

Оценка эффективности космической солнечной электростанции на основе лазерного канала передачи энергии

Вятлев П.А.*, **Дмитриев А.О.****, **Карчаев Х.Ж.*****, **Сысоев В.К.******

Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина,

Ленинградская, 24, Химки, 141400, Россия

**e-mail: vyatlev@laspase.ru*

***e-mail: dao@laspase.ru*

****e-mail: kar@laspase.ru*

*****e-mail: sysoev@laspase.ru*

Аннотация

Анализируется эффективность космической солнечной электростанции с использованием лазерного канала передачи энергии, концепция системы управления наведением лазерного канала передачи энергии такой электростанции, показана необходимость создания демонстрационной космической солнечной электростанции на основе имеющейся ракетно-космической и оптико-электронной техники.

Ключевые слова: космическая солнечная электростанция, лазерное излучение, нелинейная оптика.

В течение многих десятилетий (с 1980 гг.) активно прорабатывается концепция космических солнечных электростанций (КСЭС), предполагающих передачу собранного фотоэлектричества с помощью канала передачи энергии на наземный приёмный пункт с различных орбит от геостационарной до низкоорбитальной. [1,2]

Реализация промышленной космической солнечной электростанции позволит получить экологически чистый источник энергии независимый от природных ресурсов Земли.

Подробный анализ имеющихся проектов данного типа электростанций показывает, что такой тип солнечных электростанций имеет три трудноразрешимые физико-технические проблемы:

- для получения больших мощностей необходимо иметь большую площадь фотопреобразователей в космосе;
- получение системы преобразования энергии от Солнца до Земли с высокой эффективностью;
- создание системы наведения канала передачи энергии с высокой точностью.

К этим проблемам относится также проблема утилизации больших мощностей тепловыделения генераторов излучения на борту космических аппаратов.

Первую проблему предлагается решить следующим образом

- максимально поднять КПД фотопреобразователей. Работы в этом направлении идут достаточно успешно [3-4];

– осуществлять роботизированную сборку больших конструкций на геостационарной орбите. Имеется детальный проект японской фирмы МНИ [5]. В этом проекте предполагается создание 1.25-километрового высокостабильного большеразмерного СВЧ-излучателя по технологии фазирования антенных решеток (АФАР), управляемого наземным высокостабильным пилотным радиосигналом.

И конечно ещё один путь решения создания больших конструкций – это создание большого поля фотопреобразователей и антенн СВЧ-излучателей из отдельных автономных космических аппаратов (КА), т.е. кластерная технология, но это решение [2] требует создания новых методов фазирования по пилотному высокостабильному радиосигналу с Земли не только отдельной конструкцией СВЧ-излучателей на автономном космическом аппарате, но и всех излучателей кластера таких автономных космических аппаратов. Имеющиеся тенденции развития технологий синхронной информационно-связанных кластерных спутниковых систем «F6» позволит в будущем решить эту проблему [6].

В последнее время большое развитие получила технология передачи энергии с помощью лазерного излучения, так как КПД и мощности разрабатываемых лазеров за последние 10 лет резко возросли и с учетом того что расходимость лазерного излучения очень мала что позволяет создавать наземные приемные площадки энергии с размерами на несколько порядков меньше чем в случае использования СВЧ излучения. К тому же приемные наземные фотоприемные устройства могут работать как от лазерного, так и от солнечного излучения тем самым повышая эффективность всей солнечной электростанции в целом.

Поэтому далее рассмотрим космические солнечные электростанции с лазерным каналом передачи энергии.

Вторая проблема это эффективность всей электростанции. Оно, конечно, определяется цепочкой последовательных систем данной системы как показано на рис.1 и может достигать более 20% .

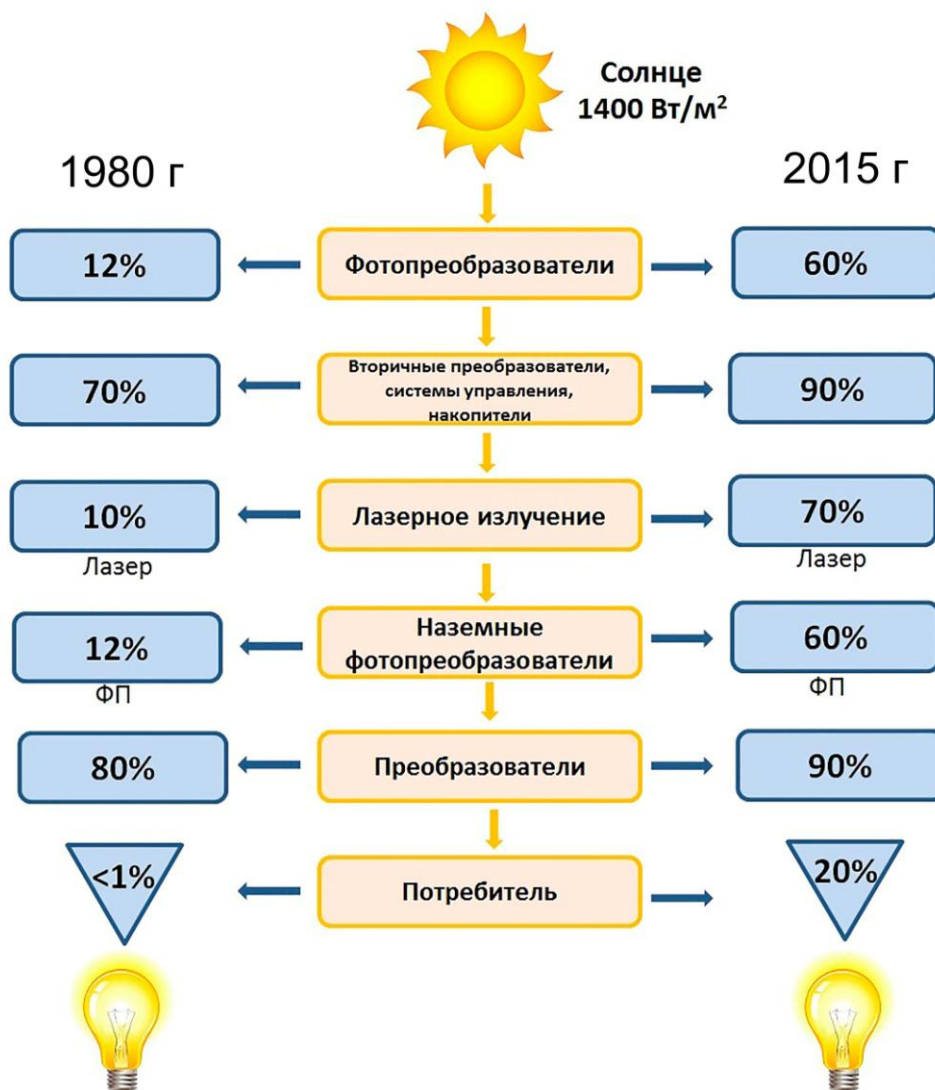


Рис.1. Оценочная диаграмма эффективности космической

солнечной электростанции с лазерным каналом передачи энергии

На данном рисунке показаны оценки временного изменения данной цепочки эффективности за более тридцать лет, которое увеличивалась с 1% на более 20%.

Можно ожидать, что к моменту осуществления первого проекта демонстрационной космической солнечной электростанции кпд особенно фотопреобразователей и лазеров будет реализовано в промышленном виде.

Эти данные подтверждают работы [7,8], которые приводят рассчитанные оценки эффективности космической солнечной электростанции: для варианта с СВЧ – каналом – более 30%, для варианта с лазерным каналом – более 20%. Такой уровень эффективности и последние достижения в области оптико-электронной технологии позволяют проводить проектирование промышленных КСЭС и в первую очередь демонстрационный вариант КСЭС.

И наконец, третья проблема это высокоточное наведение канала передачи энергии на Землю. В данной статье рассмотрим только лазерный канал передачи энергии. Данный канал обладает одним важным свойством – малой расходимостью, что с одной стороны позволяет иметь приемные наземные фотомодули небольших размеров, но с другой стороны усложняет задачу системы наведения и удержания лазерного пучка на этом фотомодуле. В статье [8] при использовании зеркала 3.5 мм рассчитывают получить расходимость от лазерного излучения до 0.1 мкрад и засвечивать наземную фотоприемную площадку диаметром около 30 м. Предполагается, что данная система будет иметь систему наведения по лазерным маякам, установленным на наземных фотоприемных площадках, что позволяет удерживать лазерный луч на площадке фотоприемников при точности ориентации космического аппарата 0.1° .

А с учётом того что в настоящее время успешно разрабатывается адаптивная оптика астрономического качества диаметром 6,5 м, проект WST [9], что позволит формировать на основе данной технологии пучок лазерного излучения с высоким качеством и малой расходимостью для будущих космических солнечных электростанций

Но для космических солнечных электростанций с лазерным каналом передачи кроме адаптивного управления зеркалами необходимо иметь концепцию наведения лазерного пучка на наземный пункт.

Предполагаемая концепция состоит из комплекса систем последовательного высокоточного наведения и высокостабильного удержания лазерного пучка на приемной наземной площадке фотомодуля показан на рис.2.

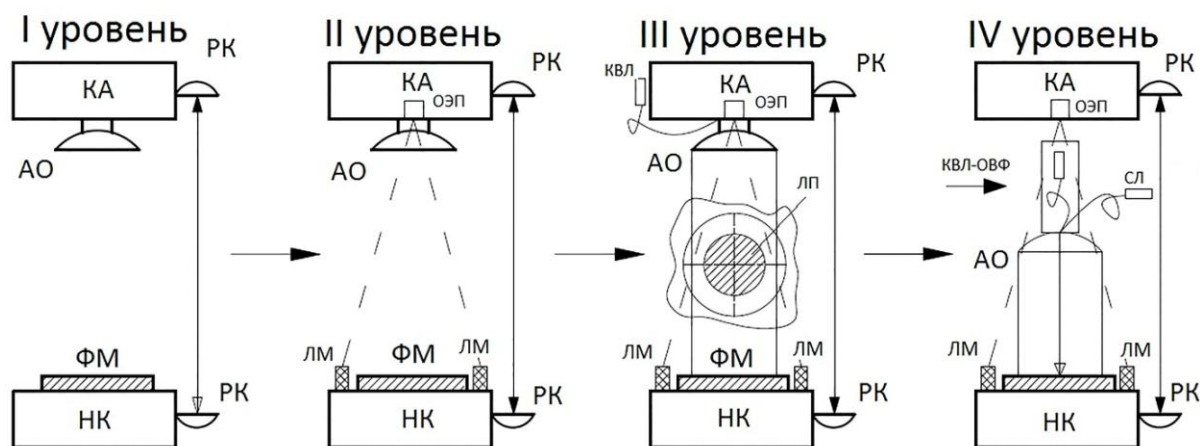


Рис.2. Схема наведения и удержания лазерного канала передачи энергии на наземный пункт

(КА – космический аппарат, НК – наземный комплекс, РК – радиокомплекс, ФМ – фотомодули, АО – адаптивная оптика, ЛМ – лазерные маяки, ОЭН – оптико-электронный прибор, КВЛ – комплекс волоконных лазеров, ЛП – лазерное пятно,

СЛ – сигнальный лазер, КВЛ-ОВФ – комплекс волоконных лазеров и обращение волнового фронта)

Конечно, это только одна из возможных схем, разрабатываемых в настоящее время:

– первый уровень – это использование технологии применяемой для определения положения космического аппарата относительно наземной фотоприемной площадки. На этом уровне используются радиотехнические средства, которые могут быть дополнены лазерным дальномером с уголковым отражателем и системой ГЛОНАСС (в случае приемлимых орбитальных характеристик космического аппарата).

– второй уровень – это наведение адаптивной зеркальной системы лазерного передатчика на фотомодули наземной площадки. Для этого будет использоваться лазерные маяки на основе мощных лазерных полупроводниковых диодов и специализированная ТВ-камера на борту космического аппарата (ОЭП).

– третий уровень это использование передаваемого лазерного излучения комплекса волоконных лазеров. При этом секционированный фотомодуль наземной площадки можно использовать как измерительную площадку характера движения лазерного излучения по этой площадке – полученную информацию передавать на борт космического аппарата для управления адаптивной зеркальной системой. Одной из важнейших проблем управления такой системой является время задержки связанное с прохождением радиосигналом дистанцию наземного пункта –

космический аппарат (до 40.000 км). Имеющиеся технологии основанные на математическом моделировании, позволяет учитывать данное запоздание.

Наиболее интересным вариантом наведения лазерного пучка предполагается в варианте IV уровня. Здесь высокоточное наведение лазерных пучков в конечном итоге будет решаться путем использования систем обратной связи базирующейся на использовании одномодовых волоконных лазеров и систем нелинейной оптики [10], которые позволяют высокоточно удерживать лазерный пучок на приемной площадке. Инструментально эта система дополняет предыдущую следующими компонентами – сигнальным лазером на борту КА и на наземном фотомодуле (НК) уголковым отражателем. Отраженное сигнальное излучение поступает в комплекс волоконно-оптических усилителей и после усиления и обращения волнового фронта через адаптивную зеркальную систему попадает на наземные фотомодули, т.е. система самонаведения на «бликающий» отклик.

Использование принципов нелинейной оптики – усиление сверхслабых лазерных сигналов и обращение волнового фронта, позволяет практически реализовать ОВФ – концентрацию запасенной в лазерной среде энергии непосредственно на удаленном объекте, практически, в режиме самонаведения.

Высокоточное наведение СВЧ-пучка на наземную ректенну решается также с использованием систем АФАР космического аппарата, управляемого высокостабильным пилотным радиосигналом с наземного пункта [11], для космических солнечных электростанций с СВЧ-каналом передачи энергии.

Одним из возможным факторов ограничивающих потенциал космических солнечных электростанций – это лучевая прочность атмосферы т.е. ионизация атмосферных газов, приводящая к плазмообразованию.

Лучевая прочность атмосферы в зоне канала передачи энергии определяется плотностью передаваемой мощности. В случае использования СВЧ излучения в работе [12] приводят следующие цифры: безэлектронный пробой атмосферы более 10 МВт/м^2 . Что превышает цифры, приведённые автором статьи [7]. Что касается лучевой прочности атмосферы в зоне лазерного излучения у автора этой работы ошибочного сведения. Как известно лучевая прочность атмосферы лазерного излучения имеет ярко выраженную спектральную зависимость [13]: низкая лучевая прочность в области ультрафиолетовых лазеров (N_2 , эксимеры, третья гармоника Nd) и высокая лучевая прочность в области излучении потенциального генератора канала передачи энергии – волоконных лазеров (1.02-1.55 мкм). Это величина порядка 100 МВт/см^2 , что при площади 100 м^2 приемной наземной площадки фотомодуля составит величину передаваемой мощности 1000 ГВт, что намного выше предполагаемой мощности будущих электростанций (10ГВт).

Конечно, для лазерного канала передачи энергии имеется проблема влияния атмосферы: аэрозоли и турбулентность, однако это можно решить за счёт рационального размещения наземных фотоприемных модулей: высокогорье, привязные высотные аэростаты, пустынные районы, морские платформы

Известно, что после долгих лет эйфории связанной с созданием электростанций на основе термоядерного цикла стала понятна степень

неразрешимости физико-технических проблем данного направления, и было принято решение создавать демонстрационный реактор с нулевым КПД, который позволит поэтапно решить все проблемы для реализации промышленной электростанции данного типа.

Солнечные космические электростанции, в отличие от термоядерных электростанций, не имеют неразрешимых физико-технических проблем, а имеют финансово-технические трудности, которые может решить современная оптоэлектронная и космическая технологии.

Для развития технологии создания промышленных космических солнечных электростанций необходимо создать демонстрационную солнечную космическую электростанцию на базе имеющейся ракетно-космической техники, что позволит осуществить отработку в первую очередь высокоточного наведения, удержание лазерного луча на наземной фотоприемной площадке и создание высокоэффективной системы утилизации тепла генераторов излучения канала передачи энергии.

Создание такой демонстрационной солнечной космической электростанции, на основе имеющейся ракетно-космической техники с уровнем передаваемой мощности 10-100кВт, вполне реально для сегодняшнего дня и все полученные технические решения можно будет использовать, для реализации как будущей промышленной СКЭС, так и для создания сетевой космической системы «ядерный энергоблок – малые спутники» [14].

Считаем что, автор работы [7] делает ошибочные выводы о бесперспективности разработки солнечных космических электростанций взяв за постулат два положения:

– необходимость создания большеразмерных (км) СВЧ-зеркальных передающих антенн с высокой точностью поверхности, что действительно технологически невозможно. Но автор не учел, что развитие СВЧ передающих излучателей для будущих электростанций ведется методами АФАР управлением по пилотному высокостабильному радиоизлучателю с Земли, не требуется высокоточное изготовление поверхности излучающей антенны. Для лазерного канала проблема наведения решается методом адаптивной оптики и также созданием лазерных систем с обращением волнового фронта;

– низкая лучевая прочность атмосферы приводит к огромным потерям мощности. Однако экспериментальные работы показывают, что лазерная лучевая прочность наземной атмосферы намного выше цифр приводимых автором.

Конечно, в России в печати, в том числе и научно-технической, появилось много «шапкозакидательских» публикаций о реализации в ближайшее время 10 ГВт электростанций без всякого обоснования, что могло и вызывает у многих определенный скепсис.

Но достаточно посмотреть работы постоянной секции конгресса Международной астронавтической федерации (IAF) за последние десять лет по космическим солнечным электростанциям, то видно, что многочисленные группы проводят большой объем теоретических и экспериментальных работ, в том числе и

российских участников [15-17], поэтому считаем, что постановка научно-исследовательской работы по данной тематике на государственном уровне актуальна.

Библиографический список

1. Ванке В.А., Лесков Л.В., Лукьянов А.В. Космические энергосистемы. – М: Машиностроение, 1990. – 230 с.
2. Сысоев В.К., Пичхадзе К.М., Грешилов П.А, Верлан А.А. Солнечные космические электростанции – пути развития. – М: МАИ-Принт, 2013. - 160 с.
3. Андреев В.М. Нанотехнология для солнечной фотоэнергетики // Альтернативная энергетика и экология. 2007. №2(46). С.93-98.
4. Jayanta Mukherjee, Wolfgang Wulfken, Holger Hartje, Frank Stiensiek, Matthew Perren, Stephen J. Sweeney. *Demonstration of eye-safe (1550 nm) terrestrial laser power beaming at 30 m and subsequent conversion into electrical power using dedicated photovoltaics* // 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, Florida, USA, June 2013. P. 1074-1077
5. Nobuniko Fukuda, Kenichi Anma, Koki Nimuro. *Concept study on space solar power system* // 62nd International Astronautical Congress, Cape Town. Oct. 2011, N. IAC-11-C3.1.6 P.1-4.
6. Нагамато М., Сакаси С., Наруо И., Ванке В.А. Работа института космических исследований в области космической энергетики // Успехи физических наук. 1994. Т.164. №6. С. 631-641.

7. Коленников Е.П. Оценка эффективности передачи энергии с геостационарной орбиты на Землю // Космонавтика и ракетостроение. 2015. №83. С. 117-122.
8. Cougnet C., Gerber B., Steinsiek F., Laine R, Perren M. *The 10 kW satellite: a first operational step for space based solar power* // 61nd IAC. Oct.2010. № IAC-10-C.3.4.2. P.1-6.
9. Greenhouse, Matthew A., et al., *Status of the James Webb Space Telescope Integrated Science Instrument Module System* // Proceedings of the SPIE Vol. 7731, 773108, 2010.
10. Schafer C.A., Gray D. *Transmission media appropriate laser-microwave solar power satellite system* // Acta Astronautica 79 (2012), pp. 140-156.
11. Сысоев В.К., Трифонов Ю.М., Андреев В.М., Пичхадзе К.М., Рыженко А.П., Долгополов В.П., Абросимов А.И., Нестерин И.М. Проект демонстрационной космической электростанции // Научные технологии. 2004. Т.5. №2-3. С. 8-17.
12. Пантелеев С.В. Физические ограничения доставки мощного сверхточного электромагнитного излучения с космической платформы на остров Хелен // Журнал радиоэлектроники. 2012. №6. С. 1-12.
13. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов - М.: Наука, 1974. 307 с.
14. Барабанов А.А., Ребров С.Г., Папченко Б.П., Пичхадзе К.М. и др. Предложение по организации связанных космических систем из малых космических

аппаратов и транспортного энергетического модуля с ядерной энергетической установкой // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. №1. С. 34-40.

15. Chertok B.E., Evdokimov R.A., Legostaev V.P., Lopota V.A., Sokolov B.A., Tugaenko V.Yu. *Remote electric power transfer between spacecrafts by infrared beamed energy* // AIP Conference Proceedings. 'Beamed Energy Propulsion – Seventh International Symposium'. 2011. pp. 489-49.

16. Богушевская В.А., Заяц О.В., Масляков Я.Н., Мацак И.С., Никонов А.А., Савельев В.В., Шептунов А.А. Разработка системы дистанционного энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ, 2014, №51: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29047>

17. Мельников В.М., Матюшенко И. Н., Чернова Н.А., Харлов Б.Н. Проблемы создания в космосе крупногабаритных конструкций // Труды МАИ, 2014, №78: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53742>