

## ЭФФЕКТ ЗАПАЗДЫВАНИЯ И ПРОБЛЕМА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ ТУРБУЛЕНТНУЮ АТМОСФЕРУ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ОБЪЕКТЫ

*Ф. Ф. Барышников*

Проблема передачи энергии на большие расстояния становится актуальной в связи с перспективой создания мощных перестраиваемых лазеров на свободных электронах, генерирующих излучение высокого оптического качества с частотой, лежащей как в окне прозрачности атмосферы, так и в области максимальной эффективности полупроводниковых преобразователей [1].

Ряд вопросов, имеющих отношение к проблеме, был рассмотрен на международном специализированном совещании в Новосибирске [2]. Передача энергии на спутник не только продлевает период его работоспособности, но и позволяет изменять и корректировать его орбиту.

Для устранения влияния атмосферной турбулентности в [1] предлагается использовать адаптивное зеркало большого диаметра ( $\sim 10 - 15$  м). При этом режим работы системы — ответ с Земли после запроса со спутника. Большие размеры приемного и передающего зеркал, а также возможность компенсации фазовых искажений, обусловленных атмосферной турбулентностью, позволяют вернуть сфокусированный луч в точку запроса.

Цель настоящего сообщения продемонстрировать наличие эффекта, который может затруднить передачу лазерной энергии на спутник.

Для наглядности расположим принимающий космический объект (спутник) и передающую станцию (лазер) в экваториальной плоскости. Будем считать, что в момент приема сигнала спутник и лазер находятся на одной вертикали. Высота орбиты спутника  $H$ , скорость движения спутника  $V_H = V_0 \cdot (1 + H/R_0)^{-1/2}$ , где  $V_0 = 7.8$  км/с — первая космическая скорость,  $R_0$  — радиус Земли.

После запроса со спутника сигнал с обращенным волновым фронтом возвращается в точку запроса через время  $t \approx 2H/C$ , где  $C$  — скорость света. Как нетрудно показать, за это время спутник из первоначального положения переместится на расстояние  $L = (V_H - V) \cdot t$ , где  $V$  — скорость поверхности Земли, обусловленная суточным вращением.

Таким образом, уход спутника из точки предполагаемого приема сигнала составит

$$L \simeq \left( \frac{v_0}{\sqrt{1 + H/R}} - V \right) \cdot \frac{2H}{c}. \quad (1)$$

Соотношение (1) может быть строго получено из рассмотрения угловой аберрации лучей, испускаемых и принимаемых движущимися объектами [3, с. 28]. Так, геостационарный спутник, находящийся точно в зените, из-за угловой аберрации кажется смещенным против вращения Земли на угол  $(v_H - V)/c$ . С другой стороны, чтобы излучение с Земли попало в приемное зеркало спутника, необходимо направить излучатель под тем же углом, но уже по направлению вращения, откуда и следует соотношение (1).

Оценим величину для разных высот. Полагая  $R_0 = 6.4 \times 10^6$  м,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с,  $v_0 = 7.8 \cdot 10^3$  м/с,  $V \simeq 450$  м/с, получим для низких орбит ( $H \ll R_0$ ):

$$L \simeq 5 \cdot 10^{-5} \cdot H. \quad (2)$$

Для  $H = 1000$  км имеем  $L = 50$  м. Ясно, что подобное смещение луча делает невозможной передачу энергии на небольшие космические объекты. Что касается больших космических станций с характерными размерами, превышающими 50 м, то для них возможно разнесение по ходу движения запрашивающего лазера и принимающего зеркала, что и решает проблему.

Ситуация усложняется с увеличением высоты. Так, для геостационарных спутников из (1) получаем  $L \simeq 700$  м. В настоящее время, по-видимому, технологически трудно создать жесткую конструкцию для разнесения маяка и приемного зеркала на столь большое расстояние.

В работе [1] предлагается в качестве одного из вариантов при облучении спутников со значительным угловым отклонением от вертикали для уменьшения пути луча в турбулентной атмосфере использовать промежуточное звено — дирижабль, прототип которого уже создан. Вероятно, этот дирижабль может быть использован и в рассматриваемом случае. Действительно, оптическая система дирижабля, принимая исправленный сигнал от адаптивного зеркала, может перенацелить его в бестурбулентной атмосфере уже с учетом реального положения спутника в момент приема сигнала.

Еще один возможный способ преодоления описанных трудностей не столь очевиден и требует тщательного анализа. Речь идет о добавлении к фазе отраженного сигнала

линейного сдвига, что эквивалентно повороту луча как целого. Характерные углы поворота, как это следует из (1), составляют величину  $(2 \div 5) \cdot 10^{-5}$  рад. Если считать, что высота турбулентно активной атмосферы составляет 10 км, то смещение луча в атмосфере относительно первоначального положения на максимальной высоте составит величину  $\sim 20 - 50$  см. Поскольку радиус когерентности плоской волны при распространении в атмосфере в зависимости от погодных условий и длины трассы составляет величину от 5 до 50 см [4], то возможна ситуация, когда качество обращения волнового фронта окажется недостаточным для успешной передачи энергии на удаленные объекты.

Таким образом, главный вывод работы состоит в том, что возможно принципиальное решение описанной проблемы либо с использованием промежуточного звена — дирижабля, либо при пространственном разделении лазера — маяка и приемного зеркала. Еще один возможный вариант, связанный с поворотом луча, требует дополнительного рассмотрения с учетом реальной статистики атмосферной турбулентности.

Автор благодарен доктору Х.Е.Беннетту за возможность ознакомиться с его статьей до опубликования и за полезные дискуссии.

#### Список литературы

- [1] *Bennett H.E., Rather J.D.G., Montgomery E.E.* // 15-th International Free Electron Laser Conference. Hague. August 23-27. 1994. Final announcement.
- [2] *Bennett H.E., Rather J.D.G., Montgomery E.E.* // Матер. Российско-Американского Совещания по проблеме передачи лазерной энергии на удаленные объекты. 4-6 июля 1993. Новосибирск: ИЯФ СО РАН.
- [3] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. Москва: Наука, 1967. 460 с.
- [4] *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.

Поступило в Редакцию  
24 октября 1993 г.

---