Тенденции развития аэрокосмических энергетических систем с лазерными каналами передачи энергии Часть 2

Александр Сигов, Владимир Матюхин (Москва), Владимир Лукин (Томск)

В первой части статьи (см. № 1/2015) были рассмотрены принципы построения лазерных систем для передачи энергии на удалённые объекты через турбулентную атмосферу с помощью зеркаларетранслятора. Процесс передачи энергии оптимизирует адаптивная оптическая система, корректирующая фазовые искажения пучка, вызванные влиянием атмосферной турбулентности. Во второй части речь пойдёт о структуре и оценке эффективности такой системы. Лабораторные исследования лазерных систем передачи энергии подтвердили принципиальную возможность коррекции турбулентных искажений атмосферы при наведении и высокоточной стабилизации лазерных пучков.

Компенсация фазовых искажений лазерного пучка при прохождении через атмосферу

Как было показано в первой части статьи, решить проблему доставки энергии на стратегически важные наземные, воздушные и космические объекты можно с помощью лазерных систем передачи энергии (ЛСПЭ) путём беспроводной трансконтинентальной транспортировки мощных информационно-энергетических потоков по стратосферным и космическим магистралям над территорией страны.

Возможности ЛСПЭ в значительной мере определяются видом базирования. По поверхности Земли, при использовании нескольких систем ретрансляции стратосферного или космического базирования, лазерное излучение может передаваться на десятки и тысячи километров (см. рис. 1). При передаче энергии лазерного излучения на высотные дирижабельные платформы (высота 20-25 км) для повышения качества пучка (уменьшения расходимости, случайного блуждания и тому подобного) необходимо принимать меры по компенсации фазовых искажений лазер-



Рис. 1. Схема стратосферной лазерной энергетической магистрали

ного пучка с использованием технологии силовой адаптивной оптики (САО). Одной из мер является применение в САО деформируемых зеркал, но такая система коррекции мощного лазерного излучения требует решения ряда дополнительных научно-технологических задач чрезвычайной сложности: повышение качества и лучевой стойкости оптических элементов, их охлаждение и другие задачи.

Во всех применениях адаптивных систем ЛСПЭ важнейшим является то обстоятельство, что лазерное излучение должно быть сформировано в пучок, расходимость которого составляет не более 10⁻⁶ рад. Эта задача также является чрезвычайно сложной, и при её практическом решении обязательным условием является использование тех или иных средств коррекции искажений волнового фронта излучения в оптическом тракте лазера и на трассах распространения излучения. В свою очередь, выбор средств коррекции искажений определяет и архитектуру системы передачи энергии в целом. Основными ограничивающими факторами предлагаемой концепции являются тропосферный слой атмосферы Земли, потери энергии на стратосферных магистралях и на оптических элементах ретранслятора лазерного излучения. Ниже рассмотрены требования, предъявляемые к адаптивным системам ЛСПЭ для восходящих (от поверхности Земли до высотной платформы), нисходящих (от высотной платформы до наземного потребителя) и наклонных (до воздушного или космического потребителя) энергетических магистралей. Для преодоления негативного влияния тропосферного слоя атмосферы Земли можно реализовать многоярусную систему передачи энергии. На первый ярус (высота 6-12 км) с поверхности Земли (или на Землю) энергия передаётся по оптическим волоконным каналам или с помощью СВЧ-излучения, а на верхний (20–30 км) – с использованием лазерного излучения. Ключевыми элементами лазерных энергетических магистралей являются адаптивные ретрансляторы (см. рис. 2).

Пассивные адаптивные ретрансляторы должны обеспечивать высокоточное наведение лазерных пучков и коррекцию искажений лазерного излучения в них. Активные ретрансляторы, кроме выполнения перечисленных операций, должны восстанавливать потери энергии в лазерных пучках, например, путём пропускания излучения через активные среды с накачкой солнечным излучением.

С использованием нескольких моделей турбулентной атмосферы были выполнены расчёты радиуса когерентности для атмосферных трасс систем передачи (СП) до Земли и оценены частоты Гринвуда – минимальные частоты работы адаптивной системы, при которых ещё имеет место коррекция атмосферных искажений.

Оценки показывают, что при размещении СП на высоте 20 км и перемещении её со скоростью менее 0,5 м/с полоса частот адаптивной системы должна быть в диапазоне 10-60 Гц. Применение адаптивной коррекции позволяет увеличить размер радиуса когерентности примерно в 10-25 раз. Если использовать, например, 5-8 опорных источников, можно увеличить размер зеркал ещё в 2-5 раз (до 15-30 м). В принципе, увеличение размера будет ограничено только размерами самой СП и возможностями её стабилизации. Расчёты показали, что традиционная коррекция с использованием одиночного опорного источника существенно увеличивает эффективность адаптивной коррекции лазерных пучков. Однако для создания когерентной апертуры в несколько сотен метров необходимо провести дополнительные иссле-



Рис. 2. Схемы адаптивных систем: а – пассивной ретрансляции лазерных пучков; б – активной ретрансляции лазерных пучков

дования по эффективности применения одновременно нескольких опорных источников.

Эффективность оптико-электронных систем в атмосфере

Для оценки эффективности оптикоэлектронных фазовых систем, таких как астрономические телескопы, лазерные системы передачи данных и тому подобных, необходимо иметь полную информацию о структуре турбулентности в вертикальном разрезе атмосферы. Пока апертура телескопа мала ($2R < L_0^{ эф\phi}$), по сравнению с эффективным внешним масштабом турбулентности, для определения качества формируемого изображения было достаточно сведений о вертикальном профиле C_n^2 структурного параметра атмосферной турбулентности.

Известно, что качество оптико-электронных систем (в том числе и астрономических приборов) характеризуется следующими параметрами:

- интегральным угловым разрешением системы φ_{min};
- параметром Штреля (Strehl) системы St;
- дисперсией дрожания изображения σ_{α}^{2} .

В вакууме $\phi_{\min} \approx \lambda/D$, где D = 2R – диаметр апертуры телескопа. Для турбулентной среды $\phi_{\min} \approx \lambda/r_0$, где r_0 – радиус когерентности для плоской волны. Этот радиус определяется структурой оптической трассы и задаётся математическими соотношениями, которые в данной статье не приводятся, но из которых можно вычислить радиус когерентности r_0 по моделям атмосферы. Он определяет интегральное разрешение оптической системы для данного места его стояния следующим образом: $\phi_{min} = 1,22\lambda/r_0$.

Параметр Штреля с достаточно высокой точностью можно рассчитать по формуле St $\approx \exp(-\sigma_s^2)$, где σ_s^2 – дисперсия фазовых флуктуаций, для расчёта которой уже требуется знание внешнего масштаба турбулентности.

Приведём результаты расчёта основных характеристик, определяющих флуктуации параметров оптических волн для типично оптико-электронной системы, работающей на восходящих (снизу–вверх) и нисходящих (сверху–вниз) атмосферных трассах. Далее приведены результаты расчётов (см. табл. 1), выполненных для разных величин радиуса когерентности:

- r_{0,1} для восходящих трасс на отрезке трассы с уровня земли до высоты 10 км;
- r_{0,2} для нисходящих трасс на отрезке трассы с высоты 10 км на уровень Земли;
- r_{0,3} для восходящих трасс на отрезке трассы с высоты 10 км до высоты

Таблица 1. Флуктуация параметров оптических волн для оптико-электронной системы

Модель вертикального профиля турбулентности	r _{о,1} , м	r _{0,2} , м	r _{о,3} , м	r _{0,4} , м	Используемая волна
Модифицированная модель HV для обсерватории AMOS о. Мауи, Гавайские о-ва	0,2013 / 0,2143	-/1,2625	0,9929 / 1,1402	0,1932 / 0,3108	
Модель Гринвуда	0,1412 / 0,1588	-/0,6698	1,1074 / 1,2864	0,1385 / 0,1408	Плоская / сферическая волна, длина волны 0,53 мкм
Модифицированная модель HV Boundary для обсерватории Мауна Кея, Гавайские о-ва	0,1515 / 0,1715	-/0,7142	0,6867 / 0,7885	0,1446 / 0,0217	
Модифицированная модель HV для обсерватории AMOS о. Мауи, Гавайские о-ва	0,4624 / 0,4922	-/2,9004	2,2810 / 2,6195	0,4441 / 0,7139	
Модель Гринвуда	0,3243 / 0,3648	-/1,5388	2,5442 / 2,9554	0,3182 / 0,3236	Плоская / сферическая волна, длина волны 1,06 мкм
Модифицированная модель HV Boundary для обсерватории Мауна Кея, Гавайские о-ва	0,3481 / 0,3933	-/1,6407	1,5777 / 1,8116	0,3323 / 0,0497	

100 км (практически, до бесконечности, что соответствует работе с приподнятой платформы по внеатмосферному объекту);

 r_{0,4} для восходящих трасс от уровня моря до бесконечности, то есть по внеатмосферному объекту.

Расчёты выполнены для двух длин волн (0,53 и 1,06 мкм) плоской и сферической волны, что даёт возможность сопоставить два предельных режима – узких и широких пучков. В расчётах использовалось несколько моделей, чаще всего применяемых для наблюдения внеатмосферных объектов на станции AMOS (гавайский остров Мауи и обсерватория Мауна-Кея), а также модель Гринвуда, созданная для условий равнинной местности.

Для учёта зенитного угла наклона трассы введён угол θ . Оценки показывают, что для зенитных углов трассы до 75° можно пользоваться приближением «плоской Земли» и рассчитывать зависимость уровня флуктуаций от зенитного угла трассы, как зависимость вида: $\mathbf{r}_{0,1}(\theta) = \mathbf{r}_{0,1}(0)\cos^{3/5}\theta$.

Это позволяет данные таблицы 1, вычисленные для условий распространения в зенит, пересчитать в параметры для трассы с зенитным углом θ. Соответствующее увеличение геометрической длины трассы численно равно соs⁻¹θ. В данном случае высота размещения оптической системы на платформе равна 10 км. Расчёты можно провести для любой другой высоты, но они не изменят следующие качественные выводы:

- основной вклад во флуктуации несёт самый нижний 10-километровый слой атмосферы;
- величины r_{0,1} и r_{0,4} практически сопоставимы;
- величина r_{0,2} практически в 5 раз больше величины r_{0,1};
- переход от коротких к более длинным волнам увеличивает радиус когерентности, что уменьшает уровень влияния атмосферной турбулентности на параметры оптического излучения (увеличение радиуса когерентности с увеличение длины волны связано соотношением $r_0(\lambda_1)/r_0(\lambda_2) =$ = $(\lambda_1/\lambda_2)^{6/5}$ для любых трасс);

 восходящие трассы, идущие до высот 10 км, обуславливают примерно в 4–5 раз большие флуктуации для расходящихся волн, по сравнению с нисходящими трассами.

Сопоставим уровень флуктуаций при применении фазовой адаптивной коррекции со случаем, когда фазовая адаптивная коррекция отсутствует. Для этого производится расчёт распределения средней интенсивности в фокальной плоскости установленного на платформе приёмного телескопа в отсутствие коррекции. Далее, используя полученные результаты, можно рассчитать значение параметра Штреля, представляющего собой отношение значения средней интенсивности на оси системы в случайно-неоднородной среде к значению интенсивности в вакууме.

Отметим, что параметр Штреля является одним из ключевых показателей для определения эффективности применения оптико-электронной системы в случайно-неоднородной среде. Этот параметр определяет «проникающую силу» оптико-электронной системы. В астрономии, например, параметр Штреля определяет минимальную светимость звезды, которую в состоянии обнаружить телескоп. Значение параметра Штреля системы при наблюдении через турбулентную среду зависит от величины радиуса когерентности плоской волны. При этом радиус когерентности рассчитывается по толще случайно-неоднородной среды, в которой распространяется излучение.

Рассмотрим результаты применения адаптивной коррекции с использованием лазерной опорной звезды (ЛОЗ) в виде сфокусированного пучка. Опуская математические выкладки, отметим, что для поля, формируемого в результате адаптивной коррекции с использованием одной ЛОЗ, находящейся на оси телескопа, получим выражение параметра Штреля для оптикоэлектронной системы (приёмного телескопа), корректируемого с помощью фокусируемой ЛОЗ, которое претерпит существенное увеличение. Адаптивная коррекция с использованием традиционной сфокусированной

ЛОЗ фактически будет эквивалентна увеличению размера когерентной части апертуры телескопа, численно равной величине b.

Далее рассчитаем эффект от применения адаптивной коррекции при работе системы с Земли по восходящей трассе. Вычисления сделаны для трёх наиболее применимых моделей и трёх высот формирования ЛОЗ (20, 40 и 100 км) с учётом того, что приёмное устройство размещено на уровне Земли (см. табл. 2). Численные данные показывают увеличение размера когерентной части апертуры системы, обусловленное действием адаптивной коррекции. Например, для различных моделей на высоте 100 км оно составляет от 25 до 27 раз. Иначе говоря, если радиус когерентности для плоской волны составляет, например, 20 см, то традиционная коррекция увеличивает размер когерентной части апертуры телескопа примерно до 5 м.

Силовые волоконные световоды для доставки лазерного излучения на привязные аэростаты

Для доставки мощного лазерного излучения на привязные аэростаты можно использовать оптическое волокно с сердцевиной из особо чистого обезвоженного кварца.

Конфигурация обычной системы доставки предполагает наличие расширителя пучка, ряда заполняющих зеркал и фокусирующего объектива. Оптика всех перечисленных компонентов достаточно проста, так как все они работают в слабо расходящихся пучках. Размер лазерного пучка в обычных системах доставки обычно существенно меньше линейных размеров оптических элементов, что в значительной мере упрощает процесс юстировки. Кроме того, в обычных системах доставки отсутствуют точки внутренней фокусировки пучка, что позволяет свести к минимуму проблему лучевой прочности.

Конструкция волоконной системы доставки включает систему ввода излучения в оптическое волокно, силовой волоконный световод (СВС) требуемой длины (3–5 км) и формирователь выходного лазерного пучка. Последний работает в расходящемся пучке (величина расходимости характеризуется числовой апертурой волокна). Это упрощает согласование пучка с бортовым фотоэлектрическим преобразо-

Таблица 2. Эффект от применения адаптивной коррекции при работе системы с Земли по восходящей трассе

В	ысота формирования ЛОЗ, км	Величина b для модели Гринвуда	Величина b для модифицированного профиля Хафнагеля-Стенли	Величина b для профиля США для условий ночи
	20	6,08	5,19	7,07
	40	11,32	10,15	13,74
	100	27,74	25,82	27,42

вателем. Ввод лазерного пучка в сердцевину волокна диаметром 200 мкм предполагает проведение юстировки и требует достаточно сложной и дорогостоящей системы ввода излучения в волокно. Кроме того, при фокусировке мощного лазерного пучка на торец волокна могут возникнуть проблемы, связанные с лучевой прочностью входного (и, соответственно, выходного) торца волокна.

Все распространённые типы волокон характеризуются двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Затухание характеризует потерю мощности передаваемого сигнала на заданном расстоянии. Есть два принципиально различных физических механизма, вызывающих данный эффект.

Первый - это потери на поглощение. Они связаны с преобразованием одного вида энергии в другой. Электромагнитная волна определённой длины вызывает колебание атомов, из которых состоит кварц, что, в свою очередь, ведёт к нагреву волокна. Фундаментальные частоты колебаний пар Si-O и Ge-O соответствуют длинам волн в области 10 мкм, но, всё же, края полос поглощения простираются до единиц микрон. Поэтому правое ограничение на графике (см. рис. 3) ещё называют фундаментальным инфракрасным поглощением. Естественно, что процесс поглощения волны тем меньше, чем меньше её длина, и чем чище материал волокна.

Второй – это потери на Рэлеевское рассеяние. Причина снижения мощности сигнала в этом случае означает выход части светового потока из волновода. Обусловлено это обычно неоднородностями показателя преломления материалов. Известно, что с уменышением длины волны потери рассеивания возрастают, более того, они обратно пропорциональны длине волны в четвёртой степени.

Лучших показателей общего затухания можно достичь на пересечении кривых поглощения и рассеивания. Реальность несколько сложнее и связана она, в основном, с водой. Вернее с гидроксильной группой ОН. Даже самыми тонкими методами очистки не удаётся полностью избавиться от этой присадки. Принято выделять три окна прозрачности, в рамках которых затухание имеет наименьшее значение. Самые распространённые значения длин волны – это 0,85, 1,3 и 1,55 мкм.



Рис. 3. Окна прозрачности оптических кварцевых волокон

На рисунке 3 видно, что длина 0,85 мкм далеко не идеальна. Однако она очень удобна из-за возможности использовать излучатель из арсенида галлия (GaAs), из которого так же изготовлялась полупроводниковая (электрическая) часть.

Для эффективной передачи мощного лазерного излучения от источника к объекту потребления энергии в оптическом диапазоне 0,2–2,2 мкм необходимы кварцевые световоды с повышенным диаметром сердцевины (600 мкм и более), с высокой числовой апертурой (до 0,3), низкими оптическими потерями и высокой лучевой прочностью (их называют силовыми). Наиболее перспективными для силовых волоконных световодов (СВС) являются высокоапертурные оптические структуры на основе сердцевины из кварцевого световода и кварцевой отражающей оболочки, легированной фтором. Разработка заготовок СВС, удовлетворяющих данным требованиям, проводилась на базе модифицированного РСVD-метода (Plasma Chemical Vapor Deposition). Суммарные потери в кварцевом волокне, изготовленном по технологии PCVD, на длине волны $\lambda = 1.07 -$ -1,08 мкм (для волоконного иттербиевого лазера) составят в этом случае величину порядка 0,8 дБ/км (при длине СВС 3 км общие потери составят величину≈40%).





Рис. 4. Силовой оптический ретранслятор: а – общий вид макета; б – адаптивная система ретранслятора

При изготовлении заготовок для вытяжки оптоволокна VAD-методом торцевого осаждения в вакууме (Vapor Axial Deposition) концентрация примеси ОН-ионов существенно уменьшается. Спектральная кривая оптических потерь становится более гладкой. При этом общие потери на длине волны излучения мощного волоконного иттербиевого лазера составят ≈ 0,5 дБ/км (при длине CBC 3 км общие потери составят ≈ 30%).

На сегодняшний день уровень технологий изготовления СВС с фторсиликатной оболочкой позволяет достичь следующих параметров:

- лучевая стойкость (кВт/мм²) до 20;
- диаметр сердцевины (мкм) до 1000;
- длина вытягиваемого из одной заготовки СВС (км) – до 2;
- потери на длине волны λ = 1,07мкм (дБ/км) – 0,5–0,6.

Макет системы ретрансляции силового излучения

Ключевым элементом системы дистанционной передачи энергии является силовой оптический ретранслятор (СОР). СОР обеспечивает приём от наземного комплекса лазерного излучения и последующее наведение пучка на потребителя энергии. Это может быть воздушный, космический или наземный объект. СОР должен обеспечить контроль пространственноэнергетических характеристик пришедшего пучка, коррекцию искажений в структуре пучка и высокоточное наведение его на объект (потребителя энергии). Для отработки технологий ретрансляции лазерных пучков был создан макет ретранслятора и проведены его стендовые и трассовые испытания.

Общий вид макета представлен на рисунке 4.

Заключение

Система дистанционной передачи энергии позволяет реализовать принципиально новый подход к проблеме глобального энергообеспечения воздушных, космических и наземных объектов. В настоящее время разработаны технологии и элементная база для проведения масштабных натурных экспериментов по дистанционной передачи лазерной энергии на воздушные и космические объекты.

В качестве излучателя лазерной системы передачи энергии по свободному пространству предлагается использовать оптоволоконный иттербиевый лазер с длиной волны излучения 1,07 мкм. Такая система позволит передавать энергию мощностью более 100–600 кВт на стратосферные дирижабли и космические аппараты.

В качестве излучателя лазерной системы при передаче энергии по силовым волоконным световодам на привязные аэростаты с высотой подъёма 3–5 км предлагается использовать эрбиевые лазеры с длиной волны 1,56 мкм мощностью 10–100 кВт.

В качестве приёмников излучения при этом необходимо использовать ФЭП на основе полупроводниковых гетероструктур AlGaAs/GaAs, обеспечивающих эффективность преобразования лазерного излучения (на λ = 1,08 мкм) более 40% в широком диапазоне плотности мощности (0,1–200 Вт/см²).

В качестве платформ для ретрансляции лазерного излучения предлагается использовать стратосферные беспилотные дирижабли, способные осуществлять функционирование в течение длительного времени (более 6 месяцев) на высотах 20–30 км.

При проведении стендовых испытаний макета СОР показана принципиальная возможность достижения высоких технических характеристик при стабилизации и коррекции искажений лазерных пучков. Однако для реализации проекта требуется создать принципиально новую элементную базу, включая силовую адаптивную оптику наземной и бортовой системы ретрансляции мощных лазерных пучков.

Литература

- Нагамато М., Сакаси С., Наруо И., Ванке ВА. Успехи Физических наук. 1994. Т. 164. № 6. С. 631–641.
- Трифонов Ю.М., Андреев В.М., Сысоев В.К., Рыженко А.П. Наукоёмкие технологии. 2004. Т. 5. № 2–3. С. 8–17.
- Andreev V.M., Grilikbes V.A., Rumyantsev V.D. Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight. Chichister: J.Wiley & Sons. 1997. P. 294–300.
- 4. Takeda K., Tanaka M., Miura S., Hashimoto K., Kawashiina K. Laser Power Transmission for the Energy Supply to the Rover Exploring Ice and the Bottom of The Crater in the Lunar Polar Region. Proc. SPIE. 2003. V. 4800. P. 411–419.
- Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск. Институт оптики атмосферы СО РАН. 2005.
- 6. Виноградский Л.М., Кишко В.И., Матюхин В.Ф. Энергообеспечение воздушных и космических объектов на основе технологий дистанционной передачи лазерного излучения. Доклад на конференции «Лазеры в медицине, науке и технике». Г. Адлер. 2008.
- Матюхин В.Ф., Кишко В.И. Принципы построения адаптивных ретрансляторов для стратосферных систем передачи энергии. Автометрия. СО РАН. Т. 48. № 2. С. 59–67.
- Сигов А.С., Матюхин В.Ф. Лазерные системы для беспроводной передачи энергии. Альтернативный киловатт. № 6. 2012. С. 21–27.
- Сысоев В.К., Пичхадзе К.М., Грешило П.А., ВерланАА. Солнечные космические электростанции – пути развития. ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». МАИ-ПРИНТ. 2013.
- 10. Лукин В.П., Матюхин В.Ф. Адаптивная коррекция изображения. Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 12. С. 2465–2473.
- Lukin V. Adaptive System for Laser Beam Formation in Atmosphere with the Use of Incoherent Images as Reference. Journal of Optics. 2013. V. 15. № 4. Art. 044009.
- Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в атмосфере. Наука. Москва. 1976.
- Лукин В.П. Некоторые особенности формирования опорных источников. Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 12. С. 1021–1028.



19-я Международная выставка электронных компонентов, модулей и комплектующих



весь цвет электроники

Совместно с выставкой



Организаторы:

+7 (812) 380 6003/07/00 electron@primexpo.ru

Забронируйте стенд на сайте: expoelectronica.ru