

Оптическая рефракция и модельные методы учета ее влияния на характеристики 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: Лазерным локаторам слежения присущи определенные недостатки, среди которых сильное влияние атмосферы на их энергетические и точностные параметры, процесс наведения узкого луча на объект и др. Высокие требования к локаторам (погрешность измерения дальности до десятка сантиметров) приводят к необходимости учета состояния атмосферы на трассе для внесения поправок в измерения. В частности, к существенному искажению сигнала приводит явление рефракции. Для снижения ошибки дальномерных измерений целесообразно использование методов компенсации влияния рефракции или ее учета и использования коэффициентов поправки. В статье показано, что эффективным решением этой проблемы при отсутствии возможности получения оперативной и точной информации о метеопараметрах является использование параллельного лазерного зондирования атмосферы.

Ключевые слова: лазерный локатор слежения, дальномерный канал, влияние атмосферы, рефракция, модельный метод компенсации, лазерное зондирование атмосферы.

Введение

Работа лазерного локатора слежения (ЛЛС) при дальностях свыше 15 км сопровождается значительным влиянием атмосферных явлений [1, 2]. Одним из них, существенно снижающим возможности оптической локации, является рассеяние излучения от атмосферы в обратном направлении (помеха обратного рассеяния), которое может привести к превышению над полезным сигналом сигнала обратного рассеяния. Это приведет к уменьшению отношения сигнал/шум и снизит эффективность работы ЛЛС в целом. Атмосферная добавка за счет 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. Если путем борьбы с помехой

обратного рассеяния является стробирование приемника ЛЛС или применение ВАРУ, то влияние рефракции скомпенсировать не просто и можно учесть только расчетным путем. Методы получения данных для такого учета являются предметом анализа данной статьи.

Оптическая рефракция и ее влияние на характеристики дальномерного тракта ЛЛС

Физической причиной искривления оптического пучка (рефракции) в земной атмосфере является неоднородность показателя преломления.

Для полного угла земной рефракции по наклонным трассам (для угла между касательными к лучу в точке наблюдения и в точке объекта) теория дает следующее выражения [4, 5]:

$$Z = \int_{n(0)}^{n(z)} \frac{tg \xi(z)}{n(z)} dn(z), \quad (1)$$

т.е. полный угол земной рефракции однозначно определяется профилем коэффициента преломления в атмосфере (рис. 1).

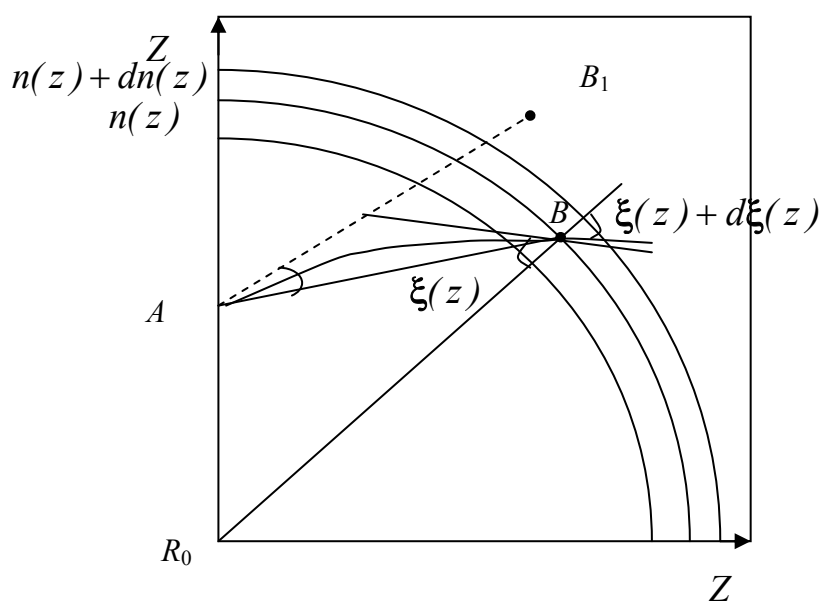


Рис. 1. – Геометрическая схема для расчета углов рефракции

Для оценки ошибки измерения дальности вносимой рефракцией можно использовать следующее выражение [4, 5]:

$$\Delta R_{\text{реф}} = -0,5(n-1)c t_u, \quad (2)$$

где n – показатель преломления атмосферы, t_u – время распространения лазерного импульса до цели и обратно.

Отсюда видно, что точность в конечном счете определяется точностью определения коэффициента преломления на трассе прохождения оптического сигнала. Если принять, что n – реальный показатель преломления на трассе, а n' – определяемый как $n' = n + \Delta n$, где Δn – ошибка определения n , то можно определить, с какой точностью необходимо измерять показатель преломления. Для этого вычтем из ошибки $\Delta R_{\text{реф}}$, которая имеет место за счет реальной рефракции, ошибку $\Delta R'_{\text{реф}}$.

$$\Delta R_0 = R_{\text{max}} \Delta n, \quad (3)$$

где R_{max} – расстояние до цели, ΔR_0 – точность определения ($\Delta R_{\text{реф}} - \Delta R'_{\text{реф}}$).

При работе на дальности сопровождения свыше 15 км и необходимости, чтобы дальномерная ошибка за счет атмосферы была меньше 0,5 м (т.н. меньше 20% от заложенной общей), требуется измерять показатель преломления с точностью $\cong 0,3 \cdot 10^{-4}$.

Модельные методы учета рефракции

Существующие теории рефракции отличаются гипотезами о параметрах атмосферы на разных высотах и соответствующими методами вычисления (1). Зависимость коэффициента преломления от параметров атмосферы в видимом и инфракрасном диапазонах волн показана на рис. 2 и имеет вид [3]:

$$n - 1 = C_\lambda \frac{P}{T} (1 - 0,132) \frac{e_b}{P}, \quad (4)$$

где C_λ – коэффициент, зависящий от длины волны (для участка спектра в области 0,6 мкм $C_\lambda = 1,0485 \cdot 10^{-2}$), P – полное давление (Па), e_b – абсолютная

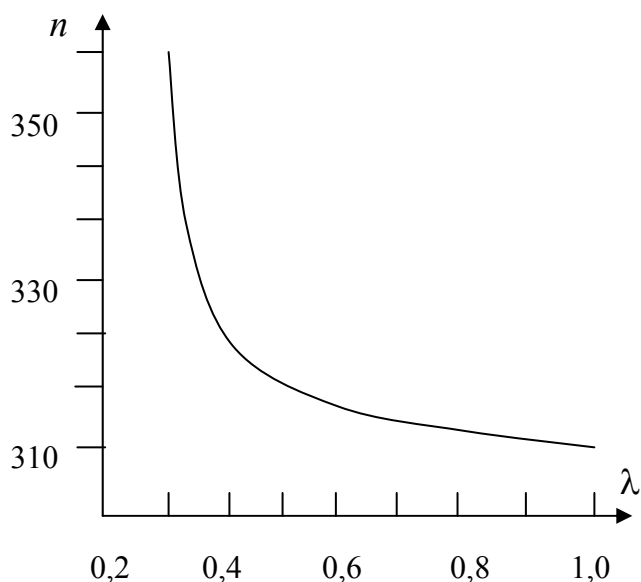


Рис. 2. – Зависимость группового показателя преломления сухого воздуха от длины волны при температуре 15° С и давлении 1013,25 мбар

влажность (Па), T – температура в градусах Кельвина.

Для вычисления угла рефракции характерны два основных пути. Первый путь – получение приближенных формул на основании ряда упрощающих допущений. Второй – численные расчеты интеграла рефракции для отдельных моделей атмосферы.

Как показывают исследования [3, 4], использование приведенных формул приводит к ошибке 1,5 %, если зенитный угол не более 75°.

При больших зенитных углах точность расчетов по приведенным формулам быстро снижается.

Более точные приближенные формулы могут быть получены с учетом конкретных моделей атмосферы (для профиля давления и температуры). Формула для угла земной рефракции Z , полученная при некоторых допущениях, приводится в работе [3]. Оценки показывают, что эта формула обеспечивает точность расчета до 10".

В настоящее время имеются таблицы, составленные на основе численных расчетов земной рефракции с использованием тех или иных моделей атмосферы [1, 3, 4]. Однако, как табличные, так и расчетные по

приближенным формулам (с учетом условий на земной поверхности) данные могут быть использованы для оценки углов рефракции скорее при типичных, чем при конкретных условиях. Многочисленные, хотя и не систематические (по времени и географическим районам), измерения углов рефракции и сравнение результатов этих измерений с расчетными показывают, что наряду с хорошим согласованием в большинстве случаев часто наблюдаются значительные (до нескольких минут) расхождения [3]. Эти расхождения особенно велики для больших зенитных углов, когда они могут достигать несколько десятков угловых минут. Подобные случаи, обычно называемые аномальной рефракцией, безусловно, снижают надежность оценки рефракции для конкретных методических условий.

Поэтому для решения многих практических задач [6] чрезвычайно важно иметь надежную количественную, оперативную информацию об атмосферных параметрах, влияющих на рефракцию и позволяющих вводить соответствующие поправки. В работе [3] предлагается одна из методик, в которой определяется разность углов при стандартных условиях в атмосфере и условиях, соответствующих времени наблюдения на земной поверхности. Слабым местом в предлагаемой методике является использованием аэрологических данных, получение которых требует значительного времени (около часа).

Более перспективным в этом случае представляется использование лазерных методов контроля параметров атмосферы, которые описаны нами в работах [5, 7-12] и экспериментально исследованы на полигоне Чауда, Феодосия, Республика Крым [5, 13-14]. Полученные атмосферные данные 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 атмосферы на точностные параметры ЛЛС. Показано, что высокие требования к ЛЛС приводят к необходимости учета состояния атмосферы на трассе для внесения поправок в измерения. 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.

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. Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. Основы проектирования лазерных локационных систем. М.: Высшая школа, 1983. 207 с.
 5. Васильев С.В. и др. Перспективные методы и средства траекторных измерений. Казань: Новое знание, 2005. 128 с.
 6. Шайкин А.С., Шайкина Е.В. Применение комплекса полунатурного моделирования в процессе проектирования информационно-измерительных и управляющих систем // Инженерный вестник Дона, 2014, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2248/.
-

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 pomех [The transfer of optical signals in the earth's atmosphere under interference conditions]. M.: Sov. radio, 1977. 368 p.
 4. 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.
-



5. Vasilev S.V. et al. Perspektivnyie metodyi i sredstva traektornyih izmereniy [Promising methods and means of trajectory measurements]. Kazan: Novoe znanie, 2005. 128 p.
6. Shaykin A.S., Shaykina E.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2248/.
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.