

А.С. ГВОЗДАРЕВ, Т.К. АРТЁМОВА, П.Е. ПАТРАЛОВ, Д.М. МУРИН
**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ
БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ДЛЯ КАНАЛА ТИПА
BEAULIEU-XIE С ЗАТЕНЕНИЯМИ**

Гвоздарев А.С., Артёмова Т.К., Патралов П.Е., Мурин Д.М. **Вероятностный анализ безопасности беспроводной системы связи для канала типа Beaulieu-Xie с затенениями.**

Аннотация. В работе рассмотрена задача анализа безопасного сеанса на физическом уровне беспроводной системы связи в условиях многолучевого канала распространения сигнала и наличия канала утечки информации. Для обобщения эффектов распространения была выбрана модель канала Beaulieu-Xie с затенениями. Для описания безопасности процесса передачи информации использовалась такая метрика, как вероятность прерывания безопасного сеанса связи. В рамках исследования было получено аналитическое выражение вероятности прерывания связи. Проведён анализ её поведения в зависимости от характеристик канала и системы связи: среднего значения отношения сигнал-шум в основном канале и канале утечки, эффективного значения показателя потерь на пути распространения сигнала, относительного расстояния между законным приёмником и прослушивающим приёмником и пороговой пропускной способности, нормированной на пропускную способность гладкого гауссова канала. Рассмотрены совокупности параметров, которые покрывают важные сценарии функционирования беспроводных систем связи. К ним относятся как глубокие замирания (отвечающие гиперрэлеевскому сценарию), так и малые замирания. Учитываются условия наличия существенной по величине компоненты прямой видимости и значительного количества многопутевых кластеров, затенения доминантной компоненты и многопутевость волн, а также всевозможные промежуточные варианты. Обнаружено, что величина энергетического потенциала, необходимого для гарантированной безопасной связи с заданной скоростью, определяется в первую очередь мощностью многопутевых компонент, а также наличие неснижаемой вероятности прерывания безопасного сеанса связи с ростом для каналов с сильным общим затенением компонент сигнала, что с практической точки зрения важно учитывать при предъявлении требований к величинам отношения сигнал/шум и скорости передачи данных в прямом канале, обеспечивающим желаемую степень безопасности беспроводного сеанса связи.

Ключевые слова: беспроводной канал, замирания, затенение, модель Beaulieu-Xie с затенениями, вероятность прерывания безопасного сеанса связи.

1. Введение. Развитие современных стандартов и технологий беспроводной связи неминуемо приводит к увеличению числа стационарных и мобильных устройств, обменивающихся информацией. Объекты сетей Интернета вещей (Internet-of-Things, IoT) или Интернета всего (Internet-of-Everything, IoE) взаимодействуют друг с другом. При этом используются технологии «устройство – устройству» (device to device, D2D), «машина – машине» (machine to machine, M2M), «человек – человеку» (human to human, H2H) [1], «транспорт – транспорту» (vehicle to vehicle, V2V) [2], а также

гибридные технологии, например, «человек – машине» (H2M, [3]) или «транспорт – любому устройству связи» (V2X) [4], позволяющие объединить различные датчики, управляющие элементы и аппаратуру передачи данных, размещённые в домах, на производствах, на транспорте, на элементах городской инфраструктуры, и мобильные, размещённые на теле человека или в элементах одежды, устройства в сети умного дома, умного города, умного жизнеобеспечения и телемедицины. Часто между устройствами при этом передаётся информация, подлежащая защите, в том числе персональные медицинские, финансовые и другие данные. От надёжности и своевременности передачи такой информации могут напрямую зависеть, например, эффективность работы городского транспорта или безопасность человеческой жизни. Поэтому начавшийся переход от индивидуальных решений в области умных домов к повсеместному внедрению умных технологий в последнее время придаёт особую остроту вопросам обеспечения безопасности сеансов связи [5-6].

Альтернативой классическому использованию криптографических методов является подход, основанный на анализе безопасности на физическом уровне [7-9], учитывающий физические явления в канале связи [10]. Такой подход обладает рядом преимуществ перед криптографией [9]. Методы физического уровня позволяют обеспечить безопасный сеанс связи даже в случае, если у подслушивающего устройства имеются мощные вычислительные ресурсы. Они обеспечивают работу сетей различной иерархии, в том числе самоорганизующихся, с узлами, подключающимися и отключающимися от сети в произвольные моменты времени. Эти методы могут выступать в качестве дополнительного хорошо встраиваемого решения обеспечения безопасности связи вместе с традиционными.

Безопасность сеанса беспроводной системы связи на физическом уровне можно охарактеризовать различными показателями [11-13], среди которых важная роль отводится вероятности прерывания безопасного сеанса связи. Она оценивается с помощью предполагаемой статистической модели канала. Следовательно, чем ближе модель к реальным измерениям, тем выше эффективность методов физического уровня.

В настоящее время наблюдается тенденция отдавать предпочтение так называемым обобщенным моделям, учитывающим всё многообразие физических явлений, происходящих при распространении сигналов в системе связи [14-15]. Одной из самых новых в этой группе является модель Больё-Се (Beaulieu-Xie) с

затенениями для канала с замираниями и затенением [16] (далее будем обозначать её как ВХ-модель), которая, с одной стороны, достаточно сложна, чтобы учесть большее количество физических факторов, влияющих на распространение сигнала по сравнению с её аналогами, а с другой – позволяет получать аналитическое описание характеристик в замкнутой форме [17]. Хотя параметры канала в этой модели являются чисто стохастическими, некоторые из них, например, среднее отношение сигнал/шум, можно связать [13] с ослаблением сигнала в беспроводном канале через так называемый показатель потерь при распространении и таким образом учесть влияние физических факторов. Для этой модели на текущий момент существуют результаты, описывающие надёжность сеанса связи (вероятностью его прерывания) и качества связи (усреднённой битовой ошибкой) [16, 18], однако для анализа безопасности сеансов связи она ещё не применялась.

Таким образом, представляет интерес получение аналитического выражения для вероятности прерывания безопасного сеанса системы беспроводной связи при наличии прослушивания и замирания в соответствии ВХ-моделью с затенением. Оно должно связывать данную метрику с параметрами модели и величинами, описывающими влияние физических факторов. При этом в силу того, что ВХ-модель пригодна к описанию различных ситуаций, встречающихся в практике связи, её можно использовать как для основного канала связи, так и для канала утечки.

Целью данной работы является анализ характера поведения зависимости вероятности прерывания безопасного сеанса связи от величин, описывающих воздействие различных влияющих факторов, а также значений этой вероятности, достижимых в наиболее часто встречающихся условиях.

2. Модель системы связи с каналом прослушки. Будем использовать классическую модель системы связи с прослушиванием, предложенную Вайнером [19]. Законный отправитель «А» отправляет сообщение w законному получателю «Б» по дискретному во времени каналу с замираниями (т.е. основному каналу) (рисунок 1). При этом l -символьный блок сообщения w^l кодируется кодерами источника и канала (т.е. «А») в n -символьное кодовое слово $x^n = \{x(1), \dots, x(i), \dots, x(n)\}$. Законный получатель «Б» принимает на выходе основного канала n -символьное слово y^n , оценив его символы каким-либо образом, и с помощью декодеров канала и приёмника формирует принятое сообщение \hat{w}^l . В соответствии с классическим

подходом [20, 21] будем считать, что передаваемый сигнал также воспринимается пассивным [9] подслушивающим устройством («Е») по каналу прослушивания. В этих условиях предполагается, что канал прослушки не оказывает физического влияния на приём сигнала по основному каналу [13].

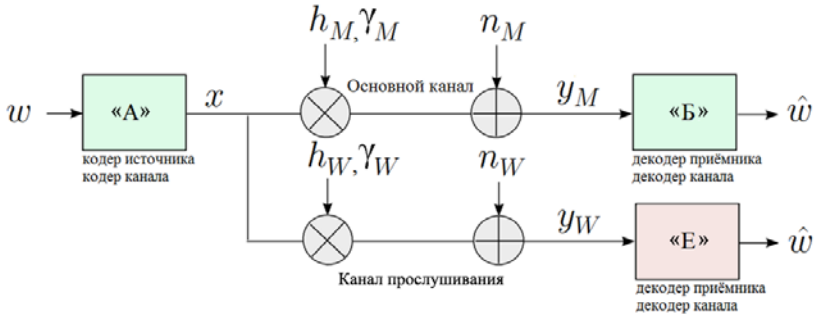


Рис. 1. Модель системы связи с каналом прослушивания

Распространение волн в обоих каналах считается многолучевым, что порождает замирание принимаемого сигнала. Обозначая переменные, соответствующие основному каналу, индексом « M », а каналу прослушивания – индексом « W », можно формализовать математическое описание системы следующим образом:

$$\begin{cases} y_M(i) = h_M(i)x(i) + n_M(i), \\ y_W(i) = h_W(i)x(i) + n_W(i), \end{cases} \quad (1)$$

где $x^n = \{x(1), \dots, x(i), \dots, x(n)\}$ – кодовое слово, $y_M(i)$, $y_W(i)$ – отсчёты слов, принятых законным получателем и подслушивающим устройством, i – номер отсчёта внутри слова, $n_M(i)$, $n_W(i)$ – комплексные гауссовы шумы с нулевым средним значением в обоих каналах, $h_M(i)$, $h_W(i)$ – стохастически изменяющиеся коэффициенты передачи основного канала и канала прослушивания при передаче i -го отсчёта, учитывающие замирания и затенения. Далее мы рассмотрим типичный случай медленных замираний или, что эквивалентно, каналов, квазистатических на интервале длительности кодового слова, т.е. имеющих $h_M(i) \approx h_M$ и $h_W(i) \approx h_W$ [13].

Для такой модели мгновенное и среднее отношение сигнал/шум (ОСШ) для основного канала и канала прослушивания могут быть определены следующим образом:

$$\begin{cases} \gamma_M(i) = \frac{P|h_M(i)|^2}{\sigma_M^2} = \frac{P|h_M|^2}{\sigma_M^2} = \gamma_M, \\ \gamma_W(i) = \frac{P|h_W(i)|^2}{\sigma_W^2} = \frac{P|h_W|^2}{\sigma_W^2} = \gamma_W, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \bar{\gamma}_M(i) = \frac{P\mathbb{E}\{|h_M(i)|^2\}}{\sigma_M^2} = \frac{P\mathbb{E}\{|h_M|^2\}}{\sigma_M^2} = \bar{\gamma}_M, \\ \bar{\gamma}_W(i) = \frac{P\mathbb{E}\{|h_W(i)|^2\}}{\sigma_W^2} = \frac{P\mathbb{E}\{|h_W|^2\}}{\sigma_W^2} = \bar{\gamma}_W. \end{cases} \quad (3)$$

В выражениях (2)-(3) P обозначает среднюю мощность передаваемого сигнала, σ_M^2, σ_W^2 – мощности шума в каждом из каналов и $\mathbb{E}\{\cdot\}$ – оператор математического усреднения. Знаки равенства в (2)-(3) следуют из предположения о квазистатичности каналов.

Хорошо известно, что [13] наличие замираний позволяет дополнительно использовать информацию о характеристиках канала, оптимизируя стратегию функционирования передатчика и законного приёмника, максимизируя качество передачи (в терминах количества информации, скорости передачи данных, вероятности битовой ошибки [9]) для основного канала и минимизируя его для канала утечки в условиях потенциальной возможности наличия подслушивающего устройства. Это, в свою очередь, придаёт особую важность аналитическим исследованиям в части влияния параметров канала на систему связи.

Общее качество функционирования системы связи с каналом прослушивания будет зависеть от выбранных моделей, используемых для описания основного канала и канала утечки. С одной стороны, с практической точки зрения удобно выбрать наиболее общие модели, позволяющие учесть как можно большее количество эффектов, связанных с распространением сигналов. С другой стороны, важно

сохранить возможность аналитической трактовки выражений для выбранной метрики безопасности связи, для чего удобно использовать для обоих каналов одинаковые модели (с одинаковыми наборами, но с разными значениями параметров). Кроме того, рассмотрим ситуацию, когда законный и прослушивающий приёмники расположены рядом, что соответствует схожести условий распространения сигнала в основном канале и в канале прослушки. Таким образом, для обоих каналов будем использовать одну и ту же модель с одними и теми же параметрами. Основной канал и канал прослушки предполагаются статистически независимыми [13].

3. Модель канала. Одной из особенностей радиоканала является разнообразие условий излучения, распространения и приёма сигнала. Если антенная система передатчика формирует излучение в широком (относительно широком) секторе углов или имеет несколько лепестков диаграммы направленности, а антенная система приёмника способна принимать сигнал с широкого сектора направлений или с нескольких лучей, то создаются условия для попадания сигнала от передатчика к приёмнику несколькими путями. Многолучёвость проявляется как результат многократного переотражения и поглощения на пути распространения радиоволн. При этом в сигнале могут присутствовать, как прямая (доминантная), так и диффузная составляющие, каждая из которых образована множеством компонент с близкими, но всё же отличающимися характеристиками. Многолучевое распространение зависит от типа застройки, рельефа местности, вида растительности и скорости перемещения абонента. Сигналы разных лучей сдвинуты во времени относительно друг друга, что обусловлено различной длиной пути распространения. Компоненты с близкой мощностью, но отличающиеся фазой могут частично или полностью компенсировать друг друга. Этот эффект зависит от частоты. Таким образом, сигнал в радиоканале испытывает замирания. Кроме того, прямая компонента может испытывать частичное или полное затенение, например, вследствие дифракции на растительности или прохождении через элементы строительных конструкций или участки трассы, отличающиеся погодными условиями.

Коэффициент передачи канала на каждом из путей определяется длиной пути, а также условиями рассеяния и поглощения элементами застройки, рельефа и другими отражателями и препятствиями. Так как длины путей, а также коэффициенты отражения и прохождения, описывающие взаимодействие волн с объектами, расположенными на пути распространения сигнала, отличаются, то коэффициент передачи

канала является случайной величиной. Его статистические свойства определяются комбинацией физических условий распространения сигнала.

Будем использовать для основного канала и канала прослушки недавно предложенную обобщенную ВХ-модель с замираниями и затенениями [16].

В рамках рассматриваемой модели сигнал распространяется в виде кластеров электромагнитных волн, в которых выделяются доминантные и многопутевые компоненты (рисунок 2).

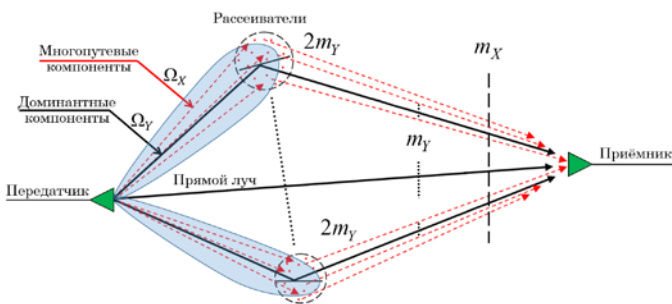


Рис. 2. Физическая ситуация, описываемая моделью канала

Модель канала параметризована в терминах средней мощности многопутевых (рассеянных) компонент Ω_X , средней мощности компонент прямой видимости Ω_Y , степени затенения компонент прямой видимости m_Y и общей степени затенения компонент m_X . Функция плотности вероятности (ФПВ) мгновенного отношения сигнал/шум для обоих каналов (основного и прослушиваемого) задаётся выражением (4) [16]:

$$\begin{aligned}
 f_{\gamma_i}(z_i) &= \frac{e^{-\frac{m_X(\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_i \Omega_X} z_i}}{\Gamma(m_X) \sqrt{\frac{z_i \bar{\gamma}_i}{\Omega_X + \Omega_Y}}} \left(\frac{m_X}{\Omega_X} \right)^{m_X} \times \\
 &\times \left(\frac{z_i (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_i} \right)^{m_X - \frac{1}{2}} \left(\frac{m_Y \Omega_X}{m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y} \right)^{m_Y} \times \\
 &\times {}_1F_1 \left(m_Y; m_X; \frac{m_X^2 (\Omega_X + \Omega_Y) \Omega_Y}{\bar{\gamma}_i \Omega_X (m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} z_i \right),
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $i = \{1; 2\}$, $\bar{\gamma}_i = \begin{cases} \bar{\gamma}_M, & i = 1, \\ \bar{\gamma}_W, & i = 2 \end{cases}$, $\bar{\gamma}_M$, $\bar{\gamma}_W$ обозначают средние значения отношений сигнал-шум для основного канала и канала прослушки соответственно, ${}_1F_1(\cdot)$ – вырожденная гипергеометрическая функция [22], а $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция Эйлера [22].

Следует отметить, что такая модель в нескольких конкретных случаях переходит в другие модели, в том числе широкораспространённые упрощённые: Райса, Рэлея, Накагами- m , ВХ-модель без затенения [23], в $\kappa - \mu$ с затенениями [17], а также в ряд других упрощённых моделей [16]. Более того, модель описывает, в том числе и те случаи, которые не охватываются классическими моделями, так как параметры интенсивности затенения m_x и m_y могут принимать произвольные положительные значения (т.е. они не ограничены снизу значением 0,5, как это широко принято для упрощённых моделей), а значение $2m_y$ равно числу доминантных компонентов [16].

Будем рассматривать ситуацию с одинаковыми параметрами затухания для основного канала и канала прослушивания, что физически соответствует сценарию, когда подслушивающий и законный приемник находятся на близком расстоянии в пределах зоны действия базовой станции (передатчика).

Можно заметить, что, хотя параметры модели Ω_x , Ω_y , m_y , m_x связаны с некоторыми физическими величинами, они являются статистическими. В отличие от них средние отношения сигнал-шум обычно связаны с расстояниями до «Б» (d_M) и «Е» (d_W) через так называемый показатель потерь на трассе α [24], т.е. $\bar{\gamma}_M \sim 1/d_M^\alpha$, $\bar{\gamma}_W \sim 1/d_W^\alpha$ [13]. Несмотря на то, что α является стохастическим, он характеризуется своим эффективным значением, которое описывает возможную среду распространения сигнала (например, $\alpha = 2$ для распространения в свободном пространстве без замираний [24]). Величиной α можно управлять, например, с помощью интеллектуальных рассеивающих панелей [25-26].

4. Показатель качества безопасного функционирования беспроводной системы связи. Будем характеризовать качество функционирования описанной беспроводной системы связи вероятностью прерывания безопасного сеанса связи P_{out} (Secrecy

Outage Probability (англ.) – SOP). Она определяется как вероятность того, что пропускная способность C будет ниже порогового значения C_{th} [13], т.е.:

$$P_{out}(C_{th}) = \mathbb{P}(C < C_{th}) = \mathbb{P}(\gamma_M < (1 + \gamma_W)2^{C_{th}} - 1) = \int_0^{\infty} \int_0^{(1+\gamma_W)2^{C_{th}}-1} f_{\gamma_M, \gamma_W}(z_1, z_2) dz_1 dz_2. \quad (5)$$

5. Полученное выражение для вероятности прерывания безопасного сеанса связи. В предположении о том, что основной канал и канал прослушивания статистически независимы, функция их совместной плотности распределения вероятностей мгновенных ОСШ может быть факторизована в виде произведения одномерных функций плотностей вероятности (4), т.е. $f_{\gamma_M, \gamma_W}(z_1, z_2) = f_{\gamma_M}(z_1)f_{\gamma_W}(z_2)$. В результате выражение (5) можно представить в виде:

$$P_{out}(C_{th}) = \int_0^{\infty} \int_0^{(1+z_2)2^{C_{th}}-1} f_{\gamma_M}(z_1) f_{\gamma_W}(z_2) dz_1 dz_2 = \frac{\left(\frac{m_Y \Omega_X}{m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y}\right)^{2m_Y} \left(\frac{m_X}{\Omega_X} (\Omega_X + \Omega_Y)\right)^{2m_X}}{\Gamma^2(m_X) \bar{\gamma}_M^{m_X} \bar{\gamma}_W^{m_X}} \times \int_0^{\infty} \int_0^{(1+z_2)2^{C_{th}}-1} z_2^{m_X-1} z_1^{m_X-1} e^{-\frac{m_X(\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_W \Omega_X} z_2} e^{-\frac{m_X(\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X} z_1} \times {}_1F_1\left(m_Y; m_X; \frac{m_X^2(\Omega_X + \Omega_Y)\Omega_Y}{\bar{\gamma}_W \Omega_X (m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} z_2\right) \times {}_1F_1\left(m_Y; m_X; \frac{m_X^2(\Omega_X + \Omega_Y)\Omega_Y}{\bar{\gamma}_M \Omega_X (m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} z_1\right) dz_1 dz_2. \quad (6)$$

Вспользуемся классическим разложением для вырожденной гипергеометрической функции ${}_1F_1(\cdot)$ в ряд ([22], выражение 13.2.2):

$$\begin{aligned}
 {}_1F_1\left(m_Y; m_X; \frac{m_X^2 (\Omega_X + \Omega_Y) \Omega_Y}{\bar{\gamma}_i \Omega_X (m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} z_i\right) &= \\
 &= \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(m_Y)_p}{(m_X)_p} \frac{\left(\frac{m_X^2 (\Omega_X + \Omega_Y) \Omega_Y}{\bar{\gamma}_i \Omega_X (m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} z_i\right)^p}{p!},
 \end{aligned} \tag{7}$$

где $(\cdot)_p$ – символ Похгаммера [22].

Подставляя разложение (7) в выражение (6) и перегруппировывая слагаемые, получим:

$$\begin{aligned}
 P_{out}(C_{th}) &= \frac{\left(\frac{m_Y \Omega_X}{m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y}\right)^{2m_Y} \left(\frac{m_X}{\Omega_X} (\Omega_X + \Omega_Y)\right)^{2m_X}}{\Gamma^2(m_X) \bar{\gamma}_M^{m_X} \bar{\gamma}_W^{m_X}} \times \\
 &\times \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(m_Y)_q}{(m_X)_q} \frac{(m_Y)_p}{(m_X)_p} \frac{\left(\frac{m_X^2 (\Omega_X + \Omega_Y) \Omega_Y}{\Omega_X (m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)}\right)^{p+q}}{q! p! \bar{\gamma}_W^p \bar{\gamma}_M^q} \times \\
 &\times \int_0^{\infty} z_2^{m_X + p - 1} e^{-\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_W \Omega_X} z_2} \left\{ \int_0^{(1+z_2)2^{C_{th}} - 1} z_1^{m_X + q - 1} e^{-\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X} z_1} dz_1 \right\} dz_2.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Заметим, что внутренний определенный интеграл сводится к неполной нижней гамма-функции $\tilde{\gamma}(a, z)$ ([22], выражение 8.2.1):

$$\begin{aligned}
 &\int_0^{(1+z_2)2^{C_{th}} - 1} z_1^{m_X + q - 1} e^{-\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X} z_1} dz_1 = \\
 &= \left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X}\right)^{-m_X - q} \tilde{\gamma}\left(m_X + q, \left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X}\right) ((1+z_2)2^{C_{th}} - 1)\right).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Учтем, что для $\tilde{\gamma}(a, z)$ существует разложение в виде конечной суммы ([22], выражение 8.4.7):

$$\tilde{\gamma} \left(m_X + q, \left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X} \right) \left((1 + z_2) 2^{C_{th}} - 1 \right) \right) =$$

$$= \Gamma(m_X + q) \left(1 - e^{-\left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X} \right) \left((1 + z_2) 2^{C_{th}} - 1 \right)} \sum_{k=0}^{m_X + q - 1} \frac{\left[\left((1 + z_2) 2^{C_{th}} - 1 \right) \right]^k}{k! \left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X} \right)^{-k}} \right). \quad (10)$$

После подстановки (10) в (7) выражение для вероятности прерывания безопасного сеанса связи распадается на 2 слагаемых. Отметим, что в первом слагаемом двойной ряд распадается на произведение двух одинарных, для каждого из которых результат суммирования может быть получен в замкнутой форме путем сведения каждого из них к выражению для гипергеометрической функции Гаусса ${}_2F_1(m_Y, b; b; z)$ с совпадающими аргументами ([22] выражение 15.4.6):

$$\sum_{p=0}^{\infty} \frac{(m_Y)_p}{p!} \left(\frac{m_X \Omega_Y}{(m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} \right)^p = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(m_Y)_p (b)_p}{(b)_p} \frac{\left(\frac{m_X \Omega_Y}{(m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} \right)^p}{p!} \quad (11)$$

$$= {}_2F_1 \left(m_Y, b; b; \frac{m_X \Omega_Y}{(m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} \right) = \left(1 - \frac{m_X \Omega_Y}{(m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} \right)^{-m_Y}.$$

Учитывая тождество:

$$\frac{1}{(m_X)_p} \Gamma(m_X + p) = \Gamma(m_X), \quad (12)$$

(вытекающее из определения символа Похгаммера), а также тот факт, что оставшийся несобственный интеграл в выражении (8) может быть вычислен с использованием вырожденной гипергеометрической функции Трикоми $U(a; b; z)$ ([22] выражение 13.4.4):

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{\infty} z_2^{m_X+p-1} \frac{\left((1+z_2) 2^{C_{th}} - 1 \right)^k}{\left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X} \right)^{-k}} e^{-\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\Omega_X} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_W} + 2^{C_{th}} \frac{1}{\bar{\gamma}_M} \right) z_2} dz_2 = \\
 & = \left[\left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X} \right) (2^{C_{th}} - 1) \right]^k \left(\frac{2^{C_{th}} - 1}{2^{C_{th}}} \right)^{m_X+p} \Gamma(m_X + p) \times \\
 & \times U \left(m_X + p; m_X + p + 1 + k; \left(\frac{2^{C_{th}} - 1}{2^{C_{th}}} \right) \left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\Omega_X} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_W} + 2^{C_{th}} \frac{1}{\bar{\gamma}_M} \right) \right) \right), \quad (13)
 \end{aligned}$$

итоговое выражение для вероятности прерывания безопасного сеанса связи представимо в виде:

$$\begin{aligned}
 P_{out}(C_{th}) &= 1 - \frac{\left(\frac{2^{C_{th}} - 1}{2^{C_{th}}} \right)^{m_X} \left(\frac{m_Y \Omega_X}{m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y} \right)^{2m_Y} e^{-\frac{m_X}{\bar{\gamma}_W \Omega_X} (\Omega_X + \Omega_Y) (2^{C_{th}} - 1)}}{\left(\frac{m_X}{\bar{\gamma}_W \Omega_X} (\Omega_X + \Omega_Y) \right)^{-m_X}} \times \\
 & \times \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(m_Y)_q (m_Y)_p}{q! p! \bar{\gamma}_W^p \bar{\gamma}_M^q} \frac{\left(\frac{m_X^2 (\Omega_X + \Omega_Y) \Omega_Y}{\bar{\gamma}_W \Omega_X (m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y)} \right)^p}{\left(\frac{2^{C_{th}} - 1}{2^{C_{th}}} \right)^{-p}} \left(\frac{m_X \Omega_Y}{m_Y \Omega_X + m_X \Omega_Y} \right)^q \times \\
 & \times \sum_{k=0}^{m_X+q-1} \frac{\left[\left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\bar{\gamma}_M \Omega_X} \right) (2^{C_{th}} - 1) \right]^k}{k!} \times \\
 & \times U \left(m_X + p; m_X + p + 1 + k; \left(\frac{2^{C_{th}} - 1}{2^{C_{th}}} \right) \left(\frac{m_X (\Omega_X + \Omega_Y)}{\Omega_X} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_W} + 2^{C_{th}} \frac{1}{\bar{\gamma}_M} \right) \right) \right). \quad (14)
 \end{aligned}$$

Насколько известно авторам, полученное выражение (7) является новым.

Стоит отметить несколько фактов:

– Все используемые специальные функции являются классическими и программно реализованы во всех современных пакетах компьютерной алгебры (MatLAB, MathCAD, Mathematica, Maple и др.), а также в виде отдельных свободно распространяемых библиотек (например, пакет Special functions (scipy.special) для языка Python).

– Несмотря на то, что полученное итоговое выражение (14) представляется в виде двойного ряда, на практике только первых нескольких членов оказывается достаточно для достижения требуемой точности, что позволяет: 1) повысить скорость вычисления вероятности прерывания беспроводного сеанса связи по сравнению с исходным выражением (6) и 2) избежать сложностей, связанных с выбором метода численного интегрирования в выражении (6), в частности с необходимостью обеспечения компромисса между сходимостью интеграла, точностью проведения операции интегрирования (чувствительности выбранной схемы интегрирования к параметрам канала) и скоростью вычисления.

– Для дальнейшего повышения скорости вычисления для выражения (14) могут быть успешно использованы алгоритмы повышения скорости сходимости рядов, например, метод Шенкса [27].

Выражение (14) позволяют анализировать поведение вероятности прерывания безопасного сеанса связи в зависимости от параметров модели канала, а также от относительного расстояния между законным и подслушивающим приёмниками.

6. Результаты численной апробации. Чтобы продемонстрировать правильность полученных выражений и изучить эффекты, вызванные изменением канала распространения, было проведено численное моделирование. Исследовались как общее поведение вероятности прерывания безопасного сеанса связи с ростом среднего отношения сигнал/шум в основном канале для различных часто встречающихся на практике случаев, так и характер и величина влияния на эту вероятность различных факторов, которые позволяет учесть модель.

6.1. Параметры моделирования. Численное моделирование производилось в системе Wolfram Mathematica. Исследовалась вероятность прерывания безопасного сеанса связи (SOP), заданная выражениями (6)-(7).

Для моделирования была выбрана совокупность параметров, которая покрывает все практически важные сценарии функционирования: как глубокие замирания (малые значения m_x и m_y , отвечающие гиперрэлеевскому сценарию), так и малые замирания

(большие значения m_x и m_y), как в случае наличия существенной по величине компоненты прямой видимости и значительном количестве многопутевых кластеров (при больших значениях Ω_y и Ω_x), так и при существенных затенениях доминантной компоненты и малого числа многопутевых волн, а также всевозможные промежуточные варианты.

Так как ВХ-модель является пригодной для описания разнообразных сценариев связи, то исследования проводились при параметрах, изменяющихся в широком диапазоне значений. Параметры модели приведены в таблице 1. При построении характеристик, в соответствии с теорией, описанной в работе [13], пропускная способность БСС нормировалась на пропускную способность Гауссовского канала связи без замираний и затенений, которая описывается классической формулой Шеннона [28]. В дальнейших упоминаниях в работе нормированная пропускная способность БСС будет называться просто пропускной способностью безопасного сеанса связи.

Таблица 1. Параметры модели

Название	Обозначение	Значения
Средняя мощность многопутевых компонент	Ω_x	-10..20 дБ
Средняя мощность компонент прямой видимости	Ω_y	-10..20 дБ
Степень затенения компонент прямой видимости	m_y	0,1..5
Общая степень затенения компонент	m_x	0,1..5
Показатель потерь на трассе	α	2 или 3
Отношение расстояний от передатчика до законного приёмника и до подслушивающего устройства	d_w / d_m	0,1..100
Среднее значение отношения сигнал-шум для основного канала связи	$\bar{\gamma}_M$	0..50 дБ
Среднее значение отношения сигнал-шум для канала прослушки	$\bar{\gamma}_w$	0..50 дБ
Пороговая пропускная способность системы связи, гарантирующая безопасную связь, нормированная на пропускную способность Гауссовского канала связи без замираний и затенений	C_{th}	0,1..0,6

Значение показателя потерь на трассе согласно [24] соответствовало ситуации распространения сигнала в условиях

городской местности с элементами инфраструктуры, создающими затенение.

6.2. Общие свойства. Влияние параметров канала. На рисунке 3 приведены зависимости вероятности прерывания безопасного сеанса связи от среднего ОСШ основного канала для ситуации канала с малой мощностью компонент и прямой видимости, и многопутевых, и сильным затенением, при показателе потерь на трассе $\alpha = 2$. Это практически гиперрэлеевский канал с глубокими замираниями [29]. В качестве параметра здесь использовано среднее значение ОСШ в канале прослушки (для значений, соответствующих -10, 0, 10, 20 дБ использованы линии с квадратными, круглыми, треугольными маркерами и маркерами в виде косых крестиков соответственно). Семейство линий, полученных при большой нормированной пороговой пропускной способности БСС (0,9), проходит существенно выше, чем семейство, полученное при малой C_{th} (0,1), и демонстрирует в отличие от них слабую зависимость от ОСШ в основном канале.

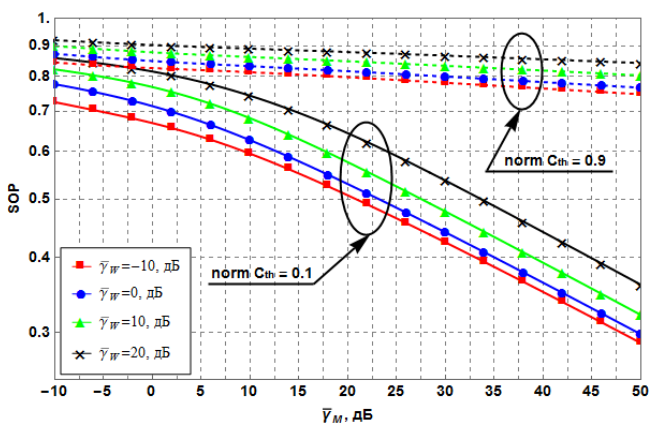


Рис. 3. Зависимость вероятности прерывания БСС от среднего ОСШ основного канала $\bar{\gamma}_M$ для канала с малой мощностью обеих компонент ($\Omega_x = \Omega_y = -10$ дБ) и сильным затенением ($m_x = m_y = 0,1$) при изменении среднего ОСШ в канале прослушки от -10 до 10 дБ и нормированной пороговой пропускной способности БСС C_{th} от малой (0,1) до большой (0,9)

Из рисунка 3 видно, что если допускать снижение скорости связи ниже заранее predetermined значения C_{th} , равного 0,1, с вероятностью, например, 0,3, то для обеспечения БСС в таких

условиях необходимы очень большие значения среднего ОСШ законного приёмника (47-50 дБ), что с точки зрения практики очень тяжело реализовать. Что касается работы при высоких скоростях ($C_{th} = 0,9$), то при том же значительном ОСШ в основном канале 50 дБ значения вероятности прерывания лежат в диапазоне от 0,75 до 0,85, то есть, $SOP = 0,3$ недостижима при высоких скоростях и высокоскоростная передача информации по беспроводному каналу с большой долей вероятности будет небезопасной.

Как видно из рисунка 3 и последующих, рост ОСШ в канале утечки ухудшает ситуацию для всех значений остальных параметров модели, за исключением отношения расстояний до законного и подслушивающего приёмников (что будет рассмотрено отдельно), причём тем сильнее, чем выше $\bar{\gamma}_w$. Это объясняется тем, что при высоком ОСШ подслушивающему приёмнику легче и обнаружить передачу информации, и декодировать сигнал. В целом, для большинства систем передачи информации связь через канал, описываемый гиперрэлеевской моделью с глубокими замираниями, является небезопасной.

Серия рисунок 4-6 демонстрирует влияние условий распространения, т.е. параметров модели канала, на условия, при которых достигается заданная вероятность прерывания безопасного сеанса связи. В них приведены результаты для $C_{th} = 0,3$, а мощность либо компонент прямой видимости, либо многопутевых, либо и тех, и других, велика (что существенным образом отличает условия распространения от тех, для которых получены зависимости на рисунке 3). Основное отличие вероятности прерывания для ситуаций на рисунке 4-6 по сравнению со сценариями на рисунке 3 заключается в существенном уменьшении значений и в характерной форме зависимостей, обладающих «полочкой» на уровне высоких вероятностей прерывания при малых ОСШ в основном канале, завершающейся резким спадом, переходящим в плато неснижаемых малых значений вероятности при больших ОСШ. В целом зависимости смещаются в область меньших $\bar{\gamma}_M$ и достигают меньших значений на плато с уменьшением ОСШ в канале утечки, степени общего затенения m_x (рисунок 4), мощности компонент прямой видимости (рисунки 5 и 6).

На рисунке 4 зависимости вероятности прерывания БСС от ОСШ в основном и подслушивающем каналах приведены для ситуации, когда скорость связи ограничена нормированной пропускной способностью 0,3, а канал описывается моделью со

слабым затенением компонент прямой видимости ($m_\gamma = 5$) в отличие от многопутевых компонент и сильным прямым лучом ($\Omega_\chi = -10$ дБ, $\Omega_\gamma = 10$ дБ).

Наличие «полочки» при значениях SOP, близких к 1, свидетельствует о независимости вероятности прерывания безопасного сеанса связи от общей степени затенения компонент прямой видимости и многопутевых компонент. «Полочка» наблюдается в ситуациях, когда подслушивающее устройство имеет лучшее $\bar{\gamma}_W$, чем законный приёмник, т.е. $\bar{\gamma}_M < \bar{\gamma}_W$, например, при $\bar{\gamma}_M < 10$ дБ для линии, соответствующей $\bar{\gamma}_W = 10$ дБ.

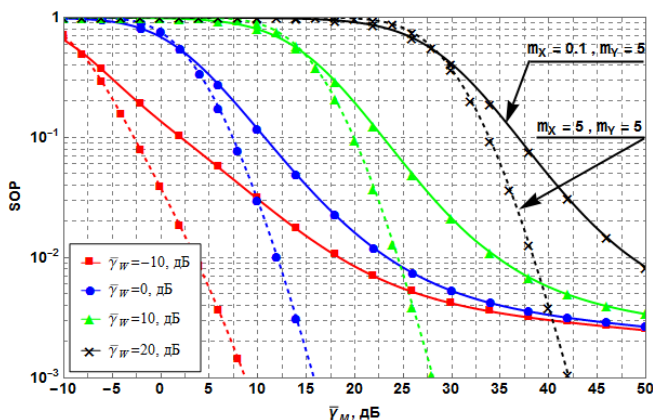


Рис. 4. Влияние общего затенения m_χ на вероятность прерывания БСС для средней нормированной пропускной способности ($C_{th} = 0,3$) в канале со слабым затенением компонент прямой видимости ($m_\gamma = 5$) и сильным прямым лучом ($\Omega_\chi = -10$ дБ, $\Omega_\gamma = 10$ дБ)

Если же рассматривать случай, когда $\bar{\gamma}_M > \bar{\gamma}_W$, то при уменьшении общей степени затенения для обоих каналов сеанс связи станет более безопасным. С ростом $\bar{\gamma}_W$ улучшение вероятности прерывания БСС снижается. Например, при помеховой ситуации в основном канале, на 10 дБ лучшей, чем в канале утечки, при $\bar{\gamma}_W = -10$ дБ происходит снижение SOP с 0,15 до 0,04 (т.е. в 3,75 раз), а при $\bar{\gamma}_W = 10$ дБ – с 0,4 до 0,35 (т.е. в 1,14 раза), что практически нивелирует эффект. При большей разнице в ОСШ основного и

подслушивающего каналов эффект улучшения вероятности прерывания БСС при уменьшении общей степени затенения является более выраженным. Например, пусть подслушивающее устройство имеет среднее ОСШ $\bar{\gamma}_w = 10$ дБ, тогда при $\bar{\gamma}_M = 25$ дБ вероятность прерывания БСС при сильном затенении будет равна 0,07, а при слабой степени затенения – 0,007, то есть изменение составляет целый порядок.

Наличие неснижаемой вероятности прерывания БСС у зависимостей для каналов с сильным общим затенением компонент сигнала говорит о том, что при заданном количестве компонент прямой видимости ($2m_\gamma = 10$), нельзя будет снизить SOP никакими способами, связанными с повышением ОСШ в основном канале.

Стоит отметить, что чем большее ОСШ у подслушивающего устройства, тем большими значениями ОСШ в основном канале будут достигаться заданные значения вероятности прерывания БСС при заданных скоростях передачи. Например, зафиксируем вероятность прерывания безопасного сеанса связи на уровне 10^{-2} при среднем ОСШ подслушивающего устройства $\bar{\gamma}_w = -10$ дБ, тогда при сильных затенениях, то есть при $m_\chi = 0,1$, для обеспечения заданной SOP потребуется обеспечить $\bar{\gamma}_M = 18$ дБ, а в ситуации со слабыми затенениями достаточно будет 4 дБ. При улучшении помеховой обстановки в канале прослушки этот выигрыш в ОСШ законного приёмника уменьшается. Так, при вероятности прерывания безопасного сеанса связи 10^{-2} выигрыш равен 14, 11, 10 и 9 дБ для $\bar{\gamma}_w$, равного -10, 0, 10 и 20 дБ соответственно.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод: для обеспечения достаточно малой вероятности прерывания БСС при большом количестве сильных доминантных компонент и малой мощности рассеянных компонент выгоднее будет канал связи со слабой степенью затенения всех компонент.

На рисунке 5 показана ситуация канала с невысокой степенью общего затенения ($m_\chi = 5$), в котором основной вклад в принятый сигнал вносят многопутевые компоненты, полученные за счёт множественных переотражений. При уменьшении параметра Ω_γ с 10 дБ до -10 дБ компонента прямой видимости для обоих каналов связи практически исчезает, а безопасность сеанса связи повышается. Наличие же прямой видимости в двух каналах одновременно приводит к тому, что безопасность сеанса связи снижается. Например, для обеспечения заданного порога скорости $C_{th} = 0,3$ с вероятностью

прерывания БСС 10^{-4} при $\bar{\gamma}_w = 0$ дБ и прямой видимости необходимо $\bar{\gamma}_M = 29$ дБ, а в ситуации, когда компонента прямой видимости практически исчезает, – всего 19 дБ.

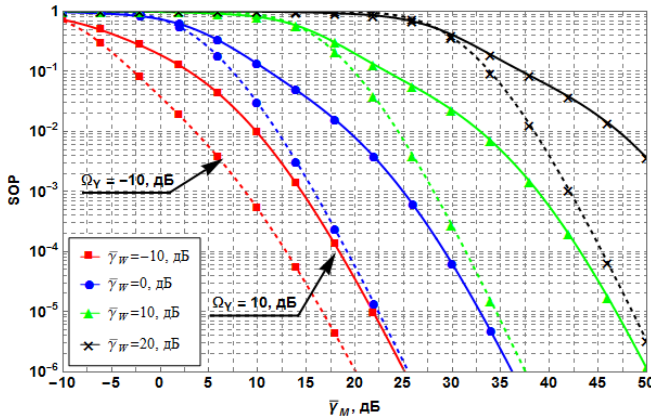


Рис. 5. Влияние средней мощности Ω_X компонент прямой видимости на вероятность прерывания БСС для $C_{th} = 0,3$ в канале с сильным затенением компонент прямой видимости ($m_\gamma = 0,1$), слабым общим затенением ($m_\chi = 5$) и высокой мощностью многопутевых компонент ($\Omega_X = 10$ дБ)

Как показано на рисунке 6, в таком канале существенным фактором, влияющим на безопасность связи, является мощность многопутевых компонент.

Во-первых, она определяет характер поведения кривых вероятности БСС. Видно, что при $\Omega_X = -10$ дБ и $\bar{\gamma}_w = 0$ дБ кривые для $\bar{\gamma}_w = -10$ дБ и $\bar{\gamma}_w = 0$ дБ практически сливаются друг с другом, хотя при $\Omega_X = 10$ дБ они сильно расходятся, на уровне SOP = 10^{-3} расхождение составляет примерно 10 дБ

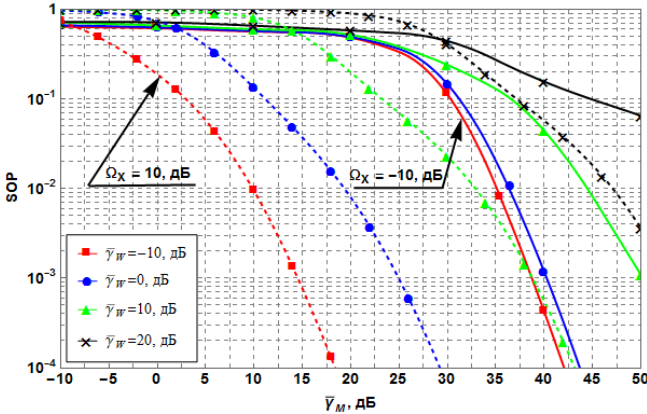


Рис. 6. Влияние средней мощности Ω_X многопутевых компонент на вероятность прерывания БСС для $C_{it} = 0,3$ в канале с сильным затенением компонент прямой видимости ($m_Y = 0,1$), слабым общим затенением ($m_X = 5$) и высокой мощностью компонент прямой видимости ($\Omega_Y = 10$ дБ)

Во-вторых, мощность многопутевых компонент определяет величину энергетического потенциала, необходимого для гарантированно безопасной связи с заданной скоростью. При этом рисунок 6 даёт представление о достижимых возможностях системы связи в ситуации, когда мощность многопутевых компонент мала, а компоненты прямой видимости испытывают сильное затенение.

Так, из рисунка видно, что для обеспечения достаточно низкой вероятности прерывания БСС, например, на уровне 10^{-3} , потребуется значительное ОСШ законного приёмника. Если ситуации с плохой помеховой обстановкой в канале утечки ($\bar{\gamma}_W = -10$ дБ) необходимо $\bar{\gamma}_M = 37$ дБ, что с точки зрения практики является сложно реализуемым, то при условии низких ($\bar{\gamma}_W = 10$ дБ) и очень низких ($\bar{\gamma}_W = 20$ дБ) помех на входе подслушивающего устройства необходимые ОСШ начинаются с 50 дБ, т.е. нереалистичны, поэтому обеспечить вероятность прерывания БСС на заданном уровне не представляется возможным.

6.3. Требования к скорости передачи. На рисунках 7-9 приведены зависимости вероятности прерывания безопасного сеанса связи от нормированной пороговой пропускной способности, ограничивающей скорость передачи информации, при фиксированном среднем ОСШ основного канала $\bar{\gamma}_M = 10$ дБ. В качестве параметра

здесь использовано среднее значение ОСШ в канале прослушки (для значений, соответствующих -10, 0, 10, 20 дБ использованы линии с квадратными, круглыми, треугольными маркерами и маркерами в виде косых крестиков соответственно). Анализируется влияние требований к скорости передачи для различных условий распространения, отображаемых наборами параметров ВХ модели канала, при показателе потерь на трассе $\alpha = 2$.

Для канала с одной компонентой прямой видимости, мощными многопутевыми компонентами и слабым общим затенением при фиксированном среднем ОСШ основного канала $\bar{\gamma}_M = 10$ дБ и различных средних мощностях компоненты прямой видимости Ω_γ , зависимости вероятности прерывания БСС от пороговой пропускной способности БСС в канале приведены на рисунке 7.

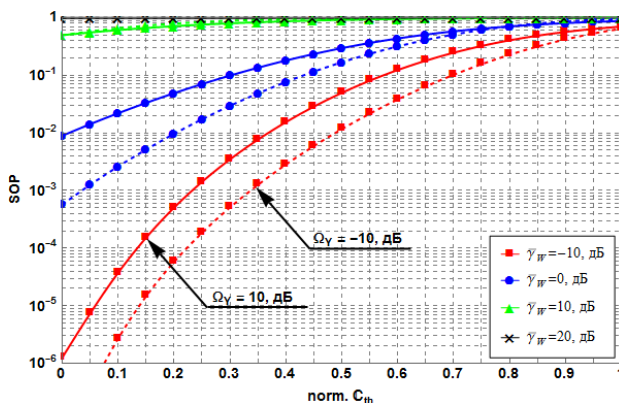


Рис. 7. Зависимость вероятности прерывания БСС от пороговой пропускной способности БСС в канале с одной компонентой прямой видимости, мощными многопутевыми компонентами и слабым общим затенением при фиксированном среднем ОСШ основного канала $\bar{\gamma}_M = 10$ дБ для высокой ($\Omega_\gamma = 10$ дБ) и низкой ($\Omega_\gamma = -10$ дБ) средней мощности компонент прямой видимости

Ситуацию, представленную на рисунке 7, можно трактовать как соответствующую каналу с замираниями Райса, в котором есть одна компонента прямой видимости ($m_\gamma = 0,5$) и наблюдается слабое общее затенение ($m_\chi = 5$). При этом отношение $K = \Omega_\gamma / \Omega_\chi$ определяет фактор Райса, принимающий в данном случае значения $K = 1$ (при $\Omega_\gamma = 10$ дБ) и $K = 0,01$ (при $\Omega_\gamma = -10$ дБ). Благодаря

слабому затенению информацию можно передавать быстро, так что вероятность прерывания БСС достигает низких значений.

Семейство сплошных линий, соответствующих высокой средней мощности компонент прямой видимости, проходит выше, чем семейство пунктирных линий, отображающих ситуацию $\Omega_y = -10$ дБ. Это означает, что появление прямого луча с высокой мощностью повышает вероятность прерывания БСС, то есть, безопасность связи становится сложнее обеспечить. Ухудшение ситуации существенно больше при низкой нормированной пропускной способности C_{th} (в 15 раз при $C_{th} = 0,1$ и только в 1,5 раза – при $C_{th} = 0,9$ при неизменном $\bar{\gamma}_w = -10$ дБ, красные линии) и при высоком среднем ОСШ в канале утечки (в 15 раз при $\bar{\gamma}_w = -10$ дБ и в 10 раз при $\bar{\gamma}_w = 0$ дБ при неизменном $C_{th} = 0,1$). При дальнейшем увеличении $\bar{\gamma}_w$ влияние мощности прямой компоненты перестаёт сказываться, а сеанс связи перестаёт быть безопасным.

Для канала с множеством затенённых компонент прямой видимости (для примера 10 компонент $m_y = 5$), слабыми многопутевыми компонентами ($\Omega_x = -10$ дБ) и сильным общим затенением ($m_x = 0,5$) при фиксированном среднем ОСШ основного канала $\bar{\gamma}_M = 10$ дБ и различных средних мощностях компоненты прямой видимости Ω_y зависимости вероятности прерывания БСС от пороговой пропускной способности БСС в канале приведены на рисунке 8. Сеанс связи в таких условиях будет безопасным с меньшей вероятностью (SOP выше, чем в ситуации канала на рисунке 7). Благодаря представлению зависимостей только в области значений высоких вероятностей прерывания безопасного сеанса связи, на рисунке 7 является заметным эффект смены характера влияния мощности компонент прямой видимости при повышении ОСШ в канале прослушки до и более ОСШ в основном канале. При $\bar{\gamma}_w = -10$ дБ (что на 20 дБ ниже, чем $\bar{\gamma}_M$) добавление энергии компонентам прямой видимости понижает вероятность прерывания БСС, причём тем сильнее, чем ниже пороговое значение нормированной пропускной способности C_{th} (красная пунктирная линия проходит выше красной сплошной во всем диапазоне значений C_{th}). При $\bar{\gamma}_w = 10$ и 20 дБ (что равно или на 10 дБ больше, чем $\bar{\gamma}_M$, соответственно) смена ситуации с $\Omega_y = -10$ дБ на $\Omega_y = 10$ дБ уже повышает вероятность прерывания БСС, а величина изменения

зависит от C_{th} . В промежуточной ситуации, когда $\bar{\gamma}_W = \bar{\gamma}_M = 10$ дБ, существует такое пороговое значение C_{th} , соответствующее точке пересечения синей сплошной и пунктирной линий, ниже которого усиление компонент прямой видимости влияет положительно, а выше отрицательно.

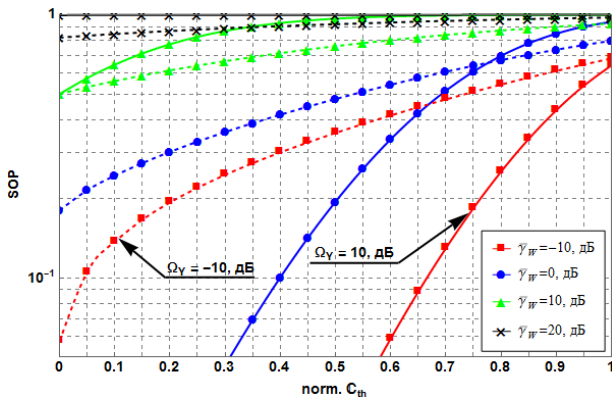


Рис. 8. Зависимость вероятности прерывания БСС от пороговой пропускной способности БСС в канале с 10 компонентами прямой видимости ($m_y = 5$), слабыми многопутевыми компонентами ($\Omega_x = -10$ дБ) и слабым общим затенением ($m_x = 0,5$) при фиксированном среднем ОСШ основного канала $\bar{\gamma}_M = 10$ дБ для высокой ($\Omega_Y = 10$ дБ) и низкой ($\Omega_Y = -10$ дБ) средней мощности компонент прямой видимости

Ещё две показательные ситуации для сильного сигнала ($\Omega_x = 10$ дБ, $\Omega_Y = 10$ дБ) при $\bar{\gamma}_M = 10$ дБ приведены на рисунке 9: практическое отсутствие затенения и компонент прямой видимости, и многопутевых компонент ($m_x = m_y = 5$, сплошные линии) и дружное сильное затенение всех компонент сигнала ($m_x = m_y = 0,5$, пунктирные линии).

Влияние степени затенения компонент сигнала проявляется аналогично влиянию мощности компонент прямой видимости. При $\bar{\gamma}_W = -10$ дБ уменьшение дружного затенения компонент сигнала понижает вероятность прерывания БСС, причём тем сильнее, чем ниже пороговое значение нормированной пропускной способности C_{th} (красная пунктирная линия проходит выше красной сплошной во всем

диапазоне значений C_{th}). При $\bar{\gamma}_W = 10$ и 20 дБ смена степени затенения с большой на малую уже повышает вероятность прерывания БСС, а величина изменения зависит от C_{th} . В промежуточной ситуации, когда $\bar{\gamma}_W = \bar{\gamma}_M = 10$ дБ, наблюдается зависимость, аналогичная вышеописанной.

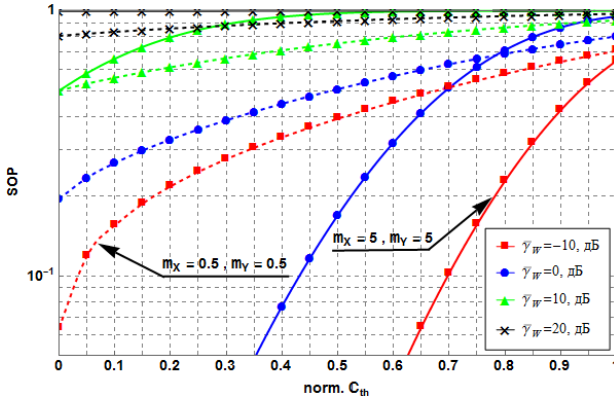


Рис. 9. Зависимость вероятности прерывания БСС от пороговой пропускной способности БСС при фиксированном среднем ОСШ основного канала $\bar{\gamma}_M = 10$ дБ для сильного сигнала ($\Omega_X = 10$ дБ, $\Omega_Y = 10$ дБ) и различной степени затенения

Таким образом, если в Гауссовском канале при $\bar{\gamma}_W \geq \bar{\gamma}_M$ нет такой пропускной способности, при которой сеанс связи был бы безопасным, то, как демонстрируют рисунок 8 и 9, при наличии затенений безопасный сеанс связи возможен до некоторого значения C_{th} , зависящего от соотношения между ОСШ в основном канале и канале прослушки.

Как показывает сравнение зависимостей на рисунке 9 с зависимостями, приведёнными на рисунке 7 сплошными линиями, в случае сильного сигнала и $\bar{\gamma}_M = 10$ дБ вероятность прерывания безопасного сеанса связи при общем слабом затенении, в основном приходящемся на компоненты прямой видимости, выше, чем в случае дружно слабо затенённых компонент. Это означает, что в канале с $m_X = m_Y = 5$ с той же вероятностью можно гарантировать более высокие скорости при безопасной передаче, например, при SOP 0,1

одинаковое затенение компонент обеспечит рост C_{th} с 0,51 до 0,70 при $\bar{\gamma}_w = -10$ дБ и с 0,30 до 0,43 при $\bar{\gamma}_w = 0$ дБ.

При выставлении высокой пороговой пропускной способности БСС, например, равной 0,9, эффект, связанный с затенениями, практически нивелируется и вероятность прерывания БСС будет всегда на высоком уровне вне зависимости от наличия или отсутствия затенений в канале связи.

6.4. Размещение законного и подслушивающего приёмников друг относительно друга. Рисунки 10 и 11 демонстрируют зависимость вероятности прерывания безопасного сеанса связи от отношения расстояний до подслушивающего и законного приёмников d_w/d_M на примерах ситуации с большим количеством ($2m_Y = 10$) мощных ($\Omega_Y = 5$ или 10 дБ) и слабо затенённых доминантных компонент при малой мощности рассеянных компонент ($\Omega_X = -10$ дБ) и фиксированном пороге пропускной способности БСС ($C_{th} = 0,6$) и различных степенях общего затенения m_X . Показатель ослабления сигнала в среде α зафиксирован на уровне 3, что соответствует городской местности [24].

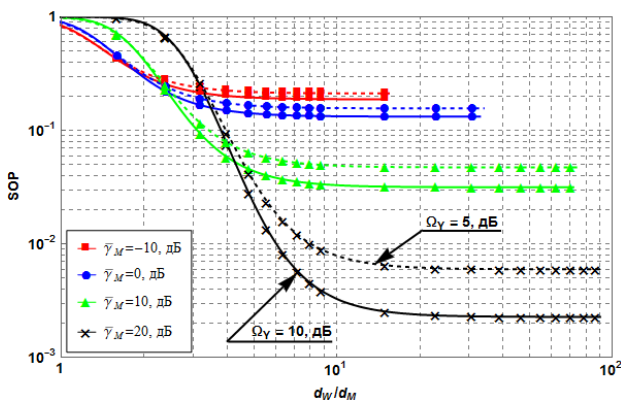


Рис. 10. Влияние отношения расстояний до подслушивающего и законного приёмников при $m_Y = 1$, $\Omega_X = -10$ дБ, $\Omega_Y = 5$ или 10 дБ, $C_{th} = 0,6$, $\alpha = 3$ для небольших затенений $m_X = 1$

Спад SOP с ростом d_w/d_M при всех наборах других параметров обладает общей особенностью: существует такое значение

$(d_W / d_M)_{\text{порог}}$, начиная с которого наблюдается неснижаемый уровень вероятности прерывания БСС SOP_{min} . Пороговое значение $(d_W / d_M)_{\text{порог}}$ лежит в области около значения 10; его величина, а также значение SOP_{min} зависят от параметров канала и соотношения сигнал-шум в основном канале.

С ростом $\bar{\gamma}_M$ выход на эту «полочку» происходит при больших относительных расстояниях, а её уровень становится ниже. Например, при $\Omega_Y = 10$ дБ (сплошные линии на рисунке 10) рост $\bar{\gamma}_M$ с -10 дБ до 20 дБ обеспечивает появление неснижаемой вероятности $SOP_{\text{min}} = 0,0025$ вместо 0,23 лишь при $(d_W / d_M)_{\text{порог}} = 15$ вместо 3,2.

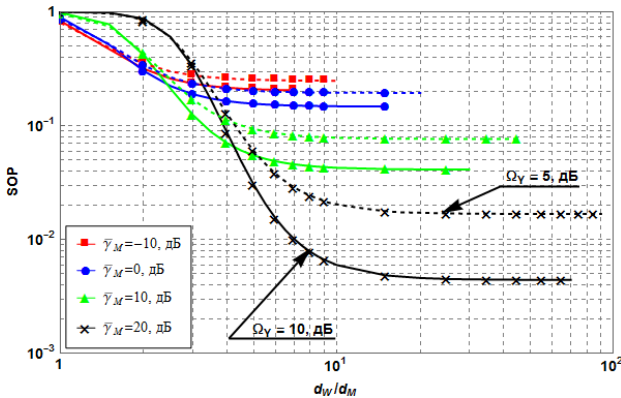


Рис. 11. Влияние отношения расстояний до подслушивающего и законного приёмников при $m_Y = 0,5$, $\Omega_X = -10$ дБ, $\Omega_Y = 5$ или 10 дБ, $C_{th} = 0,6$, $\alpha = 3$ для глубоких затенений $m_X = 0,5$

Величина мощности компонент прямой видимости, а также общая степень затенения практически не влияют на пороговое отношение дальностей приёмников, но определяют величину наилучшей достижимой вероятности прерывания БСС SOP_{min} . Например, увеличение затенения (m_X уменьшается с 1 до 0,5) при $\bar{\gamma}_M = 20$ дБ порождает повышение SOP_{min} с 0,006 до 0,019 при $\Omega_Y = 5$ дБ (пунктирные чёрные линии на рисунках 10 и 11) и с 0,0023 до 0,0045 при $\Omega_Y = 10$ дБ (сплошные чёрные линии).

Общая степень затенения сигнала также влияет на величину изменения вероятности прерывания БСС при увеличении мощности компонент прямой видимости.

Сопоставление интервалов ΔSOP_{\min} между абсолютными значениями SOP_{\min} для красных и чёрных линий на рисунках 10 и 11 показывает: по мере уменьшения m_x с 1 до 0,5 ΔSOP_{\min} растёт с 0,02 до 0,04 (в 2 раза) при $\bar{\gamma}_M = -10$ дБ и с 0,0037 до 0,0135 (в 2 раза) при $\bar{\gamma}_M = 20$ дБ.

7. Прогноз безопасности связи. Представляет интерес продемонстрировать оценки для вероятности прерывания безопасного сеанса связи и величины влияния на неё различных факторов на опубликованном примере реализованной передачи информации, для которого известны оценки качества передачи (вероятности ошибки, скорости передачи информации), как реально достигнутого в ходе эксперимента, так и прогнозы достижимых показателей качества при использовании наблюдаемого канала при других значениях доступных для изменения величин (в том числе ОСШ в канале – за счёт изменения мощности передатчика).

Будем опираться на эксперимент [30] с передачей данных в среде с мелкомасштабными замираниями в диапазоне 28 ГГц. В [16] авторы ВХ-модели оценили параметры этого канала путём минимизации тестовой статистики Колмогорова-Смирнова между эмпирическим распределением и предложенной моделью. Средние мощности многопутевых компонент и компонент прямой видимости сигнала и параметры затенения, извлечённые ими, составляют: $\Omega_x = -2$ дБ и $\Omega_y = 0$ дБ, $m_x = 0,65$, $m_y = 1,95$. Такие значения соответствуют каналу с сильным затенением практически четырёх многолучевых компонент, умеренным затенением компонент прямой видимости и почти равной средней мощностью многопутевых компонент и компонент прямой видимости. От системы передачи требовалась нормированная пропускная способность, равная 0,1.

Для таких условий была оценена с помощью полученных выражений вероятность прерывания безопасного сеанса связи. Результаты приведены на рисунках 12-14.

Как показывает рисунок 12, для данного канала пороговое значение d_w/d_M , при превышении которого увеличение ОСШ в основном канале даёт положительный результат (снижает SOP), равно 2. Вероятность прерывания безопасного сеанса связи перестаёт улучшаться при превышении (т.е. приближении законного приёмника

к передатчику и неподвижном прослушивающем приёмнике) d_w/d_M чуть ниже 10 для ОСШ в основном канале 10 дБ.

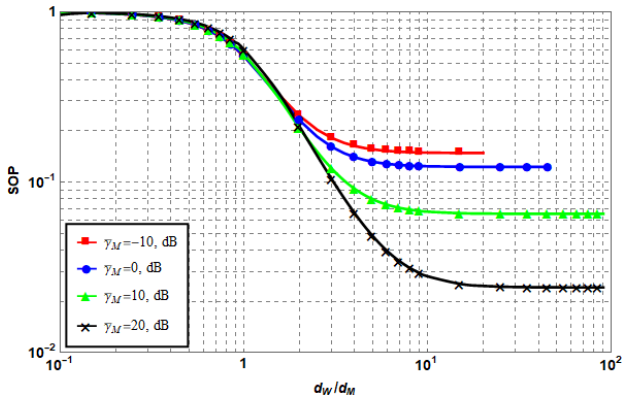


Рис. 12. Зависимость вероятности прерывания безопасного сеанса связи от отношения расстояний до подслушивающего и законного приёмников при $\alpha = 3$

Нормированная пропускная способность 0,1 при вероятности прерывания безопасного сеанса связи около 0,1 может быть для описываемого канала достигнута при ОСШ в основном канале 25 дБ, если в канале прослушки ОСШ равно 10 дБ (рисунок 13).

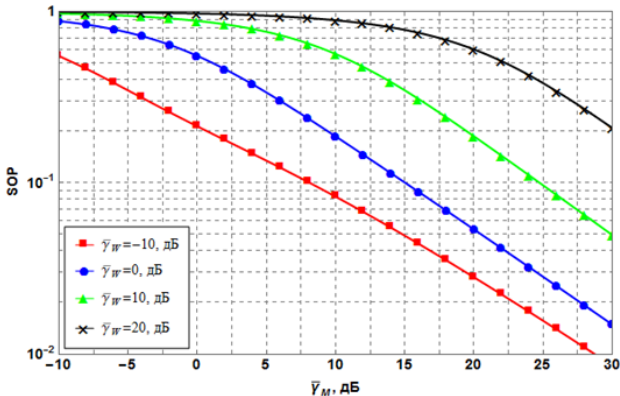


Рис. 13. Зависимость вероятности прерывания безопасного сеанса связи от ОСШ в основном канале

Рисунок 14 демонстрирует возможность управления вероятностью прерывания безопасного сеанса связи за счёт изменения

величины показателя потерь при распространении сигнала. В зависимости от среднего ОСШ в основном канале с таким набором параметров существуют значения α , вплоть до которых имеет смысл применять технические решения, способные повлиять в конечном итоге на величину SOP, в том числе использовать интеллектуальные рассеивающие панели [24-26]. При $\bar{\gamma}_M = 10$ дБ и $d_w / d_M = 4$ α не должно превышать 4, т.к. при больших α зависимости входят в режим насыщения.

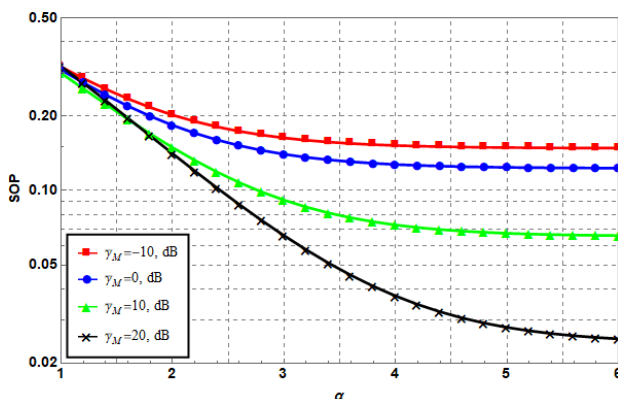


Рис. 14. Зависимость вероятности прерывания безопасного сеанса связи от показателя потерь на трассе при $d_w / d_M = 4$

8. Заключение. В работе получено аналитическое выражение в замкнутой форме для вероятности прерывания безопасного сеанса связи как показателя безопасности системы связи на физическом уровне для случая многолучевого ВХ канала с замираниями и наличием канала утечки. Был выполнен анализ для различных значений параметров: среднего значения ОСШ в основном канале и канале прослушки, эффективного значения показателя потерь на пути распространения сигнала, относительного расстояния между законным приемником и прослушивающим приёмником и пороговой пропускной способности, нормированной на пропускную способность гладкого гауссова канала.

Проведённый для наиболее типичных случаев свойств канала анализ вероятности прерывания безопасного сеанса связи показал:

- вероятность прерывания безопасного сеанса связи является высокой и не зависит от общей степени затенения компонент сигнала в

ситуации, когда подслушивающее устройство имеет лучшие шумовые характеристики, чем законный приёмник;

– для каналов с сильным общим затенением компонент сигнала существует неснижаемая с ростом среднего ОСШ в основном канале вероятность прерывания безопасного сеанса связи;

– величина энергетического потенциала, необходимого для гарантированной безопасной связи с заданной скоростью, определяется в первую очередь мощностью многопутевых компонент;

– существует такое пороговое значение минимальной требуемой скорости передачи, ниже которого усиление компонент прямой видимости или исчезновение общего затенения компонент сигнала уменьшает вероятность прерывания безопасного сеанса связи, а выше – повышает её, что наиболее ярко проявляется при одинаковых значениях ОСШ в основном канале и канале прослушки, равных 10 дБ;

– система связи при распространении сигнала в гиперрэлеевском канале с глубокими замираниями во многих практических случаях оказывается небезопасной с точки зрения защиты информации.

Полученные выражения, выводы и численные оценки могут быть использованы в рамках теоретических исследований для понимания влияния поведения сложных многопутевых каналов связи на характеристики безопасности систем связи. Они также применимы в рамках практических (инженерных) приложений, для обоснования рекомендаций по выбору или искусственному формированию структуры и условий распространения сигнала в зависимости от предъявляемых требований к вероятности прерывания безопасного сеанса связи и минимальной скорости передачи.

Литература

1. Kalyani V.L., Sharma D. IoT: machine to machine (M2M), device to device (D2D) internet of everything (IoE) and human to human (H2H): future of communication // Journal of Management Engineering and Information Technology (JMEIT). 2015. vol. 2. no. 6. pp. 17-23.
2. Jurgen R.K. (ed.). V2V/V2I communications for improved road safety and efficiency. // SAE International. 2012.
3. Lai K., Yanushkevich S.N., Shmerko V.P. Intelligent stress monitoring assistant for first responders // IEEE Access. 2021. vol. 9. pp. 25314-25329.
4. Shrestha R. et al. Evolution of V2X communication and integration of blockchain for security enhancements // Electronics. 2020. vol. 9. no. 9. p. 1338.
5. Qian Y., Ye F., Chen H.-H. Security in V2X communications // Security in Wireless Communication Networks, IEEE, 2022. pp. 311-331. doi: 10.1002/9781119244400.ch15.

6. Hasan M. et al. Securing vehicle-to-everything (V2X) communication platforms // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2020. vol. 5. no. 4. pp. 693-713. doi: 10.1109/TIV.2020.2987430.
7. Hamamreh J.M., Furqan H.M., Arslan H. Classifications and applications of physical layer security techniques for confidentiality: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. vol. 21. no. 2. pp. 1773-1828. doi: 10.1109/COMST.2018.2878035.
8. Sánchez J.D.V. et al. Survey on physical layer security for 5G wireless networks // Annals of Telecommunications. 2021. vol. 76. no. 3. pp. 155-174.
9. Wu Y. et al. A survey of physical layer security techniques for 5G wireless networks and challenges ahead // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2018. vol. 36. no. 4. pp. 679-695. doi: 10.1109/JSAC.2018.2825560.
10. Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling // Recommendations ITU-R P.1057-6 (08/2019). URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1057-6-201908-I!!PDF-E.pdf
11. Hyadi A., Rezki Z., Alouini M.S. An overview of physical layer security in wireless communication systems with CSIT uncertainty // IEEE Access. 2016. vol. 4. pp. 6121-6132. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2612585.
12. Li S. et al. Amount of secrecy loss: a novel metric for physical layer security analysis // IEEE Communications Letters. 2020. vol. 24. no. 8. pp. 1626-1630. doi: 10.1109/LCOMM.2020.2995731.
13. Barros J., Rodrigues M.R.D. Secrecy capacity of wireless channels // 2006 IEEE international symposium on information theory. IEEE. 2006. pp. 356-360. doi: 10.1109/ISIT.2006.261613.
14. Fadnis C., Katiyar B. Review of higher order statistics for selection combining scheme in Weibull fading channel // 2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC). IEEE. 2017. pp. 648-651. doi: 10.1109/CTCEEC.2017.8455182.
15. Peppas K.P., Nistazakis H.E., Tombras G.S. An overview of the physical insight and the various performance metrics of fading channels in wireless communication systems // Advanced trends in wireless communications. 2011. pp. 1-22. doi: 10.5772/15028.
16. Olutayo A., Cheng J., Holzman J.F. A new statistical channel model for emerging wireless communication systems // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2020. vol. 1. pp. 916-926. doi: 10.1109/ojcoms.2020.3008161.
17. Gvozдарев A.S. A novel unified framework for energy-based spectrum sensing analysis in the presence of fading // Sensors. 2022. vol. 22. no. 5. pp. 1742. doi: 10.3390/s22051742.
18. Olutayo A., Cheng J., Holzman J.F. Performance bounds for diversity receptions over a new fading model with arbitrary branch correlation // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2020. vol. 2020. no. 1. pp. 1-26.
19. Wyner A.D. The wire-tap channel // Bell system technical journal. 1975. vol. 54. no. 8. pp. 1355-1387. doi: 10.1002/j.1538-7305.1975.tb02040.x.
20. Liang Y. et al. Information theoretic security // Foundations and Trends in Communications and Information Theory. 2009. vol. 5. no. 4-5. pp. 355-580.
21. Liu R. Securing wireless communications at the physical layer. New York, NY, USA: Springer, 2010. vol. 7.
22. Olver F.W.J. et al. NIST digital library of mathematical functions, release 1.0.22. 2019. URL: <http://dlmf.nist.gov/> (дата обращения: 1.07.2022).
23. Beaulieu N.C., Xie J. A novel fading model for channels with multiple dominant specular components // IEEE Wireless Communications Letters. 2014. vol. 4. no. 1. pp. 54-57. doi: 10.1109/LWC.2014.2367501.

24. Cho Y. S. et al. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. John Wiley & Sons, 2010.
25. Li Z. et al. Enhancing indoor mmWave wireless coverage: small-cell densification or reconfigurable intelligent surfaces deployment? // IEEE Wireless Communications Letters. 2021. vol. 10. no. 11. pp. 2547-2551. doi: 10.1109/LWC.2021.3106821.
26. Gvozдарев А.С., Патралов П.Е., Артемова Т.К., Мурин Д.М. Reconfigurable intelligent surfaces' impact on the physical layer security of the Beaulieu-Xie shadowed fading channel // 2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). 2022. pp. 1-5.
27. Bender C.M., Orszag S., Orszag S.A. Advanced mathematical methods for scientists and engineers I: Asymptotic methods and perturbation theory. // Springer Science & Business Media. 1999. vol. 1.
28. Shannon C.E. Communication theory of secrecy systems // The Bell system technical journal. 1949. vol. 28. no. 4. pp. 656-715.
29. Frolik J. A case for considering hyper-Rayleigh fading channels // IEEE transactions on wireless communications. 2007. vol. 6. no. 4. pp. 1235-1239. doi: 10.1109/TWC.2007.348319.
30. Samimi M.K. et al. 28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels // 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE. 2016. pp. 1-6. doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7503970.

Гвоздарев Алексей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра интеллектуальных информационных радиофизических систем физического факультета, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова. Область научных интересов: статистическая обработка сигналов в беспроводных системах связи, применение методов математической статистики в задачах обработки и передачи информации. Число научных публикаций — 80. a.gvozдарев@uniyar.ac.ru; улица Советская, 14, 150003, Ярославль, Россия; р.т.: +7(4852)797-770.

Артемова Татьяна Константиновна — канд. физ.-мат. наук, доцент, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова. Область научных интересов: обработка сигналов в беспроводных системах связи, антенны, микроволновая техника и технологии. Число научных публикаций — 66. artemova@uniyar.ac.ru; улица Советская, 14, 150003, Ярославль, Россия; р.т.: +7(4852)797-770.

Патралов Павел Евгеньевич — магистр, кафедра интеллектуальных информационных радиофизических систем физического факультета, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова. Область научных интересов: математическая статистика, теория вероятности, применение методов математического моделирования теории связи. Число научных публикаций — 5. p.patralov1@stud.uniyar.ac.ru; улица Советская, 14, 150003, Ярославль, Россия; р.т.: +7(4852)797-770.

Мурин Дмитрий Михайлович — канд. физ.-мат. наук, директор, институт информационной безопасности, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова. Область научных интересов: информационная безопасность различных систем, блокчейн-системы. Число научных публикаций — 17. d.murin@uniyar.ac.ru; улица Советская, 14, 150003, Ярославль, Россия; р.т.: +7(4852)788-591.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-29-01458).

A. GVOZDAREV, T. ARTEMOVA, P. PATRALOV, D. MURIN
**THE STATISTICAL ANALYSIS OF THE SECURITY FOR A
WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM WITH A BEAULIEU-
XIE SHADOWED FADING MODEL CHANNEL**

Gvozdev A., Artemova T., Patralov P., Murin D. The Statistical Analysis of the Security for a Wireless Communication System with a Beaulieu-Xie Shadowed Fading Model Channel.

Abstract. The paper considers the problem of a wireless communication system's physical level security for a multipath signal propagation channel and the presence of a wiretap channel. To generalize the propagation effects, the Beaulieu-Xie shadowed channel model was assumed. To describe the security of the information transfer process, such a metric as the secure outage probability of was considered. An analytical expression of the secure outage probability was obtained and analyzed depending on the characteristics of the channel and the communication system: the average value of the signal-to-noise ratio in the main channel and the wiretap channel, the effective path-loss exponent, the relative distance between the legitimate receiver and the wiretap and the threshold bandwidth, normalized to the bandwidth of a smooth Gaussian channel. The analysis considers the sets of parameters that cover all practically important scenarios for the functioning of a wireless communication systems: both deep fading (corresponding to the hyper-Rayleigh scenario) and small fading, both in the case of a significant line-of-sight component and a significant number of multipath clusters, and with significant shadowing of the dominant component and a small number of multipath waves, as well as all intermediate options. It is found out that the value of the energy requirements for guaranteed secure communication at a given speed is determined primarily by the power of multipath components, as well as the existence of an irreducible secure outage probability of a communication session with an increase for channels with strong overall shadowing of the signal components, which from a practical point of view is important to take into account when imposing requirements for the values of the signal-to-noise ratio and the data transfer rate in the direct channel, providing the desired degree of security of the wireless communication session.

Keywords: wireless channel, fading, shadowing, Beaulieu-Xie shadowed fading model, secrecy outage probability.

References

1. Kalyani V.L., Sharma D. IoT: machine to machine (M2M), device to device (D2D) internet of everything (IoE) and human to human (H2H): future of communication // Journal of Management Engineering and Information Technology (JMEIT). 2015. vol. 2. no. 6. pp. 17-23.
2. Jurgen R.K. (ed.). V2V/V2I communications for improved road safety and efficiency. // SAE International. 2012.
3. Lai K., Yanushkevich S.N., Shmerko V.P. Intelligent stress monitoring assistant for first responders // IEEE Access. 2021. vol. 9. pp. 25314-25329.
4. Shrestha R. et al. Evolution of V2X communication and integration of blockchain for security enhancements // Electronics. 2020. vol. 9. no. 9. p. 1338.
5. Qian Y., Ye F., Chen H.-H. Security in V2X communications // Security in Wireless Communication Networks, IEEE, 2022. pp. 311-331. doi: 10.1002/9781119244400.ch15.

6. Hasan M. et al. Securing vehicle-to-everything (V2X) communication platforms // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2020. vol. 5. no. 4. pp. 693-713. doi: 10.1109/TIV.2020.2987430.
7. Hamamreh J.M., Furqan H.M., Arslan H. Classifications and applications of physical layer security techniques for confidentiality: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. vol. 21. no. 2. pp. 1773-1828. doi: 10.1109/COMST.2018.2878035.
8. Sánchez J.D.V. et al. Survey on physical layer security for 5G wireless networks // Annals of Telecommunications. 2021. vol. 76. no. 3. pp. 155-174.
9. Wu Y. et al. A survey of physical layer security techniques for 5G wireless networks and challenges ahead // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2018. vol. 36. no. 4. pp. 679-695. doi: 10.1109/JSAC.2018.2825560.
10. Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling // Recommendations ITU-R P.1057-6 (08/2019). URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1057-6-201908-I!!PDF-E.pdf
11. Hyadi A., Rezki Z., Alouini M.S. An overview of physical layer security in wireless communication systems with CSIT uncertainty // IEEE Access. 2016. vol. 4. pp. 6121-6132. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2612585.
12. Li S. et al. Amount of secrecy loss: a novel metric for physical layer security analysis // IEEE Communications Letters. 2020. vol. 24. no. 8. pp. 1626-1630. doi: 10.1109/LCOMM.2020.2995731.
13. Barros J., Rodrigues M.R.D. Secrecy capacity of wireless channels // 2006 IEEE international symposium on information theory. IEEE. 2006. pp. 356-360. doi: 10.1109/ISIT.2006.261613.
14. Fadnis C., Katiyar B. Review of higher order statistics for selection combining scheme in Weibull fading channel // 2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC). IEEE. 2017. pp. 648-651. doi: 10.1109/CTCEEC.2017.8455182.
15. Peppas K.P., Nistazakis H.E., Tombras G.S. An overview of the physical insight and the various performance metrics of fading channels in wireless communication systems // Advanced trends in wireless communications. 2011. pp. 1-22. doi: 10.5772/15028.
16. Olutayo A., Cheng J., Holzman J.F. A new statistical channel model for emerging wireless communication systems // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2020. vol. 1. pp. 916-926. doi: 10.1109/ojcoms.2020.3008161.
17. Gvozdev A.S. A novel unified framework for energy-based spectrum sensing analysis in the presence of fading // Sensors. 2022. vol. 22. no. 5. pp. 1742. doi: 10.3390/s22051742.
18. Olutayo A., Cheng J., Holzman J.F. Performance bounds for diversity receptions over a new fading model with arbitrary branch correlation // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2020. vol. 2020. no. 1. pp. 1-26.
19. Wyner A.D. The wire-tap channel // Bell system technical journal. 1975. vol. 54. no. 8. pp. 1355-1387. doi: 10.1002/j.1538-7305.1975.tb02040.x.
20. Liang Y. et al. Information theoretic security // Foundations and Trends in Communications and Information Theory. 2009. vol. 5. no. 4-5. pp. 355-580.
21. Liu R. Securing wireless communications at the physical layer. New York, NY, USA: Springer, 2010. vol. 7.
22. Olver F.W.J. et al. NIST digital library of mathematical functions, release 1.0.22. 2019. URL: <http://dlmf.nist.gov/> (дата обращения: 1.07.2022).
23. Beaulieu N.C., Xie J. A novel fading model for channels with multiple dominant specular components // IEEE Wireless Communications Letters. 2014. vol. 4. no. 1. pp. 54-57. doi: 10.1109/LWC.2014.2367501.

24. Cho Y. S. et al. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. John Wiley & Sons, 2010.
25. Li Z. et al. Enhancing indoor mmWave wireless coverage: small-cell densification or reconfigurable intelligent surfaces deployment? // IEEE Wireless Communications Letters. 2021. vol. 10. no. 11. pp. 2547-2551. doi: 10.1109/LWC.2021.3106821.
26. Gvozdev A.S., Patralov P.E., Artemova T.K., Murin D.M. Reconfigurable intelligent surfaces' impact on the physical layer security of the Beaulieu-Xie shadowed fading channel // 2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). 2022. pp. 1-5.
27. Bender C.M., Orszag S., Orszag S.A. Advanced mathematical methods for scientists and engineers I: Asymptotic methods and perturbation theory. // Springer Science & Business Media. 1999. vol. 1.
28. Shannon C.E. Communication theory of secrecy systems // The Bell system technical journal. 1949. vol. 28. no. 4. pp. 656-715.
29. Frolik J. A case for considering hyper-Rayleigh fading channels // IEEE transactions on wireless communications. 2007. vol. 6. no. 4. pp. 1235-1239. doi: 10.1109/TWC.2007.348319.
30. Samimi M.K. et al. 28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels // 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE. 2016. pp. 1-6. doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7503970.

Gvozdev Aleksey — Ph.D., Associate professor, Department of intelligent radiophysical information systems (physics faculty), P.G. Demidov Yaroslavl State University. Research interests: statistical signal processing in wireless communication systems, application of mathematical statistics methods for information transmission and processing. The number of publications — 80. a.gvozdev@uniyar.ac.ru; 14, Sovetskaya St., 150003, Yaroslavl, Russia; office phone: +7(4852)797-770.

Artemova Tatiana — Ph.D., Associate professor, P.G. Demidov Yaroslavl State University. Research interests: signal processing in wireless communication systems, antennas, microwave devices and technologies. The number of publications — 66. artemova@uniyar.ac.ru; 14, Sovetskaya St., 150003, Yaroslavl, Russia; office phone: +7(4852)797-770.

Patralov Pavel — Master, Department of intelligent radiophysical information systems (physics faculty), P.G. Demidov Yaroslavl State University. Research interests: mathematical statistics, probability theory, application of mathematical modeling in wireless communications. The number of publications — 5. p.patralov1@stud.uniyar.ac.ru; 14, Sovetskaya St., 150003, Yaroslavl, Russia; office phone: +7(4852)797-770.

Murin Dmitriy — Ph.D., Director, Information security institute, P.G. Demidov Yaroslavl State University. Research interests: information safety of various systems, blockchain systems. The number of publications — 17. d.murin@uniyar.ac.ru; 14, Sovetskaya St., 150003, Yaroslavl, Russia; office phone: +7(4852)788-591.

Acknowledgements. This work was supported by Russian Science Foundation under Grant 22-29-01458.