

УДК 656.254.16: 629.783

*В. Г. ШЕВЧУК, доцент, заведующий кафедрой, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель;*  
*С. В. КРИВЕНКОВ, инженер, Гомельская дистанция сигнализации и связи Белорусской железной дороги, г. Гомель;*  
*С. И. СЕДЛЕР, инженер, Конструкторско-технический центр Белорусской железной дороги, г. Минск;*  
*М. П. СТОЦКИЙ, магистр технических наук, Белорусская железная дорога, г. Минск*

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗГОВОРНОГО ТРАКТА СИСТЕМЫ GSM-R

Создана компьютерная программа, которая может работать непосредственно с речевым сигналом, снятым с подключенного к компьютеру микрофона и оцифрованным 13-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) звуковой карты компьютера. Показано, что возникающий при разговоре акустический шум «помещения», в котором расположен мобильный телефон, играет немаловажную роль, особенно при исследованиях на железнодорожных станциях и переездах, на которых уровень шума изначально превышен в связи с интенсивным движением автомобилей, а также регулярным движением поездов.

При передаче речи по радиотелефонному тракту сети цифрового стандарта радиосвязи GSM-R речевой сигнал в мобильном телефоне (мобильной станции MS) кодируется при помощи специального устройства – вокодера, реализующего один из алгоритмов кодирования (GSM-FR, GSM-HR, GSM-EFR), основанных на долговременном линейном предсказании с регулярным импульсным возбуждением (RPE-LTP). Суть данного кодирования заключается в сжатии речевой информации, когда вместо дискретизированных отсчетов аналогового сигнала передается разница между текущим и предыдущим значениями отсчета. Перед кодированием речевой сигнал предварительно оцифровывается 13-разрядным линейным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с частотой дискретизации 8 кГц [1, 3]. На основании этого было предложено создать компьютерную программу, работающую непосредственно с речевым сигналом, снятым с подключенного к компьютеру микрофона и оцифрованным 13-разрядным АЦП звуковой карты компьютера. Таким образом, получив цифровой поток закодированных 13-разрядных двоичных отсчетов (например: 0110100111011, 1001011101100 и т. д.), можно было бы вносить заранее определенный процент битовых ошибок и анализировать полученные результаты, то есть пытаться разобрать искаженную речь при помощи артикуляционных измерений радиотелефонного тракта. И на основании полученных результатов сделать вывод о том, какой процент битовых ошибок является критическим при передаче речи и речевых сообщений в сети цифровой поездной радиосвязи стандарта GSM-R.

К компьютеру (стационарному или ноутбуку) подключается микрофон, который взаимодействует со звуковой картой компьютера через порт для подключения микрофона. В дальнейшем при «снятии голоса» с микрофона речевой сигнал обрабатывается звуковой картой, которая изначально оцифровывает полученный сигнал алгоритмом 13-разрядного аналого-цифрового преобразователя. В результате программа работает непосредственно с файлом, в который записан оцифрованный голос.

Данный файл представляет собой не что иное, как битовый поток, в котором каждый отсчет является 13-разрядным двоичным числом (0110100111011, 1001011101100, 0011100111010 и т. д.). Поскольку аналого-цифровой преобразователь работает с частотой

дискретизации 8 кГц, программа каждую секунду обрабатывает поток из 8 тыс. 13-разрядных двоичных отсчетов, сопоставимый со скоростью 104 000 бит/с. Например, если длительность записи составляет 20 с, то в файл записывается 160 тыс. отсчетов, представляющих собой поток из 2 080 000 бит:

$$8000 \cdot 13 \cdot 20 = 104\,000 \cdot 20 = 2\,080\,000 \text{ бит.}$$

В дальнейшем данный алгоритм не меняется, и длительность записи ограничивается лишь объемом оперативной памяти компьютера.

Так как в программе, аналогично стандарту GSM-R, используется 13-разрядный аналого-цифровой преобразователь, это означает, что количество различных отсчетов составляет 8192 и находится в диапазоне от –4096 до 4095. Представим диапазоны отсчетов в двоичной и десятичной формах записи в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Диапазоны отсчетов в двоичной и десятичной формах записи

Десятичная форма	Двоичная форма
4095	0111111111111
4094	0111111111110
...	...
1	0000000000001
0	0000000000000
-1	1111111111111
...	...
-4095	1000000000001
-4096	1000000000000

Суть данного явления заключается в том, что компьютер воспринимает первый бит слева (самый старший) как знак плюс «+», если бит равен 0, или минус «-», если бит равен 1. Таким образом, при переходе от положительных чисел к отрицательным производится инверсия, то есть замена всех нулей на единицы, а единиц – на нули (0 → 1, 1 → 0). После данной операции к полученному двоичному числу прибавляется единица и получается то же самое, но уже отрицательное двоичное число.

Приведем пример получения отрицательного отсчета  $-4095$  из положительного  $4095$ :

- 1)  $4095_{2 \rightarrow 10} = 011111111111 \rightarrow$  (инверсия)  $\rightarrow 100000000000$ ;
- 2)  $100000000000 + 1 = 100000000001$ ;
- 3)  $100000000001_{10 \rightarrow 2} = -4095$ .

Опираясь на логику оцифровки 13-разрядным АЦП, опишем алгоритмы внесения ошибки в записанный файл битового потока речевого сигнала.

В компьютерной программе было предложено два различных способа внесения ошибок в битовый поток. Первый способ заключался в использовании генератора псевдослучайных чисел Marsaglia Multicarry, который, генерируя заранее неизвестные числа, указывает на биты, которые необходимо исказить, а второй способ вносит ошибку равномерно в зависимости от заранее указанного процента битовых ошибок.

Генератор псевдослучайных последовательностей Marsaglia Multicarry набрал наибольшее количество баллов при тестировании различными методиками и тестами в своей предметной области [1]. Так как исследование проводилось между двадцатью семью различными генераторами, такими как RANDU, Xorshift, ULTRA и др., можно утверждать, что генератор псевдослучайных последовательностей наиболее правдоподобно генерирует необходимые в используемой программе случайные числа.

Как только запись речевого сигнала завершена и известна ее длительность, количество оцифрованных отсчетов и, соответственно, количество записанных в файл бит, указывается, какой процент битового потока необходимо исказить. Исходя из данного процента, определяется, какое число бит из всего битового потока необходимо исказить.

Допустим, произвели 10-секундную запись речевого сигнала или получили 80 тыс. 13-разрядных двоичных отсчетов, создавших поток из 1 040 000 бит. Пусть необходимо исказить 5 % бит, это значит, что из 1 040 000 бит необходимо исказить 52 000 бит:

$$8000 \cdot 13 \cdot 10 = 1\,040\,000 \cdot 0,05 = 52\,000 \text{ бит.}$$

Следовательно, используемый в программе генератор Marsaglia Multicarry генерирует 52 000 псевдослучайных чисел с высокой точностью в диапазоне (0; 1). Например: 0,3785694134; 0,9425846584; 0,5841875697 и т. д. После, используя простую пропорцию, при помощи каждого псевдослучайно сгенерированного числа можно определить номер искажаемого бита ( $N$ ):

$$1\,040\,000 \text{ бит} = 1; N_1 = 0,3785694134.$$

Решая данное соотношение, определим номер первого искажаемого бита:

$$N_1 = 1\,040\,000 \cdot 0,3785694134 = 393712,189936 \approx 393\,712 \text{ бит.}$$

В результате из рассмотренного псевдослучайного числа 0,3785694134 получаем номер искажаемого бита  $N = 393\,712$ . Повторив данную операцию ещё 51 999 раз при помощи оставшихся 51 999 псевдослучайных чисел, определим ещё 51 999 номеров искажаемых бит.

Как итог, зная номера искажаемых бит в битовом потоке, искажаем каждый определенный нами бит, т. е. если бит является нулем, делаем его единицей ( $0 \rightarrow 1$ ),

и, наоборот, если бит является единицей, – нулем ( $1 \rightarrow 0$ ). Программа предоставляет возможность сохранить файл с искаженным битовым потоком речевого сигнала, а также прослушать искаженный таким образом речевой сигнал.

При использовании первого способа остается вероятность появления так называемых «пробелов» – относительно длительного неискаженного потока бит речевого сигнала, который может достигать, при достаточно большой длительности записи, нескольких секунд. Данное явление связано с тем, что какой бы качественный генератор псевдослучайных последовательностей не использовали, все равно остается вероятность того, что сгенерированные им псевдослучайные числа окажутся очень близкими по значению (например: 0,3785694134, 0,3785681734). Это приведет к тому, что данные числа или укажут на один и тот же бит дважды, или исказят рядом стоящие биты, создавая своего рода «пачку» искаженных бит (например: 00  $\rightarrow$  11), которая может достигать длительности, равной проценту искажаемого потока бит, хоть и вероятность такого случая крайне мала.

Например, при длительности записи 10 с (1 040 000 бит) может появиться пачка из 52 000 последовательно искаженных бит, что соответствует длительности записи, равной всего-навсего 0,5 с. Это будет означать, что оставшиеся 9,5 с записи не будут искажены. Вероятность такого сценария крайне мала, но данное обстоятельство имеет место и может повлиять на проводимые при помощи программы исследования.

Кроме того, необходимо понимать, что оцифрованные отсчеты речевого сигнала, находящиеся рядом друг с другом (например: 3179; 3180; 3181), описывают аналоговый сигнал приблизительно одинаково. Поэтому, в случае изменения крайних правых бит в битовом потоке, то есть младших разрядов ( $3180_{2 \rightarrow 10} = 110001101100 \rightarrow 110001101101_{2 \rightarrow 10} = 3181$ ) отсчет может исказиться ( $3180 \rightarrow 3181$ ), но это никак не отразится на речевом сигнале, т. е. слушающий не сможет различить искаженную и неискаженную записи, так как они на слух будут звучать одинаково.

В связи с данными недостатками, был предложен второй способ внесения ошибок в битовый поток, позволяющий вносить ошибку более равномерно, исключая ранее приведенный случай искажения «пачки» бит.

Второй способ, называемый равномерной ошибкой, значительно проще в реализации, чем первый способ, а также он позволяет исказить полученный битовый поток речевого сигнала равномерно, тем самым не оставив в записи ни одного «пробела», вероятность появления которого была значительно выше в первом способе.

Расчет номеров бит, которые будут искажены, производится на базе изначально указанного процента искажаемого битового потока.

Возьмем, как и в первом способе, 10-секундную запись речевого сигнала, представляющую собой поток из 1 040 000 бит. Допустим, необходимо внести 15 % искажений, т. е. исказить 156 000 бит. Это же, в свою очередь, означает, что будет искажен каждый 6-й бит, то есть 1; 7; 13; 19, и так вплоть до 1 039 997-го бита.

Алгоритм искажения выводится по «постоянной искажаемых бит» ( $P$ ), указывающей, какие биты, начиная с 1-го, должны быть искажены:

$$P = 1\,040\,000 : 156 = 6,67 \approx 6 \text{ бит.}$$

Очевидно, что данный способ внесения ошибок в битовый поток искажает большее число отсчетов по сравнению с первым способом, т. к. ошибка вносится равномерно. Логика данного алгоритма ведет к тому, что при внесении 7,693 % ошибок будет искажен буквально каждый оцифрованный отсчет.

Критическое значение (КО) вносимого процента битовых ошибок можно получить исходя из простой логики. Если за 1 с оцифровывается 8000 отсчетов, составляющих поток из 104 000 бит, то при использовании способа равномерной ошибки необходимо исказить всего лишь 8000 бит, чтобы исказить каждый отсчет:

$$КО_{\text{крит}} = (104\,000 : 8\,000) \cdot 100 \% \approx 7,693 \%$$

Проведенные исследования подтвердили данную теорию, т. к. артикуляция звуков, слов и фраз [4] была изначально занижена во всех исследованиях при внесении именно равномерной ошибки. Этот метод внесения ошибки более правдоподобно моделирует реально возникающий шум в разговорных трактах поездной радиосвязи в результате воздействия электрических шумов, вызываемых посторонними токами в микротелефонной трубке.

В качестве примера приведены графики амплитудно-временного изменения отсчетов неискаженной записи (рисунок 1, а) и искаженной (в битовый поток внесено 0,2 % битовых ошибок – рисунок 1, б), построенные при помощи компьютерной программы, созданной непосредственно для проведения исследования качества трактов поездной радиосвязи стандарта GSM-R [2, 5].

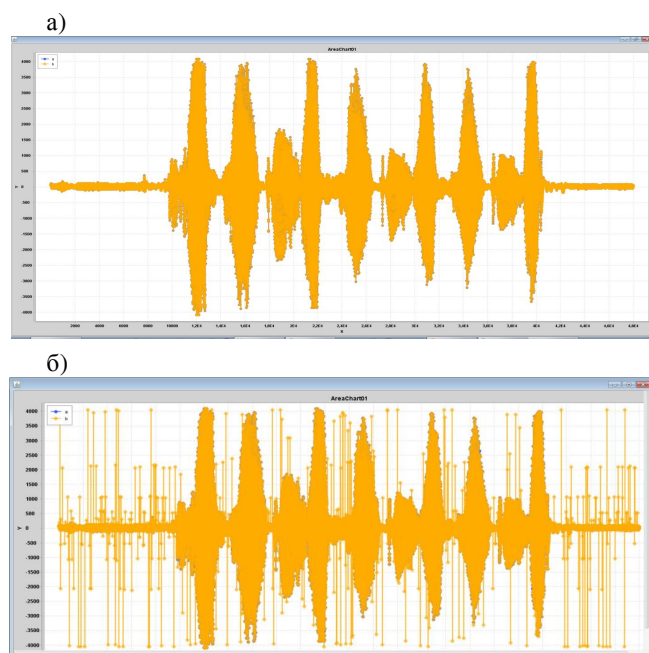


Рисунок 1 – График изменения отсчетов последней принятой записи во времени

Получено 21.09.2014

**V. G. Shevchuk, S. V. Krivenkov, S. I. Sedler, M. P. Stotski.** Computer modeling of conversational tract system GSM-R.

Created a computer program that can work directly from the speech signal taken from your computer's microphone and digitized 13-bit analog-to-digital Converter (ADC) computer's sound card. It is shown, that arise during the conversation, acoustic noise «premises», which is the mobile phone plays an important role especially when the research at railway stations and crossings, where the noise level is initially inflated due to heavy traffic and regular traffic.

Не следует забывать о возникающем при разговоре акустическом шуме, под которым подразумевается шум «помещения», где расположен мобильный телефон или мобильная станция. Данное условие играет немаловажную роль, особенно при исследованиях на железнодорожных станциях и переездах в пределах городов, где уровень шума изначально завышен в связи с интенсивным движением автомобилей через переезд, а также регулярным движением поездов, а значит, расслышать одно и то же речевое сообщение в таких обстоятельствах будет проблематичнее.

Так как в проведенном исследовании компьютерной программой искажался непосредственно битовый поток на выходе 13-разрядного АЦП (аналогичного АЦП мобильного телефона), ставилась под вопрос возможность таких искажений. В связи с данным обстоятельством рассматривался случай, когда неисправен аналого-цифровой преобразователь мобильного телефона (станции) или промежуточное оборудование сети GSM-R. Кроме того, не исключалась возможность перехвата трафика между мобильной (MS) и базовой (BTS) станциями атакующей стороной с целью искажения передаваемой речевой информации. В таком случае будет искажаться не битовый поток с АЦП мобильного телефона, а закодированный битовый поток TDMA-кадра и последствия данных искажений на приеме могут быть куда более непредсказуемыми и фатальными.

#### Список литературы

- 1 **Вериго, А. М.** Технологическая радиосвязь сегодня и завтра / А. М. Вериго, К. К. Алмазян // Автоматика, связь, информатика. – 2004. – № 5. – С. 28–31.
- 2 Сравнительный анализ основных причин неисправностей радиосвязи на Белорусской и Российских железных дорогах / В. Г. Шевчук [и др.] // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2008. – С. 216–217.
- 3 **Шевченко, Д. Н.** Методика тестирования и использования генераторов псевдослучайных последовательностей / Д. Н. Шевченко, С. В. Кривенков // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2. – С. 11–17.
- 4 **Шевчук, В. Г.** Транспортные радиосистемы. Распространение энергии звуковых и электромагнитных волн / В. Г. Шевчук. – Гомель : БелГУТ, 1999. – С. 91–103.
- 5 Совершенствование технологической радиосвязи железной дороги на основе GSM- и 3G-технологий / В. Г. Шевчук [и др.] // Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. «Проблема безопасности на транспорте». – Гомель : БелГУТ, 2010. – С. 242–243.