канала связи в протоколе IGRP вычисляется по формуле [2, 27]:

$$M = \left(k_1 \frac{10^7}{C} + \frac{k_2 \frac{10^7}{C}}{256(1-\rho)} + k_3 \frac{T_{\text{зад}}}{10} \right) \frac{k_5}{N + k_4}, \quad (11)$$

где: M – метрика канала связи; C – пропускная способность канала связи в отсутствии нагрузки [бит/с]; ρ – нагрузка канала связи, в диапазоне 0..1; N – надежность канала связи, как доля успешно переданных по каналу связи пакетов; $T_{\text{зад}}$ – задержка передачи в канале связи, определяемая в соответствии с выражениями (7) или (9) [с]; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – коэффициенты, определяющие значимость параметров.

По умолчанию для протокола IGRP $k_2 = k_4 = k_5 = 0$. В этом случае метрика канала связи в протоколе IGRP будет соответствовать показателю метрики в протоколе OSPF, с коэффициентом 0,1:

$$M = k_1 \frac{10^7}{C} + k_3 \frac{T_{\text{зад}}}{10} = \frac{1}{10} \left(k_1 \frac{10^8}{C} + k_3 T_{\text{зад}} \right). \quad (12)$$

В связи с этим, для оценки сетевых параметров канала связи предлагается использовать показатель метрики равный:

$$M = k_1 \frac{10^8}{C} + k_2 T_{\text{зад}}, \quad \text{где } k_1 = k_2 = 1. \quad (13)$$

Как показано в работах [1, 2, 3, 27], маршрутизатор реагирует на изменение метрики канала связи, если ее значение увеличилось на 10% или

более. В этом случае передача данных приостанавливается и маршрутизатор осуществляет пересчет путей передачи в сети. Таким образом, в качестве показателя процесса отказов канала связи на сетевом уровне можно ввести количество сообщений об изменении метрики отдельного канала. В качестве итогового показателя качества функционирования канала связи на сетевом уровне в условиях изменяющейся сигнально–помеховой обстановки предлагается использовать интенсивность сообщений об изменении метрики λ_M , выдаваемых маршрутизатором на основе анализа параметров каналов связи, рассчитываемую как среднее значение количества сообщений в единицу времени:

$$\lambda_M = \frac{1}{T_{набл}} \sum_{i \in T_{набл}} N_i [c^{-1}], \quad N_i = \begin{cases} 1, & M_i \geq 1, 1M_{i-1} \\ 0, & M_i < 1, 1M_{i-1} \end{cases}. \quad (14)$$

При этом оценку интенсивности λ_M предлагается вести в два этапа. Сначала оценить интенсивность сообщений об изменении метрики λ_{M1} на длительности полупериода изменения ОСШП $q(t)$ при $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$:

$$\lambda_{M1} = \frac{1}{2f_{РЭП}} \left(\sum_{t \in [0, 1/2f_{РЭП}]} N_t \right) [c^{-1}], \quad N_t = \begin{cases} 1, & M_t \geq 1, 1M_{t-1} \\ 0, & M_t < 1, 1M_{t-1} \end{cases}, \quad (15)$$

а в дальнейшем оценить значение интенсивности λ_M с учетом λ_{M1} и $f_{РЭП}$ на всем этапе функционирования $t \in [0, \infty)$.

Схема взаимосвязи исследуемых канальных и сетевых параметров для спутниковых каналов DVB–S и DVB–S2 приведена на рис. 3.

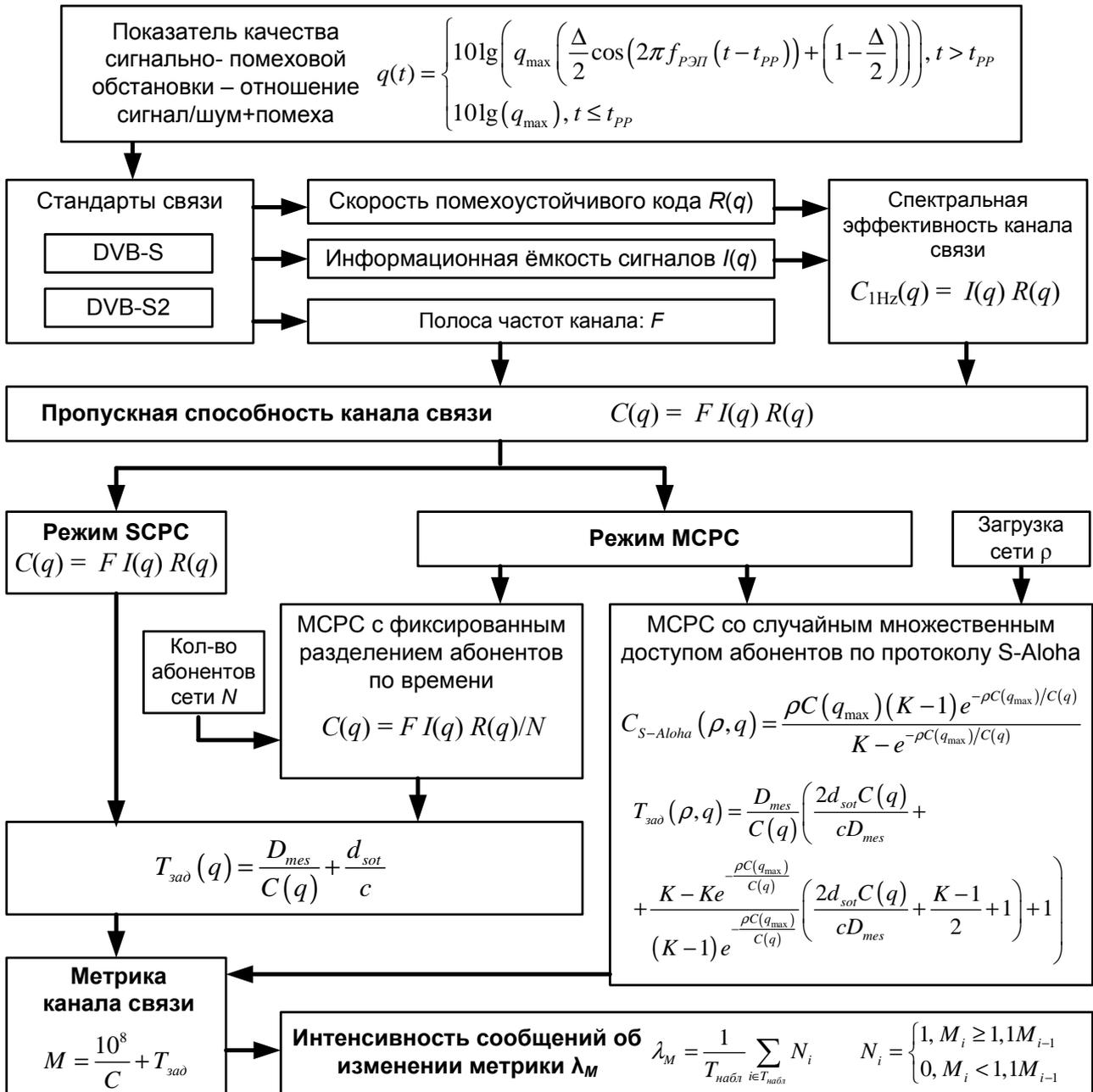


Рис. 3. Схема взаимосвязи исследуемых канальных и сетевых параметров для спутниковых каналов DVB-S и DVB-S2

Исследование влияния изменения сигнально-помеховой обстановки проводилось в три этапа. Вначале исследовались канальные характеристики – пропускная способность и время передачи при допущении о монотонном изменении ОСШП. В качестве диапазона монотонности изменения ОСШП принимается интервал монотонного снижения значений функции $q(t)$ за полупериод воздействия $1/2f_{\text{РЭП}}$, то есть на $t \in [0, 1/2f_{\text{РЭП}}]$ (рис. 2). На втором

этапе исследовались сетевые характеристики – метрика канала связи и интенсивность сообщений об изменении метрики при аналогичном допущении. На третьем этапе исследовались каналные и сетевые характеристики в условиях периодического изменения ОСШП при допущении о том, что переключение видов модуляций и соответствующих скоростей кодов происходит мгновенно.

4. Исследование влияния изменения сигнально–помеховой обстановки на пропускную способность канала SCPC

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 3, проведено исследование влияния изменения сигнально–помеховой обстановки по показателю ОСШП $q(t)$ на пропускную способность базового канала связи SCPC с шириной полосы частот $F=8960$ Гц. Ограничения на исходные данные моделирования: $q_{max}=40$; $\Delta=0,986$; $D_{mes}=256$ бит; $d_{sol}=35876$ км (ГСО); $f_{РЭП} = 1$.

На рис. 4 представлены графики изменения пропускной способности канала C_{1Hz} в расчете на 1 Гц полосы частот F при изменении ОСШП $q(t)$. Глубина изменения $q(t)$ определяется параметром Δ .

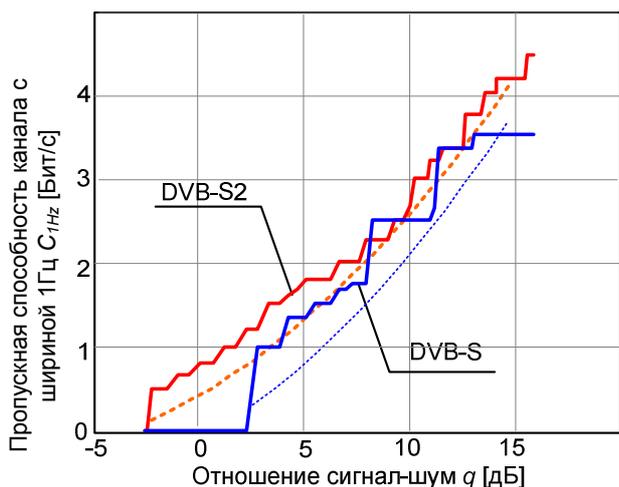


Рис. 4. Изменение пропускной способности канала SCPC в расчете на 1 Гц

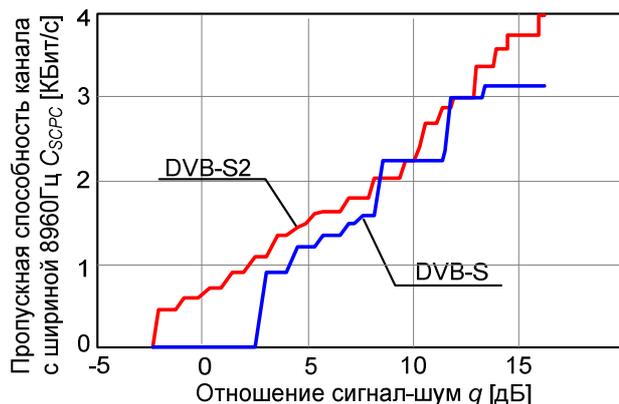


Рис. 5. Изменение пропускной способности базового канала SCPC с шириной полосы $F=8960$ Гц

На рис. 5 представлена зависимость пропускной способности базового спутникового канала C_{SCPC} с полосой $F=8960$ Гц, рассчитанные в соответствии с выражением (3). Данная зависимость характерна для канала SCPC, в котором отсутствуют дополнительные механизмы разделения пропускной способности между абонентами.

5. Исследование влияния изменения сигнально–помеховой обстановки на пропускную способность канала MCPC с фиксированным и случайным временным разделением абонентов

Изменение пропускной способности канала связи существенно влияет на характеристики канального уровня модели OSI в случае, если этот канал используется для организации сети множественного доступа. На рис. 6 представлены расчеты для пропускной способности абонентского канала связи для сети из N абонентов, выполненные для каналов DVB–S и DVB–S2 в соответствии с выражением (6) при следующих ограничениях: $q_{max}=40$; $\Delta=0,986$; $D_{mes}=256$ бит; $d_{sor}=35876$ км (ГСО); $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$; $f_{РЭП} = 1$; $N=2, 4, 8$.

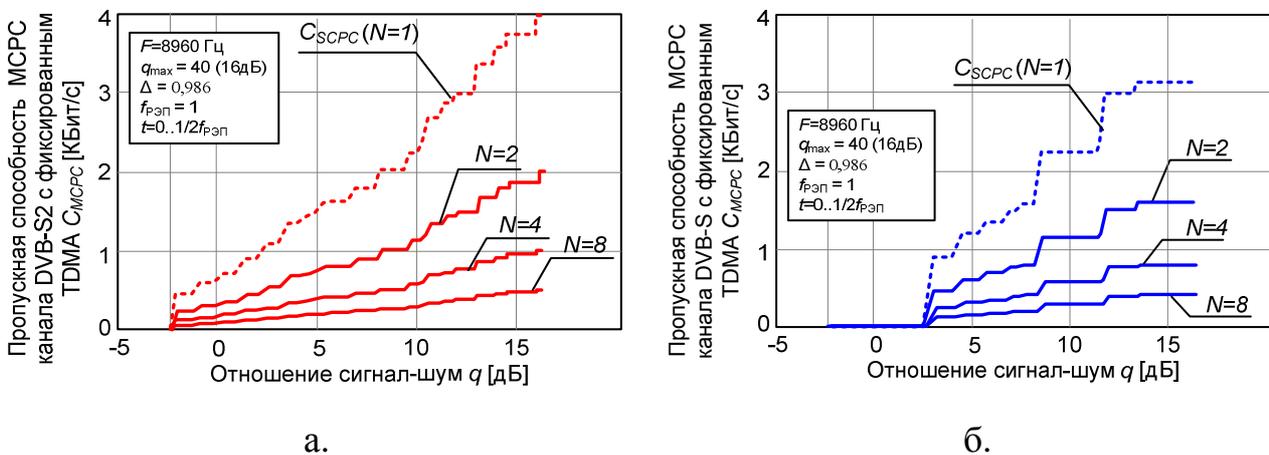
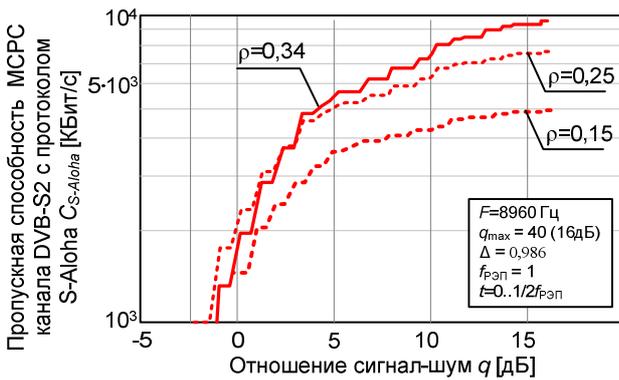


Рис. 6. Оценка пропускной способности абонентского канала связи C_{MCPC} с TDMA для сети из N абонентов

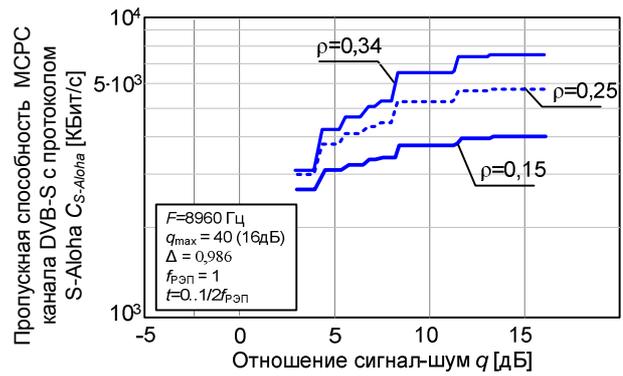
Анализ графиков, представленных на рис. 6, показал, что пропускная способность абонентских каналов C_{MCPC} при фиксированном временном

разделении обратно пропорциональна количеству абонентов N и прямо пропорциональна значению ОСШП q .

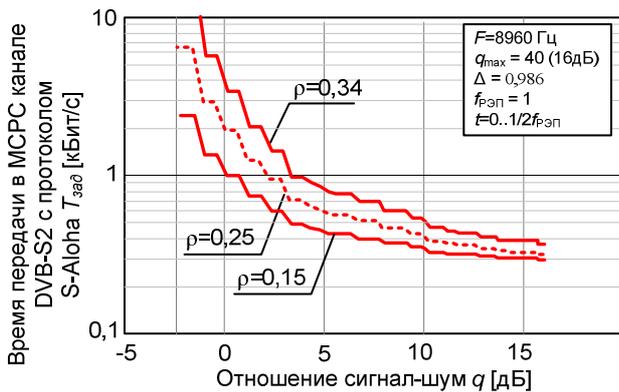
На рис. 7 представлены расчеты канальных параметров (пропускной способности и времени передачи) для канала со случайным множественным доступом абонентов по протоколу S-Aloha с уровнем информационной нагрузки ρ , выполненные для каналов DVB-S и DVB-S2 в соответствии с выражением (7) при следующих ограничениях: $q_{max}=40$; $\Delta=0,986$; $f_{РЭП}=1$; $D_{mes}=256$ бит; $d_{sot}=35876$ км (ГСО); $K=15$; $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$; $\rho=0,15, 0,25, 0,34$. При этом, как показано в работах [10, 17], уровень информационной нагрузки, при котором функционирует сеть S-Aloha, соответствует ограничению $\rho \leq 0,34$, что было учтено в условиях моделирования.



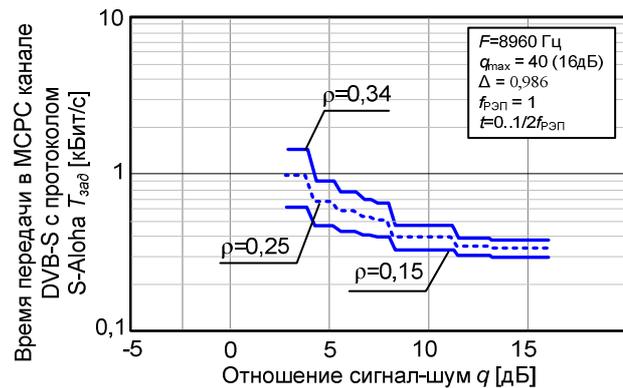
а.



б.



в.



г.

Рис. 7. Оценка пропускной способности $C_{S-Aloha}$ и времени передачи $T_{S-Aloha}$ в абонентском канале связи с протоколом S-Aloha для сети с нагрузкой ρ

6. Исследование влияния изменения сигнально–помеховой обстановки на сетевые параметры спутниковых каналов

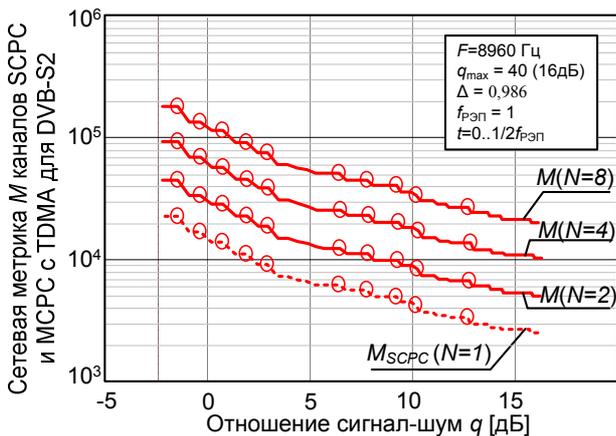
На рис. 8 представлены расчеты значений сетевого параметра – метрики каналов связи DVB–S и DVB–S2, в соответствии с выражением (13) для случаев, когда канал связи представлен в виде:

а) канала SCPC;

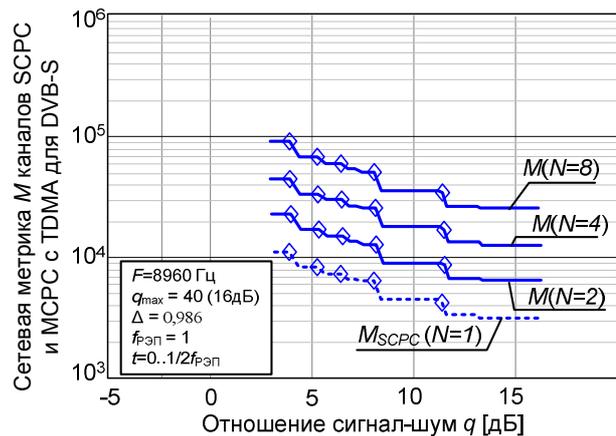
б) канала MCPC с фиксированным временным разделением абонентов (для количества абонентов $N=2, 4, 8$);

в) канала MCPC со случайным временным разделением абонентов по протоколу S–Aloha (в условиях информационной нагрузки $\rho=0,15, 0,25, 0,34$).

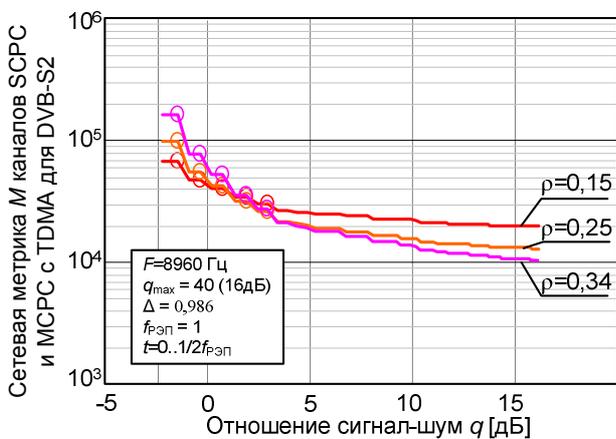
Общие ограничения при моделировании: $q_{max}=40$ (16 дБ); $\Delta=0,986$; $f_{РЭП}=1$; $K=15$; $D_{mes}=256$ бит; $d_{sot}=35876$ км (ГСО); $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$.



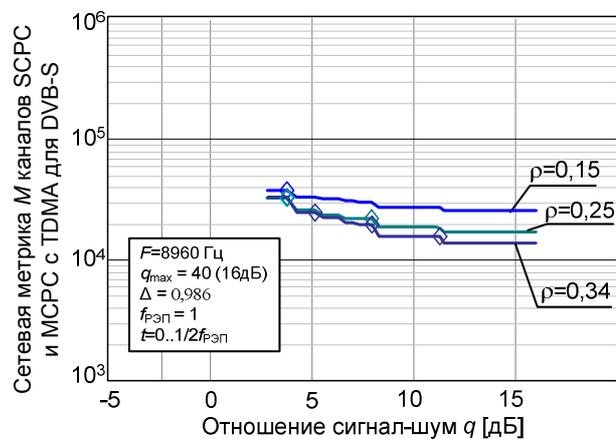
а.



б.



в.



г.

Рис. 8. Оценка изменения сетевой метрики каналов связи

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 8, показал следующее поведение метрики канала связи $M(q)$ на интервале времени исследования $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$. При фиксированном временном разделении абонентов для канала МСРС и для SCРС увеличение количества абонентов принципиально не изменяет зависимости $M(q)$, а лишь повышает значения M на величину, пропорциональную количеству абонентов N (рис. 8 а, б). При использовании канала МСРС в режиме случайного множественного доступа по протоколу S–Aloha наблюдается более быстрое убывание функции $M(q)$ при увеличении показателя загрузки сети ρ (рис. 8 б, в). Увеличение сложности схемы адаптивного выбора видов модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования (при переходе от DVB–S к DVB–S2) существенно увеличивают диапазон значений (на величину до 8..10 раз), в котором изменяется метрика канала связи $M(q)$ (рис. 8 а, б).

Моменты выдачи сообщений об изменении метрики $M(q)$ на величину более 10% на рис. 8 обозначены значками. Анализируя показатель интенсивности сообщений об изменении метрики λ_{M1} , рассчитываемый в соответствии с выражением (14) на интервале времени исследования $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$, можно сделать следующие выводы. При фиксированном временном разделении абонентов для канала МСРС и для SCРС глубина изменения ОСШП $q(t)$, задаваемая параметром Δ в выражении (2), определяет интенсивность сообщений об изменении метрики канала связи λ_{M1} , поступающих за один полупериод воздействия $1/2f_{РЭП}$. Увеличение параметра Δ ведет к увеличению интенсивности λ_{M1} (рис. 9), при этом значение интенсивности сообщений об изменении метрики на интервале $1/2f_{РЭП}$ можно аппроксимировать убывающей квазиэкспоненциальной зависимостью.

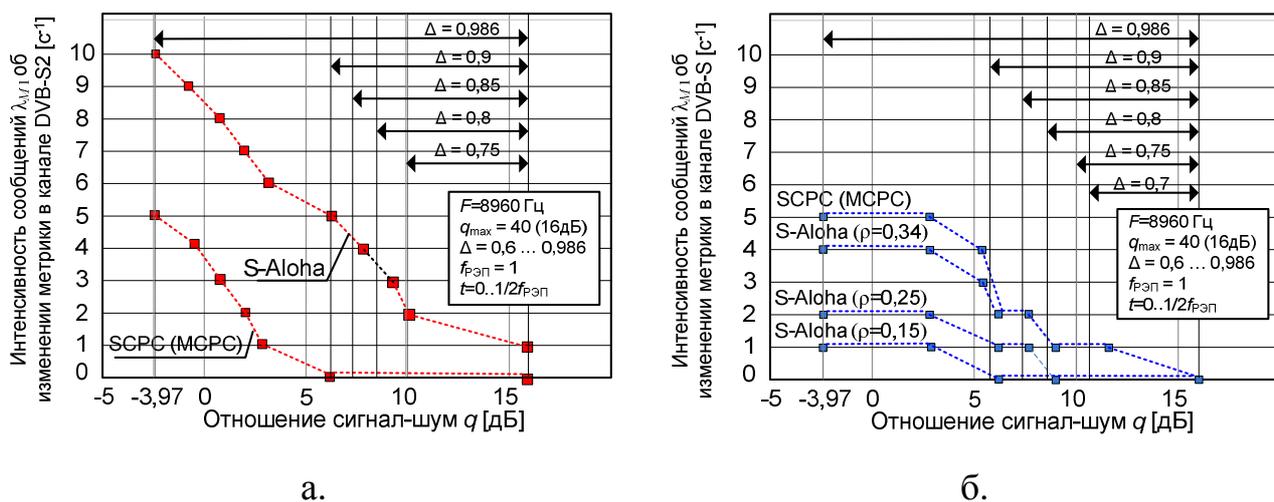


Рис. 9. Оценка интенсивности сообщений об изменении метрики канала связи λ_{M1} в зависимости от глубины изменения ОСШП

Для канала MCPC с разделением абонентов по протоколу S-Aloha интенсивность сообщений об изменения метрики канала связи λ_{M1} , поступающих за один полупериод воздействия $1/2f_{\text{РЭП}}$, определяется как параметром Δ , так и общей информационной нагрузкой канала ρ ($\rho \leq 0,34$). Увеличение параметров Δ и ρ ведет к увеличению интенсивности λ_{M1} , что хорошо наблюдается для зависимости $\lambda_{M1}(q)$ для канала DVB-S (рис. 9б), при этом минимальное число сообщений об изменении метрики на интервале $t \in [0, 1/2f_{\text{РЭП}}]$ можно аппроксимировать убывающей квазиэкспоненциальной зависимостью (рис. 9).

Статистическая оценка плотности распределения интервалов времени между поступлениями отдельных сообщений $f^*(\tau)$ об изменении метрики канала связи на интервале $t \in [0, \infty)$ при изменении показателя ОСШП $q(t)$ в соответствии с выражением (2) приведено на рис. 10. На данном рисунке значения интервалов времени между поступлениями отдельных сообщений τ нормированы к значению периода воздействия $T=1/f_{\text{РЭП}}$. Анализ графиков на рис. 10 показывает, что распределение времени τ для каналов SCPC и MCPC с фиксированном временным разделением абонентов может быть аппроксимировано квазиэкспоненциальной зависимостью. Распределение времени τ для каналов MCPC с протоколом S-Aloha может быть

аппроксимировано равномерным или линейным законом плотности вероятности.

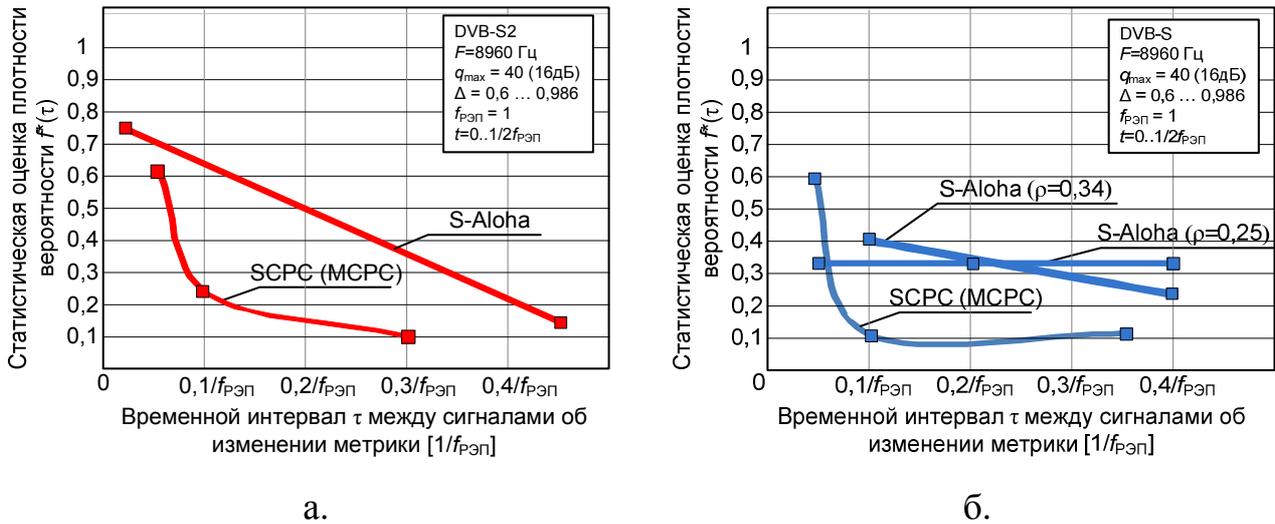


Рис. 10. Оценка плотности распределения интервалов времени между поступлениями отдельных сообщений $f^*(\tau)$ об изменении метрики канала связи

Дополнительное исследование показало, что для канала SCPC и MCPC (как в режиме фиксированного TDMA, так и в режиме S-Aloha) увеличение/уменьшение выделенной полосы частот F для каналов DVB-S и DVB-S2 не меняет поведение функции $M(q)$, представленное на рис. 8 а, б, а лишь увеличивает/уменьшает ее значения на величину, пропорциональную значению полосы частот F в выражениях (5), (6) и (8). При изменении выделенной полосы частот F для указанных случаев интенсивность λ_{M1} не изменяется.

Таким образом, результаты исследования интенсивности сообщений об изменении метрики канала связи λ_{M1} на интервале времени $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$ показывают, что усложнение схемы адаптивного изменения параметров канала связи (вида модуляции и скорости кодирования), а также увеличение загрузки канала множественного доступа, ведет к увеличению значения λ_{M1} .

Исследуем значения интенсивности сообщений об изменении метрики канала связи λ_M на интервале времени $t \in [0, \infty)$ с учетом результатов полученных для λ_{M1} на полупериоде воздействия $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$. В случае

$t \in [0, \infty)$ за каждый полупериод времени $t \in [n/2f_{\text{РЭП}}, (n+1)/2f_{\text{РЭП}}]$, $n=0, 1, 2, \dots$, будет происходить процесс изменения метрики, аналогичный представленному выше для полупериода $t \in [0, 1/2f_{\text{РЭП}}]$ ($n=0$). Причем если n – нечетное, то это соответствует полупериоду снижения метрики $M(q)$, а n – четное соответствует полупериоду роста метрики $M(q)$. При этом в зависимости от настройки протокола маршрутизации сообщения об изменении метрики могут отправляться в двух случаях: при повышении метрики канала (ухудшении его качества); при изменении метрики канала связи (ухудшении или улучшении его качества). Второй случай позволяет маршрутизатору оперативно, в динамике, реагировать, в том числе, на улучшение параметров канала связи, однако это, как будет показано ниже, ведет к увеличению (удвоению) интенсивности сообщений об изменении метрики канала связи.

Полная интенсивность сообщений об изменении метрики канала связи λ_M будет определяться значением интенсивности λ_{M1} и частоты воздействия $f_{\text{РЭП}}$:

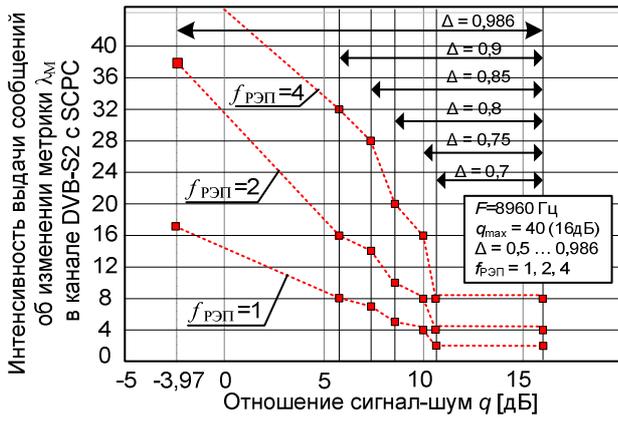
– для случая реакции только на повышение метрики канала

$$\lambda_M = f_{\text{РЭП}} \lambda_{M1} [c^{-1}]; \quad (16)$$

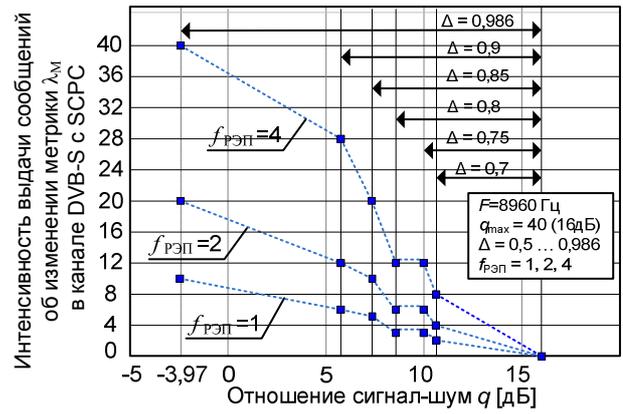
– для случая реакции на изменение (повышение и снижение) метрики канала

$$\lambda_M \approx 2 f_{\text{РЭП}} \lambda_{M1} [c^{-1}]. \quad (17)$$

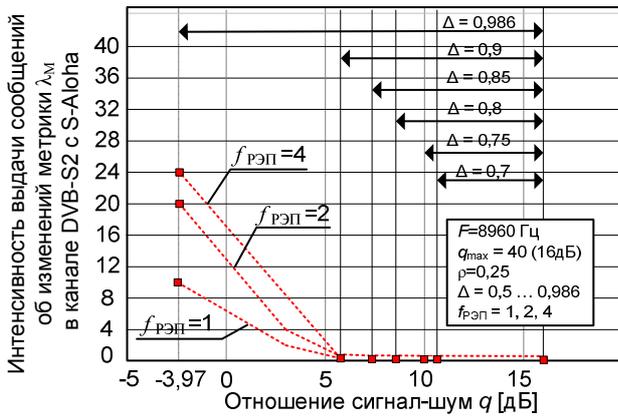
Зависимости интенсивности сообщений об изменении метрики канала связи λ_M при различных частотах $f_{\text{РЭП}}$, рассчитанные для случая, определяемого выражением (17) для каналов SCPC и MCPC с S-Aloha (при загрузке $\rho=0,25$), приведены на рис. 11.



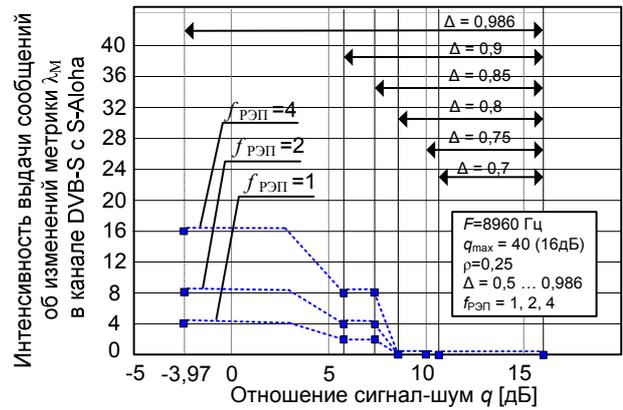
а.



б.



в.



г.

Рис. 11 Зависимость интенсивности λ_M сообщений об изменении метрики канала связи при различных частотах $f_{РЭП}$

Анализ графических зависимостей на рис. 11 показывает, что увеличение частоты воздействия $f_{РЭП}$ ведет к пропорциональному увеличению интенсивности сообщений об изменении метрики канала связи λ_M . Проведенное моделирование, как правило, подтверждает зависимость (17), однако, как показано на рис. 11в, в некоторых случаях рост λ_M не пропорционален значению $f_{РЭП}$, и для таких случаев выражение (17) примет вид $\lambda_M \leq 2 f_{РЭП} \lambda_{M1}$. Интересным выводом по графическим зависимостям, представленным на рис. 11, является то, что одно и тоже значение интенсивности λ_M может быть достигнуто как за счет изменения энергетических параметров ОСШП через параметр Δ , так и за счет увеличения частоты воздействия $f_{РЭП}$ при ограниченном диапазоне глубины изменения ОСШП (рис. 12). Данный вывод

является основанием для формирования нового вида помеховых воздействий, обладающих низкой энергоемкостью ($\Delta=0,6...0,8$, что соответствует $q(t)=16...4$ дБ) при заданных частотно-временных параметрах, которые, как показано в исследованиях [1, 2, 3], должны соответствовать временным параметрам функционирования маршрутизатора и составляют значения $1...10$ с ($f_{РЭП} = 1...0,1$ Гц).

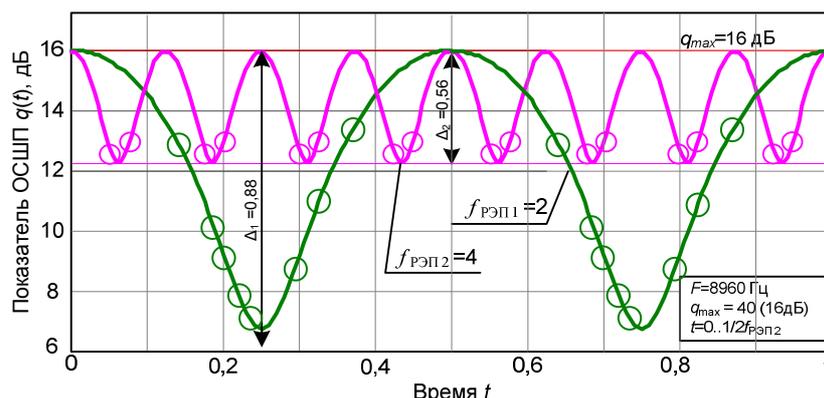


Рис. 12. Варианты достижения интенсивности $\lambda_M = 16$:

- 1) $\Delta_1=0,88, f_{РЭП1}=2$; 2) $\Delta_1=0,56, f_{РЭП1}=4$

7. Выводы по влиянию изменения сигнально–помеховой обстановки на каналные и сетевые параметры спутниковых каналов связи

Проведенное исследование показало, что при фиксированном временном разделении абонентов для канала MCPC и для SCPC периодическое снижение показателя ОСШП $q(t)$ ведет к снижению пропускной способности каналов связи DVB–S и DVB–S2 и, как следствие, росту интенсивности сообщений об изменении метрики λ_M . Значение снижения пропускной способности каналов связи DVB–S и DVB–S2 определяется параметром глубины изменения ОСШП Δ , а значение интенсивности λ_M определяется параметрам Δ и частотой изменения ОСШП $f_{РЭП}$.

При использовании канала MCPC в режиме случайного множественного доступа по протоколу S–Aloha периодическое снижение показателя ОСШП $q(t)$ ведет к снижению как пропускной способности каналов связи DVB–S и DVB–S2, так и времени задержки передачи сообщений абонентами. Значения

снижения пропускной способности каналов связи DVB-S и DVB-S2, а также значения задержки передачи определяются параметром глубины изменения ОСШП Δ и значением информационной нагрузки ρ . Значения интенсивности сообщений об изменении метрики канала связи λ_M при различных частотах $f_{РЭП}$ для канала MCPC с S-Aloha определяются параметрами глубины Δ , а также частоты изменения ОСШП $f_{РЭП}$ и возрастают с увеличением информационной нагрузки ρ .

Увеличение сложности схемы адаптивного выбора вида модуляции и скорости помехоустойчивого кодирования существенно увеличивают диапазоны значений канальных и сетевых параметров, в котором наблюдаются проявление негативных эффектов от динамического изменения ОСШП.

Литература

1. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Модель функционирования маршрутизатора в сети в условиях ограниченной надежности каналов связи // Инфокоммуникационные технологии. Том 12. № 2. 2014. С. 44–49.
2. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на функционирование расширенного протокола маршрутизации внутреннего шлюза (EIGRP) // Информационные технологии моделирования и управления. 2010. № 2 (61). С. 223–230. URL: www.sbook.ru/itmu/itmu.htm
3. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на сетевой уровень модели взаимодействия открытых систем и функционирование протокола маршрутизации оценки состояния канала (OSPF) // Информационные технологии моделирования и управления. 2009. № 7 (59). С. 956–961. URL: www.sbook.ru/itmu/itmu.htm
4. Макаренко С. И. Модели воздействия средств радиоэлектронной борьбы на систему связи на основе методов популяционной динамики // Вестник ВГТУ, 2011. Т. 7. № 1. С. 96–99.
5. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих

факторов // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. URL: jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf

6. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.

7. Макаренко С. И. Исследование влияния преднамеренных помех на возможности по ретрансляции сообщения и показатели качества обслуживания канального уровня модели OSI для системы связи со случайным множественным доступом абонентов // Информационные технологии моделирования и управления. 2010. № 6 (65). С. 807–815. URL: www.sbook.ru/itmu/itmu.htm

8. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. № 4. 2013. С. 69–79.

9. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. URL: jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf

10. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи: учеб. пособие. – М.: «Альпина Паблишер», 2004. 536 с.

11. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation system for Broadcasting Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications.

12. ETSI EN 300 421. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services.

13. ETSI EN 301 210. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite.

14. ETSI TR 102 376 v. 1.1.1 (2005–02). Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB–S2).

15. ETSI EN 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.

16. Стандарт DVB–S2. Система цифрового ТВ вещания. // Контур–М [Электронный ресурс]. – URL: www.konturm.ru/tech.php?id=dvbs2

17. Владимиров В.И. Информационные основы радиоподавления линий радиосвязи в динамике информационного конфликта. Воронеж: ВАИУ, 2003. 139 с.

18. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Немчилов А.В., Чаплыгин А.А. Пространственные и вероятностно-временные характеристики эффективности станций ответных помех при подавлении систем радиосвязи. Под ред. В.И. Борисова. Воронеж: ОАО «Концерн «Созвездие», 2007. 354 с.

19. Красносельский И.Н., Канев С.А. Исследование помехоустойчивости системы DVB–T на модели канала с многолучевым распространением // Электросвязь. №7. 2010. С. 28–30.

20. Худяков Г.И. Пропускная способность цифровых каналов электросвязи с квадратурной амплитудной модуляцией // Электросвязь. №6. 2010. С. 38–40.

21. Анпилогов В.Р., Тырин П.М., Шубин В.И., Эйбус А.Г. Конвергенция и дивергенция технологий и сервисов в сетях VSAT KU– и KA–диапазонов // Электросвязь. №6. 2012. С. 27–31.

22. Арсеньев А.В. Динамика изменения показателей качества каналов беспроводного доступа с многолучевыми замираниями при пакетной коммутации // Электрические и информационные комплексы и системы. Том 5. № 1. 2009. С. 53–57.

23. Габриэльян Д.Д., Новиков А.Н., Стрекалов А.В., Шацкий В.В., Шацкий Н.В. Особенности обработки широкополосных сигналов при воздействии преднамеренных помех, соизмеримых с полезным сигналом по полосе частот // Инфокоммуникационные технологии. Том 9. № 3. 2011. С. 94–99.

24. 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. № 6. 2010. С. 28–32.

25. Эльснер Й., Танбурги Р., Йондраль Ф. О пропускной способности беспроводных многоканальных одноранговых сетей с местным планированием частотного разделения каналов // Информационно–управляющие системы. № 6. 2010. С. 70–76.

26. Кихтенко А. В., Макаренко С. И. Вывод расчетных соотношений для времени обслуживания и эффективной пропускной способности спутникового и радио каналов связи / Деп. в СИФ ЦВНИ Минобороны РФ 14.05.2007, № 15246. Ставрополь: СВВАИУ(ВИ), 2006. 24 с.

27. Программа сетевой академии Cisco. CCNA 1 и 2. М.: «Вильямс». 2008. 1168 с.

28. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4–е издание. СПб: Питер, 2012. 944 с.