

УДК: 621.396.9

**МЕТОДИКА АНАЛИЗА СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ
В МНОГОПОЛОСНОЙ РАДИОЛИНИИ, ОБРАЗОВАННОЙ МАЛОГАБАРИТНЫМИ
СТАНЦИЯМИ ТРОПОСФЕРНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

**METHOD FOR ANALYZING THE TRANSMISSION RATE
IN A MULTIBAND RADIO LINK FORMED BY SMALL-SIZED TROPOSPHERIC
RADIO COMMUNICATION STATIONS**

По представлению чл.-корр. РАРАН А.И. Михайлина

Н.Н. Плотников, А.В. Войнов

ВАС им. С.М. Буденного

N.N. Plotnikov, A.V. Voinov

В статье рассматривается методика анализа скорости передачи в многополосной радиолинии тропосферной связи, исследуются условия, при которых в блоке выбора режима работы малогабаритной станции тропосферной связи осуществляется выбор рабочего режима. В качестве исходных данных определены: помехоустойчивость радиолинии в различных режимах работы и статистические характеристики скорости передачи в канале. Сформулированы условия редукции рабочих режимов. На основании полученных значений плотности распределения вероятностей работы с различными скоростями при выборе максимальной скорости передачи из одной, двух, трех и четырех субполос, определён прирост скорости в зависимости от количества используемых субполос в рабочем режиме.

Ключевые слова: станции тропосферной связи, блок выбора режима работы, субполоса.

The article discusses the method of analyzing the transmission rate in a multiband radio link for tropospheric communication, investigates the conditions under which the operating mode is selected in the unit for selecting the operating mode of a small-sized tropospheric communication station. As the initial data, the following are determined: the noise immunity of the radio link in various modes of operation and the statistical characteristics of the transmission rate in the channel. The conditions for the reduction of operating modes are formulated. Based on the obtained values of the probability distribution density of working with different speeds when choosing the maximum transmission speed from one, two, three and four sub-bands, the speed gain is determined depending on the number of used sub-bands in the operating mode.

Keywords: tropospheric communication stations, operating mode selection block, subband.

Тропосферные станции связи в настоящее время нашли своё широкое применение в различных областях современной жизни [1–5]. Вопросы постоянного совершенствования станций тропосферной связи с целью повышения их количественно-качественных показателей и харак-

теристик, являются крайне актуальными и находят своё отражение в статьях ряда отечественных учёных [6–8]. Несмотря на непрерывное совершенствование станций тропосферной связи вопрос оценки максимальной средней скорости передачи, которую возможно получить при

использовании блока выбора рабочей частоты (БВРЧ) до настоящего времени не рассматривался. Предлагаемая методика позволяет определить среднее значение максимальной скорости (передачи), реализуемое малогабаритной станцией тропосферной связи, использующей БВРЧ в зависимости от динамики изменения состояния канала.

Задача анализа радиолинии тропосферной связи состоит в определении максимума средней скорости передачи в соответствии с выражением:

$$\bar{V} = \frac{1}{m} \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^m \left(\max_{\beta(t) \in B} v(\bar{\alpha}, \bar{\beta}(t), p_d) \right),$$

где $v(\bar{\alpha}, \bar{\beta}(t), p_d)$ — текущая скорость передачи; m — общее число используемых модемом субполос; $\bar{\beta}(t)$ — режим работы модема; $\bar{\alpha}$ — искажение сигнала модема в субполосе; p_d — вероятность ошибки на бит.

Искажения сигнала модема в субполосе определяются, в том числе, средним отношением сигнал/шум при работе модема в N_{sb} субполосах: $SNR(N_{sb}) = SNR(1) - 10 \cdot \log_{10} N_{sb}$. Значение $SNR(1)$ в соответствии с известными методиками определяется: мощностью передатчика P_t , расстоянием между абонентами, интенсивностью дождя на трассе, рельефом местности, рабочей частотой, длиной фидера, размером и типом антенны, определяющими ослабление сигнала на трассе. В данной работе используются типичные результаты измерения отношения SNR для цифровых малогабаритных станций на трассах от 80 до 150 км на открытых интервалах при использовании компактных приемо-передающих антенн Кассегрена.

За выбор рабочего режима отвечает БВРЧ малогабаритной станции тропосферной связи. Он обладает следующими возможностями: оценка текущего SNR, оценка текущей вероятности ошибочного приёма, а также статистических свойств этих последовательностей. Далее будет показано, как на основе изучения статистических свойств данных последовательностей можно классифицировать тип используемого канала и определить максимальную среднюю скорость передачи, реализуемую малогабаритной станцией тропосферной связи при выборе рабочего режима. Решение

данной задачи, позволяет получить, предлагаемая методика.

Оценка SNR на приёме в БВРЧ возможна через SINAD (signal-to-noise and distortion ratio) — отношение сигнал плюс шум к шуму. Для этого измеряется средняя амплитуда шума при отсутствии сигнала, а затем средняя амплитуда сигнала вместе с шумом. При превышении отношением SINAD 2 дБ оно с высокой точностью равно SNR. Также SNR можно вычислить на приёме без тестовой последовательности как отношение средней амплитуды сигнальных точек на фазовой плоскости к среднеквадратическому отклонению (СКО). Именно на подобном анализе и основывается описанный способ синхронизации, реализованный в модемах рассматриваемой радиолинии. Способ реализует высокую точность оценки SNR при её значениях выше 3 дБ.

Вероятность ошибки в БВРЧ может быть измерена как на тестовых последовательностях передаваемых бит, так и с помощью расчёта числа исправленных кодом ошибок. Такой способ оценки не требует прогона тестовых последовательностей и реализует высокую точность оценки вероятности ошибки на бит когда число ошибок меньше числа исправляемых кодом ошибок. Это область значений вероятности ошибки меньше $5 \cdot 10^{-3}$, следовательно эта оценка может быть использована для смены режимов работы рассматриваемой радиолинии. Итак: БВРЧ для любого режима работы может определить в любом цикле передачи текущее SNR и вероятность ошибки.

Определение помехоустойчивости радиолинии в различных режимах работы

На рис. 1 и 2 представлены зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для различных рабочих режимов в канале с адаптивным белым Гауссовским шумом (АБГШ) и канале тропосферной связи (ТРС) с замираниями, полученные на программном имитаторе радиолинии, функционирующей по многолучевому радиоканалу. Он выполнен по модели Ваттерсона и разработан в АО «НПО «Импульс» в рамках разработки изделий ряда 15Э1920. Имитатор позволяет определить следующие характеристики канала: отношение сигнал/шум, максимальную разность хода лучей и

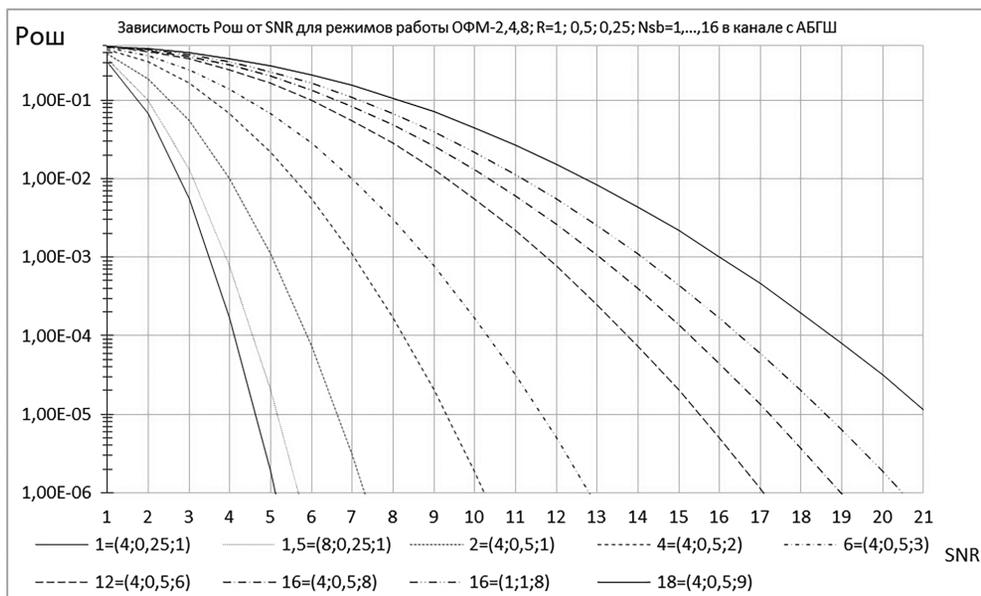


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки от SNR для различных рабочих режимов в канале с АБГШ

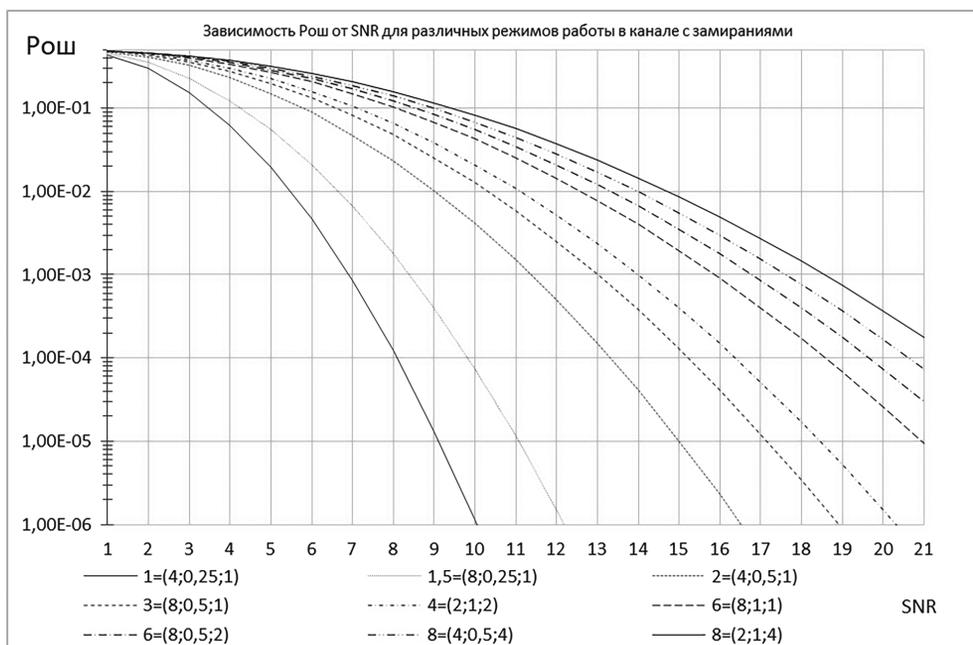


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от SNR для различных рабочих режимов в канале TPC с замиряниями $f_d \pm 3$ Гц; $n=2$; $\tau = 0,5$ мкс; $\vartheta = 4$

количество замираний в минуту. Использование такого имитатора обусловлено необходимостью набора статистических характеристик, которые легли в основу методики, в качестве исходных данных. Скорость передачи, реализуемая рабочим режимом $(k; R; N_{sb})$ определяется соотношением: $V_{пер} = N_{sb} \cdot R \cdot \log_2 k$, где k — кратность модуляции, R — скорость кода и N_{sb} — количество субполос.

Определим порог гарантируемой вероятности ошибки на бит в канале $P_{ош.пор} = 10^{-4}$ (варьируемое значение). В соответствии с ним пороги значений SNR, при которых возможна реализация различных рабочих режимов с указанными скоростями передачи представлены в таблице. Для рабочих режимов, не представленных на рис. 1, 2, в соответствующих ячейках таблицы находятся прочерки.

Два рассмотренных типа каналов являются для ТРС самым благоприятным и самым наилучшим. Для остальных типов каналов пороги реализации рабочих режимов будут находиться в промежутке между указанными в таблице. Например, для режима (4; 0,25; 1), который по-видимому, должен являться стартовым режимом как наиболее помехоустойчивый, диапазон порогов реализации будет между 3,9 и 7,6 дБ. По данному порогу можно будет определять текущий тип канала.

Редукция рабочих режимов

Общее количество рассматриваемых в данной работе рабочих режимов ($k; R; N_{sb}$) равно $3 \cdot 3 \cdot 16 = 144$. Для определения предпочтений между ними для различных условий функционирования необходимо их редуцировать (сократить). Такая редукция возможна на основе принципов доминирования или востребованности рассматриваемых режимов.

Следует отметить, что возможна реализация одной и той же скорости передачи различными рабочими режимами. Например: рабочие режимы (4; 0,5; 1), (2; 1; 1), (2; 0,5; 2), (2; 0,25; 4), (4; 0,25; 2) реализуют одну и ту же скорость — 2 Мб/с. Однако зависимости вероятности ошибки от SNR у них различаются, в той или иной степени.

Доминирующим режимом работы будем называть рабочий режим, обеспечивающий гарантируемую вероятность ошибки на бит при меньшем SNR в группе рабочих режимов, реализующих одну и ту же скорость передачи.

Востребованным рабочим режимом будем называть рабочий режим, реализующий скорость передачи из области заявленных требуемых скоростей, а также реализуемый в канале ТРС без необходимости использования выравнивания передаточной характеристики канала. Это диапазон отношений SNR до 22–24 дБ. Так рабочий режим (2; 0,25; 1) не является востребованным, поскольку реализует скорость передачи $V_{пер} = 0,5$ Мб/с, что ниже минимальных требований пользователя. Рабочий режим (8; 1,0; 16) реализует скорость передачи 96 Мб/с, однако потребует SNR более 24 дБ даже в канале с АБГШ. Следовательно, данный режим для рассматриваемой системы

передачи не является востребованным. Также предпочтительной представляется реализация равномерной линейки скоростей передачи с шагом 2 Мб/с, уменьшающимся в области низких скоростей. Большое число пороговых скоростей приведет к необходимости постоянной перестройки текущих рабочих режимов. Например, режим (8; 0,25; 7) реализует скорость передачи 10,5 Мб/с. При скоростях передачи 10 и 12 Мб/с, его реализация не представляется целесообразной.

Предложения по выбору линейки реализуемых скоростей: 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 8; 10 Мб/с для релейного и тропосферного режимов, а также 12; 14; 16; 18; 10; 22; 24 Мб/с только для релейного режима.

Выбор доминирующих востребованных режимов для определенного типа канала является предметом оптимизации. Для различных типов канала в общем случае этот выбор различен (таблица). Расширение множества рабочих режимов путем увеличения реализуемых видов модуляции, перечня реализуемых кодов, числа рабочих каналов может привести к дополнительному повышению помехоустойчивости доминирующих востребованных режимов. Размерность при этомкратно возрастёт. Однако даже минимальный набор рабочих режимов, предложенный к рассмотрению в данной работе, с учетом возможности маневра по ширине полосы дает эффективный инструмент по реализации квазиоптимального управления, обеспечивающего близкую к максимально возможной скорости передачи.

Определение статистических характеристик скорости передачи в канале

В канале без замираний, каким является канал с аддитивным гауссовским шумом, выбор востребованных доминирующих режимов обеспечит решение рассматриваемой задачи. Измерение отношения сигнал/шум в канале связи БВРР определит оптимальный рабочий режим. Даже если время от времени данное отношение будет меняться, коррекция режима обеспечит оптимальную работу. В диапазоне SNR от 4 до 24 дБ БВРР обеспечит реализацию скоростей передачи от 1 до 32 Мб/с.

При работе радиолинии ТРС в канале с замираниями всё будет иначе. На рис. 3 приведена

Пороги реализации рабочих режимов (выборочно) для $P_{\text{ош.}} < 10^{-4}$

№ п/п	$V_{\text{пер}}^*$ Мб/с	АБГШ				TPC			
		k	R	N_{sb}	SNR, дБ	k	R	N_{sb}	SNR, дБ
1	1	4	0,25	1	3,9	4	0,25	1	7,6
2	1,5	8	0,25	1	4,4	8	0,25	1	9,4
3	2	4	0,5	1	5,6	4	0,5	1	12,7
4	3	8	0,25	2	–	8	0,5	1	14,6
5	4	4	0,5	2	8,0	2	1,0	2	15,7
						8	1,0	1	17,8
6	6	4	0,5	3	9,8	8	0,5	2	18,8
						4	0,5	4	19,8
7	8	4	0,5	4	–	2	1,0	4	19,9
						8	0,5	4	–
8	12	4	0,5	6	13,2	8	0,5	4	–
9	16	4	0,5	8	14,6	4	1,0	4	–
		1	1,0	8	15,8				
10	18	4	0,5	9	18,0	8	1,0	3	–

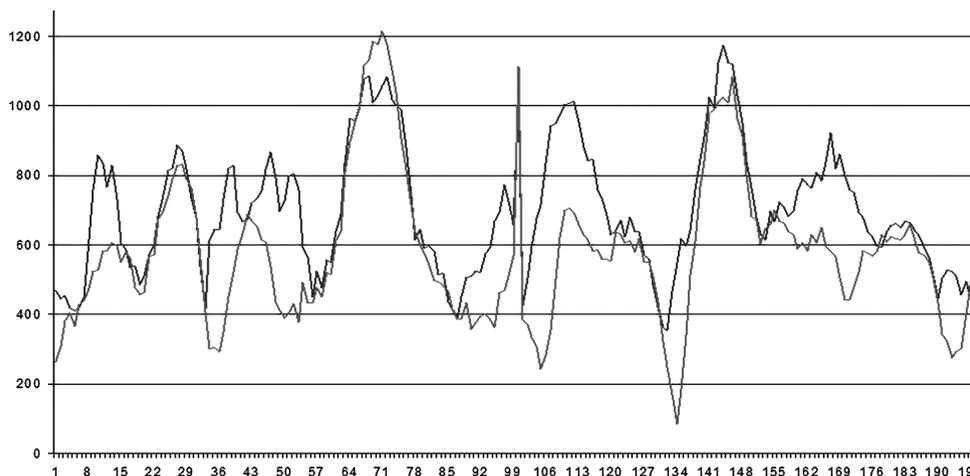


Рис. 3. Диаграммы изменения уровней сигналов для двух зондирующих частот, мВ на длительности цикла передачи TDD 10 мс

диаграмма изменения уровня сигнала на приёме вследствие замираний для радиолинии TPC, измеренного в мВ на испытаниях малогабаритной TPC «Ладья». Средняя, измеренная при отключении передачи сигнала, амплитуда помехи на приёме составила 190 мВ. Это позволило определить изменение во времени SINAD и по нему оценить SNR.

На рис. 4 приведено изменение текущего SNR во времени, шаг времени 80 мс, что соответствует 8-ми циклам передачи, среднее значение SNR 10,2 дБ. Текущее же значение SNR изменяется от 6 до 17 дБ.

Представим, что в соответствии с порогами реализации рабочих режимов, указанных в

строках 1–6 таблицы, БВРР мгновенно изменяет скорость передачи по достоверно измеренному SNR. Тогда по рис. 3 можно построить зависимость изменения максимально реализуемой скорости передачи в канале TPC. Её динамика представлена на рис. 6. Шкалы времени на рис. 3, 4 и 5 синхронизированы. Средняя скорость передачи — 1,7 Мб/с, текущая скорость меняется от 0 до 4 Мб/с.

Опишем статистику изменения скорости передачи функционирование радиолинии цепью Маркова. Номер состояния марковского процесса будет определяться номером рабочего режима. Состояние с номером «1» — отсутствие передачи, нулевая скорость, состояние «2» —



Рис. 4. Изменение текущего SNR в радиоканале TPC во времени с шагом 80 мс, дБ



Рис. 5. Изменение максимальной скорости передачи при изменении текущего SNR в канале TPC, Мб/с

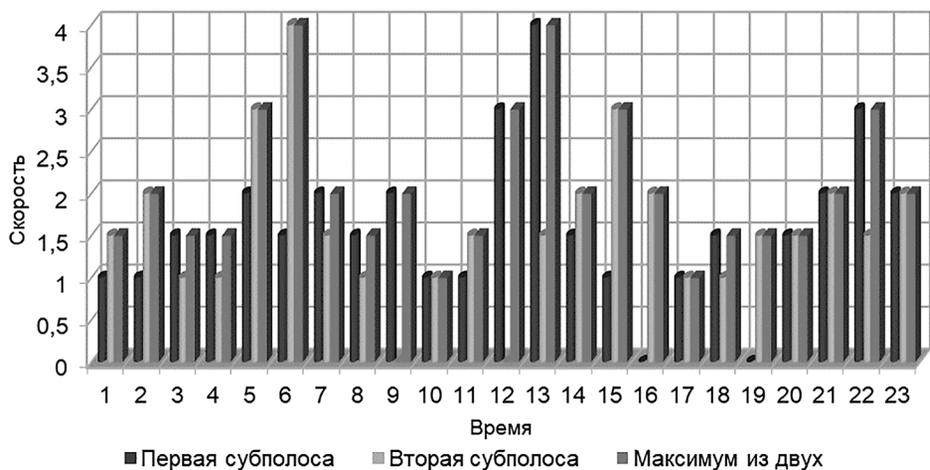


Рис. 6. Изменение максимальной скорости передачи в двух субполосах при изменении текущего SNR в канале TPC, Мб/с

скорость 1 Мб/с, состояние «3» — 1,5 Мб/с и т.д. Марковский процесс определяется матрицей переходных вероятностей \mathbf{P} и вектором начальных вероятностей \mathbf{P}_k , $k = 1, \dots, 17$. Будем полагать, что начальные вероятности равны финальным. Матрица переходных вероятностей $\mathbf{P} = \|\mathbf{p}_{ij}\|$ определится из статистики поведения наблюдаемого процесса на рис. 3.

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{(T+1)},$$

где T — длительность интервала наблюдения в дискретных шагах по времени, равных циклу передачи (на рис. 4, шаг — 8 циклов передачи);

N_{ij} — количество переходов из состояния i в состояние j на интервале наблюдения.

$$P_k = \frac{T_i}{T},$$

где T_i — количество временных интервалов, проведенных процессом в состоянии i на наблюдаемом интервале. Средняя скорость передачи определяется выражением

$$V_{\text{пер}} = \sum_{i=1}^{17} V_i P_i.$$

Рассмотрим процесс адаптивного выбора субполосы с наилучшей реализуемой в текущий момент времени скоростью передачи из нескольких резервных субполос. На рис. 6 представлены выборки девиации скоростей передачи в двух субполосах. Первая выборка соответству-

ет рис. 6, вторая независима от первой, но имеет те же статистические характеристики. Третья выборка это максимум возможной скорости передачи при выборе из двух субполос.

Известно, что функция распределения случайной величины, являющейся максимумом из выборки из m одинаково распределенных случайных величин определяется как

$$F_{\text{max}}(n, \xi) = F(\xi)^m,$$

где $F(x) = \sum_{i=1}^x P_i$ — функция распределения вероятностей исходной случайной величины. Это соотношение позволяет определить все необходимые статистические характеристики девиации скорости передачи при адаптации по номеру рабочей субполосы из нескольких резервных субполос. Средняя скорость передачи при выборке из m субполос одной оптимальной определяется выражением]:

$$V_{\text{max}}^m = m \left(V_{\text{max}}^1 - \sum_{i=1}^{17} V_i P(i) \sum_{j=0}^i P(j) \right).$$

На рис. 7 представлены плотности распределения вероятностей работы с различными скоростями при выборе максимальной скорости передачи из одной, двух, трех и четырех субполос. Им соответствуют средние скорости передачи 1,52; 2,01; 2,28; 2,48 Мб/с. Таким образом, для четырех запасных субполос верхняя граница скорости передачи для канала ТРС с замираниями $\text{SNR} = 10,2$ дБ, $f_d = \pm 3$ Гц, $n_r = 2$, $\tau = 0,5$ мкс,

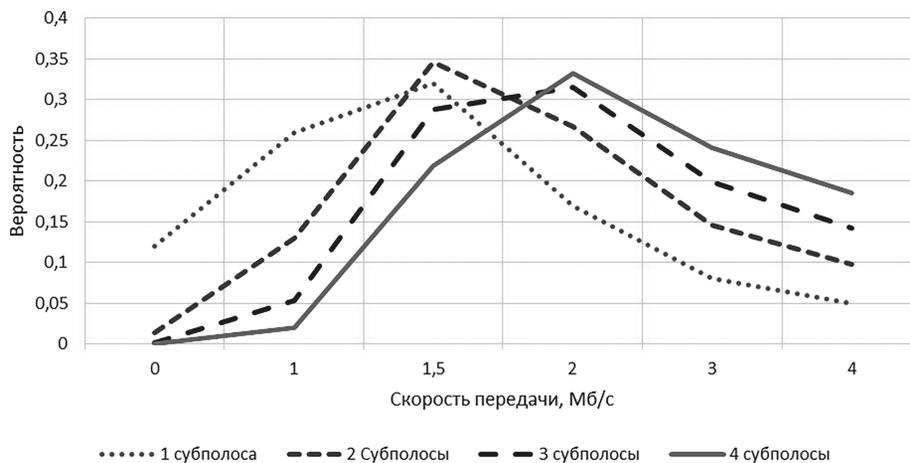


Рис. 7. Плотности распределения вероятностей передачи с различными скоростями при выборе максимальной скорости из нескольких субполос

$\vartheta = 4$ составит 2,48 Мб/с. В диапазоне SNR от 4 до 24 дБ БВРР в канале ТРС обеспечит реализацию скоростей передачи от 1 до 12 Мб/с.

Если случайная величина определена на конечном интервале, то при росте m в (2) производная случайной величины (максимум) стремится к верхней границе интервала определения. Это означает, что при достаточном количестве резервных субполос можно обеспечить работу на максимальных, реализуемых для данного канала, скоростях передачи. Для рассматриваемой задачи более важной является реализация режимов предоставления абонентам гарантируемой скорости. Для самого наихудшего типа канала, вероятность состояния, в котором невозможна передача равна 0,12, (рис. 6). Наличие 4-х резервных субполос, при занятости всех 16 основных, обеспечит вероятность наличия среди них пригодной для передачи с вероятностью $1 - 0,12^4 = 0,9998$. Поскольку замена различных субполос происходит в различные моменты времени, то выборка состояний резервных субполос будет случайной, и указанная вероятность будет иметь место при любой замене.

Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемая методика позволяет определить среднее значение максимальной скорости передачи информации, реализуемое малогабаритной станцией тропосферной связи, использующей БВРР в зависимости от динамики изменения состояния канала. Исходя из значений варьируемых параметром, определяющих режим работы и соответствующих данному режиму значения скорости передачи информации, необходимый рабочий режим можно выбрать на основе предложенных принципов доминирования и востребованности, обеспечивающий выполнение конкретных задач в части показателей скорости передачи информации.

Литература

1. Александров Д.И. Анализ тропосферных станций отечественного производства / Д.И. Александров // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Динамика взаимоотношений различных областей науки в современных условиях». — Уфа. ООО «Омега Сайнс». 2018. С. 8–11.

2. Переломов В.Н. Эффективность применения современных помехоустойчивых средств тропосферной связи / В.Н. Переломов // Технологии электромагнитной совместимости. — Москва: Издательский дом «Технологии». 2018. С. 3–9.

3. Муромцев Д.Ю. Проблемы обеспечения надёжной радиосвязи на севере России / Д.Ю. Кулешов, А.Н. Сысоев, В.М. Жуков // Вестник Воронежского государственного технического университета. — Воронеж. Воронежский государственный технический университет. 2020. Т. 16. № 3. С. 46–53.

4. Сиваков И.А. Роль и место тропосферной связи в развитии телекоммуникационных сетей в арктическом регионе / Сиваков И.А. // Региональная энергетика и энергоснабжение. — Москва. ООО «Системный консалтинг». 2019. № 2. 50 с.

5. Плотников Н.Н. Сравнительный анализ и тенденции развития стационарных станций тропосферной связи отечественного и зарубежного производства / Н.Н. Плотников, А.В. Войнов // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Воронеж. Воронежский государственный университет. 2019. С. 74–78.

6. Жумабаев Б.Т. Перспективы развития тропосферной станции. От аналоговой до нейронных сетей / Б.Т. Жумабаев, К.Ж. Исабаев, В.Г. Петровский, А.А. Ковтун // Сборник трудов конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». — Рязань. Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина. 2020. С. 3–12.

7. Мартышевская Д.А. Повышение помехоустойчивости высокоскоростной передачи цифровых сигналов с помощью подавления межсимвольной интерференции: диссертация кандидата технических наук: 05.12.04. — Владимир: ВлГУ. 2017. 141 с.

8. Александров А.В. Разработка цифровых модемов радиорелейной и тропосферной связи с использованием системы на кристалле 5580ТР016 / А.В. Александров, В.В. Ерохин, В.Я. Архипкин, Р.Р. Халиков, Ю.Л. Леохин // Наноиндустрия. — Москва. АО «Рекламно-издательский центр «Техносфера». 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 67–69.