

Ю.С. Балин, А.Д. Ершов, П.А. Коняев, Д.С. Ломакин

Контроль скорости перемещения атмосферных аэрозольных образований с использованием видео- и лидарной информации

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 14.10.2004 г.

Обсуждаются проблемы определения параметров скорости распространения аэрозольных образований на основе синхронных лидарных и видеонаблюдений, произведенных с одной точки. Рассмотрены различные атмосферные ситуации, связанные с оценкой пространственных масштабов видеоизображений. В основу метода обработки видеoinформации положена корреляционная методика слежения за движущимися объектами. Пространственный корреляционный анализ введенных в компьютер видеокадров осуществляется с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье по смешанному основанию. В качестве примеров приведены экспериментальные данные по оценке скорости переноса дымовых шлейфов и облачных образований.

Введение

Проблема оперативного определения параметров скорости ветра всегда была одной из наиболее важных задач метеорологии, поскольку ее решение замыкает на себя многочисленные практические приложения.

Одним из таких приложений являются экологические исследования загрязнения атмосферы вредными выбросами. Здесь ключевую роль при разработке и применении методов расчета рассеивания примесей играет возможность оперативного измерения следующих атмосферных параметров: коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного перемешивания; скорости ветра в слое рассеивания примеси; эффективной высоты выбросов, которая также зависит от метеорологических факторов [1–5]. Поскольку указанные атмосферные параметры, как правило, необходимо определять в пограничном слое атмосферы, то это требует привлечения дистанционных и бесконтактных методов измерения модуля скорости и направления ветра.

Так как атмосферный аэрозоль можно рассматривать как своеобразный «ветровой» трассер, то, анализируя особенности пространственно-временного распределения аэрозольного поля, можно определять параметры скорости ветра и атмосферной диффузии. Подобные исследования, когда в качестве аэрозольного объекта используются дымовые шлейфы от организованных источников, ведутся довольно давно с применением пассивных методов на основе пленочных стереоснимков шлейфов [6, 7], а в последние годы — методами цифровой стереофотограмметрии [8, 17].

В лазерном зондировании в свое время развивался метод определения параметров скорости ветра на основе корреляционного анализа статистиче-

ских характеристик естественных аэрозольных неоднородностей [9, 10], но впоследствии, в связи с совершенствованием лидарных технологий, его заменило более перспективное направление — лазерное доплеровское измерение скорости ветра [11].

И активный, и пассивный методы зондирования обладают рядом преимуществ и недостатков.

При проведении стереофотограмметрических наблюдений необходимо многопозиционное расположение (как минимум две точки) фотокамер, при этом нужна высокая временная и пространственная синхронизация экспозиций. Как отмечено в работе [8], важным является выбор зон размещения приборов, поскольку траектория распространения аэрозольного облака зависит от многих факторов и труднопредсказуема. Ясно, что когда траектория аэрозольного шлейфа имеет направление, перпендикулярное к базе стереоустановки, то такие данные нельзя использовать при обработке. Поэтому многоточечные стереоэксперименты весьма трудоемки и затратны, а также зачастую не обеспечивают необходимого качества данных на удаленных участках шлейфа, в том числе из-за уменьшения контраста изображения объекта. Основным преимуществом видеосъемки является мгновенное получение изображения всего шлейфа в целом.

При зондировании аэрозольного облака сканирующим лидаром, если использовать его как дальномер, легко получить геометрические размеры объекта, осуществляя в течение короткого времени пространственное сканирование зондирующим лучом в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Обычно эта операция занимает 1–2 мин. В то же время основное назначение лидара, помимо пространственного картирования распределения аэрозольных примесей, заключается в дистанционном определении оптических характеристик и микрофизических параметров аэрозольной среды [12–14].

Попытки использования для этих целей однопозиционных видеоизображений аэрозольных шлейфов, в частности для нахождения величины мощности локального источника по распределению яркостного контраста изображения, были предприняты в [15, 16]. Для этого необходимо иметь набор последовательных кадров, зарегистрированных с интервалом времени ~2 мин с периодом наблюдения ~25 мин, при условии относительно постоянных величин направления и скорости переноса частиц [16]. За этот период, естественно, эти величины, а также освещенность как самого объекта, так и фона могут существенно измениться и исказить количественные характеристики шлейфов.

Сканирующие лидарные системы издавна оснащались видеосистемами, установленными на поворотной колонке лидара с совмещением их оптических осей. При этом на первоначальной стадии видеосистемы использовались просто как телевизионные гиды, обеспечивая поиск объекта и определяя границы сектора обзора лидара. В последних работах [17] показана возможность объединения видео- и лидарной технологий для построения объемных изображений аэрозольного облака от импульсного (взрывного) источника. Для этих целей использовались четыре видеокамеры, расположенные на дистанциях 300–450 м от источника, и лидар, удаленный от него на расстояние около 6 км. Абсолютная пространственная привязка приборов осуществлялась с использованием GPS (Global Positioning System).

Цель настоящей статьи – показать возможность определения параметров скорости переноса аэрозольных шлейфов, в том числе облачных образований, на основе синхронных лидарных и видеонаблюдений, производимых из одной точки. Понятно, что помимо этой возможности лидар и видеокамера могут использоваться для определения оптических и микрофизических параметров аэрозольных объектов, как это показано в цитируемой литературе.

1. Описание метода и аппаратуры

Основная проблема при анализе видеоизображений аэрозольных шлейфов заключается в выборе

пространственных масштабов, особенно при использовании однопозиционной видеокамеры. Поэтому ниже кратко описаны возможные ситуации, когда эта проблема разрешается с применением только однопозиционной видеокамеры и при совместном использовании с лидаром. С техническими характеристиками лидара «ЛОЗА-М» можно ознакомиться в работе [13].

Создан комплекс для контроля скорости перемещения аэрозольных объектов (рис. 1), состоящий из лидара «ЛОЗА-М» (1), стандартной видеокамеры SONY CCD-TR490E (2), компьютера с платой видеоввода (3), а также программного обеспечения, разработанного специально для этой системы (математика – Visual Fortran 6.5, интерфейс – Visual Basic 6.0).

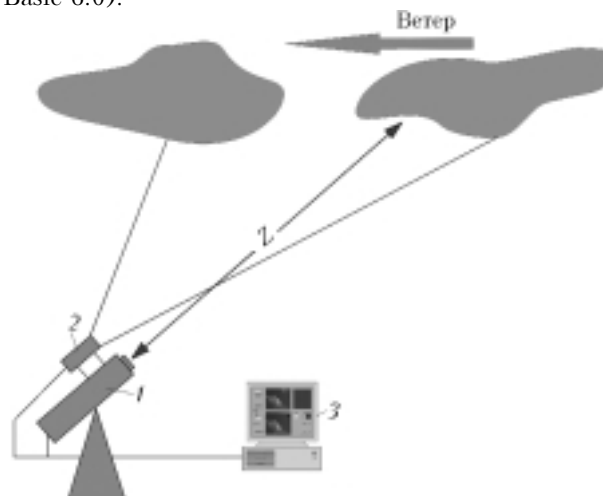


Рис. 1. Комплекс для контроля скорости перемещения аэрозольных объектов

Комплекс позволяет оценивать скорость перемещения аэрозольных образований следующими методами:

1. *Активный и пассивный методы съема информации (общий случай)*. Эта ситуация характерна при вертикальном и наклонном зондировании, когда в поле зрения комплекса отсутствуют реперные объекты. Геометрическая схема для реализации метода представлена на рис. 2, а.

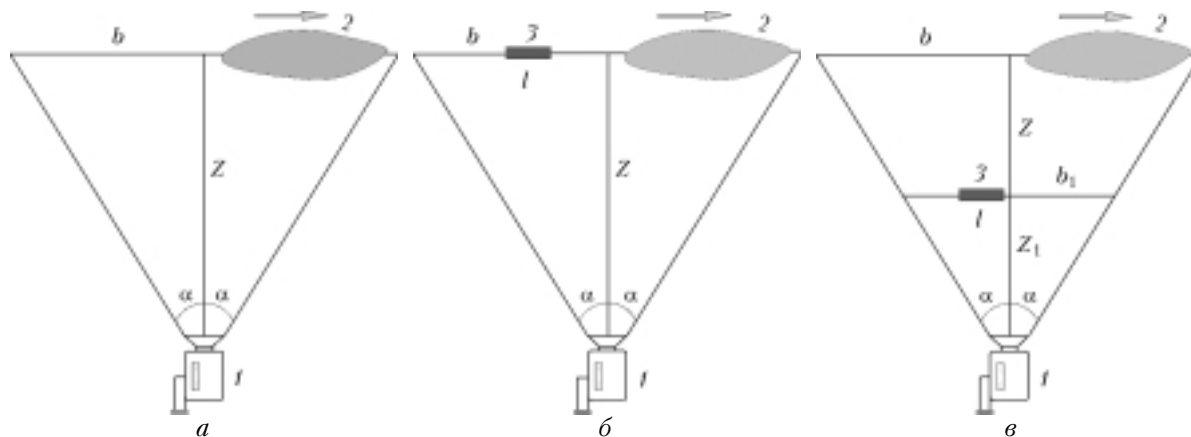


Рис. 2. Геометрия реализации методов съема информации: видеокамера (1), объект (2), репер (3); а – метод 1; б – метод 2а; в – метод 2б

Пространственный масштаб изображения объекта, а также скорость его перемещения определяются из угла поля зрения видеокамеры α и дальности до объекта Z , которая определяется лидаром.

Разрешение видеокамеры составляет 352:288 пикселей. Угол поля зрения видеокамеры в горизонтальной плоскости известен для двух случаев: нулевое приближение ($2\alpha = 45^\circ$) и при увеличении в 12 раз ($2\alpha = 4^\circ$). Один пиксель изображения в горизонтальной плоскости составляет $7'40,23''$ и $20,45''$ соответственно.

В этом случае пространственный масштаб изображения находится из законов геометрии:

$$b = Z \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

2. *Пассивный метод съема информации.* Применение только пассивного метода характерно для слабонаклонных и горизонтальных трасс, когда в поле зрения видеокамеры попадает объект с известными геометрическими параметрами. Здесь возможны два варианта:

2а. *Равная удаленность репера и объекта от измерительного комплекса.* Пространственный масштаб определяется при наличии в кадре реперного объекта с известными геометрическими параметрами (рис. 2,б). Аэрозольные образования должны находиться с ним в одной плоскости, ортогональной вектору наблюдения (шлейф из трубы).

Пространственный масштаб изображения определяется следующей формулой:

$$b = (l_r b_p) / l_p, \quad (2)$$

где l_r – абсолютная длина репера, м; l_p – относительная длина репера, пиксели; b_p – полуширина раstra изображения (176 пикселей).

2б. *Разная удаленность репера и объекта от измерительного комплекса.* Пространственный масштаб определяется при наличии в кадре реперного объекта Z с известными геометрическими параметрами и дальностью Z_1 . Эта информация позволяет контролировать угол поля зрения видеокамеры α при необходимости масштабирования размеров изображения аэрозольного облака. Так как исследуемое аэрозольное образование и репер находятся в разных плоскостях, необходимо определить дальность до облака Z (рис. 2,в).

Угол поля зрения видеокамеры и пространственный масштаб изображения определяются по следующим формулам:

$$\alpha = \operatorname{arctg}(b_1 / Z_1), \quad (3)$$

$$b = Z b_1 / Z_1, \quad (4)$$

где b_1 находится по формуле (2).

Хотя реализация только пассивного метода в большинстве случаев возможна, тем не менее наличие лидара желательно, по крайней мере для постоянной проверки гипотезы о том, что аэрозольный шлейф находится в плоскости, ортогональной вектору наблюдений. Это легко проверить, проведя лазерное дальнометрирование шлейфа на его противоположных краях.

Оценка расстояния до объекта с помощью лидара трудностей не представляет, поэтому основное внимание уделяется описанию пассивного метода.

В основу обработки видеoinформации положена корреляционная методика слежения за движущимися объектами, применяемая в различных областях науки и техники – системы наблюдения («машинное зрение»), адаптивная оптика и т.д. [18].

На рис. 3 приведен общий вид программы.



Рис. 3

Программа позволяет:

– выводить на экран монитора пространственное изображение всего аэрозольного объекта в целом;

– контролировать скорость перемещения объекта по ортогональным осям (V_x , V_y), а также результирующую скорость перемещения объекта;

– выбирать окно корреляционного анализа, а также время накопления информации в зависимости от атмосферной обстановки;

– выбирать режим работы системы, тем самым обеспечивая: а) просмотр изображения, б) измерение;

– записывать в файлы текущее изображение объекта.

Корреляционная методика измерений смещения фрагмента изображения заключается в следующем:

– выбирается характерная область в кадре динамического видеоизображения (размеры и положение прямоугольного окна корреляционного анализа);

– по команде «начать слежение» запоминается опорный кадр (прямоугольная матрица значений яркости пикселей изображения в окне анализа);

– далее в реальном времени рассчитывается двумерная взаимная корреляционная функция опорного и текущего кадров, находятся координаты ее максимума, которые и определяют величину смещения текущего кадра относительно опорного;

– по сигналу программного таймера (по окончании заданного интервала времени) происходят обновление опорного кадра и отображение результатов корреляционного анализа в виде значений компонент модуля и вектора скорости ветра.

Пространственный корреляционный анализ введенных в компьютер видеок кадров осуществляется с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье по смешанному основанию [19]. Этот алгоритм не ограничивает выбор размера окна $N = 2^m$, что существенно облегчает подбор параметров программы при проведении эксперимента (например, на рис. 3 размер окна корреляции 96×96 пикселей).

Взаимная корреляционная функция текущего и опорного кадров вычисляется по формуле

$$C_{RC}(dx, dy) = \iint I_R(x, y) I_C(x + dx, y + dy) dx dy, \quad (5)$$

$$C_{RC} = F^- [F^+ (I_R) F^+ (I_C)],$$

где I_R – опорный кадр; I_C – текущий кадр; F^+ , F^- – прямое и обратное дискретное преобразование Фурье.

Для улучшения точности применяемого алгоритма определения скорости движения объекта необходимо предварительно задать параметры: а) размеры корреляционного окна (пиксели) – задаются отдельно по координатам x и y (независимо); б) интервал времени между опорным и текущим кадрами (секунды). Эти параметры задаются пользователем в окне программы, исходя из конкретных условий эксперимента. Также возможна модификация

алгоритма с автоматическим подбором параметров путем проведения серии пробных испытаний.

Перед началом работы (измерений) необходимо откалибровать окно – задать метрику. Для этого в окне видеоизображения выделяется реперный объект и задаются его параметры (метры).

Теперь цена деления пикселя на экране определяется как

$$d_p = Base / L_p, \quad (6)$$

где $Base$ – длина базы репера, м; L_p – размер мерной ленты, пиксели.

Скорость перемещения объекта определяется как

$$V_x = |dX_{\max}| dp / t, \quad V_y = |dY_{\max}| dp / t, \quad V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \quad (7)$$

где dX_{\max} , dY_{\max} – координаты смещения максимума функции взаимной корреляции, определяемой выражением (5); t – время задержки между опорным и текущим кадрами, по которым рассчитывается корреляция (задается пользователем в окне программы как время коррелятора, в секундах).

2. Результаты эксперимента

В натуральных условиях были проведены эксперименты по оценке скорости перемещения аэрозольных загрязнений, а именно дымового шлейфа (пассивный метод съема информации) и облачных образований (сочетание пассивного и активного методов).

2.1. Дымовой шлейф

В качестве источника аэрозольных выбросов была выбрана дымовая труба ГРЭС-2 (г. Томск). Съем информации проводился в 15 ч 20 апреля 2004 г. на расстоянии прямой видимости 3200 м. Высота и диаметр трубы составляют соответственно 100 и 8 м. Труба послужила реперным объектом, относительно которого были рассчитаны угол поля зрения видеокамеры на используемых приближениях, пространственный масштаб объекта, а также скорость перемещения объекта (метод обработки 2а).

Рассмотрены различные варианты «захвата» объекта при размере области анализа 96×96 пикселей: в начале, середине и конце аэрозольного шлейфа (рис. 4). Метод устойчив, и дисперсия скоростей небольшая.

Кроме того, реализованы варианты захвата при различных заполнениях «окна» анализа объектом (дымовым шлейфом): 1) когда контуры объекта входят в «окно» и четко различимы (рис. 5,а); 2) когда объект полностью заполняет «окно» корреляции, контуры не входят в «окно» (рис. 5,б); 3) по остаткам дымового шлейфа (рис. 5,в). В первом случае метод работает устойчиво. Это идеальный вариант анализа: четкие границы объекта входят в «окно», объект смещается монотонно и сохраняет свою форму. Во втором случае метод также работает, но время от времени происходит срыв. Во избежание этого необходимо, чтобы структура исследуемого объекта в «окне» корреляции была не монотонна.

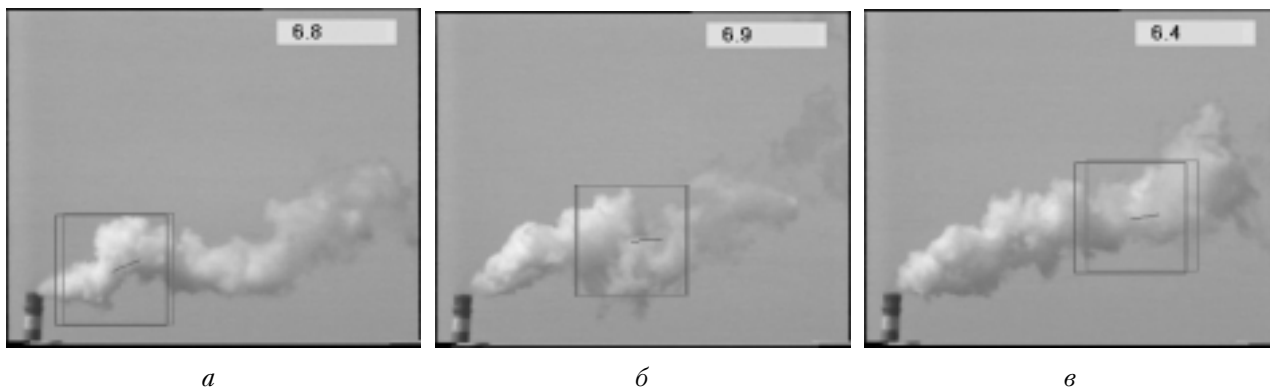


Рис. 4. Аэрозольный шлейф: *a* – начало; *б* – середина; *в* – конец, цифры указывают значение модуля скорости ветра, м/с

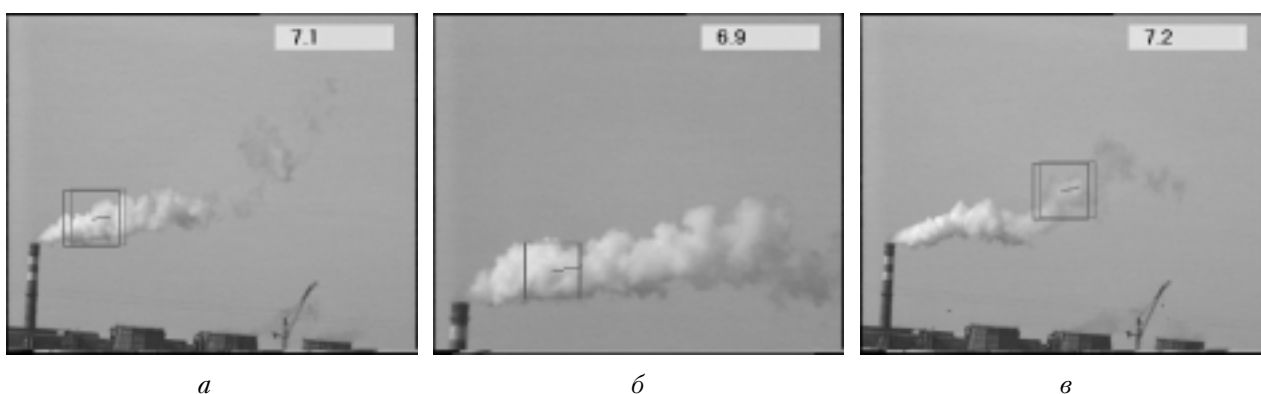


Рис. 5

В третьем случае, когда рассматривается корреляция на конце шлейфа, метод устойчив (ВКФ значима), пока поле неоднородностей аэрозоля сохраняет форму.

При таких условиях результаты обработки данных показали, что средняя скорость распространения аэрозольного шлейфа равна 7 м/с. При этом по данным TOR-станции Института оптики атмосферы скорость ветра на высоте 40 м составляла 7,3 м/с (рис. 6), а направление – южное,

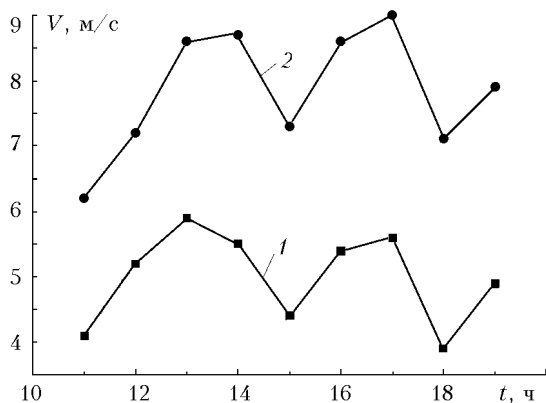


Рис. 6. Скорость ветра V на высотах 10 (*1*) и 40 м (*2*)

т.е. вектор распространения дымового шлейфа был практически перпендикулярен вектору наблюдения ($\approx 7^\circ$). Таким образом, данные, полученные в результате эксперимента, не противоречат показаниям TOR-станции.

2.2. Облачные поля

Съем информации проводился 6 июня 2004 г. под углом 45° к горизонту при слоисто-кучевой облачности. Дальность до образований 2 км, высота облаков 1,4 км. При нулевом приближении угол поля зрения видеокамеры составляет 45° (т.е. полуширина $\alpha = 22,5^\circ$), соответственно пространственный масштаб изображения 1400 м. На рис. 7 приведены результаты эксперимента, по которым средняя скорость перемещения облаков составляет 9,9 м/с, направление – юго-западное.

Таким образом, полученные результаты не противоречат данным для существующих моделей стратификации скорости ветра [20].

Для определения скорости и направления перемещения облачных формирований идеальным вариантом является вертикальный съем информации. В этом случае погрешность измерения минимальна, а точность – максимальна.

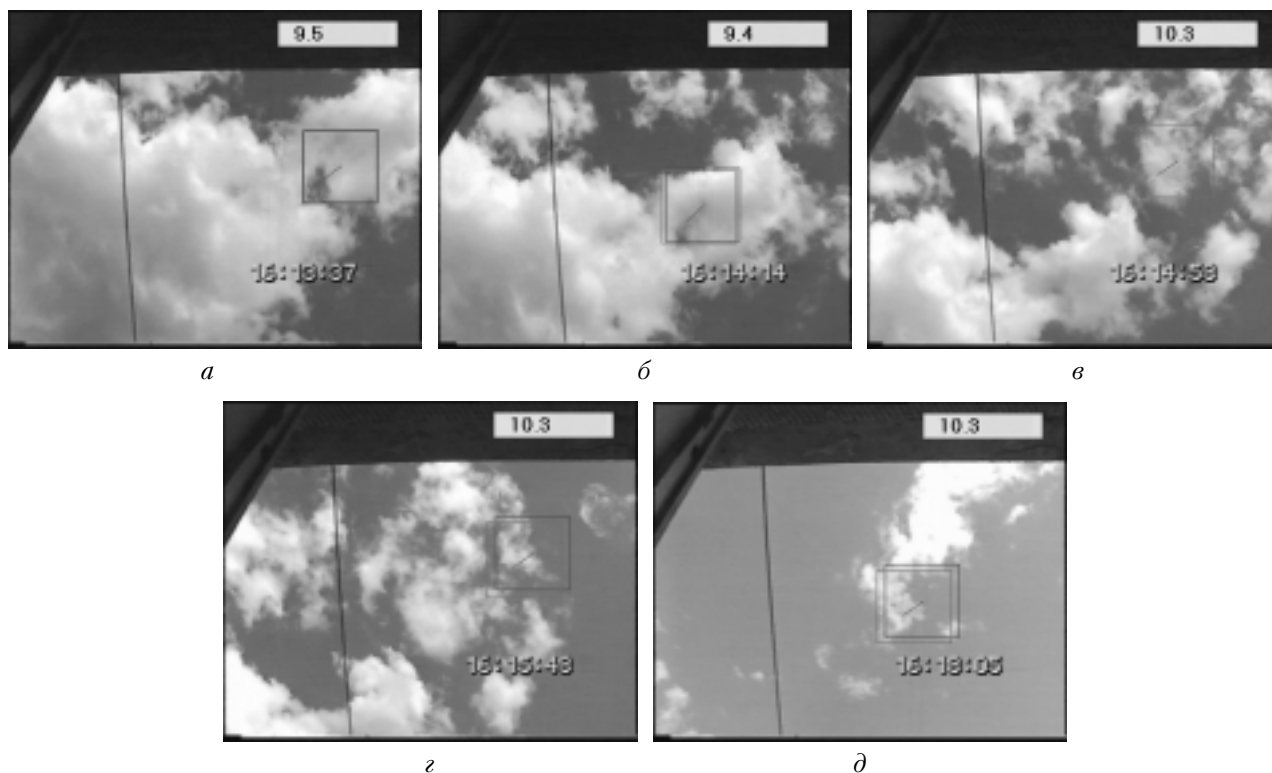


Рис. 7

Заключение

Разработан аппаратный комплекс для контроля скорости перемещения аэрозольных образований в атмосфере, сочетающий пассивный и активный методы получения информации с последующей корреляционной обработкой. Комплекс позволяет исследовать динамику аэрозольных образований в реальном масштабе времени: пространственное положение, скорость перемещения, структура образования. В натуральных условиях проведена апробация метода и качественно оценена погрешность определения скорости перемещения аэрозольных образований, которая составляет 5–7%. Устойчивость метода и достоверность результатов сохраняются при изменении масштаба.

Перспективы дальнейшего развития аппаратуры и методологии получения и обработки данных следует связывать с включением в комплекс цифровой видеоаппаратуры с непосредственной передачей изображения в компьютер в реальном масштабе времени, а также с усовершенствованием методики обработки видеоизображения, позволяющей анализировать аэрозольные поля с меньшим контрастом. Это позволит в дальнейшем применять комплекс практически для всех атмосферных ситуаций, в том числе в автоматическом режиме.

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 272 с.
2. Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы / Под ред. М.Е. Берлянда. Л.: Гидрометеониздат, 1971. 375 с.

3. Елисеев В.С. Траектории дымовых труб от промышленного источника // Тр. ГГО. 1976. Вып. 373. С. 78–85.
4. Аргунищева А.В. Математическое моделирование распределения антропогенных аэрозолей // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 800–803.
5. Аргунищев В.К., Макухин В.Л. Математическое моделирование распределения аэрозолей и газовых примесей в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 804–814.
6. Бузов М.И., Елисеев В.С., Новаковский Б.А. Стереодиффузионный метод исследования атмосферной диффузии // Тр. ГГО. 1969. Вып. 238. С. 77–85.
7. Монин А.С. Распространение дыма в приземном слое атмосферы // Атмосферная диффузия и загрязнение атмосферы. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. С. 366–381.
8. Куценогий К.П., Макаров В.И., Трубина Л.К., Климашин А.М., Махов Д.Ю., Голобоков М.В. Определение геометрии дымового шлейфа от аэрозольного генератора методом цифровой стереодиффузионной оптики // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 339–344.
9. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Под ред. И.В. Самохвалова. Новосибирск: Наука, 1985. 221 с.
10. Балин Ю.С., Разенков И.А. Лазерный контроль аэрозольных загрязнений воздушного бассейна промышленных центров // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 2. С. 169–188.
11. Смалыхо И.Н., Банах В.А., Копп Ф., Вернер Х. Лидарные измерения среднего ветра // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 8. С. 672–679.
12. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей / Под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск: Наука, 1986. 186 с.

13. Байрашин Г.С., Балин Ю.С., Ершов А.Д., Пеннер И.Э. Сканирующий лидар «ЛОЗА-М» для контроля аэрозольных полей в атмосфере // Наука производству. 2003. № 9. С. 10–14.
14. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
15. Миронов В.Л., Морский В.В., Суторихин И.А. Система обработки изображений в задачах зондирования дымовых шлейфов // Оптика атмосф. 1990. Т. 3. № 4. С. 447–448.
16. Дмитриев Б.Н., Суторихин И.А. Цифровые синхронизованные изображения аэрозольных шлейфов // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 8. С. 779–783.
17. Stephens J.R., Karl R.R., Lettelier B.C., Pope P.A. Using combined video and lidar techniques to map explosive debris plumes // Proc. of the 22 Intern. Laser Radar Conference. Matera, Italy. ESA SP-561. 2004. V. 2. P. 705–707.
18. Распознавание образов при помощи цифровых вычислительных машин. Наука для техники. Современная электроника / Под ред. Л. Хармона: Пер. с англ. / Предисл. Н.Н. Говоруна. М.: Мир, 1974. 163 с.
19. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Григорьев В.М., Коняев П.А., Лукин В.П., Ковалло П.Г., Скоморовский В.И., Янков А.П. Разработка и исследование адаптивной оптической системы солнечного телескопа // Автотметрия. 2003. Т. 39. № 5. С. 77–90.
20. Беленький М.С., Задде Г.О., Комаров В.С., Креков Г.М., Носов В.В., Першин А.А., Хамарин В.И., Цверева В.Г. Оптическая модель атмосферы. Томск: Изд-во ТФ СО АН СССР, 1987. 225 с.

Yu.S. Balin, A.D. Ershov, P.A. Konyaev, D.S. Lomakin. **Monitoring of velocity of atmospheric aerosol formations with the use of video and lidar information.**

Problems of determining the velocity of spread of aerosol formations from synchronous lidar and video observations carried out at the same point are discussed. Different atmospheric situations, involving the estimation of spatial scales of video images, are considered. The method for processing of video information is based on the correlation tracking technique applied to moving objects. The spatial correlation analysis of video frames in the computer is carried out using the mixed-radix fast Fourier transform (FFT) algorithm. Experimental data on the estimated velocity of smoke plumes and cloud formations are presented as an example.