

## Оценка предельной дальности видимости маяков и пространственных ориентиров лазерной курсоглиссадной системы в различных метеоусловиях

© В.Е. Карасик, Е.Е. Мухина, В.М. Орлов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Уникальные свойства лазерного излучения, и в первую очередь малая угловая расходимость, обеспечивают возможность использования лазеров для навигационных систем посадки самолетов. Даже относительно маломощный лазер позволяет создавать маяки, дальность действия которых превышает дальность действия традиционных навигационных огней с лампами накаливания мощностью несколько киловатт. Особенно ярко преимущество лазерных маяков проявляется в условиях плохой видимости из-за специфики распространения лазерного излучения в атмосфере.*

*На основе использования уравнения переноса излучения в атмосфере разработана методика расчета дальности видимости курсовых и глиссадных маяков лазерной системы посадки самолетов «Глиссада», а также определение видимой длины пространственных ориентиров, создаваемых этими маяками за счет рассеяния лазерного излучения в атмосфере. Понятие «видимость пучков» определялось из условия превышения порогового цветового контраста, уровень которого зависит от яркости фона. При расчете дальности видимости лазерных маяков и пространственных ориентиров для малых оптических толщин хорошим приближением решения уравнения переноса яркости является приближение однократного рассеяния. На основе данного приближения проведен цикл расчетов для атмосферной дымки с метеорологической дальностью видимости  $S_m$  в диапазоне от 1 до 5 км. Для туманов средней плотности при  $S_m$  в диапазоне 0,3...1,0 км расчет проводился с учетом многократного рассеяния.*

**Ключевые слова:** курсоглиссадная система, дальность видимости, уравнение переноса, лазерный маяк, однократное рассеяние, малоугловое приближение, методика расчета.

**Введение.** В настоящее время одной из актуальных задач авиации является повышение безопасности полетов, особенно на этапе посадки самолета. Современные взлетно-посадочные системы непрерывно совершенствуются в целях улучшения характеристик различных функционально обособленных систем (курсоглиссадные радиосистемы, системы огней подхода и приближения, системы радиомаркерных маяков и др.), а также создания новых систем, позволяющих обеспечить автоматический режим захода самолета на посадку.

Все находящиеся в эксплуатации на сегодняшний день посадочные системы, включая международную, не могут удовлетворить

предъявляемым к ним требованиям вследствие отсутствия надежной визуальной информации о пространственном положении самолета. Определенные шаги в направлении визуализации изображений — использование ТВ-систем, позволяющих летчику видеть взлетно-посадочную полосу (ВПП) в условиях ограниченной видимости, системы отображений информации на лобовом стекле кабины самолета, голографический индикатор посадки — не нашли широкого применения из-за технической сложности их эксплуатации.

Успешная и безопасная посадка самолета в условиях плохой видимости возможна только при комплексном использовании радиотехнических и светотехнических средств, причем на последнем этапе посадки светотехнические средства имеют решающее значение, позволяя при их обнаружении перейти от полета по приборам и радиомаякам к визуальной ориентировке по этим светотехническим средствам. Летная практика показывает, что для безопасной и уверенной посадки самолета переход на визуальный полет должен осуществляться с расстояний от 2,5 до 3,0 км.

Наиболее эффективным путем решения задачи повышения эффективности и безопасности полетов является создание более точных систем ближнего ориентирования, обеспечивающих надежную визуальную информацию о пространственном положении самолета в различных метеоусловиях, и прежде всего в условиях ограниченной видимости. Приведенным требованиям могут удовлетворять системы световой навигации с использованием лазеров в качестве световых маяков. Установлено [1], что контраст и дальность видения пространственных ориентиров, формируемых рассеянным лазерным излучением, существенно превышают аналогичные характеристики маяков, использующих точечные или слабоколлимированные источники света. Отмеченный фактор вместе с высокой направленностью лазерного пучка, относительно малой зависимостью траектории его распространения от особенностей рельефа местности и метеорологических условий обуславливают перспективность использования лазеров для создания точных систем навигации и ориентирования.

Устройства, реализующие способы ориентирования по рассеянному атмосферой излучению от лазерного пучка, обладают рядом принципиальных недостатков, которые ограничивают их использование на практике. Эти недостатки связаны с физической природой явления рассеяния. Контраст между яркостью распространяющегося в атмосфере пучка, обусловленный рассеянием, и фоном, на котором пучок наблюдается, достигает пороговых значений лишь в темное время суток. При этом в сумерках лазерный пучок виден только под углами, близкими к направлению его распространения, при которых интенсивность рассеянного света относительно велика. С увеличени-

ем угла наблюдения интенсивность рассеяния резко падает и, следовательно, уменьшается расстояние, с которого возможно наблюдение пучка. Это обстоятельство ограничивает возможность обозначения достаточно широких зон ориентирования. Днем лучевые визуальные лазерные устройства неработоспособны.

Существенным недостатком также является в условиях пониженной видимости относительно небольшая дальность действия лучевых устройств вследствие силу неблагоприятных условий переноса излучения протяженных источников света. Даже в условиях среднего по плотности тумана (метеорологическая дальность видимости (МДВ)  $S_M \approx 1,2$  км) резко сокращается длина наблюдаемых пучков, за счет рассеяния значительно увеличивается их диаметр, в результате чего ухудшаются наглядность и точность ориентирования.

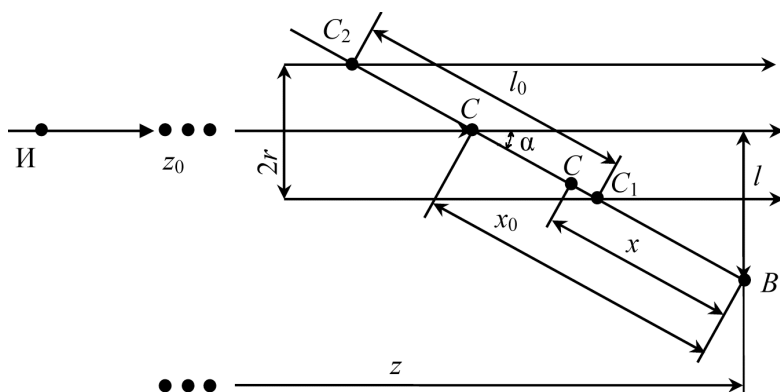
Оценка эффективности работы лазерных средств навигационного оборудования в реальной атмосфере требует решения уравнения переноса яркости лазерного излучения [1]. Структура светового поля, которое формируется заданным лазерным источником (маяком) в рассеивающей среде, определяется интегро-дифференциальным уравнением переноса излучения (УПИ) [1, 2]:

$$\vec{n}\nabla L(\vec{r}, \vec{n}) = -\varepsilon L(\vec{r}, \vec{n}) + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{4\pi} L(\vec{r}, \vec{m}) \chi(\vec{n}, \vec{m}) d\Omega_m. \quad (1)$$

Здесь  $L(\vec{r}, \vec{n})$  — яркость светового поля в точке  $\vec{r}(x, y, z)$ ;  $\chi(\vec{n}, \vec{m}) \equiv \chi(\gamma)$  — индикатриса рассеяния;  $\varepsilon$  — показатель ослабления;  $\sigma$  — показатель рассеяния;  $\varepsilon$  и  $\sigma$  измеряются в  $\text{м}^{-1}$ .

Решить уравнение (1) для произвольной рассеивающей среды не удастся. Однако можно найти приближенные решения УПИ на основе его упрощенных модификаций, используя дополнительную информацию об особенностях рассеяния в среде (атмосфере). В приземном слое атмосферы выделяют несколько качественно различных типов оптического состояния атмосферы: дымка, для которой  $S_M \geq 3$  км, туманная дымка с характерными значениями  $1 \text{ км} \leq S_M \leq 3 \text{ км}$  и туманы  $S_M \leq 1 \text{ км}$ . В условиях слабомутой атмосферы при  $S_M \geq 1 \text{ км}$  с достаточной степенью точности можно воспользоваться теорией однократного рассеяния света, когда учитывается только однократно рассеянный свет и не учитываются эффекты многократного рассеяния [2].

Пусть через рассеивающую среду (атмосферу) проходит лазерный пучок, расходимость которого характеризуется малым телесным углом. Определим яркость пучка, наблюдаемого из некоторой точки



**Рис. 1.** Схема рассеяния излучения в приближении однократного рассеяния: И — лазерный источник (маяк); В — точка приема;  $z$  — расстояние от лазерного источника до точки В

приема В, лежащей вне этого пучка. Световой пучок рассматривается под углом  $\alpha$  к его направлению (рис. 1).

Обозначим через  $x$  расстояние по направлению наблюдения от точки В до некоторой точки С лазерного пучка. Элемент яркости, обусловленной рассеянием излучения элементом  $dx$  отрезка  $C_1C_2$ , находящимся на расстоянии  $x$  от точки В, определяется, согласно работе [6], как

$$dL = \frac{1}{4\pi} \sigma(\gamma) E(x) dx,$$

где  $\sigma(\gamma)$  — показатель рассеяния среды в данном направлении;  $\gamma = \alpha$ ;  $E(x)$  — освещенность, которую лазерный пучок создает в данной точке.

Тогда яркость всей толщи пучка

$$\begin{aligned} L(\alpha) &= \frac{1}{4\pi} \sigma(\alpha) \int_{x_0-l_0/2}^{x_0+l_0/2} E(x_0) \exp[-\epsilon(x_0-x) \cos \alpha] \exp(-\epsilon x) dx = \\ &= \frac{1}{4\pi} \sigma(\alpha) E(x_0) \exp(-\epsilon x_0) l_0 \frac{\text{sh}(\epsilon l_0 \sin^2 \alpha / 2)}{\epsilon l_0 \sin^2 \alpha / 2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\text{sh } x = (e^x - e^{-x})/2$  — гиперболический синус;  $\sigma(\alpha) = \sigma \chi(\alpha)$  — показатель рассеяния;  $\chi(\alpha)$  — индикатриса рассеяния;  $\epsilon$  — показатель ослабления;  $\Lambda = \sigma/\epsilon$  — вероятность выживания фотона;  $l$  — расстояние от оси лазерного пучка до точки В приема;  $\alpha$  — угол между осью лазерного пучка и осью приема (наблюдения);  $z$  — расстояние от лазерного источника до точки В;  $l_0$  — толщина пучка в

направлении наблюдения;  $x_0$  — расстояние в этом же направлении от точки  $B$  до середины пучка.

Освещенность  $E(x_0)$  в точке  $C_0$ , отстоящей от лазерного источника на расстоянии  $z - l/\operatorname{tg} \alpha$ ,

$$E(x_0) = E\left(z - \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha}\right),$$

тогда окончательно получим

$$L(l, \alpha, z) = \frac{\Lambda \varepsilon \chi(\alpha)}{4\pi} E\left(z - \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \exp\left(-\varepsilon \frac{l}{\sin \alpha}\right) l_0 \frac{\operatorname{sh}(\varepsilon l_0 \sin^2 \alpha / 2)}{\varepsilon l_0 \sin^2 \alpha / 2}; \quad (3)$$

$$E(z) = \frac{P_0 \exp(-\varepsilon z)}{\pi(r_n^2 + z^2 \alpha_n^2)},$$

где  $r_n$  — радиус светового пучка;  $2\alpha_n$  — угловая расходимость излучения.

В сильно замутненной атмосфере (туман, облака) присутствует многократное рассеяние света, что усложняет расчет характеристик светового поля [3].

В случае, когда индикатриса рассеяния  $\chi(\gamma)$  сильно вытянута в направлении падающего светового пучка, можно упростить решение задачи путем перехода к малоугловому приближению уравнения переноса [1]:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial z} + \vec{n}_\perp \nabla_\perp \right) L(\vec{r}_\perp, z, \vec{n}_\perp) = \\ & = -\varepsilon L(\vec{r}_\perp, z, \vec{n}_\perp) + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int L(\vec{r}_\perp, z, \vec{m}_\perp) \chi(\vec{n}_\perp - \vec{m}_\perp) d^2 m_\perp, \quad (4) \\ & \vec{n}_\perp \nabla_\perp = \left( n_x \frac{\partial}{\partial x} + n_y \frac{\partial}{\partial y} \right). \end{aligned}$$

Решение уравнения (4), устанавливающее связь между полем яркости в слое  $0 \leq z \leq z_{\max}$  и распределением яркости на плоскости  $z = 0$ , можно найти, применив преобразование Фурье по переменным  $\vec{r}_\perp$  и  $\vec{n}_\perp$ . Тогда выражение для фурье-образа яркости будет иметь вид

$$\tilde{L}(\vec{v}, z, \vec{\eta}) = \tilde{L}_0(\vec{v}, \vec{\eta} + \vec{v}z) \exp\left[-\varepsilon z + \frac{\sigma}{2} \int_0^z \tilde{\chi}(\rho_0) dz'\right], \quad (5)$$

где  $\rho_0 = \sqrt{(\eta_x + v_x z')^2 + (\eta_y + v_y z')^2} = |\vec{\eta} + \vec{v}z'|$ .

Применив методику, используемую в работе [3], получим выражение для пространственно-углового распределения яркости  $L(r, \alpha, z)$ , где  $r = l$  — расстояние от оси лазерного пучка до точки наблюдения;  $\alpha$  — угол между осью лазерного пучка и осью наблюдения (рис. 2).

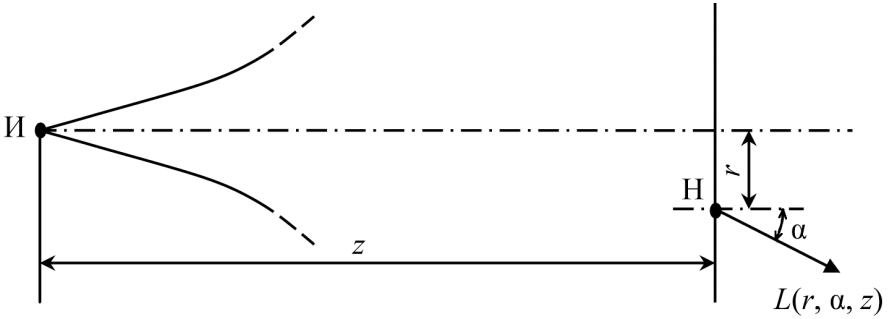


Рис. 2. Схема рассеяния в малоугловом приближении:  
И — лазерный маяк; Н — наблюдатель

Яркость рассеянной компоненты светового поля имеет вид

$$L_p(r, \alpha, z) = \frac{\Lambda \varepsilon P_0 \exp[-(1 - \Lambda)\varepsilon z]}{16\pi^2} \int_0^\pi \frac{\exp(-\Lambda \varepsilon x)}{a_2(z, x) - a_0(z, x) - a_1^2(z, x)} \times \\ \times \exp\left[ \frac{a_0(z, x)r^2 - 2a_1(z, x)r\alpha - a_2(z, x)\alpha^2}{4(a_2(z, x)a_0(z, x) - a_1^2(z, x))} \right] dx, \quad (6)$$

где

$$a_0(z, x) = \frac{\alpha_n^2}{4} + \frac{6\mu^2}{4} + \frac{\Lambda \varepsilon 6\mu^2(z-x)}{4};$$

$$a_1(z, x) = \frac{\alpha_n^2 z}{4} + \frac{6\mu^2 x}{4} + \frac{\Lambda \varepsilon 6\mu^2(z^2 - x^2)}{8};$$

$$a_2(z, x) = \frac{\alpha_n^2 z}{4} + \frac{r_n^2}{4} + \frac{6\mu^2 x}{4} + \frac{\Lambda \varepsilon 6\mu^2(z^3 - x^3)}{12}.$$

Яркость нерассеянной (прямой) компоненты светового поля

$$L_n(r, \alpha, z) = \frac{P_0}{\pi^2 r_n^2 \alpha_n^2} \exp(-\varepsilon z) \exp\left[ \frac{-(r^2 + z^2 \alpha^2)}{r_n^2} \right] \exp\left( \frac{-\alpha^2}{\alpha_n^2} \right). \quad (7)$$

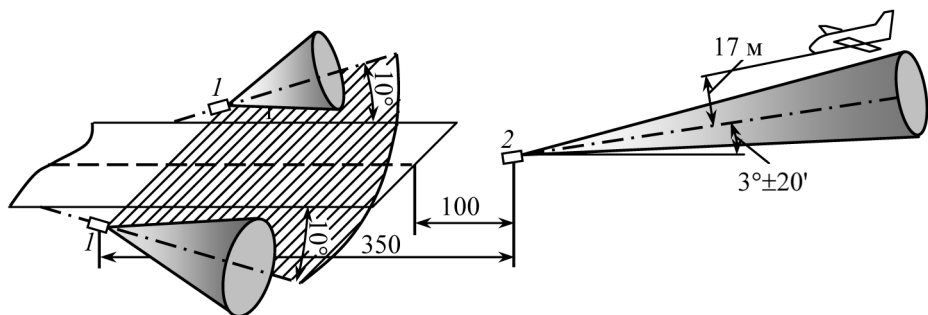
Суммарная яркость светового поля

$$L(r, \alpha, z) = L_n(r, \alpha, z) + L_p(r, \alpha, z). \quad (8)$$

Здесь  $P_0$  — мощность источника;  $\varepsilon$  — показатель рассеяния;  $k$  — показатель поглощения;  $\mu$  — параметр индикатрисы рассеяния  $\chi(\gamma)$ ;  $\langle \gamma^2 \rangle = 6\mu^2$  — дисперсия угла отклонения пучка при элементарном акте рассеяния,  $\langle \gamma^2 \rangle = \frac{1}{2} \int_0^\infty \gamma^3 \chi(\gamma) d\gamma$ .

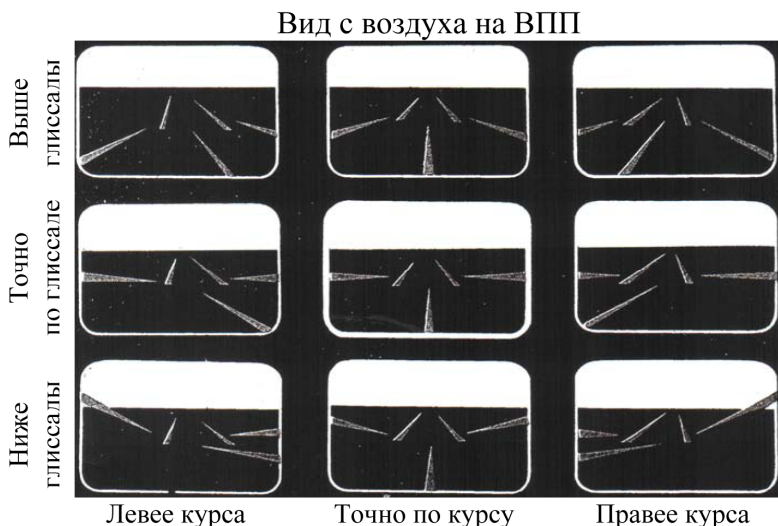
Теоретические и экспериментальные исследования показали, что в тумане с  $S_m$ , равной 350 и 500 м, при  $\alpha_n = 4'$  ( $6,8 \cdot 10^{-4}$  рад) и оптическом диаметре пучка  $2r_n \varepsilon = 3,35 \cdot 10^{-3}$  для расчета яркости рассеянного излучения можно использовать формулу (3), хотя в ряде случаев необходимо учитывать многократное рассеяние света.

С использованием полученных соотношений разработана методика расчета предельной дальности видения лазерных маяков и пространственных ориентиров на примере курсоглиссадной системы посадки самолетов «Глиссада» [4]. В системе использованы принципы проективной геометрии и явление рассеяния лазерного излучения в атмосфере, за счет которого летчик визуально воспринимает комбинацию лазерных пучков в виде символов, определяющих пространственное положение самолета относительно посадочной траектории и точки приземления. Система «Глиссада» состоит из одного курсового и двух глиссадных лазерных маяков (рис. 3), а кроме них иногда содержит маркерные маяки, отмечающие границы взлетно-посадочной полосы (ВПП).



**Рис. 3.** Геометрия курсоглиссадной системы:  
1 — глиссадный лазерный маяк; 2 — курсовой лазерный маяк

Результаты испытаний системы в ряде аэропортов свидетельствуют о том, что она проста в использовании и позволяет летчику в ночное время выдерживать параметры полета при посадке с высокой точностью. На рис. 4 приведены визуально наблюдаемые летчиком комбинации лазерных пучков, рассеянных атмосферой, в зависимости от пространственного положения самолета.



**Рис. 4.** Комбинации лазерных пучков

В центре приведено взаимное расположение линейных ориентиров (посадочный символ), которое видит летчик, когда он находится точно на заданной посадочной траектории. Система позволяет определить также крен самолета и положение его относительно ВПП при посадке и взлете.

Для расчета яркости рассеянного вперед излучения маяков курсоглиссадной системы основным расчетным соотношением является формула (3). Она позволяет найти яркость толщи атмосферы (светящейся в результате рассеяния в ней излучения лазерного маяка) в направлении линии зрения наблюдателя.

В случае наблюдения в хороших метеорологических условиях ( $S_M \geq 1$  км) в качестве индикатрисы рассеяния используется индикатриса Хеньи — Гринштейна [2]:

$$\chi(\gamma) = \frac{(1 - g^2)}{(1 + g^2 - 2g \cos \gamma)^{3/2}}, \quad (8)$$

где  $g = \langle \cos \gamma \rangle = \frac{1}{2} \int_0^\pi \chi(\gamma) \cos \gamma \sin \gamma d\gamma$  — средний косинус угла рассеяния,  $g = x_1/3$ ;  $x_1$  — первый коэффициент разложения  $\chi(\gamma)$  по полиномам Лежандра.

Для атмосферных дымок диапазон изменения параметра  $x_1$  охватывает область значений, примерно равную 1,05...2,61. Наиболее вероятным значением можно считать приблизительно 2,1 [1].

В случае наблюдения в условиях тумана в качестве индикатрисы рассеяния используется показательная функция вида [3]:



$$\chi(\gamma) = \frac{2}{\mu^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\mu}\right), \quad (9)$$

удовлетворяющая условию нормировки

$$\int_0^{\infty} \chi(\gamma) \gamma \, d\gamma = 2,$$

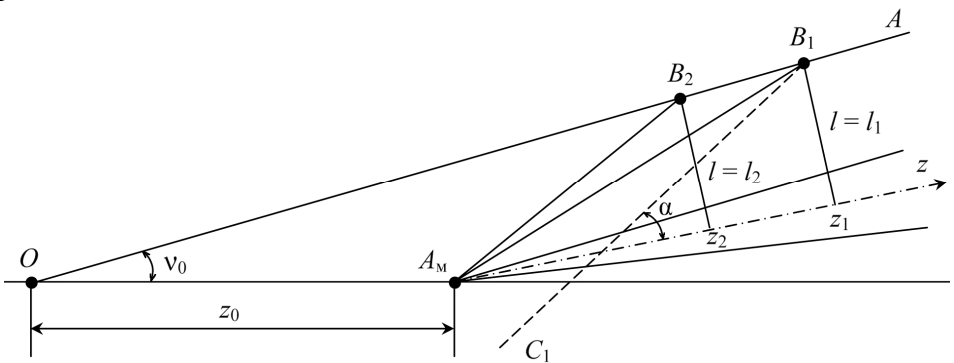
где параметр  $\mu$  характеризует вытянутость индикатрисы рассеяния.

В качестве критерия при выборе коэффициента  $\mu$  используется интегральный параметр

$$\delta = 1 - \left(\frac{\gamma_0}{\mu} - 1\right) \exp\left(\frac{\gamma_0}{\mu}\right).$$

В туманах, в области малых углов  $\gamma < 10^\circ$ , сосредоточено более 60 % энергии рассеянного света, и  $\mu$  принимает значения 0,06...0,08. В туманных дымаках  $\delta$  может достигать 50 % и  $\mu$  изменяется в пределах примерно 0,1...0,16 [2].

Геометрическая схема визуального обнаружения сигналов лазерного курсового маяка в системе посадки самолетов (для случая приема рассеянного атмосферой лазерного излучения) приведена на рис. 5.



**Рис. 5.** К определению видимости лучей лазерной системы посадки воздушных судов:

$OA$  — глиссада снижения;  $v_0$  — угол глиссады;  $z_0$  — расстояние от лазерного курсового маяка ( $A_m$ ) до точки  $O$  посадки

В точке  $A_m$  расположен лазерный курсовой маяк, излучение которого направлено вдоль оси  $z$ . В точках  $B$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ , ... находится наблюдатель.

Вследствие рассеяния лазерного излучения атмосферой в направлении взгляда создается некоторая яркость. Поле зрения глаза, в пре-

делах которого достигается удовлетворительное качество видения, составляет примерно  $30^\circ$ . В направлении  $A_mB_1$  (в направлении на источник) видимая яркость соответствует яркости для центра поля зрения, а в направлении  $B_1C_1$  — для периферии. Угол  $\alpha = \alpha_n$ , при котором яркость  $L(l_1, \alpha_n, z_1)$  становится равной яркости фона, и определяет «конец» светящегося пучка.

В плоскости предметов это соответствует следующей длине наблюдаемого участка светящегося пучка:

$$z_n = z_1 - \frac{l_1}{\operatorname{tg} \alpha_n}. \quad (10)$$

С ростом замутнения в атмосфере наблюдаемые светящиеся «шнуры» укорачиваются.

Для нахождения  $\alpha_n(z_n)$  в расчетных формулах (3) и (8) следует положить  $\alpha \geq l/z$ , а координаты точки  $B(z, l)$  задать согласно пространственному положению самолета на глиссаде в соответствующий момент времени.

При прогнозировании визуальной дальности обнаружения в атмосфере лазерного пучка при приеме рассеянного атмосферой излучения необходимо знать пороговые значения контраста обнаружения:

$$K_n = \frac{\Delta L}{L_\phi} = \frac{L_c - L_\phi}{L_\phi}. \quad (11)$$

Для обнаружения лазерного излучения, рассеянного атмосферой, необходимо выполнение следующего условия:

$$L_c = (1 + K_n)L_\phi. \quad (12)$$

В формулах (11), (12)  $L_c$  — яркость рассеянного лазерного пучка;  $L_\phi$  — яркость фона, которую создает природная световая обстановка.  $L_\phi$  изменяется в широких пределах [5]:  $2,5 \cdot 10^{-3}$  кд/м<sup>2</sup> (ночь, ясно);  $1,3 \cdot 10^{-1}$  кд/м<sup>2</sup> (ночь, лунное освещение);  $0,5$  кд/м<sup>2</sup> (сумерки, пасмурно);  $500$  кд/м<sup>2</sup> (день, туман).

В соответствии с разработанной методикой проведен расчет дальности видимости курсового и глиссадных маяков, а также протяженности пространственных ориентиров, создаваемых этими маяками при условии нахождения самолета в заданном коридоре посадки. Расчет проводился при двух длинах волн лазерных излучателей:  $0,63$  и  $0,532$  мкм.

В расчетах приняты следующие значения пороговых контрастов:

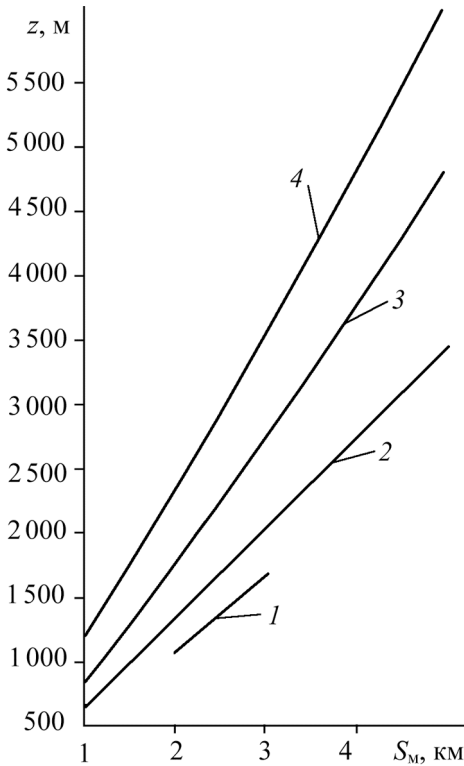
- для условий ночь, ясно: при  $\lambda = 0,63$  мкм  $K_n = 0,4$ ; при  $\lambda = 0,532$  мкм  $K_n = 0,17$ ;

• для других условий наблюдения (лунное освещение; сумерки, пасмурно; сумерки, ясно) для обеих длин волн излучения  $K_{\text{п}} = 0,04$ .

При определении индикатрис рассеяния для различных погодных условиях приняты следующие значения параметров  $x_1$  и  $\mu$ :

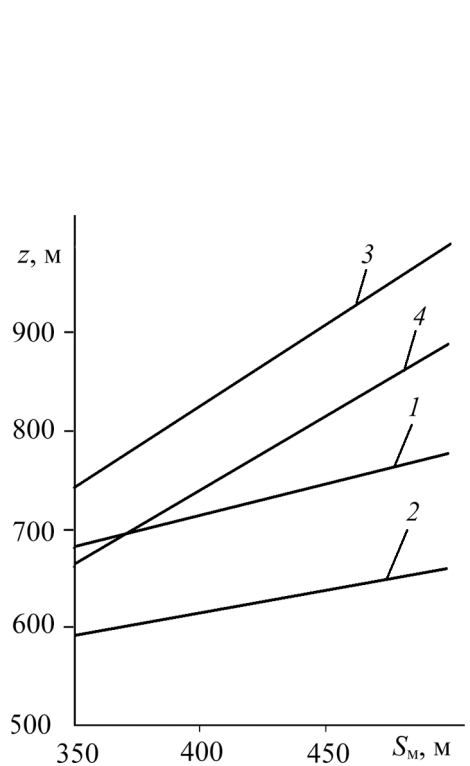
- диапазон изменения параметра  $x_1$  составляет 2,0...2,5;
- при  $S_{\text{м}} = 500$  м  $\mu$  изменяется в диапазоне 0,085...0,15, при  $S_{\text{м}} = 350$  м — в диапазоне 0,07...0,09.

На рис. 6–9 представлены результаты расчетов дальности видимости лазерных маяков в случае, когда самолет летит точно по курсу.



**Рис. 6.** Дальность видимости курсового маяка в дымке и в туманной дымке ( $S_{\text{м}} \geq 1$  км). Самолет летит точно по курсу. Сумерки, ясно,  $L_{\text{ф}} = 13$  кд/м<sup>2</sup>:

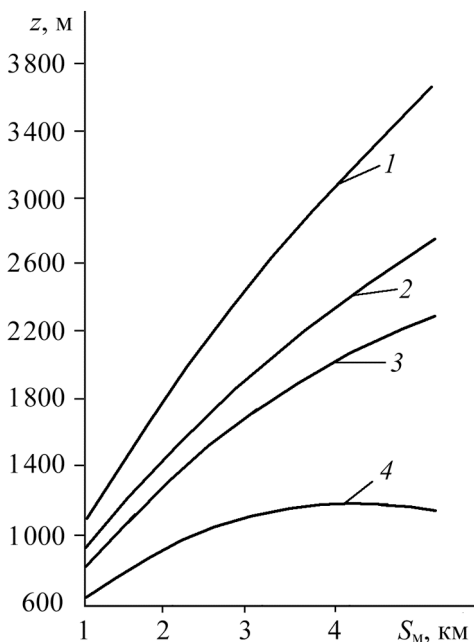
1 —  $\lambda = 0,63$  мкм; 2 —  $\lambda = 0,532$  мкм;  
1, 2 —  $x_1 = 2$ ; 3, 4 —  $x_1 = 2,5$



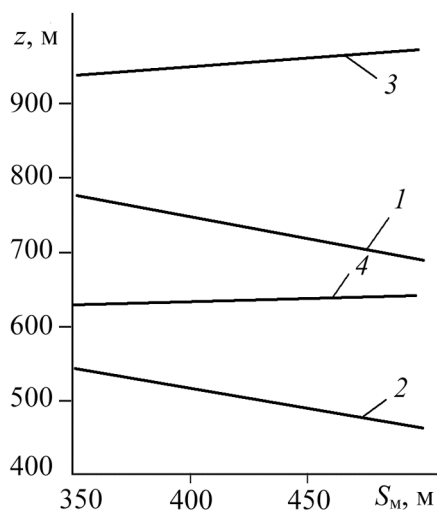
**Рис. 7.** Дальность видимости курсового маяка в тумане средней плотности. Самолет летит точно по курсу. Сумерки, пасмурно,  $L_{\text{ф}} = 0,5$  кд/м<sup>2</sup>:

1, 4 —  $\lambda = 0,63$  мкм; 2, 3 —  $\lambda = 0,532$  мкм; 1–4 —  $\mu$  равно 0,007, 0,085, 0,094 и 0,15 соответственно

Из приведенных графиков следует, что при возрастании  $S_{\text{м}}$  возрастает и дальность видимости  $z$  курсового маяка. Расчеты показывают, что в ясный солнечный день, а также в тумане дальность видимости лазерных маяков существенно снижается.



**Рис. 8.** Дальность видимости глиссидных маяков в дымке и туманной дымке ( $S_M \geq 1$  км). Самолет летит точно по курсу. Сумерки, пасмурно,  $L_\Phi = 0,5$  кд/м<sup>2</sup>:  
 1, 2 —  $\lambda = 0,532$  мкм; 3, 4 —  $\lambda = 0,63$  мкм; 1, 3 —  $x_1 = 2,5$ ; 2, 4 —  $x_1 = 2$



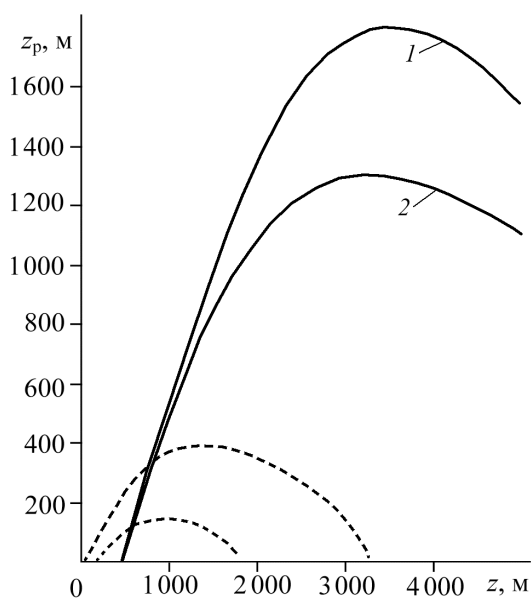
**Рис. 9.** Дальность видимости глиссидных маяков в тумане средней плотности. Самолет летит точно по курсу. Ночь, ясно,  $L_\Phi = 2,5 \cdot 10^{-3}$  кд/м<sup>2</sup>:  
 1, 3 —  $\lambda = 0,532$  мкм; 2, 4 —  $\lambda = 0,63$  мкм; 1-4 —  $\mu$  равно 0,07, 0,085, 0,09 и 0,15 соответственно

В условиях дымок ( $S_M \geq 1$  км) лазерные пучки не наблюдаются в дневных условиях. При наблюдении же лазерных маяков в условиях тумана средней плотности ( $S_M \leq 1$  км) лазерные пучки не обнаруживаются уже в сумерках в ясную погоду.

На рис. 10 представлены результаты расчета значений протяженностей пространственных ориентиров для случая, когда самолет летит точно по курсу. Видно, что графики имеют экстремум, т. е. на предельных дальностях полета длины пространственных ориентиров малы, при приближении самолета к ВПП длины пространственных ориентиров увеличиваются до некоторого максимального значения, при дальнейшем приближении самолета к ВПП они вновь уменьшаются.

Наибольшую протяженность имеет курсовой пространственный ориентир ночью в ясную погоду, при этом его длина составляет 0,8...0,9 МДВ. Следует отметить, что это соотношение приблизительно сохраняется и в условиях туманов средней плотности, когда длина пространственных ориентиров составляет 0,6...0,8 МДВ.

**Рис. 10.** Зависимость протяженности пространственных ориентиров от дальности полета самолета. Самолет летит точно по курсу.  $S_m = 5$  км. Сумерки, пасмурно,  $L_\phi = 0,5$  кд/м<sup>2</sup> (сплошная линия — курсовой маяк, пунктирная — глиссидные маяки):  
 1 —  $\lambda = 0,532$  мкм; 2 —  $\lambda = 0,63$  мкм



При посадке самолета в дымке и туманной дымке ( $S_m \geq 1$  км), в сумерки в ясную погоду и в дневное время суток пространственные ориентиры глиссидных маяков на обнаруживаются. В тумане же они обнаруживаются только ночью в ясную погоду,  $L_\phi = 2,5 \cdot 10^{-3}$  кд/м<sup>2</sup>.

Наличие экстремума объясняется тем, что при приближении самолета к маяку яркость рассеянного излучения возрастает, но в то же время при дальнейшем приближении видимая яркость уменьшается вследствие формы индикатрисы рассеянного излучения, поскольку угол наблюдения существенно возрастает.

**Выводы.** Разработана методика расчета предельной дальности видимости лазерных маяков и пространственных ориентиров лазерной курсоглиссидной системы. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что данная система может эффективно использоваться в качестве системы ближней навигации для обеспечения посадки самолетов на ВПП, обеспечивая ориентирование по курсу и глиссаде в условиях низкой дальности видимости. При значениях угла между оптической осью пучка и визирной линией, направленной на источник излучения  $\alpha = 1^\circ$ , лазерный пучок будет обнаруживаться ночью ( $L_\phi = 2,5 \cdot 10^{-3}$  кд/м<sup>2</sup>) с расстояний  $z = (2,2 \dots 3,5)S_m$ , а в сумерках ( $L_\phi = 0,5 \cdot 10^{-3}$  кд/м<sup>2</sup>) с расстояний  $z = (0,7 \dots 1,5)S_m$ . В туманах средней плотности в ночных условиях видимость лазерных маяков уменьшается и составляет  $(0,6 \dots 0,8)S_m$ . Увеличение угла  $\alpha$  между оптической осью пучка и линией визирования в пределах от  $1^\circ$  до  $5^\circ$  приводит к резкому уменьшению дальности видимости. При  $\alpha = 3^\circ$  в тумане в сумеречных условиях лазерные пучки не обнаруживаются. Наиболь-

шее преимущество лазерного источника света проявляется в ночных и сумеречных условиях, а также при пониженной МДВ. При этом дальность видимости лазерных маяков более чем в 2 раза выше дальности видимости штатных огней и знаков.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Карасик В.Е., Орлов В.М. *Локационные лазерные системы видения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2013, 478 с.
- [2] Орлов В.М., Самохвалов И.В., Зуев В.А., ред. *Сигналы и помехи в лазерной локации*. Москва, Радио и связь, 2001, 264 с.
- [3] Мухина Е.Е. *Разработка и исследование лазерной подводной системы видения на основе математического моделирования с использованием имитационного подхода*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2006, 161 с.
- [4] Бережной И.А. «Глиссада» — лазерная система посадки самолетов. *Природа*, 1997, № 1.
- [5] Зуев В.Е., Фадеев В.Я. *Лазерные навигационные устройства*. Москва, Радио и связь, 1987, 160 с.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Карасик В.Е., Мухина Е.Е., Орлов В.М. Оценка предельной дальности видимости маяков и пространственных ориентиров лазерной курсоглиссадной системы в различных метеоусловиях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/913.html>

**Карасик Валерий Ефимович** родился в 1939 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1964 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных трудов в области лазерного зондирования, локации и дальнометрии. e-mail: karassik@bmstu.ru

**Мухина Елена Евгеньевна** родилась в 1973 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1998 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных трудов в области лазерной локации и лазерных систем видения. e-mail: e-muhina@mail.ru

**Орлов Владимир Михайлович** родился в 1936 г., окончил Московский институт химического машиностроения в 1959 г. Д-р физ.-мат. наук. Автор более 150 научных трудов в области лазерной локации и атмосферной оптики.