

С.М. Иванов, В.Ш. Хисматулин

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКА ГАРТМАНА НА КАЧЕСТВО ОЦЕНИВАНИЯ ОБЩЕГО НАКЛОНА ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Рассматривается влияние числа элементов датчика Гартмана на отношение сигнал/шум для фотоэлектронных умножителей. Анализируется изменение качества оценивания общего наклона волнового фронта в зависимости от количества элементов датчика.

Астрофизическими объектами наблюдения являются точечные (неразрешаемые телескопом) и протяженные источники некогерентного света. При работе адаптивной оптической системы по некогерентному сигналу наиболее предпочтительным является использование, как показано в [1], датчиков гартмановского типа.

При методе Гартмана атмосферные возмущения отображаются на решетке линз. Если волновой фронт проходящего излучения искажен, то изображение смещается относительно идеального положения. Как известно [1], дисперсия ошибки измерения смещения Δ в гартмановском датчике определяется соотношением:

$$d_{\Delta} = \frac{1}{q_1^2} r_n,$$

где $r_n = \frac{0.61 \lambda F}{D_d} + \frac{\Theta F}{2}$ – радиус светового пятна; D_d – диаметр входной субапертуры датчика; F – фокусное расстояние датчика волнового фронта; q_1^2 – отношение сигнал/шум на субапертуре; Θ – угловой размер объекта.

Тогда дисперсия ошибки измерения наклона волнового фронта на одной из субапертур будет определяться следующим образом:

$$d_{n1} = d_{\Delta} \frac{k^2}{F^2} = \frac{\pi^2}{q_1^2} \left(\frac{1.22}{D_d} + \frac{\Theta}{\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

При малых интенсивностях сигнала возможные отношения сигнал/шум для фотоэлектронных умножителей определяются квантовым характером сигнального излучения. Количество сигнальных и фоновых фотоэлектронов распределено по закону Пуассона и в этом случае, как известно, отношение сигнал/шум имеет вид

$$q_1^2 = \frac{\bar{n}_c^{-2}}{\bar{n}_c + \bar{n}_ф}, \quad (2)$$

где \bar{n}_c – среднее число сигнальных фотоэлектронов; $\bar{n}_ф$ – среднее число фоновых фотоэлектронов.

Среднее число сигнальных фотоэлектронов связано с блеском космического объекта, выраженным в звездных величинах, соотношением:

$$\bar{n}_c = \frac{S_1 A \tau_{атм} \tau_{опт} \gamma T_n}{h \nu} \cdot 10^{\frac{m_0 - m_{к.о}}{2.5}}, \quad (3)$$

где $m_0 = -14^m$, $18 \pm 0,05$ – звездная величина, соответствующая освещенности в 1 лк; $m_{к.о}$ – звездная величина космического объекта; S_1 – площадь приемной субапертуры; $A = 1/683$ Вт/лк – механический эквивалент света; $\tau_{атм}$ – коэффициент пропускания атмосферы; $\tau_{опт}$ – коэффициент пропускания оптики; γ – квантовая эффективность фотоприемника; T_n – время накопления; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка; ν – средняя частота принимаемого светового излучения.

Увеличение числа элементов датчика ведет к уменьшению диаметра субапертуры и к уменьшению количества сигнальных фотоэлектронов, приходящих на фотоэлектронные умножители. Среднее число фоновых фотоэлектронов связано с яркостью неба B :

$$\bar{n}_\phi = \frac{BS_1 \Delta\lambda \tau_{\text{атм}} \tau_{\text{опт}} \gamma T_H \Delta\Omega}{h\nu}, \quad (4)$$

где $\Delta\Omega = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2$ – телесный угол, соответствующий полю зрения всей оптической системы; D – диаметр апертуры телескопа.

Величина отношения сигнал/шум определяется в основном количеством сигнальных фотоэлектронов и практически не зависит от углового размера объекта. На рис. 1 показано влияние числа элементов датчика $N^2 = (D/D_d)^2$ на отношение сигнал/шум при следующих условиях: $D = 0,5$ и $1,5$ м; $\tau_{\text{атм}} = 0,7$; $\tau_{\text{опт}} = 0,5$; $T_H = 5$ мс; $\bar{\nu} = 5,4 \cdot 10^{14}$ Гц; $B = 2 \cdot 10^{-11}$ Вт/ср · см² · мкм, $\gamma = 0,15$. Как видно, с ростом числа элементов датчика отношение сигнал/шум падает, что объясняется уменьшением числа сигнальных фотоэлектронов.

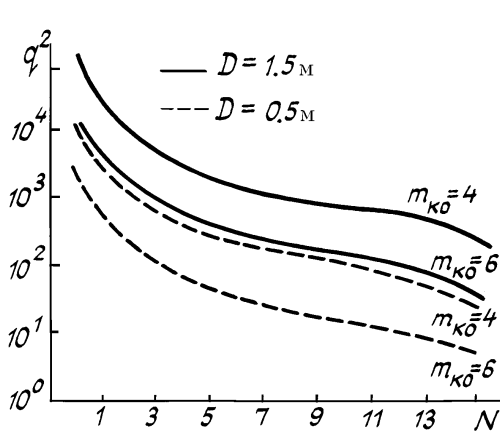


Рис. 1

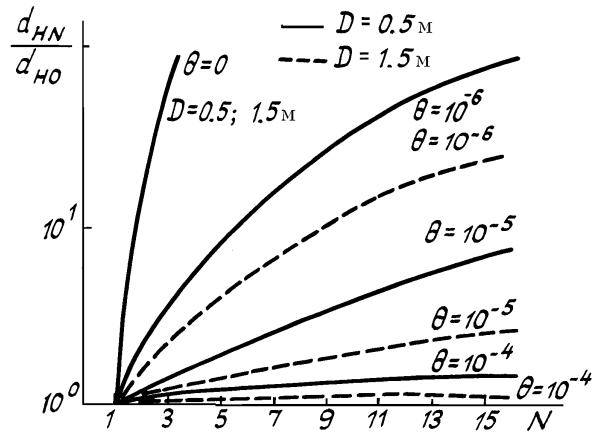


Рис. 2

Проанализируем влияние числа элементов датчика на качество оценивания общего наклона волнового фронта. На рис. 2 представлен график изменения относительной величины $d_{\text{HN}}/d_{\text{H0}}$ от числа элементов N , где d_{H0} – определяемая соотношением (1) дисперсия ошибки измерения наклона волнового фронта на всей апертуре телескопа для случая, когда датчик Гартмана состоит из одного элемента; d_{HN} – дисперсия ошибки измерения наклона волнового фронта на апертуре для датчика, состоящего из N элементов, определяемая при полной корреляции составляющих общего наклона на отдельных субапертурах соотношением:

$$d_{\text{HN}} = \frac{d_{\text{H1}}}{N^2}. \quad (5)$$

При наблюдении идеального точечного объекта ($\Theta = 0$) применение многоэлементного датчика Гартмана дает резкое ухудшение качества измерения наклона при любых размерах приемной апертуры. Если объект не точечный, то ухудшение качества проявляется в меньшей степени на больших апертурах и при больших угловых размерах объекта. Практически следует признать приемлемым использование многоэлементного датчика Гартмана, если $d_{\text{HN}}/d_{\text{H0}} < 2 \dots 4$.

1. Харди Дж. У. // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 6. С. 31-85.

Поступила в редакцию
29 июля 1991 г.

S. M. Ivanov, V. Sh. Hismatulin. The Influence of the Number of Hartmann Sensor Elements on the Quality of Common Wave-Front Slope Estimation.

The influence of the number of Hartmann sensor elements on the signal-to noise ratio in the case of PMTs is considered. The quality of estimation of the common wavefront slope as a function of the number of sensor elements is analyzed.