

# ВЛИЯНИЕ РЕФРАКЦИИ В СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЕ В ЛАЗЕРНОЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

Е. А. Олехнович

*rct.olehnoviEA@bsu.by;*

*Научный руководитель — И. П. Прокопович, кандидат физико-математических наук, доцент*

На основе данных стандартной атмосферы, барометрической формулы давления, полуэмпирической функциональной зависимости показателя преломления воздуха от температуры, давления, длины волны лазерного излучения построена и отестирована модель расчета рефракции для различных значений параметров, таких как высота, видимое зенитное расстояние, температура на уровне моря, а также длина волны лазерного излучения.

**Ключевые слова:** лазерные системы; явление рефракции; модель расчета рефракции; показатель преломления; ближний инфракрасный диапазон.

В настоящее время начинается 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 (Терабайтная передача инфракрасного излучения, 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]. 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 или систем FSO-технологии (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 момент источников излучения (ИК-светодиодов и лазеров) и особенностями прохождения света в атмосфере [3–4].

Лазерные системы в ИК-диапазоне позволяют беспрецедентно точно определять скорость и координаты космического объекта. Для их

использования в навигации для более точного наведения на объект необходимо учитывать влияние рефракции.

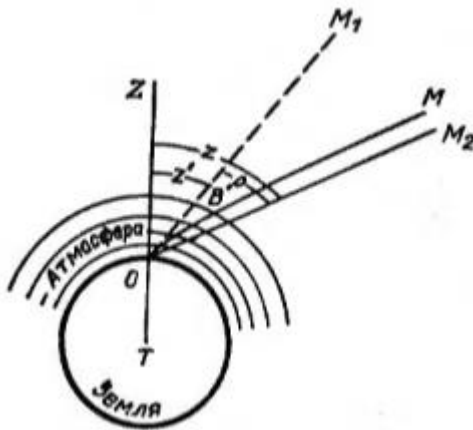


Рис. 1. Атмосферная рефракция [5]

Дело в том, что лучи света от небесного тела, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, проходят сквозь атмосферу Земли и преломляются в ней, а так как плотность атмосферы увеличивается к поверхности Земли, то луч света (рис. 1) все более и более отклоняется в одну и ту же сторону по кривой линии, так что направление  $OM_1$ , по которому наблюдатель  $O$  видит светило, оказывается отклоненным в сторону зенита и не совпадающим с

направлением  $OM_2$ , по которому он видел бы светило при отсутствии атмосферы.

Явление преломления световых лучей при прохождении ими земной атмосферы называется астрономической рефракцией.

Угол  $M_1OM_2$  называется углом рефракции или рефракцией  $\rho$ . Угол  $ZOM_1$  называется видимым зенитным расстоянием светила  $z'$ , а угол  $ZOM_2$  – истинным зенитным расстоянием  $z$ .

Теория рефракции довольно сложна. Рефракция зависит не только от высоты светила над горизонтом, но и от состояния атмосферы, главным образом от ее плотности, которая сама является функцией, в основном температуры и давления. При давлении  $B$  мм.рт. ст. и температуре  $t$  °C приближенное значение рефракции вычисляется по следующей формуле [5]:

$$\rho = 60,25'' B/760 \cdot 273^\circ / (273^\circ + t^\circ) \cdot \operatorname{tg} z' \quad (1)$$

По формуле рефракция вычисляется в тех случаях, когда видимое зенитное расстояние  $z' < 70^\circ$ . При  $z' > 70^\circ$  формула дает ошибку больше  $1''$ , увеличивающуюся при дальнейшем приближении к горизонту до бесконечности. Поэтому для зенитных расстояний  $z' > 70^\circ$  рефракция определяется путем сочетания теории со специальными наблюдениями [5].

Исследование рефракции 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. Модель также учитывает

отклонение параметров от стандартных, в частности, температуру в нижних слоях атмосферы и влияние кривизны Земли.

Для учета рефракции рассчитывается показатель преломления воздуха по известной полуэмпирической формуле

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

где  $\lambda$  – длина волны, мкм,  $P$  – давление, мБар,  $T$  – температура, К [7–11].

В таблице ниже и на рис. 2 приведены результаты сравнения рассчитанного угла рефракции в зависимости от начального зенитного расстояния с данными, приведенными в [12]. Как видно, на малых углах наблюдается хорошее согласие с приведенными данными, но в углах, больших 80 наблюдаются расхождения. Эти расхождения можно объяснить тем, что используемая полуэмпирическая формула (2) выведена в линейном приближении, а для точности расчета угла рефракции необходимо учитывать нелинейные эффекты.

**Угол рефракции в зависимости от зенитного расстояния**

| Зенитное<br>расстояние $\varphi$ , ° | Угол рефракции по данным<br>[12] $r$ , " | Угол рефракции,<br>рассчитанный по модели, $r$ , " |
|--------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 30                                   | 34                                       | 33,1754                                            |
| 60                                   | 101                                      | 99,5687                                            |
| 80                                   | 319                                      | 327,5595                                           |
| 85                                   | 593                                      | 671,1212                                           |
| 86                                   | 706                                      | 850,5917                                           |
| 87                                   | 865                                      | 1169,3751                                          |
| 88                                   | 1103                                     | 1953,8382                                          |



Рис. 2. Графики зависимости угла рефракции (в секундах) от зенитного угла

Значение учета рефракции в лазерной связи и навигации проиллюстрируем на конкретном примере. Расчеты линейного отклонения лазерного луча на длине волны 800 нм проведены для космических аппаратов (далее 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.

Таким образом, реализованная модель проверена на известных формулах, хорошо согласующихся на углах, где работает формула и экспериментальных данных, где астрономическая формула не работает, и позволяет делать расчет рефракции как для стандартной атмосферы, так и при отклонении параметров температуры от стандартной.

### Библиографические ссылки

1. *Kendall Murphy*. The future of NASA's laser communications [Электронный ресурс]// Space Dialy [сайт]. 2022. URL: [https://www.spacedaily.com/reports/The\\_future\\_of\\_NASAs\\_laser\\_communications\\_999.html](https://www.spacedaily.com/reports/The_future_of_NASAs_laser_communications_999.html) (дата обращения: 14.04.2023).
2. Росатом запланировал эксперимент с космической лазерной связью на 2024 год [Электронный ресурс]// Новости в России и в мире [сайт]. 2021. URL: <https://tass.ru/kosmos/12199535> (дата обращения: 10.04.2023).
3. Казанцев С.Г. Вопросы электромеханики // Труды ВНИИЭМ. 2018. Т. 163, № 2. С. 29–47.
4. Официальный сайт АО «НПК «СПП» [Электронный ресурс]. 2023. URL: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-svyaz.html> (дата обращения: 18.05.2023).
5. 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.
6. Глаголев Ю. А. Справочник по физическим параметрам атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 212 с.
7. Распространение лазерного пучка в атмосфере/ под ред. Д. Стробена. М.: Мир, 1981. 413 с.
8. Edlen B. The Refractive Index of Air // Metrologia. 1966. Vol. 2. P. 71–80.
9. Garfinkel B. Astronomical Refraction in politropic atmosphere // The Astronomical Journal. 1967. Vol. 72, № 2. P. 235–254.
10. Thomas M. E. and Joseph R. I. Astronomical Refraction // Johns Hopkins APL Technical Digest. 1996. Vol. 17, № 3. P. 279.
11. Auer L. H., Standish E. M. Astronomical Refraction: Computational Method For All Zenith Angles// The Astronomical Journal. 2000. Vol. 119. P. 2472–2474.
12. Аллен, К.У. Астрофизические величины: [справочник] / перевод с англ. Х. Ф. Халиуллина; под ред. Д. Я. Мартынова. Перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1977. 446 с.