

1549727

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ, ОРДЕНА  
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э.БАУМАНА

УДК 621.378.1.

На правах рукописи

Митрофанов Андрей Леонидович

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ,  
ОСНОВАННЫХ НА ИЗМЕРЕНИИ ФУНКЦИИ КОГЕРЕНТНОСТИ ЧЕТВЕРТОГО  
ПОРЯДКА

Специальность 05.11.07 - Оптические и оптоэлектронные приборы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 1996

Работа выполнена в НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор В.Н.Рождествин

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор Пахомов И.И.

кандидат технических наук  
Фролов А.В.



Ведущее предприятие указано в решении специализированного Совета

Защита состоится "24" 1 / 11 1996 г. в \_\_\_\_\_  
часов на заседании специализированного Совета К 053. 15. 02 по  
присуждению ученых степеней кандидата технических наук МГТУ им.  
Н.Э.Баумана (107000, Москва, ул. 2-я Бауманская 5).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.  
Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1996 г.

Ученый секретарь

специализированного Совета

доктор технических наук, профессор

Матвеев В.А.

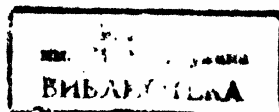
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1549427

Актуальность работы. В ряде задач лазерной локации кроме определения расстояния до объекта необходимо получить информацию о поперечных размерах объекта и форме его поверхности. Особенно актуальна такая задача в случаях, когда угловое разрешение приемной оптической системы недостаточно для получения изображения объекта. Информация о поперечных размерах объекта и форме его поверхности используется в задачах селекции и распознавания оптически неразрешаемых объектов. Геометрическая форма видимой части поверхности объекта или источника излучения связана преобразованием Фурье с функцией когерентности (ФК) 2-го порядка собственного или рассеянного поверхностью объекта излучения. Поэтому при лоцировании объекта ультракороткими импульсами лазерного излучения анализ ФК рассеянного объектом излучения позволяет осуществить реконструкцию освещенной части его поверхности. Для осесимметричных объектов информацию об их поперечных размерах дает угловой радиус  $\gamma$  объекта. Величину  $\gamma$  можно рассчитать по расстоянию  $\rho_0$  от главного максимума ФК до ее первого локального минимума.

ФК 4-го порядка излучения, рассеянного объектом с ламбертовской поверхностью, пропорциональна квадрату ФК 2-го порядка. Поэтому измерение ФК 2-го порядка может производиться путем корреляции интенсивностей регистрируемого излучения в различных точках пространства. Такой метод характеризуется высокой точностью измерения величины  $\gamma$ , составляющей  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  рад, и относительной устойчивостью к малым флуктуациям показателя преломления в атмосферном канале локации (АКЛ). Однако, метод корреляции интенсивностей неприменим при локации неподвижных объектов — в этом случае распределение интенсивности излучения, рассеянного объектом, существенно отличается от распределения интенсивности теплового источника. Реализация метода корреляции интенсивностей в режиме импульсно-периодической локации удаленных объектов требует коррекции отсчетов интенсивности излучения в каждом цикле локации. Это обусловлено присущей такому режиму амплитудно-временной нестабильностью излучения передатчика лазерной информационной системы (ЛИС).

Предложенный в диссертационной работе метод "мгновенного" измерения ФК посредством вычисления пространственной свертки



поля интенсивностей снимает указанные ограничения применения классического метода корреляции интенсивностей в ЛИС и сохраняет высокую точность измерений.

Цель исследований. Разработка метода измерения угловых размеров оптически неразрешаемых объектов, основанного на измерении ФК 4-го порядка, обеспечивающего потенциальную точность измерений не менее  $10^{-8}$  рад и устойчивого к флуктуациям показателя преломления в АКЛ.

Методы исследований. В диссертационной работе использовались методы корреляционного анализа оптических полей, теории вероятностей и математической статистики и моделирования случайных процессов на ЭВМ. Экспериментальная проверка полученных результатов проводилась методом натурного моделирования измерений ФК 4-го порядка излучения псевдотеплового источника и его углового радиуса.

Научная новизна. В процессе выполнения теоретических и экспериментальных исследований в диссертационной работе получены новые результаты:

1. Предложено "мгновенное" измерение ФК 4-го порядка путем вычисления пространственной свертки поля интенсивностей. Определены условия применимости метода.

2. Разработан алгоритм расчета начальных моментов распределений оценок отсчетов ФК 4-го порядка, измеряемой методом дискретной пространственной свертки. Показана несмещенность и состоятельность оценки каждого отсчета.

3. Показано, что оценка углового радиуса объекта в условиях турбулентного АКЛ является асимптотически несмещенной, а влияние АКЛ на оценку ФК 4-го порядка может быть учтено при известных параметрах атмосферной турбулентности.

4. Разработан алгоритм численного моделирования процесса измерения ФК 4-го порядка методом дискретной пространственной свертки поля интенсивностей. Найдены плотности вероятностей оценок отсчетов и плотность вероятности распределения положения первого локального минимума ФК 4-го порядка.

5. Предложен метод измерения углового радиуса объекта. Найден доверительный интервал оценок углового радиуса и показана возможность его измерения с потенциальной точностью не менее  $2,3 \cdot 10^{-8}$  рад.

Практическая ценность. Разработанный метод оценки углового радиуса объекта можно применить в ЛИС, осуществляющих селекцию целей. При известном расстоянии до лоцируемого объекта возможно измерение его радиуса с потенциальной точностью 0,5%.

Внедрение работы. Материалы диссертационной работы внедрены в НИР НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э.Баумана и в учебный процесс МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на II Международной конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук" - 1993 г., Москва; научном семинаре кафедры Теории колебаний МГУ - 1994 г., Москва; совместном заседании НТС НИИ РЛ и преподавателей кафедры РЛ-1 МГТУ - 1994 г., Москва.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликованы тезисы докладов и два отчета по НИР, одна работа находится в печати.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа содержит 130 страниц, включая 94 машинописных страниц текста, 18 страниц с рисунками, 7 страниц с таблицами, 3 страницы приложений, 8 страниц списка литературы, содержащего 88 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность разработки новых методов определения поперечных размеров и формы поверхности объекта в лазерной локации. Рассматриваются достоинства и недостатки метода корреляции интенсивностей при решении задачи измерения углового радиуса оптически неразрешаемого объекта. Поставлена цель работы, определены задачи исследований и дано краткое описание работы по разделам.

В первом разделе диссертационной работы рассматриваются методы измерения ФК 4-го порядка излучения, рассеянного объектом с ламбертовской поверхностью. Проведен обзор методов построения мгновенной оценки ФК 4-го порядка и параметра  $k_0$  по дискретной пространственной выборке амплитуд отсчетов поля интенсивностей. Показаны их достоинства и недостатки.

Рассмотрена следующая локационная задача. Объект облучается пространственно-когерентным квазимонохроматическим излучением. Излучение, рассеянное объектом, регистрируется двумя фотодетекторами (ФД), координаты которых заданы радиус векторами  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$ , в совпадающие моменты времени. Плоскости наблюдения и объекта параллельны. Начало отсчета системы координат совпадает с геометрическим центром объекта. При большом расстоянии  $R$  до объекта ФК 4-го порядка рассеянного излучения имеет вид:

$$\Gamma_{1,2}^{(2,2)}(\delta\vec{r}, \tau) = \langle I(\vec{r}, t) I(\vec{r} + \delta\vec{r}, t + \tau) \rangle, \quad (1)$$

где  $t$  - текущее время,  $I(\vec{r}, t) = E(\vec{r}, t)E(\vec{r}, t)^*$  - интенсивность излучения,  $E(\vec{r}, t)$  - комплексный аналитический сигнал,  $\delta\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$ ,  $\tau = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|/c$  ( $c$  - скорость света в среде распространения). Полагалось, что время регистрации излучения существенно больше времени когерентности.

При диффузном рассеянии лазерного излучения поверхностью объекта  $\Gamma_{1,2}^{(2,2)}(\delta\vec{r}, \tau)$  связана с квадратом модуля степени когерентности  $|\gamma(\delta\vec{r}, \tau)|^2$  уравнением:

$$\Gamma_{1,2}^{(2,2)}(\delta\vec{r}, \tau) = \langle I(\vec{r}_1, t) \rangle \langle I(\vec{r}_1 + \delta\vec{r}, t + \tau) \rangle (1 + |\gamma(\delta\vec{r}, \tau)|^2), \quad (2)$$

где  $\gamma(\delta\vec{r}, \tau) = \Gamma_{1,2}^{(1,1)}(\delta\vec{r}, \tau) / \langle I(\vec{r}, t) \rangle$ , а

$$\Gamma_{1,2}^{(1,1)}(\delta\vec{r}, \tau) = \langle E(\vec{r}_1, t) E^*(\vec{r}_1 + \delta\vec{r}, t + \tau) \rangle. \quad (3)$$

В методе корреляции интенсивностей ФК 4-го порядка (1) измеряется как взаимная корреляционная функция двух случайных процессов:

$$\hat{\Gamma}_{1,2}^{(2,2)}(\delta\vec{r}, \tau) = 1/T \int_0^T I(\vec{r}, t) I(\vec{r} + \delta\vec{r}, t + \tau) dt, \quad (4)$$

где  $T$  - временной интервал наблюдения. По полученной оценке  $\hat{\Gamma}_{1,2}^{(2,2)}(\delta\vec{r}, \tau)$  определяется искомое значение параметра  $\rho_0$ .

Для однородного случайного поля интенсивностей предложено получать оценку ФК посредством вычисления пространственной свертки поля интенсивностей:

$$\hat{\Gamma}_{1,2}^{(2,2)}(\delta\vec{r}, \tau) = 1/S_B \int_{S_B} I(\vec{r}, t) I(\vec{r} + \delta\vec{r}, t + \tau) d\vec{r}, \quad (5)$$

где  $S_B$  - выбранное пространство наблюдения в плоскости  $B$ . Если

$R^2 \approx S_B$  и  $S_B \perp OZ$ , для плоского объекта  $\tau \approx 0$ .

Для осесимметричных объектов можно использовать свертку вида:

$$\hat{\Gamma}_{1,2}^{(2,2)}(\delta \vec{r}, 0) = 1/L_B \int_{L_B} I(\vec{r}, t) I(\vec{r} + \delta \vec{r}, t) d\vec{r}, \quad (6)$$

где  $L_B$  - произвольно выбранный отрезок прямой наблюдения,  $L_B \approx B$ .

Оценка (6) реализована методом дискретной пространственной свертки поля интенсивностей. Рассеянное объектом излучение регистрируется одновременно всеми  $L$  точечными ФД линейки, расположенной в плоскости  $B$  и ориентированной вдоль оси абсцисс системы координат. Координаты каждого ФД линейки однозначно определяются его номером  $i$ :  $((i-1)\Delta x, 0, -R)$ ;  $\Delta x$  - шаг дискретизации. В соответствии с (6) оценки отсчетов ФК 4-го порядка ищутся в виде:

$$\hat{\Gamma}_{1,k}^{(2,2)}(k\Delta x, 0) = 1/N \sum_{i=1}^N I_i I_{i+k}, \quad (7)$$

где  $k$  - номер отсчета ФК,  $k = 0, \dots, k_{\max}$ ,  $k_{\max} < L-N$ ,  $N < L - k_{\max}$ . Плотность вероятности распределения оценки  $\hat{k}_0$  обозначена через  $W(\hat{k}_0)$ , а через  $k_0$  обозначен номер отсчета ФК, соответствующий ее первому локальному минимуму. Показано, что максимальный шаг дискретизации для объекта - диска радиуса  $a$  - не должен превышать значения  $\rho_0/8$ .

Установлено, что методы корреляции интенсивностей и пространственной свертки дают совпадающую оценку  $\hat{\rho}_0$ , стремящуюся к истинному значению, только в тех случаях, когда поле излучения (в физическом смысле) стационарно и однородно. Показано, что метод корреляции интенсивностей слабо чувствителен к неоднородности, а метод пространственной свертки слабо чувствителен к нестационарности поля интенсивностей.

Показано, что в случаях, когда объект наблюдается под малым углом возвышения или плоскости объекта и наблюдения непараллельны, ФК 4-го порядка и оценка параметра  $\rho_0$  являются функциями параметра  $\tau$  даже при одновременной регистрации излучения. Дана оценка влияния неоднородности поля интенсивностей в плоскости регистрации на смещение оценок отсчетов ФК 4-го порядка. Показана возможность получения несмещенной оценки ФК 4-го порядка в случае неоднородного поля интенсивностей.

Во втором разделе диссертационной работы найдены статистические характеристики оценок отсчетов ФК 4-го порядка, параметра  $k_0$  и углового радиуса лоцируемого объекта.

Моменты оценки каждого  $k$ -го отсчета  $\hat{\Gamma}_{1,k}^{(2,2)}(k\Delta x, 0)$  определя-

ются из выражений:

$$\tilde{M}_2(k;N) = I/N^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \langle I_i I_j I_{i+k} I_{j+k} \rangle, \quad (7)$$

$$\tilde{M}_3(k;N) = I/N^3 \sum_{i,j,l=1}^N \sum_{m=1}^N \langle I_i I_j I_l I_{i+k} I_{j+k} I_{l+k} \rangle, \quad (8)$$

$$\tilde{M}_4(k;N) = I/N \sum_{i,j,l,m=1}^N \sum_{p=1}^N \langle I_i I_j I_l I_m I_{i+k} I_{j+k} I_{l+k} I_{m+k} \rangle. \quad (9)$$

.....

$$\tilde{M}_P(k;N) = I/N^P \sum_{i,j}^N \sum_{p=1}^N \dots \sum_{p=1}^N \langle I_i I_j \dots I_m I_{i+k} I_{j+k} \dots I_{p+k} \rangle. \quad (10)$$

Выражения в угловых скобках (7)...(10) сводятся к суммам произведений всех моментов второго порядка аналитических сигналов. Искомые разложения содержат  $1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (M-1)$  слагаемых, каждое из которых состоит из  $M/2$  произведений, где  $M$  - порядок момента аналитического сигнала. Величина  $M$  принимает значения 8, 12 и 16 для 2-го, 3-го и 4-го моментов отсчета ФК соответственно.

Разработан алгоритм расчета моментов распределений  $\tilde{M}_2(k;N)$ ,  $\tilde{M}_3(k;N)$ ,  $\tilde{M}_4(k;N)$ , который требует в 10...1000 раз меньших затрат машинного времени по отношению к прямому расчету по формулам (7)...(9), причем величина выигрыша растет по мере увеличения порядка рассчитываемого момента и параметра  $N$ .

Приведено описание алгоритма расчета начальных моментов для  $M = 12$ . Выражение в угловых скобках формулы (3) после перехода от отсчетов интенсивностей к отсчетам аналитических сигналов имеет вид:

$$\begin{aligned} \langle I_1 I_j I_l I_{i+k} I_{j+k} I_{l+k} \rangle &= \langle E_1^* E_j^* E_l^* E_1 E_{i+k} E_{j+k} E_{l+k} \rangle = \\ &= \langle E_1^* E_1 \rangle \langle E_j^* E_j \rangle \langle E_l^* E_l \rangle \langle E_{i+k}^* E_{i+k} \rangle \langle E_{j+k}^* E_{j+k} \rangle \langle E_{l+k}^* E_{l+k} \rangle + \dots \end{aligned} \quad (11)$$

Для анализа выражения (11) введена формальная запись:

$$\langle I_1 I_j I_l I_{i+k} I_{j+k} I_{l+k} \rangle = \langle e_1 e_2 e_3 e_4 e_5 e_6 e_7 e_8 e_9 e_{10} e_{11} e_{12} \rangle. \quad (12)$$

Так как для стационарного аналитического сигнала имеет место равенство  $\langle E_\mu E_\nu \rangle = \langle E_\mu^* E_\nu^* \rangle = 0$  для любых индексов  $\mu$  и  $\nu$ , то и

$$\langle e_1 e_3 \rangle = \langle e_2 e_4 \rangle = \dots = \langle e_{10} e_{12} \rangle = 0.$$

Индексы обозначений аналитических сигналов в 4-й, 6-й, 8-й и т. д. позициях формальной записи, начиная с последней, последовательно переставлялись так, чтобы индекс второго

сомножителя в паре всегда был больше индекса первой записи, а разность индексов не была четной. Получено 720 ненулевых членов разложения, первые 4 из которых имеют вид:

$$\begin{aligned} &\langle e_1 e_2 \rangle \langle e_3 e_4 \rangle \langle e_5 e_6 \rangle \langle e_7 e_8 \rangle \langle e_9 e_{10} \rangle \langle e_{11} e_{12} \rangle; \\ &\langle e_1 e_2 \rangle \langle e_3 e_4 \rangle \langle e_5 e_6 \rangle \langle e_7 e_8 \rangle \langle e_9 e_{12} \rangle \langle e_{10} e_{11} \rangle; \\ &\langle e_1 e_2 \rangle \langle e_3 e_4 \rangle \langle e_5 e_6 \rangle \langle e_7 e_{10} \rangle \langle e_8 e_9 \rangle \langle e_{11} e_{12} \rangle; \\ &\langle e_1 e_2 \rangle \langle e_3 e_4 \rangle \langle e_5 e_6 \rangle \langle e_7 e_{10} \rangle \langle e_8 e_{11} \rangle \langle e_9 e_{12} \rangle. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} &\langle I_1 I_j I_{1+k} I_{1+k} I_{1+k} \rangle = \\ &= \langle E_1 E_1^* \rangle \langle E_j E_j^* \rangle \langle E_1 E_1^* \rangle \langle E_{1+k} E_{1+k}^* \rangle \langle E_{j+k} E_{j+k}^* \rangle \langle E_{1+k} E_{1+k}^* \rangle + \\ &+ \langle E_1 E_1^* \rangle \langle E_j E_j^* \rangle \langle E_1 E_1^* \rangle \langle E_{1+k} E_{1+k}^* \rangle \langle E_{j+k} E_{1+k}^* \rangle \langle E_{j+k} E_{1+k}^* \rangle + \\ &+ \langle E_1 E_1^* \rangle \langle E_j E_j^* \rangle \langle E_1 E_1^* \rangle \langle E_{1+k} E_{j+k}^* \rangle \langle E_{1+k} E_{j+k}^* \rangle \langle E_{1+k} E_{1+k}^* \rangle + \\ &\dots \\ &+ \langle E_1 E_{1+k}^* \rangle \langle E_1^* E_{1+k} \rangle \langle E_j E_{j+k}^* \rangle \langle E_j^* E_{j+k} \rangle \langle E_1 E_{1+k}^* \rangle \langle E_1^* E_{1+k} \rangle. \quad (13) \end{aligned}$$

Анализ (13) показывает, что существует только 16 различных ненулевых пар сомножителей  $\langle E_\mu E_\nu^* \rangle$ , так как  $\langle E_\mu E_\nu^* \rangle = \langle E_\nu^* E_\mu \rangle^* = \Gamma_{\mu, \nu}^{(I, I)}(A \cdot \Delta x, 0)$ , где  $A = A(1, j, 1, k)$ . Кроме того, каждый член разложения (13) является действительной и неотрицательной величиной. Поэтому каждое произведение пары сомножителей в (13) можно заменить модулем ФК второго порядка. Установлено, что аргументы функции  $|\Gamma_{\mu, \nu}^{(I, I)}(|A \cdot \Delta x|, 0)|$  при вычислении сумм в (13) повторяются при фиксированных индексах суммирования  $i, j, l$ :

при  $l \neq i$   $A(1, i, j, k) = A(1, i, j, k)$  для  $\forall i, j: l-i = l-j = \text{const}$ ;

при  $i \neq l$   $A(1, i, j, k) = A(1, i, j, k)$  для  $\forall l, j: i-l = i-j = \text{const}$ ;

при  $j \neq l$   $A(1, i, j, k) = A(1, i, j, k)$  для  $\forall i, j: j-l = j-i = \text{const}$ .

Числа совпадающих аргументов  $M_i, M_j, M_l$  (при каждом фиксированном индексе суммирования  $i, j, l$ ) даются выражениями:

$$M_i = N+1 - \max\{1, j\}, M_j = N+1 - \max\{1, j\}, M_l = N+1 - \max\{1, i\}.$$

Учет повторяемости сомножителей формальной записи позволил добиться дальнейшего сокращения числа операций, и, следовательно, времени расчета моментов (7)...(10). Для момента 4-го порядка  $\tilde{M}_4(k; N)$  число комбинаций сомножителей равно 29, а разложение содержит 40320 слагаемых.

На рис. 1 представлены результаты расчета дисперсий  $D(k; N) =$

$= \tilde{M}_2(k;N) - \tilde{M}_1(k;N)^2$  распределений оценок отсчетов ФК 4-го порядка для различных значений  $N$  при  $k_0 = 20$ , и соответствующие им зависимости  $\tilde{M}_3(k;N)$ . Анализ полученных данных показал, что при фиксированном отношении  $\Delta x/\rho_0$  дисперсии оценок отсчетов ФК 4-го порядка убывают по мере роста отношения  $N/k_0$ , что подтвердило состоятельность этих оценок. Исследование соответствия рассчитанных моментов распределений  $W(\hat{\Gamma}(k);N)$  отсчетов ФК моментам известных одно- и двухпараметрических распределений случайных величин и моментам четырехпараметрического распределения Пирсона не дало положительных результатов. При этом рассчитанные значения начальных моментов распределений оценок отсчетов ФК 4-го порядка удовлетворяли требованиям, следующим из неравенства Коши-Буняковского, что свидетельствует о корректности произведенного анализа.

Функции плотностей вероятностей  $W(\hat{\Gamma}(k);N)$  и  $W(\hat{k}_0;N)$  были получены путем численного моделирования процесса измерения ФК 4-го порядка, для которого был применен квадратурный метод формирования поля интенсивностей. Амплитудный отсчет этого поля имеет вид:

$$I(x,y) = \{\tilde{E}^{(r)}(x,y)^2 + \tilde{E}^{(i)}(x,y)^2\}^{1/2},$$

где  $\tilde{E}^{(r)}(x,y)$  и  $\tilde{E}^{(i)}(x,y)$  - некоррелированные действительная и мнимая компоненты отсчета огибающей аналитического сигнала. Используя принцип суперпозиции и переходя к дискретной по пространству форме представления квадратурных компонент поля с одинаковым шагом дискретизации по осям абсцисс и ординат  $\Delta x$ , имеем:

$$\tilde{E}_{l,m}^{(r)} = \sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} \tilde{E}_{i,j}^{(r)} \operatorname{Re} \{ \Gamma^{(I,I)}(\Delta x[(i-1)^2 + (j-m)^2]^{1/2}, 0) \};$$

$$\tilde{E}_{l,m}^{(i)} = \sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} \tilde{E}_{i,j}^{(i)} \operatorname{Re} \{ \Gamma^{(I,I)}(\Delta x[(i-1)^2 + (j-m)^2]^{1/2}, 0) \},$$

где  $l = 1, \dots, L$ ;  $m = 1$  для случая регистрации излучения линейкой ФД,  $\Delta x L_x$ ,  $\Delta x L_y$  - размер области суммирования компонент поля,  $\tilde{E}_{i,j}^{(r)} = \tilde{E}^{(r)}(i\Delta x, j\Delta x)$ ,  $\tilde{E}_{i,j}^{(i)} = \tilde{E}^{(i)}(i\Delta x, j\Delta x)$ . Для осесимметричного объекта достаточно ограничиться значениями  $\Delta x L_x = \Delta x L_y = 2\rho_0$ .

При моделировании амплитуд отсчетов поля интенсивностей были заданы значения  $L = 1000$  и  $k_0 = 20$ . Объем выборки реализа-

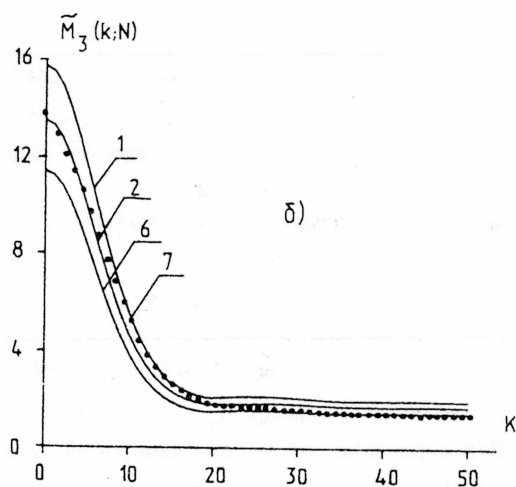
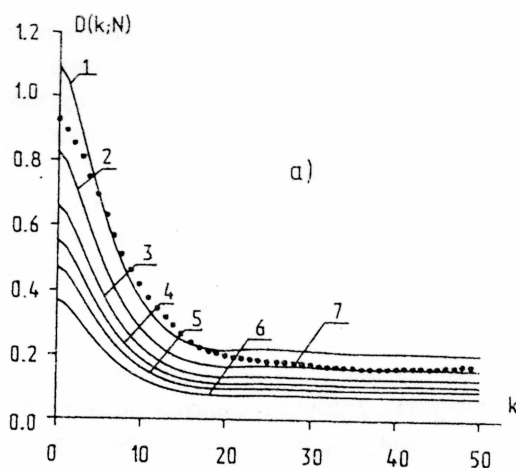


Рис.1. Дисперсии (а) и начальные моменты 3-го порядка распределений (б) оценок отсчетов ФК 4-го порядка, измеряемой методом дискретной пространственной свертки при  $k_0 = 20$ :  $N = 300$  (1);  $N = 400$  (2);  $N = 500$  (3);  $N = 600$  (4);  $N = 700$  (5);  $N = 900$  (6), а также экспериментально полученные значения дисперсий и моментов 3-го порядка (7).

ций оценок отсчетов ФК 4-го порядка и оценок параметра  $k_0$  составил  $3 \cdot 10^4$ . Отмечено большое значение дисперсии распределения оценки  $\hat{k}_0$ , которое было подтверждено при анализе распределений  $W(\hat{k}_0; N)$ . Функция  $W(\hat{k}_0; N)$  относится к классу двухмодальных распределений. Второй максимум ожидаемых значений  $k_0$  соответствует положению второго локального минимума ФК.

Вследствие асимметрии распределения  $W(\hat{k}_0; N)$  оценка  $\hat{k}_0$ , полученная путем усреднения результатов последовательных измерений, оказывается смещенной. Предложено построение несмещенной оценки  $\hat{k}_0$  как наивероятного значения  $\hat{k}_0$  в серии последовательных независимых измерений. Показано, что при числе циклов локации  $K > 300$  такая оценка является несмещенной для  $N > 600$ .

Ошибка измерения углового радиуса объекта  $\Delta\gamma$ , соответствующая ошибке определения  $\rho_0$  в пределах одного шага дискретизации при  $R \gg a$ , дается выражением:

$$\Delta\gamma = \frac{0,61\lambda \Delta x}{\rho_0(\rho_0 + \Delta x)} = \frac{a^2 \Delta x}{(0,61\lambda R + a\Delta x)R} \quad (14)$$

Полагая  $\Delta x = \rho_0/20$ ,  $a = 1$  м,  $R = 10^5$  м,  $\lambda = 0,53$  мкм, получим значение  $\Delta\gamma = 4,8 \cdot 10^{-7}$  рад, что соответствует ошибке в определении радиуса объекта  $\Delta a = 4,8 \cdot 10^{-2}$  м.

Предложен метод, позволяющий измерять  $\rho_0$  с погрешностью меньшей  $\Delta x$  построением оценки вида:

$$k_0 = \frac{(\hat{k}_H - I) \hat{W}((\hat{k}_H - I); N) + \hat{k}_H \hat{W}(\hat{k}_H; N) + (\hat{k}_H + I) \hat{W}((\hat{k}_H + I); N)}{\hat{W}((\hat{k}_H - I); N) + \hat{W}(\hat{k}_H; N) + \hat{W}((\hat{k}_H + I); N)}, \quad (15)$$

где  $\hat{k}_H$  - наивероятное значение  $\hat{k}_0$  в серии  $K$  последовательных измерений. Моделирование процесса измерения углового радиуса объекта показало несмещенность оценки (15) и позволило найти ее доверительный интервал. Полученное распределение оценки  $W(k_0; K)$  имеет три явно выраженных максимума. Центральный максимум соответствует истинному значению  $k_0$ , а боковые - промахам при определении  $k_0$ . Вероятность промахов быстро снижается при увеличении числа циклов локации  $K$ . Центральный максимум  $W(k_0)$  хорошо аппроксимируется нормальным законом распределения. Промахи могут быть устранены на основании априорной информации об угловых размерах объекта, а также в результате поиска наивероятного значения  $\hat{k}_0$  в нескольких независимых сериях измерений.

Установлено, что при  $K > 2000$  выигрыш по дисперсии оценки (15) становится незначительным по отношению к увеличению времени наблюдения. Оценка (15) параметра  $\rho_0$  обеспечивает измерение  $\rho_0$  с точностью до сотых долей шага дискретизации  $\Delta x$ . Дальнейшее увеличение точности обеспечивается усреднением результатов нескольких независимых измерений  $\rho_0$ . При  $K$  равном 512 и числе усреднений равном 10 доверительный интервал для оценки  $\rho_0$  составил  $\delta \rho_0 = 4,78 \cdot 10^{-2} \Delta x$ . Доверительный интервал оценки углового радиуса находится по формуле:

$$\delta \gamma = \frac{0,61 \lambda \delta x}{\rho_0(\rho_0 + \delta x)}.$$

При тех же значениях параметров  $R$ ,  $\lambda$ ,  $a$  и  $\rho_0$  имеем  $\delta \gamma = \pm 2,30 \cdot 10^{-8}$  рад, что соответствует ошибке в измерении радиуса объекта  $\delta a = \pm 2,30 \cdot 10^{-3}$  м. Такое значение  $\delta \gamma$  согласуется с достигнутой точностью измерения углового радиуса объекта методом корреляции интенсивностей.

Рассмотрено влияние АКЛ на оценку углового радиуса объекта, определяемого по оценкам отсчетов ФК 4-го порядка. Нарушение когерентности лазерного излучения, обусловленное рассеянием на метеообразованиях, и декорреляция излучения в силу рассеяния на неоднородностях показателя преломления воздуха в АКЛ рассматривались раздельно. Показано, что для объекта с ламбертовской поверхностью ФК 4-го порядка в турбулентном АКЛ имеет вид:

$$\Gamma^{(2,2)}(\delta \vec{r}, 0) = \langle I \rangle^2 [1 + \gamma_0^2(\delta \vec{r}, 0)^2 F(\delta \vec{r})^2],$$

где  $\gamma_0^2(\delta \vec{r}, 0)$  – квадрат модуля степени когерентности излучения в отсутствие турбулентности,  $F(|\delta \vec{r}|)$  – функция, учитывающая влияние турбулентности, совпадающая с ФК сферической волны в АКЛ. Показано, что оценка параметра  $\rho_0$  в турбулентном АКЛ является асимптотически несмещенной.

В третьем разделе диссертационной работы приведены результаты экспериментальных исследований по измерению ФК 4-го порядка методами корреляции интенсивностей и пространственной свертки, а также результаты исследований по измерению углового радиуса объекта.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, предназначенном для комплексных исследований когерентных свойств излучения, который обеспечивал: формирование псевдотеплового излучения; регистрацию амплитуд поля интенсивностей в различных точках пространства; преобразование измеренных величин в цифро-

вую форму с последующей обработкой на ПЭВМ. Были проведены исследования: стабильности излучения лазера; характеристик источника посвядотеплового излучения; линейности приемника излучения; контрастности спекл-структур.

Для увеличения интенсивности излучения в окрестности наблюдения вместо диффузно рассеивающего объекта использовалась круглая диафрагма диаметром 2 мм, перед которой был установлен плоский стеклянный диск с односторонним матированием (средний шаг шероховатостей - 20 мкм). Регистрация излучения осуществлялась линейкой ПЭС, время накопления заряда фотоприемного элемента которой составляло 4 мс. Это обеспечивало усреднение высокочастотных флуктуаций интенсивности излучения лазера. Аналоговый сигнал с выхода линейки ПЭС поступал на вход восьмиразрядного АЦП, сопряженного с ПЭВМ IBM-PC/AT. Для получения независимых оценок ФК 4-го порядка после каждого ее измерения диск поворачивался на фиксированный угол менее  $3^\circ$  шаговым двигателем через редуктор с люфтовыбирающими шестернями. Дробное передаточное отношение редуктора обеспечивало неповторяемость реализаций отсчетов интенсивностей для более чем  $10^5$  шагов двигателя. Значение параметра  $\rho_0$ , рассчитанное в соответствии с теоремой Ван-Циттера-Цернике при расстоянии от источника до ПЭС  $R = 660$  мм, составило 320 мкм, что соответствовало 20 интервалам пространственной дискретизации линейки ПЭС.

На рис. 2 представлены значения отсчетов ФК 4-го порядка, полученные методами корреляции интенсивностей и дискретной пространственной свертки, а также теоретическая кривая. На рис.3 приведены гистограммы оценок параметра  $k_0$  полученные методом численного моделирования и по результатам эксперимента. Изрезанность экспериментальной гистограммы  $\hat{W}(\hat{k}_0; N)$  в области значений  $k > k_0$  можно объяснить недостаточным числом разрядов АЦП.

Результаты теоретического расчета начальных моментов распределений оценок отсчетов ФК 4-го порядка, моментов, полученных путем численного моделирования и в ходе экспериментальных исследований приведены в табл. I. Сравнение результатов, полученных независимыми способами, дает основание считать результаты эксперимента достоверными, теоретический расчет начальных моментов распределений оценок отсчетов ФК 4-го порядка корректным, а математическую модель адекватной.

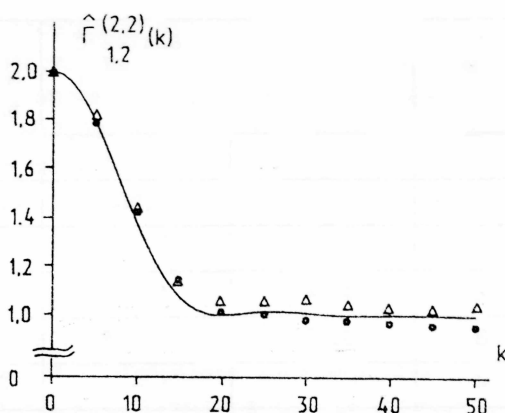


Рис.2. Оценки отсчетов ФК 4-го порядка, измеренные методами: корреляции интенсивностей (●) и дискретной пространственной свертки; при  $k_0 = 20$  и  $N = 400$  (Δ), а также теоретическая ФК 4-го порядка (—).

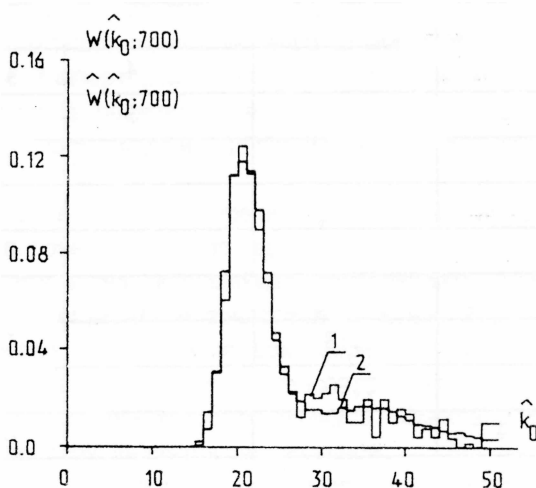


Рис.3. Гистограмма экспериментальных значений параметра  $k_0$  (1) и гистограмма значений  $\hat{k}_0$ , полученная путем численного моделирования.

Таблица I.

| Номер отсчета | Порядок момента | Эксперимент | Аналитический расчет | Численное моделирование |
|---------------|-----------------|-------------|----------------------|-------------------------|
| 0             | 2               | 4,80        | 4,824                | 4,892                   |
|               | 3               | 13,65       | 13,503               | 14,460                  |
|               | 4               | -           | -                    | 51,626                  |
| 4             | 2               | 4,04        | 4,048                | 4,281                   |
|               | 3               | 10,55       | 11,037               | 11,827                  |
|               | 4               | -           | -                    | 39,833                  |
| 8             | 2               | 3,02        | 2,778                | 3,021                   |
|               | 3               | 6,77        | 6,507                | 7,089                   |
|               | 4               | -           | -                    | 20,201                  |
| 12            | 2               | 2,09        | 1,720                | 1,958                   |
|               | 3               | 3,89        | 3,418                | 3,717                   |
|               | 4               | -           | -                    | 8,595                   |
| 16            | 2               | 1,50        | 1,264                | 1,399                   |
|               | 3               | 2,34        | 2,123                | 2,227                   |
|               | 4               | -           | -                    | 4,298                   |
| 20            | 2               | 1,24        | 1,168                | 1,224                   |
|               | 3               | 1,74        | 1,778                | 1,797                   |
|               | 4               | -           | -                    | 3,167                   |
| 24            | 2               | 1,18        | 1,194                | 1,232                   |
|               | 3               | 1,60        | 1,849                | 1,803                   |
|               | 4               | -           | -                    | 3,164                   |

Для нахождения точности оценки (15) параметра  $\rho_0$  и определения чувствительности предложенного метода измерения углового радиуса были проведены экспериментальные исследования по измерению углового радиуса источника излучения. Угловой радиус источника составлял  $3,58 \cdot 10^{-4}$  рад. Чувствительность метода измерения 14

углового радиуса определялась по отличию измеренных значений  $\rho_0$  при различных расстояниях до источника излучения. Значение  $K$  при измерениях составляло 512, а число усреднений было равно 10. При изменении расстояния от источника до приемника излучения с 12 м до 12,005 м, значения параметра  $\rho_0$  составили  $\hat{\rho}_0 = (18,93 \pm 5,29) \cdot \Delta x$  и  $\hat{\rho}_0 = (18,89 \pm 7,59) \cdot \Delta x$ . Такому изменению расстояния  $R$  соответствует изменение углового радиуса источника  $6,4 \cdot 10^{-7}$  рад. Проверка значимости расхождения дисперсий в сериях измерений при  $R = 12$  м и  $R = 12,005$  м показала, что такое расхождение не является значимым с надежностью 0,95. При этом расхождение средних значений  $\rho_0$  является значимым с той же надежностью. Таким образом, результаты экспериментальных исследований измерения углового радиуса объекта подтверждают достоверность теоретически найденного доверительного интервала оценки параметра  $\rho_0$ . Экспериментально установленная чувствительность метода измерения углового радиуса объекта при этом составила  $6,4 \cdot 10^{-7}$  рад.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Предложен метод пространственной свертки поля интенсивностей для получения оценки ФК 4-го порядка излучения, рассеянного объектом с ламбертовской поверхностью. Показана несмещенность и состоятельность оценок отсчетов ФК 4-го порядка. Найдены статистические характеристики оценки положения первого локального минимума ФК.

Предложен метод измерения углового радиуса объекта с ламбертовской поверхностью по оценкам отсчетов ФК 4-го порядка рассеянного излучения позволяющий осуществлять измерения углового радиуса с потенциальной точностью не менее  $2,3 \cdot 10^{-8}$  рад.

Показано, что влияние атмосферной турбулентности на оценку ФК 4-го порядка может быть учтено, при известных параметрах турбулентности. Оценка углового радиуса объекта в турбулентной атмосфере при этом является несмещенной.

Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. С.А.Зубцов, А.Л.Митрофанов. Оценка устойчивости и точности работы лазерной информационной системы, основанной на измерении функции когерентности в турбулентной атмосфере. Тез. докладов II Международной конференции // Актуальные проблемы фун-

даментальных наук. - М., - 1993. - С. 187. Часть результатов, полученных при выполнении работы, приведены в отчетах по НИР НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э.Баумана.