

Тенденции развития аэрокосмических энергетических систем с лазерными каналами передачи энергии

Часть 1

Александр Сигов, Владимир Матюхин (Москва)

В статье рассмотрены принципы построения лазерных систем для передачи энергии на удалённые объекты через турбулентную атмосферу. В качестве мощного источника излучения наземного базирования предложено использовать волоконные лазеры с выходной мощностью 100...1000 кВт. Энергия передаётся с помощью зеркала-ретранслятора, размещённого на стратосферном дирижабле. Процесс передачи оптимизирует адаптивная оптическая система.

ВВЕДЕНИЕ – ТРАНСПОРТИРОВКА ЛАЗЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ПО СТРАТОСФЕРНЫМ МАГИСТРАЛЯМ

В последние годы активно обсуждается проблема передачи энергии в околоземном воздушном и космическом пространстве с помощью лазерного излучения [1–3]. Интерес к этой проблеме связан, прежде всего, с тем, что нарушение снабжения электрической энергией стратегически важных наземных, воздушных и космических объектов,

включая высотные (стратосферные) платформы и искусственные космические аппараты на низких и высоких орбитах, влияет на функциональность систем безопасности и приведёт к значительным финансовым потерям. Решить проблему доставки энергии на эти объекты можно с помощью лазерных систем передачи энергии (ЛСПЭ) [2, 3] путём беспроводной трансконтинентальной транспортировки мощных информационно-энергетических потоков по стратосферным

и космическим магистралям над территорией страны.

Возможности ЛСПЭ в значительной мере определяются видом базирования, которое может быть наземным, морским, воздушным (на самолёте или аэростате) либо космическим. Расстояния, на которые лазерные системы должны будут передавать энергию, зависят от целевого назначения и вида базирования (от единиц до десятков тысяч километров). Процесс передачи энергии при наземном расположении ЛСПЭ зависит от состояния атмосферы и от погодных условий. При наземном и воздушном базировании приходится преодолевать весьма жёсткие возмущающие факторы.

Влияние облачности, осадков и других явлений низких слоёв атмосферы на передачу лазерного излучения уменьшается с подъёмом на высоту выше 20 км. Три четверти массы атмосферы сосредоточены в нижних слоях до 10 км. Выше воздух значительно разрежен, хотя его частицы обнаруживаются на высоте 2000–3000 км над земной поверхностью. Нижний слой атмосферы (тропосфера, 10–15 км) нагревается от Земли, температура воздуха с высотой падает на 6°С/км. В тропосфере находится почти весь водяной пар, образуются все облака, происходит формирование и перемещение воздушных масс, образование циклонов и антициклонов (см. рис. 1). Лазерное излучение может передаваться на значительные расстояния по поверхности Земли при использовании нескольких систем ретрансляции стратосферного или космического базирования (см. рис. 2). Стратосферное размещение ЛСПЭ позволяет дорабатывать и ремонтировать аппаратуру. Поэтому техника и технология систем ЛСПЭ должны быть доведены до совершенства для стратосферного базирования, после чего можно переходить к созданию космических лазерных систем. Вопросы построения комплексов лазерного энергообеспечения (КЛЭО) актив-



Рис. 1. Структура атмосферы Земли по высоте

но рассматриваются, практически, во всех странах, занимающихся решением космических задач. Разрабатываются технологии и элементная база для построения ЛСПЭ на базе стратосферных платформ и аэростатов.

Система ЛСПЭ функционирует следующим образом. Излучение мощных лазерных источников формируется в пучок с заданными параметрами и направляется на бортовую оптическую систему высотного дирижабля, оснащённую опорным источником и системой ретрансляции излучения. Опорный источник необходим для высокоточного наведения лазерного излучения, контроля и последующей коррекции атмосферных искажений в нём на восходящей трассе. А система ретрансляции позволяет направлять мощное лазерное излучение на различные воздушные или космические объекты (потребители энергии), оснащённые приёмными фотоэлектрическими (ФЭ) панелями, преобразующими лазерное излучение в электрический ток. Слежение за центром панели осуществляется системой ретрансляции по опорному источнику. Для пространственной ориентации приёмных ФЭ-панелей относительно лазерного пучка используется оптико-электронная система наведения ФЭ-панелей преобразователя. Аппаратное управление функционированием КЛЭО осуществляется по наземным и космическим каналам связи в радио- или оптическом диапазонах.

Максимальная дальность однопролётной стратосферной магистрали составляет до 750 км. Максимальная передаваемая световая энергия – до 10 МВт, а диаметры ретранслируемых световых пучков – от 2 до 10 м. Длины волн излучения – 0,8–0,9 мкм, 1,06–1,15 мкм или 1,315 мкм. Максимальная эффективность преобразования световой энергии в электрическую – 30%, а потери в стратосферных и ретрансляционных элементах на однопролётной магистрали не превышают 0,1 дБ. Высота стратосферной энергетической магистрали составляет более 20 км.

Основным ограничивающим фактором предлагаемой концепции является тропосферный слой атмосферы Земли. Для преодоления негативного влияния тропосферного слоя атмосферы Земли можно реализовать многоярусную систему передачи энергии. На первый ярус, представляющий собой промежуточный транспортный дирижабль

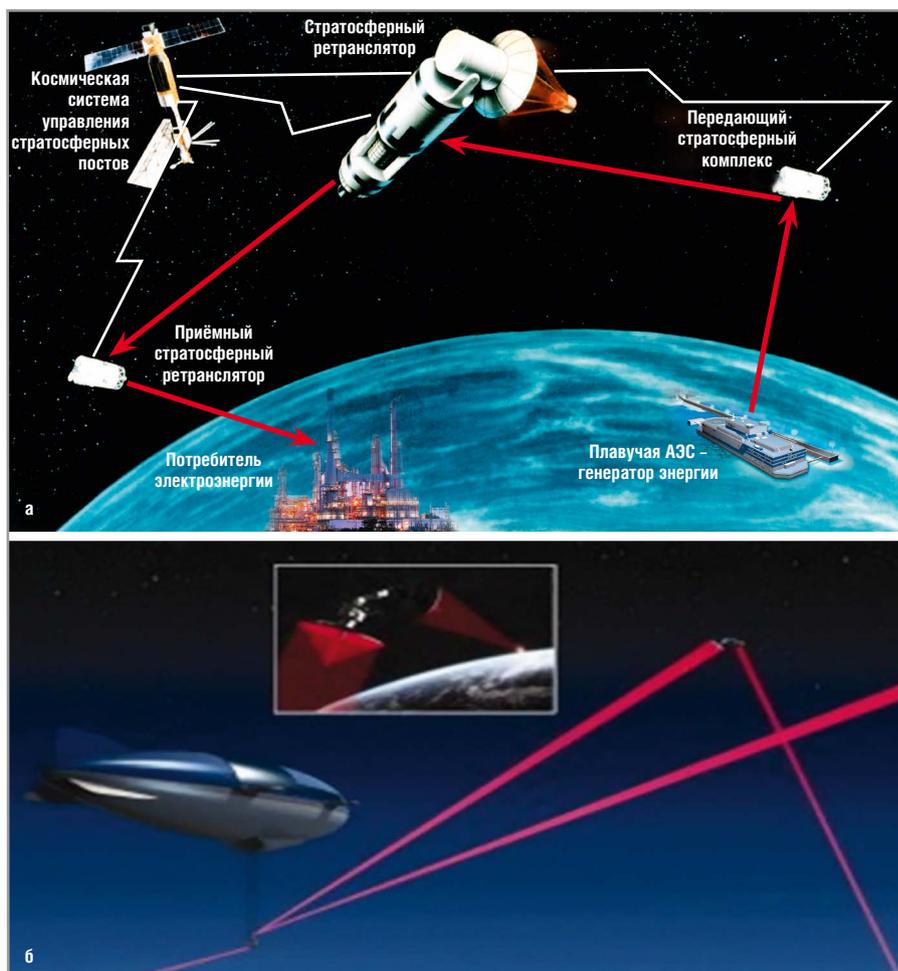


Рис. 2. Лазерные магистрали для передачи энергии из КЛЭО стратосферного (а) и космического (б) базирования

(высота его расположения 3–6 км), с поверхности Земли энергия передаётся по СВЧ-лучу или оптическому волоконному кабелю. На его борту происходит преобразование и передача энергии системой лазерного излучения на верхний ярус – стратосферную аэростатическую платформу, расположенную на высоте 16...30 км, куда лазерные энергетические линии могут доносить мощности мегаваттного порядка (5...10 МВт).

При передаче энергии лазерного излучения с поверхности Земли на высотные дирижабельные платформы (высота 20...25 км) для повышения качества пучка (уменьшения расходимости, исключения блуждания и других параметров) необходимо принимать меры по компенсации фазовых искажений лазерного пучка с использованием технологии силовой адаптивной оптики (САО).

При формировании лазерного канала с высокой выходной мощностью возникает следующая научно-техническая задача: лазерное излучение должно быть сформировано в пучок, расходимость которого не превышает

$10^{-6}...10^{-7}$ рад. Для этого необходимо использовать сложные средства коррекции искажений волнового фронта излучения, как в оптическом тракте лазера, так и в магистральном пространстве. Поиск эффективных решений показал, что именно выбор средств коррекции искажений определяет архитектуру построения лазера и ЛСПЭ в целом.

На первый взгляд, читателям может показаться, что авторы рассказывают о некоторых задачах из области научной фантастики. На самом деле эти задачи весьма актуальны уже сегодня и ими занимаются учёные во многих странах мира. Разработка технологии беспроводной передачи высоких энергий необходима для дальнейшего освоения и использования воздушного и космического пространства Земли уже в XXI веке.

ПЕРЕДАЧА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПО ЛАЗЕРНОМУ КАНАЛУ

Идея сбора солнечной энергии в космосе и транспортировки её на Землю по лазерному лучу сама по себе не нова. В 1968 году с такой идеей высту-

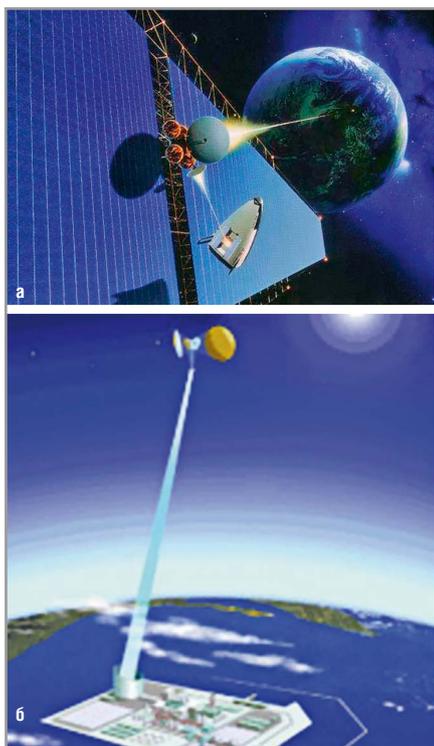


Рис. 3. Проект геостационарной солнечной электростанции SSPS (иллюстрация NSS/Mafic Studios):

а – платформа с солнечным коллектором;
б – передача энергии на Землю

пил американский учёный Питер Глейзер. Проект предусматривал размещение на орбите платформы, состоящей из солнечных батарей. Собранная энергия должна с помощью СВЧ-излучения или лазера передаваться на Землю, где она будет преобразована в электричество. Авторы подобных проектов утверждали, что излучение из космоса не повлияет на состояние ионосферы и атмосферы благодаря тому, что будет выбран диапазон частот излучения, который ими поглощается слабо. Микроволны могут передаваться через атмосферу Земли на частоте 2,45...5,8 ГГц. Оптимальным считается нижний диапазон – дальнейшее увеличение частоты невыгодно, поскольку СВЧ-излучение имеет более высокий уровень атмосферной адсорбции.

Наряду со сложнейшей задачей транспортировки электрической энергии на Землю, учёные обозначили и другую проблему. При создании подобного комплекса необходимо максимально повысить эффективность преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию для минимизации площади платформы на орбите. В настоящее время предложен ряд концептуальных решений. Физики из университета Осаки созда-

ли необычный керамический материал, содержащий хром и неодим. Комбинированная батарея на основе кристаллического кремния преобразует падающий свет (весь солнечный спектр) в лазерный луч с необычайно высокой эффективностью – 42%. Такая батарея была разработана и изготовлена консорциумом, созданным университетом Делавэра и компанией DuPont.

В приборе применена расщепляющая спектр и концентрирующая оптика, которая разделяет свет на три части с высокой, средней и низкой энергией лучей и направляет их на три участка солнечной батареи, покрытые тремя разными светочувствительными составами. Концентратор обладает широким углом восприятия лучей, что устраняет необходимость применения системы слежения за Солнцем и поворота батарей. Учёные считают, что данный преобразователь сыграет ключевую роль в японском проекте геостационарной солнечной электростанции SSPS (Space Solar Power System) (см. рис. 3).

Окончательный проект такой станции ещё не готов, но японцы утверждают, что платформа с солнечными батареями общей площадью 4 км² может переправлять на Землю достаточно мощный и слабо расходящийся луч, который на Земле будет преобразован в электрическую энергию. Выходная мощность такой станции может достигать 1 ГВт. Запуск и развёртывание столь крупного космического аппарата – сложная и дорогостоящая задача. Для участия в проекте стоимостью \$21 млрд объединились 16 крупнейших японских компаний во главе с корпорациями Mitsubishi Electric и IHI. В течение четырёх лет они планируют разработать и сконструировать конкретные устройства для транспортировки панелей на стационарную орбиту высотой 36 000 км, а также для сборки панелей и передачи электроэнергии на Землю с минимальными потерями. Первый опыт по передаче электричества с орбиты планируется провести в 2015 году, а окончательный ввод системы в эксплуатацию намечен на 2030 год.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МОЩНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

К лазерам с прямым преобразованием солнечного излучения предъявляются следующие требования:

а) наличие широкой (и, по возможности, непрерывной) полосы погло-

щения в области спектра, где сосредоточена основная доля излучения накачки;

б) существование процессов, приводящих при поглощении излучения к образованию инверсной населённости уровней;

в) восстанавливаемость химического состава лазерной смеси, в которой под действием излучения возможно протекание различных химических реакций.

Если накачка активной среды осуществляется непосредственно сконцентрированным солнечным светом, то вышеуказанные требования должны выполняться, естественно, и системами, поглощающими излучение преимущественно в видимой области спектра. Однако, в принципе, возможно создание солнечного лазера, в котором для накачки используется излучение, трансформированное с помощью чёрного тела из видимой области спектра в его инфракрасную часть.

Какой же должна быть мощность лазерной установки, чтобы говорить о её применении для передачи энергии?

Большой интерес представляют твёрдотельные иттрий-неодимовые лазеры N:(YAG) американской компании Northrop Grumman, суммарная мощность которых достигает 120 кВт, и волоконные непрерывные лазеры на иттербии российской компании «ИРЭ-Полус», выходная мощность которых достигает 100 и более киловатт. Такие лазеры могут иметь двойное назначение (оборонное и гражданское применение) в качестве дальномеров, систем обнаружения, сварки и резки сверхтвёрдых металлов и применяться для решения ещё целого ряда задач, не поддающихся решению другими технологиями и техническими средствами.

Волоконные лазеры сочетают в себе свойства генераторов излучения (лазерных диодов), усилителей излучения и высокоэффективных световодов. Волоконные лазеры переживают период бурного развития. Например, волоконные непрерывные лазеры на иттербии ($\Delta\lambda = 1,05 - 1,08$ мкм) достигли весьма впечатляющих параметров (см. таблицу 1).

В петербургском институте лазерной физики ГОИ им. С.И. Вавилова разработана концепция системы прямого преобразования солнечной энергии в лазерное излучение на базе фуллеренкислород-йодного лазера (см. рис. 4). Показаны преимущества этой системы

и её конкурентоспособность по сравнению с аналогичными системами преобразования солнечной энергии. Выполнен анализ различных вариантов генераторов синглетного кислорода на основе твёрдофазных фуллеренсодержащих структур. Проведён цикл экспериментальных исследований процессов преобразования солнечной энергии в лазерное излучение с использованием разработанного макета фуллерен-кислород-йодного лазера с накачкой имитатором солнечного излучения. Получена генерация в импульсно-периодическом режиме работы лазера с частотой 10 Гц со средней выходной мощностью 30 Вт. Достигнут съём энергии лазерной генерации с единицы объёма активной среды 9 Дж/л.

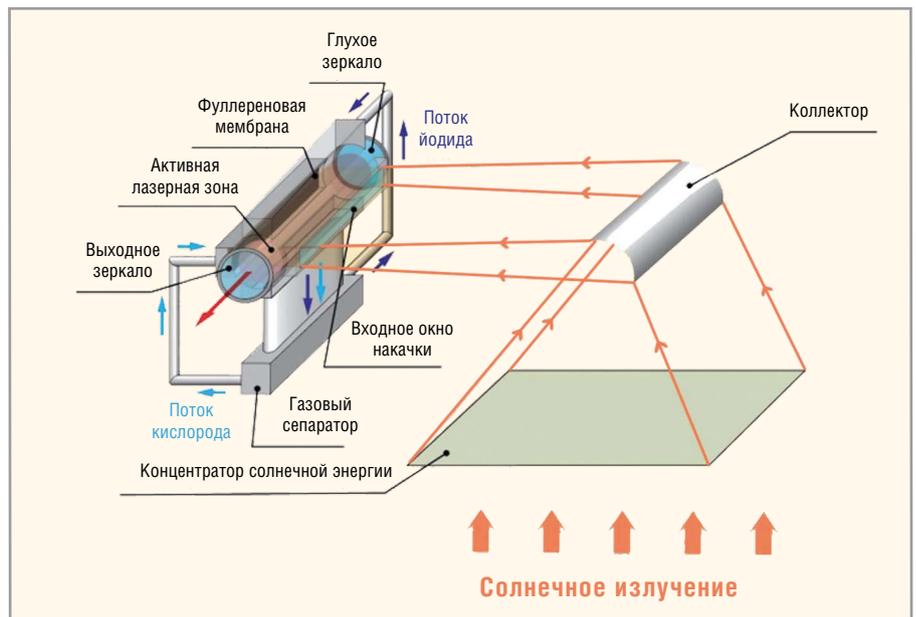


Рис. 4. Схема фуллерен-кислородно-йодного лазера с солнечной накачкой

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лазерное излучение может быть эффективно преобразовано в электроэнергию с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе полупроводниковых гетероструктур. Области применения такого преобразования: беспроводные системы дистанционного энергопитания космических аппаратов лазерным излучением, передаваемым с Земли, передача энергии между космическими аппаратами и с космических аппаратов на Землю, а также с Земли на дирижабли системы телекоммуникаций, обеспечение энергопитания труднодоступных объектов.

Исходя из особенностей характеристик лазерного излучения и ограничений на параметры фотоэлектрической системы, основными требованиями к ФЭП являются высокий КПД при выбранных длинах волн лазерного излучения и возможность эффективной и надёжной работы ФЭП при различных уровнях средней плотности падающего излучения и повышенных температурах. Главной проблемой является обеспечение достаточно высокой эффективности фотоэлектрического преобразования падающего лазерного излучения в широком диапазоне изменения его плотности.

В реальном ФЭП на основе GaAs, оптимизированном для умеренной плотности (0,1...1 Вт/см²) лазерного излучения (λ = 0,8 мкм) получен КПД 40–43%. При увеличении плотности лазерного излучения до 50–70 Вт/см²

Таблица 1. Характеристики волоконных непрерывных лазеров на иттербии (Δλ = 1,05–1,08 мкм)

Параметр	Данные
Выходная мощность, кВт	до 100
Возможность модуляции излучения на частоте, кГц	5
КПД, %	до 30
Канализация излучения по волокну диаметром, мкм	200
Длина волоконного световода, м	до 300
Качество пучка, мрад	2,5 × 6
Срок службы не менее, ч	100 000
Габариты 10-киловаттного модуля, м	0,86 × 0,81 × 1,50
Масса 100-киловаттного модуля, кг	1000

Таблица 2. Оценка КПД преобразования энергии лазерного излучения

Тип лазера	Длина волны, мкм	КПД лазера, %	Материал приёмника	КПД преобразования лазерного излучения в электричество, %	Суммарный КПД, %
Кристаллические лазеры	1,03; 1,06	18...20	GaSb	36	6,5...7,2
			InGaAs	45	8,1...9
Волоконные лазеры	1,07 (Yb)	28...30	InGaAs	45	12,6...13,5
	1,55 (Er)	15...20	GaSb	54	8,1...10,8
Лазеры на парах щелочных металлов	0,77 (K)	30...35	AlGaAs	64	18...22
	0,795 (Rb)		AlGaAs	62	
	0,895 (Cs)		InGaAs	60	
InP					

КПД ФЭП вырастает до 45%. Дальнейшее увеличение интенсивности лазерного излучения до 200 Вт/см² приводит к снижению КПД до 42%.

ФЭП на основе AlGaAs/GaAs обеспечивают эффективность преобразования лазерного излучения (на λ = 1,08 мкм) более 40% в широком диапазоне плотности мощности (0,1...200 Вт/см²). Увеличение КПД до 50–55% может быть достигнуто за счёт снижения оптических и омических потерь, а также за счёт смещения

длины волны лазерного излучения до 0,85 мкм. В таблице 2 представлены оценки КПД преобразования энергии излучения в электричество при оптимальной плотности падающего излучения 100 Вт/см² для трёх типов лазеров.

Тонкоплёночные ФЭП на основе арсенида галлия, разрабатываемые в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, позволяют сохранить высокий КПД при уменьшении толщины структуры ФЭП до величины менее 10 мкм. В результате более чем на порядок снижается рас-

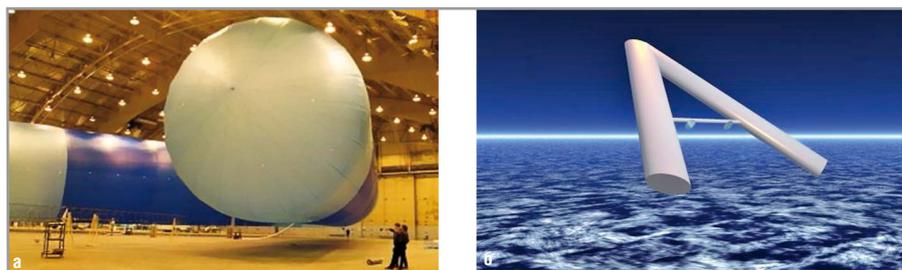


Рис. 5. V-образный беспилотный 53-метровый суборбитальный дирижабль Ascender:

а – в цеху; б – в полёте

ход арсенида галлия и, как следствие этого, в 2–3 раза снижается вес фотоэлектрических батарей. Цены на легированные индием (InGaAs) арсенид-галлиевые фотоэлектрические батареи составляют порядка \$3/ватт, и продолжают снижаться.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ И МАГИСТРАЛЕЙ

Мощность энергии, излучаемой Солнцем, составляет ориентировочно 63 МВт с каждого квадратного метра его поверхности. Интегральная плотность мощности солнечного излучения, достигающего атмосферы Земли, то есть газовой среды, которая вращается вместе с Землей как единое целое, составляет в среднем 1367 Вт/м² (ее называют солнечной постоянной). В ясный день поверхности Земли достигает не более 1000 Вт/м². Остальная часть солнечной энергии отражается и рассеивается в атмосфере молекулами газов, аэрозольными частицами, каплями воды и кристаллами льда. Это обуславливает одну из задач солнечной энергетики – как максимально эффективно уловить солнечные лучи, чтобы приблизиться к солнечной постоянной. Предлагается решить эту задачу с помощью огромных управляемых оптических зеркал, расположенных в ближнем космосе. Отражаемая от зеркал солнечная энергия может быть направлена на специальную стратосферную платформу (СП) или систему из нескольких таких платформ. На этих платформах должны быть расположены системы солнечных батарей, преобразующих солнечный свет в электричество.

Одним из вариантов СП является беспилотный дирижабль Ascender. Двухкилометровый гелиевый дирижабль с ионными двигателями по проекту калифорнийской компании JP Aerospace (см. рис. 5) может выходить почти на космическую орбиту. Разработчик

утверждает, что наполненные гелием воздушные шары способны подниматься на высоту 40–60 км и находиться там месяцами, наподобие орбитальных космических станций, принимая сменные экипажи с Земли.

Заполненный гелием аппарат с дистанционным управлением, оснащенный воздушными винтами, должен достичь расчетной высоты не менее 30,5 км. Также он должен продемонстрировать способность реагировать на команды с Земли, зависеть над заданной точкой, компенсируя моторами действие ветра, а также проходить путь между произвольно заданными пунктами на поверхности планеты. Испытание проводится, в первую очередь, для американских ВВС, которые рассматривают высотные аэростаты в качестве перспективных средств разведки и ретрансляции данных.

Стоимость постройки Ascender составила \$500 тыс. Это гораздо дешевле, чем покупка беспилотных самолетов-разведчиков, таких как Global Hawk (\$30 млн вместе со всем наземным оборудованием).

Калифорнийская компания полагает, что их детище послужит хорошим дополнением к другому дирижаблю – High Altitude Airship, который по заказу Пентагона разрабатывает фирма Lockheed Martin. Однако планы у JP Aerospace куда более грандиозные. Они не ограничиваются работой в интересах ВВС. Ascender длиной 53 метра – это лишь промежуточный этап на пути создания серии более крупных аэростатов.

Сейчас компания разрабатывает долговременную, парящую почти на границе космоса, станцию под названием Dark Sky Station с поперечником 3,2 км. Она должна висеть или медленно дрейфовать на высотах до 42 км и нести на борту обитаемую исследовательскую станцию, экипажи на которую доставлялись бы небольшими пилотируемыми аналогами Ascender.

Другой проект компании – Orbital Ascender. Это пилотируемый V-образный аэростат длиной 1,8 км, способный двигаться вокруг планеты по орбите и швартоваться к Dark Sky Station. Один оборот вокруг Земли занимал бы у гигантского корабля от 3 до 9 дней.

Для разгона и подъема на высоты, недоступные обычным аэростатам (60 км и более), аппарат будет использовать ионные реактивные двигатели, питаемые топливными элементами и солнечными батареями. Положительную роль в рекордном подъеме сыграла бы и аэродинамика этого аппарата. Основатель компании JP Aerospace Джон Пауэлл (John Powell) заявляет, что ионные двигатели будут установлены на высотном аэростате и испытаны на высоте 30 км.

Калифорнийские инженеры пока даже не предсказывают, сколько лет понадобится для вывода в космос столь смелых проектов. Но такие аппараты, полагает Пауэлл, могли бы заменить нынешние космические корабли во многих сферах применения, заполняя промежутки между высотами, освоенными самолетами, и высотами, на которых летают низкоорбитальные спутники (см. рис. 6).

Следует иметь в виду, что на пути солнечного излучения к Земле происходит не только отражение солнечной энергии и рассеяние ее в атмосфере. На нее также воздействует атмосферная турбулентность, под влиянием которой в большинстве районов Земли солнечное излучение будет иметь угловое рассеяние примерно 3...5 секунд. Учитывая расстояние от геостационарного спутника до Земли, получим отклонение оптического излучения примерно на 10 км, что легко компенсируется при помощи простейшей адаптивной системы. Проблема заключается в необходимости управлять огромными оптическими элементами прямо в космосе, на высотах порядка 35...40 тыс. км. Но гораздо существеннее проблема дороговизны энергии, так как ее решение требует высокой эффективности преобразования световой энергии в электрическую. Это поможет сократить «лишние» площади солнечных батарей, которые необходимы для компенсации потерь энергии. Для решения данных задач ученые предлагают самые разнообразные проекты.

В одном из вариантов на космической орбите, на высоте примерно 40 тыс. км в районе геостационарных

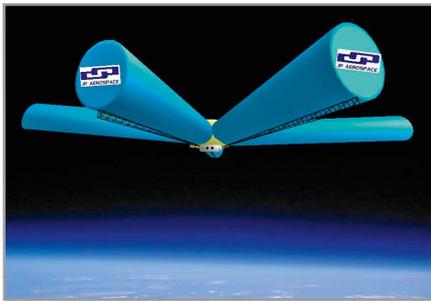


Рис. 6. Dark Sky Station – многокилометровая космическая станция-аэростат

орбит, предлагается поместить систему слабо фокусирующих космических линз или зеркал (КЗ). Если осуществить прямую фокусировку отражённого от КЗ солнечного излучения прямо на СП или на Землю, появится необходимость адаптивно управлять этими зеркалами. Освещённая зона будет иметь площадь, равную сотням квадратных километров, однако плотность энергии в ней, по сравнению с естественной величиной плотности на поверхности Земли, будет ничтожно мала (см. рис. 7а).

Если исходить из того, что зеркала находятся на геостационарной орби-

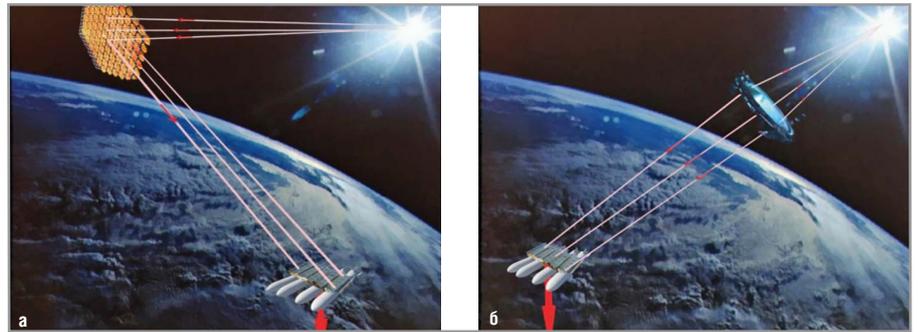


Рис. 7. Пассивная ретрансляция солнечного излучения к СБ, расположенным на СП

те, а СП – на высоте порядка 20 км, тогда размеры КЗ становятся гораздо больше размеров СП. В одном из вариантов проекта КЗ представляют собой тонкую плёнку, натянутую на разворачиваемый в космос каркас, который, в свою очередь, и осуществлял точную наводку зеркал на СП (см. рис. 7б).

В другом варианте предлагается разместить на ГСО космическую электростанцию (КЭС) с ЛСПЭ, а на СП – постоянно висящую на высоте 20...40 км энергетическую заправочную станцию, предназначенную для беспроводного энергообеспечения

объектов на Земле и в аэрокосмическом пространстве. На КЭС должны быть размещены либо системы прямой накачки лазера солнечным светом, либо солнечные батареи с ЛСПЭ. Особенностью высот 20...40 км над Землёй являются постоянно дующие ветры, которые будут дестабилизировать положение СП. Поэтому она должна быть снабжена системой стабилизации своего положения и постоянной юстировки КЗ. Согласование системы КЗ и СП можно осуществить с помощью оптических маяков и систем адаптивной коррекции, установленных на СП (см. рис. 8).

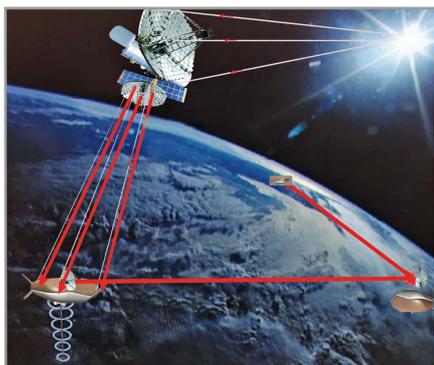


Рис. 8. Концепция аэрокосмической системы беспроводного энергообеспечения объектов

На Земле энергия лазерного излучения будет преобразована в электрическую или тепловую энергию. Системы пересылки лазерного излучения на трассе «СП – наземные станции» должны учитывать действие атмосферной турбулентности и погрешности стабилизации СП, а также корректировать искажающие действия. Для этого применяют активную и пассивную стабилизацию СП, а также корректируют искажающие действия. Для этого применяют активную и пассивную стабилизацию СП. Площадь приёмных солнечных батарей или других приёмников оптического излучения на Земле будет минимизирована за счёт фокусировки лазеров и повышения плотности мощности на 3–4 порядка.

На СП могут быть размещены лазеры с прямой накачкой солнечным излучением, кремниевые батареи, ретрансляторы и другое оборудование. Вариант размещения в космосе лазеров с прямой накачкой солнечным излучением и, минуя преобразования, отправка лазерных пучков на Землю с помощью расположенных на СП ретрансляторов, будет иметь наивысший КПД. Вариант с расположением на борту СП мощных лазеров и систем наведения может быть интересен тем, что он позволит начать работу по уничтожению космического мусора (см. рис. 9), так как СП всегда находится выше облаков. Вследствие фокусировки лазерных пучков площадь батарей на Земле будет существенно меньше, чем в случае прямого сбора солнечного света на поверхности Земли.

На СП и на наземных станциях будут размещены специальные маяки, представляющие собой точечные источники света. Излучение такого источника света, расположенного на Земле, проходит через атмосферу и принимается на СП специальным датчиком волнового фронта, сигналы которого будут управлять активными зеркалами для идеальной фокусировки лазерного пучка. Выбор длины волны лазе-



Рис. 9. Уничтожение космического мусора с помощью мощных лазеров

ра будет определяться возможностями минимизации негативных эффектов, обусловленных атмосферой Земли. Для выбранной длины волны можно заранее рассчитать так называемый размер когерентной зоны излучения видимого диапазона, которая позволяет обеспечить высокоточное наведение и фокусировку лазерного излучения на Землю. Оценки показывают, что при фокусировке на Землю размер когерентной зоны излучения видимого диапазона будет составлять примерно 20 см.

Структура аэрокосмической солнечной электростанции мегаваттной мощности (≥ 10 МВт) будет включать следующие компоненты:

- КЭС, содержащая ФЭП с КПД более 40% и лазерные каналы передачи мощности более 100 кВт со спектром излучения 0,8...2 мкм;
- аэростатная СП грузоподъемностью 25...50 т, расположенная на высоте 20...35 км с ФЭП площадью ≥ 10000 м² и КПД $\geq 30\%$ в верхней части и передающими ректеннами диаметром до 100 м в нижней части;
- спутник с плёночными зеркалами-концентраторами диаметром 500...1000 м, 10–100 лазерными каналами передачи энергии с высокоточными индивидуальными системами наведения (10^{-6} рад.) и накопителями энергии (возможно, суперконденсаторами);
- центр управления всеми компонентами электростанции, расположенный на СП, (аэростат может иметь двигатели для ориентации и стабилизации своего положения).

Для космической электростанции выбор типов лазеров диктуется следующими требованиями: КПД более 30%, мощность более 10 кВт, близкое к дифракционному уровню качество пучка лазерного излучения, возможность суммирования пучков без потери качества, минимальные массогабаритные пара-

метры и отсутствие подвижных систем. Этим требованиям соответствуют волоконные лазеры.

Для такого многокомпонентного сооружения, включающего в себя лазеры, зеркала, концентраторы и маяки, требуется многоуровневая адаптивная система оптического наведения, способная учесть фазовые, деформационные и другие искажения-препятствия, встречающиеся на пути лучей. Об этой адаптивной оптической системе мы расскажем во второй части статьи.

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. Проблема солнечных космических электростанций. Успехи физических наук. 1977. Т. 123. № 4. С. 633.
2. Ванке В.А., Лесков Л.В., Лукьянов А.В. Космические энергосистемы. М. Машиностроение. 1990. 240 с.
3. Ванке В.А. Электроэнергия из космоса – солнечные космические электростанции. Журнал радиоэлектроники. 2007. № 12. С. 98.
4. Glaser P.F. Power from the Sun: It's Future. Science. 1968. V. 162. № 11. P. 857.
5. Грилихес В.А., Орлов П.П., Попов Л.Б. Солнечная энергия и космические полёты. М. Наука. 1984. 216 с.
6. Матюхин В., Мельников В., Сысоев В., Верлан А., Харлов Б. Лидерство России в создании промышленных лазерных космических солнечных электростанций для трансляции электроэнергии на Землю. Информационные ресурсы России. № 1. 2013.
7. Райкунов Г.Г., Камков В.А., Мельников В.М., Харлов Б.Н. Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции. М. Физматлит, 2009. 447 с.
8. Сигов А.С., Матюхин В.Ф. Лазерные системы для беспроводной передачи энергии. Альтернативный киловатт. № 6. 2012. С. 21.
9. Сысоев В.К., Пономаренко А.Д., Верлан А.А. Мировые тенденции развития космических электростанций. Альтернативный киловатт. № 5. 2011. С. 14.
10. Сысоев В.К., Верлан А.А., Насыров А.Ф. Солнечные электростанции на высотных дирижаблях. Научное обозрение. № 5. 2011. С. 312.
11. Сысоев В.К., Пичхадзе К.М., Грешилов П.А., Верлан А.А. Солнечные космические электростанции – пути развития. М. ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2013. 160 с.
12. Тугаенко В.Ю. Возможности и перспективы беспроводной передачи электрической энергии в космосе и из космоса на Землю. Альтернативный киловатт. № 2. 2011. С. 36.

