

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЧЕВОГО КАНАЛА В СЕТЯХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

В настоящее время происходит интенсивное развитие рынка передачи речевого трафика по сетям с коммутацией пакетов. При этом характеристики транспортной сети могут значительно влиять на качество передачи речевого сигнала. Одним из перспективных методов исследования характеристик передачи речевого трафика является имитационное моделирование. В данной статье рассматривается методика имитационного моделирования пакетной передачи речи, которая была использована при исследовании характеристик пакетной передачи речи через IP-сети.

1. Программные средства моделирования

В качестве базового был выбран пакет имитационного моделирования LBL Network Simulator (NS) v 2.1b8 [1], работающий под управлением ОС Linux RH 6.2. Данное программное обеспечение (ПО) используется для моделирования IP-сетей. Пакет позволяет моделировать элементы реальных сетей передачи данных (СПД): агенты протоколов уровня 4-7, каналы передачи данных с ошибками, протоколы маршрутизации, дисциплины обслуживания очереди заявок и др. Важно также, что пакет имеет открытый код, что позволяет добавлять свои компоненты. Базовые компоненты написаны на C++, интерфейс и некоторые элементы – на языке Tool Command Language (TCL). На рис. 1 представлен структура взаимодействующих элементов пакета NS..

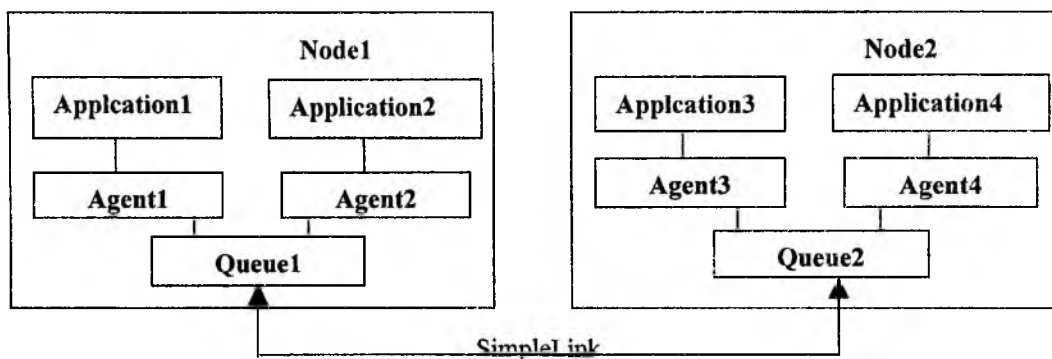


Рис. 1

Элементы модели представленные на рис. 1, имеют следующее назначение:

Node - элемент соответствующий оконечному оборудованию данных (ООД), имеет уникальный адрес в сети;

Application (Приложение) - моделирует прикладной процесс, являющийся источником информации, которую он генерирует в соответствии с определенным алгоритмом, при этом данные передаются на нижние уровни;

Agent (Агент) - моделирует протокол транспортного уровня (в модели TCP, UDP, RTP/RTCP), который служит для формирования сегментов, содержащих заголовки протокола и данные от приложения, управляет потоком, обнаруживает и восстанавливает поврежденные сегменты и т.д;

Queue (Очередь) - моделирует буфер (накопитель), в котором сегменты протокола транспортного уровня ожидают передачи по каналу связи. Очередь может иметь дисциплину обслуживания, отличную от FIFO (RED,ERED,FQ,WRR);

SimpleLink (Канал передачи) - моделирует канал передачи с задержкой, интенсивностью обслуживания, источником ошибок.

Агенты алгоритмов маршрутизации (как unicast, так и multicast) расположены в узлах либо реализованы централизованно в объекте Simulator.

Для визуализации процесса моделирования использовался пакет LBL Network Animator (NAM). Применение NAM особенно эффективно при анализе маршрутов передачи пакетов и состояния очередей заявок каналов связи.

Стек протоколов транспортного уровня, используемых при передаче речи и реализованный в NS, соответствует стандарту RTP/RTCP (Real Time Protocol / Real Time Control Protocol) [2]. На приклад-

ном уровне к каждому агенту привязывается источник речевого сигнала, определенный ниже. В сессии RTP/RTCP участвуют два агента (хотя моделирование конференц-связи в режиме multicast также возможно). Количество источников речи изменяется как параметр моделирования. Размер пакета RTP выбирался из таких соображений: 12 байт заголовков RTP [10], при использовании FEC заголовков увеличивается на 4 байта для каждой копии, с учетом капсуляции в сегмент UDP (заголовок 20 байт) общий размер пакета, передаваемого на сетевой уровень [3]:

$$L = 20_{UDP} + 12_{RTP} + N_{main} + k \cdot 4 + N_{red} + 1$$

2. Моделирование источников речевого трафика

При выборе модели речевого трафика необходимо учитывать лингвистические особенности передаваемой речи, такие как значения среднего времени пауз и активности трафика для данного языка.

При исследовании были реализованы два вида моделей источника на основе "быстрого детектора" [4], моделируемого марковским процессом с тремя состояниями, и модель на основе реального речевого трафика. Диаграмма переходов модели источника речевого сигнала приведена на рис. 2.

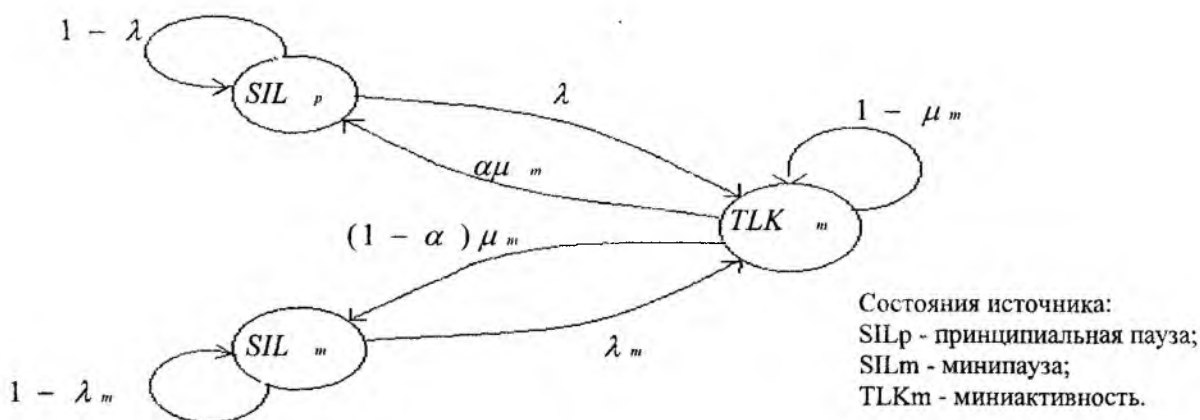


Рис. 2

При этом интенсивности переходов определяются:

$$\lambda = 1 - e^{-t/t_2}$$

$$\mu_m = 1 - e^{-t/t_3}$$

$$\lambda_m = 1 - e^{-t/t_4}$$

среднее количество миниактивностей:

$$\alpha = (t_3 + t_4) / t_1,$$

где: t - длительность временного интервала формирования пакетов во время речевой активности (в дальнейшем 20 мс); t_1, t_2, t_3, t_4 - параметры экспоненциально распределенных случайных величин представляющих [11]:

t_1 - принципиальную активность (1,0 с);

t_2 - принципиальную паузу (1,35 с);

t_3 - миниактивность (0,275 с);

t_4 - минипаузу (0,05 с).

Идея источника на основе реального трафика состоит из предварительной записи речевого фрагмента, полученного использованием стандартного пакета передачи речи по IP сетям (при моделировании применялся RAT 4.2.9). При этом выбирается тип кодера, параметры FEC и др. Трафик собирается с помощью утилиты rtpdump из пакета RTPTOOLS в виде последовательности RTP/RTCP-пакетов. На втором этапе путем обработки записанного трафика создается файл данных для источника, содержащий время генерации, тип пакета, размер пакета. На следующем этапе пакет моделирова-

ния фактически производит модификацию исходного файла трассировки с учетом полученных в ходе моделирования потерь и запаздывания пакетов. На рис. 3 представлена схема формирования данных источника реального речевого трафика

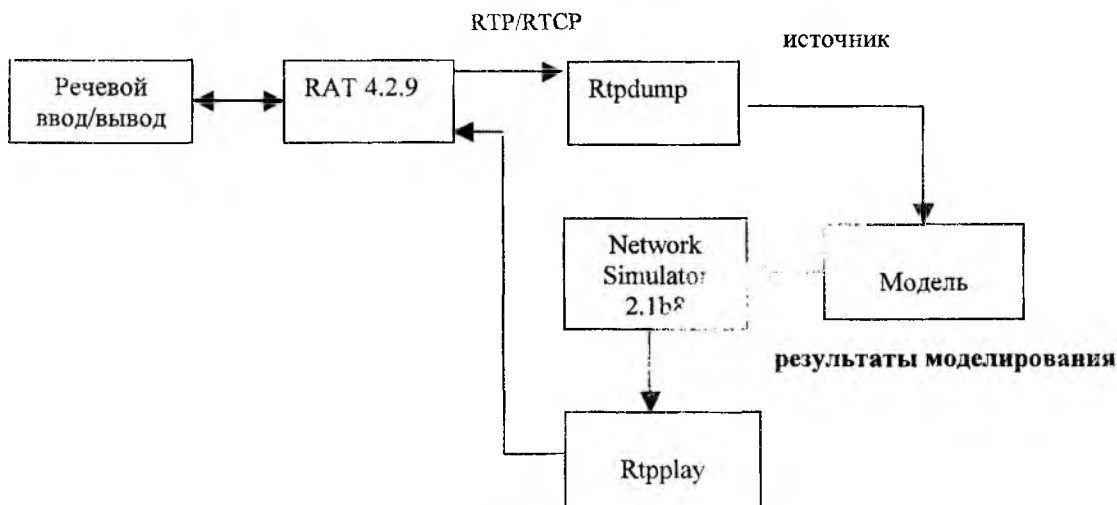


Рис. 3

В пакет NS был добавлен класс Session/RTP_RED, использующий средства штатного класса Session/RTP. Трафик RTCP формируется вместе с RTP. Данный подход позволяет моделировать передачу речи в различных условиях, используя все элементы Network Simulator.

После моделирования производится определение QoS передачи речи путем субъективной оценки по шкале MOS. Для этого с помощью утилиты rtpplay производится "воспроизведение" восстановленного фрагмента.

При моделировании большого количества речевых источников эффективным является совместное использование двух видов источников, при этом количество источников реального трафика может быть минимальным, так как они будут использоваться для контроля QoS.

3. Моделирование источников фонового трафика

В случае совместной передачи речи и данных для модели передачи речевого трафика кроме речевого источника необходимо учитывать характер фонового трафика. При моделировании источника возможно определить тип протокола прикладного и транспортного уровней. Важной характеристикой протокола транспортного уровня является наличие механизма определения перегрузки сети. Обычно они реализованы в TCP различных версий. На прикладном уровне передача данных обычно моделируется агентом протокола FTP. При этом интенсивность передачи данных в сеть определяется агентом протокола TCP, а характеристики трафика значительно зависят от характеристик протокола транспортного уровня, например, от версии протокола TCP (RFC793, Tahoe, Reno, Newreno, Sack, Vegas и др.).

Источники с постоянной скоростью передачи (CBR) и изменяемой скоростью передачи (VBR) принято также характеризовать бертностью [5].

При использовании агентов TCP необходимо учитывать наличие элементов предотвращения перегрузки сети в агенте данной версии TCP и влияние агентов данной версии на QoS. В настоящее время разработаны и широко применяются несколько алгоритмов предотвращения перегрузок сети, их можно классифицировать по способу реализации: в объектах протоколов транспортного уровня агентов и в маршрутизаторах СКП. Среди первой группы можно выделить используемые в различных версиях протокола TCP [6]:

- Slow start;
- Congestion avoidance;
- Fast retransmit;
- Fast recovery;

Недостатком методов первой группы является ограничение интенсивности источников нагрузки при обнаружении признаков перегрузки в сети, при этом к ограничениям приводят как значительные

флуктуации нагрузки, так и кратковременные перегрузки в сети, что при передаче речевого трафика может вызвать значительную деградацию качества передаваемого сигнала [6].

Среди алгоритмов второй группы широко используются:

- Random Early Detect (RED);
- WRR (Weight Round Robin);
- CBQ (Class Basic Queueing);
- RSVP (Resource reSerVation Protocol).

При этом первые три фактически являются вариантами дисциплины обслуживания очереди заявок и реализуются в КСв.

4. Моделирование восстановления потерянных речевых сегментов и формирования задержки воспроизведения речи

При моделировании важно учесть влияние алгоритмов восстановления речевых сегментов и алгоритмов формирования задержек воспроизведения речи, так как они оказывают значительное влияние на QoS. Одним из широко используемых методов компенсации потерь, вызванных кратковременными перегрузками сети, является прямое исправление ошибок без повторной передачи (FEC Forward Error Correction) [7]. При этом используется проверочное кодирование с использованием различных алгоритмов (например, проверки по четности или код Рида-Соломона). Одним из недостатков данного алгоритма является дополнительная задержка, вносимая в процессе восстановления. Достоинством является точное восстановление потерянных сегментов и независимость от типа носителя (т.е. типа передаваемой информации).

В [7] предложена модификация FEC, учитывающая тип носителя - SFEC (Signal Forward Error Correction). Принцип действия SFEC основан на передаче в одном пакете основной части, содержащей данные текущего интервала (k), кодируемые с базовой скоростью, и дополнительной части, содержащей r блоков данных предшествующих интервалов ($k-r$), кодируемых с меньшей скоростью.

Пояснение принципа действия SFEC приведено на рис. 4.

В [7] приведены результаты имитационного моделирования SFEC в случае $r=1$.

В предлагаемой методике реализация SFEC зависит от модели источника речевого трафика. В случае марковской модели модифицируется размер пакета RTP и при восстановлении учитываются характеристики используемого FEC алгоритма.

В случае модели реального трафика параметры FEC алгоритма указываются в настройках пакета RAT до начала генерирования трафика.

Основной задачей алгоритмов второй группы [8] является формирование задержки воспроизведения d_i с целью уменьшения потери данных интервалов кодирования из-за запаздывания сегментов, для чего производится оценка сетевой задержки, при этом время воспроизведения первого сегмента определяется как:

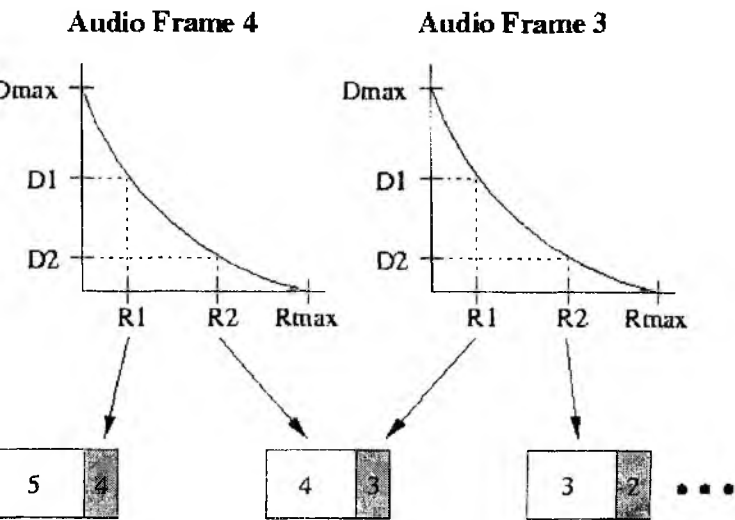


Рис. 4

$$p_i = t_i + d_i + \mu v_i, \quad (1)$$

где: t_i – время генерации сегмента; d_i – оценка сетевой задержки; v_i – оценка дисперсии сетевой задержки.

Значения d_i и v_i обновляются по данным каждого прибывающего пакета, вычисление v_i одинаково для всех алгоритмов:

$$v_i = \alpha v_{i-1} + (1 - \alpha) |d_i - n_i| \quad (2)$$

где n_i - текущая сетевая задержка пакета.

Кратко рассмотрим существующие алгоритмы [8].

1. Exp-Avg.

При этом d_i вычисляется по (2), d_i вычисляется по формуле:

$$d_i = \alpha d_{i-1} + (1 - \alpha) n_i \quad (3)$$

2. Fast Exp-Avg,

В отличие от первого алгоритма (3), более быстро адаптируется к увеличению задержки, используя меньший весовой коэффициент $\beta \leq \alpha$.

$$d_i = \begin{cases} \beta d_{i-1} + (1 - \beta) n_i & n_i > d_{i-1} \\ \alpha d_{i-1} + (1 - \alpha) n_i & n_i \leq d_{i-1} \end{cases}$$

3. Min-Delays.

Использует минимальную задержку среди всех пакетов речевой активности.

$$d_i = \min_{j \in S} (n_j)$$

При моделировании в качестве базового используется алгоритм Exp-Avg, d_i вычисляется по (3).
Время воспроизведения речевого фрагмента вычисляется по (1).

5. Критерии оценки потерь и задержек сегментов при передаче речи

При исследовании передачи речевого сигнала также необходимо произвести оценку значений потерь и задержек пакетов. При этом необходимо учитывать специфику передачи и восстановления речевого сигнала (например, влияние алгоритмов FEC). Определение параметров моделей потерь производится путем анализа статистики сетевого трафика [9-11].

Рассматриваются следующие характеристики потерь речевых сегментов:

$$P(X = k) = \frac{o_k}{a}, \quad (4)$$

$$E[X] = \frac{1}{a} \sum_{k=1}^{\infty} k o_k, \quad (5)$$

$$P(X \geq k) = \frac{1}{a} \sum_{n=k}^{\infty} o_n, \quad (6)$$

$$P(X \geq k | X \geq k-1) = \frac{\sum_{n=k}^{\infty} o_n}{\sum_{n=k-1}^{\infty} o_n}, \quad (7)$$

$$P(Y = k) = \frac{o_k}{\sum_{n=1}^{\infty} o_n}, \quad (8)$$

$$E[Y] = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k o_k}{\sum_{k=1}^{\infty} o_k}, \quad (9)$$

где o_k - число групп с последовательной потерей k речевых пакетов.

Учитывая значительное влияние групповых потерь пакетов на качество передачи речи в [10] предложены характеристики (4)-(9), определяющие длину и период появления групповых потерь речевых сегментов.

Задержки, возникающие при передаче речи, классифицируются следующим образом [11]:

- сетевая, состоящая из задержки передачи, распространения, ожидания в очередях;
- вызываемая Операционной Системой приемной или передающей сторон;
- устройств преобразования, например, звуковых картах;
- вызываемые некоторыми алгоритмами кодирования;
- вызываемые приложениями, например, задержками воспроизведения речи на приемной стороне.

Для характеристики задержек пакетов в сети возможно использовать условные распределения ccdf (Conditional Cumulative Delay Distribution) [11], определяемые как

$$f(t) = P[d_i \geq t | d_{i-1} \geq t], l = 1, 2, 3, \dots,$$

$$f(t) = P[d_i | d_{i-1} \in (t_1, t_2)]$$

где l – определяет значение смещения между поступающими пакетами.

5. Моделирование потерь сегментов при передаче речевого трафика

Одной из задач при исследовании алгоритмов FEC является определение значения количества передаваемых копий данных предыдущих интервалов кодирования, передаваемых в данном RTP пакете и скорости их кодирования, оптимальных для данных условий передачи. В [11] для моделирования потерь речевых пакетов предложено использовать простую модель Гильберта, которая фактически является Марковской с 2-мя состояниями. На рис. 5 показан граф переходов для моделей Гильберта.

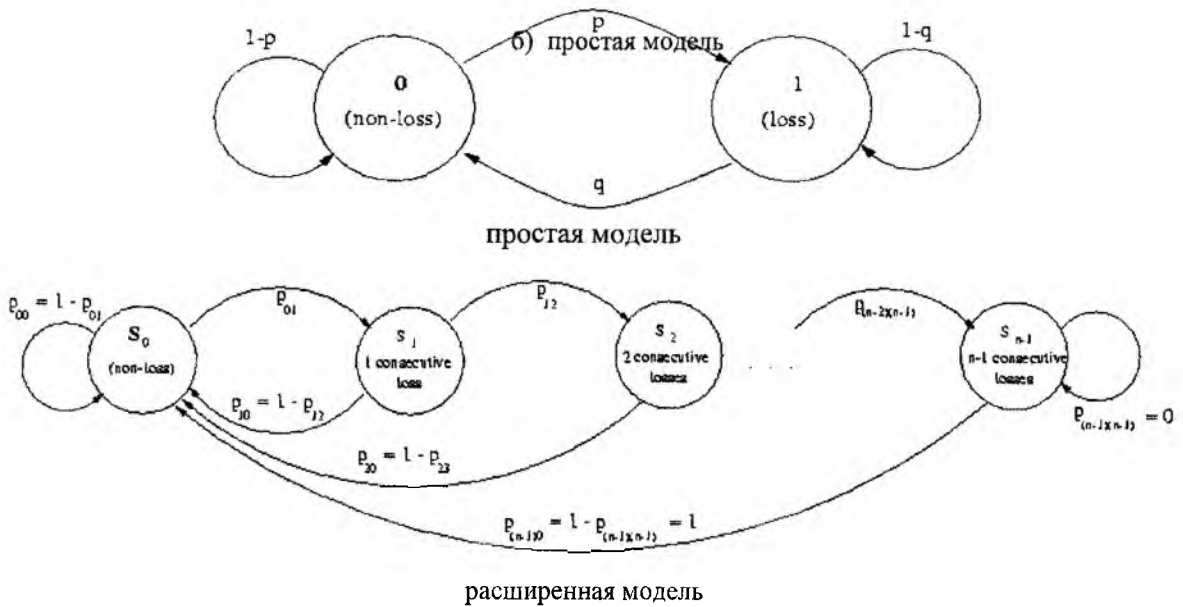


Рис. 5

Стационарные вероятности для модели Гильберта имеют вид:

$$\pi_0 = \frac{q}{p+q}, \quad \pi_1 = \frac{p}{p+q},$$

где p - вероятность потери следующего пакета, если предыдущий был доставлен; q - вероятность доставки следующего пакета, при условии, что предыдущий был потерян.

Параметры p и q модели могут быть определены из статистики потерь:

$$p = \left(\sum_{i=1}^{n-1} o_i \right) / o_0,$$

$$q = 1 - \left(\sum_{i=2}^{n-1} o_i \cdot (i-1) \right) / \left(\sum_{i=1}^{n-1} o_i \cdot i \right),$$

Для расчета стационарных вероятностей $(\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{(n-1)})$ расширенной модели Гильберта, используется матрица [9]

$$\begin{array}{cccccc|ccc} P_{00} & P_{10} & P_{20} & \dots & P_{(n-2)0} & P_{(n-1)0} & \pi_0 & & \pi_0 \\ P_{01} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \pi_1 & & \pi_1 \\ 0 & P_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 & \pi_2 & = & \pi_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_{(n-2)(n-1)} & P_{(n-1)(n-1)} & \pi_{(n-1)} & & \pi_{(n-1)} \end{array}$$

Интенсивности переходов между состояниями определяются:

$$P_{01} = \left(\sum_{i=1}^{n-1} o_i \right) / o_0, \quad P_{(k-1)(k)} = \left(\sum_{i=k}^{n-1} o_i \right) / \left(\sum_{i=k-1}^{n-1} o_i \right)$$

где o_0 количество доставленных сегментов.

Используя аналитические модели потерь речевых сегментов, возможно определить требуемое количество k копий [12],[13] для заданной финальной вероятности потерь для данных интервала кодирования речи.

В [12] предложен вариант определения k . Задается таблица вариантов комбинаций, для определения используемой комбинации применяется следующий алгоритм:

1. Рассчитывается вероятность потерь пакетов после восстановления P_a .
2. Рассчитывается вероятность потерь пакетов перед восстановлением P_b .
3. Если $P_a > \text{HIGH}$, то обновляем значение количества потерянных в группах пакетов и повторно рассчитываем P_a .
4. Если $P_a > \text{HIGH}$, то увеличиваем на 1 номер комбинации.
5. Если $P_a < \text{LOW}$, то вычисляем:

$$\Delta = P_b(i-1) - P_b(i).$$

6. Если $\Delta > \text{MINIMUM_THRESHOLD}$, то уменьшаем на 1 номер комбинации.
7. Присваиваем $P_b(i-1) := P_b(i)$.

Значения **HIGH** и **LOW** определяют соответственно требуемую максимальную и минимальную вероятности потери сегментов.

Таблица

Номер	Комбинация
0	0
1	0,1
2	0,2
3	0,1,2
4	0,1,3
5	0,1,2,3
6	0,1,2,4
7	0,1,3,4
8	0,1,2,3,4

В потерянных пакетах выделяются потерянные в группах (10). Количество пакетов, не относящихся к теряемым в группах, определяется как разность количества пакетов, потерянных после реконструкции и количества потерянных в группе. В случае, если количество потерянных после восстановления пакетов меньше **LOW**, вычисляется разница количества потерянных пакетов в данном интервале и предыдущем интервале приема RTP-пакета. Если эта разница меньше **MINIMUM THRESHOLD**, номер используемой комбинации уменьшается на 1. Например, вероятность потери данных интервала кодирования после FEC-алгоритма для комбинации 0,1,3 [13].

$$P_{0,1,3} = (p(1-q)(pq + 1 - 2q + q^2)) / (p + q)$$

Комбинация 0,1,3 означает, что в одном RTP пакете передаются данные текущего i -го (0), $i-1$ (1), $i-3$ (3) интервалов кодирования.

6. Критерии оценки качества передачи речи

В настоящее время отсутствуют общепризнанные методы объективной оценки качества пакетной передачи речи. Из известных можно указать [7],[14],[15],[16]. МСЭ в [15] рекомендует использовать субъективные оценки при определении качества речевого сигнала. Для этого разработан метод средних субъективных оценок (MOS - Mean Opinion Score), использующий пятибалльную шкалу оценок. Независимыми исследователями разработаны инструментальные средства определения качества речевого сигнала на основе субъективных оценок, например, [17]. При данном исследовании использован метод оценки R-D [7], в нем применяется зависимость Скорость Кодирования-Искажения Сигнала (Rate-Distortion R-D), при этом принимается нелинейная зависимость:

$$D(R) = c_1 e^{-\alpha R} + c \tag{11}$$

где c_1 и c_2 выбираются таким образом, что: $D(64 \text{ кбит/с}) = 0$; $D(0 \text{ кбит/с}) = 1$; R определяет скорость, с которой кодируются данные, коэффициент $\alpha = 16$.

Как указывается в [14], искажение D обратно пропорционально ОСШ (отношению сигнал/шум) SNR:

$$10 \lg \left(\frac{[\sum x(n)^2]}{[\sum (x(n) - \hat{x}(n))^2]} \right).$$

При обработке данных трассировки модели определяются вероятности:

P_s - успешной доставки пакета;

P_{rl} - восстановления потерянного пакета;

P_{ul} - потери и невозможности восстановления пакета.

Суммарное искажение D с учетом (11), определяется как:

$$D = P_s \cdot D(R_{source}) + P_{rl} \cdot D(R_{red}) + P_{ul} \cdot D(0),$$

где R_{source} - скорость основного кодирования; R_{red} - скорость восстановительного кодирования.

Выводы

Использование методов имитационного моделирования пакетной передачи речевого трафика позволяет исследовать эффективность базовых алгоритмов используемых при организации пакетной передачи речи в условиях совместной передачи речи и данных и при различных характеристиках потерь и задержек сегментов. Использование предложенного метода формирования модели речевого трафика позволяет определять не только характеристики потерь и задержек речевых сегментов, но и оценку разборчивости речи после моделирования, а также эффективность существующих программных средств передачи речевого и видео трафика.

Список литературы: 1. *McCanne S., Floyd S.* The LBNL Network Simulator. Lawrence Berkeley Laboratory. <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns/>. 2. *Schulzrinne H., Caner S., Frederick R., Jacobson V.* RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. Internet Engineering Task Force, Audio-Video Transport Working Group, January 1996. RFC-1889. 3. *Perkins C., Kouvelas I., Hardman O.* RTP Payload for Redundant Audio Data. Internet Engineering Task Force, Network Working Group, September 1997. RFC-2198. 4. *Wen J., Chen Y., Wang J.* NC-PRMA in Microcellular Systems. Communication Systems, vol 11, 1998, pp.183-188. 5. *Ершов В.А., Ершова Э.В., Ковалев В.В.* Метод расчета пропускной способности звена Ш-ЦСИС с технологией АТМ при мультисервисном обслуживании // Электросвязь. 2000. №3. С 19-23. 6. *Jacobson V.* Congestion avoidance and control. SIGCOMM Symposium on Communications Architectures and Protocols, pp. 314-329, 1988. 7. *Podolsky M., Romer C., McCanne S.* Simulation of FEC-based error control for packet audio on the Internet. In Proc. IEEE INFOCOM, volume 2, pp. 505-515, San Francisco, CA, March 1998. 8. *Jonathan D. Rosenberg, Lili Qiu, Henning Schulzrinne.* Integrating packet FEC into adaptive voice playout buffer algorithms on the internet. In Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE Infocom), 2000. 9. *Sanneck H., Carle G., Koodli R.* A framework model for packet loss metrics based on loss runlengths. In SPIE/ACM SIGMM Multimedia Computing and Networking Conference, January 2000. 10. *Koodli R., Ravikanth R.* One-way loss pattern sample metrics. Internet Engineering Task Force, June 1999. 11. *Wenyu Jiang, Henning Schulzrinne.* QoS measurement of internet real-time multimedia services. Technical Report CUCS-015-99, Columbia University, New York, December 1999. 12. *Padhye C., Kenneth J. Christensen.* A New Adaptive FEC Loss Control Algorithm for Voice over IP Application. Proceedings of 19th IEEE International Performance, Computing and Communication Conference, pp. 307-313, February 2000. 13. *Bolot J-C., Fosse-Parisis S., Towsley D.* "Adaptive FEC-Based Error Control for Internet Telephony", Proceedings of IEEE INFOCOM, March 1999. 14. *Горелов Г.В., Казанский Н.А., Лукова О.Н.* Методика оценки качества пакетной передачи речи в интегральных цифровых сетях. // Электросвязь. - 1992. №9. С 31-33. 15. CCITT Recommendation of P Series, "Method for the Evaluation of Service from the Standpoint of Speech Transmission Quality". CCITT Red Books Volume V - VIIIth Plenary Assembly, 1984. 16. *Voran S.* "Objective Estimation of Perceived Speech Quality - Part I: Development of the Measuring Normalizing Block Technique", IEEE Trans. on Speech and Audio Processing, Vol. 7, No. 4, July 1999. 17. *Bouch A., Watson A., Sasse M.A.* QUASS - a tool for measuring the subjective quality of real-time multimedia audio and video. In May HCI'98 Conference Comparison, P. 94-95, 1998.