

ВРЕМЯ-ЧАСТОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛАССА КОЭНА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ КАК СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Федосенков Д.Б.¹, к.т.н., доцент, начальник отдела управления
активами (rafwavelet@ngs.ru)

Симикина А.А.², аспирант кафедры «Автоматизация производственных
процессов и АСУ» (simikovaanna@mail.ru)

Кулаков С.М.³, д.т.н., профессор кафедры «Автоматизация и информационные
системы» (kulakov-ais@mail.ru)

Федосенков Б.А.⁴, д.т.н., профессор кафедры «Информационные и автоматизированные
производственные системы»

¹ ООО «Сибирская генерирующая компания»
(115054, Россия, Москва, ул. Дубининская, 53)

² Кемеровский государственный университет (КемГУ)
(650000, Россия, Кемерово, ул. Красная, 6)

³ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

⁴ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ)
(650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Аннотация. В статье представлены и описаны время-частотные распределения класса Коэна, которые целесообразно использовать как математическое средство, позволяющее формировать удобное, с точки зрения информативности и семантической ясности - визуально-графическое отображение рабочих режимов разнохарактерных технологических процессов, в том числе процессов черной металлургии. Отмечено, что обычно процесс регулирования реализуется без синхронного визуального контроля каждой регулируемой скалярной (одномерной) координаты, однако наличие такого мониторинга является важным условием автоматизированного управления динамикой нестационарных технологических процессов. Для устранения этого недостатка предложено выполнять синхронный мониторинг с использованием многомерных время-частотных распределений класса Коэна, когда каждый измерительный скалярный сигнал специфически отображается посредством одного из таких распределений, например распределения Вигнера-Вилле. Приводится выражение для обобщенного распределения класса Коэна с наличием ядра распределения и функции неоднозначности. Последняя позволяет получать из материнской функции распределения разного типа. Приведены наиболее характерные представители время-частотных распределений этого класса с указанием их ядер. Доказана возможность возникновения на карте сигнального распределения интерференционных элементов, затрудняющих идентификацию контролируемых режимов. Рассмотрен случай формирования виртуальных элементов в составе распределения Вигнера-Вилле, отображающего двухкомпонентный одномерный сигнал. Поясняются условия возникновения паразитных элементов на карте распределения, получаемой, например, в ходе реализации процесса мультикомпонентного дозирования сыпучих шихтовых материалов при производстве доменного агломерата. Получено аналитическое выражение распределения Вигнера, отображающее многокомпонентный скалярный сигнал и содержащее информационную (полезную) и виртуальную (паразитную) части время-частотного распределения. Установлена связь между числом дозаторов сыпучих материалов в составе блока дозирующих устройств и количеством паразитных (виртуальных) элементов в распределении Вигнера. На примере процесса дозирования продемонстрирован эффект распространения шумовых компонент в распределении Вигнера. Приведен пример, иллюстрирующий проникновение шума в распределение Вигнера и возникновение в нем виртуальной части при отображении сигнальной оциллограммы с наличием зашумленной паузы и двух участков с разными частотами. Получено выражение для распределения Вигнера в виде решетчатой функции. Сделано заключение о параметрах периодичности распределения и необходимой частоте дискретизации измерительных сигналов.

Ключевые слова: время-частотные распределения класса Коэна, распределение Вигнера-Вилле, ядро распределения, функция неоднозначности, интерференционные (виртуальные) элементы распределения, процессы черной металлургии, дозаторы непрерывного действия, сигнал дозирования, мультикомпонентный сигнал.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-324-329

ВВЕДЕНИЕ

В проектируемых системах автоматизированного управления технологическими процессами в качестве устройств управления обычно предусматриваются ав-

томатические регуляторы, реализующие определенные законы и алгоритмы регулирования. При этом процесс регулирования реализуется без синхронного визуального контроля каждой регулируемой скалярной (одномерной) координаты, в то время как наличие такого

контроля является важным обстоятельством, особенно в условиях нестационарности регулируемых процессов [1]. Для устранения этого недостатка предлагается выполнять синхронный мониторинг [1] с использованием многомерных время-частотных распределений класса Коэна [2, 3], когда каждый измерительный скалярный сигнал специфически отображается посредством одного из таких распределений, например распределения Вигнера-Вилле.

ВРЕМЯ-ЧАСТОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛАССА КОЭНА

Распределение Вигнера-Вилле [2 – 10] и его модификации (см. таблицу) относятся к билинейным распределениям класса Коэна. В общем виде распределения этого типа определяются выражением

$$Coh_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A_x(\theta, \tau) \Phi(\theta, \tau) \times \exp[j2\pi(\theta t - \tau f)] d\theta d\tau, \quad (1)$$

где $A_x(\theta, \tau)$ – функция неоднозначности [4, 11], задающая определенный тип распределения и имеющая вид

$$A_x(\theta, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \exp(-j2\pi\theta t) x \left(t + \frac{\tau}{2} \right) dt, \quad (2)$$

$\Phi(\theta, \tau)$ – ядро распределения [3, 11] класса Коэна, служит для модификации виртуальной (паразитной) части распределения; здесь t, τ – текущие моменты времени; j – мнимая единица; f и θ – мгновенные линейные частоты в спектре сигнала.

Поскольку функция неоднозначности (неопределенности) полностью повторяет с точностью до константы вид распределения Вигнера-Вилле

$$W(t, \omega) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} x^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \exp(-j\omega\tau) x \left(t + \frac{\tau}{2} \right) d\tau, \quad (3)$$

то ядро последнего $\Phi(\theta, \tau) = 1$.

Некоторые из широко используемых в практике обработки сложных мультикомпонентных технологических сигналов распределения представлены в таблице.

На практике, в ходе процесса комплексного дозирования сыпучих шихтовых материалов, когда при дозировании разноименных ингредиентов различными дозаторами как непрерывного, так и дискретного действия, зачастую, возникают такие режимы, при которых подачи тех или иных компонентов естественным образом перемежаются с паузами, причем при этом могут меняться и частоты дозирования. В этом случае, если не принять соответствующих мер, связанных с идентификацией и/или с принудительным подавлением виртуальных элементов [2, 3, 12 – 14] на отображающих

Время-частотные распределения и их ядра в составе (1)

Time-frequency distributions and their kernels in composition (1)

Наименование распределения	Ядро $\Phi(\theta, \tau)$	Запись распределения $E(t, \omega)$
Вигнера-Вилле	1	$\frac{1}{2\pi} \int_0^t \exp(-j\omega\tau) x^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) x \left(t + \frac{\tau}{2} \right) d\tau$
Марджено-Хилла [11, 12]	$\cos\left(\frac{\theta\tau}{2}\right)$	$\text{Re} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} x(t) \exp(-j\omega\tau) S^*(\omega)$
Рихачека [11]	$\exp\left(j\frac{\theta\tau}{2}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} x(t) \exp(-j\omega\tau) S^*(\omega)$
Фазонормированный синус	$\frac{\sin a\theta\tau}{a\theta\tau};$ $a = \text{const}$	$\frac{1}{4\pi a} \int_0^t \frac{1}{\tau} \exp(-j\omega\tau) \int_{t-a\tau}^{t+a\tau} x^* \left(u - \frac{\tau}{2} \right) x \left(u + \frac{\tau}{2} \right) du d\tau$
Пейджа [2]	$\exp\left(j\frac{\theta \tau }{2}\right)$	$\frac{\partial}{\partial t} \left \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t x(t) \exp(-j\omega\tau) d\tau \right ^2$
Чуи-Уильямса [2, 3, 11, 13]	$\exp\left(-\frac{\theta^2\tau^2}{\sigma}\right)$	$\frac{1}{4\pi^{3/2}} \iint \left(\frac{\tau^2}{\sigma}\right)^{-0,5} \exp\left\{-\left[\frac{(u-t)^2}{4\tau^2} - j\omega\tau\right]\right\} \times$ $\times x^* \left(u - \frac{\tau}{2}\right) x \left(u + \frac{\tau}{2}\right) du d\tau$
Спектрограмма		$\left \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp(-j\omega\tau) x(\tau) h(\tau-t) d\tau \right ^2$

измерительные сигналы распределения, интерпретация полученных на мониторах время-частотных изображений материалотоковых сигналов дозирования как по времени, так и по частоте будет представлять собой достаточно сложную для эксплуатационников задачу. Сложность заключается в том, что нужно будет постоянно сопоставлять полученное время-частотное отображение (например, распределение Вигнера) с соответствующим порождающим его материалотоковым сигналом. При динамичных и достаточно нестационарных процессах дозирования такая ситуация может приводить к потере контроля текущего процесса, а при цифровой идентификации полученного распределения еще и с целью реализации функции управления это может вызвать некорректное формирование управляющих воздействий при их подаче на исполнительные механизмы дозаторов. Последнее обстоятельство недопустимо, а в ряде случаев – фатально. Пример тому – приготовление шихтовой смеси при производстве доменного агломерата.

Также, например, в сфере записи и распознавания речевых команд важны интервалы молчания, формирующие определенную семантику анализируемого сигнала, но паразитные элементы распределения Вигнера маскируют их. Эти паразитные фрагменты могут быть удалены путем сглаживания (фильтрации), но сглаживание уничтожает некоторые другие желательные свойства распределения Вигнера. К тому же такая фильтрация может напрямую «затирать» на карте Вигнера определенные время-частотные элементы, что, в свою очередь, способствует неверной интерпретации внутренней структуры анализируемых сигналов.

Наличие виртуальных элементов на карте Вигнера-Вилле (то есть паразитных, интерференционных [2, 3, 14], членов в составе распределения) поясним аналитически, для чего рассмотрим двухкомпонентный сигнал вида $s(t) = \alpha g(t) + \beta c(t)$, где $g(t)$ и $c(t)$ – составляющие сигнала; α и β – масштабные коэффициенты. Распределение Вигнера, отображающее этот сигнал, на основании выражения (3) преобразуется так:

$$\begin{aligned} W(t, \omega) &= (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} s^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \exp(-j\omega\tau) s \left(t + \frac{\tau}{2} \right) d\tau = \\ &= (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\alpha g \left(t + \frac{\tau}{2} \right) + \beta c \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \right] \times \\ &\times \left[\alpha^* g^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) + \beta^* c^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] \exp(-j\omega\tau) d\tau = \\ &= (2\pi)^{-1} \int \left[|\alpha|^2 g \left(t + \frac{\tau}{2} \right) g^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] \exp(-j\omega\tau) d\tau + \\ &+ (2\pi)^{-1} \int \left[|\beta|^2 c \left(t + \frac{\tau}{2} \right) c^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] \exp(-j\omega\tau) d\tau + \\ &+ (2\pi)^{-1} \int \left[\alpha \beta^* g \left(t + \frac{\tau}{2} \right) c^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \left[\alpha^* \beta g^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) c \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \right] \exp(-j\omega\tau) d\tau = \\ &= |\alpha|^2 W_g(t, \omega) + |\beta|^2 W_c(t, \omega) + (2\pi)^{-1} \times \\ &\times \int \left[\alpha \beta^* g \left(t + \frac{\tau}{2} \right) c^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) + \alpha^* \beta g^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times c^* \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \right] \exp(-j\omega\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что в состав итогового распределения входят распределения для составляющих $g(t)$ и $c(t)$ сигнала $s(t)$, а также интегральное распределение, отображающее проявление паразитной связи между компонентами сигнала, что выражается в появлении виртуальных элементов на карте (распределении) Вигнера [11, 15 – 19].

ВРЕМЯ-ЧАСТОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИГНАЛОВ

При двухкомпонентном гармоническом сигнале в распределении Вигнера возникают концентрации энергии [1, 2] на двух основных частотах (фактическое распределение энергии) и на полусуммарной частоте [2, 15] (виртуальное распределение энергии).

В общем случае при сложном N -компонентном сигнале вида

$$s(t) = \sum_1^N S_k(t)$$

время-частотное распределение выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} W(t) &= \sum_1^N W_{kk}(t, \omega) + \sum_1^N W_{kl}(t, \omega), \\ k &\neq l, \quad k, l = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

где первая «сигма» означает сумму распределений для каждой k -ой компоненты $s_k(t)$ в составе сигнала $s(t)$, а вторая – сумму распределений виртуальных элементов.

При использовании в составе блока дозирующих устройств дозаторов непрерывного типа – шнековых и(или) спиральных – в распределении Вигнера возникают виртуальные концентрации энергии на полусуммарных частотах – при определении средней частоты любых двух дозаторов. Следовательно, для N дозаторов непрерывного действия получаем $1/2N(N-1)$ локализованных концентраций виртуальной энергии.

При расчете время-частотных распределений мультикомпонентных сигналов последние выражаются в виде дискретных решетчатых функций.

Ниже приведено количество локализованных виртуальных концентраций, порождаемое блоком дозаторов:

Число дозаторов, N , в составе блока дозирующих устройств 2, 3, 4, 5
Количество паразитных элементов в составе распределения Вигнера 1, 3, 6, 10

В этом случае, в соответствии с теоремой отсчетов [2, 20], распределение Вигнера определяется как

$$W(t, \omega) = \frac{T}{\pi} \sum_{k=0, \infty} s^*(t - kT) s(t + kT) \exp(-j2\omega kT), \quad (4)$$

где $1/T$ – частота дискретизации, выбирается из соотношения $T \leq \frac{\pi}{2\omega_{\max}}$, ω_{\max} – максимальная частота в спектре сигнала.

Как видно из выражения (4), дискретное распределение Вигнера – периодически с периодом π (поскольку частота мнимой экспоненты равна 2ω), а не 2π – как в случае непрерывного сигнала. Следовательно, частота дискретизации ω_s должна быть в два раза больше частоты Найквиста ω_N [2, 11], то есть

$$\omega_s \geq 2\omega_N = 4\omega_{\max}.$$

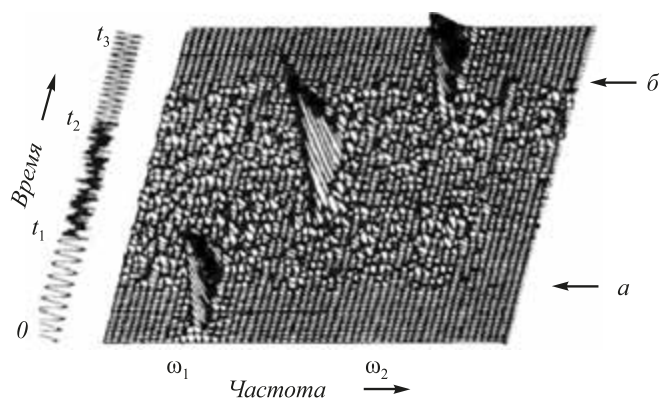
При решетчатой форме сигнала расхода материало- потока, дискретизированного по времени и заданного в форме $\hat{x}(t) = \sum_{n=0, \infty} x(nT) \delta(T - nT)$ и непрерывной частоте ω получаем дискретную версию распределения Вигнера:

$$\hat{W}(n, \omega) = \sum_{k=0, \infty} s^*[(n - 2k)T] s(kT) \exp[-j\omega(2k - n)T].$$

Данное выражение соответствует условию безутратного, в информационном смысле, восстановления непрерывного одномерного материалопотокового сигнала из его дискретного распределения.

ПРИМЕР ПРОНИКНОВЕНИЯ ШУМА В РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИГНЕРА

При реализации численных методов расчета распределений Вигнера реальных материалопотоковых сигналов отмечается, что во многих случаях распределения оказываются зашумленными как по временному, так и частотному диапазонам. В общем случае, если некоторый шум действует на определенном временном интервале, то этот шум будет проявляться и на других интервалах, а если сигнал – бесконечной длительности (то есть является нелокализованным во времени), то шум будет отображаться на всем временном интервале регистрации сигнала. Этот негативный эффект является общим свойством распределения Вигнера, которое объясняется существенной алокальностью последнего.



Пример, иллюстрирующий проникновение шума в распределение Вигнера

An example illustrating noise penetration into the Wigner distribution

Это свойство продемонстрировано на рисунке, где показан 1D-сигнал конечной длительности с наличием шума в диапазоне (t_1, t_2) , и соответствующее этому сигналу распределение Вигнера. Шум на распределении появляется во временном диапазоне между стрелками a и b на рисунке, хотя длительность шума короче этого интервала. Кроме того, он проявляется и в частотном диапазоне, ширина которого больше диапазона (ω_1, ω_2) . Здесь частота ω_1 соответствует нижней части осциллограммы (от нуля до t_1), а частота ω_2 – верхней (t_2, t_3) ; $\omega_2 > \omega_1$.

Пик виртуальной энергии в диапазоне (t_1, t_2) проявляется на полусуммарной частоте $(1/2)(\omega_1 + \omega_2)$. Если бы сигнал имел бесконечную длительность, то шум появлялся бы на всем временном интервале в распределении Вигнера, хотя он имел конечную длительность в сигнале.

Выводы

В исследовании проанализированы недостатки, а также продемонстрированы возможности время-частотных распределений класса Коэна (на примере распределения Вигнера) отображать одномерные сигналы параметров технологических процессов в удобном, с эксплуатационной точки зрения, время-частотном пространстве. Подобные преобразования целесообразно использовать в автоматизированных системах управления как математический аппарат, позволяющий формировать комфортное (с позиций информативности и семантической ясности) визуально-графическое отображение рабочих режимов разнохарактерных технологических процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосенков Б.А. Научно-технические основы создания и моделирования автоматизированных систем управления непрерывными смесеприготовительными процессами. Автореф. ... доктора техн. наук. – М., 2005. – 55 с.

2. Cohen L. Time-frequency distributions – A Review // *Proceedings of the IEEE*. 1989. Vol. 77. No. 7. P. 941 – 981.
3. Cohen L. Time-frequency analysis. – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. – 299 p.
4. Hlawatsch F. A note on Wigner distribution for finite duration or band-limited signals and limiting cases // *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1988. Vol. ASSP-36. P. 927 – 929.
5. Ferrando S.E., Doolittle E.J., Bernal A.J., Bernal L.J. Probabilistic matching pursuit with Gabor dictionaries // *Signal Processing*. 2000. Vol. 80. P. 2099 – 2120.
6. Cohen L. On a fundamental property of the Wigner distribution // *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1987. Vol. ASSP-35. P. 559 – 561.
7. Cohen L., Posch T. Positive Time-Frequency Distribution Functions // *IEEE Trans. Acoust., Speech., Signal Processing*. 1985. Vol. ASSP-33. No. 1. P. 31 – 38.
8. Cohen L. Wigner distribution for finite duration or band-limited signals and limiting cases // *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1987. Vol. ASSP-35. No. 6. P. 796 – 806.
9. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis // *PINSA*. 2002. Vol. 68A. No. 1. January. P. 35 – 56.
10. Debnath L. Wavelet transforms and their applications. – Birkhauser, Boston, 2002. – 565 c.
11. Mallat St. A wavelet tour of signal processing, Academic Press, 2nd Ed., Ecole Polytechnique, Paris. Reprinted 2001. – 637 p.
12. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class / Chapter in: Time-frequency analysis: concepts and methods. ISTE. 2008 (January). P. 131 – 163.
13. Choi H.L. and Williams W.J. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels // *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1989. Vol. ASSP-37. P. 862 – 871.
14. Мартуганова Е.Р. Модель web-сервиса по специализированной обработке данных на основе жадных алгоритмов. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2014. – 86 с.
15. Davis G.M., Mallat S.G., Zhang Z. Adaptive time-frequency decomposition with matching pursuit. *Proc. SPIE 2242, Wavelet Applications*, 1994. P. 402 – 413.
16. Mallat S., Zhang Z. Matching Pursuit With Time-Frequency Dictionaries // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1993. Vol. 41. No. 12. P. 3397 – 3414.
17. Townsend S., Lee B., Jr. Sparse. Approximation and Atomic Decomposition: Considering Atom Interactions in Evaluating and Building Signal Representations. A Dissertation, March 2009. – 260 p.
18. Gribonval R., Depalle P., Rodet X., Bacry E. and Mallat S. Sound signals decomposition using a high resolution matching pursuit. – In *Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC'96)*. August 1996. P. 293 – 296.
19. Boashash B., Touati S., Auger F., Flandrin P., Chassande-Mottin E. et al. Measures, performance assessment and enhancement TFDs // Chapter in: Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference. Academic Press. 2016. January. P. 387 – 452.
20. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб: Питер, 2006. – 751 с.

Поступила в редакцию 12 ноября 2018 г.
После доработки 26 декабря 2018 г.
Принята к публикации 29 декабря 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. No. 4, pp. 324–329.

COHEN'S CLASS TIME-FREQUENCY DISTRIBUTIONS FOR MEASUREMENT SIGNALS AS A MEANS OF MONITORING TECHNOLOGICAL PROCESSES

D.B. Fedosenkov¹, A.A. Simikova², S.M. Kulakov³,
B.A. Fedosenkov⁴

¹Siberian Generating Company, Moscow, Russia

²Kemerovo State University (KemSU), Kemerovo, Russia

³Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

⁴Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russia

Abstract. The article presents and describes Cohen's class time-frequency distributions which are expedient to use as a mathematical tool that allows to create a convenient – in terms of information content and semantic clarity – visual-graphical representation of the operating modes of various technological processes including processes of ferrous metallurgy. It was noted that a controlling process is usually implemented without simultaneous visual monitoring of each scalar (one-dimensional) coordinate that is under control, but the presence of such monitoring is an important condition for the computer-aided controlling of the dynamics of non-stationary technological processes. To eliminate this drawback, it was proposed to perform synchronous monitoring using the multidimensional Cohen's class time-frequency distributions, when each measurement scalar signal is specifically represented through one of these distributions, for example, the Wigner-Ville distribution. An expression is given for the generalized distribution of Cohen's class with a distribution kernel and an ambiguity function. This function allows receiving distributions of various types from the maternal function. The most typical representatives of time-frequency distributions forming this class are given with their available kernels. The possibility of appearance of interference elements, which make it difficult to identify the controlled modes, on a

signal distribution map is proved. Case of the formation of virtual elements within the Wigner-Ville distribution representing a two-component one-dimensional signal is considered. The conditions are explained for the emergence of parasitic elements on the distribution map, obtained, for example, during realizing the process of multi-component feeding the bulk blast furnace charge materials in the production of sintering mixture. An analytical expression is obtained for the Wigner distribution, which displays a multi-component scalar signal and contains the information (useful) and virtual (parasitic) parts of the time-frequency distribution. A link between the number of bulk material feeders available in the feeding devices unit and the number of parasitic (virtual) elements in the Wigner distribution was determined. Using the dosing process as an example, the effect of the noise components propagation in the Wigner distribution is demonstrated. An example is given to illustrate the penetration of noise into the Wigner distribution and appearance of the virtual concentration in it when displaying a signal waveform with a noisy pause and two sections with different frequencies. An expression for the Wigner distribution in the form of a comb function is obtained. The conclusion was made about the parameters of the distribution periodicity and the required sampling frequency of measurement signals.

Keywords: Cohen's class distributions, Wigner-Ville distribution, distribution kernel, interference elements, distribution virtual elements, ferrous metallurgy processes, ambiguity function, multicomponent signal, feeding signal.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-324-329

REFERENCES

1. Fedosenkov B.A. *Nauchno-tehnicheskie osnovy sozdaniya i modelirovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya nepreryvnymi*

- smeseprigotovitel'nyimi protsessami. avtoref. dis... doktora tekh. nauk. [Scientific and technical basis of design and simulation of automated control systems for continuous mixing preparation. Extended Abstract of Dr. Sci. Eng.]. Moscow, 2005, 55 p. (In Russ.).
2. Cohen L. Time-frequency distributions – A Review. *Proceedings of the IEEE*. 1989, vol. 77, no. 7, pp. 941–981.
3. Cohen L. *Time-frequency analysis*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995, 299 p.
4. Hlawatsch F. A note on Wigner distribution for finite duration or band-limited signals and limiting cases. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1988, vol. ASSP-36, pp. 927–929.
5. Ferrando S.E., Doolittle E.J., Bernal A.J., Bernal L.J. Probabilistic matching pursuit with Gabor dictionaries. *Signal Processing*. 2000, vol. 80, pp. 2099–2120.
6. Cohen L. On a fundamental property of the Wigner distribution. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1987, vol. ASSP-35, pp. 559–561.
7. Cohen L., Posch T. Positive Time-Frequency Distribution Functions. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1985, vol. ASSP-33, pp. 31–38.
8. Cohen L. Wigner distribution for finite duration or band-limited signals and limiting cases. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1987, vol. ASSP-35, no. 6, pp. 796–806.
9. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis. *PINSA*. 2002, 68 A, no. 1, pp. 35–56.
10. Debnath L. *Wavelet transforms and their applications*. Birkhauser, Boston, 2002, 565 p.
11. Mallat St. *A wavelet tour of signal processing*. Academic Press, 2nd Ed., Ecole Polytechnique, Paris. Reprinted, 2001. 637 p.
12. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class. In: *Time-frequency analysis: concepts and methods*. ISTE. 2008 (January), pp. 131–163.
13. Choi H.L., Williams W.J. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1989, vol. ASSP-37, p. 862–871.
14. Martuganova E.R. *Model' web-servisa po spetsializirovannoi obrabotke dannykh na osnove zhadnykh algoritmov* [Model of web-service for specialized data processing based on greedy algorithms]. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 2014, 86 p. (In Russ.).
15. Davis G.M., Mallat S.G., Zhang Z. Adaptive time-frequency decomposition with matching pursuit. In: *Proc. SPIE 2242, Wavelet Applications*, 402, 1994, pp. 402–413.
16. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1993, vol. 41, no. 12, pp. 3397–3414.
17. Townsend S., Lee B., Jr. Sparse. *Approximation and atomic decomposition: considering atom interactions in evaluating and building signal representations. A Dissertation*. March 2009, 260 p.
18. Gribonval R., Depalle P., Rodet X., Bacry E., Mallat S. Sound signals decomposition using a high resolution matching pursuit. In: *Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC'96). August 1996*, pp. 293–296.
19. Boashash B., Touati S., Auger F., Flandrin P., Chassande-Mottin E. etc. Measures, performance assessment and enhancement TFDs. In: *Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference*. Academic Press, 2016, January, pp. 387–452.
20. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. St. Petersburg: Piter, 2006, 751 p. (In Russ.).

Information about the authors:

D.B. Fedosenkov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of Asset Management Department (rafwavelet@ngs.ru)
A.A. Simikova, Postgraduate of the Chair "Automation of Production Processes and ACS" (simikovaanna@mail.ru)
S.M. Kulakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Automation and Information Systems" (kulakov-ais@mail.ru)
B.A. Fedosenkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Information and Automated Production Systems"

Received November 12, 2018
 Revised December 26, 2018
 Accepted December 26, 2018