

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Введение

К широкому кругу задач информационной безопасности, сохранения коммерческой тайны относится задача защиты от несанкционированной видео- и фотосъемки. Это реализуется при помощи лазерных оптоэлектронных систем (ЛОС), позволяющих определить местоположение скрытых оптических приборов наблюдения (ОПН) – биноклей, видео- и фотокамер.

Принцип действия таких ЛОС основан на процессе сканирования пространства лазерным лучом и определении местоположения отражающей поверхности, которой служит линза объектива. Более сложные ЛОС позволяют не только определить координаты скрытых ОПН, но и идентифицировать и классифицировать. Если физика процесса определения координат ОПН подробно описана в литературе по оптической локации [1], то вопрос идентификации и классификации, как правило, представляет коммерческую тайну производителя.

Классификация ОПН относится к задачам распознавания образов. Классическая задача распознавания образов включает в себя три этапа: получение информации об объекте; выделение и анализ характерных естественных или искусственных признаков (простейших характеристик или свойств); идентификация и классификация объекта по результатам анализа выделенным признакам. Наиболее популярные методы: Фурье-анализ и корреляционный анализ, контурный анализ, фрактальный анализ, вейвлет-анализ, метод перебора и другие [2].

Упомянутый фрактальный анализ относится к топологическим методам, применяемым для анализа временных рядов процессов и изображений, в том числе для классификации объектов при радиолокации [3].

Цель работы – разработка топологической модели идентификации оптических систем на основе фрактального анализа.

Практическое применение топологии

Топология – это учение о модальных отношениях пространственных образов – или о законах связности, взаимного положения и следования точек, линий, поверхностей, тел и их частей или их совокупности в пространстве, независимо от отношений мер и величин. Развиваясь как самостоятельное математическое направление топология зарекомендовала себя как эффективная теория исследования сложных процессов и объектов. Современный топологический анализ рассматривается как перспективное направление развития теории исследования нелинейных динамических систем, является инструментом анализа нелинейной метрологии [4 – 5]. Развивается в последнее время топологическая фотоника – новое направление, изучающее вопрос реализации топологических эффектов в фотонных кристаллах, связанных резонаторах, метаматериалах и квазикристаллах [6]. Применяются топологические методы, в частности фрактальный анализ, для анализа изображений [3].

Согласно определению Б. Мандельброта фрактал представляет собой объект, размерность Хаусдорфа – Безиковича (фрактальная размерность D) которого больше его топологической размерности [7]. При проведении физических исследований фрактальные признаки могут быть обнаружены в структуре сигналов и полей, поведении функций, характеризующих распределение физических величин во времени и пространстве. Из этого следует возможность поиска фрактальной размерности как особенного признака процессов или изображений.

Для определения D ряда $\{x_i\}$ (где x_i – i -е значение величины x , $i=1, \dots, n$) используется метод нормированного размаха, выведенный эмпирическим путем П. Херстом [7]. Анализ ряда $\{x_i\}$ позволяет получить показатель Херста H , связанный с D :

$$D = 2 - H. \quad (1)$$

Значения показателя Херста находятся в интервале $0 \leq H \leq 1$ и определяются через отношение R/σ , где R – размах между максимальным и минимальным значениями функции приращения $x(i, n)$, величина σ – среднее квадратичное отклонение:

$$R = \max_{1 \leq i \leq n} x(i, n) - \min_{1 \leq i \leq n} x(i, n); x(i, n) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i), \quad (2)$$

где \bar{x}_i – среднее арифметическое значений $\{x_i\}$.

Соотношение R/σ связано с параметром H выражением

$$R/\sigma = (n/2)^H. \quad (3)$$

Из (1) – (3) можно получить значение фрактальной размерности, как всего интервала наблюдений, так и его отдельных участков, определить характер динамики x , как на отдельных временных интервалах, так и в период наблюдения в целом. Для классификации динамики x создается фрактальная шкала с точками 1, 1,5, 2: при $D=1$, динамика x строго детерминированная; при $D=2$ величина x ведет себя регулярным образом, но разброс измеряемых значений очень велик; при $D=1,5$ динамика x случайная. Если $1 < D < 1,5$ или $1,5 < D < 2$ исследуемый процесс является немарковским, хаотичным, персистентным и антиперсистентным соответственно.

Знание фрактальной размерности D ряда $\{x_i\}$ позволяет оценить характер поведения объекта измерения (или структуры сигнала) и выбрать соответствующий математических аппарат обработки результатов измерения.

Топологическая идентификация ОПН

На основе фрактальных представлений о структуре сигналов может быть предложена топологическая модель идентификации ОПН. Рассмотрим ЛОС, работающую по схеме: лазерный импульс распространяется по направлению возможного расположения ОПН, отражаясь от объекта, возвращается назад. Задача ЛОС состоит в определении координат отражающей поверхности и ее идентификации. Оставив за рамками статьи определение координат объекта оптическими методами, рассмотрим вопрос о его идентификации. Задача идентификации обусловлена необходимостью поиска ОПН на фоне возможных «ложных» целей с отражающими поверхностями.

Характерной особенностью ОПН является то, что на преломляющие и отражающие поверхности оптических деталей наносят покрытия, представляющие собой тонкие пленки различных веществ: металлов и их окислов, диэлектриков, кремний органических соединений и др. Это позволяет изменять оптические характеристики деталей и придавать им новые физические свойства. На линзы биноклей, фото- и видеокамер наносятся просветляющие покрытия, материал и толщина которых выбираются таким образом, чтобы пропускать излучение видимого диапазона. Практически не отражаются волны, для которых выполняется условие

$$\lambda = 4dn, \quad (4)$$

где d – толщина пленки, n – ее показатель преломления.

В случае многослойного покрытия рассматривают диапазон длин волн, $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$, удовлетворяющих условию (4). Излучение с длинами волн, не входящих в этот диапазон, отражается. При этом, вследствие наложения излучения, отраженного от различных слоев покрытия, наблюдается интерференция в отраженных лучах [8].

Наличие в отраженном оптическом сигнале следов его взаимодействия с просветляющим покрытием позволяет идентифицировать ОПН. В качестве объекта исследования рас-

смотрим площадь сечения лазерного пучка, отраженного от поверхности, покрытой тонкой пленкой. Площадь сечения пучка анализируется с помощью ПЗС-камеры с линейным объективом, входящей в состав ЛОС. Камера позволяет исследовать распределение интенсивности излучения вдоль выбранной оси на плоскости (x, y) .

Аппроксимируем распределение интенсивности в интерференционной картине:

$$I_{int}(x) = I_0 \cos^2(kx), \quad (5)$$

где I_0 – максимальное значение интенсивности, k – волновое число [8].

Функция распределения интенсивности $I(x)$ (5) является объектом фрактального анализа (1) – (3). Рассмотрим случай линейного распределения интенсивности: $I(x) = I_0 \times j$, где j – номер измерения значения интенсивности $j = 1 \dots m$. Размах R и дисперсия σ , вычисленные для функции приращения, равны соответственно:

$$R = \frac{I_0}{8} m^2, \quad \sigma = \frac{I_0}{2\sqrt{3}} \sqrt{m(m+1)}. \quad (6)$$

Из выражения (3) следует

$$H = \ln(R/\sigma) / \ln(m/2). \quad (7)$$

Зависимость R/σ от m примет вид

$$\ln(R/\sigma) = \ln(\sqrt{3}/4) + \ln(m) + \ln(1 - 1/2m). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), получим, что для прямой линии и больших отсчетов:

$$H = \lim_{m \rightarrow \infty} [\ln(R/\sigma) / \ln(m/2)] = 1. \quad (9)$$

Следовательно, значение фрактальной размерности (1) $D=1$. Аналогичный результат можно получить для любой гладкой кривой, например, для синусоиды с периодом, соизмеримым с m . При анализе реальных сигналов, представленных в виде двумерных графиков $I(x)$, параметр D характеризует степень изрезанности графика $I(x)$: при больших значениях D график сильно изрезан, а при малых – имеет плавный, но не гладкий характер.

Выражение (5) описывает гладкую, непрерывную кривую. Согласно (6) – (9) фрактальная размерность функции (5) равна 1. Однако в реальных условиях сигнал, вследствие действия помех интенсивности $I_N(x)$, поступит в объектив ПЗС в виде, отличном от (5). Предполагая, что связь сигнала и помех носит аддитивный характер, представим результирующий сигнал $I_{Rez}(x)$ в виде

$$I_{Rez}(x) = I_{int}(x) + I_N(x). \quad (10)$$

Это приведет к увеличению значения фрактальной размерности на величину ΔD . Вследствие стохастической природы помех, их фрактальная размерность выше фрактальной размерности полезного сигнала. Эксперименты показывают, что при соотношении сигнал/шум $q_0^2 = -3$ дБ приращение фрактальной размерности ΔD составляет $0,1 - 0,3$ [3]. Поэтому, значение фрактальной размерности сигнала (10) можно оценить как $1,1 \leq D \leq 1,3$. При отражении импульса от поверхности без просветляющего покрытия в сигнале (10) отсутствует интерференционная компонента $I_{int}(x)$ и сигнал будет стохастическим, для которого $D=1,5$.

Фрактальная размерность – не единственный инструмент фрактального анализа, и ее значение способно ответить на ограниченный круг вопросов в рамках поставленной задачи – идентификация ОПН. Для ответа на вопрос о типе ОПН ее недостаточно. Для идентификации и классификации ОПН должен быть разработан ансамбль фрактальных признаков конкретных ОПН. Наряду с фрактальной размерностью фрактальные признаки должны включать: вид фрактальных сигнатур, вид пространственного спектра и значения пространственных частот, характеризующих структуру сигнала.

Выводы

Представлена топологическая модель поиска и идентификации скрытых оптических систем наблюдения. Модель основана на фрактальных представлениях о структуре оптического сигнала и определении фрактальной размерности распределения интенсивности в плоскости сечения отраженного от цели лазерного импульса.

Показано, что приближение значения фрактальной размерности к единице является предпосылкой к идентификации цели как оптического прибора наблюдения.

Для классификации типа оптического прибора, наряду с фрактальной размерностью, должен быть разработан ансамбль фрактальных признаков: вид фрактальных сигнатур, вид пространственного спектра и значения пространственных частот, характеризующих структуру сигнала.

Список литературы:

1. Лебедько Е. Системы импульсной оптической локации : учеб. пособие. Москва : Лань, 2014. 368 с.
2. Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике : учеб. пособие. Москва : МГУ, 2004. 82 с.
3. Новейшие методы обработки изображений ; под ред. А. А. Потапова. Москва : Физмат-лит, 2008. 496 с.
4. Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Основы нелинейной метрологии. LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 162 p.
5. Machekhin Yu. Kurskoy Yu. Fractal-entropy analysis of measurement results in nonlinear dynamical systems // Measuring technique. 2014. V. 57. № 6. P. 609-704.
6. Lu L., Joannopoulos J.D., Soliaiiж M. Topological photonics // Nature Photonics. 2014. V. 8. P. 821–829.
7. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Москва : Постмаркер, 2000. 352 с.
8. Ландсберг Г.С. Оптика. 6-е изд., стереот. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. 848 с.