

## ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ СИГНАЛОВ

Геннадий Максименко

Президиум Национальной Академии Наук Украины

*Анотація:* Розглядається підхід до представлення небезпечних сигналів методами частотно-часового аналізу. Обґрунтована доцільність застосування для опису небезпечних сигналів частотно-часового розподілення Вигнера, для якого існують ефективні алгоритми обробки сигналів.

*Summary:* In the article the questions of the methods frequency-time analyses for representation dangerous signals are considered. The describe these signals is founded on frequency-time of Wigner distribution, for which are effective algorithms of processing signals.

*Ключові слова:* Опасный сигнал, частотно-временное распределение.

### I Введение

Развитие современных программно-аппаратных средств и комплексов для проведения специсследований объектов информационной деятельности на наличие опасных сигналов требует усовершенствования, разработки и использование новых математических методов представления и обработки таких сигналов.

Опасные сигналы извлекаются путем их обнаружения, приема и анализа при работе основных и вспомогательных средств, расположенных на объекте, а также при наличии побочных электромагнитных излучений и наводок. При этом опасным считается сигнал, если он содержит информацию с ограниченным доступом и может быть перехвачен злоумышленником. Поэтому создание и внедрение надежных систем и комплексов технической защиты информации на объектах не возможны без реализации функций обнаружения опасных сигналов.

Любой опасный сигнал (далее – сигнал) характеризуется низкой мощностью, нестационарностью и низкой вероятностью его обнаружения в сложной помеховой обстановке (при предельном отношении сигнал/шум  $< 5$  дБ). Поэтому основными требованиями к выбору математических методов его описания являются: обеспечение такого представления сигнала, которое учитывало бы его нестационарность; применимость в задачах энергетического обнаружения даже в условиях воздействия нестационарных шумов; наличие для данных представлений эффективных алгоритмов обработки.

До сих пор известные методы анализа сигналов основывались на статистическом подходе. Преобразование Фурье (прямое и обратное), по сути, представляют собой математическую абстракцию, так как, в частности, спектральная функция (прямое преобразование Фурье) неизменна по времени и может быть вычислена, если функция времени известна в промежутке  $t \in (-\infty, \infty)$ . Такое представление на практике выполняется в достаточном приближении, если рассматриваются установившиеся процессы в системах (т. е. стационарные режимы работы систем). При рассмотрении переходных процессов (например, процесса вхождения системы связи в синхронизм) это представление становится неадекватным и необходимо вводить другие представления, связывающие временные и спектральные характеристики сигналов. Но статистический подход к определению энергетического спектра дает только усредненную картину распределения энергии процесса по частотам элементарных гармонических составляющих. При этом при статистическом усреднении не учитывается принципиально фазовая структура процесса. В связи с этим целесообразно для анализа сигналов использовать частотно-временные представления, а именно – математические методы частотно-временного распределения (ЧВР).

Передовые теоретические исследования в области частотно-временного анализа инициировались прежде всего потребностями практики. Попытки сблизить частотную и временную точки зрения на формы описания сигналов продолжаются до сих пор. И хотя это направление имеет серьезные ограничения по возможностям синтеза адекватных моделей сигналов, оно в ряде случаев оказывается эффективным, когда, например, статистические методы в силу ограниченного по времени электромагнитного контакта с источником излучения не дают результата.

В настоящее время на базе теории частотно-временных рядов и новых технологий цифровой обработки сигналов наметилась тенденция перехода к качественно новой ступени анализа тонкой структуры сигналов. Она базируется на методах описания сигналов частотно-временными рядами и понятиях текущего и мгновенного спектров.

## II Частотно-временное распределение Габора

Мгновенный спектр определяется как спектр отрезка сигнала длительностью  $T$ , непосредственно предшествующего данному моменту  $t$ . Его можно также представить разностью двух текущих спектров или приращением, получаемым текущим спектром за промежуток времени  $T$  [1]:

$$S(f, t) = \int_{-\infty}^t A(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau - \int_{-\infty}^{t-T} A(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau = \int_{t-T}^t A(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau, \quad (1)$$

Аналитическая запись разложения сложного объекта-сигнала в пространстве частота-время на совокупность простых составляющих, предложенная Габором, имеет вид [2]:

$$A(t) = \sum_k \sum_l c_{kl} u_{kl}(t) \quad (2)$$

Здесь  $\{c_{kl}\}$  – частотно-временной спектр;  $\{u_{kl}(t)\}$  – система функций разложения, причем

$$\{u_{kl}(t)\} = \{u(t + l \cdot T) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T} - \frac{\pi}{4}\right)\}, \quad (3)$$

где  $T$  – длительность анализируемого отрезка сигнала;  $u(t)$  – весовая функция совокупности  $\{u_{kl}(t)\}$ , которая для ряда Габора является гауссовой [2]:

$$\{u(t)\} = \exp\left(-\frac{2t^2}{T^2}\right) \quad (4)$$

Функция (4) не является единственно возможной при описании сигнала рядом (2). В литературе [2] показано, что это могут быть любые функции, произведение эффективной полосы частот которых на эффективную длительность близко к единице.

Простейшим случаем является прямоугольная весовая функция  $u_0(t)$  для которой в [2] доказано утверждение о том, что значения мгновенного спектра сигнала  $A(t)$ , заданного выражением (1), в плоскости частота-время ( $2\pi k/T$ ;  $l \cdot T$ ) совпадает со значениями частотно-временных спектров (2) для прямоугольной весовой функции анализа  $u(t)$  в (3) длительностью анализируемого отрезка сигнала  $T$ .

Прямоугольная весовая функция  $u_0(t)$  на указанном отрезке длительностью  $T$  дает полную и ортогональную систему тригонометрических функций разложения (2) в ряд Фурье. Для нее обобщенное частотно-временное представление сигнала имеет вид [4]:

$$A(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} u_0(t + lT) c_{kl} \cos\left(\frac{2\pi kt}{T} - \frac{\pi}{4}\right), \quad (5)$$

$$c_{kl} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(t + lT) A(t) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T} - \frac{\pi}{4}\right) dt. \quad (6)$$

Как показано в [4], выбор вида весовой функции  $u(t)$  и длительности анализируемого отрезка сигнала  $T$  меняет аппроксимирующие свойства рядов (2), которые оказываются тем лучше, чем большая часть энергии функции  $u(t)$  сосредоточена на частотно-временной площадке единичной площади.

В отличие от прямоугольной весовой функции разложение Габора с  $u(t)$  вида (4) обладает некоторыми преимуществами. Оно позволяет с определенной степенью точности локализовать энергию анализируемого сигнала как по времени, так и по частоте. Вместе с тем, разложение сигнала в ряд Габора по элементарным гауссовским сигналам связано с определенными трудностями. Данная система функций не является строго ортогональной. В литературе [4] предложены методы преодоления этого недостатка, но система Габора не является минимальной – одну из функций системы можно выбросить, сохранив полноту оставшейся системы. В этом отношении следует считать актуальной задачу поиска других более эффективных (оптимальных) частотно-временных распределений.

### III Частотно-временное распределение Вигнера

Среди множества частотно-временных распределений (ЧВР) важную роль в теории и практике анализа сигналов играет распределение Вигнера [2, 3]:

$$V(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_a(t + \tau/2) s_a^*(t - \tau/2) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau, \quad (7)$$

где  $s_a(t)$  – аналитический сигнал анализируемого действительного процесса  $s(t)$  конечной энергии; \* – знак комплексного сопряжения.

Распределение Вигнера обладает рядом свойств, которые делают его уникальным инструментом исследования частотно-временной структуры нестационарных процессов. Например, сдвиг сигнала по частоте и (или) по времени приводит к соответствующему сдвигу распределения; средние распределения по времени или частоте определяют соответственно значения спектральной мощности сигнала на заданной частоте или мощности его огибающей в заданный временной отсчет; моменты первых порядков функции Вигнера приводят к известным понятиям мгновенной частоты и группового времени задержки. Наконец (7) – это действительная функция, значения которой локализуются в точках частотно-временной плоскости, определяемых мгновенными частотами действующих процессов. Характеристической функцией распределения Вигнера является хорошо известная в теории радиолокации функция неопределенности.

При вычислении выражения (7) обычно пользуются его дискретным аналогом [3]:

$$V(k, n) = \sum_{\tau=-N/2}^{N/2} s_a(\tau + n) s_a^*(n - \tau) \exp(-j2\pi k\tau / N). \quad (8)$$

где  $N$  – объем обрабатываемых отсчетов континуального сигнала, взятых в соответствии с теоремой Котельникова;  $k, n$  – частотные и временные переменные дискретного преобразования соответственно.

Учитывая свойства положительности распределения Вигнера, выражение (8) после сравнительно несложных преобразований можно привести к более удобному для дальнейших рассуждений виду. С точностью до постоянного множителя

$$V(k, n) = \sum_{\tau=-N/2}^{N/2} s(n + \tau) s(n - \tau) \operatorname{Re} \{ \exp(-j2\pi k\tau / N) \}, \quad (9)$$

Как показано в работах [4, 5], частотно-временное распределение Вигнера удобно использовать для решения задачи энергетического обнаружения опасных сигналов в нестационарных шумах. Это позволит уменьшить нижнюю границу требуемого отношения сигнал/шум для уверенного обнаружения опасного сигнала.

Используя частотно-временное представление Вигнера можно не только понизить требуемое отношение сигнал/шум, но и снизить требования к объему априорной информации, используя принцип локализации энергии однокомпонентных сигналов на частотно-временной плоскости [4]. Согласно этому принципу энергия концентрируется вблизи линии мгновенной частоты сигнала. Тогда задачу обнаружения можно сформулировать следующим образом: по фрагменту частотно-временной плоскости, ограниченному интервалом наблюдения  $T_n$  и полосой анализа  $\Delta F$ , принять решение о наличии или отсутствии в ней опасного сигнала.

Исследование фрагментов распределения Вигнера активной энергии сигнала показывает, что области положительных значений частотно-временного распределения располагаются вблизи линии мгновенной частоты (рис. 1,а). В случае отсутствия однокомпонентных опасных сигналов, не просматривается четко ограниченных на частотно-временной плоскости областей концентрации положительных значений (рис. 1,б). Вследствие этого траектория изменения мгновенной частоты может быть аппроксимирована кусочно-постоянной функцией с возможно более длительными интервалами непрерывности.

Однако сам факт наличия на анализируемом фрагменте частотно-временной плоскости аппроксимирующей функции не может служить статистикой, характеризующей наличие сигнала, так как она получается и при отсутствии однокомпонентного сигнала (рис. 1,б). Сравнение кусочно-постоянных аппроксимирующих функций (непрерывные линии на рис. 1,а и рис. 1,б) показывает, что при отсутствии в обрабатываемом фрагменте ЧВР однокомпонентного сигнала ломаный характер функции *более ярко выражен*. Следовательно, в качестве решающей статистики для задачи энергетического обнаружения узкополосного процесса на основе ЧВР активной энергии может быть определено число интервалов

непрерывности кусочно-постоянной аппроксимирующей функции. Тогда, как указано в [4], решающее правило для построения алгоритмов энергетического обнаружения опасных сигналов может быть представлено в виде выражения:

$$H = \begin{cases} H_1 & | M \leq M_n; \\ H_0 & | M > M_n, \end{cases} \quad (10)$$

где  $H_1$  и  $H_0$  – решения, соответствующие наличию или отсутствию сигнала;  $M$  – число интервалов непрерывности кусочно-постоянной аппроксимирующей функции;  $M_n$  – порог принятия решения.

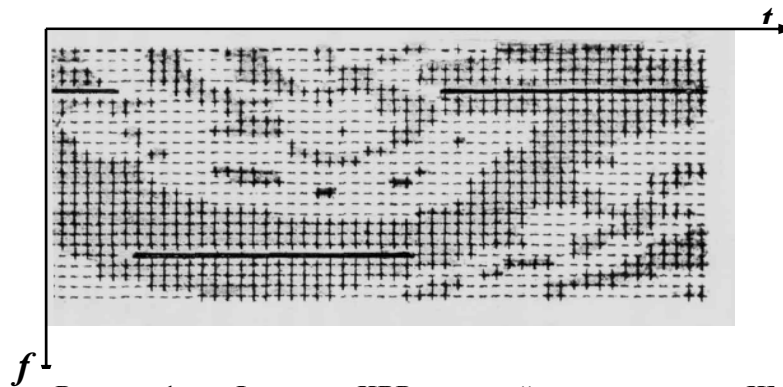


Рисунок 1, а – Фрагмент ЧВР активной энергии сигнала ЧМ

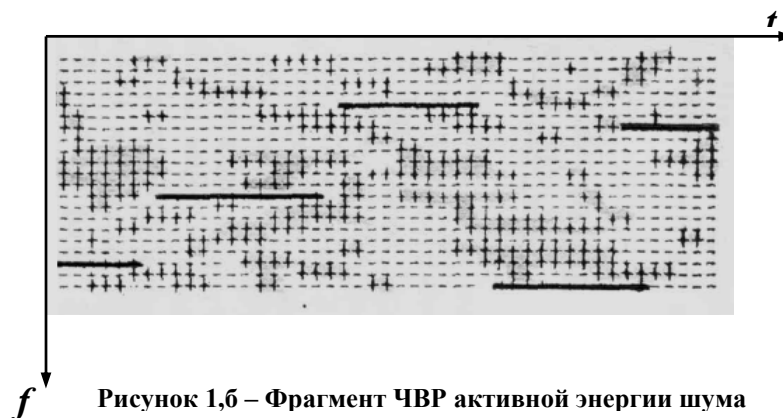


Рисунок 1,б – Фрагмент ЧВР активной энергии шума

#### IV Заключение

В статье рассмотрены два основных метода для представления опасного сигнала: частотно-временное распределение Габора и частотно-временное распределение Вигнера. Обоснована предпочтительность применения частотно-временного распределения Вигнера для формализованного представления и анализа опасных сигналов, которое позволяет на практике построить и применить эффективные алгоритмы энергетического обнаружения и обработки опасных сигналов в условиях нестационарного шума, понизить требуемое отношение сигнал/шум и снизить требования к объему априорной информации.

*Литература:* 1. Поляков П. Ф. Широкополосные аналоговые системы связи со сложными сигналами. – М.: Радио и связь, 1981. – 152 с. 2. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х т. – М.: Мир, 1983. 3. Алексеев А. А., Кириллов А. Б., Чеченев С. Ю. Частотно-временное распределение мощности сигналов в базисе Уолша // Радиоэлектроника (Изв. Высш. учеб. заведений). – 1991. – Т. 34. – С. 12 – 17. 4. Алексеев А. А., Кириллов А. Б. Технический анализ сигналов и распознавание радиоизлучений. – СПб.: ВАС, 1998. – 368 с. 5. Л. Коэн. Время-частотные распределения, ТИИЭР, т. 77, № 10, 1989 г.