

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

**МЕЖДУНАРОДНЫЕ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ
СОЗДАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ
ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭНЕРГИИ НА МИКРОВОЛНАХ**

И.П. Коршунов, В.Е. Любченко

**INTERNATIONAL AND NATIONAL PROJECTS OF THE
SATELLITE SYSTEMS FOR THE WIRELESS ENERGY
TRANSMISSION BY THE MICROWAVES**

I.P. Korshunov, V.E. Lyubchenko

Обсуждается состояние исследований в мире по проблеме транспортировки энергии с геостационарной орбиты на Землю посредством микроволн. Классифицированы основные проблемы, относящиеся к радиофизическому и радиотехническому аспектам идеи создания энергетических систем космического базирования и транспортировки энергии на Землю. Дана характеристика тенденций, наметившихся при разработке международных и национальных проектов реализации идеи космической энергетики на микроволнах. Рассмотрены варианты построения основных subsystems и отдельных элементов космической энергетической системы.

Введение

Известно, что основными источниками энергии на Земле были и остаются углеводородные виды топлива. Согласно данным [1,2] мировая потребность в энергии в 1990 году составила около $0.9 \cdot 10^5$ ТВт.час (1ТВт.час = 10^{12} Вт.час), из которых примерно 30% выработанной тепловой энергии использовалось для производства электричества, при этом доля иных источников электрической энергии (атомные станции, гидростанции и др.) не превышает 10 % (рис. 1).

Прогнозируется, что к 2020 году необходимый объем энергии достигнет величины $\sim 1.7 \cdot 10^5$ ТВт.час, а необходимая доля электрической энергии возрастет до 50 % от общего объема. Поскольку запасы углеводородных видов топлива близки к истощению, а потребности в электроэнергии постоянно растут, во всем мире активно ведется поиск альтернативных источников энергии. В этой связи обращает на себя внимание тот огромный энергетический потенциал, который представляет собой излучение Солнца, достига-

ющее пределы земной орбиты. Плотность излучения Солнца в космосе, при нормальном падении характеризуют т.н. солнечной постоянной $B_0 = 1.35 \text{ кВт} / \text{м}^2$. В экваториальных областях земной поверхности интенсивность солнечного излучения ослабляется примерно на 1.6-2.2дБ из-за потерь света в атмосфере (без учета влияния метеоусловий). Учитывая суточное вращение Земли, можно сосчитать, что среднесуточная мощность в ее экваториальной области уменьшается еще на 5.5 дБ. Таким образом, суммарные потери среднесуточной, солнечной радиации на поверхности Земли достигают 7-8 дБ. Традиционными преобразователями солнечного излучения в электрический ток в энергетических системах наземного и космического базирования являются т.н. солнечные батареи (С-Б) на основе кристаллического или аморфного кремния.

Идея космической, солнечной энергетики базируется на создании солнечных энергетических спутников (СЭС), размещаемых на геостационарной орбите (ГО), и системы беспроводной транспортировки энергии (БТЭ) на микроволнах. Реализация этой идеи может обеспечить производство экологически – чистой (под экологической чистотой здесь подразумевается практическое отсутствие вредных выбросов в атмосферу Зем-

И.П. Коршунов, д.ф.-м.н.

В.Е. Любченко, д.ф.-м.н.

г. Фрязино, Фрязинский филиал института радиотехники и электроники РАН

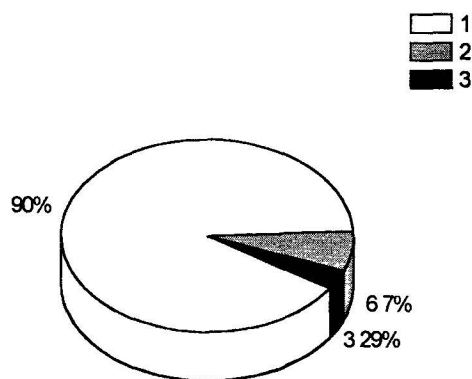


Рис 1 Производство электроэнергии различными производителями 1 – ТЭЦ, 2 – АЭС, 3 – ГЭС и прочие производители

ли) электрической энергии в глобальном масштабе Прогресс в исследованиях, проведенных последние десятилетия по большинству направлений, связанных с этой идеей, уже теперь позволяет обсуждать конкретные проекты ее практического осуществления. Поскольку стоимость таких проектов весьма высока (сопоставима с затратами на межпланетные экспедиции), их реализация предусматривает открытие национальных и международных программ. Мировое научное сообщество придает большое значение перспективам солнечной энергетики, именно по этой проблеме в Бюллетенях U.R.S.I. [3,4] опубликованы подборки оригинальных статей. В конце 2005 года направление СЭС – БТЭ охарактеризовано в резолюции сессии U.R.S.I., как важнейшее направление текущего столетия, подтверждением этому является т.н. «Белая книга U.R.S.I.» [5].

Авторы настоящего доклада не ставили своей целью подготовить детальный обзор работ по указанной выше тематике, подробнейшая библиография по этому вопросу представлена в [5]. Цель доклада – охарактеризовать состояние исследований по данному направлению в мире и подчеркнуть основные тенденции, наметившиеся при решении основных проблем, связанных с радиофизическим и радиотехническим аспектами.

Следует подчеркнуть, что обсуждаемый вариант использования энергии солнечного излучения не является единственным и безусловным «фаворитом». Известны проекты передачи солнечной энергии с геостационарной орбиты посредством волновых пучков мощных лазеров на длине волны 1.06 мкм [5]. Рассматривается также возможность расширения сети наземных электрических станций на С-Б, расположенных в приэкваториальных областях Земли [5].

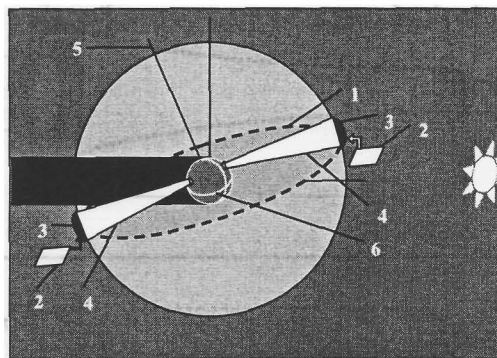


Рис 2

1. Общая характеристика идеи СЭС-БТЭ

Для иллюстрации существа этой идеи обратимся к рис. 2. На ГО 1 расположена космическая платформа, в состав которой входят: С-Б – 2, питающая постоянным током решетку – 3 фазированных микроволновых генераторов. Последняя формирует в свободном пространстве длинный волновой пучок – 4. Благодаря тому, что платформа стабилизирована относительно Земли, волновой пучок постоянно «нацелен» в заданную точку земной поверхности. В этой точке расположена ректифицирующая антенна (ректенна), перехватывающая основную часть пучка и преобразующая его энергию в постоянный ток. На рис. 2 показано положение космической платформы в двух оппозитных точках – полуденной и полуночной, а взаимное положение Земли и Солнца соответствует зиме в северном полушарии. Благодаря тому, что плоскость экватора наклонена к плоскости эклиптики, геостационарная платформа практически всегда обходит область, занятую тенью Земли. Зимой платформа проходит под тенью, а летом – над ней. Однако в периоды равноденствия платформа будет пересекать эту тень; легко сосчитать, что общее время затенения платформы в году составляет менее 1 %.

Система БТЭ обеспечивает формирование длинного волнового пучка, представляющего собой пространственно локализованное электромагнитное поле. Эквивалентная ширина диаграммы направленности пучка не превышает 1 угловой минуты. Геометрия этой системы схематически показана на рис. 3. Решетка фазированных антенных излучателей – 1, возбуждаемых посред-

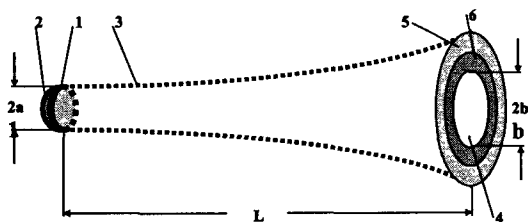


Рис. 3

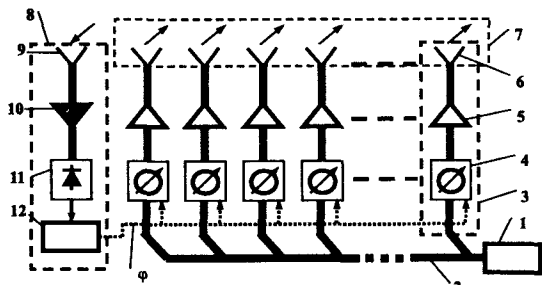


Рис. 4 Функциональная схема микроволнового сегмента СЭС

ством микроволновых генераторов, расположенных в контейнере - 2, формирует волновой пучок - 3, распространяющийся в свободном пространстве. На расстоянии L от излучающей антенны расположена ректенна - 4, которая перехватывает основную часть мощности волнового пучка. Области - 5 и - 6 в плоскости ректенны заняты т.н. дифракционным фоном пучка. В зависимости от конкретных условий возбуждения пучка возможно такое перераспределение дифракционного поля, что его плотность в непосредственной окрестности - 5 ректенны будет меньше, чем в периферийной области - 6.

Систему БТЭ характеризуют четырем величинами: диаметрами антенны и ректенны ($2a$, $2b$); длиной пучка, где F — эффективное фокусное расстояние излучающей антенны и длиной волны λ . Обобщенный параметр Френеля с:

$$c = \frac{2\pi ab}{L\lambda}, \quad (1)$$

связывающий четыре указанные величины, позволяет определить электродинамические параметры пучка в любом его поперечном сечении при условии, что задано амплитудно-фазовое распределение излучаемого поля. В большинстве описанных в научной литературе проектов фигурируют следующие значения указанные выше величин $a \in 0,5 - 1$ км, $b \in 2 - 5$ км, $F \approx 36000$ км, см и $\lambda_1 = 5.2$ см. Предполагаемый уровень мощности постоянного тока на выходе ректенны варьирует от сотен МВт до нескольких ГВт. Эффективность системы БТЭ принято

характеризовать отношением $\eta_0 = P_{эл}^{(рект)} / P_{эл}^{(с-б)}$, где $P_{эл}^{(рект)}$ и $P_{эл}^{(с-б)}$ — мощность постоянного тока на выходе ректенны и С-Б соответственно. Оценки, базирующиеся на характеристиках современных передающих и приемных устройств, позволяют считать что $\eta_0 = 50\%$.

Реализация обсуждаемой идеи обусловлена комплексом разноплановых проблем. Приведем их примерный перечень:

1. Создание гигантских геостационарных платформ.
2. Разработка принципов построения высокоэффективных С-Б.
3. Создание решетки фазированных микроволновых генераторов.
4. Выбор диапазона несущих частот и электромагнитная совместимость.
5. Экологическая безопасность на Земле.
6. Взаимодействие мощного микроволнового пучка с космической плазмой и атмосферой Земли.
7. Формирование оптимального волнового пучка.
8. Разработка принципов построения высокоэффективной ректенной решетки.
9. Создание системы автоматического ориентирования и стабилизации формы волнового пучка.

Ниже мы остановимся более подробно на большинстве из этих проблем, по данным публикаций [3-7]. Однако вначале кратко охарактеризуем состояние исследований и разработок по рассматриваемым вопросам в мире.

2. Характеристика международных и национальных проектов СЭС-БТЭ

Наибольшую активность в разработке идеи СЭС-БТЭ проявляют исследовательские группы в США, Японии и объединенной Европе.

Первый национальный проект был разработан в 1979 г., в США — проект NASA-DOE (национальное аэрокосмическое агентство — министерство энергетики США). В соответствии с ним предполагалось смонтировать на ГО 60 станций по 5 ГВт полезной мощности каждая. Площадь С-Б на одной станции ~ 50 км², ее эффективность $\sim 13\%$, выходная мощность по постоянному току ~ 9 ГВт. Суммарная микроволновая мощность, излучаемая антенной решеткой диаметром 1 км — 6.6 ГВт, рабочая частота 2.45 ГГц. Мощность по-

стоянного тока на выходе ректенны диаметром 10 км — 5.8 ГВт, общая эффективность ~ 7 %. Стоимость проекта оценивалась \$ 250 млрд.

В 1997 г. в США была разработана новая концепция т.н. «солнечных колонн» (Sun Tower), предусматривающая применение относительно небольшого числа системных компонентов, и ориентированная на снижение стоимости станций. Архитектурное построение таких станций подобно подсолнуху, «головка» которого представляет излучающую микроволновую антенну, а «листья» - С-Б. Проектная излучаемая микроволновая мощность на частоте 5.8 ГГц составляет ~ 200 МВт, диаметр антенной решетки — 260 м. Солнечные батареи диаметром 50 — 100 м предполагаются самораскрывающимися, их выходная мощность ~ 1МВт. Данная концепция ориентирована на использование ректенных решеток диаметром 4 км. В ее рамках рассматриваются варианты увеличения эффективности С-Б в 2 и в 4 раза. Это достигается посредством «грейферных» зеркальных конструкций, обеспечивающих увеличение плотности солнечной радиации на Si-панели за счет наложения на нее множественных отражений от наклонно установленных периферийных зеркал.

Активизация исследований по проблеме СЭС-БТЭ в Японии относится к началу 80 годов прошлого века. Исследователями университета в Киото впервые выполнены эксперименты по выяснению влияния мощного СВЧ - излучения на ионосферную плазму Земли. Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA) был разработан ряд моделей СЭС, предусматривающих использование поворотных зеркальных концентраторов солнечного излучения и «сэндвиче» образную компоновку С-Б с блоком микроволновых излучателей. Планируемая частота микроволновой несущей в этих моделях - 5,8ГГц. В модели 2003 года рассмотрена концепция парящих зеркальных концентраторов, что позволяет исключить в конструкции С-Б применение вращающихся сочленений. На 2010 год запланирован демонстрационный эксперимент [8], целью которого является запуск уменьшенного фрагмента СЭС на низко траекторную орбиту (НТО) (370км). Фрагмент представляет собой само развертывающуюся СЭС с площадью антенны 16×17.6 м, излучающей мощность ~ 100 кВт на частоте 5.8 ГГц. В соответствии с перспективными планами JAXA в 2030 году возможен запуск СЭС мощностью 5 ГВт на Г-О.

В 2003 году ESA (European Space Agency) выдвинуло программу интегрированной энергетической сети из солнечных энергетических станций наземного и космического базирования. Энергетические системы на базе СЭС рассматриваются в этой программе как наиболее энергоемкие производители, предназначенные для обеспечения пиковых поставок электроэнергии. Основой архитектурного построения СЭС в этой программе являются парусные колонны, на которых расположены тонкопленочные С-Б, разворачивающиеся в виде парусов. Рабочая частота — 2.45ГГц, источники микроволн - магнетроны, находящиеся в массовом производстве. Основные усилия, по мнению разработчиков программы, должны быть сконцентрированы на снижении стоимости доставки грузов на Г-О.

3. Доставка СЭС на геостационарную орбиту

Проблема транспортировки функциональных и конструктивных узлов СЭС на ГО, по мнению разработчиков, является ключевой. Ориентировочный вес одной станции может составлять $5 \cdot 10^4 - 10^5$ тонн. Большегрузные носители типа Falcon9-S9 способны доставить на ГО и на НТО груз весом ~ 9.5т и ~ 25т соответственно. Иными словами, для доставки одной СЭС потребуются несколько тысяч рейсов. Подсчитано, что при интенсивности трафика более 3000 стартов в год стоимость космических перевозок может быть снижена до \$22 за 1 кг веса [5]. Для уменьшения затрат предусмотрен сценарий двухступенчатой доставки: на НТО груз доставляют традиционные носители, а с НТО на ГО — электро - ракетные буксировщики.

4. Создание высокоэффективных солнечных батарей

Обычно в качестве преобразователей солнечного излучения в электрический ток используют панели кремниевых С-Б. При проектировании С-Б применительно к задачам СЭС приходится сталкиваться с двумя проблемами: 1) необходимостью увеличения эффективности преобразования;

$$\eta_{с-б} = P_{эл}^{(с-б)} / P_{изл},$$

где $P_{изл}$ — мощность падающего солнечного излучения, и 2) обеспечением оптимального пози-

ционирования С-Б относительно Солнца при движении СЭС по ГО.

Традиционные кремниевые С-Б теоретически могут обладать эффективностью $\eta_{с-б} \approx 30\%$, однако практически эта величина редко достигает 20%, что определяется относительно большой шириной запрещенной зоны и малой подвижностью носителей в полупроводнике. Энергетический выход подобных С-Б составляет $\sim 0.2 \text{ кВт} / \text{м}^2$; или $1 \text{ кВт} / \text{кг}$ (веса С-Б); для получения электрической мощности 1 ГВт необходима С-Б площадью 5 км^2 , весом 10^3 т . Низкая эффективность преобразования существующих С-Б серьезно ухудшает общий показатель эффективности системы СЭС-БТЭ. Весьма перспективными в этом плане представляются С-Б на основе структур из С- нанотрубок [9]. В литературе [10] имеются сообщения об экспериментально достигнутом значении эффективности в них $\sim 80\%$.

При движении СЭС по ГО платформа вместе с С-Б непрерывно меняет свою ориентацию относительно положения Солнца, в результате чего активная площадь С-Б также изменяется. Для ослабления влияния этого явления стремятся либо оборудовать С-Б устройством автоматического позиционирования относительно Солнца, либо сделать ее всенаправленной. При первом способе, однако, возникает необходимость во вращающихся сочленениях, которые обеспечивали бы передачу электрической мощности высокого уровня, что само по себе достаточно сложно. Поэтому стремятся создавать конструкции второго типа, примерами которых являются «солнечные колонны» и «парусные колонны», упомянутые выше. Для той же цели предложены конструкции Грейферных зеркальных концентраторов, обеспечивающих увеличение плотности освещенности С-Б. Оригинальная архитектура СЭС предложена в одном из последних японских проектов [8]. В нем энергетическая и микроволновая части СЭС совмещены. Точнее панели С-Б располагаются сверху и по периметру микроволновой части, обращенной вниз. Благодаря этому упраздняются общие шины сильноточного питания и существенно повышается степень унификации аппаратуры. Однако, при движении СЭС по ГО, в ее оппозиционных точках, эффективная поверхность С-Б изменяется от 1 до 0.64, что приводит к необходимости соответствующего резервирования ее площади.

5. Микроволновый сегмент СЭС

В рассматриваемых сейчас проектах СЭС-БТЭ планируют использовать большие излучающие антенны с размерами от нескольких сотен метров до 2 км в поперечнике. Вполне понятно, что такие устройства целесообразно проектировать в виде фазированных антенных решеток, основой которых является элементарная ячейка с излучателем. Число таких ячеек, в зависимости от типа источника микроволновой несущей и размеров антенны, колеблется от 10^4 до 10^8 . Обычно элементарные ячейки komponуют в модули из 10 – 100 элементов, а их, в свою очередь – в субрешетки. Предполагается, что модули, а в ряде случаев и субрешетки монтируют и настраивают до вывода СЭС на ГО.

Микроволновый сегмент СЭС включает в себя функциональные узлы и устройства, показанные на функциональной схеме рис. 4 [11]. СВЧ – колебание от задающего генератора – 1 посредством системы волноводных разветвителей – 2 распределяется на элементарные излучающие ячейки – 3. В состав каждой ячейки входят управляемый фазовращатель – 4, усилитель – 5 СВЧ – колебаний и собственно элементарный излучатель – 6. Конструктивно ячейки объединены в микроволновый модуль – 7. Обычно в состав антенной решетки или субрешетки включают одну или несколько ячеек – 8 для регистрации т.н. пилот – пучка, предназначенного для управления траекторией всего волнового пучка, излучаемого антенной (см. ниже). В состав ячейки пилот – пучка входят: элементарная приемная антенна – 9, усилитель – 10 и фазовый детектор – 11, сигнал с выхода которого поступает на контроллер – 12, управляющий фазовращателями – 4 в цепях излучающих ячеек. Схема на рис. 4 соответствует устройству на твердотельных усилителях, в качестве задающего генератора здесь предусматривается задающий генератор на электровакуумных приборах. На схеме не показаны источники электрического питания, а также устройства для теплоотвода рассеиваемой мощности. Узлы, входящие в состав микроволнового сегмента обычно komponуют в виде многослойных структур [11-13], это обусловлено стремлением к минимизации габаритов и массы, а также к уменьшению потерь в шинах питания. В качестве источников микроволновых колебаний, применительно к задачам СЭС, обычно предполагают электровакуумные генераторы/

усилители: клистрон, магнетрон и ЛБВ, а также полупроводниковые приборы (ПП). Наиболее перспективными на данном этапе считаются клистрон и магнетрон. В таблице 1 [8] приведены основные параметры двух таких приборов, работающих на частоте 2.45 ГГц. Из приведенных данных видно, что, хотя клистрон обеспечивает получение более высокого уровня мощности, магнетрон оказывается более предпочтительным по показателям эффективности, спектральной чистоты излучения и сроку службы.

В диапазоне 5.8 ГГц разработаны аналогичные приборы, в частности, клистрон [8] генерирует мощность ~ 26 кВт (28 кВ, 1.12А), температура его корпуса и магнитной системы 300°C, а коллектора – 500°C. Конструктивные параметры микроволнового сегмента СЭС на базе такого прибора приведены в таблице 2. Близкими характеристиками обладает передатчик на базе магнетрона мощностью 5 кВт, имеющего эффективность ~ 85%. Следует отметить оригинальные разработки [14] серии высокостабильных магнетронов на частотах 2.45 ГГц и 5.8 ГГц. На базе этих приборов созданы антенные модули с излучаемой мощностью 4кВт. Используемые магнетроны снабжены системой фазовой автоподстройки частоты, обеспечивающей стабильность не хуже, чем 10-8.

Еще одним видом устройств для получения микроволновых колебаний являются ПП усилители. Обычно в микроволновой технике используют транзисторы на базе соединений: InGaAs, GaN и SiC [6]. Работа ПП усилителей в режиме класса Е обеспечивает получение значений т.н. полной эффективности $\eta = (P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}) / P_{\text{пит}}$ более 80%, в частности, ожидается, что на частотах до 5 ГГц эта величина для GaN – транзисторов составит >85 %. На рис. 5 приведена зависимость η от частоты для трех указанных выше ПП – материалов.

Представляет интерес сопоставить параметры микроволновых сегментов СЭС, проектируемых на основе трех типов рассмотренных выше СВЧ – генераторов/усилителей. Рабочая частота рассматриваемых систем 5.8 ГГц, а проектная излучаемая мощность 2 ГВт. Данные сравнения приведены в таблице 3, из которой следует, что более предпочтительным является магнетронный передатчик; он обладает наименьшим весом и имеет приемлемый температурный режим. Транзисторный вариант не требует высоковольтного питания, однако температурный режим перехо-

да требует применения специальных мер теплоотвода.

6. Проблемы электромагнитной совместимости и экологической безопасности

Наиболее приемлемые для систем СЭС-БТЭ частоты (2.45 ГГц и 5.8 ГГц) расположены в т.н. полосе ISM (Industry, Science and Medical), которая соответствует ряду наземных и космических телекоммуникационных систем. Ввиду того, что уровень мощности, излучаемой системами СЭС-БТЭ на несколько порядков превышает мощности связанных и даже радиолокационных систем вполне объяснима опасность возникновения перекрестных помех. В работе [15] дан анализ требований к чистоте спектра излучения на частоте 2.45 ГГц, а также к уровню боковых антенных и решеточных лепестков.

Известно, что микроволновое излучение пагубно влияет на здоровье человека. Обычно считают, что вредность такого воздействия связано с тепловыми эффектами. В соответствии с руководящими материалами ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [16] плотность мощности профессионального облучения составляет порядка 10 – 50 Вт/м². Аналогичные нормы IEEE – стандарта регламентируют этот уровень для диапазона 2.45 – 5.8 ГГц величинами: ~100 Вт/м² при экспозиции 6 мин и ~40 Вт/м² – при экспозиции 30 мин соответственно [17].

Воздействие атмосферы на микроволновый пучок в нормальных условиях незначительно, оно связано с поглощением в парах воды и кислороде, а также рассеянием на неоднородностях коэффициента преломления воздуха. На частотах 2.45 – 5.8 ГГц поглощение оценивают величиной 7х10-3дБ/км [18], а полные потери в атмосфере составляют 3,5х10-2дБ. Дождь на трассе распространения волнового пучка увеличивает потери. Так, на частоте 5.8 ГГц, изменение интенсивности дождя от 5 до 150 мм/час приводит к увеличению потерь с 0.01 до 1 дБ/км [19].

При распространении микроволнового пучка через ионосферную плазму имеют место следующие линейные эффекты: рефракция, фарадеевское вращение плоскости поляризации, сцинтилляция и поглощение. Однако, благодаря большим размерам ректенны, влияние этих эффектов на эффективность системы БТЭ пренебрежимо

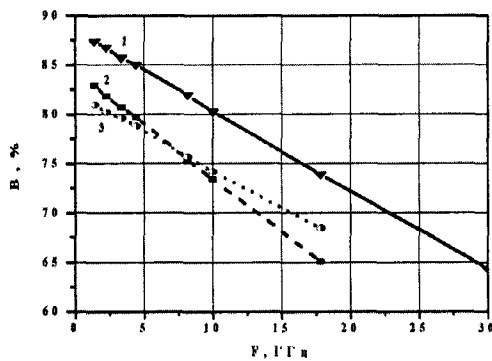


Рис. 5. Зависимость эффективности III-V усилителей от частоты: 1- GaN ; 2 - SiC; 3 - InGaAs

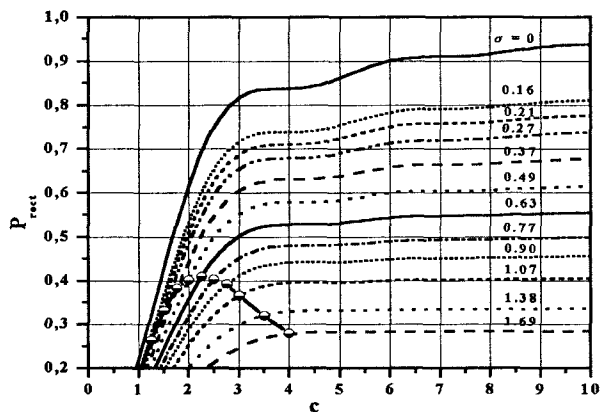


Рис. 6. Зависимость принятой ректенной мощности от параметра Френеля

мало. В противоположность этому, нелинейные эффекты взаимодействия микроволн и космической плазмы могут оказаться существенными именно при больших плотностях мощности пучка. К нелинейным эффектам относят: омический разогрев плазмы; плазменный эффект Холла, обусловленный пондеромоторными силами; термо самофокусировку пучка; трех волновое взаимодействие и возбуждение электростатических волн в МГц-диапазоне волн. Поглощение в нижних слоях ионосферы (слои D и E) ограничивает максимальную плотность мощности микроволнового пучка величиной порядка 230 Вт/м^2 [20]. В работе [21] показано, что возбуждение электростатических волн в МГц-диапазоне волн может привести к дополнительным потерям волнового пучка порядка 0.01%. Эффект самофокусировки микроволнового пучка в плазме из-за неоднородности плотности энергии в пучке исследован теоретически в работе [22]. Там, в частности показано, что при учете реальных параметров пучка и плазмы вероятность проявления этого эффекта ничтожна.

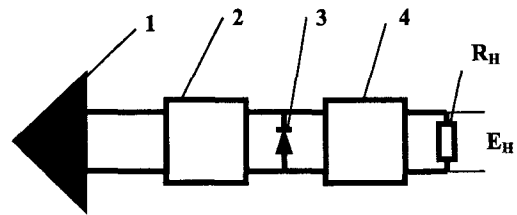


Рис. 7. Функциональная схема элементарной ректенной ячейки

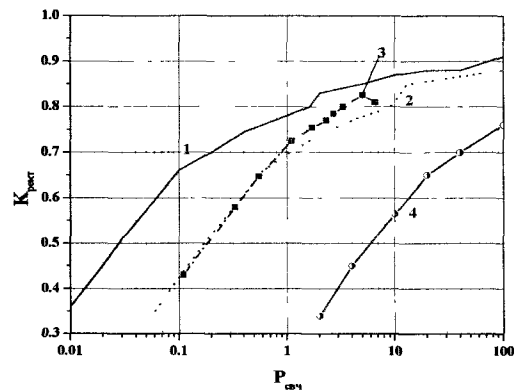


Рис. 8. Эффективность преобразования ректенного элемента в зависимости от мощности микроволнового сигнала

Почти все приведенные выше оценки являются результатом теоретического анализа, исключение составляют данные, относящиеся к взаимодействию интенсивного микроволнового пучка с космической плазмой. Эти результаты получены в экспериментах, проведенных в Японии [23], с помощью небольших ракет.

7. Формирование оптимального волнового пучка

Волновой пучок представляет собой особое формирование электромагнитного поля, в котором его ширина существенно превышает длину волны, а протяженность пространственной локализации поля - много больше его ширины. Условия и методы формирования волновых пучков впервые рассмотрены в работе [24]. В зоне Френеля, т. е. при $L > (2a)^2 / \lambda$, где L — расстояние от излучающей апертуры до плоскости приема (рис. 3), волновой пучок является слабо расходящимся, и это обстоятельство позволяет использовать его для передачи электромагнитной энергии с малыми потерями. В данном рассмотрении подразумевается, что потери мощности обусловлены лишь дифракционным фоном, выходящим за пределы ректенны.

При проектировании систем СЭС-БТЭ по заданным параметрам $2a$, $2b$; L , λ , а также мак-

симальной плотности излучаемой мощности уместно рассматривать две доктрины:

А) Обеспечение экологически «чистой» зоны за пределами ректенны.

Б) Передача максимально возможной мощности на ректенну.

Их реализация предполагает разную структуру волновых пучков и соответственно - разные амплитудно - фазовые распределения излучаемых полей. Если первый вариант допускает размещение ректенны в относительно плотно населенных регионах, то второй - ассоциируется с малонаселенной местностью. Все упомянутые выше проекты СЭС-БТЭ ориентированы на реализацию первого варианта, т.е. - использование усеченного гауссовского распределения (УГР) излучаемого поля [25]

$$V(\rho) = \exp(-\sigma\rho^2), \quad (2)$$

где $\sigma = (a/\omega_0)^2$, ω_0 — характерный размер гауссовского распределения, $\rho = r/a$ — нормированная координата. Как отмечалось выше, при заданном амплитудно - фазовом распределении излучаемого поля $U(\rho_1)$ и параметре Френеля c , поле в плоскости ректенны $V(\rho_2)$ в квазиоптическом приближении определяется в виде:

$$V(\rho_2) = \frac{ac}{b} \int_0^1 U(\rho_1) J_0(c\rho_1\rho_2) \rho_1 d\rho_1, \quad (3)$$

где $\rho_1 = r/a$, $\rho_2 = r/b$ — нормированные координаты в плоскости антенны и ректенны соответственно, $J_0(\cdot)$ — функция Бесселя нулевого порядка. Энергетический коэффициент передачи в такой системе БТЭ имеет вид:

$$\eta(c, \sigma) = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{\int_0^1 |V(\rho)|^2 \rho d\rho}{\int_0^1 |U(\rho)|^2 \rho d\rho}. \quad (4)$$

Для каждого значения c может быть найдено такое значение σ_{opt} , которому соответствует максимум функционала (4). На рис. 6 приведено семейство кривых $P_{рект}$, соответствующих числительно выражения (4), в зависимости от параметра c и разных величинах σ . Нормировка значений принятой ректенной мощности $P_{рект}$, отложенных по вертикальной оси рис. 6, соответствует единичной излученной мощности, при фиксированной максимальной амплитуде поля. Кривая на этом рисунке, обозначенная $\sigma = 0$,

соответствует равномерному распределению излучаемого поля. Легко заметить, что по мере роста σ , т.е. «обострения» УГР, уровень принятой ректенной мощности уменьшается потому, что соответствующим образом падает коэффициент использования излучающей апертуры. На приведенном рисунке огибающая $P_{рект}(c_{opt}, \sigma_{opt})$, отмеченная значками, очерчивает зону оптимальных условий передачи в случае УГР. Оптимальность условий здесь подразумевает энергетический баланс между потерями из-за диффузионного расширения всего гауссовского распределения и дифракционными потерями. Диффузионное расширение пучка определяет ширину центрального лепестка в плоскости ректенны, а дифракционные потери обусловлены краевыми эффектами на излучающей апертуре. В проектируемых системах СЭС-БТЭ $c_{opt} \approx 3,2$; $\sigma_{opt} \approx 1,35$, этому соответствует 10-дБ различие в плотностях мощности в центре антенны и на ее краях [26]. Указанным значениям на рис. 6 соответствует уровень падающей на ректенну мощности порядка 35%. При тех же условиях, т.е. $c_{opt} \approx 3,2$ и той же максимальной амплитуде, но равномерном распределении излучаемого поля ($\sigma = 0$), принятая ректенной мощность составила бы 83% [27, 28]. Итак, налицо выигрыш по энергоемкости системы СЭС-БТЭ в 2.4 раза благодаря полному использованию поверхности излучающей антенны.

В особых случаях, например, для системы СЭС-БТЭ с параметрами: $a=0.5$ км, $b=4.15$ км; $c=7$, $\lambda=5.2$ см возможно увеличение принятой ректенной мощности до величины ~ 93%, т.е. даже больше, чем уровень, соответствующий кривой $\sigma=0$ на рис. 6 при том же c . Это достигается благодаря введению дополнительной (к квадратичной) фазовой коррекции равномерно распределенного излучаемого поля, которая может быть найдена методом фазового синтеза [28-30].

8. Разработка принципов построения ректенной решетки

Ректенная решетка, подобно рассмотренному в п. 5 микроволновому сегменту, состоит из модулей, образованных элементарными ректенными ячейками, блок схема одной из которых показана рис. 7. Микроволновый сигнал, принятый элементарной антенной - 1, поступает через низкочастотный фильтр - 2 на выпрямляющий диод Шоттки - 3, размещенный в четверть - волновой рас-

пределенной линии. Выпрямленное напряжение E_H с диода подается через элемент согласования - 4 на нагрузку R_H . Эффективность преобразования микроволнового сигнала в постоянный ток зависит от уровня микроволновой мощности и согласования с нагрузкой. Если эти параметры не соответствуют оптимуму, эффективность преобразования падает. На рис. 8 приведены кривые зависимости эффективности преобразования $K_{\text{рект}}$ ректенного элемента от плотности мощности микроволнового сигнала на приемной антенне. Кривая 1 соответствует данным измерений, проведенных на частоте 2.45 ГГц [6, 30], кривая 2 получена при измерениях на частоте 5.8 ГГц [6, 31, 32], кривые 3, 4 получены пересчетом с данных на частоте 2.45 ГГц [6], при этом кривая 4 соответствует частоте 35 ГГц. Из рисунка видно, что при плотностях СВЧ мощности более $50 \text{ мВт} / \text{см}^2$ значения эффективности преобразования достигают 90% на частотах 2.45 и 5.8 ГГц.

При создании ректенных модулей и собственно ректенной решетки не возникает трудностей, связанных с их фазировкой по СВЧ, но появляются осложнения при их взаимном соединении по постоянному току. Оказывается, что при последовательном или параллельном соединении элементарных ректенн их суммарная выходная мощность становится меньше суммы парциальных выходных мощностей. Исследования показали, что более предпочтительным является параллельное соединение элементов [33].

Последние годы в литературе появилось достаточно много сообщений о разработке и испытаниях отдельных ректенных модулей и макетов ректенн на базе Si и GaAs- диодов Шотки. В таблице 4 приведены основные параметры некоторых вариантов ректенных модулей [6]. В таблице 4 приведены основные параметры некоторых вариантов ректенных модулей [6]. Ориентировочным энергетическим показателем ректенной решетки является удельная мощность постоянного тока $1 \text{ кВт} / \text{м}^2$.

Укажем еще один вид ректенной системы, который позволяет преобразовывать микроволновую мощность непосредственно в постоянный ток. Речь идет о циклотронно - волновом преобразователе (ЦВП) [34]. Использование ЦВП целесообразно, когда приемная антенна выполнена в виде параболического зеркала или фазированной по СВЧ антенной решетки. Первые образцы подобных устройств обеспечивали преобразование

микроволновой мощности $\sim 1-1,5 \text{ Вт}$ с эффективностью 56%. Лабораторные образцы ЦВП более поздних разработок преобразовывали уже 25 Вт мощности с эффективностью 70-74% [35]. В дальнейшем планируется создать ЦВП на уровень мощности 10-20 кВт с ожидаемой эффективностью 60-83% [36].

9. Система автоматического ориентирования волнового пучка

Без преувеличения можно сказать, что система автоматического ориентирования волнового пучка (АОВП) по своему функциональному назначению является основной частью комплекса СЭС-БТЭ. Система АОВП, в первую очередь, должна обеспечивать совмещение оси волнового пучка с центром ректенны в реальном масштабе времени. Только в этом случае энергия микроволнового пучка будет преобразовываться в постоянный ток без избыточных потерь, и только в этом случае опасность облучения окрестной с ректенной территории мощным микроволновым полем будет сведена к минимуму.

В литературе описано достаточно много вариантов «архитектурного» построения систем АОВП, работающих на принципе отражения части сигнала, принятого ректенной, обратно на излучающую антенну (ретродиректорные системы). Рассмотрим принцип работы подобной системы АОВП, функциональная схема которой показана на рис. 9. Ректенная решетка, включающая большое число элементарных приемных антенн - 1, расположена в плоскости А-А. Выпрямляюще - преобразующая часть ректенны изображена в виде блока - 2. В центре решетки размещен угловой отражатель - 3 или аналогичное ему устройство, которое переотражает падающее на него поле П-П точно по тому же направлению, т.е. формирует пилот - пучок. Ввиду того, что размеры отражателя малы, отраженное им поле О-О имеет вид сферической волны, радиус кривизны фазового фронта которой в плоскости Б-Б передающей антенной решетки равен L .

Излучающая антенная решетка Б-Б на рис. 9 представлена набором модулей - 4, включающих большое число элементарных ячеек - 5 (показана одна) и одну ячейку - 6 для приема пилот - пучка. Все излучающие ячейки возбуждаются усилителями - 7, на входы которых поступает сигнал задающего генератора - 8. Сигналы с выходов ячеек пилот - пучка поступают на один из

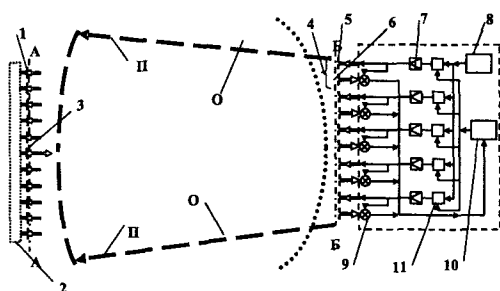


Рис. 9. Функциональная схема системы АОВП

входов фазовых детекторов - 9, при этом на второй их вход подается сигнал, излучаемый данным модулем. На выходе фазовых детекторов вырабатываются сигналы, соответствующие разности фаз двух входных сигналов. Таким образом, при изменении угла ориентации пилот - пучка О-О его сферический фронт развернется относительно своего исходного положения и фазовые детекторы всех модулей зарегистрируют соответствующие приращения разности фаз. Сигналы фазовых рассогласований с блоков - 9 поступают на центральный процессор - 10, где с помощью соответствующих контроллеров вырабатываются сигналы управления фазовращателями - 11. В результате, осуществляется коррекция ориентации излучаемого пучка таким образом, чтобы разности фаз на фазовых детекторах стали равными нулю, при этом ось волнового пучка совместится с центром ректенны.

Существуют разные варианты построения системы АОВП, в том числе, и по частоте пилот - пучка (ω_n). Так в [37], в качестве датчиков изменения угла наклона траектории пучка предполагается использовать интерферометры космического или наземного базирования, работающие на частоте (ω_s) основного энергетического канала. Для того, чтобы обезопасить приемную аппаратуру пилот - пучка от воздействия интенсивного излучения передающей антенны, эти частоты обычно разносят $\omega_n \neq \omega_s$, при этом для формирования пилот - пучка используют локальный генератор (ЛГ). В работе [38] для устранения 2π - неоднозначности используется пилот - пучок с двумя частотно - асимметричными сигналами $\omega_s + \Delta\omega$ и $\omega_s + 2\Delta\omega$ на частоте ЛГ $\omega_n = 2\omega_s$. В последующей модификации этой системы (2.45 ГГц) использован пилот - сигнал на частоте $\omega_s/3$, при этом частота ЛГ на приемного конце синтезируется из пилот сигнала. При таком построении системы АОВП исчезают трудности, связанные с нарушением синхронизации, обусловленным нестабильностью частоты и фазы ЛГ.

Оригинальная система АОВП рассмотрена в работе [39], в ней частоты пилот - пучка и передающей антенны равны 3.85 и 5.77 ГГц соответственно. В системе АОВП [40] частоты ω_s и ω_n — одинаковы (подобно [37]), но сигнал пилот - пучка формируют посредством шумоподобной модуляции в некоторой полосе частот. На стадии обработки сигнала для подавления несущей применяют узкополосные фильтры, которые обеспечивают на промежуточной частоте подавление центральной частоты не хуже -100 дБ. В экспериментальном макете подобной системы с полосой модуляции пилот-сигнала ~ 6 МГц достигнута точность измерения разности фаз лучше, чем 0.1°.

Итак, в «штатном» режиме работы система АОВП обеспечивает непрерывное совмещение оси излучаемого волнового пучка с центром ректенны. В нештатных ситуациях, например, при случайном исчезновении пилот-пучка излучение всех N элементов антенны оказывается расфазированным и волновой пучок рассеивается по всем направлениям полусферы, т.е. амплитуда поля в главном направлении уменьшается в N раз.

Заключение

Со времени публикации предыдущего обзора на рассматриваемую тему [41] значительно изменился не только уровень проработки основных функциональных узлов и комплексов системы СЭС-БТЭ, но во многом трансформировались и концепции, закладываемые в ее построение.

Одним из слабых мест первых проектов была весьма низкая величина суммарной эффективности передачи энергии $\eta_{\text{сум}} \sim 7-10\%$, что обусловлено, в первую очередь, низкой эффективностью преобразования солнечной энергии в постоянный ток $\eta_{\text{с-б}} \sim 15-20\%$. В этой связи весьма обнадеживают результаты экспериментальных исследований композитных солнечных элементов на основе С - нанотрубок, обещающих увеличение $\eta_{\text{с-б}}$ до 80%, что привело бы к увеличению $\eta_{\text{сум}}$ до 40%. Кроме того, использование подобной технологии позволило бы существенно уменьшить размеры и вес С-Б. ----

Не смотря на то, что при проектировании передающей аппаратуры предпочтение пока отдается магнетронным и клистронным генераторам/усилителям, значительный прогресс достигнут в создании ПП - усилителей особенно на базе соединений GaN, имеющим в диапазоне 2.45-5.8 ГГц

эффективность 85 % и выше. Благодаря тому, что ПП – усилители технологически совместимы с системами полосковых элементов (мультиплексоры, фильтры, элементарные излучатели и пр.) уместно предположить, что при условии решения проблемы теплоотвода, их шансы на роль основного элемента микроволнового сегмента СЭС могут значительно возрасти.

Основываясь на современном состоянии разработок основных функциональных узлов системы СЭС-БТЭ, можно представить общую картину, поэтапно характеризующую эффективность преобразования мощности постоянного тока от С-Б в постоянный же ток на выходе ректенны, в виде таблицы 5. Эти данные заимствованы из работы [6].

Нельзя сказать с полной уверенностью, что комплекс экологических проблем, которые могут возникнуть на стадии создания СЭС, а в последующем – на стадии их эксплуатации, решен. В частности, нет оценок влияния массовых пусков мощных ракет носителей (до 3000 в год) на атмосферу и ионосферу Земли. Оценки влияния мощных микроволновых пучков на ионосферу существуют в основном пока в теоретическом виде. При этом объективных оценок влияния их длительного воздействия на биосферу Земли пока нет. Не известно также, какие климатические последствия могут возникнуть из-за стационарного, локального нагрева больших объемов воз-

духа в зоне мощных микроволновых пучков. Надо думать, что на все эти и подобные вопросы со временем будут даны обнадеживающие ответы. По-видимому, только в этом случае проекты СЭС-БТЭ будут иметь право на осуществление.

Тем не менее, серьезность намерений инициаторов идеи СЭС-БТЭ, вообще говоря, не вызывает сомнений. Действительно, японской национальной программой предусмотрен в 2010 году запуск на НТО уменьшенного само разворачивающегося фрагмента СЭС, и при обнадеживающих результатах этого эксперимента в 2030 году запланирован вывод на ГО СЭС мощностью ~ 5 ГВт. В США, как заявлено на представительском докладе [42], программа солнечной энергетики отнесена в разряд проблем, затрагивающих национальные интересы; для координации работ в этом направлении предполагается создание специальной комиссии. В состав комиссии кроме представителей конгресса должны войти также представители ряда ведущих министерств и ведомств. Вероятно, что в недалеком будущем, вполне резонно может встать вопрос о квотах при распределении мест под Солнцем на ГО.

Авторы благодарят Н. Шиохару (N. Shinohara) и Д. Пребла (D.Preble) за представленные материалы черного варианта «Белой книги» и плодотворный обмен мнениями.

Таблица 1

Параметр	Клистрон	Магнетрон
Вых. Мощность	50 кВт	4.39 кВт
Эффективность СВЧ/пост. ток	0,74	81.7 %
Отношение	120 дБ-->10 кГц	110 дБ-->10 кГц
	135 дБ-->1 МГц	137 дБ-->1 МГц
	140 дБ-->20 МГц	160 дБ-->20 МГц
Несущая/шум	160 дБ-->100 МГц	196 дБ-->50 МГц
Срок службы	25 лет	50 лет

Таблица 2

Элемент микроволновой части	Вес, приведенный к площади антенны
Клистрон	8.17
Блок питания	10.5
Щелевая волноводная антенна	6.0
Радиаторы теплоотвода	0.69
Приведенная масса модуля (из расчёта 1 кг/кВт)	15.0
Общий вес	40.4

Таблица 3

Тип прибора	Клистрон	Магнетрон	Транзисторный усилитель
Макс. Мощность	26000	5000	59
Рабочее напряжение (В)	28000	6000	80
Эффективность	83	85.5	90
Масса генератора (кг)	34.15	1	0.001
Раб. температура	300-корпус 500-коллектор	350-радиатор	
Число генераторов на излучающей апертуре диаметром 500 м	209863	~400000	~84000000
Характ. масса передатчика	40.4	32	33.9

Таблица 4

Тип ректенны	Раб. частота	Изм. эффект. преобразования	Вых. Мощность пост. Тока	Поляризация	Отношение мощности пост. тока к массе модуля
Печатные диполи	2.45	85 %	5	Линейная	4000
Круговые излучатели	2.45	81 %	5	Биполярная	263
Печатные диполи	2.45	70 %	1	Биполярная	-
Печатные бромби-ческие диполи	5.61	78 %	0.084	Круговая	-
Круговые излучатели	5.8	76 %	3	Линейная	-

Таблица 5

Этап преобразования	Эффективность	Мощность, ГВт
Вх. мощность пост. тока, ГВт		2.672
Эффективность микроволновых блоков		
Преобразования: пост. ток-микроволны	0.860	2.298
Микроволновые фильтры	0.891	2.048
Эффективность микроволновой антенны		
Случайные сбои подрешётки на подрешётке	0.96	1.966
Амплитудные ошибки	0.996	1.957
Фазовые ошибки	0.978	1.914
Квантование фазы	0.997	1.908
Квантование амплитуды	0.989	1.886
Эффективность апертуры антенны	0.98	1.849
Эффективность передачи волнового пучка		
Потери при распространении	0.979	1.809
Влияние дифр. потерь	0.921	1.666
Эффективность ректенны		
Случайные сбои на ректенне	0.990	1.649
Потери в микроволновых фильтрах	0.891	1.469
Эффективность ректенны (пост.ток)	0.86	1.263
Эффективность всей ректенной решетки	0.95	1.200
Эффективность пост.ток-пост.ток	0.45	

Литература

1. Griswell D.R., Waldron R.D. Results of analysis of a Lunar-based power system to supply Earth with 20000 Gw of electric power. // SPS91 Power from Space. Paris/Gif-sur-Yvette. August 27-30. 1991. — P.186.
2. US department of energy, Energy Information administration. International energy outlook 2002. Report № DOE/EIA 0484 (2001). March. 2002.
3. U.R.S.I. Radio Science Bulletin. 2004. — № 310.
4. U.R.S.I. Radio Science Bulletin. 2004. — № 311.
5. U.R.S.I. White Paper on a Solar Power Satellite (SPS). Issued in October, 2005 URSI Inter-commission Working Group on SPS.
6. McSpadden J.O., Makins J.C. //IEEE Microwave Magazine. 2002. — V.3. — №12. — P.46.
7. Matsumoto H. // IEEE Microwave Magazine. 2002. — V.3. — №12. — P.36.
8. Sasaki S., Tanaka K., Kawasaki S. et al. // U.R.S.I. Radio Science Bulletin. 2004. — №310. — P.9.
9. Varadan V.K., Xie J., Vonoy K.J., Yoon H. // U.R.S.I. Radio Science Bulletin. 2004. — №310. — P.36.
10. Varadan V.K., Hollinger R.D., Varadan V.V., Xie J., Sharma P.K. // Smart Materials and Structures. 2000. — V.9. — P.413.
11. Kawasaki S. // U.R.S.I. Radio Science Bulletin. 2004. — №310. — P.15.
12. Leong K.M.K.H., Chung Y., Yao W., Wang Y., Itoh T. // U.R.S.I. Radio Science Bulletin. 2004. — №311. — P.21.
13. Choi J., Mortazawi A. // U.R.S.I. Radio Science Bulletin. 2004. — № 311. — P. 47.
14. N. Shinohara, H.Matsumoto, K.Hashimoto. // U.R.S.I. Radio Science Bulletin. 2004. — №310. — P.29
15. Hatsuda T., Ueno K., Inoue M.// IEEE Microwave Magazine, 2002. — V.3. — No.4. — P.65.
16. ICNIRP. "Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz)" Health Physics. 1998. — No.74. — P.494.
17. IEEE. 1999. Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz IEEE. New York. 1999.
18. CCIR Report 719, Attenuation by Atmospheric Gases, Recomm. And Rept. Of CCIR. 1978. — P.100.
19. CCIR Report 721. Attenuation and Scattering by Precipitation and Other Atmospheric Particles. Recomm. And Rept. Of CCIR. 1978. — P.107.
20. Perkins F. W., Roble R. G. // J. Geophys. Res. 1978. — V.83, — No.A4. — P.1611.
21. Matsumoto H., Hashino Y., Yashiro H., Shinohara N. // Electronics and Communications in Japan. 1995. — Part3. — V.78. — No.11. — P.89.
22. Shinohara N., Shklyar D. R., Matsumoto H. 1996. — Part1. — V.79. — No.9. — P.92.
23. Goubau G., Schwering F. // IRE Trans. Antennas and Propagation. 1961. — AP-9. — P.248.
24. Takeshita S. //IEEE Trans. On Antennas and Propag. 1968. — V. AP-16. — No.3. — P.305.
- Арманд Н.А., Ломакин А.Н., Парамонов Б.М. // Радиотехника и электроника. 1983. — Т.26. — №7. — С.1479.
26. Ваганов Р.Б. // Радиотехника и электроника. 1997. — Т.42. — №4. — С.462.
27. Ваганов Р.Б., Коршунов И.П., Коршунова Е.Н., Шатров А.Д. Методы синтеза волновых пучков, применительно к проблеме передачи мощности в зоне Френеля. // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». Тезисы докладов и сообщений III-Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». 6-12 сентября 2004г. Изд-во НПИ ИПД «Авторское перо». Волгоград. 2004. — С.53.
28. Vaganov R.B., Korshunova E.N., Korshunov I.P., Shaposhnikov S.S., Shatrov A.D. // IEEE. Proceed. IV Intern. Conf. On ANTENNA THEORY AND TECHNICUS. Sevastopol. Ukraine. Sept. 9-12. 2003. — V.2. — P.809.
29. Ваганов Р.Б., Коршунова Е.Н., Коршунов И.П., Шапошников С.С., Шатров А.Д. // Радиотехника и электроника. 2003. — Т. — 48. — №11. — С. 1337.
30. Brown W.C. Electronic and mechanical improvement of the receiving terminal of a free-space microwave power transmission system. // Raytheon Co, Wayland. MA. Tech. Rep. PT-4964, NASA Report No CR-135194. NASA Contract No NAS3-19722. — P 66. — Aug. 1977.
31. McSpadden J.O., Fan L., Chang K. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1998. — V. 46. — Dec. — P.2053.
32. Miura T., Shinohara N., Matsumoto H. // Electronics and Communications in Japan. 2001. — V.84. — Part 2. — No.2. — P.27.
33. Watson D.C., Grow R. W., Jonson C. C. // J. Microwave Power. 1970. — V.5. — No.2. — P.72.
34. Vanke V.A., Matsumoto H., Shinohara N. // IEICE Trans. Electron. 2003. — V. E86-C. — No.7. — P.1390.
35. Арманд Н.А., Ломакин А.Н., Парамонов Б.М. // Радиотехника и электроника. 1983. — Т.28. — №1. — С.157.
36. Kaya N., Matsumoto H., Akiba R. // Space Power. 1993. — V.11. — No.1, 2. — P.267.
37. Mikami I., Mizuno T., Ikematsu H., Satoh H., Matsumoto H., Shinohara, Hashimoto K. // Proc. of URSI EMTS 2004. 2004. — P.317.
38. Hashimoto K., Tsutsumi K., Matsumoto H., Shinohara N. // U.R.S.I. Radio Science Bulletin. 2004. — №311. — P.31.
39. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.И. // Успехи физических наук. 1977. — Т.123. — вып. 4. — С.633.
40. Matsumoto H. // The Radio Science Bulletin. 1995. — No.273. — P.11.
41. Ванке В.А., Лопухин В.М., Росновский В.К., Саввин В.И. Сигорин К.И. // Радиотехника и электроника. 1982. — Т.27. — №5. — С.1014.
42. Preble D. Report Presented for the SPS Research Society Symposium, Japan. 2005. Friday, September 16, 2005. — <http://www.sspi.gatech.edu>.