

П.А. Бакут, В.Е. Киракосянц

## ОПТИМАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ФАЗОВОГО ФРОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ

С использованием статистического метода максимального правдоподобия найдена оптимальная рекуррентная процедура восстановления изображения удаленных объектов при наличии фазовых искажений сигнала в турбулентной атмосфере и аддитивного фона на входе оптического приемника. Показано, что оптимальный алгоритм может быть реализован с помощью адаптивной оптической системы (АОС): на основе датчика волнового фронта гетеродинного типа. Показано, что в отличие от традиционных АОС в состав оптической схемы, помимо фазового корректора и датчика волнового фронта, должен входить амплитудный корректор, служащий для улучшения точности оценивания фазовых искажений в шумах.

Показано, что потенциальные возможности оптимальной процедуры таковы, что при ее работе отсутствует принципиальная необходимость использовать дополнительный опорный источник.

### Введение

Как известно [1], возмущения показателя преломления среды распространения приводят к искажениям волнового фронта принимаемого сигнала и часто существенно ухудшают характеристики традиционных оптических систем. Это ухудшение особенно заметно в ситуациях, когда размер приемной апертуры значительно превышает величину радиуса когерентности сигнала, искаженного при распространении в турбулентной атмосфере. При наличии в пределах области изопланарности объекта, неразрешаемого опорного источника, эффективными методами борьбы с искажениями сигнала от объекта (а следовательно, и с искажениями восстанавливаемого образа объекта) в турбулентной среде служат адаптивные процедуры обработки принимаемого сигнала (и в частности, алгоритм фазового сопряжения) [2]. В этих случаях возможно эффективное разделение информации об искажениях сигнала в атмосфере и информации о характеристиках наблюдаемого объекта путем измерения искажений волнового фронта (ВФ) сигнала и их компенсации при восстановлении изображения объекта. При достаточно высокой энергетике опорного источника и правильно выбранных параметрах измерительного и корректирующего устройств возможно достижение характеристик адаптивных оптических систем (АОС), близких к дифракционным [3]. Проблема заключается в том, что угловое рассогласование между наблюдаемым объектом и опорным источником, используемым для измерения искажений ВФ, в видимом диапазоне не должно превышать 2÷4 угл.с. Яркость опорного источника должна быть при этом не менее 7÷8 звездной величины [4]. Оценки, приведенные в [4], говорят о том, что вероятность нахождения в поле зрения подходящей естественной опорной звезды при работе в произвольном участке звездного неба весьма мала ( $\approx 10^{-6}$ ).

Представляется, что в настоящее время при работе в видимом диапазоне длин волн существуют два пути, позволяющих в какой-то степени преодолеть указанные ограничения. Один из них связан с созданием искусственных лазерных «звезд» [5]. Такая «звезда» в принципе может быть сформирована в заданном направлении и при этом иметь необходимую яркость. Второй путь предполагает разработку оптимальной процедуры обработки искаженного в атмосфере сигнала от протяженного наблюдаемого объекта, с помощью которой возможно восстановление образа объекта без использования постороннего опорного источника. Нахождению такой процедуры и посвящена данная работа.

### 1. Модель принимаемого сигнала

Будем рассматривать задачу наблюдения за протяженным хорошо разрешаемым по угловым координатам объектом, излучение которого пространственно некогерентно. Излучение, рассеянное объектом, распространяется в случайно-неоднородной среде – турбулентной атмосфере. Для простоты будем полагать справедливыми следующие обычно выполняемые на практике условия:

– время экспозиции  $T$  мало по сравнению с характерным временем изменения комплексной фазы сигналы  $\psi(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \approx \psi(\mathbf{r}, \mathbf{p})$ , описывающей искажения световых волн при распространении в турбулентной среде от точки  $\mathbf{p}$  поверхности объекта до точки  $(z, \mathbf{r})$  приемной апертуры  $\Omega$ ;

– размеры объекта наблюдения невелики по сравнению с областью изопланарности объекта по отношению к приемной апертуре; это означает, что случайный набег фазы  $\psi$  один и тот же для любой точки  $\mathbf{p}$  поверхности объекта  $\psi(\mathbf{r}, \mathbf{p}) \approx \psi(\mathbf{r})$ .

Кроме того, будем предполагать наличие в системе наблюдения предустановленного достаточно узкополосного оптического фильтра (ОФ).

С учетом сделанных допущений модель принимаемого сигнала может быть записана в виде

$$y(\mathbf{r}, t) = \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} E(\boldsymbol{\rho}, t) G(z, \mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) d^2 \rho \exp\{\psi(\mathbf{r}) - i\omega_0 t\} + n(\mathbf{r}, t),$$

$$\mathbf{r} \in \Omega, 0 < t \leq T. \quad (1.1)$$

В выражении (1.1) функция  $n(\mathbf{r}, t)$  описывает шумовое (фоновое) излучение, которое обычно считают белым гауссовым шумом со спектральной плотностью  $N_{\text{ш}}$ :

$$\langle n(\mathbf{r}, t) \rangle = 0, \langle n(\mathbf{r}_1, t_1) n(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle = N_{\text{ш}} \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \delta(t_1 - t_2). \quad (1.2)$$

Здесь угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций фона, а  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция Дирака.

Функция  $E(\boldsymbol{\rho}, t)$  представляет собой комплексную амплитуду, описывающую пространственное распределение поля в картинной плоскости объекта. При наблюдении объектов, излучающих пространственно некогерентно, функцию  $E(\boldsymbol{\rho}, t)$  можно считать реализацией гауссовского случайного процесса, дельта-коррелированного по пространственной координате:

$$\langle E(\boldsymbol{\rho}, t) \rangle = 0; \quad \langle E(\boldsymbol{\rho}_1, t_1) E(\boldsymbol{\rho}_2, t_2) \rangle = 0; \quad (1.3)$$

$$\langle E(\boldsymbol{\rho}_1, t_1) E^*(\boldsymbol{\rho}_2, t_2) \rangle = O(\boldsymbol{\rho}) \delta(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2) b(t_1 - t_2),$$

где функция  $O(\boldsymbol{\rho})$  описывает пространственное распределение плотности энергии излучения по поверхности объекта;  $b(t)$  – временная корреляционная функция полезного сигнала; \* – знак комплексного сопряжения.

Наконец, функция Грина  $G(z, \mathbf{r}, \boldsymbol{\rho})$ , входящая в (1.1), характеризует распространение световых волн от картинной плоскости объекта к плоскости приемной апертуры и в приближении Френеля имеет вид

$$G(z, \mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) = \frac{k}{2\pi iz} \exp \left\{ ik \left[ z + \frac{|\mathbf{r} - \boldsymbol{\rho}|^2}{2z} \right] \right\}, \quad (1.4)$$

где  $z$  – дальность до объекта;  $k = \omega_0/c$  – волновое число,  $\omega_0$  – центральная частота ОФ.

Представленная модель (1.1)–(1.4) достаточно точно описывает процесс формирования рассеянного сигнала шероховатой поверхностью объекта наблюдения и распространение этого сигнала в турбулентной атмосфере. Проблема теперь заключается в том, чтобы научиться из сигнала с указанными характеристиками, т.е. искаженного в турбулентной атмосфере, извлекать содержащуюся в нем информацию об образе объекта  $O(\boldsymbol{\rho})$ . Как известно, такого рода задачи с успехом решаются с применением статистической теории принятия решений [6].

## 2. Оптимальная процедура восстановления искаженного изображения

Синтез оптимальных систем обработки информационных сигналов в статистической теории принятия решений основывается на формировании и последующей технической реализации так называемого функционала отношения правдоподобия (ФОР) [7]. Методика нахождения ФОР для гауссовского наблюдаемого сигнала хорошо известна [7]. Использование этой методики для сигнала (1.1)–(1.4) дает возможность записать условный логарифм ФОР в следующем виде:

$$\Lambda[y(\mathbf{r}, t)/O(\boldsymbol{\rho}), \varphi(\mathbf{r})] = -\frac{m_t S}{\lambda^2 z^2} \int_{-\infty}^{\infty} \ln \left[ 1 + \frac{O(\boldsymbol{\rho})}{4N_{\text{ш}}} \right] d^2 \rho +$$

$$+ \frac{1}{N_{\text{ш}}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{O(\boldsymbol{\rho})/4N_{\text{ш}}}{1 + O(\boldsymbol{\rho})/4N_{\text{ш}}} P(\boldsymbol{\rho}) d^2 \rho, \quad (2.1)$$

где  $m_t = \Delta\omega T$  – число временных ячеек когерентности сигнала на интервале наблюдения;  $\Delta\omega$  – ширина полосы пропускания ОФ;  $\lambda$  – средняя длина волны регистрируемого сигнала;  $S$  – площадь приемной апертуры, а функцию  $P(\boldsymbol{\rho})$  можно трактовать как пространственную плотность энергии принимаемого сигнала:

$$P(\boldsymbol{\rho}) = \int_0^T |U(\boldsymbol{\rho}, t)|^2 d^2 \rho; \quad (2.2)$$

$$U(\boldsymbol{\rho}, t) = \int_{\Omega} Y^*(\mathbf{r}, t) G(z, \mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) \exp\{i\varphi(\mathbf{r})\} d^2 r;$$

$$Y(\boldsymbol{\rho}, t) = \int_0^T y(\mathbf{r}, \tau) h(t - \tau) \exp\{i\omega_0 \tau\} d\tau$$

– комплексная амплитуда поля на выходе ОФ;  $h(t)$  – огибающая передаточной функции ОФ.

Функционал (2.1) получен при следующих дополнительных предположениях:

– флуктуации сигнала на интервале наблюдения считаются «быстрыми» ( $m_t \gg 1$ );

– объект наблюдения «хорошо» разрешается по угловым координатам ( $m_r = SS_0/\lambda^2 z^2 \gg 1$ ,  $S_0$  – площадь проекции объекта на картинную плоскость);

– амплитудные флуктуации сигнала, возникающие при его распространении в случайно-неоднородной среде, игнорируются ( $\psi(\mathbf{r}) \cong i\varphi(\mathbf{r})$ ,  $\varphi(\mathbf{r})$  – функция, описывающая флуктуации действительной фазы);

– временной энергетический спектр сигнала аппроксимируется эквивалентным «прямоугольником».

Дальнейшее следование теории, т.е. усреднение (2.1) по мешающим воздействиям – искажениям фазы  $\varphi(\mathbf{r})$ , к успеху не приводит, а ведет лишь к громоздким и трудно трактуемым операциям. Поэтому поступим следующим образом: будем вместе с оценкой образа объекта оценивать и искажения сигнала, описываемые функцией  $\varphi(\mathbf{r})$ . Покажем, что такая процедура приведет к синтезу достаточно просто реализуемой следящей адаптивной оптической системы.

Сначала с помощью функционала (2.1) найдем оценку максимального правдоподобия образа  $\hat{O}(\rho)$  объекта  $O(\rho)$  при фиксированной реализации искажений  $\varphi(\mathbf{r})$ . Видно, что эта оценка имеет вид

$$\hat{O}(\rho) = \begin{cases} \frac{4\lambda^2 z^2}{m_r S} [P(\rho/\varphi(\mathbf{r})) - P_{\text{ш}}], & P(\rho) > P_{\text{ш}}, \\ 0, & P(\rho) < P_{\text{ш}}, \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $P_{\text{ш}} = E_{\text{ш}}/S_0$  – плотность энергии фонового излучения в одной пространственной ячейке когерентности,  $E_{\text{ш}} = N_{\text{ш}} m_r m_r$  – средняя энергия шумового фона, регистрируемого в объеме наблюдения.

Полученная процедура оценивания образа объекта весьма похожа на традиционный алгоритм формирования оптического изображения с помощью обычной оптической системы. Отличие процесса формирования изображения в шумах и при наличии фазовых искажений от традиционной процедуры, как видно из (2.3), заключается в необходимости введения шумового порога в плоскости изображения и фазовой маски в плоскости входной апертуры. С помощью шумового порога из традиционного изображения изымаются недостоверные участки с малым отношением сигнал-шум, а фазовая маска призвана компенсировать фазовые искажения сигнала  $\varphi(\mathbf{r})$ .

Для нахождения оптимальной процедуры компенсации этих искажений при полностью неизвестном наблюдаемом объекте подставим оценку его образа (2.3) в логарифм ФОП (2.1). При этом получим оценку логарифма ФОП, которая не зависит от образа объекта и которую, следовательно, можно будет использовать для оценивания искажений волнового фронта:

$$\Lambda[\gamma(\mathbf{r}, t)/\hat{O}(\rho), \varphi(\mathbf{r})] = \frac{m_r S}{\lambda^2 z^2} \int_{P(\rho) > P_{\text{ш}}} \left[ \frac{P(\rho)}{P_{\text{ш}}} - 1 - \ln \frac{P(\rho)}{P_{\text{ш}}} \right] d^2 \rho. \quad (2.4)$$

Следует отметить, что логарифмический критерий оптимальности для компенсации фазовых искажений сигнала был получен ранее в работе [8].

Функционал (2.4) позволяет найти явное выражение, описывающее оптимальную процедуру оценивания ВФ. Следует, однако, иметь в виду, что оценка непрерывной функции в шумах методом максимального правдоподобия, т.е. без учета априорных сведений об оцениваемой функции, невозможна. Очевидно, что с достаточно хорошей точностью мо-

жет быть извлечена информация лишь о конечном числе параметров этой функции. В рассматриваемом случае удобно перейти к ступенчатой аппроксимации функции  $\varphi(\mathbf{r})$ :

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^N \varphi_j \chi_j(\mathbf{r}), \quad (2.5)$$

где  $N$  – число оцениваемых параметров  $\varphi_j$ , а  $\chi_j(\mathbf{r})$  – индикаторная функция анализируемого участка ВФ на приемной апертуре:  $\chi_j(\mathbf{r}) = 1$  при  $\mathbf{r} \in \Omega_j$  и  $\chi_j = 0$  в других случаях, причем  $\bigcup_{j=1}^N \Omega_j = \Omega$ .

Теперь для оценок неизвестных значений «ступенек» в (2.5) может быть применен метод максимального правдоподобия, а имеющаяся априорная информация о функции  $\varphi(\mathbf{r})$  (и об интенсивности шумов в объеме наблюдения) должна быть использована для оптимального выбора числа  $N$  оцениваемых параметров.

Предполагая, что мы уже имеем некоторую оценку образа объекта  $\hat{O}^{(n)}(\rho)$ , из (2.4) с учетом аппроксимации (2.5) легко получить следующую рекуррентную процедуру восстановления искаженного изображения объекта наблюдения при одновременном оценивании и компенсации искажающих воздействий:

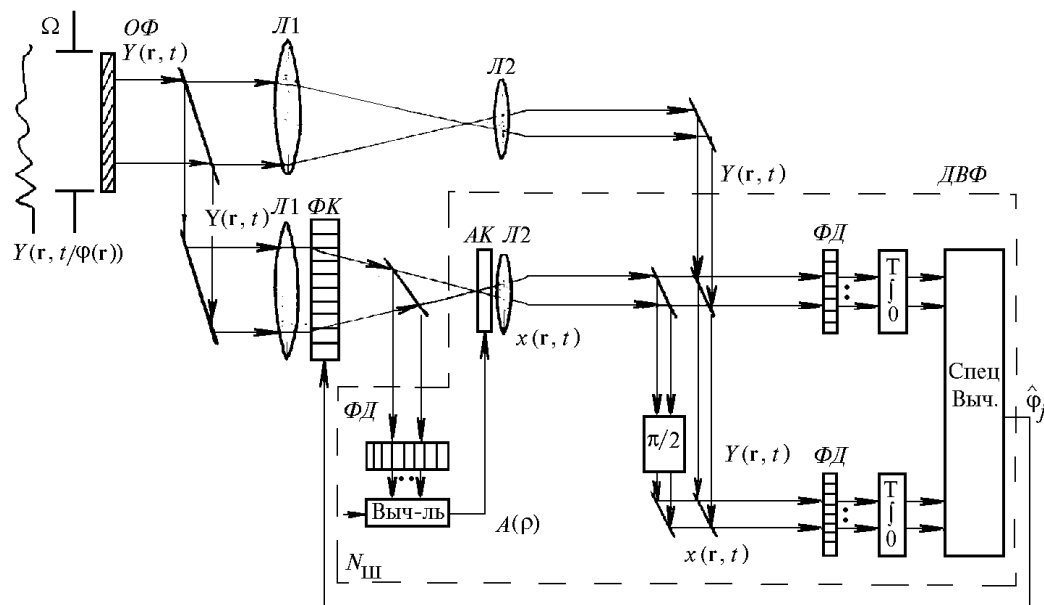
$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{O}^{(n)}(\rho) = \frac{4\lambda^2 z^2}{m_r S} [P(\rho/\hat{\varphi}_j^{(n)}, j=1, \dots, N) - P_{\text{ш}}], \quad P(\rho) > P_{\text{ш}}; \\ \exp\{i\hat{\varphi}_j^{(n+1)}\} = \frac{\int_0^T dt \int_{\Omega_j} \gamma(\mathbf{r}, t) X^{(n)}(\mathbf{r}, t) d^2 r}{\left| \int_0^T dt \int_{\Omega_j} \gamma(\mathbf{r}, t) X^{(n)}(\mathbf{r}, t) d^2 r \right|}, \quad n=1, 2, \dots, \end{array} \right. \quad (2.6)$$

причем  $\hat{\varphi}_j^{(1)} = 0$ ;  $j = 1, \dots, N$ ;  $n$  – номер итерации. Кроме того, в выражениях (2.6) приняты следующие обозначения:  $\hat{O}^{(n)}(\rho)$  и  $\hat{\varphi}_j^{(n)}$  – оценка образа объекта и компенсирующее значение фазы на  $\Omega_j$  участке апертуры на  $n$ -м такте рекуррентной процедуры;  $X^{(n)}(\mathbf{r}, t)$  – комплексная амплитуда поля в плоскости, сопряженной с плоскостью входной апертуры, на  $n$ -м такте:

$$X^{(n)}(\mathbf{r}, t) = \int_{\hat{O}^{(n)}(\rho) > 0} A^{(n)}(\rho) U^{(n)}(\rho, t) G^*(z, \mathbf{r}, \rho) d^2 \rho, \quad (2.7)$$

$$U^{(n)}(\rho, t) = \sum_{j=1}^N \exp\{i\hat{\varphi}_j^{(n)}\} \int_{\Omega_j} Y^*(\mathbf{r}, t) G(z, \mathbf{r}, \rho) d^2 r, \quad (2.8)$$

$$A^{(n)}(\rho) = 1 - \frac{P_{\text{ш}}}{P(\rho/\hat{\varphi}_j^{(n)}, j=1, \dots, N)}. \quad (2.9)$$



Блок-схема АОС восстановления искаженного изображения объекта

Легко видеть, что полученная процедура (2.6)–(2.9) может быть реализована в виде оптической схемы, изображенной на рисунке. В соответствии с (2.6)–(2.9) схема содержит два основных элемента: многоканальный фазовый корректор (ФК) и многоканальный датчик ВФ (ДВФ), причем в ДВФ входит управляемая амплитудная корректирующая маска, описываемая функцией (2.9). Эта маска позволяет уменьшать «веса» тех точек в обрабатываемом (для извлечения информации о фазовых искажениях) изображении, отношение сигнал-шум в которых достаточно велико. В ситуациях, когда аддитивными шумами можно пренебречь (отношение сигнал-шум стремится к бесконечности), амплитудный корректор может отсутствовать, поскольку в этом случае его коэффициент передачи приближается к единице для всех точек в обрабатываемом изображении. При этом оптимальная схема приближается к традиционной АОС с одним ФК. В общем же случае оптимальная схема представляет собой следующую АОС с двумя управляемыми корректорами: фазовым и амплитудным. Опишем ее работу, основываясь на выражениях (2.6)–(2.9).

На первом такте ( $n = 1$ ) итерационного процесса компенсация искаженного фазового фронта отсутствует, т.е. обрабатываемый фазовый фронт совпадает с исходным, а корректирующие фазы  $\hat{\phi}_j^{(1)} = 0$ ,  $j = 1, \dots, N$ . При этом первое выражение в (2.6) на первом такте соответствует нескорректированному (не считая участков с малым отношением сигнал-шум) искаженному изображению  $\hat{O}^{(1)}(\rho)$ . По этому изображению формируется «опорный» сигнал  $X^{(1)}(\mathbf{r}, t)$  для ДВФ. Комплексная амплитуда этого уже частично скорректированного сигнала определяется выражением (2.7). На первом такте коррекция

«опорного» сигнала осуществляется лишь в амплитудном корректоре (АК), располагающемся в плоскости изображения ДВФ. «Опорный» сигнал подается на многоканальный фотодетектор ДВФ, находящийся в плоскости, сопряженной с плоскостью входной линзы. На фотодетектор одновременно подается и исходный сигнал  $Y(\mathbf{r}, t)$ . Описанный датчик, очевидно, представляет собой многоканальный ДВФ гетеродинного типа. На первом такте он формирует корректирующие фазы  $\hat{\phi}_j^{(2)}$  в соответствии со вторым выражением (2.6), изменяя состояние ФК. Изменение состояния ФК приводит к корректировке изображения объекта на основе первого выражения (2.6). При этом изображение принимает вид  $\hat{O}^{(2)}(\rho)$ . После этого АК изменяет свое состояние в соответствии с полученным изображением. Далее вновь корректируется «опорный» сигнал для ДВФ  $X^{(2)}(\mathbf{r}, t)$ . При этом в соответствии с (2.7)–(2.9) коррекция теперь осуществляется сразу в двух местах: в ФК в плоскости апертуры и в АК в плоскости изображения, причем ФК служит одновременно и для улучшения восстановления изображения и для повышения качества оценивания фазовых искажений на следующей итерации, а АК используется лишь для улучшения точности оценивания фазовых искажений.

Процесс повторяется до установления стационарного состояния, при котором будет достигнута та или иная степень повышения качества изображения. Таким образом реализуется процесс адаптивной коррекции искаженного изображения в оптимальной АОС.

## Выводы

1. С использованием статистического подхода удалось найти оптимальную рекуррентную процедуру

восстановления образа удаленного объекта, оптический сигнал от которого искажен при распространении в турбулентной атмосфере, а априорные характеристики объекта полностью неизвестны.

2. Найденная процедура может быть реализована в виде следящей адаптивной оптической системы. Однако в отличие от традиционных АОС главными элементами оптимальной схемы являются не только многоканальные фазовый корректор и датчик ВФ гетеродинного типа, но и управляемый амплитудный корректор, расположенный в плоскости изображения и служащий для повышения точности оценивания фазовых искажений в шумах. В случае, когда аддитивными шумами можно пренебречь, надобность в амплитудном корректоре отпадает.

3. Потенциальные возможности найденной процедуры таковы, что при ее работе отсутствует принципиальная необходимость использовать дополнительный опорный источник. При этом в значительной степени снимается проблема весьма малой вероятности нахождения естественной звезды в зоне изопланарности наблюдаемого объекта при работе астрономических систем в видимом диапазоне.

4. Как частный, но интересный результат следует отметить нахождение объективного критерия оптимальности в задаче оценивания искажений ВФ сигнала от протяженного объекта. Оказывается, критерием оптимальности служит максимум интеграла от некоторой нелинейной функции плотности энергии принимаемого сигнала по области, занятой

оценкой образа объекта. Вообще случайная реализация пространственной плотности энергии принимаемого сигнала в плоскости изображения объекта за время его экспозиции является достаточной статистикой при решении задач восстановления искаженных изображений протяженных объектов и оценивания фазовых фронтов сигналов от этих объектов.

5. Для оценки скорости сходимости оптимального рекуррентного алгоритма восстановления, а следовательно, и для выяснения необходимых характеристик быстродействия исполнительных элементов фазового и амплитудного корректоров требуются дополнительные исследования, связанные со статистическим моделированием работы алгоритма.

1. *Fried D.L.* Limiting Resolution Looking Down Through the Atmosphere // *JOSA*. 1966. V. 56. P. 1380.
2. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
3. *Merkle F.M., Beckers J.M.* // Application of Adaptive Optics to Astronomy. Proceedings of SPIE. 1989. 1114. P. 36.
4. *Parenti R.R.* Adaptive Optics for Astronomy // The Lincoln Laboratory. 1992. V. 5. N 1. P. 93.
5. *Humphreys R.A., Primmerman C.A., Bradley L.C., Herrmann J.* Atmospheric-Turbulence Measurements Using a Synthetic Beacon in the Mesospheric Sodium Layer // *Opt. Lett.* 1991. V. 16. P. 1367.
6. *Вальд А.* Статистические решающие функции // *Позиционные игры* / Пер. с англ. М.: Наука, 1967. С. 300–522.
7. *Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др.* Вопросы статистической теории радиолокации. Т. 1. М.: Сов. радио, 1963. 424 с.
8. *Александров А.Б., Инишин П.П.* О роли экстремальных значений энтропии в задачах спектрального анализа // *Оптика и спектроскопия*. 1991. Т. 70. Вып. 1. С. 142.

Государственное предприятие  
«НПО Астрофизика», Москва

Поступила в редакцию  
11 июня 1998 г.

*P.A. Bakut, V.E. Kirakosyants.* **Optimal Estimate of Phase Front and Image Reconstructing under Phase Distortions.**

Using the statistical maximum likelihood estimator, an optimal recurrent procedure has been elaborated for remotely located objects' image reconstruction under a signal phase distortions in turbulent atmosphere and additive background at the optical receiver input. It is shown that the optimal algorithm can be realized using an adaptive optical system (AOS) based on a generator of wave front of heterodyne type. It has been shown that in contrary to standard AOS, an amplitude corrector, enhancing an accuracy estimate of phase distortions by noises, should be a part of the optical system along with phase corrector and the wave front generator.

A potentiality of the optimal procedure is shown to be such that its operation does not require an additional reference source.