

GEO 轨道兆瓦级空间太阳能电站接收整流技术研究

王颖^{1,2} 韦高¹ 董士伟² 禹旭敏² 李小军²

(1. 西北工业大学电子信息学院, 西安, 710029; 2. 中国空间技术研究院西安分院空间微波技术重点实验室, 西安, 710100)

摘要:依据中国空间太阳能电站建设中远期规划和技术发展水平,预估兆瓦级电站发射天线口径为 200 m 左右,并根据收发天线口径尺寸的约束关系以与接收天线口径相关的波束收集效率和构建成本之间的矛盾为问题导向,通过研究不同口径的接收天线口面上功率密度分布,分析与之匹配的后端整流电路需求,给出了接收天线口径的优选过程。研究结果表明 5 km 为较合理的兆瓦级电站接收天线设计建设指标,且在整个接收整流阵列中仅需同一种整流器件,同样整流电路即可实现较高的整流效率,为实现兆瓦级空间太阳能电站(Space solar power satellite, SSPS)的演示验证系统论证提供了技术支持。最后以此为基础研究了整流电路的设计实现,给出了适用于较低输入功率密度下提高整流效率的技术途径。

关键词:空间太阳能电站;兆瓦级;整流;功率密度;接收天线

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2018)S2-0103-06

Receiving Array and Rectifier for MW-Level SSPS in GEO Orbit

WANG Ying^{1,2}, WEI Gao¹, DONG Shiwei², YU Xumin², LI Xiaojun²

(1. College of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710029, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave CAST(Xi'an), Xi'an, 710100, China)

Abstract: Based on the medium and remote planning on space solar power satellite (SSPS) and technological development level in China, the transmitting antenna aperture is estimated to be about 200 m in the future. According to the constrains of transmitting and receiving antenna aperture, with respect to contradiction between beam collection efficiency and construction cost that are both associated with receiving antenna aperture, a receiving antenna aperture optimization process is given by studying power density distribution in receiving antenna with different sizes and analyzing the corresponding back end rectifying circuit requirements. Research results show that the reasonable size of receiving antenna in MW-level SSPS system is 5 km, while only type of diode and the same rectifier are adopted in the whole antenna area. This parameter supplies technical support for the realization of MW-level SSPS demonstration and verification system. On the basis of this, the implementation of rectification circuit is studied. Finally, feasible techniques for MW-level SSPS of lower power density are proposed.

Key words: space solar power satellite (SSPS); MW-Level; rectifier; power density; receiving antenna

随着人口和资源需求的增加,能源问题成为世界各国面临的重要挑战。自 1968 年 Peter Glaser 提出了空间太阳能电站(Space solar power satellite, SSPS)的概念以后^[1], SSPS 作为未来可持续发展的清洁能源解决方案之一,自 20 世纪 70 年代

起得到了很大的发展。从早期概念和可行性的研究,提出各种不同的系统构想开始,到有实质进展的关键技术突破、地面试验验证和电离层试验等等, SSPS 的研究工作在逐步细致深入中。随着航天器技术和核心器件的飞速发展,构建 SSPS 的障

基金项目:装备预研基金(6142411020302)资助项目;国家自然科学基金面上(51777168)资助项目。

收稿日期:2018-03-23; **修订日期:**2018-05-30

通信作者:王颖,女,工程师, E-mail: wangying_c504@163.com。

引用格式:王颖,韦高,董士伟,等. GEO 轨道兆瓦级空间太阳能电站接收整流技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(S2): 103-108. WANG Ying, WEI Gao, DONG Shiwei, et al. Receiving array and rectifier for MW-level SSPS in GEO orbit[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S2): 103-108.

碍在逐个扫除。日本已明确提出构建 SSPS 的发展路线及时间节点规划,计划在 2030 年完成百兆瓦级的空间演示验证,2040 年即开始吉瓦级商业化的 SSPS 的运行^[2]。中国近年来也十分重视 SSPS 的研究,相关团队相继发表了在系统方面的研究成果^[3-5]。中国空间技术研究院领导的研究团队致力于 SSPS 建设的论证攻关工作,已经提出了分阶段两步走的中远期发展建议,计划在 2030 年后实现兆瓦级 SSPS 的演示验证,之后随着关键技术的完善升级与验证,将在 2050 年左右最终建成吉瓦级 SSPS。

根据中国 SSPS 建设中远期的规划,本文首先简要介绍了 GEO 轨道兆瓦级 SSPS 微波能量传输系统方案,分析了电站收发天线口径尺寸的约束关系,重点研究了接收天线口面上功率密度分布对接收整流的需求及限定,并给出了实现兆瓦级电站较为合理的接收天线设计指标。最后以此为基础研究了整流电路的设计实现,提出了适用于兆瓦级电站的较低输入功率密度下提高整流效率的建议。

1 兆瓦级电站系统方案

1.1 SSPS 系统

已有的 SSPS 系统设想实现途径大致可分成两大类,一是在地球同步轨道(Geostationary earth orbit, 效率 GEO)上将太阳能转换为微波(或激光)后,通过无线方式传输到地面,地面上再通过变换将微波能(或激光能)转化为电能;另一类是在 GEO 轨道上将太阳光会聚,然后传输到地面,在地面上再进行转化^[6]。本文主要论述以微波无线能量传输技术为基础的 SSPS。微波无线能量传输技术是 SSPS 核心技术之一,具有较高的预期传输效率,在特定的频段范围内大气穿透性好,能量损耗小,可以通过波束调整实现高精度能量传输,安全性好,且技术相对成熟,特别适合于未来的大功率 SSPS 应用,是目前国际上 SSPS 研究的重点。描述的 SSPS 系统构成如图 1 所示,主要由空间段置于 GEO 的一颗巨大的太阳能卫星和地面电力设备两大部分构成,其中在轨卫星的功能是将太阳电池阵帆板收集到的太阳能转换成直流电,再由微波电路将直流电转换为微波,最后通过发射天线将微波能发射回地面。地面设施将空间发射回来的微波能量收集变换,最后经过整流天线整流得到的直流电能经直流/交流变换后汇入电网,供后续用户使用。

在整个系统链路中,整体效率可由 3 个转换环节上的效率乘积所得,分别为:光能转换为微波能的空间段的转换效率、表示整流天线区域接收的微波能与发射天线发射的微波电能的比率的波束收

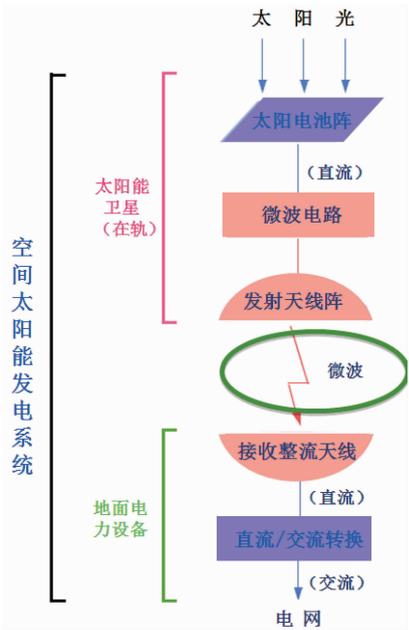


图 1 SSPS 系统构成

Fig. 1 SSPS system construction

集效率(Beam collection efficiency, BCE),以及微波能转换为直流的地面段的转换效率。

根据微波理论,最佳场分布情况下的收发天线之间的波束收集效率 η_{beam} 可表示为

$$\eta_{\text{beam}} = 1 - e^{-\tau^2} \quad (1)$$

式中: $\tau^2 = \frac{A_t A_r}{(\lambda D)^2}$, A_t , A_r , λ 和 D 分别为发射天线、接收天线的面积、工作波长和传输距离^[7]。

根据国际无线电科学联合会(International union of radio science, URSI)发表的白皮书上关于 SSPS 的观点,从经济角度考虑,SSPS 系统的直流-微波-直流的转换效率要达到 50%,即要保证空间段的转换率为 70%,波束收集率为 90%,地面段的转换率为 80%,SSPS 才能保证发射成本,实现经济效益的产出^[8]。空间段和地面段的能量转换效率由主要部件的效率水平决定,而在工作频率固定情况下波束收集效率则主要由收发天线尺寸约束,是与系统方案设计息息相关的参量。因此,波束收集效率是后续讨论兆瓦级方案的一个重要参数。

典型的 SSPS 系统如图 2 所示,其中发射天线的直径为 1 km,对应的地面接收整流天线直径为 4 km,工作频率为 5.8 GHz,此时整流天线中心微波的功率密度为 27 mW/cm²。假设发射端为高斯功率分布,则接收端的波束功率密度分布也是非均衡的,类高斯分布,整流天线功率密度分布特性如图 2 所示^[8]。由图中可知,中心功率密度与边缘功率密度差异可达 3 个数量级以上,而整流天线的微波一直流转换效率取决于微波功率输入的强度和

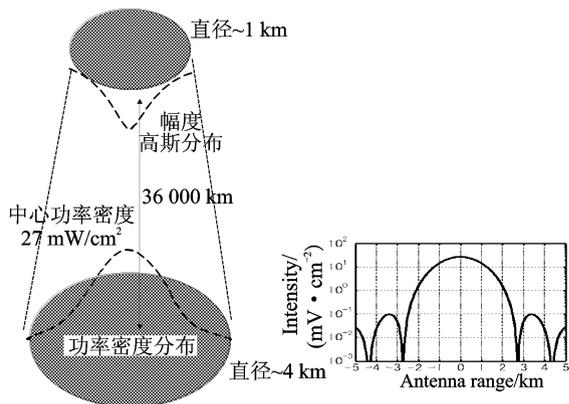


图 2 典型 SSPS 系统示意及整流天线功率密度分布特性

Fig. 2 Diagram of typical SSPS system and distribution characteristic of power density in antenna

后端连接的负载值。在最优微波功率输入强度和最佳负载阻值的情况下,才能获得最大的效率。这是由二极管的自身特性所决定的,因此,无论是较低或较高的输入功率强度都会使微波一直流转换效率低于最大值。表 1 给出了已有典型吉瓦级 SSPS 模型的参数,可以看到发射天线和接收天线直径可比拟,且均在公里量级,波束收集效率接近于白皮书中目标值的 90%。整流天线表面的等效功率密度可由 $\phi = E^2$ 计算得到,因此根据发射电场分布,以及采用简单的三角函数可以计算出模型接收天线边缘与发射天线中心垂直于地面方向之

间的夹角,即可得到边沿与中心的功率密度差异,结果见表 1 所列。由计算结果可知接收天线口面上中心到边缘的功率密度变化剧烈,数值相差 10 dB 以上,故而对于吉瓦级 SSPS 系统,为保证较高的整流转换效率,整流天线在功率密度较高的中心以及较低的区域需要采用不同的整流器件或方案措施。

1.2 兆瓦级电站

作为 SSPS 构建过程中的过渡环节,兆瓦级电站主要是完成系统总体方案设计以及核心技术攻关。虽然兆瓦级电站是吉瓦级电站构建的基础,但在规模上却存在较大的差异。考虑到 2030 年后的火箭运载能力和技术发展水平以及两步走计划在空间天线尺寸的跨越发展,发射天线直径在百米量级较为合理。相比较在空间建设难度地面的限制要小得多,且考虑由于发射天线尺寸缩小造成的波束收集效率降低,应适当增大接收天线尺寸,而寻找到合适的尺寸,实现较高的波束收集效率与最小化的建设规模之间的折中是本文研究的问题之一。另外,由于兆瓦级电站发射功率较吉瓦级电站低近 30 dB,则接收端收集到的功率密度要比吉瓦级电站低千倍以上,如何在如此低的功率密度下完成高效能量的接收整流,接收天线以及现有商用整流器件的实现也是需要探讨的问题。

表 1 典型 SSPS 模型参数

Tab. 1 Parameters of typical SSPS models

模型	频率 /GHz	发射天线 直径/km	整流天线 直径/km	收集效率 /%	输出功率 /GW	接收面中心 功率密度/ (mW·cm ⁻²)	边缘与中心 功率密度的 差值/dB
JAXA1 模型	5.8	1	3.4	86	1.3	26	-10.69
JAXA2 模型	5.8	1.93	2.45	87	1.3	100	-21.64
NASA/DOE 模型	2.45	1	1	89	6.72	23	-16.88

下面以 MR-SPS 方案为例进行讨论,中国空间技术研究院提出兆瓦级 SSPS 的结构如图 3 所示,采用模块化设计,通过旋转关节将太阳能电池阵分解为多个相互分离的子阵,在维持系统复杂性不增加的前提下,提高了系统的可靠性同时便于系统的组装和构建^[3]。根据前述分析,拟定兆瓦级电站空间发射天线直径 200 m,工作频率为 5.8 GHz,仍以 90% 的波束收集效率为目标计算,那么接收天线的直径将要达到 18 km。首先这在建设难度上将是巨大且近短期内不可实现的;其次兆瓦级 SSPS 作为系统试验验证,重点在运载、百米量级天线组装展开和微波无线能量传输技术等关键技术的验证,故而没有必要单纯追求较高的波束收集效率;最后,考虑兆瓦级 SSPS 到吉瓦级 SSPS 的

继承性,接收天线直径在公里量级较为适合。表 2 给出了地面接收天线直径在 3.5~7 km 范围的波束收集效率计算结果,可见波束收集效率在 10%~30% 之间,以此为基础分析发射功率和接收功率密度。将微波-直流转换效率按 80% 计,以地面直流输出功率 1 MW 为目标,则整流的微波功率为 1.25 MW,考虑微波在大气中损耗 8%^[9],可以反推计算出传输到地面的微波总功率和电站发射微波功率,具体结果见表 2。根据现有技术水平,预估 2030 年后能够在直径 200 m 的发射天线口面上产生 10 MW 以上的微波功率实现难度较大,故而接收天线直径在 4 km 以下的方案可以舍弃。但是也并非接收天线直径越大越好,众所周知,随着直径的线性增加,圆面积将以平方指数增大,而成

本是 SSPS 构建中需要考量的一个十分重要的因素,因此需要在尽可能大的波束收集效率和尽可能小的接收天线直径之间进行权衡,具体分析将在下一节中给出。此外,接收天线口面功率密度的数值与后端整流电路效率密切相关,具体内容也将在第 3 部分详细展开论述。

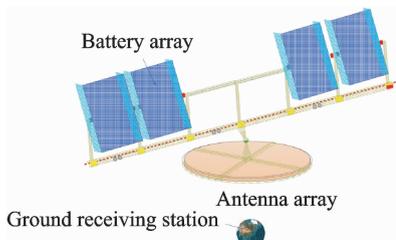


图 3 MR-SPS 方案

Fig. 3 Scheme of MR-SPS

表 2 不同直径接收天线情况下的系统指标计算

Tab. 2 System parameters of different receiving antenna sizes

接收天线直径/ km	BCE/ %	传输到地面的微波总 功率/MW	电站发射 微波功率 /MW	整流阵列 中心功率 密度/ ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)
3.5	8.35	14.97	16.27	0.014 75
4.0	10.77	11.6	12.61	0.011 43
4.5	13.43	9.3	10.12	0.009 17
5.0	16.31	7.66	8.33	0.007 56
5.5	19.38	6.45	7.01	0.006 35
6.0	22.6	5.53	6.01	0.005 45
6.5	25.99	4.8	5.23	0.004 74
7.0	29.46	4.24	4.61	0.004 18

2 接收天线口面功率密度分析

由表 2 计算所得的数据,根据发射功率已经初步筛选出接收天线直径在 4.5~7 km 范围,那么如何进一步优化以确定最优的接收天线直径就是本节需要研究解决的问题。主要思路是从接收天线口面上的功率密度分布入手,分析中心到边缘的功率密度的变化特性,从整流电路一致性及系统构建难度上考虑。

为方便起见,将接收天线接收到的功率归一化,即将中心功率最大处定为 1,接收天线边缘收到的功率与之将比,则可得到天线边缘与中心处的功率密度差异。假设收发天线完全对准的情况下,4.5 km 和 7 km 的整流天线阵列表面归一化功率密度分布如图 4 所示。不同于吉瓦级 SSPS 系统接收天线口面上功率密度的锐变分布,兆瓦级电站的功率密度分布相对较为均匀。当接收天线直径为 4.5 km 时,边缘功率密度较中心功率密度低约 0.8 dB;直径扩大到 7 km 时,该差值增大至接近 2 dB。可知兆瓦级电站系统受限于发射天线尺寸,

接收天线上的功率密度变化虽不及吉瓦级系统剧烈,但不同直径接收天线口面上中心与边缘功率密度的差值仍会有一定的差异,而整流二极管在最优的输入功率下,才能获得最大的效率。因此为保证整流效率,分析不同的功率密度需要对应的后端整流电路,以及不同的接收天线口面上具体需要的整流电路种类,据此作为接收天线直径选择的重要依据和约束条件。计算的不同直径接收天线边缘与中心功率密度相差数值如表 3 所列。

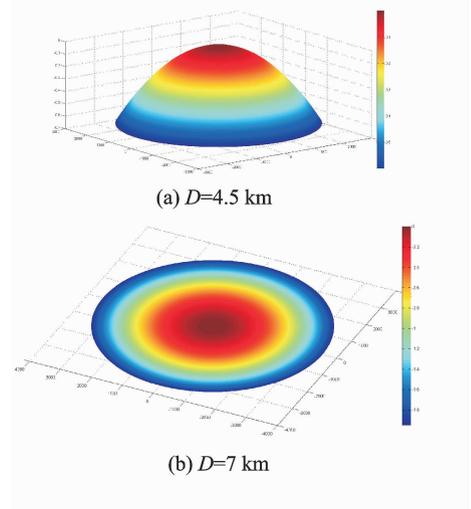
图 4 不同接收天线直径条件下整流天线阵列表面归一化功率密度分布 ($D_1=200$ m)

Fig. 4 Normalized distribution of power density with different receiving antenna sizes

表 3 不同直径接收天线边缘与中心的功率密度差值指标
Tab. 3 Power density difference of center and border with different receiving antenna sizes

接收天线直径/km	边缘与中心的功率密度差值/dB
4.5	-0.784 9
5.0	-0.971 7
5.5	-1.183
6.0	-1.414
6.5	-1.67
7.0	-1.948

前文已提及整流管的整流效率会随着输入功率的变化而变化。当输入功率较低时,由于加载在二极管输入端的电压小于或等于二极管导通电压,二极管并没有完全导通,所以整流效率较低。随着输入功率的逐步增加,二极管完全导通,整流效率有了明显的提高,但当二极管两端的输入电压超过击穿电压后,二极管反向击穿,整流效率会迅速地降低。因而在最优整流效率附近会有一定的动态范围,保证整流效率可以在一定的输入功率范围均可以保持较为理想的整流效率。为分析整流效率与输入功率的动态范围,图 5 给出了 AVAGO 公

司 HSMS2852 的仿真结果图,以其最大整流效率的输入功率 2 dBm 处为中心向两侧延伸,各下降 0.4 dB 时,效率下降约 3%,而输入功率下降 1 dB 时,效率则减小近 8%。因此,7 km 的接收天线直径上可能需要两种针对不同的输入功率的整流电路,在工程上不及 4.5 km 或 5 km 仅需一种形式的整流电路即可简单易行。因而 4.5 km 或 5 km 是更为适合兆瓦级电站的接收天线直径的指标。

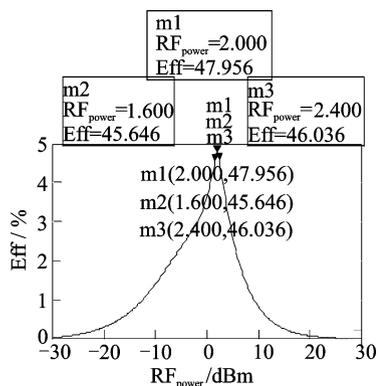


图 5 仿真的整流电路效率与输入功率关系

Fig. 5 Simulated conversion efficiency of rectifier against input power

此外,也可发现微波-直流转换效率 80% 的预期转换效率是基于吉瓦级电站较高的整流阵列处功率密度情况提出的,而在兆瓦级电站较低的功率密度情况下,这个预期效率降至 40% 左右将更为合理。但该指标并不影响本文中的分析结论,仅会使得最后输出的直流功率相应降低。因此,接收天线直径在 5 km 附近是实现兆瓦级电站较为合理的指标。

3 接收整流设计实现

“整流天线(Rectenna)”是由“整流电路(Rectifier)”和“天线(Antenna)”两个词合成而来,最早由 W. C. Brown 发明提出。整流天线的主要功能是用来接收微波能量,并将其转换成直流电,因而典型的整流天线由完成能量接收的接收天线以及将微波能量转换成直流电的整流二极管两部分构成。一般情况下,在天线和整流二极管之间会有一个低通滤波器,用以抑制高次谐波经天线再次辐射出去。另外,在整流二极管后有一个输出直流滤波器,用以将直流电能输出至负载,而将由于整流二极管的非线性而产生的高次谐波反射回二极管再次整流,以提高整流效率。整流天线的天线类型很多,如对称振子、Yagi-Uda 天线、微带天线以及抛物面天线等^[10]。整流电路也有许多类型,4 种常见的整流电路有半波整流电路、全波整流电路、桥式整流电路以及倍压整流电路。整流二极管方面,从微波能量传输技术早期 GaAs 肖特基势垒二极管,

到后来普遍使用硅肖特基势垒二极管,以及近年来随着新型材料及技术的发展,如 SiC 和 GaN 等用于提高整流效率及增大输入功率的新型二极管也在接收整流中发挥了重要的作用^[11]。

影响整流效率的主要参数为整流二极管的正向导通电压以及反向击穿电压。而导通电压影响整流电路在较低输入功率下的特性,本文仿真对比了 AVAGO 公司两款导通电压不同的二极管整流性能,分别为 HSMS2852 和 HSMS2860。图 6 给出了两款二极管整流效率随输入功率变化的情况,二极管 HSMS2852 的导通电压比二极管 HSMS2860 小,所以在输入功率在较低的一 30 dBm 到 0 dBm 区间,HSMS2852 的整流效率要比 HSMS2860 的效率高。但随着输入功率的增大,HSMS2860 的效率较 HSMS2852 有明显升高,且效率最大值超过 70% 以上,远高于 HSMS2852 不足 50% 的整流效率最大值,证明了在较低输入功率整流效率方面仍有研究提升的空间。

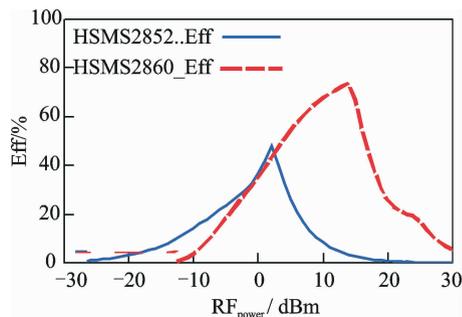


图 6 两款整流二极管对比

Fig. 6 Comparison of conversion efficiency between HSMS2852 and HSMS2860

目前,整流天线研制领域一个主要的研究方向是研制适合于一般在微瓦范围的较低功率微波的整流天线。应用之一是用于目标识别的 RF ID 标签、无线传感器和体内医疗器具供电等;另外一个较为受关注的应用就是环境能量拾取(Energy harvesting),但由于其面向的是被动的已有能量接收,因此工作频点主要为移动通信的 900 MHz 以及 WIFI 信号的 2.45 GHz。现有文献中,工作频点在 2.45 GHz 附近的情况,单管二极管的输入功率在 $10\mu\text{W}$ 以下时,整流效率一般不超过 30%^[12-14]。如何提高整流天线在低输入功率下的转换效率是整流天线设计的一大难点。主要实现途径有两条,一是基于现有肖特基二极管,从电路拓扑及设计方法上突破,最常见的是采用倍压整流电路提高整流效率;另外就是将接收天线与整流电路协同设计,通过天线与整流电路直接相匹配连接,避免了匹配电路带来的插入损耗同时抑制了高次谐波,从而有效地提高了整流天线在低输入功率

下的性能。此外,在器件方面寻求适用于较低功率的新型整流器件,如金属—绝缘体—金属二极管和自旋二极管等虽然目前技术尚不成熟,但也为从新型器件方面开展研究提供了技术途径。

另一方面,表2中计算得到的是整流功率密度,与相应的接收天线面积相乘才可得到输入功率,而在SSPS需求的直径千米级的接收天线面上,整流天线一般以阵列的形式实现。目前较为常见的整流天线是平面天线单元与整流电路一对一的形式,而天线单元尺寸普遍不大。因此若增大平面天线阵列单元面积即可提高单整流电路的输入功率,当然在此情况下阵列单元之间在接收天线的设计层面是否存在新的问题还有待进一步深入研究。

4 结 论

以中国SSPS建设中远期规划为需求,分析了兆瓦SSPS微波能量传输系统方案的特点,固定发射天线尺寸,根据电站收发天线之间的约束关系,研究了接收天线口面上功率密度的分布情况,以此为依据提出适用于兆瓦级电站的接收天线直径指标为5 km,且在整个接收天线上可以只采用一种整流器件及电路形式实现较高的整流效率,最后分析了较低输入功率下的整流电路的设计实现途径及方法。

参考文献:

- [1] GLASER P E. Power from the sun: Its future [J]. *Science*, 1968, 162:857-861.
- [2] SASAKI S, TANAKA K. Wireless power transmission technologies for solar power satellite [C]// 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission, Technologies Systems and Applications (IMWS). Kyoto, Japan: IEEE MTT-S, 2011.
- [3] 侯欣宾,王立,张兴华,等.多旋转关节空间太阳能电站概念方案设计[J]. *宇航学报*, 2015, 36(11):1332-1338.
HOU Xinbin, WANG Li, ZHANG Xinghua, et al. Concept design on multi-rotary joints SSPS [J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(11):1332-1338.
- [4] 杨阳,段宝岩,黄进,等.OMEGA型空间太阳能电站聚光系统设计[J]. *中国空间科学技术*, 2014, 34(5): 18-23.
YANG Yang, Duan Baoyan, HUANG Jin, et al. SSPS OMEGA: A new concentrator system for SSPS [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2014, 34(5):18-23.
- [5] DONG Shiwei, YU Hongxi, DONG Yazhou, et al. A new solar power satellite system faced to engineering: concentric disc [C]// Proceeding IEEE Wireless Power Transfer Conference. Perugia, Italy: IEEE, 2013:63-65.
- [6] 张兴华,侯欣宾,王立,等.空间太阳能电站聚光模式研究[J]. *中国空间科学技术*, 2016, 36(2):1-12.
ZHANG Xinghua, HOU Xinbin, WANG Li, et al. Investigation of light concentrating mode for SSPS [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2016, 36(2):1-12.
- [7] SASAKI S, TANAKA K, MAKI K I. Microwave power transmission technologies for solar power satellites [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(6): 1438-1447.
- [8] URSI SPS 国际委员会工作组.太阳能发电卫星白皮书[M].北京:中国宇航出版社,2013.
URSI inter-commission working group on SPS. Supporting document for the URSI white paper on solar power satellite systems [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2013.
- [9] 陈振国,杨鸿文,郭文斌.卫星通信系统与技术[M].北京:北京邮电大学出版社,2003.
CHEN Zhenguo, YANG Hongwen, GUO Wenbin. *Satellite communication system and technology* [M]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications Press, 2003.
- [10] McSpadden J O, Fan L, and Chang K, Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 1998, 46(12):2053-2060.
- [11] LI L, KISHI A, LIU Q, et al. GaN Schottky barrier diode with TiN electrode for microwave rectification [J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2014, 2(6):168-173.
- [12] VERA G, GEORGIADIS A, COLLADO A, et al. Design of a 2.45 GHz rectenna for electromagnetic (EM) energy scavenging [C]// IEEE Radio and Wireless Symposia. New Orleans, Louisiana, USA: IEEE, 2010:61-64.
- [13] OLGUN U, CHEN C, VOLAKIS J, Investigation of rectenna array configurations for enhanced RF power harvesting [J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2011, 10:262-265.
- [14] SUN Hucheng, GUO Yongxin, HE Miao, et al. Design of a high-efficiency 2.45-GHz rectenna for low-input-power energy harvesting [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11:929-932.