

Б.Н. Дмитриев, И.А. Суторихин

Цифровые синтезированные изображения аэрозольных шлейфов

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

Поступила в редакцию 9.02.2000 г.

Рассматривается возможность применения цифровых синтезированных изображений аэрозольного шлейфа для нахождения мощности локального источника с известными параметрами. Излагаются методы, использованные при предварительной обработке и анализе динамических изображений аэрозольных шлейфов. Обсуждаются результаты анализа телефотометрических наблюдений процессов распространения аэрозольных шлейфов.

Введение

С целью проведения оперативного мониторинга состояния атмосферы в промышленных зонах могут быть использованы различные оптические системы дистанционного зондирования, в том числе и пассивные, основанные на регистрации рассеянного солнечного излучения исследуемого объекта. Наблюдения могут осуществляться как в ИК (тепловизоры), так и видимом диапазоне (системы телевизионной регистрации) [1, 2].

Общим для пассивных методов зондирования является то, что в них тем или иным способом измеряется яркостный контраст объекта. Например, в методе Рингельмана, широко используемом станциями контроля окружающей среды, визуально с помощью специальных тест-шаблонов оператором оценивается яркость дымового шлейфа на контрастном фоне.

На формирование исходного изображения дымового шлейфа стационарного источника влияют такие параметры, как освещенность, распределение концентрации, оптические свойства частиц, состояние атмосферы, неоднородность фона. В настоящее время проводится разработка телефотометрического метода контроля производительности стационарного источника с известными параметрами [3]. В данном методе телевизионная регистрация процесса распространения аэрозольного шлейфа, последующие статистическая обработка и анализ цифровой видеопоследовательности проводятся с целью нахождения величины мощности источника по распределению поля яркостного контраста объекта на видеоизображении.

1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для оцифровки видеосигнала была создана на базе персонального компьютера MMX166 (рис. 1). В состав установки входят бытовая видеокамера стандарта VHS Panasonic M7 и цифровой фотоаппарат OLYMPUS 440C 1, видеокарта с TV-тюнером S3 ViRDGE PCI 2, мультимедийный микропроцессор Intel MMX166 3, устройства ввода-вывода (4, 5). Цифровой фотоаппарат подключается к последовательному порту компьютера и позволяет получать 24-битные фотоизображения размером 768×564 пикселей. Аналоговый видеосигнал с видеокамеры поступает на 96-разрядный АЦП видеокарты, и далее происходит запись цифровой последовательности в AVI-формате на винчестер. Скорость смены кадров может быть выбрана от 1 до 15 кадр./с при раз-

мере 16-битного изображения 320×240 точек (что соответствует стандарту VHS). Для ввода видеоинформации в компьютер используется стандартный пакет программ, предоставляемый фирмой-изготовителем видеокарты. Пакет подключается к последовательному порту компьютера. После записи видеосигнала (или снимков) на персональный компьютер исходный AVI-файл, содержащий видеопоследовательность, разбивается на отдельные графические файлы PIC-формата – кадры исходной видеопоследовательности. Далее изображения преобразуются в 8-битные (в 256 градаций серого) с последующими обработкой и анализом сигнала. Обработка и анализ цифровой видеоинформации (или цифровых снимков) производится с помощью оригинальных алгоритмов и программ, разработанных в рамках исследований.

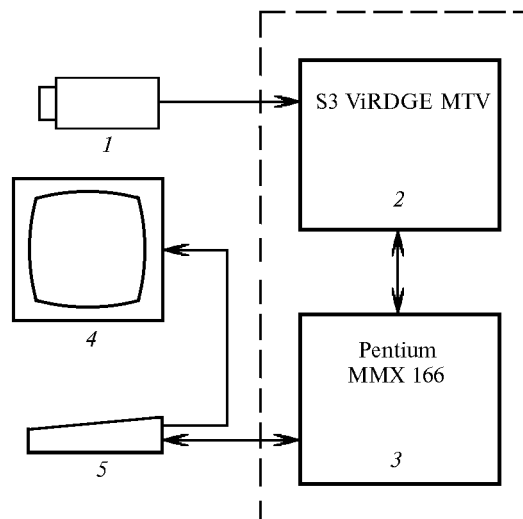


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

2. Статистическая обработка видеоизображений аэрозольных шлейфов

Процесс распространения аэрозольного шлейфа от локального стационарного источника в турбулентной атмосфере является случайным динамическим процессом. Поэтому цифровые видеоизображения необходимо рассматривать как цифровые динамические изображения (динами-

ческие поля) и применять статистические методы обработки и анализа изображений.

Под динамическим изображением понимается временная последовательность двухмерных или трехмерных изображений $f(x, y, t)$ или $f(x, y, z, t)$, отражающая динамику какого-либо процесса [4]. При этом предполагается, что последовательные кадры регистрируются через интервалы времени, дифференциально малые по сравнению с характерной постоянной времени динамической системы. Это означает, что последовательные кадры в достаточной степени коррелированы во времени, что отличает динамические изображения от произвольного набора кадров. Степень корреляционных связей между отдельными кадрами в видеопоследовательности зависит от скорости переноса частиц и достаточно высока в течение достаточно большого промежутка времени, по сравнению с интервалом времени τ между соседними кадрами в исходной видеопоследовательности (при обычной скорости оцифровки $\tau = 1 - 1/30$ с). Было установлено, что величина промежутка времени τ' , в течение которого парный коэффициент корреляции уменьшается до значения 0,95, составляет 1,5–1,9 с при скоростях ветра 8–10 м/с, а в случае слабого ветра (0,5–1 м/с) $\tau' = 3 - 3,5$ с [5].

На основании проведенных расчетов были построены цифровые видеопоследовательности из синтезированных изображений аэрозольных шлейфов. Каждый кадр в такой последовательности является результатом усреднения кадров исходной цифровой видеопоследовательности за интервал времени τ' :

$$I(x_i, y_j, t_m) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I'(x_i, y_j, t_k),$$

где $I(x_i, y_j, t_m)$ – элемент синтезированного изображения последовательности; $I'(x_i, y_j, t_k)$ – элемент изображения исходной последовательности; $n = \tau'/\tau$, τ – скорость смены кадров в исходной последовательности; x_i, y_j – координаты элемента. Динамическое синтезированное изображение аэрозольного шлейфа, полученное таким образом, несет информацию об изменении пространственного распределения поля яркостного контраста аэрозольного шлейфа с течением времени.

В результате суммирования кадров из исходной последовательности происходит статистическое накопление информации об объекте, собранной за промежуток времени τ' . Также было установлено, что величина коэффициента корреляции между синтезированными изображениями в последовательности не ниже 0,96. Таким образом, последовательность синтезированных изображений тоже является динамическим изображением.

Синтезированные динамические изображения аэрозольных шлейфов обладают рядом преимуществ по сравнению с исходными. Во-первых, операция построения синтезированных изображений приводит к подавлению аддитивного шума (импульсного и квантования), усилению сигнала и расширению динамического диапазона [6, 7]. Во-вторых, синтезированные динамические изображения несут статистическую информацию об объекте, т.е. это один из вариантов статистической обработки. В-третьих, представление цифровой видеозаписи в таком виде является достаточно эффективным способом сжатия видеoinформации. Например, если скорость записи

25 кадр./с, а промежуток времени $\tau' = 2$ с, то синтезированное динамическое изображение будет занимать объем памяти в 50 раз меньше, чем исходная цифровая видеопоследовательность.

Другим способом предварительной статистической обработки является представление исходной цифровой видеoinформации в виде синтезированного изображения, полученного в результате усреднения во времени значений яркости всех кадров видеопоследовательности за весь промежуток времени наблюдения:

$$I(x_i, y_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I'(x_i, y_j, t_k),$$

где $I(x_i, y_j)$ – элементы синтезированного изображения; $I'(x_i, y_j, t_k)$ – элементы изображения исходной видеопоследовательности; x_i, y_j – координаты элементов; $n = T/\tau$, T – время наблюдения, τ – скорость смены кадров видеопоследовательности. Данная операция эквивалентна операции интегрирования во времени видеосигнала.

Синтезированное изображение аэрозольного шлейфа, полученное таким способом, представляет собой пространственно-временное распределение поля яркостного контраста аэрозольного шлейфа. На формирование синтезированного изображения аэрозольного шлейфа помимо вышеописанных факторов влияют такие характеристики, как устойчивость направления переноса частиц во времени, временные флуктуации вертикальной и горизонтальной составляющих скорости ветра. Если направление ветра остается постоянным и шлейф имеет четко выраженное направление во времени, то на синтезированном изображении отчетливо виден дымовой шлейф. В противном случае изображение дымового шлейфа становится сильно размытым, смазанным временными флуктуациями скорости переноса частиц и синтезированное изображение становится крайне малоинформативным и непригодным для дальнейшего анализа. Временные флуктуации вертикальной и горизонтальной составляющих скорости ветра изменяют исходное изображение таким образом, что на синтезированном изображении максимум яркостного контраста смещен в сторону источника аэрозоля. Это обстоятельство существенно при анализе изображений аэрозольных шлейфов. Одним из частных случаев, когда можно использовать синтезированные изображения, являются типичные условия, при которых возникает смог.

Регистрация процесса распространения происходит посредством видеокамеры со встроенной функцией АРУ (автоматической регулировкой усиления), благодаря которой происходят автоматическая подстройка динамического диапазона видеосигнала под объект съемки и изменение яркостного контраста изображения. Калибровку видеокамеры, в частности, можно осуществлять введением в поле изображения эталонных объектов (например, наборов тест-объектов типа ТОН-1) и фиксированием яркости и контраста изображения.

Таким образом, предварительная обработка цифровых изображений аэрозольных шлейфов проводится в несколько этапов: 1) коррекция и нормализация исходных изображений; 2) построение синтезированных динамических изображений; 3) построение на основе синтезированных динамических изображений синтезированных изображений.

3. Анализ видеоизображений аэрозольных шлейфов

Традиционно под обработкой изображений подразумевается предварительная обработка (соответствует англоязычному термину Image Processing) – обработка, в результате которой вновь получается изображение. Термин анализ изображений (соответствует англоязычному термину Image Analysis), как и термин анализ сцен, к настоящему времени не является устоявшимся [6]. Термин анализ изображений по данным литературных источников несет тройственный смысл: 1) классификация и распознавание образов; 2) измерение различных количественных данных; 3) смысл задач понимания изображений. В дальнейшем в данной работе под анализом изображений будет пониматься второй из перечисленных выше.

Статистический анализ регистрируемых динамических изображений, прошедших предварительную обработку, проводится с целью определения яркостного контраста аэрозольных шлейфов и нахождения мощности выбросов источников загрязнения. Мощность аэрозольного источника M можно определить как число частиц N , переносимых через перпендикулярную направлению ветра плоскость zx за единицу времени. Мощность выброса связана с концентрацией следующим соотношением:

$$M = V_y \int_{-\infty}^{\infty} \int z dx \rho(x, y, z, t),$$

где V_y – составляющая скорости переноса частиц вдоль направления распространения аэрозольного шлейфа y ; $\rho(x, y, z, t)$ – концентрация частиц [8]. Распределение концентрации вместе с оптическими свойствами частиц и освещенностью обуславливает распределение интенсивности света I , рассеянного на аэрозольном шлейфе. Если освещенность объекта и параметры частиц фиксированы, то интенсивность рассеянного света прямо пропорциональна мощности аэрозольного шлейфа:

$$\iint I(x, y, z, t) dz dx \sim M.$$

Величина яркости изображения аэрозольного шлейфа в выбранной области измерений определяется по пороговому значению яркости фона, на котором происходит распространение шлейфа. Как показывает анализ видеоматериала ранее проведенных стендовых экспериментов [8] по моделированию процесса распространения аэрозольного шлейфа, для определения абсолютного значения мощности аэрозольного выброса можно использовать следующие величины:

1) среднюю яркость изображения аэрозольного шлейфа $\langle I(t_m) - I_f(t_m) \rangle$, нормированную на фон:

$$\langle I(t_m) - I_f(t_m) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k |I(x_i, y_j, t_m) - I_f(t_m)|,$$

где $I(x_i, y_j, t_m)$ – элемент t_m кадра; $I_f(t_m)$ – значение яркости фона; $n \times k$ – размер области осреднения; $N = n \times k$;

2) максимальную яркость профиля изображения аэрозольного шлейфа, нормированную на фон $\langle I(y, t_m) - I_f(t_m) \rangle$:

$$\langle I(y, t_m) - I_f(t_m) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [I(x_i, y_j, t_m) - I_f(t_m)],$$

где y – координата элементов изображения, соответствующих максимуму интенсивности излучения, рассеянного на частицах аэрозоля света. Расчеты, проведенные с изображениями стендового эксперимента, показывают, что обе величины линейно связаны с мощностью источника [9]. При распространении аэрозоля в атмосфере направление переноса частиц со временем варьируется и не остается строго горизонтальным либо вертикальным. Возникают трудности с определением направления переноса частиц в конкретно выбранной точке изображения шлейфа и вычислением второй из величин, требующие привлечения более сложного математического аппарата, а следовательно, увеличения времени счета. Поэтому в настоящее время для определения относительной мощности источника нами используется первая из вышеперечисленных.

4. Результаты статистической обработки и анализа телефотометрических наблюдений аэрозольных выбросов локальных источников в атмосферу

В течение 1999 г. нами проведены телефотометрические наблюдения ряда котельных промпредприятий и ТЭЦ г. Барнаула. Наблюдения осуществлялись при ясной погоде и сплошной облачности. Был поставлен эксперимент по оперативному наблюдению следующих предприятий города: котельной Алтайского завода агрегатов (АЗА), котельной Комбината железо-бетонных изделий (КЖБИ), котельной предприятия «Алтай Ресурс». Видеосъемка проводилась в условиях переменной облачности, время наблюдения каждого объекта 20–25 мин, временной интервал между съемками – 10 мин. На рис. 2 представлено цифровое изображение дымового шлейфа котельной КЖБИ, а на рис. 3 – синтезированное изображение аэрозольного шлейфа данного объекта. На рис. 4 – динамика изменения среднего значения яркости дымовых шлейфов, нормированных на значение яркости фона. По данным о средней нормированной яркости динамических изображений можно проследить динамику изменения относительной мощности источника от момента начала работы источника до выхода его в рабочий диапазон. Анализ синтезированных изображений аэрозольных шлейфов позволяет определить усредненную во времени мощность источника. При анализе динамических синтезированных изображений можно получить информацию не только о среднем значении мощности источника за некоторый промежуток времени, но и проследить динамику мощности во времени.



Рис. 2. Дымовой шлейф трубы котельной КЖБИ



Рис. 3. Синтезированное изображение дымового шлейфа трубы котельной КЖБИ

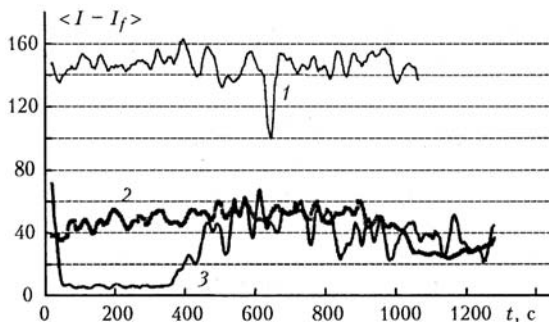


Рис. 4. Динамика изменения среднего значения яркости шлейфов труб промышленных предприятий г. Барнаула. 4.11.99: 1 – КЖБИ; 2 – АЗА; 3 – «Алтай Ресурс»

На рис. 5 приведены результаты измерения среднего значения яркости, нормированной на фон, для синтезированных и динамических синтезированных изображений. Различия между величинами двух типов представления видеоданных обусловлены временными флуктуациями скорости и направления переноса частиц.

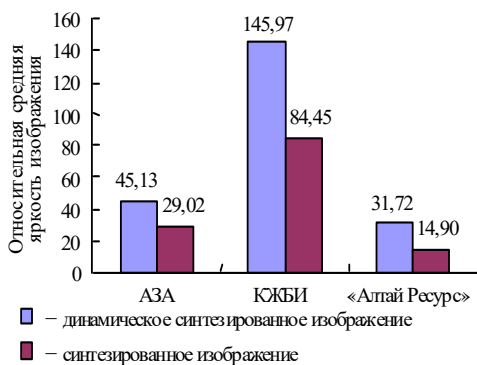


Рис. 5. Интегральное значение яркости aerosольного шлейфа

В результате анализа цифровых синтезированных изображений установлено, что для построения синтезированных изображений достаточно иметь набор последовательных

кадров, регистрируемых с интервалом времени 1,5–2 мин при временах наблюдения 20–25 мин, при условии относительно постоянных направления и скорости переноса частиц. Данное обстоятельство позволяет говорить о возможности использования цифрового фотоаппарата для наблюдений, обладающего более высоким разрешением.

Однако если направление распространения aerosоля сильно изменяется во времени, то в этом случае величину яркости aerosольного шлейфа, а также флуктуации ее во времени можно найти по исходным цифровым кадрам видеопоследовательности (см. рис. 4). Как показывает анализ результатов проведенных нами исследований, оптимальными для построения такого рода зависимостей являются видеопоследовательности с частотой смены кадров 2–5 кадр./с.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволили: 1) установить возможность использования синтезированных и динамических синтезированных изображений для нахождения относительной мощности локального стационарного источника загрязнений как при возникновении смоговых ситуаций в атмосфере в промышленных центрах, так и при систематическом контроле локального стационарного источника; 2) определить параметры статистических ансамблей изображений, необходимых для формирования изображений данных типов.

1. Миронов В.Л., Суторихин И.А., Морский В.В. Система обработки изображений в задачах зондирования дымовых шлейфов // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 4. С. 112–114.
2. Банах В.А., Миронов В.Л., Суторихин И.А., Смалыхо И.Н., Морский В.В. Статистические характеристики интенсивности рассеянного на aerosольном шлейфе оптического излучения // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 10. С. 1289–1297.
3. Дмитриев Б.Н., Куценогий К.П., Морский В.В., Суторихин И.А. Телефотометрический метод контроля производительности источника // Международный симпозиум «Контроль и реабилитация окружающей среды»: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 1998. С. 155–156.
4. Гараторкин А.И. Цифровая обработка динамических полей // Цифровая оптика: Обработка изображений и полей в экспериментальных исследованиях. Сборник научных трудов. М.: Наука, 1990. С. 78–105.
5. Dmitriev B.N., Sutorikhin I.A. Application of statistical criteria to dynamic images of aerosol plumes // Proceedings for SPIE. V. 3983. N 30. Institute for Water and Environmental Problems (Russia). P. 215–221.
6. Янин В.В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. М.: Наука, 1995. 120 с.
7. Баранов В.А. Новые возможности радиоскопических телевизионных систем, достигаемые путем аналого-цифрового накопления видеоизображений // Международная конференция «ОИДИ-90»: Тезисы докл. Новосибирск, 1991. С. 115–116.
8. Морский В.В., Суторихин И.А., Гаевой В.В., Куценогий К.П., Смалыхо И.Н. Дистанционная оценка мощности aerosольного факела по его видеоизображению // Вторая межреспубликанская конференция «Оптические методы исследования потоков»: Тезисы докл. Новосибирск, 1993. С. 99–100.
9. Дмитриев Б.Н., Суторихин И.А. Статистическая обработка цифровых изображений aerosольных шлейфов // V Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 1998. С. 95–98.

B.N. Dmitriev, I.A. Sutorikhin. Digitally generated images of aerosol plumes.

The possibility of application of digitally generated images of aerosol plumes to measuring the power of a point source of pollution with preset parameters is considered. The methods used under processing and analysis of dynamic images of aerosol plumes are presented. The outcomes of the image analysis of telephotometric monitoring of aerosol plumes distribution in the atmosphere are discussed.