

Определение характеристик спектра усиления Мандельштама – Бриллюэна с помощью двухчастотного зондирующего излучения

О.Г. Морозов¹, Г.А. Морозов¹, А.А. Талипов¹, В.Г. Куприянов²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
420111, Россия, г. Казань
ул. К. Маркса, 10

² Государственный научно-исследовательский институт приборостроения
129226, Россия, г. Москва
пр-т Мира, 125

В работе представлен новый метод определения характеристик спектра усиления, вызванного эффектом вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ), в одномодовом оптическом волокне. Метод основан на использовании двухчастотного зондирующего излучения. Для преобразования комплексного спектра ВРМБ из оптической области в электрическую применяется однополосная модуляция. Нахождение характеризующего положения составляющих двухчастотного излучения в контуре усиления осуществляется через коэффициент амплитудной модуляции их огибающей и разность фаз между огибающими зондирующих и прошедших через контур составляющих.

Ключевые слова: вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна, двухчастотное зондирующее излучение, однополосная модуляция.

Введение

Точное определение характеристик спектра усиления, вызванного эффектом ВРМБ в одномодовом оптическом волокне, необходимо в ряде применений. К ним относятся: оценка искажений, вносимых ВРМБ в информацию, передаваемую по волоконно-оптическим линиям связи [1], обработка и преобразование оптических несущих и микроволновых поднесущих в сетях связи типа «радио-по-волокну» [2], измерительное преобразование температуры и деформации в фоновой СВЧ-спектроскопии оптического волокна [3; 4]. Для кварцевых волокон сдвиг частоты Мандельштама – Бриллюэна составляет порядка 10–20 ГГц, а усиление Мандельштама – Бриллюэна наблюдается в полосе пропускания 20–100 МГц. Основными определяемыми параметрами является центральная частота контура усиления, его добротность и коэффициент усиления.

Классический метод определения спектра усиления Мандельштама – Бриллюэна (СУМБ) основан на использовании двух лазеров: одного – для накачки ВРМБ, а другого – для зондирования сформированного спектра уси-

ния [5]. Недостаток этого метода состоит в необходимости строгого контроля разницы частот двух источников. Решение этой проблемы дает усовершенствованный метод, где оптический модулятор формирует двухчастотный сигнал, представляющий собой боковые полосы лазера накачки, которые потом используются для зондирования [6]. В свою очередь недостатком данного метода следует считать необходимость учета вкладываемых в контур усиления мощностей и механизмов перекачки энергии между составляющими накачки и зондирования, отсутствие которых может привести к насыщению контура и появлению существенных погрешностей в определении характеристик СУМБ.

Определенный прогресс в системах определения СУМБ был достигнут при формировании сканирующего двухполосного амплитудномодулированного зондирующего излучения из излучения накачки [7]. Однако данный метод характеризуется невысокой чувствительностью, обусловленной необходимостью приема и обработки сигналов в широкой полосе частот (10–20 ГГц), а также существенным влиянием на погрешность измерения наличия верхней боковой полосы частот.

Решение данной проблемы также было получено с помощью применения двухчастотного излучения, сформированного в отличие от [6] для излучения накачки [8]. Одна частота соответствовала частоте накачки, а вторая ее стоксовой компоненте, при этом контуру усиления Мандельштама – Бриллюэна соответствовал сдвинутый по частоте контур поглощения, который использовался для подавления верхней боковой полосы частот. Однако, как показала практика, данная система отличается высокой сложностью и необходимостью четкого контроля положения стоксовой компоненты и компоненты накачки, а также контура поглощения, особенно при сканировании зондирующего сигнала в пределах 20–100 МГц.

Не так давно была представлена система измерения, которая свободна от этого ограничения [9]. Она основана на преобразовании СУМБ из оптической области в электрическую с помощью однополосного амплитудномодулированного излучения, в котором верхняя боковая полоса подавлена. Несмотря на преимущества, реализация этого метода не всегда эффективна, в силу оставшейся характерной невысокой чувствительности измерений, по природе сходной с измерениями двухполосным амплитудномодулированным зондирующим излучением в широкой полосе частот.

В данной статье рассматривается новый способ определения спектра усиления, вызванного эффектом ВРМБ в одномодовом оптическом волокне. Метод основан на использовании преимуществ однополосной модуляции и двухчастотного зондирующего излучения, которое характеризуется возможностью переноса спектра информационного сигнала в область минимальных шумов фотоприемника, а также эффективным процессом обработки получаемой спектральной информации по характеристикам огибающей биений двух спектральных компонент.

1. Вынужденное рассеяние и усиление Мандельштама – Бриллюэна

ВРМБ является результатом рассеяния света акустическими волнами. Возбужденные тепловыми полями акустические волны (акустические фононы) осуществляют периодическую модуляцию показателя преломления волокна [10]. В результате брэгговской дифракции индуцированная решетка показателя преломления рассеивает излучение накачки. Соответственно происхо-

дит появление смещенных по частоте стоксовой и антистоксовой составляющих. Этот процесс может быть вынужденным, когда интерференция лазерного излучения и стоксовой волны усиливает акустическую волну через механизм электрострикции. Так как рассеянный свет подвержен доплеровскому эффекту, сдвиг частоты ν_B , обусловленный ВРМБ, зависит от звуковой скорости и определяется выражением

$$\nu_{MB} = \frac{2nV_A}{\lambda_P}, \quad (1)$$

где V_A – звуковая скорость внутри волокна; n – показатель преломления; λ_P – длина волны накачки.

Сильное затухание звуковых волн в кварце определяет форму СУМБ. Рост интенсивности стоксовой волны характеризуется коэффициентом усиления $g_{MB}(\nu)$, максимальным при $\nu = \nu_{MB}$. Экспоненциальное затухание акустических волн приводит к тому, что спектр усиления $g_{MB}(\nu)$ будет иметь форму Лоренца

$$g_{MB}(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\nu_{MB}/2)^2}{(\nu - \nu_{MB})^2 + (\Delta\nu_{MB}/2)^2}, \quad (2)$$

где $\Delta\nu_{MB}$ – ширина спектра на полувысоте.

Максимальный коэффициент усиления определяется выражением

$$g_{MB}(\nu_{MB}) = g_0 = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c\lambda_P^2 \rho_0 V_A \Delta\nu_{MB}}, \quad (3)$$

где p_{12} – продольный акустооптический коэффициент; ρ_0 – плотность материала; c – скорость света в вакууме.

2. Двухчастотное зондирование контура усиления Мандельштама – Бриллюэна

Оптическая однополосная амплитудная модуляция со сканированием частоты боковой составляющей применяется для обеспечения точного преобразования комплексных спектров СУМБ из оптической области в электрическую область, включая информация о сдвиге частоты и добротности контура усиления при ВРМБ. Предложенный нами метод измерения основан на зондировании СУМБ не одночастотным, а двухчастотным излучением. Экспериментальная установка для проведения измерений показана на рис. 1.

Оптический сигнал от лазерного диода с длиной волны 1550 нм с шириной полосы около 100 кГц разделяется по двум каналам устройс-

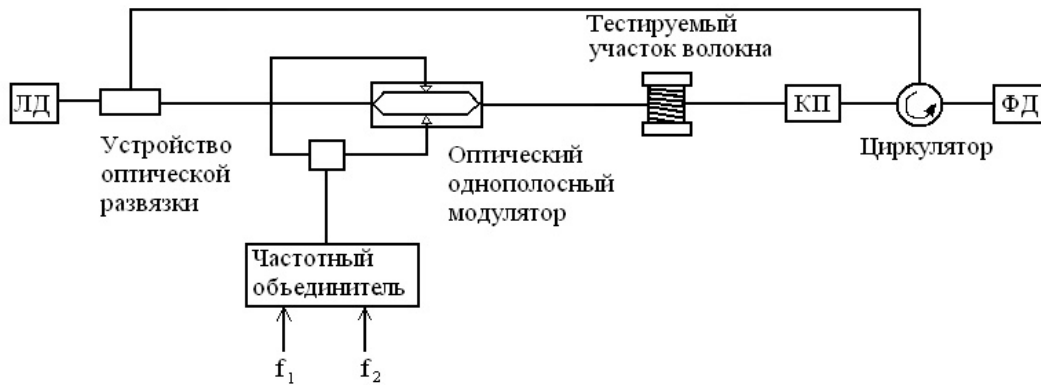


Рис. 1. Экспериментальная установка: ЛД – лазерный диод; КП – контроллер поляризации; ФД – фотодетектор

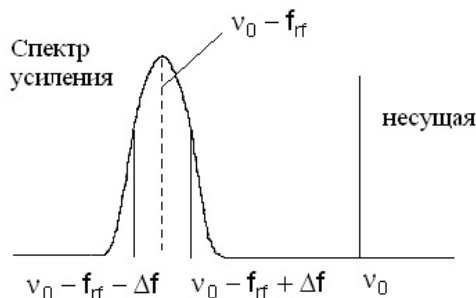


Рис. 2. Зондирование спектра усиления двухчастотным сигналом

твом оптической развязки. В первом канале сигнал модулируется в оптическом однополосном модуляторе, на один из входов которого подан сигнал от частотного объединителя. Оптический однополосный модулятор выполнен на основе двухканального модулятора Маха – Цендера. Далее модулированный сигнал подается на тестируемый участок волокна (ТУВ), в котором встречно распространяется оптическое излучение, прошедшее по второму каналу. Немодулированное излучение является излучением накачки ВРМБ в ТУВ.

Таким образом, однополосное двухчастотное излучение с составляющими $f_1 = f_{rf} - \Delta f$ и $f_2 = f_{rf} + \Delta f$ зондирует СУМБ, при этом частота $\nu_0 - f_{rf}$ при настройке на центр контура усиления соответствует его центральной частоте ν_{MB} , расстройка Δf – половине его полуширины $\Delta \nu_{MB}$, а частота несущей ν_0 – частоте накачки $\nu_P = c/\lambda_P$. Двухчастотное излучение, прошедшее через ТУВ принимается фотодетектором.

Процесс зондирования схематично показан на рис. 2.

Излучение на выходе оптического однополосного модулятора определяется выражением:

$$E_{in}(t) = A_0 \exp(j2\pi\nu_0 t) + A_{-1} \exp[j2\pi(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)t] + A_{-2} \exp[j2\pi(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)t], \quad (4)$$

где $A_0 = |A_0| \exp(j\varphi_0)$, $A_{-1} = |A_{-1}| \exp(j\varphi_{-1})$, $A_{-2} = |A_{-2}| \exp(j\varphi_{-2})$ – комплексные амплитуды оптической несущей и двухчастотного сигнала. Этот оптический сигнал распространяется через ТУВ, который имеет передаточную функцию, характеризующую спектр усиления $H(\nu)$; следовательно, оптическая область на выходе волокна будет определяться выражением

$$E_{out}(t) = A_0 |H(\nu_0)| \exp[j \arg H(\nu_0)] \times \exp(j2\pi\nu_0 t) + A_{-1} |H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)| \times \exp[j \arg H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)] \times \exp[j 2\pi (\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)t] + A_{-2} |H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)| \times \exp[j \arg H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)] \times \exp[j 2\pi (\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)t]. \quad (5)$$

Выходной ток на частоте биений между двумя зондирующими составляющими $2\Delta f$ пропорционален

$$|i_{out}(t)| \propto |A_{-1}| |A_{-2}| |H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)| \times |H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)| \cos[4\pi\Delta f t + \varphi_{-1} - \varphi_{-2} + \arg H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f) - \arg H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)]. \quad (6)$$

Анализ (5) показывает, что из электрического выходного сигнала детектора можно получить образ оптической передаточной функции на частотах двух зондирующих сигналов. Оптическая передаточная функция ТУВ эквивалентна последовательному соединению линейной передаточной функции волокна и СУМБ.

3. Определение основных параметров контура усиления Мандельштама – Бриллюэна

Как указывалось выше, основными определяемыми параметрами СУМБ являются центральная частота контура усиления, его добротность и коэффициент усиления.

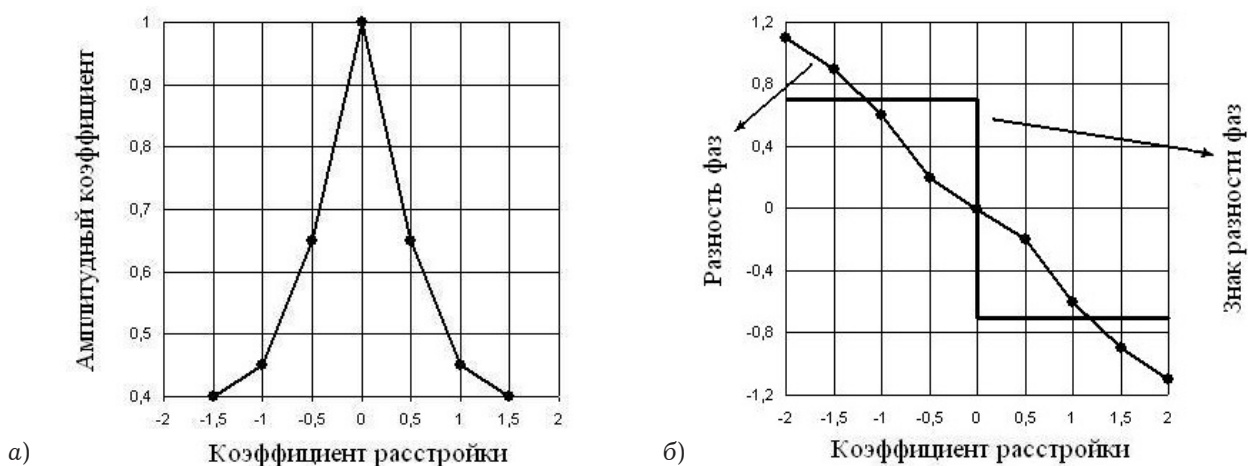


Рис. 3. Амплитуда (а), разность фаз и знак разности фаз (б) огибающих на входе и выходе ТУВ как функция расстройки от центральной частоты СУМБ

Анализ (5) по огибающей $2\Delta f$ позволил построить измерительные характеристики для определения центральной частоты контура усиления по ее амплитуде (рис. 3, а), а также разности фаз или знаку разности фаз (рис. 3, б) между огибающими на входе и выходе ТУВ, аналогично [11].

Характерно, что в момент достижения средней частоты двухчастотного сигнала $\nu_0 - f_{rf}$ резонансной частоты контура усиления ν_B , огибающая выходного сигнала по фазе совпадает с огибающей двухчастотного сигнала на входе ТУВ (рис. 3, б), а коэффициент модуляции огибающей выходного двухчастотного сигнала максимален и равен 1 (рис. 3, а). При этом относительная погрешность измерения центральной частоты может составить 0,1 % и определяется шириной линии лазерного излучения (в нашем случае 0,1 МГц), а также точностью поддержания разностной частоты $2\Delta f$. Определенную долю погрешности может вносить наличие в спектре не полностью подавленной верхней боковой полосы двухчастотного излучения. Среди методов ее уменьшения может быть рассмотрено применение чирпированной волоконной решетки Брэгга, настроенной на ее подавление в полосе возможного изменения положения при сканировании. Такое решение представляется нам более эффективным, чем предложенное в [8], как по эффективности подавления, так и по возможности контроля искажений, вызванных хроматической дисперсией.

Определив $\nu_0 - f_{rf} = \nu_{MB}$, можно перейти к определению добротности Q контура усиления Мандельштама – Бриллюэна. Для этого нами предложена разновидность метода вариации частоты, который основан на зависимости

$$Q_{1,2} = \frac{\nu_0 - f_{rf}}{f_1 - f_2} \sqrt{\frac{i_{out}(\nu_0 - f_{rf})}{i_{out1,2}} - 1}, \quad (7)$$

где $i_{out}(\nu_0 - f_{rf})$ и $i_{out1,2}$ – амплитуды на средней частоте и на составляющих двухчастотного сигнала на выходе фотодетектора при настройке средней частоты зондирующих составляющих на частотах $f_1 = f_{rf} - \Delta f$ и $f_2 = f_{rf} + \Delta f$ на центр контура усиления. Если значение $i_{out1,2}$ можно определить по выходному сигналу фотодетектора, то значение $i_{out}(\nu_0 - f_{rf})$ остается неизвестным.

Изменим значение Δf на определенную величину $\Delta f'$, не меняя настройки на центр контура усиления, и получим новые значения частот $f_3 = f_{rf} - \Delta f - \Delta f'$ и $f_4 = f_{rf} + \Delta f + \Delta f'$. Для частот f_3 и f_4 можно переписать (7) в виде

$$Q_{3,4} = \frac{\nu_0 - f_{rf}}{f_3 - f_4} \sqrt{\frac{i_{\nu_0 - f_{rf}}}{i_{3,4}} - 1}. \quad (8)$$

Поскольку $Q_{1,2} = Q_{3,4}$ из совместного решения уравнений (7) и (8) получим значение $i_{out}(\nu_0 - f_{rf})$, а затем, подставив полученное значение в одно из указанных уравнений добротность Q контура усиления Мандельштама – Бриллюэна и соответствующую ей полуширину СУМБ $\Delta\nu_{MB}$.

Преимущество предложенного метода заключается в том, что в процессе измерений на информационный сигнал воздействуют шумы не всей полосы частот от СУМБ до несущей (10–20 ГГц), а лишь шумы полосы частот самого спектра усиления (20–100 МГц). Следовательно, отношение сигнал/шум измерений в данном случае в $10^2 - 10^3$ раз выше аналогичного отношения в ранее предложенных методах.

Подставив (1) в (3), получим выражение для определения максимального коэффициента усиления Мандельштама – Бриллюэна

$$g_{MB}(\nu_{MB}) = g_0 = \frac{4\pi n^8 p_{12}^2 \nu_P^3}{c^4 \rho_0 \nu_{MB} \Delta \nu_{MB}} \quad (9)$$

в зависимости от известных и определенных нами по вышеуказанным процедурам частотных параметров ν_P , ν_{MB} и $\Delta \nu_{MB}$.

Разработанный метод был проверен в лаборатории НОЦ «Волоконно-оптические технологии» КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева на катушке оптического волокна Corning SMF-28 длиной 6 км. При мощности накачки 5 мВт, мощности боковых составляющих 9 нВт определен частотный сдвиг ВРМБ в 10,5 ГГц и коэффициент усиления 20 дБ, полуширина контура составила 36 МГц. Однополосный модулятор был реализован на базе модулятора Маха-Цендера, предоставленного для эксперимента НППК (г. Пермь).

Заключение

Продemonстрирован новый метод определения спектра усиления, вызванного эффектом ВРМБ в одномодовом оптическом волокне, основанный на использовании преимуществ методов сканирующей однополосной модуляции и двухчастотного зондирования. Метод характеризуется высокой разрешающей способностью, повышенным практически на два порядка отношением сигнал/шум измерений, простотой предложенных алгоритмов определения центральной частоты, добротности контура и коэффициента максимального усиления Мандельштама – Бриллюэна. Кроме того, процедура измерений реализуется на простой и стабильной экспериментальной установке. Среди методов уменьшения погрешностей измерения, обусловленных наличием не полностью подавленной верхней боковой полосы двухчастотного излучения, может быть рассмотрена возможность применения в структуре измерительной системы chirпированной волоконной решетки Брэгга, настроенной на ее подавление во всех положениях, возможных при сканировании.

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре телевидения и мультимедийных систем и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Симметрия»).

Список литературы

1. Mao X.P., Tkach R.W., Chraplyvy A.R. Stimulated Brillouin threshold dependence on fiber type and uniformity // IEEE Photon. Technol. Lett. 1992. Vol. 4. № 1. P. 66–69.
2. Loayssa A., Benito D., Garde M.J. Optical carrier Brillouin processing of microwave photonic signals // Opt. Lett. 2000. Vol. 25. № 17. P. 1234.
3. All frequency domain distributed fiber optic Brillouin sensing / R. Bernini [et al.] // IEEE Sensors Journal. 2003. Vol. 3. № 1. P. 36–43.
4. Oh I., Yegnanarayanan S., Jalali B. High-resolution microwave phonon spectroscopy of dispersion shifted fiber // IEEE Photon. Technol. Lett. 2002. Vol. 14. № 3. P. 358–360.
5. Identification of longitudinal acoustic modes guided in the core region of a single-mode optical fiber by Brillouin gain spectra measurements / N. Shibata [et al.] // Opt. Lett. 1988. Vol. 13. № 7. P. 595–597.
6. Nikles M., Thevenaz L., Robert P.A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers // J. Lightwave Technol. 1997. Vol. 15. № 10. P. 1842–1851.
7. Loayssa A., Benito D., Garde M.J. Narrow-bandwidth technique for stimulated Brillouin scattering spectral characterization // Electron. Lett. 2001. Vol. 37. № 6. P. 367–368.
8. Sagues M., Loayssa A. Swept optical single sideband modulation for spectral measurement applications using stimulated Brillouin scattering // Optics Express. 2010. Vol. 18. № 16. P. 17555–17568.
9. Characterization of stimulated Brillouin scattering spectra by use of optical single-sideband modulation / A. Loayssa [et al.] // Optics Letters. 2004. Vol. 29. № 6. P. 638–640.
10. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. Boston: Academic Press, 1989. 342 p.
11. Морозов О.Г., Степущенко О.А., Садыков И.Р. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом // Вестник МарГТУ. 2010. № 3. С. 3–13.

Characterization of stimulated Mandelstam – Brillouin scattering spectrum using a double-frequency probing radiation

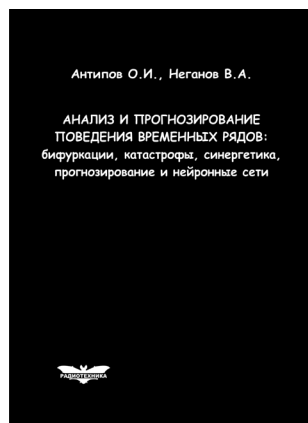
O.G. Morozov, G.A. Morozov, A.A. Talipov, V.G. Kupriyanov

This paper presents a novel method for characterization of gain spectrum of stimulated Brillouin scattering (SBS) in single-mode optical fiber. This method is based on the usage of double-frequency probing emission. For conversion of the complex SBS spectra from optical to the electrical domain single-sideband modulation is used. Detection of double-frequency components position in the gain spectrum occurs through the amplitude modulation index of the curve and the phase difference between curves of probing and passing components.

Keywords: stimulated Brillouin scattering (SBS), double-frequency probing emission, single-sideband modulation.

Антипов, О.И.

Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети / О.И. Антипов, В.А. Неганов. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с. ISBN 978-5-88070-294-7



УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Монография посвящена объединению нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям-кризисам, которые отождествляются с катастрофами в синергетике – науке о самоорганизации в сложных системах, где велика роль коллективных, кооперативных эффектов, возникновения порядка – фрактальных структур в турбулентности (или хаосе). В синергетике общим является принцип подчинения, который позволяет исключать большое число переменных в сложных системах и описывать в них сложные процессы. Использование в роли одной из основных количественных характеристик катастроффрактального показателя Херста связывает фракталы с бифуркациями. Объединение этих четырех направлений позволяет упростить проектирование прогнозирующих нейронных сетей, которое в настоящее время отчасти является искусством.

Даны авторские модификации некоторых известных фрактальных методов, позволяющие проводить более глубокий анализ хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны являться необходимой частью полного алгоритма построения прогностических моделей, описанного в книге. В частности, описан авторский алгоритм определения временного лага, необходимого для реконструкции аттрактора динамической системы и модификация метода ближайших ложных соседей, которую можно использовать в качестве индикатора приближающейся катастрофы.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных задач анализа, моделирования и прогнозирования хаотических процессов в нелинейных системах из различных отраслей науки и техники.