

ВВЕДЕНИЕ

Функционирование оптико-электронных, радиолокационных и гидроакустических систем обнаружения объектов связано с необходимостью анализа быстропротекающих процессов, отличительной особенностью которых является негауссовский характер их распределений и нестационарность на временном интервале принятия решения. Специфика корреляционно-экстремальных систем наведения летательных аппаратов состоит также в необходимости учета вклада фонов или подстилающих поверхностей в отраженный сигнал. Попытка описания энергетических спектров соответствующих случайных полей в рамках традиционной модели авторегрессии — скользящего среднего приводит к неадекватному описанию изображений фонов по сравнению с экспериментальными данными. Существенной особенностью анализа автономных локационных систем ближнего действия является малый объем экспериментальных данных. В этой ситуации классические непараметрические оценки статистик полей становятся малоэффективными.

Учет перечисленных выше ограничений при построении теории цифровой обработки полей целей и сигналов в автономных информационных системах дистанционного зондирования ставит в разряд наиболее сложных проблему создания логически связанной последовательности теоретических и вычислительных методов для адекватного описания процессов рассеяния зондирующего излучения объектами локации. Решение этой проблемы требует применения инструментария безусловно современной, как правило, нестандартной научной методологии.

Адекватное статистическое описание реальных нестационарных негауссовых сигналов и помех локационных систем требует применения моделей вероятностных смесей стандартных распределений, называемых также рандомизированными моделями. Идентифика-

ция параметров такого рода моделей требует, в свою очередь, применения методологии теории адаптации и обучения и такого ее мощного метода построения параметрических моделей многомерных негауссовых распределений, как семейство EM-алгоритмов.

Совершенствование семейства EM-алгоритмов в направлении устранения их недостатков позволяет получать эффективные решения таких важных задач теории цифровой обработки сигналов и их математического моделирования, как синтез новых правил обнаружения и классификации объектов, а также создавать статистические модели реального времени для входных воздействий.

Специфика функционирования систем дистанционного зондирования связана с необходимостью обнаружения цели на фоне подстилающей поверхности. Огромное количество работ посвящено проблеме статистического моделирования фонов и подстилающих поверхностей с заданными корреляционно-спектральными свойствами. Однако до сих пор не получили окончательного решения задачи цифрового синтеза многомерных случайных полей на основе построения эффективных статистических моделей и алгоритмов, свободных от априорных упрощающих допущений относительно функционального вида энергетического спектра, способа дискретизации поля, его типа и большого объема экспериментальных данных. Решение этой важной проблемы, основанное на применении рандомизированных спектральных моделей, представлено в учебном пособии.

В гл. 1 и 2 пособия получил дальнейшее развитие спектральный метод параметрического моделирования случайных полей, представленный в работах А.С. Шалыгина и Ю.И. Палагина. Размерность данных, с которыми приходится иметь дело, нередко больше двух, а их записи настолько короткие, что стандартное дискретное преобразование Фурье не обеспечивает разумного баланса между дисперсией спектральной оценки и ее частотным разрешением. В пособии представлена процедура синтеза многомерных цифровых фильтров прямого и обратного линейного прогноза, функционирующих в двух различных режимах — расширения измеренных данных и их спектрального оценивания. Результаты работы процедуры являются надежной информационной основой для построения модельных полей и оценки их адекватности экспериментальным данным.

Параметрическая модель N -мерного гауссовского поля с нулевым средним, единичной дисперсией и спектральной плотностью мощности $S_N(\vec{U})$ представлена суммой статистически независимых пространственных гармоник со случайными амплитудами и пространственными частотами. Предложены методики статистического моделирования выборочного спектра $\hat{S}_N(\vec{U})$ и сглаженной периодограммы. Результатом их работы является выборка случайных частот из генеральной совокупности $\hat{S}_N(\vec{U})$ и процедура цифрового синтеза изображений поля, свободная от ограничений размерности, функционального вида спектра, способа дискретизации данных и в значительной степени от их объема.

В гл. 3—6 пособия представлен метод рандомизации многомерных спектральных плотностей, основой которого является семейство ЭМ-алгоритмов. В рамках параметрической модели спектр $\hat{S}_N(\vec{U})$ аппроксимируется конечной смесью из набора типовых спектральных плотностей $\hat{S}_{N,k}(\vec{U}|\bar{\theta}_k)$, заданных с точностью до конечного набора своих параметров $\bar{\theta} = (p_1, \dots, p_K, \bar{a}_1, \dots, \bar{a}_K, B_1, \dots, B_K)$. Каждая спектральная составляющая представлена, в свою очередь, двухкомпонентной смесью $\hat{S}_{N,k}(\vec{U}|\bar{\theta}_k) = \{\hat{S}_{N,k}(\vec{U}|\bar{\theta}_k^+) + \hat{S}_{N,k}(\vec{U}|\bar{\theta}_k^-)\} / 2$ стандартных спектров, совпадающих между собой с точностью до векторов средних спектральных классов $\pm \bar{a}_k$, где параметры $\bar{\theta}_k^+ = (+\bar{a}_k, B_k)$ и $\bar{\theta}_k^- = (-\bar{a}_k, B_k)$ характеризуют положение и масштаб парциальных спектров. Такого рода погружение удобно для описания спектральных свойств анизотропных изображений и их последующего цифрового синтеза, а также позволяет применять эффективный метод рандомизации многомерных распределений.

В качестве целей обучения анализируются функционалы правдоподобия Фишера, расстояния Бхатачария и дивергенции Кульбака. Экстремумы последних обеспечивают оптимальное значение вектора параметров смеси стандартных спектральных плотностей. Аналитическое решение задачи условной оптимизации получено в виде модифицированной системы нелинейных нормальных уравнений. Ее итерационное решение реализует SWM-алгоритм рандомизации исходного энергетического спектра. Этот алгоритм по-

зволил рассмотреть обширный класс описаний энергетических спектров в метрике Махаланобиса и идентифицировать параметры соответствующих спектральных моделей.

Применение на S-шаге алгоритма коррелирующего-декоррелирующего преобразований позволяет алгоритму работать с вырожденными парциальными спектральными распределениями и дает возможность снизить вычислительные затраты при оценке матрицы расстояний Махаланобиса. Важно отметить, что S-шаг алгоритма предоставляет выборку случайных частот для дальнейшего статистического моделирования поля. Реализация взвешенных (в смысле Л.Д. Мешалкина) оценок параметров парциальных распределений и сглаживающих (по выборке) операторов позволяет алгоритму эффективно работать с малыми межклассовыми расстояниями. Оценивание оптимального (в смысле выбранного функционала качества обучения) вектора параметров смеси стандартных спектров реализует M-шаг алгоритма.

Методами цифрового моделирования исследованы свойства сходимости алгоритма для различных функционалов качества обучения. Предложена комбинированная цель обучения, обеспечивающая разумный компромисс между скоростью сходимости алгоритма и значениями дисперсий оценок параметров конечной смеси стандартных спектров.

С помощью пары интегральных преобразований Ганкеля разработаны удобные для цифрового моделирования параметрические модели радиального спектра изотропного поля и его ковариационной функции. Спектральная плотность мощности представлена смесью обобщенных распределений модуля N -мерного вектора, а ковариационная функция соответствующим отрезком ряда Фурье — Бесселя.

В гл. 6 пособия представлена методика моделирования негауссовского поля с помощью нелинейного безынерционного преобразования гауссовского поля. Основная проблема такого рода алгоритма связана с получением явной зависимости ковариационных функций формирующего и целевого полей. Эта задача решена методом кумулянтных уравнений А.Н. Малахова.