
УДК 004:535.5

Е.С. Литвинова

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА УГЛОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ЛОКАЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ

Описан датчик раннего обнаружения загорания, основанный на отслеживании угловых флуктуаций локальных максимумов диаграммы рассеяния, формирующейся при отражении лазерного луча от решетки тетраэдрических ретрорефлекторов. Разработана компьютерная модель данного датчика. Результаты моделирования показали, что при возрастании степени турбулентности сканируемого объема воздуха увеличивается отклонение локального максимума получаемой диаграммы рассеяния.

Ключевые слова: компьютерная модель, лазерный пожарный извещатель, решетка тетраэдрических ретрорефлекторов, турбулентность.

Введение

В борьбе с пожаром самым главным фактором является его обнаружение на ранней стадии развития. Для этого разработано множество различных пожарных извещателей, в том числе и лазерных, применяемых в помещениях того или иного назначения.

Основным узлом в любом пожарном извещателе является датчик, который обнаруживает загорание. Пожарные датчики отличаются принципом работы, но общей задачей при их конструировании является наискорейшее срабатывание при возникновении очага загорания.

Для определения необходимых параметров датчика целесообразно использовать компьютерную

модель, которая включала бы все его составляющие и адекватно представляла процессы, происходящие при возникновении загорания.

Данная статья посвящена описанию компьютерной модели лазерного пожарного датчика, принцип работы которого основан на анализе угловых флуктуаций локальных максимумов диаграммы рассеяния лазерного излучения на решетке ретрорефлекторов тетраэдрического типа.

1. Описание лазерного пожарного датчика

В принцип работы рассматриваемого пожарного датчика заложен метод раннего обнаружения загораний [1], который, в отличие от известных аналогов [2], заключается в отслеживании отклонения

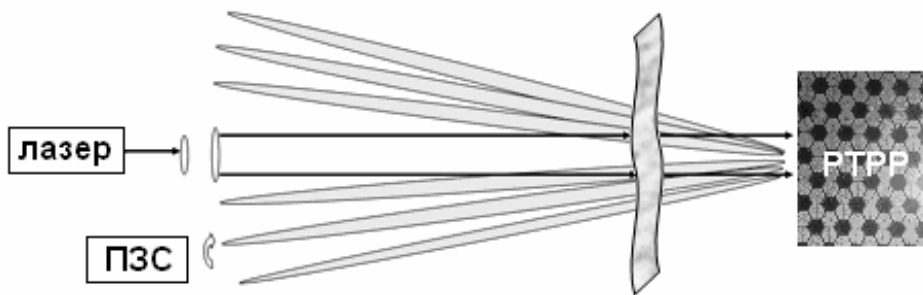


Рис. 1. Схема лазерного пожарного датчика

2. Описание компьютерной модели

Для создания компьютерной модели рассматриваемого пожарного датчика необходимо адекватно описать все этапы прохождения луча по сканируемому объему воздуха: а) распространение излучения между основными узлами; б) двукратное прохождение его через фазовый экран; в) отражение от РТРР.

2.1. Распространение излучения

В общем случае поле на некотором расстоянии от источника света (рис. 2) рассчитывается с помощью известного интеграла Кирхгофа.

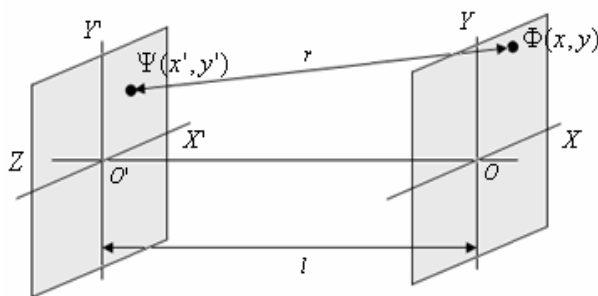


Рис. 2. К расчету поля на заданном участке трассы

Но, поскольку в условиях наблюдения имеет место $|x - x'|/l \ll 1$ и $|y - y'|/l \ll 1$, то для описания закономерностей дифракции по Кирхгофу в работе используется малоугловое приближение Френеля:

диаграммы рассеяния, формирующейся при отражении лазерного луча от решетки тетраэдрических ретрорефлекторов (РТРР).

Тепловой турбулентный поток, возникающий на ранней стадии загорания, провоцирует изменение показателя преломления в разных участках сканируемого объема воздуха. Возникающие за счет этого случайные набеги фазы приводят к отклонению диаграммы рассеяния.

Выбор РТРР в качестве отражательной системы обусловлен в частности регулярным характером получаемой диаграммы рассеяния с четко выраженными локальными максимумами, малейшее отклонение которых фиксируется ПЗС-матрицей датчика.

Общая схема описываемого датчика представлена на рис. 1.

$$\Phi(x, y) = \frac{k}{2\pi i} \frac{e^{ikl}}{l} \int_{S'} \Psi(x', y') e^{\left\{ \frac{ik[(x-x')^2 + (y-y')^2]}{2l} \right\}} dx' dy'$$

При обработке больших массивов данных (как в нашем случае) прямое вычисление интеграла Кирхгофа займет очень много времени.

Поэтому в компьютерной модели мы использовали аппарат свертки, что предусматривает вычисление двух прямых преобразований Фурье и одно обратное:

$$\Phi(x, y) = F^{-1}[F[\Psi] \cdot F[\exp(ikr)/r]] \quad (1)$$

Итак, зная распределение поля на одном участке трассы, с помощью (1) модель определяет распределение поля на нужном расстоянии от этого участка.

2.2. Генерация фазового экрана

Случайные набеги фазы, вызванные тепловыми искажениями показателя преломления воздуха на пути распространения лазерного излучения, можно свести в тонкий фазовый экран.

Распределение показателя преломления представляется в виде случайного поля с учетом турбулентных характеристик атмосферы. Поле считается однородным, изотропным, с гауссовым законом распределения и нулевым средним.

Существует множество различных методов моделирования таких случайных полей. Самыми распространёнными являются метод линейного преоб-

разования, метод канонических и неканонических разложений, метод формирующего фильтра.

Более экономичным и приемлемым в нашем случае является метод формирующего фильтра (метод скользящего суммирования) [3].

Метод формирующего фильтра применительно к теории атмосферной турбулентности заключается в следующем.

Непрерывный случайный процесс $x(t)$ представляется набором дискретных величин:

$$x_k = x(t_k) = \sum_{j=-M}^M a_j \xi_{k-j}, \quad (2)$$

где a_j – коэффициенты, определяемые параметрами турбулентной атмосферы, а ξ_k – статистически независимые случайные величины, распределённые по нормальному закону с нулевым средним и единичной дисперсией ($\xi_k \sim N(0, 1)$).

Для нахождения коэффициентов a_j представим случайный процесс в виде

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(\tau) \xi(t-\tau) d\tau. \quad (3)$$

Корреляционную функцию можно записать так:

$$R_x(\tau) = M[x(t)x(t+\tau)]. \quad (4)$$

В то же время по теореме Винера-Хинчина корреляционная функция связана со спектральной плотностью через преобразование Фурье:

$$R = F^{-1}[S]. \quad (5)$$

Подставляя (3) в (4), находим

$$R(\tau) = a(\tau) \cdot a(-\tau), \quad (6)$$

т.е. свертку, которую можно рассчитать с помощью преобразования Фурье.

Из (5) с учетом (6) при четных a находим

$$F[a] = \sqrt{S}. \quad (7)$$

Теперь подставляя (7) в (2) с учётом свойств свёртки находим $x = F^{-1}[F[a] \cdot F[\xi]]$ или для спектра

$$x = F^{-1}[\sqrt{S} \cdot F[\xi]]. \quad (8)$$

Для описания турбулентности в общем случае в качестве спектральной плотности возьмем спектр фон Кармана:

$$S_x(w) = 0.033 C_n^2 (w^2 + w_0^2)^{-11/6} \exp(-w^2/w_m^2), \quad (9)$$

где C_n^2 – структурная постоянная флуктуаций показателя преломления;

$w_0 = 2\pi/L_0$, $w_m = 5.92/l_0$, L_0 и l_0 – внешний и внутренний масштабы турбулентности соответственно.

Известно, что спектр фон Кармана наилучшим образом описывает мощность турбулентности [4].

Итак, задавая различные значения параметров турбулентности (C_n^2 , L_0 и l_0 и спектр фон Кармана (9)) с помощью метода формирующего фильтра, получаем необходимые случайные фазовые экраны (рис.3).

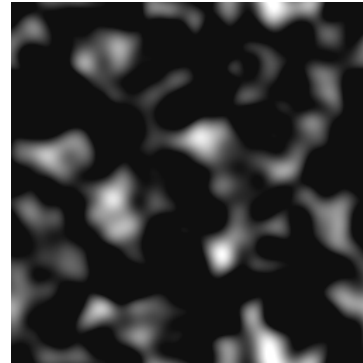


Рис. 3. Реализация случайного фазового экрана

2.3. Трансформация излучения на РТРР

Ретрорефлектор тетраэдрического типа представляет собой отражательную систему с тремя взаимно перпендикулярными отражающими гранями и передней гранью, пропускающей излучение вовнутрь и обратно. Собранные в единую отражательную решетку такие ретрорефлекторы рассеивают свет в виде диаграммы с регулярной гексагональной структурой. На рис. 4 представлены траектория движения луча в ретрорефлекторе и апертура решетки.

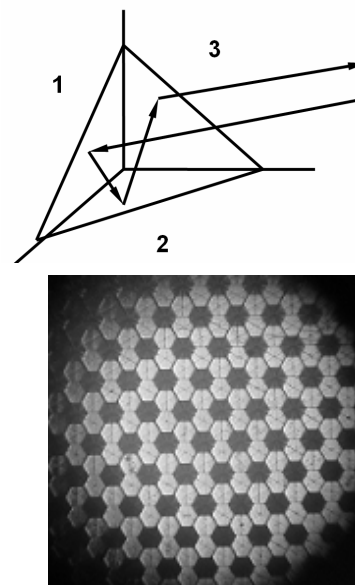


Рис. 4. Траектория луча при отражении от ретрорефлектора и апертура решетки

Тот факт, что отражающие грани ретрорефлектора перпендикулярны друг другу, дает возможность описать траекторию луча в декартовой системе координат с помощью аппарата аналитической геометрии. Ранее проведенные работы [5, 6] показали, что изменение поляризации при отражении падающего под разными углами лазерного излучения от решётки не влияет на отклонение локальных максимумов дифрак-

ционной картины. Поэтому в предлагаемой модели эффект деполяризации излучения не учитывается.

С учетом вышеизложенного можно кратко описать основные этапы работы предложенной компьютерной модели (рис. 1):

1. Расчет изменения поля при распространении излучения от лазера к фазовому экрану (1).
2. Генерация случайного фазового экрана и умножение на пропускание экрана.
3. Расчет изменения поля при распространении излучения от фазового экрана к РТПР.
4. Расчет трансформации излучения на РТПР.
5. Расчет изменения поля при распространении излучения от РТПР к фазовому экрану.
6. Умножение на пропускание экрана.
7. Расчет изменения поля при распространении излучения от фазового экрана к матричному приемнику.
8. Измерение текущих координат локального максимума.
9. Вычисление дисперсии флуктуаций положения локального максимума.

3. Результаты работы компьютерной модели

Разработанная компьютерная модель позволила проверить работу предложенного метода РОЗ для разных значений турбулентности (рис. 5).

Чувствительность метода к обнаружению загорания проверена на всех участках трассы между лазером и отражателем.

При возрастании степени турбулентности усиливается загорание и соответственно увеличивается отклонение локального максимума диаграммы рассеяния.

Из приведенного графика можно судить, что датчик срабатывает уже при малых значениях флуктуаций турбулентности, т.е. на ранней стадии возникновения загорания. Построение лазерных пожарных извещателей на основе описанного датчика является перспективным с точки зрения повышения информативности систем обнаружения пожаров.

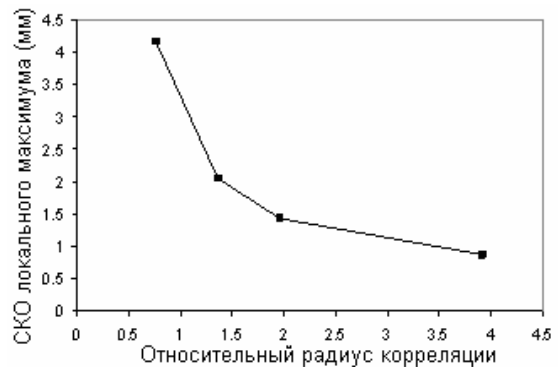


Рис. 5. Зависимость СКО локального максимума диаграммы рассеяния от относительного радиуса корреляции случайного распределения фазы.

Малые значения относительного радиуса корреляции соответствуют большим значениям степени турбулентности

Список литературы

1. Доля Г.Н. Телевизионный датчик для оценки состояния турбулентной атмосферы с использованием световозвращающих покрытий / Г.Н. Доля, Е.С. Чудовская // Труды 3-го МРФ «Прикл.р-эл-ка. Сост. и перспек. разв.». – 2008. – Т.2 – С. 480-483.
2. Шаровар Ф.И. Методы раннего обнаружения загораний / Ф.И. Шаровар. – М.: Стройиздат, 1988.
3. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В.В. Быков. – М.: Сов. радио, 1971.
4. Гудмен Дж. Статистическая оптика / Дж. Гудмен. – М.: Мир, 1988. – 528 с.
5. Доля Г.Н. Преобразование амплитудно-фазового распределения при отражении лазерного излучения от тетраэдрических ретрорефлекторов / Г.Н. Доля, Е.С. Литвинова // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2010. – Вип. 6(87). – С. 81-86.
6. Чудовская Е.С. Моделирование закономерностей рассеяния лазерного излучения на ретрорефлекторах тетраэдрического типа / Е.С. Чудовская, Г.Н. Доля // Труды науч.-техн. конф. «КМНТ-2010». – 2010. – Ч.1 – С. 355-358.

Поступила в редколлегию 25.07.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Н. Фоменко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КУТОВИХ ФЛУКТУАЦІЙ ЛОКАЛЬНИХ МАКСИМУМІВ

О.С. Литвинова

Описується датчик раннього виявлення загорання, що базується на відстеженні кутових флуктуацій локальних максимумів діаграми розсіяння, яка формується при відбитті лазерного променя від решітки тетраедричних ретрорефлекторів. Розроблена комп'ютерна модель даного датчика. Результати моделювання показали, що при зростанні ступеня турбулентності сканованого повітря збільшується відхилення локального максимуму діаграми розсіяння.

Ключові слова: комп'ютерна модель, сповіщувач, решітка тетраедричних ретрорефлекторів, турбулентність.

COMPUTER MODEL OF LASER FIRE DETECTOR BASED ON THE ANALYSIS OF LOCAL MAXIMUM ANGULAR FLUCTUATIONS

E.S. Litvinova

The detector of inflammation early detection based on tracking of shift of diffraction pattern obtained by the laser radiation reflection from tetrahedral retro-reflectors array is described. The computer model of this detector is developed. The simulation results show that with increasing magnitude of atmosphere turbulence there is an increase of the shift of diffraction pattern local maximum.

Keywords: computer model, laser fire detector, tetrahedral retroreflector array, turbulence.