

Лабораторная работа № 3

ЦИФРОВОЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение принципов реализации цифровых обнаружителей и исследование их качественных показателей.

2. КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Как известно, при обнаружении сигналов структура устройства оптимальной обработки определяется отношением правдоподобия $L(\vec{u}) = \frac{w_1(\vec{u})}{w_0(\vec{u})}$, где $\vec{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_M\}$ - совокупность (вектор) выборочных значений напряжения, $u_i = x \cdot S_i + u_{ni}$, $i = \overline{1, M}$; x - параметр, равный единице при наличии полезного сигнала $\vec{S} = \{S_1, \dots, S_j, \dots, S_M\}$ и нулю – при его отсутствии; $\vec{u}_n = \{u_{n1}, \dots, u_{ni}, \dots, u_{nM}\}$ - совокупность выборочных значений шумового напряжения; $w_0(\vec{u})$, $w_1(\vec{u})$ - значения многомерных плотностей вероятности, вычисляемые для принятой реализации \vec{u} в предположении об отсутствии ($x=0$) и наличии ($x=1$) полезного сигнала соответственно. Покажем качественно на простом примере смысл применения критерия отношения правдоподобия. На рис. 1 приведены одномерные распределения

$$w_0(u) = u \cdot e^{-\frac{u^2}{2}}, \quad (1)$$

$$w_1(u) = \frac{u}{1 + \frac{q^2}{2}} \cdot e^{-\frac{u^2}{2\left(1 + \frac{q^2}{2}\right)}} \quad (2)$$

для обнаружения сигнала со случайной начальной фазой и флюктуирующей по закону Релея амплитудой. Здесь q - отношение сигнал/шум по напряжению. Время прихода сигнала считаем известным. Распределениям такого вида подчиняется напряжение на выходе амплитудного детектора. Предположим, что на выходе детектора получено напряжение u_1 (рис. 1). Очевидно, что более правдоподобным является предположение о том, что это напряжение принадлежит распределению $w_1(u)$, так как $w_1(u_1) > w_0(u_1)$, т.е. оно обусловлено совместным действием сигнала и шума. Если же на выходе детектора имеется напряжение u_2 , то в этом случае $w_1(u_2) < w_0(u_2)$ и более правдоподобным является предположение об отсутствии полезного сигнала. Таким образом, проводится сравнение плотностей $w_1(u)$ и $w_0(u)$, что эквивалентно сравнению их отношения с некоторым порогом I_0 .

При обнаружении некогерентной пачки из M импульсов с независимыми флюктуациями амплитуд $\vec{u} = \{u_1, \dots, u_i, \dots, u_M\}$ отношение правдоподобия

$$l(\vec{u}) = \prod_{i=1}^M l(u_i) = \frac{1}{\left(1 + \frac{q^2}{2}\right)^M} \cdot \prod_{i=1}^M \exp\left\{\frac{u_i^2 \cdot q^2}{4 \cdot \left(1 + \frac{q^2}{2}\right)}\right\} \quad (3)$$

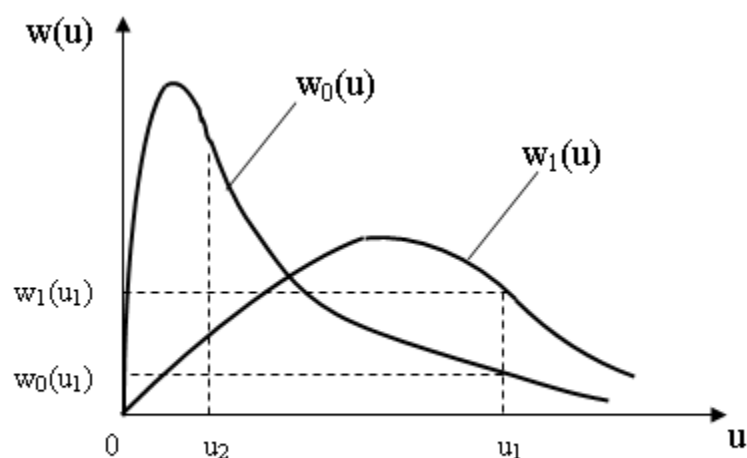


Рис. 1

Логарифмируя (3), и выполняя простые преобразования, легко привести алгоритм обнаружения к виду:

$$\sum_{i=1}^M u_i^2 \begin{matrix} ? \\ > \\ < \end{matrix} Z_0. \quad (4)$$

При выполнении в (4) условия ">" принимается решение о наличии полезного сигнала, в противном случае (при выполнении условия "<") - об отсутствии. Оптимальная структура приемника обнаружения, отвечающая (4), показана на рис. 2.

Согласованный фильтр (СФ) предназначен для обработки отдельных радиоимпульсов пачки. Используемые при обнаружении напряжения $u_1, \dots, u_i, \dots, u_M$ представляют собой отсчеты амплитуд радиоимпульсов на выходе СФ. Отсчеты берутся в моменты времени $t_0 + iT_n$, $i = \overline{0, M-1}$, где t_0 - момент достижения максимума отношения сигнал/шум первым импульсом пачки, а T_n - период следования импульсов в пачке. Отсюда следует, что обнаружитель должен содержать элемент памяти для хранения значений u_i^2 . На практике в качестве элемента памяти часто использовались различные устройства: ультразвуковые линии задержки, магнитные ленты или диски, потенциалоскопы и т.п. Недостаток указанных элементов памяти состоит в их невысокой точности, относительно низкой надежности и высокой стоимости. Эти факторы являются определяющими при переходе к квазиоптимальному цифровому обнаружителю.

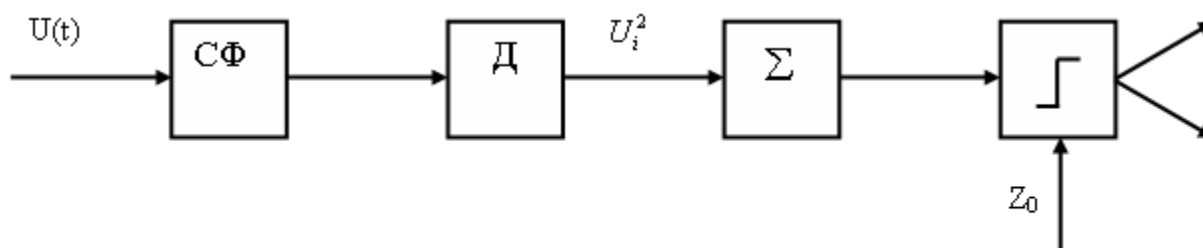


Рис. 2

Оптимальный алгоритм обнаружения может быть с высокой точностью

реализован в цифровой форме, если выходное напряжение детектора подвергнуть аналого-цифровому преобразованию. Тогда накопление реализуется цифровым сумматором без аппаратных погрешностей и нестабильностей. Единственным элементом, вносящим погрешность при обработке, является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), однако эта погрешность может быть уменьшена за счет увеличения его разрядности. Вместе с тем, доказано, что даже при минимальном числе уровней квантования сигнала, равном двум ("1" и "0"), увеличение энергии сигнала по сравнению с оптимальным алгоритмом (4), вызванное неоптимальностью обработки, не превышает 3 дБ.

Структурная схема цифрового обнаружителя при квантовании сигнала на два уровня приведена на рис. 3 [1,2]. Во временном селекторе (ВС) берутся отсчеты $\{u_i^2\}$, которые поступают на бинарный квантователь - пороговое устройство, где вырабатываются импульсы при превышении входным напряжением порога h . Таким образом, логическое напряжение "0" или "1" на выходе порогового устройства вырабатывается по правилу

$$\text{"1"} \text{ при } u_i^2 \geq h,$$

$$\text{"0"} \text{ при } u_i^2 < h.$$

Накопитель импульсов пачки при их бинарном квантовании представляет собой счетчик импульсов, вырабатываемых пороговым устройством. Результат

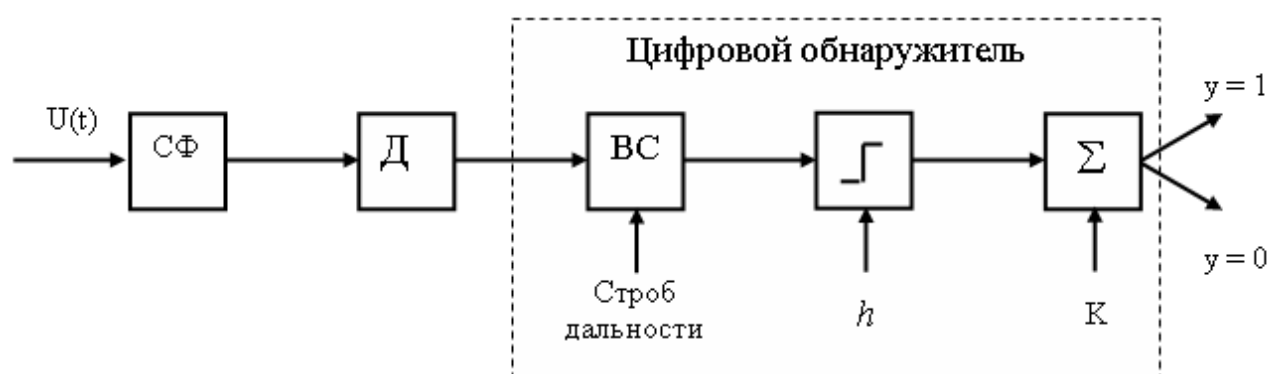


Рис. 3

накопления единичных решений R сравнивается с цифровым порогом K . Окончательное решение выносится по правилу:

$$\text{“1” при } R \geq K \quad (5)$$

$$\text{“0” при } R < K.$$

Число R накопленных единиц при M -кратной выборке (пачка из M импульсов) подчиняется биномиальному распределению, откуда вероятность $P(R)$ получения ровно R единиц при M испытаниях определяется выражением:

$$P(R) = C_M^R \cdot P_1^R (1 - P_1)^{M-R},$$

где C_M^R - число сочетаний из M элементов по R , а P_1 - вероятность образования единицы на выходе порогового устройства при однократном наблюдении (для одиночного импульса). Вероятность выполнения верхнего из условий (5), очевидно, равна:

$$P(R \geq K) = \sum_{R=K}^M C_M^R \cdot P_1^R (1 - P_1)^{M-R}.$$

При наличии сигнала и шума на входе обнаружителя $P_1 = D_1$ - вероятность правильного обнаружения при однократном отсчете, а при наличии шума - $P_1 = F_1$ - вероятность ложной тревоги при однократном наблюдении. Отсюда характеристики обнаружения для схемы рис. 3:

$$D = \sum_{R=K}^M C_M^R \cdot D_1^R (1 - D_1)^{M-R}, \quad (6)$$

$$F = \sum_{R=K}^M C_M^R \cdot F_1^R (1 - F_1)^{M-R}. \quad (7)$$

Из анализа характеристик обнаружения установлено [1, 2], что для каждого объема пачки M при использовании критерия Неймана-Пирсона существует оптимальное значение цифрового порога K , которое для $M \gg 1$ приближенно находится из условия

$$K_{opt} \approx 1,5 \cdot \sqrt{M}.$$

Доказано, что при таком выборе цифрового порога минимизируется отношение сигнал/шум, необходимое для обнаружения сигнала с заданными вероятностями D и F .

Вероятности D_1 и F_1 находятся при известных распределениях $w_0(u)$, $w_1(u)$ и пороге h при помощи очевидных формул:

$$D_1 = \int_h^{\infty} w_1(u) du; \quad F_1 = \int_h^{\infty} w_0(u) du.$$

В рассматриваемом примере, когда распределения $w_0(u)$, $w_1(u)$ имеют вид (1), (2), эти вероятности определяются выражениями:

$$D_1 = \exp\left\{-\frac{h^2}{1 + \frac{q^2}{2}}\right\}; \quad (8)$$

$$F_1 = \exp\left\{-\frac{h^2}{2}\right\} \quad (9)$$

и связаны между собой, как видно из (8), (9), соотношением:

$$D_1 = F_1^{\frac{1}{1+q^2/2}}.$$

3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

На рис.4 представлена структурная схема лабораторного макета, включающая в себя имитатор сигнала, имитатор радиоканала, цифровой обнаружитель пачки и статистический анализатор характеристик обнаружения. В имитаторе сигнала формируются отсчеты шума или смеси сигнала с шумом. При релейских флюктуациях полезного сигнала оба распределения $W_0(\bar{u})$ (1) и $W_1(\bar{u})$ (2) являются релейскими (рис.1) и отличаются друг от друга лишь средней мощностью (масштабом по оси абсцисс). Одинаковый тип законов распределения позволяет в макете достаточно просто имитировать наличие на входе обнаружителя шума или смеси сигнала и шума изменением усиления

отсчетов релейского шума, полученных с помощью временного селектора. При этом минимальный коэффициент усиления соответствует действию только шума на входе обнаружителя. В макете регулируемыми



Рис. 4.

параметрами являются отношение сигнал – шум q , объем пачки M , цифровой порог K и аналоговый порог h .

Управление экспериментом осуществляется четырьмя кнопками с совмещенными функциями и регулятором аналогового порога.

После включения питания необходимо кнопкой «Меню/Выбор» активизировать параметр q . Повторным нажатием этот параметр выбирается для регулировки (подчеркивание). Кнопка « \triangleleft /Шум» уменьшает, а «Пачка/ \triangleright » увеличивает значение параметра. Установив нужное значение параметра,

необходимо его зафиксировать нажатием левой кнопки (убрать подчеркивание). Для перехода к следующему параметру необходимо нажатием одной из средних кнопок выбрать нужный параметр и повторить процедуру установки его значения.

Кроме того кнопки « \triangleleft /Шум» и «Пачка/ \triangleright » включают режим вывода шума и пачки флюктуирующих импульсов на гнездо «Выход».

Кнопка «Выход/Старт» запускает эксперимент, а также осуществляет выход из всех режимов без сохранения изменения.

В верхней части экрана слева выводится оценка вероятности, а справа – порог.

Объем эксперимента (число испытаний) в макете выбран равным 10000. В качестве оценки вероятности принятия решения “сигнал есть” используется частота наступления данного события

$$P(R \geq K) \approx \frac{n}{N},$$

где N – общее число испытаний (число пачек), а n – число испытаний, окончившихся решением «сигнал есть».

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучить введение и проверить усвоение материала по контрольным вопросам.

2. Рассчитать зависимости: $F(K)$, $F(F_1)$, $D(q)$, экспериментально измеряемые впоследствии в лабораторной работе. Индивидуальные исходные данные взять из таблицы 1 в соответствии с порядковым номером студента в журнале группы (лабораторное задание выполняется также индивидуально).

3. Подготовить бланки лабораторного отчета с выполненным домашним заданием.

4. Продумать методику выполнения экспериментальной части лабораторного задания.

5. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Просмотреть и зарисовать осциллограммы напряжений на гнезде «Выход» при включении пачки флюктуирующих импульсов или шума. Анализируя распределение яркости изображения шума, качественно представить его плотность вероятности.

2. Для заданного в таблице объема пачки M измерить зависимость вероятности ложной тревоги F от цифрового порога K . Вероятность ложной тревоги F_1 в однократной выборке, устанавливаемая аналоговым порогом, также указана в таблице 1. Для измерения F_1 или D_1 необходимо задать $M=1$ и $K=1$.

3. Снять и построить зависимость $F = \Psi(F_1)$ для заданных в таблице 1 значений M и K . Сравнить экспериментальные результаты с теоретической зависимостью, рассчитанной в домашнем задании.

4. Для заданных в таблице 1 значений M , F и D экспериментально получить зависимость необходимого ОСШ q от цифрового порога K . Следует иметь в виду, что при изменении цифрового порога K изменяется вероятность ложной тревоги F . Поэтому для ее стабилизации на заданном уровне необходимо при каждом новом значении цифрового порога K скорректировать аналоговый порог, экспериментально находя его значение, при котором вероятность ложной тревоги F будет оставаться на заданном уровне. Выяснить, существует ли оптимальное значение цифрового порога K .

5. Экспериментально получить характеристики обнаружения $D(q)$ для заданных объема пачки M цифрового порога K и вероятности ложной тревоги F .

6. По всем пунктам задания сделать выводы.

Таблица 1

Варианты индивидуального задания

Номер в
журнале

	M	K	F	D
--	-----	-----	-----	-----

группы			F_1		
1	7	2	0.1	0.01	0.75
2	4	2	0.1	0.06	0.8
3	6	4	0.15	0.015	0.85
4	5	2	0,1	0.03	0.9
5	6	5	0.25	0.025	0.95
6	5	3	0.15	0.04	0.75
7	7	6	0.3	0.05	0.8
8	5	4	0.2	0.05	0.85
9	7	3	0.15	0.015	0.9
10	7	5	0.25	0.03	0.95
11	4	3	0.15	0.08	0.75
12	7	4	0.2	0.02	0.8
13	6	2	0.25	0.025	0.85
14	4	4	0.2	0.005	0.9
15	6	3	0.15	0.008	0.95

1. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют отношением правдоподобия и какова его роль при обнаружении сигналов?
2. Каков закон распределения амплитуды помехи (узкополосного шума) и амплитуды смеси флюктуирующего сигнала и помехи? В чем различие этих законов?
3. Каковы алгоритм и структурная схема обнаружителя некогерентной пачки быстро флюктуирующих импульсов?
4. В чем состоят трудности реализации оптимального алгоритма?
5. В чем сущность и какова структурная схема цифрового обнаружителя сигналов?
6. От чего зависят и как определяются вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения при цифровом обнаружении?

7. Как вычисляются вероятность правильного обнаружения, и ложной тревоги при однократном наблюдении? Какова их связь в случае флюктуирующего сигнала?
8. Какова структурная схема макета для изучения цифрового метода обнаружения сигналов? В чем состоит назначение отдельных элементов структурной схемы?
9. В чем состоит методика измерения вероятностей D и F ?
10. Каков характер зависимости вероятности ложной тревоги от цифрового порога K при фиксированных значениях M и F_1 ?
11. Что влияет на выбор величины аналогового порога в цифровом обнаружителе?
12. Каков характер зависимости вероятности правильного обнаружения D от отношения сигнал/шум q при $F = const$, $K = K_{opt}$?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Сов.радио, 1970. – 560 с.
2. Лёзин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем. - М.: Радио и связь, 1986. - 280 с.