

ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ МИКРОВОЛНОВЫМ ЛУЧОМ

Введение

В настоящее время все более актуальными становятся вопросы, связанные с разработкой инновационных технологий создания новых высокоэффективных информационно-энергетических систем беспроводной передачи энергии (БПЭ) микроволновым лучом для решения прикладных задач. Поэтому во всем мире ведутся активные исследования в этом направлении. БПЭ основана на передаче энергии на значительные расстояния с помощью сфокусированного пучка электромагнитного излучения в микроволновом или оптическом диапазонах и последующем его преобразовании в энергию постоянного тока с помощью антенн-выпрямителей (ректенн) (рис.1).

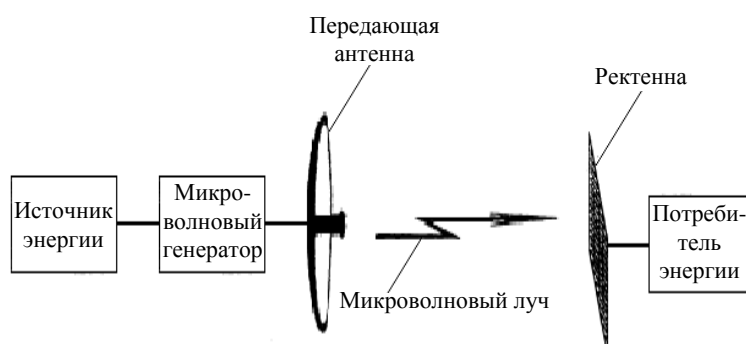


Рис. 1. Структурная схема системы беспроводной передачи энергии

Идея беспроводной передачи энергии не нова и впервые была высказана в 1899 г. Н. Тесла, но он не смог найти пути ее практического решения. Полвека спустя вопросы передачи энергии с помощью электромагнитного излучения высокой частоты были рассмотрены в общей постановке П.Л. Капицей. Однако практическое воплощение идеи беспроводной передачи энергии микроволновым лучом стало возможным в 60-е годы XX в. в связи с развитием радиолокации, освоением дециметровых и сантиметровых диапазонов волн, появлением основополагающих работ Губо по максимизации КПД передачи между двумя апертурами [1] и в связи с изобретением В. Брауном ректенны [2]. Результатом этих работ стало создание нового типа энергетических систем – систем передачи энергии с помощью микроволнового луча.

В настоящей работе рассмотрены исторические этапы развития беспроводной передачи энергии микроволновым лучом, проанализировано современное состояние исследований и перспектив ее развития.

1. Первые достижения в области БПЭ

Возможность создания систем БПЭ и целесообразность их практического использования была подтверждена результатами демонстрационных экспериментов. Четыре из них отмечены в работе [3] как первые важнейшие достижения в области беспроводной передачи энергии.

Прежде всего – это первая демонстрация под руководством В. Брауна полета летательного аппарата (ЛА) (рис. 2), запитываемого микроволновым лучом, который непрерывно оставался в воздухе в течение 10 часов на высоте порядка 18 метров [2]. В этом эксперименте использовалась ректенна с кремниевыми выпрямительными диодами, имевшими низкий КПД. При второй демонстрации полета вертолета КПД удалось повысить за счет применения ректенн с диодами Шоттки [4]. В этом эксперименте впервые использовались

электронные системы наведения микроволнового луча на апертуру ректенны, которые должны быть неотъемлемой частью систем БПЭ.

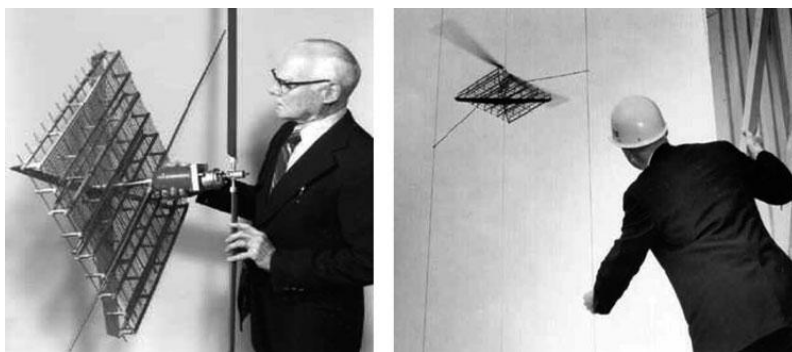


Рис. 2. ЛА, запитываемый микроволновым лучом (1964 г.)

В. Браун считал, что передача энергии микроволновым лучом будет технологическим прорывом в организации электродвижения ЛА [3]. Прежде всего, это обусловлено параметрами ректенн, которые как источник постоянного тока имеют низкое отношение выходной мощности к массе – 1 кВт/кг. Применение систем БПЭ для питания электродвигателей позволит создать транспортную систему, которая будет иметь отношение массы ЛА к массе полезного груза на порядок меньше, чем ЛА с химическим двигателем.

Был проведен лабораторный опыт по беспроводной передаче энергии, в результате которого была доказана возможность достижения КПД систем БПЭ 54 % с учетом КПД преобразования энергии первичного источника постоянного тока в энергию СВЧ [4].

Наиболее крупномасштабный полигонный эксперимент по передаче 30 кВт СВЧ-мощности (рис. 3) на расстояние в одну морскую милю (1,6 км) был проведен в 1975 г. [4]. Ректенна содержала примерно пять тысяч приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), каждый из которых преобразовывал 6 Вт СВЧ-мощности. Измеренный КПД ректенны равнялся 82 % на частоте 2388 МГц.

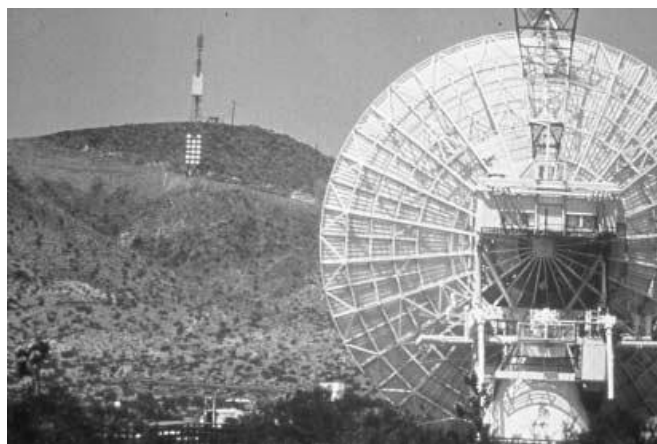


Рис. 3. Эксперимент по БПЭ, проведенный в Голдстоуне (США)

2. Обзор состояния разработок и перспектив создания систем БПЭ

Демонстрационные эксперименты позволили осознать реальность осуществления БПЭ с помощью микроволнового луча и приступить к разработке большого числа различных проектов систем БПЭ, в том числе используемых для подпитки высотных платформ [4 – 7] с поверхности Земли либо с низкой или геостационарной орбит, космических аппаратов [8 – 11], электрических двигательных установок межорбитальных буксиров [12 – 15]. Обсуждалась также возможность энергоснабжения наземных потребителей от солнечных космических электростанций (СКЭС) [16 – 21] и др. В результате исследований были определены области применения и перспективные направления развития систем БПЭ [3, 22].

В таблице указаны способы беспроводной передачи энергии и дана их краткая характеристика и области применения (см. также рис. 4).

Метод передачи энергии	Индукционный	Микроволновым лучом	Лазерным лучом	Извлечение энергии из окружающего ЭМП
Особенности метода	Основан на явлении электромагнитной индукции. Небольшое расстояние передачи энергии (ближняя зона)	Передача энергии на значительные расстояния. Используется фокусировка электромагнитного излучения (ректенна располагается в зоне Френеля)	Энергия на расстояние передается лазерным лучом	Ректенна извлекает энергию из окружающего ЭМП, которое создают различные радиотехнические устройства. Преобразование оптического излучения в постоянный
Основные области применения	- Беспроводная зарядка мобильных терминалов; - беспроводная зарядка аккумуляторных батарей электромобилей	- СКЭС; - дистанционное энергоснабжение космических аппаратов, ЛА; - доставка энергии наземным потребителям в труднодоступные районы; - беспроводное дистанционное энергоснабжение различных датчиков, специальной аппаратуры передачи информации и телеметрических данных	- СКЭС; - дистанционное энергоснабжение космических аппаратов, стратосферных платформ с космических орбит	- Энергоснабжение маломощных мобильных терминалов и всевозможных датчиков; - альтернатива солнечным батареям

В работе рассмотрены особенности всех способов беспроводной передачи энергии, кроме индукционного.

2.1. Солнечные космические электростанции

Проблема энергетических неисчерпаемых ресурсов была и остается самой важной для человечества. Большой интерес всегда представляла солнечная энергетика. Ее привлекательность – это экономическая эффективность и экологическая чистота. В связи с этим особое место и наибольший интерес занимали революционные предложения по использованию солнечной энергии в концепции солнечной космической электростанции, высказанные в 70 – 80-е годы XX века П. Глейзером. По специальной научно-исследовательской программе Министерства энергетики США (ДООЕ) и НАСА в 1977 – 1980 гг. были проведены работы, в которых рассматривалась возможность создания в начале XXI века орбитальных СКЭС [18]. В СКЭС предполагалось размещать солнечные фотопреобразователи на геостационарной орбите, вырабатываемую ими энергию (на уровне до 5 ГВт) передавать на поверхность Земли хорошо сфокусированным микроволновым пучком (рис. 5 [23]), а прием этой энергии производить с помощью крупноапертурных ректенн.

Считалось, что СКЭС может стать одним из крупномасштабных источников энергии в XXI веке. Результаты этих работ позволили сформировать основные представления о физических и технических особенностях солнечных космических электростанций. Но технико-экономический анализ этих проектов показал их несостоятельность на данном этапе развития науки и техники, и в течение нескольких десятилетий интерес к данной проблеме был потерян, но при этом был дан толчок развитию новых научных направлений, в

частности теории антенн с нелинейными элементами, к которым относятся и антенны-выпрямители.

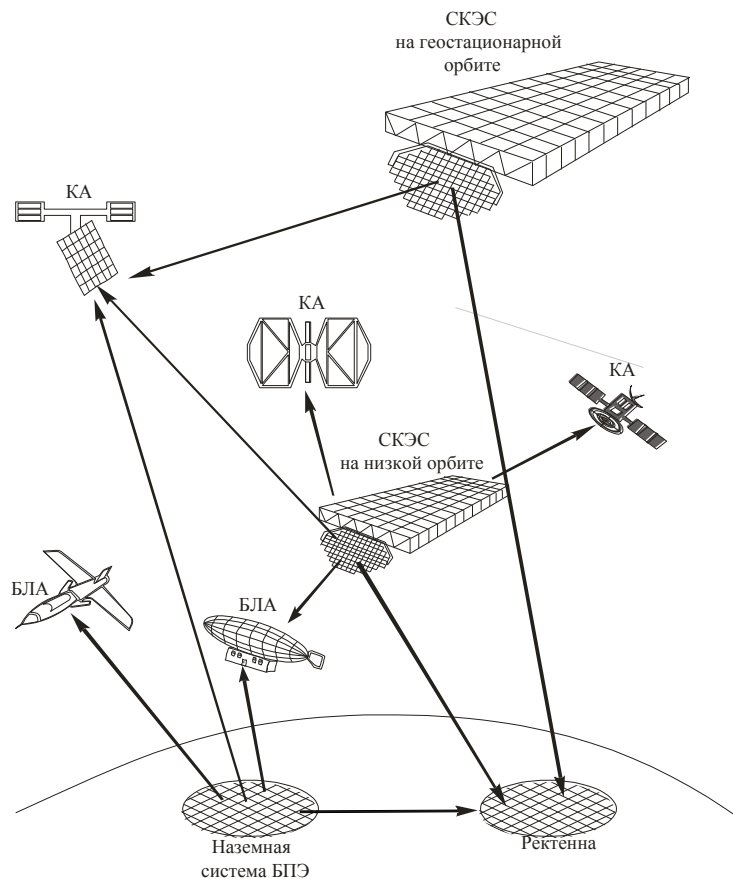


Рис. 4. Области применения СПЭ

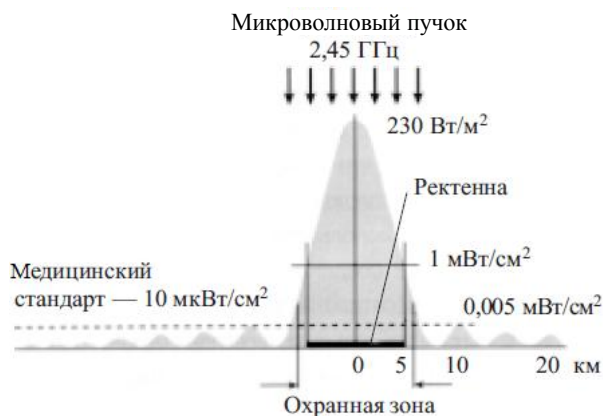


Рис. 5. Распределение плотности потока мощности, создаваемой СКЭС на поверхности Земли

Значительный прогресс в развитии космической техники, и особенно оптико-электронных систем (в первую очередь, фотопреобразователей), нанотехнологий, а также повторяющиеся энергетические кризисы с конца XX века, обострение проблем экологических и климатических последствий воздействия традиционной энергетики на окружающую среду [23 – 25], возможность реализации с помощью систем СПЭ принципиально новых подходов решения военных задач [26], информационного и энергетического обеспечения важных воз-

душных, космических и наземных объектов вернули в начале XX в. интерес многих исследователей (США, Японии, Канады, России, ЕС) к проблеме промышленного производства электрической энергии из солнечной энергии [26 – 34]. Динамика исследований в США в области создания солнечных орбитальных электростанций с 1970 г. по 2007 г. отражена в [26]. Разработка концепции базового варианта СКЭС ДОО/НАСА привлекла внимание и научнотехнической общественности Японии. С начала 2000-х годов в Японии проводятся интенсивные исследования и разработка конструкций передающих ФАР, создаются макеты СКЭС, демонстрирующие весь процесс передачи энергии из космоса на Землю от фотопреобразова-

телей до ректенн на все новой и новой элементной базе [35]. Рассматриваются также вопросы обеспечения экологической и биологической безопасности путем снижения уровня фонового СВЧ-излучения до медицинских стандартов. Поднимаются вопросы поиска компромисса одновременного обеспечения высокого КПД и безопасности передачи энергии. Проводятся теоретические и экспериментальные исследования ректенн.

В трудах форума “Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности 2014 г.” [36] подчеркивается острая необходимость уже в ближайшей перспективе начинать практическую реализацию проектов СКЭС и отмечаются серьезные намерения ряда стран создать уже в скором времени (2016 – 2025 гг.) мощные СКЭС с передачей энергии микроволновым лучом на Землю. Япония уже объявила о начале проекта по сооружению в космосе гигаваттной электростанции на солнечных батареях общей площадью 4 кв. км. Для участия в проекте стоимостью 21 млрд. долларов в качестве подрядчиков были привлечены ведущие корпорации. Ввод системы в эксплуатацию намечен на 2030 г. В марте 2015 г. на официальном сайте Mitsubishi Heavy Industries [37] было заявлено об успешном завершении наземных испытаний системы БПЭ. В процессе эксперимента микроволновый луч мощностью в 10 кВт был передан с передающего устройства на ректенну, расположенную от него на расстоянии 500 м. Остальные детали эксперимента не уточнялись.

В США также активно изучаются вопросы, связанные с беспроводной энергетикой, в том числе и для военных нужд. К 2016-му году в США планируют вывести в космос СКЭС на 200 МВт [37], а к 2025 г. увеличить это цифру до 20 ГВт. На международном рынке «космического электричества» активный интерес проявляют Китай, Южная Корея и ряд стран в Европе. Интенсивно прорабатываются различные аспекты создания СКЭС, в том числе и экономические.

По оценкам специалистов в краткосрочной перспективе более реализуемы проекты космической энергетикой на базе комплексов информационно-силовой беспроводной передачи энергии стратосферного и космического базирования с использованием спутниковой сети, авиации, аэростатов и дирижаблей [39 – 42] (рис. 6).

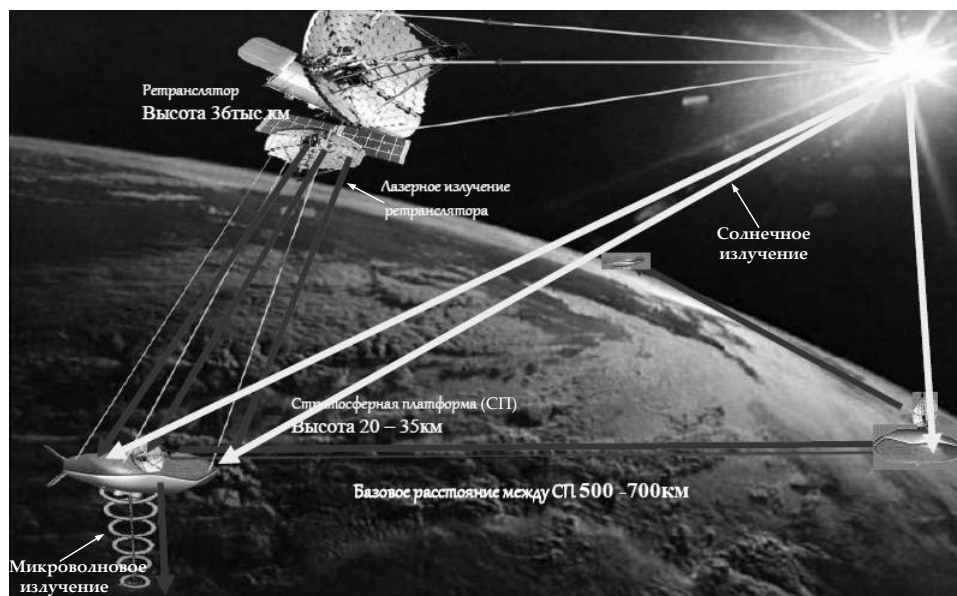


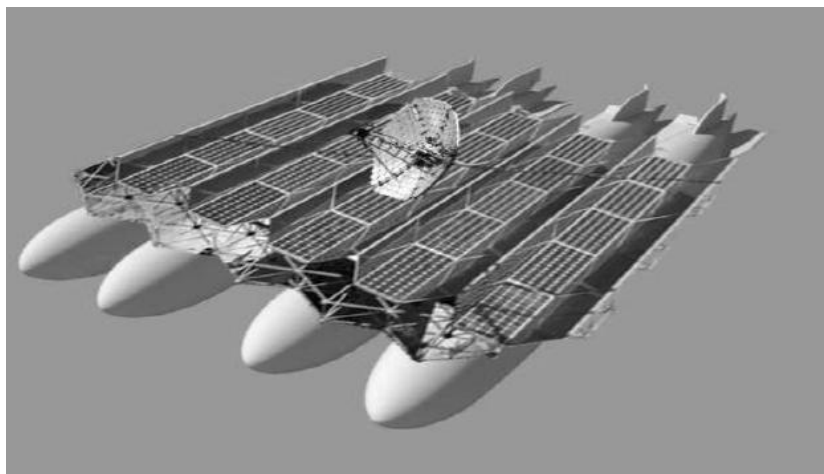
Рис. 6. Концепция аэрокосмической системы беспроводного энергоснабжения объектов

Характерной особенностью этих проектов является переход от исследований в дециметровом диапазоне волн к исследованиям в миллиметровом, субмиллиметровом и оптическом диапазонах. Известно, что повышение рабочей частоты приводит к существенному сокращению габаритных размеров систем БПЭ, поэтому предлагается передавать энергию от СКЭС наземным потребителям в оптическом либо в субмиллиметровом диапазонах, но не на Зем-

лю, а на стратосферные ретрансляторы, которые располагаются на расстоянии 20 – 35 км от поверхности Земли.

Стратосферные ретрансляторы, преобразуя оптическое излучение в более низкочастотный микроволновый диапазон (например, 2,45 – 10 ГГц), обеспечат передачу энергии на Землю с малыми потерями в атмосфере в более компактных пространственных зонах, т.к. на этих расстояниях расходимость микроволнового луча, по сравнению с базовым проектом П. Глейзера (рис. 5), будет меньше. Такой подход, при незначительных дополнительных потерях при преобразовании оптического излучения в излучение микроволнового диапазона в стратосферном ретрансляторе, позволит существенно уменьшить габаритные размеры антенн-выпрямителей, снизить затраты и всевозможные риски при создании СКЭС.

В [38] рассматривается перспективный проект стратосферной солнечной электростанции, в которой предлагается размещать солнечные батареи не на космических орбитах, а непосредственно на стратосферном ретрансляторе (рис. 7). По оценкам специалистов, при размере солнечных батарей 300×300 м (площадь 90000 м²) уровень падающей на них солнечной энергии может достигать сотни мегаватт.



Если принять КПД преобразования солнечной энергии 20 %, энергия, поставляемая потребителю, может составлять десятки мегаватт.

Считается, что такие проекты будут экономически оправданы и в ближайшем будущем могут быть технически реализуемы, так как передача энергии со стратосферных

Рис. 7. Проект солнечной стратосферной электростанции

платформ требует меньших площадей наземных приемно-выпрямительных комплексов, по сравнению с базовым проектом СКЭС. Стратосферные электростанции позволят осуществлять непрерывную работу в течение нескольких лет, проводить их ремонт и модернизацию, а также открывают новые подходы к стратегии и тактике оборонных задач, решению проблемы астероидной опасности. Эффективность реализации рассмотренных проектов будет зависеть во многом от эффективности первичных источников энергии – солнечных батарей. Поэтому актуальными являются проблемы, связанные с увеличением КПД преобразования солнечного излучения в постоянный ток, которые будут рассмотрены ниже.

Отметим еще одну важную особенность, которую необходимо учитывать при проектировании СКЭС. Микроволновый пучок СКЭС интенсивность, которого примерно на 11 – 12 порядков превышает интенсивность ЭМП, используемых в каналах космической связи будет проходить через ионосферную плазму. В связи с этим будут возникать нелинейные эффекты при его прохождении сквозь ионосферу. Сведения об этих нелинейных эффектах были получены в Японии при проведении первого космического эксперимента MINIX (Microwave Ionosphere Nonlinear Interaction Experiment) по передаче 800 Вт микроволновым лучом на частоте 2,45 ГГц с баллистической ракеты (рис. 8), находящейся на высоте 250 км, на приемную антенну, расположенную на отделяемой головной части ракеты [43].

Спустя 10 лет в 1993 г. японскими учеными был проведен второй космический эксперимент (рис. 9) по передаче энергии микроволновым лучом в космосе ISY-METS (International Space Year Microwave Energy Transmission in Space) [43]. Этот эксперимент по общему целевому назначению был близок к первому, однако проводился уже на существенной улучшенной материально технической базе. Передача микроволновой энергии проходила в полном соответствии с показателями наземных испытаний.

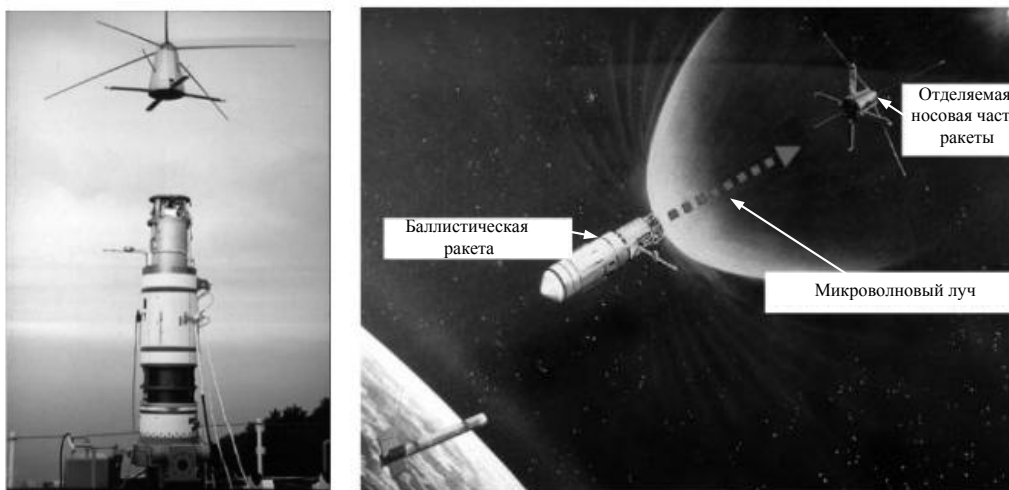


Рис. 8. Предполетные испытания зондирующей ракеты (имитация отделения носовой части, содержащей приемную аппаратуру) и схема эксперимента (1983 г.)

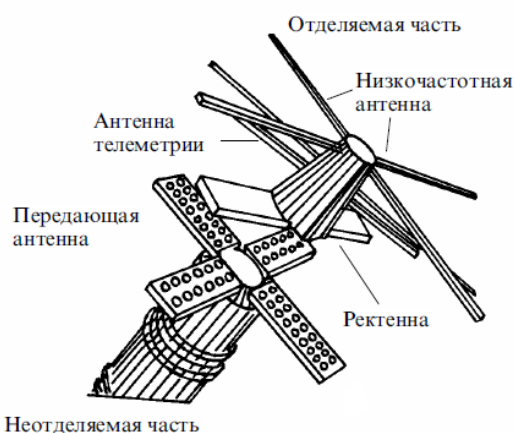


Рис. 9. Общая схема расположения функциональных узлов эксперимента ISY-METS

Подводя итог, следует отметить, что СКЭС – одна из наиболее перспективных, экологически чистых энергосистем будущего, которая базируется не только на широкомасштабном использовании средств современной электроники, но и эффективно стимулирует ее развитие. Применение крупномасштабных систем сопряжено с необходимостью решения экономических, экологических, социальных проблем и проблем электромагнитной совместимости, успешное решение которых во многом связано с продуктивным международным сотрудничеством, т.к. это очень дорогостоящие проекты, экономиче-

чески оправдывающие себя не сразу. Поэтому для начала реализации таких амбициозных, крупномасштабных, дорогостоящих проектов считается целесообразным нарастить технологический и научный потенциал путем отработки технологий и устройств БПЭ на примере менее дорогостоящих приложений, представляющих также практический интерес, а затем на экспериментальных образцах СКЭС с транспортировкой энергии на Землю.

В настоящее время можно выделить ряд менее дорогостоящих проектов беспроводного энергоснабжения объектов микроволновым лучом, позволяющих решать ряд практических прикладных задач. Среди таких считается привлекательным применение систем БПЭ в космических энергосистемах для энергоснабжения кораблей и орбитальных станций, не имеющих собственных энергоустановок, для доставки энергии наземным потребителям из труднодоступных богатых топливом районов в промышленные районы с большим энергодефицитом, в системах обеспечения энергией объектов, находящихся длительное время в воздухе, а также для беспроводного дистанционного энергоснабжения датчиков, работающих в экологически опасных зонах, энергоснабжения специальной аппаратуры передачи информации и телеметрических данных, питания датчиков в медицинских приложениях.

2.2. БПЭ для энергоснабжения космических аппаратов

Возможность использования беспроводной передачи энергии для энергоснабжения спутников с борта орбитальной станции рассматривалась в NASA еще в начале 1970-х гг., когда обсуждались планы создания орбитальной станции.

В [44] отмечается, что технология беспроводной передачи электрической энергии между космическими аппаратами (КА) открывает широкие перспективы дистанционного энергообеспечения множества потребителей в космосе от мощных энергетических станций на базе солнечных либо ядерных энергоустановок. Использование беспроводной передачи энергии позволяет обеспечить централизованное энергообеспечение в космосе, основанное на использовании одной или нескольких мощных энергетических станций для более эффективного и гибкого энергообеспечения космических аппаратов в сравнении с существующими автономными бортовыми энергетическими установками. При этом могут быть обеспечены стабильность уровня энергопотребления, энергообеспечение КА в случае возникновения аварийной ситуации, которая может возникнуть в случае полного или частичного отсутствия заряда аккумулятора КА от солнечной батареи, а также может быть обеспечена возможность глубокого регулирования циклограммы¹ энергопотребления при существенном снижении габаритных размеров и массы космического аппарата.

Особенностью данного варианта энергообеспечения КА является и экологическая безопасность – отсутствие проблемы обеспечения безопасного взаимодействия электромагнитного излучения с биосферой и атмосферой Земли, включая ее ионосферу.

2.3. БПЭ к труднодоступным наземным объектам

Одним из ярких примеров практической реализации беспроводного энергообеспечения труднодоступных районов земной поверхности на дальностях прямой видимости следует отметить реализованный в 1997 г. французский проект Grand Bassin (начатый в 1994 г. [45,

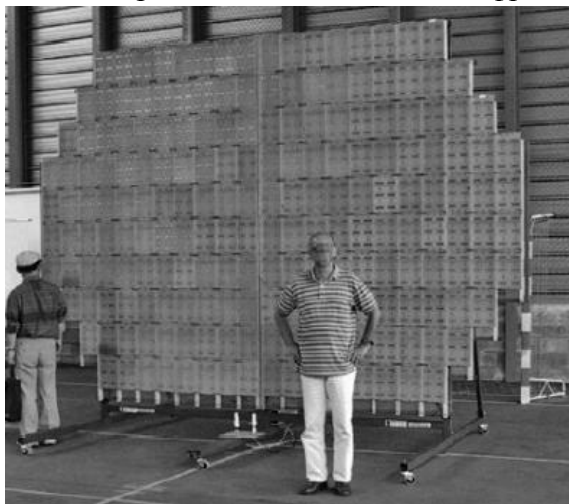


Рис. 10. Ректенна, используемая в проекте Grand Bassin

46]) беспроводного энергообеспечения микроволновым лучом (передача 10 кВт мощности на расстояние 700 м с результирующим КПД 57 %) на острове Реюньон в деревне Гранд Бассин, расположенной в глубоком кратере потухшего вулкана, где монтаж обычных силовых кабелей затруднен из-за сложности рельефа и высокой стоимости работ, а использование солнечных батарей малоэффективно. В этом случае технология БПЭ оказалась предпочтительнее, а расчеты показали, что она обходится не дороже традиционных способов передачи энергии. На рис. 10 изображена ректенна, разработанная для данного проекта. В это же время наземные испытания систем БПЭ проводились и в Японии [47] (рис. 11).

В 2008 г. исследовательская группа известных специалистов в области БПЭ во главе с Д. Манкинсом (США) и Н. Кая (Япония) при финансовой поддержке телевизионного канала Дискавери впервые провела эксперимент по беспроводной передаче энергии микроволновым лучом на значительное расстояние [48]. Передающая подсистема располагалась на острове Мауи и была оснащена ФАР, работающей на частоте 2,45 ГГц. Приемная подсистема располагалась на расстоянии 148 км (Мауна Лоа, Гавайи), которое примерно в 100 раз больше, чем расстояние при первом эксперименте по БПЭ, проведенном в 1975 г. Брауном и Дикинсоном в Голдстоуне [4], а передаваемый уровень мощности был порядка 50 Вт.

¹Циклограмма – табличная или графическая зависимость требуемой суммарной мощности всех бортовых приемников электрической энергии данного типа от этапа полета.

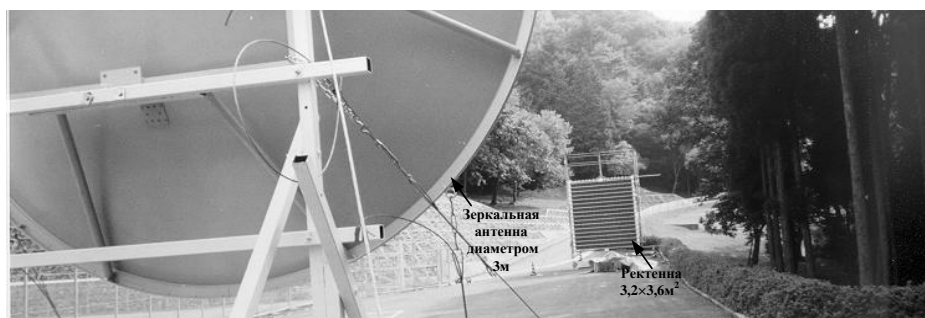


Рис. 11. Эксперимент по передаче 5 кВт мощности на расстояние 42 м

Контроль микроволнового луча по всей трассе распространения проводился с помощью датчиков, установленных на борту вертолета. Успешно выполненный эксперимент стал очередным шагом на пути развития к практическому внедрению систем БПЭ для энергообеспечения труднодоступных объектов.

2.4. Беспроводное энергоснабжение беспилотных летательных аппаратов

В мире наблюдается повышенный интерес к беспилотным летательным аппаратам (БЛА), спектр применения которых очень широк – от создания различных систем связи для гражданских и военных нужд, мониторинга атмосферы, лесных пожаров, техногенных катастроф, контроля прибрежной зоны, мониторинга государственных границ до дальнего обнаружения воздушных целей (в первую очередь маловысотных). Интерес к БЛА также связан с тенденцией переноса средств радиоэлектронной борьбы с пилотируемой авиации на беспилотную.

Выбор структуры и параметров электроэнергетической системы (ЭС) БЛА в значительной степени обусловлен решаемыми им задачами, количеством требуемой мощности и временем, в течение которого эту мощность необходимо поставлять потребителям, то есть требуемой полной энергией. Многообразие типов источников электрической энергии (ЭЭ), индивидуальность свойств и существующие иногда трудности их выбора для конкретной ЭС БЛА, стремление сочетать достоинства источников питания разных типов предопределяет необходимость создания комплекса источников электрической энергии, составленного из сочетания нескольких типов источников, обладающих необходимыми достоинствами и допустимыми недостатками. Причем под типами источников электроэнергии подразумеваются как источники одной физической природы, так и разной.

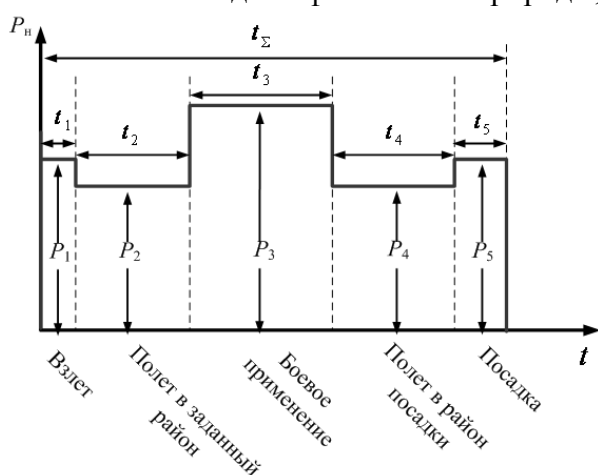


Рис. 12. Типовая циклограмма потребления мощности БЛА

ка, аккумуляторная батарея является аварийным источником, и ее емкость рассчитывается исходя из требований аварийного режима полета.

Системы с комбинированными источниками должны обеспечивать электромагнитную совместимость и отдельную работу, безопасность обслуживания, что повышает надежность и гибкость управления.

Требуемая мощность источников ЭЭ для БЛА в настоящее время определяется по циклограммам нагрузки или графикам нагрузки [49]. Типовой пример графика нагрузки представлен на рис. 12.

Классическая методика выбора первичного источника ЭЭ при проектировании ЭС БЛА предполагает определение участка с максимальной требуемой мощностью, которая и устанавливает номинальную мощность источника

К ЭС БЛА могут быть предъявлены более низкие требования по надежности (отсутствие экипажа, низкая стоимость из-за высокого предполагаемого отхода на боевые потери), но в то же время более жесткие требования по массе и объему (длительный режим полета, максимум полезной нагрузки).

Первые опыты В. Брауна по демонстрации полета вертолета, запитываемого микроволновым лучом, доказали перспективу энергоснабжения БЛА данным способом по ряду причин:

- БЛА может находиться в воздухе неограниченное время;
- уменьшается масса БЛА, что позволяет увеличить массу дополнительного оборудования;
- возможна комбинация различных источников энергии (солнечных батарей, аккумуляторов, энергоснабжение микроволновым лучом).

В связи с этим с начала 90-х годов XX в. и по настоящее время наблюдается повышенный интерес к беспроводному энергоснабжению микроволновым лучом БЛА. В этой области исследований следует отметить существенный вклад канадских специалистов по разработке и испытанию стратосферной ретрансляционной платформы SHARP (Stationary High Altitude Relay Program 1987 г.) [50]. БЛА должен летать по замкнутой траектории на высоте около 20 км и снабжаться энергией с Земли микроволновым пучком на частоте 2,45 ГГц (рис. 13).

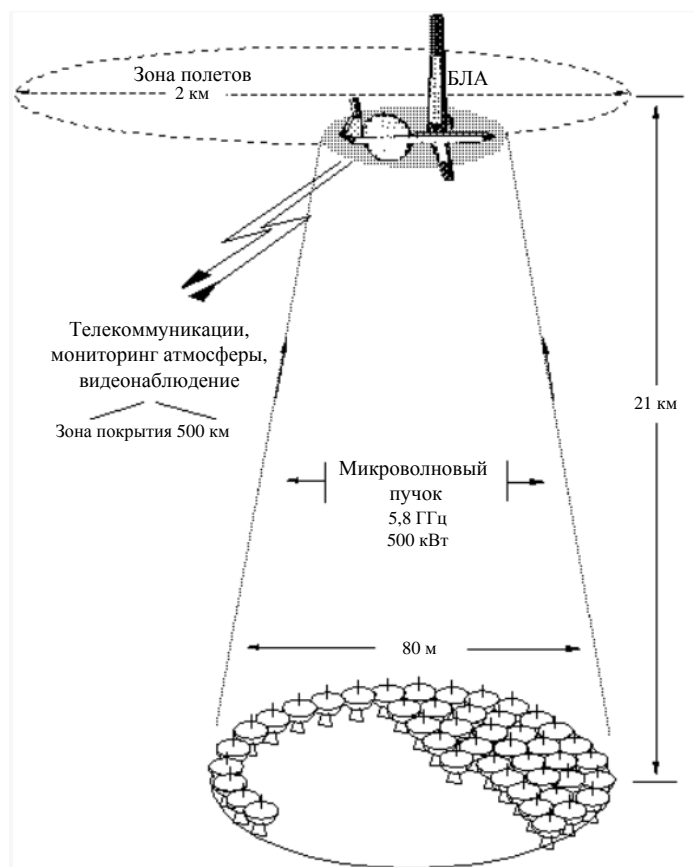


Рис. 13. Конфигурация системы SHARP

Передающая антенная система состоит из 260 параболаидов с комбинированным управлением лучом, диаметр передающей решетки – 80 м, излучаемая мощность – 500 кВт. Диаметр пучка на высоте 20 км около 30 м, т.е. примерно равен размеру самолета. Величина плотности потока мощности на ретрентне – 500 Вт/м^2 , на ее выходе необходимо обеспечить около 300 кВт мощности постоянного тока для питания электромотора.

Возможность практической реализации проекта SHARP подтверждена запуском масштабной модели БЛА [51 – 54] (рис. 14, а). БЛА на высоте около 150 м облучался волнами СВЧ круговой поляризации, поэтому ретрентна состояла из двух решеток ортогональных излучателей (рис. 14, б).

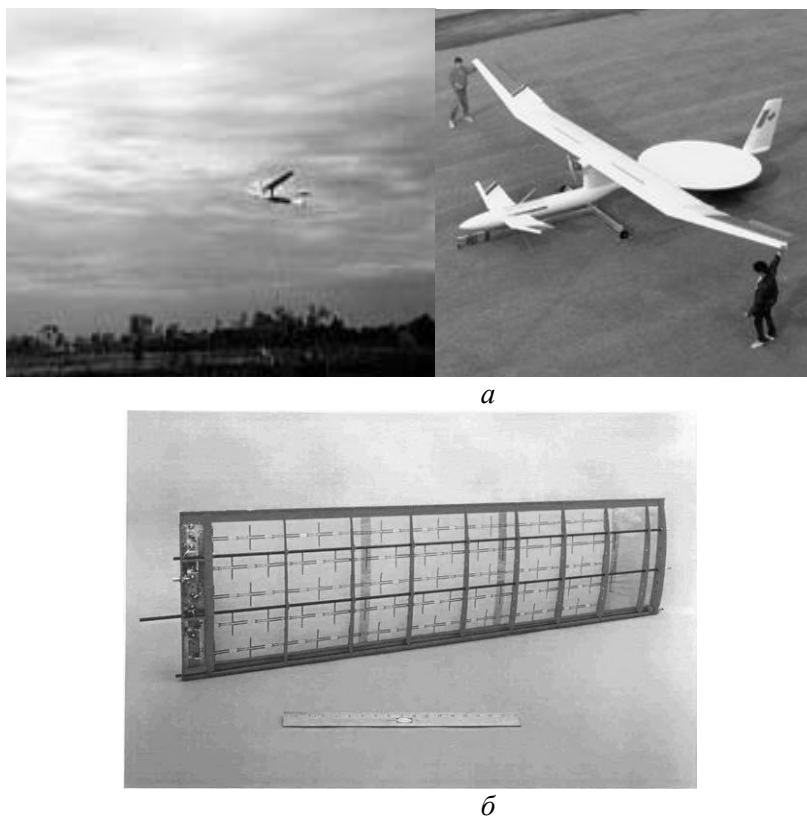


Рис. 14. Модель SHARP (масштаб 1:8) (а) и ее крыло с размещенной на нем ректенной (б)

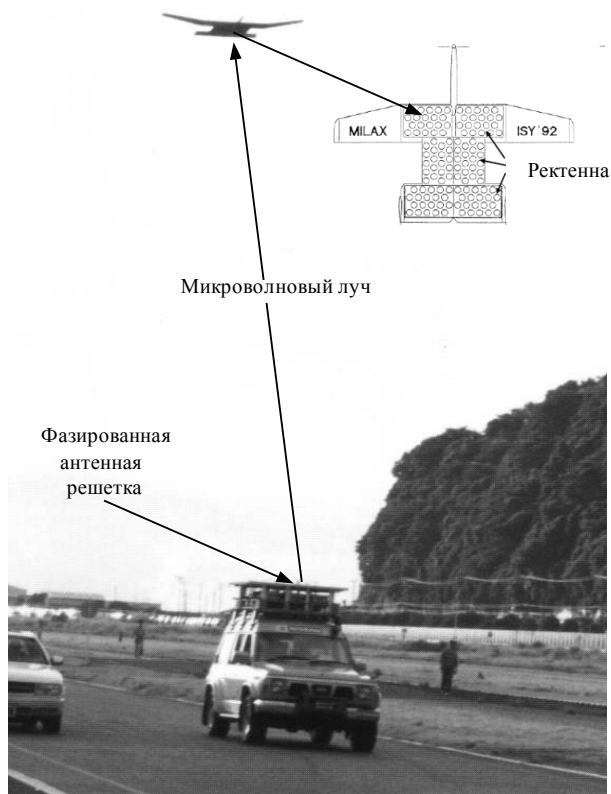


Рис. 15. Эксперимент по передаче энергии микроволновым лучом на движущийся БЛА

ности дирижабля и облучаемой электромагнитным полем на ортогональных поляризациях мощностью 10 кВт на частоте 2,45 ГГц с поверхности Земли.

В работе [56] представлены детальные результаты исследований и испытаний двух прототипов грузовых дирижаблей, предназначенных для транспортировки больших грузов через

В 1992 г. был проведен эксперимент под названием MILAX (Microwave Lifted Airplane eXperiment) по БПЭ на движущийся БЛА [35] на высоте порядка 10 м от поверхности Земли, на котором была установлена 120-элементная ректенная решетка (рис. 15) с КПД выпрямления 61 % и мощностью постоянного тока в нагрузке 88 Вт, достаточной для обеспечения полета БЛА. Передающая ФАР была установлена на крыше автомобиля.

Выражением существенного прогресса, достигнутого в развитии систем БПЭ к 1995 г. для энергоснабжения БЛА, представляется проведенный японскими специалистами г. Кобе демонстрационный эксперимент ETHER (Energy Transmission toward High altitude long endurance airship ExpeRiment) по передаче энергии на борт большого дирижабля с помощью микроволнового луча [55] на расстояние 50 м. Дирижабль длиной 16 м и диаметром 6,6 м был оборудован двумя электродвигателями, которые питались энергией постоянного тока, подаваемой от ректенны с размерами $2,7 \times 3,4 \text{ м}^2$, установленной на внешней поверхности

труднодоступные районы (горы, реки, озера и др.). Первый прототип реализован на солнечных батареях и предназначен для работы в дневное время. На высотах порядка 2 км при плохих погодных условиях и в темное время суток солнечные батареи неэффективны, поэтому был разработан второй прототип дирижабля, который снабжался энергией микроволнового луча (рис. 16).

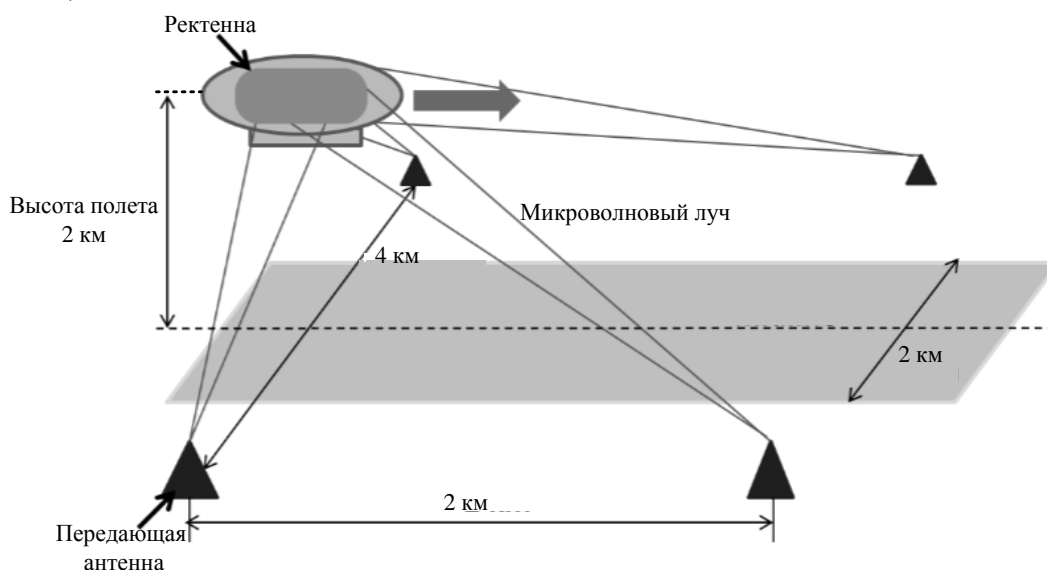


Рис. 16. Схема беспроводного энергоснабжения микроволновым лучом грузовых дирижаблей

Результаты испытаний показали эффективность энергоснабжения БЛА с помощью комбинации беспроводных технологий питания и традиционных источников (солнечных батарей, аккумуляторных батарей).

В [57] описана еще одна демонстрация полета дирижабля (8×30 м) на высоте 300 м, запитываемого микроволновым лучом на частоте 5,8 ГГц (рис. 17). Ректенна диаметром 3 м имела КПД 70 %. Передаточная фазированная антенная решетка диаметром 12 м состояла из 7 зеркальных антенн, каждая из которых излучала мощность 3,5 кВт (суммарная излучаемая мощность порядка 24 кВт). На рис. 17 приведена схема эксперимента.

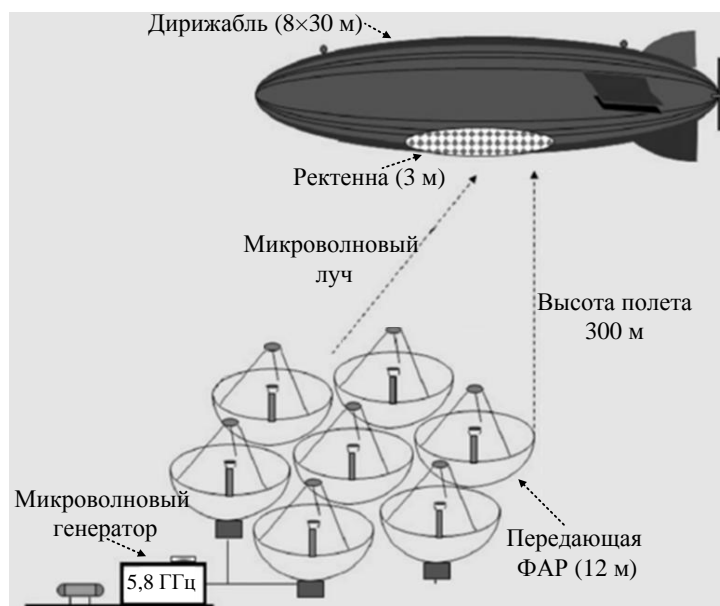


Рис. 17. Демонстрация полета дирижабля, запитываемого микроволновым лучом

В настоящее время особое внимание проявляется к разработке нового класса военных систем микроБЛА (МБЛА, типичный вес 50 гр., размеры 15 см), инициатором которого является агентство передовых оборонных исследовательских проектов DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, США). Одновременно появился интерес и к идее энергоснабжения МБЛА с помощью микроволнового луча (рис. 18) [58 – 61].

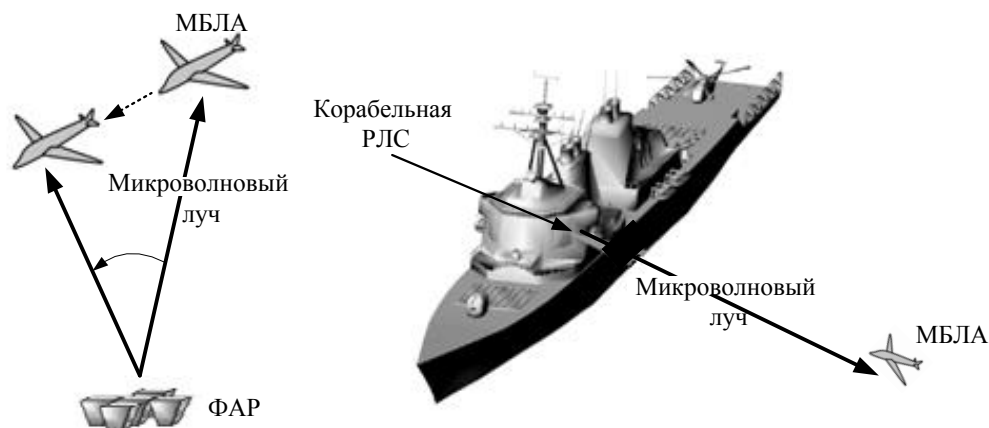


Рис. 18. Беспроводное энергоснабжение МБЛА

При разработке подобных ЛА появляется ряд новых важных задач, связанных с поддержанием высокой точности наведения микроволнового луча на апертуру ректенны и с поиском вариантов схемных решений ректенн, обеспечивающих высокий КПД энергосистемы ЛА, т.к. при энергоснабжении БЛА микроволновым лучом возникает проблема отслеживания его траектории (рис. 18) и учета изменения его углового положения (рис. 19).

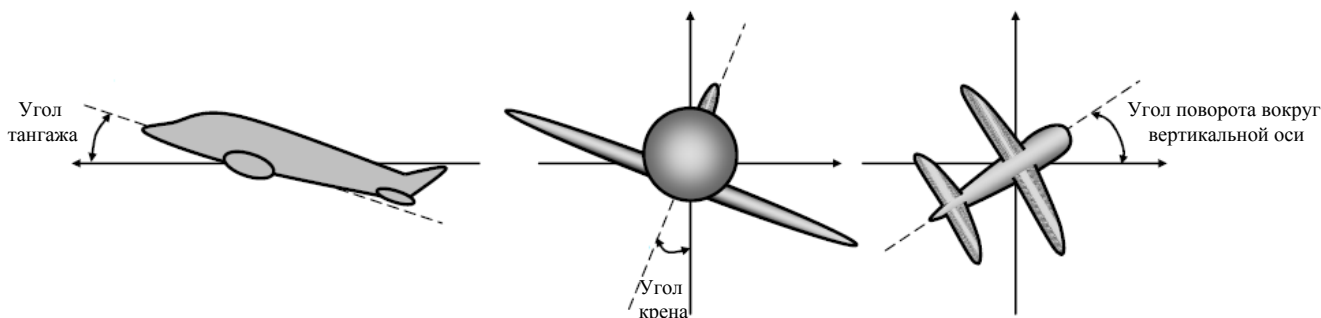


Рис. 19. Изменения углового положения ЛА

Угловое положение БЛА изменяется случайным образом, поэтому нужна ректенна, преобразующая поле любой поляризации.

2.5. Энергоснабжение потребителей за счет извлечения энергии из окружающего электромагнитного поля

Еще одно быстро развивающееся направление – создание систем БПЭ небольшой мощности для беспроводного энергоснабжения различных датчиков применяемых, например, для мониторинга окружающей среды, в медицинских приложениях, промышленного контроля и мониторинга. Интенсивно развивается направление, связанное с энергоснабжением мобильных терминалов путем извлечения энергии из окружающего электромагнитного поля (ЭМП) (рис. 20). В работе [64] исследуется возможность энергоснабжения беспроводных сенсорных сетей за счет окружающего ЭМП создаваемого телекоммуникационными объектами. Последние достижения в беспроводной связи и передаче микроволновой энергии на большие расстояния позволяют реализовать новые подходы по беспроводному энергоснабжению мобильных терминалов.

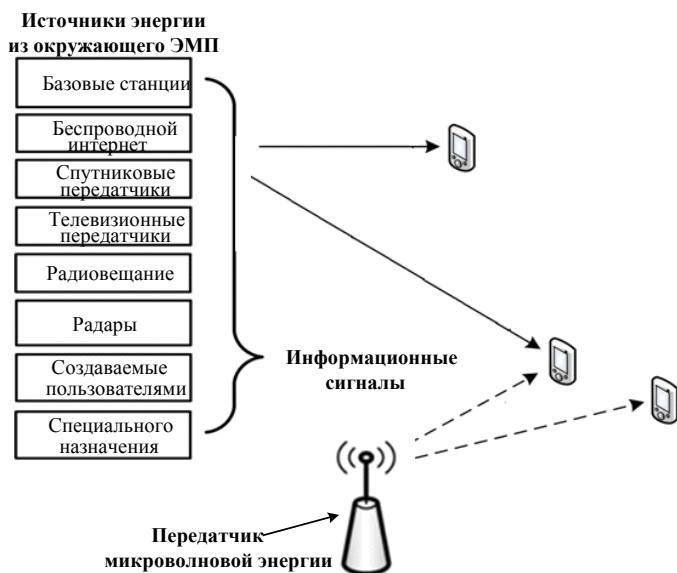


Рис. 20. Энергоснабжение мобильных терминалов за счет извлечения энергии из окружающего ЭМП

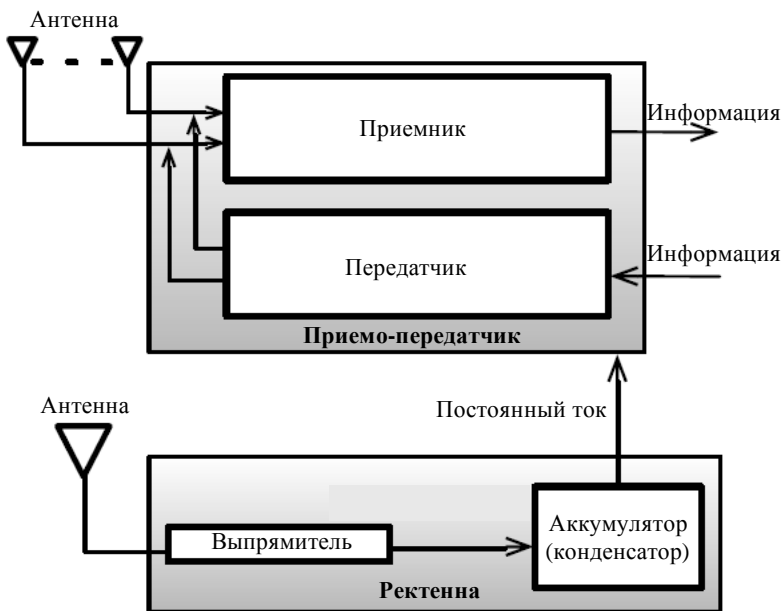


Рис. 21. Архитектура телекоммуникаций с беспроводным питанием

В заключение рассмотрим еще одну важную задачу, связанную с преобразованием оптического излучения в постоянный ток, которая, как отмечалось выше, важна и при проектировании СКЭС. Применение солнечной энергетики достаточно ограничено, с одной стороны, невысоким КПД солнечных батарей. Максимальный КПД типичных солнечных панелей не превышает 20%, хотя в мире, и в том числе в Украине, ведутся интенсивные работы по повышению КПД солнечных батарей за счет применения фотопреобразователей на основе многопереходных гетероструктур, а именно – трехпереходных фотопреобразователей с более высоким КПД (ориентировочно 27 – 30 %) и разработке конструктивных методов увеличения концентрации светового потока на фотопреобразователях. С другой стороны, эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую обусловлена временем суток и климатическими условиями.

Интеграция БПЭ и беспроводной связи открывает новую область исследований – беспроводное питание телекоммуникаций (wirelessly powered telecommunications – WPTC) (рис. 21) [65], где возникают новые направления исследований:

- одновременная передача информации и энергии (simultaneous wireless information and-power transfer – SWIPT.) [66];
- сетевая архитектура телекоммуникаций с беспроводным питанием [67];
- методы безопасного и эффективного использования беспроводного питания в телекоммуникациях [68, 69];
- разработка новых протоколов связи с передачей энергии.

В отличие от ранее рассмотренных систем БПЭ, где ректенны работают на фиксированной частоте и на апертуре которых формируются оптимальные амплитудные распределения, здесь необходимо, в связи с другими условиями функционирования ректенн, решать новые задачи, как теоретические, так и практические, связанные с разработкой математических моделей широкополосных ректенн, возбуждаемых ЭМП с произвольной поляризацией. Решение этих задач, безусловно, актуально, а успех в их решении позволит приступить к разработке сетей нового поколения с беспроводным питанием.

Кардинального изменения технологии индустрии производства панелей для преобразования солнечной энергии следует ожидать в связи с развитием физики наноструктур, в частности плазмонных проводов и углеродных нанотрубок [70]. Указанные наноструктуры могут стать основой для приемных фотоэлектрических антенн (наноректенн), преобразующих солнечный свет в постоянный ток. По многим параметрам наноректенны эффективнее традиционных фотопреобразователей и устраняют их недостатки, как с точки зрения эффективности преобразования, так и с точки зрения себестоимости производства электроэнергии. Такой выигрыш в КПД связан с возможностью преобразования энергии электромагнитных волн во всем спектре солнечного излучения. Видимый свет и ИК-излучение дают наибольшую энергию: на видимый свет приходится 47 % лучистой энергии, на ИК – 44 %, а на ультрафиолет – только 9 % лучистой энергии. Более 85 % энергии излучения солнца содержится в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,6 мкм.

Поэтому актуальными представляются разработки технологий, с помощью которых можно будет организовать сравнительно дешевое производство двухсторонних гибких солнечных панелей на основе наноректенн, одна сторона которых работает в видимом диапазоне на длинах волн 0,43 – 0,50 мкм, где плотность потока энергии солнечного излучения имеет максимальное значение, а другая – в ИК-диапазоне (в том числе и в темное время суток). КПД таких панелей можно ожидать порядка 80 %. Отметим, что в настоящее время уже начаты эксперименты с тепловыми наноантеннами (наноректеннами ИК-диапазона) на углеродных нанотрубках [70].

Перспективы применения наноректенн для сбора солнечной энергии требуют усовершенствования теории и техники ректенн и для случая терагерцового диапазона.

Таким образом, благодаря развитию нанотехнологий солнечная энергетика обещает стать одним из основных источников энергетических ресурсов.

3. Исследования по беспроводной передаче энергии в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ)

Исследования по проблеме беспроводной передачи энергии ведутся в ХНУРЭ с начала 1980-х годов по инициативе проф. Я.С. Шифрина. Особое внимание уделялось изучению окончечных устройств систем БПЭ – ректенн. Существенный вклад в развитие теории и техники антенн с нелинейными элементами, в частности ректенн, сделали проф. А.И. Лучанинов и проф. В.М. Шокало. На начальном этапе основные усилия были направлены на изучение характеристик отдельных приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), образующих ректенну. ПВЭ представляют собой один из классов антенн с нелинейными элементами (АНЭ), поэтому для их анализа использовался разработанный достаточно строгий и общий метод анализа подобных антенн [71]. Применительно к ПВЭ соответствующая процедура расчета изложена в справочнике по антенной технике [72]. В соответствии с указанной процедурой были детально изучены зависимости основных характеристик ПВЭ от типа излучателя, наличия или отсутствия в схеме ПВЭ фильтра нижних частот, параметров этого фильтра и фильтра постоянного тока, параметров диода Шоттки, нагрузки ПВЭ, уровня падающей на него мощности. Полученные результаты позволяют судить о свойствах и параметрах различных типов ПВЭ, указывают пути повышения их КПД, снижения побочного излучения, улучшения их эксплуатационных характеристик. Эти данные являются базовыми для анализа совокупности ПВЭ – ректенных решеток [73].

При большом числе ПВЭ ректенны относят к крупноапертурным. В основе анализа таких крупноапертурных ректенн, при равномерном их облучении, лежит приближение бесконечной решетки. Задача сводится к расчету одного ПВЭ в составе бесконечной решетки. Особое внимание было уделено анализу крупных ректенн при неравномерном облучении их апертуры. Последнее реализуется в интересах повышения результирующего КПД ректенны.

Помимо теоретических работ проводились и экспериментальные исследования характеристик ректенн [74]. Для этого была создана первая в Украине установка для проведения

опытов по беспроводной передаче энергии, включающая в себя передающую подсистему (рис. 22, а) и ректенну из 144 ПВЭ (рис. 22, б).

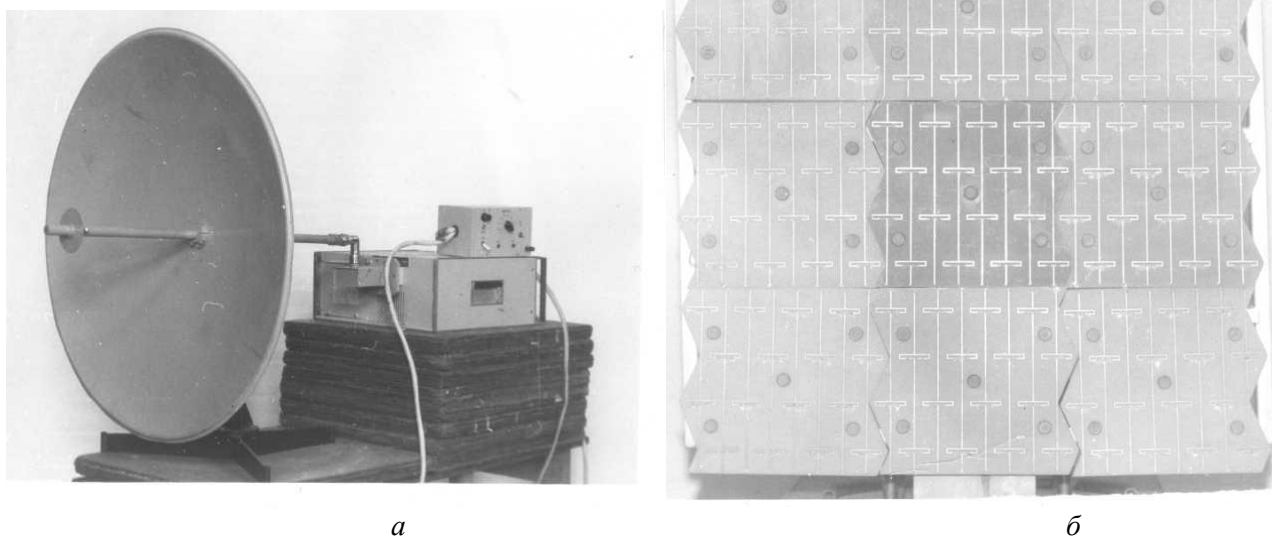


Рис. 22. Экспериментальная установка по БПЭ микроволновым лучом (2,45 ГГц), разработанная в ХНУРЭ: а – передающая подсистема, б – ректенна

Проведенные на этой установке исследования подтвердили ряд теоретических закономерностей, характеризующих изменение параметров как одиночных ПВЭ, так и ректенны в целом в зависимости от схемы их построения и уровня падающей на них мощности.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований была разработана теория и развита практика построения крупноапертурных ректенн, которые обобщенные в монографии [75].

Заклучение

Из приведенного обзора видно, что за последнее время фронт исследований по проблеме БПЭ существенно расширился. Изложенные основные результаты исследований в области БПЭ указывают на актуальность рассматриваемой проблемы и ее возрастающее влияние на процесс развития мировой энергетики. Видно, что к настоящему времени в этой области сделано немало, а уровень понимания обсуждаемой проблемы в целом и технический уровень разработок отдельных подсистем достаточно высоки для практической реализации проектов систем БПЭ в ближайшем будущем. Эти результаты, а также результаты проводимых сейчас и намеченных будущих исследований, несомненно, будут способствовать дальнейшему повышению качественных характеристик систем БПЭ различного назначения, расширению возможностей эффективного применения подобных систем для решения ряда практически важных задач, причем можно с уверенностью полагать, что принципиально неразрешимых научных проблем на этом пути нет.

Обобщая полученные результаты, можно констатировать, что выполненные на кафедре ОРТ ХНУРЭ исследования существенно дополняют известные достижения и являются значительным шагом в развитии теории и техники систем БПЭ микроволновым лучом.

Реализация обсуждаемых в статье идей обусловлена решением комплекса разноплановых проблем, поэтому с учетом рассмотренных тенденций развития БПЭ за последнее время фронт выполняемых исследований в этой области существенно расширился и в ХНУРЭ. Наиболее важные и основные из новых исследуемых направлений следующие:

1. Усовершенствование теории и практики построения передающих антенн и ректенн современных систем БПЭ обладающих высокими энергетическими характеристиками, высо-

кой производительностью, простотой реализации, мобильностью, экологической и биологической безопасностью. Перечисленным требованиям должна, по сути, удовлетворять любая хорошая радиотехническая система. Поэтому здесь стоит вопрос в выборе компромиссного решения при реализации указанных характеристик.

2. Изучение особенностей фокусировки электромагнитных излучений на апертуру ректенн (как правило, малого радиуса), устанавливаемых на подвижных объектах, когда изменяются их траектория движения и угловое положение. Здесь возникают задачи обеспечения постоянства радиуса сфокусированного пучка при изменении расстояния фокусировки, оптимизации амплитудного распределения на апертуре ректенны, позволяющего повысить ее КПД. Это, в свою очередь, приводит и к необходимости исследования электродинамических и энергетических характеристик ректенн, поиску их оптимальных конфигураций.

3. Задачи, связанные с извлечением ректеннами энергии из окружающего ЭМП, предполагают:

- разработку математических моделей ректенн, пригодных для их анализа при возбуждении широкополосными сигналами либо совокупностью сигналов на различных частотах;
- поиск конструкций излучающих структур ректенн, позволяющих принимать поле с произвольной поляризацией и в широкой полосе частот;
- поиск конструкций приемно-выпрямительных элементов, позволяющих повысить КПД выпрямления ректенн, при их возбуждении маломощными сигналами.

Следует отметить, что при решении указанных задач следует предъявлять жесткие требования к ректеннам по массогабаритным показателям.

4. Как показывает анализ существующих результатов исследований, для освоения новых частотных диапазонов, в частности оптического, требуются:

- более углубленное исследование процессов выпрямления оптического излучения в постоянный ток;
- разработка обобщенной математической модели, пригодной для анализа наноректенн;
- разработка методик и эффективных алгоритмов численной реализации математической модели, позволяющих проводить не только анализ, но и оптимизацию параметров наноректенн.

Таким образом, тенденции развития современных систем БПЭ различного класса требуют проведения разноплановых теоретических и экспериментальных исследований вопросов, связанных как с передающей, так и с приемной подсистемами системы БПЭ.

Список литературы: 1. *Goubau G., Schwering P.* On the guided propagation of electromagnetic wave beams // IRE Trans. Antennas Propagation. – 1961. – V. AP-9. – P. 248–256. 2. *Brown W.C.* Experimental involving a microwave beam to power and position a helicopter // IEEE Trans. V. AES-5. – 1969. – No.9. 692 p. 3. *Brown W.C., Eves E.E.* Microwave power transmission and its application to space // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1992. – V. 40. N 8. – P. 1239–1250. 4. *Brown W.C.* The history of power transmission by radio waves // IEEE Trans. 1984. V. MTT-32. – N 9. – P. 1230–1242. 5. *Fisher A.* Secret of perpetual flight? Beam-power plane // Popular Science. – 1988. – V. 232. N 1. – P. 62–65, 106, 107. 6. *Morris C.E.* Microwave powered, unmanned, high-altitude airplanes // Journal of aircraft. – 1984. – V. 21, N 12. – P. 966–970. 7. *Brown W.C.* Microwave powered, long duration, high-altitude platform // Internal. microwave symp. – N.Y.: IEEE, 1986. – P. 507–510. 8. *Glaser P.E.* Microwave power transmission for use In space // Microwave Journal. – 1986. – N12. – P. 44–58. 9. *Arndt G.D., Kerwin E.M.* Application of earth-orbit power transmission // Space power. 1986. – N 12. – P. 44–58. 10. *Landis G.A.* A new space station power system // Acta Astronautica. – 1988. – V. 17. N 9. – P. 975–977. 11. *Chang K., McCleary J.C., Pollock M.A.* Feasibility study of 35 GHz microwave transmission in space // Solar power. – 1989. – V. 8. N 3. – P. 365–370. 12. *Hoffert M.I., Miller G., Kadiramangalam M., Ziegler W.* Earth-to-satellite microwave power transmission // Journal of propulsion and power. – 1989. – V. 5. N 6. – P. 750–758. 13. *Minovith M.A.* Solar powered, self refueling, microwave propelled interorbital transportation system // AIAA Paper. – 1983. – N 1446. 14. *Brown W.C.* Earth to space DC power transmission system utilizing a microwave beam as a source of energy for electric propelled interorbital vehicles // AIAA Paper. – 1985. – N 2045. 15. *Brown W.C.* All electronic propulsion – key to future spaceship design // AIAA Paper. – 1988. – N 3170. 16. *Glaser P.E.* Power from the Sun: its future // Science. – 1968. – V. 162. – P. 857–861. 17. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л.* Проблемы солнечных космических электростанций // Успехи физических наук. – 1977. – Т. 123. – Вып. 4. – С. 633–656. 18. Satellite power system concept develop-

ment and evaluation program // Reference system report. Wash.: DOE/ER. – 1978. (DOE/ER–0023). 19. *Книжник Р.С., Кочубей А.Н.* Передача энергии пучком СВЧ радиоволн и солнечные космические электростанции // Зарубежная радиоэлектроника. – 1983. – N 7. – С. 75–84. 20. *Rogers T.P.* Reflector satellites for solar power // IEEE Spectrum. 1981. V. 18. N 7. P. 38–43. 21. *Angelini A.M.* On the possibility of intercontinental power transmission via satellite // Space power. – 1988. – V. 7. N 2. – P. 175–186. 22. *Glaser P.E.* An overview of the solar power satellite option // IEEE Trans, on Microwave Theory and Techniques. – 1992. – V. 40. N 6. – P. 1230–1238. 23. *Ванке В.А.* СВЧ-электроника – перспективы в космической энергетике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2007. – № 6. – С. 12 – 15. 24. *Райкунов Г.Г., Мельников В.М., Чеботарев А.С., и др.* Проблемы создания космических солнечных электростанций (КСЭС) мощностью 1–10 ГВт, транслирующих энергию на Землю // Авиационные и космические технологии. 2011. №3. С. 69 – 73. 25. *Еськов Ю.М.* Экологически чистая мировая электроэнергетика и космонавтика в XXI веке. – Москва, 2004. – 167с. 26. *Department of Defense*, “Space-Based Solar Power as an Opportunity for Strategic Security” Report to the director, National Security Space Office, 10 October 2007 p. 75 27. *Mankins Y.C.* A technical overview of the “suntower” solar power satellite concept Acta // Astronautica. – 2002. – V. 50, No 6. – P.369-377. 28. *Ванке В.А.* Электроэнергия из космоса – солнечные космические электростанции // Журнал радиоэлектроники. – 2007. – No 12. – С.1-10. 29. *Masumoto H.* Research on Solar Power Satellites and Microwave Power transmission in Japan, IEEE Microwave Magazine, Vol. 3, Issue 4, December 2002, pp. 36-45. 30. *Mitani T., Shinohara N., Hashimoto K., Matsumoto H.* Study on High-efficiency and Low-noise Wireless Power Transmission for Solar Power Station/Satellite // The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)” November 2006, Bangkok, Thailand p. 1 – 4. 31. *Hashimoto K., Shinohara N.* Solar Power Satellite and its EMC Issues // EMC’09/Kyoto p. 29 – 32. 32. *Iizuka K., Matsumoto H., Shinohara N.* Technology and Applications of Microwave Power Transmission // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol.40 No.6 (Dec. 2004) p. 1- 5. 33. *Gökalp I., Calabro M., Hollanders H., Deschamps L.* Space solar energy: A challenge for the European (and international) community // Space Technol. – 2003. – Vol. 23. No. 1. – P. 1 - 10. 34. *Шубов А.Г.* О некоторых подходах к созданию систем беспроводной передачи энергии // Радиотехника. – 2010. – №161. – С. 37-51. 35. *Shinohara N.* Beam Control Technologies with a High Efficiency Phased Array for Microwave Power Transmission in Japan // Proceedings of the IEEE, Volume 101, Issue 6, 2013 p. 1448 – 1463. 36. Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности // Труды Междунар. форума «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR – 2014». 10 – 11 ноября 2014 г. ; под. ред. О.С. Попеля, Д.О. Дуникова. – Москва: ОИВТ РАН. 2014. – 478 с. 37. *MHI Successfully Completes Ground Demonstration Testing of Wireless Power Transmission Technology for SSPS -Expanding the Potential for New Industrial Applications* // Press information, March 12, 2015 No. 1879 <http://www.mhi-global.com/news/story/1503121879.html>. 38. *Проблемы и перспективы создания космических солнечных электростанций и беспроводной передачи энергии МГТУ МИРЭА / А.С. Сигов, В.Ф. Матюхин ИОА СО РАН – В.П.Лукин* <http://reenfor.org/upload/files/Сигов, Матюхин, Лукин.pdf>. 39. *Мельников В.М.* Особенности создания и применения космических солнечных электростанций (КСЭС) мощностью 1-10 ГВт на волоконных лазерах с солнечной накачкой автономная энергетика // Журнал ОАО научно-производственного предприятия “Квант“. – 2014. – № 32. – С. 3 – 9. 40. *Little F.E.* Meeting the challenges of implementing portable space-based solar power General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI Year: 2011 Pages: 1 – 4. 41. *Сигов А.С., Матюхин В.Ф.* Пути развития солнечных стратосферных аэрокосмических энергетических комплексов с дистанционной передачей энергии // Труды Междунар. форума «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR – 2014». 10 – 11 ноября 2014 г. – Москва : ОИВТ РАН, 2014. – С 388 – 397. 42. *Сысоев В.К., Пичхадзе К.М., Фельдман Л.И., Арапов Е.А., Лузянин А.С.* Концепция разработки космической солнечной электростанции // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Космонавтика и Ракетостроение. – 2011. – №2. – С. 12 – 19. 43. *Нагатомо М., Сасаки С., Наруко Ё., Ванке В.А.* Работы Института космических исследований Японии в области космической энергетике // УФН. – 1994. – Т. 164, вып.6. – С. 632-641. 44. *Легостаев В.П., Лопота В.А., Синявский В.В.* Перспективы и эффективность применения космических ядерно-энергетических установок и ядерных электроракетных двигательных установок // Космическая техника и технологии. – 2013. – №1. – С. 4 – 15. 45. *Celeste A., Luk J-D. L. S., Chabriet J. P., Pignolet G.* The Grand-Bassin Case Study: Technical Aspects”, Proc. of SPS’97, 1997, pp. 255-258. 46. *Celeste A., Jeanty P., Pignolet G.* Case study in Reunion island, Acta Astronautica”, vol. 54, 2004, pp. 253-258. 47. *Shimokura N., Kaya N., Shinohara M., Matsumoto H.* Point-to-point microwave power transmission experiment // Scripta Technica, Inc. Electr Eng Jpn, 120(1): 33–39, 1997. 48. *Franceschetti G., Gervasio V., Mittra R.* A Look at the Wide Spectrum of Wireless Power Transmission // Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT) Vol 6 – Nov., 2014. <http://www.e-fermat.org/files/articles/1546116408479a.pdf>. 49. *Жмуров Б.В., Халютин С.П.* Алгоритм определения состава и параметров первичных источников электроэнергии БПЛА // Тр. междунар. симпозиума «Надежность и качество». – 2010. – Т. I. – С. 425 – 429.

50. Fisher A. Secret of perpetual flight? Beam-power plane // Popular Science. – 1988. – V. 232. N 1. – P. 62–65.
51. Sohlesak J.J., Alden A., Ohno T. SHARP (Stationary high altitude platform): rectenna and low altitude tests // Globecom 85: IEEE Glob. Telecommun. conf. New Orleans. – 1985. – V. 2. – P. 960–964.
52. Jull G.W., Lillemark A., Turner R.M. SHARP (Stationary high altitude platform): telecommunication missions and systems // Globecom 85: IEEE Glob. Telecommun. conf. New Orleans. – 1985. – V. 2. – P. 955–959.
53. Schlesak J.J., Alden A., Ohno T. A Microwave Powered High Altitude Platform // IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – 1988. – P. 283-286.
54. Brown W.C. Beamed Microwave Power Transmission and its Application to Space // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 40, No. 6, June 1992.
55. Fujino Y., Fujita M., Kaya N., et al. A Dual Polarization Microwave Power Transmission System for Microwave Propelled Airship Experiment // ISAP '96 Proceedings, Chiba, Japan p. 393 – 396.
56. Skuza J., Park Y., et al. Feasibility Study Cargo Airship Transportation Systems Powered by New Green Energy Technologies // Technical Report NASA/TM–2014-218241.
57. Dickinson R.M. Power in the sky: Requirements for microwave wireless power beamers for powering high-altitude platforms // Microwave Magazine, IEEE, Volume 14, Issue 2, 2013, P. 36 – 47.
58. Oda A., Sawahara H., Ishiba M., et al. Integration of MAV Wireless Power Transmission Systems / 8th Annual International Energy Conversion Engineering Conference 25 – 28 July 2010, Nashville, TN p. 1 – 6.
59. Ishiba M., Ishida J., Komurasaki K., Arakawa Y. Wireless Power Transmission and Telecommunication using a Microwave Active Phased Array / 9th Annual International Energy Conversion Engineering Conference 31 July – 03 August 2011, San Diego, California, p. 1 – 8.
60. Ahn C-J. Prototype of 5.8 GHz Wireless Power Transmission System for Electric Vehicle System / 2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE, Singapore, vol.6, 2011, p. 128 – 131.
61. Stout T., Basappa P., et al. Study on Microwave Power via Rectenna for Airship // Applications Proc. SPIE 6931, Nanosensors and microsensors for bio-systems, March 2008.
62. Wu Y., Linnartz J., et al. Modeling of RF energy scavenging for batteryless wireless sensors with low input power personal indoor and mobile radio communications // PIMRC, 2013 IEEE 24th International Symposium on 8-11 Sept. 2013. P.527 – 531.
63. Payne J. et al. Wireless power transmission for medical applications // Nanosensors, Biosensors, and Info-Tech Sensors and Systems 2009. Ed. Vijay K. Varadan. San Diego, CA, USA: <http://hdl.handle.net/1721.1/52633>.
64. Nishimoto H., Kawahara Y., Asami T. Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks // IEEE SENSORS 2010 Conference p. 1282 – 1287.
65. Lu X., Wang P., Niyato D., et al. Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey / IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 17, no. 2, May 2015, pp. 757-789.
66. Zhang R., Ho C. K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer / IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 12, N. 5, pp. 1989-2001, May 2013.
67. Huang K., Lau V.K.N. Enabling wireless power transfer in cellular networks: architecture, modeling and deployment / IEEE Transactions on Wireless Communications, vol 13, N. 2, pp. 902-912, Feb. 2014.
68. Yang G., Ho C.K., Guan Y.L. Dynamic resource allocation for multiple-antenna wireless power transfer / IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 62, N. 14, pp. 3565-3577, July 2014.
69. Chen X., Wang X., Chen X. Energy-efficient optimization for wireless information and power transfer in large-scale MIMO systems employing energy beamforming / IEEE Wireless Communications Letters, vol. 2, no. 6, pp. 667-670, Dec. 2013.
70. Современные тенденции развития наноэлектромагнетизма: аналитический обзор / НИУ «Ин-т ядерных проблем» БГУ ; сост. Г.Я. Слепьян, С.А. Максименко, П.П. Кужир. – Минск : Изд. центр БГУ, 2012. – 71 с.
71. Шифрин Я.С., Лучанинов А.И., Щербина А.А. Нелинейные антенные эффекты // Изв. Вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1990. Т.33. №2. С.5-13.
72. Шифрин Я.С., Лучанинов А.И. Антенны с нелинейными элементами // Глава в кн. Справочник по антенной технике. Т.1. ; под. ред. Л.Д.Бахраха и Е.Г.Зелкина. – М. : ИПРЖР, 1997. – С. 207-235.
73. Шифрин Я.С., Лучанинов А.И., Шокало В.М. Приемно-выпрямительные элементы ректенных систем. – Харьков : Харьк. ин-т радиоэлектроники, 1988. – 181 с. Деп. в УкрНИИНТИ. 20.2.89. N 1626–Ук89.
74. Шокало В.М., Коновальцев А.А., Омаров М.А., Лучанинов Ю.А., Грецких Д.В. Экспериментальные исследования масштабной модели системы беспроводной передачи энергии микроволновым лучом с максимальным КПД // Радиотехника. – 2001. – №122. – С.17-21.
75. Шокало В.М. Крупноапертурные антенны-выпрямители систем беспроводной передачи энергии микроволновым лучом / В.М. Шокало, А.И. Лучанинов, А.М. Рыбалко, Д.В. Грецких ; под ред. В.М. Шокало. – Х. : Коллегиум, 2006. – 308 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 04.03.2016