

Г.А. Калошин, В.В. Носов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ВКЛАДА ФЛУКТУАЦИЙ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИ УГЛОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ НА ТРАССЕ «ЗЕМЛЯ – МОРЕ»

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований регулярной и случайной рефракции лазерных пучков при определении пространственного положения транспортных средств в режиме измерения дирекционных направлений оптико-электронной углоизмерительной системой.

Проведено сравнение теоретических оценок с результатами измерений среднеквадратических отклонений пучка на трассе «земля – море». Показано удовлетворительное совпадение теоретических оценок с результатами эксперимента при условии корректного выбора профиля подстилающей поверхности вблизи источника излучения.

Введение

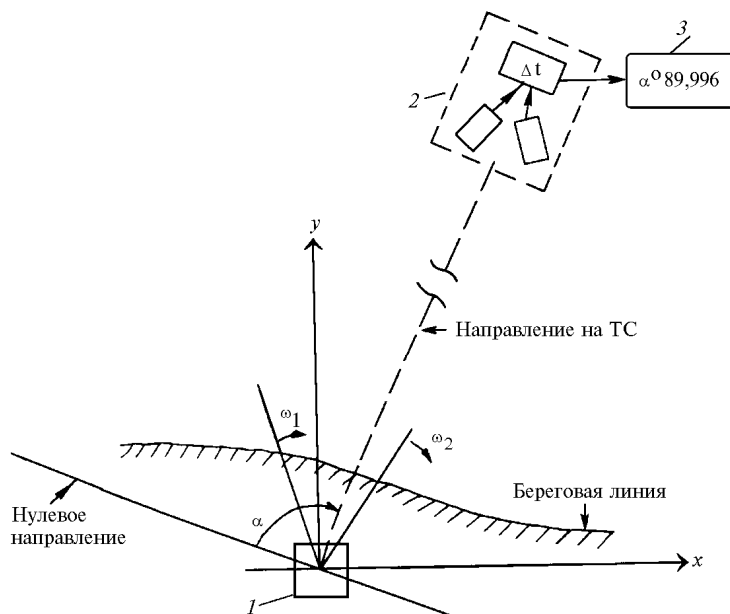
Развитие современных транспортных средств (ТС) предъявляют все новые требования к точности определения пространственного положения, которая в настоящее время может составлять несколько десятков угловых секунд [1]. Удовлетворение этого требования связано с дистанционным измерением в автоматическом режиме угловых координат ТС. Эта задача в настоящее время решается оптико-электронными углоизмерительными системами (ОЭУИС), основанными, главным образом, на использовании лазерных пучков.

Требование к ОЭУИС в соответствии с задачами постоянно повышаются, и это относится в первую очередь к дальности, точности и быстродействию. Кроме того, важными являются удобства и комфортность использования таких систем в работе. Наиболее простые технические решения повышения точности и быстродействия связаны с наличием двух практически равноправных носителей информации: лазерных пучков, обеспечивающих связь с ТС в индикаторном режиме, и электрического сигнала, позволяющего реализовать все необходимые логические и вычислительные операции.

Так, в [1, 2] предложено техническое решение данной задачи в виде строчного преобразователя, в котором осуществляется последовательный просмотр всех участков сектора ориентирования и выделения на борту ТС информационного сигнала с последующим определением азимутальных смещений. Фотометрические функции устройства [1] основаны на преобразовании измеряемой линейной координаты x в информационном секторе в соответствующий временной интервал Δt . Береговым устройством (БУ) формируются два лазерных пучка (рисунок), которые с помощью дефлекторов вращаются в пространстве с разной угловой скоростью ω_1 и ω_2 . При этом за нулевое пространственное направление принимается линия пересечения этих углов, жестко связанная с БУ, установленным на «пассивном» хранителе направления с предельной погрешностью 5–15'' в течение длительного срока (год и более).

Регистрация временного интервала Δt между оптическими сигналами однозначно характеризует азимутальное положение ТС или дирекционное направление на ТС, а установка второго БУ позволяет однозначно решить навигационную задачу. Таким образом, измерительный процесс представляет собой последовательность преобразований $\alpha = \alpha[\Delta t(m)]$, где $\Delta t = t_2 - t_1$; t_1 и t_2 – моменты прохождения через фотоприемное устройство (ФПУ) опорного и информационного лазерных пучков; m – количество импульсов, поступивших на ФПУ.

Метод, предложенный в [1], дает возможность довести m (частоту измерений) до 25–30 Гц. Это позволяет с известной точностью регистрировать текущее значение углового смещения ТС.



Функциональная схема ОЭУИС: 1-береговое устройство, 2-фотоприемное устройство, 3-блок обработки и индикации

Для успешной работы ОЭУИС на уровне современных требований к точности необходим детальный учет всех компонентов, составляющих суммарную погрешность измерения α . Среднеквадратическое отклонение (СКО) σ_{Σ} при измерении α определяется как сумма СКО, обусловленного инструментальной погрешностью $\sigma_{и}$, и СКО, вносимого турбулентной атмосферой $\sigma_{а}$ в виде боковых регулярных и случайных смещений лазерного пучка:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{и}^2 + \sigma_{а}^2}.$$

Целью статьи является теоретическое и экспериментальное исследование $\sigma_{а}$ над подстилающей поверхностью типа «земля – море».

Здесь представлены результаты теоретических оценок боковой рефракции и дисперсии случайных смещений лазерного пучка, выполненных для трасс, проходящих над земной и морской поверхностью для зенитных углов 90, 87,5, 85 и 75°, имеющих место при расположении источника излучения в условиях прибрежной горной местности. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными, полученными ОЭУИС для дистанций до 5 км.

1. Теоретические оценки

1.1. Боковая регулярная рефракция. Экспериментальные исследования [3] показывают, что градиенты плотности воздуха по высоте в среднем на два порядка больше, чем по горизонтالي. На столько же угол рефракции в вертикальной плоскости больше угла рефракции в горизонтальной плоскости. Для условий стандартной атмосферы рефракция в вертикальной плоскости не превышает нескольких угловых минут для расстояний до 100 км, боковая рефракция при этом не превышает секунды. Лишь в исключительных случаях при прохождении лазерного пучка вблизи нагретых солнцем стен в условиях города зарегистрированы значения боковой рефракции до 20'' [3].

Для расчета боковой рефракции обычно используется выражение [3]

$$r_6 = PL/(T^2 \cos \alpha) \operatorname{tg} \tau (k_1 + k_2 \gamma) \sin(A - Q), \quad (1)$$

где $k_1 = 0,28$; $k_2 = 8,1$; P – давление воздуха, мбар; T – абсолютная температура в точке наблюдения; γ – вертикальный градиент температуры, град/м; τ – угол наклона слоев равного показателя преломления к плоскости горизонта или угол, отсчитываемый от точки зенита до вектора ∇n , на-

правленному в сторону уменьшения показателя преломления n ; A и Q – азимуты наблюдаемого направления и вектора ∇n ; L – дистанция; α – угол места наблюдаемого источника.

Наклон слоев равного показателя преломления, обусловленный горизонтальными градиентами, может быть вычислен с помощью выражения

$$\tau = -2,068 \cdot 10^3 \Gamma + 58,85 G, \quad (2)$$

где Γ – горизонтальный градиент температуры, град/м; G – горизонтальный градиент давления, мбар/м, составляющий в среднем $(1-5) \cdot 10^{-5}$ мбар/м. Значение Γ над водной поверхностью на высоте 2 м обычно составляет $\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$ град/м и резко убывает с увеличением высоты пучка.

Определим, используя выражения (1) и (2), величину r_0 для дистанции $L = 30$ км. Для типичных средних условий (стандартной) атмосферы имеем: $T = 280$ К, $P = 1000$ мбар, $\Gamma = \pm 10^{-4}$ град/м, $G = -5 \cdot 10^{-5}$ мбар/м, $\gamma = 0,006$ град/м. Зададим $A - Q = 90^\circ$, а $\alpha = 1^\circ$. Тогда $\tau = -0,21^\circ$, а $r_0 = -0,46''$. Из (1) также видно, что с уменьшением L r_0 пропорционально уменьшается.

1.2. Случайная рефракция. В приземном слое структура турбулентности оценивается теорией подобия Монина–Обухова [4]. Параметр C_n^2 характеризует интенсивность турбулентных пульсаций показателя преломления и связан с метеорологическими характеристиками соотношениями:

$$C_n^2 = [(79 P/T^2) \cdot 10^{-6}]^2 C_T^2, \quad P \text{ [мбар]}, \quad T \text{ [К]},$$

$$C_T^2 = c^2 \alpha^2 (R_i) (\kappa_k h)^{4/3} \left(\frac{\partial T(h)}{\partial h} \right)^2, \quad R_i = \frac{g}{T} \frac{\partial T / \partial h}{(\partial u / \partial h)^2},$$

где g – ускорение силы тяжести; P и T – давление и температура; dT/dh и du/dh – высотные градиенты температуры и скорости ветра; $\kappa_k = 0,4$; $c^2 = 2,8$. График $\alpha^2(R_i)$ приведен в [5]. Распределение значений C_n^2 вблизи ровной земной подстилающей поверхности иллюстрирует табл. 1 [7].

Таблица 1

Значения C_n^2 в условиях степи на высоте $h = 2,5$ м

| Время суток | Интервал наиболее вероятных значений $C_n^2, \text{ м}^{-2/3}$ | Вероятность попадания в интервал |
|-------------|--|----------------------------------|
| День | $5,4 \cdot 10^{-14} \div 5,4 \div 10^{-13}$ | 84 |
| Ночь | $5,4 \cdot 10^{-15} \div 5,4 \div 10^{-14}$ | 69 |
| Вечер, утро | $5,4 \cdot 10^{-16} \div 5,4 \div 10^{-15}$ | 66 |

Типичный диапазон приземных значений C_n^2 в ясный летний день определяется неравенством [5]:

$$10^{-17} \text{ м}^{-2/3} \leq C_n^2 \leq 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}.$$

В дневное время из-за разницы в нагреве суши и морской поверхности значения C_n^2 вблизи поверхности моря обычно несколько меньше, чем вблизи поверхности суши.

В оценках использовалась усредненная модель высотного профиля $C_n^2(h)$:

$$C_n^2(h) = C_{n_0}^2 (h/h_0)^{-2/3} e^{-h/\hbar}, \quad C_{n_0}^2 = C_n^2(h_0), \quad \hbar = 3200 \text{ м},$$

где h_0 – высота источника излучения над подстилающей поверхностью. Для наиболее вероятных значений $C_{n_0}^2$ эта модель обеспечивает хорошее согласие с экспериментальными данными [6, 7].

Согласно [8], СКО оси визирования лазерного пучка σ_a для горизонтальных и наклонных трасс рассчитывалось по следующей формуле:

$$\sigma_a^2 = 4,1 L a^{-1/3} \int_0^1 d\xi (1 - \xi)^2 C_n^2(h(\xi L)) \{q^{-1/3} (\xi L) - [q^2 (\xi L) + \beta(h(\xi L))]^{-1/6}\}. \quad (3)$$

Здесь $h(\xi L) = \sqrt{\xi^2 L^2 + (R + h_0)^2} + 2(R + h_0)\xi L \cos\theta - R$ – текущая высота точки трассы; ξL – расстояние от текущей точки трассы до излучателя; $h(0) = h_0$; R – радиус Земли; θ – зенитный угол приемника, под которым он виден с места источника, $0 \leq \theta \leq \pi/2$; $\beta(h) = 2[0,4h/(2\pi a)]^2$; a – радиус излучающей апертуры источника; L – длина трассы; $q(\xi) = [1 + (\xi L/a) \operatorname{tg}(\varphi_0/2)]^2 + \Omega^{-2} \xi^2 + 8\sigma^{12/5}(\xi) \Omega^{-1} \xi^{16/5}$, $\Omega = ka^2/L$; $\sqrt{q(\xi)}$ – текущий вдоль трассы средний радиус лазерного пучка, нормированный на свое значение у источника ($q(0) = 1$); φ_0 – полный угол начальной расходимости оптического пучка; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число;

$$\sigma^2(\xi) = 0,82 k^{7/6} L^{11/6} \int_0^1 dt (1-t)^{5/3} C_n^2(h(\xi t L)).$$

По алгоритму (3) были проведены оценки угловой дисперсии случайных смещений лазерного пучка σ_a с учетом прохождения трассы над земной и морской поверхностью для различных высот источника (береговое устройство) и фотоприемного устройства на ТС и с учетом высотного профиля C_{n0}^2 .

Оценки были проверены для следующих параметров, характеризующих источник, геометрию трассы и структурную характеристику флуктуаций C_{n0}^2 : источник – расходимость пучка излучения 4, 5, 6°; радиус пучка 1 мм, длина волны 0,63 мкм. Геометрия трассы – дальность над морем (L_m) 5; 10; 15; 20; 25; 35 км, дальность над сушей (L_c) 10; 20; 50; 100; 200 м, высоты источника ($H_i = h_0$) и приемника (H_n) 2,5; 5; 10; 20; 30 м; зенитный угол 90°. Структурная характеристика диэлектрической проницаемости над морем $C_{n0}^2 = 10^{-14}$; $5 \cdot 10^{-15}$; $10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$.

Ниже показан фрагмент таблицы (табл. 2) дисперсий случайных смещений лазерного пучка $\sigma_a^2 = \sigma_m^2 + \sigma_c^2$, где σ_m^2 и σ_c^2 – значения дисперсий для участков трассы над морем и сушей соответственно. Здесь же в качестве иллюстрации приведены дисперсии для расходимости 4', радиуса пучка 1 мм и значений $C_{n0}^2 = 10^{-13} \div 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, наиболее соответствующие условиям экспериментальной проверки и приведенные в табл. 2 в виде дроби. Числитель соответствует зенитному углу 90°, а знаменатель – зенитному углу, равному 87,5°.

Таблица 2

Фрагмент таблицы дисперсий случайных смещений лазерного пучка в зависимости от геометрии трассы, параметров пучка и среды

| $\lambda = 0,63$ мкм, расходимость пучка 4', диаметр пучка 2 мм, $C_{n0}^2 = 10^{-13} \div 10^{-15}$, $\text{м}^{-2/3}$ | | | $\sigma_c^2 \cdot 10^{10}$, рад ² | | | | | | $\sigma_m^2 \cdot 10^{10}$, рад ² | | | | | | $\sigma_a \cdot 10^5$, рад | | | | | |
|---|--------------|---------------|---|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----|-----------------------------|----|----|----|----|----|
| | | | L_c , м | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H_i , м | H_n , м | L_m , км | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 35 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 35 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 35 |
| | 3 | 200 | 0,09 | | | | | | 0,35 | | | | | | 0,67 | | | | | |
| | | 100 | 0,025 | | | | | | 0,014 | | | | | | 0,197 | | | | | |
| | | 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 200 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Для зенитных углов менее 90° также были проведены оценки σ_a по алгоритму (3) для следующих параметров, характеризующих условия распространения.

Параметры источника:

- длина волны излучения – 0,63 мкм;
- расходимость пучка – 2; 4';
- диаметр пучка – 2; 5 мм.

Геометрия трассы

- а) прибрежный район:
- дальность над морем – 1,4, 10, 20, 35 км;

дальность над сушей – 10, 100, 300 м;
 б) суша:
 дальность над сушей – 1, 4, 10, 20, 35 км;
 зенитный угол – 87,5; 85; 75°;
 в) море:
 дальность над морем – 1, 4, 10, 20, 35 км;
 зенитный угол – 87,5; 85; 75°;
 высота источника – 1,5 м.

Значение C_n^2 :

над сушей на высоте 2,5 м – 10^{-12} ; 10^{-14} ; $10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$;
 над морем на высоте 2,5 м – 10^{-14} ; $5 \cdot 10^{-14}$; $10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$.

Результаты расчетов σ_a в данном случае также представлены в таблицах, вид которых и объем аналогичны табл. 2 с той лишь разницей, что колонки H_n и H_p заменены на колонки «расходимость» и «радиус источника» и добавлена колонка «зенитный угол».

2. Экспериментальные измерения σ_a

Идея эксперимента основана на косвенных измерениях дисперсии случайных смещений лазерного пучка σ_a^2 и состояла в следующем. На ТС, положение которого контролировалось независимыми методами с высокой точностью, определялись среднеквадратические отклонения при измерениях дирекционных направлений на БУ σ_Σ , положение БУ также фиксировалось с высокой точностью. Имея большой массив значений σ_n , полученных во время стендовых испытаний в климатических камерах, σ_a определялась как

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_\Sigma^2 - \sigma_n^2}. \quad (4)$$

Это эквивалентно мгновенному измерению координат центра тяжести пучка на плоском экране в непосредственной близости ФПУ. Береговое устройство ОЭУИС, укомплектованное лазерами типа ЛГН–104 с длиной волны излучения 0,63 мкм и выходной мощностью 40 мВт, было установлено на неподвижном «массивном» хранителе направления со среднеквадратической погрешностью 5" в течение длительного срока на высоте 10 м. ФПУ ОЭУИС находилось на ТС, положение которого контролировалось с высокой точностью двумя независимыми методами: стационарным фазовым радиодальномером ГРАС [9] со среднеквадратической погрешностью определения места, равной 0,7 м на расстоянии 0,2 ÷ 60 км, и с помощью двух разнесенных на 1 км лазерных дальномеров типа СТ-5 «Блеск» со среднеквадратической погрешностью измерения расстояния, не превышающей 0,20 м на расстояниях 0,002–5 км. ФПУ наводилось на БУ, и в течение 10 ÷ 15 мин с частотой 30 Гц осуществлялся набор значений σ_Σ^2 . Многократные измерения позволили устранить влияние волнения и регулярной рефракции. Точность измерения σ_a составляла $3,2 \cdot 10^{-5}$ рад. Одновременно осуществлялся контроль за следующими метеопараметрами: скоростью и направлением ветра, температурой и градиентом температуры. Возможности ФПУ при имеющемся энергетическом потенциале БУ позволяли работать на дистанциях до 5 км.

Результаты обобщенных измерений σ_Σ для двух значений C_{n0}^2 представлены в табл. 3. Здесь же приведены СКО пучка, обусловленные аппаратурой σ_n при аналогичных температурах, и СКО пучка, полученные в эксперименте (σ_a^3) и расчетным путем (σ_a^p) при параметрах трассы $L_m = 5$ км, $L_c = 0,2$ км, $H_n = 10$ м, $H_p = 3$ м, соответствующих условиям измерений α , и диаметре пучка, равном 2 мм.

Таблица 3

Результаты обобщенных измерений σ_Σ

| $\sigma \cdot 10^{-5}$, рад | $C_{n0}^2 = 5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ | $C_{n0}^2 = 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, $t = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ |
|--|--|--|
| σ_Σ | 6,7 | 5,2 |
| σ_n | 2,7 | 2 |
| $\sigma_a^3 = \sqrt{\sigma_\Sigma^2 - \sigma_n^2}$ | 6,1 | 4,8 |
| σ_a^p | 2,5 | 1,8 |

Обсуждение результатов

Результаты измерений показывают, что предложенный метод измерения σ_a дает удовлетворительные результаты для эксперимента в турбулентной атмосфере.

Как следует из теоретических оценок, основной вклад в величину дисперсии случайных смещений лазерного пучка вносит участок трассы, прилегающий к источнику. Поэтому корректный выбор модели профиля подстилающей поверхности вблизи источника позволяет уменьшить погрешность теоретических оценок σ_a . Вклад регулярной боковой рефракции на порядок меньше величины случайной рефракции, и при угломерных измерениях им можно пренебречь.

Авторы выражают благодарность к. ф.-м. н. Чен Бен Наму за расчеты, приведенные в табл. 2, и сотрудникам КТИ «Оптика» к.т.н. Н.Ф. Нелюбину за полезные обсуждения результатов подраздела 1.1, А.М. Короткову и Ю.С. Михееву за помощь в получении экспериментальных данных.

1. Капичин И. Н. Опτικο-электронные углоизмерительные системы. Киев: Техника, 1986. 144 с.
2. А. с. 1338674 (СССР) 4608 В5/38. Оптический проблесковый сигнализатор / Г.А. Калошин, В.Ю. Каштаев, А.М. Коротков и др. Оpubл. в БИ. 1987. N 19.
3. Юношев Л. С. Боковая рефракция света при измерениях углов. М.: Недра, 1969. 96 с.
4. Монин А. С., Обухов А. М. Безразмерные характеристики турбулентности в приземном слое атмосферы // ДАН СССР. 1953. Т. 93. N 2. С. 223–226.
5. Гурвич А. С., Кон А. И., Миронов В. Л., Хмелевцов С. С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
6. Walters D. L. Atmospheric modulation transfer function for desert and mountain locations measurements // Journal Opt. Soc. Amer. 1981. V. 71. N 4. P. 406–409.
7. Оптическая модель атмосферы / М.С. Беленький, Г.О. Задде, В.С. Комаров и др. Томск: Изд. Томского филиала СО АН СССР, 1987. 225 с.
8. Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения / В.П. Аксенов, А.В. Алексеев, В.А. Банах и др. Томск: Изд. Томского филиала СО АН СССР, 1987. 247 с.
9. Лазерные устройства для обеспечения судовождения / В.Е. Зуев, Г.А. Калошин, Р.С. Константинов и др. Новосибирск: Наука, 1985. 127 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
30 декабря 1996 г.

G. A. Kaloshin, V. V. Nosov. Investigation of Direction Fluctuations Contribution into Goniometric Measurements with Laser Beams on Path «Ground-to-Sea».

The theoretical and experimental results are presented on regular and stochastic refraction of laser beams when determining spatial location of transportation facilities in the regime of measuring directions with the use of optoelectronic goniometric system. The theoretical estimations are compared with the measurements of the beam mean square divergence over the path «ground-to-sea». Satisfactory agreement between theoretical and experimental results is shown providing a proper choice of the underlying surface profile near the beam source.