

УДК 621.391.828

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВИГНЕРА-ВИЛЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ СРЕДЫ

© 2011 г.

*Е.И. Шкелев*¹, *Н.Е. Земнюков*¹, *М.Н. Корокозов*²,
*А.А. Стромков*³, *А.П. Марышев*³, *И.Н. Диденкулов*³

¹Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

²Нижегородский филиал ЦНИИ «Комета» – «КБ «Квазар»

³Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

shkelev@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 19.05.2011

Рассмотрен метод исследования дисперсионных свойств среды, основанный на активном зондировании и спектрально-временном анализе (СВА) прошедшего через исследуемую среду сигнала посредством взаимного преобразования Вигнера–Виля (ВВ) с опорным сигналом, согласованным с принимаемым. Особенностью метода является использование комплексных свойств взаимного ВВ преобразования, в результате чего достигается более высокое в сравнении с традиционными методами СВА частотно-временное разрешение. Представлены результаты натурного (в условиях моря) эксперимента, показавшие эффективность предложенного способа обработки применительно к гидроакустическим сигналам.

Ключевые слова: частотная модуляция, спектрально-временной анализ, преобразование Вигнера–Виля, дисперсия, гидроакустика, дистанционное зондирование.

Свойства гидроакустического канала распространения звука отличаются большим разнообразием и зависят от таких факторов, как рельеф дна, соленость, термальный разрез, глубина, волнение на поверхности, близость побережья и т.д. К тому же перечисленные факторы подвержены сезонным и географическим изменениям. Большое влияние на распространение гидроакустического сигнала оказывают свойства среды такие, как слоистость, наличие дисперсии, различные виды реверберации, из-за чего передаваемый по акустическому каналу сигнал может претерпевать значительные изменения. С одной стороны, это приводит к искажениям передаваемой информации, а с другой, – возникшие в принятом сигнале изменения могут быть использованы в целях диагностики среды распространения. В работе рассматривается один из методов исследования дисперсионных свойств среды, основанный на применении активного зондирования и выявлении изменений спектрально-временных характеристик (СВХ) излученного сигнала $s(t)$ при его распространении до точки приема. Для целей спектрально-временного анализа (СВА) применен ранее не использовавшийся при решении подобного рода задач метод взаимного преобразования Вигнера–Виля (ПВВ) [1–3]

$$P(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} u\left(t - \frac{\tau}{2}\right) s_0^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (1)$$

Преобразование можно трактовать как двумерную взаимную функцию корреляции между принятым сигналом $u(t)$ и опорным колебанием $s_0(t)$, зеркально отображенным во времени и смещенным по частоте [1, 4], или как свертку между $u(t)$ и $s_0(t)\exp(-j2\pi ft)$. Оба сигнала представлены в аналитическом (комплексном) виде.

Применение преобразования (1) налагает ограничение на вид используемых при диагностике сигналов. Важно, чтобы принятый сигнал $u(t)$ имел непрерывную угловую модуляцию, при которой имеют смысл понятия активного (мгновенного) спектра и мгновенной частоты. Для рассматриваемого метода диагностики в качестве зондирующих могут быть использованы одиночные δ -образные импульсные сигналы и импульсы с непрерывной частотной модуляцией. Однако δ -образные импульсы применимы, если импульсная реакция канала связи обладает достаточно большой длительностью и обеспечивает принимаемому сигналу $u(t)$ свойства сигнала с частотной модуляцией. Достигается это при достаточно больших расстояниях от излучателя до приемника. При использовании сигналов с непрерывной угловой модуля-

цией нет ограничений на расстояние между источником и приемником. Однако возникает проблема выбора метода СВА, обладающего необходимым частотно-временным разрешением. В этом отношении взаимное ПВВ имеет преимущества перед традиционными методами спектрально-временного анализа, поскольку и взаимное (1), и автопреобразование (преобразование (1) с $s_0(t) = u(t)$) Вигнера–Виля отличаются высокой разрешающей способностью по частоте и по времени, особенно в отношении сигналов $u(t)$ с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ):

$$u(t) = \begin{cases} A(t) \exp[2\pi j \int_{t_n}^{t_n+\Delta t} (f_n + \lambda t) dt], & t \in [t_n, t_n + \Delta t]; \\ 0, & t \notin [t_n, t_n + \Delta t]; \end{cases} \quad (2)$$

t_n и Δt – соответственно начало и длительность ЛЧМ сигнала. Объясняется это тем, что при $s_0(t) = u(t)$ перемножение комплексных экспонент в подынтегральном выражении (1) дает

$$P(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t) e^{2\pi j(f_n + \lambda t - f)\tau} d\tau = P_A[j2\pi(f - f_n - \lambda t)], \quad (3)$$

где $P_A[j2\pi(f - f_n - \lambda t)]$ – спектральное распределение квадрата амплитуды (мощности) ЛЧМ импульса. Это означает, что параметр λ , характеризующий скорость изменения мгновенной частоты $f(t) = f_n + \lambda t$, влияет только на локализацию активного спектра $P(f, t)$, в то время как его форма зависит от квадрата амплитуды $A(t)$.

В реальных вычислениях пределы интегрирования конечны и задаются размером T_w «скользящего» окна. Поэтому на вид спектрального распределения в каждый момент времени t влияет не только закон изменения амплитуды $A(t)$, но также размер и форма окна T_w . При неизменной в пределах окна амплитуде A (при $A(t) = const$) форма спектра и, следовательно, частотно-избирательные свойства ПВВ зависят только от параметров текущего окна анализа. Поэтому в представленном здесь эксперименте в качестве зондирующего сигнала $s(t)$ была выбрана периодическая последовательность ЛЧМ импульсов. Каждый импульс имел длительность $\Delta t = 8$ с и частоту $f_s(t)$, изменяющуюся в пределах от $f_{s1} = 216$ до $f_{s2} = 236$ Гц.

Задачей предлагаемого метода спектрально-временной обработки с применением взаимного ПВВ является выявление и количественная оценка изменений во временном профиле мгновенной частоты $f(t)$ при распространении импульсов $s(t)$ до точки приема. Вызванные средой распространения изменения в характере частотной модуляции не позволяют в общем случае брать $s(t)$ в качестве опорного сигнала хотя бы потому, что дисперсионная среда вызывает изменения его длительности. Для того, чтобы изменения в законе модуляции можно было уверенно идентифицировать, параметры частотной модуляции $f_0(t)$ опорного сигнала $s_0(t)$ приходится подбирать, ориентируясь на изменения мгновенной частоты $f(t)$ в принятом сигнале. Кроме того, принимаемый сигнал $u(t)$, как правило, содержит помехи $n(t)$, а при многолучевом распространении его полезная составляющая $v(t)$ может иметь многомодовую структуру.

Общее представление о спектрально-временных свойствах сигнала в точке приема дает распределение спектральной плотности мощности, полученное с помощью «скользящего» фурье-анализа (рис. 1а). Для рассмотрения выбран один из ЛЧМ импульсов $u(t)$. Анализ проводился с применением прямоугольного временного окна с размером $T_w = 1024$ отсчетов. В полученном таким образом время-частотном распределении (ВЧР) можно выделить четыре области. Области 1 и 2 принадлежат полезной составляющей $v(t)$. При этом область 1 соответствует исследуемому импульсу, а область 2 – концу предшествующего. Область 3 относится к помехе с фиксированной частотой, а область 4 – к широкополосной импульсной помехе. Мощность помех значительно превышала мощность сигнала, но перекрытия спектров помех и сигнала не было. Это позволило применить к $u(t)$ предварительную фильтровую обработку и тем самым значительно уменьшить влияние помех на получаемые время-частотные распределения [5]. Фурье-спектр после фильтровой обработки представлен на рис. 1б.

«Скользящее» преобразование Фурье не позволило выделить какую-либо информацию, в которой отразилось бы воздействие среды распространения на зондирующий сигнал. В полученном с его помощью время-частотном распределении (рис. 1а, б) заметно лишь то, что начальная частота $f_1 = 0.219$ оказалась выше, а конечная $f_2 = 0.234$ – ниже соответствующих начальной $f_{s1} = 0.216$ и конечной $f_{s2} = 0.236$ частот зондирующего импульса $s(t)$. Здесь и далее используются безразмерная (отнесенная к частоте дискретизации $f_d = 1000$ Гц) частота и безразмерное (отнесенное к периоду дискретизации время $T_d = 1/f_d$) время t , равное числу отсчетов n . Причина такого занижения девиации

«Скользящее» преобразование Фурье не позволило выделить какую-либо информацию, в которой отразилось бы воздействие среды распространения на зондирующий сигнал. В полученном с его помощью время-частотном распределении (рис. 1а, б) заметно лишь то, что начальная частота $f_1 = 0.219$ оказалась выше, а конечная $f_2 = 0.234$ – ниже соответствующих начальной $f_{s1} = 0.216$ и конечной $f_{s2} = 0.236$ частот зондирующего импульса $s(t)$. Здесь и далее используются безразмерная (отнесенная к частоте дискретизации $f_d = 1000$ Гц) частота и безразмерное (отнесенное к периоду дискретизации время $T_d = 1/f_d$) время t , равное числу отсчетов n . Причина такого занижения девиации

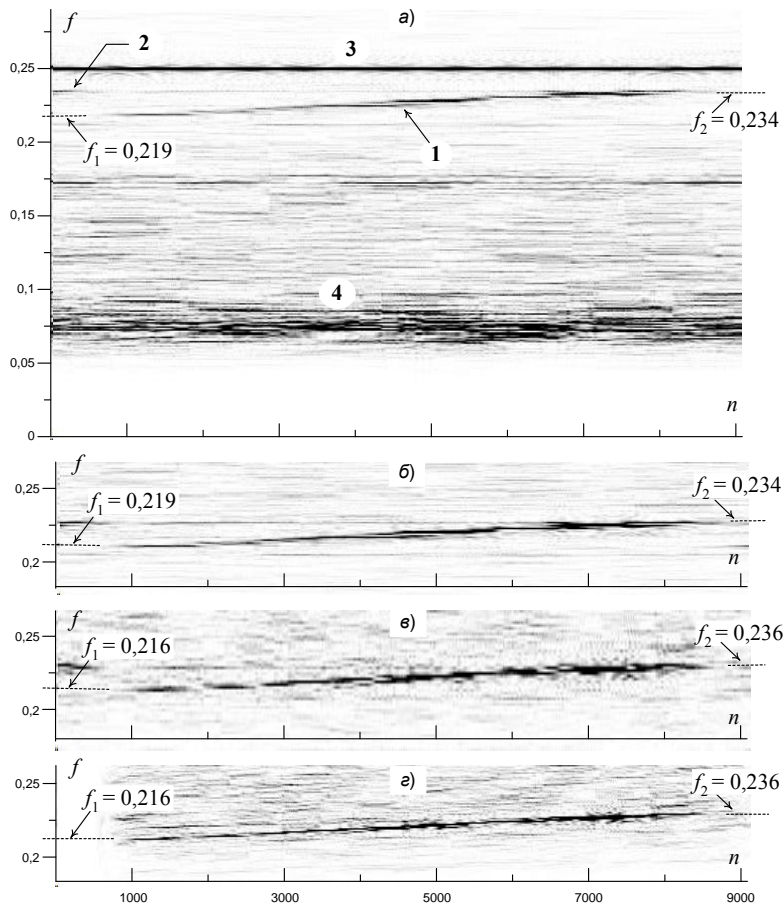


Рис. 1

частоты $f_2 - f_1$ заключена в нелокальности «скользящего» фурье-анализа.

Нелокальность свойственна и преобразованию Вигнера–Вилля, но для совпадающих или близких ЛЧМ сигналов $u(t)$ и $s_0(t)$ она проявляется согласно (3) только в отношении их амплитудных характеристик. Это свойство, хотя и в меньшей степени, сохраняется также при наличии различий во временных профилях $f(t)$ и $f_0(t)$ исследуемого $u(t)$ и опорного $s_0(t)$ сигналов, но при условии монотонной зависимости $f(t)$ и $f_0(t)$ от времени. Поэтому с точки зрения частотно-временного разрешения положительный результат достигается даже при использовании в качестве опорного простого синусоидального колебания $s_0(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t)$. Об этом свидетельствует представленное на рис. 1в распределение взаимной спектральной плотности мощности (распределение квадрата модуля $|P(f,t)|^2$ ВРВВ), полученное для синусоидального опорного сигнала с частотой $f_0 = 0.206$. Измеренные по этому распределению значения частот f_1 и f_2 не обнаружили отличия от граничных частот $f_{s1} = 0.216$ и $f_{s2} = 0.236$ излученного сигнала, но обнаружилось незначительное (~150–200 отсчетов) увеличение длительности принятого импульса. Это определило выбор в качестве опорного сигнала ЛЧМ импульса с частотой $f_0(t)$,

изменяющейся в пределах 0.216–0.236, и с длительностью $\Delta t_0 = 8200$. Соответствующее этому опорному сигналу распределение взаимной спектральной плотности мощности представлено на рис. 1г. Заметно, что частотно-временная структура этого распределения выражена более четко, однако и в нем нет эффектов, обусловленных дисперсионными свойствами среды. Информацию о них можно получить, если обратиться к реальной и/или мнимой частям ВРВВ.

Поясним это, представив исследуемый сигнал $u(t)$ в виде совокупности некоторого числа мод

$$s_k(t) = A_k \exp\left(j2\pi \int_0^t f_k(x) dx\right) \quad (k - \text{номер моды}) \quad (4)$$

с частотной модуляцией. Активные спектры таких сигналов на плоскости частота–время локализованы в областях, близких к мгновенным частотам $f_k(t)$. Этим же свойством обладают и время-частотные распределения, полученные с помощью взаимного ПВВ, но области их локализации согласованы не только с частотами $f_k(t)$ мод ($k > 0$), но и с частотой $f_0(t)$ опорного колебания $s_0(t)$ ($k = 0$). Если наряду с частотной в $s_k(t)$ имеется неглубокая узкополосная амплитудная модуляция, то она не оказывает существенного влияния на характер ВЧР.

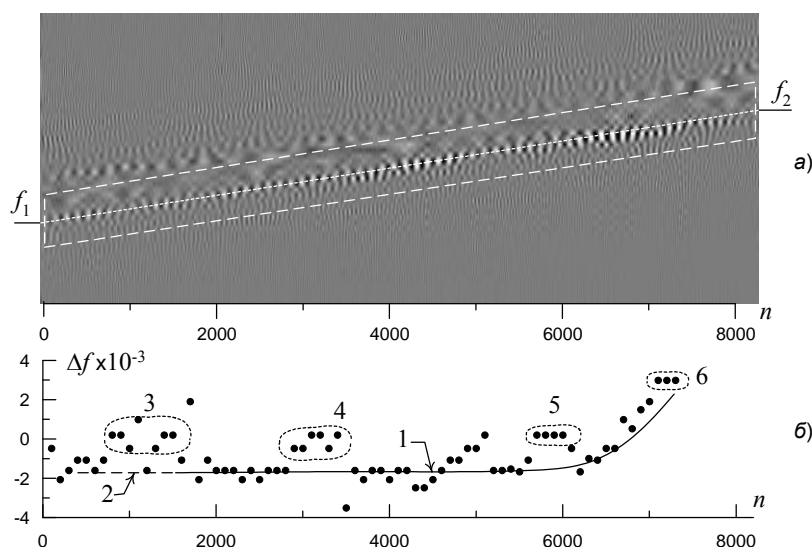


Рис. 2

Взяв в качестве опорного колебание с постоянной амплитудой A_0^1 и заменив в (1) бесконечные пределы интегрирования на пределы, ограниченные размером T_w перемещаемого («скользящего») временного окна, получаем для $P(t, f)$ выражение в виде суммы

$$P(f, t) = \sum_{k=1}^n P_k(f, t), \quad (5)$$

где

$$P_k(f, t) = A_0 e^{j\Delta\phi_k(t)} \int_{-T_w/2}^{T_w/2} A_k e^{j[\phi_k(t, \tau/2) + \phi_0(t, \tau/2)]} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

– ВРВВ, принадлежащее отдельным модам (4),

$$\Delta\phi_k(t) = 2\pi \int_0^t [f_k(x) - f_0(x)] dx, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \phi_k(t, \tau/2) &= 2\pi \int_{t-\tau/2}^{t+\tau/2} f_k(x) dx, \\ \phi_0(t, \tau/2) &= 2\pi \int_{t-\tau/2}^t f_0(x) dx. \end{aligned} \quad (8)$$

Так как интегральное выражение в (6) является преобразованием Фурье, то его функциональность определяется мгновенными частотами $f_k(t)$ и $f_0(t)$, в то время как экспоненциальный множитель перед интегралом зависит от разности мгновенных фаз $\Delta\phi_k(t)$. Этот факт имеет принципиальное значение, поскольку фазовый множитель в комплексном распределении (6) дает возможность более точного измерения частот $f_k(t)$.

Закон изменения частоты $f_0(t)$ опорного колебания во взаимном ПВВ (1) выбирался, исходя

из характера распределения квадрата модуля ВРВВ $|P(f, t)|^2$ (рис. 1а) так, чтобы функция $f_0(t)$ наилучшим образом соответствовала распределению максимумов $|P(f, t)|^2$. Среда с дисперсией вызывает отклонение мгновенной частоты $f(t)$ принятого сигнала от $f_s(t)$ зондирующих импульсов, что и наблюдалось в условиях реального эксперимента. Однако наблюдавшееся отклонение $\delta f(t) = |f(t) - f_s(t)|$ частоты $f(t)$ от линейного закона $f_s(t)$ было весьма незначительным и необнаружимым, как было показано выше, по распределению $|P(f, t)|^2$.

Более детальный анализ экспериментальных данных был выполнен по распределению реальной части $\text{Re}[P(f, t)]$ ВРВВ с привлечением методики, изложенной в [4]. Первоначально частота $f_0(t)$ опорного колебания выбиралась, исходя из условия соответствия ее временного профиля распределению квадрата модуля ВРВВ $|P(f, t)|^2$. Затем $f_0(t)$ сдвигалась вверх на постоянную частоту $f_{\text{сдв}} = 0.01$, становясь равной $f_0(t) = f_s(t) + \delta f(t) + f_{\text{сдв}}$.

На рис. 2 представлен результат обработки одного из ЛЧМ импульсов – импульса, фурье-спектр которого изображен на рис. 1 (область 1 на рис. 1а). В яркостном очерченном пунктирным контуром изображении реальной части $\text{Re}[P(f, t)]$ ВРВВ этого импульса (рис. 2а) обнаруживается многокомпонентная структура, состоящая из нескольких мод, частоты которых близки к частоте $f(t)$, изменяющейся в пределах от $f_1 = 0.216$ до $f_2 = 0.236$. Соответствующий этому диапазону линейный профиль отмечен пунктирной линией.

Многомодовая структура $u(t)$ является следствием многолучевого распространения. При этом разным модам свойственны разные законы изменения мгновенной частоты $f_k(t)$ (k – индекс

¹ Как известно, угловая модуляция сопровождается амплитудной модуляцией, характер которой зависит от глубины угловой модуляции.

моды) и, как следствие, – разные законы модуляции яркости изображения, обусловленные вариациями разностных частот $\Delta f_k(t) = f_k(t) - f_0(t)$.

Временная зависимость разностной частоты $\Delta f_k(t)$ для одной из составляющих (отмеченной индексом $k=1$) сигнала $u(t)$ представлена на рис. 2б точками и соответствующими аппроксимирующими кривыми 1 и 2. Временной профиль $\Delta f_1(t)$ (аппроксимирующие кривые 1 и 2) является явно нелинейным и имеет нарастающие значения по мере приближения к заднему фронту принятого импульса. Это говорит о том, что высокочастотные составляющие излученного сигнала $s(t)$ приходят на вход приемника с большей задержкой, чем низкочастотные. Действительно, если бы все частоты задерживались на одно и то же время, то разность $\Delta f_1(t)$ оставалась бы постоянной. Увеличение этой разности показывает на существование зависимости скорости звука от частоты. То, что аппроксимирующие кривые имеют нарастающий характер, говорит о наличии в среде распространения звука «отрицательной» дисперсии, т.е. дисперсии волноводного типа.

Очерченные точки на рисунке рис. 2б (области 3, 4, 5 и 6) мало информативны и показаны лишь потому, что могут принадлежать другим модам в сигнале $u(t)$, а также для того, чтобы продемонстрировать многолучевой характер распространения излученного ЛЧМ сигнала. Кроме того, интерференция разных мод приводит к модуляции их интенсивности. Такого рода модуляция наблюдается в распределениях $|P(f,t)|^2$ на рис. 1в, г. Интерференционным взаимодействием мод можно объяснить также наличие «пробелов» на множестве точек, по которым построена аппроксимирующая кривая 1 на рис. 2а и появлением над этими пробелами точек, принадлежащих (как можно предположить) другим модам.

Общее смещение соответствующих разностным частотам $\Delta f_k(t)$ точек на рис. 2б в область отрицательных значений объясняется временным сдвигом опорного сигнала $s_0(t)$ относительно принятого сигнала $u(t)$.

Результаты измерений показывают, что предложенная методика спектрально-временного анализа позволяет достичь разрешающей способности, при которой отклонения частотно-временного профиля $\Delta f(t)$ в точке приема от заданного (в данном случае линейного) закона изменения $f_0(t)$ в излученном сигнале могут быть измерены с точностью $|\Delta f(t)| < 0.5/T_w$, чего невозможно получить, применяя существующие средства цифрового спектрального анализа. Такая точность может быть достигнута в условиях многолучевого распространения на большие расстояния и при частотно зависимом поглощении, а также при действии помех. При распространении на меньшие расстояния можно добиться существенного снижения действия помех и уменьшения интерференционных эффектов. Это дает возможность исследования сред со слабой дисперсией, например, исследования ультразвуковыми методами релаксационной дисперсии в жидкостях, не достигая области «дисперсионного скачка».

Список литературы

1. Козн Л. Время-частотные распределения: Обзор // ТИИЭР. 1989. Т. 77, № 10. С. 120.
2. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер. с франц. М.: Мир, 1983. Т. 2. 256 с., ил.
3. Boualem Boashash. Note on use Wigner distribution for time-frequency signal analysis // IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1988. V. 36, No 9. P. 1518.
4. Шкелев Е.И., Земнюков Н.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 2. С. 134.
5. Шкелев Е.И., Кисляков А.Г., Лупов С.Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. Т.45, № 5. С. 433.

ON THE POSSIBILITY OF USING MUTUAL WIGNER-VILLE TRANSFORM TO STUDY MEDIUM DISPERSIVE PROPERTIES

E.I. Shkelev, N.E. Zemnyukov, M.N. Karakozov, A.A. Stromkov, A.P. Maryshev, I.N. Didenkulov

A method to study medium dispersive properties based on active remote sensing and spectral-time analysis (STA) is considered. In this method, a mutual Wigner-Ville transform (WVT) is applied to a signal passed through the medium being investigated and a reference signal which is matched to the received one. The use of WVT complex features in the STA procedure makes it possible to get a higher frequency-time resolution as compared with traditional STA methods. The results of a full-scale experiment (at sea) are presented which show the effectiveness of the proposed method in sonar signal processing.

Keywords: frequency modulation, spectral-time analysis, Wigner-Ville transform, dispersion, hydroacoustics, remote sensing.