

Е.В. Стойкова, Э.С. Фердинандов, В.А. Митев

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕННОГО ИНТЕРВАЛА МЕЖДУ РЕГИСТРАЦИЯМИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ СКОРОСТИ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

В работе рассмотрено влияние интервала времени между моментами регистрации изображений при корреляционно-экстремальном определении скорости горизонтального дрейфа атмосферных неоднородностей. Расчеты ошибок измерения проведены аналитически и при помощи статистического моделирования. Приведены экспериментальные результаты измерения скорости дрейфа облачных полей системой с ПЗС-датчиком.

Перспективным направлением в дистанционном зондировании атмосферы является создание систем с оптическими датчиками изображений на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) для корреляционно-экстремального измерения скорости горизонтального дрейфа $\mathbf{V} = (V_x, V_y)$ атмосферных неоднородностей [1, 2]. Основное значение для проектирования и оптимизации таких систем имеет вопрос о точности измерений, зависящей как от параметров системы и исследуемой среды, так и от статистической природы помех.

В принципе, проблема точности корреляционно-экстремального измерения скорости системой с ПЗС-датчиком характеризуется следующими особенностями:

- 1) скорость дрейфа находится по взаимному сдвигу пары коррелированных дискретизированных изображений случайного поля неоднородностей;
- 2) линейные размеры изображений соизмеримы со средними размерами неоднородностей;
- 3) регистрация изображений происходит в условиях аддитивных и мультипликативных помех и при наличии эволюции неоднородностей во времени.

Поэтому, исходя из специфики системы с ПЗС-датчиком, нами начат комплексный анализ ее точности, отдельные результаты которого опубликованы в [3–9]. Решение поставленной задачи проводится путем аналитического исследования влияния помех на относительную среднеквадратическую ошибку при определении сдвига изображений и статистического моделирования на ЭВМ работы системы в различных условиях. Разработанная методика анализа точности описана подробно в [5, 6]. В настоящей работе представлены результаты оценки влияния интервала времени τ_0 между моментами регистрации изображений на точность измерений.

При заданной скорости сдвиг изображений $\Delta = (\xi_m, \eta_m)$ возрастает пропорционально τ_0 , в то время как площадь S под пространственной взаимно-корреляционной функцией (ВКФ) неоднородностей $R(\xi, \eta)$ не зависит от скорости. Следовательно, измерения при меньших сдвигах должны характеризоваться большей относительной ошибкой. В действительности, однако, S для усредненной по ансамблю изображений ВКФ $\langle \hat{R}(\xi, \eta) \rangle$ возрастает с увеличением τ_0 из-за уменьшения области усреднения, что приводит к возрастанию среднеквадратического отклонения оценки сдвига. Кроме того, точность измерения существенно ухудшается при увеличении отношения между τ_0 и временем жизни неоднородностей. Все это привело к необходимости исследовать вопрос об оптимальном сдвиге изображений.

При небольших относительных флуктуациях оценок составляющих скорости $\hat{V}_x = \hat{\xi}_m / \tau_0$, $\hat{V}_y = \hat{\eta}_m / \tau_0$ среднеквадратической ошибки δ_V и $\Delta\varphi$ при определении модуля и направления вектора \mathbf{V} определяются из следующих выражений:

$$\delta_V = V^{-1} \sqrt{\langle (\hat{V} - V)^2 \rangle} \approx \sqrt{\langle \hat{\varepsilon}_x^2 \rangle \cos^4 \varphi + \langle \hat{\varepsilon}_y^2 \rangle \sin^4 \varphi + 2 \langle \hat{\varepsilon}_x \hat{\varepsilon}_y \rangle \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}; \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = \sqrt{\langle (\hat{\varphi} - \varphi)^2 \rangle} \approx \operatorname{tg}^2 \varphi (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{-1} \sqrt{\langle \hat{\varepsilon}_x^2 \rangle + \langle \hat{\varepsilon}_y^2 \rangle - 2 \langle \hat{\varepsilon}_x \hat{\varepsilon}_y \rangle}; \quad (2)$$

$$\hat{\varepsilon}_{x,y} = \hat{V}_{x,y} / V_{x,y} - 1, \quad (3)$$

где \hat{V} и $\hat{\varphi}$ – оценки $V = (V_x^2 + V_y^2)^{1/2}$ и $\varphi = \arctg(V_y/V_x)$. Оценки $\hat{\xi}_m, \hat{\eta}_m$ могут быть найдены из условия экстремума функции $A(\xi, \eta) = A_x \xi^2 + A_y \eta^2 + B_x \xi + B_y \eta + C$, используемой для аппроксимации экспериментальной ВКФ в области максимума по методу наименьших квадратов. Оценка ВКФ для случая дискретизированных изображений находится согласно алгоритму

$$\hat{R}(\mu, \nu) \equiv \hat{R}(\mu \Delta_1, \nu \Delta_2) = \frac{1}{(N_1 - \mu)(N_2 - \nu)} \sum_i^{N_1 - \mu} \sum_j^{N_2 - \nu} (F_{ij}^{(1)} - \hat{F}_1)(F_{i+\mu, j+\nu}^{(2)} - \hat{F}_2), \quad (4)$$

где $N_{1,2}$ и $\Delta_{1,2}$ – число отсчетов и шаги дискретизации вдоль осей изображений; $\hat{F}_{1,2}$ – оценки математического ожидания для первого и второго изображений; $F_{ij}^{(k)}$ – значение функции, описывающей изображение в точке с координатами $x = i\Delta_1$, $y = j\Delta_2$ в момент времени t_k .

Оценка скорости может быть найдена также по положению минимума взаимно-структурной функции (ВСФ) изображений:

$$\hat{D}(\mu, \nu) \equiv \hat{D}(\mu \Delta_1, \nu \Delta_2) = \frac{1}{(N_1 - \mu)(N_2 - \nu)} \sum_i^{N_1 - \mu} \sum_j^{N_2 - \nu} (F_{i+\mu, j+\nu}^{(2)} - F_{ij}^{(1)})^2. \quad (5)$$

Оценки $\hat{V}_{x,y}$ являются отношениями коррелированных величин:

$$\hat{V}_{x,y} = -\hat{B}_{x,y} / 2\tau_0 \hat{A}_{x,y}. \quad (6)$$

Из (3) и (6) следует, что относительные флуктуации оценок $\hat{V}_{x,y}$ связаны нелинейно с относительными флуктуациями оценок коэффициентов $\hat{A}_{x,y}$ и $\hat{B}_{x,y}$:

$$\hat{\varepsilon}_{x,y} = \frac{\hat{b}_{x,y} - \hat{a}_{x,y}}{1 + \hat{a}_{x,y}}, \quad (7)$$

где $\hat{a}_{x,y} = \hat{A}_{x,y} / A_{x,y} - 1$, $\hat{b}_{x,y} = \hat{B}_{x,y} / B_{x,y} - 1$.

Очевидно, приближенное вычисление среднеквадратических отклонений и ковариаций оценок $\hat{V}_{x,y}$ возможно при сравнительно небольших флуктуациях знаменателя в формулах (7). Тогда будут в силе приближенные равенства:

$$\langle \hat{\varepsilon}_{x,y}^2 \rangle \approx \langle (\hat{b}_{x,y} - \hat{a}_{x,y})^2 \rangle \equiv \omega_{x,y}^2; \quad (8)$$

$$\langle \hat{\varepsilon}_x \hat{\varepsilon}_y \rangle \approx \langle \hat{b}_x \hat{b}_y \rangle - \langle \hat{a}_x \hat{b}_y \rangle - \langle \hat{a}_y \hat{b}_x \rangle + \langle \hat{a}_x \hat{a}_y \rangle.$$

Когда размеры изображений таковы, что условие $\hat{a}_{x,y} \ll 1$ не выполняется, характер влияния различных факторов на точность измерения можно установить, исследуя поведение среднеквадратических отклонений $\omega_{x,y}$, у числителей в формулах (7).

Таким образом, вычисление определенных выражениями (7) и (8) среднеквадратических ошибок δ_V и δ_φ необходимо выполнять в следующем порядке:

- 1) задаются корреляционные функции неоднородностей и помех;
- 2) вычисляются ковариации $\langle \hat{R}(\mu, \nu) \hat{R}(x, \lambda) \rangle$ и $\langle \hat{D}(\mu, \nu) \hat{D}(x, \lambda) \rangle$ оценок (4) и (5) ВКФ и ВСФ соответственно;
- 3) на основе $\langle \hat{R}(\mu, \nu) \hat{R}(x, \lambda) \rangle$ и $\langle \hat{D}(\mu, \nu) \hat{D}(x, \lambda) \rangle$ вычисляются ковариации оценок коэффициентов $\hat{A}_{x,y}$ и $\hat{B}_{x,y}$;

4) с помощью (8) вычисляются, когда это возможно, среднеквадратические отклонения $\langle \hat{\varepsilon}_{x,y}^2 \rangle$ и ковариации $\langle \hat{\varepsilon}_x \hat{\varepsilon}_y \rangle$ как и δ_V и $\Delta\phi$.

При существенных флуктуациях оценок ВКФ вычисления ограничиваются нахождением среднеквадратических отклонений $\omega_{x,y}$. В этом случае для количественной оценки ошибок δ_V и $\Delta\phi$ необходимо обратиться к моделированию [9].

В качестве корреляционной функции неоднородностей принята модель:

$$R(\xi, \eta) = \sigma_0^2 \exp \left\{ - \frac{(\xi - V_x \tau_0)^2 + (\eta - V_y \tau_0)^2}{a^2} - \frac{\tau_0^2}{\theta^2} \right\},$$

где величины $2a$ и 2θ можно рассматривать как средний размер и среднее время жизни неоднородностей.

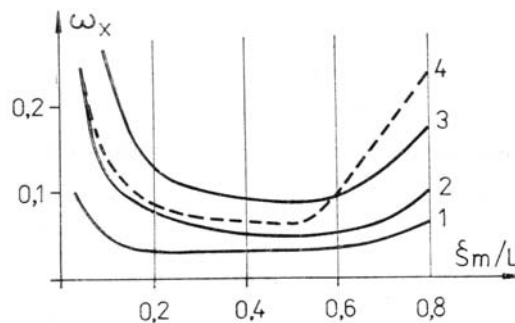


Рис. 1. Зависимость среднеквадратического отклонения ω_x от сдвига между изображениями при $N_1 = N_2 = 25$, $\Delta_1 = \Delta_2 = 0,2a$ и $V_x = V_y$ (1 и 2 – ВКФ и ВКФ в отсутствие помех; 3 – ВКФ при эволюции неоднородностей во времени; 4 – ВКФ при наличии аддитивного белого шума с дисперсией $0,25 F_{1,2}^2$

Проведенные вычисления и моделирование показывают, что точность определения скорости удовлетворительна при выполнении неравенства:

$$0,2 < V_{x(y)}\tau_0/L < 0,6, \quad (9)$$

записанного для большей из двух составляющих скорости. Этот результат получен для изображений с линейными размерами, которые в 3–4 раза больше пространственного радиуса корреляции случайного поля неоднородностей. Наличие эволюции и помех приводит в целом к сужению оптимального интервала, что может быть компенсировано увеличением размеров изображений. При использовании алгоритма (5) в качестве нижней границы в (9) можно выбрать 0,1. Это объясняется тем, что при отсутствии помех точность при использовании (5) выше по сравнению с (4), так как при столь малых размерах изображений относительно часто наблюдается смещение максимума ВКФ от его истинного положения.

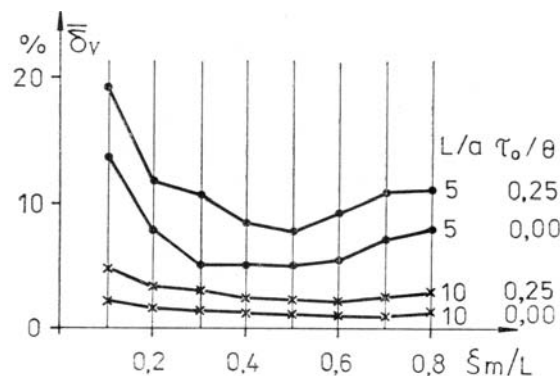


Рис. 2. Зависимость средней ошибки измерения от сдвига по данным моделирования

На рис. 1 показана зависимость среднеквадратического отклонения ω_x от отношения ξ_m/L для квадратных изображений с $N_1 = N_2 = 25$, $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$ при $V_x = V_y$ и $\Delta/a = 0,2$; $L = N_1\Delta$. Кривая 1 соответствует структурному алгоритму в отсутствие помех, а кривые 2, 3, 4 – корреляционному в

отсутствие эволюции и шума (кривая 2), при $t_0/\Theta = 0,5$ кривая 3) и при наличии аддитивного белого шума (кривая 4). На рис. 2 показаны результаты моделирования, в ходе которого обработаны серии из 1000 одномерных реализаций длиной $L = 5$ и 10 радиусов корреляции при контрастности неоднородностей 10% для ξ_m/L в интервале от 0,1 до 0,8.

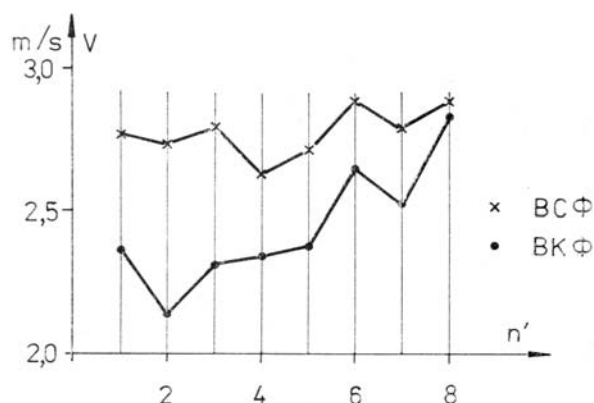


Рис. 3. Измеренные значения скорости дрейфа облачных полей системой с ПЗС-датчиком при не оптимально выбранном сдвиге между изображениями

Необходимо отметить расхождение между формулой (9) и сделанным в [10] на основе обработки аэрофотографий облачных полей выводом, что при $1/\lambda(\gamma/\Theta)^2 > 0,3$ корреляционно-экстремальное измерение теряет смысл. Возможная причина этого расхождения заключается, по-видимому, в недостаточном числе обработанных в [10] пар изображений — обстоятельстве особенно важном ввиду возрастающей с увеличением τ_0 вероятности смещения ВКФ.

При помощи разработанной нами системы с ПЗС-датчиком [11] получены серии коррелированных изображений облачных полей, регистрируемых через одинаковые промежутки времени при постоянной скорости дрейфа за время измерения. На основе этих данных проведена экспериментальная проверка неравенства (9), задающего рекомендуемый интервал значений отношений ξ_m/L , η_m/L . На рис. 3 показаны полученные в эксперименте значения V , когда эти значения находятся вне указанного интервала. В этом случае, флуктуации V от эксперимента к эксперименту оказываются существенными. На рис. 4 приведены значения V в случае корреляции между первым и каждым следующим изображением в серии. Видно, как с увеличением временного интервала между моментами регистрации изображений флуктуации сглаживаются и получается хорошее совпадение между результатами для корреляционного и структурного алгоритмов.

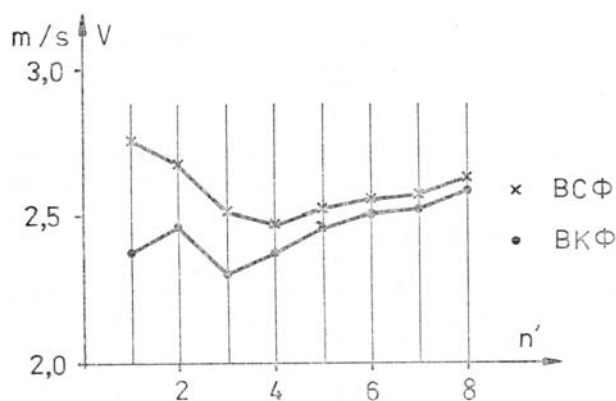


Рис. 4. Измеренные значения скорости дрейфа при увеличении сдвига между изображениями

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизаций характеристик рабочего режима корреляционно-экстремальных систем с точки зрения точности измерения скорости горизонтального дрейфа случайно-неоднородных атмосферных полей, а также при проектировании таких систем.

1. Орлов В. М., Матвиенко Г. Г., Самохвалов И. В. и др. Применение корреляционных методов в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука. 1983. 160 с.
2. Матвиенко Г. Г., Задде Г. О., Фердинандов Э. С. и др. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука. 1985. 224 с.

3. Stoykova E.V., Ferdinandov E.S., Mitev V.A., Mitsev Ts.A. //Bulg. J. Phys. 1985. V. 12. № 1. P. 78–89.
4. Ferdinandov E.S., Stoykova E.V., Mitsev Ts.A., Mitev V.A. //Bulg. J. Phys. 1985. V. 12. № 3. P. 340–352.
5. Stoykova E.V. //Rev. Roum. Phys. 1987. V. 32. № 1–2. P. 241–244.
6. Stoykova E.V. //Bulg. J. Phys. 1987. V. 14. № 3. P. 271–282.
7. Stoykova E.V., Stoykov V. //Bulg. J. Phys. V. 14. № 3. P. 283–296.
8. Stoykova E.V. //Bulg. J. Phys. 1987. V. 14. № 4. P. 349–360.
9. Stoykova E.V., Stoykov V. //14 Intern. Laser Radar Conf. Abst., San Candido. 1988.
10. Юрга И.И. //В кн.: VI Всес. симпозиум по лазерному зондированию атмосферы. Ч. 1. (Тезисы докл.). Томск, 1980. С. 173.
11. Митев В.А., Стойкова Е.В., Фердинандов Э.С., Мицев Ц.А. // В кн.: Тезисы докл. болг. совещания. София, 1985. С. 123–129.

Институт электроники
БАН, София

Поступила в редакцию
4 мая 1988 г.

E.V. Stoykova, E.S. Ferdinandov, V.A. Mitev. On the Choice of the Optimal Interval between the Image Recording Times in the Correlation-Extremal Measurement of the Optical Inhomogeneity Drift Velocity.

The effect of the interval between the image recording times in the correlation-extremal measurement of the atmospheric inhomogeneity horizontal drift-velocity is discussed. The measurement errors are estimated analytically and by means of statistical models. Experimental observations of the cloud field drift-velocity using a CCD sensing system are presented.