

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИОННО-СПЕКТРАЛЬНОГО СПОСОБА ИДЕНТИФИКАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ

Целью данной работы является исследование дисперсионно-спектрального способа идентификации однократных импульсных сигналов малой длительности в квазиреальном времени. Так как длительность сигнала мала (единицы-доли наносекунд), для обработки целесообразно использовать дисперсионную линию задержки, которая в отличие от устройств, использующих быстрое преобразования Фурье, обладает эффектом расширения спектрального отклика как функции времени. Таким образом, применение дисперсионной линии задержки позволяет увеличить время измерения параметров исследуемых сигналов и производить эти измерения в квазиреальном времени.

Задача распознавания решается при следующих начальных условиях:

- принимаются искомым импульсный радиосигнал и импульсный радиосигнал-помеха с различными параметрами (центральная частота заполнения  $\omega_0$ , ширина спектра  $\Delta\omega_{0,7}$  на уровне 0,7 и коэффициент прямоугольности  $K_n$  огибающей спектра);
- идентифицируемый радиоимпульс и сигнал-помеха могут действовать одновременно или раздельно во времени;
- принимаемые сигналы выделены приемным устройством на фоне шумов;
- центральная частота  $\omega_0$  принимаемого одиночного радиоимпульса изменяется по нормальному закону;
- если принимается сумма основного сигнала и сигнала-помехи, центральная частота последнего изменяется по нормальному закону.

В процессе идентификации выделяются сигналы класса  $\Omega_1$  (радиоимпульсы с параметрами  $x_1 \in (\omega_{0\min}, \omega_{0\max})$ ,  $x_2 \in (\Delta\omega_{0,7\min}, \Delta\omega_{0,7\max})$ ,  $x_3 \in (K_{n\min}, K_{n\max})$ ) как без мешающего сигнала класса  $\Omega_2$ , так и в его присутствии.

Таким образом, для идентификации используем три наиболее устойчивых семейства признаков [1]:

- частоты максимумов спектра  $f_m$  (признак  $x_1$ );
- ширину спектра на различных относительных уровнях  $\Delta f_n$ , где  $n$  – уровень отсчета (0,7; 0,5) (признак  $x_2$ );
- коэффициенты прямоугольности  $K_n$  огибающей спектра  $K_{nNM} = \Delta f_N / \Delta f_M$ , где  $N, M$  – уровни отсчета в пределах  $N \in (0,5..0,8)$ ,  $M \in (0,001..0,01)$  (признак  $x_3$ ).

При этом:

- $x_1 \in (x_1; x_2 \dots x_l)$ , где  $l$  – количество максимумов спектра;
- $x_2 \in (x_1; x_2 \dots x_j)$ , где  $j$  – количество уровней отсчета ширины спектра;
- $x_3 \in (x_1; x_2 \dots x_i)$ , где  $i$  – количество уровней, по которым вычисляется коэффициент прямоугольности  $K_{nNM}$ .

Для общего случая принимаем равные вероятности появления сигналов обоих классов:  $P(\Omega_1) = P(\Omega_2) = 0,5$ .

Для получения конкретных характеристик процесса распознавания в качестве основного сигнала класса  $\Omega_1$  будем рассматривать радиоимпульсы с огибающей спектра  $S_1(\omega)$  типа функции Хэмминга и в качестве сигнала-помехи класса  $\Omega_2$  – радиоимпульсы с колоколообразной огибающей спектра  $S_2(\omega)$ .

При одновременном их воздействии [1] на выходе дисперсионной линии задержки (ДЛЗ) получим:

$$|S(\omega)| = \sqrt{|S_1^2(\omega, \omega_{0_1}, T_1)| + |S_2^2(\omega, \omega_{0_2}, T_2, \tau)| + 2 \cdot S_2(\omega, \omega_{0_1}, T_1) \cdot S_2(\omega, \omega_{0_2}, T_2, \tau) \cdot \cos(\varphi)}. \quad (1)$$

После определения информативных признаков  $x_1, x_2, x_3$  входных радиопульсов идентификация выполняется на основе критерия Байеса. Как известно, при этом стратегия решений обеспечивает минимум среднего байесовского риска. Применение критерия Байеса можно считать оправданным, так как распознавание осуществляется многократно в условиях неизменного признакового пространства при стабильном описании классов и неизменной платежной матрице.

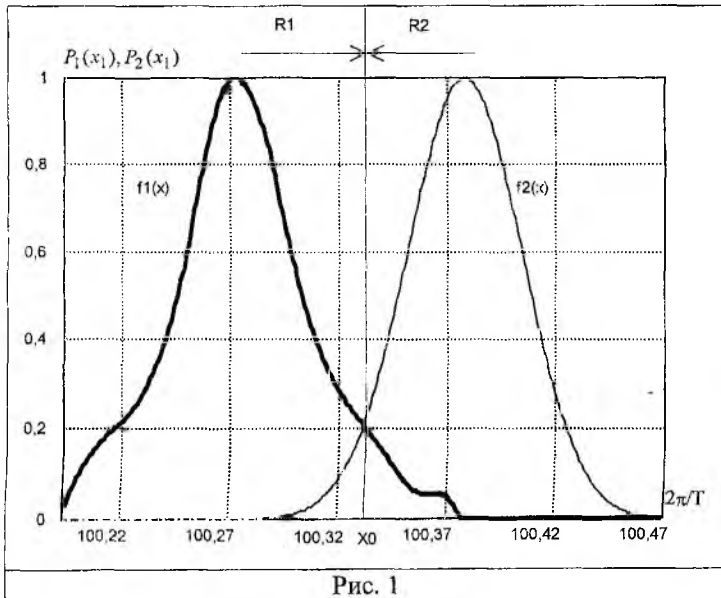


Рис. 1

Минимум риска, усредненного по множеству решений задачи распознавания неизвестных объектов, обеспечивается тогда, когда решения о принадлежности объектов классу  $\Omega_1$  или  $\Omega_2$  принимаются в соответствии со следующим правилом: если измеренное значение признака у данного объекта расположено в области  $R_1$ , то объект относится к классу  $\Omega_1$ , если в области  $R_2$  – к классу  $\Omega_2$ , что показано на рис. 1 (для случая, когда амплитуды основного сигнала и сигнала-помехи равны, центральная частота основного сигнала  $\omega_{0_1} = 100 \cdot \frac{2\pi}{T}$ ; дисперсия  $\sigma = 0,2$ ).

Стратегию, основанную на этом правиле, называют байесовской стратегией, а

минимальный средний риск – байесовским риском.

При этом условная вероятность принадлежности объекта классу  $\Omega_1$  для признака  $x_n$ , где  $n$  – номер признака равна [2]:

$$P(\Omega_1 / x_n^0) = P(\Omega_1) f_1(x_n^0) / f(x_n^0),$$

а условная вероятность принадлежности объекта классу  $\Omega_2$ :

$$P(\Omega_2 / x_n^0) = P(\Omega_2) f_2(x_n^0) / f(x_n^0),$$

где  $f(x_n^0) = P(\Omega_1) f_1(x_n^0) + P(\Omega_2) f_2(x_n^0)$  – совместная плотность распределения вероятностей значений признака  $x_n$  по классам;  $P(\Omega_1 / x_n^0)$  и  $P(\Omega_2 / x_n^0)$  – апостериорные вероятности принадлежности распознаваемого объекта классам  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  соответственно.

Условные риски по признаку  $x_n$ , связанные с решениями  $\omega \in \Omega_1$  и  $\omega \in \Omega_2$ , равны  $R(\Omega_1 / x_n^0) = c_2 P(\Omega_2 / x_n^0)$ ,  $R(\Omega_2 / x_n^0) = c_1 P(\Omega_1 / x_n^0)$ . Решение о принадлежности  $\omega \in \Omega_1$  принимается при условии минимального среднего риска, когда  $R(\Omega_1 / x_n^0) / R(\Omega_2 / x_n^0) < 1$ .

Таким образом, байесовский подход к решению задачи распознавания состоит в вычислении условных рисков и принятии решений на основании сравнения их значений. Именно такой подход обеспечивает минимум среднего риска и минимум ошибочных решений.

При распознавании первоначально необходимо определить: принимается один основной сигнал или вместе с сигналом-помехой. Поскольку рассматриваются радиопульсы с гладкими монотонно убывающими спектрами, эта задача решается по количеству максимумов суммарной огибающей  $S(\omega)$ . Далее процедура идентификации выполняется по-разному в зависимости от числа слагаемых.

Если принимается один радиопульс, необходимо определить – это основной сигнал или помеха. Поскольку центральная частота последнего может флуктуировать по нормальному закону, возможно ее совпадение с аналогичным параметром основного сигнала. Таким образом, имеется вероят-

ность приема на частоте  $\omega_{0_1}$  сигнала-помехи. Следовательно, для принятия решения о принадлежности радиосигнала к классу  $\Omega_1$  необходимо последовательно определить соответствие параметров  $x_1, x_2, x_3$  априорно заданным интервалам их значений. Если принимается сумма полезного сигнала и помехи, то априорные распределения признаков  $x_1, x_2, x_3$  будут близки к нормальному распределению [1].

При условии, что амплитуды основного сигнала и сигнала-помехи равны, условный риск принятия решения о принадлежности радиосигнала к классу  $\Omega_1$  увеличивается с увеличением каждого признака. Условный риск для признака  $x_1$  приведен на рис. 2: при  $D=1$  (кривая 1),  $D=10$  (кривая 2),  $D=50$  (кривая 3). График для равных амплитуд сигналов ( $D=1$ ) аппроксимируется зависимостью:

$$R(\omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - a(\omega))^2}{2\sigma^2}\right],$$

где  $\sigma = 0,21$ ;  $a(\omega) = 100,4 + \operatorname{tg}(\omega) \cdot \tau \operatorname{tg}(\omega) \cdot \frac{\operatorname{tg}(\omega)}{0,069}$ .

В реальных условиях идентифицируемый радиосигнал и сигнал-помеха имеют различные амплитуды  $A_1$  и  $A_2$ , отношение которых образует динамический диапазон  $D = \frac{A_2}{A_1}$  амплитуд в некотором интервале значений  $D \in [D_{\min}, D_{\max}]$ .

Для устойчивого измерения признаков  $x_1, x_2, x_3$  при наличии сигнала-помехи в динамическом диапазоне  $D$  необходимо внести ограничение на уровень точки пересечения спектров сигналов, а также модифицировать процедуру их измерения. Точка пересечения спектров, находящаяся между максимумами, должна находиться на уровне 0,5-0,7, а процедура измерения ширины спектра будет заключаться в измерении половины ширины спектра основного сигнала (по уровню 0,7) и умножению ее на 2.

Эти условия вызывают увеличение интервала разрешения  $\Delta\omega$  при условии (0,5-0,7). График зависимости этого параметра ( $\Delta\omega = \omega_{02} - \omega_{01}$ ) от динамического диапазона ( $D=1..150$ ) приведен на рис. 3 и аппроксимируется функциями:

$$\Delta_n(D) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \cdot \left[ \frac{-D - \left( a_n + a_n \cdot \frac{\sqrt{D^3}}{3} \right)^2}{2 \cdot (\sigma)^2} \right]$$

где  $\sigma = 0,95$ ;  $n$  – номер зависимости ( $n=1$  – уровень точки пересечения спектров равен 0,4;  $n=2$  и  $n=3$  – соответственно 0,5 и 0,6);  $a_1=1,048$ ;  $a_2=1,014$ ;  $a_3=0,96$ .

Из рис. 2 видно, что динамический диапазон сигналов фактически не влияет на риск принятия решения о принадлежности входного радиосигнала к тому или иному классу.

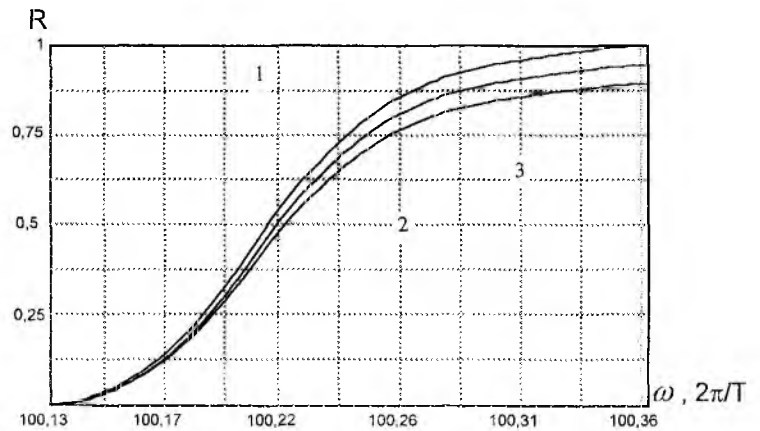


Рис. 2

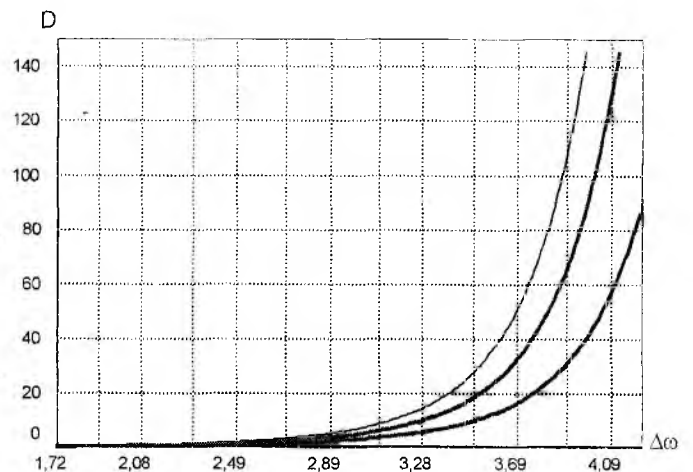


Рис. 3

Исходя из этого можно сделать вывод, что чем больше  $D$ , тем меньшее влияние на центральную частоту суммарного сигнала он оказывает. То есть увеличение динамического диапазона не увеличит условный риск распознавания.

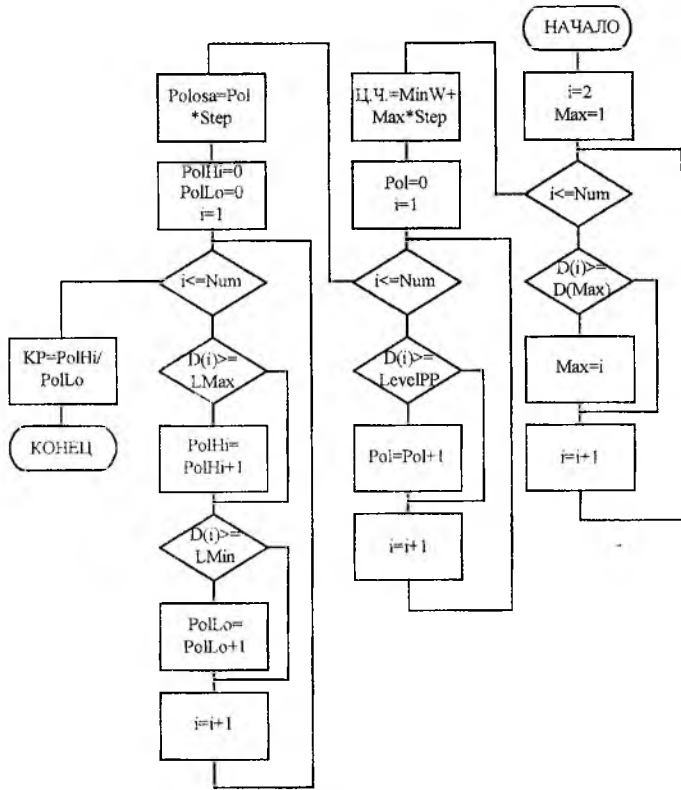


Рис. 4

Алгоритм самой идентификации приведен на рис. 5.

Устройство идентификации радиоимпульсов (рис. 6) функционирует следующим образом.

С учетом рассмотренных особенностей информативных признаков и критерия Байеса, обработка суммарного спектра (1) выполняется согласно алгоритму, приведенному на рис. 4 (где Num – количество отсчетов;  $D(i)$  –  $i$ -ый элемент входного дискретного спектра сигнала; Ц.Ч. – центральная частота; Polosa – полоса пропускания; LevelPP – уровень, по которому измеряется полоса пропускания; PolHi, PolLo – соответственно верхний и нижний уровни для определения коэффициента прямоугольности; KP – коэффициент прямоугольности).

Алгоритм функционирует следующим образом: при определении центральной частоты находится максимальное значение спектральной характеристики и вычисляется соответствующее ей значение частоты. Затем определяется ширина спектра (полоса пропускания): находится количество отсчетов выше уровня, по которому измеряется ширина спектра, после чего это количество умножается на шаг по частоте. Коэффициент прямоугольности определяется отношением двух ширин спектра на разных уровнях.

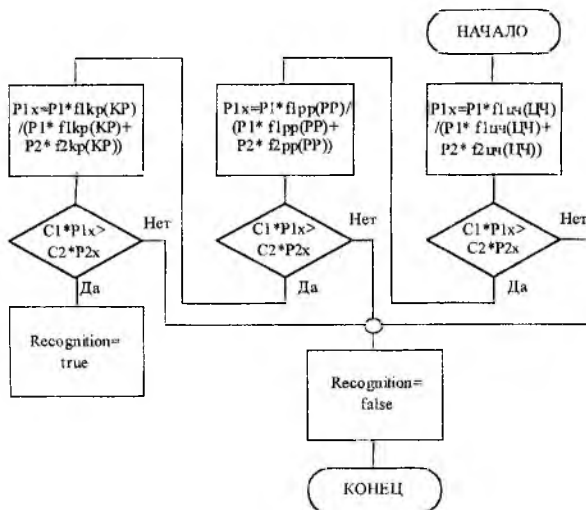


Рис. 5

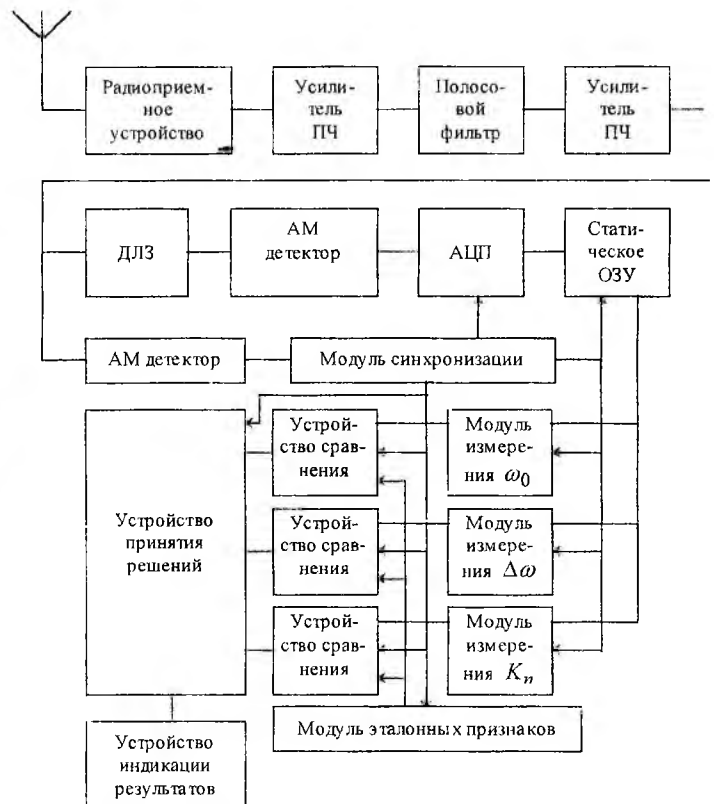


Рис. 6

Принятый исследуемый сигнал поступает на радиоприемное устройство, где выделяется на фоне сигналов-помех, далее выделенный и усиленный радиосигнал поступает на дисперсионную линию задержки (ДЛЗ), на выходе которой формируется спектр  $S(\omega)$  суммарного радиосигнала. Спектр заносится в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), откуда поступает на модули измерения признаков. Измеренные признаки в устройствах сравнения сравниваются с априорно заданными параметрами, после чего в устройстве принятия решения принимается решение о принадлежности входного сигнала к классу  $\Omega_1$  или  $\Omega_2$ .

**Список литературы:** 1. *Письменецкий В.А., Бородин А.В., Платонов П.И.* Анализ информативных признаков для идентификации импульсных радиосигналов по спектральным параметрам // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2000. Вып. 114. С.159-162. 2. *Письменецкий В.А., Бородин А.В., Платонов П.И.* Измерение несущей частоты наносекундных импульсов спектральным методом, 1996. 10 с. Деп. В ГНТБ Украины. 3. *Горелик А.Л. Скрипкин В.А.* Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1989. 232 с. 4. *Глудкин О.П., Черняев В.Н.* Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА. М.: Радио и связь, 1983. 296 с. 5. *Бородачев В.И.* Основные вопросы теории и точности производства. М.: Изд. АН СССР, 1950. 418 с.

*Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 29.12.2000*