

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОКНА ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ДЕКОМПОЗИЦИИ СИГНАЛЬНОГО РАДИОПРОФИЛЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-6-23-28

Manuscript received 05 May 2023;
Accepted 03 June 2023

Бойков Константин Анатольевич,
МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия, nauchnyi@yandex.ru

Ключевые слова: декомпозиция, оконное преобразование, сигнальный радиопрофиль, частотно-временное преобразование, корреляционный анализ

Известные методы частотно-временного преобразования сложны и громоздки в вычислениях, требуют корректного подбора (перебора) базовых функций разложения, могут иметь интерференционные точки и отрицательные значения функции спектральной плотности. Наличие пространственно-временной неопределенности, непременно присущей любому частотно-временному разложению, а также отсутствие возможности коррекции найденных коэффициентов разложения делают современные методы частотно-временного преобразования малоэффективными при анализе сигнальных радиопрофилей (СРП). Декомпозиция СРП с оконной корреляционной обратной связью устраняет указанные выше недостатки, посредством многократного перебора параметров, однако это происходит за счет существенного увеличения времени преобразования. Целью данной работы является повышение эффективности частотно-временного разложения СРП посредством анализа параметров окна преобразования при декомпозиции с оконной корреляционной обратной связью. В работе используются методы экспериментальных исследований для регистрации электрической составляющей излученного изделием электромагнитного поля – СРП. Методы корреляционного анализа для определения наилучшего совпадения реперного и восстановленного СРП. Методы цифровой обработки сигналов при частотно-временном разложении. Представлены зарегистрированные СРП и их параметры, проведен корреляционный анализ данных СРП. Приведены зависимости корреляционных функций от ширины и шага окна при различном числе точек дискретизации зарегистрированного СРП. Полученные результаты впервые показали возможность использования определенных параметров окна преобразования для повышения точности и существенного снижения времени декомпозиции СРП, что обуславливает новизну работы. Установлено, что при ширине окна равном половине протяженности самого СРП и шаге окна не более десятой части протяженности СРП можно добиться повышения взаимной корреляции между исходным и восстановленным СРП до 0,95. Даны рекомендации по быстроедействию регистрирующей аппаратуры при приеме СРП. Практическая значимость работы заключается в уменьшении числа итераций многопараметрического приближения при использовании корреляционной обратной связи в ходе декомпозиции СРП, что существенно снижает время на преобразование и повышает его точность.

Информация об авторе:

Бойков Константин Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО "МИРЭА – Российский технологический университет", Москва, Россия

Для цитирования:

Бойков К.А. Исследование параметров окна частотно-временного преобразования при проведении декомпозиции сигнального радиопрофиля // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №6. С. 23-28

For citation:

Boikov K.A. (2023) Investigation of the parameters of the frequency-time conversion window during the decomposition of the signal radio profile. T-Comm, vol. 17, no.6, pp. 23-28. (in Russian)

Введение

Анализ динамики систем с меняющимися во времени характеристиками является одной из приоритетных задач цифровой обработки сигналов. Частотно-временной анализ касается обработки сигналов с изменяющимся во времени частотным содержанием. Такие сигналы лучше всего представлены в частотно-временной области, где демонстрируется распределение энергии в двумерном частотно-временном пространстве [1]. Обработка сигнала может использовать особенности, создаваемые концентрацией энергии в двух измерениях (время и частота), а не только в одном (время или частота).

Часто на практике декомпозиция сигнала проводится для максимально точного разложения на удобные для дальнейшего анализа функции и аппроксимации минимальным числом членов ряда при удовлетворении заданной степени точности. При исследовании темы декомпозиции сигналов по системе заданных функций часто возникает неправильное отождествление этой процедуры с процедурой разложения заданной функции в ряд. Декомпозиция в данной работе преследует своей целью разложение, зарегистрированного сложного СРП, на простые затухающие колебания с определением их числа и экстракцией основных параметров [2]. Классический подход к проведению исследований в данной области состоит в предположении квазистационарности – медленного изменения параметров во времени. В этом случае небольшие фрагменты регистрируемых процессов можно рассматривать как почти стационарные, применяя к ним классические радиофизические методы обработки и анализа сигналов [3]. Однако использование этих методов из-за введения допусков вносит ощутимые погрешности при разложении.

На сегодняшний день популярны несколько вариантов частотно-временного преобразования. Например, преобразование Габора, заключающееся в разделении всего временного интервала сигнала на оконные составляющие с последующим последовательным преобразованием для каждого окна в отдельности [4]. Тем самым осуществляется переход к частотно-временному представлению. При этом в качестве оконной функции для решения задач разложения используются простейшие гауссовы функции $\psi(t, h_k)$. Выражение для преобразования Габора можно представить следующим образом [5]:

$$X_{\Gamma}(f, h_k) = \int_{-\infty}^{\infty} f_U(t) \psi(t - h_k) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (1)$$

где $\psi(t - h_k)$ – функция окна сдвига по временной оси на фиксированные значения параметра h_k .

Отличительной особенностью известного вейвлет-анализа является то, что в нем можно использовать семейства функций, реализующих различные варианты соотношения неопределенности. Соответственно, исследователь имеет возможность гибкого выбора между ними и применением тех вейвлетных функций, которые наиболее эффективно решают поставленные задачи. Вейвлет-преобразования подразделяют на дискретное и непрерывное. Для непрерывного вейвлет-анализа используется выражение [6]:

$$X_B(a, h_n) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f_U(t) \psi^*\left(\frac{t - h_n}{a}\right) dt \quad (2)$$

где $a > 0$ – параметр растяжения, задающий масштабирование, h_n – параметр положения, соответствующий временному сдвигу, ψ^* – комплексно сопряженная функция для материнского (или базисного) вейвлета ψ .

Данные методы частотно-временного разложения сложны и громоздки в вычислениях, требуют корректного подбора базовых функций разложения. Эти недостатки являются следствием высокой точности нахождения коэффициентов разложения, а также хорошего пространственно-временного разрешения. Априори известная форма составляющих СРП приводит к необходимости создания новых инструментов анализа, которые могли бы эффективно применяться для обработки нестационарных сигналов с использованием возможности коррекции.

Декомпозиция с оконной корреляционной обратной связью, впервые представленная в работе [7], за счет многопараметрической подгонки параметров СРП, за несколько итераций позволяет восстановить исходный СРП со взаимной корреляцией с репером не менее 0,9. Однако такой многопараметрический анализ занимает много времени из-за объемных вычислений.

Для решения указанных проблем в данной работе определяются наилучшие параметры окна преобразования (ширина окна и шаг окна), позволяющие снизить число итераций и ускорить сам процесс декомпозиции СРП.

Постановка задачи и методы исследования

Как уже было отмечено, целью представленного исследования является повышение эффективности частотно-временного разложения СРП посредством анализа параметров окна преобразования при декомпозиции.

Под окном преобразования здесь понимается прямоугольная функция $O(t)$, которая с определенным шагом перемещается по оси времени от начала координат:

$$O(t) = \begin{cases} 1, & t \leq |t_0| \\ 0, & t > |t_0| \end{cases} \quad (3)$$

Известно, что спектр такого окна представляет собой функцию вида $\sin(x)/x$ и имеет лепестковый характер [8], (ширина лепестков равна $2\pi/t_0$, то есть обратно пропорциональна ширине окна). Значение спектральной функции на нулевой частоте равно площади импульса $O \cdot t_0$. Спектральная функция является вещественной, поэтому фазовый спектр принимает лишь два значения – 0 и π , в зависимости от знака функции.

Под шириной окна в данной работе понимается число точек дискретизации, попадающих в прямоугольную функцию окна, что эквивалентно протяженности функции по временной оси – t_0 . Не следует путать ширину окна преобразования и ширину основного лепестка спектра (эффективную ширину при лепестковом характере спектра).

Под шагом окна понимается число точек дискретизации, на которые перемещается прямоугольная функция окна (окно преобразования) при частотно-временном разложении.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи по декомпозиции исходного СРП, экстракции его основных параметров и корреляционному анализу восстановленного и исходного СРП.

При проведении анализа можно воспользоваться СРП радиоэлектронного устройства (РЭУ), уже полученного ранее. Следует заметить, что электронный узел состоит из группы компонентов, итоговый СРП узла – суперпозиция СРП входных и выходных цепей его составляющих [9]:

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_{CBi}(t) = \sum_{i=1}^N U_{0i} e^{-\delta_i(t-t_{0i})} \sin[\omega_i(t-t_{0i})], \quad (4)$$

где U_0 – начальная амплитуда колебаний (постоянная интегрирования, зависящая от значений параметров накопителей), δ – коэффициент затухания, ω – угловая частота колебаний t – текущий момент времени, t_0 – момент времени начала излучения i -го колебания.

Таким образом при декомпозиции представленного СРП будут получены его составляющие – затухающие колебания, соответствующие определенным излучателям (рис. 1)

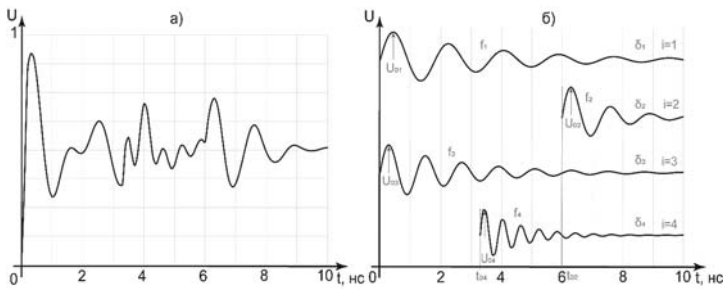


Рис. 1. СРП: а) суперпозиция излучений; б) сигнальные составляющие СРП

Далее необходима экстракция параметров СРП посредством частотно-временного преобразования [10]:

$$X(f, h) = \sum_{h=0}^{K-O} \left[\sum_{c=h}^{O-1+h} U(O) \exp\left(-j \frac{2\pi f c}{O}\right) \right], \quad (5)$$

где $X(f, h)$ – дискретный частотно-временной спектр сигнала, h – номер отсчета положения окна преобразования ($0 < h < K - O$), K – общее число отсчетов СРП, $U(O)$ – сигнал, дискретизированный во времени, c – номер отсчета, f – частота, O – число точек, образующих окно преобразования.

Ожидается, что в результате наличия пространственно-временной неопределенности, при восстановлении СРП по экстрагированным ранее параметрам будет наблюдаться его отклонение от исходного СРП (рис. 2).

Изучение отклонения предполагается провести методом корреляционного анализа, полученного и исходного СРП, путем построения корреляционной функции $r(h)$ [11,12]:

$$r(h) = \frac{\sum_{i=h}^{M+h} (Y_{1,i} - \bar{Y}_1) \cdot (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)}{\sqrt{\sum_{i=h}^{M+h} (Y_{1,i} - \bar{Y}_1)^2 \cdot \sum_{i=h}^{M+h} (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)^2}}, \quad (6)$$

где M – число выборок («окно» преобразования), h – номер отсчета положения окна преобразования ($0 < h < K - M$),

$Y_1 = \frac{U}{U_M}$ – выб ки значений СРП a , $Y_2 = \frac{U_B}{U_{MB}}$ – выборки

значений СРП b , $\bar{Y}_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=h}^{M+h} Y_{1,i}$, $\bar{Y}_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=h}^{M+h} Y_{2,i}$ – средние

значения выборок, U – значение СРП a в точке выборки, U_M – максимальное значение СРП a , U_B – значение СРП b в точке выборки, U_{MB} – максимальное значение СРП b .

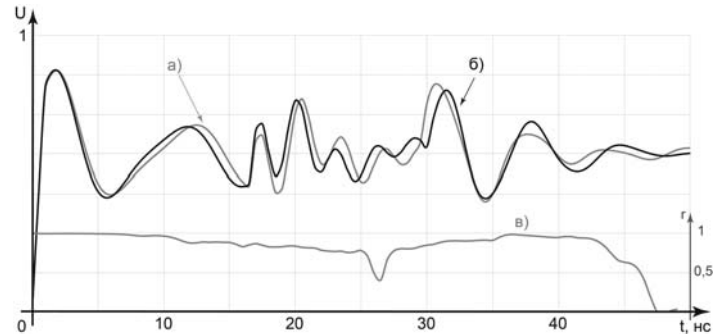


Рис. 2. Корреляционная функция (в) восстановленного (а) и исходного (б) СРП

Очевидно, что от параметров окна преобразования будет зависеть точность экстракции параметров СРП. Так, при увеличении ширины окна повышается точность определения частоты и снижается точность определения времени включения очередного излучения и наоборот. При увеличении шага окна увеличивается скорость выполнения декомпозиции, но снижается точность определения времени включения излучения. Следует заметить, что использование современной сверхбыстродействующей регистрирующей аппаратуры с частотой дискретизации 40 Гвыб/с позволяет получить шаг окна до 25 пс (одна точка дискретизации).

Для определения наиболее эффективных параметров окна предлагается воспользоваться оценкой площади под кривой корреляционной функции:

$$S_r = \int_0^{t_0} r(t) dt \quad (7)$$

Поскольку исследуется СРП уже дискретизированный во времени, то интегрирование в выражении

(7) можно заменить на сумму площадей S_{ri} в каждой точке дискретизации СРП:

$$S_r = \sum_{i=1}^K S_{ri} = \sum_{i=1}^K r(h) \cdot (t_i - t_{0i}) \quad (8)$$

Когда СРП совпадают полностью, то есть $r(h) = 1$, то считаем площадь под кривой корреляционной функции единичной. Все вычисленные площади будут приведены к единичной (приведенная или относительная площадь). Чем выше-приведенное значение S_{ri} тем точнее произведено восстановление СРП посредством декомпозиции с корреляционной обратной связью.

Полученные результаты

В результате проведенных испытаний было получено несколько СРП с различной частотой дискретизации – 128, 256, 512, 1024 точек. Частота дискретизации задавалась для каждой группы измерений настройками сверхбыстродействующего измерительного осциллографа реального времени

RTO2032 (производство Rohde & Schwarz). На рисунке 3 приведены зависимости относительной площади под кривой корреляционной функции от ширины окна.

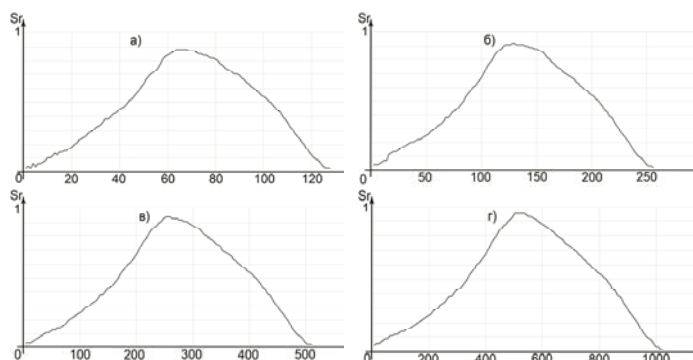


Рис. 3. Зависимость относительной площади под корреляционной кривой от ширины окна для числа точек дискретизации: а) 128, б) 256, в) 512, г) 1024

Как видно из данного рисунка относительная площадь под корреляционной кривой имеет несущественную зависимость от частоты дискретизации и максимальна в районе точек, лежащих в окрестности $K/2$.

По приведенным зависимостям также можно проследить рост S_r с увеличением числа точек дискретизации (рис. 4).

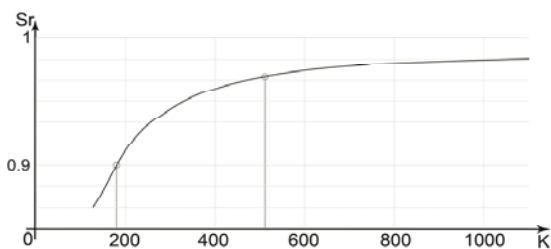


Рис. 4. Зависимость относительной площади под корреляционной кривой от числа точек дискретизации

На представленном рисунке, при дискретизации ниже 512 точек кривая S_r начинает резко убывать. При средней длительности СРП $t = 50$ нс, данная дискретизация соответствует приблизительно 10 Гвыб/с. Дальнейшее уменьшение точек дискретизации ведет к «провалу» $S_r < 0,9$ (180 точек), что говорит о существенном ослаблении корреляционной связи между исходным и восстановленным сигналом.

Аналогичным образом были построены зависимости относительной площади под кривой корреляционной функции от шага окна. На рисунке 5 показана данная зависимость для случая 1024 точки дискретизации.

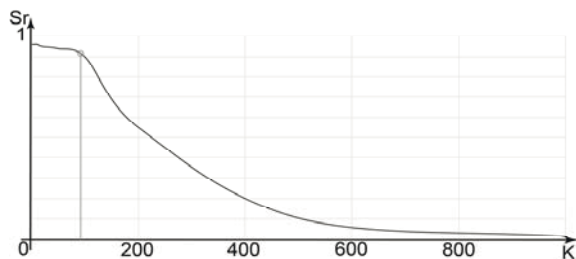


Рис. 5. Зависимость относительной площади под корреляционной кривой от шага окна

Резкий спад относительной площади под корреляционной кривой идет после увеличения шага окна до 100 точек, то есть $K/10$ (ниже этого порога значение S_r практически неизменно). Аналогичные зависимости были построены для случая 128, 256 и 512 точек дискретизации, которые показали также резкий спад при шаге окна более $K/10$ точек. Чем меньше шаг окна, тем более точно можно определить время начала излучения (t_0), однако в этом случае число операций преобразования существенно возрастает. Так для шага окна $K/10$ время декомпозиции будет на порядок меньше единичного шага окна, при несущественном снижении значения S_r .

Проведение декомпозиции

Для проверки полученных при исследовании данных необходимо провести декомпозицию СРП с уже известными параметрами (рис. 2), и сравнить с результатами, полученными ранее. В таблице 1 представлены известные параметры исходного СРП, параметры, полученные в работе [13] с произвольным размером и шагом окна, а также параметры, полученные для окна с шириной $K/2$ и шагом $K/10$. В скобках показано число итераций последовательного приближения (многопараметрический подгон значений посредством корреляционной обратной связи) для каждого из окон.

Таблица 1

Параметры излучателей СРП

Параметры	Исходный СРП	Произвольные параметры	Окно $K/2$
f_1 , ГГц	0,65	0,68 (10)	0,63 (5)
f_2 , ГГц	0,90	0,98 (7)	0,95 (4)
f_3 , ГГц	0,85	0,86 (12)	0,83 (5)
f_4 , ГГц	1,90	1,8 (15)	1,95 (6)
δ_1 , нс ⁻¹	-0,30	-0,31 (10)	-0,30 (4)
δ_2 , нс ⁻¹	-0,40	-0,43 (8)	-0,39 (4)
δ_3 , нс ⁻¹	-0,73	-0,75 (14)	-0,71 (5)
δ_4 , нс ⁻¹	-0,80	-0,85 (17)	-0,81 (7)
t_{01} , нс	0	0 (1)	0 (1)
t_{02} , нс	0	0 (1)	0 (1)
t_{03} , нс	5,5	5,3 (9)	5,6 (5)
t_{04} , нс	3,0	3,1 (11)	3,1 (6)

Как видно из данной таблицы использование ширины окна $K/2$ с шагом $K/10$ позволяет снизить разброс параметров между исходным и восстановленным СРП до 5%, а число итераций сократить практически вдвое по сравнению с окном с произвольными параметрами.

При проведении декомпозиции с оконной корреляционной обратной связью это дает выигрыш по времени преобразования в два раза для каждого параметра. Если рассматривать СРП радиоэлектронного узла, состоящего из четырех излучателей, каждый из которых имеет три оценочных параметра (справедливо на практике), то выигрыш по времени на преобразование будет около 20 раз.

На рисунке 6 представлены корреляционные функции между исходным и восстановленным сигналом при декомпозиции с окном с произвольными параметрами и с окном $K/2$.

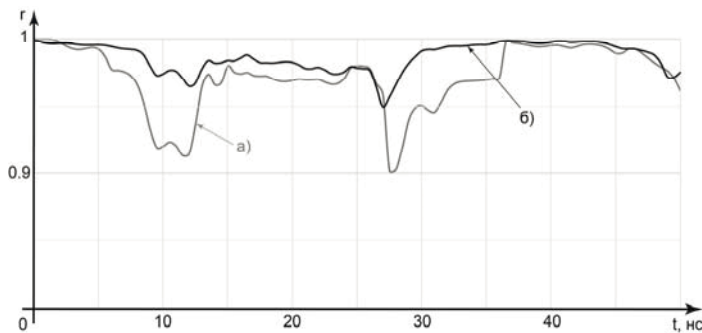


Рис. 6. Корреляционные функции:
а) произвольное окно, б) окно $K/2$

Из данного рисунка видно, что при использовании фиксированного окна $K/2$ минимальное значение взаимной корреляционной функции между исходным и восстановленным сигналом не опускается ниже 0,95, что по шкале Чаддока означает сильную корреляционную связь [14].

Следует заметить, что при использовании фиксированного окна $K/2$ возрастает не только минимальное значение взаимной корреляционной функции, но и существенно сужается временная область корреляционного несоответствия. Данная особенность способствует наилучшей локализации параметров, требующих коррекции, что также приведет к общему снижению времени на декомпозицию СРП.

Заключение

В работе представлено исследование параметров окна частотно-временного преобразования при декомпозиции СРП. Установлено, что при ширине окна равной половине точек дискретизации всего СРП ($K/2$) и при шаге окна не более десятой части точек дискретизации ($K/10$) существенно снижается время на декомпозицию СРП (приблизительно в два раза на каждый параметр), повышается минимальное значение взаимной корреляционной функции между исходным и восстановленным сигналом (не ниже 0,95), а также сужается временная область корреляционного несоответствия.

На практике это означает повышение эффективности декомпозиции СРП и как следствие повышение скорости, достоверности идентификации при пассивной радиосенсорной технической диагностики РЭУ. Как показал анализ при проведении аналогичных исследований не рекомендуется использовать регистрирующую технику с частотой дискретизации ниже 10 Гвыб/с. Данное условие в настоящее время может быть удовлетворено, поскольку современные сверхбыстродействующие осциллографы реального времени позволяют провести дискретизацию СРП с частотами до 40 Гвыб/сек.

При исследовании менее протяженных СРП (например, длительностью 2 нс и менее), число точек дискретизации даже для сверхбыстродействующей аппаратуры будет менее 100, что существенно снижает значение корреляционной функции между исходным и восстановленным СРП. Однако в данном случае можно использовать преобразования эквивалентного времени, в частности с регенеративными системами, для повышения числа точек дискретизации на интересующих участках СРП [15].

Дальнейшим развитием темы является исследование влияния формы окна частотно-временного преобразования на декомпозицию СРП и анализ возможного перекрытия окон.

Это должно дать ответ на вопрос о целесообразности использования окон различных функций (простейшие Гауссовы функции, окно Барлетта, синус-окно, приподнятый косинус Хемминга и другие) по сравнению с представленным в данной работе прямоугольным окном, что открывает новые перспективы в исследовании частотно-временного разложения нестационарных СРП.

Литература

1. Li G., Yu D., Yuan L., Chen X. Single Pulse Manipulations in Synthetic Time-Frequency Space // *Laser & Photonics Reviews*. 2022. Vol. 16, No. 1. P. 2100340. DOI 10.1002/lpor.202100340. EDN BCPLME.
2. Бойков К.А. Декомпозиция сигнального радиопрофиля в пассивной радиосенсорной технической диагностике и аутентификации электронных устройств // *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2022 Т. 18. № 1. С. 129-134.
3. Porsani M.J., Silva M.G., Ursin B. Signal decomposition and time-frequency representation using iterative singular spectrum analysis // *Geophysical Journal International*. 2019. Vol. 217, No. 2. P. 748-765. DOI 10.1093/gji/ggz046.
4. Rossa F. D., Guerrero J., Orlando G., Tagliatalata G. Applied Spectral Analysis // *Dynamic Modeling and Econometrics in Economics and Finance*. 2021. Vol. 29. P. 123-139. DOI 10.1007/978-3-030-70982-2_9. EDN LFBWEO.
5. Chaitra Y. L., Dinesh R. An Impact of Radon Transforms and Filtering Techniques for Text Localization in Natural Scene Text Images // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Vol. 248. P. 563-573. DOI 10.1007/978-981-16-4177-0_55. EDN AQQKIF.
6. Āuriš V., Semenov V.I., Chumarov S.G. Application of continuous fast wavelet transform for signal processing. London: Science Publishing, 2021. 188 p. ISBN 978-1-9993071-9-6. EDN TCGQRU.
7. Бойков К.А. Способ декомпозиции сложного сигнала с использованием корреляционной обратной связи: пат. 2772607 Рос. Федерации МПК H04B 1/06 / заявитель и правообладатель Бойков К.А. № 2021130198; заявл. 16.02.2021; опубл. 13.09.2021, Бюл. № 15.
8. Shevgunov T.Ya., Gushchina O.A. Using two-dimensional fast Fourier transform for estimating spectral correlation function // *T-Comm*. 2021. Vol. 15, No. 11. P. 54-60. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-11-40-44. EDN FXOHCP.
9. Бойков К.А. Определение параметров электронных устройств методом пассивной радиосенсорной технической диагностики // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*, 2021. Т. 24. №6. С. 63-70. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>.
10. Iskhakova A.O., Alekhin M.D., Bogomolov A.O. Time-frequency transforms in analysis of non-stationary quasi-periodic biomedical signal patterns for acoustic anomaly detection // *Information and Control Systems*. 2020. No. 1(104). P. 15-23. DOI 10.31799/1684-8853-2020-1-15-23. EDN KSWNQK.
11. Huang R., Cui H. Consistency of chi-squared test with varying number of classes // *Journal of Systems Science and Complexity*, 2015. № 28(2). P. 439-450. <https://doi.org/10.1007/s11424-015-3051-2>.
12. Thanh T. K., Vinh T.T. The application of correlation function in forecasting stochastic processes // *Herald of Advanced Information Technology*, 2019. № 2(4). P. 268-277. <https://doi.org/10.15276/hait04.2019.3>.
13. Бойков К.А. Радиосенсорная идентификация и аутентификация радиоэлектронных устройств // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022. Том 16. №5. С. 15-20.
14. Шкодун П.К. Разработка комплекса диагностических параметров оценки технического состояния тяговых электродвигателей подвижного состава // *Известия Транссиба*, 2020. № 4(44). С. 56-65.
15. Бойков К.А. Регенеративная система в пассивной радиосенсорной технической диагностике электронных устройств // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 2022. Том 16. № 2. С. 16-21.

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF THE FREQUENCY-TIME CONVERSION WINDOW DURING THE DECOMPOSITION OF THE SIGNAL RADIO PROFILE

Konstantin A. Boikov, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia, nauchnyi@yandex.ru

Abstract

Known methods of time-frequency transformation, such as the Gabor-Ville transform, wavelet transform, are complex and cumbersome in calculations, require the correct selection of basic expansion functions, may have interference points and negative values of the spectral density function. The presence of space-time uncertainty inherent in any frequency-time decomposition, as well as the lack of the possibility of correcting the found expansion coefficients, make modern methods of frequency-time transformation ineffective in the analysis of signal radio profiles (SRP). Decomposition of SRP with windowed correlation feedback eliminates the above disadvantages by multiple enumeration of parameters, however, this occurs at the expense of a significant increase in the transformation time. The transformation window here is understood as a rectangular function that moves along the time axis from the origin. In this work, the window width is understood as the number of sampling points falling into the rectangular window function, which is equivalent to the length of the function along the time axis. The window step is the number of sampling points to which the rectangular window function (transformation window) moves in the time-frequency decomposition. The purpose of this work is to increase the efficiency of the frequency-time decomposition of the SRP by analyzing the parameters of the transformation window in decomposition with windowed correlation feedback. In the study, experimental research methods are used to register the electrical component of the electromagnetic field radiated by the product - SRP. Correlation analysis methods for determining the best match between the reference and reconstructed SRP. Methods of digital signal processing with frequency-time decomposition. The paper presents the registered SRPs and their parameters, a correlation analysis of the SRP data is carried out. The dependences of the correlation functions on the width and step of the window are given for a different number of sampling points of the registered SRP. The results obtained for the first time showed the possibility of using certain parameters of the transformation window to improve the accuracy and significantly reduce the time of SRP decomposition, which makes the work novel. It has been established that with a window width equal to half the length of the SRP itself and a window step of not more than a tenth of the length of the SRP, it is possible to achieve an increase in the cross-correlation between the original and restored SRP up to 0.95. Recommendations are given on the speed of recording equipment when receiving PDS (sampling rate below 10 GS/s). The practical significance of the work lies in the reduction of iterations of the multi-parameter approximation when using correlation feedback in the course of SRP decomposition, which significantly reduces the conversion time and improves its accuracy.

Keywords: decomposition, window transformation, signal radio profile, time-frequency transformation, correlation analysis.

References

1. Li G., Yu D., Yuan L., Chen X. Single Pulse Manipulations in Synthetic Time-Frequency Space. *Laser & Photonics Reviews*. 2022. Vol. 16, No. 1. P. 2100340. DOI 10.1002/lpor.202100340.
2. Boikov K.A. Decomposition of the signal radio profile in passive radio sensor technical diagnostics and authentication of electronic devices. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022. Vol. 18. No. 1. P. 129-134. (In Russ)
3. Porsani M.J., Silva M.G., Ursin B. Signal decomposition and time-frequency representation using iterative singular spectrum analysis. *Geophysical Journal International*. 2019. Vol. 217, No. 2. P. 748-765. DOI 10.1093/gji/ggz046.
4. Rossa F.D., Guerrero J., Orlando G., Tagliatela G. Applied Spectral Analysis. *Dynamic Modeling and Econometrics in Economics and Finance*. 2021. Vol. 29. P. 123-139. DOI 10.1007/978-3-030-70982-2_9.
5. Chaitra Y.L., Dinesh R. An Impact of Radon Transforms and Filtering Techniques for Text Localization in Natural Scene Text Images. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Vol. 248. P. 563-573. DOI 10.1007/978-981-16-4177-0_55.
6. Duris V., Semenov V.I., Chumarov S.G. Application of continuous fast wavelet transform for signal processing. London : Sciemcee Publishing, 2021. 188 p. ISBN 978-1-9993071-9-6.
7. Boikov K.A. The method of decomposition of a complex signal using correlation feedback: Pat. 2772607 Ros. Federation IPC H04B 1/06 / applicant and copyright holder K.A. Boykov. No. 2021130198; dec. 02/16/2021; publ. 09/13/2021, Bull. No. 15.
8. Shevgunov T.Ya., Gushchina O.A. Using two-dimensional fast Fourier transform for estimating spectral correlation function. *T-Comm*. 2021. Vol. 15, No. 11. P. 54-60. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-11-40-44.
9. Boikov K.A. Determination of the parameters of electronic devices by the method of passive radio-sensor technical diagnostics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika*, 2021. Vol. 24. No. 6. P. 63-70. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>. (In Russ)
10. Iskhakova A.O., Alekhin M.D., Bogomolov A.O. Time-frequency transforms in analysis of non-stationary quasi-periodic biomedical signal patterns for acoustic anomaly detection. *Information and Control Systems*. 2020. No. 1(104). P. 15-23. DOI 10.31799/1684-8853-2020-1-15-23.
11. Huang R., Cui H. Consistency of chi-squared test with varying number of classes. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2015. No. 28(2). P. 439-450. <https://doi.org/10.1007/s11424-015-3051-2>.
12. Thanh T.K., Vinh T.T. The application of correlation function in forecasting stochastic processes. *Herald of Advanced Information Technology*, 2019. No. 2(4). P. 268-277. <https://doi.org/10.15276/hait04.2019.3>.
13. Boikov K.A. Radio sensor identification and authentication of radio electronic devices. *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 5. P. 15-20. (In Russ)
14. Shkodun P.K. Development of a set of diagnostic parameters for assessing the technical condition of traction electric motors of rolling stock. *Izvestiya Transsiba*, 2020. No. 4 (44). P. 56-65. (In Russ)
15. Boikov K.A. Regenerative system in passive radiosensor technical diagnostics of electronic devices. *T-Comm*, 2022. Vol. 16. No. 2. P. 16-21. (In Russ)

Information about author:

Konstantin A. Boikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Wave Processes and Technologies of the Institute of Radioelectronics and Informatics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA - Russian Technological University", Moscow, Russia