

*Ю.В. ЛЫКОВ, канд. техн. наук, К. С. КОЛЕСНИК, М. С. КОЛЕСНИК,  
А.В. БЕЛУЩЕНКО*

## **ВЫБОР ПОРОГОВОГО ЗНАЧЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ДЛЯ РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ СОСТАВНОГО АКУСТО-РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КАНАЛА УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ**

### **Введение**

Один из самых распространенных способов съема акустической информации – использование различных радиозакладных устройств (РЗУ), то есть устройств, передающих акустическую информацию и/или сигналы с телефонной линии по радиоканалу. РЗУ – миниатюрное электронное устройство, состоящее из микрофона и радиопередатчика, обеспечивающего передачу подслушиваемых переговоров на достаточно значительное расстояние с помощью электромагнитных волн. Средний радиус действия радиоканала 200 – 300 м, типовое время работы при использовании автономного питания 2 – 3 дня, но может быть значительно больше. При питании от внешних источников время работы практически не ограничено. Достоинствами являются простота использования, относительная дешевизна, малые размеры и возможность камуфляжа не только самих РЗУ, но и приемных устройств.

Вопреки распространенному мнению, радиопередающие подслушивающие устройства плохо подавляются различными средствами противодействия, такими как генераторы широкополосных радиопомех, которые именно из-за широкого спектра излучения не могут эффективно противостоять РЗУ средней и даже малой мощности. Исключения составляют генераторы прицельной помехи, но для их работы необходимо сначала определить частоту излучения РЗУ. Поэтому генераторы прицельной помехи работают в комплексе с приемной аппаратурой и стоят значительно дороже широкополосных генераторов.

Если речь идет о телефонном РЗУ, то, поскольку оно может быть установлено на всем протяжении телефонной линии, использование генераторов пространственного зашумления вообще не имеет смысла [1].

### **Постановка задачи**

Для определения дальности канала утечки информации и соответственно целесообразности применения дополнительных мер по его закрытию требуется задаться предельным отношением информативный сигнал/шум. Дальность составного акусто-радиоэлектронного канала ограничивает два вида шумов: акустический и электромагнитный. Исходя из сферы применения РЗУ (съем акустической информации из незащищенных кабинетов, офисов) уровень акустических шумов при средней громкости разговоров вносит меньший вклад. Поэтому для объективной оценки дальности составного канала необходимо получить зависимость между отношением электромагнитный сигнал/шум и разборчивостью речи для разных видов модуляции.

### **Основные положения**

Обобщенная структура составного канала показана на рис. 1.

В работе основным выражением является зависимость разборчивость речи от отношения акустический сигнал/шум. Далее необходимо определить зависимость отношение акустический сигнал/шум от отношения электромагнитный сигнал/шум. Наиболее нелинейным элементом и соответственно вносящим большой вклад в эту зависимость является демодулятор.

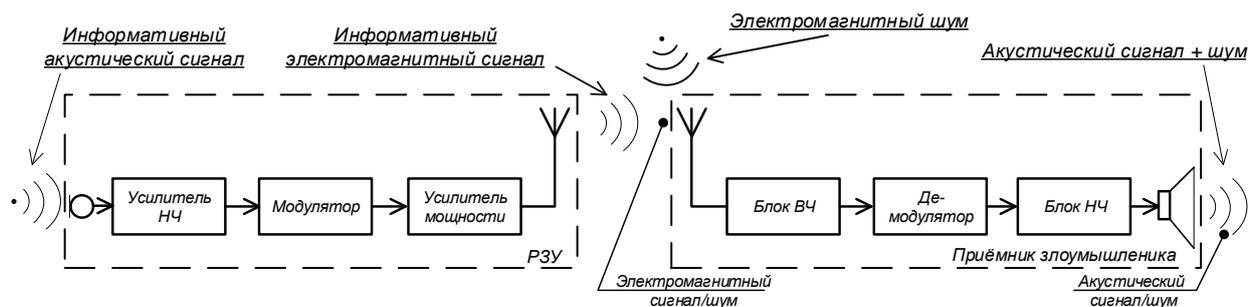


Рис.1. Структура составного канала утечки информации

БВЧ – линейное инерционное устройство (поскольку напряжения сигнала и шума малы). Поэтому для него справедлив принцип суперпозиции: можно отдельно проанализировать прохождение сигнала и шума через БВЧ, а затем рассмотреть сумму процессов на выходе блока. При анализе прохождения шума через БВУ будем считать, что БВЧ – не шумящий, а на его входе действует приведённый шум (как естественного, так и искусственного характера). Приведённый входной шум является стационарным нормальным случайным процессом. Ширина его спектра много больше полосы пропускания БВЧ, поэтому можно считать его белым шумом. При прохождении нормального случайного процесса через линейный блок его распределение вероятностей не меняется. Поэтому шум на выходе БВЧ также будет нормальным. Однако это будет уже узкополосный случайный процесс. Такой процесс имеет характер квазигармонического колебания [3].

Демодулятор – нелинейное устройство. Поэтому закон распределения шума на выходе демодулятора отличается от нормального. Его статистические характеристики зависят как от статистических характеристик шума на входе демодулятора, так и от амплитуды сигнала.

Анализ прохождения выходного колебания демодулятора через БНЧ существенно зависит от структуры оконечной части РПУ. Для упрощения расчетов будем считать его идеальным ФНЧ с прямоугольной АХЧ.

### Расчет разборчивость речи от отношения акустический сигнал / шум

Показатель словесной разборчивости речи можно использовать для оценки эффективности закрытия технических каналов утечки речевой информации. Наиболее целесообразно для оценки разборчивости речи использовать инструментально-расчетный метод, основанный на результатах экспериментальных исследований, проведенных Н.Б. Покровским, и не требующий проведения артикуляционных измерений. Суть этого метода заключается в следующем.

Спектр речи разбивается на  $N$  частотных полос, в общем случае произвольных. Для каждой  $i$ -й ( $i = 1 - N$ ) частотной полосы на среднегеометрической частоте [2]:

$$f_{cp.i} = \sqrt{f_{s.i} \cdot f_{n.i}} \quad (1)$$

Определяется формантный параметр  $\Delta A_i$ , характеризующий энергетическую избыточность дискретной составляющей речевого сигнала:

$$\Delta A(f_{cp.i}) = \begin{cases} \frac{200}{f^{0.43}} - 0.37 & \text{если } f \leq 1000 \text{ Гц} \\ 1.37 + \frac{1000}{f^{0.69}} & \text{если } f > 1000 \text{ Гц} \end{cases}, \quad (2)$$

Для каждой  $i$ -й частотной полосы определяется весовой коэффициент  $k_i$ , характеризующий вероятность наличия формант речи в данной полосе:

$$k_i = k(f_{s.i}) - k(f_{n.i}), \quad (3)$$

где  $k(f_{в,i})$  и  $k(f_{н,i})$  – значения весового коэффициента для верхней  $k(f_{в,i})$  и нижней  $k(f_{н,i})$  граничной частот  $i$ -й частотной полосы спектра речевого сигнала, рассчитываемые по формуле

$$k(f) = \begin{cases} 2.57 \cdot 10^{-8} \cdot f^{2.4} & \text{если } 100 < f \leq 400 \text{ Гц} \\ 1 - 1.074 \cdot \exp(-10^{-4} \cdot f^{1.18}) & \text{если } 400 < f \leq 10000 \text{ Гц} \end{cases} \quad (4)$$

Определяется спектральный индекс артикуляции (понимаемости) речи  $i$   $R$  (информационной вес  $i$ -й спектральной полосы частотного диапазона речи) и рассчитывается интегральный индекс артикуляции речи  $R$ :

$$R_i = p_i \cdot k_i, \quad (5)$$

где коэффициент

$$p_i = \begin{cases} \frac{0.78 + 5.46 \cdot \exp[-4.3 \cdot 10^{-3} \cdot (27.3 - |Q|^2)]}{1 + 10^{0.1|Q|}} & \text{если } Q_i \leq 0; \\ 1 - \frac{0.78 + 5.46 \cdot \exp[-4.3 \cdot 10^{-3} \cdot (27.3 - |Q|^2)]}{1 + 10^{0.1|Q|}} & \text{если } Q_i > 0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $Q_i = q_i - \Delta A_i$ ;  $q_i$  – отношение “уровень речевого сигнала/уровень шума”, дБ.

Для общей частотной полосы спектра речевого сигнала рассчитывается интегральный индекс артикуляции речи  $R$  по формуле

$$R = \sum_{i=1}^N R_i, \quad (7)$$

По интегральному индексу артикуляции речи определяется словесная  $W$  разборчивости речи:

$$W = \begin{cases} 1.54 \cdot R^{0.25} [1 - \exp(-11 \cdot R)] & \text{если } R < 0.15; \\ 1 - \exp\left(-\frac{11 \cdot R}{1 + 0.7 \cdot R}\right) & \text{если } R \geq 0.15. \end{cases} \quad (8)$$

При наличии измерительной аппаратуры общего применения наиболее простым способом является представление спектра речевого сигнала в виде пяти октавных полос. При этом методическая ошибка, по сравнению с 20-полосным представлением спектра, не превышает 7 % [10]. Полученная разборчивость речи приведена на рис.2.

Необходимо отметить, что полученная зависимость пригодна только для некоррелированного текста и лишь отдаленно соответствует реальной ситуации съёма информации по составному акусто-радиоэлектронному каналу. В этом случае текст является коррелированным и кроме того у злоумышленника есть возможность неоднократного его прослушивания, эти факторы значительно повышают разборчивость речи.

Также к методическим погрешностям измерений  $W$  (строго говоря, погрешности оценки) относятся следующие факторы:

- использование зависимости  $P(E)$ , справедливой для уровня шума приблизительно в 40 дБ, в то время как средства защиты создают шум, превышающий уровень речи до 20 дБ. При повышении уровня шума зависимость  $P(E)$  существенно деформируется;

- ступенчатая аппроксимация непрерывных кривых огибающих спектра речи и шума, что может привести к существенным отклонениям интегральных уровней речи и шума в октавных полосах;

- неучет частотной зависимости уровня слуховых ощущений;

– неучет погрешностей косвенных измерений (оценок) [4].

Результаты расчета погрешностей косвенного измерения (оценки)  $W$  приведены на рис. 3 [4]. Сравнивая приведенные графики (рис.2, 3) при уровне разборчивости 0,2 разность составляет  $-3$  дБ.

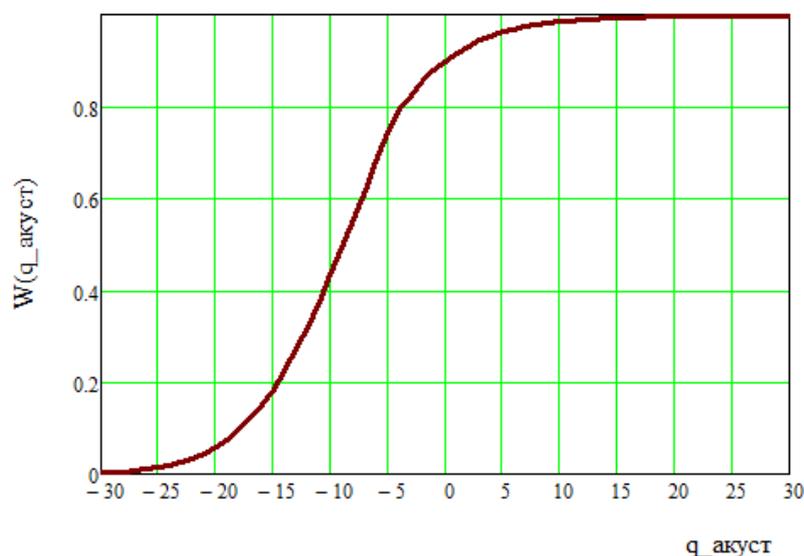


Рис. 2. Разборчивость речи от отношения сигнал/шум

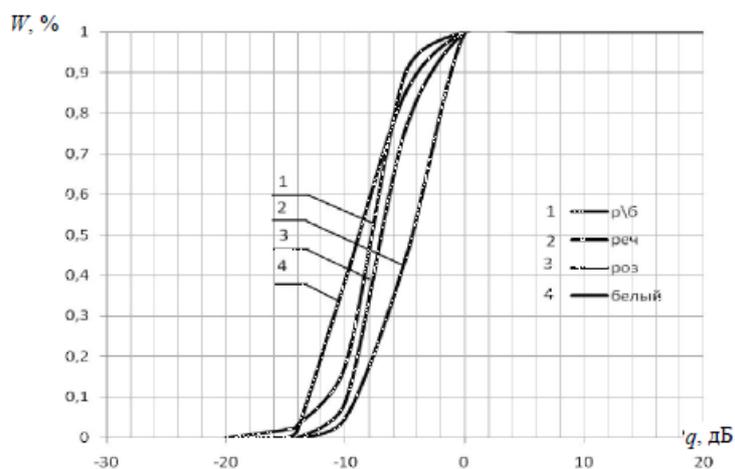


Рис. 3. Разборчивость речи от отношения сигнал/шум при коррелированной речи при многократном прослушивании

### **Помехоустойчивость наиболее популярных методов модуляции, применяемых в РЗУ**

Проанализируем потенциальный выигрыш в отношении сигнал/шум для различных методов модуляции, наиболее распространённых в РЗУ.

Определение помехоустойчивости приема непрерывных сигналов осуществляется вычислением отношения средних мощностей сигнала  $P_c$  и шума  $P_{ш}$  на выходе демодулятора

В любом демодуляторе отношение сигнал/шум на выходе  $q_{\text{вых}}$  зависит не только от качественных показателей демодулятора, но и от отношения сигнал/шум на его входе  $q_{\text{вх}}$ . Помехоустойчивость систем передачи непрерывных сигналов оценивается выигрышем в отношении сигнал/шум:

$$g = \frac{q_{\text{вых}}}{q_{\text{вх}}} \quad (9)$$

Наиболее популярными видами модуляции, применяемые в РЗУ, являются ЧМ, АМ, БМ и ОМ. Ниже приведены расчетные формулы выигрыша оптимального демодулятора для различных видов модуляции при помехе в виде аддитивного белого гауссовского шума [5]:

$$g_{\text{АМ}} = \frac{M^2}{M^2 + K_A^2} \cdot \alpha_{\text{АМ}}, \quad (10)$$

$$g_{\text{ОМ}} = 2, \quad (11)$$

$$g_{\text{БМ}} = 1, \quad (12)$$

где  $M$  – коэффициент модуляции,  $K_A$  – коэффициент амплитуды модулирующего сигнала, представляющий собой отношение его максимальной мощности к средней и определяемый в логарифмических единицах,  $\alpha = \Delta f / F_m$  – коэффициент расширения полосы, показывающий во сколько раз ширина спектра модулированного сигнала  $\Delta f$  превышает частоту модулирующего сигнала  $F_m$  ( $\alpha_{\text{АМ}} = 1$ ,  $\Delta f = 50 \text{ кГц}$ ,  $F_m = 3,1 \text{ кГц}$ ).

При ЧМ выигрыш демодулятора зависит от  $\rho_{\text{вх}}$  и определяется так:

$$g_{\text{ЧМ}} = \frac{3m_{\text{ЧМ}}^2 \cdot \alpha_{\text{ЧМ}}}{K_A^2} \cdot \frac{1}{1 + 4m_{\text{ЧМ}}^2 \cdot \exp(-q_{\text{вх}}) \sqrt{3q_{\text{вх}}(1 + 6q_{\text{вх}} / K_A^2) / \pi}}, \quad (13)$$

где  $m_{\text{ЧМ}}$  – индекс модуляции.

Второй множитель в формуле (13) близок к 1, если  $\rho_{\text{вх}}$  превышает пороговое отношение сигнал/шум  $\rho_{\text{вх}}$ . В этом случае выигрыш демодулятора

$$g = \frac{3}{K_A^2} \cdot m_{\text{ЧМ}}^2 \cdot \alpha_{\text{ЧМ}} \quad (14)$$

При синхронном детектировании АМ, БМ, ОМ-сигналов пороговый эффект не наблюдается [5]. Высокое качество демодуляции ЧМ сигнала возможно лишь при сравнительно большом отношении сигнал/шум на входе ограничителя ЧД, когда практически отсутствуют «перескоки» фазы. Это пороговое отношение сигнал/шум составляет 7 – 10 дБ [6]. В настоящее время разработаны и внедрены методы снижения порога помехоустойчивости для систем передачи информации с ЧМ. С этой целью используются следящие фильтры додетекторной обработки сигнала. Это позволяет уменьшить мощность помехи на выходе следящего фильтра примерно в  $m_{\text{ЧМ}}$  раз [5], при этом отношение сигнал/шум на выходе демодулятора увеличивается на 8 дБ.

Рассмотрим случай, оптимальный для злоумышленника при котором обеспечивается максимальная дальность съема информации:

$$q_{\text{вых}}(q_{\text{вх}}) = \begin{cases} \frac{3}{K_A^2} m_{\text{ЧМ}}^2 \alpha_{\text{ЧМ}} & \text{if } q_{\text{вх}} \geq 16 \\ 3.2 \cdot q_{\text{вх}} - 13 & \text{if } 7 \leq q_{\text{вх}} < 16. \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

Полученная обобщенная кривая (рис. 4) хорошо согласуется с составным каналом утечки информации, т.к., как правило, в РЗУ помимо частотной присутствует и паразитная амплитудная модуляция, что позволяет злоумышленнику для получения максимального выигрыша использовать при малых сигнал/шум АМ демодулятор, при больших – ЧМ.

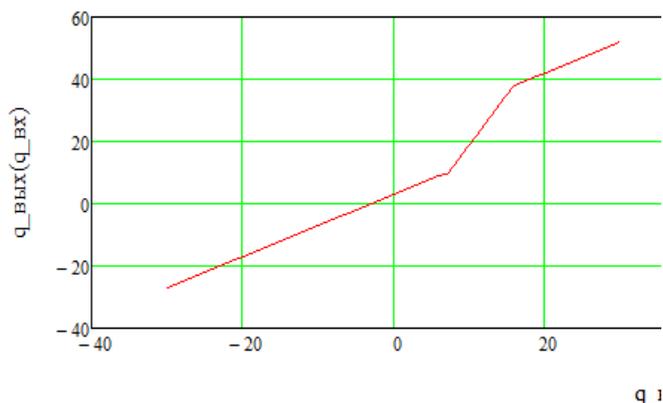


Рис. 4. Помехоустойчивость обобщенного демодулятора при оптимальном приёме

### Зависимость разборчивости речи от отношения электромагнитный сигнал/шум в составном канале утечки информации

Исходя из полученной зависимости словесной разборчивости речи от отношения акустический сигнал/шум (8) и выигрыша в отношении сигнал/шум для различных видов демодуляции (15) получим зависимость словесной разборчивости речи от отношения электромагнитный сигнал/шум.

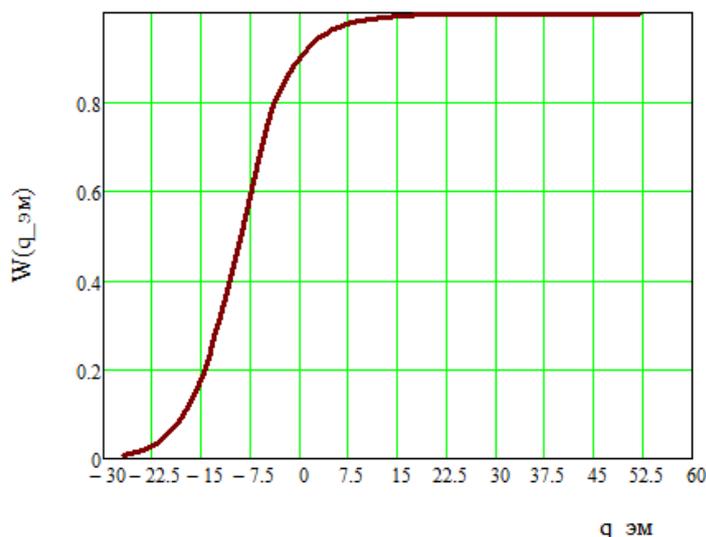


Рис. 5. Зависимость разборчивости речи от отношения сигнал/шум

Кроме того, злоумышленником могут применяться различные методы шумоочистки позволяющие повысить отношение сигнал/шум на 2 – 7 дБ [7].

В работе [7] показано, что при словесной разборчивости менее 20 – 30 % значительно затруднено установление предмета ведущегося разговора. Соответственно при пороговом значении разборчивости 0.2 отношение электромагнитный сигнал/шум равен -15 дБ. С поправкой 3 дБ, учитывающей использование корреляционного текста в перехватываемом сообщении с многократным прослушиванием и 7 дБ на использование современных методов шумоочистки, пороговое значение отношения сигнал/шум примет значение -25 дБ. Поправка на использование следящих фильтров не учитывалась, так как они применяются для ЧМ, которая эффективна для существенно больших отношений сигнал/шум.

## Выбор методики расчета дальности распространения радиоволн

Существует множество методик расчета дальности распространения радиоволн [8, 9]. В данной работе исследовались модели свободного пространства, Окамура, Хата и ITU-R P.1546. В качестве исходных данных использовали параметры возможных средств съема информации наиболее популярных частотных диапазонов: закладное устройство с частотой  $F_{pzy}=95$  МГц и мощностью  $P_{pzy}=51$  мВт, а также рации Motorola PMR TLKR T8 с частотой  $F_{pau}=446$  МГц и мощностью  $P_{pau}=0.5$  Вт.

Также были проведены экспериментальные исследования дальности распространения радиоволн при прямой видимости. Результаты приведены в таблице.

Источник излучения	Модели распространения радиоволн				Эксперимент, км
	Свободное пространство, км	Окамура, км	Хата, км	ITU-R P.1546, км	
Закладное устройство	200	0,35	0,6	2	0,3
Рация	735	-	1,7	13	8,31

Исходя из полученных результатов видно, что наиболее приближенными к значениям экспериментальных измерений являются модели Окамура и ITU-R P.1546. Модель Окамура достаточно проста и может использоваться для прогнозирования дальности распространения радиоволн. Однако необходимо отметить отсутствие в модели механизмов учета рельефа местности. Недостатком также является отсутствие необходимых кривых для расчета среднего ослабления в условиях города, например при расчете максимальной дальности для рации. В рекомендации ITU-R P.1546 изложена методика расчета напряженности поля, основанная на использовании кривых распространения радиоволн. Эта методика является более универсальной, хотя конечные результаты немного завышены.

### Выводы

Для оценки дальности составного акусто-радиоэлектронного канала утечки информации в работе получена зависимость между отношением электромагнитный сигнал/шум и разборчивостью речи для оптимальных видов модуляции. Исходя из полученных результатов можно рекомендовать использовать предельное отношение электромагнитный сигнал/шум  $-25$  дБ, при котором обеспечивается словесная разборчивость 0.2.

Модель свободного пространства не подходит для расчета дальности действия радиозакладного устройства. Используя модели Окамура, Хата и ITU-R P.1546, можно получить более точные значения, поскольку в них учитываются дополнительные потери по трассе.

Данные выводы являются предварительными, оценочными, основаны только на результатах данных испытаний. Для получения более объективных заключений необходимы дополнительные более широкие исследования.

**Список литературы:** 1. Ананский Е.В. Средства и методы обнаружения радиозакладок : <http://sb.biz.ua/sredstva-i-metody-obnaruzheniya-radiozakladok-ananskij> 2. Железняк В. К. Защита информации от утечки по техническим каналам : учеб. пособие. – Спб., 2006. – 75с. 3. Прохождение сигнала и шума через тракт РПУ : <http://1604.ucoz.com/UPOS/Glava10.pdf> 4. Трушин В.А., Рева И.Л., Иванов А.В. О методических погрешностях оценки словесной разборчивости речи в задачах защиты информации. [http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2012\\_03\\_02/pdf/238trushin.pdf](http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2012_03_02/pdf/238trushin.pdf) 5. Бакеев Д.А. Радиотехнические системы передачи информации. Системы связи. Оценка технической эффективности ра-

диотехнических систем передачи информации и систем связи : учеб. пособие. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2006. – 40с. 6. *Немировский М.С.* Помехоустойчивость радиосвязи. – М. ; Л. : Энергия, 1966. – 231с. 7. *Хорев А.А.* Оценка возможностей средств акустической (речевой) разведки // Специальная техника. – 2009. – №4. – С. 49-63. 8. *Сектор радиосвязи МСЭ-R.* Рекомендация МСЭ-R P.1546-4 (10/2009). Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 до 3000 МГц. Серия Р. Распространение радиоволн. ITU 2010. – 33с. 9. *Лихограй В.Г., Крючкова Л.П.* Производительность и помехозащищенность радиоканалов систем абоненского радиодоступа : учеб. пособие ; под. ред. проф. *В.М. Шокало*, проф. *В.А. Хорошко*. – Харьков : КП «Городская типография», 2011. – 165с. 10. *Хорев А.А., Макаров Ю.К.* Методы защиты речевой информации и оценки их эффективности : <http://www.analitika.info/info1.php?page=1&full=block article128>

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 15.02.2013*