



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Microwave Wireless Power Transfer Technology—Article

逐日工程——空间太阳能电站地面验证系统创新设计、研制与实验研究

段宝岩^{a,*}, 张逸群^a, 陈光达^a, 赵泽^a, 米建伟^a, 李勋^a, 杨林^b, 栗曦^b

^a Research Institute on Mechatronics, Xidian University, Xi'an 710071, China

^b Research Institute of Antenna, Xidian University, Xi'an 710071, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 December 2022

Revised 24 February 2023

Accepted 27 November 2023

Available online 30 November 2023

关键词

OMEGA-SSPS

全链路与全系统

波束收集效率

圆环阶梯型波形

灵巧结构

场耦合理论模型

波束指向控制

摘要

基于作者提出的欧米伽空间太阳能电站(OMEGA-SSPS)创新设计方案,作者团队研制了世界首个全链路、全系统的OMEGA-SSPS地面演示验证系统。第一,提出了OMEGA 2.0创新设计方案;第二,建立了聚光、光电转换与发射天线的场耦合理论模型及系统优化设计模型;第三,提出了兼顾高波束收集效率(BCE)与圆环阶梯型微波波形的设计理论及方法;第四,提出了聚光镜对日定向与发射天线对接收天线定向的控制策略及方法;第五,提出了高效散热的仿生设计与拓扑优化的理论及方法;第六,探明了提高接收天线接收、整流与合成效率的途径及方法;第七,突破了面向波束指向控制的高精度测量技术;第八,设计并研制了灵巧的机械结构;第九,研制的全链路与全系统的地面验证系统,可实现从实时跟踪太阳、高倍聚光、光电转换、微波转换与发射直至微波接收整流的全过程实验,得到了满意的结果。

© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. 引言

面对地球上可供开采的煤炭、化石能源的存量已非常有限[1]以及地球气候变化带来的日益严峻的挑战,加之中国提出的碳达峰(2030年)与碳中和(2060年)目标,开发利用空间太阳能是一个极具竞争力的选择。因地面上每平方米接收到的太阳能仅约136 W,而太空则高达约1360 W,如果加上聚光措施,其能量密度是相当可观的。

空间太阳能电站(SSPS)具有广阔的应用前景,虽说从空间向地面供电这一远期目标的实现尚需时日,但近期应用则是眼前的事,如在太阳同步轨道建造充电桩,可为众多小卫星充电,解决工作于中低轨道小卫星的电力供

给难题。因此,建造SSPS具有重要的现实与长远意义。

自Peter 1968年提出空间太阳能电站的概念[2],已过去54年。在过去的50余年中,对SSPS的研究,虽出现过几次高潮和低谷,但从未停止过。研究工作主要集中在两个方面:一是创新设计方案的研究与提出;二是实验验证工作的大胆尝试。

就前者而言,分别提出了非聚光与聚光两大类方案。非聚光类的代表性方案有基准型[3]、太阳帆式[4]、分布绳系[5]以及多旋转关节式[6]。至于聚光类,代表性的有对称聚光型[7]、阿尔法(ALPHA)[8]、缓解三明治散热压力的漏斗式[9]、欧米伽式(OMEGA)[10–12]等。还有一类可称为混合型方案,既包括聚光也包括非聚光,如

* Corresponding author.

E-mail address: byduan@xidian.edu.cn (B. Duan).

DNA—局部菲涅尔透镜[13]、分布式瓦片聚光[14]。

说到实验验证,已有侧重于某个方面的试验,但较完整的微波功率传输(MWPT)寥寥无几。2008年,美国航空航天局(NASA)在夏威夷群岛的Mauna Loa岛与Haleakala岛之间进行了迄今为止传输距离最远(148 km)的微波无线功率传输实验[15]。发射天线采用有源阵列模式,微波功率器件为固态放大器,发射功率为20 W,频率为2.45 GHz,初步验证了微波无线能量传输的可行性。但存在两个不足:一是微波传输效率太低;二是仅为单一的微波无线传输(发射天线的射频RF1到接收天线阵面的射频RF2),不包括太阳能SE到射频RF1、射频RF2到直流DC的转换。

2015年,日本在兵库县进行了55 m距离的微波无线功率传输实验[16],验证了基于5.8 GHz固态源和相控阵体制下的能量传输,发射功率为1.8 kW,DC-DC传输效率为9.88%。日本的实验比美国前进了一大步,但其存在的不足之处是,仅提供了从直流DC到微波发射RF1、微波无线传输RF1-RF2、微波接收到的RF2-DC环节验证,不包括模拟空间轨道运行时的对日定向、高倍聚光、光电转换、高功率直流传输与管理等链路环节。

此外,在2019年进行了使用相控阵为飞行中的无人机供电的实验。对于飞行中的无人机,在10 m的距离处接收到功率约60 W的直流电。当距离增加到30 m时,接收到的直流电功率约为42 W [17]。

美国海军SSPS实验室2019年利用X37-B平台在低轨道进行了12 in (1 in = 2.54 cm)三明治结构形式的有源相控阵发射天线的单项试验[18]。接着,美国海军SSPS实验室又于次年利用空间站进行了整流天线的单项实验[19]。

国内在实验验证方面也开展了一些有意义的工作,如2009年四川大学黄卡玛教授团队[20],利用磁控管锁相技术,研制了基于微波功率传输的地面实验装置,发射与接

收天线口径分别是 $1.5\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ 与 $2.7\text{ m} \times 8\text{ m}$,相距200 m,频率为2.45 GHz,波束收集效率(BCE)为55%,RF-DC的传输效率为2.25%。

西安电子科技大学机电科技研究所研制了室内的完整实验装置(图1),包括太阳光能平行光发生器、球反射镜高倍聚光、光电转换、微波转换与发射、微波接收整流天线等,发射天线为固态源的单辐射微带单元,接收天线包括9个微带接收单元,功放与接收整流效率均为50%。存在的不足:一是在室内;二是发射与接收天线间的距离(60 cm)很短。

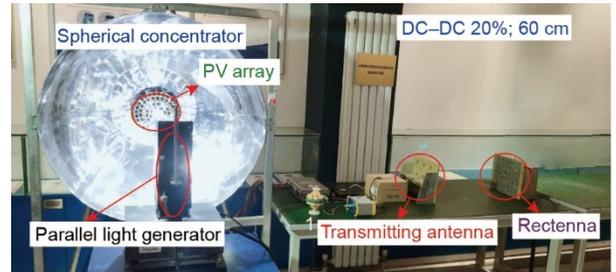


图1. 室内OMEGA演示验证装置。

为了深入研究如波束成形、聚光镜跟日、高倍聚光与光电转换、射频功率转换与发射天线、射频功率收集与整流、空间结构系统灵巧设计,以及精密测量与整体系统控制等多项关键技术,在西安电子科技大学校园研制了室外地面演示验证系统,如图2所示。现对各部分介绍如下。

2. OMEGA 2.0创新设计

针对OMEGA的两个困难[10-12]——特殊且苛刻的球形聚光镜薄膜材料与高压大功率直流的电刷式传输,作者团队提出了改进设计[21-22],将其取名为OMEGA 2.0,如图3所示。在此改进设计中,整体的球形聚光镜代之以

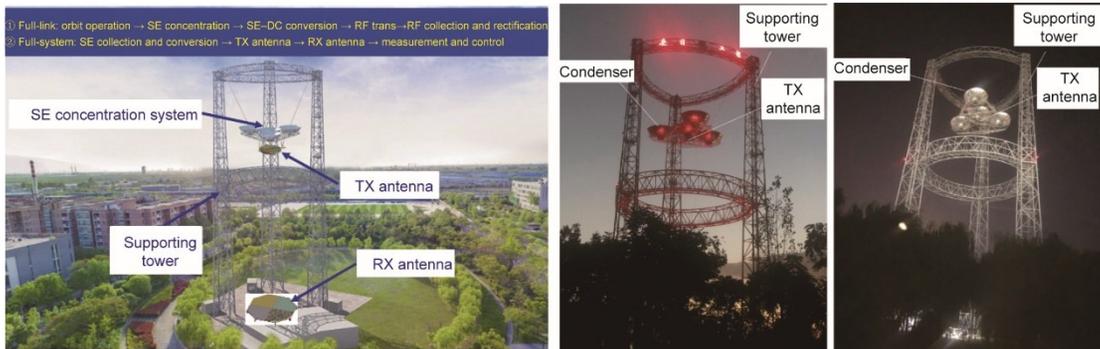


图2. 室外OMEGA地面演示验证装置。(a) 演示图; (b) 实物图。

球冠形聚光镜，全向微波发射天线被置于球冠形聚光镜之外，从根本上克服了原设计存在的两大困难。为实现整个空间结构系统的聚光镜对日定向与微波波束对接收天线定向，应用全向天线的波束指向电调技术与空间飞行器位姿调整的电推技术。

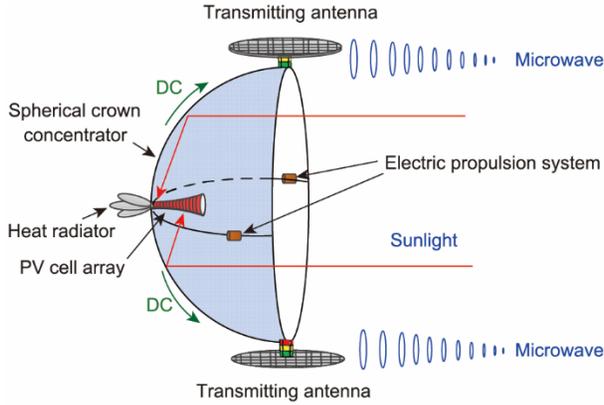


图3. OMEGA 2.0 创新设计。

3. 光机电热多物理系统耦合与设计理论模型

包括聚光与光电转换、发射天线与微波转换、高功质比的灵巧结构系统的OMEGA 2.0空中系统，存在着电磁场、温度场、结构位移场等多物理场间的耦合，非线性结构与材料因素对电、光性能的影响以及基于多场耦合理论模型与影响机理的综合优化设计的问题[23]。优化设计可数学描述为如下所示的非线性规划问题PI：寻求结构、热及电磁等设计变量，满足电磁、结构、热等性能约束，耦合理论模型与影响机理等约束，制造与尺寸限定等边界约束，最大化系统的功质比[23]，即

$$\text{Find } \mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{\text{mnd}})^T \quad (1a)$$

$$\min -Z(\mathbf{X})$$

$$\text{s. t. } g_j^S(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUS} \quad (1b)$$

$$g_j^T(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUT} \quad (1c)$$

$$g_j^E(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUE} \quad (1d)$$

$$g_j^C(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUC} \quad (1e)$$

$$\Gamma_1(S_N, \delta(\beta), \gamma, T, F) = 0 \quad (1f)$$

$$\Gamma_2(E_{\text{op}}, T, \delta(\beta), \gamma, F) = 0 \quad (1g)$$

$$\Gamma_3(E, T, \delta(\beta), \gamma, F) = 0 \quad (1h)$$

$$\bar{f}(M^i, V^i, J^i, L^i, x, y, z | i=1, 2, 3) = 0 \quad (1i)$$

$$\underline{\mathbf{X}} \leq \mathbf{X} \leq \bar{\mathbf{X}} \quad (1j)$$

式中， \mathbf{X} 是设计变量向量； x_{mnd} 为设计变量的个数； Z 为功质比； \bar{f} 是兼容性约束。 g^S 、 g^T 、 g^E 和 g^C 是结构、温度、

电磁和控制方面的约束。 Γ_1 、 Γ_2 和 Γ_3 分别代表聚光子系统、光伏子系统和发射天线子系统。 x 、 y 、 z 是三个子系统质心的坐标系。NUS、NUT、NUE及NUC分别为结构、热、电磁及控制系统的非线性约束函数个数。

式(1a)表示最大化系统功质比，式(1b)~(1e)分别为结构、热、光电转换及控制分系统的性能约束，式(1f)~(1h)分别代表聚光、光电转换及发射天线的场耦合理论模型（其中隐含着影响机理），式(1i)为聚光、光电转换及发射天线三个分系统的质量 M^i 、惯量 J^i 、体积 V^i 及特征尺寸 L^i 需满足的协调方程（ $i=1, 2, 3$ ），式(1j)为设计变量的上下限约束。 S_N 、 $\delta(\beta)$ 、 γ 、 T 、 F 、 E 、 E_{op} 分别为光压、位移（结构参量）、制造与装配产生的随机误差、温度、控制力、电磁、线馈源表面的光能分布密度。

利用耦合模型和设计理论，设计了地面验证系统的空中结构，如图4所示。该结构包括四个球冠聚光器、四个陀螺状光伏阵列、支撑框架以及电力管理和分配系统。为了适应三根大跨度柔索的牵引和驱动要求（通过三根大跨度柔索，图4所示的整个结构被提升至55 m的高度，接收天线则放置在地面），四个聚光器被排列成三角形。

为了确保光伏面板的表面精度，设计了以铝合金为主骨架的光伏阵列支撑框架，如图5(a)所示。所设计的结构可为电力管理与分配模块提供足够的空间，并与中心体连接，如图5(b)所示。中心体包括两个散热器、水箱、水泵和温度测量模块，并通过支撑框架固定。

基于图4所示的空中结构三维(3D)模型，建立了有限元模型(FEM)，如图6所示。支撑框架使用梁单元进行仿真，聚光器面板使用壳单元进行仿真，光伏阵列面板使用板单元进行仿真。对模型施加了重力载荷，以分析其结构性能。此外，电力管理与分配、测量与控制以及散热模块的载荷被视为外部载荷，在有限元模型中，它们被放置在相关节点上。环境温度载荷按照35°C施加。由于实验不考虑在不利气象条件下（如雨雪、强风等）进行，因此仅考虑了稳态风载荷，如图7所示。

基于建立的有限元模型分析了结构性能。随后，基于多物理系统的耦合模型和设计理论对空中结构的功质比进行了优化。为了模拟运行状态下的SSPS，地面验证系统需要具备对日定向的功能。因此，在优化过程中考虑了两个条件：一是整个结构处于水平工作状态；二是整个结构按给定角度倾斜。根据地面验证系统所在的纬度，空中结构的最大南北倾斜角度约为58°。图8展示了水平工况下结构变形和应力云图。此外，还分析了整个结构在最倾斜

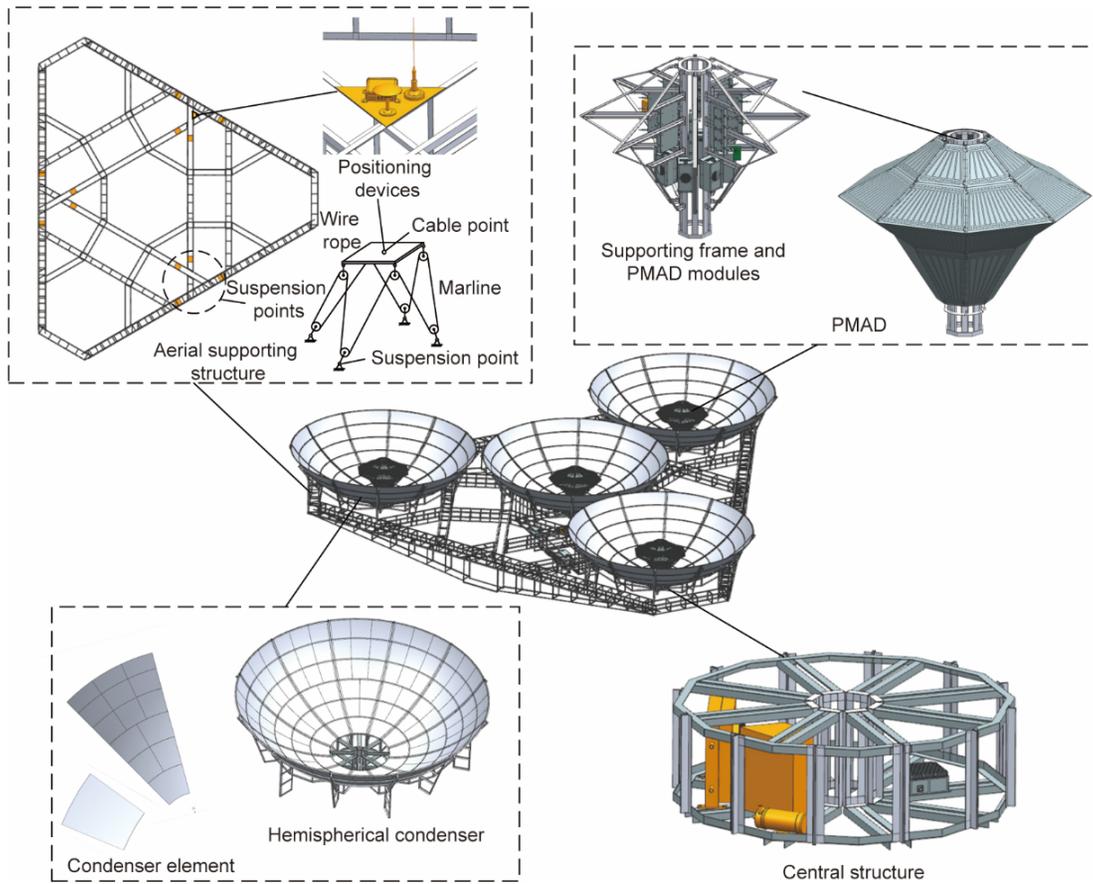


图4. 地面验证系统的空中结构。

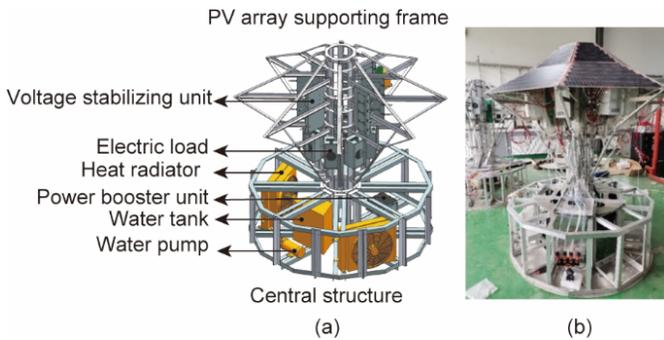


图5. 中心体、支撑框架和陀螺状光伏阵列的3D模型和原型。(a) 3D模型；(b) 原型。

工况（倾斜角度=58°）下的性能，图9展示了该条件下的结构变形和应力云图。

表1总结了不同倾斜角度下空中结构关键部件的最大

应力。可见，随着倾斜角度的增加，空中结构每个关键部件的应力也会增加。

4. 微波发射天线与波形优化

经光电转换得到的直流电，通过升压、传输、降压后，转换为射频形式，再由功放、功分、辐射单元发射出去，相干相加后的射频波束通过无线方式，将能量传送给接收天线。显然，射频波束的波形非常重要，对其基本要求是波束收集效率（BCE）要高，即能量尽可能多地集中于主波束之内，而主波束的3分贝波宽恰好等于接收天线的口径，于是，就要求副瓣电平尽量低。二是在接收天线口径内，波束呈图10（b）所示的“圆环阶梯状”，而非图10

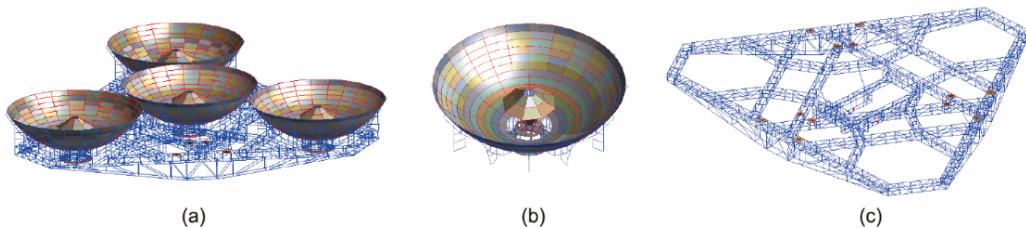


图6. 空中结构的有限元模型。(a) 整体结构；(b) 聚光光伏阵列结构；(c) 支撑框架。

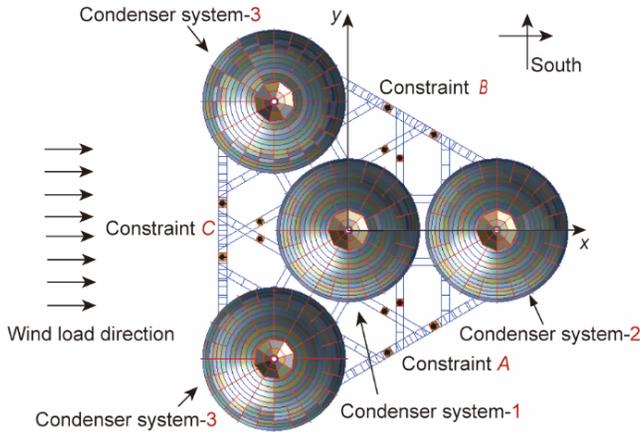


图7. 空中结构有限元模型的载荷与约束。A、B、C代表三个悬挂点。

(a) 所示的通常探测与通信那样的波束形状。这要求在同一圆环内的波束幅度相同，从而在该环内可用相同的整流器件，以满足高性价比的要求[24]。三是接收天线应处在发射天线的远场。四是安全，即接收天线边沿之外的微波功率密度应低于国标规定值。

为满足上述要求，需对天线辐射单元的幅度与位置进行优化设计。

4.1. “圆环阶梯型”口径场分布

假设归一化的“圆环阶梯型”口径场分布 (SAD) 函数 $f(\alpha, \rho)$ 包含 N 个台阶 (图 11)，则对阵列天线而言，该分布对应的每个台阶内均为等幅激励，不同台阶的激励系数不同。由单位阶跃函数，可将“圆环阶梯型”口径场分布表示为

$$f(\alpha, \rho) = \begin{cases} \alpha_1 H(\rho) - \sum_{n=1}^{N-1} (\alpha_n - \alpha_{n+1}) H(\rho - \rho_n), & 0 \leq \rho \leq 1 \\ 0, & \rho > 1 \end{cases} \quad (2a)$$

式中， $H(\rho)$ 为单位阶跃函数； α_n 与 ρ_n 分别为与“圆环阶梯型”口径场分布对应的第 n 个台阶的归一化高度与半径。为更精确地描述口径场分布，特将单位阶跃函数在圆心 0 处的函数值从原定义的 0.5 改为 1，即

$$H(\rho) = \begin{cases} 1, & \rho \geq 0 \\ 0, & \rho < 0 \end{cases} \quad (2b)$$

微波无线功率传能的 BCE 与发射天线的口径场分布相关，即 BCE 是由“阶梯型”分布的台阶数目 N 、每个台阶的归一化高度 α_n 以及与之对应的归一化半径 ρ_n 共同决定。

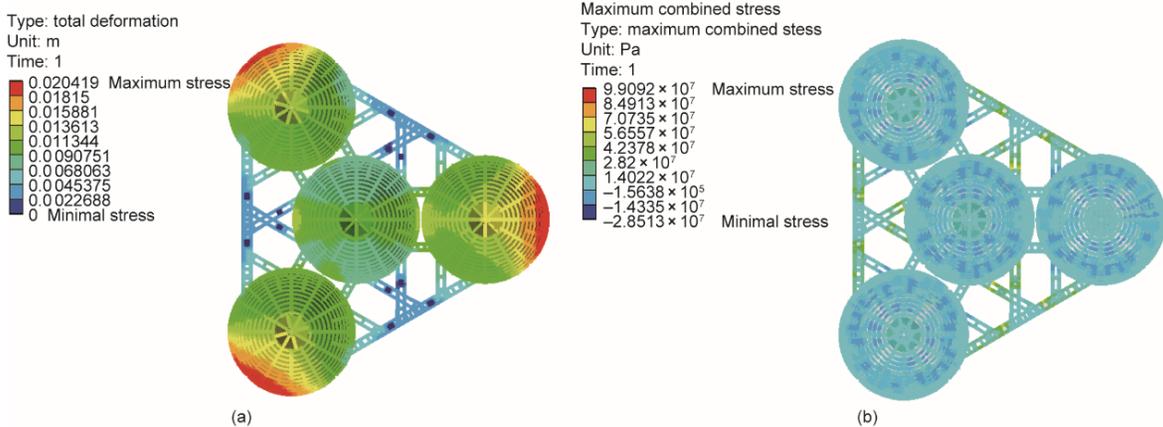


图8. (a) 水平工作条件下整个结构的变形云图；(b) 水平工作条件下整个结构的应力云图。

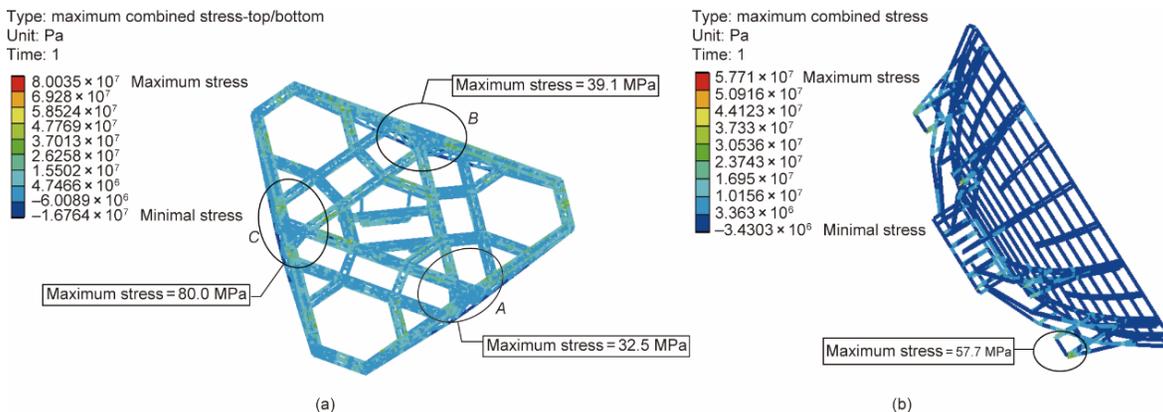


图9. (a) 倾斜工作条件下整个结构的变形云图 (倾斜角度=58°)；(b) 倾斜工作条件下整个结构的应力云图 (倾斜角度=58°)。

表1 不同倾斜角度下空中结构关键部分的最大应力

Tilt angle (°)	Maximum stress (MPa)								
	Suspension of overall structure			PV array supporting structure			Condenser supporting structure		
	A	B	C	1	2	3	1	2	3
10	64.0	59.8	72.9	34.5	35.7	36.3	22.0	22.5	23.4
20	62.1	50.7	71.5	48.1	49.4	49.9	23.9	24.7	25.0
30	56.8	45.8	66.4	60.2	61.9	62.5	32.9	33.8	34.5
40	48.3	43.8	63.2	70.3	72.1	72.5	43.2	44.1	45.1
50	37.2	41.7	74.9	78.5	79.7	79.9	51.6	52.8	53.3

1, 2, and 3 represent the three condenser systems.

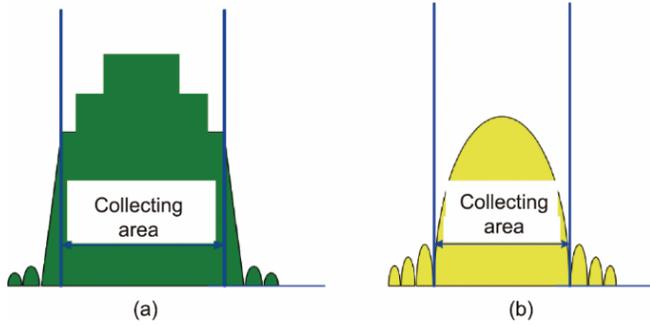


图10. 不同用途的微波波束形状。(a) 探测、通信等；(b) 微波功率传输。

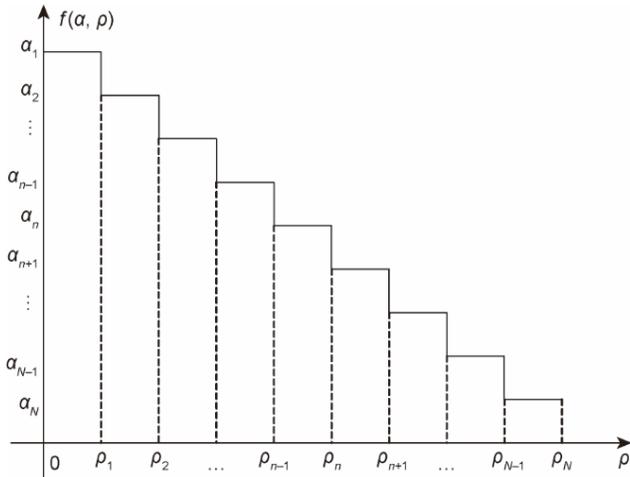


图11. SAD的示意图。

4.2. 微波波束波形优化

在台阶数目 N 给定情况下，波形优化可归结为如下所示的非线性规划问题，即寻求一组最佳的归一化台阶高度 α_n 与半径 ρ_n ，使 BCE 最大化，即

$$\text{Find } X = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N)^T \quad (2c)$$

$$\min f(X) = -\text{BCE}(X)$$

$$\text{s. t. } g_1(X) \leq C_0 \quad (2d)$$

$$g_2(X) \leq C_1 \quad (2e)$$

$$\alpha_{n+1} \leq \alpha_n, (1 \leq n \leq N-1) \quad (2f)$$

$$\rho_{n+1} \geq \rho_n (1 \leq n \leq N-1) \quad (2g)$$

$$0 < \alpha_n \leq 1 \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (2h)$$

$$0 < \rho_n \leq 1 \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (2i)$$

式中，设计变量 $X = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N)^T$ 为“圆环阶梯型”分布函数的描述参数，即每个台阶归一化的高度与半径。目标函数 $f(X)$ 等于 $-\text{BCE}(X)$ ， $g_1(X)$ 和 $g_2(X)$ 分别代表接收天线内外最大微波功率密度， C_0 和 C_1 为对应的最大容许值。约束条件 (2f) 是为保证“阶梯型”口径场分布呈现由中心到边缘的幅度锥削，降低副瓣电平。约束条件 (2g) 则为确保“阶梯型”口径场分布的每个台阶的宽度应大于 0。

在逐日工程系统中，发射天线和接收天线口径分别为 1.2 m 和 5.2 m，二者相距 55 m。图 12 展示了地面验证系统中采用的四台阶阶梯型口径场幅度分布的优化布局。发射天线由 176 个子阵列和四种类型的功率放大器组成。图 13 呈现了发射天线的示意图。它主要包括一个 5.8 GHz 的晶体振荡器、一个 1 对 176 的功率分配器、176 个功率放大器通道和 176 个发射子阵列。每个功率放大器通道都包含一个功率放大器和一个移相器。直流

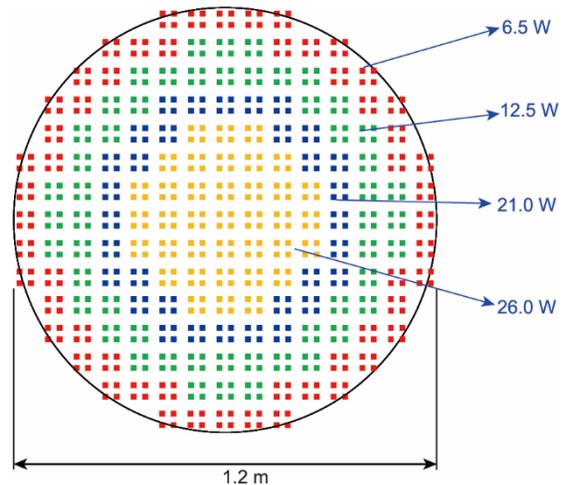


图12. 发射天线功放布置图。

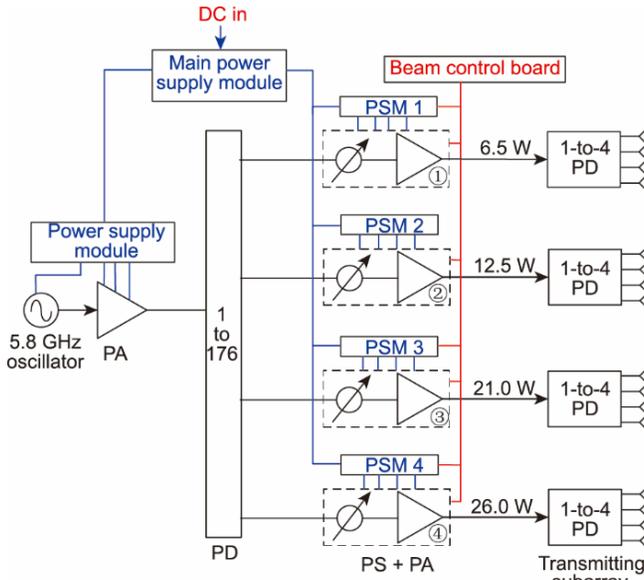


图 13. 发射天线系统组成示意图。

功率来自太阳能收集，转换子系统将电力提供给发射天线子系统。

$$\begin{bmatrix} x_{w1} \\ y_{w1} \\ z_{w1} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}) \cdot \begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{c0} \\ y_{c0} \\ z_{c0} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_{c1} \\ \tilde{y}_{c1} \\ \tilde{z}_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \bar{\beta} \cos \bar{\gamma} - \sin \bar{\alpha} \sin \bar{\beta} \sin \bar{\gamma} & -\cos \bar{\alpha} \sin \bar{\gamma} & \sin \bar{\beta} \cos \bar{\gamma} + \sin \bar{\alpha} \cos \bar{\beta} \sin \bar{\gamma} \\ \cos \bar{\beta} \sin \bar{\gamma} + \sin \bar{\alpha} \sin \bar{\beta} \cos \bar{\gamma} & \cos \bar{\alpha} \cos \bar{\gamma} & \sin \bar{\beta} \sin \bar{\gamma} - \sin \bar{\alpha} \cos \bar{\beta} \cos \bar{\gamma} \\ -\cos \bar{\alpha} \sin \bar{\beta} & \sin \bar{\alpha} & \cos \bar{\alpha} \cos \bar{\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} \quad (3b)$$

$$\begin{cases} (\cos \bar{\beta} \cos \bar{\gamma} - \sin \bar{\alpha} \sin \bar{\beta} \sin \bar{\gamma})x_{c1} + (-\cos \bar{\alpha} \sin \bar{\gamma})y_{c1} + (\sin \bar{\beta} \cos \bar{\gamma} + \sin \bar{\alpha} \cos \bar{\beta} \sin \bar{\gamma})z_{c1} = \tilde{x}_{c1} \\ (\cos \bar{\beta} \sin \bar{\gamma} + \sin \bar{\alpha} \sin \bar{\beta} \cos \bar{\gamma})x_{c1} + (\cos \bar{\alpha} \cos \bar{\gamma})y_{c1} + (\sin \bar{\beta} \sin \bar{\gamma} - \sin \bar{\alpha} \cos \bar{\beta} \cos \bar{\gamma})z_{c1} = \tilde{y}_{c1} \end{cases} \quad (3c)$$

式中， $\mathbf{R}(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma})$ 为旋转矩阵。联立求解式(3b)和式(3c)便可得出 $\sin \bar{\gamma}$ 与 $\cos \bar{\gamma}$ ，进而得到 $\bar{\gamma}$ 。

5. 聚光镜对日与发射天线对接收天线指向控制

首先建立图 14 (a) 所示的实验系统坐标系，分别为大地坐标系 $OXYZ$ 、接收天线坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 、空中整体结构坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 以及发射天线坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$ ，并规定 Y 、 X 分别指向北、东， Z 指向天。为实现聚光镜的对日实时定向跟踪，整个空中结构由三根大跨度的柔性索，通过位于 75 m 高的支撑塔悬吊于空中，并实时驱动空中结构与聚光镜系统，满足其对高度、位置与姿态的要求。图 14 (b) 则具体示出了空中结构，包括四个直径 6.71 m 的球面聚光镜与陀螺光伏阵、支撑桁架结构、发射天线以及电力传输与管理等。位于图 14 (b) 空中结构上的三个北斗位姿传感器，可实时给出结构中心点的位置坐标 $(x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})^T$ 、姿态角 $(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma})^T$ 中的 $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{\beta}$ 以及大地坐标系的中心位置坐标 $(x_{c0}, y_{c0}, z_{c0})^T$ ，于是，可由下述公式获知空中结构中心点在大地坐标系 $OXYZ$ 中的位置 $(x_{w1}, y_{w1}, z_{w1})^T$ 与航偏角 $\bar{\gamma}$ ：

至此，便可通过调整三根张力索的索长，完成对空中结构位置与姿态的调整，实现聚光镜对日的实时定向跟踪。

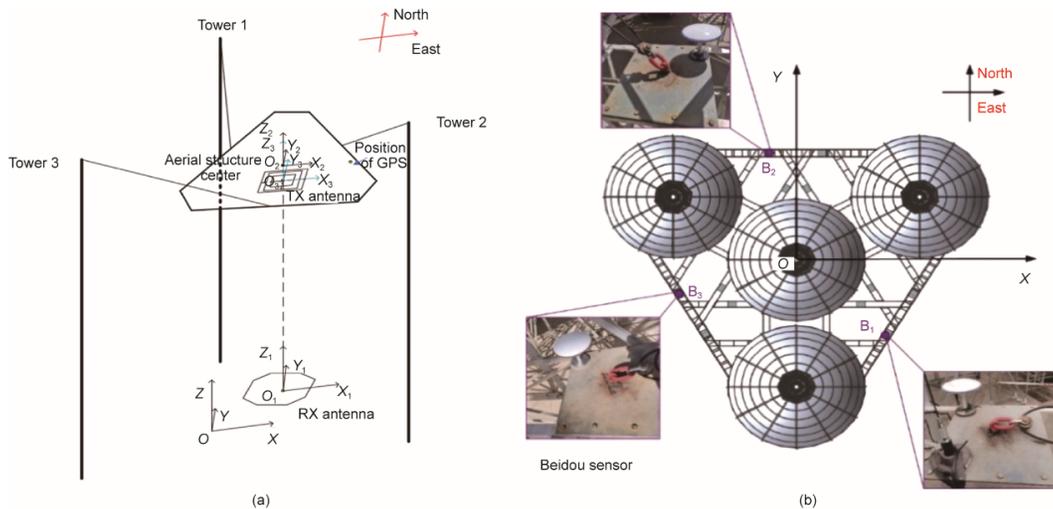


图 14. (a) 实验系统坐标系；(b) 空中机构及北斗传感器。

需要指出的是，控制方程中尚需加入索的弹性、热胀冷缩、卷扬机回差等非线性因素的影响，这可通过大量试验获知。

发射天线微波波束指向控制，则由基于A/B轴的机调与基于相位的电调来完成。

6. 光电转换与微波转换中的热控

高效散热是SSPS-OMEGA的一大任务，而就空中结构而言，存在两个热源，即光电转换与发射天线的微波转换。说到光电转换中的散热，又包括两步：一是通过热管将陀螺光伏馈源阵的热实时、快速、高效导出；二是将导出的热，及时向空间辐射出去。在第一步中，需对嵌有热管的极薄冷板进行导热意义上的拓扑与布局优化设计。至于第二步，则可通过仿蝴蝶翅膀的拓扑设计来完成，因为蝴蝶翅膀不仅极轻、薄，且具有大的散热面积。

发射天线的散热是另一难题，尤其对阿尔法方案的三明治结构。而对于OMEGA创新设计方案，因从原理上避免了三明治结构，已在相当程度上缓解了散热压力。即使如此，在微波转换过程中，仍有大量的废热产生，不及时排出，将导致功放的失效甚至烧毁。为此，提出了相应的散热方法并得到了实验验证[25-27]。

7. 接收整流天线优化设计

接收整流天线的任务有三个：一是接收；二是整流；三是直流合成。本实验系统采用空气微带接收单元，按三环台阶接收（图15），第一环在中间（红色），一个肖特基二极管整流器对应一个接收单元，称为1-1型，第二（橙色）、三环（黄色）分别为2-1型、4-1型，即一个整流器分别对应两个和四个接收单元。

为实现高效接收，不仅须具有高的口径利用效率，而且应使发、收天线的极化方式相同，该实验系统采用左旋圆极化，平均口径效率约为92.1%。到达接收天线阵面的微波波束功率密度等指标如表2所示。

至于整流，必须满足整流电路入口与接收单元输出端

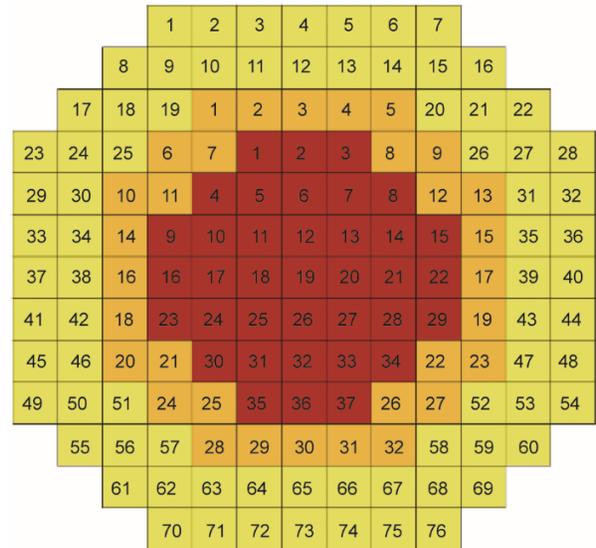


图15. 接收阵列天线平面图。

的阻抗匹配。对整流电路进行了大量仿真模拟与实物实验，结果是输入功率（单位为dBm）在19~22范围时，效率大于50%，输入功率在22~27范围时，效率大于60%。最终采用2倍压电路，获得了平均59.4%的整流效率。对于直流合成，有两点值得注意：一是合成前加隔离，否则，浪涌将导致整流器件烧坏；二是采用串并混合方式。最终实现的合成效率约为74.1%。

8. 面向波束指向控制的测量技术

为满足对波束指向精度的要求，除需测量上面提到的空中结构位姿、发射天线功放部件的壳温、机械传动精度、环境温度与风荷外，还需对接收天线阵面的微波波束功率密度分布、极化进行测量。

为实时得到接收阵面功率密度的分布情况，特在阵面对称布置若干微波功率密度计，当处于对称位置的功率密度传感器的读数不同时，说明波束指向出现了偏差，将实测值无线反馈给总控机，调整发射天线的相位，可将波束指向调整回来。调整时需注意机调与电调的协同。

表2 接收天线单元测试结果汇总表

Type	Gain(dBi)	VSWR	AR(dB)	HPBW(°)	AE
1-1	8.49-8.62	1.01-1.15	0.10-0.86	Elevation plane 68.54-70.21 Azimuth plane 69.82-70.88	93.98%-96.84%
2-1	11.58-11.72	1.02-1.21	0.10-1.20	Elevation plane 66.70-68.63 Azimuth plane 32.20-33.16	95.72%-98.86%
4-1	14.20-14.76	1.01-1.29	0.10-1.60	Elevation plane 31.45-33.38 Azimuth plane 31.83-34.72	87.50%-99.54%

为进行波束极化测量，特研制了极化测试仪（图16），左边图为沿 X 、 Y 坐标轴布置的25个极化传感器，每个传感器包含（右侧图）线极化天线单元模块与步进电机，可实时记录下微波波束在各个位置的极化情况。

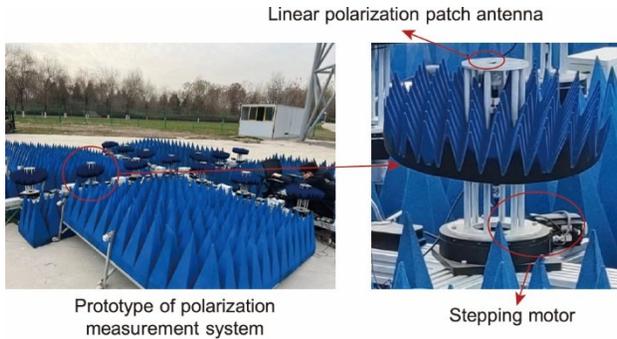


图16. 微波波束极化测试仪。

9. 灵巧机械结构与研制

为满足对系统的高精度、灵巧及轻量化要求，特将基于机电耦合理论的多学科布局优化、系统及灵巧设计思想，贯穿于整个设计过程中。具体来说，其包括类型优化、拓扑优化、形状优化及尺寸优化等，被应用于空中三角背架结构、聚光镜背架结构、镜面设计以及陀螺光伏支撑结构等（图17）。

机械传动机构优化设计，包括发射天线A/B轴及支撑框架、大跨度柔性索驱动及高精度滑轮组结构、伺服与卷扬机、整体空中结构系统的支撑与机动系统等。



图17. 聚光镜与支撑桁架结构实物图。

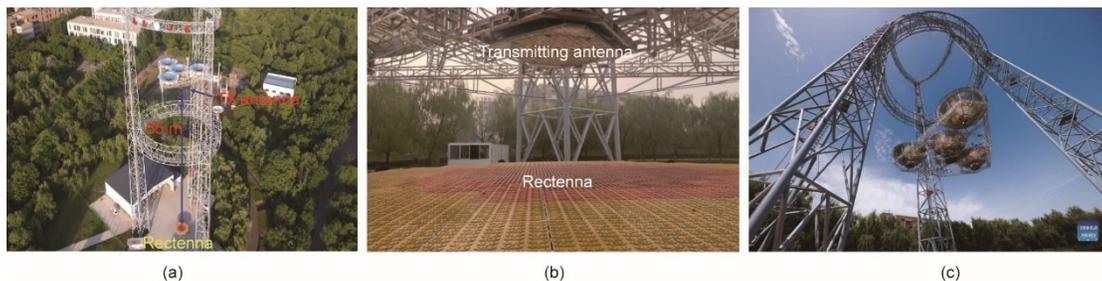


图18. 实验装置整体实物图。(a) 实物图1；(b) 实物图2；(c) (仰视) 实物图3。

机电集成结构设计，包括有源相控阵空气微带发射天线、空气微带接收整流天线、光电转换与微波转换系统等。

10. 地面验证系统研制与实验

在深入进行上述理论研究与技术突破的基础上，研制成功了图18所示的实验验证系统，主要包括聚光镜与光电转换、发射天线与接收天线、空中灵巧支撑结构、支撑塔、大跨度柔索驱动机构、测量与控制等。

图19所示的发射天线口径1.2 m，包括5.8 GHz的晶振信号发生器（稳定度为 10^{-8} ），等幅同相激励的前级功放与功分，末级176个固态源功放、移相、电源组成的末级功放模块，散热器，以及704个微带辐射单元，发射天线的DC-RF效率约为42.55%。

空气微带接收天线（图20）口径为5.2 m，包括14 500个接收单元、7200个肖特基整流二极管。

图21（a）展示的是主控室中的测量、控制与动力供给计算机，可视化菜单支持多种试验参数的选择。同时，实时展示实验中的微波波束指向精度、到达接收天线阵面的微波功率密度分布、聚光镜姿态角、光伏电池板的温度、发射天线功放器件壳温、环境温度与风速风向等。图21（b）则是聚光镜与位姿控制卷扬机实物图，计算机控制卷扬机正反转以收、放三根大跨度的柔索，保证聚光镜的位置与姿态始终处于电性能所容许的误差范围之内。

坐落于西安电子科技大学校园的逐日工程，是一个基于微波功率传输的空间太阳能电站地面演示验证系统，可支持多种实验、创新设计与制造技术的实验验证。基于此实验系统，已进行了多种实验研究，积累了大量实验数据。就5.8 GHz的微波功率传输而言，实验结果如表3 [15-17,25]所示。表中同时给出了日本2015年在兵库县、美国2008年在夏威夷进行的微波功率传输实验结果。

可见，2022年6月西安电子科技大学完成的实验，技术指标有明显优势。此外，该实验系统所具备的模拟空间

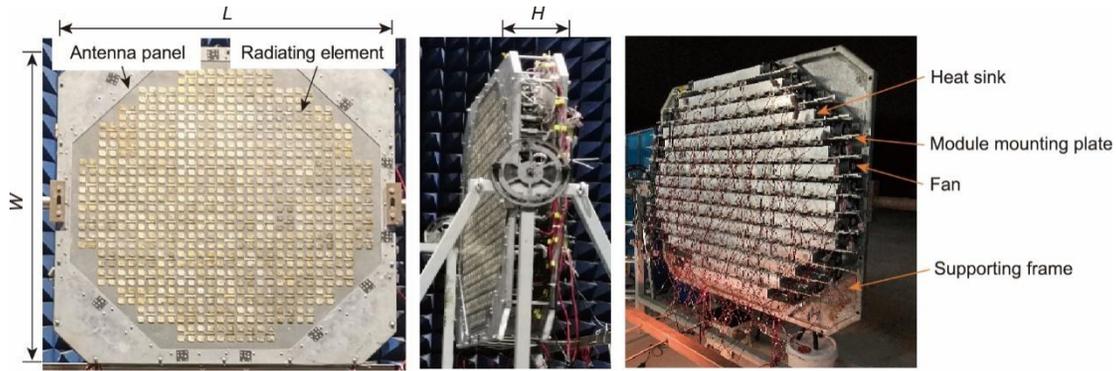


图19. 发射天线实物图。 L : 长; W : 宽; H : 高。



图20. 接收天线实物图。(a) 正面; (b) 侧面。



图21. 空中结构控制与测量系统实物图。(a) 主控室测量、控制计算机实物图; (b) 聚光镜与位姿控制卷扬机实物图。

运行中对日定向、光电转换、高压大功率传输与管理以及灵巧机械结构等功能与环节,在日本、美国的实验中尚不具备。

研制的SSPS地面验证系统包括多个子系统,其中包括太阳能收集与转换、直流电源传输与管理、发射天线和整流天线子系统。在实验中测量了每个子系统的效率,结果总结在图22中。总效率为1.15%,直流-直流无线电力传输效率为15.05%。图22展示了总传输效率受到太阳能收集与转换效率的限制。这是因为受资金限制,采用了便宜且低效率的硅光伏阵列(约18%)。测得的验证系统的直流输出功率约为736 W。

表3 中日美三国实验结果对比表

Country	Location/application	Transmission distance	Transmitted power	BCE	DC-DC efficiency
China	Xi'an (2022) [25]	55 m	2081 W	87.3%	15.05%
Japan	Hyogo (2015) [16]	55 m	1800 W	66.00%	9.88%
	UAV (2019) [17]	10/30 m	1600 W	—	Received power 60/42 W
United States	Hawaii (2008) [15]	148 km	20 W	—	—

UAV: unmanned aerial vehicle.

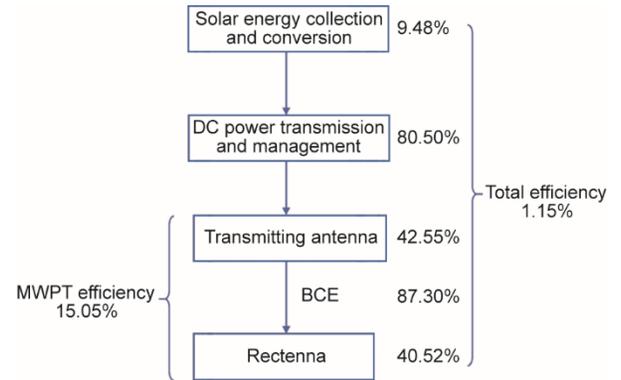


图22. 全链路地面验证系统的效率。

11. 结语

通过理论分析、模拟仿真、实际系统研制以及大量实验,得到如下体会。

(1) 基于OMEGA 2.0的创新设计,建立了多物理场和多学科耦合的理论模型,并提出了一种系统的优化设计方法,为理论分析、数值模拟以及空间太阳能电站地面验证系统的开发奠定了理论基础。

(2) 研制了世界上首个全链路与全系统的空间太阳能电站地面演示验证系统,可实现对日定向、光电转换、高压大功率传输与管理、微波转换与发射、微波无线输能、接收整流等完整过程,为基于微波功率传输的空间太阳能电站技术的创新打下了坚实基础。

(3) 所研制的MWPT系统在5.8 GHz工作频率下,实

现了87.3%的高能量转换效率和15.05%的总DC-DC效率。发射天线与接收天线之间的距离为55 m, 传输功率达到2081 W。这一结果优于日本兵库县最新的实验结果(相同工作频率和传输距离下, 系统BCE为66%, DC-DC效率为9.88%, 传输功率为1800 W)。

(4) 下一步更重要的工作, 是基于该实验系统, 开展更为深入的实验与创新研究, 为早日建成真正的空间太阳能电站做出贡献。

(5) 可通过若干改进措施提升系统效率。例如, 在逐日工程中, 由于资金限制, 采用了廉价且效率低下的硅光伏阵列。未来可采用高效率的砷化镓(GaAs)光伏阵列。此外, 应专门开发适用于MWPT应用的高效率功率放大器, 该应用无需工作带宽要求。同时, 采用集成天线技术(AiP), 将功率放大器、移相器、电源模块及天线元件/子阵列集成, 以减少发射天线的尺寸和损耗。

(6) 需注意的是, 地面验证系统的尺寸、传输功率水平和环境与外太空中的真实SSPS有显著差异; 因此, 应对地面验证系统与真实空间SSPS进行相似性分析。基于相似性理论, 所获得的经验和开发的技术将有助于构建实际的SSPS。

(7) 未来将重点研究如何利用发射天线为多个移动目标供电。在此情况下, 应开发实时目标检测和精确波束控制技术。

致谢

本实验验证系统的研制与实验过程中, 得到了黄进、梁玮、郑峰、宋立伟、李仙丽、李娜、钱思浩、姜顺喜、葛潮流、樊冠恒以及其他博士生、硕士生的支持与帮助, 在此表示衷心感谢!

Compliance with ethics guidelines

Baoyan Duan, Yiqun Zhang, Guangda Chen, Ze Zhao, Jianwei Mi, Xun Li, Lin Yang, and Xi Li declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Statistical review of world energy. Report. London: BP; 2020.
- [2] Glaser PE. Power from the Sun: its future. *Science* 1968;162(3856):857-61.
- [3] Mankins JC. New directions for space solar power. *Acta Astronaut* 2009;

- 65(1 2):146-56.
- [4] Seboldt W, Klimke M, Leipold M, Hanowski N. European sail tower SPS concept. *Acta Astronaut* 2001;48(5-12):785-92.
- [5] Sasaki S, Tanaka K, Higuchi K, Okuizumi N, Kawasaki S, Shinohara N, et al. A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS. *Acta Astronaut* 2007;60(3):153-65.
- [6] Hou X, Wang L, Zhang X, Zhou L. Concept design on multi-rotary joints SPS. *J Astronaut* 2015;36(11):1332-8. Chinese.
- [7] Carrington C, Fikes J, Gerry M, Perkinson D, Feingold H, Olds J. The Abacus/Reflector and integrated symmetrical concentrator: concepts for space solar power collection and transmission. In: *Proceedings of the 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit*; 2000 Jul 24-28; Las Vegas, NV, USA; 2000.
- [8] Mankins J. SPS-ALPHA: the first practical solar power satellite via arbitrarily large phased array. In: *Proceedings of the 10th International Energy Conversion Engineering Conference*; 2012 Jul 30-Aug 1; Atlanta, GA, USA; 2012.
- [9] Jaffe P, Pasour J, Gonzalez M, Spencer S. Sandwich module development for space solar power. In: *Proceedings of the 28th International Symposium on Space Technology and Science*; 2011 Jun 5-12; Okinawa Prefecture, Japan; 2011.
- [10] Duan B. [A novel design project of space solar power station (SSPS) called OMEGAproject]. In: *The 2nd Symposium of Space Information Technology and Application of Chinese Academy of Engineering*; 2014 Sep 21-23; Xi'an, China; 2014. Chinese.
- [11] Yang Y, Duan B, Huang J, Li X, Zhang Y, Fan J. SSPS-OMEGA: a new concentrator system for SSPS. *Chin Space Sci Technol* 2014; 34(5): 18-23. Chinese.
- [12] Yang Y, Zhang Y, Duan B, Wang D, Li X. A novel design project for space solar power station (SSPS-OMEGA). *Acta Astronaut* 2016;121:51-8.
- [13] Cash I. CASSIOPEIA solar power satellite. In: *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*; 2017 Oct 10-12; Montreal, QC, Canada; 2017.
- [14] Arya M, Lee N, Pellegrino S. Ultralight structures for space solar power satellites. In: *Proceedings of The 3rd AIAA Space Structures Conference, Spacecraft Solar Array Structures I*; 2016 Jan 4-6; San Diego, CA, USA; 2016.
- [15] Kaya N, Iwashita M, Little F, Marzwell N, Mankins JC. Microwave power beaming test in Hawaii. In: *Proceedings of the 60th International Astronautical Congress*; 2009 Oct 12-16; Daejeon, Republic of Korea; 2009.
- [16] Mihara S, Sato M, Nakamura S, Sasaki K, Homma Y, Sasaki T, et al. The result of ground experiment of microwave wireless power transmission. In: *Proceedings of the 66th International Astronautical Congress*; 2015 Oct 12 16; Jerusalem, Israel; 2015.
- [17] Shinohara N, Hasegawa N, Kojima S, Takabayashi N. New beam forming technology for narrow beam microwave power transfer. In: *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*; 2019 Aug 4-7; Incheon, Republic of Korea; 2019.
- [18] Rodenbeck CT, Jaffe PI, Strassner II BH, Hausgen PE, McSpadden JO, et al. Microwave and millimeter wave power beaming. *IEEE J Microw* 2021;1(1):229-59.
- [19] Vedda JA, Jones KL. Space-based solar power: a near term investment decision. *El Segundo: Center for Space Policy and Strategy*; 2021.
- [20] Liu C, Li K, Huang K. [Development of microwave power transmission study]. *J Kunming Univ Sci Technol* 2011; 36(Suppl):19-22. Chinese.
- [21] Duan B. Fundamental, technology and prototype experiment of MWPT & SSPS in China. In: *IEEE Wireless Power Transfer School*; 2021 May 27-Jun 2; San Diego, CA, USA; 2021.
- [22] Duan BY. The improved OMEGA project of SSPS with MWPT and omnidirectional scanning antenna. *Sci Sin Tech* 2023;53(1):139-44. Chinese.
- [23] Duan BY. [The main aspects of the theory and key technologies about space solar power satellite]. *Sci Sin Tech* 2018;48(11):1207-18. Chinese.
- [24] Li X, Duan B, Song L, Zhang Y, Xu W. Study of stepped amplitude distribution taper for microwave power transmission for SSPS. *IEEE Trans Antennas Propag* 2017;65(10):5396-405.
- [25] Duan B, Zhang Y, Chen G, Zhao Z, Mi J, Li X. Report of the Sun-Chasing Project. Xi'an: Xidian University; 2022.
- [26] Fan G, Duan B. Topology and bionic-based thermal design of space solar power station and the application in SSPS-OMEGA. *Chin J Comput Mech* 2021;38(4):445-51.
- [27] Qian S, Duan B, Lou S, Ge C, Wang W. Investigation of the performance of antenna array for microwave wireless power transmission considering the thermal effect. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett* 2022;21(3):590-4.