

## КОНЦЕПЦИЯ МОДУЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ЛАЗЕРНЫМ КАНАЛОМ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

© 2012 г. В. К. Сысоев\*, доктор техн. наук; К. М. Пичхадзе\*, доктор техн. наук; А. А. Верлан\*;  
Б. П. Папченко\*\*

\* Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, г. Химки, Московская область

\*\* Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: sysoev@laspace.ru

Предлагается концепция построения солнечной космической электростанции из автономных спутников, связанных информационными и энергетическими каналами. Часть спутников этой системы являются носителями лазерных каналов передачи энергии на Землю, а другие выполняют роль фотопреобразователей солнечной энергии в электрическую с последующей передачей бесконтактным магнитно-резонансным методом на спутник-излучатель.

*Ключевые слова:* солнечная космическая электростанция, магнитный резонанс, фотопреобразующие структуры, лазерный канал передачи энергии.

Коды OCIS: 350.6050, 050.0050, 060.3510

Поступила в редакцию 19.06.2012

Концепция солнечной космической электростанции (СКЭС), предполагает размещение солнечных фотобатарей на геостационарной орбите и передачи вырабатываемой энергии (на уровне до 10 ГВт) на поверхность Земли хорошо сфокусированным СВЧ пучком. Прием этой энергии производится с помощью большеразмерных ректенн [1].

Данная концепция предполагала создание космического сооружения с размерами в тысячи метров и в сотни тонн сложнейших конструкций и поэтому интерес к ней был потерян уже на идеологическом уровне. Прогресс в области технологии создания высокоэффективных солнечных фотобатарей привел к появлению в последующие годы новых проектов, в том числе и демонстрационных космических солнечных электростанций. Однако и их параметры (масса, габариты) не позволяют надеяться на их практическую реализацию в ближайшее время [1–3]. Основные технические проблемы, делающие данную концепцию солнечной космической электростанции трудно выполнимой, следующие:

1. Необходимость большеразмерной конструкции потребует многих пусков ракет носителей с компонентами электростанции и организацию трудоемких сборочных операции в космосе.

2. Организация передачи энергии с помощью СВЧ излучения на Землю при использовании диапазонов 2,45 или 5,8 ГГц с расстояния 40 000 км приводит к необходимости создания космической передающей антенны (которая к тому же потребует высокоточного наведения) с размером более 1 км, а приемную ректенну диаметром более 15 км. Такую антенну и ректенну со стабильными параметрами невозможно ни изготовить ни обеспечить их надежное функционирование.

Последние достижения в области фотопреобразователей, лазерных излучателей, композитных материалов и успехи в развитии систем управления космическими системами позволяют по-новому взглянуть на построение космической электростанции.

В настоящее время эффективно развивается технология кластерных автономных спутниковых систем, информационно связанных между собой. В NASA-DARPA такой проект получил название “F6” [4]. Предполагается разработка модульного, фрагментарного (не объединенного механически в единое целое) спутника. Такая спутниковая система будет состоять из свободно движущихся по близким орбитам различных целевых модулей, взаимодействующих друг с другом.

Идеологию программы F6 авторы предлагают распространить на построение солнечной космической электростанции. Концептуально такая электростанция может иметь следующую структуру (рис. 1):

1. Спутники-приемники солнечной энергии. Такой спутник будет состоять из: космического модуля, большеразмерной конструкции гибких фотопреобразователей с системой накопителей энергии, системы безконтактной передачи энергии на небольшие расстояния (один из возможных вариантов – магнитно резонансный передатчик).

2. Спутники-передатчики энергии на землю. Такой спутник будет состоять из: космического модуля, системы волоконных лазеров, генерирующих излучение в области 1–2 мкм, зеркальной системы передачи лазерной энергии, системы накопителей энергии, нескольких портов приема энергии со спутника-приемника солнечной энергии.

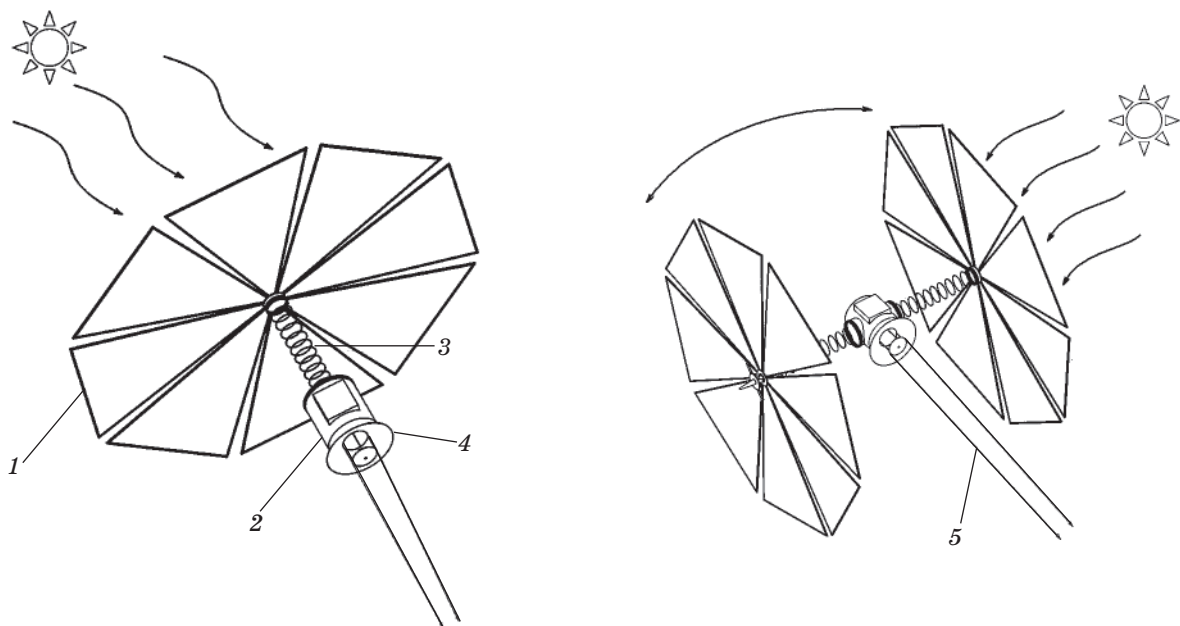
3. Фотоприемная система лазерной энергии на Земле. Такая система может устанавливаться на аэростатах с трос-кабелем.

4. Система управления с Земли космической электростанцией будет состоять из двух связанных подсистем: управление спутниковой системой, управление наведением лазерного излучения на наземную фотоприемную систему.

Важнейшим элементом концепции солнечной космической электростанции является создание трансформируемой конструкции большеразмерной тонкопленочной фотопреобразующей панели, преобразующей солнечное излучение в электрическую энергию. Конструкцию фотопреобразующей панели предполагается создавать на основе технологии солнечного паруса, разворачиваемого в космосе центробежным механизмом [5] или надувными штангами из отверждаемых композитных материалов.

Тонкопленочные фотопреобразовательные структуры успешно применены в японском проекте солнечного паруса “Ikaros”. Тонкопленочные фотопреобразователи на основе  $ZnO-CdS-CuJnGaSe_2$  позволяют получить  $250 \text{ Вт/м}^2$  при толщине преобразователей 25–35 мкм [6]. Это позволит получить при разворачивании фотопреобразующих пленочных структур до размеров  $100 \times 100$  метров более 2 МВт электрической мощности.

Выбор волоконного лазера для передачи энергии со спутника-передатчика на Землю обусловлен следующими причинами: возможностью передачи больших мощностей, получением на Земле небольшого пятна на фотоприемных системах (десятки метров), что на несколько порядков меньше чем в проектах с СВЧ каналом передачи энергии (тысячи ме-



**Рис. 1.** Схема модульной солнечной космической электростанции. 1 – спутник приемник солнечной энергии, 2 – спутник передатчик, 3 – магниторезонансный передатчик энергии, 4 – зеркальная система передачи лазерного излучения на Землю, 5 – трех спутниковая система.

тров). Прогресс в области развития волоконных лазеров весьма значителен – мощность достигла величин более 50 кВт [7], эффективность порядка 80% [8].

Расположение наземных фотопреобразователей на высотных привязных аэростатах определяется необходимостью избежать поглощения лазерного излучения аэрозолем гидроксидов нижних слоев атмосферы и это будет выгодно как с точки зрения экологии, так и возможностью установки в любом районе, тем более имеется технология решения в виде уже эксплуатируемых привязных высотных радиоаэростанций. Наземные фотопреобразователи будут работать от двух источников энергии – лазерного излучения и от солнечного излучения, что увеличит эффективность всей электростанции.

Технология в области магниторезонансной бесконтактной передачи энергии “Witricity” [9] достигла впечатляющих результатов: КПД до 90%, мощность передачи несколько киловатт на расстояние более метра. Дальнейшее развитие данной системы бесконтактной передачи энергии к началу создания космических электростанций позволит передавать большие мощности до нескольких метров.

Решение проблемы высокоточного наведения мощных лазерных пучков на наземную фотоприемную систему можно решить путем создания адаптивной обратной связи между лазерными излучателями и наземной фотоприемной системой (рис. 2) [10]. Для этого предлагается система, которая использует обратную оптическую связь для регулирования направления лазерного луча с помощью нелинейных оптических методов. С этой целью уголкового отражатели устанавливаются в середине площадки наземной фотоприемной системы. При получении отраженного лазерного излучения производится обращение волнового фронта, который через волновые усилители направляет лазерное излучение на фотоприемную площадку аэростата.

Ключевыми проблемами, которые необходимо решить, для реализации предлагаемой схемы космической электростанции являются:

- Разработка больших размеров фотопреобразующих структур с системой накопления электроэнергии и системой бесконтактной магниторезонансной передачи энергии.

- Разработка наземно-космической системы высокоточного управления группировкой космических аппаратов, а также системы вы-

\* \* \* \* \*

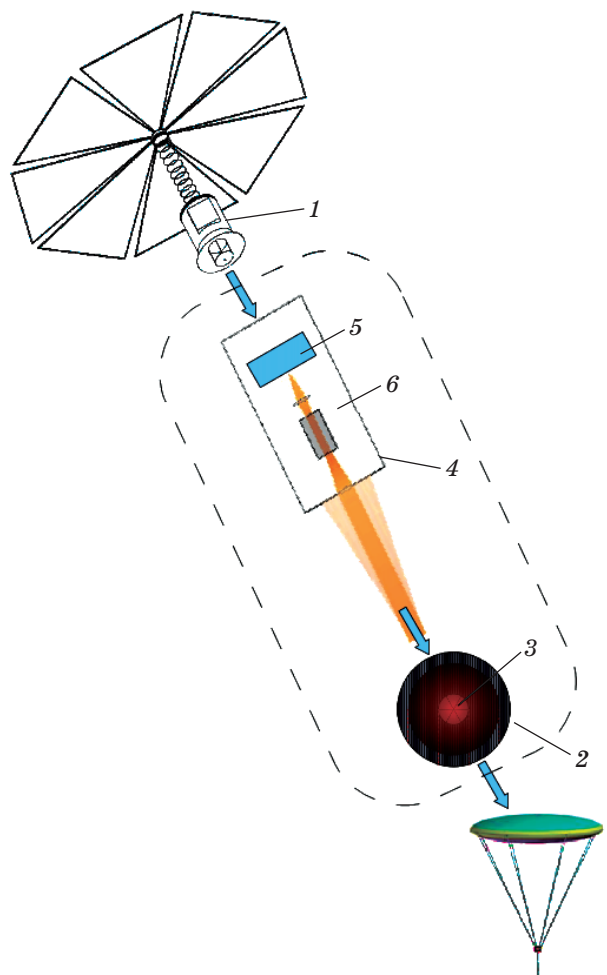


Рис. 2. Схема наведения лазерного канала передачи энергии с использованием обратной связи на основе нелинейно оптических методов. 1 – спутник передатчик, 2 – фотоприемная лазерная система, 3 – площадка уголкового отражателя, 4 – передатчик лазерного излучения, 5 – устройство обращения обратного фронта, 6 – усилитель.

сокоточного наведения лазерного излучения со спутника передатчика на фотопреобразующую станцию, размещенную на Земле.

- Создание системы высокоэффективной волоконных лазеров с высокоэффективной системой охлаждения светодиодной накачки этих лазеров.

Предлагаемая концепция позволит решить основную проблему при разработке солнечных космических электростанций это необходимость создания больших площадей фотопреобразователей для получения необходимых мощностей путем создания сети информационно и энергетически связанных автономных спутников.

Работа выполнена в рамках осуществления гранта П775 ФЦП “Научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.”

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Glaser P.E.* Power from the Sun: its Future: Science. 1968. V. 162. P. 867.
  2. *Сысоев В.К., Понамаренко А.Д., Верлан А.А.* Мировые тенденции развития космических электростанций // Альтернативный киловатт. 2011. № 5 (11). С. 14–18.
  3. *Сысоев В.К., Пичхадзе К.М., Арапов Е.А.* Анализ возможных схем построения космических солнечных электростанций // Полет. 2010. № 6. С. 34–47.
  4. *Shah N., Brown O.C.* Fractionated Satellites: Changing the Future of Risk and Opportunity for Space Systems // High Frontier. 2008. V. 5. № 1. P. 29–36.
  5. *Комков В.А., Мельников В.М., Харлов Б.Н.* Формируемые центробежными силами космические солнечные батареи. М.: Черос. 2007. 188 с.
  6. *Ramanathan K., Contreras M.A., Perkins C.L., Asher S., Hasoon F.S., Keane J., et al.* Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> thin-film solar cells // Progress in Photovoltaics. 2003. № 11 (4). P. 225–230.
  7. IPG Photonics Corporation. The Fiber Laser Company™ // Needham's 14<sup>th</sup> Annual Growth Conference. January 10, 2012.
  8. *Курков А.С., Шолохов Е.М., Цветков В.Б., Маракулин А.В., Минашина Л.А., Медведков О.И., Косолапов А.Ф.* Гольмиевый волоконный лазер с рекордной квантовой эффективностью // Квант. электрон. 2001. № 41(6). С. 492–494.
  9. *Kurs A., Moftatt R., Soljacic M.* Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices // Appl. Phys. Letters. 2010. V. 96. № 4. P. 44–109.
  10. *Schafer C.A., Gray D.* Transmission media appropriate laser-microwave solar power satellite system // Acta Astronautica. 2012. V. 79. № 11. P. 140–156.
-