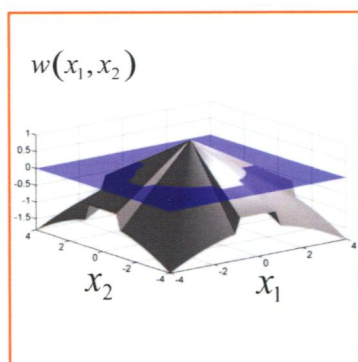


М цифровой обработки

В.Ф. КРАВЧЕНКО,
Д.В. ЧУРИКОВ

Цифровая обработка
сигналов атомарными
функциями и вейвлетами



ТЕХНОСФЕРА





М И Р **цифровой обработки**

В.Ф. Кравченко,
Д.В. Чуриков

**Цифровая обработка
сигналов атомарными
функциями и вейвлетами**

Под ред. заслуженного деятеля
науки РФ, д.ф.-м.н.,
проф. В.Ф. Кравченко

ТЕХНОСФЕРА

Москва
2019

УДК 537.87 + 621.371

ББК 22.336

К78

Рецензенты:

Пустовойт В.И. – академик РАН, Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук.

Крюковский А.С. – доктор физико-математических наук, профессор, Российский новый университет.

К78 Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В.

Цифровая обработка сигналов атомарными функциями и вейвлетами

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 182 с. ISBN 978-5-94836-506-0

Монография посвящена исследованию, развитию и разработке методов анализа физических систем на основе теорий R- и атомарных функций, WA-систем функций, построению алгоритмов обработки и моделирования процессов дистанционного зондирования и радиоастрономии в целях улучшения физических характеристик передачи, восстановления и распознавания многомерных сигналов. Рассматриваются новые весовые функции (окна) и фильтры с конечной импульсной характеристикой на их основе, а также ортогональные и аналитические вейвлеты. Исследована обобщенная теорема отсчетов на основе атомарных функций и ее частные случаи. Разработан алгоритм синтеза многомерных функций с произвольной геометрией опорной области. Предложено и обосновано обобщение функции неопределенности по времени и частоте применительно к анализу сложных зондирующих сигналов.

Книга предназначена для научных работников, аспирантов и студентов, работающих в области цифровой обработки сигналов применительно к современным задачам радиофизики и радиотехники.

УДК 537.87 + 621.371

ББК 22.336

© 2019, Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В.

© 2019, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-506-0

VICTOR FILIPPOVICH KRAVCHENKO,
DMITRY VICTOROVICH CHURIKOV

Digital Signal Processing by Atomic Functions and Wavelets

Edited by the Honored scientist of the Russian Federation,
doctor of physical and mathematical sciences,
professor V.F. Kravchenko

TECHNOSPHERA
Moscow
2019

UDK 537.87 + 621.371

BBK 22.336

K78

Reviewers:

Pustovoyt V.I. – *academician of RAS, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences.*

Kryukovsky A.S. – *doctor of physical and mathematical sciences, professor, Russian New University.*

Kravchenko V.F., Churikov D.V.

Digital Signal Processing by Atomic Functions and Wavelets

Moscow: TECHNOSPHERA publishers, 2019. – 182 p.

ISBN 978-5-94836-506-0

The monograph is devoted to research and the development of methods for analysis of physical systems on the basis of theories of R- and atomic functions, WA-systems of functions, the construction of processing algorithms and simulation of remote sensing and radio astronomy processes with the objective of improving the physical characteristics of the transmission, recovery, and recognition of multidimensional signals. The new weight functions (windows) and finite impulse response filters based on them, as well as analytical and orthogonal wavelets are described. The generalized sampling theorem based on atomic functions and its special cases are investigated. The algorithm of synthesis of multidimensional functions with reference area of complex shape geometry is developed. The generalization of the ambiguity function of time and frequency in relation to the analysis of complex sounding signals is proposed and justified.

The book is intended for researchers, postgraduates and students working in the field of digital signal processing as applied to modern problems of radiophysics and radio engineering.

© 2019, Kravchenko V.F., Churikov D.V.

© 2019, TECHNOSPHERA JSC, design. All Rights Reserved

Содержание

Введение	11
Список используемых сокращений	15
Глава 1.	
Атомарные функции в задачах фильтрации и цифровой обработки сигналов	16
1.1. Основные системы атомарных функций и физические характеристики	16
1.1.1. Семейство атомарных функций $\text{fir}_N(x)$	16
1.1.2. Семейство атомарных функций $h_a(x)$	17
1.1.3. Физические характеристики	19
1.2. Конструкции весовых функций и улучшение их физических характеристик	21
1.2.1. Весовые функции Кравченко — Кайзера	21
1.2.2. Весовые функции Кравченко — Наттолла	22
1.3. Конструкции фильтров с конечной импульсной характеристикой на основе атомарных функций	24
1.3.1. Фильтры с линейной фазовой характеристикой	24
1.3.2. Типы КИХ-фильтров с линейной фазовой характеристикой	25
1.3.3. Разработка КИХ-фильтров	25
1.3.4. Построение фильтра с конечной импульсной характеристикой	26
1.4. Обобщенные ряды отсчетов	30
1.4.1. Обобщенные ряды отсчетов на основе атомарных функций	31
1.4.2. Физический смысл обобщенного ряда отсчетов	32
1.4.3. Весовая функция Кравченко — Котельникова	35
1.4.4. Обобщенная теорема отсчетов для случайных сигналов	39
1.4.5. Анализ частных случаев обобщенных рядов отсчетов	40
1.4.6. Учет погрешностей обобщенной теоремы отсчетов	45
1.4.7. Ядро ряда отсчетов Кравченко — Левитана	47
1.5. Непараметрическое оценивание функции плотности вероятности последовательности случайных величин	49
1.5.1. Допустимые оценки функции плотности вероятности и ее производных	51
1.5.2. Численный эксперимент	53
Выводы	56
Глава 2.	
Применение WA-систем функций в задачах радиофизики	57
2.1. Построение ортогональных WA-систем функций	57
2.1.1. Ортогональные WA-системы функций $\{\widetilde{\text{up}}(t)\}$	57
2.1.2. Алгоритм Кравченко построения ортогональных WA-систем функций	64
2.1.3. Построение ортогональных WA-систем функций на основе атомарных функций $h_a(x)$	65
2.2. Ортогональные WA-системы функций в цифровой обработке сигналов и изображений	67

2.2.1. Удаление шума и компрессия одномерных сигналов	67
2.2.2. Удаление шума и компрессия изображений	69
2.3. Аналитические WA-системы функций	74
2.3.1. Построение комплексных WA-систем функций	74
2.3.2. Функционал качества выбора вейвлетного базиса	77
2.3.3. Анализ временных рядов комплексными WA-системами функций	77
Выводы	83
Глава 3.	
Синтез многомерных цифровых фильтров	84
3.1. Теория R-функций и обратная задача аналитической геометрии	84
3.2. Синтез двумерных цифровых фильтров с нестандартной геометрией опорной области	89
3.2.1. Двумерные цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой	89
3.2.2. Локусы сложной формы и опорные области двумерных цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой	91
3.2.3. Построение двумерного фильтра с конечной импульсной характеристикой	91
3.2.4. Численная реализация алгоритма и анализ физических результатов	93
3.3. Аналитические двумерные WA-системы функций и их физические свойства	105
3.3.1. Построение двумерных WA-систем функций	105
3.3.2. Физические свойства аналитических двумерных WA-систем функций	109
Выводы	112
Глава 4.	
Обработка радиолокационных сигналов и синтезирование апертуры антенны атомарными функциями	113
4.1. Обработка сигналов в радиоприемном устройстве	113
4.2. Цифровая обработка сигналов в антеннах с синтезированной апертурой при боковом обзоре	118
4.2.1. Геометрия синтезирования апертуры	118
4.2.2. Формула дальности	119
4.2.3. Сигналы в системах синтезирования апертуры	120
4.2.4. Двухэтапная цифровая обработка сигналов РСА	122
4.3. Применение функций Кравченко — Кайзера к задачам весового усреднения разностной частоты	123
4.4. Обобщение функции неопределенности по времени и частоте на основе семейства атомарных функций применительно к цифровой обработке сигналов в антенных системах	125
4.5. Атомарные и WA-системы функций в корреляционной обработке радиолокационных сигналов	135

4.5.1. Фильтрация корреляционной функции с помощью атомарных и WA-систем функций.....	141
Выводы.....	149
Глава 5.	
Комбинированный алгоритм описания сложных контурных объектов и фильтрации изображений в условиях помехи высокой интенсивности.....	150
Введение.....	150
5.1. Выделение контуров объектов из изображений.....	152
5.2. Линейная фильтрация изображений в задаче выделения контуров.....	155
5.3. Подчеркивание границ объектов на изображении.....	155
5.4. Выделение границ при обработке изображений. Согласованно- избирательный фильтр.....	156
5.5. Контурные как дискретные сигналы. Уравнение чертежа.....	161
5.5.1. Кодирование контурных бинарных изображений.....	161
5.5.2. Классификация контурных сигналов.....	164
5.5.3. Элементарные контуры.....	164
5.5.4. Сложный геометрический объект и его аналитическое описание.....	164
5.6. Численный эксперимент.....	166
Выводы.....	169
Заключение.....	170
Список литературы.....	171
Информация об авторах.....	179

Contents

Introduction	11
The list of acronyms	15
Chapter 1.	
Atomic functions in the filtering and digital signal processing problems	16
1.1. The main systems of atomic functions and their physical characteristics	16
1.1.1. The family of atomic functions $\text{fup}_N(x)$	16
1.1.2. The family of atomic functions $h_a(x)$	17
1.1.3. Physical characteristics	19
1.2. Construction of weight functions and the improvement of their physical characteristics	21
1.2.1. Kravchenko — Kaiser weight functions	21
1.2.2. Kravchenko — Nuttall weight functions	22
1.3. Design of FIR filters based on atomic functions	24
1.3.1. Filters with linear phase characteristics	24
1.3.2. Types of FIR-filters with linear phase characteristics	25
1.3.3. The development of FIR-filters	25
1.3.4. Construction of filter with finite impulse response	26
1.4. Generalized sampling series	30
1.4.1. Generalized sampling series based on atomic functions	31
1.4.2. The physical meaning of the generalized sampling series	32
1.4.3. Kravchenko — Kotelnikov weight function	35
1.4.4. The generalized Kravchenko — Kotelnikov sampling theorem for random signals	39
1.4.5. Analysis of particular cases of the generalized sampling series	40
1.4.6. The accounting errors of the generalized sampling theorem	45
1.4.7. The Kravchenko — Levitan core of the sampling series	47
1.5. Nonparametric estimation of probability density function of a sequence of random variables	49
1.5.1. Admissible valuation of the probability density function and its derivatives	51
1.5.2. Numerical experiment	53
Conclusions	56
Chapter 2.	
The application of WA-systems of functions in problems of physics	57
2.1. The construction of orthogonal WA-systems of functions	57
2.1.1. Orthogonal WA-systems of functions $\{\widetilde{\text{up}}(t)\}$	57
2.1.2. The Kravchenko algorithm for constructing orthogonal WA-systems of functions	64
2.1.3. The construction of orthogonal WA-systems of functions on the basis of atomic functions $h_a(x)$	65
2.2. Orthogonal WA-systems of functions in digital processing of signals and images	67
2.2.1. Noise removal and compression one-dimensional signals	67

2.2.2. Noise removal and image compression	69
2.3. Analytical WA-systems of functions	74
2.3.1. Construction of complex WA-systems of functions	74
2.3.2. The functionality of the quality of the selection wavelet basis for signal analysis	77
2.3.3. Time series analysis of complex WA-systems of functions	77
Conclusions	83

Chapter 3.

Synthesis of multidimensional digital filters	84
3.1. The theory of R-functions and inverse problem analytic geometry	84
3.2. Synthesis of two-dimensional digital filters with custom geometry reference area	89
3.2.1. Two-dimensional digital filters with finite impulse response	89
3.2.2. The loci of complex shape and the reference region two-dimensional digital filters with finite impulse response	91
3.2.3. The construction of a two-dimensional filter with infinite impulse response	91
3.2.4. Numerical implementation of the algorithm and analysis physical results	93
3.3. Two-dimensional analytical WA-systems of functions and their physical properties	105
3.3.1. Constructing an analytical two-dimensional WA-systems of functions	105
3.3.2. Physical properties analytical two-dimensional WA-systems of functions	109
Conclusions	112

Chapter 4.

Processing of radar signals and synthetic aperture antenna atomic functions	113
4.1. Signal processing in the receiver	113
4.2. Digital signal processing in antennas synthetic aperture side overview	118
4.2.1. Geometry of synthetic aperture	118
4.2.2. The range equation	119
4.2.3. The signals in the system of synthetic aperture	120
4.2.4. A two-stage digital signal processing RSA	122
4.3. Application functions Kravchenko — Kaiser to problems of weight averaging of the difference frequency	123
4.4. A generalization of the ambiguity function of time and frequency based on the family of atomic functions in the digital signal processing in antenna systems	125
4.5. Atomic and WA-systems of functions in the correlation processing of radar signals	135
4.5.1. Filtering of the correlation function with atomic and WA-systems of functions	141
Insights	149

Chapter 5.**The combined algorithm description for complex contour object and filter images in conditions of disturbance, high intensity**

	150
Introduction	150
5.1. Contours extraction of objects from images	152
5.2. Linear filtering of images in the problem of the peaking	155
5.3. Underline the boundaries of objects in the image	155
5.4. Edge detection in image processing. Consistently selective filter	156
5.5. Contours as discrete signals. The equation of drawing	161
5.5.1. The contour coding of binary images	161
5.5.2. Classification of contour signals	164
5.5.3. Elementary circuits	164
5.5.4. Complex geometric object and its analytical description	164
5.6. Numerical experiment	166
Conclusions	169
Conclusions	170
Bibliography	171
Information about the authors	179