

УДК 621.391.82 : 621.317.346

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ШУМА В ПРИСУТСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

А. А. Горбачев, В. И. Данилов

Рассматривается метод оценки интенсивности нормального шума в присутствии импульсных помех путем измерения наименьших на ограниченных интервалах времени значений огибающей смеси шум + помеха. Приближенно определены верхняя и нижняя границы погрешностей измерений. Приведены экспериментальные результаты.

В ряде случаев радиоприема возникает необходимость измерения интенсивности нормального шума на фоне импульсных последовательностей с неизвестными априори параметрами (например, помехи от РЛС, двигателей внутреннего сгорания и т. п.). Реализация оптимального измерительного устройства, по-видимому, весьма сложна, особенно, если число неизвестных параметров велико. Поэтому представляют интерес методы приема, хотя и не реализующие в полной мере потенциальные возможности обработки принимаемых колебаний, но вместе с тем позволяющие относительно простыми техническими средствами существенно ослабить влияние помех на результаты измерений. К числу таких методов можно отнести метод, описываемый ниже.

Существо его сводится к следующему. Анализируемый процесс $\xi(t)$ разбивается на примыкающие друг к другу интервалы длительностью T , на каждом из которых отыскивается наименьшее значение ξ_n . Значения ξ_n подвергаются усреднению. Результат усреднения $\bar{\xi}_n$ регистрируется выходным измерительным прибором.

Форма огибающей импульсов помехи на выходе высокочастотного тракта приемника может быть различной. В частности, импульсы помехи от РЛС могут иметь близкую к прямоугольной форму огибающей. Если же спектр импульса значительно шире полосы пропускания приемника, форма импульса может быть близка к импульсной характеристике высокочастотного тракта приемника.

Рассматривая влияние прямоугольных импульсов помехи на экстремумы огибающей $\xi(t)$ смеси нормального шума и этих помех, можно заметить, что на интервале времени T , превышающем длительность импульса помехи, $\xi(t)$ будет принимать значение ξ_n , как правило, в момент времени, находящийся за пределами интервала τ_n , занятого помехой, и поэтому это значение будет определяться лишь шумовым сигналом (причем, с тем большей вероятностью, чем сильнее выполняется неравенство $U_m \gg \sigma$, где U_m — амплитуда импульса помехи, а σ^2 — дисперсия шума на входе детектора). В случае же, когда огибающая импульса помехи имеет не прямоугольную форму, величина τ_n будет зависеть как от формы импульса, так и от отношения U_m/σ . При этом будет иметь место влияние «хвоста» импульса на значение ξ_n .

С целью выяснения эффективности предлагаемого метода оценим приближенно величину погрешности δ измерения σ в присутствии импульсных помех, полагая при этом, что время наблюдения шумовой реализации неограниченно велико.

Найдем плотность вероятности $P(\xi_n)$ наименьших значений большого числа реализаций длительностью T случайного процесса $\xi(t)$, представляющего собой огибающую смеси шума и прямоугольных импульсов помехи. Воспользуемся для этой цели методикой, принятой в [1] при отыскании распределения наибольших значений случайной функции. Представим $\xi(t)$ рядом ее значений ξ_i в моменты t_i , разделенные интервалами $\tau_k \simeq 1/2\Delta F$, где ΔF — ширина спектра. Считая, что ξ_i статистически независимы, определим вероятность $P_i(\xi_n)$, что $\xi(t) = \xi_n$ при $t_i = i\tau_k$ и $\xi(t) > \xi_n$ при $t_i \neq i\tau_k$:

$$P_i(\xi_n) = \left[\int_{\xi_n}^{\infty} W(\xi, U_m) d\xi \right]^m \left[\int_{\xi_n}^{\infty} W(\xi, 0) d\xi \right]^{n-m-1} W(\xi_n, 0). \quad (1)$$

Здесь $n = T/\tau_k$ — общее число отсчетов на интервале T , m — число отсчетов, произведенных в моменты действия помехи на этом же интервале,

$$W(\xi, U_m) = \frac{\xi}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\xi^2 + U_m^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{\xi U_m}{\sigma^2}\right), \quad W(\xi, 0) = W(\xi, U_m = 0).$$

Произведя замену переменной $\xi/\sqrt{2}\sigma = x$, обозначив $U_m/\sqrt{2}\sigma = u$, $\xi_n/\sqrt{2}\sigma = x_n$ и представляя $I_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (x/2)^{2k}/(k!)^2$, получим в безразмерных величинах

$$P_i(x_n) = a x_n \exp[-(n-m)x_n^2 - mu^2] \times \left\{ \exp u^2 - x_n^2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(u x_n)^{2k}}{(k!)^2} \frac{d^k}{d(x_n^2)^k} [\exp(-x_n^2) {}_1F_1(1, 2, x_n^2)] \right\}^m, \quad (2)$$

где ${}_1F_1(\alpha, \beta, \gamma)$ — вырожденная гипергеометрическая функция, a — нормирующий коэффициент. Вероятность, что на интервале времени T наименьшее значение $\xi(t)$ будет равно ξ_n , имеет вид

$$P(\xi_n) = a \sum_{i=1}^n P_i(\xi_n). \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда $n \gg 1$ и $n-m \gg 1$. Поскольку при этом $x_n \ll 1$, выражение (2) может быть упрощено:

$$P_i(x_n) \simeq \begin{cases} a_1 x_n \exp[-(n-m) - m \exp(-u^2)] & x_n^2 \simeq a_1 x_n \exp[-(n-mu^2) x_n^2] \\ & (u^2 \ll 1), \\ a_2 x_n \exp[-(n-m) x_n^2] & (u^2 \gg 1) \end{cases} \quad (2a)$$

(a_1 и a_2 — нормирующие коэффициенты).

Возвращаясь к прежним обозначениям, получим

$$P(\xi_n) \simeq \begin{cases} \left(n - \frac{mU_m^2}{2\sigma^2}\right) \frac{\xi_n}{\sigma^2} \exp\left[-\left(n - \frac{mU_m^2}{2\sigma^2}\right) \frac{\xi_n^2}{2\sigma^2}\right] & \left(\frac{U_m^2}{2\sigma^2} \ll 1\right) \\ (n-m) \frac{\xi_n}{\sigma^2} \exp\left[-(n-m) \frac{\xi_n^2}{2\sigma^2}\right] & \left(\frac{U_m^2}{2\sigma^2} \gg 1\right) \end{cases} \quad (3a)$$

При отсутствии помех из выражения (3a) следует

$$P(\xi_{n0}) = \frac{n\xi_{n0}}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{n\xi_{n0}^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4)$$

Найдем моменты первого порядка случайных величин ξ_n и ξ_{n0} :

$$\bar{\xi}_n = \int_0^\infty \xi_n P(\xi_n) d\xi_n \simeq \begin{cases} \left[\frac{\pi}{2(n - mU_m^2/2\sigma^2)} \right]^{1/2} \sigma & \left(\frac{U_m^2}{2\sigma^2} \ll 1 \right) \\ \left[\frac{\pi}{2(n - m)} \right]^{1/2} \sigma & \left(\frac{U_m^2}{2\sigma^2} \gg 1 \right) \end{cases}; \quad (5)$$

$$\bar{\xi}_{n0} = \int_0^\infty \xi_{n0} P(\xi_{n0}) d\xi_{n0} = \sqrt{\pi/2n} \sigma. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что $\bar{\xi}_{n0}$ линейно зависит от σ .

Определим теперь погрешность измерения δ :

$$\delta = (\bar{\xi}_n - \bar{\xi}_{n0}) / \bar{\xi}_{n0}. \quad (7)$$

Обозначая через $d = m/n$ коэффициент заполнения помехами интервала наблюдения, найдем

$$\delta \simeq \begin{cases} \left(1 - d \frac{U_m^2}{2\sigma^2}\right)^{-1/2} - 1 & \left(\frac{U_m^2}{2\sigma^2} \ll 1\right) \\ (1 - d)^{-1/2} - 1 & \left(\frac{U_m^2}{2\sigma^2} \gg 1\right) \end{cases}. \quad (8)$$

Из выражений (5) и (8) видно, что величина δ зависит от скважности импульсов помехи. Помехи оказывают на результаты измерения ξ_n такое же влияние, как и сокращение длительности анализируемой шумовой реализации в отсутствие помехи. При достаточно больших амплитудах импульсов помехи это сокращение равно суммарной длительности импульсов. Сказанное легко понять, если учесть, что при $U_m > 3\sigma$ вероятность $P[\xi(t) \leq \xi_{n0}]$ на интервале действия импульса помехи пренебрежимо мала при любых фазовых соотношениях колебаний на выходе высокочастотного тракта, создаваемых импульсом помехи и измеряемым шумовым фоном.

Форма реальных импульсов помехи, как правило, отличается от прямоугольной, так что длительность импульсов является функцией отношения U_m/ξ_n и отыскание $P(\xi_n)$ в общем случае связано с громоздкими вычислениями. Однако для случая помех с постоянной амплитудой $U_m > 3\sigma$, воспользовавшись выражениями (5)–(8), можно приблизительно оценить влияние импульсов, указав верхнюю и нижнюю границы погрешности. При $T \gg \tau_k$ и сравнительно низких частотах следования импульсов помехи F_n верхняя граница погрешности δ_v может быть определена следующим образом:

$$\delta_v \simeq (1 - F_n \tau_{пв})^{-1/2} - 1, \quad (9)$$

где $\tau_{пв}$ — длительность импульса помехи на уровне $\bar{\xi}_{n0}$. С помощью выражения (9), заменив в нем $\tau_{пв}$ на $\tau_{пн}$, можно найти и нижнюю границу погрешностей δ_n (через $\tau_{пн}$ обозначена длительность импульса помехи, определяемая на уровне $\xi = 3\sigma$).

Следует отметить, что дисперсия оценки σ при использовании описанного метода измерения при прочих равных условиях в $n = T/\tau_k$

раз больше по сравнению с таковой в случае применения устройства, основанного на отыскании первого момента огибающей. Поэтому важно правильно выбрать величину T . Для получения наименьшей дисперсии оценки σ при заданном времени наблюдения следует стремиться к уменьшению T . Необходимость уменьшения T диктуется и тем обстоятельством, что увеличение T и, как следствие его, уменьшение ξ_n может привести к заметному росту влияния наводок. Имея в виду сказанное ранее о существовании исследуемого метода, легко видеть, что минимальное значение T ограничено длительностью импульса помехи, которая, как уже отмечалось, зависит от формы и относительной амплитуды помехи U_m/σ . Расчеты и эксперимент показывают, что в случае, когда ширина спектра помехи на входе приемника значительно превосходит ΔF , выбирать $T < 4\tau_k$ целесообразно. При этом неизбежен не менее чем четырехкратный проигрыш в дисперсии оценки.

На рис. 1 приведены рассчитанные согласно (9) кривые для верхней и нижней границ погрешностей δ_v и δ_n , представленных как функции отношения U_m/σ .

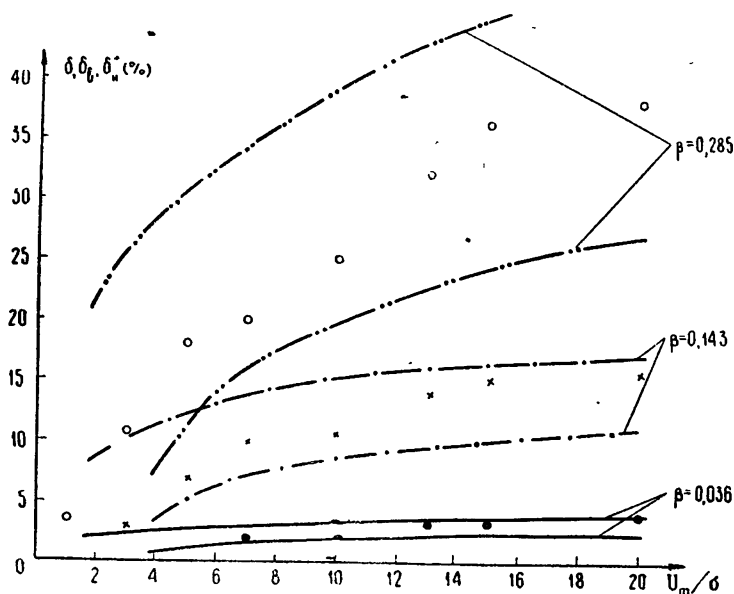


Рис. 1.

Расчеты выполнены для трех значений скважности импульсов помехи, каждый из которых представляет собой отклик высокочастотного тракта приемника с полосой пропускания ΔF на δ -импульс ($\beta = F_n/\Delta F = 0,036; 0,143; 0,285$). На этом же рисунке показаны соответственно экспериментальные результаты, удовлетворительно согласующиеся с расчетными. Возрастание δ с ростом U_m/σ объясняется увеличением при этом τ_{nv} и τ_{nn} . Лабораторный макет, высокочастотная часть которого содержала два усилителя на одиночных контурах, имел следующие параметры: $\Delta F_{0,5} = 7$ кГц, избирательность при расстройке 7 кГц составляла 15 дБ. В нем использовалась относительно простая схема детектора минимальных значений на интервале $T = 1$ мсек [2]. Как видно из рис. 1, описываемый метод особенно эффективен при больших скважностях помех.

Сопоставляя в заключение рассматриваемый метод с часто используемым на практике методом измерения σ путем отыскания первого момента огибающей, можно отметить, что первый обеспечивает

8—10-кратное ослабление влияния помех на результаты измерения σ . При $U_m/\sigma \gg 1$ и прямоугольной форме огибающей импульсов помехи описанный метод может оказаться значительно эффективнее амплитудного ограничения со следящим порогом, устанавливаемом при отсутствии помех на уровне 3σ . Поскольку в последнем порог ограничения растет вместе с ростом U_m , погрешность измерения δ также растет, тогда как для первого величина δ при этом остается постоянной.

При приеме шумовых сигналов на фоне импульсных помех, форма огибающей которых отличается от прямоугольной, погрешность δ (вследствие зависимости длительности импульса на уровне принимаемого шума от отношения U_m/σ) растет вместе с ростом U_m/σ , но в меньшей мере, чем при использовании ограничителя. Для $U_m/\sigma > 5$ при использовании описываемого метода δ в первом приближении растет пропорционально $[\ln(U_m/\sigma)]^\alpha$ ($\alpha \ll 1$), тогда как для ограничителя δ растет примерно по линейному закону.

Можно заметить, что описанный в статье метод измерения шума по величине смещения оценки эквивалентен методу, основанному на измерении среднего напряжения на выходе детектора с запирающим высокочастотного тракта приемника на время действия каждого из импульсов помехи. Однако рассматриваемый метод более прост в техническом отношении, так как не требует установки обнаружителя импульсов помехи на фоне шума с неизвестной дисперсией.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Тихонов, Выбросы случайных процессов, УФН, 77, № 3, 1962.
2. А. А. Горбачев, В. И. Данилов, Измерительная техника (в печати).

Научно-исследовательский радиофизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
21 февраля 1969 г.

A METHOD OF MEASURING THE NOISE INTENSITY IN THE PRESENCE OF PULSE NOISES

A. A. Gorbachev, V. I. Danilov

A method of estimating the intensity of normal noises in the presence of pulse noises by measuring the less values of the envelope of mixture-noise is considered. The upper and lower boundaries of the measurement errors are approximately determined. The experimental results are presented.