

УДК 681.3

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СПУТНИКА-РЕТРАНСЛЯТОРА ПРИ РЕЗЕРВИРОВАНИИ РАДИОРЕСУРСА С УПРЕЖДЕНИЕМ

Новиков Евгений Александрович

кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.

E-mail: novikov.evg.al@gmail.com.

Адрес: 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

Аннотация: В статье рассматривается вариант организации множественного доступа к радиоресурсу спутника-ретранслятора с выделением каналов по требованию на основе резервирования с упреждением. Исследуются модели с фиксированной и динамически изменяемой величиной резерва канальной емкости спутника-ретранслятора при передаче речевого трафика, а также модель распределения оставшегося ресурса для передачи трафика данных.

Ключевые слова: радиоресурс, динамическое резервирование с упреждением, спутниковая связь.

Введение

Необходимым условием инновационного развития экономики России является интенсивное развитие телекоммуникационной инфраструктуры, особенно ее космического сегмента. Для удаленных и труднодоступных районов использование систем спутниковой связи (ССС) зачастую является единственным возможным вариантом организации связи и передачи данных. Существенной особенностью такого варианта организации связи, определяющей его достоинства и недостатки, является использование в качестве промежуточного звена спутника-ретранслятора (СР) на околоземной орбите. Использование этой особенности, с одной стороны, позволяет предоставлять услуги связи и передачи данных там, где использование иных видов связи невозможно или имеет высокую стоимость, а с другой стороны, определяет трудности реализации, связанные с существенными задержками при распространении радиосигнала. Например, при использовании СР на геостационарной орбите минимальная задержка составляет 240 мс [1, 7], что сопоставимо с требованиями, предъявляемым к процессу передачи речевого трафика (допустимое время задержки для речевого пакета при передаче по спутниковым радиопередачами составляет не более 450 мс) [2].

Опыт эксплуатации систем связи и передачи данных показывает, что передаваемый трафик, как правило, имеет ярко выраженный нестационарный и самоподобный характер, что в значительной степени осложняет решение задачи распределения ресурсов, особенно, в случае использования СР. Достаточно остро вопрос распределения ограниченной емкости канального ресурса СР стоит в случае организации телефонной связи для группы абонентов и совместной с ней передачи данных.

Анализ динамики ведения переговоров группой абонентов показывает, что вероятность одновременной активности всех абонентов в группе по мере возрастания её численности становится пренебрежимо малой величиной. Ключевым вопросом в этом случае является выбор такого числа R резервных каналов, величина которого, с одной стороны, позволила бы экономить ресурс пропускной способности, а с другой стороны, обеспечивала бы заданный уровень потерь на уровне 1-5% от общего числа речевых пакетов [1, 4, 5]. При этом возможно две стратегии выбора значения R . Первая и более простая в реализации стратегия состоит в том, что величина резерва R устанавливается фиксированной для каждой емкости канальной группы независимо от числа активных абонентов. Величина R выбирается минимальной при ограничении на вероятность

потери речевого пакета. Вторая стратегия выбора величины резерва R состоит в том, что величина резерва адаптивно изменяется в зависимости от числа активных в текущем цикле абонентов и емкости канальной группы. Очевидно, что вторая стратегия более сложна в реализации, так как в этом случае необходимо вести таблицу значений R для каждого соотношения числа N_A активных абонентов и емкости K ресурса пропускной способности.

Так как число активных абонентов изменяется случайным образом независимо от числа выделенных каналов, то каждое состояние можно характеризовать парой чисел (i, j) , где $i = \overline{0, M}$ – число активных абонентов; $j = \overline{R, \min[K, (i+R)]}$ – число выделенных для телефонии каналов.

Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при передаче речевого трафика с фиксированным резервированием радиоресурса и упреждением

При первой стратегии (с фиксированным резервом) необходимо поддерживать постоянную величину резерва R до тех пор, пока не будет исчерпан весь доступный ресурс каналов. В качестве примера на рис. 1 изображен граф переходов в марковской цепи, моделирующей процесс статистического уплотнения группы из четырех каналов при фиксированной величине резерва $R=1$. Будем полагать, что вся группа каналов, обслуживаемая СР, разбита на две подгруппы: одна подгруппа емкостью j выделяется для передачи телефонии, а другая подгруппа емкостью $(K-j)$ – для передачи данных. В качестве допущения, позволяющего воспользоваться аппаратом теории марковских процессов, примем, что эта величина имеет показательное распределение со средним значением $1.5T_{ц}$. Использование такого допущения возможно поскольку перевод канала из первой подгруппы в

другую при активизации абонента осуществляется не мгновенно, а через некоторый интервал времени (вообще говоря, являющийся величиной случайной с равномерным распределением на интервале $[T_{ц}, 2T_{ц}]$).

Тогда интенсивность переходов из состояний (i, j) в состояния $(i, j+1)$ будет равна $\alpha = (1.5T_{ц})^{-1}$. На графе (рис. 1) этим переходам соответствуют горизонтальные стрелки в правом направлении.

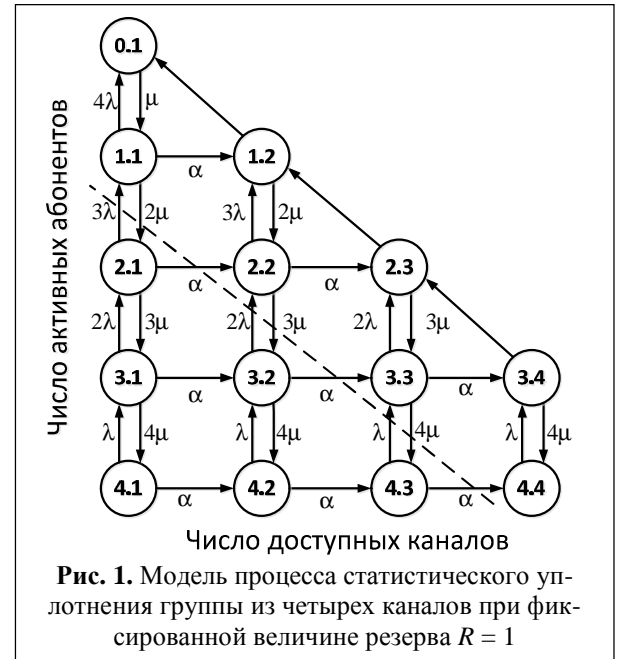


Рис. 1. Модель процесса статистического уплотнения группы из четырех каналов при фиксированной величине резерва $R = 1$

Для расчета вероятностей состояний подобной марковской цепи в стационарном режиме может быть составлена система линейных алгебраических уравнений вида:

Особенность системы уравнений (1) состоит в том, что сумма вероятностей состояний каждого яруса по горизонтали (рис. 1) для ка-

$$\begin{cases}
 p_{ij} = \frac{\lambda(N-i+1)p_{(i-1)j} + \mu \min(K, i+1)p_{(i+1)j} + \alpha p_{i(j-1)}}{\lambda(N-i) + \mu i + \alpha}, & i = \overline{1, N-1}, j = \overline{R, i+R-1}; \\
 p_{ij} = \frac{\mu \min(K, i+1)(p_{(i+1)j} + p_{(i+1)(j+1)}) + \alpha p_{i(j-1)}}{\lambda(N-i) + \mu i}, & i = \overline{1, N-1}, j = i+R; \\
 p_{Nj} = \frac{\lambda p_{(N-1)j} + \alpha p_{N(j-1)}}{K\mu + \alpha}, & j = \overline{R, K-1}; \\
 p_{N,K} = \frac{\lambda p_{(N-1)K} + \alpha p_{N(K-1)}}{\mu K}; \\
 \sum_{i=0}^N \sum_{j=R}^{\min(i+R, K)} p_{ij} = 1; \\
 p_{ij} = 0, (j-i) > R.
 \end{cases} \tag{1}$$

ждого индекса i совпадает с вероятностями P_i активизации i абонентов:

$$\sum_{j=R}^{\min(i+R,K)} p_{ij} = P_i. \quad (2)$$

Потери будут происходить в том случае, когда число активных абонентов будет превышать число доступных каналов, т.е. при $(i-j) > 0$. При этом, если $(i-j) = 1$, то будут теряться пакеты лишь одного соединения, при $(i-j) = 2$ – двух соединений и т.д. Состояния марковской цепи, в которых происходят потери пакетов, отделены в нижней части графа (рис. 1) штриховой линией. Учитывая, что стационарные вероятности состояний показывают, какую долю времени на интервале наблюдения процесс проводит в том или ином состоянии, вероятность потери речевых пакетов может быть оценена соотношением:

$$P_n = \sum_{i=R+1}^N \sum_{j=R}^{\min(K,i-1)} (i-j) p_{ij}. \quad (3)$$

Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при передаче речевого трафика с адаптивным резервированием радиоресурса и упреждением

Для второй стратегии резервирования с адаптивно изменяемой величиной резерва может быть построена марковская цепь, подобная изображенной на рис. 1. В качестве примера на рис. 2 приведен граф переходов для системы уплотнения 6 телефонных каналов при начальном уровне резерва $R_1 = 2$, где состояния марковской цепи, в которых происходят потери пакетов, отделены в нижней части графа пунктирной линией.

После достижения порогового состояния, в котором активны три абонента, уровень резерва снижается на 1, т.е. до $R_2 = R_1 - 1$. Для данной модели может быть составлена аналогичная (1) система линейных алгебраических уравнений, позволяющая рассчитать стационарные вероятности состояний. Отличием новой системы уравнений от (1) является условие:

$$p_{ij} = 0 \text{ при } i > i_{np}; j = i + R_1,$$

где i_{np} – предельное значение числа активных абонентов, после которого уровень резерва снижается на 1 (для приведенного примера на рис. 2 $i_{np} = 3$).

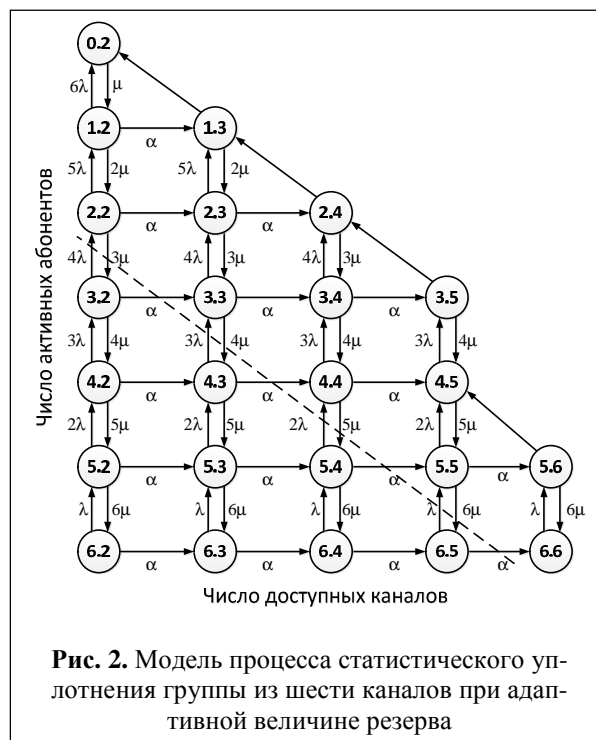


Рис. 2. Модель процесса статистического уплотнения группы из шести каналов при адаптивной величине резерва

При известных вероятностях состояний для первой и второй модели можно оценить среднее число занимаемых трафиком телефонии каналов \bar{K} , величину свободного ресурса $(K - \bar{K})$, который может быть задействован для передачи данных, а также уровень потерь речевых пакетов. Среднее число каналов, занимаемых системой уплотнения с динамическим резервированием, определяется равенством

$$\bar{K} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=R}^{\min(K,i+R)} j p_{ij}.$$

Достижимый при этом коэффициент уплотнения группы из K каналов можно оценить, как отношение числа уплотняемых источников N к емкости группы каналов K :

$$K_y = N / K.$$

На рис. 3 приведены кривые, отражающие коэффициент уплотнения (сплошные линии) в зависимости от числа уплотняемых каналов для трех случаев: 0 – без динамического резервирования; 1 – с резервированием одного ка-

нала; 2 – с адаптивным изменением числа резервируемых каналов. На этом же графике приведены кривые (штриховые линии), отражающие уровень потерь для различных схем резервирования каналов (при уплотнении без резервирования величина потерь нормировалась на уровне 1%).

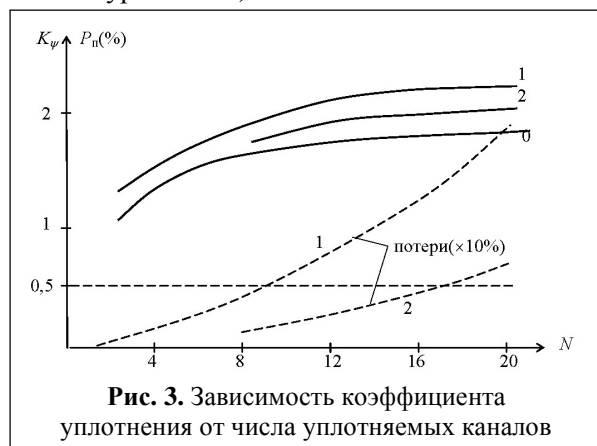


Рис. 3. Зависимость коэффициента уплотнения от числа уплотняемых каналов

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Использование механизма динамического резервирования каналов при статистическом уплотнении позволяет заметно (на 20-25%) повысить кратность уплотнения по сравнению со статическим закреплением каналов за группой уплотняемых абонентов. При этом появляется дополнительная возможность уплотнения спутниковых радиолиний потоками данных, не столь чувствительных к задержкам.

2. Резервирование фиксированного числа каналов оправдывает себя лишь для небольших групп (до 8 включительно) абонентов (кривая 1). При большей численности группы величина потерь в случае малого уровня резерва (1 канал) быстро превышает допустимый уровень (штриховая линия 1), что приводит к невозможности поддержания удовлетворительного качества диалога. В случае же большого уровня резерва (два и более каналов) практически пропадает эффект экономии ресурса пропускной способности уплотняемой спутниковой радиолинии.

3. Для групп абонентов численностью от 8 и выше более выгодным с точки зрения допустимого уровня потерь и достигаемого выигрыша является динамическое резервирование

запасных каналов с адаптивно изменяемой величиной резерва. При этом величина необходимого резерва определяется общей численностью уплотняемой группы и текущим значением числа активных абонентов. Значения резерва для различных сочетаний исходных данных и пороги их изменения могут быть установлены программно или «защиты» в память бортовой цифровой вычислительной машины СР на этапе проектирования.

Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при передаче трафика данных с адаптивным упреждающим резервированием

Число каналов, доступных для передачи сообщений данных (не занятых в текущий момент молчащими абонентами), будет случайным образом изменяться от 0 до $(K - R)$. Таким образом, дополнительный канал передачи данных, образуемый через ЗС, может быть представлен системой массового обслуживания (СМО) с переменной интенсивностью обслуживания.

Если принять допущение о том, что поток поступающих сообщений данных является пуассоновским с параметром γ , а объем сообщений данных является случайной величиной \hat{v} с экспоненциальным распределением:

$$B(v) = 1 - e^{-v/\bar{v}}, \quad (4)$$

где \bar{v} – средний объем сообщения данных в битах, то в качестве модели исследуемой СМО может быть использована двумерная марковская цепь, граф состояний которой для рассматриваемого примера представлен на рис.4.

Состояния марковской цепи характеризуются парой чисел (i, j) , где i – число свободных каналов, которые могут быть использованы для передачи данных ($i = \overline{0, K - R}$); j – число сообщений данных, которые необходимо передать ($j = \overline{0, N}$); N – предельная емкость буфера данных. Интенсивности переходов между состояниями определяются следующим образом:

γ – интенсивность поступления сообщений данных;

β – интенсивность обслуживания сообщений данных в одном канале мультиплектора, определяемая соотношением $\beta = c/\bar{v}$, где c – скорость передачи в отдельном канале;

μ – интенсивность освобождения каналов;

α_i – интенсивность резервирования i -го канала.

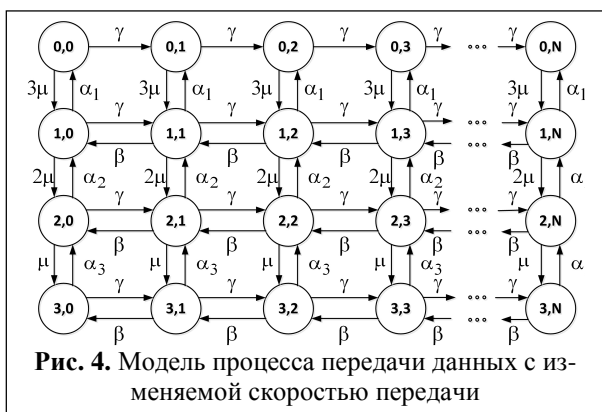


Рис. 4. Модель процесса передачи данных с изменяемой скоростью передачи

Для расчета стационарных вероятностей состояний p_{ij} рассматриваемой модели может быть составлена система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} p_{0j} = \frac{p_{1j}\alpha_1 + p_{0,j-1}\gamma}{(K-R)\mu + \gamma}, & j = \overline{1, N-1}; \\ p_{0N} = \frac{p_{1N}\alpha_1 + p_{0,N-1}\gamma}{(K-R)\mu}; \\ p_{ij} = \frac{p_{i+1}\alpha_{i+1} + p_{i,j+1}\beta + p_{i,j-1}\gamma + p_{i-1,j}(K-R-i+1)\mu}{\alpha_i + \beta i + (K-R-i)\mu + \gamma}, & i = \overline{1, K-R}, j = \overline{0, N}; \\ \sum_{i=0}^{K-R} \sum_{j=0}^N p_{ij} = 1. \end{cases} \quad (5)$$

После расчета стационарных вероятностей состояний исследуемой марковской цепи легко могут быть вычислены следующие характеристики:

– средняя длина очереди сообщений данных в буфере:

$$\bar{q} = \sum_{j=2}^N j \sum_{i=0}^{K-R} p_{ij}; \quad (6)$$

– вероятность переполнения буфера:

$$P_{\Pi} = \sum_{i=0}^{K-R} p_{iN}; \quad (7)$$

– среднее время ожидания сообщения данных до начала передачи:

$$\bar{\omega} = \frac{\bar{q}}{\gamma(1-P_{\Pi})}, \quad (8)$$

где γ – интенсивность поступления сообщений данных.

На рис. 5 представлены зависимости предельно достижимой средней скорости передачи данных в зависимости от емкости уплотняемой группы телефонных каналов для трех стратегий резервирования каналов:

а) при первой стратегии резервируется только один дополнительный канал, при этом потери превышают норму уже на группе из 9 каналов;

б) при второй стратегии число резервируемых каналов адаптивно изменяется от 2 до 1 в зависимости от числа активных абонентов. В этом случае коэффициент уплотнения несколько снижается, однако потери остаются в норме при емкости уплотняемой группы вплоть до 14 каналов;

в) третья стратегия резервирования предполагает адаптивное изменение числа резервируемых каналов от 3 до 1 по мере увеличения числа активных абонентов. В этом случае емкость уплотняемой группы может превышать 20 каналов при сохранении потерь на уровне 5%.

Анализ приведенных зависимостей показывает,

что скорость передачи в канале данных растет практически линейно по мере увеличения емкости уплотняемой канальной группы до тех пор, пока не достигается предельный уровень потерь пакетов телефонии и не возникает необходимость увеличения числа резервируемых каналов. Учитывая случайный характер потока сообщений данных и ограничения на максимальную задержку, следует отметить, что реальная скорость передачи в канале данных оказывается меньшей, чем та, которую может обеспечить ресурс незанятых телефонией каналов, и составляет порядка 60% от емкости доступной группы каналов. Ограничивая коэффициент загрузки канала данных на уровне

0,6, можно оценить достигаемый при совместном уплотнении речи и данных коэффициент уплотнения радиолинии K_y :

$$K_y = \frac{M + 0.6 \times (K - \bar{K})}{K}, \quad (11)$$

где M – число уплотняемых источников телефонии.

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента уплотнения K_y и коэффициента использования радиоресурса (КИР) от емкости канальной группы K , уплотняемой M телефонными абонентами и потоком данных при ограничении потерь речевых фрагментов на уровне 5% и предельной задержки сообщений данных на уровне 1с.

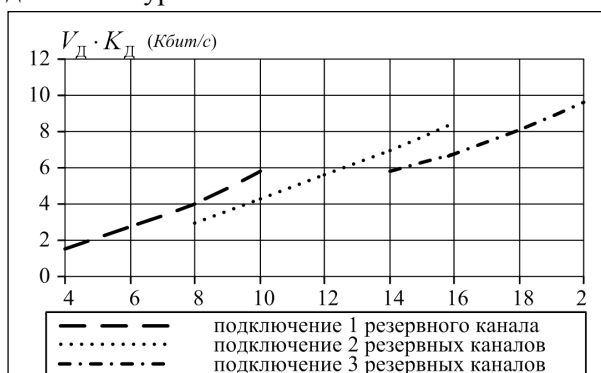


Рис. 5. Средняя скорость передачи канала данных при уплотнении K телефонных каналов и ограничении потерь на уровне 5%

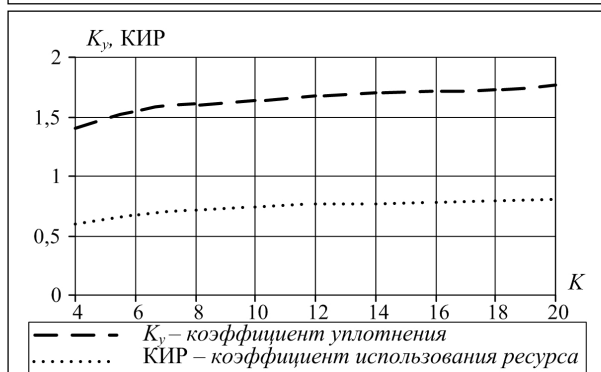


Рис. 6. Зависимость коэффициента уплотнения K_y и КИР радиолинии от емкости канальной группы K , уплотняемой M телефонными абонентами и потоком данных (предельно достижимые значения)

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать выводы:

1. Использование механизма динамического распределения каналов каждой ЗС (в зависи-

мости от текущей активности) даже с учетом резерва на запаздывание позволяет заметно (на 20-25%) повысить кратность уплотнения бортового радиоресурса СР по сравнению со статическим закреплением каналов. При этом появляется дополнительная возможность уплотнения спутниковых радиолиний потоками данных, не столь чувствительных к задержкам.

2. Совместное уплотнение образуемой ЗС группы каналов потоками речи и данных позволяет существенно повысить коэффициент использования выделенного станции радиоресурса (до уровня 80%, в отличие от 40% без уплотнения) и практически удвоить емкость ССС.

3. Резервирование фиксированного числа каналов оправдывает себя лишь для небольших групп (до 8 включительно) абонентов (кривая 1, рис.5). При большей численности группы величина потерь в случае малого уровня резерва (1 канал) быстро превышает допустимый уровень, что приводит к невозможности поддержания удовлетворительного качества диалога. В случае же большого уровня резерва (два и более каналов) практически пропадает эффект экономии ресурса пропускной способности уплотняемой спутниковой радиолинии.

4. Для групп абонентов численностью от 8 и выше более выгодным с точки зрения допустимого уровня потерь и достигаемого выигрыша является динамическое резервирование запасных каналов с адаптивно изменяемой величиной резерва. При этом величина необходимого резерва определяется общей численностью уплотняемой группы и текущим значением числа активных абонентов. Значения резерва для различных сочетаний исходных данных могут быть установлены программно или «защиты» в память бортовой вычислительной машины СР на этапе проектирования.

5. Предложенный в работе метод и разработанные математические модели позволяют обоснованно управлять (с учетом запаздывания) выделяемым для каждой ЗС радиоресурсом (числом резервируемых для телефонии и выделяемых для передачи данных каналов), обеспечивая заданные параметры качества обслуживания абонентов.

Литература

1. Антоян А.Б. Пакетная коммутация для передачи речи // Вестник связи. - 1999. - № 5.- С.68–71.
2. Коган А.В. IP-телефония: оценка качества речи // Технологии и средства связи.-2001.- №1. - С. 78 – 84.
3. Корнышев Ю.Н., Дузь В.И. Исследование свойств потоков телефонных вызовов // Электро-связь.- 1990 - №3.- С.30-33.
4. Федин Д.Н. Передача голоса по сетям с пакетной коммутацией // Вестник связи.-1999.- №9.-

Поступила 18 февраля 2014 г.

С.33-35.

5. Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф. Цифровая обработка речи / Под ред. Шелухина. – М.: Радио и связь, 2000. – 256 с.
6. Chandra K. Statistical multiplexing / Wiley Encyclopedia of Telecommunicatins. -2003.
7. Gruber J.G. Delay related issues in integrated voice and data networks. // IEEE Trans. Comm.- 1981.- V.29.- № 6.- pp. 768 – 800.
8. Minoly D. Issues in packet voice communication.// Proc. IEEE.- 1979.- v. 126.- №8.

English

Assessment of reflecting satellite transmission capacity when reserving a feed-forward radio resource

Novikov Evgeniy Aleksandrovich – Candidate of Engineering, Associate Professor, Doctoral Student Department of Network and Communication Systems of Space Complexes A.F. Mozhaysky Military Space Academy.

Address: 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

Abstract: There is a special necessity of application of satellite communication systems for providing access of subscribers living in hard-to-reach and remote regions of Russia to modern info communication services. The vastness of the serviced area with a large subscriber basis and the principal limit of frequency - power resources of reflecting satellites stipulate a special urgency of the task of dynamic reallocation of a radio resource of a reflecting satellite between active and passive directions of communication. The problem of determination of the number of the back-up channels, which allow to minimize a resource of the selected transmission capacity and to ensure the given degree of loses at 1-5 % level of the total number of voice packets is stated in the paper. The solution of the problem of providing multiple access to a radio resource of reflecting satellite by the request is offered on the basis of reserving feed-forward channels. The value of a required reserve is determined by the total number of the consolidated group and the current number of active subscribers. The models with the fixed and dynamically changeable value of channel capacity reserve of a reflecting satellite in the transmission of voice traffic and the distribution model of the remain resource for data traffic transmission are investigated. The proposed approach allows to manage reasonably (taking into account the delay) a radio resource selected for each ground station (the number of channels reserved for a telephony and selected for date transmission), ensuring the required quality parameters of subscribers service.

Key words: a radio resource, dynamic feed-forward reserving, satellite communication.

References

1. Antonjan A.B. Packet Switching for Voice Transmission. Vestnik svjazi. 1999. № 5. P.68–71.
2. Kogan A.V. IP- telefonija: Voice Quality Estimation. Tehnologii i sredstva svjazi. 2001. № 1 p. 78 – 84.
3. Kornyshev Ju.N., Duz V.I. Research of Telephone Calls Flow Characteristics. Jelektrosvjaz. 1990. № 3. p.30-33.
4. Fedin D.N. Voice Transmission through Networks with Packet Switching. Vestnik svjazi. 1999. № 9. p.33-35.
5. Sheluhin O.I., Lujancev N.F. Digital Voice Processing. Ed. by Sheluhin. M.: Radio i svjaz, 2000. 256p.
6. Chandra K. Statistical multiplexing. Wiley Encyclopedia of Telecommunicatins. 2003.
7. Gruber J.G. Delay Related Issues in Integrated Voice and Data Networks. IEEE Trans. Comm. 1981. V.29. № 6. pp. 768-800.
8. Minoly D. Issues in Packet Voice Communication. Proc. IEEE. 1979. v. 126. №8.