

УДК 623.4.052.5: 623.4.023.43

О РАССОГЛАСОВАНИИ ВИЗИРНОЙ И ЛОКАЦИОННОЙ ОСЕЙ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Кучеренко О.К., Бойкова Е.В. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

В работе определены требования к допустимому углу рассогласования визирной оси оптической системы наведения и оптической оси канала дальнометрии лазерного дальномера.

Введение

Точность согласования визирной оси оптической системы наведения и оптической оси канала дальнометрии является одним из основных факторов, который приводит к улучшению эксплуатационных характеристик локационных лазерных дальнометров (ЛД). К таким характеристикам, в первую очередь, относятся дальность действия, точность измерения, массогабаритные параметры. Если ось визирного канала не коллинеарна по отношению к оси канала дальнометрии, то индикатриса лазерного локатора касается объекта краем, где сила излучения меньше, чем на оси. В этом случае эхо-сигнал, попадающий на фотоприемник, уменьшается, что вызывает ухудшение указанных ранее параметров ЛД.

Целью статьи является анализ факторов, влияющих на форму индикатрисы излучения лазера, получение формулы, позволяющей оценить требования к угловому рассогласованию визирной и локационной осей, а также численное определение допустимого углового рассогласования для типичных излучателей и фотоприемников, применяемых в ЛД.

Анализ последних публикаций. Постановка задачи

Актуальность решаемой проблемы подтверждается рядом публикаций. Так, например, в работе [1] предложено несколько способов согласования визирной и локационной осей ЛД. Одним из способов является базирование по отверстию прожигаемому лазерным источником в металлической пленке покрывающей специально изготовленный цилиндр, являющийся неотъемлемой частью ЛД. В работе [2] рассмотрены особенности построения системы согласования каналов многоканальных приборов, в которых дополнительно к ЛД установлены тепловизионный и телевизионный каналы. Основным средством для обеспечения взаимной параллельности осей в этих системах являются вращающиеся оптические клинья, позволяющие отклонять визирные и оптические оси в небольшом диапазоне углов. Однако, в указанных работах не приводятся аналитических формул, позволяющих определить требования к допустимому углу рассогласования визирного и локационного каналов ЛД.

Для получения необходимых соотношений нами была принята модель, которая иллюстрируется рис. 1.

Пусть лазер имеет индикатрису излучения, определяемую угловой расходимостью θ_0 пучка с силой излучения по центру индикатрисы I_0 , а для произвольного угла $\theta - I_\theta$. Излучение лазера направляется в сторону объекта, а фактическое направление на объект, определяемое, как видно из рис. 1 углом θ , характеризует угловое рассогласование между осью визирования и локационной осью ЛД. Площадь объекта принимаем постоянной независимо от его положения относительно индикатрисы излучения лазера. На пути прохождения излучения находится атмосфера, накладывающая свои ограничения на процесс локации. Примем, что энергетические характеристики пучка, отраженного от объекта, подчиняются закону распределения Ламберта. Учитывая, что расстояние до объекта L велико, будем считать, что пространственно излучатель и фотоприемник совмещены. Их раздельное положение условно. Зеркальная составляющая отраженного от объекта пучка излучения расположена под углом 2θ по отношению к облучающему объект пучку.

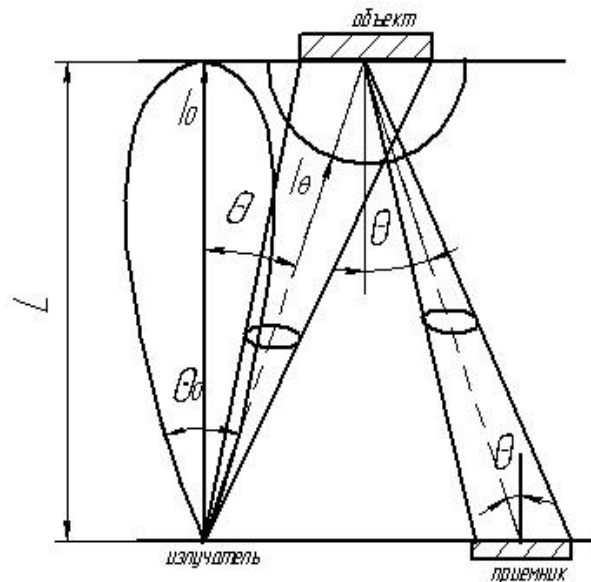


Рисунок 1 – Схема рассогласования осей дальномерного и визуального каналов

Для уменьшения потерь излучения при прохождении через атмосферу длина волны излучения лазера должна быть оптимизирована [3]. Необходимость оптимизации обусловлена сложным механизмом взаимодействия лазерного излучения с атмосферой, а также изменением погодных условий в широком диапазоне. Если ограничиться только линейными эффектами взаимодействия излучения с атмосферой, то интенсивность лазерного излучения в фокальном пятне определяется соотношением

$$I(\lambda) \approx \frac{P_o}{[\theta(\lambda)L]^2} \exp[-(\alpha_{ab} + \alpha_s)L],$$

где α_{ab} – коэффициент молекулярного поглощения; α_s – коэффициент аэрозоль-

ного поглощения и рассеяния; L – длина трассы; $\theta(\lambda)$ – эффективная расходимость лазерного пучка.

$$\alpha_s = 3.745 \cdot 10^{-5} \cdot \nu^{0.8543}$$

где α_s измеряется в км^{-1} , $\nu = 1/\lambda$ – в см^{-1} .

Будем считать, что $\alpha_{ab} \ll \alpha_s$.

При использовании теории турбулентности Колмогорова в [3] приведено выражение для эффективной расходимости лазерного пучка по уровню 0,8 от полной дошедшей до объекта мощности излучения:

$$\theta(\lambda) = \left\{ 4,42(K\lambda/D)^{5/3} + 37,1\lambda^{-1/3}C_n^2(h_o)X_{eff} \right\}^{6/5} + 33D^{-1/3}C_n^2(h_o)X_{eff} \Big\}^{1/2}$$

где D – диаметр излучающей диафрагмы; K – оптическое качество выходного лазерного пучка, равное отношению реальной расходимости излучения к ее дифракционному пределу; C_n^2 – структурный коэффициент показателя преломления, учитывающий влияние турбулентности; h_o – высота над земной поверхностью излучающей апертуры; $X_{eff} = LW(\Delta h/h)$ – эффективная длина наклонной трассы; L – реальная длина трассы; $W(\Delta h/h)$ – поправочный коэффициент.

$$W(\Delta h/h) = (1 - \Delta h/h)^{4/3} \int_0^1 t^{5/3} (1 - t\Delta h/h)^{-4/3} dt - \\ - 2,15 \cdot 10^{-4} h_o (\Delta h/h) (1 - \Delta h/h)^{1/3} \int_0^1 t^{5/3} (1 - t) (1 - t\Delta h/h)^{-4/3} dt \\ \Delta h = h - h_o$$

При увеличении λ коэффициент ослабления α_s и турбулентное уширение уменьшаются, в то же время дифракционная расходимость излучения растет. Это является причиной существования оптимального значения длины волны λ_{opt} , которая может быть найдена из условия

$$L\theta^2 \frac{\partial \alpha_s}{\partial \lambda} + \frac{\partial \theta^2(\lambda)}{\partial \lambda} = 0$$

Анализ показывает, что при благоприятных погодных условиях преимущество на стороне коротковолновых лазеров, поскольку их длина волны ближе к оптимальной [3].

Наиболее подходящим средством для изменения диаграммы направленности является двухкомпонентная оптическая система. В работе [4] приведена формула для эквивалентного конфокального параметра выходного пучка в двухкомпонентной оптической системе, состоящей из первого короткофокусного (обращенного к лазеру) компонента и второго (выходного) длиннофокусного компонента:

$$R'_{o2} = \frac{4XR_{\text{лаз}}(f'_2)^2}{4(X\Delta - f'_1 - d_1)^2 + R_{\text{лаз}}^2}, \quad (1)$$

где Δ – расстояние между фокальными плоскостями F'_1 и F'_2 компонентов;

$X = (1 + d_1 / f_1')^2 + (R_{\text{лаз}} / 2f_1')^2$; d_1 – расстояние от первого компонента до перетяжки исходного пучка; $R_{\text{лаз}}$ – конфокальный параметр пучка лазера.

Анализ формулы (1) показывает, что минимальная расходимость будет при $\Delta = 0$, т.е. при использовании телескопической системы. При изменении значения Δ расходимость будет увеличиваться. Причем целесообразно иметь положительное значение Δ , т.е. сближать компоненты, т.к. при этом отсутствует виньетирование пучка вторым компонентом. Расфокусировка Δ системы должна быть соизмеримой с фокусными расстояниями линз телескопа.

Теоретические положения, которые легли в основу исследований.

Для описания индикатрисы излучения лазера используем зависимость [5]

$$I(\theta) = \frac{2 \cdot \Phi \cdot \exp \left[-2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \theta}{\theta_o} \right)^2 \right]}{2\pi \left(1 - \cos \frac{\theta_o}{2} \right)},$$

где $I(\theta)$ – интенсивность излучения в i -ом направлении; Φ – полный поток от излучателя; θ_o – расходимость лазерного пучка.

В дальнейшем под углом θ будем понимать угол, который соответствует рассогласованию осей визирного и дальномерного каналов. Введем ряд ограничений на параметры лазерного пучка, размер объекта и расстояние до него, которые позволят получить конкретные числовые результаты.

Так, будем считать интенсивность лазерного пучка в плоском угле $\theta_o / 10$ постоянной, учитывая незначительные ее отклонения в этом угловом диапазоне. Телесный угол, соответствующий $\theta_o / 10$, равен

$$\Omega_i = 2\pi \left(1 - \cos \left(\frac{\theta_o}{2 \cdot 10} \right) \right)$$

Площадь объекта $A_{об}$ найдем из условия, что объект располагается по оси индикатрисы излучения лазера и занимает телесный угол равный Ω_i

$$A_{об} = 2\pi \left(1 - \cos \left(\frac{\theta_o}{2 \cdot 10} \right) \right) L^2$$

При проведении численного моделирования площадь объекта и расстояние от ЛД до плоскости его расположения будем считать неизменными. При этих условиях поток излучения, отраженного ламбертовской поверхностью объекта и попавшего на чувствительную поверхность фотоприемника равен

$$\Phi_n = \frac{\Phi \cdot \exp \left[-2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \theta}{\theta_o} \right)^2 \right]}{2\pi^2 \left(1 - \cos \frac{\theta_o}{2} \right)} \cdot \frac{A_{об}}{L^2} \cdot \frac{A_n}{L^2} \cos^6 \theta \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{об},$$

где A_n – площадь чувствительной площадки фотоприемника;

τ_a – коэффициент пропускания атмосферы; $\tau_{об}$ – коэффициент серости объекта.

Соотношение сигнал/шум окажется равным

$$\mu = \frac{\Phi \cdot \exp \left[-2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \theta}{\theta_o} \right)^2 \right]}{2\pi^2 \left(1 - \cos \frac{\theta_o}{2} \right)} \cos^6 \theta \frac{A_n}{L^2} \frac{A_{об}}{L^2} S \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{об}}, \quad (2)$$

где S – чувствительность фотоприемника; I_T – темновой ток.

Если вероятность ошибки принятия сигнала от объекта составляет $P_{ош} = 10^{-9}$, то должно выполняться отношение сигнал/шум $\mu = 6$.

Численное моделирование и его результаты

Численное моделирование по определению допустимого углового рассогласования визирной и локационной осей проводились с применением формулы (2) при $\mu = 6$. В качестве исходных данных для моделирования были взяты параметры типичных источника и приемника, применяемых в локационных ЛД. Основные характеристики этих элементов:

- излучатель: лазер LT-8ES; энергия импульса $W = 0.02 \text{ Дж}$; длина волны излучения $\lambda = 1064 \text{ нм}$; длительность импульса $\tau = 10 \text{ нс}$.

- приемник: фотодиод ЛФДГ-70; чувствительность на длине волны $\lambda = 1060 \text{ нм}$ $S = 18 \text{ А/Вт}$; темновой ток $I_T = 15 \cdot 10^{-9} \text{ А}$.

Кроме того были приняты следующие значения параметров, входящих в (2)

- дальность до объекта $L = 20 \text{ км}$;
- диаметр входного зрачка оптической системы фотоприемного устройства $D = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;
- коэффициент серости объекта $\tau_{об} = 0,8$;
- расходимость излучения $\theta_o = 5 \text{ мрад}$.

Коэффициент пропускания атмосферы был найден по методу Лангера [6]. В соответствии с этим методом τ_a для окна прозрачности, соответствующего $\lambda = 1064 \text{ нм}$ равен

$$\tau_a = k_i \cdot (\omega_i / \omega)^{\beta_i} \quad (\omega > \omega_i),$$

где k_i, β_i , – постоянные коэффициенты для соответствующих полос прозрачности; ω – количество осажденной воды, мм; ω_i – указываемое в таблице значение количества осажденной воды.

Для принятых в расчетах условий:

- $L = 20 \text{ км}$ в ясную погоду в летний период в Киевской области;
- $T = 292 \text{ К}$ – средняя температура атмосферы в июле;
- $V = 0.51$ – относительная влажность воздуха

получим из таблиц значения коэффициентов $k_i = 0.765$; $\beta_i = 0.134$; $\omega_i = 54$.

Тогда $\tau_a = 0,7$.

Рассчитанные в соответствии с формулой (2) значения μ в зависимости от θ приведены на графике рис. 2.

$$\Phi := 2 \cdot 10^6 \text{ Вт} \quad I_T := 15 \cdot 10^{-9} \text{ А} \quad \theta_o := 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$$

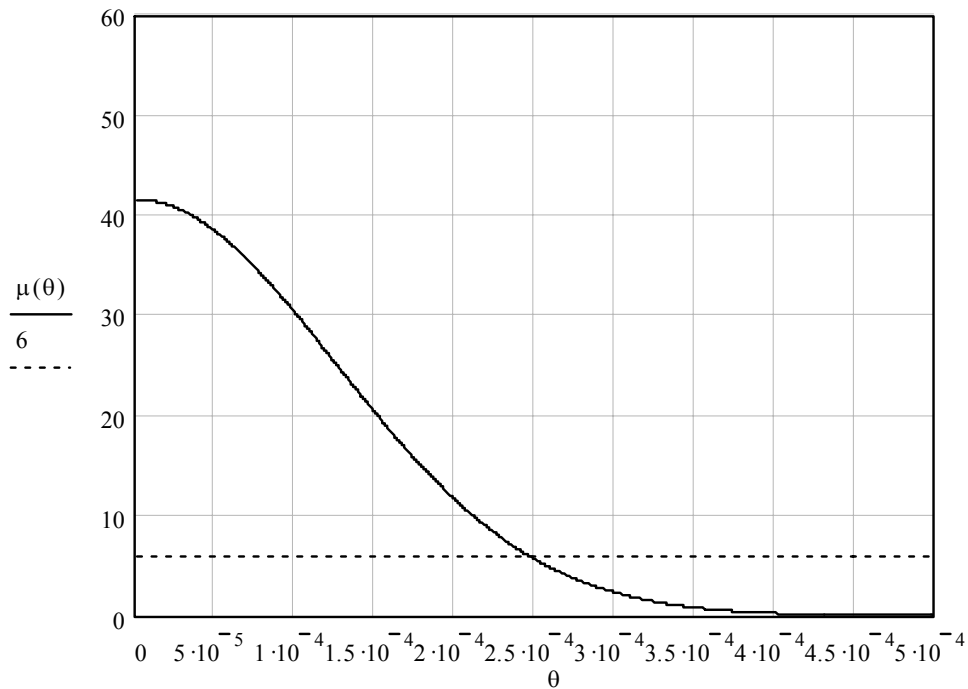
$$D := 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} \quad L := 2 \cdot 10^4 \text{ м} \quad S := 20 \text{ А/Вт}$$

$$A_n := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \text{площадь приемника}$$

$$A_g := 2\pi \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\theta_o}{2}\right)\right) \cdot L^2 \quad \text{площадь объекта} \quad A_g = 0.785 \text{ м}^2$$

$$A_g := 10 \text{ м}^2$$

$$\mu(\theta) := \frac{\frac{\Phi \cdot e^{\left[-2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \theta}{\theta_o}\right)^2\right]}}{2 \cdot \pi^2 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\theta_o}{2}\right)\right)} \cdot (\cos(\theta))^6 \cdot \frac{A_n}{L^2} \cdot \frac{A_g}{L^2} \cdot S \cdot 0.7^2}{I_T}$$



$$\text{root}[(\mu(\theta) - 6), \theta, 0, 0.005] = 2.46 \times 10^{-4} \text{ рад}$$

$$\frac{60 \cdot 180}{\pi} \cdot \text{root}[(\mu(\theta) - 6), \theta, 0, 0.005] = 0.846 \text{ угл мин}$$

Рисунок 2 – Изменение отношения с/ш при отклонении оси индикатрисы излучения

Графические зависимости показывают, что для типичных заданных условий отношение сигнал/шум $\mu = 6$ может быть достигнуто при максимально возможном угле рассогласования визирной и локационной осей ЛД равном $\theta_m = 0,246 \text{ мрад}$ или $0,846 \text{ угл. мин.}$ Приведенная методика позволяет определить θ_m для любых возможных значений параметров излучателя, фотоприемника и других факторов, сопровождающих работу ЛД.

Выводы

В результате проведенных исследований получено соотношение, позволяющее определить допустимое угловое рассогласование визирного и локационного каналов ЛД для любых возможных значений параметров характеризующих используемую элементную базу с учетом формы индикатрисы излучения лазера и влияния атмосферы. Как показало численное моделирование для типичных значений параметров, входящих в полученную формулу, максимально допустимое угловое рассогласование при $\mu = 6$ составило $\theta_m = 0,846 \text{ угл. мин.}$ Дальнейшие исследования в этом направлении будут посвящены разработке методик обеспечения требуемой точности взаимного положения визирной и локационной осей ЛД.

Литература

1. Соловьев Г.Я., Гордиенко В.И., Мазурин И.В., Замосенчук В.Н., Сухомлинов П.А. Системы согласования каналов наблюдения и лазерных дальномеров в комплексированных приборах наблюдения и прицеливания // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2004. – №27. – С. 55–59.
2. Шемшединов Р.Б. Адаптация в оптико-локационных системах // Оптический журнал. – 2004. – №2. – С. 41–53.
3. Башкин А.С., Безноздрев В.Н., Пирогов Н.А. Об эффективности прохождения излучения различных лазеров через приземную турбулентную атмосферу // Квантовая электроника. – 2003. – №1. – С. 31–36.
4. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
5. Парвулюсов Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для студентов втузов/Ю.Б. Парвулюсов, В.П. Солдатов, Ю.Г. Якушенков; Под общ. ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.
6. Хадсон Р. Инфракрасные системы. – М.: Мир, 1972. – 534 с.

Кучеренко О.К., Бойкова Е.В. **Про неузгодженість візирної та локаційної осей лазерного далекоміра**
У роботі визначені вимоги до припустимого кута неузгодженості візирної осі оптичної системи наведення й оптичної осі каналу вимірювання дальності лазерного далекоміра.

Kucherenko O.K., Boykova E.V. **About the mismatch visual and location axes of the laser range finder**
The requirements to an allowable corner of mismatch visual and location axes of the laser range finder are determined in the work.

Надійшла до редакції
12 червня 2006 року