РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2016 г. Е.А. ГОЛУБЕВ, А.В. СЕМЕНОВ

Московский технический университет связи и информатики,
ФГУП 18 Центральный научно-исследовательский институт
министерства обороны Российской Федерации, г. Москва

В настоящей работе рассматривается применение подхода, предложенного авторами [1], к радиоволновой диагностике изделий микроэлектроники по их энергетическим спектрам.

Предполагается, что при неограниченном времени наблюдений спектр сигналов любого объекта представим в виде кусочно-непрерывной, общей для всех сигналов отрезке, детерминированной функции. Множество функций, характеризующих объекты, интерпретируются как множество векторов гильбертова пространства. Расстояния между функциями в метрическом пространстве являются теми дискриминационными функциями, по которым целесообразно производить различение объектов. Пусть скорость сходимости в среднем спектров известна, и сходимость происходит за конечное время. Тогда задачу различения объектов целесообразно ставить, как задачу распознавания с ошибкой не превышающей допустимую.

Определение Различимыми по спектру радиоизлучения назовем объекты, спектры которых позволяют различить их за конечное время в гильбертовом пространстве.

Дискриминационные свойства спектров рассмотрим для случая пространства функций $F_1, F_2, ..., F_k$, описывающих спектры сигналов $S_1, S_2, ..., S_k$ в виде их огибающей кривой и пространства гистограмм, усредняющих наблюдения на отрезках внутри $[a,b]$. Введем следующие требования: пусть существует интеграл от квадрата любой функции $F_1, F_2, ..., F_k$; пусть область определения этих функций – отрезок $[a,b]$, общий для всех.

Для оценки расстояния между функциями будем использовать метрику гильбертова пространства $d(f,h) = \|f-h\| = \sqrt{\int_a^b (f(x)-h(x))^2 dx}$. Для исключения влияния разных масштабов при различении будем рассматривать лишь функции с нормой =1, для чего введем их нормировку

$$F_i(x) = \|f_i(x)\|^{-1} \cdot f_i(x); \ \|F_i(x)\| = 1 .$$

Таким образом, каждому спектру в гильбертовом пространстве соответствует точка, расположенная на гиперсферической поверхности единичного радиуса [2].

Методика контроля

Шаг 1. Преобразуем пространство сигналов в пространство спектров.

Как известно, энергетический спектр может быть получен только путем усреднения распределения энергии за бесконечное время наблюдения.

Шаг 2. Получение средней функции наблюдений (обучение).

Таким образом, для каждого числа измерений *n* может быть определена функция – среднее наблюдение:

$$\overline{F}_{i,n} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} F_{i,j} \tag{1}$$

где $F_{i,j}$ - распределение энергии *i*-го сигнала в полосе частот $[a,b]$, полученное в результате *j*-го замера. Последовательность средних функций сходится к функции спектру *i*-го сигнала.

В результате того, что время наблюдения и всегда конечно и в канале перехвата присутствуют помехи в системе различения будет присутствовать шум, выражающийся расстоянием между средней функцией и спектром соответствующего сигнала.

Обозначим плотность вероятности отклонения средней функции от соответствующего спектра через $W_n(d_i)$:

$$W_n(d_i) = W_n\left(d\left(\overline{F}_{i,n}, F_i\right)\right) \tag{2}$$

Очевидно, что вид $W_n(d_i)$ зависит от числа наблюдений и при $n \to \infty$ превращается в δ- функцию и задача распознавания решается однозначно.

Шаг 3. Построение решающего правила.

Рассмотрим в качестве главного дискриминационного признака при различении спектров расстояние между ними на гиперсфере.

$$d\left(F_i, F_j\right) = \sqrt{\int_a^b \left(F_i - F_j\right)^2 dx} = \sqrt{2}\sqrt{1 - \int_a^b F_i F_j dx} \tag{3}$$

Интеграл $\int_a^b F_i F_j dx = R\left(F_i, F_j\right)$ представляет собой корреляционную функцию двух спектров (корреляционный интеграл).

Для нормированных функций, отображающих спектры сигналов, корреляционный интеграл равен или 0, если спектры не имеют общих частот, т.е. спектры ортогональны, или 1, если спектры полностью совпадают, или принимает промежуточные значения.

Шаг 4. Принятие решения (распознавание).

Пусть существует ограниченное множество априорно известных функций F_i. Отнесение функции $\overline{F}_n$ к одной из известных функций (отождествление с определенным спектром), полученной в результате усреднения *n* измерений, с одной из функций F_i, будем производить при условии, что

$$d\left(\overline{F}_n, F_i\right) = \min_{j=1,2,\ldots,k} d\left(\overline{F}_n, F_j\right)$$

Из (3) следует, что условие (4) эквивалентно условию отождествления по максимуму корреляционного интеграла. Из теории оптимального декодирования известно, что отождествление принятого сигнала с одним из сигналов, хранящихся в памяти приёмника, производимое по максимуму корреляционного интеграла, минимизирует вероятность ошибки, т.е. является оптимальным. Этот метод также известен как метод максимального правдоподобия.

Схема оптимального декодера спектров описывается выражениями:

$$\overline{F}_n \approx F_i \Leftrightarrow d\left(\overline{F}_n, F_i\right) = \min_{j=1,2,\ldots,k} d\left(\overline{F}_n, F_j\right) \tag{5}$$

или

$$\overline{F}_n \approx F_i \Leftrightarrow R\left(\overline{F}_n, F_i\right) = \max_{j=1,2,\ldots,k} R\left(\overline{F}_n, F_j\right) \tag{6}$$

Вариант (6) использует максимум корреляционного интеграла и связан с вариантом (5) взаимно однозначным соотношением

$$d^2\left(\overline{F}_n, F_i\right) = 2\left(1 - R\left(\overline{F}_n, F_j\right)\right) \tag{9}$$

Шаг 5. Определение вероятности ошибки распознавания.

Для того, чтобы отождествлять спектры сигналов правильно, необходимо учесть наличие сигналов, спектрам которых различитель не был обучен. Поэтому отождествление спектра сигнал следует производить по правилу (5) или (6) с дополнительным условием, что средняя функция $\overline{F}_n$ достаточно близка к функции F_i.

Зададим области достоверного обнаружения следующим образом.

На гиперсферической поверхности единичного радиуса вокруг каждой точки $F_1, F_2, ..., F_k$ выделим непересекающиеся области $Q_1, ..., Q_k$, означающие достаточную для принятия решения близость мгновенных функций F_i к средней функции $\overline{F}_n$.

В общем случае контуры областей должны выбираться с учетом спектров сигналов, характерных для решаемой на практике задаче распознавания, а также с учетом взаимных помех от спектров априорно известных сигналов, обусловленных разным характером сходимости средних функций $\overline{F}_{i,n}$ к спектрам F_i.

Построение таких контуров представляет собой непростую теоретическую задачу, не говоря уже о сложных для реализации решающих правил. Поэтому ограничимся рассмотрением областей Q_i круговой формы с радиусом r_i.

Для выбора радиусов областей r_i целесообразно построить матрицу расстояний D. Минимальное ненулевое число $d_{i,\min}$ в *i*-й строке матрицы *D* определяет расстояние от точки F_i до ближайшей точки F_j. Полагая, что спектры сигналов F_i и F_j равновероятны и характер сходимости их средних функций $\overline{F}_{i,n}$ и $\overline{F}_{j,n}$ одинаков и не зависит от направления подхода к точке, граница между областями Q_i и Q_j должна делить это расстояние поровну. Из этого следует, что максимальный радиус области Q_i определяется из условия

$$r_i \le \frac{1}{2} d_{i,\min} \tag{10}$$

Решающая схема обнаружителя должна выдавать решение об отождествлении для *i*-го спектра лишь при условии, что

$$d\left(\overline{F}_n, F_i\right) \le r_i \tag{11}$$

Таким образом, необходимость в защите от спектров посторонних сигналов ухудшает характеристики оптимального обнаружения. Вероятность правильного отождествления для *i*-го спектра в соответствии с (11) и (2) определяется, как

$$p_i = \int_0^{r_i} W_n(d_i) dd \tag{12}$$

Общая вероятность правильного отождествления равна

$$p = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} p_i$$

При заданной вероятности правильного отождествления можно определить необходимое число измерений. Для этого, решая уравнение (12) для разных значений *n* построим зависимость $p_i = p_i(n)$, из которой следует необходимое число измерений.

Эксперимент

Предлагаемый подход применен для распознавания изделий микроэлектроники по их энергетическим спектрам. В частности для радиоэлектронных модулей с внутрикорпусным объемом [3].

Обучающая выборка – это годные модули. Выборка для распознавания содержит как годные модули, так и модули с ошибками при монтаже. Энергетические спектры от объектов исследования получены с помощью векторного анализатора цепей (в виде набора s-параметров). Методика измерения, реализованная в приборе, позволяет сымитировать наблюдение за продолжительное время, получив, таким образом усредненный «спектр» (функцию среднее наблюдение).

Результаты контроля для отрезка от 1 до 4,5 ГГц представлены на рис. 1.

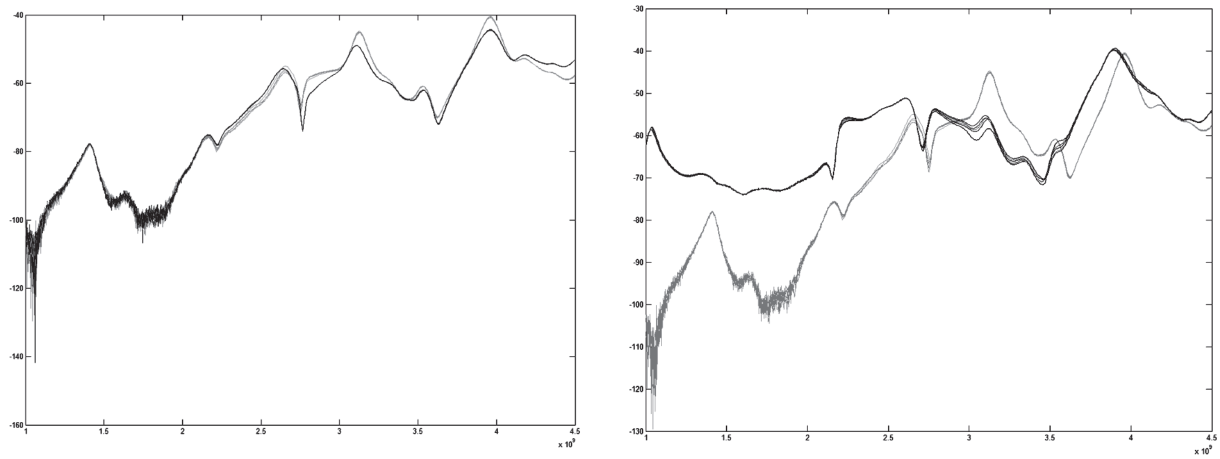

Рис. 1. Результаты различения годных модулей и модулей с ошибками монтажа (светлые линии – s12 характеристики годных моделей, темные линии – s12 характеристики модулей с ошибками монтажа).

В данном эксперименте метод расчета имеет сходство алгоритмом k-средних, где на этапе обучения с помощью функции среднего наблюдения жестко задается центр «кластера», а область Q_i является его выпуклой оболочкой.

Таким образом, описываемый подход можно применять для решения задлач радиоволновой технической диагностики изделий микроэлектроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голубев Е.А., Семенов А.В.* Применение технологии воспроизводящих ядер в гильбертовом пространстве для распознавания сигналов // Сборник трудов X международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (16-17 марта 2016 г.) с. 120. Москва – МТУСИ – 2016г.
2. *Kennedy R.A., Sadeghi P.* Hilbert Space Methods in Signal Processing Cambridge University Press 2013. 420 p.
3. *Гордиенко В.В., Потапов А.Ю., Семенов А.В., Федорец В.Н.* Способ, устройство и система для подтверждения подлинности изделий электронной техники // Патент на изобретение № 2534004 РФ: МПК G01R31/; заявитель и патентообладатель ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ заявл. 09.01.2013; опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33.