10. М е т о д поиска квазирешений в задаче лазерного оптико-акустического газоанализа / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев, Ю.В. Федотов // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 4. – С. 388–392.

Статья поступила в редакцию 2.10.2007

Юрий Викторович Федотов родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области лазерной техники.

Yu.V. Fedotov (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), researcher of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of laser technology.

ОПТИКА

УДК 681.78.01: 681.3(075.8)

Ю. А. Л у ш и н

ЗОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В рамках скалярной теории дифракции предложен и теоретически обоснован зонный способ измерения оптических передаточных функций крупногабаритных оптических систем, позволяющий объективно оценить качество приемных систем оптико-электронных приборов на этапе выходных испытаний без использования уникальных крупногабаритных коллимирующих устройств.

Одной из самых больших проблем при контроле качества крупногабаритных оптических систем является необходимость заполнения всего входного зрачка контролируемой системы коллимированным потоком излучения. При этом аберрационное качество коллимирующей оптической системы должно быть не хуже качества контролируемой [1], что является сложной технической и экономической проблемой.

Далее предложен зонный способ измерения некогерентных оптических передаточных функций (ОПФ) приемных систем оптико-электронных приборов (ОЭП) с крупногабаритной оптикой без использования уникальных крупногабаритных коллимирующих оптических систем.

Как известно [2–6], некогерентная оптическая передаточная функция оптической системы (ОС) может быть представлена как функция автоковариации входного зрачка

$$H(\nu_x, \nu_y) = P(\lambda f'\nu_x, \lambda f'\nu_y) * P^*(\lambda f'\nu_x, \lambda f'\nu_y), \qquad (1)$$

где $H(\nu_x, \nu_y)$ — ненормированная ОПФ ОС; $P(\lambda f'\nu_x, \lambda f'\nu_y)$ — функция зрачка ОС; $P^*(\lambda f'\nu_x, \lambda f'\nu_y)$ — комплексно-сопряженная функция зрачка ОС; $*$ — символическое обозначение операции корреляции; λ — длина волны оптического излучения; f' — заднее фокусное расстояние ОС; ν_x, ν_y — пространственные частоты вдоль осей OX и OY соответственно.

Функция зрачка представляет собой комплексную функцию пропускания, которая описывается выражением [1, 4, 5]

$$P(\xi, \eta) = [\tau(\xi, \eta)] \exp[jkW(\xi, \eta)], \qquad (2)$$

где $\tau(\xi, \eta)$ — коэффициент пропускания входного зрачка по интенсивности; $W(\xi, \eta)$ — волновая монохроматическая аберрация оптической системы — определяет степень отклонения реальной части волнового фронта от сферы сравнения, измеряемой вдоль радиуса идеальной монохроматической волны; k — волновое число.

Для упрощения дальнейших выкладок будем рассматривать одномерную некогерентную ОПФ.

Пусть имеется произвольная некогерентная ОС, входной зрачок которой изображен на рис. 1. Впишем входной зрачок в прямоугольник

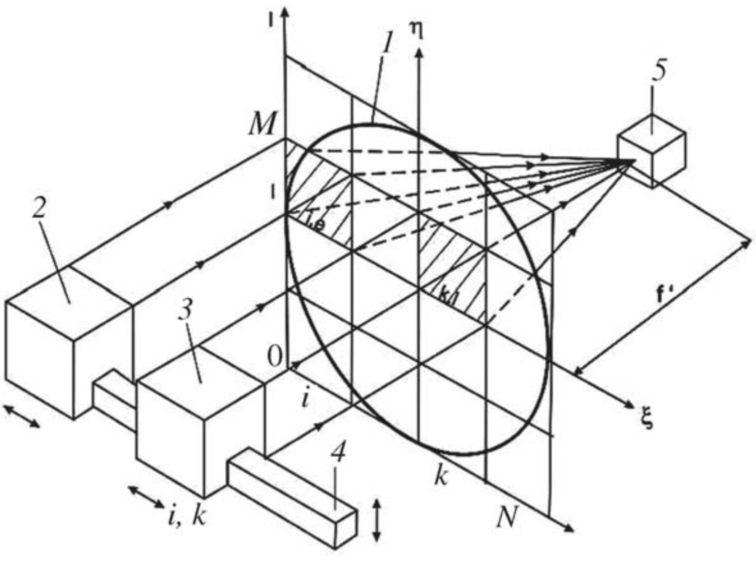

Рис. 1. Зонный способ измерения некогерентной оптической передаточной функции ОС:
1 — входной зрачок контролируемой ОС; *2, 3* — коллимирующие устройства; *4* — направляющая опора; *5* — анализирующее устройство

со сторонами D_ξ и D_η по осям $O\xi$ и $O\eta$ соответственно. Разделим входной зрачок на N равных частей вдоль осей $O\xi$ и $O\eta$. Пусть входной зрачок описывается функцией $P(\xi, \eta)$. В дискретных координатах функцию зрачка можно рассматривать как сумму зональных зрачковых функций:

$$P(\xi, \eta) = \sum_{\ell=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} P_{i\ell}(\xi, \eta) = \sum_{\ell=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} [\tau_\ell(\xi, \eta)] \exp[jkW_\ell(\xi, \eta)], \tag{3}$$

где $P_{i\ell}(\xi, \eta)$ — функция элементарной области входного зрачка ОС; i, ℓ — дискретные координаты элементарной области входного зрачка ОС; $i = 1, 2, 3, \ldots, N$; $\ell = 1, 2, 3, \ldots, N$; $\xi = \lambda f' \nu_x$, $\eta = \lambda f' \nu_y$; $\tau_\ell(\xi, \eta)$ — коэффициент пропускания по интенсивности элементарной области входного зрачка; $W_\ell(\xi, \eta)$ — волновая аберрация элементарной части волнового фронта.

Подставив выражение (3) в формулу (1), получаем выражение для одномерной ОПФ, представляющей собой функцию автоковариации входного зрачка по координате $O\nu_x$:

$$H(\nu_x, 0) = \sum_{\ell=1}^{N} \left[\sum_{i=1}^{N} P_{i\ell}(\xi) * \sum_{i=1}^{N} P_{i\ell}^*(\xi) \right] = \\ = \sum_{\ell=1}^{N} \left[\sum_{i=1}^{N} P_i(\xi) * \sum_{i=1}^{N} P_i^*(\xi) \right]_\ell . \tag{4}$$

Раскроем выражение (4), опуская для упрощения записи аргументы функции зрачка:

$$H(\nu_x, 0) = \sum_{\ell=1}^{N} \Big[(P_1 + P_2 + \ldots + P_N) * (P_1^* + P_2^* + \ldots + P_N^*) \Big]_\ell = \\ = \sum_{\ell=1}^{N} \Big[(P_1 {*} P_1^* + P_2 {*} P_2^* + \ldots + P_N {*} P_N^*) + P_1 {*} P_2^* + P_1 {*} P_3^* + \ldots + P_1 {*} P_N^* + \\ + P_2 {*} P_1^* + P_2 {*} P_3^* + P_2 {*} P_4^* + \ldots + P_2 {*} P_N^* + \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots + \\ + P_N * P_1^* + P_N * P_2^* + \ldots + P_N * P_{N-1}^* \Big]_\ell . \tag{5}$$

Преобразуем выражение (5) в такой вид, когда ОПФ может быть представлена в виде совокупности функций автоковариации. Для этого рассмотрим соотношение

$$(P_i + P_\kappa) * (P_i + P_\kappa)^* = P_i {*} P_i^* + P_\kappa {*} P_\kappa^* + P_i {*} P_\kappa^* + P_\kappa {*} P_i^*, \tag{6}$$

которое в символической форме определяет ненормированную ОПФ системы, когда входной зрачок представляет собой совокупность двух элементарных пространственных областей. Выражение (6) перепишем в виде

$$(P_i + P_\kappa) * (P_i + P_\kappa)^* - (P_i * P_i^* + P_\kappa * P_\kappa^*) = P_i * P_\kappa^* + P_\kappa * P_i^*. \quad (7)$$

Представим члены вида $P_i * P_\kappa^* + P_\kappa * P_i^*$ в выражении (5) в виде левой части выражения (7):

$$H(\nu_x, 0) =$$
$$=\sum_{\ell=1}^{N}\left[\sum_{i=1}^{N} P_i * P_i^* - (N-1)\sum_{i=1}^{N} P_i * P_i + \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{\kappa=i+1}^{N}(P_i + P_\kappa) * (P_i + P_\kappa)^*\right]_\ell =$$
$$= \sum_{\ell=1}^{N}\left[\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{\kappa=i+1}^{N}(P_i + P_\kappa) * (P_i + P_\kappa)^* - (N-2)\sum_{i=1}^{N} P_i * P_i^*\right]_\ell =$$
$$= \sum_{\ell=1}^{N}\left[\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{\kappa=i+1}^{N} H_{i\kappa}(\nu_x, 0) - (N-2)\sum_{i=1}^{N} H_{ii}(\nu_x, 0)\right]_\ell. \quad (8)$$

где $H_{i\kappa}(\nu_x, 0) = (P_i + P_\kappa) * (P_i + P_\kappa)^*$ — одномерная ОПФ системы, когда ее входной зрачок представляет собой совокупность двух элементарных зон, являющимися элементами одной строки; $H_{ii}(\nu_x, 0) = P_i * P_i^*$ — одномерная ОПФ системы, когда ее входной зрачок представляет собой одну элементарную область зрачка контролируемой ОС.

Нормированная ОПФ системы определяется выражением

$$\overline{\mathrm{H}}(\nu_x) = \sum_{\ell=1}^{N} \frac{\left[\displaystyle\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{k=i+1}^{N} H_{ik}(\nu_x, 0) - (N-2)\sum_{i=1}^{N} H_{ii}(\nu_x, 0)\right]_\ell}{\displaystyle\sum_{i=1}^{N}\left[H_{ii}(0,0)\right]_\ell}. \quad (9)$$

Выражение (9) описывает ОПФ аберрационной ОС в виде совокупности зонных ОПФ, являющихся функциями автокорреляции элементарных частей входного зрачка ОС.

Основанный на выражении (8) способ измерения ОПФ крупногабаритных ОС без использования уникальных крупногабаритных коллимирующих устройств заключается в следующем: входной зрачок аберрационной ОС заполняется последовательно сначала одним, а затем двумя одинаковыми неперекрывающимися пучками коллимированного модулированного излучения, несущими информацию о тест-объекте. Пучки перемещаются дискретно коллинеарно друг другу вдоль оси пространственных частот измеряемой ОПФ, а также совместно друг с другом перпендикулярно этой оси в определенные фиксированные положения с шагом, равным размеру выходного

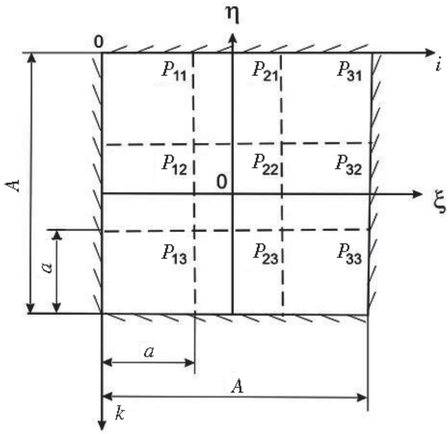

Рис. 2. Входной зрачок оптической системы

зрачка $\dfrac{D}{N}$ коллимированного излучения. Используя измеренные зонные ОПФ, по формуле (9) рассчитывают ОПФ контролируемой оптической системы.

Зонный способ измерения ОПФ поясняется схемой, приведенной на рис. 1.

Число необходимых положений коллимирующих пучков (число циклов измерения одномерной ОПФ) определяется по формуле

$$n = \frac{N^2}{2}(N+1). \tag{10}$$

Так, число циклов измерения составит: $n = 18$ для $N = 3$; $n = 40$ для $N = 4$; $n = 75$ для $N = 5$; $n = 126$ для $N = 6$.

Как следует из приведенных расчетов, для уменьшения трудоемкости измерения ОПФ крупногабаритных ОС, число N должно выбираться в пределах от 3 до 6.

Рассмотрим простейший пример вычисления ОПФ зонным способом. Пусть имеется дифракционно-ограниченная ОС, входной зрачок которой представляет квадрат со стороной A. Коэффициент пропускания зрачка по интенсивности постоянен в пределах зрачка и равен единице (рис. 2).

Представим входной зрачок в виде совокупности девяти зон, разделив его по осям Ox и Oy на три равные части. Размер каждой зоны по осям Ox и Oy составит $a = A/3$.

Для определения одномерной ОПФ в данном случае необходимо вычислить ОПФ каждой строки разбиения зрачка, просуммировав полученные результаты в соответствии с выражением (9) по оси Oy.

Как известно [4, 5], нормированная одномерная ОПФ некогерентной дифракционно-ограниченной ОС с прямоугольным входным зрачком определяется выражением

$$\overline{H}(\nu_x) = 1 - \left|\frac{\nu_x}{\nu_{xm}}\right|, \tag{11}$$

где $\nu_{xm} = \dfrac{A}{\lambda f} = \dfrac{3a}{\lambda f}$ — максимальная пространственная частота ОС.

Для рассматриваемого примера выражение (9) примет вид

$$\overline{H}(\nu_x) = \sum_{\ell=1}^{3} \frac{\left[\sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{k=i+1}^{3} H_{ik}(\nu_x,0) - (N-2)\sum\limits_{i=1}^{3} H_{ii}(\nu_x,0)\right]_\ell}{\sum\limits_{i=1}^{3}\left[H_{ii}(0,0)\right]_\ell} =$$

$$= \sum_{\ell=1}^{3} \frac{\left[H_{12}(\nu_x)+H_{13}(\nu_x)+H_{23}(\nu_x) - H_{11}(\nu_x)-H_{22}(\nu_x)-H_{33}(\nu_x)\right]_\ell}{\sum\limits_{i=1}^{3}\left[H_{11}(0) + \mathrm{H}_{22}(0) + \mathrm{H}_{33}(0)\right]_\ell}. \tag{12}$$

Из выражения (12) следует, что для вычисления одномерной ОПФ ОС необходимо:

1) последовательно определить функции автоковариации входного зрачка, представляющего собой сначала совокупность двух элементарных зон, а затем каждой элементарной зоны зрачка в отдельности;

2) просуммировать по пространственным частотам функции автоковариации двойных зон и вычесть из полученного выражения сумму функций автоковариации одинарных зон;

3) пронормировать полученное выражение на сумму значений функций автоковариации одинарных зон на нулевой пространственной частоте.

Нетрудно показать, что функции автоковариации совокупности двух зон (зонные ОПФ) определяются выражениями:

$$H_{12}(\nu_x,0)_\ell = (P_1+P_2)_\ell * (P_1+P_2)^*_\ell = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{2a}{\lambda f} - |\nu_x| & |\nu_x| \leqslant \dfrac{2a}{\lambda f}; \\ 0 & |\nu_x| > \dfrac{2a}{\lambda f}; \end{array} \right.$$

$$H_{23}(\nu_x,0)_\ell = (P_2+P_3)_\ell * (P_2+P_3)^*_\ell = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{2a}{\lambda f} - |\nu_x| & |\nu_x| \leqslant \dfrac{2a}{\lambda f}; \\ 0 & |\nu_x| > \dfrac{2a}{\lambda f}; \end{array} \right.$$

$$H_{13}(\nu_x,0)_\ell = (P_1+P_3)_\ell * (P_1+P_3)^*_\ell = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{2a}{\lambda f} - 2\,|\nu_x| & |\nu_x| \leqslant \dfrac{a}{\lambda f}; \\ |\nu_x| - \dfrac{a}{\lambda f} & \dfrac{a}{\lambda f} < |\nu_x| \leqslant \dfrac{2a}{\lambda f}; \\ \dfrac{3a}{\lambda f} - |\nu_x| & \dfrac{2a}{\lambda f} < |\nu_x| \leqslant \dfrac{3a}{\lambda f}; \end{array} \right.$$

$$H_{11}(\nu_x) = H_{22}(\nu_x) = H_{33}(\nu_x) = \left| \begin{array}{ll} \dfrac{a}{\lambda f} - |\nu_x| & |\nu_x| \leqslant \dfrac{a}{\lambda f}; \\ 0 & \dfrac{a}{\lambda f} < |\nu_x|. \end{array} \right. \quad (13)$$

Нормирующий член в выражении (12) имеет вид

$$\sum_{\ell=1}^{3} [H_{11}(0) + H_{22}(0) + H_{33}(0)] = 9\frac{a}{\lambda f}. \quad (14)$$

В соответствии с выражением (12) с учетом формул (13) и (14) получаем

при $|\nu_x| \leqslant \dfrac{a}{\lambda f}$

$$\overline{H}(\nu_x) = \\ = \sum_{\ell=1}^{3} \left[\frac{2a}{\lambda f} - |\nu_x| + \frac{2a}{\lambda f} - |\nu_x| + \frac{2a}{\lambda f} - 2|\nu_x| - \frac{3a}{\lambda f} + 3|\nu_x| \right]_\ell \Big/ \frac{9a}{\lambda f} = \\ = \left\{ \sum_{\ell=1}^{3} \left[\frac{3a}{\lambda_x} \right]_\ell - |\nu_x| \right\} \Big/ \frac{9a}{\lambda f} = \left[\frac{9a}{\lambda f} - |\nu_x| \right] \Big/ \frac{9a}{\lambda f} = 1 - \frac{|\nu_x|}{\nu_{xm}};$$

при $\dfrac{a}{\lambda f} < |\nu_x| \leqslant \dfrac{2a}{\lambda f}$

$$\overline{H}(\nu_x) = \sum_{\ell}^{3} \left[\frac{2a}{\lambda f} - |\nu_x| + |\nu_x| - \frac{a}{\lambda f} + \frac{2a}{\lambda f} - |\nu_x| \right]_\ell \Big/ \frac{9a}{\lambda f} = \\ = \left\{ \sum_{\ell=1}^{3} \left[\frac{3a}{\lambda f} \right]_\ell - |\nu_x| \right\} \Big/ \frac{9a}{\lambda f} = 1 - \frac{|\nu_x|}{\nu_{xm}};$$

при $\dfrac{2a}{\lambda f} < |\nu_x| \leqslant \dfrac{3a}{\lambda f}$

$$\overline{H}(\nu_x) = \sum_{\ell=1}^{3} \left[\frac{3a}{\lambda f} - |\nu_x| \right]_\ell \Big/ \frac{9a}{\lambda f} = \\ = \left\{ \sum_{\ell=1}^{3} \left[\frac{3a}{\lambda f} \right]_\ell - |\nu_x| \right\} \Big/ \frac{9a}{\lambda f} = 1 - \frac{|\nu_x|}{\nu_{xm}}, \quad (15)$$

где $\nu_{xm} = \dfrac{3a}{\lambda f}$.

С учетом симметричности на рис. 3 приведены правые части графиков зонных ОПФ. Таким образом, вычисленная зонным способом

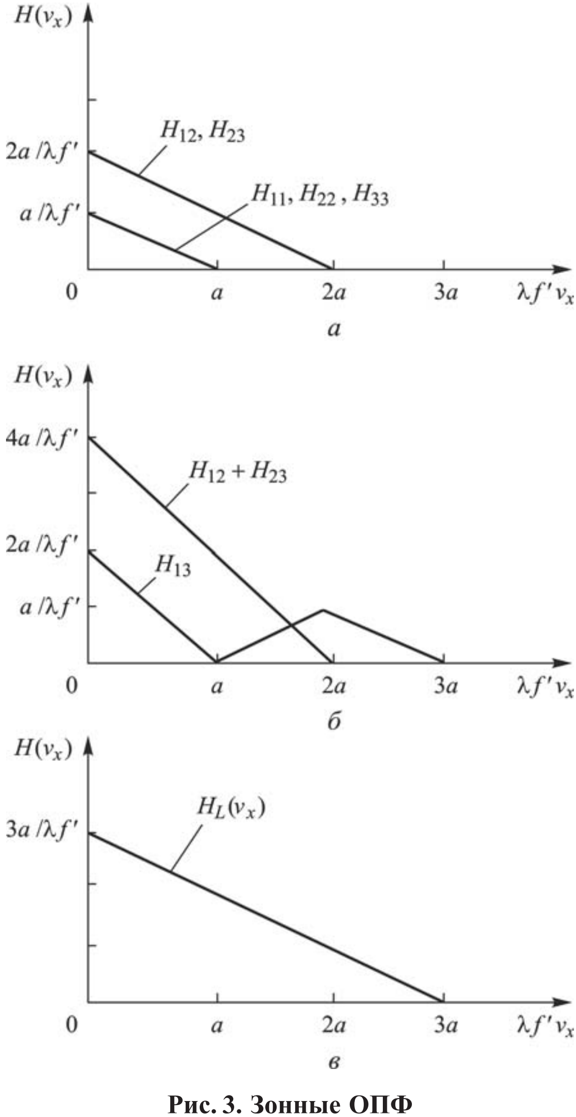

Рис. 3. Зонные ОПФ

ОПФ ОС, как следует из выражений (15), полностью совпадает с известным исходным выражением (11), что подтверждает правильность полученного выражения (9), определяющего алгоритм вычисления ОПФ некогерентной оптической системы зонным способом.

Для оптической системы, обладающей аберрациями, функция зрачка представляет собой комплексную функцию пропускания, которая описывается выражением (2). Оптическая передаточная функция в общем виде описывается выражением [1, 2, 7, 8]:

$$H(\nu_x) = T(\nu_x)\exp(j\Phi(\nu_x)) = T(\nu_x)[\cos\Phi(\nu_x) + j\sin\Phi(\nu_x)], \qquad (16)$$

где $T(\nu_x)$ — модуляционная передаточная функция ОС, $\Phi(\nu_x)$ — функция передачи фазы.

С учетом формулы (16) выражение (9) примет вид

$$\overline{H}(\nu_x) =$$

$$=\sum_{\ell=1}^{N}\left[\frac{\sum\limits_{i=1}^{N-1}\sum\limits_{k=i+1}^{N}T_{i,k}(\cos\Phi_{i,k}+j\sin\Phi_{i,k})-(N-2)\sum\limits_{i=1}^{N}T_{i,i}(\cos\Phi_{i,i}+j\sin\Phi_{i,i})}{\sum\limits_{i=1}^{N}T_{i,i}(0)}\right]_{\ell}=$$

$$=\sum_{\ell=1}^{N}\left[\frac{\sum\limits_{i=1}^{N-1}\sum\limits_{k=i+1}^{N}T_{i,k}\cos\Phi_{ik}-(N-2)\sum\limits_{i=1}^{N}T_{i,i}\cos\Phi_{i,i}}{\sum\limits_{i=1}^{N}T_{i,i}(0)}\right]_{\ell}+$$

$$+j\sum_{\ell=1}^{N}\left[\frac{\sum\limits_{i=1}^{N}\sum\limits_{k=i+1}^{N-1}T_{i,k}\sin\Phi_{i,k}-(N-2)\sum\limits_{i=1}^{N}T_{i,i}\sin\Phi_{i,i}}{\sum\limits_{i=1}^{N}T_{i,i}(0)}\right]_{\ell}=A+jB. \quad (17)$$

Здесь

$$A=\sum_{\ell=1}^{\mathrm{N}}\left[\frac{\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{k=i+1}^{N}T_{i,k}\cos\Phi_{i,k}-(N-2)\sum_{i=1}^{N}T_{i,i}\cos\Phi_{i,i}}{\sum_{i=1}^{N}T_{i,i}(0)}\right]_{\ell};$$

$$B=\sum_{\ell=1}^{N}\left[\frac{\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{k=i+1}^{N}T_{i,k}\sin\Phi_{i,k}-(N-2)\sum_{i=1}^{N}T_{i,i}\sin\Phi_{i,i}}{\sum_{i=1}^{N}T_{i,i}(0)}\right]_{\ell};$$

для упрощения записи аргументы функций опущены.

Модуляционная передаточная функция и функция передачи фазы аберрационной оптической системы вычисляются по известным формулам:

$$T(\nu_x)=\sqrt{A^2+B^2}; \quad (18)$$

$$\Phi(\nu_x)=\mathrm{arctg}\frac{B}{A}. \quad (19)$$

Выражения (17), (18), (19) определяют алгоритм вычисления ОПФ крупногабаритной ОС по измеренным зонным модуляционным передаточным функциям и функциям передачи фазы.

Представленный в настоящей работе зонный способ измерения и вычисления ОПФ приемных систем оптико-электронных приборов (ОЭП) с крупногабаритной оптикой позволяет:

— объективно оценить качество приемных систем ОЭП на этапе выходных испытаний без использования уникальных крупногабаритных коллимирующих устройств;

— осуществлять юстировку приемных систем ОЭП;

— контролировать на одной установке без переналадки и изменения ее параметров широкий класс приемных систем ОЭП, существенно отличающихся размерами входных зрачков;

— значительно уменьшить стоимость контрольно-юстировочной аппаратуры за счет исключения из нее уникальных высококачественных крупногабаритных коллиматоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульман М. Я. Измерение передаточных функций оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье оптику. – М.: Мир, 1970.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 422 с.
4. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем. – М.: Машиностроение, 1990. – 431 с.
5. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б. Преобразование сигналов в оптико-электронных приборах систем управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1980. – 175 с.
6. Ю у Ф. Т. С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию. – М.: Сов. Радио, 1979. – 304 с.
7. О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику.. – М.: Мир, 1966. – 254 с.

Статья поступила в редакцию 26.09.2007

Юрий Андреевич Лушин родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 30 научных работ в области проектирования и производства оптико-электронных приборов управления.

Yu.A. Lushin (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 30 publications in the field of design and manufacturing of control optic-electronic instruments.