

УДК 621.378.325

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ РЕТРАНСЛЯТОРОВ ДЛЯ СТРАТОСФЕРНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

В. И. Кишко, В. Ф. Матюхин

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет
радиотехники, электроники и автоматики»,
119454, Москва, просп. Вернадского, 78
E-mail: mirea@mirea.ru*

Проанализированы проблемы построения лазерных систем передачи энергии в условиях турбулентной атмосферы с использованием зеркал-ретрансляторов, размещаемых на стратосферном дирижабле. Показана принципиальная возможность построения такой системы с использованием мощного наземного волоконного лазера на иттербии, зеркал-ретрансляторов мощного лазерного излучения и адаптивной оптической системы для коррекции фазовых искажений пучка, вызванных влиянием атмосферной турбулентности. Создан макет лазерных систем передачи энергии и проведены его лабораторные исследования, подтвердившие принципиальную возможность коррекции турбулентных искажений атмосферы при наведении и высокоточной стабилизации лазерных пучков.

Ключевые слова: лазерная система передачи энергии, волоконные лазеры, адаптивная оптическая система, стратосферные дирижабли, зеркало-ретранслятор лазерного излучения.

Введение. Отказ энергетических установок космических аппаратов приводит к значительным финансовым потерям, а иногда и к человеческим жертвам. Решить проблему доставки энергии на эти объекты можно с помощью лазерных систем передачи энергии (ЛСПЭ). В зависимости от целевого назначения и вида базирования система может обеспечивать передачу энергии на дальность от десятков метров до нескольких сотен тысяч километров.

В последние несколько лет США и другие западные страны пропагандируют и рекламируют работы, связанные с созданием ЛСПЭ [1, 2]. История создания первой американской летающей лаборатории с ЛСПЭ на основе мощного газодинамического CO₂-лазера подробно изложена в [1]. Аспекты использования мощного авиационного лазера для перехвата жидкостных баллистических ракет на активной фазе полёта рассмотрены в [2]. В Великобритании ежегодно проходят международные конференции «Системы направленной энергии». Вместе с тем ключевые технологии, «ноу-хау», отдельные тактико-технические характеристики и некоторая другая информация являются закрытыми.

Работы в области создания ЛСПЭ и элементной базы проводятся и в России. В [3] проанализированы проблемы построения ЛСПЭ, базирующихся на методах линейной адаптивной оптики и предназначенных для передачи энергии на космические расстояния. В [4] рассмотрена возможность передачи лазерной энергии по оптическому волокну.

В МГТУ радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) проводятся исследования возможности передачи лазерной энергии в условиях турбулентной атмосферы с использованием элементов адаптивной оптики и зеркал-ретрансляторов, размещаемых на высотных дирижабельных платформах [5].

Процесс передачи энергии при наземном расположении лазерной системы зависит от состояния атмосферы и от погодных условий. Поэтому создание ЛСПЭ большой дальности действия такого вида размещения сопряжено со многими проблемами.

Наиболее перспективно создание ЛСПЭ стратосферного базирования длительного бар-

ражирования. С подъёмом на высоту свыше 16–32 км уменьшается влияние облачности, осадков и других явлений в низких слоях атмосферы на передачу энергии лазерного излучения. При этом воздушное размещение по сравнению с космическим обеспечивает возможность ремонта аппаратуры, что чрезвычайно важно при длительной эксплуатации ЛСПЭ. В связи с этим стратосферные ЛСПЭ должны стать трамплином для создания космических лазерных систем передачи энергии [6].

Страны, где разработка современных лазерных технологий и создание образцов перспективных ЛСПЭ принадлежат к приоритетным направлениям науки и техники, уже в недалёком будущем получают ощутимые преимущества в мировом сообществе.

В МГТУ МИРЭА с 2008 г. проводятся работы по созданию технологий и элементной базы для построения комплексов лазерного энергообеспечения (КЛЭО) на базе стратосферных платформ и привязных аэростатов [5, 6].

Возможный вариант концепции построения КЛЭО представлен на рис. 1. Система 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. Система ретрансляции позволяет направлять мощное лазерное излучение на воздушные или космические объекты, которые оснащены фотоэлектрическими приёмными панелями, преобразующими лазерное излучение в электрический ток. Слежение за центром панели осуществляется системой ретрансляции по опорному источнику. Для пространственной ориентации фотоэлектрических приёмных панелей относительно лазерного пучка применяется оптико-электронная система (ОЭС) наведения фотоэлектрических панелей преобразователя.

Лазерное излучение может передаваться на значительные расстояния по поверхности Земли при использовании нескольких систем ретрансляции стратосферного или космического базирования.

Основным ограничивающим фактором концепции является тропосферный слой атмосферы Земли. Для преодоления негативного влияния тропосферного слоя предлагается

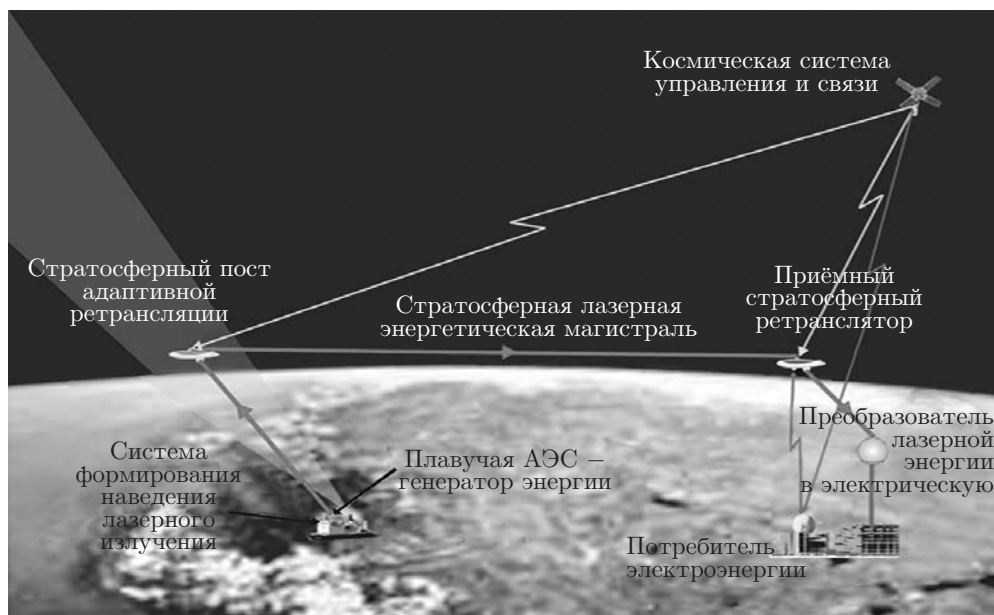


Рис. 1. Схема концепции построения комплекса лазерного энергообеспечения

использовать многоярусную систему передачи энергии. На первый ярус (высота 6–12 км) с поверхности Земли энергия передаётся по СВЧ- или оптическим волоконным каналам, а на верхний (20–30 км) — с помощью лазерного излучения.

Источники мощного лазерного излучения. Волоконные лазеры, интенсивно развивающиеся в настоящее время, сочетают в себе свойства собственно генераторов излучения (лазерных диодов), усилителей излучения и высокоэффективных световодов. Представим достигнутые в НТО «ИРЭ-Полюс» (г. Фрязино Московской обл.) параметры волоконных непрерывных лазеров на иттербии ($\Delta\lambda = 1050\text{--}1080$ нм): выходная мощность до 100 кВт; возможность модуляции лазерного излучения на частоте 5 кГц; КПД до 30 %; канализация излучения по волокну диаметром 200 мкм; длина волоконного световода до 300 м; расходимость пучка $2,5 \times 6$ мрад; срок службы >100000 ч; габариты модуля (мощность 10 кВт) $86 \times 81 \times 150$ см; масса модуля (мощность 100 кВт) 1000 кг.

Система формирования пучка мощного лазерного излучения. Принципиальная оптическая схема системы дистанционной передачи энергии лазерного излучения на базе модулей волоконных лазеров с выходной мощностью более 100 кВт приведена на рис. 2 (длина излучения 1,07 мкм, расходимость на выходном торце $5 \text{ мм} \times 2 \cdot 10^{-4}$ рад, КПД от первичного источника не менее 30 %).

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, направленным с Земли, передача энергии между космическими аппаратами и с космических аппаратов на

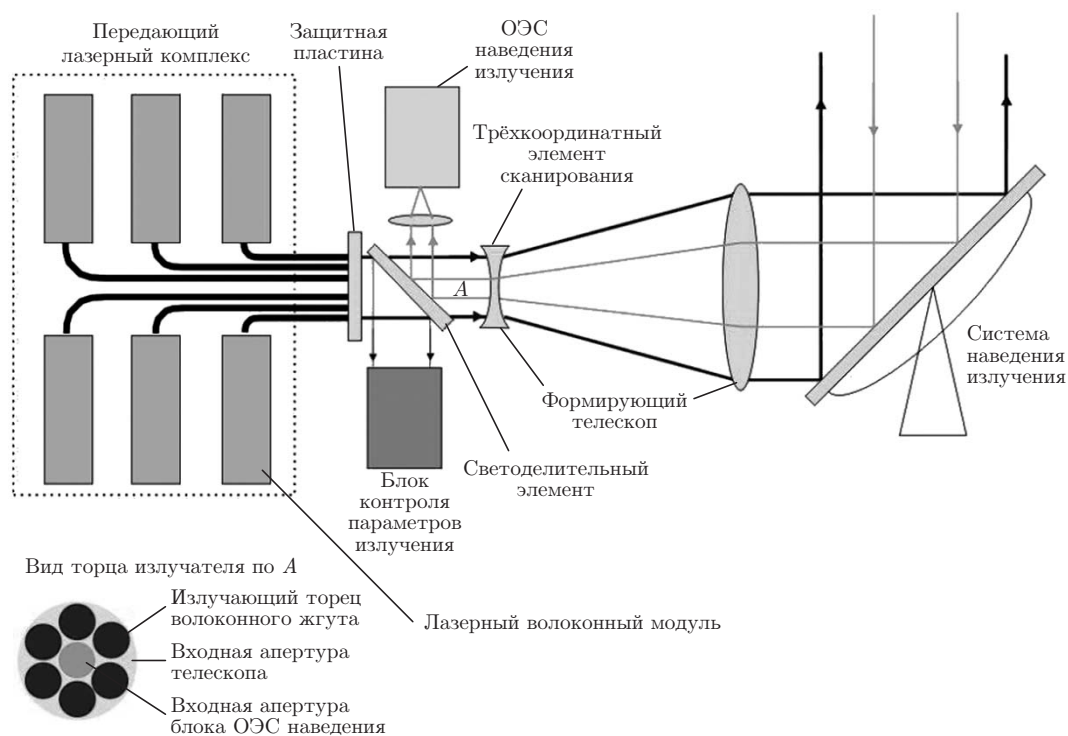


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема системы наземной компоненты дистанционной передачи энергии на базе мощных волоконных лазеров (передаваемая энергия 120–500 кВт; расходимость излучения $10^{-5}\text{--}10^{-6}$ рад; диаметр выходной апертуры излучателя 0,5–1,0 м; увеличение телескопической системы 15–30 \times ; точность стабилизации оси излучения $0,5 \cdot 10^{-5}$ рад)

Таблица 1

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

Землю, а также с Земли на высотные дирижабли [7].

Обеспечение высокой эффективности фотоэлектрического преобразования падающего лазерного излучения в широком диапазоне изменения его интенсивности является главной практической проблемой. В реальном ФЭП на базе GaAs, оптимизированном для умеренной интенсивности ($0,1\text{--}1,0\text{ Вт/см}^2$) лазерного излучения ($\lambda = 0,8\text{ мкм}$), получен КПД 40–43 %. При увеличении интенсивности ($50\text{--}70\text{ Вт/см}^2$) лазерного излучения КПД ФЭП возрастёт до 45 %. Дальнейшее увеличение интенсивности (200 Вт/см^2) приводит к снижению КПД до 42 %. В табл. 1 представлены оценки КПД преобразования энергии излучения в электричество при оптимальной интенсивности падающего излучения 100 Вт/см^2 для трёх типов лазеров [8].

Тонкоплёночные ФЭП на основе арсенида галлия, разработанные в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН, позволяют сохранить высокий КПД при уменьшении толщины структуры ФЭП до величины менее 10 мкм, что обеспечивает снижение расхода арсенида галлия более чем на порядок, и, как следствие, веса фотоэлектрических батарей в 2–3 раза. Стоимость арсенид-галлиевых фотоэлектрических батарей, легированных индием (InGaAs), составляет в настоящее время порядка 3 долл./Вт и продолжает уменьшаться.

Перспективы создания стратосферных платформ. В нашей стране создаются новейшие стратосферные воздухоплавательные комплексы ВАМП (высотная аэростатная многоцелевая платформа). Примером такого комплекса является проект стратосферного дирижабля «Аэростатика» (рис. 3), лётно-технические характеристики которого приведены в табл. 2.

В последнее время за рубежом интенсивно развиваются программы по созданию стратосферных дирижабельных платформ.

Двухкилометровый гелиевый беспилотный дирижабль "Ascender" с ионными двигателями (по проекту компании "JP Aerospace" (США)) может выходить почти на космическую орбиту. Разработчик дирижабля уверен, что наполненные гелием воздушные шары способны достигать высот 40–60 км и находиться там месяцами, подобно орбитальным космическим станциям, принимая сменные экипажи с Земли.

Дирижабль предназначен в первую очередь для американских ВВС, которые рассматривают высотные аэростаты как перспективные средства разведки и ретрансляции данных. Стоимость постройки "Ascender" составила 500 тыс. долларов. Это намного дешевле беспилотных самолётов-разведчиков, таких как "Global Hawk" (30 млн долларов вместе со всем наземным оборудованием).

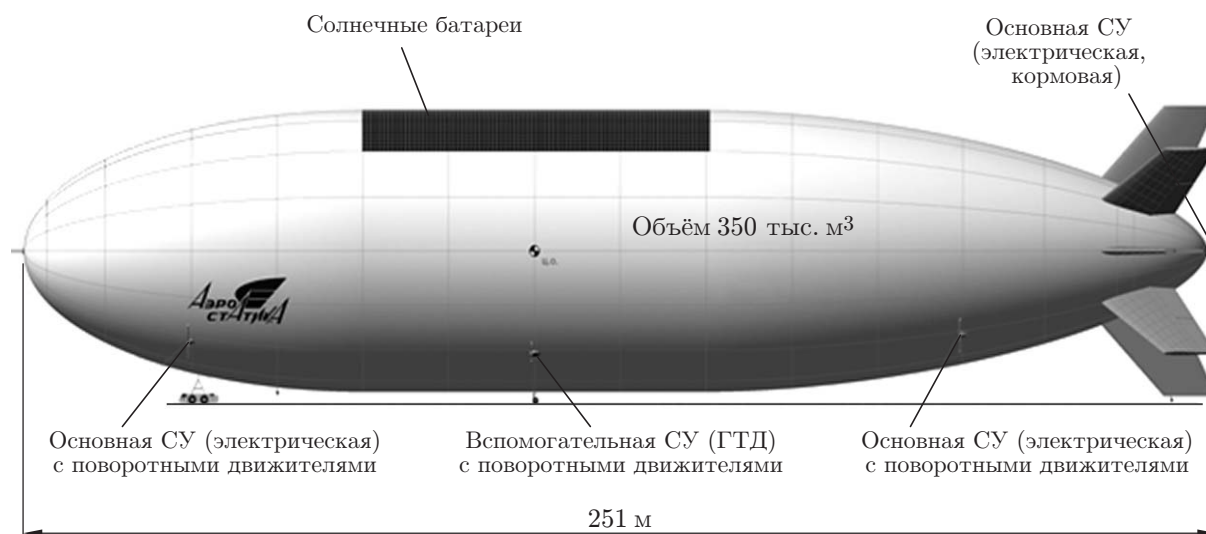


Рис. 3. Проект стратосферного дирижабля, разработанного Научно-производственной фирмой «Аэростатика» (СУ ГТД — система управления газотурбинным двигателем)

Таблица 2

Геометрические параметры	Значения	Лётные характеристики	Значения
Объём корпуса	352000 м ³	Максимальная скорость: на высоте 20 км у земли	30 м/с 25 м/с
Длина корпуса	248,5 м	Высота полёта	19–21 км
Длина дирижабля	251 м	Полезная нагрузка	1000 кг
Высота дирижабля	53 м	Мощность, потребляемая полезной нагрузкой	не менее 1 кВт
Диаметр миделевого сечения	50 м	Продолжительность беспосадочного полёта	30 суток
Удлинение корпуса	5	Дальность дистанционного управления дирижаблем	150 км
Количество газовых отсеков	13		

Другой проект компании — это пилотируемый V-образный аэростат "Orbital Ascender" длиной 1,8 км, способный швартоваться к космической станции (рис. 4) и двигаться вокруг планеты по орбите. Один оборот вокруг Земли занимал бы у гигантского корабля от 3 до 9 дней. Такие аппараты могли бы заменить нынешние космические корабли во многих сферах применения, заполняя промежуток между высотами, освоенными самолётами, и высотами, на которых летают низкоорбитальные спутники.

Компенсация фазовых искажений лазерного пучка при прохождении через атмосферу. Возможности ЛСПЭ в значительной мере определяются видом базирования. При передаче энергии лазерного излучения на высотные дирижабельные платформы (высота 20–25 км) для повышения качества пучка (уменьшения расходимости, случайного блуждания и др.) необходимо принимать меры по компенсации его фазовых искажений

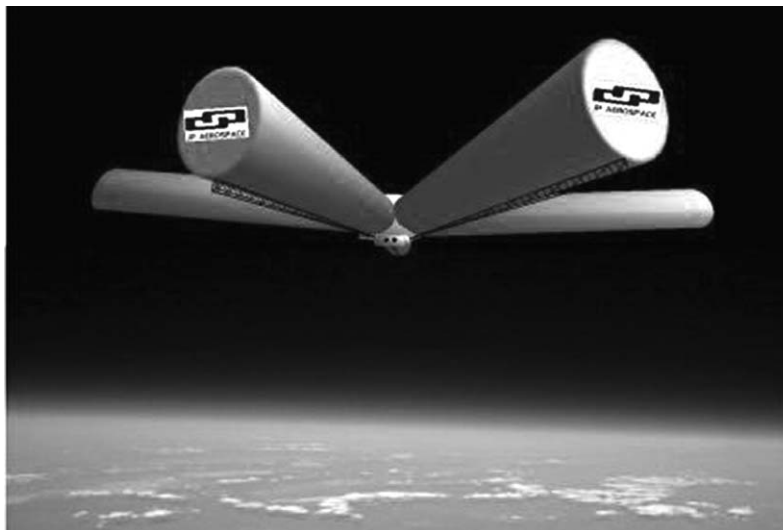


Рис. 4. "Dark Sky Station" — многокилометровая космическая станция-аэростат

с использованием технологии силовой адаптивной оптики [8]. Зеркала для неё должны изготавливаться с помощью специального промышленного оборудования, материалов и технологий. Системы коррекции мощного лазерного излучения на базе силовых деформируемых зеркал требуют решения ряда дополнительных научно-технологических проблем, включая повышение качества и лучевой стойкости оптических элементов, их охлаждение.

Макет системы ретрансляции силового излучения. Основным элементом системы дистанционной передачи энергии является силовой оптический ретранслятор (COP). Он обеспечивает приём лазерного излучения от наземного комплекса и последующее наведение пучка на воздушный, космический или наземный объект — потребитель энергии. COP должен контролировать пространственно-энергетические характеристики пришедшего пучка, корректировать искажения в его структуре.

Для отработки технологий ретрансляции лазерных пучков в Особом конструкторском бюро МГТУ МИРЭА создан макет ретранслятора и проведены его стендовые испытания. В процессе экспериментов регистрировались текущие угловые координаты φ_{x1} , φ_{y1} точечного источника с координатора системы стабилизации. Значения разности между начальным и текущим положениями ($\Delta\varphi_x = \varphi_{x1} - \varphi_{x2}$, $\Delta\varphi_y = \varphi_{y1} - \varphi_{y2}$) даны в табл. 3.

Результаты измерения ошибки наведения δ без подключения и с подключением адаптивного контура приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Результаты измерения погрешности работы наземной (нижней) и воздушной (верхней) компонент макета COP при выключенных и включённых адаптивных контурах представлены в табл. 5.

Таблица 3

$\Delta\varphi_x$, дискрет	$\Delta\varphi_y$, дискрет	$\Delta\varphi = \sqrt{(\Delta\varphi_x)^2 + (\Delta\varphi_y)^2}$, дискрет	δ , угл. с
0,859	0,459	0,974	±1,4
0,635	0,657	0,914	
1,123	0,896	1,437	
0,768	0,532	0,934	
0,639	0,435	0,773	

Таблица 4

$\Delta\varphi_x$, дискрет	$\Delta\varphi_y$, дискрет	$\Delta\varphi = \sqrt{(\Delta\varphi_x)^2 + (\Delta\varphi_y)^2}$, дискрет	δ , угл. с
0,559	0,359	0,664	±0,48
0,435	0,557	0,706	
0,623	0,596	0,862	
0,568	0,432	0,713	
0,439	0,465	0,639	

Таблица 5

Система	Радиус Фрида, см	C_n^2 , ($10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$)	СКО наклонов, угл. с	СКО aberrаций, мкм
Нижняя система без АОС	$1,3 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,1$	3	0,16
Нижняя система с АОС	$2,2 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,2$	1,4	0,04
Верхняя система без АОС	$5,73 \pm 0,05$	$0,36 \pm 0,12$	3,6	0,03
Верхняя система с АОС	$7,9 \pm 0,05$	$0,3 \pm 0,1$	2,15	0,02

Примечание. C_n^2 — параметр для характеристики турбулентных сред; АОС — адаптивная оптическая система.

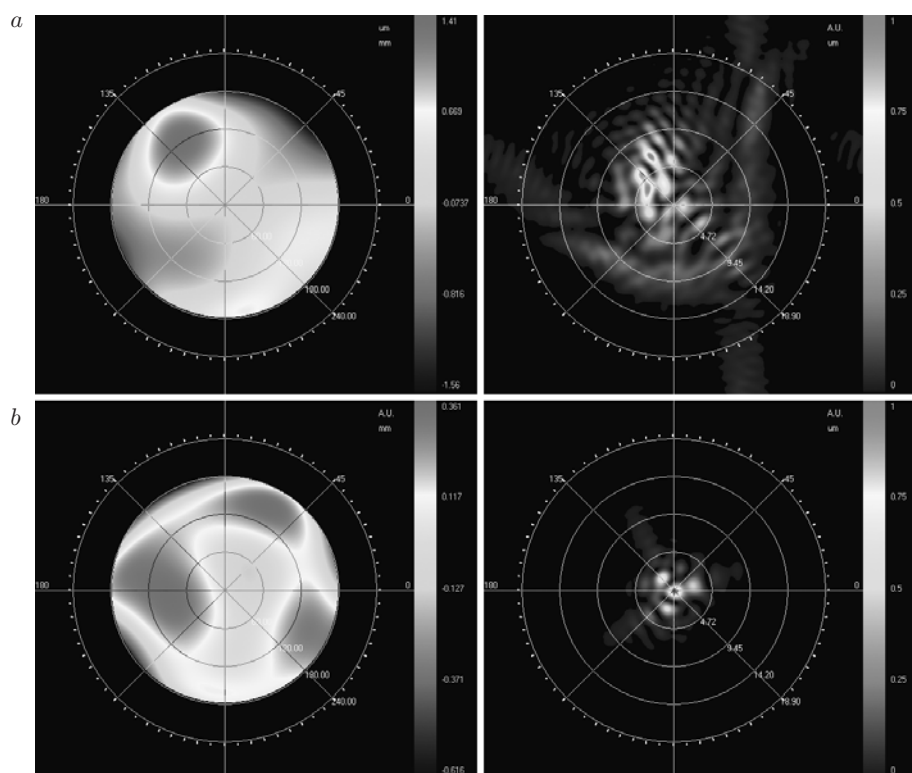


Рис. 5. Эффективность адаптивных контуров: при неработающих (а) и включённых (б) контурах адаптивной системы макета

Иллюстрация эффективности адаптивных контуров макета дана на рис. 5, *a, b*. Остаточные аберрации мелкомасштабные — их компенсация невозможна деформируемым зеркалом данной конструкции.

Заключение. Система дистанционной передачи и преобразования энергии электромагнитного излучения, рассмотренная в данной работе, 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 натуральных экспериментов по дистанционной передаче лазерной энергии на воздушные и космические объекты.

В качестве излучателя лазерной системы передачи энергии в свободном пространстве целесообразно применять оптоволоконные иттербиевые лазеры с длиной волны излучения 1,07 мкм, позволяющие передавать энергию мощностью более 100–600 кВт на стратосферные дирижабли и космические аппараты. Приёмниками излучения при этом могут служить ФЭП на основе полупроводниковых гетероструктур AlGaAs/GaAs, обеспечивающих эффективность преобразования лазерного излучения (на $\lambda = 1,08$ мкм) более 40 % в широком диапазоне плотностей мощности (0,1–200 Вт/см²).

В качестве платформ для ретрансляции лазерного излучения предлагается использовать стратосферные беспилотные дирижабли, способные функционировать в течение длительного времени (более 6 месяцев) на значительных 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, включающую силовую адаптивную оптику наземной и бортовой компонент системы ретрансляции мощных лазерных пучков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Duffner R. W.** Airborne Laser: Bullets of Light. N. Y.: Plenum Press, 1997. 398 p.
2. **Report of the APS study group on Boost-phase intercept systems for National Missile Defense: Scientific and technical issues. Section 10.1** // Пресс-релизы Американского физического общества. URL: http://americanphysicsociety.net/about/pressreleases/upload/BPI_Report.pdf (дата обращения: 29.11.2011).
3. **Грязнов Н. А., Киселев В. М.** Линейное сопряженное фазирование независимых однодиодных излучателей // Квантовая электроника. 2000. **30**, № 5. С. 421–427.
4. **Крохин О. Н.** Передача электрической энергии посредством лазерного излучения // УФН. 2006. **176**, № 4. С. 441–444.
5. **Матюхин В. Ф., Кишко В. И., Виноградский Л. М.** Энергообеспечение воздушных и космических объектов на основе технологий дистанционной передачи лазерного излучения // Сб. докл. XX Междунар. конф. «Лазеры в медицине, науке и технике». М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2009. Т. 20.
6. **Трифонов Ю. М., Андреев В. М., Сысоев В. К., Рыженко А. П.** Проект демонстрационной космической электростанции // Научно-технические технологии. 2004. **5**, № 2–3. С. 8–17.
7. **Andreev V. M., Grilikhes V. A., Romyantsev V. D.** Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight. Chichester: Wiley & Sons, 1997. 294 p.
8. **Канев Ф. Ю., Лукин В. П.** Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: ИОА СО РАН, 2005. 250 с.

