

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.391.268

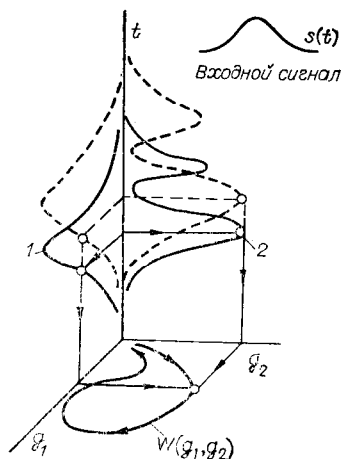
А. Е. КРАСНОВ
(Москва)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИЛЬБЕРТ-ФИЛЬТРАЦИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛА
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ ПРИЗНАКОВ
ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ**

Задача выделения информативных признаков, характеризующих пространственную структуру электромагнитного сигнала, является важнейшей частью проблемы автоматического распознавания состояния объекта по его собственным или переизлученным полям. В ряде случаев данные признаки должны быть инвариантны к условиям наблюдения объекта или соответствующего ему электромагнитного сигнала, в частности к его сдвигу и изменению масштаба. В последнее время большие надежды возлагают на частотно-спектральные методы выделения инвариантных признаков, которые основаны на нелинейных интегральных преобразованиях спектра пространственных частот сигнала [1, 2]. Однако данные методы обладают существенными недостатками. Так, при измерении (вычислении) спектра мощности теряется информация о взаимном расположении (фазах) отдельных составляющих сигнала. Интегральные преобразования спектра усредняют пространственные частоты сигнала. В результате значительно снижается селективность выделяемых признаков — различные по структуре сигналы обладают одинаковыми признаками.

В сообщении описан метод выделения инвариантных признаков электромагнитного сигнала, свободный от указанных недостатков. Сущность метода заключается в следующем. Электромагнитный сигнал $s(t)$, отвечающий пространственной огибающей наблюдаемого поля, пропускается одновременно через два различных пространственных фильтра. Характеристики фильтров выбираются такими, чтобы их выходные сигналы $g_1(t)$ и $g_2(t)$ повторяли сдвиги и изменения масштабов входного сигнала. Затем измеряются амплитуды выходных сигналов и строится спектр $w(g_1, g_2)$ совместных значений данных амплитуд (см. рисунок). При специальном выборе характеристик фильтров спектр w оказывается инвариантным к сдвигам и изменениям масштабов входного сигнала.

Обычно электромагнитный сигнал, связанный со скалярным стационарным полем, описывают двумерной комплексной функцией $s(x, y)$. Будем искать необходимые фильтры в классе нелинейных пространственно-инвариантных систем. Тогда действительные выходные сигналы фильтров можно описать выражениями $g_i(x, y) = G[s(x, y) \otimes h_i(x, y)]$, $i = 1, 2$. В данном выражении h соответствует импульсной характеристике фильтра, символ \otimes означает операцию двумерной свертки, а $G[s]$ — операцию нелинейного преобразования комплексной амплитуды сигнала s в действительную величину. В частности, данная операция включает нормирование амплитуды сигнала для достижения независимости g от преобразований вида $s \rightarrow ks$, а также конкретный тип детектирования (гетеродинный или гомодинный, когерентный или некогерентный) сигнала. Сменим условия наблюдения сигнала, т. е. увеличим масштабы входного сигнала по взаимно ортогональным направлениям в M, N раз и сдвинем сигнал на величины $\Delta x, \Delta y$ соответственно. Данным изменениям будет отвечать сигнал $s(Mx - \Delta x, Ny - \Delta y)$. Для того чтобы выходные сигналы «отслеживали» все подобные изменения входного сигнала при наиболее общем виде



Выходные сигналы фильтров до (сплошная) и после (штриховая кривая) сдвига и изменения масштаба входного сигнала:

1, 2 — выходные сигналы фильтров

нелинейной функциональной зависимости $G[s]$, т. е. $g(x, y) \rightarrow g(Mx - \Delta x, Ny - \Delta y)$, импульсные характеристики фильтров должны удовлетворять условию $h(x, y) = h(Mx, Ny)MN$. В классе наиболее легко реализуемых разделимых импульсных характеристик данному условию удовлетворяют четыре обобщенные функции: $h_1(x, y) = \delta(x)\delta(y)$, $h_2(x, y) = \delta(y)P/x$, $h_3(x, y) = \delta(x)P/y$, $h_4(x, y) = P/xy$, где $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака, а P/t — главное значение в смысле распределений функции $1/t$ (в точке $t = 0$ функция не определена). Выберем в качестве необходимых импульсных характеристики h_1 и h_2 , соответствующие тождественному преобразованию сигнала ($s \otimes h_1 = s$) в линейной части первого фильтра и преобразованию Гильберта сигнала ($s \otimes h_2 = s \otimes P/x$) в линейной части второго фильтра. Выбор данных импульсных характеристик связан также со следующим обстоятельством. Известно, что по своему действию на сигнал гильберт-фильтрация аналогична взятию его производной вдоль соответствующего направления: $s(x, y) \otimes h_2(x, y) = (\partial s(x, y)/\partial x) \otimes P/x^2 \cong \partial s(x, y)/\partial x$ [3]. Заметим, что распределение $w(s, s \otimes h_2)$ является аналогом фазового портрета процесса изменения сигнала вдоль направления x (направления «строк»). Для одномерных динамических процессов второго порядка такой фазовый портрет будет однозначным интегральным описанием их динамических свойств [4]. В нашем случае стационарный электромагнитный сигнал s зависит от двух переменных, но также удовлетворяет уравнению второго порядка — волновому уравнению Гельмгольца. Следовательно, распределение $w(s, s \otimes h_2)$ с точностью до любых перестановок строк сигнала в направлении y является фазовым портретом процесса $s(x, y)$. Если предположить, что такие перестановки маловероятны, то различным сигналам s будут соответствовать различные распределения w . Известные методы детектирования электромагнитных сигналов обычно дают монотонную зависимость $G[s]$. Поэтому спектр $w(g_1, g_2) = w(G[s], G[s \otimes h_2])$ будет также однозначно связан с сигналом s . Для устранения неоднозначности, обусловленной двумерностью сигнала, необходимо производить гильберт-фильтрацию сигнала и в другом, ортогональном направлении и строить дополнительный спектр $w(G[s], G[s \otimes h_3])$. Производя гильберт-фильтрацию сигнала по различным направлениям и строя усредненный фазовый портрет, можно получить интегральное описание пространственной структуры сигнала, не зависящее от его трансляционных и ориентационно-масштабных преобразований.

Таким образом, по аналогии с описанием динамических процессов второго порядка спектр совместных значений электромагнитного сигнала и его гильберт-образов представляет собой интегральное описание (фазовый портрет) пространственных свойств сигнала, а составляющие спектра могут рассматриваться как инвариантные признаки его пространственной структуры. Роль преобразования Гильберта и найденного спектра оказывается не случайной. Можно показать, что основы феноменологически изложенного метода обусловлены причинами, связанными с корпускулярно-волновой природой электромагнитного поля и проблемой измерения различных физических свойств объектов такой природы. В частности, представление электромагнитного поля с помощью разложения по плоским волнам или когерентным состояниям накладывает ограничение на описание его пространственных свойств, так как статистический оператор плотности стационарного поля зависит лишь от абсолютных значений амплитуд когерентных состояний [5]. В результате все поля, когерентные компоненты которых отличаются фазами, оказываются вырожденными: им соответствует один и тот же оператор плотности. Найденный спектр совместных значений пространственной огибающей электромагнитного поля и ее гильберт-образов является оценкой оператора плотности, вырожденной по отношению к трансляционно-масштабным преобразованиям пространственных координат поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейсасент Д., Псалтис Д. Новые методы оптических преобразований для распознавания образов // ТИИЭР.— 1977.— Т. 65, № 1.
2. Павличенков С. А., Протасевич В. И., Садыков Ш. И., Скочиллов А. Ф. Алгоритм, реализующий ориентационно-масштабную инвариантность в проблеме распознавания образов // Автометрия.— 1985.— № 4.
3. Сороко Л. М. Гильберт-оптика.— М.: Наука, 1981.
4. Андронов А. А., Леонтович Е. А., Гордон И. И., Майер А. Г. Качественная теория динамических систем второго порядка.— М.: Наука, 1966.
5. Глаубер Р. Оптическая когерентность и статистика фотонов // Квантовая оптика и квантовая радиофизика.— М.: Мир, 1966.

Поступило в редакцию 26 мая 1986 г.