

*Г.Н. ДОЛЯ, д-р техн. наук, В. А. РОМАНИЮК, канд. техн. наук,
С.А. ГОРЕЛЫШЕВ, канд. техн. наук, А.В. КОЧИН, канд. техн. наук*

ПРИНЦИПЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИЮ ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Постановка проблемы и анализ литературы

С развитием цивилизации размеры материальных ценностей и охраняемых территорий увеличивались. В связи с тем, что последнее время в мире значительно возросла угроза террористических нападений, значительно повысилась роль первого рубежа охраны территории и находящихся на них объектов (предприятий, аэропортов, АЭС, специальных или военных объектов). В настоящее время наиболее актуальным является комплексирование охранных систем, основанных на разных физических принципах [1]. Это происходит по следующей причине. С ростом периметра охраняемой территории растет длина физического ограждения. Поэтому возможность нарушения такого барьера возрастает. На данный момент современные системы охраны периметра обычно являются совмещением физического барьера со сложной электронной системой охраны (с достаточно малой вероятностью ложных тревог) [2–5].

Специфика отечественных условий проектирования и эксплуатации периметровых систем защиты заключается, прежде всего, в широком разнообразии климатических и почвенно-геологических условий. Большие сезонные колебания температуры, в ряде случаев достигающие до 60–70 градусов, сильные снегопады, метели, мокрый снег, частые плотные туманы, ураганные ветры, сильные дожди, гололед, иней обуславливают большие трудности при выборе соответствующей системы сигнализации и делают практически невозможным использование какой-либо единственной системы.

Идеальное средство должно было бы иметь зону обнаружения в виде сферы, замыкающей в себе защищаемый объект. К сожалению, в настоящее время создание таких средств нецелесообразно и все существующие средства имеют зону действия высотой не более 2–3 м по периметру объекта. Обнаружение диверсантов или террористов, использующих вертолеты, воздушные шары или ранцевые ракетные установки, возможно только после их приземления и попадания в зону действия средства сигнализации [6–7].

Перспективным направлением решения данной задачи является метод, основанный на анализе изменения пространственной структуры лазерного излучения на трассе. Это позволит увеличить зону действия средств контроля до высоты десятков метров по периметру объекта. Таким образом, разработка методов и средств обнаружения изменения состояния турбулентной среды при распространении лазерного излучения является актуальной.

Цель статьи – разработка способов обнаружения изменения состояния турбулентной среды, вызванного внешним воздействием, по трассе распространения лазерного излучения.

Изложение основного материала

При использовании лазерного излучения в результате интерференции парциальных лучей, отраженных от различных участков со случайным наклоном и высотой в плоскости наблюдения, формируется так называемая спекл-картина, представляющая собой совокупность отдельных пятен (спеклов). При смещениях такой поверхности, например из-за вибраций, в плоскости наблюдения происходит смещение спекл-картины, что может быть использовано для анализа вибраций объектов. Кроме того, изменения в структуре наблюдаемого распределения происходят также при отражении от неподвижных объектов в случае изменения турбулентных свойств среды распространения.

Существенного увеличения мощности принимаемого сигнала, а значит и расширения возможностей практического применения метода можно достичь при использовании световозвращающих покрытий (СВП) вместо диффузно-отражающих поверхностей [8, 9]. СВП

представляет собой совокупность элементарных световозвращателей в виде микростеклошариков или микропризм. размерами порядка нескольких десятков микрометров. Рассеянное излучение имеет также пространственно-неоднородный характер, соответствующий спекл-картине (рис. 1), однако диаграмма направленности шириной всего несколько градусов сориентирована всегда в направлении в сторону излучателя вне зависимости от взаимной ориентации нормали к поверхности и направления падения луча.

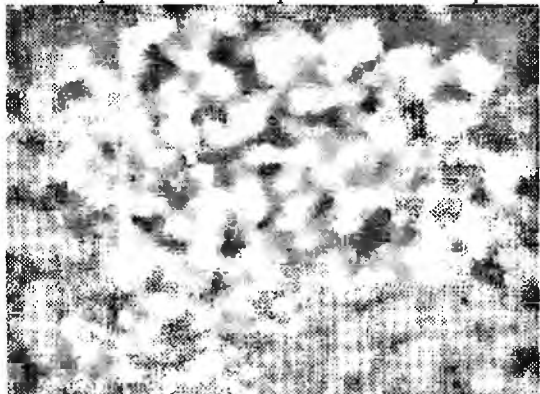


Рис.1. Спекл-картина рассеянного излучения.

Возможным подходом к решению задачи диагностики потоков является анализ влияния фазовых флуктуаций, вносимых турбулентностью в зондирующее излучение [10]. Физической основой метода диагностики турбулентного состояния воздуха является зависимость временного спектра флуктуаций фазы волны от величины поперечной скорости движущегося турбулентного потока и состояния турбулентности, определяемого значением структурной постоянной флуктуаций показателя преломления. Известно [11, 12], что временной спектр фазовых флуктуаций в лазерном пучке ограничен частотой:

$$f_0 = \frac{v_{\perp}}{\sqrt{2\pi\lambda L}}, \quad (1)$$

где v_{\perp} – поперечная к направлению распространения луча составляющая скорости ветра, λ – длина световой волны, L – длина турбулентной трассы.

Это обстоятельство используется, в частности, для определения скорости ветра методами лазерного дистанционного зондирования атмосферы [10]. В случае, когда $f < f_0$, временной спектр флуктуаций параметров луча изменяется мало и описывается соотношением

$$W(f) = 0,85C_n^2 k^{2/3} L^{7/3} / v_{\perp}, \quad (2)$$

где C_n^2 – структурная постоянная флуктуаций показателя преломления, k – волновое число. При $f > f_0$ спектральная плотность мощности быстро убывает в соответствии с зависимостью

$$W(f) = 2,19C_n^2 k^{2/3} L^{7/3} \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-8/3} / v_{\perp}. \quad (3)$$

Таким образом, для определения состояния турбулентного слоя необходимо оценить величину f_0 . Реализовать такой подход можно, например, с помощью метода спекл-интерферометрии [13], при котором необходимо анализировать временные изменения сигнала фотоприемника, при регистрации излучения, отраженного от СВП и прошедшего через турбулентный слой. В этом случае закономерности динамики изменения сигнала фотоприемника будут определяться свойствами турбулентного потока.

Данный подход был реализован с помощью макета, схема которого изображена на рис. 2. Приемопередающий блок включал в себя полупроводниковый лазер 1 мощностью 25 мВт, формирователь пучка 2, с помощью которого луч расширялся до 3 см и фокусировался на поверхности СВП 3, удаленной на расстояние 30 м. Часть рассеянного излучения, пройдя диафрагму 4 диаметром 0,5 см, поступала на вход фотоприемного устройства ФУО-138, включающего фотодиод и предусилитель. Далее выходной сигнал подавался на вход звуковой карты компьютера, где оцифровывался и затем анализировался.

Распределение сфокусированного поля в плоскости СВП $U(x_1, y_1)$ можно представить через распределение поля в плоскости излучающей апертуры в виде

$$U(x_1, y_1) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \int \int_{-\infty}^{\infty} U(x_0, y_0) T(x_0, x_1, y_0, y_1, t) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x_0x_1 + y_0y_1)\right\} dx_0 dy_0,$$

где множитель $T(x_0, x_1, y_0, y_1, t)$ описывает влияние динамического фазового экрана, создаваемого электронагревателем на трассе распространения луча. После отражения луча от СВП, имеющего комплексный коэффициент отражения $K(x_1, y_1)$, распределение поля в плоскости наблюдения можно записать в виде

$$U_1(x_0, y_0) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \int \int_{-\infty}^{\infty} U(x_1, y_1) T(x_0, x_1, y_0, y_1, t) K(x_1, y_1) \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda z}(x_0x_1 + y_0y_1)\right\} dx_1 dy_1.$$

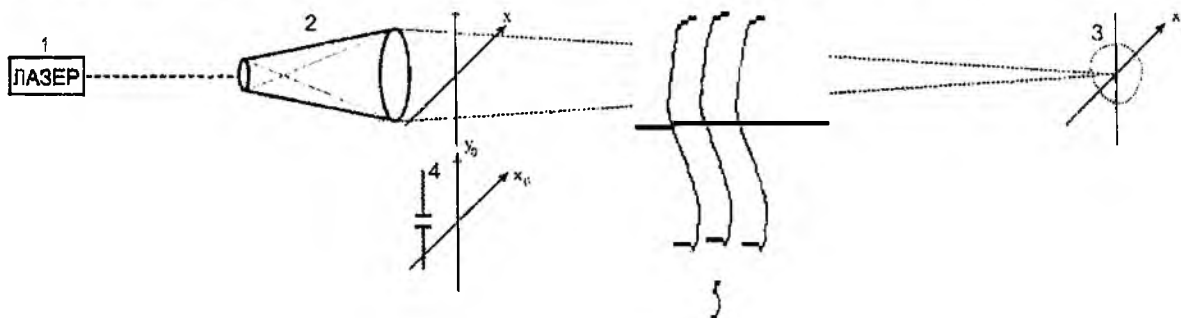


Рис. 2. Схема макета

Поэтому очевидно, что после квадратичного детектирования фрагмента принятого поля в реализации фототока также будут проявляться временные закономерности флуктуаций показателя преломления воздуха, которые можно заметить при анализе принятого сигнала.

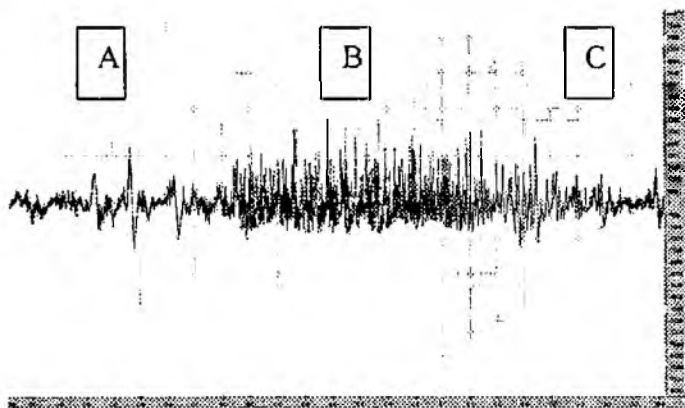


Рис. 3. Временная реализация сигнала фотоприемника в регистрируемом сигнале (участок В).

Затем тепловой источник убирался и восстанавливалось исходное значение состояния турбулентности (участок С).

На рис. 4 представлена усредненная спектрограмма сигнала, соответствующего интервалам А и С (рис. 4, а), а также спектрограмма, соответствующая временному интервалу В (рис. 4, б). Можно заметить, что в соответствии с соотношением 3, при изменении состояния турбулентности происходит расширение спектра регистрируемого сигнала, что свидетельствует о возможности обнаружения изменения состояния турбулентности.

Другим возможным подходом к обнаружению изменения состояния турбулентности является анализ фрактальных свойств зарегистрированной реализации фототока. Как известно [14], турбулентность была одним из первых физических процессов, у которых были обнаружены фрактальные свойства.

На рис. 3 представлена временная реализация сигнала фотоприемника, зарегистрированная в формате WAV-файла с помощью программы CoolEdit. Записанная реализация содержит три характерных участка. Первый участок А соответствует невозмущенному состоянию турбулентной атмосферы. Затем на трассе распространения луча с помощью теплового источника создавалась область с повышенным состоянием турбулентности, что приводило к возрастанию переменной составляющей

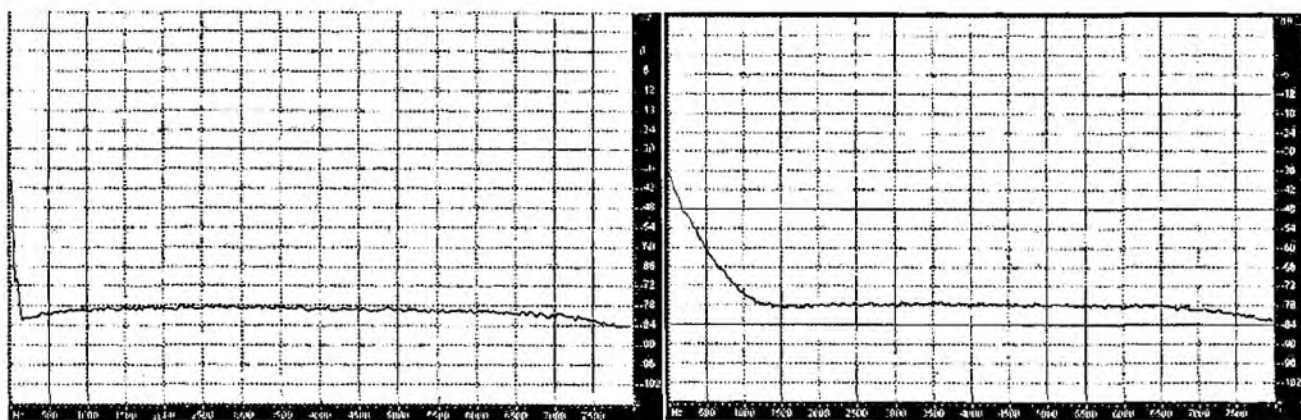


Рис. 4. Усредненная спектрограмма сигнала

Анализируемые последовательности (временные ряды) реализаций фототока носят случайный характер (рис. 3). Для определения фрактальности случайного процесса (временного ряда) используют показатель Херста (H) и фрактальную размерность (D) [15].

Закон Херста для произвольной случайной последовательности может быть записан

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{\tau}{2}\right)^H \quad (4)$$

В данном выражении R – размах (разность максимального и минимального значения) накопленного отклонения $X(t, \tau)$ определяется выражением

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau),$$

выражение для накопленного отклонения $X(t, \tau)$ текущего значения от среднего значения $\langle y \rangle_\tau$ временного ряда $y(t)$ за период исследования τ имеет вид

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{y(u) - \langle y \rangle_\tau\},$$

среднее значение вычисляется следующим образом: $\langle y \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} y(t)$, стандартное отклоне-

ние оценивается выражением $S = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \{y(t) - \langle y \rangle_\tau\}^2}$, а t принимает дискретные целочисленные значения.

Прологарифмировав соотношение (4), получаем следующее выражение

$$\log\left(\frac{R}{S}\right) = H \cdot \log\left(\frac{\tau}{2}\right).$$

Последнее выражение описывает график зависимости нормированного размаха от периода наблюдения, построенного в двойном логарифмическом масштабе. Как видно, искомым показателем H , который носит название показателя Херста, будет равен коэффициенту угла наклона полученного графика. При некоторых условиях, определенных в [15], фрактальная размерность временного ряда может быть довольно просто вычислена с помощью данного показателя по формуле

$$D = 2 - H.$$

По изложенной выше методике производилась оценка фрактальных свойств зарегистрированного временного ряда (рис. 5). Для этого ряд разбивался на соответствующие временные интервалы «окна», в которых и вычислялась фрактальная размерность. Результаты вычислений представлены на рис. 5. Здесь так же, как и на графике исходной реализации временного ряда, четко видны три характерных участка, соответствующие интервалам А, В, С.

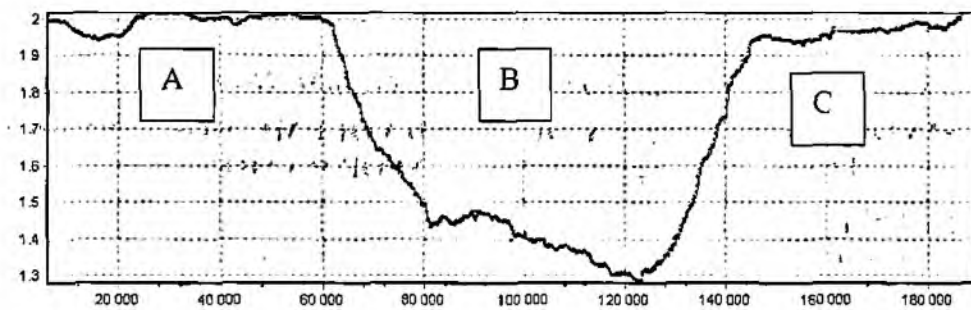


Рис.5. Оценка фрактальных свойств зарегистрированного временного ряда

Временным интервалам, соответствующим моментам времени с невозмущенным состоянием атмосферы, соответствуют значения размерности $D = 2$. На интервале В, соответствующем возмущенному состоянию турбулентности, происходит заметное уменьшение значений фрактальной размерности до уровня 1,3. На основе этого можно сделать вывод, что значения фрактальной размерности временного ряда фотоотчетов могут быть использованы для обнаружения факта изменения состояния турбулентности на трассе распространения луча.

Выводы

Предложены возможные подходы к решению задачи диагностики потоков: анализ влияния фазовых флуктуаций, вносимых турбулентностью в зондирующее излучение и анализ фрактальных свойств зарегистрированной реализации фототока. Кроме того, приведены полученные временные реализации сигнала фотоприемника при наличии и отсутствии турбулентности воздуха. Показана возможность обнаружения факта изменения состояния турбулентности на трассе распространения луча, что может быть положено в основу разработки охранной системы различных объектов.

Список литературы 1. Комплексная охрана объектов: методы и аппаратура. <http://arsenal.nm.ru>. 2. Требования к техническому оснащению объектов средствами охранно-пожарной сигнализации. <http://kiev-security.org.ua/box/3/22.shtml> 3. Оленин Ю.А. Проблемы комплексного обеспечения охранно-территориальной безопасности и физической защиты особо важных объектов РФ // Проблемы объектовой охраны: Сб. науч. трудов. Пенза: Пензенский гос. ун-тет, 2000. Вып. 41. С. 121-125. 4. Оленин Ю.А. Контроль и учет материальных ценностей в системе охраны и физической защиты предприятия // Системы безопасности, связи и телекоммуникаций. Пенза, 2001. №40-41. С. 121-125. 5. Лепешкин В. Оценка защитных свойств периметральной сигнализации // Мир и безопасность. М., 2001. №3. С.10-15. 6. Охрана периметра. <http://www.xvision.ru/?id=15>. 7. Крюков И.Н., Иванов В.А Сравнительный анализ физических полей объектов в целях обнаружения и распознавания нарушителей границы // НМС. № 6. Ч. 4. Калининград, КВИ ФПС, 1999. С. 18-24. 8. Dolya G. N., Zhyvchuk V. The appreciation of the influence of exactness of focusing on the work of the laser homodyne method of measuring the parameters of vibration. Proc. SPIE Vol. 5582, p. 45-52, Sep 2004. 9. Доля Г.Н., Катунин А.Н., Мазанов В.М. Сравнительный анализ возможностей методов интерферометрии для наблюдения фазовых неоднородностей в воздушной среде // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2006. Вып.2 (20). С.61-64. 10. Беленький М.С. и др. Оптическое зондирование атмосферной турбулентности. Новосибирск: Наука, 1986. 128 с. 11. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.:Наука, 1967. 522с. 12. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 334 с. 13. Дэйсонс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 328с. 14. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с. 15. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М.: Постмаркет, 2000. 352с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 13.04.2009

