

УДК 621.396

А.В. Кобзев, В.В. Романенко

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

## АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ НЕИЗВЕСТНОГО ВИДА С УЧЕТОМ ИХ РАССОГЛАСОВАНИЯ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

Проводится анализ отношения сигнал/шум на выходе энергетического приемника при рассогласовании параметров импульсного сигнала с характеристиками приемника. Осуществляется количественное сравнение потерь в отношении сигнал/шум относительно согласованного приема. Приводятся соотношения для расчета характеристик обнаружения

**Ключевые слова:** показатели обнаружения, импульсные сигналы неизвестного вида, энергетический приемник.

### Введение

Задача обнаружения сигналов неизвестного вида характерна для средств радиотехнической разведки (РТР) и радиомониторинга [1 – 3], добывающих информацию об излучающих объектах. Основной особенностью средств РТР и радиомониторинга является априорная неопределенность видов и параметров модуляции принимаемых сигналов, что неизбежно сказывается на показателях их обнаружения. В ряде публикаций, где излагаются вопросы обработки такого класса сигналов содержатся противоречивые подходы при анализе показателей обнаружения и измерения параметров. Так, например, в работах [1,2] в качестве параметра обнаружения одиночных сигналов конечной длительности используется энергетическое отношение  $q^2 = 2\mathcal{E}/N_0$ , где  $\mathcal{E}$  – энергия импульса на входе приемника,  $N_0$  – спектральная плотность мощности внутреннего шума. Авторы указанных работ не учитывают то обстоятельство, что данный параметр применим при анализе возможностей только средств активной радиолокации [4], когда имеется копия излучаемого импульсного сигнала и при приеме используются известные характеристики модуляции сигнала. Это условие позволяет применить согласованную фильтрацию, например, сжатие широкополосного сигнала (ШПС) или корреляционную обработку, осуществляющие когерентное (додетекторное) накопление сигнала [4]. В приемных устройствах РТР и радиомониторинга процедура согласованной обработки неприменима из-за незнания вида сигнала. В работе [3] использован более реалистичный подход, когда для приема сигналов неизвестного вида рассматривается энергетический приемник, что соответствует общепринятым подходам. Здесь при анализе характеристик обнаружения полагается, что сумма сигнала и шума на выходе приемника описывается  $\chi^2$ -распределением. В соответствии со свойствами  $\chi^2$ -распределения [5] это справедливо только для случая шумо-

вого гауссового полезного сигнала на входе, что крайне редко встречается при РТР. Поэтому в случае приема негауссового сигнала (в том числе импульсного с детерминированными видами модуляции) подобный подход приводит, на наш взгляд, к неточным результатам. Кроме того, в указанных работах не рассматриваются практически интересные вопросы влияния степени рассогласования длительности и ширины спектра сигнала с параметрами приемника на характеристики обнаружения.

**Цель работы.** В данной работе устанавливается связь между энергетическим отношением  $q^2$  и отношением сигнал/шум на выходе энергетического приемника и тем самым определяются энергетические потери за счет рассогласования параметров импульсного сигнала и характеристик приемника, как до детектора, так и после детектора.

### Основное содержание

Энергетический приемник в упрощенном виде (рис. 1), представляет собой соединение полосового фильтра (ПФ), квадратичного детектора (КвД) и фильтра нижних частот (ФНЧ), выполняющего роль интегрирующего устройства. Фильтры будем характеризовать шумовыми полосами пропускания:  $\Delta f$  – для ПФ и  $\Delta F$  – для ФНЧ.

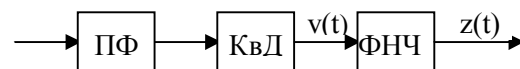


Рис. 1. Схема энергетического приемника

Пусть на входе ПФ действует внутренний шум со спектральной плотностью мощности  $N_0$  и полезный сигнал в виде прямоугольного импульса амплитудой  $A$  и длительностью  $\tau$ . Будем считать, что ПФ имеет прямоугольную АЧХ. Тогда энергетический спектр низкочастотной флюктуационной составляющей процесса  $v(t)$  на выходе КвД имеет форму треугольника с основанием  $\Delta f$  [6] и максимумом  $N_d$  на нулевой частоте. Определим характеристики про-

процесса  $z(t)$  на выходе ФНЧ и выразим их через параметры сигнала и шума на входе ПФ.

Среднее значение и дисперсия низкочастотной сплошной части процесса на входе ФНЧ соответственно равны [6]  $m_v = \sigma_{ш}^2 + P_c$ ;  $\sigma_v^2 = \sigma_{ш}^4 + 2P_c\sigma_{ш}^2$ , где  $P_c = A^2/2$ ;  $\sigma_{ш}^2 = N_0 \cdot \Delta f$  – мощность сигнала и дисперсия шума на входе приемника в полосе  $\Delta f$ . Для треугольного спектра справедливо также равенство  $\sigma_v^2 = N_d \cdot \Delta f/2$ . При прохождении через ФНЧ необходимо учитывать, что сигнальная составляющая  $z_c$  и дисперсия флюктуационной составляющей  $z_{ш}(t)$ , обусловленной взаимодействием импульсного сигнала и шума (второе слагаемое в  $\sigma_v^2$ ), нарастают при воздействии импульса и принимают максимальное значение в конце его действия. Эту особенность учтем путем умножения соответствующих составляющих на коэффициенты  $g_c$  и  $g_n$ , т.е.  $z_{c,max} = P_c \cdot g_c$ ; а дисперсия процесса  $z_{ш}(t)$  должна содержать коэффициент  $g_n$ . Для пассивной цепи коэффициенты  $g_c \leq 1$ ;  $g_n \leq 1$ . Они зависят от типа ФНЧ. Дисперсию флюктуационного процесса на выходе ФНЧ с нормированной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)  $K(f)$  можно представить в виде

$$\sigma_z^2 = N_d \int_0^{\Delta f} \left(1 - \frac{f}{\Delta f}\right) K^2(f) df \approx N_d \Delta f \left(1 - \frac{\Delta F}{2\Delta f}\right). \quad (1)$$

Здесь учтено, что интеграл от  $K^2(f)$  есть шумовая полоса  $\Delta F$ . Если обозначить  $x = 1 - \Delta F/(2\Delta f)$ , то с учетом равенства  $\sigma_v^2 = N_d \cdot \Delta f/2$  соотношение (1) для момента окончания импульса можно представить в следующем виде

$$\sigma_{z,max}^2 = (\sigma_{ш}^4 + 2P_c\sigma_{ш}^2 g_n) \times (2\Delta F x / \Delta f). \quad (2)$$

Обозначим входное отношение сигнал/шум по мощности  $\rho^2 = P_c / \sigma_{ш}^2$ . Тогда отношение сигнал/шум на выходе в момент окончания импульса равно

$$z^2 = \frac{z_{c,max}^2}{y_{z,max}^2} = \frac{c^4 g_c^2}{1 + 2c^2 g_n} \cdot \frac{\Delta f}{2\Delta F x}. \quad (3)$$

Величина  $\eta^2$  определяет вероятность правильного обнаружения. Сравним (3) со случаем додетекторной согласованной обработки, когда вместо ПФ включен фильтр, согласованный с видом модуляции сигнала. При этом сигнал/шум на входе КвД определяется энергетическим отношением  $q^2 = 2\mathcal{E} / N_0 = 2\rho^2 \cdot \Delta f \cdot \tau$ , а на выходе ФНЧ с учетом квадратичного детектирования имеем  $\eta_c^2 = q^4 / (1 + 2q^2)$ . Представляет интерес рассматривать значения сигнал/шум  $q^2 > 10$ , при которых происходит обнаружение с вероятностями около 0,5 и более [4]. Поэтому будем считать, что  $\eta_c^2 \approx q^2/2$ . Потери за счет рассогласования параметров сигнала с характеристиками энергетического приемника по отношению к согласованному приемнику выразим как отношение  $\gamma = \eta_c^2 / \eta^2 = \rho^2 \Delta f \tau / \eta^2$  ( $\gamma > 1$ ). Введем параметр рассогласования  $\alpha = \Delta F \tau$ . Тогда с учетом (3) можно записать выражение для потерь в следующем виде:

$$\gamma(\alpha, \rho^2) = 2\alpha x (1 + 2\rho^2 g_n) / (\rho^2 g_c^2). \quad (4)$$

Рассмотрим показатели обработки для двух типов ФНЧ. Первый из них представляет собой согласованный фильтр (СФ) для прямоугольного видеоимпульса длительностью  $\tau_0$  (рис.2) [6], в состав которого входят элемент задержки (ЭЗ) на время  $\tau_0$ , устройство вычитания и идеальный интегратор, осуществляющий вычисление в соответствии с равенством

$$z(t) = \frac{1}{\tau_0} \int_{-\infty}^t [v(s) - v(s - \tau_0)] ds. \quad (5)$$

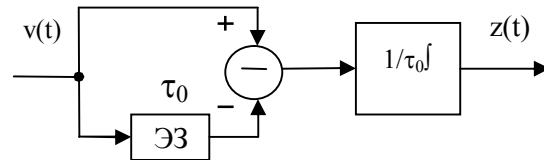


Рис. 2. Согласованный фильтр для прямоугольного видеоимпульса

Шумовая полоса такого СФ равна  $\Delta F = 0,5/\tau_0$  [6]. Если  $\tau = \tau_0$  (условие согласования), то  $g_c = 1$ ,  $g_n = 1$ ,  $\alpha = 0,5$ . Этот случай целесообразно называть последетекторным согласованием. Он позволяет в некоторой степени восполнить потери за счет додетекторного рассогласования в энергетическом приемнике при фиксированной полосе  $\Delta f$ . При этом имеем

$$\gamma_c(\rho^2) = x(1 + 2\rho^2) / \rho^2. \quad (5)$$

Если известна ширина спектра  $\Delta f_c$  и длительность радиоимпульса  $\tau$  (наилучшая ситуация в РТР) и сигнал является широкополосным с неизвестным видом модуляции, то можно согласовать полосы фильтров как до детектора ( $\Delta f = \Delta f_c$ ), так и после ( $\alpha = 0,5$ ). Тогда в случае ШПС ( $\Delta f_c \tau \gg 1$ ) имеем  $\Delta f \gg \Delta F$ ,  $x \approx 1$ ;  $\gamma = (1 + 2\rho^2) / \rho^2$ . Для немодулированного внутри импульса  $\Delta f_c \tau \approx 1$ ,  $\Delta f \approx \Delta F$ ,  $x = 0,5$ ;  $\gamma_c = (1 + 2\rho^2) / (2\rho^2)$ . Отсюда следует, что незнание вида внутриимпульсной модуляции ШПС при указанных выше условиях согласования приводит к потерям в диапазоне от  $\gamma_{c,max} = 1/\rho^2$  при  $\rho^2 \ll 1$  до  $\gamma_{c,min} = 2$  (или 1) для ШПС (или немодулированного) при  $\rho^2 \gg 1$ .

При рассогласовании фильтра ( $\tau \neq \tau_0$ ) сигнальная составляющая  $z_c$  не может превышать величину  $\min(\tau, \tau_0) / \tau_0$ . Поэтому при  $\tau < \tau_0$  имеем  $g_c = g_n = \tau / \tau_0 = 2\alpha$ , а при  $\tau > \tau_0$  имеем  $g_c = g_n = 1$ . Другой тип ФНЧ представляет собой простейший RC-фильтр (резистор с сопротивлением R и конденсатор емкостью C). Для него справедливы соотношения [6]:  $\Delta F = 1/(4RC)$ ,  $g_c = 1 - \exp(-4\alpha)$ ,  $g_n = 1 - \exp(-8\alpha)$ .

В практических разработках, как правило, выполняются неравенства  $\Delta f \gg \Delta F$ ;  $\Delta f > \Delta f_c$ , т.е.  $x \approx 1$ . Именно для этих условий на рис. 3 приведены зависимости потерь  $\gamma$  [дБ] от параметра рассогласования  $\alpha = \Delta F \tau$  для значений  $\rho^2 = 0,1; 1$  и 10.

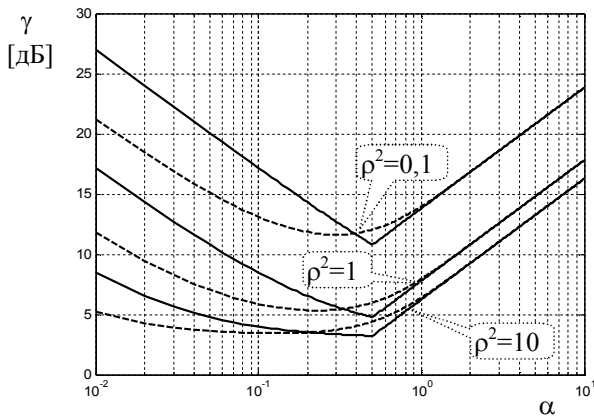


Рис. 3. Графики потерь в энергетическом приемнике в зависимости от параметра рассогласования ФНЧ

Сплошные кривые соответствуют фильтру по схеме рис. 2, а пунктирные – RC-фильтру. Из этих данных видно, что в энергетическом приемнике потери в отношении сигнал/шум по сравнению с согласованным приемником могут иметь значительную величину. Наименьшие потери последетекторного СФ имеют величины 10,8 дБ; 4,8 дБ и 3,2 дБ при различных  $\rho^2$ . Наименьшие потери в RC-фильтре (11,6 дБ; 5,3 дБ и 3,4 дБ) соответствуют параметру рассогласования  $\alpha=0,3; 0,23$  и  $0,13$  в зависимости от  $\rho^2$ . При этом RC-фильтр проигрывает фильтру рис. 2 по наименьшим потерям всего на 0,8 дБ; 0,4 дБ и 0,2 дБ. Кроме того RC-фильтр при  $\alpha < 0,5$  менее чувствителен к рассогласованию. Это связано, по-видимому, с более пологими скатами АЧХ. При выполнении условия  $\Delta f \gg \Delta F$  процесс  $z(t)$  нормализуется и для расчета характеристик обнаружения можно использовать интеграл вероятностей

$$\Phi(y/m, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\left\{-\frac{(u-m)^2}{2\sigma^2}\right\} du. \quad (6)$$

Перейдем к нормированному случайному процессу на выходе  $z_n(t) = z(t)/\sigma_z$ , который имеет единичную дисперсию. Средние значения  $m_0, m_1$  этого процесса при отсутствии ( $P_c = 0$ ) и наличии сигнала равны

$$m_0 = \sqrt{\frac{\Delta f}{2\Delta F}}; m_1 = \left( \frac{1 + \rho^2 g_c}{1 + 2\rho^2 g_{\Pi}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\Delta f}{2\Delta F}}. \quad (7)$$

### АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ВИЯВЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ НЕВІДОМОГО ВИДУ З УРАХУВАННЯМ ЇХ НЕУЗГОДЖЕНОСТІ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИЙМАЛЬНОГО ПРИБОРУ

А.В. Кобзев, В.В. Романенко

Проводиться аналіз відношення сигнал/шум на виході енергетичного приймача при неузгодженості параметрів імпульсного сигналу з характеристиками приймача. Здійснюється кількісне порівняння втрат у відношенні сигнал / шум відносно узгодженого прийому. Наводяться співвідношення для розрахунку характеристик виявлення.

**Ключові слова:** показники виявлення, імпульсні сигнали невідомого виду, енергетичний приймач.

### THE ANALYSIS OF DETECTION INDEX OF UNKNOWN TYPE PULSE SIGNALS ALLOWING FOR THEIR MISMATCH WITH CHARACTERISTICS OF RECEIVER

A.V. Kobzev, V.V. Romanenko

The article presents the analysis of the signal-to-noise ratio at the energy receiver output allowing for a mismatch of the pulse signal to the characteristics of the receiver. In article performed a quantitative comparison of the signal-to-noise ratio losses to a case of harmonized detection and provided relations for the calculation of the detection index characteristics.

**Keywords:** detection index, unknown type pulse signals, energy receiver.

При заданной вероятности ложной тревоги  $P_{лт}$  можно найти порог обнаружения из равенства  $u_{пор} = \Phi^{-1}(1 - P_{лт}/m_0, 1)$ , где  $\Phi^{-1}$  – функция, обратная интегралу (6). Вероятность правильного обнаружения находится как  $P_{обн} = 1 - \Phi(u_{пор}/m_1, 1)$ . В среде MATLAB такие расчеты можно провести с использованием команд  $u_{пор} = \text{norminv}(1 - P_{лт}, m_0, 1)$ ;  $P_{обн} = 1 - \text{normcdf}(u_{пор}, m_1, 1)$ .

### Выводы

Энергетический приемник имеет существенные потери в отношении сигнал/шум на выходе по сравнению с согласованным приемником. Наименьшие потери можно обеспечить при согласовании последетекторного тракта, если известна длительность импульса. Для согласования можно использовать простейший RC-фильтр нижних частот, который по своим возможностям мало уступает фильтру со строгим согласованием. При неизвестной длительности импульса целесообразно осуществить последетекторное согласование для импульса минимальной длительности. Это позволит сохранить информацию о длительности импульса на входе.

### Список литературы

1. Радзиевский В.Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. 2-е изд., испр. и доп. / В.Г. Радзиевский, А.А. Сирота. – М.: Радиотехника, 2004. – 432 с.
2. Мельников Ю.П. Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности) / Ю.П. Мельников. – М.: Радиотехника, 2005. – 304 с.
3. Куприянов А.И. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: Учебное пособие / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.
4. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
6. Горяинов И.Т. Примеры и задачи по статистической радиотехнике / И.Т. Горяинов, А.Г. Журавлев, В.И. Тихонов. – М.: Сов. радио, 1970. – 600 с.

Поступила в редколлегию 7.08.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Е.Л. Казаков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.