

©2011 г. А.А. Стрельницкий, В.М. Шокало, Е.В. Ягудина,
М.К. Абдул-Хуссейн, В.А. Назаренко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ Wi-Fi РАДИОКАНАЛА

Изложен метод расчета вероятности обнаружения цифровой системы передачи информации, учитывающий влияние на ее величину условий распространения радиоволн в *Wi-Fi* радиоканалах (открытое пространство и помещение) при их функционировании в зонах Релея, Френеля и Фраунгофера. С помощью полученных соотношений проведены расчеты, результаты которых сопоставлены с данными натурных экспериментов.

Ключевые слова: вероятность обнаружения, радиоканал, условия распространения радиоволн.

Запропоновано метод розрахунку імовірності виявлення цифрової системи передачі інформації, що враховує вплив на її величину умов поширення радіохвиль у *Wi-Fi* радіоканалах (відкритий простір та приміщення) при їх функціонуванні в зонах Релея, Френеля і Фраунгофера. За допомогою отриманих співвідношень проведені розрахунки, результати яких зіставлені з даними натурних експериментів.

Ключові слова: імовірність виявлення, радіоканал, умови поширення радіохвиль.

This article sets out the method of calculating the probability of detecting a digital information transmission system, taking into account the impact on its value propagation conditions in *Wi-Fi* radio channels (open space and room) for their functioning in the areas of Raleigh, Fresnel and Fraunhofer. Using these ratios were calculated, the results are compared with data from field experiments.

Keywords: probability of detection, radio channel, radio conditions.

Одним из критериев определения скрытности работы беспроводных легитимных каналов связи является величина вероятности обнаружения $P_{об} \leq 0,7$ [1]. Исходя из понятия отводного канала (канала утечки информации) в работе [1] введено такое соотношение для определения величины $P_{об}$:

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

где $(S/N)_л$ и $(S/N)_о$ – соотношение сигнал/шум в легитимном и отводном каналах; R_s – секретная скорость, при которой легитимный канал считается скрытным.

В работе [2] получена такая разновидность выражения (1):

$$P_{об} = 1 - \frac{1}{1 + 2^R \cdot (r_л / r_о)^n} \cdot e^{-\frac{2^{R_s}-1}{(S/N)_л}}, \quad (2)$$

где $r_л$, $r_о$ – расстояние от передатчика до приемников легитимного и отводного каналов, n – показатель степени, отражающий, согласно [3], те или иные условия распространения радиоволн (РРВ).

Формула (2) позволяет исследовать зависимость величины $P_{об}$ от условий РРВ, придавая различные значения показателю n . Однако выражение (2) справедливо, как известно из [3], только для дальней зоны излучения. Особенность же работы *Wi-Fi* радиоканалов состоит в том, что они функционируют как в ближней, так и в промежуточной зонах.

Цель данной статьи состоит в составлении модели для определения $P_{об}$ в зонах Релея, Френеля и Фраунгофера, а также проведении численных и натурных экспериментов для доказательства достоверности разработанной модели.

Модель для расчета вероятности обнаружения

Представим в формуле (1) соотношения сигнал/шум в следующем виде:

$$(S/N)_л = \frac{S(r_л, \theta_1, \theta_2)}{N(r_л, \theta_2)}, \quad (3)$$

$$(S/N)_о = \frac{S(r_о, \theta_1, \theta_3)}{N(r_о, \theta_3)}, \quad (4)$$

где $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – углы направления максимум угловой интенсивности напряженности поля передающей антенны $F_{\Pi}(r_л, \theta_1)$ и приемных антенн легитимного $F_{л}(r_л, \theta_2)$ и отводного $F_о(r_л, \theta_3)$ каналов.

Тогда выражения (3) и (4) можно записать так:

$$(S/N)_л = \frac{S(r_э)}{N(r_э)} \alpha \left(\frac{r_э}{r_л} \right) F_{\Pi}^2(r_л, \theta_1) F_{л}^2(r_л, \theta_2),$$

$$(S/N)_о = \frac{S(r_э)}{N(r_э)} \alpha \left(\frac{r_э}{r_о} \right) F_{\Pi}^2(r_о, \theta_1) F_о^2(r_о, \theta_3),$$

где α – затухание в легитимном и отводном каналах, $r_э$ – эталонное расстояние [3].

Далее предположим, что при любых расстояниях $r_л$ и $r_о$ интенсивности $F_{\Pi}(r_л, \theta_1)$, $F_{л}(r_л, \theta_2)$, $F_о(r_л, \theta_3)$ не зависят от угловых координат. Тогда выражение (1) преобразуется к следующему виду

$$P_{об} = 1 - \frac{\exp\left\{-\left(2^{R_s} - 1\right) / (S/N)_л\right\}}{1 + 2^{R_s} \cdot \alpha_о / \alpha_л}. \quad (5)$$

Формула (5) позволяет исследовать зависимость величины $P_{об}$ от значений $\alpha_о$ и $\alpha_л$, т.е. и от условий РРВ в легитимном и отводном каналах.

Расчет величин $\alpha_о$ и $\alpha_л$ для различных условий РРВ может быть проведен по моделям, описанным в [4].

Результаты расчетов по формуле (5) приведены на рис.1. Кривые 1-3 соответствуют условиям РРВ на открытом пространстве (1 – в дальней, 2 – в промежуточной, 3 – в ближней зоне, кривая 4 – в помещении). Из приведенных результатов следует, что различия в условиях РРВ существенно влияют на величину $P_{об}$.

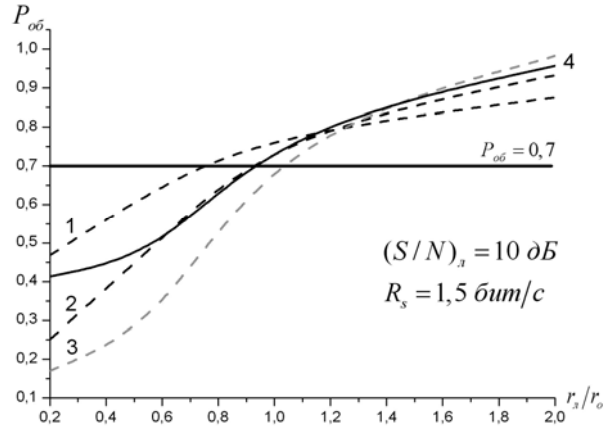


Рис. 1. Результаты численных исследований $P_{об}$.

Полученные данные являются новыми и позволяют определить условия, при которых $P_{об} \leq 0,7$, что соответствует критерию уверенного обнаружения сигналов ЦСПИ.

Экспериментальные исследования вероятности обнаружения

Экспериментальные исследования проводились с целью доказательства достоверности разработанной модели анализа вероятности обнаружения. Сравнивались расчетные значения $P_{об}$ и измеренные. Экспериментальные величины $P_{об}$ были получены на основании измерений уровней затуханий $\alpha_л$ и $\alpha_о$ в легитимном и отводном каналах.

Для измерения величин $\alpha_л$ и $\alpha_о$ использовалось следующее оборудование *Wi-Fi*: точка доступа (ТД) типа *D-Link DWL-3200 AP*, ноутбук *ASUS A2500* с внешней радиокартой *ORINOCO PC24E-H-ET*, нетбук *Lenovo ThinkPad x100e*, с поддержкой протокола *IEEE 802.11n*. В качестве программного обеспечения применялась утилита *Xirius Wi-Fi Inspector*, предоставляющая информацию об уровнях сигналов.

В одних и тех же условиях измерения проводились десять раз с последующей обработкой (определение среднего значения и доверительных интервалов). Для обработки полученных данных использовалось распределение Стьюдента при доверительной вероятности $P=0,95$ (случай малого количества измерений при неизвестной точности [5]). Вначале определялся эмпирический стандарт по формуле

$$S_{\Xi} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

где n – количество измерений величины a , ее разовое измерение x_i , \bar{x} – среднее арифметическое значение. При этом доверительная оценка такова

$$|a - \bar{x}| < t(P; k) \cdot \frac{S_{\Xi}}{\sqrt{n}}, \quad k = n - 1.$$

Значение параметра $t(P; k)$ определялось из таблиц [5] по числу измерений и величине P .

Первоначально опыты выполнялись в лаборатории. Эскиз помещения, в котором проводились эксперименты по измерению вероятности обнаружения канала связи, представлен на рис.2.

На рис.2: ТД – точка доступа, ЛК – ноутбук легитимного канала связи, ОК – ноутбук отводного канала связи.

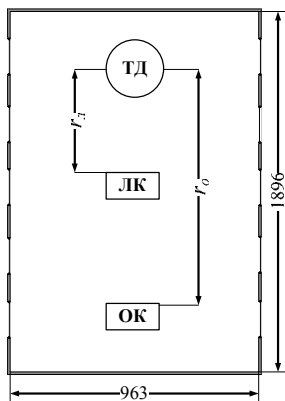


Рис. 2. Эскиз помещения и расположение технических средств.

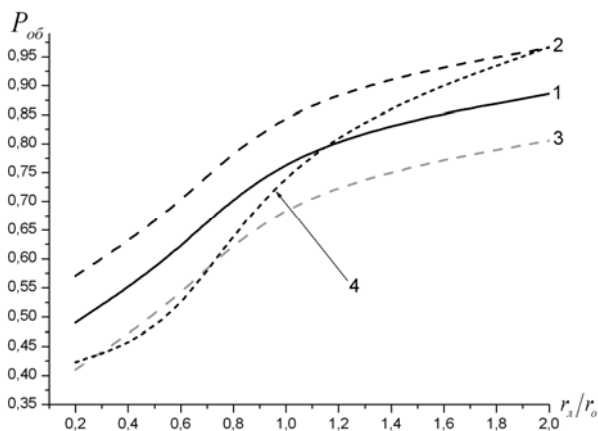


Рис. 3. Результаты измерения величины $P_{об}$ в помещении (1 – измеренная кривая, 2, 3 – доверительный интервал, 4 – теоретическая кривая).

Результаты измерений и расчетов кривых $P_{об}(r_L/r_0)$ для случая помещения приведены на рис.3. Измерения проводились при $r_L=6$ м и $(S/N)_L=32$ дБ.

Аналогичные измерения были проведены на открытом пространстве. Опыты выполнялись на футбольном поле (см. рис. 4) университета.

Данные измерений при $(S/N)_L=43$ дБ в дальней, промежуточной и ближней зонах приведены на рис. 5-7 (номера для обозначения кривых на всех графиках одинаковы и указаны на рис.5). Здесь же изображены кривые, рассчитанные по формуле (5) с учетом того, что в различных зонах используются различные модели затухания.

Анализируя представленные результаты можно заключить следующее. Теоретические кривые, в основном, находятся в границах кривых доверительных интервалов.

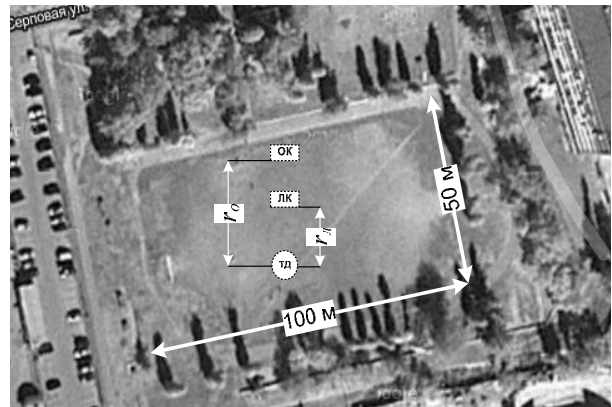


Рис. 4. Снимок стадиона (вид сверху) и расположение технических средств.

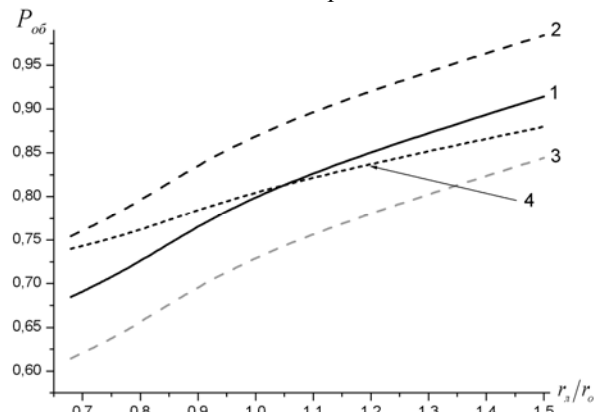


Рис. 5. Результаты измерения величины $P_{об}$ на открытом пространстве в дальней зоне (1 – измеренная кривая, 2, 3 – доверительный интервал, 4 – теоретическая кривая).

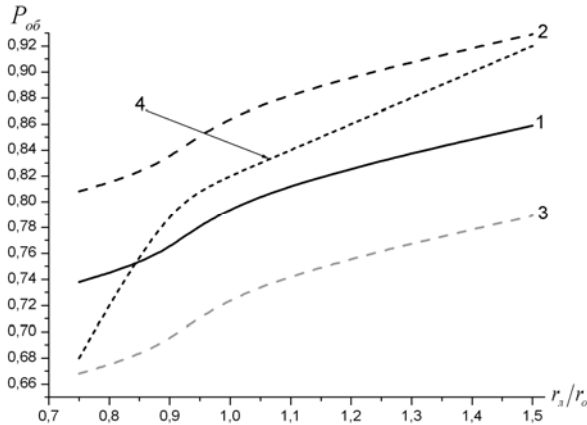


Рис. 6. Результаты измерения величины $P_{об}$ на открытом пространстве в промежуточной зоне (1 – измеренная кривая, 2, 3 – доверительный интервал, 4 – теоретическая кривая).

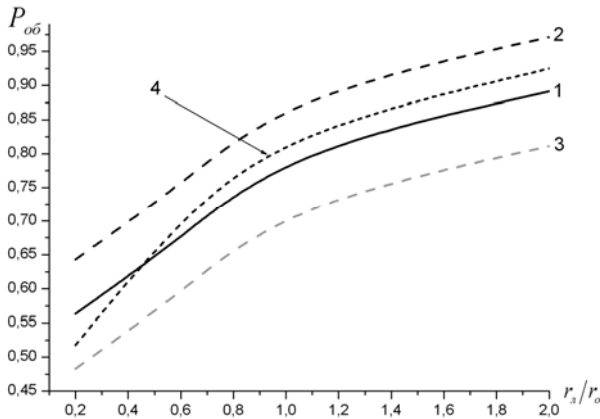


Рис. 7. Результаты измерения величины $P_{об}$ на открытом пространстве в ближней зоне (1 – измеренная кривая, 2, 3 – доверительный интервал, 4 – теоретическая кривая).

Однако сами границы, рассчитанные при вероятности 0,95, довольно широкие (в силу малого количества измерений), что позволяет сделать вывод о том, что разработанные модели можно использовать только для оценки, а не точного определения вероятности обнаружения функционирования канала связи.

Выводы

1. Различия в условиях РРВ 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.

2. Экспериментальные исследования, проводимые с целью доказательства достовер-

ности разработанной модели анализа вероятности обнаружения, показали, что разработанные модели можно использовать только для оценки, а не точного определения вероятности обнаружения функционирования канала связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barros J., Rodrigues M.R.D. Secrecy capacity of wireless channels // International Symposium on Information Theory (IEEE2006). – New York: IEEE Press. – 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 (Lecture Notes in Computer Science). – P. 3-12.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е издание. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003.
4. Шокало В.М. Производительность и помехозащищенность радиоканалов систем абонентского радиодоступа: [учебное пособие] / Под ред. проф. В.М. Шокало, проф. В.А. Хорошко. – Харьков: КП "Городская типография", 2011.
5. Румишский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971.