

Модель функционирования сети связи, построенной на основе радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов

С.М. Одоевский¹, В.О. Ключников¹, И.В. Степанец²

¹Военная академия связи им. С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

²Дойче Телеком,
Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

*Адрес для переписки: KlyuchnikovVO@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.10.2021

Поступила после рецензирования 15.11.2021

Принята к публикации 18.11.2021

Ссылка для цитирования: Одоевский С.М, Ключников В.О., Степанец И.В. Модель функционирования сети связи, построенной на основе радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 4. С. 63–76. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-63-76

Аннотация: *Статья посвящена описанию модели функционирования сети связи, построенной на основе радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов. Представлены математические выражения, позволяющие рассчитывать частные показатели устойчивости и пропускной способности радиорелейных интервалов, линий и направлений связи, а также обобщенные показатели качества сети связи в целом с учетом особенностей функционирования радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов в условиях замираний радиоволн на отдельных радиорелейных интервалах.*

Ключевые слова: радиорелейная связь, адаптивная модуляция, коммутация пакетов, моделирование сетей связи.

Введение

Радиорелейная связь – вид наземной радиосвязи, основанной на многократной ретрансляции радиосигналов [1]. В настоящее время она считается надежной высокоскоростной (широкополосной) разновидностью беспроводной связи, являющейся удобной альтернативой проводной связи в сетях доступа и в транспортных сетях, особенно, когда прокладка медных или волоконно-оптических кабелей невозможна, затруднена или требует слишком много времени. Однако устойчивость радиорелейной связи ограничена влиянием среды распространения радиоволн на радиорелейных интервалах (РР-интервалах) радиорелейных линий (РР-линий) и внешних помех на входе приемников радиорелейных станций (РР-станций).

В обычных условиях при правильном планировании и эксплуатации РР-линий влияние внешних помех удается практически исключить за счет использования направленных антенн и частотно-территориального разноса РР-станций с возмож-

ными источниками внешних помех. Остаточные неустранимые помехи (от близких передатчиков соседних РР-станций или других стволов собственной станции) проявляются в виде деградации чувствительности, для снижения (компенсации) которой используются специальные методы обработки сигналов, учитываемые при расчете РР-линий с целью прогноза их устойчивости, прежде всего, по отношению к замираниям радиоволн [2].

В целом расчет устойчивости сетей связи, построенных на основе РР-станций, в соответствии с [3] сводится к расчету устойчивости отдельных направлений связи, образуемых одной или несколькими (резервирующими друг друга) РР-линиями, состоящими из множества отдельных РР-интервалов. При этом основную сложность расчетов составляют расчеты устойчивости РР-интервалов, которые обычно выполняются в соответствии с апробированными отечественными (например, [2, 4]) и/или международными (например, [5]) рекомендациями (методиками).

Все отмеченные выше методики расчета устойчивости РР-линий и направлений связи основаны на математических моделях функционирования РР-интервалов с постоянной скоростью передачи, определяемой выбранным режимом работы модема. Однако современные РР-станции поддерживают режимы работы с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов (АМКП), которые предполагают адаптивное изменение скорости передачи при текущем изменении уровня сигнала и/или помех [6, 7]. Общепринятых математических моделей функционирования сетей связи, построенных на основе РР-станций с АМКП, а также соответствующих методик расчета их устойчивости, в настоящее время не существует [8]. В данной статье описывается предлагаемая математическая модель функционирования такой сети связи, которая может служить основой для дальнейшей разработки методик расчета РР-интервалов, РР-линий, направлений и сетей связи, построенных на основе РР-станций с АМКП.

Постановка задачи

В известных методиках расчета устойчивости РР-линий (в частности, [2, 4, 5]) предполагается, что РР-станции на всех РР-интервалах работают с постоянной скоростью передачи, определяемой выбранным режимом работы модема. При этом в качестве показателя неустойчивости P_n используется предположение, что вероятность ошибки превысит некоторую допустимую величину $P_{\text{ош.тр}}$. Данный показатель на практике (в ходе эксплуатации РР-интервалов и РР-линий) соответствует доле времени, когда нарушаются требования к вероятности ошибки. Принято различать (по-разному рассчитывать) и по-разному называть показатели, характеризующие неустойчивость из-за ухудшения качества связи ниже допустимой величины на коротких и продолжительных отрезках времени. Так, быстрые замирания на отрезках времени менее 10 с принято оценивать показателем качества по ошибкам или коэффициентом сильно пораженных секунд SESR (аббр. от англ., Severely Errored Second Ratio), а медленные замирания длительностью больше 10 с – коэффициентом неготовности [2].

Согласно указанным методикам, при расчете показателя неустойчивости P_n величина $P_{\text{ош.тр}}$ непосредственно не применяется, а задается соответствующая величина требуемого отношения сигнал/шум $h^2_{\text{тр}}$, при которой используемый в РР-станции модем на установленной (требуемой) скорости передачи $C_{\text{тр}}$ обеспечивает вероятность ошибки $P_{\text{ош}}(C_{\text{тр}})$ не более допустимой величины $P_{\text{ош.тр}}$.

При известной мощности шума $P_{\text{ш}}$, которая при отсутствии внешних помех соответствует собственному шуму приемника (при необходимости учета внешних помех их мощность добавляют к

ней, получая некоторую эквивалентную мощность шума) в полосе пропускания, соответствующей режиму работы модема, требуемое отношение сигнал/шум $h^2_{\text{тр}}$ пересчитывается в величину чувствительности $P_{\text{с.тр}} = P_{\text{ш}} \cdot h^2_{\text{тр}}$, равную минимально необходимой мощности сигнала на входе приемника, при которой обеспечивается допустимая вероятность ошибки $P_{\text{ош.тр}}$. Далее на основании рассчитанной по модели распространения радиоволн для конкретного РР-интервала медианной мощности сигнала P_c вычисляется запас на замирания $Z = P_c / P_{\text{с.тр}}$, который затем по известным статистическим зависимостям (аналитическим или графическим) пересчитывается в искомый показатель неустойчивости $P_n(Z)$.

Как следует из вышесказанного, традиционные методики расчета позволяют оценивать устойчивость РР-интервалов $P_n(C_{\text{тр}}) = P_n(Z(C_{\text{тр}}))$ после расчета запаса на замирания $Z(C_{\text{тр}})$ только при заданной постоянной скорости передачи $C_{\text{тр}}$. При пересчете найденных показателей неустойчивости отдельных РР-интервалов в показатели неустойчивости РР-линий обычно скорость передачи не упоминается, так как она в общем случае может быть разной на разных интервалах, в частности, между разными узловыми РР-станциями, ответвляющимися часть каналов. Но очевидно, что неустойчивость РР-линии будет соответствовать неустойчивости сквозного цифрового канала с максимальной скоростью не выше минимальной скорости $C_{\text{тр}}$ по всем РР-интервалам.

Аналогично, при расчете неустойчивости отдельных направлений связи в общей сети связи [3], включающих несколько маршрутов прохождения сквозных каналов по участкам разных РР-линий, подразумевается, что каждый из резервных маршрутов обеспечивает скорость передачи в сквозном канале не ниже требуемой величины $C_{\text{тр}}$. В разных направлениях одной сети связи могут задаваться и оцениваться по устойчивости сквозные каналы с разными скоростями передачи. Но обобщенные показатели устойчивости сети в целом в [3] не рассматриваются.

Заметим, что показатели своевременности доставки информации (в виде любых блоков данных, в частности, пакетов) в традиционных методиках расчета РР-интервалов и РР-линий не затрагиваются, так как при использовании в них временного разделения каналов с постоянными значениями скоростей передачи пакеты данных не буферизуются и задержка составляет от нескольких тактов до цикла группового сигнала, что намного меньше длительности передачи одного пакета. В то же время нормы на показатели задержки в пакетных сетях существуют [9], но контролируются они между устройствами коммутации пакетов за пределами традиционных РР-линий, построенных на обычных РР-станциях, предоставляющих внешним устрой-

ствам коммутации пакетов сквозные каналы с постоянной скоростью передачи.

С появлением РР-станций с АМКП, которые могут динамически изменять скорость передачи и включают в своем составе устройства коммутации пакетов, возникает проблема определения показателей устойчивости РР-интервалов, РР-линий, направлений и сетей связи, построенных на основе таких РР-станций, а также проблема оценки дополнительных показателей пропускной способности и своевременности, которые до появления таких РР-станций при расчете РР-интервалов и РР-линий не регламентировались.

Для решения указанной проблемы необходимо разработать математическую модель функционирования сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП, которая позволит на основании заданных параметров РР-станций с АМКП $m \in M$ и заданных параметров дестабилизирующих факторов (Д-факторов) $u \in U$ рассчитывать различные частные (ЧПК) и обобщенные (ОПК) показатели качества РР-интервалов, РР-линий, направлений и сетей связи $Q(m, u)$, а также оценивать их (делать выводы о пригодности отдельных участков и сети в целом), сравнивая с требуемыми значениями данных показателей $Q_{тр}$. В обобщенном виде разработанная модель представлена на рисунке 1, где в символическом виде изображена иерархическая декомпозиция сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП, на вложенные направления связи, РР-линии и РР-интервалы, построенные на основе РР-станций с АМКП, функционирующих в условиях дестабилизирующих факторов, а также соответствующая последовательная взаимосвязь ЧПК РР-интервалов, РР-линий, направлений связи

и ОПК сети связи. В составе учитываемых параметров РР-станций и дестабилизирующих факторов выделены постоянные (const) и варьируемые (var) параметры, первые из которых в процессе функционирования сети не изменяются (задаются численно), а вторые изменяются случайным образом (касается дестабилизирующих факторов, описываемых соответствующими функциями распределения вероятностей) или в результате адаптации (касается РР-станций, описываемых соответствующими алгоритмами адаптации, реагирующими на текущие изменения дестабилизирующих факторов).

Стрелки в блоке с ЧПК и ОПК (см. рисунок 1) указывают причинно-следственные связи одних показателей с другими при прямом расчете (сплошные стрелки), который актуален при решении задач анализа (выбранных параметров РР-станций), и при обратном расчете (пунктирные стрелки), который актуален при решении задач синтеза (необходимых параметров РР-станций) или нормировки требований более крупных частей сети к их составным более мелким частям (например, при их нормировке касательно РР-интервалов на основании требований к РР-линиям, что бывает необходимо для оценки пригодности отдельных РР-интервалов без расчета показателей качества всей РР-линии).

Разработанная модель функционирования сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП, для решения указанных задач анализа и синтеза предоставляет необходимые математические зависимости, которые рассматриваются далее последовательно в виде моделей функционирования РР-интервалов, РР-линий, направлений связи и сети связи.

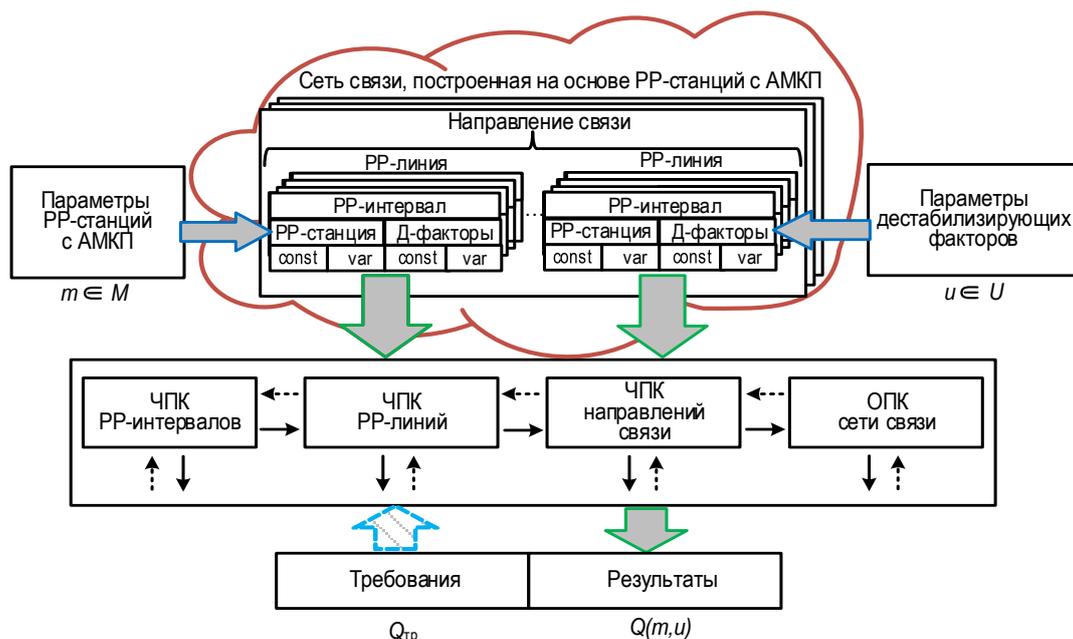


Рис. 1. Обобщенная модель функционирования сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП
 Fig. 1. Common Functioning Model of Network of Microwave Link Stations with Adaptive Modulation and Packet Switching

Модель функционирования радиорелейного интервала

Минимальными участками сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП, характеристики которых влияют на характеристики всех более крупных участков, являются радиорелейные интервалы, включающие две РР-станции и среду распространения радиоволн между ними (рисунок 2).

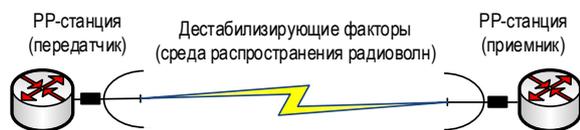


Рис. 2. Элементы модели функционирования РР-интервала, построенного на основе РР-станций с АМКП

Fig. 2. Elements of the Functional Model of Microwave Link Interval Supplied with Microwave Link Stations with Adaptive Modulation and Packet Switching

На рисунке 2 выделены элементы, участвующие в передаче информации на РР-интервале в одну сторону: от передатчика левой РР-станции к приемнику правой РР-станции. При использовании одинаковых параметров РР-станций с обеих сторон РР-интервала с учетом дуальности среды распространения радиоволн полученные результаты расчетов в одну сторону используются и в качестве результатов расчета в обратную сторону. В противном случае (если есть отличия параметров РР-станций) расчеты повторяются аналогичным образом для обратного направления.

Математическая модель функционирования РР-интервала представляет собой набор формул, связывающих параметры РР-станций \mathbf{m} и дестабилизирующих факторов \mathbf{u} с ЧПК РР-интервала $Q(\mathbf{m}, \mathbf{u})$ с учетом особенностей используемых режимов работы РР-станций с АМКП. Основной отличительной особенностью таких РР-станций является поддержка множества градаций скорости передачи $\mathbf{C} = \{C_1, \dots, C_n\}$ с соответствующими градациями чувствительности $\mathbf{P}_{с.тр} = \{P_{с.тр.1}, \dots, P_{с.тр.n}\}$, $\{\mathbf{C}, \mathbf{P}_{с.тр}\} \in \mathbf{m}$. В дальнейшем будем полагать, что все градации скорости и чувствительности упорядочены по возрастанию, т. е. $C_1 < C_2 < \dots < C_n$ и $P_{с.тр.1} < P_{с.тр.2} < \dots < P_{с.тр.n}$.

После вычисления по известным методикам [2–5] медианного уровня сигнала P_c на входе приемника РР-станции с учетом известных для данного РР-интервала или вычисленных долговременных (усредненных) параметров \mathbf{u} среды распространения радиоволн в роли дестабилизирующих факторов для каждой градации скорости передачи C_i , $i = \overline{1, n}$, можно вычислить запас уровня сигнала на замирания $Z_i = P_c / P_{с.тр.i}$. Для дальнейших расчетов вместо значений запаса уровня удобнее использовать обратную величину – допустимый коэффициент ослабления сигнала $V_i = 1/Z_i$, значения которого так же, как и соответствующие градации

скорости C_i и чувствительности $P_{с.тр.i}$, оказываются упорядоченными по возрастанию: $V_1 < V_2 < \dots < V_n$.

Случайная составляющая дестабилизирующих факторов \mathbf{u} , характеризующая замирания уровня сигнала, в общем случае задается некоторой функцией распределения $F(V) = Pr(v_t < V)$ дополнительного ослабления радиоволн v_t , из-за которого уменьшается текущий уровень сигнала $P_{с.t} = P_c \cdot v_t$. Зная данную функцию распределения, можно для каждой градации скорости C_i определить коэффициент неустойчивости РР-интервала $P_{н.i} = F(V_i)$.

Сравнивая рассчитанные значения коэффициентов неустойчивости $P_{н.i}$ для каждой градации скорости C_i с требуемым значением $P_{н.тр} \in Q_{тр}$ для РР-интервала, можно определить максимальную скорость, при которой выполняются требования к устойчивости РР-интервала:

$$C_{\max} = \max_{i=\overline{1, n}} C_i | P_{н.i} \leq P_{н.тр}. \quad (1)$$

Величина C_{\max} является новым ЧПК, характерным для РР-интервалов, построенных на основе РР-станций с АМКП, расчет которого известными методиками [2–5] не регламентируется, хотя и основан, как следует из представленного выше описания модели функционирования РР-интервала, именно на них. Расчет данного дополнительного показателя уже реализован во многих специальных программах проектирования РР-линий, в частности, в [8], для обоснования выбора максимальной постоянной скорости передачи на РР-интервале для обычных цифровых каналов. Но он не затрагивает в явном виде режима динамического адаптивного изменения скорости передачи на РР-интервале при пакетной передаче данных.

Математические модели радиоканалов с адаптивным изменением скорости встречались в научной литературе уже давно [10–12]. В основном они опирались на статистику замираний в диапазоне коротких волн и изменение скорости передачи путем изменения длительности (влияющей на изменение ширины спектра) простых одномерных двухпозиционных символов с амплитудной, частотной или фазовой манипуляцией. С появлением сотовой связи в диапазоне ультракоротких волн появились модели адаптивных радиолиний, в которых изменение скорости происходит путем изменения позиционности сигналов и кодовой скорости при сохранении постоянной ширины спектра [13–14]. Близость используемых алгоритмов адаптивной модуляции в сотовой и современной радиорелейной связи позволяет использовать их в составе модели функционирования РР-интервала, построенного на основе РР-станций с АМКП.

В общем случае адаптивное изменение скорости (путем изменения модуляции) происходит в некоторые дискретные моменты времени с интервалом Δt , кратном циклу группового сигнала (обыч-

но единицы – десятки миллисекунд). При выборе на очередном отрезке времени $(t, t + \Delta t)$ некоторой градации скорости C_i , реальная скорость C_t , в зависимости от текущего дополнительного ослабления v_t на данном отрезке времени, будет иметь величину:

$$C_t = \begin{cases} C_i, v_t \geq V_i \\ 0, v_t < V_i \end{cases} \quad (2)$$

В случае точного предсказания величины ослабления v_t на данном отрезке времени, очевидно, наилучшим выбором, максимизирующим текущую (а следовательно, и среднюю скорость за длительное время $T \gg \Delta t$ – см. далее), будет выбор градации скорости C_{i^*} , где:

$$i^* = \arg \max_{i=1, n} C_i | v_t \geq V_i. \quad (3)$$

Однако из-за погрешности измерений и задержки наблюдений, как минимум на величину Δt , абсолютно точно предсказать величину v_t по результатам наблюдений до момента $t - \Delta t$ невозможно. Как показано в [10], в случае использования непрерывного множества градаций скорости (при изменении скорости путем изменения длительности символов – это возможно) при любой дисперсии ошибки прогноза ожидаемая величина скорости C_{i^*} будет достигаться лишь с вероятностью 50 %, т. е. итоговая средняя скорость будет в два раза меньше. В [11, 12] показано, что для обеспечения более высокой (вплоть до требуемой) устойчивости и, соответственно, более высокой итоговой скорости, необходимо выбирать очередную ее градацию с некоторым дополнительным запасом по чувствительности ΔZ , величина которого зависит от функции распределения и степени корреляции замираний на интервале Δt .

При использовании дискретных градаций скорости $\{C_i\}_n$ с достаточно большим отличием соседних градаций чувствительности $\{P_{с.тр.л}\}_n$ погрешности прогнозирования замираний сказываются не так сильно. Кроме того, интервал корреляции даже быстрых интерференционных замираний на РР-интервале обычно довольно большой (десятые доли – единицы секунд), а медленных рефракционных замираний или замираний из-за осадков еще больше (десятки секунд – минуты и даже часы). На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициента корреляции замираний от интервала времени между моментами измерений, полученные на основании обработки статистических данных об уровне принимаемого сигнала на РР-интервале длиной 3,5 км на частоте 80 ГГц.

Из графика на рисунке 3 видно, что коэффициент корреляции очень медленно убывает с увеличением интервала времени между измерениями. При сдвиге на минимальный интервал времени 10 мин коэффициент корреляции оказался равен 0,93. Следует ожидать, что на интервале времени,

равном циклу адаптации по скорости Δt , составляющем доли секунд, коэффициент корреляции будет очень близок к 1. Таким образом, погрешностью предсказания уровня замираний на отрезке времени цикла управления скоростью передачи на РР-интервале можно пренебречь.

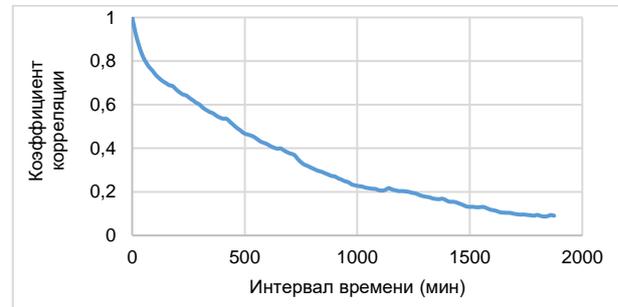


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции замираний от интервала времени между моментами измерений

Fig. 3. Fading Correlation Coefficient Dependent on Different Time Intervals between the Measurements

С учетом (2), зная функцию распределения $F(V) = Pr(v_t < V)$ дополнительного ослабления v_t , можно рассчитать среднюю скорость $C_{ср}$ передачи на РР-интервале за длительное время $T \gg \Delta t$ следующим образом:

$$C_{ср} = \sum_{i=1}^n C_i (F(V_{i+1}) - F(V_i)) = \sum_{i=1}^n C_i (P_{н.i+1} - P_{н.i}), \quad (4)$$

где $F(V_{n+1}) = P_{н.n+1} = 1$.

При отсутствии ошибок управления коэффициент неустойчивости РР-интервала в режиме пакетной передачи данных со средней скоростью (4) определяется вероятностью ослаблений, меньше допустимой величины V_1 для самой маленькой скорости C_1 , т. е. равен $P_{н.1}$.

Как следует из характеристик современных РР-станций с АМКП [6, 7], они могут по-разному обслуживать разный трафик, который можно условно разделить на две группы:

- 1) постоянный или непрерывный трафик (с требуемой постоянной скоростью $C'_t = \text{const}$);
- 2) переменный или прерывистый трафик (с допустимой переменной скоростью $C''_t = \text{var}$).

К первому типу трафика относится передача речи и видео в реальном времени (*rt* – аббр. от *англ. real time*) с жесткими требованиями к задержке, а ко второму – передача прочих данных, нетребовательных к задержке (*nrt* – аббр. от *англ. not real time*).

Обычно первый тип трафика является (и называется) приоритетным, а второй неприоритетным. При этом именно по устойчивости РР-интервала при передаче первого типа трафика с заданной скоростью $C'_{тр}$ делается вывод о пригодности интервала, т. е. РР-интервал считается пригодным, если $P_n(C'_{тр}) < P_{н.тр}$.

При использовании на РР-интервале РР-станций с АМКП эквивалентный вывод о пригодности можно сделать на основании сравнения величины $C_{\max}(P_{n,тр})$, рассчитанной по формуле (1), с $C'_{тр}$, т. е. РР-интервал считается пригодным, если $C_{\max}(P_{n,тр}) \geq C'_{тр}$. Если при этом оказывается, что $C_{j-1} \leq C'_{тр} < C_j$, где $1 < j \leq n$, то избыточные градации скорости $\{C_j, \dots, C_n\}$ можно использовать для передачи неприоритетного трафика с максимальной средней скоростью:

$$C''_{ср} = \sum_{i=j}^n (C_i - C'_{тр}) \cdot (P_{n,i+1} - P_{n,i}), \quad (5)$$

где $P_{n,n+1} = 1$.

При этом коэффициент неустойчивости РР-интервала $P_n(C''_{ср})$ при обслуживании неприоритетного пакетного трафика со средней скоростью $C''_{ср}$ (5) определяется вероятностью ослаблений, меньше допустимой величины V_j для градации скорости C_j , т. е. $P_n(C''_{ср}) = P_{n,j}$.

В связи с обслуживанием приоритетного трафика с заданной скоростью передачи практически с прежними (до появления РР-станций с АМКП) минимальными задержками на РР-интервале, можно ограничиться для данного трафика ЧПК РР-интервала в виде рассчитанной величины коэффициента неустойчивости $P_n(C'_{тр})$. Для неприоритетного трафика, кроме коэффициента неустойчивости $P_n(C''_{ср})$ (который, очевидно, в общем случае отличается от коэффициента неустойчивости для приоритетного трафика $P_n(C'_{тр}) < P_n(C''_{ср})$), к ЧПК РР-интервала следует отнести величину максимальной доступной средней скорости $C''_{ср}$. При этом, если коэффициент неустойчивости $P_n(C''_{ср})$ еще можно (для оценки пригодности РР-интервала) сопоставить с требуемой величиной $P_{n,тр}$, то о достаточности рассчитанной величины средней скорости $C''_{ср}$ ничего однозначно сказать нельзя, поскольку требования к ней для отдельных РР-интервалов не предъявляются.

В то же время для пакетных сетей, как уже отмечалось ранее, существуют нормы на допустимые задержки, которые можно пересчитать, исходя из требований к максимальной допустимой задержке передачи пакетов через сеть между граничными устройствами коммутации пакетов [9]. Среднюю задержку пакетного неприоритетного трафика $\tau_{ср}$ на РР-интервале, построенном на основе РР-станций с АМКП, можно примерно оценить, исходя из рассчитанной величины средней скорости $C''_{ср}$ при известной средней длине (объеме) L протокольных блоков данных (в частном случае, пакетов) с помощью следующей простой формулы:

$$\tau_{ср} = L/C''_{ср}. \quad (6)$$

Однако данная формула является достаточно точной только при малой дисперсии случайных

колебаний скорости. Более точное значение средней задержки можно вычислить на основании известного распределения замираний и связанного с ним (в следствие адаптации) распределения градаций скорости:

$$\tau_{ср} = L \sum_{i=j}^n (P_{n,i+1} - P_{n,i}) / (C_i - C'_{тр}). \quad (7)$$

Следует отметить, что средняя задержка, рассчитанная по формулам (6) или (7), фактически является средним временем обслуживания пакетов на РР-интервале и не зависит от интенсивности трафика на входе РР-интервала. Реальная задержка пакетов на РР-интервале будет дополнительно включать время ожидания начала обслуживания пакетов в очереди, которое существенно зависит от интенсивности и других характеристик потока данных на входе РР-интервала. В предлагаемой модели функционирования РР-интервала реальный трафик не учитывается, но данная модель может быть использована для оценки показателей качества обслуживания конкретного пакетного трафика с заданными параметрами входного потока.

Таким образом, с помощью описанной выше математической модели функционирования РР-интервала, построенного на основе РР-станций с АМКП, можно рассчитать такие ЧПК РР-интервала, как коэффициент неустойчивости приоритетного $P_n(C'_{тр})$ и неприоритетного пакетного трафика $P_n(C''_{ср})$, максимальная средняя скорость $C''_{ср}$ и средняя задержка $\tau_{ср}$ неприоритетного пакетного трафика. Причем последние три показателя являются новыми и актуальными именно для РР-интервала, построенного на основе РР-станций с АМКП. Данные ЧПК РР-интервала используются самостоятельно (если целью расчетов является анализ характеристик только РР-интервала) или в качестве исходных данных для расчетов ЧПК РР-линий, направлений связи и сетей связи, построенных на основе РР-станций с АМКП.

Модель функционирования радиорелейной линии

Согласно классическому определению радиорелейной связи, приведенному в начале статьи, одной из ее отличительных особенностей является многократная ретрансляция радиосигналов. Структурно это выражается в том, что рассмотренные выше РР-интервалы являются лишь звеньями цепи, именуемой РР-линией, с ретрансляцией на промежуточных РР-станциях. Ретрансляция в РР-линиях на стыках между соседними РР-интервалами в общем случае может осуществляться довольно большим количеством способов – начиная от пассивной ретрансляции на несущей частоте в промежуточной РР-станции, состоящей из двух антенн (или специального переотражателя радиоволн), которая

практически не вносит задержку, до ретрансляции с предварительным разуплотнением каналов для ответвления части из них на узловых РР-станциях, что уже вносит задержку, малозаметную при временном уплотнении/разделении каналов, но более существенную при использовании технологий коммутации пакетов, реализуемых в современных РР-линиях на узловых РР-станциях с АМКП (рисунок 4).

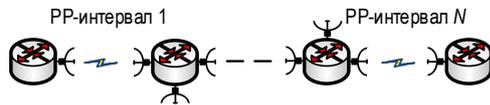


Рис. 4. Элементы модели функционирования РР-линии, построенной на основе РР-станций с АМКП

Fig. 4. Elements of the functional Model of Microwave Link Line Supplied with Microwave Link Stations with Adaptive Modulation and Packet Switching

Как и в предыдущем случае для РР-интервалов, расчеты для РР-линий выполняются в предположении, что передача данных осуществляется в одну сторону (по рисунку слева направо). При использовании симметричных РР-интервалов это неважно, и полученные результаты расчетов в одну сторону используются в качестве результатов расчета в обратную сторону. В противном случае (если есть отличия в ЧПК РР-интервалов в разные стороны) расчеты повторяются аналогичным образом для обратного направления.

Последовательный характер обработки данных на множестве РР-интервалов одной РР-линии предопределяет вид ЧПК РР-линии как некоторую аддитивную или мультипликативную свертку ЧПК РР-интервалов. Основной такой сверткой, регламентированной известными методиками расчета РР-линий, является расчет коэффициента готовности РР-линии путем перемножения коэффициентов готовности РР-интервалов (что предполагает независимость отказов и замираний на разных РР-интервалах). Указанный расчет эквивалентен следующей формуле расчета коэффициента неустойчивости РР-линии $P_{н,ррл}$ на основании рассчитанных коэффициентов неустойчивости РР-интервалов $P_{н,рри,i}$, $i = \overline{1, N}$:

$$P_{н,ррл} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{н,рри,i}) \approx \sum_{i=1}^N P_{н,рри,i}. \quad (8)$$

Приближенное равенство справа в формуле (8) справедливо при очень маленьких значениях $P_{н,рри,i} \ll 1/N$, $\forall i = \overline{1, N}$, что на практике обычно выполняется с большим запасом.

В РР-линии, построенной на основе РР-станций с АМКП, по формуле (8) можно вычислять показатели неустойчивости отдельно для приоритетного $P'_{н,ррл}$ и неприоритетного $P''_{н,ррл}$ трафика на основании рассчитанных показателей неустойчивости $P'_{н,рри,i}$ и $P''_{н,рри,i}$, $i = \overline{1, N}$, для данных типов трафика на РР-интервалах.

Дополнительным ЧПК РР-линии, характеризующим ее максимальную пропускную способность, может служить величина максимальной сквозной скорости передачи $C_{\max,ррл}$ с заданной устойчивостью, которую можно рассчитать на основании рассчитанных по формуле (1) значений максимальной скорости $C_{\max,рри,i}$, $i = \overline{1, N}$, на отдельных интервалах:

$$C_{\max,ррл} = \min_{i=\overline{1, N}} C_{\max,рри,i}. \quad (9)$$

Величина $C_{\max,ррл}$ (9) фактически характеризует максимальную пропускную способность РР-линии для приоритетного трафика $C'_{\max,ррл}$, поскольку предполагает выполнение требований по устойчивости и пренебрежимо малую задержку.

Аналогичным образом по формуле (9), подставляя в правую часть рассчитанные по формуле (5) значения максимальной средней скорости неприоритетного трафика $C''_{ср,рри,i}$ на отдельных интервалах $i = \overline{1, N}$, можно рассчитать и максимальную пропускную способность РР-линии для неприоритетного пакетного трафика $C''_{ср,ррл}$. Для данного типа трафика дополнительным ЧПК является суммарная задержка в РР-линии $\tau_{ср,ррл}$, которую можно рассчитать на основании рассчитанных по формулам (6) или (7) задержек на отдельных интервалах $\tau_{ср,рри,i}$, $i = \overline{1, N}$:

$$\tau_{ср,ррл} = \sum_{i=1}^N \tau_{ср,рри,i}. \quad (10)$$

По аналогии с замечанием, приведенным выше по поводу формул (6) и (7) расчета $\tau_{ср}$ на РР-интервале, следует отметить, что суммарная средняя задержка, рассчитанная по формуле (10), характеризует суммарное время обслуживания пакетов в РР-линии без учета времени ожидания на входе каждого очередного РР-интервала. Но если время ожидания, с учетом характеристик входного и, возможно, дополнительного (добавляемого на узловых РР-станциях) трафика будет рассчитано с помощью соответствующих математических моделей систем массового обслуживания, то оно может быть учтено в качестве дополнительных слагаемых в формуле (10).

Таким образом, с помощью описанной выше математической модели функционирования РР-линии, построенной на основе РР-станций с АМКП, можно рассчитать такие ЧПК РР-линии, как коэффициент неустойчивости для приоритетного $P'_{н,ррл}$ и неприоритетного $P''_{н,ррл}$ трафика, пропускная способность для приоритетного $C'_{\max,ррл}$ и неприоритетного $C''_{ср,ррл}$ трафика, а также средняя задержка $\tau_{ср,ррл}$ для неприоритетного пакетного трафика. Причем последние четыре показателя являются новыми и актуальными именно для РР-линий, построенных на основе РР-станций с АМКП. Данные ЧПК РР-линий используются самостоятельно (если целью расчетов является анализ ха-

рактических только РР-линий) или в качестве исходных данных для расчетов ЧПК направлений связи и сетей связи, построенных на основе РР-станций с АМКП.

Модель функционирования направления связи

Расчет характеристик направлений связи, образуемых между граничными устройствами коммутации (ГУК) с помощью множества маршрутов, проходящих обычно через разные участки не только разных РР-линий, но и разных кабельных линий связи, является не характерным для традиционного моделирования систем радиорелейной связи. Однако включение в состав РР-станций устройств коммутации пакетов, с которыми активно взаимодействует каналообразующая аппаратура с адаптивной модуляцией, динамически изменяющая скорость передачи на РР-интервалах, обуславливает научный и практический интерес к рассмотрению вопросов влияния характеристик РР-станций с АМКП не только на ЧПК РР-интервалов и РР-линий, но и на ЧПК направлений связи.

На рисунке 5 приведен пример элементов модели функционирования направления связи, построенного на основе РР-станций с АМКП, образующих несколько маршрутов (проходящих по разным РР-линиям) между двумя граничными устройствами коммутации ГУК₁ и ГУК₂.

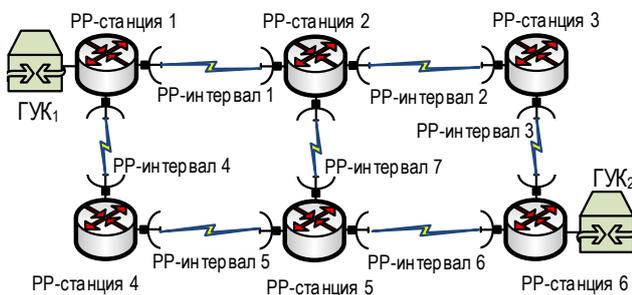


Рис. 5. Элементы модели функционирования направления связи, построенного на основе РР-станций с АМКП

Fig. 5. Elements of the Functional Model of Network Directions Supplied with Microwave Link Stations with Adaptive Modulation and Packet Switching

Выделение нескольких маршрутов (РР-линий) в одном направлении связи используется для решения двух задач: для повышения устойчивости и/или для повышения пропускной способности направления связи. Формально данные задачи могут решаться независимо, однако если говорить, для каналов с какой пропускной способностью нужно повысить устойчивость или какую устойчивость нужно обеспечить для каналов с максимальной пропускной способностью, то оказывается, что данные задачи тесно взаимосвязаны. Если все маршруты использовать для обеспечения максимальной пропускной способности, то устойчивость направления связи будет определяться устойчивостью самой неустойчивой РР-

линии. Если же все маршруты использовать для повышения устойчивости, то пропускная способность направления связи будет определяться радиорелейной линией с самой маленькой пропускной способностью.

С другой стороны, указанное выше противоречие между устойчивостью и пропускной способностью направления связи очень напоминает противоречие между устойчивостью и скоростью передачи на РР-интервалах. И там, и там при увеличении скорости (пропускной способности) падает устойчивость, и наоборот – при снижении скорости устойчивость повышается. Отсюда следует, что при образовании направлений связи, построенных на основе РР-станций с АМКП, можно за счет изменения маршрутов в устройствах коммутации пакетов, входящих в узловых РР-станциях, согласованно с адаптивным изменением скорости передачи на РР-интервалах различных маршрутов адаптивно перераспределять и тем самым максимизировать общую пропускную способность направления связи с контролируемой устойчивостью.

В целом такая процедура динамического изменения маршрутов в сетях связи, построенных на основе РР-станций с АМКП, потребует доработки системы управления всей сетью, и пока не известны (в деталях) примеры реализации таких систем. Но спрос на них есть и даже есть реклама готовых предложений [7] на основе РР-станций с АМКП в миллиметровом диапазоне волн, в котором замирания из-за осадков бывают очень длительными (о чем уже шла речь ранее), но локальными, что позволяет быстро восстанавливать или даже не прерывать связь за счет использования обходных маршрутов по участкам разных РР-линий, не подверженным одновременным замираниям.

Предлагаемая математическая модель функционирования направления связи, построенного на основе РР-станций с АМКП, базируется на методике оценки связности двухполюсного графа методом перебора простых цепей (МППЦ). Данная методика рекомендована в ГОСТ Р 53111-2008 [3], но полностью там не представлена. В приложении Б к данному ГОСТу лишь приводится общий вид формулы расчета вероятности связности p_{ij} заданной пары вершин (i, j) графа как вероятности исправного состояния хотя бы одного пути (маршрута) $\mu_{i,j}^{(l)}$ из всех возможных маршрутов между этими вершинами $\mu_{i,j}$:

$$p_{ij} = E \left\{ p_{i,j}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{i,j}^{(l)} \in \mu_{i,j}} (1 - p_{i,j}^{(l)}) \right\}, \quad (11)$$

где $p_{i,j}^{(l)}$ – вероятность связности l -го маршрута $\mu_{i,j}^{(l)}$, определяемая как совместная вероятность ис-

правного состояния всех ребер и вершин a , образующих этот маршрут l :

$$p_{i,j}^{(l)} = \prod_{\forall a \in \mu_{i,j}^{(l)}} p_a, \quad (12)$$

где p_a – коэффициент готовности a -го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащих пути $\mu_{i,j}^{(l)}$.

В части, касающейся ребер, коэффициентам готовности p_a в рассматриваемом случае направления связи, построенного на основе РР-станций с АМКП, соответствуют значения коэффициентов готовности (устойчивости) РР-интервалов, равные $(1 - P_n)$, где P_n – коэффициент неустойчивости РР-интервала, метод расчета которого был описан ранее в модели функционирования РР-интервала. В качестве коэффициентов готовности вершин можно принять коэффициенты готовности, определяемые технической надежностью РР-станций, учет которой, в частности, регламентирован в методике расчета цифровых радиорелейных линий, представленной в ГОСТ Р 53363-2009 [4].

Проблемой расчетов по формуле (11), взятой из [3], является нераскрытый математический смысл символа E перед фигурными скобками, который лишь указывает на использование в процессе расчетов по формуле, приведенной внутри скобок, так называемого поглощения, т. е. замены показателей степени больше единицы, появляющихся после раскрытия скобок у некоторых слагаемых, на единицу, что позволит исключить события многократного учета коэффициента готовности одного ребра или одной вершины. На рисунке 5 такими элементами, входящими в несколько маршрутов (в несколько РР-линий), являются РР-станции с номерами 1, 2, 5, 6 и РР-интервал 7.

Полное математическое описание МППЦ есть в [15]. Пример реализации МППЦ с подробным алгоритмическим описанием приведен в [16]. Особенностью программной реализации МППЦ, описанной в [16], является предварительный отбор всех кондиционных (подходящих) маршрутов с заданной пропускной способностью, что позволяет его использовать для расчета коэффициентов неустойчивости направлений связи, построенных на основе РР-станций с АМКП, как для приоритетного трафика $P'_{n,nc}$ с заданной скоростью передачи C'_{tr} , резервирующего для себя такую пропускную способность $C'_{tr,nc}$ во всех или в выбранной части маршрутов (РР-линий), так и для неприоритетного трафика, использующего всю оставшуюся пропускную способность C''_{nc} .

Для расчета пропускной способности C''_{nc} можно использовать известные методы решения задачи о максимальном потоке между заданными вершинами графа, например, метод расстановки пометок (алгоритм Форда – Фалкерсона), описанный в [17].

По аналогии с расчетом максимальной пропускной способности РР-линий (9) с заданной устойчивостью, для направления связи можно определить маршрут с максимальной пропускной способностью для приоритетного трафика $C'_{max,nc}$ с заданной устойчивостью. Если окажется, что $C'_{max,nc} \geq C'_{tr,nc}$, то для приоритетного трафика не потребуются резервирование, и всю оставшуюся пропускную способность C''_{nc} всех маршрутов можно использовать для неприоритетного трафика.

Величина средней задержки $\tau_{ср,nc}$ в направлении связи для неприоритетного трафика без учета характеристик входного трафика является неоднозначной, так как она в общем случае будет зависеть от выбираемого маршрута из множества всех маршрутов, доступных в направлении связи для неприоритетного трафика и от пропускной способности входящих в этот маршрут РР-интервалов, влияющих на задержки на каждом из них, которые учитываются в качестве слагаемых в формуле (10) при расчете суммарной задержки в РР-линии.

В качестве однозначного ЧПК, характеризующего задержку в направлении связи, можно использовать величину минимальной задержки $\tau_{min,nc}$ по всем маршрутам, которую можно определить известными методами поиска кратчайших маршрутов [17] или путем простого перебора уже отобранных кондиционных маршрутов.

При наличии исходных данных о характеристиках входного потока и его распределении между разными маршрутами можно будет рассчитать не минимальную, а реальную среднюю задержку $\tau_{ср,nc}$, которую можно минимизировать путем решения совместной задачи распределения пропускной способности и потоков данных между разными маршрутами [18].

Таким образом, с помощью описанной выше математической модели функционирования направления связи, построенного на основе РР-станций с АМКП, можно рассчитать такие ЧПК направления связи, как коэффициент неустойчивости направления связи для приоритетного $P'_{n,nc}(C'_{tr})$ и неприоритетного $P''_{n,nc}$ трафика, максимальная пропускная способность $C'_{max,nc}$ отдельного маршрута для приоритетного трафика с допустимой неустойчивостью, а также пропускная способность C''_{nc} и минимальная задержка в направлении связи $\tau_{nc,min}$ для неприоритетного пакетного трафика.

Все эти показатели являются новыми и актуальными для направлений связи, построенных на основе РР-станций с АМКП. Данные ЧПК направлений связи используются самостоятельно (если целью расчетов является анализ характеристик направлений связи) или в качестве исходных данных для последующего расчета ОПК сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП.

Модель функционирования сети связи

Расчет характеристик сети связи, включающей множество разнообразного каналообразующего и коммутационного оборудования, используемого для формирования и обслуживания множества различных направлений связи, предоставляющих множество телекоммуникационных услуг, еще менее характерен для традиционного моделирования систем радиорелейной связи, чем расчет характеристик отдельных направлений связи. Но если для построения отдельных направлений связи, расчет ЧПК которых был рассмотрен выше, могут использоваться РР-станции с АМКП, то напрашивается вывод о возможности обобщения результатов расчета ЧПК всех направлений связи в виде некоторых обобщенных показателей качества (ОПК) всей сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП.

На рисунке 6 приведен пример элементов модели функционирования сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП, образующих по несколько маршрутов (РР-линий) во всех направлениях связи между четырьмя граничными устройствами коммутации ГУК₁, ГУК₂, ГУК₃, ГУК₄.

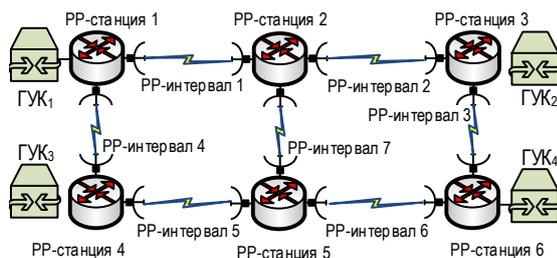


Рис. 6. Элементы модели функционирования сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП

Fig. 6. Elements of the Functional Model of Communication Network Supplied with Microwave Link Stations with Adaptive Modulation and Packet Switching

Обобщенная оценка показателей качества всех направлений связи, использующих общие сетевые ресурсы, является классической многокритериальной задачей, не имеющей однозначного решения без дополнительных уточнений. Указанные уточнения касаются в первую очередь степени известности на этапе проектирования требований к сети в части касающейся обслуживаемого трафика в различных направлениях связи.

Неопределенность (неполнота) указанных требований при необходимости получения конкретных гарантированных результатов принято учитывать расчетами на наихудший случай, результаты которых характеризуют вполне определенные предельные возможности сети. Так, при отсутствии исходных данных о потребностях отдельных направлений связи в пропускной способности, устойчивости и допустимых задержках в качестве ОПК сети связи можно использовать следующие граничные оценки на основе ЧПК отдельных направлений связи:

– гарантируемый (минимальный) коэффициент неустойчивости $P'_{н.с.с}$ сети связи при передаче приоритетного трафика в любом направлении связи с заданной скоростью $C'_{тр}$:

$$P'_{н.мин.с.с}(C'_{тр}) = \max_{k=1, K} P'_{н.с.с}(C'_{тр}); \quad (13)$$

– гарантируемая (максимальная) пропускная способность сети связи для приоритетного трафика $C'_{max.с.с}$ в любом направлении связи с допустимой неустойчивостью:

$$C'_{max.с.с} = \min_{k=1, K} C'_{max.с.с.k}, \quad (14)$$

где K – количество направлений в сети связи (например, на рисунке 6 количество дуплексных направлений связи между всеми парами ГУК $K = 6$, а однонаправленных $K = 12$);

– гарантируемая (максимальная) пропускная способность сети связи для неприоритетного трафика $C''_{max.с.с}$ в любом направлении связи:

$$C''_{max.с.с} = \min_{k=1, K} C''_{н.с.к}; \quad (15)$$

– гарантируемая (минимальная) задержка $\tau_{min.с.с}$ в сети связи при передаче неприоритетного трафика в любом направлении связи:

$$\tau_{min.с.с} = \max_{k=1, K} \tau_{min.н.с.}; \quad (16)$$

Указанные выше ОПК сети связи в виде граничных оценок возможностей сети позволяют, при появлении информации о конкретных требованиях обслуживаемого трафика в отдельных направлениях связи, сразу делать выводы (без дополнительных расчетов) о потенциальных возможностях их выполнения в данной сети. Однако приведенные выше граничные оценки предполагают использование всех сетевых ресурсов в интересах хоть и любого, но лишь одного направления связи.

Другим вариантом граничной оценки обобщенных показателей качества сети связи является расчет предельных возможностей сети при использовании сетевых ресурсов в интересах всех направлений связи одновременно. Одним из таких известных ОПК сети связи является обобщенный показатель устойчивости, вычисляемый как вероятность связности сети, под которой понимается вероятность наличия хотя бы одного исправного маршрута во всех направлениях связи. Относительно сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП, как уже отмечалось ранее, под исправным маршрутом следует понимать маршрут с пропускной способностью не менее требуемой. Эквивалентным показателем неустойчивости $P'_{н.с.с}$ сети связи для приоритетного трафика при этом является вероятность отсутствия маршрутов с требуемой пропускной способностью $C'_{тр}$ хотя бы в одном направлении связи. Рассчитать данный показатель можно одним из методов анализа структурной надежности многополюсных сетей связи, приведенных в [15].

Другим известным ОПК сети связи является обобщенный показатель суммарной пропускной способности сети $C_{\text{сум.сс}}$, который может быть рассчитан как для приоритетного $C'_{\text{сум.сс}}$, так и для неприоритетного трафика $C''_{\text{сум.сс}}$ (на основании пропускных способностей отдельных РР-интервалов $C'_{\text{мах.рри}}$ и $C''_{\text{ср.рри}}$), вычисляемый как пропускная способность эквивалентного направления связи, образованного объединением входов всех направлений связи на одном фиктивном узле, а выходов – на другом фиктивном узле.

Расчет приведенных выше ОПК $P'_{\text{н.сс}}$ и $C_{\text{сум.сс}}$ известными методами для больших сетей является сложной переборной задачей, которая для очень больших сетей является неразрешимой. В то же время эти ОПК не позволяют судить о распределении устойчивости и пропускной способности между отдельными направлениями связи.

Первый обобщенный показатель $P'_{\text{н.сс}}$ говорит только о гарантированной минимальной устойчивости в любом направлении, но в отдельных направлениях устойчивость может быть гораздо выше этой величины $P'_{\text{н.сс}}$, которая сама по себе может превышать требуемое значение. Обе ситуации свидетельствуют об избыточном расходе ресурсов сети, что является характерным для подобных граничных оценок в условиях отсутствия информации о конкретных требованиях к устойчивости в отдельных направлениях связи.

Второй показатель $C_{\text{сум.сс}}$ говорит лишь о максимальной гарантированной суммарной пропускной способности сети по всем направлениям связи, но в конкретных направлениях связи может оказаться пропускная способность совершенно разная как выше, так и ниже требуемой, что также, как и в предыдущем случае, является следствием отсутствия учета реальных потребностей отдельных направлений связи в пропускной способности.

Если будут известны потребности отдельных направлений связи в пропускной способности $C_{\text{тр.к}}$, $k = \overline{1, K}$, то в качестве ОПК сети можно использовать обобщенный показатель $P_{\text{сс}}$ степени выполнения требований к пропускной способности в каждом направлении $C_k/C_{\text{тр.к}}$, где C_k – рассчитанные значения пропускной способности, усредненный по всем направлениям с весовыми коэффициентами, равными доле их потребностей $C_{\text{тр.к}}/C_{\text{тр.с}}$ в суммарной требуемой пропускной способности $C_{\text{тр.с}}$:

$$P_{\text{сс}} = \frac{\sum_k C_{\text{тр.к}} \cdot (C_k/C_{\text{тр.к}})}{\sum_k C_{\text{тр.к}}} = \frac{\sum_k C_k}{C_{\text{тр.с}}}. \quad (17)$$

Величина C_k представляет собой обеспеченную или реализованную пропускную способность сети в k -м направлении и зависит от распределения пропускной способности всех сетевых элементов между проходящими через них маршрутами во всех направлениях связи. На это распределение

влияют настройки маршрутов в устройствах коммутации РР-станций с АМКП, которые можно сравнивать по обобщенному показателю $P_{\text{сс}}$ (17) и оптимизировать по критерию максимума его величины. При этом требования по устойчивости в каждом направлении будут выполняться, если контролировать их выполнение при выделении указанных пропускных способностей $\{C_k\}_k$ в каждом направлении на каждом входящем в них РР-интервале, что позволяет обеспечивать адаптивную модуляцию, как было показано ранее в модели функционирования РР-интервала.

С другой стороны, заметим, что формально показатель устойчивости направления связи также характеризует степень выполнения требований к пропускной способности, но не как долю общей пропускной способности сети (что можно назвать функциональной устойчивостью [16]), а как долю времени, в течение которого эти требования выполняются. Поэтому можно включить эти показатели, именуемые показателями структурной устойчивости (поскольку рассчитываются на основе структуры сетевого графа) в качестве дополнительных коэффициентов в числителе формулы (17) и получить обобщенный показатель одновременно структурной и функциональной устойчивости сети [16]:

$$P_{\text{сс}} = \frac{\sum_k C_k \cdot (1 - P_{\text{н.к}})}{C_{\text{тр.с}}}. \quad (18)$$

При этом по-прежнему сохраняется возможность обеспечения требуемой устойчивости в каждом отдельном направлении при выделении пропускных способностей $\{C_k\}_k$.

Недостатком ОПК сети связи (18) является отсутствие учета разной важности отдельных направлений, которая может быть известна при анализе сетей связи, построенных на основе РР-станций с АМКП. Одним из популярных методов учета разной важности при аддитивной свертке частных показателей, подобной (18), является добавление весовых коэффициентов $\{\beta_k\}_k$ [19], величина которых задается пропорционально важности отдельных направлений:

$$P_{\text{сс}} = \frac{\sum_k \beta_k \cdot C_k \cdot (1 - P_{\text{н.к}})}{C_{\text{тр.с}}}, \quad (19)$$

$$\beta_k \geq 0 | \forall k = \overline{1, K}, \quad \sum_k \beta_k = 1.$$

Следует отметить, что в приведенных выше вариантах свертки ЧПК направлений связи в ОПК сети связи (17–19) под индексами $k = \overline{1, K}$ можно понимать не номера направлений связи, а условные сквозные номера виртуальных каналов во всех направлениях связи, что позволит учесть распределение сетевых ресурсов не только между направлениями связи в целом, но и между отдельными виртуальными каналами, различаемыми в устройствах коммутации РР-станций с АМКП.

Введенные в ОПК (19) весовые коэффициенты важности разных виртуальных каналов для максимизации данного ОПК можно учесть при распределении пропускной способности доступных каналов и поступающих потоков данных в каждом отдельном устройстве коммутации, что позволяют делать современные сетевые механизмы, например, механизмы взвешенных очередей [20].

Известно [10], что весовая свертка частных показателей (19) может привести к увеличению ОПК не только за счет лучших ЧПК более важных слагаемых, но и за счет большого количества менее важных слагаемых в ущерб более важным ЧПК. Поэтому представляет интерес учета в ОПК сети связи также других вариантов свертки с учетом разной важности отдельных ЧПК, чувствительных, в частности, к результатам действия сетевых механизмов приоритетного обслуживания, обеспечивающих распределение сетевых ресурсов не пропорционально весовым коэффициентам, а в порядке убывания важности (приоритета).

В качестве такого ОПК в [16] предложено использовать особую свертку частных показателей качества отдельных виртуальных каналов с учетом их относительной важности, влияющей на распределение сетевых ресурсов. Внешне данная свертка напоминает обычную аддитивную свертку (18), но сложение ЧПК при этом выполняется не в произвольном, а в строгом порядке убывания важности ЧПК. Разумеется, если бы все ЧПК были вычислены заранее, т. е. до вычисления ОПК по формуле (18), то от перестановки слагаемых сумма бы не поменялась. Но сложение ЧПК в данном случае предлагается выполнять последовательно с одновременными промежуточными вычислениями очередных ЧПК с учетом промежуточной оптимизации выделяемых ресурсов с учетом их части, уже затраченной на образование уже учтенных виртуальных каналов более высокого приоритета:

$$P_{cc} = \frac{\sum_k C_k(\{C_r\}_{k-1}) \cdot (1 - P_{n,k}(\{C_r\}_{k-1}))}{C_{тр,с}}, \quad (20)$$

где $\{C_r\}_{k-1} = \{C_1, C_2, \dots, C_{k-1}\}$ – множество сетевых ресурсов (обозначенных значениями предоставленной скорости передачи), выделенных для $k-1$ виртуальных каналов, упорядоченных в порядке убывания приоритета; $C_k(\{C_r\}_{k-1})$, $P_{n,k}(\{C_r\}_{k-1})$ – значения скорости передачи и коэффициента неустойчивости k -го виртуального канала, рассчи-

танные с учетом затраченных сетевых ресурсов для предыдущих $r = 1, k - 1$ виртуальных каналов.

Таким образом, с помощью описанной выше математической модели функционирования сети связи, построенной на основе РР-станций с АМКП, можно рассчитать как классические ОПК сети связи, характеризующие предельные возможности сети по устойчивости $P_{n,\min,cc}$, пропускной способности $C_{\max,cc}$ и задержкам $\tau_{\min,cc}$ в любом отдельном направлении связи, так и интегральные сетевые показатели общесетевой устойчивости $P_{n,cc}$ и пропускной способности $C_{\text{сум},cc}$ во всех направлениях связи. Кроме того, предложены варианты расчета ОПК сети связи P_{cc} , позволяющие учитывать индивидуальные требования к пропускной способности и устойчивости отдельных направлений связи с детализацией до требований отдельных виртуальных каналов одновременно с учетом используемых в устройствах коммутации РР-станций с АМКП сетевых механизмов, обеспечивающих распределение сетевых ресурсов с учетом указанных требований и относительной важности (приоритета) каждого виртуального канала.

Заключение

Существующие методики расчета устойчивости радиорелейных линий и образуемых на их основе направлений связи в различных транспортных сетях и сетях доступа базируются на математических моделях функционирования РР-интервалов с постоянной скоростью передачи. Однако современные РР-станции поддерживают режимы работы с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов, которые позволяют изменять скорость передачи, адаптируясь к текущим изменениям уровня сигнала из-за замираний. Общепринятых математических моделей функционирования сетей связи, построенных на основе РР-станций с АМКП, а также соответствующих методик расчета их устойчивости в настоящее время не существует.

В статье описана предлагаемая математическая модель функционирования такой сети связи, которая может служить основой для дальнейшей разработки методик расчета и оптимизации радиорелейных интервалов, радиорелейных линий, направлений и сетей связи, построенных на основе радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов.

Список используемых источников

1. Справочник по радиорелейной связи. Под ред. С.В. Бородача. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
2. Методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости в диапазоне частот 2-20 ГГц. М.: Инженерный центр, 1998. 245 с.
3. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ, 2009. 16 с.
4. ГОСТ Р 53363-2009 Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета. М.: Стандартинформ, 2009. 68 с.

5. Рекомендация МСЭ-R P.530-17 (12/2017) Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости.
6. Кирик Ю.М., Петренко А.А. Радиорелейное оборудование с пакетной технологией передачи данных // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2010. Т. 4. № 7. С. 86–88.
7. Брусиловский Л.И. Радиорелейные системы: настоящее и будущее // XII Международный IT-форум с участием стран БРИКС и ШОС (Югра, 2021). URL: https://itforum.admhmao.ru/upload/iblock/b2d/Radioreleynye-sistemy-svyazi-RF-nastoyashchee-i-budushchee_Brusilovskiy-L.I..pdf (дата обращения 10.10.2021)
8. Одоевский С.М., Степанец В.А. Проектирование РРЛ: программный комплекс ONEPLAN RPLS // Первая миля. 2016. № 61. С. 18–23.
9. Рекомендация МСЭ-T Y.1541 (02/2006) Требования к сетевым показателям качества для служб, основанных на протоколе IP.
10. Каневский З.М., Дорман М.И., Токарев Б.В., Кретинин В.В. Передача информации с обратной связью. М.: Связь, 1976. 349 с.
11. Постюшков В.П., Серебряков Ю.М. Пахомов И.С. Управление параметрами сигналов в радиолиниях. Л.: ВАС, 1980. 51 с.
12. Онышко А.Г., Постюшков В.П., Чухванцев В.Я. Оптимальное управление энергетическими ресурсами в одноинтервальных радиолиниях. Л.: ВАС. 1984. 48 с.
13. Hanzo L., Webb W. T., Keller T. Single-and Multi-carrier Quadrature Amplitude Modulation: Principles and Applications for Personal Communications, WATM and Broadcasting. Wiley, 2000. 762 p.
14. Alouini M.S., Goldsmith A.J. Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels // Wireless Personal Communications. 2000. Vol. 13. PP. 119–143. DOI:10.1023/A:1008979107539
15. Филин Б.П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. М.: Радио и связь. 1987. 205 с.
16. Одоевский С.М., Лебедев П.В. Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 152–189. DOI:10.24411/2410-9916-2021-10107
17. Филлипс Д., Гарсия-Диас А. Методы анализа сетей. М.: Мир. 1984. 496 с.
18. Одоевский С., Григорчук А., Яговитов Д., Ясинский С. Обобщенная методика оптимизации совместного управления трафиком и пропускной способностью мультисервисной сети связи // Информация и космос. 2021. № 2. С. 37–44.
19. Ланнэ А.А., Улахович Д.А. Многокритериальная оптимизация Л.: ВАС, 1984. 94 с.
20. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2019. 992 с.

* * *

Functional Model of Communication Network of Microwave Link Stations with Adaptive Modulation and Package Switching

S. Odoevsky¹, V. Kluychnikov¹, I. Stepanets²

¹Military Academy of Communications,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

²Deutsche Telekom,
St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-63-76

Received 18th October 2021

Revised 15th November 2021

Accepted 18th November 2021

For citation: Odoevsky S., Kluychnikov V., Stepanets I. Functional Model of Communication Network of Microwave Link Stations with Adaptive Modulation and Package Switching. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(4):63–76. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-63-76

Abstract: *The article describes the model of the communication network functioning, which consist of microwave link stations with adaptive modulation and packet switching. Mathematical expressions are presented, which allow to calculate particular indicators of stability and throughput of microwave link intervals, lines and communication*

directions, as well as generalized quality indicators of the communication network as a whole, taking into account the peculiarities of the functioning of microwave link stations with adaptive modulation and packet switching under the fading conditions at separate microwave link intervals.

Keywords: microwave link communication, adaptive modulation, packet switching, modeling of communication networks.

References

1. *Handbook on Radio Relay Communication*. Ed. S.V. Borodich. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1981. 416 p. (in Russ.)
2. *Methodology for Calculating Lines of Line-of-Sight Digital Radio Relay Lines in the Frequency Range 2–20 GHz*. Moscow: Inzhenernyi tsentr Publ.; 1998. 245 p. (in Russ.)
3. GOST R 53111-2008 *Stability of functioning of the public communications network. Requirements and check methods*. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. 16 p. (in Russ.)
4. GOST R 53363-2009 *Digital radio-relay links. Quality parameters. Calculation methods*. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. 68 p. (in Russ.)
5. Rec. ITU-R P.530 (12/2017) Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.
6. Kirik Yu.M., Petrenko A.A. Radio Relay Equipment with Packet Data Transmission Technology. *T-Comm*. 2010;4(7): 86–88. (in Russ.)
7. Brusilovsky L.I. Radio Relay Systems: Present and Future. *Proceedings of the XII International IT Forum with the participation of the BRICS and SCO countries, Ugra, 2021*. Available from: https://itforum.admhmao.ru/upload/iblock/b2d/Radioreleynye-sistemy-svyazi-RF-nastoyashchee-i-budushchee-Brusilovskiy-LI_.pdf [Accessed 10th October 2021]
8. Odoevsky S., Stepanets V. Designing Microwave Links, ONEPLAN RPLS Software. *Last Mile*. 2016;61:18–23. (in Russ.)
9. Rec. ITU-T Y.1541 (02/2006) Network performance objectives for IP-based services.
10. Kanevsky Z.M., Dorman M.I., Tokarev B.V., Kretinin V.V. *Information Transfer with Feedback*. Moscow: Sviaz Publ.; 1976. 349 p. (in Russ.)
11. Postyushkov V.P., Serebryakov Yu.M. Pakhomov I.S. *Control of Parameters of Signals in Radio Lines*. Leningrad: Military Academy of Communications Publ.; 1980. 51p. (in Russ.)
12. Onyshko A.G., Postyushkov V.P., Chukhvantsev V.Ya. *Optimal Management of Energy Resources in Single-Interval Radio Lines*. Leningrad: Military Academy of Communications Publ.; 1984. 48 p. (in Russ.)
13. Hanzo L., Webb W. T., Keller T. *Single-and Multi-carrier Quadrature Amplitude Modulation: Principles and Applications for Personal Communications, WATM and Broadcasting*. Wiley; 2000. 762 p.
14. Alouini M.S., Goldsmith A.J. Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels. *Wireless Personal Communications*. 2000;13:119–143. DOI:10.1023/A:1008979107539
15. Filin B.P. *Methods for Analyzing the Structural Reliability of Communication Networks*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1987. 205 p. (in Russ.)
16. Odoevsky S.M., Lebedev P.V. Method for estimating the stability of a system of technological management for a special purpose infocommunication network with a defined topological and functional structures. *Systems of Control, Communication and Security*. 2021;1:152–189. (in Russ.) DOI:10.24411/2410-9916-2021-10107.
17. Phillips D., Garcia-Diaz A. *Network Analysis Methods*. Moscow: Mir Publ.; 1984. 496 p. (in Russ.)
18. Odoevsky S.M., Grigorichuk A.N., Yagovitev D.S., Yasinsky S.A. General Optimization Method and the Algorithm for of the Mutual Traffic and Bandwith Management of a Multiservice Communication Network. *Information and Space*. 2021;2: 37–44. (in Russ.)
19. Lanne A.A., Ulakhovich D.A. *Multi-Criterial Optimization*. Leningrad: Military Academy of Communications Publ.; 1984. 94 p. (in Russ.)
20. Olifer V., Olifer N. *Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols*. St. Petersburg: Piter; 2019. 992 p. (in Russ.)

Сведения об авторах:

ОДОЕВСКИЙ
Сергей Михайлович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Сетей связи и систем коммутации» Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного», odse2017@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-3616-507X>

КЛЮЧНИКОВ
Виктор Олегович

адъюнкт кафедры «Сетей связи и систем коммутации» Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного», KlyuchnikovVO@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-8812-9236>

СТЕПАНЕЦ
Ирина Валерьевна

эксперт ключевых проектов отдела планирования интегрированного доступа Дойче Телеком, stepanets.irina@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-1167-1590>