

Экспериментальное исследование передачи речи через ЦВЧ-каналы связи с использованием технологии VoIP

А.Г. Меркулов

В статье приводятся описание и результаты эксперимента по исследованию передачи речи через ЦВЧ-каналы связи с использованием технологии VoIP. Описывается экспериментальный стенд, позволяющий оценить характеристики передачи речи и работы техник компрессии заголовков пакетов. Результаты эксперимента подтверждают необходимость и целесообразность применения компрессии заголовков при передаче пакетов речи в ЦВЧ-каналах с использованием технологии VoIP.

Ключевые слова: ВЧ-связь, пакетные сети, VoIP, сжатие заголовков.

1. Введение

Организация конвергентных IP-сетей между подстанциями с использованием цифровых высокочастотных (ЦВЧ) каналов связи по высоковольтным линиям электропередачи на сегодняшний день является актуальной задачей. Связано это с тем, что заканчивается цикл жизни ЦВЧ-сетей Frame Relay, и с тем, что в энергетике всё чаще используются различные приложения на основе IP-протокола. Создание конвергентных IP-сетей подразумевает передачу речевых сигналов с использованием технологии VoIP. Исследование характеристик передачи речи по IP-ВЧ-каналам связи является очень важным научно-практическим вопросом. Автором был разработан стенд для экспериментальной проверки характеристик передачи речевых сигналов с использованием технологии VoIP. С использованием стенда была проведена оценка требуемой пропускной способности канала связи, эффективности использования компрессии заголовков IP-пакетов и влияние на них помех. В результате эксперимента были получены данные, позволившие сформулировать ряд рекомендаций, касающихся вопроса передачи речи по IP-ВЧ-каналам связи (VoIP).

2. Варианты организации ЦВЧ-соединений для передачи трафика IP-приложений

Рассмотрим варианты организации ЦВЧ-каналов для передачи трафика IP-приложений. Наиболее простым вариантом является использованием ЦВЧ-оборудования со встроенной функцией Ethernet-моста, тем более что эта функция интегрирована в большинство современных ЦВЧ-устройств. Структурная схема IP-ВЧ-канала с использованием Ethernet-моста показана на рис. 1.

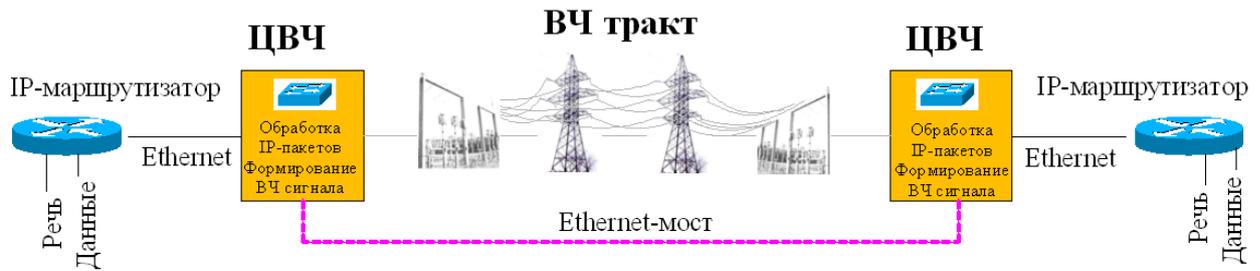


Рис.1. Схема IP-ВЧ-канала с использованием Ethernet-моста

При использовании Ethernet-мостов ЦВЧ-оборудование вовлечено в процесс обработки пакетов и может выполнять операции фильтрации и приоритезации трафика. Однако у этого решения есть существенный недостаток. Так как на канальном уровне используется протокол Ethernet, в сумме с заголовками IPv4/UDP/RTP размер заголовка пакета VoIP будет равен 66 байт. При размере IP-дейтаграммы в 20 байт эффективность использования канала связи будет чуть больше 23% [1]. Использование дейтаграммы размером в 30 байт позволяет увеличить эффективность до 31%. Столь низкая эффективность использования канала при скорости передачи информации, не превышающей несколько десятков килобит в секунду, сильно усложняет внедрение VoIP в ЦВЧ-сетях.

Вторым вариантом организации передачи трафика IP-приложений является использование прозрачного физического соединения между ЦВЧ-устройствами при подключении к ним IP-маршрутизаторов через последовательный интерфейс X.21. В этом случае кадры Ethernet, получаемые маршрутизатором от внешних источников, инкапсулируются с использованием протокола PPP. Таким образом, между двумя маршрутизаторами осуществляется последовательное WAN-соединение, а ЦВЧ-оборудование не участвует в обработке пакетов. Структурная схема IP-ВЧ-канала с использованием последовательного WAN-соединения показана на рис. 2.



Рис. 2. Схема IP-ВЧ-канала с использованием последовательного WAN-соединения

Использование PPP-инкапсуляции позволяет уменьшить размер заголовка канального уровня до 8 байт. Также надо отметить, что исключение ЦВЧ-оборудования из процесса обработки сетевого трафика уменьшает общее время передачи информации в сети и время восстановления канала связи в случае потери синхронизации между модемами ЦВЧ-устройств. При этом эффективность использования канала связи увеличивается до 29% при размере IP-дейтаграммы в 20 байт и до 38% при размере в 30 байт [1].

Существует метод, позволяющий уменьшить размер заголовков сетевого и транспортно-го уровней, тем самым увеличив эффективность использования канала и уменьшив требуемую скорость передачи информации речевых сигналов. Этот метод основывается на компрессии заголовков пакетов. Характеристики техник компрессии заголовков речевых

пакетов приведены в табл. 1 [2]. Использование компрессии заголовков IPv4/UDP/RTP позволяет уменьшить их общий размер в 6–10 раз, в зависимости от техники компрессии. Надо заметить, что на практике средний коэффициент компрессии несколько ниже из-за использования обновления контекста сессии путём периодической передачи пакетов с полноразмерными заголовками. Техники компрессии сRTP и ECRTTP реализованы в широко распространённых маршрутизаторах CISCO. Что касается ROHC, то на сегодняшний день это самая эффективная техника компрессии в отношении коэффициента сжатия и помехоустойчивости, но в IP-маршрутизаторах она не используется и должна быть интегрирована непосредственно в ЦВЧ оборудование. Два производителя ЦВЧ-устройств: SIEMENS AG и ABB – уже осуществили это. В обоих случаях использовано техническое решение от EFFNET [3], но передача IP-трафика производится с использованием Ethernet-мостов. В табл. 2 и 3 приводятся расчётные характеристики требуемой скорости передачи речевых сигналов V_{VoIP} при различных размерах IP-дейтаграммы S_{Load} для вокодеров G.723.1 и G.729 для Ethernet-мостов и WAN-соединений. Нетрудно показать, что V_{VoIP} можно рассчитать по формуле (1), которая учитывает использование компрессии заголовков и подавления пауз речи.

Таблица 1. Характеристики техник компрессии заголовков речевых пакетов

Название метода компрессии	Сжатие заголовков IPv4/UDP/RTP, байт	Коэффициент компрессии, G	Принцип компрессии	Устойчивость к потерям пакетов, непоследовательному приему и задержке	Практическое использование с ЦВЧ оборудованием
cRTP (RFC 2508)	2 – 4	0.9-0.975	Передача дельта-значений изменяющихся полей заголовка	Низкая	Маршрутизаторы CISCO для PPP-соединений
ECRTP (RFC3545)	8 – 12	0.7-0.8	Передача Абсолютных значений изменяющихся полей заголовка	Высокая	Маршрутизаторы CISCO для PPP-соединений
ROHC RFC(3095)	1 – 4	0.9-0.975	WB-LSB кодирование	Высокая	Интегрировано в ЦВЧ оборудовании PowerLink 50/100 [4], ETL 600 [5].

$$V_{VoIP} = 8 \cdot S_{L2} + (1 - G) \cdot S_{IPv4/UDP/RTP} + k_{VAD} \cdot S_{Load} \cdot \frac{1}{T_{vocoder}}, \text{ [кБит/с]} \quad (1)$$

где S_{L2} – размер заголовка протокола канального уровня, [байт];

$S_{IPv4/UDP/RTP}$ – размер заголовков сетевого и транспортного уровней, для IPv4 40 байт;

G – коэффициент компрессии, без использования компрессии равен 0;

k_{VAD} – фактор речевой активности, принимаем равным 0,6;

$T_{vocoder}$ – суммарная длительность речевой выборки в IP-дейтаграмме, [мс].

Таблица 2. Требуемая скорость передачи речевых сигналов VoIP в ЦВЧ-каналах с Ethernet-мостом

Вокодер	Размер заголовка PPP, байт	Размер заголовков IPv4/UDP/RTP, байт	Размер нагрузки S_{Load} , байт	Длительность речевой выборке в IP-дейтаграмме, $T_{vocoder}$, мс	Требуемая скорость передачи речевого сигнала V_{VoIP} , кБит/с	Требуемая скорость передачи речевого сигнала при k_{VAD} 0,6, кБит/с
Без компрессии						
G.723.1	26	40	20	30	22.93	20.8
G.729	26	40	20	20	34.40	31.2
G.729	26	40	30	30	25.60	22.4
при использовании техники компрессии ROHC (RFC 3095) – ЦВЧ-оборудование PowerLink 50/100, ETL 600						
G.723.1	26	4	20	30	13.33	11.2
G.729	26	4	20	20	20.00	16.8
G.729	26	4	30	30	16.00	12.8

Таблица 3. Требуемая скорость передачи речевых сигналов VoIP в ЦВЧ-каналах с последовательным WAN-соединением и PPP-инкапсуляцией

Вокодер	Размер заголовка PPP, байт	Размер заголовков IPv4/UDP/RTP, байт	Размер нагрузки S_{Load} , байт	Длительность речевой выборке в IP-дейтаграмме, $T_{vocoder}$, мс	Требуемая скорость передачи речевого сигнала V_{VoIP} , кБит/с	Требуемая скорость передачи речевого сигнала при k_{VAD} 0,6, кБит/с
Без компрессии						
G.723.1	8	40	20	30	18.13	16
G.729	8	40	20	20	27.20	24
G.729	8	40	30	30	20.80	17.6
при использовании техники компрессии ECRTTP (RFC 3545) – IP-маршрутизатор CISCO						
G.723.1	8	12	20	30	10.66	8.53
G.729	8	12	20	20	16.00	12.8
G.729	8	12	30	30	13.30	10.2
при использовании техники компрессии cRTP (RFC 2508) – IP-маршрутизатор CISCO						
G.723.1	8	4	20	30	8.53	6.4
G.729	8	4	20	20	12.80	9.6
G.729	8	4	30	30	11.20	8

3. Задачи эксперимента

1) Определение требуемой пропускной способности канала связи для передачи речевых сигналов VoIP в зависимости от размера IP-дейтаграммы и использования различных техник компрессии заголовков сетевого и транспортного уровней. Сравнение полученных в результате эксперимента данных с теоретическими расчётными значениями требуемой скорости передачи речевых сигналов VoIP, представленными в таблицах 2 и 3.

2) Определение помехоустойчивости различных техник компрессии заголовков при воздействии независимых ошибок, вызванных аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ).

4. Описание экспериментального стенда

Для проведения эксперимента был разработан и собран стенд, включающий в себя следующие элементы:

1) ЦВЧ-оборудование PowerLink 50/100 CSPi v3.5.132 (производство SIEMENS AG) с функцией Ethernet-моста и интегрированным алгоритмом компрессии заголовков пакетов речи ROHC (RFC 3095). Также ЦВЧ-оборудование включает в себе функцию создания прозрачного соединения между двумя устройствами с подключением внешнего оборудования через интерфейс X.21;

2) IP-маршрутизаторы CISCO 2901v с функцией голосового шлюза. Маршрутизаторы имели в своём составе следующие модули:

- HWIC-2T – двухпортовый модуль с последовательными интерфейсами X.21;
- EHWIC-4ESG – 4-портовый модуль интерфейсов Fast Ethernet;
- VIC3-2FXS – 2-портовый голосовой модуль с интерфейсами FXS.

Маршрутизатор имеет интегрированные алгоритмы компрессии заголовков пакетов речи sRTP (RFC 2508) и ECRTCP (RFC 3545) для последовательных соединений с PPP-инкапсуляцией.

3) Компьютеры с установленным программным обеспечением (ПО) для тестирования пакетных сетей IXIA v6.70. ПО IXIA позволяют производить тестирование пакетных сетей путём генерации различных видов сетевого трафика и измерения параметров передачи пакетов. В том числе ПО имеет функции генерации трафика VoIP с возможностью установки различных типов вокодеров и их параметров, например, количества речевых фреймов в IP-дейтаграмме и значения фактора речевой активности. В ходе тестирования измеряются параметры задержки передачи в одну сторону, абсолютной задержки передачи, джиттера пакетов и процента потерянных пакетов.

4) NTP-сервер Symmetricom, использующийся для синхронизации времени ПК, на которых установлены элементы ПО IXIA. Синхронизация времени необходима для корректного расчёта задержки передачи речевых сигналов.

5) Анализатор AnCom A7-307. Анализатор предназначен специально для измерения параметров ВЧ-каналов и имеет в своём составе генератор различных сигналов, в том числе генератор АБГШ и спектроанализатор.

6) Магазин затуханий с регулируемым значением затухания от 5 до 50 дБ.

7) Аналоговые телефонные аппараты.

На рис. 3 и 4 показаны структурные схемы испытательного стенда для варианта с Ethernet-мостом и последовательным WAN-соединением.

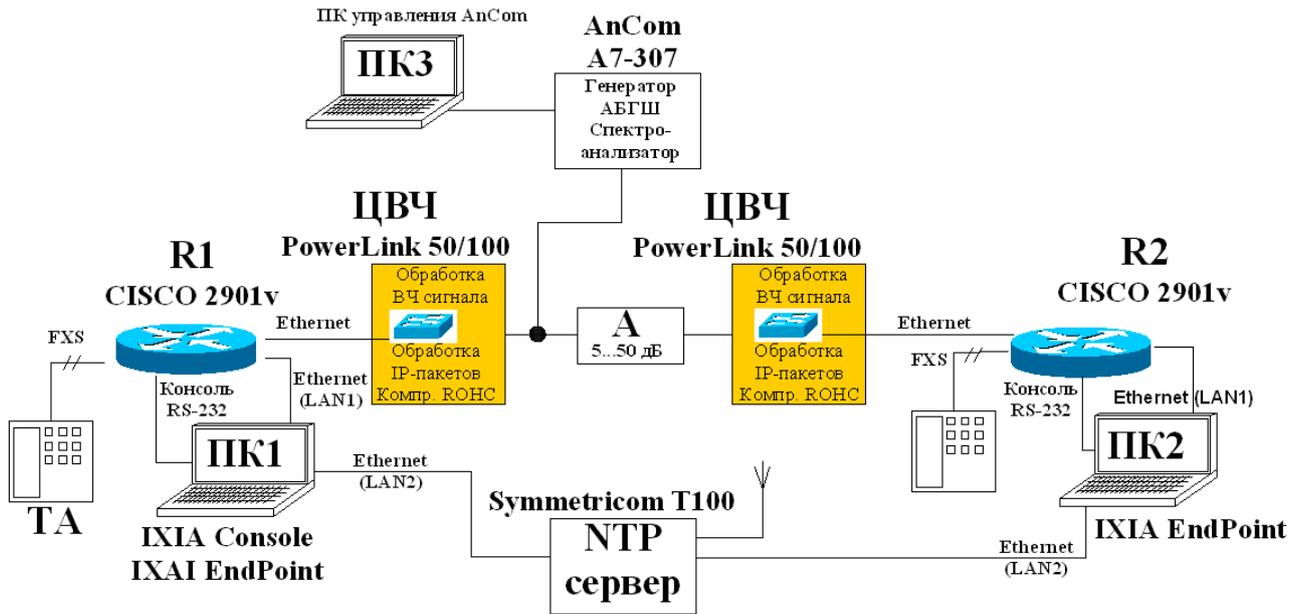


Рис. 3. Структурная схема испытательного стенда для тестирования с Ethernet-мостом

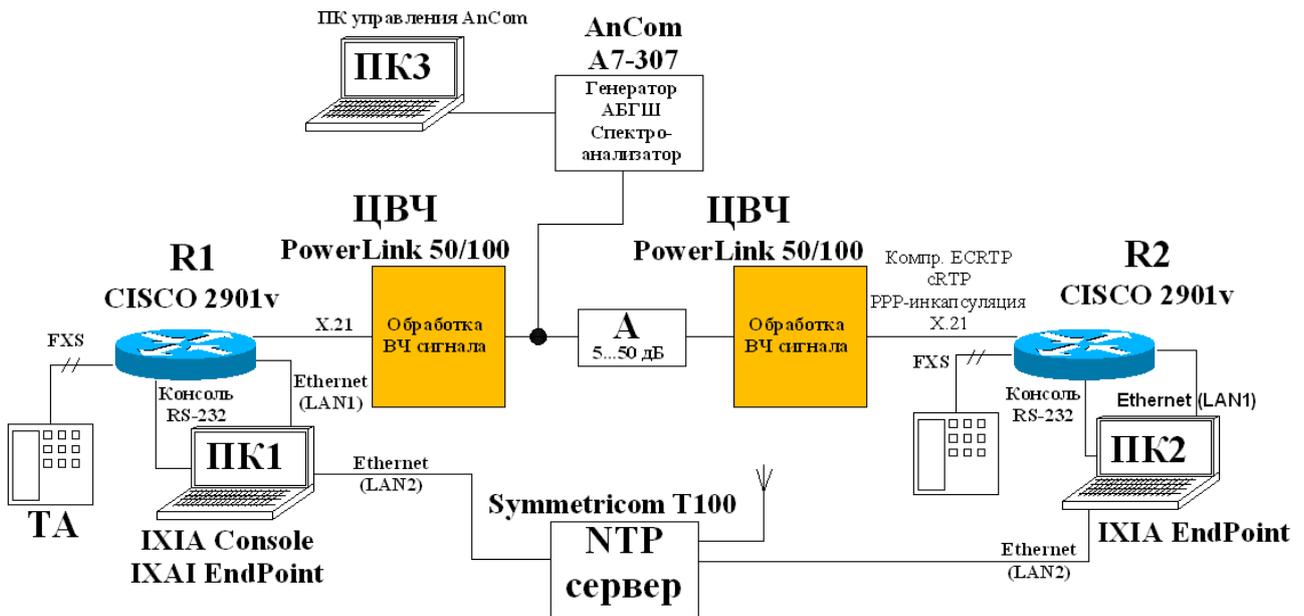


Рис. 4. Структурная схема испытательного стенда для тестирования с WAN-соединением

Основным назначением генератора АБГШ и магазина затуханий является имитация воздействия погодных факторов, приводящих к уменьшению значения отношения сигнал/помеха и увеличению значения коэффициента битовых ошибок. Путём регулировки уровня шума на входе приёмника оборудования и изменения затухания в линии можно изменять коэффициент битовых ошибок от $K_{(ош)} = 10^{-6} - 10^{-4}$. Измерение $K_{(ош)}$ осуществляется ЦВЧ-оборудованием.

5. Результаты определения требуемой скорости передачи речевых сигналов VoIP

Для определения требуемой скорости передачи речевых сигналов VoIP V_{VoIP} в зависимости от количества соединений была разработана следующая методика. Вначале между двумя ЦВЧ-устройствами конфигурировалась скорость передачи информации, заведомо больше теоретически необходимой в несколько раз. В ПО IXIA конфигурировалась VoIP-пара с характеристиками IP-дейтаграммы, представленными в таблицах 2 и 3, и проводились измерения задержки передачи в одну сторону $T_{\text{OWD}(1)}$. Далее для каждого из возможных вариантов увеличивалось количество одновременных VoIP-соединений. Путём подбора скорости передачи информации C_{PLC} между ЦВЧ-устройствами и количества одновременных соединений N находилось такое значение C_{PLC} , для которого значение $T_{\text{OWD}(N)}$ не превышало $T_{\text{OWD}(1)}$ более, чем на:

$$\Delta T_{\text{OWD}} = (N - 1) \cdot T_{\text{Serial}}, \quad (2)$$

где T_{Serial} – задержка сериализации речевого пакета [мс], равная:

$$T_{\text{Serial}} = 8 \cdot \frac{(S_{\text{L2}} + (1 - G) \cdot S_{\text{IPv4/UDP/RTP}} + k_{\text{VAD}} \cdot S_{\text{Load}})}{C_{\text{PLC}}}. \quad (3)$$

Теоретическое значение $T_{\text{OWD}(1)}$ является суммой следующих составляющих задержки передачи: T_{PLC} – задержка формирования и обработки ВЧ-сигнала в ЦВЧ-оборудовании (на передаче и на приёме); T_{Router} – задержка обработки информации в маршрутизаторах и задержки сериализации T_{Serial} , так что:

$$T_{\text{OWD}(1)} = T_{\text{PLC}} + 2 \cdot T_{\text{Router}} + T_{\text{Serial}}. \quad (4)$$

Значение задержки T_{PLC} для ЦВЧ-оборудования, использованного при испытаниях, равняется 40 мс [4]. Значение задержки T_{Router} не превышает нескольких миллисекунд.

Значение деления C_{PLC} на N при полученном в испытаниях значении ΔT_{OWD} , равным теоретически рассчитанному, является искомым значением V_{VoIP} . Расчётные значения $T_{\text{OWD}(N)}$ и результаты испытаний представлены в табл. 4 и 5. Отметим, что для этого опыта k_{VAD} принималось равным 1, то есть функция подавления пауз речи не использовалась. Испытания проводились только для вокодера G.729 как наиболее перспективного для использования в многосегментных ЦВЧ-каналах [5]. Результаты эксперимента полностью подтверждают расчётные значения. Незначительные расхождения связаны с тем, что из-за технических особенностей ЦВЧ-оборудования не всегда возможно установить скорость передачи информации между модемами с требуемым конкретным значением и в опытах использовались наиболее близкие значения.

Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований значения V_{VoIP} для ЦВЧ-канала с Ethernet-мостом

Вокодер	N	C_{PLC} кБит/с	T_{Serial} , мс	ΔT_{OWD} теор. мс	ΔT_{OWD} исп. мс	$T_{OWD(N)}$ (среднее)_	V_{VoIP} Теор кБит/с	V_{VoIP} кБит/с
Без компрессии для Ethernet-моста								
G.729 (20 мс)	1	144	5.1	0	0	49	34.5	36
	4			15.3	13	62		
G.729 (30 мс)	1	54	14.2	0	0	58	25.6	26
	2			14.2	14	72		
при использовании техники компрессии ROHC (RFC 3095) ЦВЧ оборудование PowerLink 50/100								
G.729 (20 мс)	1	62	7	0	0	52	20.0	20.6
	3	62		14	12	64	20.0	20.6
G.729 (30 мс)	1	58	8.3	0	0	54	16.0	16.0
	3	58		16.6	18	62	16.0	16.0

Таблица 5. Результаты экспериментальных исследований значения V_{VoIP} для ЦВЧ-канала с последовательным WAN-соединением

Вокодер	N	C_{PLC} кБит/с	T_{Serial} , мс	ΔT_{OWD} теор. мс	ΔT_{OWD} исп. мс	$T_{OWD(N)}$ (среднее)_	V_{VoIP} Теор кБит/с	V_{VoIP} кБит/с
Без компрессии для последовательного WAN-соединения								
G.729 (20 мс)	1	56	12.3	0	0	56	27.2	28
	2			12.3	11	67		
G.729 (30 мс)	1	42	18.2	0	0	63	20.8	21
	2			18.2	17	80		
при использовании техники компрессии ECRTP (RFC 3545) IP-маршрутизатор CISCO 2901v/k9								
G.729 (20 мс)	1	50	6.4	0	0	52	16	16.6
G.729 (20 мс)	3			12.8	14	66		
G.729 (30 мс)	1	42	9.5	0	0	56	13.3	14.0
G.729 (30 мс)	3			19.0	18	74		
при использовании техники компрессии sRTP (RFC 2508) IP-маршрутизатор CISCO 2901v/k9								
G.729 (20 мс)	1	52	4.9	0	0	49	12.8	13.0
G.729 (20 мс)	4			14.7	14	63		13.0
G.729 (30 мс)	1	44	7.6	0	0	53	11.2	11.0
G.729 (30 мс)	5			30.4	32	85		11.0

6. Оценка характеристик техник компрессии заголовков при воздействии независимых ошибок

В ВЧ-канале присутствуют помехи различной природы, причём их источником является линия электропередачи. Электрические помехи в каналах ВЧ-связи по ВЛ можно разделить на две основные группы: помехи при нормальном эксплуатационном состоянии линии и помехи, возникающие при отклонении от нормального режима – короткие замыкания, коммутационные переключения, грозовые разряды [6].

К помехам при нормальном эксплуатационном состоянии ВЛ относится шум коронирования фазных проводов. Помехи от коронирования проводов являются источником независимых ошибок и приводят к появлениям отдельных повреждённых пакетов.

Увеличение уровня шума коронирования проводов, например, при сильном дожде или грозе вблизи подстанции, приводит к снижению отношения уровней полезного сигнала

и помехи (SNR) в полосе приёмника. При значительном уменьшении SNR происходит увеличение коэффициента битовых ошибок $K_{(ош)}$, что является причиной сбоев в приёме информационных сигналов. Погодные факторы относятся к продолжительным по времени воздействию и могут приводить к длительным замираниям ВЧ-сигнала.

Необходимо оценить, как увеличение $K_{(ош)}$ может отразиться на качестве передачи речевых сигналов при использовании компрессии и без неё. Для выполнения опыта необходимо оценить значение временного интервала появления повреждённых пакетов для различных значений $K_{ош}$.

Рассчитаем количество теряемых пакетов в зависимости от коэффициента ошибок. Вероятность того, что i -ый пакет, состоящий из L байт полезной нагрузки и H байт заголовка, будет передан с ошибками, составит:

$$P_{\text{packet(ош)}} = 1 - (1 - K_{(ош)})^{8 \cdot (L + H_i)}. \quad (5)$$

Среднее количество переданных пакетов до появления первого пакета с ошибками может быть найдено из выражения (8) [7]:

$$N = \frac{1}{P_{\text{packet(ош)}}}. \quad (6)$$

Таким образом, средний временной промежуток, после которого пакет будет принят с ошибками, составит:

$$T_{(ош)} = N \cdot T_{\text{vocoder}}. \quad (7)$$

Результаты расчётов можно представить следующим образом: при $K_{(ош)} = 10^{-2}$ ошибки будут появляться в каждом принятом пакете, при $K_{(ош)} = 10^{-3}$ ошибки будут в каждом 2 – 3 пакете; при $K_{(ош)} = 10^{-4}$ без применения компрессии ошибки будут появляться через 15 – 20 пакетов, при использовании компрессии заголовков интервал увеличиться до 30 – 35 пакетов. Для $K_{(ош)} = 10^{-5}$, 10^{-6} , 10^{-7} значение интервала будет увеличиваться в 10, 100 и 1000 раз в сравнении со случаем $K_{ош} = 10^{-4}$. Выразим результаты расчётов во временной шкале: при $K_{ош} = 10^{-4}$ появление повреждённого пакета можно ожидать несколько раз в секунду, тогда как при $K_{(ош)} = 10^{-6}$ интервал увеличивается до 40 – 50 секунд разговора перед первой ошибкой. Для $K_{(ош)} = 10^{-7}$ время до появления пакетов с ошибками исчисляется минутами. При $K_{(ош)} = 10^{-2}$ и 10^{-3} повреждёнными будут все пакеты.

Испытания по определению параметров работы техник компрессии проводились следующим образом. Путём увеличения затухания тестовой линии и уровня шума, подаваемого с генератора АБГШ на вход приемника ЦВЧ-оборудования, устанавливались следующие значения $K_{(ош)}$: 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} . Измерение коэффициента ошибок производит само ЦВЧ-устройство. Ввиду технических особенностей ЦВЧ-оборудования, $K_{(ош)} = 10^{-4}$ является максимальным значением коэффициента ошибок, при котором может производиться передача информации. При дальнейшем увеличении $K_{ош}$ модемы ЦВЧ-оборудования теряют синхронизацию между собой.

Исходя из результатов расчётов и условия о том, что событие, заключающееся в принятии повреждённого пакета, должно произойти не менее 10 раз, были приняты следующие значения $T_{(ош)}$. Для $K_{(ош)} = 10^{-4}$ и 10^{-5} $T_{(ош)} = 60$ секунд; $K_{(ош)} = 10^{-6}$ $T_{(ош)} = 300$ секунд. Причём каждое испытание повторялось 10 раз.

Далее устанавливалось телефонное соединение длительностью $T_{(ош)}$ и проводился разговор. С использованием команды *show voice call* проводился мониторинг потерь и восста-

новления речевых фреймов. Качество восприятия речи оценивалось субъективно по градациям – разборчиво, не разборчиво и наличие временных сбоев. После завершения теста производилась проверка статистики работы декомпрессора с использованием команды *show ip rtp header-compression*. Так как мониторинг работы декомпрессора ROHC ЦВЧ оборудования выполнить не представляется возможным, качество работы алгоритма оценивалось статистикой работы вокодера и субъективной оценкой качества восприятия речевого сигнала.

Испытания проводились только для вокодера G.729+VAD, ввиду того что используемая в маршрутизаторах версия микропрограммного обеспечения не поддерживает работу с вокодером G.723.1.

Результаты испытаний представлены в табл. 6 – 8.

Таблица 6. Статистика передачи речи VoIP при $K_{(ош)} = 10^{-4}$

$K_{(ош)} = 10^{-4}$					
Характеристики работы вокодера					
	Без сжатия	sRTP	ECRTP (20 байт)	ECRTP (30 байт)	ROHC
Длительность соединения, мс	Max 66020 Av. 61380 Min 60180	Max 65420 Av. 62660 Min 61100	Max 67900 Av. 62220 Min 60160	Max 64330 Av. 63990 Min 61790	Max 64940 Av. 63440 Min 61780
Восстановление предсказанием, мс	Av. 400	Av. 1000	Av. 580	Av. 620	Av. 520
Восстановление пауз, мс	Av. 10	Av. 260	Av. 20	Av. 40	Av. 20
Интерполяция, мс	0	0	0	0	0
Статистика декомпрессии					
Принято пакетов	----	Av. 3764	Av. 3689	Av. 2432	----
Со сжатыми заголовками	----	Av. 3680	Av. 3675	Av. 2419	----
Ошибки	----	Av. 178	Av. 10	Av. 14	----
Отброшено пакетов	----	Av. 159	Av. 7	Av. 11	----
Процент потерь, %	----	4.01-5.12	0.15-0.22	0.45-0.71	----
Оценка качества восприятия речи					
Max – максимальное значение Av. – среднее значение Min – минимальное значение N 10 испытаний	Удовлетворительно, речь разборчива, с кратковременными искажениями	Плохо, речь неразборчива, с постоянными прерываниями	Удовлетворительно, речь разборчива, с кратковременными прерываниями	Удовлетворительно, речь разборчива, с кратковременными прерываниями	Удовлетворительно, речь разборчива, с кратковременными прерываниями

Таблица 7. Статистика передачи речи VoIP при $K_{(om)} = 10^{-5}$

$K_{(om)} = 10^{-5}$					
Характеристики работы вокодера					
	Без сжатия	sRTP	ECRTP (20 байт)	ECRTP (30 байт)	ROHC
Длительность соединения, мс	Max 69500 Av. 67200 Min 64820	Max 65780 Av. 62740 Min 60120	Max 66440 Av. 65420 Min 63680	Max 66360 Av. 65570 Min 61730	Max 64900 Av. 62880 Min 61380
Восстановление предсказанием, мс	Av. 50	Av. 140	Av. 70	Av. 70	Av. 40
Восстановление пауз, мс	Av. 10	Av. 30	Av. 0	Av. 30	Av. 0
Интерполяция, мс	0	0	0	0	0
Статистика декомпрессии					
Принято пакетов	---	Av. 3450	Av. 3530	Av. 2428	---
Со сжатыми заголовками	---	Av. 3432	Av. 3507	Av. 2406	---
Ошибки	---	Av. 12	0	0	---
Отброшено пакетов	---	Av. 10	0	0	---
Процент потерь, %	---	0.27-0.45	0	0	---
Оценка качества восприятия речи					
Max – максимальное значение Av. – среднее значение Min – минимальное значение N 10 испытаний	Хорошо, речь разборчива, без искажений и прерываний	Удовлетворительно, речь разборчива, с кратковременными прерываниями	Хорошо, речь разборчива, без искажений и прерываний	Хорошо, речь разборчива, без искажений и прерываний	Хорошо, речь разборчива, без искажений и прерываний

Таблица 8. Статистика передачи речи VoIP при $K_{(om)} = 10^{-6}$

$K_{(om)} = 10^{-6}$					
Характеристики работы вокодера					
	Без сжатия	sRTP	ECRTP (20 байт)	ECRTP (30 байт)	ROHC
Длительность соединения, мс	Max 300080 Av. 302250 Min 301260	Max 303420 Av. 302720 Min 300600	Max 303480 Av. 302790 Min 301960	Max 304240 Av. 301820 Min 300100	Max 303460 Av. 301380 Min 300020
Восстановление предсказанием, мс	Av. 560	Av. 570	Av. 0	Av. 0	Av. 0
Восстановление пауз, мс	Av. 500	Av. 530	Av. 0	Av. 0	Av. 0
Интерполяция, мс	0	0	0	0	0
Статистика декомпрессии					
Принято пакетов	---	Av. 15338	Av. 15361	Av. 10404	---
Со сжатыми заголовками	---	Av. 15205	Av. 15247	Av. 10288	---
Ошибки	---	1	0	0	---
Отброшено пакетов	---	1	0	0	---
Процент потерь, %	---	0	0	0	---
Оценка качества восприятия речи					
Max – максимальное значение Av. – среднее значение Min – минимальное значение N 10 испытаний	Хорошо, речь разборчива, без искажений и прерываний				

Интересным фактом, установленным в ходе проведения опытов, является то, что даже при $K_{\text{ош}} = 10^{-4}$ и отсутствии сжатия заголовков пакетов качество восприятия речевого сигнала было разборчивым, тогда как для техники компрессии sRTP разобрать речь было почти невозможно, техники ECRTP и ROHC обеспечили хорошее качество речи даже в условиях высоких значений коэффициентов ошибок 10^{-4} , 10^{-5} . Таким образом, результаты испытаний хорошо согласуются с данными, приведёнными в табл. 1.

Наиболее важным при использовании компрессии заголовков в ЦВЧ-каналах является обеспечение помехоустойчивости алгоритма декомпрессии, а не значение коэффициента компрессии. Естественно, что при уменьшении размера пакета за счёт использования компрессии заголовков уменьшается вероятность его повреждения ошибками, но необходимо учитывать тот факт, что неправильный приём одного пакета может спровоцировать запуск восстановления контекста сессии, что, в свою очередь, приведёт к потере сразу нескольких пакетов.

В технике компрессии ECRTP помехоустойчивость обеспечивается передачей полноразмерных значений изменяющихся полей заголовков, поэтому декомпрессор даже после потери нескольких пакетов может сохранять синхронизм, тогда как в технике sRTP потеря пакетов приводит к сбою в работе алгоритма декомпрессии. Техника ROHC является наиболее совершенной, так как в ней используется WB-LSB кодирование. В ROHC отсутствует проверочная сумма UDP, что позволяет приложению (вокодеру) восстанавливать фреймы или маскировать пропущенные фрагменты речевого сигнала.

7. Выводы

По результатам проведённых испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Результатами эксперимента подтверждены теоретически рассчитанные значения V_{VoIP} для вокодера G.729. Для минимизации требуемой скорости передачи речевых сигналов VoIP с использованием вокодера G.729 целесообразно формировать IP-дейтаграмму не из двух, а из трёх речевых фреймов. Это не приводит к существенному отличию характеристик передачи речевого сигнала при использовании компрессии и без неё в сравнении со стандартным размером IP-дейтаграммы в 2 речевых фреймах. Но этот подход позволяет уменьшить значение V_{VoIP} при использовании компрессии заголовков от 12 до 16%, а без использования компрессии – на 23 – 25 %.

2. Опыты по оценке помехоустойчивости алгоритмов сжатия заголовков VoIP-пакетов полностью подтвердили правильность теоретических расчётов. Техники ECRTP и ROHC обеспечивают одинаковые удовлетворительные характеристики качества работы при высоком коэффициенте ошибок $K_{\text{ош}} = 10^{-4}$ и 10^{-5} , техника sRTP имеет существенно худшие характеристики. Использование техник ECRTP и ROHC не ухудшает качество передачи речевого сигнала в сравнении с вариантом без использования компрессии.

Литература

1. Меркулов А.Г. Методы повышения эффективности передачи IP-трафика в ЦВЧ каналах связи // Т-Comm. 2014. № 1. С.34-37.
2. Joseph A. Ishac Survey of header compression techniques. Glenn Research Centre, Cleveland, Ohio, NASA/TM 2001-211154, 2001. 27 p.
3. The concept of robust header compression, ROHC. White paper. Effnet AB, 2004. 4 p.
4. Техническое описание оборудования ВЧ-связи PowerLink 100 CSPi. Siemens AG, 2011, 600 с.
5. Меркулов А.Г. Оценка качества передачи речи VoIP через цифровые высокочастотные каналы связи// Перспективы науки. 2014. № 1 (52). С. 54-59.

6. *Микуцкий Г.В.* Каналы высокочастотной связи для релейной защиты и автоматики. М.: Энергия, 1977. 312 с.
7. *Seeeling P., Reisslein M., Madsen P. T. and Fitzek F.* Performance analyses of header compression schemes in heterogeneous wireless multi-hop networks // *Wireless Personal Communications*. 2006. №38. P. 203–232.

*Статья поступила в редакцию 21.01.2014;
переработанный вариант — 22.02.2014*

Меркулов Антон Геннадьевич

ФГБОУ «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,
аспирант
тел. +7(701) 2-127-507, e-mail: anton-merkulov@list.ru

Experimental research of voice transmission over digital power line carrier channels with VoIP technology

A. Merkulov

This article is devoted to the experimental research of VoIP signals transmission over Digital Power Line Carrier channels. The experimental stand, allowing evaluation of VoIP signals transmission characteristics and header compression techniques performance are described. The results of the experiment confirm the need and appropriateness of using header compression while transmitting VoIP over Digital Power Line Carrier channels.

Keywords: power line carrier, packet networks, VoIP, header compression.