Оценка помехозащищенности линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты

Assessing immunity to interference of radio communication lines with slow frequency-hopping spread spectrum

Дворников / Dvornikov S.
Сергей Викторович
(practicdsv@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» (ВАС им. С. М. Буденного) МО РФ,
профессор кафедры радиосвязи.
г. Санкт-Петербург

Семисошенко / Semisoshenko M.
Михаил Александрович
(practicdsv@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор.
ВАС им. С. М. Буденного,
профессор кафедры радиосвязи.
г. Санкт-Петербург

Домбровский / Dombrovsky Y.
Ярослав Аркадьевич
(practicdsv@yandex.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
начальник факультета автоматизированных систем управления.
г. Санкт-Петербург

Гулидов / Gulidov A.
Алексей Анатольевич
(practicdsv@yandex.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
соискатель кафедры радиосвязи.
г. Санкт-Петербург

Иванов / Ivanov R.
Роман Вячеславович
(practicdsv@yandex.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
соискатель кафедры радиосвязи.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: линия радиосвязи – radio communication lines; медленная ППРЧ – slow FHSS; оценка помехозащищенности – immunity assessment; заградительные помехи – barrage jamming.

Рассматриваются вопросы оценки функционирования линий радиосвязи, работающих в режиме с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), при постановке заградительных помех. В качестве показателя эффективности функционирования линий радиосвязи с дискретными видами модуляции использована вероятность ошибки приема элемента сигнала. Приводятся аналитические зависимости приема элемента сигнала с относительной фазовой манипуляцией в радиоканале с постоянными параметрами в зависимости от величины подавляемого участка диапазона частот. Показано, что без дополнительных мер по повышению помехозащищенности линий радиосвязи с ППРЧ их подавление обеспечивается при достаточно незначительном частотном перекрытии помехой их рабочего диапазона. Приводятся данные расчета, подтверждающие правомерность сделанных выводов.

Issues in assessing functioning of radio communication lines operating with slow slow frequency-hopping spread spectrum (FHSS), at setting barrage jamming are considered. As function efficacy index for radio communication lines with discrete modulation types possibility of signal element error is used. Analytical dependencies of signal element receipt with relative phase keying in radio channel with constant parameters depending on the value of radio communication sector with FHSS to be suppressed are given, their suppression is ensured at insignificant frequency overlap by interference of their operating range. Calculation data are given that prove legitimacy of conclusions made.

Введение

Одним из важнейших показателей, характеризующих линии радиосвязи (ЛРС), является их помехозащищенность [1], характеризующая способность обеспечения требуемого качества связи при воздействии преднамеренных помех. Согласно [2, 3] помехозащищенность ЛРС количественно оценивается значением

коэффициента подавления $K_П$, определяемым отношением минимально необходимой мощности помехи к мощности сигнала $P_{пом}/P_с$, при котором обеспечивается заданный уровень деструктивного урона, наносимого в результате радиоэлектронного подавления (РЭП) со стороны противоборствующей стороны. В свою очередь, коэффициент подавления представляет собой обратную величину показателю, характеризующему качество радиосвязи, определяемому отношением мощности сигнала к мощности помехи $P_с/P_{пом}$ [4]. Следовательно, помехозащищенность ЛРС также может характеризоваться допустимой вероятностью ошибки при приеме бита p_B [5].

В настоящее время для защиты от преднамеренных помех используют различные методы, в том числе расширения спектра, к которым относится режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) [6], исследованию отдельных особенностей которого и посвящена настоящая статья.

Оценка помехозащищенности линий радиосвязи, функционирующих в режиме медленной ППРЧ

В настоящее время принято различать быструю ППРЧ, при которой на длительности символа передачи сигнала происходит несколько изменений номиналов несущих частот, и медленную ППРЧ, при которой на каждой из субчастот передается несколько сигнальных символов [2].

Поскольку в дальнейшем в качестве объекта исследования рассматривается ЛРС, то предметом исследования определим помехоустойчивость ЛРС, работающей в режиме медленной ППРЧ.

Сигналы с медленной ППРЧ условно относят к широкополосным [7] только с учетом потребного диапазона частот при передаче информации в целом. На интервале пребывания в пределах каждой из субчастот сигнал медленной ППРЧ является узкополосным и ничем не отличается от традиционных сигналов с таким же видом модуляции. Следовательно, для него применимы все известные подходы к оценке помехозащищенности.

В соответствии с [8] стратегия РЭП сигналов ЛРС предполагает два основных подхода постановки помех. Это метод предсказания, согласно которому на этапе мониторинга вскрывается закон ППРЧ и помеха излучается синхронно с подавляемым сигналом на одних и тех же частотах. Другой подход базируется на так называемой постановке помех вслед, когда помеху излучают только после обнаружения и идентификации сигнала подавляемой ЛРС.

Анализ исследований, проведенный в [2], показал, что эффективная реализация указанных подходов возможна только при наличии высокопроизводительного оборудования для проведения мониторинга и довольно сложного программного обеспечения. Именно поэтому на практике довольно часто используют способ постановки заградительных помех, при котором излучают широкополосную помеху в пределах диапазона работы ЛРС с ППРЧ, или же используют сканирующую по частоте помеху.

Очевидно, что в этом случае помехами будет поражена только часть диапазона работы ЛРС с ППРЧ, характеризуемая коэффициентом подавляемого участка диапазона частот $\nu = F_{РЭП}/F_{ППРЧ}$, где $F_{ППРЧ}$ – ширина диапазона работы ЛРС с ППРЧ, а $F_{РЭП}$ – ширина полосы частот, в которой излучается помеха. При этом не принципиально, является ли помеха скользящей или заградительной (статически неподвижной относительно $F_{ППРЧ}$). В любом случае вероятность частотно-временного совпадения помехи и сигнала ЛРС с ППРЧ будет определяться величиной ν.

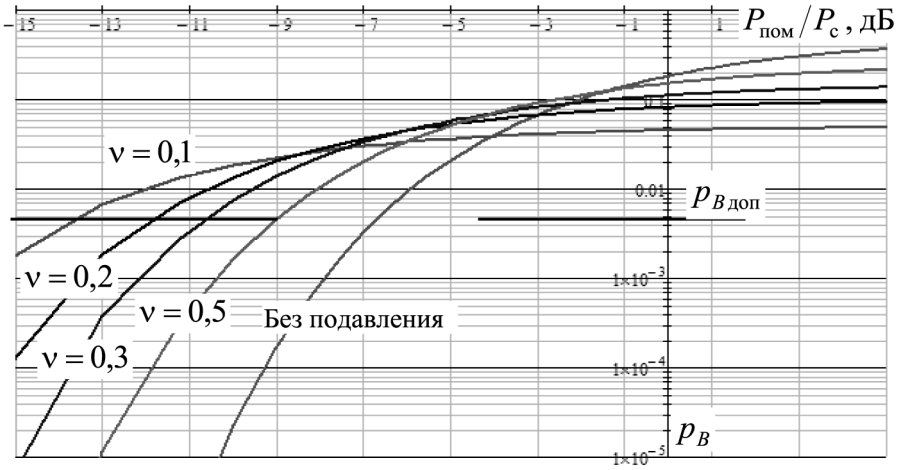

Рис. 1. Зависимости вероятности битовой ошибки от текущего значения превышения помехи над сигналом

Для рассматриваемой ситуации РЭП, при постановке заградительной помехи ЛРС, ее спектральную плотность мощности представим дискретной случайной величиной, значения которой $N_{пп1} = P_{РЭП}/F_{РЭП}$ и $N_{пп2} = N_ш$ (где $N_ш$ – спектральная плотность мощности шума в полосе частот, в которой отсутствует помеха) соответственно определяются вероятностями $p_1 = \nu$ и $p_2 = 1-\nu$.

Тогда математическое ожидание спектральной плотности мощности преднамеренной помехи в полосе работы ЛРС с ППРЧ можно представить следующим образом:

$$N_{пп}(\nu) = \frac{P_{РЭП}}{F_{РЭП}}\nu + N_ш(1-\nu). \quad (1)$$

При условии, что $N_ш << \frac{P_{РЭП}}{F_{РЭП}}$, математическое ожидание спектральной плотности мощности преднамеренной помехи в полосе работы ЛРС представим в виде:

$$N_{пп}(\nu) = \nu\frac{P_{РЭП}}{F_{РЭП}}. \quad (2)$$

Данное выражение справедливо при условии, что спектральная плотность мощности преднамеренной помехи в полосе работы радиосигнала на субчастоте обеспечивает такое подавление ЛРС, при котором текущая вероятность ошибки приема элемента сигнала будет не менее допустимой $p_{B\,доп}$.

При этом будем полагать, что в не перекрываемой помехой области частот связь обеспечивается с требуемым качеством.

Тогда в радиоканале с постоянными параметрами для некогерентного приема сигналов двойной относительной фазовой манипуляции (ОФМ-2), характерного для ЛРС с медленной ППРЧ [6], вероятность ошибки при приеме бита p_B будет определяться следующим выражением:

$$p_B \approx \nu\frac{1}{2}\exp\left(-\nu\frac{E_B}{P_{РЭП}/F_{РЭП}}\right) = \nu\frac{1}{2}\exp\left(-\nu\frac{E_B F_{РЭП}}{P_{РЭП}}\right), \quad (3)$$

где E_B – энергия сигнала, приходящаяся на бит (для радиосигнала ОФМ-2 соответствует энергии, приходящейся на символ).

В результате получим выражение для расчета вероятности битовой ошибки при условии постановки оптимальной по спектральной плотности мощности преднамеренной помехи заградительного характера:

$$p_B \approx \nu\frac{1}{2}\exp\left(-\frac{\nu}{K_П}\right). \quad (4)$$

Для сигналов ОФМ значение $K_П \approx 1{,}3$ [9], что позволяет представить выражение (4) в виде

$$p_B = \nu \times 0{,}5\exp(-0{,}77\nu). \quad (5)$$

На рис. 1 представлены зависимости вероятности битовой ошибки p_B от текущего значения $P_{пом}/P_с$ при различной величине коэффициента ν, характеризующего относительную величину подавляемого участка диапазона частот, занимаемого ЛРС с ППРЧ.

Для общего случая при нестрогом выполнении вышеуказанных условий можно определить условие выбора оптимального значения $\nu_{опт}$, при котором достигается максимальный деструктивный урон, наносимый заградительной помехой ($p_{B\max} = \max_{\nu_{опт}} p_B$), обеспечиваемый при минимуме энергетических затрат

$$\nu_{опт} = K_П = \frac{P_{РЭП}/F_{РЭП}}{E_B} = \frac{P_{РЭП}}{E_B \times F_{РЭП}} \le 1, \quad (6)$$

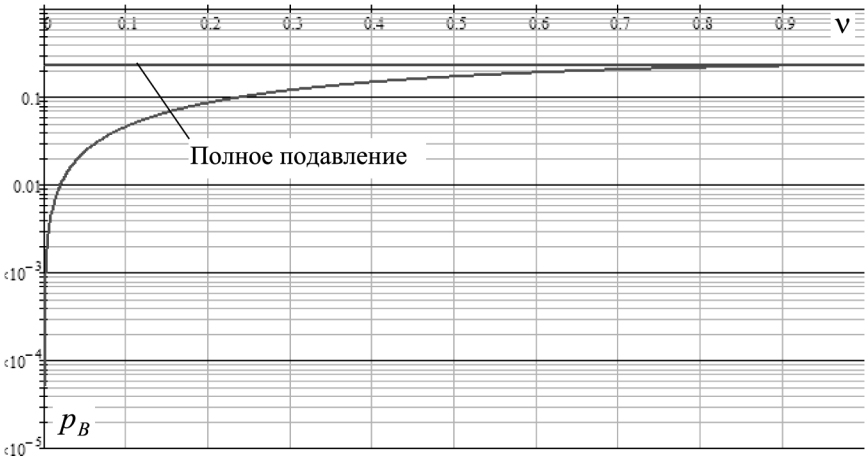

Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки от пораженного помехой участка диапазона частот

Тогда, подставив полученное в (6) значение $\nu_{опт}$ в (3), окончательно имеем

$$p_{B\max} = \max_{\nu_{опт}} p_B = \frac{1}{2} \times \frac{P_{РЭП}}{E_B \times F_{РЭП} \times e}. \quad (7)$$

Выражение (7) определяет условие выбора минимальной полосы частот, при подавлении которой обеспечивается заданный уровень деструктивного воздействия на ЛРС с ППРЧ.

Зависимости значений вероятности битовой ошибки от величины коэффициента p_B показаны на рис. 2.

Заключение

Анализ полученных теоретических результатов и данных расчета позволяют сделать основные выводы.

Зависимость текущего значения превышения мощности помехи над мощностью сигнала от величины коэффициента ν, характеризующего относительную величину подавляемой полосы частот, не является линейной. Для обеспечения постоянного текущего значения допустимой вероятности битовой ошибки $p_{B\,доп}$ необходимо повышение мощности сигнала на 2 дБ при условии увеличения диапазона частот, пораженного помехой, на 10% по отношению к исходному.

С физической точки зрения не существует отличия при РЭП ЛРС с ППРЧ в использовании заградительной по частоте помехи или скользящей помехи в пределах используемого ЛРС диапазона частот.

Для деструктивного поражения ЛРС с медленной ППРЧ, работающей с дискретными видами модуляции без помехоустойчивого кодирования и режима повторной передачи блоков информации переданных с ошибками, достаточно подавить 1...2% рабочих частот ЛРС с ППРЧ. В случае равномерного закона случайного выбора номинала рабочей частоты в режиме ППРЧ это равносильно постановке заградительным помех с эквивалентным показателем $\nu = 0{,}01...0{,}02$.

Дальнейшие направления исследований авторы связывают с разработкой мер по повышению помехозащищенности ЛРС с медленной ППРЧ за счет использования адаптирующихся по длительности кадра блоковых и сверточных кодов, применения помехоустойчивых видов сигналов [10], а также повышения достоверности обнаружения фрагментов сигналов с ППРЧ в пределах их рабочих субчастот [11].

Литература

1. Архипкин, В. Я. Сравнительная помехозащищенность систем связи с широкополосными и узкополосными сигналами / В.Я. Архипкин, К.А. Мешковский // Информация и Космос. – 2004. – № 3. – С. 23–27.

2. Макаренко, С. И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты : монография / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.

3. Работа линий радиосвязи с ППРЧ в условиях преднамеренных помех / М.А. Вознюк [и др.] // Информационные технологии. – 2012. – № 10. – С. 64–67.

4. Torrieri, D. J. The Information-Bit Error for Block Codes / D.J. Torrieri // IEEE Trans. – 1984. – V. COM-32. – No. 4. – P. 474–476.

5. Дворников, С. В. Методика оценки имитоустойчивости каналов управления роботизированных устройств / С.В. Дворников // Радиопромышленность. – 2016. – № 2. – С. 64–69.

6. Blanchard, J. E. A Slow Frequency-Hopping Technique That is Robust to Repeat Jamming / J.E. Blanchard // IEEE Milcom'82, Conf. Boston. – 1982. – Vol. 1. – P. 14.1–14.19.

7. Дворников, С. В. Проблема поиска сигналов источников информации при радиомониторинге / С.В. Дворников // Мобильные системы. – 2007. – № 4. – С. 33–35.

8. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г.И. Тузов [и др.] ; под ред. Г.И. Тузова. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.

9. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / под ред. В.Г. Радзивского. – М.: «Радиотехника», 2006. – 424 с.

10. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2014. – № 2. – С. 51–56.

11. Метод обнаружения радиосигналов на основе обработки их частотно-временных распределений плотности энергии / С.В. Дворников [и др.] // Информация и Космос. – 2005. – № 4. – С. 13–16.