

Рефракция в стандартной атмосфере и угловое смещение траектории в лазерной аэрокосмической связи и навигации

Е. А. Олехнович, И. П. Прокопович

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: rct.olehnoviEA1@bsu.by, Prokopovich_I@bsu.by

Для произвольных зенитных углов, вплоть до 88° , и больших расстояний выполнены расчеты рефракции лазерного пучка на длине волны 800 нм. Нами найдены углы рефракции для больших зенитных углов, при которых астрономические формулы для рефракции не работают. Рассматриваются задачи нелинейного распространения ультракоротких лазерных импульсов и эффекты рефракции.

Ключевые слова: атмосфера Земли; рефракция в атмосфере; лазерная космическая связь; лазерная космическая навигация; большие зенитные углы; оптика свободного пространства; ультракороткие лазерные импульсы; нелинейное распространение.

Refraction in standard atmosphere and angular trajectory displacement in laser aerospace communication and navigation

E. A. Olehnovich, I. P. Prokopovich

Belarusian State University, Minsk, Belarus,
e-mail: rct.olehnoviEA1@bsu.by, Prokopovich_I@bsu.by

The problem of laser beam refraction at 800 nm in Earth's atmosphere for any up to 88° value of the zenith angle and for long distances have been computed. We found refraction angles for large zenith angles in which the astronomical refraction formulas cannot be used. The problems of nonlinear propagation of ultrashort laser pulses and effects of refraction are discussed.

Keywords: Earth's atmosphere; refraction in atmosphere; laser space communication; laser space navigation; large zenith angles; free-space optics; ultrashort laser pulses; nonlinear propagation.

В настоящее время начат революционный переход с радиосистем аэрокосмической связи и навигации на лазерные системы. Уже в мае 2022 года NASA на околоземную орбиту была выведена лазерная коммуникационная система TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD), созданная в Массачусетском технологическом институте, обеспечившая канал связи с Землей на скорости 100 Гб/с, что в 1000 раз превосходит скорость современной космической радиосвязи (100 Мб/с) [1]. А весной 2023 года на лазерном канале связи TBIRD спутник-Земля была достигнута скорость 200 Гб/с. В то же время «Росатом», институт РФЯЦ-ВНИИЭФ (Российский Федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики), запланировали выпустить опытный образец аппаратуры для космической лазерной связи на скорости 100 Гб/с, и планируют в 2024 году провести эксперимент с космической лазерной связью, где будут участвовать аппарат «Прогресс» и МКС [2].

В большинстве реализованных лазерных систем FSO-технологий (free-space

optics – оптика свободного пространства) используется ближний инфракрасный диапазон (далее ИК-диапазон) (0,7 – 1,64 мкм), что обусловлено рабочей длиной волны наиболее перспективных из используемых на сегодняшний день для этих целей лазеров и особенностями прохождения света в атмосфере [3–4].

Лазерные системы в ИК-диапазоне позволяют беспрецедентно точно определять скорость и координаты космического объекта. Так, например, начатые с 1962 г. (США) и 1963 г. (СССР) [5] опыты по лазерному зондированию Луны обеспечивают к настоящему времени точность измерения расстояния ~ 1 см. Для их использования в системах космической связи и навигации необходимо учитывать влияние рефракции в атмосфере Земли.

Как известно, теория рефракции достаточно сложна. Рефракция зависит не только от азимутального угла распространения лазерного импульса, но и от состояния атмосферы, главным образом от ее плотности, которая сама является функцией, в основном температуры и давления. Важнейшими факторами высокоскоростной лазерной связи в открытом пространстве являются решения проблем пространственного обнаружения, наведения лазерного луча на объект и сопровождения объекта. Длительность сопровождения объекта лазерным лучом определяет полный объем информации, который может быть передан по лазерному каналу связи.

Исследование рефракции нами проводилось на модели, основанной на параметрах стандартной атмосферы [6]. Данный стандарт соответствует международному стандарту ISO 2533. Для расчета давления с изменением высоты использована барометрическая формула. Наша модель также учитывает отклонение параметров от стандартных, в частности, температуру в нижних слоях атмосферы и влияние кривизны Земли. Показатель преломления воздуха в нашей модели рассчитывался по известной полуэмпирической формуле [7]:

$$n = 1 + \left(\frac{77,6 \cdot (1 + 7,52 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^{-2}) \cdot P}{T} \cdot 10^{-6} \right), \quad (1)$$

где λ – длина волны, мкм, P – давление, мБар, T – температура, К.

Полученные нами результаты для азимутальных углов вплоть до 70° хорошо согласуются как с расчетами по известным астрономическим формулам [8, 9], так и полученными численным моделированием [10]. Как известно [9], при азимутальных углах больших 70° астрономические формулы для расчета рефракции дают быстро увеличивающееся расхождение, с увеличением азимутального угла, от экспериментальных данных и от прямых численных моделирований (см., например, [10]). Астрономические формулы для расчета рефракции не учитывают сложное поведение температуры и плотности атмосферы при увеличении азимутального угла и расстояния, а также кривизны слоев атмосферы и изменения угла светового луча по отношению к ним.

На рис. 1 показаны результаты моделирования и расчета как без учета влияния кривизны слоев атмосферы, так и с учетом кривизны. Не трудно заметить, что при азимутальном угле 87,6° угол рефракции при учете кривизны слоев атмосферы отличается от угла рефракции без учета кривизны слоев атмосферы на ~ 24", а при увеличении азимутального угла до 88° это различие возрастает до ~ 54".

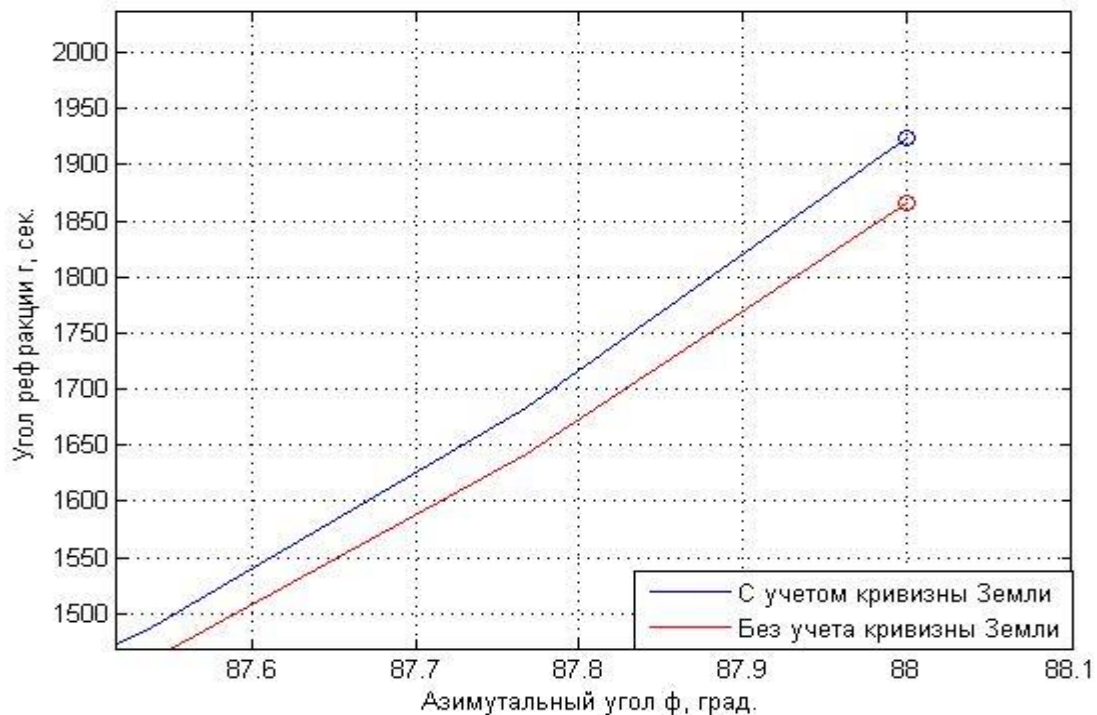


Рис. 1. Зависимость угла рефракции лазерного излучения на длине волны 800 нм, прошедшего через стандартную атмосферу, от азимутального угла, изменяющегося в диапазоне $7,5^{\circ}$ – 88°

Расчеты линейного отклонения лазерного луча на длине волны 800 нм проведены для космических аппаратов (КА), находящихся на орбитах высотой в 500 км, и при азимутальных углах 80 и 86 градусов расстояние от лазера до КА будет составлять 1694 км и 2172 км соответственно, рефракция 325" и 843", а линейное отклонение лазерного луча 2753 м и 9168 м соответственно.

К настоящему времени выполнен ряд экспериментальных работ по нелинейному распространению ультракоротких импульсов (УКИ) в атмосфере в сильном нелинейном режиме [11–13], а также ряд компьютерных моделирований этих режимов (см., например, [14]). В этих сильных нелинейных режимах самофокусировка компенсирует дифракцию, происходит формирование филаментов, а вынужденное комбинационное саморассеяние фемтосекундных УКИ [15, 16] приводит к генерации спектрального суперконтинуума [16, 17]. Спектр при этом расширяется у фемтосекундных УКИ с первоначальной длиной волны 800 нм до 0.5 – 4.5 мкм [12]. Получено прохождение такими фемтосекундными “белыми” УКИ в нелинейном режиме сквозь всю тропосферу и часть стратосферы Земли [13]. Следует отметить, что рефракция, в конечном итоге, для “белых” УКИ играет весьма существенную роль, с другой стороны эти фемтосекундные УКИ открывают новые возможности в увеличении скорости передачи информации на большие расстояния, в навигации (измерения с высокой точностью координат, скоростей и направлений движения [17]) аэрокосмических объектов.

Реализованная модель проверена на известных астрономических формулах и экспериментальных данных, и хорошо согласуется с ними, а для больших азимутальных углов, где астрономические формулы не работают, позволяет делать

расчеты рефракции для стандартной атмосферы с учетом кривизны слоев атмосферы и больших азимутальных углов.

Библиографические ссылки

1. *Kendall Murphy*. The future of NASA's laser communications [Electronic resource] // Space Daily. 2022. URL: https://www.spacedaily.com/reports/The_future_of_NASAs_laser_communications_999.html (date of access:14.04.2023).
2. Росатом запланировал эксперимент с космической лазерной связью на 2024 год // Новости в России и в мире [Электронный ресурс]. 2021. Режим доступа: <https://tass.ru/kosmos/12199535>. – Дата доступа: 10.04.2023.
3. *Казанцев С. Г.* Вопросы электромеханики // Труды ВНИИЭМ. 2018. Т. 163. № 2. С. 29–47.
4. Официальный сайт АО «НПК «СПП». [Интернет-ресурс]: URL: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-svyaz>.
5. *Басов Н. Г.* О квантовой электронике: статьи и выступления. – М.: Наука. Глав. ред. физ.мат. лит., 1987. 400 с.
6. *Глаголев Ю. А.* Справочник по физическим параметрам атмосферы. – Л.: Гидрометеорологическое Изд., 1970. 212 с.
7. Распространение лазерного пучка в атмосфере. / Под ред. Д. Стробена.- М.: Мир. 1981.
8. *Аллен К. У.* Астрофизические величины: [справочник] / перевод с англ. Х. Ф. Халиуллина; под ред. Д. Я. Мартынова. – Перераб. и доп. изд. – Москва : Мир, 1977. 446 с.
9. *Кононович Э. В., Мороз В. И.* Общий курс астрономии: Учебное пособие / Под ред. В. В. Иванова. Изд. 2-е, испр. М. : Едиториал УРСС, 2004. 544 с.
10. *Auer L. H., Standish E. M.* Astronomical Refraction: Computational Method for All Zenith Angles // The Astronomical Journal. 2000. Vol. 119. P. 2472.
11. Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air / E. T. J. Nibbering [et al.] // Opt. Lett. 1996. Vol. 21. P. 62.
12. Infrared extension of the super continuum generated by femtosecond terawatt laser pulses propagating in the atmosphere / J. Kasparian [et al.] // Opt. Lett. 2000. Vol. 25. P. 1397–1399.
13. 32 TW atmospheric white-light laser / P. B  jot [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90, 151106.
14. *Кандидов В. П.* Нелинейно-оптическая трансформация мощного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе / В. П. Кандидов, О. Г. Косарева, А. А. Колтун // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. С.69–75.
15. *Беленов Э. М.* Динамика мощного фемтосекундного импульса в комбинационно-активной среде / Э. М. Беленов, А. В. Назаркин, И. П. Прокопович // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. С 223–227.
16. *Беленов Э. М., Прокопович И. П.* Двухквантовые процессы комбинационного типа в сверхшироком спектре мощных УКИ света // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 6. С. 577–580.
17. The Supercontinuum Laser Source. / Ed. R. R. Alfano NY. Springer, 2006.