Оптический журнал

Оптическое приборостроение

УДК 535.231.15

Лидарная модель формирования натриевой «лазерной звезды» при наблюдении и угловом сопровождении космических объектов

© 2019 г. Г. И. Афонин, канд. техн. наук; А. С. Кошкаров, канд. техн. наук; Г. Н. Мальцев, доктор техн. наук

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург

E-mail: csm681@bk.ru

Поступила в редакцию 25.02.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-06-36-44

Рассмотрена лидарная модель формирования натриевой «лазерной звезды» для измерения и адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений в наземной оптической системе при наблюдении и угловом сопровождении космических объектов. Исследованы энергетические характеристики «лазерной звезды» при её различном угловом положении в зоне видимости наземной оптической системы. Сформулированы требования к энергетическим характеристикам лазера формирования «лазерной звезды» для реализации адаптивной фазосопряжённой коррекции атмосферных фазовых искажений при наблюдении низкоорбитальных космических объектов.

Ключевые слова: *«лазерная звезда», атмосферные фазовые искажения, адаптивная оптика, фазовое сопряжение.*

Коды OCIS: *140.0140, 350.1260.*

Реализация потенциальных характеристик наземных оптических систем наблюдения за астрономическими и космическими объектами в условиях атмосферных искажений становится возможной благодаря использованию методов адаптивной оптики [1–3]. В последние годы благодаря новейшим достижениям в области оптического приборостроения появилась возможность технической реализации крупных наземных оптических телескопов с адаптивной коррекцией атмосферых фазовых искажений, позволяющей проеодолеть атмосферный предел разрешающей способости наземных оптических систем [4–7]. При этом оптическое наблюдение за космическими объектами с адаптивной фазовой коррекцией имеет ряд особеностей как с точки зрения решаемых прикладных задач мониторинга околоземного космического пространства, так и с точки зрения технической реализации адаптивной коррекции атмосферых искажений в процессе углового сопровождения наблюдаемых космических объектов.

В качестве одной из наиболее перспективных технологий адаптивной фазовой коррекции атмосферых искажений в наземных оптических системах в настоящее время рассматривается адаптация по искусственной «лазерной звезде» (LGS-AO — Laser Guide Star Adaptive Optics) [8–12]. «Лазерная звезда» формируется при распространении лазерного излучения в атмосфере по вертикальным и наклонным трассам снизу вверх. На определенных длинах волн в некоторых слоях атмосферы происходит интенсивное рассеяние и переизлучение лазерного излучения. Это переизлученное излучение может приниматься наземным телескопом как излучение искусственно сформированного опорного источника для измерения и коррекции атмосферых фазовых искажений методом фазового сопряжения. Возможно формирование «лазерных звёзд» двух типов — релеевских и натриевых. Релеевские «лазерные звёзды» формируются с использованием релеевского рассеяния лазерного излучения с длиной волны 0,35–0,4 мкм на высоте 10–20 км в тропосфере. Натриевые «лазерные звёзды» формируются с использованием резонансного рассеяния лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 0{,}589$ мкм в слое паров натрия на высоте 90–100 км в ионосфере. Высота натриевого слоя, уровень концентрации в нём атомов натрия

и большое по сравнению с релеевским рассеянием эффективное сечение обратного рассеяния делают натриевый слой наиболее подходящим для формирования искусственных опорных источников излучения.

Реализация технологии адаптации по «лазерной звезде» на ряде крупных наземных телескопов позволила получить изображения астрономических объектов с угловым разрешением, близким к инструментальному [5, 7, 8, 13, 14]. В то же время, несмотря на имеющиеся теоретическое обоснование и экспериментальные данные, в настоящее время отсутствует единое мнение об энергетике «лазерной звезды», в частности, о мощности лазерного излучения, необходимой для её формирования при различных условиях измерения действующих атмосферых фазовых искажений, а полученные различными авторами количественные оценки энергетических характеристик «лазерной звезды» существенно отличаются друг от друга [15–17]. Одной из причин этого является то, что условия адаптации по «лазерной звезде» при наблюдении астрономических и космических объектов могут существено отличаться. Астрономические наблюдения не связаны с высокой динамикой наблюдемых объектов, а наблюдение за космическими объектами, находящимися на околоземных орбитах, происходит в процессе их углового сопровождения в зоне видимости наземной оптической системы.

Практический интерес представляет определение энергетических характеристик натриевой «лазерной звезды», позволяющих использовать её в качестве опорного источника для адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений в наземных оптических системах при угловом сопровождении наблюдаемых космичесих объектов, что характерно для наблюдения за низкоорбитальными космическими объектами — функционирующими и прекратившими функционировать космическими аппаратами и элементами «космического мусора» [4, 6, 18]. Очевидно, что энергетика «лазерной звезды» должна обеспечивать возможность измерения атмосферных фазовых искажений в широком диапазоне направлений линии визирования на наблюдаемый космический объект при его прохождении в зоне видимости наземной оптической системы.

Кроме требований по энергетике условием использования «лазерной звезды» в качестве опорного источника для измерения действующих атмосферных фазовых искажений является условие изопланатизма [3, 10, 19]. «Лазерная звезда» должна располагаться в одной изопланатической зоне с наблюдаемым космическим объектом так, чтобы измеряемые по ней атмосферные фазовые искажения соответствовали искажениям, в условиях которых формируется изображение наблюдаемого объекта. Размер изопланатичной зоны характеризуется углом изоплантизма, который, как и энергетика «лазерной звезды», зависит от направления линии визирования на наблюдаемый космический объект при его прохождении в зоне видимости наземной оптической системы.

Для анализа энергетических характеристик «лазерных звёзд» используются два основных подхода. Первый подход — феноменологический — представлен в работах [10, 17]. Он предполагает математическое описание процессов резонансного рассеяния в натриевом слое и распространения лазерного излучения с помощью формальных моделей, введённых для аналитического решения соответствующих уравнений переноса. Второй подход — физический — представлен в работах [8, 20]. Он основан на описании принимаемого излучения «лазерной звезды» с помощью лидарного уравнения. При этом рассеяние лазерного излучения в натриевом слое описывается обобщёнными параметрами аналогично тому, как это делается при расчётах, связанных с лазерным зондированием атмосферы. В настоящей статье развивается второй из указанных подходов, что отвечает решаемой прикладной задаче — определению уровня принимаемого излучения «лазерной звезды», необходимого для измерения по нему атмосферных фазовых искажений при наблюдении низкоорбитальных космических объектов наземными оптическими системами.

Особенностью рассматриваемй лидарной модели является совместный учёт изменения параметров рассеяния в натриевом слое и трассы распространения зондирующего и переизлучённого натриевым слоем излучения в зависимости от углового положения «лазерной звезды» относительно наземной оптической системы. Предполагается, что оптическая система имеет моностатическую конфигурацию, тогда справедливым будет предположение о том, что оптические оси телескопа наблюдения и лазера формирования «лазерной звезды» практически совпадают. Угловое положение наблюдаемого космического объекта и «лазерной звезды» в зоне видимости наземной оптической системы характеризуется зенитным углом β линии визирования, изменяющимся в пределах $-\pi/2 \le \beta \le \pi/2$. Лидарная модель формирования «лазерной звезды» позволяет проанализировать изменение энергии её излучения E_{LGS} в зависимости от зенитного угла β. Излучение с энергией E_{LGS} принимается наземной оптической системой при угловом сопровождении «лазерной звездой» прохождения в зоне видимости наблюдаемого космического объекта.

В общем случае энергетические характеристики принимаемого наземной оптической системой рассеянного атмосферой зондирующего лазерного излучения задаётся лидарным уравнением, связы-

вающим энергию или мощность излучения обратного рассеяния с характеристиками излучающего лазера и оптическими параметрами атмосферы на трассе распространения [10, 21]. При формировании натриевой «лазерной звезды» обратное рассеяние зондирующего излучения импульсного лазера происходит за счёт его переизлучения слоем паров натрия, и выражение для принимаемой наземной оптической системой энергии излучения «лазерной звезды» в импульсе рассеянного излучения имеет следующий вид [8]:

$$E_{\mathrm{LGS}} = \frac{E_L r_0^2 \gamma_{\mathrm{atm}}^2 \gamma_{\mathrm{res}} \gamma_{\mathrm{tr}} \sigma_{\mathrm{ef}} C_{\mathrm{Na}}}{16 R_{\mathrm{LGS}}^2 \left(1 + \tau_M / \tau_S\right)}, \qquad (1)$$

где E_L — энергия импульса, излучаемого лазером формирования «лазерной звезды», R_{LGS} — наклонная дальность до «лазерной звезды», r_0 — радиус когерентности атмосферных фазовых искажений (радиус Фрида) на трассе распространения на длине волны зондирующего лазерного излучения, σ_{ef} — эффективное сечение обратного рассеяния слоя паров натрия, C_{Na} — средняя поперечная концентрация атомов натрия в натриевом слое, τ_M — время естественного возбуждения атомов натрия, τ_S — время вынужденного возбуждения атомов натрия, зависящее от длительности импульса лазерного излучения, γ_{atm} — коэффициент пропускания (прозрачности) атмосферы, γ_{tr} и γ_{res} — коэффициенты пропускания передающей и приёмной оптических систем соответственно. Величина γ_{atm} входит в выражение (2) в квадрате, поскольку лазерное излучение дважды проходит через атмосферу (зондирующее излучение до «лазерной звезды» и переизлученное излучение обратно). Типичные значения параметров натриевого слоя для вертикальной трассы распространения лазерного излучения на длине волны $\lambda = 0{,}589$ мкм составляют $C_{\mathrm{Na0}} = 5\times10^{13}$ м$^{-2}$, $\sigma_{\mathrm{ef}} = 9\times10^{-16}$ м^2, $\tau_M = 16$ нс [22].

В предположении, что угловая расходимость излучения лазера формирования «лазерной звезды» составляет $\Delta\theta \approx 2(\lambda/r_0)$, где λ — длина волны зондирующего лазерного излучения, выражение (1) определяет энергию сигнала, приходящуюся на отдельный канал управления субапертурой корректора волнового фронта размером $d \approx r_0$. Практически это имеет место, если в излучаемом поле лазера формирования «лазерной звезды» атмосферные искажения не корректируются, а при уменьшении размера субапертуры d по сравнению с r_0 энергия сигнала, приходящаяся на отдельный канал адаптивного контура, уменьшается в $(r_0/d)^2$ раз.

Зависимость определяемой выражением (1) энергии излучения «лазерной звезды» E_{LGS}, принимаемого оптической системой, от зенитного угла β линии визирования на наблюдаемый космический объект определяется зависимостью от β следующих параметров: средней поперечной концентрации атомов натрия в натриевом слое C_{Na}, наклонной дальности до «лазерной звезды» R_{LGS}, радиуса когерентности атмосферных фазовых искажений r_0 и коэффициента пропускания атмосферы γ_{atm} на трассе распространения лазерного излучения. На рис. 1 показаны геометрические соотношения, влияющие на изменение перечисленных параметров с изменением зенитного угла β линии визирования на «лазерную звезду». Здесь и далее для определения характера изменения энергетики «лазерной звезды» в зоне видимости наземной оптической системы рассматривается плоская модель атмосферы, не учитывающая сферичность Земли.

На вертикальных трассах (при $\beta = 0$) средняя поперечная концентрация атомов натрия в среднем составляет C_{Na0}. С увеличением зенитного угла β величина C_{Na} увеличивается благодаря увеличению эффективной толщины натриевого слоя, как это показано на рис. 1. Для плоской модели атмосферы поперечная концентрация атомов натрия C_{Na} в зависимости от зенитного угла β определяется выражением

$$C_{\mathrm{Na}}(\beta) = C_{\mathrm{Na0}} \sec\beta. \qquad (2)$$

Наклонная дальность от наземной оптической системы до «лазерной звезды» R_{LGS} в зависимости

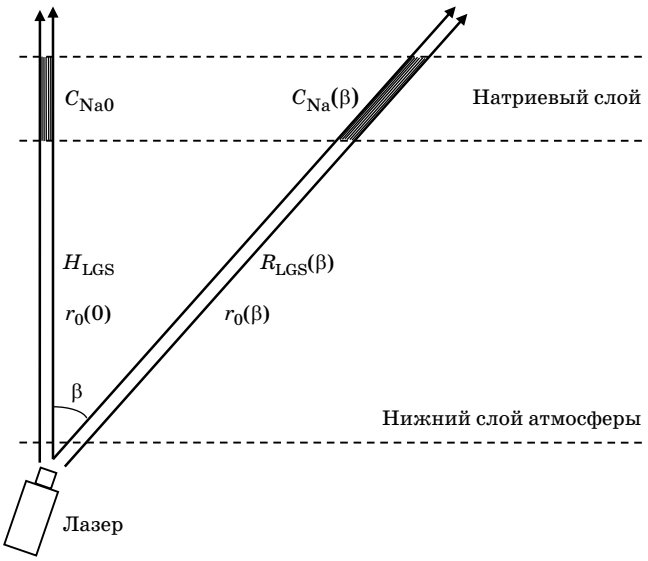

Рис. 1. Геометрические соотношения при формировании натриевой «лазерной звезды». H_{LGS} — высота натриевого слоя, β — зенитный угол, C_{Na0} — средняя поперечная концентрация атомов натрия при $\beta = 0$, $r_0(0)$ — радиус когерентности для вертикальной трассы, $C_{\mathrm{Na}}(\beta)$ — средняя поперечная концентрация атомов натрия при ненулевых значениях β, $r_0(\beta)$ — радиус когерентности при ненулевых значениях β, $R_{\mathrm{LGS}}(\beta)$ — наклонная дальность от наземной оптической системы до «лазерной звезды».

от зенитного угла β для плоской модели атмосферы определяется выражением

$$R_{\mathrm{LGS}}(\beta) = H_{\mathrm{LGS}}\sec\beta, \quad (3)$$

где H_{LGS} — высота натриевого слоя.

Радиус когерентности атмосферных фазовых искажений r_0 связан со структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления атмосферы C_n^2 на трассе распространения и в общем случае определяется (в метрах) выражением [3]

$$r_0 = 0{,}185\left[\lambda^{-2}\int\limits_{(R)} C_n^2(z)dz\right]^{-3/5}, \quad (4)$$

где $C_n^2(z)$ — структурная характеристика флуктуаций показателя преломления на трассе распространения. Интегрирование в выражении (4) осуществляется по трассе распространения оптического излучения R, при наблюдении космических объектов наземной оптической системой — по линии визирования на наблюдаемый объект. С учётом выражения (4) радиус когерентности r_0 в зависимости от зенитного угла β для плоской модели атмосферы определяется выражением

$$r_0(\beta) = r_0(0)\cos^{3/5}\beta, \quad (5)$$

где $r_0(0)$ — радиус когерентности для вертикальной трассы (при $\beta = 0$) при зенитном положении наблюдаемого космического объекта.

Для стандартной модели затухания оптического излучения в атмосфере по закону Бугера [6] коэффициент пропускания атмосферы γ_{atm} в зависимости от зенитного угла β для плоской модели атмосферы определяется выражением

$$\gamma_{\mathrm{atm}}(\beta) = \gamma_{\mathrm{atm0}}^{\sec\beta}, \quad (6)$$

где γ_{atm0} — коэффициент пропускания атмосферы для вертикальной трассы (при $\beta = 0$) при зенитном положении наблюдаемого космического объекта.

Подставив в уравнение (1) зависимости (2), (3), (5), (6), получаем зависимость энергии E_{LGS} излучения, принимаемого от «лазерной звезды», в импульсе рассеянного излучения от зенитного угла β линии визирования на наблюдаемый космический объект, в направлении на который формируется «лазерная звезда»

$$E_{\mathrm{LGS}}(\beta) = \frac{E_{\mathrm{L}} r_0^2(0)\gamma_{\mathrm{atm0}}^{2\sec\beta}\gamma_{\mathrm{res}}\gamma_{\mathrm{tr}}\sigma_{\mathrm{ef}}C_{\mathrm{Na0}}\cos^{11/5}\beta}{16H_{\mathrm{LGS}}^2\left(1+\tau_M/\tau_S\right)}. \quad (7)$$

Изменение принимаемой энергии излучения «лазерной звезды» E_{LGS} при изменении зенитного угла линии визирования характеризует отношение $E_{\mathrm{LGS}}(\beta)/E_{\mathrm{LGS}}(0)$, где $E_{\mathrm{LGS}}(0)$ — энергия излучения, принимаемого от «лазерной звезды» при её нахождении в зените (при $\beta = 0$). Зависимость $E_{\mathrm{LGS}}(\beta)/E_{\mathrm{LGS}}(0)$ имеет следующий вид:

$$E_{\mathrm{LGS}}(\beta)/E_{\mathrm{LGS}}(0) = \gamma_{\mathrm{atm0}}^{2(\sec\beta-1)}\cos^{11/5}\beta. \quad (8)$$

На рис. 2 представлены расчётные зависимости отношения $E_{\mathrm{LGS}}(\beta)/E_{\mathrm{LGS}}(0)$, полученные для различных значений коэффициента прозрачности атмосферы. Кривая *1* соответствует $\gamma_{\mathrm{atm0}} = 0{,}4$, кривая *2* — $\gamma_{\mathrm{atm0}} = 0{,}6$, кривая *3* — $\gamma_{\mathrm{atm0}} = 0{,}8$. Их графиков видно, что имеет место существенная зависимость энергии E_{LGS} излучения, принимаемого от «лазерной звезды», от зенитного угла β, а также от величины γ_{atm0}. Для работы в диапазоне зенитных углов $-45° < \beta < 45°$ необходимо увеличение выходной энергии излучения лазера, формирующего «лазерную звезду», в 1,7–4 раза, а для работы в диапазоне зенитных углов $-60° < \beta < 60°$ необходимо увеличение выходной энергии излучения в 7–15 раз по сравнению с выходной энергией лазера формирующего «лазерную звезду», при работе в зенит (при $\beta = 0$). Очевидно, что это может ограничивать угловые области наблюдения низкоорбитальных космических объектов.

В основе измерения искажений волнового фронта датчиком волнового фронта гартмановского типа в видимом диапазоне волн лежит фотодетектирование принимаемых оптических сигналов. При этом потенциальная точность измерений определяется энергией принимаемого излучения «лазерной звезды», приходящегося на отдельный канал адаптивного контура, в котором в течение времени «замороженности» действующих искажений проводится измерение искажений для управления соответствующей субапертурой корректора

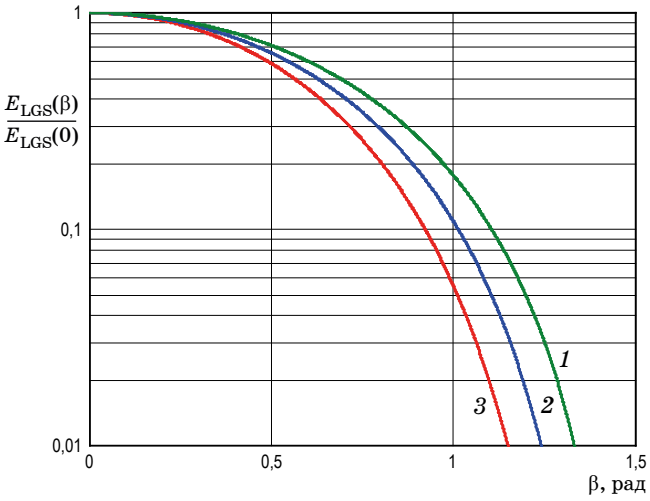

Рис. 2. Зависимости нормированной энергии излучения «лазерной звезды» $E_{\mathrm{LGS}}(\beta)/E_{\mathrm{LGS}}(0)$ в импульсе принимаемого рассеянного излучения от зенитного угла линии визирования β при различных значениях коэффициента прозрачности атмосферы γ_{atm0}. *1* — $\gamma_{\mathrm{atm0}} = 0{,}4$, *2* — $\gamma_{\mathrm{atm0}} = 0{,}6$, *3* — $\gamma_{\mathrm{atm0}} = 0{,}8$.

волнового фронта. Эта энергия характеризуется средним числом регистрируемых фотодетектором за время накопления сигнальных фотоотсчётов

$$n_s = \frac{\eta\lambda E_{\mathrm{LGS}} T_0}{hcT_S}, \qquad (9)$$

где η — квантовая эффективность фотодетектора, $h = 6{,}62\times10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, $c = 3\times10^8$ м/с — скорость света, E_{LGS} — энергия излучения «лазерной звезды» в импульсе рассеянного излучения, определяемая выражением (6), T_0 — время накопления сигнала, T_S — период следования импульсов лазерного зондирования. В выражении (9) отношение T_0/T_S представляет собой число импульсов лазерного зондирования, приходящихся на время накопления сигнала от «лазерной звезды», по которому осуществляется измерение действующих фазовых искажений, а величина $E_{\mathrm{LGS}}T_0/T_S$ представляет собой энергию излучения «лазерной звезды», приходящуюся на одно измерение фазовых искажений.

Потенциальная точность измерения фазовых искажений на отдельной субапертуре при регистрации фотодетектором n_s сигнальных фотоотсчётов характеризуется среднеквадратическим отклонением ошибки измерения средней фазы на субапертуре [23]

$$\sigma_{\varphi 0} = \pi/\sqrt{n_c}\,. \qquad (10)$$

Выражение (10) справедливо для наблюдений в ночное время суток и частично в сумерки, когда фоновый шум незначителен, и число фоновых фотоотсчётов и фотоотсчётов темнового тока не учитывается.

Для апертуры, состоящей из N субапертур, полное значение среднеквадратического отклонения ошибки измерения датчиком волнового фронта гартмановского типа фазовых искажений на апертуре в целом определяется выражением [23]

$$\sigma_\varphi = \sigma_{\varphi 0}\sqrt{\frac{2}{3}\left(1+\frac{1}{4}\ln N\right)}. \qquad (11)$$

На рис. 3 приведены рассчитанные с использованием выражений (10) и (11) зависимости среднего числа сигнальных фотоотсчётов n_s, необходимого для достижения требуемого уровня ошибки измерения фазовых искажений на апертуре, от числа субапертур N. Среднеквадратическое отклонение ошибки измерения фазовых искажений на апертуре σ_φ связано приближенным соотношением (приближение Марешаля) $R_{St} \approx \exp(-\sigma_\varphi^2)$ с коэффициентом Штреля R_{St}. Кривая *1* соответствует $R_{St} = 0{,}95$, кривая *2* — $R_{St} = 0{,}9$, кривая *3* — $R_{St} = 0{,}85$, кривая *4* — $R_{St} = 0{,}8$, кривая *5* — $R_{St} = 0{,}75$, кривая *6* — $R_{St} = 0{,}7$. Из графиков видно, что величина n_s резко увеличивается при приближении R_{St} к единице, а при фиксированном значении R_{St} в области значений $N > 10$ слабо изменяется при увеличении N.

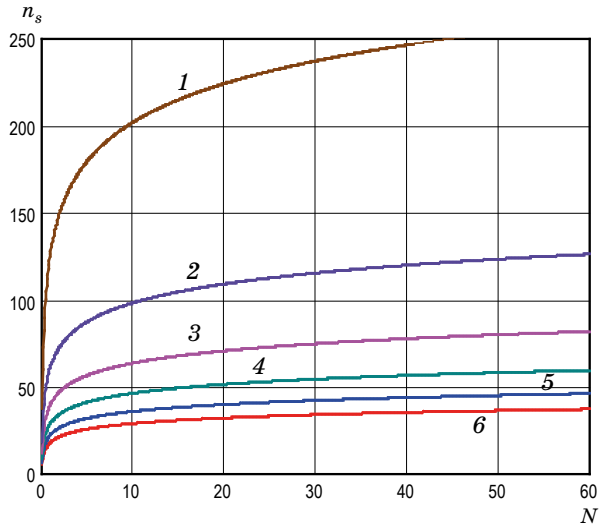

Рис. 3. Зависимости среднего числа сигнальных фотоотсчётов n_s, необходимого для достижения требуемого уровня ошибки измерения фазовых искажений, характеризуемого величиной коэффициента Штреля R_{St}, от числа субапертур N. *1* — $R_{St} = 0{,}95$, *2* — $R_{St} = 0{,}9$, *3* — $R_{St} = 0{,}85$, *4* — $R_{\mathrm{St}}=0{,}8$, *5* — $R_{St} = 0{,}75$, *6* — $R_{St} = 0{,}7$.

Для наземной оптической системы с приёмным телескопом диаметра $D = 60$ см и с адаптивной системой с корректором волнового фронта, состоящим из $N = 30$ субапертур [5], размер субапертуры корректора волнового фронта составляет $d = 9{,}5$ см, что для условий астроклимата, характеризующегося радиусом когерентности атмосферных искажений $r_0 = 10$ см, соответствует соотношению $d \approx r_0$. В соответствии с зависимостями, приведёнными на рис. 3, для измерения волнового фронта с малой ошибкой, соответствующей $R_{St} = 0{,}95$, в этих условиях в течение времени накопления T_0 необходимо обеспечить приём от «лазерной звезды» примерно $n_s = 250$ сигнальных фотоотсчётов на субапертуру.

Подставив в выражение (9) значение принимаемой наземной оптической системой энергии излучения «лазерной звезды» E_{LGS}, определяемое уравнением (1), получаем

$$n_s = \frac{\eta\lambda T_0 E_L r_0^2 \gamma_{\mathrm{atm}}^2 \gamma_{\mathrm{res}} \gamma_{\mathrm{tr}} \sigma_{\mathrm{ef}} C_{\mathrm{Na}}}{16hcT_S R_{\mathrm{LGS}}^2 \left(1+\tau_M/\tau_S\right)}. \qquad (12)$$

Используя выражение (12), можно выразить энергию импульса лазера формирования «лазерной звезды» E_L, требуемую для обеспечения заданного числа сигнальных фотоотсчётов n_s

$$E_L = \frac{16hcT_S n_s R_{\mathrm{LGS}}^2 \left(1+\tau_M/\tau_S\right)}{\eta\lambda T_0 r_0^2 \gamma_{\mathrm{atm}}^2 \gamma_{\mathrm{res}} \gamma_{\mathrm{tr}} \sigma_{\mathrm{ef}} C_{\mathrm{Na}}}. \qquad (13)$$

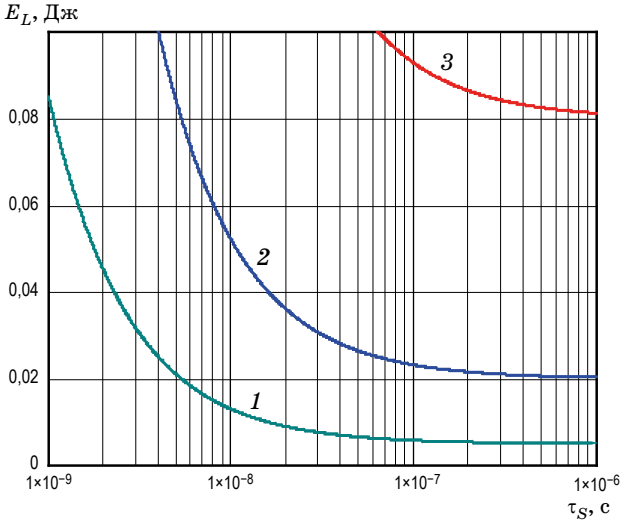

Рис. 4. Зависимости энергии импульса лазера формирования «лазерной звезды» E_L, требуемой для обеспечения $n_s = 250$ сигнальных фотоотсчётов на субапертуру, от длительности импульса τ_S при различных значениях радиуса когерентности атмосферных фазовых искажений r_0. *1* — $r_0 = 20$ см, *2* — $r_0 = 10$ см, *3* — $r_0 = 5$ см.

На рис. 4 приведены рассчитанные с использованием выражения (13) зависимости энергии импульса лазера формирования «лазерной звезды» E_L, требуемой для обеспечения $n_s = 250$ сигнальных фотоотсчётов на субапертуру, от длительности импульса, которая полагалась равной времени вынужденного возбуждения атомов натрия τ_S. При расчётах полагалось $T_S = 10$ мкс, $T_0 = 1$ мс, $\tau_M = 16$ нс, $R_{\text{LGS}} = 95$ км, $\eta = 0{,}3$, $\lambda = 0{,}589$ мкм, $\sigma_{\text{ef}} = 9\times10^{-16}$ м^2, $C_{\text{Na}} = 5\times10^{13}$ м$^{-2}$, $\gamma_{\text{atm}} = 0{,}5$, $\gamma_{\text{tr}} = \gamma_{\text{res}} = 0{,}9$. Кривая *1* соответствует $r_0 = 20$ см, кривая *2* – $r_0 = 10$ см, кривая *3* – $r_0 = 5$ см. Из графиков видно, что зависимости $E_L(\tau_S)$ имеют два характерных участка. При $\tau_S < 10$ нс имеет место резкое увеличение величины E_L при фиксированном n_s и уменьшении τ_S, а при $\tau_S > 10$ нс величина E_L при фиксированном n_s практически не зависит от τ_S. Приведённые зависимости $E_L(\tau_S)$ позволяют сформулировать требования к характеристикам лазера формирования «лазерной звезды».

Период следования зондирующих импульсов T_0 в общем случае должен удовлетворять условию $T_S < T_0$. Так, в работе [10] рекомендуются следующие значения длительности и периода следования импульсов лазера формирования «лазерной звезды»: $\tau_S = 30$ нс, $T_S = 10$ мкс. При длительности импульса $\tau_S = 30$–100 нс для диапазона значений радиуса когерентности $r_0 = 5$–20 см требуемая энергия импульса лазера формирования «лазерной звезды» составляет при принятых допущениях $E_L = 0{,}005$–$0{,}08$ Дж. При периоде следования импульсов $T_S = 10$ мкс это соответствует диапазону значений средней выходной мощности лазера $P_L = E_L/T_S = 20$–800 Вт. При $d \approx r_0 = 10$ см получаем $P_L = 200$ Вт.

Подставив в выражение (9) зависимость энергии излучения E_{LGS}, принимаемого от «лазерной звезды», от зенитного угла β линии визирования на наблюдаемый космический объект, в направлении на который формируется «лазерная звезда», определяемую выражением (7), получаем зависимость числа сигнальных фотоотсчётов от зенитного угла β

$$n_s(\beta) = \frac{\eta\lambda T_0 E_L r_0^2(0)\gamma_{\text{atm0}}^{2\sec\beta}\gamma_{\text{res}}\gamma_{\text{tr}}\sigma_{\text{ef}}C_{\text{Na0}}\cos^{11/5}\beta}{16hcT_S H_{\text{LGS}}^2\left(1+\tau_M/\tau_S\right)}. \quad \textbf{(14)}$$

На рис. 5 приведены расчётные зависимости числа приходящихся на субапертуру сигнальных фотоотсчётов n_s в зависимости от углового положения «лазерной звезды» относительно наземной оптической системы, определяемого зенитным углом β. Кривая *1* соответствует лазеру формирования «лазерной звезды» со средней мощностью $P_L = 200$ Вт, кривая *2* — $P_L = 300$ Вт, кривая *3* — $P_L = 400$ Вт. При расчётах полагалось $T_S = 10$ мкс, $T_0 = 1$ мс, $\tau_S = 100$ нс, $\tau_M = 16$ нс, $H_{\text{LGS}} = 95$ км, $\eta = 0{,}3$, $\lambda = 0{,}589$ мкм, $\sigma_{ef} = 9\times10^{-16}$ м^2, $C_{\text{Na0}} = 5\times10^{13}$ м$^{-2}$, $\gamma_{\text{atm}} = 0{,}5$, $\gamma_{\text{tr}} = \gamma_{\text{res}} = 0{,}9$. Линия *4* соответствует числу сигнальных фотоотсчётов $n_s = 250$.

При рассмотренных значениях средней мощности лазера формирования «лазерной звезды» P_L и значениях зенитного угла β, близких к 0, число принимаемых сигнальных фотоотсчётов n_s в несколько раз превышает число фотоотсчётов, достаточное для измерения волнового фронта.

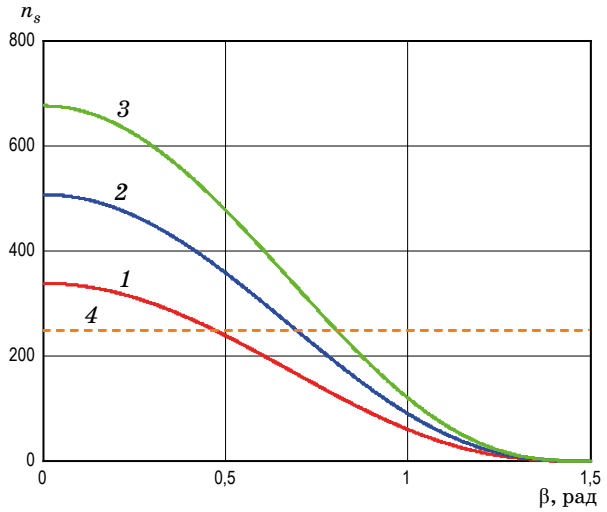

Рис. 5. Зависимости числа приходящихся на субапертуру сигнальных фотоотсчётов n_s от зенитного угла линии визирования β при различной средней выходной мощности лазера формирования «лазерной звезды» P_L. *1* — $P_L = 200$ Вт, *2* — $P_L = 300$ Вт, *3* — $P_L = 400$ Вт, *4* — $n_s = 250$.

Рассмотренные значения средней выходной мощности лазера формирования «лазерной звезды» $P_L = 200–400$ Вт позволяют проводить наблюдения за космическими объектами с адаптивной коррекцией атмосферных искажений и с реализацией слежения за ними при прохождении в зоне видимости наземной оптической системы в диапазоне изменения зенитных углов $-45° < \beta < 45°$. Для проведения наблюдений при больших значениях зенитного угла β необходимо увеличение мощности лазера формирования «лазерной звезды». Таким образом, необходимость обеспечения запаса по мощности лазера формирования «лазерной звезды» обусловлена наблюдениями за низкоорбитальными космическими объектами в широком диапазоне изменения зенитных углов.

Принципиальное значение для реализации адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений имеет и выполнение условия изопланатизма. В соответствии с этим условием «лазерная звезда» и наблюдаемый космический объект должны располагаться на угловом расстоянии, не превышающем угла изопланатизма θ_0, в пределах которого фазовые искажения, измеренные по «лазерной звезде», соответствуют фазовым искажениям при формировании изображения космического объекта. Величина угла изопланатизма θ_0, как и радиус когерентности атмосферных фазовых искажений r_0, связана со структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления атмосферы C_n^2 на трассе распространения и в общем случае определяется (в радианах) выражением [3]

$$\theta_0 = 5{,}81\times10^{-2}\left[\lambda^{-2}\int\limits_{(R)} z^{5/3}C_n^2(z)dz\right]^{-3/5}, \qquad (15)$$

где $C_n^2(z)$ — структурная характеристика флуктуаций показателя преломления на трассе распространения. Интегрирование в выражении (15) осуществляется по трассе распространения оптического излучения R, при наблюдении космических объектов наземной оптической системой — по линии визирования на наблюдаемый объект.

При анализе условий наблюдения космических и астрономических объектов наземными оптическими системами используются различные модели атмосферы и эмпирические соотношения между углом изопланатизма θ_0 и радиусом когерентности атмосферных искажений r_0 [14, 19, 24], например, $\theta_0 = 3{,}978\times10^{-5}r_0$ или $\theta_0 = r_0/(3h_0)$, где h_0 — высота турбулентного слоя. При $h_0 = 10$ км оба приближённых соотношения дают близкие значения θ_0, различающиеся примерно на 15%. Если обозначить $\theta_0(0)$ угол изопланатизма при нахождении наблюдаемого космического объекта в зените (при $\beta = 0$), то с учётом выражения (15) зависимость угла изопланатизма от зенитного угла для плоской модели атмосферы имеет следующий вид:

$$\theta_0(\beta) = \theta_0(0)\cos^{8/5}\beta. \qquad (16)$$

Уменьшение угла изопланатизма θ_0 с увеличением зенитного угла β может дополнительно ограничивать условия адаптивной коррекции атмосферных искажений с измерением действующих фазовых искажений по «лазерной звезде». На рис. 6 приведены расчётные зависимости отношения $\theta_0(\beta)/\theta_0(0)$. Кривая *1* получена в соответствии с зависимостью $\theta_0(\beta)$, определяемой выражением (16). Кривая *2* получена в соответствии с зависимостью $r_0(\beta)$, определяемой выражением (5), с учётом эмпирического соотношения между r_0 и θ_0. Из графика видно, что для наклонных трасс (при $\beta > 0$) эмпирические соотношения между r_0 и θ_0 дают более оптимистические значения углов изопланатизма θ_0. Практически для пунктов с хорошим астроклиматом в работе [19] указывается порядок величины угла изопланатизма $\theta_0 \approx 5'' = 25$ мкрад, что позволяет проводить наблюдения низкоорбитальных космических объектов, по крайней мере, в диапазоне изменения зенитных углов $-45° < \beta < 45°$.

Рассмотренная лидарная модель формирования натриевой «лазерной звезды» и проведённые с её помощью расчёты позволяют проанализировать условия измерения по «лазерной звезде» атмосферных фазовых искажений и их адаптивной коррекции в наземной оптической системе при наблюдении астрономических и космических объектов. По результатам проведённых расчётов для типовых условий наблюдения низкоорбитальных космических объектов сформулированы требования к энергетическим характеристикам лазеров формирования «лазерной звезды» для реализации адаптивной коррекции атмосферных

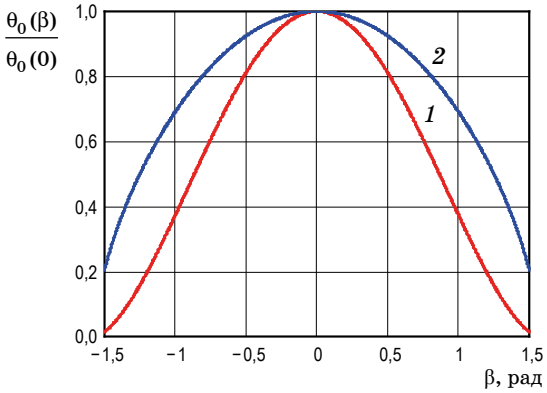

Рис. 6. Зависимости нормированной величины угла изопланатизма $\theta_0(\beta)/\theta_0(0)$ от зенитного угла линии визирования β. *1* — расчёт в соответствии с зависимостью $\theta_0(\beta)$, *2* — расчёт в соответствии с зависимостью $r_0(\beta)$ и эмпирического соотношения между r_0 и θ_0.

фазовых искажений. При этом рассмотренная моностатическая схема формирования «лазерной звезды» является наиболее простой в технической реализации по сравнению с бистатической и гибридными схемами, которые существенно увеличивают техническую сложность адаптивной оптической системы и неэффективны, что отмечено в работах [10, 25]. Следует также отметить, что в рассматриваемом случае адаптивной коррекции атмосферых искажений в процессе углового сопровождения наблюдаемых космических объектов при использовании бистатической схемы формирования «лазерной звезды» необходимо обеспечить синхронное сопровождение наблюдаемого объекта с обоих позиций и точное наведение лазера формирования «лазерной звезды», находящегося на одной позиции, в точку натриевого слоя в зоне изопланатизма оптической системы наблюдения, находящейся на другой позиции.

Полученные для условий наблюдения низкоорбитальных космических объектов значения средней выходной мощности лазера формирования «лазерной звезды» в сотни ватт превышают характеристики лазеров, используемых в известных наземных астрономических оптических системах с измерением действующих атмосферных искажений по натриевой «лазерной звезде», где используются импульсные лазеры со средней выходной мощностью в десятки ватт [26, 27]. Такое расхождение объясняется тем, что рассматривались более сложные условия наблюдения космических объектов — при угловом сопровождении наблюдаемых космических объектов и наблюдении в широком диапазоне зенитных углов линии визирования. В то же время астрономические наблюдения проводятся на направлениях, близких к зенитному, и слежение за угловым движением наблюдаемого объекта в широком диапазоне зенитных углов не требуется.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. М.: Радио и связь, 1985. 336 с.
2. *Матвеев И.Н., Сафронов А.Н., Троицкий И.Н., Устинов Н.Д.* Адаптация в информационных оптических системах. М.: Радио и связь, 1984. 344 с.
3. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
4. *Дятлов В.* Основные направления развития наземных оптоэлектронных средств контроля космического пространства США // Зарубежное военное обозрение. 2006. № 1. С. 50–55. № 2. С. 30–35.
5. *Шаргородский В.Д., Галкин А.А., Гришин Е.А., Иншин П.П.* Получение изображений космических аппаратов телескопом Алтайского оптико-лазерного центра с использованием адаптивной оптики // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 3. С. 201–205.
6. *Бельский А.Б.* Новый подход к разработкам оптико-электронных средств мониторинга околоземного космического пространства // Оптический журнал. 2009. № 8. С. 22–28.
7. *Leverington D.* Observatories and telescopes of modern times. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 501 p.
8. *Welsh B.M., Gardner C.S., Thompson L.A.* Design and performance analysis of adaptive-optical systems using laser guide stars // Proc. IEEE. 1990. V. 78. P. 1721–1743.
9. *Fugate R.Q., Wild W.J.* Untwinkling the stars. P. I // Sky and Telescope. 1994. № 5. P. 25–32.
10. *Больбасова Л.А., Лукин В.П.* Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. М.: Физматлит, 2012. 125 с.
11. *Малашко Я.И., Наумов М.Б.* Системы формирования мощных лазерных пучков. М.: Радиотехника, 2013. 328 с.
12. *Лукин В.П.* Лазерные опорные звёзды — искусственные опорные источники // Сборник статей «Как это было...». Ч. 5. М.: Техносфера, 2016. С. 181–191.
13. *Fugate R.Q., Ellerbroek B.L., Higgins C. H. et al.* Two generations of laser-guide-star adaptive-optics experiments at the Starfire Optical Range // J. Opt. Soc. Amer. A. 1994. V. 11. P. 310–324.
14. *Лукин В.П.* Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // Успехи физических наук. 2014. Т. 184. № 6. С. 599–640.
15. *Welsh B.M., Gardner C.S.* Performance analysis of adaptive-optical systems using laser guide stars and slope sensors // J. Opt. Soc. Amer. A. 1989. V. 6. P. 1913–1923.
16. *Fried D.L., Belsher J.F.* Analysis of fundamental limits to artificial-guide-star adaptive-optics-system performance for astronomical imaging // J. Opt. Soc. Amer. A. 1994. V. 11. P. 277–287.
17. *Бакут П.А., Ершова О.М., Шумилов Ю.П.* Расчет энергетики искусственной лазерной звезды // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 12. С. 1100–1104.
18. *Мальцев Г.Н.* Организация оптических наблюдений и обработки данных о «космическом мусоре» // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 10. С. 65–69.

19. *Welsh B.M., Gardner C.S.* Effects of turbulence inducted anisoplanatism on image performance of adaptive astronomical telescopes using LGS // J. Opt. Soc. Amer. A. 1990. V. 8. P. 1237–1242.

20. *Бакут П.А., Камчатов В.Б., Маркина О.М., Шумилов Ю.П.* Искусственные маяки в адаптивных оптических системах // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 29–37.

21. *Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г.* Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Лань, 2013. 288 с.

22. *Neichel B., Callingham J., D'Orgeville C. et al.* Characterization of the sodium layer at Cerro Pachon and impact on laser guide star performance // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2013. V. 429. P. 3522–3532.

23. *Харди Д.У.* Активная оптика: новая техника управления световым пучком // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 6. С. 31–85.

24. *Больбасова Л.А., Лукин В.П.* Модовый изопланатизм фазовых флуктуаций // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 12. С. 1070–1075.

25. *Лукин В.П., Фортес Б.В* Сопоставление предельной эффективности различных схем формирования лазерных опорных звезд // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 1. С. 34–41.

26. *Parenti R.R., Sasiela R.J.* Laser-guide-star systems for astronomical applications // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. V. 11. P. 288–309.

27. *Шустов Б.М.* Большие оптические телескопы будущего // Земля и Вселенная. 2008. Т. 3. № 11. С. 8–11.