

Дисперсионный метод учета статической и динамической рефракции для дальномерного тракта лазерного локатора слежения

*В.О. Ефимов¹, А.Н. Пикулев¹, Н.В. Дорогов¹,
А.А. Тяжелова¹, Л.М. Сарварова¹, В.Ю. Колесников¹,
А.М. Николаев², П.М. Николаев^{2,3}, Ю.М. Николаев^{2,3}*

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань*

²*Научно-исследовательский институт аэроупругих систем, Феодосия*

³*Летно-исследовательское предприятие «Взлет», Феодосия*

Аннотация: Рефракция оказывает сильное влияние на точностные параметры дальномерного тракта лазерных локаторов слежения и процесс наведения узкого лазерного луча на объект. Высокие требования к локаторам (погрешность измерения дальности до десятка сантиметров) приводят к необходимости учета рефракции для внесения поправок в измерения. К существенному искажению сигнала приводит не только явление статической рефракции, но и динамической. Для снижения ошибки дальномерных измерений целесообразно использование методов компенсации влияния статической рефракции или ее учета и использования коэффициентов поправки. В статье показано, что наиболее эффективным решением проблемы рефракции при наличии динамической составляющей также является использование параллельного лазерного зондирования атмосферы, однако его осуществление необходимо проводить на двух различных длинах волн. При этом основным методом вычисления поправочных коэффициентов является дисперсионный метод, который позволяет снизить относительную погрешность измерений до 10^{-6} .

Ключевые слова: лазерный локатор слежения, дальномерный канал, влияние атмосферы, статическая рефракция, динамическая рефракция, дисперсионный метод компенсации, лазерное двухволновое зондирование атмосферы.

Введение

Работа лазерного локатора слежения (ЛЛС) при дальностях свыше 15 км сопровождается значительным влиянием атмосферных явлений [1, 2]. Атмосферная добавка за счет статической рефракции для длины волны 0,53 мкм имеет порядок (на уровне моря) 3×10^{-4} от максимально измеряемой дальности [3]. Таким образом, для расстояния в 15 км аддитивная добавка $\Delta R_{\text{реф}}$ к реальной измеряемой дальности составит 4,5 м. Наиболее эффективным решением этой проблемы при отсутствии возможности получения оперативной и точной информации о метеопараметрах является

использование лазерного зондирования атмосферы. Его использование позволяет точно (относительная погрешность 10^{-5}) и оперативно вносить коррекцию в измерения дальности [4]. Другим явлением, которое без дополнительного контроля во многих случаях может уменьшить точность наведения лазерного локатора и определения координат объекта, является случайная или динамическая рефракция, т.е. быстрое во времени отклонение оптического луча, вызванное движущимися неоднородностями воздуха. Более перспективным в этом случае представляется использование двухволновых лазерных методов контроля параметров атмосферы. В частности, ошибки измерения дальности, вызванные статическим и динамическим изменениями показателя преломления, могут быть исключены при использовании дисперсионного метода. Данный метод и его реализация на YAG:Nd³⁺ лазере являются предметом анализа данной статьи.

Дисперсионный метод учета статической и динамической рефракции

Показатель преломления воздуха зависит от длины волны [4-6], и, следовательно, свет с двумя различными длинами волн, распространяющихся по одному и тому же пути, будет проходить этот путь с несколько отличающимися скоростями.

Поскольку рефракция для данной длины волны пропорциональна плотности воздуха, то разность значений рефракции и, следовательно, разность времен прохождения для двух длин волн пропорциональна для каждой длины и их разности может быть использовано для нахождения средней плотности воздуха на трассе, и, следовательно, показателя преломления для каждой длины волны.

Дальность R_λ , измеренная локатором, отличается от истинного значения R и может быть описана выражением:

$$R_{\lambda} = \int_0^R n dx, \quad (1)$$

где n – показатель преломления вдоль данного оптического пути для данной длины волны λ .

Величина R_{λ} складывается из двух составляющих:

$$R_{\lambda} = R + \Delta R_{\lambda}, \quad (2)$$

где ΔR_{λ} – добавка к реальному расстоянию R , обусловленная влиянием атмосферы на данной λ .

Для двух длин волн λ_1 и λ_2 соответствующие изменения значения R_{λ} выразим через R_{λ_1} и R_{λ_2} , а атмосферные добавки через ΔR_{λ_1} и ΔR_{λ_2} .

Тогда

$$R_{\lambda_i} = R + \Delta R_{\lambda_i} = \int_0^R n_i dx; i = 1, 2. \quad (3)$$

Отсюда:

$$\Delta R_{\lambda_i} = \int_0^R (n_i - 1) dx. \quad (4)$$

Пусть

$$\Delta R_{\lambda} = \Delta R_{\lambda_1} - \Delta R_{\lambda_2} = \int_0^R A(n_2 - 1) dx, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{n_2 - n_1}{n_2 - 1}. \quad (6)$$

Величина A , определяющая соотношение коэффициентов преломления, не зависит от давления и температуры и лишь незначительно зависит от влажности [3, 5, 6].

В первом приближении ее можно считать постоянной. Отсюда:

$$\Delta R_{\lambda_2} = \Delta R_{\lambda} / A. \quad (7)$$

Так, например, для дальности 10 км на уровне моря при $\lambda_1 = 0,63299$ мкм и $\lambda_2 = 0,36836$ мкм приращения оптических путей для синего (λ_2) и для красного света (λ_1) будут отличаться примерно на 10%, а их разность $\Delta R_{\lambda} \cong 30$ см.

Двухволновый канал контроля статической и динамической дисперсии

Схема, реализующая двухволновой принцип измерения на основе использования импульсного лазера генерирующего одновременно излучение на длинах волн $\lambda_1 = 1,06$ мкм (основная частота) и $\lambda_2 = 0,53$ мкм (вторая гармоника), представлена на рис. 1.

Твердотельные лазеры НИИ «Полюс» на кристаллах $YAG:Nd^{3+}$, $YA:Nd$, и стекле, активированном Cr и Nd, охватывают диапазон излучения от 0,26 до 1,3 мкм. Выходная мощность лазеров на $YAG:Nd^{3+}$ и $YA:Nd$ достигает 1 кВт в непрерывном режиме, в импульсном режиме энергия излучения достигает 3–5 Дж. За последние годы разработаны лазеры на новых кристаллах $YAG:Cr$, Tm, Ho, Er, корунд с Ti и $YAG:Cr^{4+}$. Специально для оптической локации разработаны твердотельные излучатели серии LT, которые отличаются высокой частотой повторения импульсов, наличием встроенного драйвера электрооптического затвора, высокой эффективностью и надежностью, устойчивостью к вибрациям и ударам, широким диапазоном рабочих температур. Излучатели предназначены для использования в мобильных лидарных системах для зондирования атмосферы и экологического мониторинга, безопасных высокочастотных лазерных дальнометрах, бортовых системах различного назначения. При введении в состав ЛЛС подсистемы учета параметров атмосферы наиболее приемлемым является лазерный излучатель LT-5Z, излучающий на двух длинах волн.

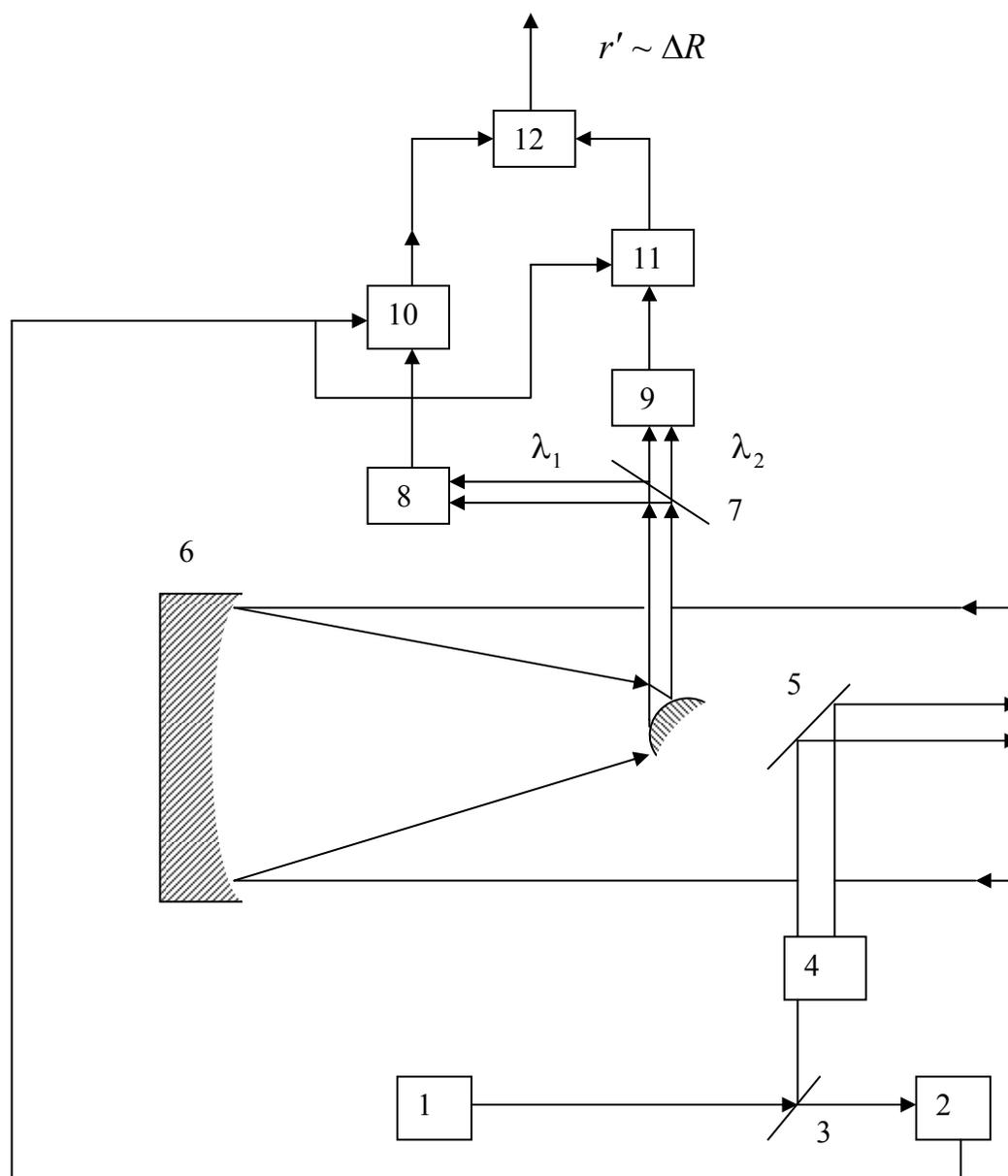


Рис. 1. – Схема, реализующая двухволновый метод измерения расстояния:
1 – лазер; 3,5 – зеркало; 4 – формирующая оптическая система; 6 – объектив;
7 – дихроичный расщепитель; 2, 8, 9 – фотоприемники; 10,11 – измерители
задержки сигнала; 12 – схема вычитания

Лазер 1 импульсно генерирует электромагнитную энергию оптического диапазона на λ_1 и λ_2 . С помощью зеркал 3,5 и после прохождения формирующей оптической системы 4 излучение направляется на объект

слежения на котором установлен уголкового отражатель. Отраженное лазерное излучение поступает на приемную оптическую систему 6 и дихроичный расщепитель 7 между фотоприемниками 8 и 9. Излучение с λ_1 поступает на фотоприемник 8, а излучение λ_2 – на фотоприемник 9. Измеритель задержки 10 и 11 вычисляют задержку τ_{λ_1} и τ_{λ_2} соответственно для λ_1 и λ_2 . Схема вычитания определяет разность между τ_{λ_1} и τ_{λ_2} , которая пропорциональна величине ΔR_{λ_1} , а значит и величине атмосферной добавки ΔR_{λ_2} . Полученная по процедуре (1)-(7) поправка вводится для расчетов в дальномерный тракт лазерного локатора слежения, что позволяет на один порядок повысить точность измерения и свести относительную погрешность измерений к значению 10^{-6} .

Использование лазерных методов контроля параметров атмосферы, включая двухволновые и двухчастотные, описаны нами в работах [6-12] и экспериментально исследованы на полигоне Чауда, Феодосия, Республика Крым [6, 13-14] на лазерах YAG:Nv³⁺ ИЗ-25 и непрерывных лазерах. Полученные атмосферные данные на лазере LT-5Z использовались при создании мобильного лазерно-телевизионного локатора внешнетраекторных измерений спуска аэроупругих систем «Кафа+» и устанавливались как на земле, так и на воздушном аэростате. Исследовались траектории полета воздушных шаров и спуска грузовых парашютно-десантных систем.

Заключение

Проведена оценка влияния статической и динамической рефракции на точностные параметры ЛЛС. Показано, что высокие требования к ЛЛС приводят к необходимости учета как «замороженного», так и случайного состояния атмосферы на трассе для внесения поправок в измерения для учета влияния рефракции. Наиболее эффективным решением этой проблемы при отсутствии возможности получения оперативной и точной информации о

метеопараметрах является использование двухволнового лазерного зондирования атмосферы и дисперсионного метода учета дифракции. Их использование позволяет наиболее точно (относительная погрешность 10^{-6}) и оперативно вносить коррекцию в измерения дальности.

Литература

1. Molebny V., et al. Laser radar: historical prospective – from the East to the West // Opt. Eng. 2016. V. 56. № 3. P. 031220.
2. Фиговский О.Л. В интервале пяти лет появятся инновации, которые сегодня кажутся фантастикой // Инженерный вестник Дона, 2011, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/643/.
3. Зуев В.В., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере в условиях помех. М.: Сов. радио, 1977. 368с.
4. Ефимов В.О. и др. Оптическая рефракция и модельные методы учета ее влияния на характеристики дальномерного тракта лазерного локатора слежения // Инженерный вестник Дона, 2017, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/2248/.
5. Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. Основы проектирования лазерных локационных систем. М.: Высшая школа, 1983. 207 с.
6. Васильев С.В. и др. Перспективные методы и средства траекторных измерений. Казань: Новое знание, 2005. 128 с.
7. Natanson O.G., et al. Reflectometry in open and fiber mediums: technology transfer // Proc. SPIE. 2005. V. 5854. pp. 205-214.
8. Morozov O.G., et al. Mobile leak detection systems for oil product pipelines // Proc. SPIE. V. 3588. 1999. pp. 90-98.
9. Petuchov V.M., et al. Lidar technologies application to leakage detection in oil product pipelines // Proc. SPIE. V. 3588. pp. 81-89.

10. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. ЛЧМ-лидар с преобразованием частоты // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 12. С. 1871.

11. Ильин Г.И. и др. Блок импульсной накачки лидарных комплексов // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 5. С. 762.

12. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. Исследования ЛЧМ-лидара с преобразованием частоты // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 2. С. 435.

13. Nikolaev A.M., et al. Intellectual parachute and balloon systems based on fiber optic technologies // Proc. SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560B.

14. Nikolaev A.M., et al. Fiber optic sensors for parachute systems monitoring // Proc. SPIE. 2010. V. 7523. P. 752308.

References

1. Molebny V., et al. Laser radar: historical prospective – from the East to the West. Opt. Eng. 2016. V. 56. № 3. P. 031220.

2. Figovskiy O.L. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/643/.

3. Zuev V.V., Kabanov M.V. Perenos opticheskikh signalov v zemnoy atmosfere v usloviyah pomeh [The transfer of optical signals in the earth's atmosphere under interference conditions]. M.: Sov. radio, 1977. 368 p.

4. Efimov V.O., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/2248/.

5. Malashin M.S., Kaminskiy R.P., Borisov Yu.B. Osnovyi proektirovaniya lazernyih lokatsionnyih sistem [Basics of laser location systems designing]. M.: Vysshaya shkola, 1983. 207 p.

6. Vasilev S.V. et al. Perspektivnyie metody i sredstva traektornyih izmereniy [Promising methods and means of trajectory measurements]. Kazan: Novoe znanie, 2005. 128 p.

7. Natanson O.G., et al. Proc. SPIE. 2005. V. 5854. pp. 205-214.



8. Morozov O.G., et al. Proc. SPIE. V. 3588. 1999. pp. 90-98.
9. Petuchov V.M., et al. Proc. SPIE. V. 3588. pp. 81-89.
10. Ilin G.I., Morozov O.G., Polskiy Yu.E. Optika atmosferyi i okeana. 1995. V. 8. № 12. P. 1871.
11. Ilin G.I., et al. Optika atmosferyi i okeana. 1995. V. 8. № 5. P. 762.
12. Ilin G.I., Morozov O.G., Polskiy Yu.E. Optika atmosferyi i okeana. 1997. V. 10. № 2. P. 435.
13. Nikolaev A.M., et al. Proc. SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560B.
14. Nikolaev A.M., et al. Proc. SPIE. 2010. V. 7523. P. 752308.