

УДК 621.391.7

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ АПЕРТУР ЛЕГИТИМНОГО И ОТВОДНОГО КАНАЛОВ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ РАБОТЫ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Стрельницкий А. А., Стрельницкий А. Е., Цопа А. И., Шокало В. М.,  
Ягудина Е. В. (Харьковский уац. унив-т радиоэлектроники)

Получено соотношение связывающее вероятность обнаружения функционирования беспроводных цифровых систем передачи информации (ЦСПИ) от размеров апертур легитимного и отводного каналов и их взаимного расположения. Показано, что основными факторами, влияющими на эффективность обнаружения, является удаление приемных апертур легитимного и отводного каналов от апертуры системы излучателей и рассеивателей источника информации, а также значение секретной скорости. Получены конкретные количественные данные о размерах апертур легитимного и отводного каналов, а также о взаимном их расположении при которых сигналы ЦСПИ могут быть уверенно обнаружены.

**Введение.** Для прогнозирования защищенности беспроводных цифровых систем передачи информации (ЦСПИ) в настоящее время широко используется концепция отводного канала [1]. С помощью отводных каналов (ОК) осуществляется обнаружение и подавление функционирования ЦСПИ. Факт обнаружения функционирования ЦСПИ оценивается вероятностью обнаружения  $P_{об}$  [2].

В [2] показано, что величина  $P_{об}$  зависит от соотношения сигнал/шум ( $SNR$ ) в легитимном и нелегитимном каналах и скорости передачи информации  $R_s$ , при которой ЦСПИ считается секретной (не обнаруживается). Параметры  $SNR$  и  $R_s$  – это энергетические параметры ЦСПИ. Другой известный путь оценки потенциальных характеристик многоканальных ЦСПИ – это их представление в виде функциональных зависимостей от габаритных (в долях длины волны) размеров излучающих структур на приемной и передающей стороне системы связи [3]. Такое представление позволяет на ранних стадиях проектирования ЦСПИ прогнозировать необходимое число пространственных каналов для обеспечения заданных ее характеристик. Однако указанный подход пока не распространен для случая ЦСПИ с отводным каналом, что не позволяет исследовать зависимость величины  $P_{об}$  от размера апертуры ОК и ее расположения относительно апертур легитимного канала. Проведение таких исследований и является целью настоящей работы.

**Постановка задачи и вывод основных соотношений.** Представим ЦСПИ с отводным каналом по аналогии с [3] в виде трех взаимодействующих апертур (рис. 1). Две из них образуют легитимный канал. Передающая апертура является сферой с диаметром  $a$ , внутри которой находятся как излучатели, так и рассеиватели. Наличие рассеивателей позволяет увеличить, как известно из [3], число каналов передачи информации в MIMO системах. Приемная апертура легитимного канала имеет размер  $a_n$ . Отводной канал располагается по отношению к оси легитимного канала под углом  $\gamma$  и имеет приемную апертуру с размером  $a_o$ . В

легитимном канале апертуры удалены на расстояние  $r_n$ , а в отводном – на расстояние  $r_o$ .

Получим для такой системы формулу, определяющую вероятность обнаружения  $P_{об}$ , взяв за основу выражение известное из [2]

$$P_{об} = 1 - \frac{(SNR)_л}{(SNR)_л + 2^{R_s} (SNR)_o} \cdot e^{\left[ \frac{2^{R_s} - 1}{(SNR)_л} \right]} = 1 - \frac{1}{1 + 2^{R_s} \frac{(SNR)_o}{(SNR)_л}} \cdot e^{\left[ \frac{2^{R_s} - 1}{(SNR)_л} \right]} \quad (1)$$

где  $(SNR)_л$  и  $(SNR)_o$  – отношение сигнал/шум в легитимном и отводном каналах соответственно.

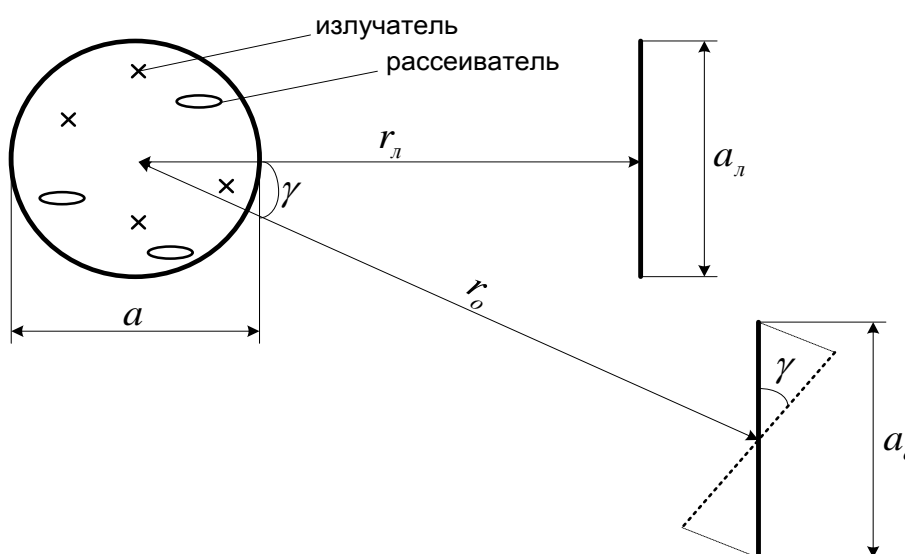


Рис. 1. Эквивалентное представление ЦСПИ с отводным каналом

Теперь из формулы Найквиста и теоремы Шеннона [4] получим соотношение для определения количества пространственных каналов, необходимых при передаче информации с заданным отношением  $SNR$ :

$$C = 2 \cdot \log_2 M, \quad (2) \qquad C = \log_2(1 + SNR), \quad (3)$$

где  $C$  – производительность ЦСПИ,  $M$  – количество дискретных сигналов, необходимых для передачи информации с заданной производительностью.

Далее будем считать, исходя из исследований проведенных в [3], что для передачи  $M$  дискретных сигналов нужно  $M$  различных пространственных каналов. Приравнявая на этом основании правые части (2) и (3) получим равенство:

$$SNR = M^2 - 1, \quad (4)$$

которое позволяет определить необходимое число  $M$  при заданной величине  $SNR$ .

Воспользовавшись результатами работы [3], можно записать числа  $M_l$  и  $M_o$  для легитимного и отводного каналов через геометрические параметры ЦСПИ:

$$M_n = \frac{a}{r_n} \cdot \frac{a_n}{\lambda}, \quad (5)$$

$$M_o = \frac{a}{r_o} \cdot \frac{a_o}{\lambda} \cdot \cos \gamma, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Теперь из (4)-(6) следуют такие соотношения:

$$(SNR)_n = \left( \frac{a \cdot a_n}{r_n \cdot \lambda} \right)^2 - 1, \quad (7)$$

$$(SNR)_o = \left( \frac{a \cdot a_o}{r_o \cdot \lambda} \cdot \cos \gamma \right)^2 - 1, \quad (8)$$

Подставив выражения (7) и (8) в формулу (1) получим:

$$P_{об} = 1 - \frac{1}{1 + 2^{R_s} \frac{(a \cdot a_o \cdot \cos \gamma / r_o \cdot \lambda)^2 - 1}{(a \cdot a_n / r_n \cdot \lambda)^2 - 1}} \cdot e^{\left[ \frac{2^{R_s} - 1}{(a \cdot a_n / r_n \cdot \lambda)^2 - 1} \right]}. \quad (9)$$

Формулы (7)-(9) в явном виде отражают зависимость параметров  $SNR$  и  $P_{об}$  от геометрических размеров апертур ЦСПИ  $a$ ,  $a_n$  и отводного канала  $a_o$ , а также их взаимного расположения (размеры  $r_n$ ,  $r_o$  и угол  $\gamma$ ). Анализируя выражение (7) нетрудно сделать такие рекомендации. Требуемое соотношения сигнал/шум в легитимном канале обеспечивается выбором соответствующих размеров приемной апертуры  $a_n / \lambda$  и величины заполнения трассы радиоканала рассеивателями, т.е. зависит от отношения  $a / r_n$ .

С точки зрения злоумышленника (см. (8)) эффективная работа отводного канала также обеспечивается наличием большого числа рассеивателей вдоль трассы длиной  $r_o$  и значительными размерами апертуры отводного канала  $a_o / \lambda$ .

Представляет практический интерес изучение влияния отношения  $r_o / r_n$  на величину  $P_{об}$ . Для этого упростим выражение (9), полагая, что выполняются такие неравенства:

$$\left( \frac{a}{r_o} \cdot \frac{a_o}{\lambda} \cdot \cos \gamma \right)^2 \gg 1, \quad (10)$$

$$\left( \frac{a}{r_n} \cdot \frac{a_n}{\lambda} \right)^2 \gg 1. \quad (11)$$

Тогда формулу (9) можно записать в таком виде:

$$P_{об} = 1 - \frac{1}{1 + 2^{R_s} \cdot \left( \frac{r_o}{r_n} \right)^{-1} \cdot \frac{a_o}{a_n} \cos \gamma} \cdot e^{\left[ \frac{2^{R_s} - 1}{(a/r_n)^2 \cdot (a_n/\lambda)^2 - 1} \right]} = 1 - \frac{1 - \left[ (2^{R_s} - 1) / \left( \frac{a \cdot a_n}{r_n \cdot \lambda} \right)^2 \right]}{1 + 2^{R_s} \cdot \left( \frac{r_o}{r_n} \right)^{-1} \cdot \frac{a_o}{a_n} \cos \gamma}. \quad (12)$$

Последняя запись в выражении (12) получена в результате представления  $e^{(\cdot)}$  в виде суммы первых двух членов ряда Тейлора.

**Анализ полученных результатов.** Из анализа формулы (12) следует, что при выполнении условия (11) величина заполняемости рас-сеивателями трассы вдоль легитимного канала  $a/r_n$  практически не сказывается на значении  $P_{об}$  и одним из основных факторов, определяющим величину вероятности обнаружения, является отношение  $r_n/r_o$ . Этот вывод подтвержден результатами расчетов (рис. 2, а: две нижние кривые при  $a/r_n = 0,5$  и  $a/r_n = 1,5$ ).

Второй важный фактор – секретная скорость  $R_s$ . При ее росте увеличивается и вероятность обнаружения. Это также видно из рис. 2, а.

Другие данные численных экспериментов по формуле (9) приведены на рис. 2, б, в. Они имеют ясный физический смысл. Так, с увеличением размера апертуры отводного канала  $a_o/\lambda$  растет и величина  $P_{об}$  (рис. 2, б), что обусловлено увеличением  $(SNR)_o$  (см. (9)).

При размещении апертуры  $a_o$  под некоторым углом  $\gamma$  к оси легитимного канала вероятность обнаружения падает, т.к. размер апертуры  $a_o$  уменьшается на значение  $\cos \gamma$  (рис. 2, б).

Аналогичный характер имеют зависимости  $P(a/r_o)$ , приведенные на рис. 2, в. При

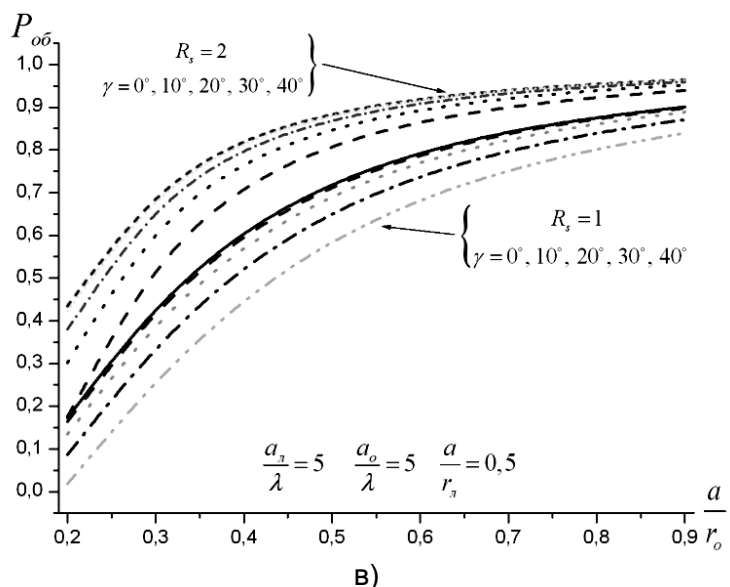
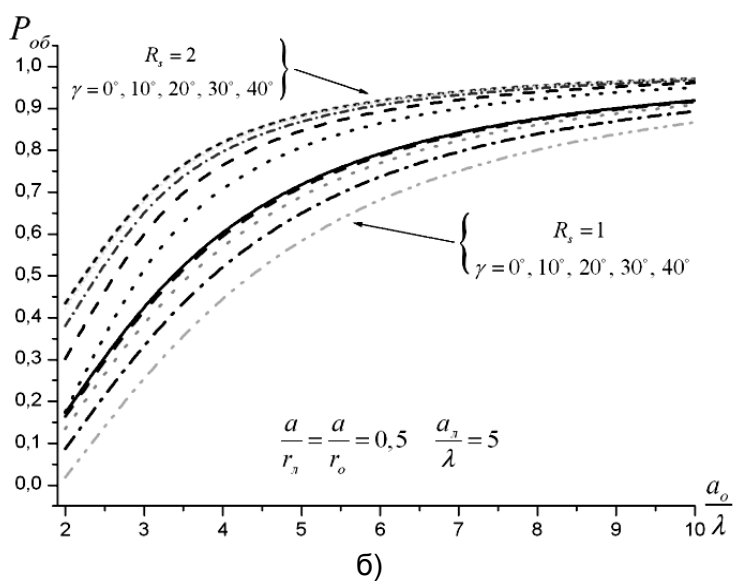
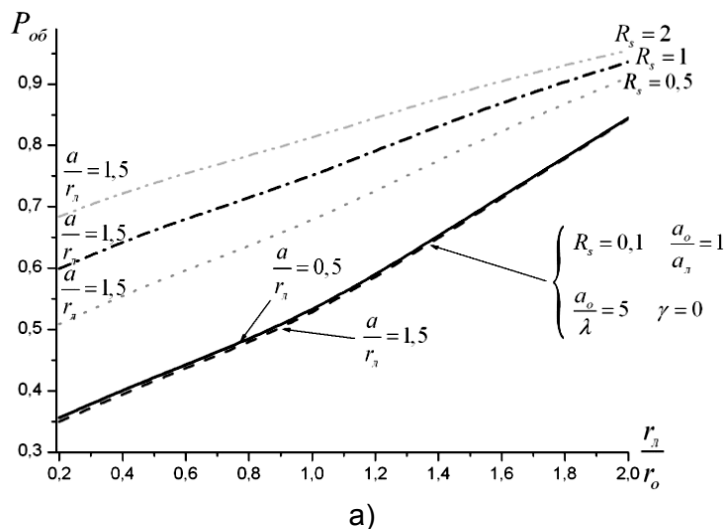


Рис. 2. Результаты вычислений величины  $P_{об}$

изменении  $a/r_o$  от 0,2 до 0,5 происходит резкое увеличение вероятности обнаружения за счет роста значения  $(SNR)_o$ . В области, где  $a/r_o > a/r_n = 0,5$  параметр  $P_{об}$  слабо зависит от величины заполнения рассеивателями трассы отводного канала при больших значениях  $R_s$  и достигает максимума при  $\gamma = 0^\circ$  (см., например, кривые при  $R_s = 2$ ).

Если принять, что уверенное обнаружение сигналов ЦСПИ возможно при  $P_{об} \geq 0,7$ , то можно провести такой анализ полученных результатов. Из рис. 2 следует, что сигналы ЦСПИ могут быть обнаружены при секретной скорости  $R_s \geq 2$  практически при любых соотношениях  $r_n/r_o$ . При этом размеры апертуры излучателя отводного канала  $a_o$  должны быть не менее  $4\lambda$ , а соотношение  $a/r_o > 0,35$ .

### **Выводы**

1. Впервые получена формула, связывающая вероятность обнаружения ЦСПИ от размеров ее апертур, апертуры отводного канала и их взаимного расположения.

2. Показано, что основными факторами, влияющими на эффективность обнаружения, является удаление приемных апертур легитимного и отводного канала от апертуры системы излучателей и рассеивателей источника информации, а также величина секретной скорости  $R_s$ .

3. Получены конкретные количественные данные о размерах апертур легитимного и отводного каналов, а также о взаимном их расположении при которых сигналы ЦСПИ могут быть уверенно обнаружены.

### **Литература**

1. Wyner A.D. The wire-tap channel // Bell System Technical Journal. – 1975. – Vol. 54 – № 8. – pp. 1355-1367.

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. Chakraborty K., Franceschetti M. Maxwell meets Shannon: space-time duality in multiple antenna channels // Proc. 44-th Allerton Conf. Communication, Control and Computing. – Monticello, 2006. – pp. 761-770.

4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е издание. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.