

С. В. ТЮРИН, канд. техн. наук, А. С. ЗАМКОВОЙ, канд. техн. наук,
В. П. КОНРАУ, канд. техн. наук, М. М. БЫКОВ, канд. техн. наук, В. П. ДЗЕБАНЬ

АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ В ЛИДАРНЫХ СИСТЕМАХ

Одним из наиболее эффективных путей уменьшения влияния турбулентной атмосферы на качество функционирования лазерных измерительных систем является применение адаптивных методов компенсации искажений оптического сигнала [1]. Сущность этих методов, реализуемых адаптивными оптическими системами, заключается в динамической коррекции принимаемой от исследуемого объема пространства волны на основе информации о турбулентных искажениях.

В случае применения адаптивной техники удастся сконцентрировать весь принимаемый апертурой световой поток в фактически дифракционном пятне малого размера, что приводит к повышению отношения полезного сигнала к шуму на фотоприемнике и, в конечном счете, определяет предельную чувствительность измерительного инструмента. При этом степень фокусировки излучения в фокальной плоскости приемного телескопа существенно зависит от качества адаптивной коррекции, которое в большинстве случаев может быть охарактеризовано параметром Штреля $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{\langle I(z,0) \rangle}{I_0(z,0)} \quad (1)$$

Данный параметр показывает степень снижения средней интенсивности на оси пучка в условиях частично скомпенсированных искажений волнового фронта относительно интенсивности при их идеальной компенсации или отсутствии искажений.

При распространении оптического пучка в случайно неоднородной среде (турбулентной атмосфере) средняя интенсивность в точке фокальной плоскости описывается выражением

$$\langle I(\rho) \rangle = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \int \int_{-\infty}^{\infty} \langle G(r_1)G^*(r_2) \rangle U(r_1)U^*(r_2) \exp\{i[\varphi(r_1) - \varphi(r_2)]\} dr_1 dr_2, \quad (2)$$

где z – расстояние между плоскостями апертуры и объекта (или фокусное расстояние);

$G(r)$ – функция возмущений;

$u(r)$ – распределение поля в плоскости адаптивной апертуры;

$\varphi(r)$ – случайный набег фаз.

Если с помощью точечного опорного источника, расположенного в одной изопланатической области с зондируемым объемом, измерить атмосферные фазовые искажения, определяемые множеством $\exp[i\varphi(r)]$, то, вводя в плоскости приемной адаптивной апертуры корректирующее воздействие $\exp[-\Phi(r)]$, можно компенсировать фазовые флуктуации атмосферы. Тогда среднюю интенсивность после коррекции можно определить из соотношения

$$\langle I(\rho) \rangle = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \int \int_{-\infty}^{\infty} \langle G(r_1)G^*(r_2) \rangle U(r_1)U^*(r_2) \exp\{\varphi(r_1) - \Phi(r_1) - \varphi(r_2) + \Phi(r_2)\} dr_1 dr_2. \quad (3)$$

Из (3) видно, что при получении достаточно точных $\Phi(r) \approx \varphi(r)$ оценок искажения фазы волнового фронта опорного излучения и широких возможностей корректирующих устройств можно довести в пределе до их значений в однородной среде.

Влияние турбулентности на работу приемных телескопов проявляется в том, что каждая точка формируемого изображения размывается. При этом уменьшается интенсивность в центре пятна, и мощность оптического пучка концентрируется на большой площади в плоскости изображения по сравнению со случаем отсутствия искажений. Указанное обстоятельство может быть адекватно описано уменьшением эффективного размера апертуры телескопа, в пределах которого происходит когерентное суммирование световых полей в фокальной плоскости приемного телескопа. В этом случае

$$R_{ш} = \frac{S_{эф}}{S_{пр}}, \quad (4)$$

где $S_{эф}$ – эффективная площадь апертуры ;

$S_{пр} = \pi D^2/4$ – фактический диаметр апертуры.

Тогда интенсивность излучения в фокальной плоскости адаптивного телескопа I_a определится из выражения :

$$I_A = \frac{P_s}{A_{п1}} = \frac{P_s D^2 R_{ш}}{\pi(1,22\lambda F)^2}, \quad (5)$$

где $A_{п1}$ – площадь засвеченого пятна в фокальной плоскости ;

P_s – мощность принимаемого оптического пучка ;

F – фокусное расстояние телескопа.

Интенсивность излучения в фокальной плоскости телескопа при отсутствии адаптации I_p и учете условия $D \gg r_0$ определится следующим выражением:

$$I_p = \frac{P_s}{A_{п}} = \frac{P_s r_0^2}{\pi(1,22\lambda F)^2}, \quad (6)$$

где r_0 - радиус корреляции фазовых искажений.

Если взять отношение этих значений интенсивности, то можно оценить степень эффективности использования адаптивного телескопа в измерительных системах:

$$\frac{I_A}{I_p} = \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 R_{ш}. \quad (7)$$

Зависимость I_a/I_p от отношения D/r_0 для разных значений $R_{ш}$ представлена на рис. 1

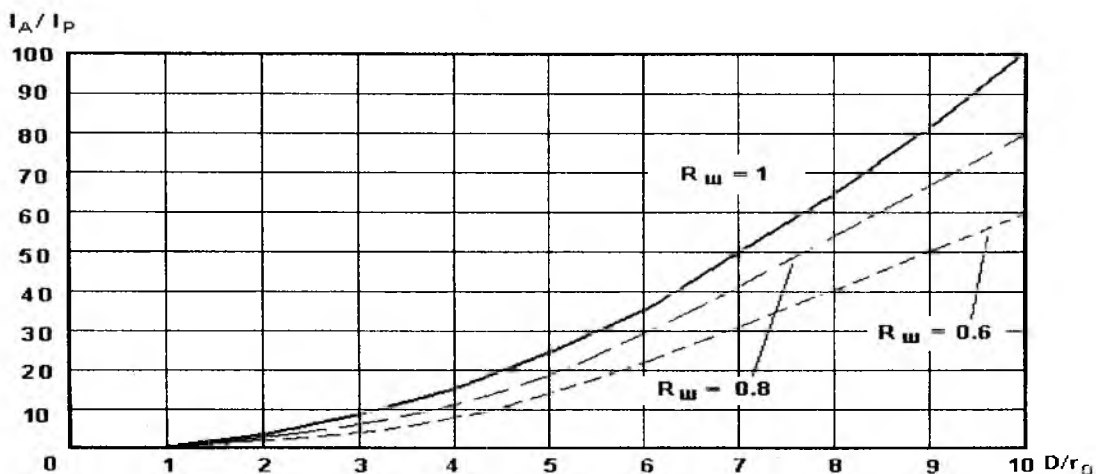


Рис. 1

Анализ результатов показывает, что наиболее эффективным является использование адаптивных методов для крупных апертур. Существенное повышение интенсивности в фокальной плоскости телескопа за счет сужения фокального пятна в этом случае приводит к возрастанию до 10 раз отношения сигнал/шум на фотоприемнике.

Это обстоятельство может быть использовано в лидарных измерителях для улучшения их потенциальных характеристик путем снижения предельного значения концентраций измеряемого компонента, которое характерно для данной лидарной системы. Для метода дифференциального поглощения и рассеяния предельное значение объемного числа молекул $N_{изм}$, которое может быть определено, описывается выражением [2]:

$$N_{изм} = \frac{1}{2\sigma\Delta R} \ln \left[1 + \frac{1}{q} \right], \quad (8)$$

где σ – сечение поглощения исследуемых молекул;

ΔR – протяженность локального объема пространства, в котором осуществляются дистанционные измерения;

q – отношение сигнал/ шум на фотоприемнике.

Из данного соотношения видно, что увеличение отношения сигнал/шум приводит к снижению порога обнаружения исследуемых компонент, что повышает чувствительность лидарного измерителя.

Отношение сигнала к шуму на выходе фотоприемника описывается известным отношением [2]:

$$q = \frac{P_s}{\left[2B(P_s + P_\phi)h\nu/\eta + BP_B^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

где P_s – мощность принимаемого сигнала;

B – ширина полосы пропускания фотоприемника;

$h\nu$ – энергия кванта;

η – квантовая эффективность фотоприемника;

$P_\phi = KB(\lambda)S_{пр} \Delta\Omega \Delta\lambda$ – мощность фонового излучения атмосферы,

(K – коэффициент пропускания оптического тракта);

$B(\lambda)$ – спектральная яркость фона;

$S_{пр}$ – площадь приемной апертуры;

$\Delta\Omega$ – телесный угол, в котором принимается фоновое излучение;

$\Delta\lambda$ – ширина полосы пропускания приемного тракта;

$$P_B = \frac{\sqrt{A_{П}}}{D^*} \text{ эквивалентная мощность шума фотоприемника, } (11)$$

($A_{П}$ – площадь засвеченного пятна в фокальной плоскости $A_{П1}$). Она уменьшается вместе с телесным углом $\Delta\Omega_1$, в котором принимается излучение, что обуславливает соответствующие изменения эквивалентной мощности шума фотоприемника P_{B1} и мощности фонового излучения $P_{\phi1}$.

Тогда для условий, когда сигнал ограничен темновым током фотоприемника ($BP_B^2 \gg 2B(P_s + P_\phi)h\nu/\eta$), характерным для твердотельных детекторов в ИК диапазоне с учетом (5,6,9,10,11), отношение величины сигнал/шум в случае адаптации (q_1) и без нее (q) можно представить в следующем виде :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 \approx \left(\frac{D}{r_0}\right)^2 R_{ш} = \frac{I_A}{I_P} \quad (12)$$

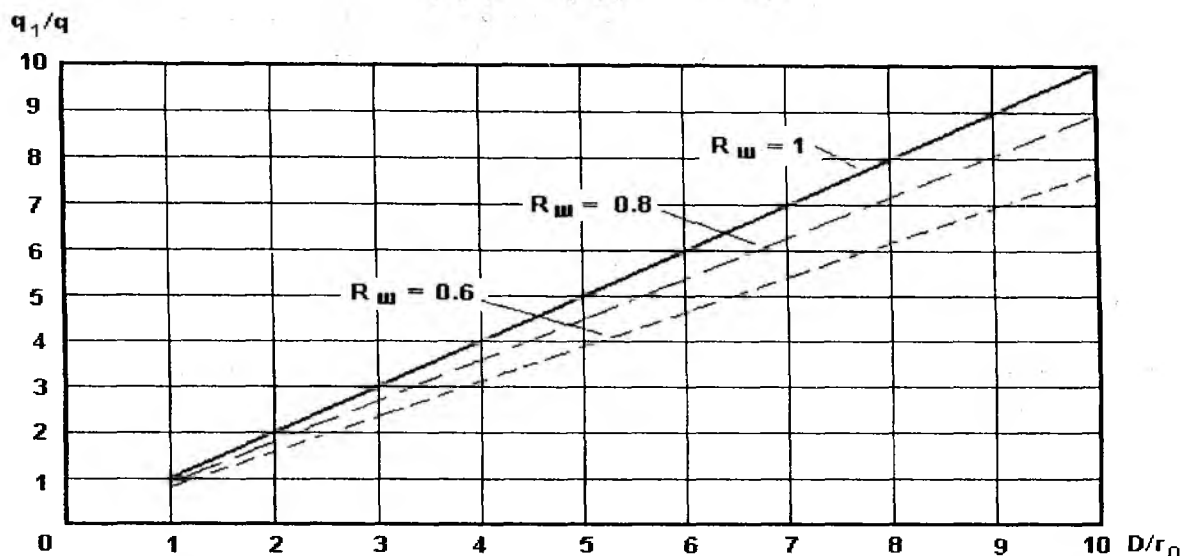


Рис. 2

Из соотношения (12) видно, что с увеличением интенсивности излучения в фокальной плоскости адаптивного телескопа соответствующим образом растет и отношение сигнал/шум на выходе фотоприемника.

Таким образом, проведенные исследования показали, что существует возможность улучшения потенциальных характеристик лидарного измерения за счет применения адаптивных телескопов, позволяющих при достаточно больших апертурах существенно (до 10 раз) повысить отношение сигнал/шум.

Список литературы: 1. Gardner C.S., Welsh B.M., Thompson L.A.. Design and performance analysis of adaptive optical telescopes using laser guide stars. Proc IEEE. 1990. Vol. 78, № 11. Pp 1721 – 1741. 2. Иващенко М.В., Шерстов. И.В. Дальность действия лидара дифференциального поглощения на основе СО₂-лазера // Квантовая электроника. Т. 30, № 30. 2000. С. 747 – 752

Харьковский военный университет
Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 10.10.2002