

УДК 621.391

ДЕМОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ИХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Дворников С. В.

Введение

Частотно-временной анализ находит все более широкое применение в технологиях цифровой обработки сигналов. Теоретические работы Коэна [1], получившие творческое развитие в трудах Классена и Мекленбука [2], позволили по новому подойти к решению таких задач радиомониторинга как обнаружение, разделение сигналов, их распознавание и измерение параметров [3-5].

Очевидно, что возможности частотно-временного анализа не ограничиваются его применением только в рамках указанных задач. Благодаря своим свойствам частотно-временные распределения являются уникальным инструментом, позволяющим обрабатывать тонкую структуру сигналов. А возможность получения на их основе модифицированных форм, с улучшенными свойствами помехоустойчивости, расширила сферу применения частотно-временных представлений. В частности, анализ результатов [6] позволил сделать заключение о целесообразности построения на их базе алгоритмов демодуляции.

Вопросам поиска универсальных алгоритмов демодуляции радиосигналов в комплексах мониторинга традиционно отводится особое место. В первую очередь это связано с необходимостью их работы в широком спектре самых разнообразных модуляционных форматов. Очевидно, что использование, в указанной ситуации, классических алгоритмов, базирующихся на методах оптимальной фильтрации и корреляционной обработки, приведет к необходимости наличия соответствующего ассортимента аппаратуры, или же значительного перечня соответствующего программного обеспечения.

Таким образом, проблема поиска универсальных алгоритмов, позволяющих производить демодуляцию широкого класса сигналов, остается актуальной и значимой задачей для радиомониторинга. В связи с этим, целью данной работы является разработка метода демодуляции, позволяющего эффективно работать с широким классом сигналов частотной манипуляции в шумах высокой интенсивности.

Метод демодуляции сигналов на основе их частотно-временных представлений

В соответствии с методологией разработанной Коэном, спектрограмма, представляющая квадрат модуля кратковременного (оконного) преобразования Фурье, является простейшим частотно-временным представлением, хотя и не относится к классу билинейных распределений [1]. Поэтому рассмотрим возможность приме-

Предлагается метод демодуляции сигналов частотной манипуляции на основе обработки их частотно-временных распределений. Обосновывается целесообразность выбора в качестве базовых билинейных распределений. Приводятся результаты практического эксперимента, подтверждающие продуктивность разработанного подхода.

нения спектрограммы для демодуляции сигналов с частотной манипуляцией.

Пусть $z(t)$ – радиосигнал частотной манипуляции. Тогда его спектр $F(f)$ в комплексном базисе функций Фурье будет представлен следующим аналитическим выражением [7]

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t) e^{-j2\pi f t} dt, \quad (1)$$

Для получения совместного частотно-временного представления необходимо в выражение (1) ввести функцию, ограничивающую процесс вычисления по времени $h(t)$. Функцию $h(t)$ часто называют временным окном анализа. В результате получим частотно-временное распределение, представляющее оконное преобразование Фурье [1]

$$\rho_{\text{ОПФ}}(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} z(\tau) h(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau. \quad (2)$$

Тогда, в соответствии с определением, выражение для расчета спектрограммы сигнала $z(t)$ запишем следующим образом:

$$\rho_{\text{СП}}(f, t) = |\rho_{\text{ОПФ}}(f, t)|^2. \quad (3)$$

На рис. 1 представлен спектр тестового радиосигнала $z(t)$, манипулированного меандром и его спектрограмма.

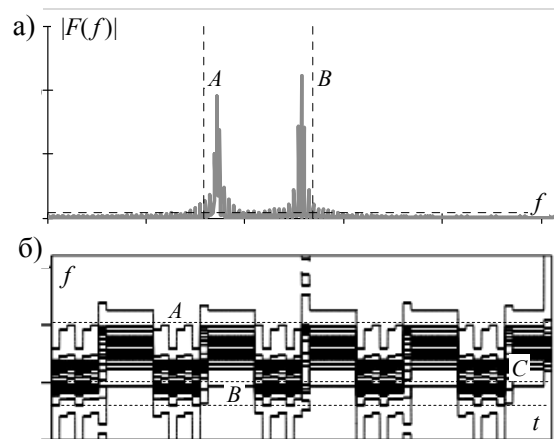
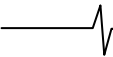


Рис. 1. Спектр тестового сигнала – а); спектрограмма тестового сигнала – б).



Вертикальные пунктирные линии на рис. 1, обозначенные как A и B , определяют границы, заключающие 98% спектральной энергии сигнала.

Анализ спектрограммы на рис. 1б показывает, что на частотно-временной матрице распределения сигнальные компоненты имеют вид функции первичного модулирующего сигнала. Следовательно, если выделить строку матрицы, соответствующую максимальному уровню энергии, то по форме функции ее огибающей можно судить о модулирующем (первичном) сигнале. Так, на рис. 2а представлена функция огибающей значений строки матрицы, соответствующей частоте нажатия f_H (на рис. 1б пунктирная линия C).

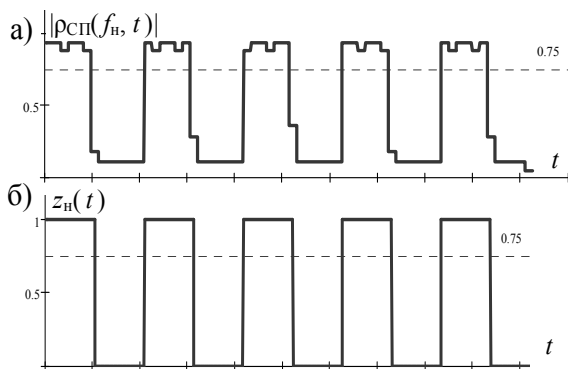


Рис. 2. Функция огибающей строки частотно-временной матрицы распределения тестового сигнала, соответствующей частоте нажатия – а); первичный модулирующий сигнал на частоте нажатия – б).

На рис. 2, совместно с функцией огибающей, нанесена пунктирная линия по уровню 0,75, представляющая порог принятия решения. Он позволяет нивелировать фронты функции огибающей, поскольку те не всегда могут быть достаточно гладкими. Более того, они, как правило, разнятся по уровню от одной битовой посылки к другой [6].

Анализ полученных результатов (см. рис. 2б) позволяет сделать вывод о близости форм функции огибающей распределения пиковых значений энергии и первичного сигнала. Следовательно, выделенная из частотно-временной матрицы функция огибающая довольно полно характеризует модулирующий сигнал.

Таким образом, данные проведенных исследований позволяют определить первичную трактовку основных этапов, составляющих метод демодуляции частотно-манипулированных сигналов на основе обработки их частотно-временных представлений.

На первом этапе рассчитывается матрица частотно-временного представления демодулируемого сигнала. На втором этапе определяются строки матрицы, в пределах которых локализуется энергия сигнальных компонент. На третьем этапе определяется уровень порога принятия решения. На четвертом собственно и осуществляется демодуляция как процедура сравнения значений функции оги-

бающей с величиной порога в каждый момент времени на основе дуального решения, т.е. есть пересечение или нет.

Учитывая, что функция огибающей тестового сигнала не является гладкой, можно предположить, что в условиях шумов величина неровностей увеличится. Указанные обстоятельства в значительной степени усложняют эффективную реализацию процедуры выбора порога принятия решения.

С целью повышения ее продуктивности необходимо модифицировать рассчитанную частотно-временную матрицу за счет ее временного нормирования. Это позволит компенсировать энергетические «провалы» на частотно-временной плоскости, вызванные не только аддитивными шумами, но и результатом мультипликативных замираний. Например, обусловленных многолучевостью ионосферного распространения радиоволн, характерной для сигналов декаметрового диапазона.

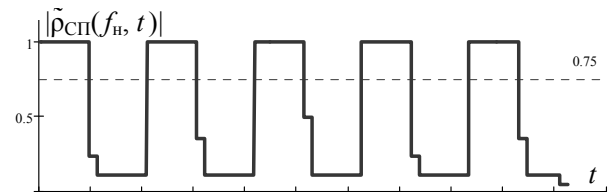


Рис. 3. Функция огибающей тестового сигнала.

На рис. 3 представлена функция огибающей тестового сигнала, полученной на основе его предварительно нормированной частотно-временной матрицы $\tilde{\rho}_{CP}(f, t)$.

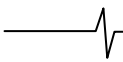
Результаты эксперимента по демодуляции частотно-манипулированных сигналов

Для оценки продуктивности предлагаемого метода были проведены исследования по демодуляции частотно-манипулированных сигналов в шумах различной интенсивности. В качестве тестового синтезировался радиосигнал длительностью в 2048 дискретных отсчета, модулированный меандром с первичным импульсом в 204 дискретных отчета, аналогичный изображенному на рис. 2б. При формировании спектрограммы в качестве функции окна использовалась функция Хэмминга [7]

$$h(t) = 0,54 - 0,46 \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{n-1}\right), \quad (4)$$

здесь n – переменная, регулирующая длительность окна анализа, в пределах которого осуществляется обработка сигнала. Эта же функция использовалась для синтеза фильтра, который согласовывался по спектру с модулирующим сигналом.

Затем с первичным сигналом $z_{\Pi}(t)$ сравнивались функции огибающих, выделенные из матрицы спектрограммы $\rho_{ОПФ}(f_H, t)$, и матрицы ее модифицированной формы $\rho_{ОПФ}^M(f_H, t)$ за счет процедур временного нормирования, а также результирующая функция $\rho_{\Phi}(t)$, полученная в результате свертки импульсной характеристики $h(t)$ согласованного фильтра с тестовым сигналом



$$\rho_{\Phi}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau - t) z(\tau) d\tau \quad (5)$$

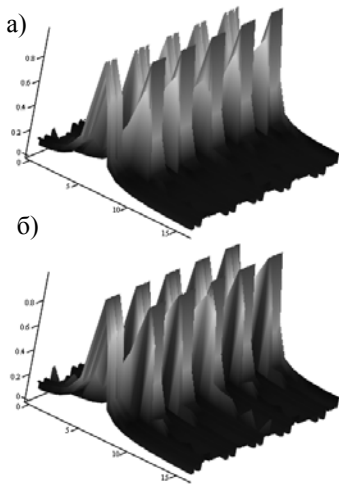


Рис. 4. Спектрограмма тестового сигнала без шумов: классическая форма – а); модифицированная форма – б).

На рис. 4 представлены классическая и модифицированная формы спектрограммы тестового сигнала без шумов

Качество демодуляции оценивалось по величине абсолютной ошибки между первичным сигналом и полученными функциями

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |z_{\Pi}(t) - \rho(t)| \quad (6)$$

Здесь для соответствующей величины ошибки $\Delta_{\text{ОПФ}}$, $\Delta_{\text{ОПФ}}^{\text{М}}$, Δ_{Φ} в качестве $\rho(t)$ выступают: $\rho_{\text{ОПФ}}(f_{\text{H}}, t)$,

$\rho_{\text{ОПФ}}^{\text{М}}(f_{\text{H}}, t)$ и $\rho_{\Phi}(t)$, соответственно.

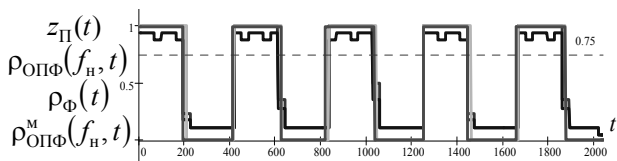


Рис. 5. Модулирующий сигнал, функция огибающей строки матрицы классической спектрограммы и ее модифицированной формы, результирующая функция корреляции.

Далее тестовый сигнал аддитивно смешивался с шумом и эксперимент повторялся. В ходе опытов отношение сигнал/шум (ОСШ) оценивалось как отношение средней мощности сигнала к спектральной плотности шума. Мощность сигнала рассматривалась в пределах пятих гармоник раздельно для каждой из частот нажатия и отжатия

$$\Delta F_o = |(f_o + f_o^5) - (f_o - f_o^5)|,$$

$$\Delta F_H = |(f_H + f_H^5) - (f_H - f_H^5)| \quad (7)$$

На рис. 6 представлены матрицы классической спектрограммы и ее модифицированной формы тестового

сигнала при ОСШ 10 дБ.

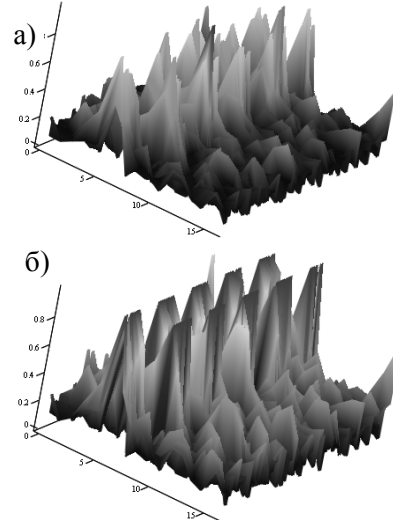


Рис. 6. Спектрограмма тестового сигнала при ОСШ 15 дБ: классическая форма – а); модифицированная форма – б).

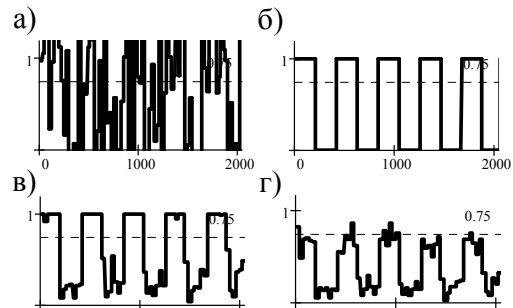


Рис. 7. Функция корреляции – а); модулирующий сигнал – б); функция огибающей строки матрицы модифицированной спектрограммы – в); функция огибающей строки матрицы классической спектрограммы – г); при ОСШ 15 дБ.

Следует отметить, что при указанных значениях ОСШ метод корреляционной фильтрации фактически не позволяет получать приемлемых результатов (см. рис. 7а). В данном эксперименте амплитудно-частотная характеристика фильтра выбиралась из соображения полного восстановления модулирующего колебания. Однако на практике фильтрующие системы настраивают только на первую гармонику, а для восстановления первичного сигнала дополнительно применяют корректирующие алгоритмы (см. рис. 8а). В этом случае общая эффективность демодулятора существенно повышается.

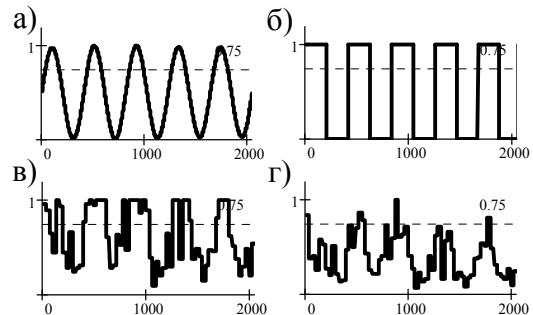
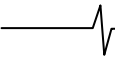


Рис. 8. Функция фильтра 1-й гармоники – а); модулирующий сигнал – б); функция огибающей строки матрицы модифицированной спектрограммы – в); функция огибающей строки матрицы классической спектрограммы – г); при ОСШ 8 дБ.



Следует заметить, что аналогичные алгоритмы коррекции применимы и для предлагаемого метода, а так как в рамках эксперимента исследовалась эффективность фильтрации с позиций непосредственной демодуляции, то полученные результаты сравнивались с функцией $\rho_{\Phi}(t)$.

В таблице 1 представлены оценки величин ошибок $\Delta_{\text{ОПФ}}$, $\Delta_{\text{ОПФ}}^{\text{М}}$ и Δ_{Φ} , нормированных к максимальному значению.

Таблица 1.

Результаты ошибки демодуляции тестового сигнала

Значение ОСШ, дБ	Величина ошибки		
	Δ_{Φ} , %	$\Delta_{\text{ОПФ}}$, %	$\Delta_{\text{ОПФ}}^{\text{М}}$, %
0	2,37	7,72	5,34
34	7,53	8,69	5,41
30	12,33	9,17	5,47
25	17,13	9,84	5,59
22	20,90	10,09	5,72
20	24,00	11,30	6,07
19	27,64	12,70	6,80
18	34,99	13,55	7,29
16	38,82	14,34	7,72
15	40,83	14,82	8,63
14	48,91	15,31	8,99
13	61,30	15,86	10,09
12	66,16	16,40	10,45
11	70,47	17,31	11,00
10	76,67	18,65	14,22
9	85,24	20,60	14,40
8	100,0	21,63	16,46

Результаты табл. 1 получены методом Монте-Карло по 100 выборкам, хотя рекомендуемое количество выборок должно быть больше 200. Однако на практике часто ограничиваются меньшим числом, допуская при этом определенный проигрыш в точности вычисления статистических оценок [8].

В качестве другого показателя эффективности (см. табл. 2) рассматривалась относительная оценка, полученная как отношение функций $\Delta_{\text{ОПФ}}$, $\Delta_{\text{ОПФ}}^{\text{М}}$ и Δ_{Φ} к величине ошибки огибающей, выделенной из частотно-временной матрицы классической spectroграммы $\delta = \Delta / \Delta_{\text{ОПФ}}$ для каждого значения ОСШ.

Использование относительной оценки δ позволяет наглядно оценить пределы диапазона эффективного применения того или иного метода. В частности, при высоких значениях ОСШ применение демодуляции на основе корреляционной фильтрации видится более предпочтительным. В то время как при ОСШ ниже 18-15 дБ преимущество разработанного метода неоспоримо.

Анализ результатов, представленных на рис. 8, показывают, что даже изменение порога принятия решения в методе демодуляции, базирующемся на классической форме spectroграммы, не даст существенного улучшения.

Таблица 2.

Результаты относительной оценки

Значение ОСШ, дБ	Значение величины ошибки для		
	δ_{Φ}	$\delta_{\text{ОПФ}}$	$\delta_{\text{ОПФ}}^{\text{М}}$
0	0,31	1,0	0,69
34	0,87	1,0	0,62
30	1,34	1,0	0,60
25	1,74	1,0	0,57
22	2,07	1,0	0,56
20	2,12	1,0	0,54
19	2,18	1,0	0,54
18	2,58	1,0	0,54
16	2,7	1,0	0,54
15	2,75	1,0	0,58
14	3,19	1,0	0,59
13	3,87	1,0	0,64
12	4,03	1,0	0,64
11	4,07	1,0	0,64
10	4,11	1,0	0,68
9	4,14	1,0	0,70
8	4,62	1,0	0,76

Таким образом, основываясь на результатах проведенного эксперимента, целесообразно уточнить трактовку первого этапа разработанного метода. А именно: сформированную матрицу распределения модифицировать за счет применения к ней операций временного нормирования.

Распространение метода демодуляции на билинейные частотно-временные распределения

Для строгости перехода от spectroграмм к билинейным распределениям в предлагаемом методе целесообразно рассмотреть обобщенное распределение Коэна, свойства которого подробно исследованы в [9]

$$\rho(f, t) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \exp[j2\pi(\xi t - f\tau - \xi v)] \Phi(\tau, \xi) K(v, \tau) dv d\tau d\xi, \quad (8)$$

где $K(v, \tau) = z_a^*(v - \tau/2)z_a(v + \tau/2)$; $\Phi(\tau, \xi)$ – функциональное (порождающее) ядро преобразования, определяющее тип распределения.

Фундаментальность уравнения (8) определяется сохранением всех полезных свойств синтезируемых на его основе частотно-временных распределений по отношению к их классическим формам и согласованием их с теорией оценивания параметров сигналов.

Синтезу уравнения, определяющего обобщенную форму (8), предшествовал ряд работ Коэна, наиболее интересной из которых является [1]. В ней впервые определено понятие билинейности, сущность которой состоит в том, что при формировании распределений исходный сигнал используется дважды (в виде $K(v, \tau) = z_a^*(v - \tau/2)z_a(v + \tau/2)$), причем в формуле синтеза связь между описаниями сигнала линейна.

С целью исследования возможности применимости билинейных распределений, синтезированных на основе уравнения (8) в разработанном методе демодуляции, проанализируем, на сколько этому соответствуют, получае-

мые частотные и временные оценки сигналов с использованием функции плотности распределения энергии.

Утверждение 1.

Результат интегрирования любого совместного распределения по частоте дает среднее значение квадрата огибающей при условии $\Phi(0, \xi) \equiv 1$.

Доказательство.

Проинтегрируем распределение сигнала $\rho(f, t)$ по частоте

$$\int_{-\infty}^{\infty} \rho(f, t) df \cdot$$

Учитывая, что $\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi f\tau) df = \delta(\tau)$, получим:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[j2\pi\xi(t-v)] \Phi(0, \xi) z_a^*(v) z_a(v) dv d\xi = \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \exp[j2\pi\xi(t-v)] d\xi \right) |z_a(v)|^2 dv = \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-v) |z_a(v)|^2 dv = |z_a(t)|^2. \end{aligned}$$

Утверждение 2.

Результат интегрирования любого совместного распределения по времени дает среднее значение энергии сигнала (квадрата его амплитудных значений) при условии $\Phi(\tau, 0) \equiv 1$.

Доказательство.

Проинтегрируем распределение сигнала $\rho(f, t)$ по времени

$$\int_{-\infty}^{\infty} \rho(f, t) dt \cdot$$

Учитывая, что $\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi f\tau) d\tau = \delta(f)$, получим:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[j2\pi(-\tau f)] \Phi(\tau, 0) z_a^*(v - \tau/2) z_a(v + \tau/2) dv d\tau = \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi f\tau} F_a^*(f) e^{-j2\pi f(v-\tau/2)} F_a(f) e^{-j2\pi f(v+\tau/2)} df dv d\tau = \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[j2\pi f(-\tau - 2v)] d\tau dv \right) |F_a(f)|^2 df = \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(f) \cdot |F_a(f)|^2 df = |F_a(f)|^2. \end{aligned}$$

Представленные аналитические доказательства подтвердили правомерность выбора билинейных распределений в качестве базовых.

Поскольку ядро обобщенного преобразования в уравнении (8) не зависит от f и t , то соответственно, любые сдвиги сигнала по времени или по частоте приводят к аналогичным частотно-временным сдвигам в их билинейных распределениях [9]. Указанное фундаментальное свойство делает его тонким инструментом анализа. Если у билинейных распределений частотное разрешение зависит от частоты дискретизации, то у спектрограмм оно определяется параметрами окна, в пределах которого происходит усреднение энергии. Это делает спектрограммы в

большей степени размытыми частотно-временными описаниями по отношению к билинейным представлениям. Следовательно, функция огибающей частотно-временной матрицы, полученная на основе билинейных распределений, будет в большей степени рельефна, что, в конечном счете, повысит эффективность демодуляции.

Заключение

Предложенный в работе метод демодуляции, естественно, в большей степени применим в решении задач мониторинга, когда сложно использовать методы оптимальной фильтрации. Между тем результаты практического эксперимента указывают на его высокую продуктивность в условиях шумов высокой интенсивности. Более того, можно предположить, что применение степенных преобразований к частотно-временным матрицам распределений [6], позволит повысить эффективность метода. Другой путь повышения качества демодуляции видится в использовании масштабно-временных распределений, поскольку они позволяют концентрировать шумы преимущественно в высокочастотной части матриц, которые затем легко убираются в результате обратной репродукции только непораженных фрагментов. Результаты работы могут рассматриваться в качестве основы для разработки алгоритмов демодуляции частотно-манипулированных радиосигналов.

Литература

1. Cohen L. Generalized phase-space distribution function // J. of Mathematical Physics. – 1966. – Vol. 7. – N5, pp. 781-786.
2. Claasen T.A.C.M., Meulenbrauker W.F.G. The Wigner distribution a tool for time-frequency signal analysis. Part 1,2,3// Philips J. Res. - 1980. - Vol.35, pp. 217-250, 276-300, 372-389.
3. Алексеев А.А., Дворников С.В., Железняк В.К., и др. Применение методов частотно-временной обработки акустических сигналов для анализа параметров реверберации // Научное приборостроение. – 2001. – Т. 11, №1. – С.65-76.
4. Дворников С.В., Алексеева Т.Е. Распределение Алексеева и его применение в задачах частотно-временной обработки сигналов / Информация и космос. 2006. № 3 С. 9-21.
5. Дворников С.В., Комарович В.Ф., Железняк В.К., и др. Метод обнаружения радиосигналов на основе обработки их частотно-временных распределений плотности энергии / Информация и космос. 2005. № 4. С. 13-17.
6. Дворников С.В., Сауков А.М. Модификация частотно-временных описаний нестационарных процессов на основе показательных и степенных функций // Научное приборостроение. Т.14. 2004. № 2. С. 57-66.
7. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
8. Математический энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия, 1988. 847 с.
9. Коэн Л. Время-частотные распределения: Обзор // ТИИЭР. – 1989. – Т.77. – № 10. – С. 72-121.