

9. Ивахненко А. Г. Принятие решений на основе самоорганизации / Ивахненко А. Г., Зайченко Ю. П., Димитров В. Д. – М. : Советское радио, 1976. – 280 с.

Рецензент: Рибальський О. В.  
Надійшла 03.03.2011

УДК 621.391.7

Стрельницкий А. А., Стрельницкий А. Е., Цопа А. И.,  
Шокало В. М., Ягудина Е. В. (ХНУРЭ)

## ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ Wi-Fi РАДИОКАНАЛА С РАЗЛИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

### Введение

В настоящее время большое влияние уделяется обеспечению безопасности работы Wi-Fi радиоканалов. Степень безопасности их функционирования оценивается вероятностью обнаружения  $P_{об}$  с помощью приемника-обнаружителя злоумышленника [1]. В [2] показано, что величина  $P_{об}$  зависит от условий распространения радиоволн (РРВ). Однако при моделировании в [2] использовалась степенная модель РРВ не учитывающая специфики работы Wi-Fi радиоканалов.

Известно, что при создании разветвленных Wi-Fi сетей обычно используются три разновидности прямолинейных отрезков радиолиний: передача информации по открытому пространству между домами, внутри зданий (залы, широкие комнаты) и по волновым каналам коридоров [3]. Особенность локальных Wi-Fi сетей состоит в том, что передача информации производится не только в дальней, но и в ближней и промежуточной зонах излучения. Однако для двух последних случаев достоверные модели РРВ пока не созданы.

В настоящей работе излагаются варианты моделей РРВ, которые учитывают указанные особенности работы Wi-Fi сетей. Затем эти модели применены для численного анализа безопасности Wi-Fi радиоканала. В качестве критерия безопасной работы была принята величина  $P_{об} \leq 0,7$ .

### Варианты моделей расчета затуханий широкополосных сигналов в Wi-Fi радиоканалах

Ниже описываются результаты теоретических и экспериментальных исследований, доказывающих возможность применения приближенных моделей, основанных на отражательной трактовке, для прогнозирования затуханий широкополосных сигналов в любой зоне излучения многолучевых радиолиний, как для закрытого помещения так и для открытого пространства.

Для разработки модели радиолинии использовались, известные из отражательной трактовки, приближения: высоты приемной и передающей антенн таковы, что область существенная для распространения располагается над отражающей поверхностью, которая в пределах области существенной для отражения является гладкой и однородной; передающая антенна представляет собой систему ненаправленных излучателей, образованную собственно передающей антенной и ее зеркальным изображением; приемная ненаправленная антенна находится в ближней зоне передающей системы излучателей и в дальней зоне каждого из них. Последнее приближение позволяет рассмотреть ближнюю и промежуточную зоны излучения. Для построения модели использовался эскиз закрытого помещения, приведенный на рис. 1. При удалении стен и

потолка на бесконечность остается одна отражающая поверхность, что соответствует модели открытого пространства.

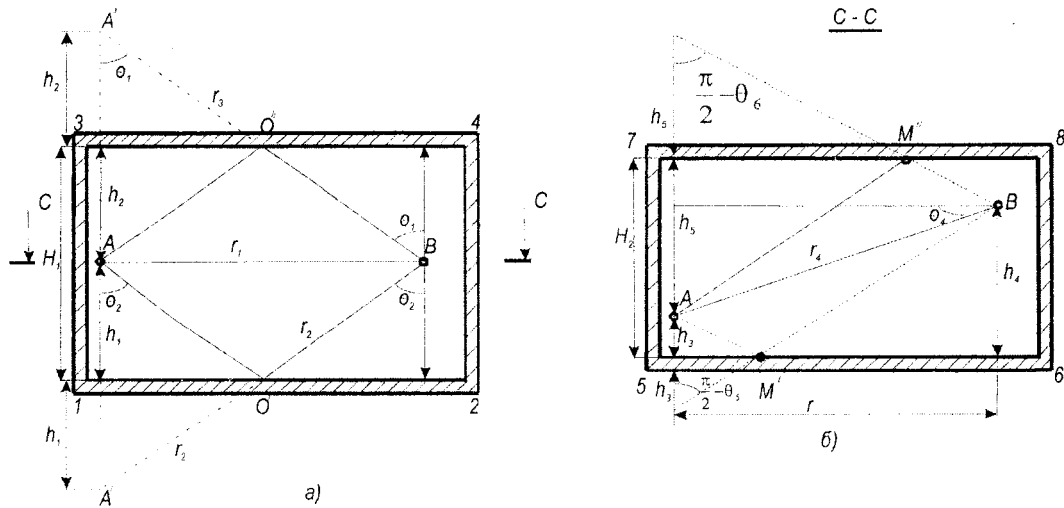


Рис. 1. Эскиз помещения

В случае открытого пространства при принятых приближениях можно получить следующее выражение для плотности потока мощности в точке приема  $B$  при горизонтальной поляризации ( $L = 2h_1$ ) и мощности излучения  $P_s$

$$\Pi = \frac{60P_s}{Z_c} \cdot I(r) = \frac{60P_s}{Z_c} \times \left\{ \frac{1 + \left(\frac{L}{r}\right)^2 + R_r^2 - 2R_r \sqrt{1 + \left(\frac{L}{r}\right)^2} \cos \left[ kr \left( 1 - \sqrt{1 + \left(\frac{L}{r}\right)^2} \right) \right]}{r^2 \left[ 1 + \left(\frac{L}{r}\right)^2 \right]} \right\}, \quad (1)$$

где  $Z_c, k$  – характеристическое сопротивление и волновое число свободного пространства,  $R_r$  – коэффициент отражения подстилающей поверхности при горизонтальной поляризации,  $I(r)$  – интерференционный множитель.

Экспериментально можно измерить только огибающую сигнала. Она получается из интерференционного множителя при  $\cos \left[ kr \left( 1 - \sqrt{1 + \left(\frac{L}{r}\right)^2} \right) \right] \approx 0$ .

$$1 + \left(\frac{L}{r}\right)^2 + R_r^2 / r^2 \left[ 1 + \left(\frac{L}{r}\right)^2 \right] = \alpha(r). \quad (2)$$

Подчеркнем, что мы не исследовали абсолютный уровень сигнала (ни расчетный, ни экспериментальный). Известно, что расчет абсолютного уровня сигнала в многолучевых радиолиниях любым методом является делом бесперспективным [4]. Выяснение же аналитической зависимости нормированного затухания  $\alpha\left(\frac{r_2}{r}\right)$  существенно облегчает

прогнозирование производительности цифровых систем передачи информации (ЦСПИ) ( $r_0$  – эталонное расстояние [5], которое для локальных ЦСПИ равно 1 м).

Нами предлагается следующая модель для расчета на открытом пространстве зависимостей нормированного затухания в радиолинии ЦСПИ:

а) вся трасса разбивается на три характерных участка  $r_0 \leq r \leq r_6$ ;  $r_6 \leq r \leq r_a$ ;  $r > r_a = 18 \frac{h^2}{\lambda}$  – характерное расстояние, начиная с которого справедлива формула Введенского  $r_6 = 10L$  – расстояние до границы ближней зоны;

$$\text{б) при } r_0 < r \leq r_6 \quad \alpha \left( \frac{r_0}{r} \right) = 10 \lg \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \cdot \frac{1 + \left( \frac{L}{r} \right)^2 + R_\Gamma^2}{1 + \left( \frac{L}{r} \right)^2}, \quad \text{дБ}; \quad (3)$$

$$\text{в) при } r_6 \leq r \leq r_a \quad \alpha \left( \frac{r_6}{r} \right) = 10 \lg \left( \frac{r_6}{r} \right)^2, \quad \text{дБ}; \quad (4)$$

$$\text{г) при } r > r_a \quad \alpha \left( \frac{r_a}{r} \right) = 10 \lg \left( \frac{r_a}{r} \right)^4, \quad \text{дБ}. \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) отличаются от известных из [5] тем, что нормирование ведется не относительно расстояния  $r_0$ , а расстояний  $r_6$  и  $r_a$ . Для расчета радиоканала абсолютный уровень сигнала или сигнал/шума должен быть измерен при расстоянии  $r_0$ .

Для случая закрытого помещения модель распространения радиоволн заметно усложняется. Если коэффициенты отражения от стен, потолка и пола известны, то плотность потока мощности  $\Pi$  результирующего поля в точке  $B$  при мощности излучения  $P_\Sigma$  и горизонтальной поляризации излучения определяется так ( $R_B$  – коэффициент отражения при вертикальной поляризации):

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{60P_\Sigma}{Z_C} \cdot I(r) = \frac{60P_\Sigma}{Z_C} & \left\{ \left[ \frac{\cos kr}{r} - \frac{R_\Gamma \cos kr_2}{r_2} - \frac{R_\Gamma \cos kr_3}{r_3} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\cos kr_4 \cos \theta_4}{r_4} + R_B \left( \frac{\cos kr_5 \cos \theta_5}{r_5} + \frac{\cos kr_6 \cos \theta_6}{r_6} \right) \right]^2 + \right. \\ & \left. + \left[ -\frac{\sin kr}{r} + \frac{R_\Gamma \sin kr_2}{r_2} + \frac{R_\Gamma \sin kr_3}{r_3} + \frac{\sin kr_4 \cos \theta_4}{r} + R_B \left( \frac{\sin kr_5 \cos \theta_5}{r_5} + \frac{\sin kr_6 \cos \theta_6}{r_6} \right) \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

где  $r_2 = \sqrt{r^2 + (2h_1)^2}$ ,  $r_3 = \sqrt{r^2 + (2h_2)^2}$ ,  $r_4 = \sqrt{r^2 + (h_4 - h_3)^2}$ ,  $r_5 = \sqrt{r^2 + (h_4 + h_3)^2}$ ,  $r_6 = \sqrt{r^2 + [(H_2 - h_4) + h_5]^2}$ .

Достоверность модели (2) определялась с помощью аппаратуры стандарта IEEE 802.11b, путем измерения экспериментально зависимости  $\alpha\left(\frac{r_2}{r}\right)$ . Из выражения (3) огибающая  $\alpha\left(\frac{r_2}{r}\right)$  для закрытого помещения определяется численным путем.

Справедливость предложенной численной модели РРВ для расчета затухания на радиолинии локальной ЦСПИ с учетом влияния многолучевости на открытой местности и в закрытом помещении подтверждается данными расчетов и экспериментов, приведенными на рис. 2, 3.

Исходные данные для расчета затухания: на открытой местности расчет проводился для стадиона размером 100 на 100 м, высота от подстилающей поверхности до передающей и приемной антенн радиоканала составила – 0,6 м; в помещении расчет проводился для коридора шириной 5 м, длиной 16 м и высотой 4 м, высота подвеса передающей и приемной антенн также составляла 0,6 м.

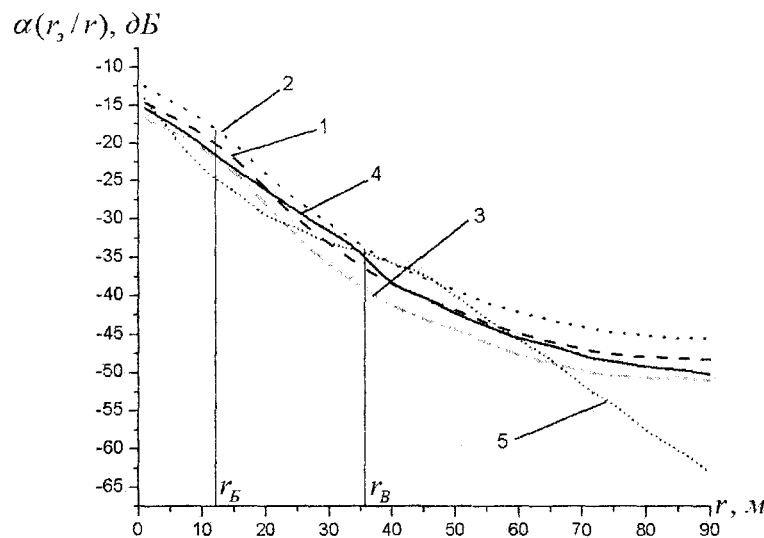


Рис. 2. Затухание сигнала на открытой местности

Измерения уровня сигнала проводились для радиолинии состоящей из двух клиентских адаптеров системы абонентского радиодоступа с протоколом IEEE 802.11b.

Кривые 1 на рисунках – это средние значения измеренной величины сигнала; кривые 2, 3 ограничивают верхний и нижний доверительный интервал при вероятности 0,95 (обработка результатов опытов велась по данным десяти измерений с помощью распределения Стьюдента); кривые 4 – расчетные по предложенной модели; кривые 5 – расчетные по модели COST 231 Хата [6].

Из обобщения представленных данных следует, что разработанная модель РРВ дает хорошее совпадение с результатами эксперимента и может быть применена на практике для расчета радиолиний локальных ЦСПИ с широкополосными сигналами во всех трех зонах излучения как в случае закрытого помещения, так и вне его.

Сравнивая кривые 1, 4, 5 на рис. 2, 3 нетрудно заключить, что предложенная модель заметно выигрывает в точности получаемых результатов, по сравнению с известной моделью Хата COST 231. Этот выигрыш, на наш взгляд, обусловлен тем, что эмпирические зависимости РРВ были получены Окамура-Хата в 70-80г. XX века. Тогда господствовала аналоговая связь и специфика ЦСПИ с широкополосными сигналами не нашла отражение в эмпирических соотношениях.

Таким образом доказана гипотеза о возможности использования приближенной модели, основанной на отражательной трактовке, для расчета затуханий широкополосных сигналов в многолучевых радиопомещениях локальных ЦСПИ с технологией Wi-Fi.

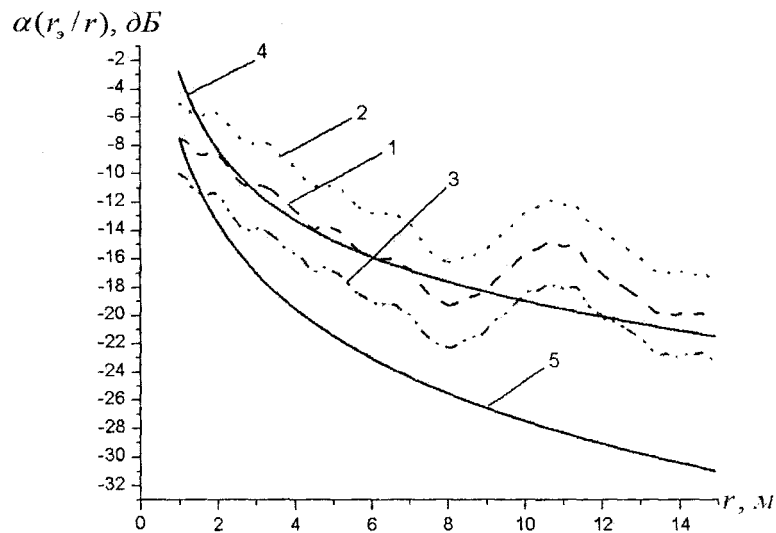


Рис. 3. Затухание сигнала в помещении

#### Численные исследования вероятности обнаружения

Для прогнозирования защищенности радиоканалов широко используется концепция отводного канала [7], с помощью которого и обнаруживаются сигналы ЦСПИ. В [2] приведена следующая формула расчета  $P_{об}$ :

$$P_{об} = 1 - \frac{(S/N)_л}{(S/N)_л + 2^{R_s} \cdot (S/N)_о} \cdot e^{\left[ \frac{2^{R_s} - 1}{(S/N)_л} \right]}, \quad (7)$$

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:

$$(S/N)_л = \frac{S(r_л, \theta_1, \theta_2)}{N(r_л, \theta_2)}, \quad (8)$$

$$(S/N)_о = \frac{S(r_о, \theta_1, \theta_3)}{N(r_о, \theta_3)}, \quad (9)$$

где  $r_л, r_о$  – 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 передающей антенны  $F_{II}(r_л, \theta_1)$  и приемных антенн легитимного  $F_I(r_л, \theta_2)$  и отводного  $F_o(r_о, \theta_3)$  каналов.

Тогда выражения (8) и (9) можно записать так:

$$\frac{S(r_n, \theta_1, \theta_2)}{N(r_n, \theta_2)} = \frac{S(r_o)}{N(r_o)} \cdot \alpha \left( \frac{r_o}{r_n} \right) \cdot F_{II}^2(r_n, \theta_1) \cdot F_n^2(r_n, \theta_2), \quad (10)$$

$$\frac{S(r_o, \theta_1, \theta_3)}{N(r_o, \theta_3)} = \frac{S(r_o)}{N(r_o)} \cdot \alpha \left( \frac{r_o}{r_n} \right) \cdot F_{II}^2(r_o, \theta_1) \cdot F_o^2(r_o, \theta_3). \quad (11)$$

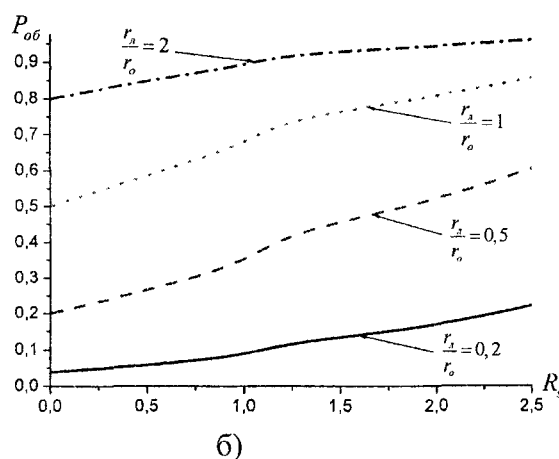
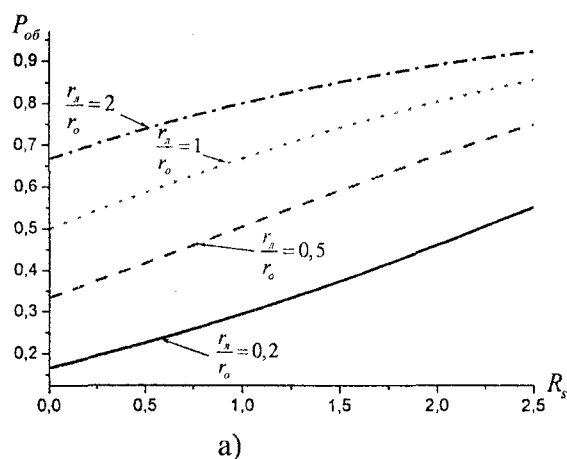
Далее предположим, что при любых расстояниях  $r_n, r_o$  интенсивности  $F_{II}(r_n, \theta_1), F_n(r_n, \theta_2), F_o(r_o, \theta_3)$  не зависят от угловых координат. Тогда выражение (7) преобразуется к следующему виду

$$P_{об} = 1 - \frac{\exp \left[ \frac{2^{R_s} - 1}{(S/N)_n} \right]}{1 + 2^{R_s} \cdot \frac{\alpha_o}{\alpha_n}}. \quad (12)$$

Формула (12) позволяет исследовать зависимость величины  $P_{об}$  от значений  $\alpha_o$  и  $\alpha_n$ , т.е. и от условий РРВ в легитимном и отводном каналах. С ее помощью были проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 4. Здесь показаны зависимости  $P_{об}(R_s)$  при  $(S/N)_n = 20 \text{ дБ}$  и различных значениях  $r_n/r_o$  для открытого пространства (рис. 4, а – ближняя зона, рис. 4, б – промежуточная зона, рис. 4, в – дальняя зона) и помещения (рис. 4, г).

Из приведенных данных следует, что в случае открытого пространства при размещении приемника легитимного канала сначала в ближней зоне передающей антенны, а затем в промежуточной и дальней зонах, вероятность обнаружений растет при  $r_n < r_o$ . Т.е. в ближней зоне условия обнаружения легитимного Wi-Fi канала более благоприятны.

В помещении условия обнаружения ухудшаются и критерий  $P_{об} > 0,7$  реализуется при больших значениях  $r_n/r_o$ , чем в дальней зоне, при одних и тех же величинах  $R_s$ .



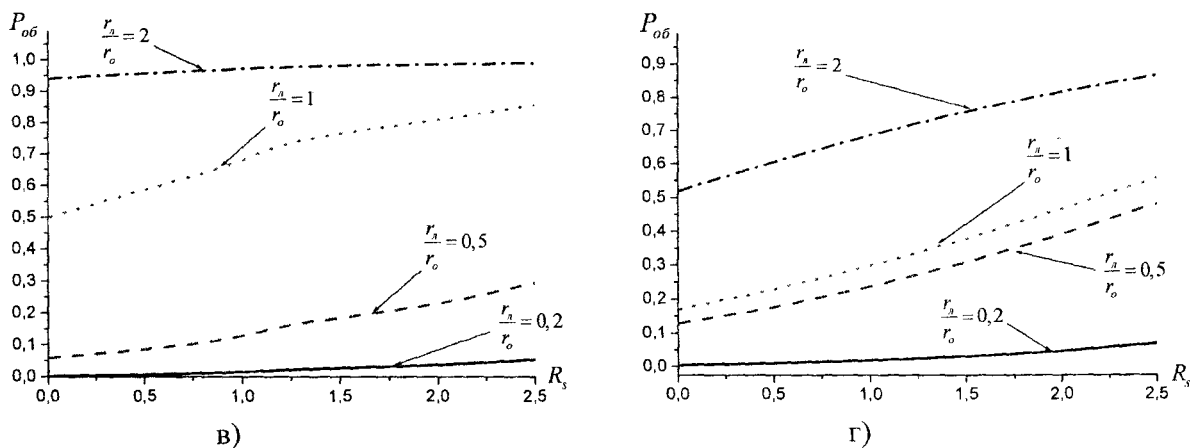


Рис. 4. Зависимости  $P_{об}(R_s)$  для разных условий PPB

Полученные результаты обусловлены ходом кривых затухания (см. рис. 2, 3). Крутизна спада кривых  $\alpha\left(\frac{r_2}{r}\right)$  растет при переходе от ближней зоны к дальней на открытом пространстве, а далее в помещении. Таким образом, чем дальше находится приемник-обнаружитель от передатчика по сравнению с легитимным приемником, тем при равных значениях  $r_n/r_o$  и  $R_s$  в ближней зоне открытого пространства соотношение  $\alpha_o/\alpha_n$  будет больше, чем в дальней зоне, а значит и величина  $P_{об}$  будет больше.

#### Выводы

Из приведенных результатов следует, что различия в условиях PPB существенно влияют на величину  $P_{об}$ . Полученные данные являются новыми и позволяют определить условия при которых  $P_{об} < 0,7$ , что соответствует критерию безопасной работы Wi-Fi радиоканала.

#### 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. – pp. 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. – pp. 3–12.
3. 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). – pp. 1511–1528.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – С. 1104.
5. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие. – М.: Изд-во «Наука», 1973. – С. 607.
6. EURO-COST 231TD (91)73. Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800 MHz bands. – The Hague, September, 1991.
7. Wyner A.D. The wire-tap channel // Bell System Technical Journal. – 1975. – Vol. 54 – № 8. – pp. 1355–1367.

Рецензент: Ленков С.В.  
Надійшла 23.03.2011