

**ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПАЧКИ РАДИОИМПУЛЬСОВ,
ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРИЕМНИК РАДИОЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА**

**ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО СПЕКТРА ПАЧКИ РАДІОІМПУЛЬСІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ
НА ПРИЙМАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ЗАСОБУ**

**EVALUATION OF THE ENERGY SPECTRUM PACKET RADIO PULSES
THAT AFFECT THE RECEIVER ELECTRONIC MEANS**

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы аналитического представления энергетического спектра ограниченной последовательности импульсных сигналов воздействующих на приемник радиоэлектронного средства.

Анотація. У статті розглянуто питання аналітичного подання енергетичного спектра обмеженої послідовності імпульсних сигналів, які впливають на приймач радіоелектронного засобу.

Summary. The paper deals with the analytical representation of the energy spectrum of a bounded sequence of pulsed signals acting on the receiver electronic means.

В практике частотно-территориального планирования радиоэлектронных средств с импульсным излучением, например, радиолокационных, радионавигационных станций возникает проблема оценки степени воздействия излучений ограниченной последовательности импульсных некогерентных радиосигналов на приемные устройства радиоэлектронных средств (РЭС) различных радиослужб в совмещенных и смежных полосах частот.

Примерами потребности таких практических расчетных задач являются проводимые под эгидой Международного союза электросвязи (МСЭ) исследования по многим пунктам повестки дня Всемирных и Региональных конференций по радиосвязи. В задачах такого класса, как правило, требуется оценить условия совместимости РЭС различных служб в совмещенных и смежных полосах частот, особенно при перераспределении дополнительных полос спектра для внедрения новых перспективных радиотехнологий.

Известно [1...4], что энергетический спектр ограниченной импульсной последовательности, например, радиоимпульсов (при амплитудной, фазокодоманипулированной, линейно-частотной импульсной модуляции передатчика радиолокатора), представляет собой гребенчатую структуру с огибающей спектра одиночного импульса и шириной гребня $\Delta f = 1/NT_n$, где N – количество радиоимпульсов в пачке; T_n – период следования зондирующих импульсов. Однако при этом авторы [1...4], как правило, подчеркивают, что такое представление энергетического спектра в виде гребенчатой структуры справедливо для ограниченной последовательности когерентных радиоимпульсов (которые являются когерентными по отношению к собственному приемнику). Однако в указанных источниках не рассмотрено определение аналитического выражения для энергетического спектра некогерентной импульсной последовательности радиосигналов.

Поэтому целью настоящей статьи является определить аналитическое представление энергетического спектра ограниченной некогерентной последовательности импульсных радиосигналов по отношению к приемнику, подверженному воздействию такого класса помех.

Когерентность излучаемых зондирующих импульсов, в частности, например, необходима в импульсно-доплеровских радиолокаторах, использующих принцип скоростной селекции. Она играет ключевую роль, с одной стороны, в борьбе с отражениями от местных предметов, а также с отражениями, как от естественных (облака, тучи и т. п.), так и от искусственно создаваемых отражающих радиоволны пространств, например, дипольных отражателей, а, с другой, в метеородиолокации для определения необходимых параметров состояния метеообразований.

Однако для любого радиоэлектронного средства, работающего в совмещенных или смежных полосах частот, так называемые, зондирующие импульсы, излучаемые радиолокатором с любой импульсной модуляцией излучений передающего устройства, представляют собой помеховые сигналы некогерентной последовательности радиоимпульсов по отношению к приемнику, подверженному воздействию такого класса помех. Это обусловлено, прежде всего, тем, что устройство, излучающее последовательность зондирующих импульсов радиолокатора и гетеродин приемника, подверженного воздействию такого вида помех, никаким образом не связаны между собой и работают независимо друг от друга, поэтому на входе приемника, подвергающегося

воздействию последовательности радиоимпульсов приходящие сигналы будут иметь случайную начальную фазу по отношению к колебаниям гетеродина подавляемого приемника. К этому следует добавить дополнительные факторы, обуславливающие случайный характер начальной фазы колебаний излучаемого импульсного сигнала, такие, как возможное взаимное перемещение в пространстве источников импульсных сигналов и приемников, подверженных воздействию импульсных помех, наличие на трассе распространения импульсных сигналов диспергирующих сред (туман, облачность, наличие в атмосфере пыли и т. п.).

При рассмотрении структуры энергетического спектра некогерентной последовательности радиоимпульсов, например, прямоугольной формы, воздействующих на приемник радиоэлектронного средства, подверженного воздействию ограниченной последовательности импульсных радиопомех, для простоты анализа будем считать, что все импульсы имеют единичную амплитуду и все параметры импульсов, кроме начальной фазы, неслучайны, а начальная фаза зондирующих импульсов по своей природе на входе приемника, подверженного воздействию такого вида помех, относительно его гетеродина случайна и закон ее распределения равномерный в интервале $[-\pi, \pi]$. На входе приемника, подверженного воздействию последовательности некогерентных радиоимпульсов, такая последовательность помеховых сигналов может быть описана следующим образом [3]:

$$U(t) = \sum_{k=0}^{N-1} U(t - kT_n) \cdot e^{-j2\pi F_\delta t} \cdot e^{-j\phi_k}, \quad (1)$$

где $U(t)$ – огибающая одиночного радиоимпульса; T_n – период следования зондирующих импульсов; $F_\delta = \frac{2V_r}{\lambda}$ – доплеровская частота, поскольку в общем случае радиальная составляющая (V_r) скорости движущегося объекта, на котором установлен радиолокатор, относительно подавляемого приемника присутствует практически всегда; ϕ_k – случайная начальная фаза k -го зондирующего импульса.

Спектральная плотность напряжения сигнала находится как преобразование Фурье функции, представленного выше выражения (1):

$$g(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} u(t - kT_n) \cdot e^{-j2\pi F_\delta t} \cdot e^{-j\phi_k} \cdot e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2)$$

После замены переменной $t - kT_n = x$ и изменения порядка интегрирования и суммирования получим:

$$g(f) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j\phi_k} \cdot e^{-j2\pi(f+F_\delta)kT_n} \int_{-\infty}^{\infty} U(x) e^{-j2\pi(f+F_\delta)x} dx = g_1(f + F_\delta) \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j2\pi(f+F_\delta)kT_n} e^{-j\phi_k}, \quad (3)$$

где $g_1(f) = \int_{-\infty}^{\infty} U(x) e^{-j2\pi fx} dx$ – спектральная плотность напряжения одиночного импульса.

Тогда энергетический спектр сигнала, поступающего на вход подавляемого приемника, представляет собой:

$$G_c(f) = \frac{1}{N} |\overline{g(f)}|^2 = \frac{1}{N} |g_1(f + F_\delta)|^2 \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} e^{-j2\pi(f+F_\delta)(l-m)T_n} \cdot e^{-j(\phi_l - \phi_m)}. \quad (4)$$

Выделяя в двойной сумме выражения (4) члены, соответствующие $l = m$, получим:

$$G_c(f) = |g_1(f + F_\delta)|^2 \left[1 + \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{\substack{m=0 \\ (l \neq m)}}^{N-1} e^{-j2\pi(f+F_\delta)(l-m)T_n} \cdot e^{-j(\phi_l - \phi_m)} \right]. \quad (5)$$

Далее обозначим:

$e^{-j(\phi_l - \phi_m)} = e^{-j\Delta\phi} = \theta$, а также преобразуем двойную сумму в выражении (5) и в результате будем иметь:

$$G(f) = |g_1(f + F_\delta)|^2 \left[1 + \sum_{\substack{m=-(N-1) \\ m \neq 0}}^{N-1} \frac{N - |m|}{N} \cdot \theta \cdot e^{-j2\pi(f+F_\delta)mT_n} \right]. \quad (6)$$

Добавим и вычтем в выражении (6) недостающее в сумме слагаемое, соответствующее $m = 0$ (оно равно θ), тогда:

$$G_c(f) = |g_1(f + F_\delta)|^2 \left[1 - \theta + \theta \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} \frac{N - |m|}{N} \cdot e^{-j2\pi(f + F_\delta) \cdot m \cdot T_n} \right]. \quad (7)$$

Учитывая, что

$$\sum_{m=-(N-1)}^{N-1} \frac{N - |m|}{N} \cdot e^{-j2\pi(f + F_\delta) \cdot m \cdot T_n} = \frac{\sin^2 \pi \cdot N \cdot (f + F_\delta) \cdot T_n}{\sin^2 \pi \cdot (f + F_\delta) \cdot T_n}, \text{ окончательно установим, что}$$

$$G_c(f) = |g_1(f + F_\delta)|^2 \left[1 - \theta + \theta \cdot \frac{\sin^2 \pi \cdot N \cdot (f + F_\delta) \cdot T_n}{\sin^2 \pi \cdot (f + F_\delta) \cdot T_n} \right]. \quad (8)$$

Считаем, что разность случайных начальных фаз некогерентных зондирующих импульсов на входе подавляемого приемника, как было отмечено выше, также распределена равномерно в интервале $[-\pi, \pi]$. В этом случае:

$$\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-j\Delta\phi} d\phi = 0. \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в формулу (8), получим:

$$G_c(f) = |g_1(f + F_\delta)|^2. \quad (10)$$

Из полученного выражения (10) следует, что спектр последовательности некогерентных зондирующих импульсов на входе приемника, подверженного воздействию такого вида помех, совпадает со спектром одиночного импульса.

Из проведенного анализа следует, что любая последовательность импульсных радиосигналов по отношению к приемнику, подверженному воздействию такого рода помех, является некогерентной последовательностью, энергетический спектр которой совпадает с энергетическим спектром одиночного радиоимпульса.

На основе проведенного анализа можно сформулировать достаточно простой подход к решению вопроса определения технических условий совместимости между РЭС с импульсным излучением и РЭС с любым другим видом излучения в совмещенных и смежных полосах частот. Для этого необходимо проинтегрировать аналитическое выражение для энергетического спектра модулирующей функции помехового сигнала в пределах полосы пропускания приемника, подверженного воздействию некогерентной ограниченной последовательности радиоимпульсов:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{\pi} \int_{f_1}^{f_2} |S(\omega)|^2 d\omega, \quad (11)$$

где f_1 и f_2 – граничные значения полосы пропускания приемника, подверженного воздействию помех импульсных радиопомех.

Таким образом, решив такую задачу, можно будет получить относительное значение части энергии помехового сигнала, попадающей в полосу пропускания приемника, независимо от того, какое это излучение – в занимаемой полосе частот или внеполосное излучение и на основе ее сравнения с допустимым пороговым значением уровня помех на входе приемника и на основе этого рассчитать требуемое значение координационного расстояния между анализируемыми РЭС.

В заключение отметим, что в работе представлено аналитическое выражение энергетического спектра ограниченной последовательности некогерентных импульсных радиосигналов по отношению к приемнику, подверженному воздействию такого вида помех.

Литература

1. Гоноровский. И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: [учеб. для вузов]. – [4-е изд., перераб]. / Гоноровский. И. С. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. Бартон. Д. Радиолокационные системы / Бартон. Д. – М. Военное изд-во МО СССР, 1967 – 480 с.
3. Охрименко А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба / Охрименко. А. Е. – М.: Воениздат МО СССР, 1983 – 456 с.
4. Атабеков Г. И. Основы теории цепей: [учеб. для вузов]. / Атабеков Г. И. – М.: Энергия, 1968 – 424 с.