УДК 621.396.96

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЛЕЗНЫЙ СИГНАЛ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ ПОМЕХИ

ANALYSIS OF THE EFFECT OF MULTIPLICATIVE INTERFERENCE ON THE USEFUL SIGNAL

Аннотация. *В статье рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с воздействием на полезный сигнал мультипликативной помехи. Показано, что мультипликативную помеху можно всегда свести к эквивалентной аддитивной помехе. Исследован естественный способ устранения мультипликативной помехи – автоматическая регулировка усиления. Показано, что в результате идеальной автоматической регулировки усиления получается сигнал постоянной интенсивности, но с флуктуирующей по интенсивности аддитивной помехой.*

Abstract. *In the article considers and analyzes issues related to the impact on the useful signal of multiplicative interference. It is shown that multiplicative noise can always be reduced to an equivalent additive noise. A natural way to eliminate multiplicative interference is investigated - automatic gain control. It is shown that as a result of ideal automatic gain control, a signal of constant intensity is obtained, but with additive noise fluctuating in intensity.*

Ключевые слова. *Мультипликативная помеха, эквивалентная аддитивная помеха, нестационарный процесс.*

Key words. *Multiplicative interference, equivalent additive interference, non-stationary process.*

Введение

Как правило, в подавляющих случаях, в радиотехнических системах и устройствах рассматривают воздействие на полезный сигнал аддитивной помехи. Рассмотрим и проанализируем воздействие на полезный сигнал мультипликативной помехи [1].

Эквивалентная аддитивная помеха. Прежде всего отметим, что мультипликативную помеху всегда можно свести с эквивалентной аддитивной помехой [2]. Это обстоятельство во многом упрощает исследование воздействия мультипликативной помехи на полезный сигнал.

Запишем принятый сигнал в виде выражения

$$y = s\eta = \eta_0 s + \xi_э, \quad (1)$$

где y – принятый сигнал;

s – переданный сигнал;

η – стационарный случайный процесс, выражающий мультипликативную помеху;

η_0 – его среднее значение;

$\xi_э$ – эквивалентная аддитивная помеха.

В этом случае получаем

$$\xi_э = s(\eta - \eta_0) = s\zeta. \quad (2)$$

После этого можно пользоваться результатами, полученными для аддитивной помехи, беря ее равной $\xi_э$.

Укажем на особенности аддитивной помехи $\xi_э$. Главное ее свойство состоит в том, что она представляется произведением случайного процесса $\zeta = \eta - \eta_0$ на детерминированную функцию времени s, представляющую сигнал. Следовательно, $\xi_э$ есть нестационарный процесс и все его распределения и их моменты зависят от времени. Это значит, что для получения осмысленных результатов нужно после усреднения по множеству сделать повторное усреднение по времени.

Заметим, что η есть случайный процесс с ненулевым средним

$$M\eta = \eta_0 \neq 0$$

и что по смыслу мультипликативной помехи $\eta > 0$.

Таким образом, η имеет распределение, ограниченное снизу. Процесс $\zeta = \eta - \eta_0$ имеет уже нулевое среднее и соответственно смещенное распределение.

Все остальные сведения об этом процессе можно узнать только из опыта путем статистической обработки его результатов [3].

Заметим, что η и ζ – безразмерные величины, тогда как аддитивная помеха $\xi_э$ имеет размерность сигнала s.

Эквивалентное отношение сигнал-помеха.

Найдем эквивалентное отношение сигнал-помеха (ОСП) для случая мультипликативной помехи. Выразим это отношение как

$$\rho_0 = \frac{\eta_0^2 \overline{s^2}}{\overline{D\xi_э}}.$$

Запишем, что

$$D\xi_э = Ds\zeta = s^2 D\zeta;$$

$$\overline{D\xi_э} = \overline{s^2} D\zeta \left(= \overline{s^2} D\eta\right),$$

Артюшенко Владимир Михайлович *– доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы», Технологический университет (МГОТУ), г. Королев МО, тел. 8(495)512-00-34;*

Воловач Владимир Иванович *– доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис», Поволжский государственный университет сервиса (ПГУС), г. Тольятти, тел. +79023736975;*

Аббасова Татьяна Сергеевна *– кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии и управляющие системы», Технологический университет (МГОТУ), г. Королев МО, тел. 512-00-34.*

Sergey Kukushkin *– doctor Vladimir Artyushenko – doctor of technical sciences, professor, head of the department «Information technology and control systems», Technological University (MGOTU), Korolev, Moscow Region, tel. 8(495)512-00-34;*

Vladimir Volovach *– doctor of technical sciences, associate professor, head of the department «Information and Electronic Service», Volga State University of Service (PGUS), Togliatti, tel. +7(902)373-69-75;*

Tatyana Abbasova *– candidate of technical sciences, associate professor of the department «Information technologies and control systems, Technological University (MGOTU), Korolev, Moscow Region, tel. 8(495)512-00-34.*

следовательно

$$\rho_0 = \frac{\eta_0^2}{D\zeta} = \frac{\eta_0^2}{D\eta}. \qquad (3)$$

Таким образом, ОСП определяется только средним значением и дисперсией процесса, характеризующего мультипликативную помеху [4].

Рассмотрим действие метода накопления в случае мультипликативной помехи. Мы имеем

$$y = s\eta_1 + s\eta_2 + \dots + s\eta_k =$$

$$= \sum^{k} s\eta_i = \sum s(\zeta_i + \eta_{0i}) \cdot$$

Предполагается, что один и тот же сигнал s передается по k каналам, в которых мультипликативные помехи независимы [5,6]. Средняя интенсивность сигнала, поступающая по i-му каналу, определяется величиной η_{0i}.

Введем среднее по всем каналам значение

$$\eta_0 = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} \eta_{0i}.$$

Перепишем выражение для принятого сигнала y в виде

$$y = \eta_0 ks + \sum_{k} s\zeta_i = b + n.$$

В этом выражении первый член представляет полезный сигнал, а второй – помеху. ОСП запишется в виде

$$\rho = \frac{b^2}{\overline{Dn}} = \frac{\eta_0^2 k^2 \overline{s^2}}{D\sum s\zeta_i}.$$

Так как ζ_i предполагаются статистически независимыми, то

$$D\sum s\zeta_i = s^2 D\sum \zeta_i = s^2 kD\zeta,$$

и ОСП равно

$$\rho = \frac{\eta_0^2 k}{D\zeta} = k\rho_0.$$

То есть, выигрыш от применения метода накопления такой же, как и при аддитивной помехе.

Оптимальный прием

Рассмотрим вопрос об оптимальном приеме. Представляя действие приемника операцией интегрирования с весом, запишем

$$y = \int_0^T \varphi(t)\eta(t)s(t) =$$

$$= \int_0^T \varphi(t)[\zeta(t) + \eta_0]s(t)dt =$$

$$= \eta_0 \int_0^T \varphi(t)s(t)dt +$$

$$+ \int_0^T \varphi(t)\zeta(t)s(t)dt = b + n.$$

Здесь b – полезный сигнал (на входе решающего устройства), n – помеха. При полностью известном сигнале s наилучший вид весовой функции есть $\varphi = s$.

Тогда

$$y = \eta_0 \int_0^T s^2(t)dt = E_s; \quad n = \int_0^T \zeta(t)s^2(t)dt$$

и ОСП

$$\rho = \frac{b^2}{Dn} = \frac{\eta_0^2 E_s^2}{Dn}.$$

Если мультипликативная помеха представляется медленным по сравнению с $s(t)$ процессом, то можно полагать, что за время T величина $\zeta(t)$ заметным образом не меняется и может рассматриваться как постоянный случайный множитель, так что

$$n \simeq \zeta(t)\int_0^T s^2(t)dt = E_s\zeta,$$

тогда $Dn \approx E_s^2 D\zeta$ и для ОСП получаем выражение (3)

$$\rho = \frac{\eta_0^2}{D\zeta}.$$

Мультипликативная помеха на практике появляется в тех случаях, когда параметры системы передачи изменяются во времени случайным образом. Как правило, так обстоит дело во всех реальных системах. Однако иногда хотя и существуют флуктуации параметров, но они практически неощутимы. В других случаях, например, с суточными и сезонными изменениями условий передачи коротких волн, когда случайные изменения коренным образом перестраивают весь механизм передачи, она может стать просто невозможной.

Отдельно заслуживает внимания явление так называемого замирания (федингa). Интерференционный механизм этого явления очень чувствителен к незначительным изменениям условий распространения. Дело в том, что волна, посланная передатчиком, достигает антенны приемника, одновременно следуя по разным путям, так называемое многолучевое распространение. Из-за разности длин различных путей возникают разности фаз, и волны, дошедшие различными путями, между собой интерферируют. Так как пути представляют собой случайные образования, изменяющиеся с изменением состояния атмосферы, то интенсивность принимаемого сигнала постоянно изменяется, вплоть до полного пропадания на какое-то время.

Если представить простейшую модель с двумя лучами равной интенсивности, то вследствие интерференции пропадание сигнала будет происходить уже при разности ходов, равной половине длины волны. На коротких волнах это будет составлять несколько десятков метров. Если число лучей больше, то характер явления будет определяться распределением суммы синусоидальных колебаний со случайными фазами и амплитудами. При этом число слагаемых, число путей или лучей, будет случайно.

Методы борьбы с замираниями. Рассмотрим наиболее простые и эффективные методы борьбы с замираниями. Эти методы следует отнести к разновидностям метода накопления. Смысл состоит в том, что стремятся образовать несколько каналов, по возможности с независимыми замираниями. Как правило ограничиваются двумя каналами. Это дает заметный эффект, хотя практика показывает, что увеличение числа каналов приводит к значительному дополнительному выигрышу. Сигналы нескольких каналов можно использовать по-разному. Если просто их сложить, то получится классический метод накопления. Однако очень часто применяют другой прием. Автоматически подключают тот канал, сигнал которого в данный момент больше.

В общем виде, операцию обработки нескольких сигналов можно представить, как суммирование с весом. Легко заметить, что при простом накоплении весовые коэффициенты одинаковы, а при выборе максимального сигнала все весовые коэффициенты, кроме одного, равны нулю. Весовые коэффициенты можно выбирать так, чтобы удовлетворить некоторому критерию оптимальности. Например, можно потребовать максимизацию ОСП для суммарного сигнала. Однако, как показывают расчеты, преимущество такой оптимальной системы перед системой с простым накоплением, невелико.

Один из методов борьбы с замираниями является применение приема на разнесенные антенны. Если рассмотреть напряженность поля в месте приема как функцию времени и двух пространственных координат в горизонтальной плоскости, то окажется, что процессы в двух фиксированных точках протекают тем более сходно, чем эти точки ближе. Раздвигая точки наблюдения, можно найти такое наименьшее расстояние между нами, на котором изменения напряженности поля можно уже считать практически некоррелированными. Это расстояние называется интервалом пространственной корреляции, определяемое разносом антенн.

Второй метод состоит в разнесении по частоте, то есть в передаче одного и того же сигнала на двух различных несущих. Замирание обусловлено интерференцией, зависящей от фазовых соотношений, а на другой частоте, при тех же разностях ходов, фазовые соотношения будут совершенно иными. Можно искать интервал частотной корреляции, то есть наименьший интервал по шкале частот между двумя несущими частотами, обеспечивающий практически некоррелированное замирание по обоим каналам. Оказывается, что этот интервал невелик – достаточен относительный разнос двух частот порядка 10-3.

Кроме передачи на двух или более синусоидальных несущих колебаниях, для борьбы с замираниями предлагалось использование в качестве переносчика шума с подходящим образом выбранной шириной полосы. Другими словами, берется переносчик не с линейным, а со сплошным спектром определенной ширины. На практике эта возможность пока не использовалась.

Заметим, что самым естественным способом устранения мультипликативной помехи является применение автоматической регулировки усиления (АРУ). Можно рассматривать АРУ как коррелятор для мультипликативной помехи. Идеальное устройство АРУ, действие которого можно было бы представить как умножение сигнала на 1/η, где η – мультипликативная помеха, позволило бы полностью от нее избавиться.

Однако, кроме мультипликативной помехи всегда существует аддитивная помеха. Обозначив через z сигнал на выходе, можем записать

$$y = \eta s + \xi; z = \frac{1}{\eta} y = s + \frac{\xi}{\eta}.$$

То есть, в результате действия идеального АРУ хотя и получаем сигнал постоянной интенсивности, но с флуктуирующей по интенсивности аддитивной помехой. ОСП АРУ изменить не может.

Выводы. Таким образом рассмотрено и проанализировано воздействие на полезный сигнал мультипликативной помехи. Показано, что воздействующую мультипликативную помеху можно свести к эквивалентной аддитивной помехе. Найдено эквивалентное отношение сигнал-помеха для случая мультипликативной помехи. Рассмотрены вопросы оптимального приема и эффективные методы борьбы с замираниями сигнала.

Литература

1. Кремер И.Я., Владимиров В.И., Карпухин В.И. Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов. Под ред. И.Я. Кремера. – М.: Изд-во «Советское радио», 1972, 480 с.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – 3-е изд.., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с:
3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
4. Артюшенко В.М., Воловач В.И., Аббасова Т.С. Влияние мультиплпкативных помех на дальность радиолокационного обнаружения цели // Двойные технологии. 2019. №3 (88). С.64-67.
5. Артюшенко В.М., Воловач В.И., Васильев Н.А. Расчет вероятности обнаружения летательных аппаратов системами дистанционного обнаружения // Стратегическая стабильность. 2019. №1 (86). С. 65-73.
6. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ преобразования случайных сигналов и помех в аппаратуре авиационно-космических радиосистем // Информационно-технологический вестник. 2019. №1 (19). С.9-17.

Материал поступил в редакцию 31.03.2022 г.