УДК 621.391.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА РЕЧЕВОГО СИГНАЛА В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЙ КОНВЕНЦИОНАЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗИ

***Перечнев Д. Н.*[1], *Коротков К. С.*[2]**

COMPETITIVE ANALYSIS OF VOICE QUALITY IN CONVENTIONAL DIGITAL RADIO COMMUNICATION SYSTEMS

Perechnev D. N., Korotkov K. S.

Analysis of dependencies of objective measurement results on signal-to-noise ratio for various digital voice radio communication systems has been conducted for additive Gaussian white noise channel and Rayleigh fading channel. It is shown that the Bit Error Rate (BER) cannot be the only parameter to characterize the quality of voice communication in various channel conditions.

Keywords: APCO 25, DAXON, Rayleigh fading, conventional communication

Приоритетное развитие цифровой радиосвязи с одновременным распространением средств аналоговой радиосвязи делает необходимым исследование их преимуществ и недостатков. На практике получили широкое распространение различные стандарты цифровой радиосвязи: международные открытые (APCO 25, Tetra, Tetrapol) и закрытые (SMARTNET («Motorola»), EDACS («Ericsson»), DAXON («Информационная Индустрия»)). Радиостанции зарубежного производства этих стандартов нашли применение в ряде корпоративных сетей связи. В России начато производство радиостанций одного из открытых стандартов (APCO 25) отечественными производителями: Альтавия–351Д, Альтавия–251Д («Альтоника», Москва); Руно–322 APCO, РИТМ–222 APCO («Компания РИТМ», Краснодар). При эксплуатации средств цифровой радиосвязи как зарубежного, так и отечественного производства проявились особенности, требующие более глубокого анализа, которые в явном виде в информационных материалах (включая спецификации стандартов) не представлены. В связи с этим необходимо не только детально сравнить и проанализировать характеристики различных систем цифровой радиосвязи, но и одновременно провести их сравнение с системами аналоговой радиосвязи. В данной статье решается задача анализа качества речевого сигнала в системах цифровой и аналоговой радиосвязи в конвенциональном режиме.

1. Математическая модель канала радиосвязи

Анализ работы систем конвенциональной радиосвязи проводился с помощью математической модели, содержащей два канала: с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и с таким же каналом, но с учетом релеевских замираний, возникающих вследствие многолучевого распространения радиоволн. Блок-схема эксперимента, использующего данную математическую модель, приведена на рис. 1.

В данном эксперименте исследуется зависимость качества речевого сигнала на выходе радиоприемного устройства от различных параметров, наиболее важными из которых является соотношение сигнал/шум (S/N) в случае канала с АБГШ и соотношение S/N в совокупности со скоростью релеевских замираний в канале с многолучевым распространением радиоволн.

[1]Перечнев Денис Николаевич, аспирант кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

[2]Коротков Константин Станиславович, д-р техн. наук, профессор кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

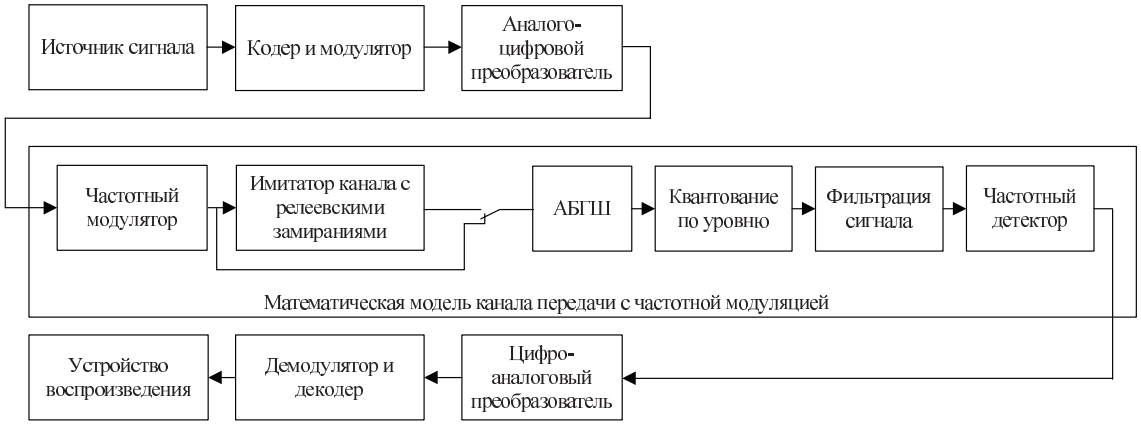

Рис. 1. Блок-схема эксперимента

Качество речевого сигнала оценивается с помощью системы объективного тестирования PESQ [1], которая позволяет получить оценку MOSLQO, пригодную для сравнения с результатами субъективного теста MOSLQO [2].

В качестве исследуемых систем цифровой радиосвязи были выбраны APCO 25 и DAXON. Предпосылками для их сравнения стали возможность одновременной работы оборудования данных стандартов в аналоговом и цифровом режимах, а также активное использование радиостанций этих стандартов потребителем.

В эксперименте образец речевого сигнала подается на вход вокодера IMBE в случае системы APCO 25 или MELP для речепреобразователя DAXON, где происходит аналого-цифровое преобразование (АЦП) исходного сигнала и его кодирование в битовый поток. Далее цифровая информация поступает на вход соответствующего модулятора, в котором происходит преобразование потока битов в аналоговый сигнал. Подробности преобразования речевого сигнала в кодере/декодере и модуляторе/демодуляторе APCO 25 изложены в материалах стандарта [3, 4]. В открытых источниках [5] также доступны общие сведения о внутреннем устройстве модуля DAXON 600.

Частотный модулятор представляет собой формирователь квадратурного сигнала с частотной модуляцией. Процесс частотной модуляции в общем виде описывается выражением [6]

$$r(t) = A\cos\left(\omega_0 t + \omega_d \int\limits_{-\infty}^{t} s(\tau)d\tau + \phi_0\right), \tag{1.1}$$

где A — амплитуда несущей частоты, ω_0 — центральная частота, ω_d — девиация частоты, $s(\tau)$ — сигнал, поступающий на вход модулятора, ϕ_0 — начальная фаза.

Применяя к (1.1) формулу Эйлера и полагая центральную частоту равной нулю, а мощность сигнала равной единице, получим квадратурное представление частотно-модулированного сигнала в основной полосе частот:

$$r(t) = \cos\left(\omega_d \int\limits_{-\infty}^{t} s(\tau)d\tau + \phi_0\right) + \\ + j\sin\left(\omega_d \int\limits_{-\infty}^{t} s(\tau)d\tau + \phi_0\right).$$

Высокочастотное колебание с несущей частотой оказалось возможным исключить благодаря тому, что комплексная огибающая узкополосного радиосигнала содержит в себе всю информацию, обусловленную как амплитудной, так и угловой модуляцией [6].

При построении модели имитатора релеевских замираний использовались следующие допущения: трасса прямой видимости в процессе распространения радиоволны от передатчика к приемнику отсутствует, замирания считаются амплитудными, а также учитывается нестационарность канала вследствие относительного движения передатчика и приемника. При указанных допущениях возможно реализовать математическую

Таблица 1. Соотношения E_b/N_0 для вероятности ошибки 5% для различных каналов радиосвязи

Тип канала	E_b/N_0, дБ
АБГШ	5,6
Р8	11,9
Р60	10,7
Р100	11,0

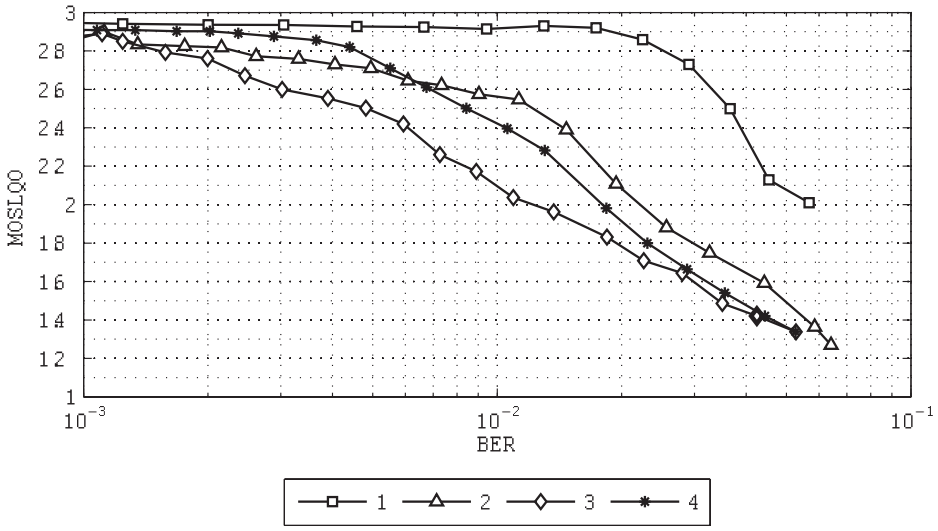

Рис. 2. Зависимость оценки MOSLQO системы PESQ от вероятности ошибки в канале: *1* — АБГШ; *2* — Р8; *3* — Р60; *4* — Р100

модель по принципу, приведенному в литературе [7]. Скорость релеевских замираний определяется значением максимального доплеровского сдвига, т. е. зависит от относительной скорости движения подвижных терминалов и частоты несущей. Далее для определенности частота несущей полагалась равной 174 МГц, а скорость движения абонента изменялась. Введем здесь следующие обозначения типов исследуемых каналов: релеевский канал при скорости движения абонента $V = 8$ км/ч — Р8, $V = 60$ км/ч — Р60, $V = 100$ км/ч — Р100.

После имитатора канала с многолучевым распространением радиоволн сигнал подается на имитатор канала с АБГШ, реализованному в виде генератора комплексного шумового сигнала с гауссовским распределением амплитуды.

Дополнительно в модели учтено квантование сигнала по уровню после АЦП его квадратурных составляющих при приеме и фильтрация сигнала фильтром основной селекции радиоприемного устройства. Частотный детектор выполнен по принципу непосредственного вычисления девиации частоты квадратурного сигнала: $\omega_d = darg(r(t))/dt$.

2. Анализ результатов математического моделирования цифровых систем связи

Результаты математического моделирования состоят в получении зависимости оценки MOSLQO от соотношения S/N в канале для различных систем радиосвязи и типов каналов, которые приведены ниже.

Кроме того, для системы АРСО 25 получены зависимости вероятности появления битовых ошибок (BER) от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 для различных каналов радиосвязи, а также зависимости MOSLQO от BER. В качестве порога чувствительности приемного устройства стандартом [8] определена фиксированная величина равная 5% BER вне зависимости от типа канала. В табл. 1 приведены значения, соответствующие данному значению BER. Разница в чувствительности между каналом АБГШ и каналом с релеевскими замираниями составляет 5–6,5 дБ в зависимости от скорости перемещения подвижного терминала.

Далее на рис. 2 приведен график зависимости оценки MOSLQO системы PESQ от

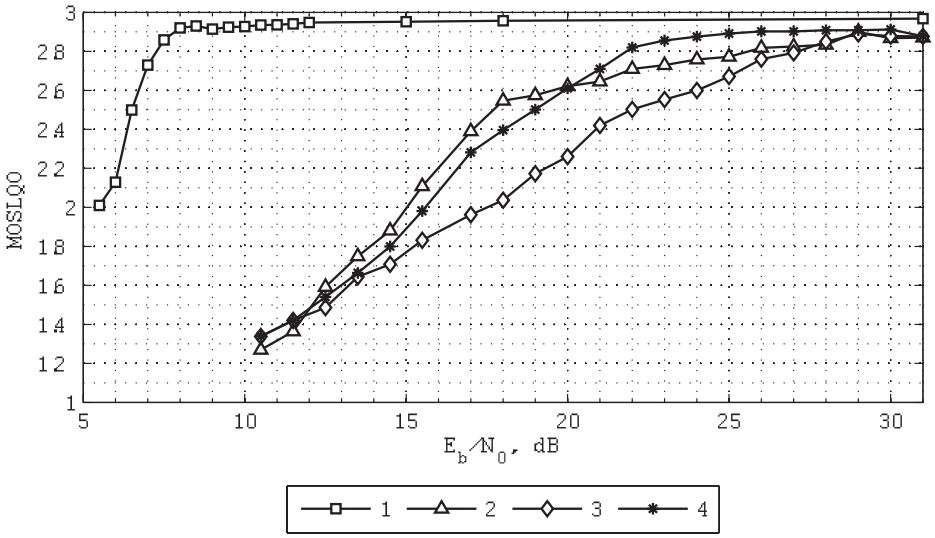

Рис. 3. Зависимость оценки по MOSLQO от соотношения E_b/N_0 в канале: *1* — АБГШ; *2* — P8; *3* — P60; *4* — P100

вероятности ошибки в канале для различных каналов радиосвязи.

Как видно из результатов тестирования, для получения одинаковой разборчивости речи в канале с АБГШ и в канале с релеевскими замираниями требуется различное значение BER. В то же время в стандарте для порога чувствительности приемного устройства используется фиксированная величина. Таким образом, в реальных условиях эксплуатации системы неизбежно различие в качестве принимаемого речевого сигнала в зависимости от типа канала при пороговых значениях уровня сигнала.

Если принять оценку по MOSLQO полученную для 5% BER в канале с АБГШ ($MOSLQO = 2,1$) в качестве пороговой, то путем линейной интерполяции экспериментально полученных данных получим следующие значения для BER для канала с релеевскими замираниями: 2,0%, 1,0%, 1,7% для каналов P8, P60, P100 соответственно. Таким образом, порог чувствительности в каналах с замираниями необходимо понизить до 1–2% BER для обеспечения того же качества принимаемой речи.

Дополнительно отметим, что для канала с релеевскими замираниями качество речевого сигнала гораздо ниже при тех же значениях вероятности битовой ошибки в принимаемом цифровом потоке. Это объясняется более низкой устойчивостью кодека IMBE к пакетам ошибок по сравнению с равновероятным распределением ошибок внутри цифрового потока.

Исходя из вышеизложенного, наиболее корректной зависимостью для определения качества радиосвязи при реальной эксплуатации системы будет являтся зависимость оценки MOSLQO от отношения E_b/N_0 либо от отношения сигнал/шум, линейно связанного с E_b/N_0 выражением [9]:

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b}{N_0}\frac{R}{W}, \tag{2.1}$$

где R — скорость битового потока, W — ширина полосы передачи, N_0 — односторонняя спектральная плотность мощности шума.

Полученная зависимость MOSLQO от E_b/N_0 приведена на рис. 3. Принимая за пороговое значение оценку $MOSLQO = 2,1$ для каналов с релеевскими замираниями, получим следующие требуемые соотношения сигнал/шум: 15,4 дБ, 18,3 дБ, 16,0 дБ для каналов P8, P60, P100 соответственно.

Следовательно, порог чувствительности радиостанций, работающих в каналах с релеевскими замираниями, определенный по одинаковой оценке MOSLQO на 3,5–7,5 дБ, ниже порога чувствительности, определенного по одинаковой вероятности битовой ошибки.

На рис. 4 приведены зависимости оценки MOSLQO, полученные при аналогичном моделировании канала связи с использованием речепреобразующего устройства DAXON 600.

Качество цифровой речевой связи полностью определяется оценкой MOS. Поэтому как пороговое значение для системы радиосвязи DAXON возможно выбрать точно

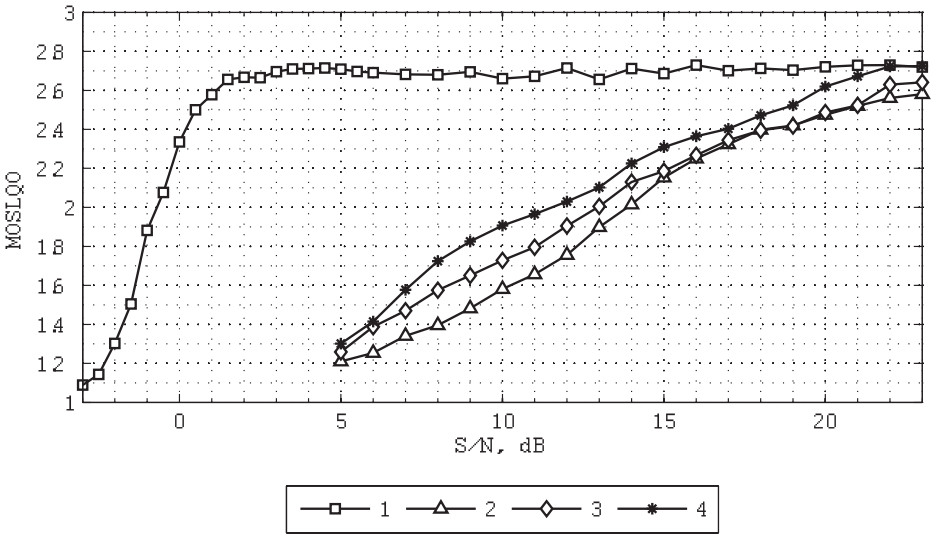

Рис. 4. Зависимость оценки MOSLQO от соотношения сигнал-шум в канале для речепреобразующего модуля DAXON для различных каналов: *1* — АБГШ; *2* — Р8; *3* — Р60; *4* — Р100

такую же оценку MOSLQO, как и для системы АРСО 25, т.е. $MOSLQO = 2,1$. Исходя из этих допущений, получены соотношения S/N, соответствующие данной оценке, а также величина ухудшения требуемого соотношения S/N при переходе от канала с АБГШ к каналу с релеевскими замираниями. Результаты сведены в табл. 2.

3. Сравнение различных систем цифровой и аналоговой радиосвязи

Так как соотношение сигнал/шум S/N и отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 связаны между собой выражением (2.1), то возможно приведение зависимости $MOSLQO(E_b/N_0)$ (рис. 3) к зависимости $MOSLQO(S/N)$ с целью сравнения двух систем радиосвязи. При этом в (2.1) полагается $R = 9600$ бит/c — скорость битового потока в системе АРСО 25, а $W = 60$ кГц — ширина полосы канала в математической модели.

По результатам математического моделирования также возможно сравнение качества речевого сигнала приемной аппаратуры, реализующей оба рассматриваемых стандарта радиосвязи.

Предположим, что источником АБГШ являются собственные шумы приемника. В таком случае мощность принятого сигнала для заданного соотношения сигнал/шум (с учетом (2.1)) определяется следующим выражением [9]:

$$S = kTN_F R\,(E_b/N_0) = kTN_F W\,(S/N)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура, N_F — коэффициент шума приемника.

Таким образом, в случае равенства N_F, то есть при использовании идентичных высокочастотных трактов приемника для оборудования обоих стандартов, уровень принимаемого сигнала полностью определяет соотношение сигнал/шум на входе приемника, и, следовательно, сравнение приемного оборудования двух стандартов возможно с учетом полученных соотношений для S/N.

Помимо моделирования цифровых систем связи, дополнительно было произведено моделирование и аналоговой системы радиосвязи с частотной модуляцией.

На рис. 5 приведены сводные зависимости, по которым можно сравнивать системы цифровой и аналоговой радиосвязи.

Обращает на себя внимание достаточно низкая оценка MOSLQO для аналогового режима по сравнению с цифровым. Путем субъективной оценки качества речевого сигнала в аналоговой системе связи было выяснено, что оценка MOSLQO некорректно характеризует качество сигнала. Субъективно граница разборчивости речи в аналоговом режиме лежит в районе S/N равного минус 2,5 дБ, что соответствует границе разборчивости в системе АРСО 25. Следовательно, необходимо либо изменение алгоритма объективного тестирования качества ре-

Таблица 2. Значения соотношения сигнал/шум (S/N) определенные в качестве пороговых для системы радиосвязи DAXON

Тип канала	S/N, дБ	$\Delta S/N$, дБ
АБГШ	−0,5	0
P8	12,7	13,2
P60	13,6	14,1
P100	14,5	15,0

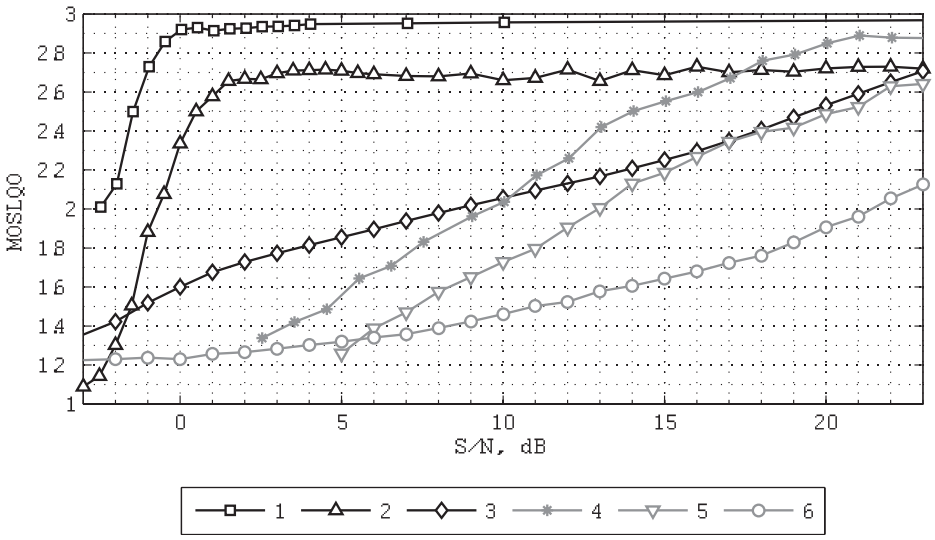

Рис. 5. Сравнение зависимостей оценки MOSLQO от отношения S/N для систем цифровой и аналоговой радиосвязи: *1* — АБГШ APCO 25; *2* — АБГШ DAXON; *3* — АБГШ Аналоговый; *4* — P60 APCO 25; *5* — P60 DAXON; *6* — P60 Аналоговый

чи, либо выбор иной функции отображения результатов алгоритма PESQMOS в результат MOSLQO.

В табл. 3 сведены значения соотношений сигнал/шум для различных систем радиосвязи для оценки $MOSLQO = 2,1$, выбранной ранее в качестве пороговой.

Таким образом, система APCO 25 в канале с АБГШ обеспечивает равное качество речевого сигнала при соотношении сигнал/шум на 1,8 дБ — лучшем по сравнению с системой DAXON; в канале с релеевскими замираниями на 3–6 дБ лучшем S/N, что говорит о большей приспособленности системы APCO 25 для работы в условиях релеевских замираний.

Заключение

В результате исследования различных систем конвенциональной подвижной радиосвязи можно сделать следующие выводы.

Вероятность битовой ошибки не полностью характеризует качество радиосвязи в различных условиях распространения радиоволн, дополнительно необходимо знание характеристик радиоканала. Глубина замирания радиосигнала и его продолжительность определяет длину пакета ошибок во времени, а средняя мощность сигнала в точке приема — вероятность возникновения ошибок на интервале времени, включающем в себя достаточно большое количество таких пакетов. Влияние пакетов ошибок можно существенно снизить путем введения чередования, при котором они превращаются в одиночные ошибки, которые в дальнейшем исправляются с помощью какого-либо кода коррекции ошибок. Однако чередование наилучшим образом работает при какой-либо одной длине и частоте появления пакета ошибок. Длина пакета ошибок и частота его появления связана со значением максимального доплеровского сдвига, который, в свою очередь, зависит от относительной скорости движения мобильных терминалов и диапазона частот, в котором работает система связи. Усовершенствование системы APCO 25 возможно путем применения различных схем чередо-

Таблица 3. Значения пороговых соотношений сигнал/шум S/N для различных систем радиосвязи

Тип канала	S/N, дБ (APCO 25)	S/N, дБ (DAXON)	S/N, дБ (Аналоговый)
АБГШ	−2,3	−0,5	10,6
P8	7,4	12,7	14,8
P60	10,4	13,6	22,4
P100	8,1	14,5	22,4

вания, оптимальных для различных диапазонов частот.

Кроме чередования возможными мерами улучшения качества речевого обмена могут служить разработка низкоскоростного вокодера, устойчивого к пакетам ошибок, и его применение в системах цифровой подвижной радиосвязи.

В процессе исследования установлено, что оценки MOSLQO недостаточно для сравнения цифровых и аналоговых систем радиосвязи. Для аналоговых каналов радиосвязи необходимо либо изменение алгоритма объективного тестирования качества речи, либо выбор иной функции отображения результатов алгоритма PESQMOS в результат MOSLQO.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить главные преимущества аналоговой связи, состоящие в возможности работы при соотношениях сигнал/шум более низких, чем это оговаривается стандартами. Конечно, качество речи при этом значительно ухудшается, но отдельные фразы, смысл которых еще возможно понять, все-таки могут пройти через радиоканал. Для цифровой же системы связи подобный радиообмен практически невозможен, т. к. при падении соотношения сигнал/шум ниже определенного порога происходит полный разрыв связи, либо появляются характерные сильные искажения голоса. Таким образом, целесообразно дополнение любой системы цифровой речевой радиосвязи аналоговым режимом. При этом для упрощения ведения радиообмена речевыми сообщениями возможна реализация функции автоматического определения типа системы — аналоговый либо цифровой.

Литература

1. ITU-T Recommendation P.862. Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs. 2001.
2. ITU-T Recommendation P.862.1. Mapping function for transforming P.862 raw result scores to MOS-LQO. 2003.
3. TIA/EIA-102.BAAA. Project 25 FDMA Common Air Interface. TIA, 1998.
4. TIA/EIA-102.BABA. Project 25 Vocoder Description. TIA, 1998.
5. Мир связи и информации. Connect! [Электронный ресурс]: Каталог-справочник / Издательский Дом «CONNECT!» URL: http://www.connect.ru/catalog_tech_info.asp?prod=1436 (дата обращения: 1.09.2010).
6. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Дрофа, 2006. 719 с.
7. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.
8. TIA/EIA/IS-102.CAAA. Digital C4FM/CQPSK Transceiver Measurement Methods. TIA, 1997.
9. *Бернард С.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2004. 1104 с.

Ключевые слова: APCO 25, DAXON, релеевские замирания, конвенциональная радиосвязь

Статья поступила 27 августа 2010 г.
Кубанский государственный университет, г. Краснодар
© Перечнев Д. Н., Коротков К. С., 2010