

М.К. АБДУЛ-ХУССЕЙН, А.А. СТРЕЛЬНИЦКИЙ, канд. техн. наук,
А.Е. СТРЕЛЬНИЦКИЙ, канд. техн. наук, В.М. ШОКАЛО, д-р. техн. наук, Е.В. ЯГУДИНА

МЕТОД РАСЧЕТА РАДИОКАНАЛА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТЬЮ ОБНАРУЖЕНИЯ

Введение

Одним из основных показателей качества работы цифровых систем передачи информации (ЦСПИ) является вероятность обнаружения их сигналов с помощью отводного канала $P_{об}$. В работах [1, 2] приведены зависимости $P_{об}$ от соотношений сигнал/шум (S/N) в легитимном и отводном каналах, а также от секретной скорости передачи информации R_s , при которой работа ЦСПИ еще не обнаруживается.

На практике часто требуется знать область пространства (зону обнаружения), в пределах которой $P_{об} \geq 0,7$, что соответствует отсутствию условий безопасной работы канала связи.

Цель работы – изложение предложенного авторами метода расчета зоны обнаружения радиоканала ЦСПИ с вероятностью $P_{об}$ не меньше заданной величины.

Идея метода. Основные приближения

В статье [1] приведена зависимость для расчета величины $P_{об}$:

$$P_{об} = 1 - \frac{(S/N)_л}{(S/N)_л + 2^{R_s} \cdot (S/N)_о} \cdot e^{\left[\frac{2^{R_s} - 1}{(S/N)_о} \right]}, \quad (1)$$

где $(S/N)_л$ и $(S/N)_о$ – отношение сигнал/шум в легитимном и отводном каналах соответственно, R_s – скорость передачи информации при которой ЦСПИ считается секретной (не обнаруживается).

Представим соотношения сигнал/шум в следующем виде:

$$(S/N)_л = \frac{S(r_л, \theta_1, \theta_2)}{N(r_л, \theta_2)}, \quad (2)$$

$$(S/N)_о = \frac{S(r_o, \theta_1, \theta_3)}{N(r_o, \theta_3)}, \quad (3)$$

где $r_л, r_o$ – расстояние от антенны передатчика до антенн приемников легитимного и отводного каналов соответственно, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – углы направления максимумов угловой интенсивности напряженности поля (УЗИП) передающей антенны $F_n(r_л, \theta_1)$ и приемных антенн легитимного $F_л(r_л, \theta_2)$ и отводного $F_o(r_o, \theta_3)$ каналов в местной системе координат.

Тогда выражения (2) и (3) можно записать так:

$$\frac{S(r_л, \theta_1, \theta_2)}{N(r_л, \theta_2)} = \frac{S(r_s)}{N(r_s)} \cdot \alpha\left(\frac{r_n}{r_л}\right) \cdot F_n^2(r_л, \theta_1) \cdot F_л^2(r_л, \theta_2), \quad (4)$$

$$\frac{S(r_o, \theta_1, \theta_3)}{N(r_o, \theta_3)} = \frac{S(r_s)}{N(r_s)} \cdot \alpha\left(\frac{r_n}{r_o}\right) \cdot F_n^2(r_o, \theta_1) \cdot F_o^2(r_o, \theta_3), \quad (5)$$

где $S(r_s)/N(r_s)$ – экспериментально измеренное на эталонном расстоянии r_s [3] соотношение сигнал/шум в максимуме интенсивности излучения; $\alpha(r_n/r_л), \alpha(r_n/r_o)$ – функциональные зависимости затухания сигнала в легитимном и отводном каналах: через r_n в выражениях (4),

(5) обозначено расстояние r_s если $r < r_0$, или r_0 если $r_0 \leq r \leq r_n$ и $r_n = r_n$ если $r \geq r_n$; r_0 – расстояние до дальней границы ближней зоны ($r_0 \approx 10L$, $L = 2h$, h – высота антенны над отражающей поверхностью); r_n – расстояние, с которого начинает выполняться формула Введенского.

Выражения (4), (5) записаны с учетом упрощающего предположения, что при всех значениях r и θ_2 , θ_3 шумовая температура антенн не изменяется и примерно равна $290^\circ K$, т.е.

$$N(r_i, \theta_i) \approx N(r_s) \approx const. \quad (6)$$

Известно, что при изменении расстояния r в пределах ближней зоны и зоны Френеля изменяются и угловые зависимости интенсивностей полей (УЗИП) $F_s^2(r_s, \theta_2)$, $F_n^2(r_n, \theta_3)$. Это обстоятельство существенно усложняет процесс определения отношения S/N . Для его упрощения предлагается применить еще одно приближение, суть которого состоит в том, что в пределах каждой из зон излучения угловые зависимости интенсивностей принимаются постоянными. Т.е. при изменении r от начала ближней r_0 до конца дальней r_n зон используются всего три функциональные зависимости интенсивностей $F_{s,n}^2 = (r_3, \theta_{2,3})$, где r_3 – усредненное расстояние зоны распространения радиоволн:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{при } r < r_0 & r_3 = r_0 / 2 = 5L; \\ \text{при } r_0 < r < r_n & r_3 = 0,5(r_n - r_0) = L(L/\lambda - 5); \\ \text{при } r \geq r_n & r_3 = r_n = 2L^2/\lambda. \end{array} \right\} \quad (7)$$

Введенное приближение (7) позволяет значительно упростить выражения (4), (5). Одно из них, например, для случая легитимного канала запишется так:

$$\frac{S(r, \theta_1, \theta_2)}{N(r_s)} = (S(r_s)/N(r_s)) \cdot \alpha(r_n/r_s) \cdot F_n^2(r_3, \theta_1) \cdot F_s^2(r_3, \theta_2). \quad (8)$$

С учетом сделанных приближений окончательное выражение для расчета вероятности обнаружения принимает такой вид:

$$P_{об} = 1 - \left(\exp \left[- \frac{2^{R_s} - 1}{(S/N)_{s,1}} \right] / \left(1 + 2^{R_s} \cdot \frac{\alpha_n}{\alpha_s} \cdot \frac{F_n^2(r_n, \theta_3)}{F_s^2(r_s, \theta_2)} \right) \right). \quad (9)$$

Применяя выражение (9), можно построить зону обнаружения ЦСПИ, воспользовавшись понятием кривых постоянной вероятности обнаружения $P_{об}(r, \theta) = const$. Они ограничивают двумерное пространство на плоскости (r, θ) , внутри и на границе которого $P_{об}(r, \theta) \geq 0,7$. Строятся кривые постоянной вероятности обнаружения таким образом. Вначале по формуле (9) рассчитываются кривые $P_{об} = f(r)$ при различных углах θ_2 . Рассчитанные кривые аппроксимируются полиномами, которые приравняются к заданному значению $P_{об} = 0,7$. Для каждого из этих уравнений находятся корни $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$. Кривая, проходящая через точки $(r_1, \theta_{21}), (r_2, \theta_{22}), \dots, (r_n, \theta_{2n})$, и является кривой постоянной вероятности обнаружения.

Результаты экспериментов и расчетов

Вначале были проведены экспериментальные исследования, направленные на изучение возможности применения приближения (6) при определении величины $P_{об}$. Для этого предполагалось, что антенны радиоканала направлены друг на друга так, что достигаются макси-

мальные интенсивности приема и передачи, т.е. в случае легитимного канала $F_{\Pi}^2(r_3, \theta_1) = 1$ и $F_{\Pi}^2(r_3, \theta_2) = 1$. Тогда (8) запишется в виде

$$\frac{S(r)}{N(r_3)} = \frac{S(r_3)}{N(r_3)} \cdot \alpha \left(\frac{r_{\Pi}}{r_3} \right). \quad (10)$$

На рис. 1 изображены зависимости S/N от расстояния, измеренные на открытой местности и рассчитанные по соотношению (10).

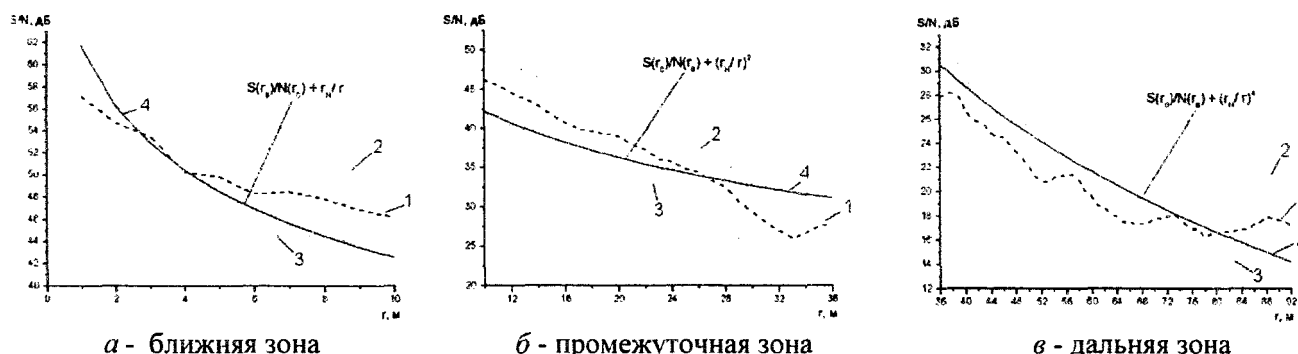


Рис. 1

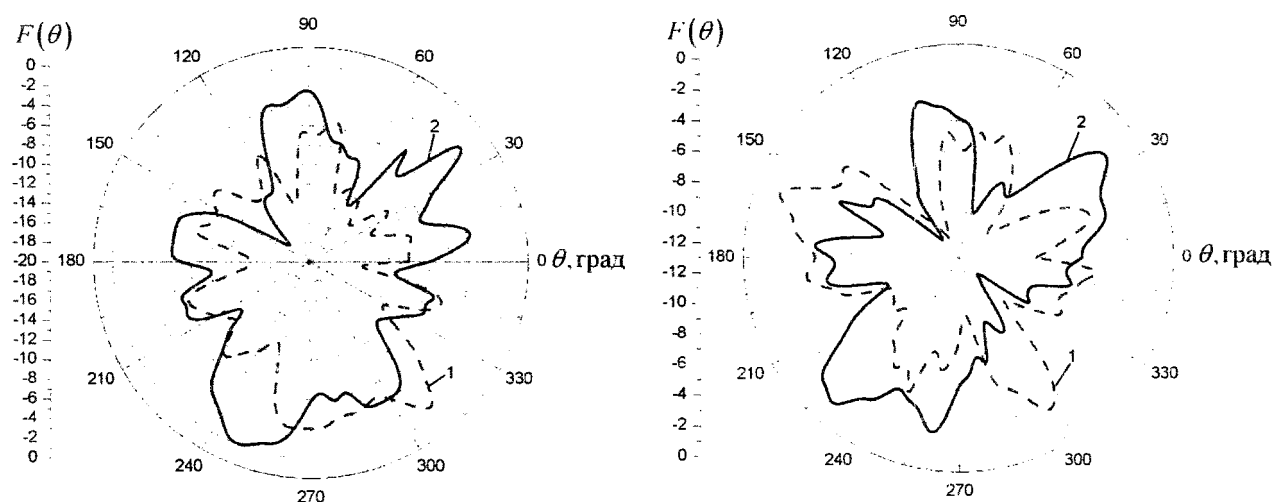
Измерения уровня сигнал/шум проводилось для радиолинии, состоящей из двух клиентских адаптеров ЦСПИ с протоколом *IEEE 802.11b*. Кривые 1 на рис. 1 – это среднее значение измеренной величины S/N ; кривые 2, 3 ограничивают верхний и нижний доверительный интервал при вероятности 0,95 (обработка результатов опытов велась по данным десяти измерений с помощью распределения Стюдента); кривые 4 – расчетные по предложенной в [4] модели. Наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных кривых. Таким образом, возможность применения условия (6) при расчете отношения S/N в локальных ЦСПИ доказана.

Дальнейшие исследования состояли в экспериментальном определении УЗИП точек доступа и терминалов ЦСПИ. Значение УЗИП входят в выражение (9), однако определены они могут быть только экспериментально. Покажем это на примере УЗИП оборудования *Wi-Fi* радиоканала.

Измерения проводились в ближней зоне на частоте 2,45 ГГц и на расстоянии 5 м между точкой передачи и точкой приема. Приемное устройство располагалось на поворотном столе, проградуированном по углу, а передатчик был неподвижным. Опыты выполнялись в помещении антенной лаборатории. При этом ставилась задача выявить (качественно) степень неравномерности угловой зависимости интенсивности поля, т.е. и возможность произвольного расположения терминалов при организации радиосети. Исследовались точки доступа типа *D-Link DWL-900 AP+*, радиокарты типа *Orinoco PC CART(5B)*, ноутбук со встроенной антенной *ASUS M 50SV* и коммуникатор типа *Sony-Ericsson P990 I*.

Результаты измерений занесены в таблицу и показаны на рис. 2.

Тип оборудования	Количество лепестков УЗИП	Неравномерность УЗИП, дБ	Абсолютный уровень сигнала, дБ
Точка доступа	7	-18	-40
Ноутбук <i>ASUS</i>	8	-16	-42
Радиокарта	5	-12	-50
Коммуникатор	5	-12	-54



а - 1 – ноутбук ASUS, 2 – точка доступа

б - 1 – коммуникатор, 2 – радиокарта

Рис. 2

В результате измерений можно сделать следующие выводы: все измеренные УЗИП сильно отличаются от всенаправленных; УЗИП точки доступа и ноутбука похожи по строению, имеют почти равное количество лепестков и «провалов»; ноутбук обеспечивает большую чувствительность по сравнению с коммуникатором и радиокартой.

Проведенные эксперименты подтверждают, что УЗИП оборудования *Wi-Fi* канала имеют сложную конфигурацию и теоретически рассчитаны быть не могут.

Полученные экспериментальные результаты были использованы при оценке вероятности обнаружения легитимного *Wi-Fi* канала, образованного точкой доступа (ТД) *D-Link DWL-900 AP+* и ноутбуком *ASUS M 50SV*, с помощью отводного канала, образованного ТД и коммуникатором *Sony-Ericsson P990 I*. При расчетах принималось, что максимумы УЗИП ТД и ноутбука, а также ТД и коммуникатора направлены друг на друга; другие данные были выбраны следующими: $(S/N)_t = 20$ дБ, $R_s = 2$ бит/с, $r_t = 12$ м.

Результаты расчетов по предложенному методу зоны обнаружения *Wi-Fi* канала представлены на рис. 3.

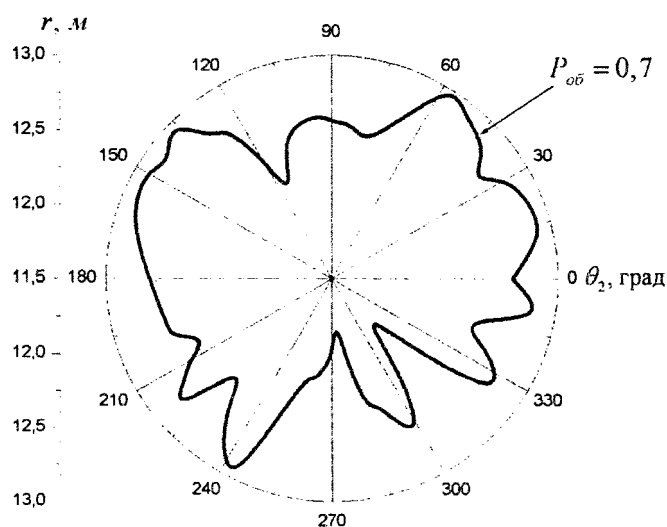


Рис. 3

В силу неравномерности УЗИП граница зоны обнаружения имеет сложную конфигурацию. В среднем же *Wi-Fi* канал с вероятностью $P_{об} = 0,7$ может быть обнаружен при удале-

нии приемника отводного канала на расстояние $r_{o,cr} = 12$ м. При этом минимальное и максимальное расстояние r_o составляет величины 11,7 и 12,8 м соответственно.

Для расчета зоны обнаружения по предложенному выше методу тратится значительное время. Поэтому немаловажным является вопрос о снижении вычислительных затрат при оценке величины $P_{об}$. В рассматриваемом примере (рис. 3) неравномерность границы зоны обнаружения колеблется всего в пределах $\sim 1,1$ м. Это обстоятельство дает право предложить более простую методику расчетов. На заданном удалении r_d и при $r_o = const$ строятся кривые $P_{об}(\theta_2)$ (рис. 4). Затем зона обнаружения определяется приближенно по критерию $P_{об} \geq 0,7$. Как видно из рис. 4, этот критерий выполняется при $r_o \approx 12$ м, что соответствует ранее полученному результату, изображенному на рис. 3.

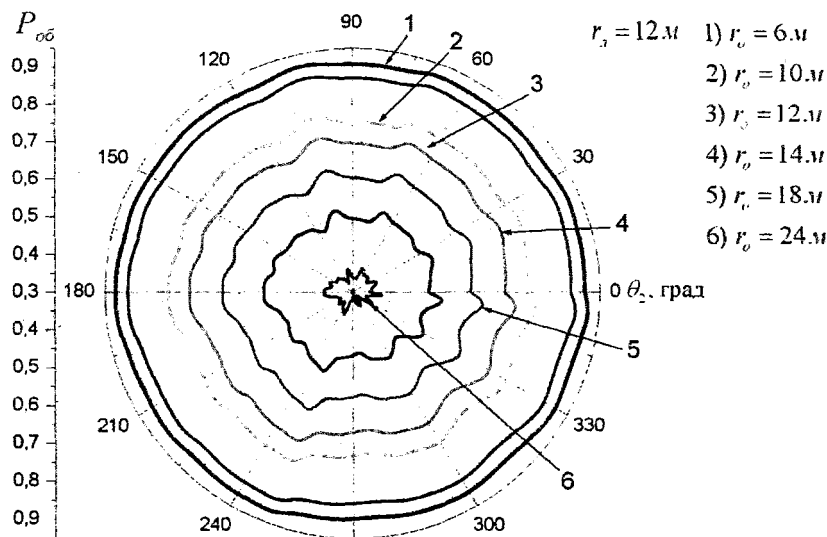


Рис. 4

Выводы

1. Предложен метод расчета радиоканала ЦСПИ с заданной вероятностью обнаружения, основанный на построении зоны обнаружения по критерию $P_{об} \geq 0,7$.
2. Показано, что при расчетах возникает необходимость использовать экспериментальные УЗИП.
3. Выяснено, что при слабой неравномерности границы зоны обнаружения расчеты можно упростить, не прибегая к поиску корней уравнений $P_{об} = f(r)$ при $\theta_{2i} = const$, а построив семейство кривых $P_{об}(\theta_2)$ при различных значениях r_o .

Список литературы: 1. Barros J., Rodrigues M.R.D. Secrecy capacity of wireless channels // In: 2006 IEEE International Symposium on Information Theory // IEEE Press, New York. – P. 356–360. 2. Chrysikos T., Dagiuklas T., Kotsopoulos S. A Closed-Form Expression for Outage Secrecy Capacity in Wireless Information-Theoretic Security // Proceedings of Security in Emerging Wireless Communication and Networking Systems (SEWCN'09). – Springer, 2010. – Vol. 42 of Lecture Notes in Computer Science. – P 3–12. 3. Склар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд. : пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2003. – С. 1104. 4. Shokalo V.M., Strelitskiy O.O., Tsopa O.I. Approximate Model for Estimation of Efficiency and Noise Immunity of Branched Street and Corridor Wi-Fi and WiMAX Communication Channels // International journal «Telecommunication and Radio Engineering». – Begell House, 2009. – Vol. 68(17). – P. 1511–1528.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 25.02.2011