

РЕФРАКЦИЯ В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТ И АЗИМУТАЛЬНЫХ УГЛОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

На основе данных стандартной атмосферы, барометрической формулы и полуэмпирической функциональной зависимости показателя преломления воздуха от температуры, давления и длины волны лазерного излучения построена модель рефракции для различных высот, вплоть до космических, и различных зенитных расстояний. По данной модели в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне лазерного излучения проведены численные расчеты, показывающие хорошее согласие с результатами расчета по формуле астрономической рефракции, в той области зенитных расстояний, где формула астрономической рефракции еще хорошо согласуется с астрономическими наблюдениями и измерениями. А также приведены результаты расчетов, по построенной модели, показывающие хорошее согласие с известными астрономическими данными по рефракции в области больших зенитных расстояний, где расчеты по формуле астрономической рефракции сильно расходятся с астрономическими данными.

В настоящее время начинается революционный переход на лазерные системы атмосферной и космической связи и навигации. В мае 2022 года NASA на околоземную орбиту была выведена лазерная коммуникационная система TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD), созданная в Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology, MIT), обеспечившая канал связи с Землей на скорости 100 Гб/с. Это в 1000 раз превосходит скорость современной космической радиосвязи (100 Мб/с). В близкой перспективе выход TBIRD на скорости в 200 Гб/с и выше [1]. «Росатом», институт РФИЦ-ВНИИЭФ, 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].

Системы поиска, наведения и сопровождения являются одними из ключевых в лазерных системах связи и навигации [3,4]. А рефракция, ее точный расчет, и последующая корректировка направления лазерного луча являются основными задачами в решении проблем поиска, наведения и сопровождения объекта лазерной связи, устойчивости установленного канала связи и навигации, определении его точных координат и скоростей

Теория рефракции, как известно, весьма сложна и полученные астрономические формулы расчета рефракции получены с большими упрощениями и приближениями и резко теряют свою точность и адекватность реальности при сравнительно больших видимых зенитных расстояниях z_1 , углах отклонения лазерного луча от зенита. Так уже при z_1 около 70 градусов и более астрономические формулы рефракции дают погрешность более 1". А в 1" погрешность дает линейное боковое смещение лазерного луча или неопределенность для низкоорбитальных систем (500 км) на более чем 2.4 м, для геостационарных орбит (36000 км) дает боковое отклонение лазерного луча и неопределенность более 174 м.

Нами исследовалась модель рефракции на основе данных стандартной атмосферы, согласно действующему стандарту ГОСТ 4401-81[5]. Данный стандарт соответствует международному стандарту ISO 2533. Для расчета давления с изменением высоты была использована барометрическая формула. Полуэмпирическая формула функциональной зависимости показателя преломления воздуха от температуры, давления и длины волны лазерного излучения [6] использована в нашей модели. Эта формула для показателя преломления воздуха хорошо согласуется с формулами, полученными другими авторами [7,8]. Наша модель также учитывает влияние кривизны Земли. Выполнены расчеты по этой модели рефракции для различных высот, вплоть до космических, и различных зенитных расстояний. Модель хорошо работает для всех зенитных расстояний. Кроме того, в отличие от астрономических формул, она позволяет выполнять расчеты рефракции не только интегрированно для всей атмосферы Земли, но и дифференцированно в различных слоях

атмосферы, например, тропосферы, что обеспечивает расчет и учет рефракции атмосферы в лазерной связи и навигации авиасистем.

В ближнем ИК диапазоне на длине волны 800 нм лазерного излучения проведены численные расчеты, показывающие хорошее согласие с результатами расчета по формуле астрономической рефракции, в той области зенитных расстояний, где формула астрономической рефракции еще хорошо согласуется с астрономическими наблюдениями и измерениями. Приведены результаты расчетов, по построенной модели и по астрономическим формулам, построены графики для различных зенитных расстояний и высот атмосферы, показывающие хорошее согласие с известными астрономическими данными по рефракции в области больших зенитных расстояний, где расчеты по формулам астрономической рефракции сильно расходятся с астрономическими данными.

Список литературы

1. <https://www.spacedaily.com/reports>
2. <https://naked-science.ru/article>
3. Лазерная связь. /А. Г. Шереметьев, Р. Г. Толпаров - М.: «Связь», 1973 - 384 с.
4. Оптическая связь. / Р. М. Гальярди, Ш. Карп - М.: Связь, 1978 - 424 с.
5. Справочник по физическим параметрам атмосферы. / Ю.А.Глаголев -Л.: Гидрометеорологическое Изд., 1970 — 212 с.; <http://esc.gsfc.nasa.gov/267/LCRD.html>
6. Распространение лазерного пучка в атмосфере/ Под ред. Д. Стробена — М.: «Мир», 1981 — 416 с.
7. The Refractive Index of Air. / B. Edlen. Metrologia, -1966 - 2, 71 — 80.
8. Astronomical Refraction: Computational Method for All Zenith Angiel/ L. H. Auer, E.M. – The Astronomical Journal - 2000 – **119**, 2472.
9. Astronomical Refraction in politropic atmosphere. / B. Garfinkel. The Astronomical Journal – 1967 – **72**, № 2, 235.
10. Astronomical Refraction. / M.E. Thomas and R.I. Joseph. Johns Hopkins APL Technical Digest – 1996 – **17**, № 3, 279.