

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАТОРОВ В ЗАДАЧАХ ОБНАРУЖЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ

© Н. А. Лысенко

Дніпропетровський національний університет

Проводиться порівняння оптимального і цифрового виявлячів пачки імпульсних сигналів, подаються залежності ймовірності правильного виявлення пачки імпульсів від відношення сигнал-шум для кожного виявляча. Отримано рекомендації щодо вибору порогу в цифровому виявлячі для досягнення найкращих значень ймовірності виявлення.

Постановка задачи. В ультразвуковых системах неразрушающего контроля возникает необходимость обнаружения импульсных сигналов, отраженных от различного вида неоднородностей, расслоений, трещин и т.д. Чтобы обнаружить дефект с большой вероятностью, количество зондирующих импульсов увеличивают. В результате возникает задача обнаружения сигнала, состоящего из m импульсов [1]. Данная задача с точки зрения статистического распознавания сводится к проверке по измеренной пачке сигналов двух гипотез:

1) $|x(t)| = |S(t)| + |n(t)|$, где $|x(t)|$ — вектор измеренных сигналов, $|S(t)|$ — вектор импульсных сигналов, $0 \leq t \leq \tau_c$, а $|n(t)|$ — вектор помех в виде белого шума;

2) $|x(t)| = |n(t)|$, в случае, если сигнала нет (т.е. $|S(t)| = 0$).

Обнаружить пачку импульсных сигналов можно двумя способами: аналоговым и цифровым.

Согласно первому способу известен оптимальный обнаружитель, вероятностная характеристика обнаружения которого определяется суммированием энергий каждого импульса. Вероятность обнаружения пачки из m импульсов равна [1]

$$P_{\text{оп}} = \Phi[\sqrt{2\mathcal{E}m/N_0} - \Phi^{-1}(1 - P_{\text{лт}})].$$

Структурная схема оптимального обнаружителя представлена на рис. 1. В рассмотренном приемнике сумматор установлен после согласованного фильтра. Такой сумматор — сложное устройство, так как в его составе должна находиться линия задержки импульсов на период их повторения.

Согласно второму способу известен цифровой обнаружитель, в состав которого входит счетчик импульсов. Решающее правило обнаружения пачки импульсов выбрано в виде неравенства $r \geq k$, т.е.

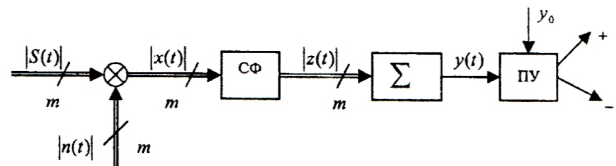


Рис. 1. Структурная схема оптимального обнаружителя пачки импульсных сигналов, где m — число импульсов в пачке, СФ — согласованный фильтр, Σ — сумматор, ПУ — пороговое устройство

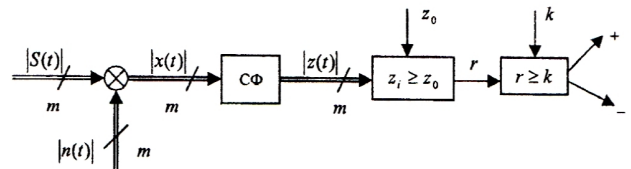


Рис. 2. Структурная схема цифрового обнаружителя пачки импульсных сигналов

если из всех m импульсов превысило порог k импульсов, то пачка импульсов считается обнаруженной (правило k из m).

Таким образом, в цифровом обнаружителе расчет осуществляется отдельно по каждому импульсу, и решение об обнаружении пачки принимается по превышению порога определенного количества импульсов. Следовательно, в структурной схеме цифрового обнаружителя сумматор заменяется устройством счета числа превышений порога $z_i \geq z_0$ [2]

$$r = \sum_{i=1}^m \text{sgn}(z_i - z_0).$$

Структурная схема цифрового обнаружителя

пачки импульсных сигналов представлена на рис. 2.

Если $P_{\text{ЛО}}$ — вероятность ложного обнаружения импульса, $P_{\text{ОИ}}$ — вероятность правильного обнаружения, то число импульсов r , превышающих первый порог z_0 , является случайной величиной. Так как случайные события превышения порога $z_i \geq z_0$ независимы, то r как случайная величина имеет биномиальное распределение вероятностей:

$$P_m(r/n) = C_m^r P_{\text{ЛО}}^r (1 - P_{\text{ЛО}})^{m-r},$$

$$P_m(r/n) = C_m^r P_{\text{ОИ}}^r (1 - P_{\text{ОИ}})^{m-r}.$$

Формулы для вычисления вероятности ложной тревоги и вероятности правильного обнаружения пачки импульсов имеют следующий вид:

$$P_{\text{ЛТ}} = \sum_{r=k}^m C_m^r P_{\text{ЛО}}^r (1 - P_{\text{ЛО}})^{m-r},$$

$$P_{\text{ОП}} = \sum_{r=k}^m C_m^r P_{\text{ОИ}}^r (1 - P_{\text{ОИ}})^{m-r},$$

где $P_{\text{ЛО}}$ и $P_{\text{ОИ}}$ вычисляются по формулам [1]:

$$P_{\text{ЛО}} = \int_{z_0}^{\infty} W(z/n) dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \int_{z_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) dz = 1 - \Phi\left(\frac{z_0}{\sigma_z}\right),$$

$$P_{\text{ОИ}} = \Phi\left[\sqrt{\frac{2\mathcal{E}}{N_0}} - \Phi^{-1}(1 - P_{\text{ЛО}})\right].$$

При замене аналогового интегратора цифровым обнаружителем вероятность обнаружения пачки импульсов уменьшается и зависит от длины пачки импульсов и выбора второго порога k . Ниже исследуется влияние длины пачки и величины порога на эффективность обнаружения.

Решение задачи. Цифровой обнаружитель имеет два порога z_0 и k , которые должны определяться при проектировании обнаружителей для заданных отношений сигнал/шум $2\mathcal{E}/N_0$, длительности пачки импульсов m и вероятности ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}$. Рассмотрим сначала два крайних случая:

1) если порог $k = m$, т.е. пачка считается обнаруженной, если все импульсы пачки превышают порог z_0 .

2) если порог $k = 1$, т.е. пачка импульсов считается обнаруженной, если имело место хотя бы одно превышение порога z_0 .

На рис. 3 представлены графики зависимостей вероятности обнаружения пачки импульсных сигналов от q (где $q^2 = 2\mathcal{E}/N_0 = D_c/D_{\text{ш}}$) для оптимального обнаружителя ($P_{\text{ОП}}$) и двух крайних случаев для цифрового обнаружителя ($P_{\text{ОП}}^*$). Видно, что оптимальный обнаружитель при любых значениях $P_{\text{ЛТ}}$ обнаруживает пачку импульсов с большей вероятностью, чем цифровой обнаружитель.

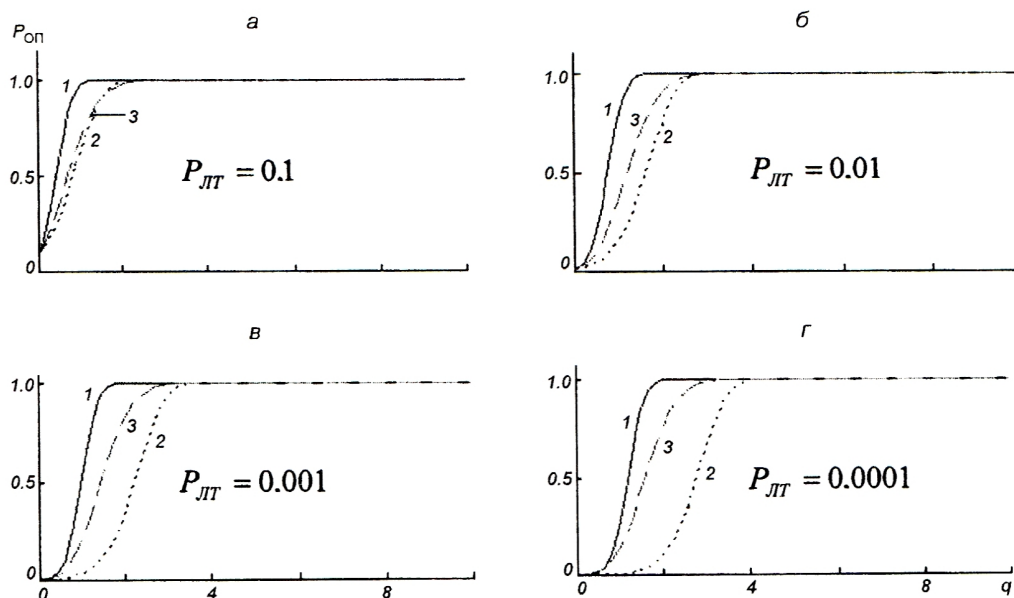


Рис. 3. Вероятностные характеристики обнаружения пачки импульсных сигналов для $m = 10$: при $P_{\text{ЛТ}} = 0.1$ (а), 0.01 (б), 0.001 (в), 0.0001 (г). Кривая 1 — $P_{\text{ОП}}$, кривая 2 — случай $k = m$, кривая 3 — случай $k = 1$

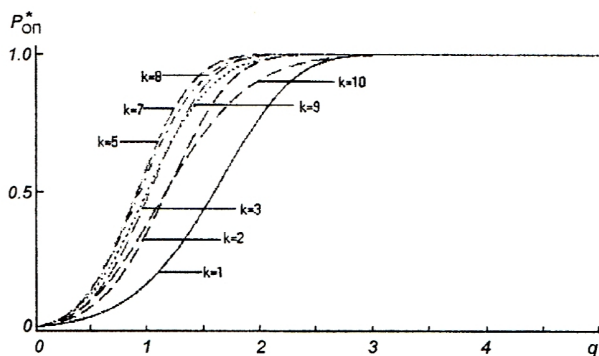


Рис. 4. Вероятностные характеристики цифрового обнаружителя для различных значений порога k при $m = 10$ и $P_{ЛТ} = 0.01$

Однако выбор порога k существенно влияет на характеристики обнаружения, и рассмотренные два крайних случая не позволяют нам сделать вывод о наиболее эффективном пороге. Если предположить, что вероятностные характеристики всех промежуточных случаев ($k = 2, 3, \dots, m-1$) находятся между уже рассмотренными крайними случаями, то можно однозначно сказать, что чем больше порог k , тем эффективнее обнаружение пачки импульсов, и наилучшим является случай, когда порог максимальный, т.е. $k = m$. Но справедливо ли данное предположение? В поисках оптимального порога k для цифрового обнаружителя было проведено исследование вероятностей обнаружения пачки импульсов для промежуточных вариантов выбора порога. Результаты исследования представлены на рис. 4.

При исследованиях были получены также графики для других значений вероятности ложной тревоги ($P_{ЛТ} = 0.1, 0.001, 0.0001$). Характер зависимости при изменении значения вероятности ложной тревоги не меняется, поэтому они не представлены.

Для наглядного графического представления зависимости вероятности обнаружения пачки импульсов от значения порога k зафиксируем некоторое значение q (например $q = 1$). Зависимость вероятности обнаружения пачки импульсов от значения порога k для $P_{ЛТ} = 0.01$ и $q = 1$ показана на рис. 5.

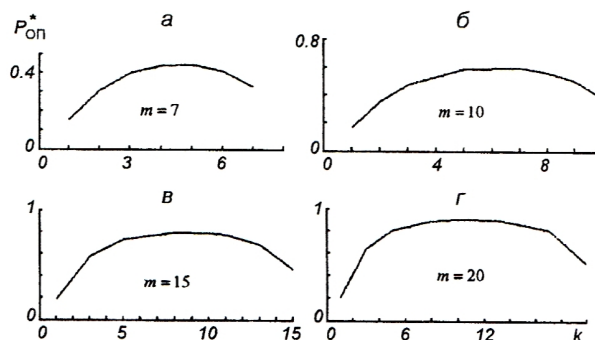


Рис. 5. Зависимость вероятности обнаружения пачки импульсов цифровым обнаружителем от k для $P_{ЛТ} = 0.01$, $q = 1$ и четырех различных значений m

Таким образом, для наилучшего обнаружения цифровым обнаружителем пачки, например, из 10 импульсов, необходимо выбрать порог в промежутке от 5 до 7.

Выводы. Из анализа зависимостей вероятности обнаружения цифровым интегратором пачки импульсных сигналов $P_{оп}^*(k)$ от величины порога k для различных значений длины пачки m , следует вывод о том, что явного ярко выраженного максимума данная зависимость не имеет и можно предложить целый диапазон для выбора k :

$$k_{opt} \in [m/2 - 0.1m; m/2 + 0.2m],$$

причем $k_{opt} \in Z$, где Z — множество целых чисел.

1. Вайнштейн Л. А., Зубаков В. Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. — М.: Сов. радио, 1960.—447 с.
2. Малайчук В. П. Основы теории обработки сигналов в технических системах управления и контроля. — Днепрпетровск, 1990.—116 с.

The given work is devoted to the comparison analog and digital detector of a pulse burst. The diagrams of dependence of the correct detection probability of the pulse burst from the signal-to-noise merit are submitted. The main aim of this article is to show the investigation of an influence a length of the pulse burst and a value of the detection threshold on detection efficiency. The recommendations are offered at the choice of the detection threshold for achievement in the best of detection probability.