

Ю.С. Балин, И.А. Разенков, А.П. Ростов

ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА

Теоретически и экспериментально исследовано искажающее влияние шумов на спектры когерентности и фазы сигналов аэрозольного лидара. Анализ проводился для участка трассы зондирования, рассматриваемого в виде линейной системы с одним входом и выходом. Получено соотношение, позволяющее при наличии шумов получать из лидарных измерений фазового спектра несмещенную оценку скорости ветра.

При зондировании нижней тропосферы величина лидарного сигнала в значительной мере определяется рассеянием на аэрозольных частицах, концентрация которых подвержена колебаниям во времени и пространстве.

По этой причине регистрируемая лидаром совокупность пространственно-временных выборок сигналов носит также случайный характер. Для статистического описания полученного массива данных в настоящее время широко используются методы корреляционного и спектрального анализа, с практической точки зрения направленные на реализацию способа дистанционного измерения параметров атмосферной турбулентности и скорости ветра [1, 2]. При извлечении полезной информации из данных зондирования возникает необходимость оценки искажающего влияния помех, имеющих различную физическую природу. Вопросы учета основных видов помех, обусловленные мультипликативным вкладом шумов из-за флуктуаций энергии зондирующего излучения и аддитивными шумами приемного тракта лидара при использовании корреляционного анализа подробно изложены в [3].

В настоящем сообщении оценивается влияние искажающего действия шумов на статистические характеристики лидарных сигналов с использованием спектрального анализа.

Известно, что основной областью применения спектрального анализа в прикладных задачах является исследование входных и выходных процессов линейных систем. Процесс зондирования также можно представить в виде некоторой гипотетической линейной системы с одним входом и одним выходом [4]. Это представление схематично показано на рис. 1, где выделен участок трассы зондирования r , лежащий в одной плоскости с вектором скорости \mathbf{V} и составляющий с ним угол φ . Аэрозольные неоднородности, увлекаемые ветром, пересекают участок r и вызывают появление флуктуаций лидарных сигналов. Временной ряд совокупности сигналов на входе системы обозначим через $x(t)$, а процесс на выходе через $y(t)$. Свойства линейной системы, описывающие процесс переноса аэрозольных неоднородностей, характеризуются функциями когерентности $\gamma(f)$ и фазы $\theta(f)$, определяемыми через спектры мощности сигналов на входе и выходе. Функция когерентности показывает долю мощности сигналов на частоте f , обусловленную вкладом аэрозольных неоднородностей, пересекающих при движении участок трассы зондирования. Фазовый угол $\theta(f)$ определяет время распространения неоднородности через систему, т. е. зависит от величины разнесения r и скорости ветра V :

$$\theta(f) = -2\pi fr/V. \quad (1)$$

В соответствии с теорией линейных систем [4] для регистрируемых в эксперименте процессов $x(t)$ и $y(t)$

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}, \quad \theta_{xy}(f) = \text{arctg} \frac{\text{Im} G_{xy}(f)}{\text{Re} G_{xy}(f)}, \quad (2)$$

где $G_{xx}(f)$, $G_{yy}(f)$ и $G_{xy}(f)$ соответственно автоспектры и кросс-спектр сигналов $x(t)$ и $y(t)$.

Для получения аналитических соотношений, показывающих влияние помех на спектры когерентности и фазы, представим процессы $x(t)$ и $y(t)$ в виде суммы полезных сигналов $u(t)$, $w(t)$ и шума $m(t)$ и $n(t)$ (рис. 1):

$$\begin{aligned} x(t) &= u(t) + m(t); \\ y(t) &= w(t) + n(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Хотя шум опорного канала (флуктуации энергии зондирующих импульсов) входит в сигналы мультипликативно, представление (3) в виде аддитивной добавки возможно, если выполняется ряд условий. Одно из них — малость величин вариаций составляющих процесса. Это условие обычно легко реализуется, поскольку при зондировании свободной атмосферы короткопериодные (5÷10 мин)

вариации коэффициентов обратного рассеяния в основном не превышают 10% [3]. В течение этого времени флуктуации энергии твердотельных лазеров, как правило, составляют единицы процентов [5]. Еще одно условие заключается в предварительном центрировании процессов, осуществляемом во время математической обработки результатов измерений.

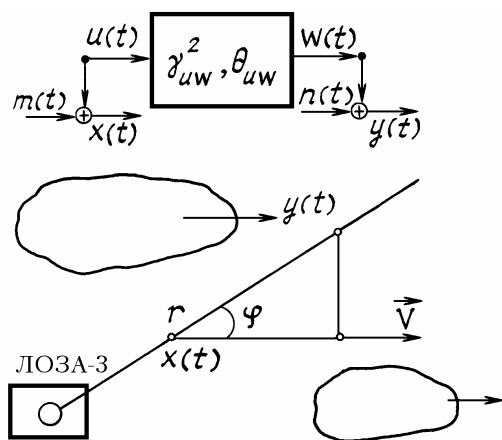


Рис. 1. Схематическое представление трассы зондирования в виде линейной системы

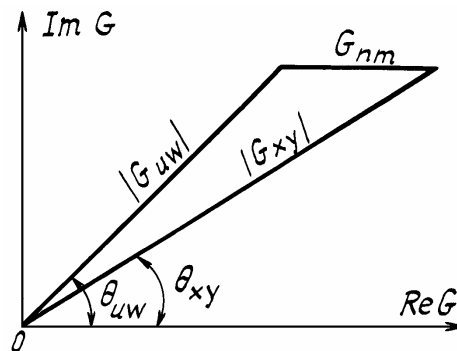


Рис. 2. Изображение спектров в комплексной плоскости в полярных координатах

Дальнейший анализ проведем для случаев некоррелированных и коррелированных входного $m(t)$ и выходного $n(t)$ шумов, подобно тому, как это выполнено в [4]. Поскольку при зондировании атмосферы практически всегда выполняется неравенство $rL^{-1} \ll 1$, то отношения шум/сигнал на входе и выходе системы совпадают.

При наличии некоррелированных шумов на входе и выходе системы, т. е. при $G_{mn}(f) = 0$, можно записать следующие соотношения для спектров когерентности и фазы [4]:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \gamma_{uw}^2(f) [1 + \alpha(f)]^{-2}; \quad (4)$$

$$\theta_{xy}(f) = \theta_{uw}(f), \quad (5)$$

где $\alpha(f) = G_{mn}(f)/G_{uw}(f) = G_{nm}(f)/G_{ww}(f)$ — отношение шум/сигнал.

Отсюда следует, что присутствие некоррелированного шума в лидарных сигналах приводит к понижению спектра когерентности, но не влияет на величину фазового угла. Последнее означает, что получаемая из фазового спектра оценка скорости ветра будет несмещенной.

Рассмотрим теперь случай, когда шумы $m(t)$ и $n(t)$ коррелированы между собой (флуктуации энергии излучения лазера), т.е. выполняется условие $G_{mn}(f) \neq 0$. Тогда выражение для кросс-спектра $G_{xy}(f)$ запишется в виде

$$G_{xy}(f) = G_{uw}(f) + G_{nm}(f). \quad (6)$$

Дальнейший расчет можно существенно упростить и сделать более наглядным, если искомые спектры представить в графическом виде в комплексной плоскости, изображенной на рис. 2. На этом рисунке в полярных координатах нанесены кросс-спектры $G_{uw}(f)$ и $G_{xy}(f)$, причем величины отрезков соответствуют модулям этих спектров, а углы наклона — фазовым углам $\theta_{uw}(f)$ и $\theta_{xy}(f)$.

Используя данное графическое представление, в монографии [4] рассмотрены два частных варианта: модуль $|G_{mn}(f)|$ параллелен $|G_{uw}(f)|$ и $|G_{mn}(f)|$ перпендикулярен $|G_{uw}(f)|$. При условии $G_{mn}(f) \rightarrow 1$ для первого варианта $\theta_{xy}(f) = \theta_{uw}(f)$ наименьшее значение функции когерентности равно:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \{[1 - \alpha(f)]/[1 + \alpha(f)]\}^2. \quad (7)$$

Для второго варианта, когда $\theta_{xy}(f) = \theta_{uw}(f) \pm \Delta\theta_{mn}(f)$, имеем [4]

$$\gamma_{xy}^2(f) = [1 + \alpha^2(f)]/[1 + \alpha(f)]^2, \quad (8)$$

В нашем случае, поскольку флуктуации шума в разных точках трассы носят синхронный характер, модуль $|G_{mn}(f)|$ параллелен действительной оси. Тогда для функций когерентности и фазы можно получить следующие выражения:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{\gamma_{uw}^2(f) + 2\alpha(f)\gamma_{uw}^2(f)\cos\theta_{uw}(f) + \alpha^2(f)}{[1 + \alpha(f)]^2}; \quad (9)$$

$$\theta_{xy}(f) = \arctg \frac{\sin\theta_{uw}(f)}{\cos\theta_{uw}(f) + \alpha(f)\gamma_{uw}^{-1}(f)}. \quad (10)$$

Из соотношений (9, 10) видно, что определяемые из экспериментальных данных спектры когерентности и фазы при наличии коррелированного шума на трассе зондирования всегда будут искаженными. Степень искажения определяется отношением шум/сигнал $\alpha(f)$, поэтому естественно ожидать, что наименьшие искажения будут в низкочастотной части спектра, где в силу степенного характера спектра полезного сигнала [1, 6, 7] отношения $\alpha(f)$ минимально. Отметим, что в отличие от случая с некоррелированными шумами, здесь фазовый спектр подвержен шумовым искажениям. Тем не менее из (10) следует, что при значениях фазового угла, кратных величине π , определяемый экспериментально угол $\theta_{xy}(f)$ должен совпадать с истинным значением $\theta_{uw}(f)$. Этот вывод имеет наглядное графическое подтверждение, если обратиться к рис. 2. Очевидно, что при увеличении частоты f , отрезок прямой, соответствующий $G_{xy}(f)$, должен поворачиваться относительно начала координат. При достижении углом $\theta_{xy}(f)$ значения $\pm\pi$ все отрезки, соответствующие спектрам $G_{xy}(f)$, становятся параллельными оси абсцисс. Это, в свою очередь, означает, что фазовые углы $\theta_{uw}(f)$ и $\theta_{xy}(f)$ совпадают. Последнее, в соответствии с (1), позволяет получить простое соотношение для несмещенной оценки скорости ветра

$$V = -2f_{\pi} r \cos\varphi,$$

где f_{π} — частота, при которой фаза достигает значения $\pm\pi$.

Экспериментальные исследования статистических характеристик лидарных сигналов были проведены на лазерном локаторе «ЛОЗА-3» [8] в августе-сентябре 1988 г. вблизи г. Томска над ровной подстилающей поверхностью. Трасса лидара располагалась под углом места $3-5^{\circ}$ в направлении скорости ветра. Система регистрации локатора позволяла фиксировать лидарный сигнал на трассе зондирования с шагом 20 м, при этом первый строб выбирался на высоте 10 м над поверхностью Земли, а последний на высоте 30 м.

На метеомачте на высоте 20 м, соответствующей средней точке измерительного участка трассы лидара, располагался акустический анемометр [9], который с частотой 4 Гц измерял значения двух горизонтальных компонент скорости ветра. Частота записи лидарной информации при формировании временных рядов сигналов составляла 2 Гц. Запись информации лидаром и анемометром производилась синхронно на микроЭВМ «Электроника-60», при этом длина реализаций составляла 30 мин. Из анемометрических данных определялись: средняя величина модуля и направления скорости ветра, значение флуктуаций модуля скорости ветра. Из лидарных данных с использованием быстрого преобразования Фурье [4, 6] вычислялись авто- и кроссспектры лидарных сигналов. При вычислениях, с целью повышения достоверности статистических данных, производилось усреднение спектров по ансамблю, который получался из обработки данных различных пар точек на трассе зондирования [6, 7]. Из спектров сигналов по формулам (2) определялись спектры когерентности $\gamma_{xy}^2(f)$ и фазы $\theta_{xy}(f)$.

Истинные спектры $\gamma_{uw}^2(f)$ и $\theta_{uw}(f)$ рассчитывались с привлечением анемометрических данных о модуле ветра, его направлении и величине флуктуаций в соответствии с теорией, изложенной в [7]. При проведении расчетов предполагалась выполнимость гипотезы замороженной турбулентности, поскольку измерение сигналов осуществлялось для небольших разнесений, а время жизни неоднородностей составляет десятки секунд [3, 7]. Это означает, что за время распространения аэрозольных неоднородностей между измерительными точками трассы форма этих неоднородностей не претерпевает существенных изменений.

Всего статистической обработке было подвергнуто 27 совместных реализаций. В двух реализациях получить полезную информацию из данных зондирования не представилось возможным, поскольку вариации сигнала составляли менее 2% и отношение сигнал/шум было меньше единицы.

В качестве иллюстрации на рис. 3, 4 приведены характерные спектры когерентности и фазы, полученные 5.09.88 г. из двух последовательных по времени реализаций при стабильной метеорологической обстановке. По измерениям акустического анемометра среднее значение скорости ветра составляло 3,8 и 3,9 м/с соответственно, а величина флуктуаций скорости ветра была равной 11% в обоих случаях. Лидарные данные представлены в виде точек, а теоретические расчеты функций когерентности и фазы кривыми 2–5. Приведенные на рисунках величины доверительных интервалов соответствуют числу степеней свободы $n = 128$ при уровне значимости 0,05.

При обработке экспериментального материала проводилось разделение шумового компонента на когерентную и некогерентную составляющие. Селекция осуществлялась по методике, изложенной в [10], на основе анализа величины скачков авто- и кросскорреляционных функций при нулевых задержках. Отношение сигнал/некоррелированный шум составляло 32 и 10, а для коррелированного шума 49 и 12 соответственно для первой (рис. 3, а) и второй (рис. 3, б) реализаций. Общее отноше-

ние дисперсий сигнал/шум для данных в верхней части рисунка равно 19, во втором случае — 6. Частотные зависимости $\alpha(f)$, полученные с учетом степенного характера спектра $G_{uu}(f)$ полезного сигнала, показаны на рис. 3 кривыми 1.

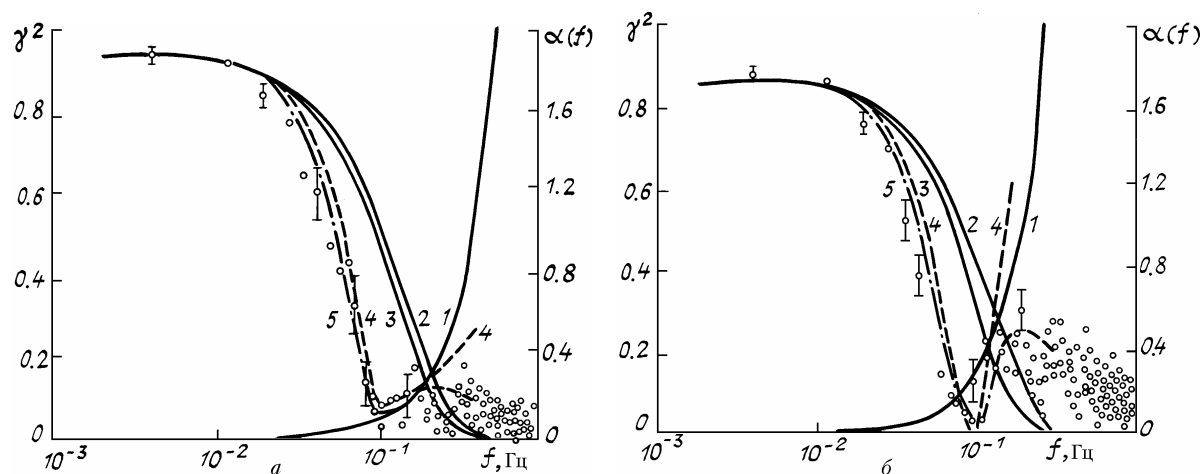


Рис. 3. Сопоставление теоретических и экспериментальных функций когерентности для различных видов шумов и отношений сигнал/шум: $a - S/N = 19$, $b - S/N = 6$; кривая 1 — $\alpha(f)$; кривые 2 — 5 — теоретический расчет $\gamma^2(f)$; точки — экспериментальные данные

Истинные значения $\gamma_{uw}(f)$ и $\theta_{uw}(f)$ изображены на рисунках кривыми 2. Влияние некоррелированных шумов (кривые 3 рис. 3), рассчитанное с использованием выражения (4), слабо сказывается на общем поведении зависимостей $\gamma(f)$, просто приводя к понижению спектра когерентности. Поскольку на фазовый угол некоррелированные шумы не влияют, то на рис. 4 эти зависимости отсутствуют.

Наличие в лидарных сигналах когерентного шума опорного канала приводит к существенным искажениям спектров когерентности и фазы на средних и высоких ($f > 0,1$ Гц) частотах. Результаты расчетов на основе соотношений (9) и (10) показаны на рис. 3, 4 кривыми 4.

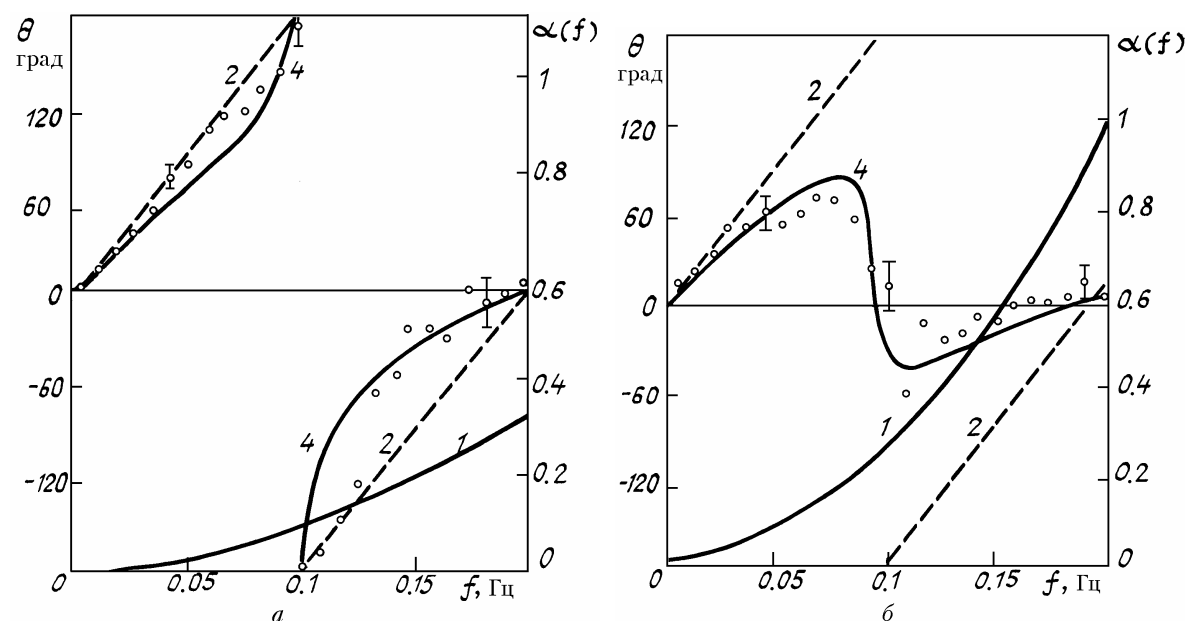


Рис. 4. Сопоставление теоретических и экспериментальных функций фазового угла. Исходные данные соответствуют рис. 3. Кривая 1 — $\alpha(f)$; кривые 2, 4 — теоретический расчет $\theta(f)$; точки — экспериментальные данные

В области низких и средних частот влияние коррелированного шума сказывается в уменьшении абсолютных значений спектров когерентности и фазы, при этом экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с результатами теоретических расчетов. В области высоких частот наблюдается повышение спектра когерентности, что объясняется преобладающим влиянием когерентного шума. В данной области частот, как следует из рисунка, степень нарастания функции когерентности возрастает с увеличением отношения шум/сигнал. При этом для $f > 0,1$ Гц видно существенное расхождение кривых

с экспериментальными данными $\gamma_{xy}^2(f)$. Вначале значения $\gamma_{xy}^2(f)$ возрастают, а затем прослеживается тенденция к их уменьшению. В целом в этой части рисунка значения спектров когерентности группируются в районе $\gamma_{xy}^2(f) = 0,1 \div 0,2$.

Такое расхождение расчетов с экспериментом, очевидно, объясняется одновременным влиянием двух факторов. Коррелированный шум, когда он становится преобладающим, приводит к увеличению степени когерентности, а некоррелированный — всегда к уменьшению. Строгий учет совместного влияния указанных факторов представляется затруднительным. Тем не менее, если предположить независимое влияние обоих типов шумов, то $\gamma_{xy}^2(f) = \gamma_{uw}^2(f)K_k(f)K_n(f)$. Здесь $K_k(f)$ и $K_n(f)$ — некоторые функции частоты ($K_k(f), K_n(f) < 1$), искажающие степень когерентности за счет соответственно коррелированного и некоррелированного шумов.

Тогда выражение для расчета $\gamma_{cxy}^2(f)$, за счет совместного влияния выглядит следующим образом:

$$\gamma_{cxy}^2(f) = \frac{\gamma_{kxy}^2(f) \cdot \gamma_{nxy}^2(f)}{\gamma_{uw}^2(f)}, \quad (11)$$

где $\gamma_{kxy}^2(f)$ и $\gamma_{nxy}^2(f)$ — соответственно функции когерентности, полученные за счет влияния коррелированного (кривая 2) и некоррелированного (кривая 3) шумов.

Результаты расчетов $\gamma_{cxy}^2(f)$, представленные на рис. 3 кривой 5, наилучшим образом из всех остальных согласуются с экспериментальными данными. Это позволяет предположить, что данный подход является оправданным.

Фазовые спектры подвержены меньшему воздействию шумов, но их вид значительно отличается друг от друга в зависимости от отношения сигнал/шум. При повышении значения $\alpha(f)$ (рис. 4, б) наблюдается существенная деформация спектра на средних частотах. Однако в соответствии с ранее сделанным выводом, при значениях $f = f_\pi$ шум не влияет на истинное значение фазового спектра. На рис. 4, а в этой точке кривые 2 и 4 пересекаются между собой, а при понижении отношения сигнал/шум (рис. 4, б) кривая 4 пересекает ось абсцисс. Тем не менее следует отметить, что определение f_π в последнем случае все-таки затруднено из-за высокой статистической погрешности, которая определяется низким значением спектра когерентности $\gamma_{xy}^2(f_\pi)$. Эту трудность можно преодолеть, если осуществить расчет фазового спектра для увеличенного разнесения r между измерительными точками трассы зондирования. Это означает настройку лидарной системы на аэрозольные неоднородности большего размера и, следовательно, смещение по спектру к низким частотам, где отношение сигнал/шум выше. Фазовый спектр по форме станет похожим на спектр, приведенный в левой части рисунка. Естественной потерей при этом будет повышение погрешности отсчета положения f_π из-за дискретного характера измеренных спектров, поскольку дискрет значения Δf определяется длиной реализации.

Таким образом, для применяемого класса аппаратуры, для реализуемых в атмосфере масштабах аэрозольных неоднородностей и средних значений скорости ветра применение спектрального анализа для статистической обработки лидарных данных возможно в области частот, ограниченной сверху $f \sim 0,1$ Гц.

1. Eloranta E. W., King J. M., Weinman J. A. // Appl. Meteor. 1975. № 14. P. 1485–1489.
2. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
3. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Задде, Э.С. Фердинандов и др. Новосибирск: Наука, 1985. 220 с.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
5. Аршинов Ю.Ф., Балин Ю.С. и др. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 2. С. 390–397.
6. Балин Ю.С., Беленький М.С., Разенков И.А., Сафонова Н.В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 8. С. 77–83.
7. Балин Ю.С., Беленький М.С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. № 10. С. 1060–1063.
8. Балин Ю.С., Байрашин Г.С., Бурков В.В. и др. // Проблемно-ориентированные измерительно-вычислительные комплексы. Новосибирск: Наука, 1986. С. 65–71.
9. Анисимов М.В., Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // ПТЭ. 1988. № 4. С. 196–199.
10. Каган Р.Л., Гандин Л.С. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 359 с.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
г. Томск

Поступила в редакцию
2 октября 1989 г.

Yu. S. Balin, I. A. Razenkov, A. P. Rostov. **Influence of Noises on the Statistical Properties of Lidar Return Signals from Aerosol.**

Distortions of the coherence and phase spectra of aerosol lidar returns due to the noise influence are studied both theoretically and experimentally. The analysis has been carried out based on the use of approach in which the sounding path's interval is considered as a linear system with one input and one output. A relationship is derived in the paper which allows one to obtain nonbiased estimation of wind velocity even from the phase spectra of lidar returns mixed with noise.