

УДК 621.391.234

Определение норм на допустимые уровни импульсных побочных электромагнитных излучений

А. И. Астайкин, В. Ф. Ключев,
И. В. Пашко

Рассмотрены вопросы расчета допустимых уровней импульсных сигналов побочного электромагнитного излучения на границе контролируемой зоны, за пределами которой исключен несанкционированный доступ к передаваемой по линии связи информации путем приема сигналов побочного электромагнитного излучения, при использовании соответствующих критериев эффективной защиты.

Введение

Кабельные линии связи являются источниками побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ). Наличие ПЭМИ, с одной стороны, создает помехи работе других радиоэлектронных средств (РЭС), а с другой – прием сигналов ПЭМИ позволяет осуществить несанкционированный доступ к передаваемой по линии информации. По обеим причинам необходимо нормирование уровней сигналов ПЭМИ. Нормы для помехового воздействия сигналов ПЭМИ определяются по критериям электромагнитной совместимости соответствующих РЭС [1]. Ведомственными документами установлены также нормы эффективной защиты средств передачи телеграфной и телекодовой информации от утечки за счет ПЭМИ, однако, как правило, неизвестны критерии, по которым они установлены, а применение этих норм для других систем передачи цифровой информации приводит в ряде случаев к неоправданно большим радиусам контролируемых зон безопасной передачи информации.

Цель работы – рассмотреть вопросы расчета допустимых уровней импульсных сигналов ПЭМИ на границе контролируемой зоны, за пределами которой исключен несанкционированный доступ к передаваемой по линии связи информации путем приема сигналов ПЭМИ, при использовании соответствующих критериев эффективной защиты.

Постановка задачи

Рассмотрим некоторую кабельную линию, связывающую источник сообщения (ИС) и получателя сообщения (ПС), по которой осуществляется передача цифровой информации с помощью натурального двоичного кода. Например, при передаче символа "1" ИС формирует в линии постоянное напряжение в течение длительности посылки T , а при передаче символа "0" – напряжение отсутствует, что соответствует формированию в линии последовательности прямоугольных видеоимпульсов переменной длительности. Предположим, что сигнал ПЭМИ, создаваемый излучением кабельной линии, представляет изменение во времени выходного напряжения антенной

системы измерительного приемника, расположенного в дальней зоне излучающей линии. Показано [2], что сигнал, поступающий на вход измерительного приемника, можно считать результатом дифференцирования по времени сигнала в линии передачи, поэтому сигнал ПЭМИ можно представить моделью импульсного кодирования двоичной последовательности, когда передаче символа "1" соответствует пара коротких разнополярных импульсов, разделенных интервалом T , а передаче символа "0" – отсутствие сигнала. Очевидна возможность восстановления сигнала в линии связи по результатам измерений сигнала ПЭМИ в пределах некоторой зоны достоверного его приема на фоне помех. Для определения границ контролируемой зоны, за пределами которой невозможно восстановление передаваемого сигнала с заданным качеством по измерениям сигнала ПЭМИ, необходимо рассчитать величину предельного отношения сигнал/помеха (ОСП) на входе оптимального (наилучшего) измерительного приемника, позволяющего восстановить сигнал с заданным качеством. Другими словами, расстояние от линии связи до измерительного приемника сигнала ПЭМИ, на входе которого достигается предельное ОСП, будет границей зоны, вне которой реализуется эффективная защита линии связи от утечки информации за счет ПЭМИ, а сама величина предельного ОСП определит ту норму этого отношения, которая гарантирует защиту с использованием соответствующего критерия ее эффективности. Понятно, что такой подход к нормированию уровней ПЭМИ конкретных систем передачи цифровой информации требует большого объема априорной информации о статистических свойствах сигналов и помех, которые существенно зависят от условий эксплуатации систем и, как правило, неизвестны (труднодоступны). Однако указанную норму можно рассчитать путем определения минимального теоретического ее предела (потенциально возможной величины). Такой предел, как известно из теории оптимальных методов приема [3], соответствует приему полностью известного (детерминированного) сигнала при мешающем действии только собственного шума приемника – нормального случайного процесса. Представляется также интересной на наш взгляд оценка другой (верхней) границы ОСП, когда сигнал ПЭМИ на выходе полосового фильтра измерительного приемника описывается совокупностью реализаций гауссова случайного процесса. Такая модель, например, может отвечать ситуации, когда импульсы ПЭМИ образуют пачку (10–15) коротких импульсов со случайными параметрами в релейных схемах формирования сигнала в линии связи вследствие искрения и дребезга контактов реле. При этом весьма широкополосное шумоподобное ПЭМИ на выходе относительно узкополосного полосового фильтра измерительного приемника будет иметь распределение, близкое к нормальному.

Основные расчетные соотношения

Пусть по кабельной линии связи двоичным кодом с разрядностью m передаются десятичные цифры, число которых на временном интервале, соответствующем длительности сеанса связи (кадра), равно M . Пусть десятичные цифры выбираются независимо и равновероятно из интервала $0 - (2^m - 1)$ (код полный). Предположим, что на входе измерительного приемника действует аддитивная смесь сигнала ПЭМИ и белого гауссова шума с двусторонней спектральной плотностью мощности $N_0/2$. Сигнал ПЭМИ, соответствующий переданным последовательно M двоичным m -разрядным кодовым группам, будем считать детерминированным, так что передаче символа "1" в любом разряде кода соответствует сигнал известной формы $s(t)$ с энергией, равной E , а передаче символа "0" – отсутствие сигнала, при точной временной синхронизации передачи и приема элементарных сигналов. В этих условиях показано [4], что оптимальный алгоритм приема, минимизирующий полную (среднюю) вероятность ошибки при взаимонезависимых и равновероятных входных символах, осуществляется решающей схемой поэлементного приема, в которой решение

о передаче каждого последовательного символа принимается независимо от решений относительно других символов и состоит в сравнении с порогом взаимной корреляции на интервале длительности символа T принятого сигнала и опорного, воспроизводящего форму $s(t)$ активного символа. Средняя вероятность ошибки при оптимальном приеме двоичного символа определяется соотношением [4]

$$P_e = 1 - F(d/2), \quad (1)$$

где $d^2 = 2E/N_0$ – энергетическое ОСП на входе приемника; $E = \int_0^T s^2(t)dt$ – энергия сигнала;

$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-y^2/2) dy$ – функция Лапласа.

Вероятность правильного приема двоичного символа будет равна

$$P = 1 - P_e = F(d/2), \quad (2)$$

вероятность правильного приема одной цифры (m -разрядной кодовой комбинации) определится формулой

$$P_{sd} = P^m = F^m(d/2), \quad (3)$$

а вероятность правильного приема кадра, состоящего из M десятичных цифр будет равна

$$P_{scl} = P_{sd}^M = F^{mM}(d/2) = F^N(d/2), \quad (4)$$

где $N = mM$ – число двоичных информационных символов в кадре.

Наконец, приведем соотношения для вероятности правильного приема n цифр из общего их числа M в кадре

$$P_M(n) = C_M^n P^n (1-P)^{M-n} \quad (5)$$

и для вероятности правильного приема не менее чем n цифр

$$P_M(k \geq n) = \sum_{k=n}^M C_M^k P^k (1-P)^{M-k}, \quad (6)$$

где $C_M^k = \frac{M!}{k!(M-k)!}$ – число сочетаний из M по k .

Формулы (2)–(6) могут служить основой для определения граничного значения $d_b = \sqrt{2E/N_0}$ по заданным критериям качества, функцию которых могут выполнять заданные значения вероятностей P , P_{scl} , $P_M(n)$, $P_M(k \geq n)$, выбор которых остается вне нашего обсуждения.

Предположим теперь, что при передаче по линии связи информационного символа "1" сигнал ПЭМИ на выходе полосового фильтра приемника с шириной полосы пропускания Δf на интервале длительности переходных процессов в фильтре $\tau \approx 1/\Delta f$ представляет совокупность реализаций гауссова случайного процесса с нулевым средним и дисперсией σ_s^2 . Пусть аддитивная помеха на выходе полосового фильтра также соответствует модели гауссова процесса с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 , тогда оптимальный приемник, как известно [5], должен вычислять энергию принятой на интервале анализа реализации и сравнивать ее с порогом при вынесении решения о наличии сигнала либо его отсутствии. Вероятность правильного приема двоичного символа при оптимальном приеме определится соотношением [5]

$$P = 0,5[1 + P(n, \gamma_1^2) - P(n, \gamma_2^2)], \quad (7)$$

где $\gamma_1^2 = n(1+1/a)\ln(1+a)$; $\gamma_2^2 = n\ln(1+a)$; $n = \Delta f \tau_a$ – число независимых отсчетов на интервале анализа τ_a ; $a = \sigma_s^2 / \sigma_n^2$ – ОСП по мощности; $P(n, x) = \int_0^x \frac{e^{-t}}{(n-1)!} t^{n-1} dt$ – неполная гамма-функция.

Анализ расчетных соотношений и примеры расчета нормируемых величин

График зависимости (2) представлен на рис. 1, его можно использовать для определения d по заданной величине P применительно к системам передачи телекодовой и телеграфной информации, когда при произвольной длительности сеанса связи другие критерии вряд ли целесообразны.

Заметим, что при $d = 0$ (сигнал не передается) $P = 0,5$, что соответствует минимально возможному значению вероятности правильного приема двоичного символа, совпадающему с априорной вероятностью его передачи. При передаче по линии связи команды, составленной из N независимых двоичных символов, по заданной вероятности правильного приема команды P_{sct} из выражения (4) можно определить граничное значение ОСП соотношением

$$d = 2 \operatorname{arctg} F(P_{sct}^{1/N}), \quad (8)$$

где под $\operatorname{arctg} F(x)$ понимается функция, обратная функции Лапласа. Зависимость (8) отображена на рис. 2 для фиксированных значений $P_{sct} = 10^{-4}; 10^{-5}; 10^{-6}$ и $N = 20 \div 200$, которая свидетельствует о монотонном росте параметра d при увеличении параметра N , поэтому нормируемая величина ОСП должна определяться для минимально возможного числа символов в команде.

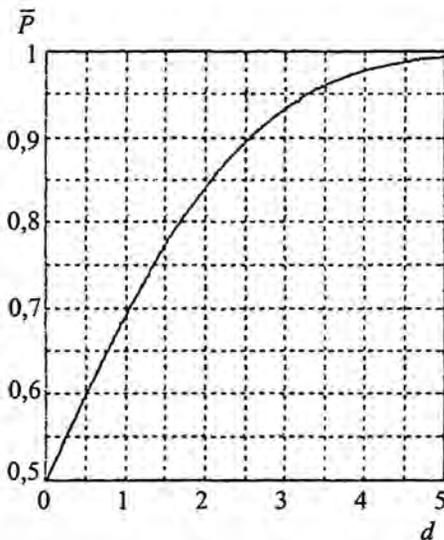


Рис. 1. Вероятность правильного приема двоичного символа

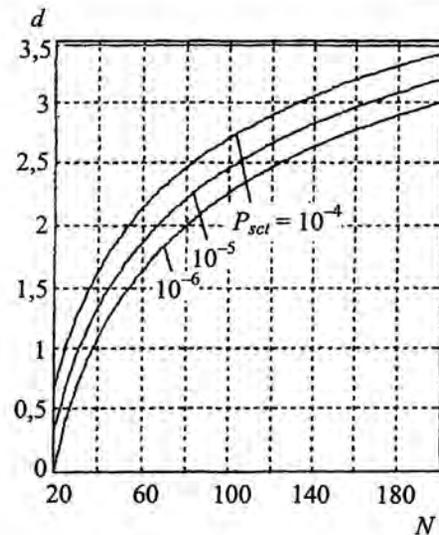


Рис. 2. Граничное значение отношения сигнал/помеха приема команды из N независимых двоичных символов

Заметим, что минимально возможное значение $P_{sct} = (0,5)^N$ соответствует $d = 0$, поэтому задаваемая величина P_{sct} не может быть произвольно малой. Для различных вариантов сигналов, передаваемых по линии связи, нормируемый параметр d по-разному связан с измеряемым ОСП. Например, если активный сигнал ПЭМИ является радиоимпульсом с амплитудой A и эквивалентной длительностью τ , энергия которого $E = A^2\tau/2$, а спектральная плотность мощности помехи в полосе сигнала Δf равна $N_0 = P_n/\Delta f \approx P_n\tau$, где P_n – мощность помехи, то нормируемый параметр $d = \sqrt{2E/N_0} = A/\sqrt{P_n}$ и соответствует отношению амплитуды радиоимпульса к среднеквадратичному напряжению помехи. Если обнаруживаемый сигнал – видеоимпульс с амплитудой A и эквивалентной длительностью τ , то $E = A^2\tau$ и $d = \sqrt{2}A/\sqrt{P_n}$. Наконец, для сигнала ПЭМИ, образованного парой видеоимпульсов на фронте и срезе информационного видеоимпульса, будем иметь $d = 2A/\sqrt{P_n}$. Оценим для примера граничное ОСП для $P_{sct} = 10^{-6}$ и $N = 100$, получим из рис. 2 значение $d_b = 2,25$.

Для случайной модели сигнала ПЭМИ зависимость $P(a, n)$ (7) представлена на рис. 3 для $n = \Delta f\tau = 1$. Из соотношения $P_{sct} = P^N$ можно получить оценку граничного значения ОСП по мощности, которая для $P_{sct} = 10^{-6}$ и $N = 100$ составит величину $a_b = 11,75$, которая примерно в пять раз больше ОСП по мощности для детерминированного видеоимпульса $A^2/P_n = d_b^2/2 = 2,53$.

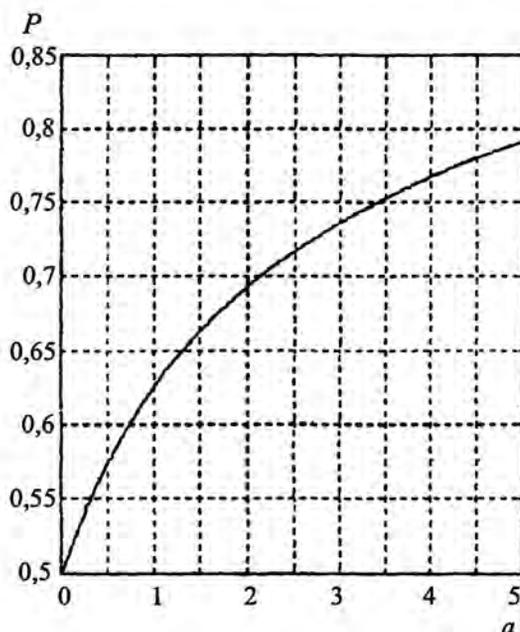


Рис. 3. Вероятность правильного приема двоичного символа при оптимальном приеме

Таким образом, предложенный подход позволяет рассчитать численные оценки граничных значений ОСП для соответствующих моделей сигналов ПЭМИ и критериев эффективной защиты систем передачи цифровой информации от утечки информации за счет ПЭМИ и может служить основой для разработки норм на допустимые уровни сигналов ПЭМИ.

Список литературы

1. Бадалов А. А., Михайлов А. С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС. М.: Радио и связь, 1990.
2. Хармут Х. Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. М.: Радио и связь, 1985.
3. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983.
4. Коржик В. И., Финк Л. М., Щелкунов К. Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник. М.: Радио и связь, 1981.
5. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга вторая. М.: Сов. радио, 1975.

Definition of Norms on Allowable Levels of Pulse Collateral ElectroMagnetic Radiations

A. I. Astaykin, V. F. Klyuev, I. V. Pashko

Questions of calculation of allowable levels of pulse signals of collateral electromagnetic radiation on border of a controllable zone outside which the non-authorized access to the information transmitted on the communication line is excluded by reception of signals of collateral electromagnetic radiation are considered, at use of corresponding criteria of effective protection.