DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2024.03.007

微波无线传能发射天线馈电相位鲁棒性优化设计

柳坤鹏,李 勋,孙小宇,刘晨阳

(西安电子科技大学 机电科技研究所,西安 710071)

摘 要:为保证微波无线传能系统具有可靠且高的传输效率,针对系统中发射天线存在的馈电相 位误差,提出了一种基于最差情况分析的多准则优化设计方法。首先,推导了发射天线电性能参 数与随机馈电相位误差的数学关系。其次,基于最差情况分析方法,建立了馈电相位随机误差的 缩减区间描述模型。然后,提出了一种具有鲁棒性的波束收集效率优化设计方法。最后,通过蒙 特卡洛方法验证了所提方法的有效性。

关键词:微波无线传能;波束收集效率;敏度分析;天线阵列;移相器相位误差 中图分类号:V443;TM724 文献标志码:A 文章编号:1674-7135(2024)03-0048-08

Robust and optimal design of the feed amplitude of transmitting antenna in microwave wireless transmission

LIU Kunpeng, LI Xun, SUN Xiaoyu, LIU Chenyang (Research Institute on Mechatronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To ensure a microwave wireless power transmission system with both high reliability and high efficiency, a multi-criteria optimization design technique based on the worst case sensitivity analysis was developed. First, the relationship between the electrical performance of the transmitting antenna and the random excitation phase errors is formulated. Next, a reduced tolerance range model of the excitation phase based on the worst-case sensitivity analysis is established. Then, a robust excitation phase optimization design method is proposed to ensure high and reliable beam collection efficiency. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by the Monte Carlo method.

Key words: microwave wireless power transmission; beam collection efficiency; sensitivity analysis; antenna array; phased shifter error

0 引言

微波无线传能是一种革命性的技术,可摆脱笨 重电缆的束缚,实现电力的无线传输^[1-7]。由于其 具有灵活性和便捷性等特点,可为偏远地区或移动 目标提供能量供给^[8-10]。发射天线和接收整流天 线的匹配协作对于微波无线传能系统至关重要。 发射天线将发射波束尽可能地聚焦在接收整流天 线口面上,接收天线的任务是接收来自发射天线的 微波能,并将其转化为直流电能。波束收集效率 (beam collection efficiency, BCE)^[11-12]是微波无线 传能系统(microwave wireless power transmission, MWPT)的一个重要性能指标,通常被用来评估能量 从发射天线传输到接收天线的效率。

相控阵天线可通过控制阵列中辐射单元的馈 电幅相,从而改变天线辐射波束方向和波束形状, 在雷达、导航、微波无线能量传输等方面被广泛应

收稿日期:2023-10-08; 修回日期:2023-12-15

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:62201416);中央高校基本科研业务费项目(编号:QTZX23070);秦创原引用高层次创 新创业人才项目(编号:QCYRCXM-2022-314)

引用格式:柳坤鵰,李勋,孙小宇,等. 微波无线传能发射天线馈电相位鲁棒性优化设计[J]. 空间电子技术,2024,21(3):48-55. LIU K P,LI X,SUN X Y, et al. Robust and optimal design of the feed amplitude of transmitting antenna in microwave wireless transmission[J]. Space Electronic Technology, 2024,21(3):48-55.

用^[13-15]。对于长距离微波无线传能^[16],为提高 BCE,许多研究致力于优化与设计有源相控阵发射 天线的口径场幅度分布[17-20],虽然这些方法能获得 较高的 BCE, 却面临着发射天线的高成本和工程实 现难等问题。均匀分布[17] 是一种简单且易于实现 的口径场幅度分布形式,却忽略了天线相位对 BCE 的重要性^[21-26]。Takahashi T^[21,23]针对采用数字移 相器的发射天线,研究了波束指向与 BCE 的关系, 却忽略了相位误差的影响。Li X^[27-28]研究了阵元 位置误差和相位误差对 BCE 的影响。Zhang S^[29]在 近场情况下,研究了天线表面变形对 BCE 的影响。 Zhou H W^[30]等研究了有源相控阵天线位置误差和 激励幅度误差对 BCE 的影响,并提出一种利用统计 学方法来评估存在激励误差时可达到的最差 BCE。 综上,现有的工作针对馈电激励误差对 BCE 的影响 进行了深入分析,然而缺乏对馈电系统的鲁棒性设 计。实际工程中,数字移相器误差可能对 BCE 产生 负面影响,因此需要采取措施来研究和应对这些误 差,以确保整个系统在存在不确定性误差时仍能获 得期望的 BCE。

Steiner G^[31]研究表明,当涉及相互独立,目具 有不同容差范围的多参数优化设计问题时,其目标 函数的最差情况往往出现在参数的不确定性边界 上。一般认为在给定的容差区间和最优解的情况 下,找到满足约束的最差目标函数值的过程称为最 差情况敏度分析(worst case sensitivity analysis, WC-SA)。为评估数字移相器的不确定性误差对 BCE 的影响,并确保存在不确定性误差下系统仍能获得 预期的 BCE, 文章提出了一种基于 WCSA 的多准则 分析方法,利用吸收边界粒子群算法^[32-34](particle swarm optimization, PSO)进行两阶段多准则分析。 其中,第一个阶段为主优化阶段,即通过优化策略, 找到满足约束条件的最优解;第二阶段为 WCSA 分 析阶段,即在最优解附近的容差范围内找到满足多 准则 BCE 约束的最差情况解^[35]。该模型主要优势 在于其可在确保最差 BCE 满足工程需求时,实现最 大的容差区间和100%可靠性。

1 算法介绍

1.1 鲁棒性优化

1.1.1 主优化

单元的位置和排布形式对阵列天线波束的形 状和性能有着重要影响。以方形阵列天线为例,假 设其包含 $N \times N$ 个辐射单元(简称阵元),且阵元沿 $x \pi y$ 方向均匀分布,间距 dx = dy,如图 1 所示。这 里不考虑阵元之间的互耦影响。图 1 中的红色方框 表示第(m,n) 个辐射单元,其空间位置,激励幅值和 相位分别表示为 $(x_{mn}, y_{mn}), \omega_{mn} \pi \varphi_{mn}, m = 1, 2, \cdots,$ $N, n = 1, 2, \cdots, N_o$



图1 方形天线阵列

Fig. 1 Square antenna arrays

理想阵因子和功率方向图^[36]的表示如式(1)、 式(2)所列。

$$AF(u,v) = \sum_{m=1}^{N} \sum_{n=1}^{N} \omega_{mn} e^{j|k[(m-1)dxu+(n-1)dyv)] + \varphi_{mn}|}$$
(1)
$$P(u,v) = |AF(u,v)|^{2} =$$

$$\sum_{m=1}^{N} \sum_{n=1}^{N} \sum_{p=1}^{N} \sum_{q=1}^{N} \sum_{q=1}^{N} \omega_{mn} \omega_{pq} e^{j|k[u(m-p)dx+v(n-q)dy]+\varphi_{mn}-\varphi_{pq}|}$$
(2)

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, $u = \sin\theta\cos\varphi, v = \sin\theta\sin\varphi$ 为方向余弦。

BCE 与接收区域外最高辐射电平(the side lobe level outside of the collection region, CSL)是微波无线 传能系统两个重要参数,其分别被定义如式(3)、式 (4)所列^[12]。

$$BCE = \frac{P_{\Psi}}{P_{\Omega}} = \frac{\int_{\Psi} |AF(u,v)|^2 du dv}{\int_{\Omega} |AF(u,v)|^2 du dv}$$
(3)

$$CSL(dB) = 10 \lg \left(\frac{\max_{u, v \notin \Psi} |P(u, v)|}{\max_{u, v} |P(u, v)|} \right)$$
(4)

其中, P_{ψ} 表示为发射天线辐射到接收区域立体角 ψ 的功率, P_{Ω} 表示为发射天线在可视域 Ω 内总辐射的功率。

假设发射天线等幅激励^[37],采用 B 位数字移相 器寻找发射天线的最优激励相位分布^[38],考虑电磁 安全约束,并最大化 BCE,优化模型如式(5)所列。

Find
$$\vec{x}_{opt} = (\varphi_{11}, \varphi_{12}, \cdots \varphi_{NN})^{T}$$

Min $f(\vec{x}_{opt}) = -BCE(\vec{x}_{opt})$
s. t. $g(\vec{x}_{opt}) \leq CSL_{0}$
 $\varphi \in \left[\frac{360^{\circ}}{2^{B}} \times 0, \frac{360^{\circ}}{2^{B}} \times 1, \dots, \frac{360^{\circ}}{2^{B}} \times (2^{B} - 1)\right]$
(5)

其中, \vec{x}_{opt} 表示不考虑相位误差的阵元最佳激励相位向量,为将式(5)转化为标准优化问题, $f(\vec{x}_{opt})$ 为负的 BCE^[35]。 $g(\vec{x}_{opt})$ 表示接收区域外的最高辐射电平,*CSL*₀为电磁环境所能容许的最高电平值。

1.1.2 WCSA 分析

由于加工工艺和环境等因素影响,移相器存在 不确定误差 Δ 。WCSA 分析是在给定的容差区间 内,将不确定性误差 Δ 引入理想激励相位向量 \vec{x}_{opt} , 然后在 \vec{x}_{opt} 的不确定性边界内寻找使得 BCE 最差的 相位向量 \vec{x}_{wc} 的过程。

对于天线设计和综合问题,设计参数的不确定 性边界可认为是超矩形^[33]。如图 2 所示,给出了具 有二维参数变量 ϕ_1 和 ϕ_2 的相位容差区域,红色十 字表示最优解 $\vec{x}_{opt} = (x_1, x_2)$,绿色圆圈表示 \vec{x}_{we} ,其 中多个绿色圆圈表示 \vec{x}_{we} 可能存在的位置。 Δ_1, Δ_2 分别表示 \vec{x}_{out} 在两个维度上的容差范围。



图 2 具有两个参数变量 ϕ_1 和 ϕ_2 的矩形容差区域 Fig. 2 Square tolerance region with two parameter variables ϕ_1 and ϕ_2

假设已经通过主优化找到无误差的阵元最佳 激励相位向量 x_{opt},将因移相器本身产生的不确定 性误差引入到 x_{opt},在不确定性边界范围内寻找考 虑误差的最差激励相位分布,考虑电磁安全约束, 并实现最小化 BCE,优化模型如式(6)所列^[35]。

Find
$$\vec{x}_{wc} = (\varphi_{11} + \delta_{11}, \cdots \varphi_{1N} + \delta_{1N}, \dots, \varphi_{NN} + \delta_{NN})^T$$

Min $h(\vec{x}_{wc}) = BCE(\vec{x}_{wc})$
s. t. $g(\vec{x}_{wc}) \leq CSL_0$
 $\vec{x}_{opt} - \vec{\Delta} \leq \vec{x}_{wc} \leq \vec{x}_{opt} + \vec{\Delta}$
 $|\delta_{mn}| \leq \Delta_{mn} m = 1, 2, \cdots, N, n = 1, 2, \cdots, N$ (6)

其中, \vec{x}_{uc} 表示考虑误差的最差情况解, $\vec{\Delta} = (\Delta_1, \Delta_2, \dots \Delta_n) \in \mathbb{R}^N$ 表示初始各阵元的容差区间, $(\delta_{11}, \dots, \delta_{1N}, \delta_{21}, \dots, \delta_{NN})$ 是最优解 \vec{x}_{opt} 周围出现的一组阵元 容差区间, $h(\vec{x}_{uc})$ 为考虑误差情况下的 BCE。

1.2 算法流程框图

文章将发射天线阵元相位的鲁棒性优化分为两个阶段,即主优化阶段和WCSA分析阶段^[35]。主优化:在不考虑相位误差的情况下,利用具有吸收边界 PSO优化算法找到满足约束条件且最小化目标函数 f(x)的解。需要注意的是文中的 f(x)表示负的 BCE。WCSA分析:在最优解 x_{opt}的基础上引入相位误差,得到满足最小化目标函数 h(x)的最差情况解 x_{we}。为保证 100% 的可靠性,制定多个预期 BCE 作为约束准则,若满足预期 BCE 则建立禁区且记录容差范围和最优解,反之缩小容差范围,直至最差 BCE 满足要求,这个阶段需要注意的是缩小容差范围和设置禁区^[32-34]。建立禁区的目的是避免本轮最优解位于上一轮最优解的容差范围内,或者说保证本轮的最优解远离上一轮最优解的容差区间。

首先,需要找到使目标函数 h(x)最小的最差情 况 \vec{x}_{we} ,定义 $\vec{d} = (\Delta_{11}, \dots, \Delta_{1N}, \Delta_{21}, \dots, \Delta_{NN})$ 为最优 解 \vec{x}_{opt} 与潜在最差情况解 \vec{x}_{we} 之间的距离^[31]。其次, 将 \vec{d} 中最小的维度元素作为下一次迭代的初始容 差区间 Δ_{we} ,如式(7)所列。以两个潜在最差解为 例,说明缩小容差区间的详细过程,如图 3 所示, d_i 表示最优解 \vec{x}_{opt} 距潜在最差情况解 \vec{x}_{we-i} 的距离, Δ_{ij} , i=1,2, j=1,2表示 ϕ_1 和 ϕ_2 维度上的大小。

$$\Delta_{wc} = \min\max \|d\| \tag{7}$$

其中∥・∥表示2范数。dim 表示维度, solution 表示 潜在最差情况解。

当容差区间缩小到最差 BCE 满足较宽松的约 束准则时,则可以进入到具有更严格约束准则的优 化过程。在进入下一次更严格约束的优化之前,需 要设置一个禁区。以第一类零阶贝塞尔函数为例 说明禁区的作用,如图 4 所示。设计的禁区惩罚函 数 *F*(*x*)^[32],如式(8)所列。



图 3 具有两个参数变量 φ₁ 和 φ₂ 的矩形容差区间 缩减示意图



$$F(\vec{x}) = 10^M \,\forall \, \vec{x} \in \, \bigstar \, (8)$$

其中 *M* 为常数,一般取值 6~8。当粒子进入禁区范 围内时,对该粒子进行惩罚。



图4 建立禁区示意图





Fig. 5 Flow chart of the multi-criteria WCSA optimization algorithm

2 案例测试验证

针对 15×15 的方形发射天线进行激励相位的 鲁棒性优化设计,其中,接收天线阵列也为方形^[12]。 在点对点的微波无线传能中^[3],无需控制激励相位 进行波束扫描。因此,为验证文章提出的方法,在 不影响波束指向的前提下,将阵列划分为 Q 类。如 图 6 所示,颜色相同的方格代表具有同一相位值的 阵元。





假设阵元按照矩形栅格布局,沿 x 轴和 y 轴方 向等间距排列,且间距 $d_x = d_y = 0.5\lambda$,阵元的工作 频率为5.8 GHz。进一步,假设发射天线阵元激励 幅值均为1,且采用6位^[33]数字移相器,每个数字移 相器初始容差极限为±10°,其步进量 ε 为 360°/2⁶ =5.625°。案例中发射天线长为7.5λ,接收天线长 为50λ,两者垂直距离为225λ。接收区域为 ψ = { $(u,v): -u_0 \le u \le u_0, -v_0 \le v \le v_0$ }, u_0 和 v_0 分别表 示接收天线在 u-v坐标系下的边长。为对比不同约 束准则的容差范围,对于 Q = 5设置了 BCE 分别为 71%,73%和75%三个约束准则;对于 Q = 8设置了 BCE 分别为71%,72%和73%三个准则。

需要指出的是,文章将最优解容差范围的大小 作为判断该解鲁棒性强弱的依据,即具有更大容差 范围的最优解具有更强的鲁棒性。Q = 5和Q = 8的鲁棒性优化结果如表1所列。第一列表示移相器 分类数;第二列表示最优解,这里用十进制表示,具 体的阵元激励相位数值需要乘以移相器的步进量 ε ;第三列表示最优 BCE;最后一列表示鲁棒性设计 需要满足的约束准则;在不同的约束准则下,第四 列表示当前设计所能容忍的最大相位容差;第五列 给出了该容差下的最差 BCE。为方便阅读,后续将 分类数 Q 对应的第 i 个最优解定义为 x_i^o , $i = 1, 2_o$ 如 Q = 5 时的最优解(58,57,58,60,56)表示为 x_1^5 。

表 1 鲁棒性优化结果(N = 225) Tab. 1 Robust optimization results (N = 225)

······································					
分类	最优解	最优	最大容差	最差情	准则
数 Q		BCE/%	Δ/\deg	况 BCE/%	/%
<i>Q</i> = 5	(58,57,58, 60,56)	74.97	7.60	71.31	>71
			4.18	73.28	>73
			Null	Null	>75
<i>Q</i> = 5	(48,49,48, 46,50)	74.97	8.14	71.38	>71
			4.39	73.36	>73
			Null	Null	>75
Q = 8	(50,56,58,	73.32	6.43	71.37	>71
	58,60,60,		4.14	72.18	>72
	56,54)		1.39	73.05	>73
Q = 8	(52,46,48,	73.76	6.43	71.26	>71
	49,50,52,		4.35	72.29	>72
	47,47)		1.93	73.26	>73

根据表 1 的数据分析可知,针对 Q = 5 的情况, 当 BCE 约束准则设置为 71% 时, x_1^5 表现出的最大 容差为 7.60 度。与此同时, x_2^5 经 WCSA 分析后的 最大容差为 8.14 度,两者之间存在 0.514 度的差 异。这表明不同的天线单元初始相位值具有不同 的容差范围。此外,当Q = 8,BCE 约束准则设置为 71%时, x_1^8 和 x_2^8 表现出相同的容差范围,但后者的 最差 BCE 比前者提高了 0.09%。这表明在相同的 容差范围内仍有提高系统性能的空间。

如图 7 所示,给出了 Q = 5, BCE 约束准则为 71%时, x_1^5 和 x_2^5 对应阵元存在相位误差时的相位分 布图,其中数值采用了四舍五入,保留小数点后 一位。





Fig. 7 Phase distribution of array elements corresponding

to different optimal solutions with phase errors

如图 8 所示,给出了 Q = 5,BCE 约束准则为 71%时,发射天线的归一化功率方向图。黑色方框 表示接收天线的接收区域 ψ。

通过图 6 与图 7 对比可以看出,靠近阵列边缘 的阵元相位数值相比于无误差相位分布均发生较 大变化。从数值上看,有误差的相位数值等于无误 差相位数值加减最大容差。这种现象很好的符合 了最差情况往往出现在参数不确定性边界上的 特征^[31]。 通过图 8 可以看出, x₁⁵ 与 x₂⁵ 存在相位误差时, 其归一化功率方向图在接收区域无明显差别。在 v = 0 或 u = 0 的区域呈现出中间功率大,两侧功率 小的特点。图 8(a)与图 8(b)的主要区别在于边缘 区域的功率分布。





(b)有相位误差的阵列归一化功率分布(48,49,48,46,50)

图 8 有相位误差时不同最优解对应的归一化功率方向图

Fig. 8 Normalized power direction diagrams corresponding

to different optimal solutions with phase errors

为了评估文章方法的有效性,采用蒙特卡洛法 进行对比验证。以最优解(48,49,48,46,50)为例, 在给定的最大容差8.14度范围内进行采样,将最大 容差范围分成 *K* 等份容差区间,每个容差区间内设 置 30 万个采样点。该案例中,*K* 设置为100。此外, 将每个容差区间内的最差解作为最终结果进行输 出。如图 9 所示,横轴表示容差区间,纵轴表示最差 BCE。青色圆圈表示蒙特卡洛结果,红色五角星表 示利用文章所提方法得到的结果。

从图9可以看出,在最大容差范围内,蒙特卡洛 法得到的最差 BCE 为 73.78%,所提方法得到的最 差 BCE 为 71.38%。当容差区间较小时,蒙特卡洛 方法结果与文章方法结果相近;当容差区间增大 时,蒙特卡洛方法结果大于本文方法结果。这表明随着容差范围的增大,所提方法得到的最优解更具有鲁棒性。



图 9 本文方法与蒙特卡洛法的对比结果

Fig. 9 Comparing the worst BCE of each segmented tolerance interval obtained by MCM and the proposed method

3 结论

文章提出了一种基于 WSCA 的发射天线鲁棒 性馈电相位优化设计方法。通过该方法,可找到一 组具有最大容差的馈电相位激励,从而保证发射天 线存在馈电相位随机误差时,仍具有较高的 BCE。 此外,优化得到的馈电相位激励表现出两大特点: 一是理想 BCE 相同时,鲁棒性馈电相位激励往往具 有更大的容差范围;二是容差范围相同时,鲁棒性 馈电相位激励往往具有更高的 BCE。进一步地,通 过蒙特卡洛方法验证了所提方法的有效性。

参考文献:

- STRASSNER B, CHANG K. Microwave power transmission: Historical milestones and system components [J].
 Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6):1379-1396.
- ZHU X R, JIN K, HUI Q, et al. Long-range wireless microwave power transmission: A review of recent progress
 IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4):4932-4946.
- [3] 曹垒,林先其,陈越腾.微波无线能量传输与收集应用 系统的研究进展及发展趋势[J].空间电子技术, 2020,17(2):57-63.
- [4] 李军,董士伟,李洋,等.空间太阳能电站发展历程回 顾与前景展望[J].空间电子技术,2018,15(2):8-15.
- [5] 杨士中. 微波功率传输的研究[J]. 空间电子技术, 2018,15(2):1-7.
- [6] 董亚洲,董士伟,王颖,等. 空间太阳能电站微波能量
 传输验证方案设计[J]. 中国空间科学技术,2017,37
 (3):11-18.
- [7] 王颖,董亚洲,李小军,等. 微波无线能量传输技术在

平流层飞艇中的应用研究[J]. 空间电子技术,2016, 13(1):15-19.

- [8] 段宝岩.空间太阳能发电卫星的几个理论与关键技术
 问题[J].中国科学(技术科学),2018,48(11):
 1207-1218.
- [9] BROWN W C, EVES E E. Beamed microwave power transmission and its application to space[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40 (6):1239-1250.
- [10] SHAMS K M Z, ALI M. Wireless power transmission to a buried sensor in concrete [J]. IEEE Sensors Journal, 2007,7(12):1573-1577.
- [11] 侯欣宾,贾海鹏. 基于微波无线能量传输的临近空间 飞行器电力供给[J]. 空间电子技术,2016,13(2): 12-16.
- [12] OLIVERI G, POLI L, MASSA A. Maximum efficiency beam synthesis of radiating planar arrays for wireless power transmission [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(5):2490-2499.
- [13] PARKER D, ZIMMERMANN D C. Phased arrays part 1:Theory and architectures [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50:678-687.
- [14] AGRAWAL A K, HOLZMAN E L. Beamformer architectures for active phased-array radar antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(3): 432-442.
- [15] NAQVI A H, LIM S. Review of recent phased arrays for millimeter-wave wireless communication [J]. Sensors, 2018,18(10):3194.
- [16] MASSA A, OLIVERI G, VIANI F, et al. Array designs for long-distance wireless power transmission: State-of-the-art and innovative solutions [J]. Proceedings of the IEEE, 2013,101(6):1464-1481.
- [17] LI X, DUAN B Y, SONG L W, et al. Study of stepped amplitude distribution taper for microwave power transmission for SSPS [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10):5396-5405.
- [18] BLANK S J, HUTT M F. Transmitter illumination taper as a design parameter for wireless power transmission systems [C]//2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, Montreal: IEEE, 2012:1-3.
- [19] BAKI A, NAOKI S H I N O H A R A, HIROSHI M A T S U M O T O, et al. Study of isosceles trapezoidal edge tapered phased array antenna for solar power station/satellite[J]. IEICE Transactions on Communications, 2007, E90-B(4):968-977.
- [20] BAKI A K M, HASHIMOTO K, SHINOHARA N, et al. I-

sosceles-trapezoidal-distribution edge tapered array antenna with unequal element spacing for solar power satellite [J]. IEICE Transactions on Communications, 2008, E91. B(2):527-535.

- [21] TAKAHASHI T, MIZUNO T, SAWA M, et al. Development of phased array for high accurate microwave power transmission [C]//2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications, Kyoto; IEEE, 2011;157-160.
- [22] NANOKAICHI K, SHINOHARA N, KAWASAKI S, et al. Development of waveguide-slot-fed active integrated antenna for microwave power transmission [C]//XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), [S.1.]:New Delhi,2005.
- [23] SHINOHARA N, ISHIKAWA T. High efficient beam forming with high efficient phased array for microwave power transmission [C]//2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Torino: IEEE,2011:729-732.
- [24] ISHIKAWA T, SHINOHARA N. Study on optimization of microwave power beam of phased array antenna for SPS
 [C]//2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications, Kyoto: IEEE, 2011:153-156.
- [25] WAN S P, HUANG K M. Methods for improving the transmission-conversion efficiency from transmitting antenna to rectenna array in microwave power transmission[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(4): 538-542.
- [26] 董士伟,董亚洲,王颖,等. MW 级太空发电站微波能量 波束指向控制精度分析[J]. 宇航计测技术,2018,38
 (3):61-66.
- [27] LI X, ZHOU J Z, ZHANG Y Q. Performance of planar arrays for microwave power transmission with phase shifter errors[J]. Fifth Asia International Symposium on Mechatronics (AISM 2015), 2015;1-4.
- [28] LI X, ZHOU J Z, DUAN B Y, et al. Performance of planar arrays for microwave power transmission with position errors [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14:1794-1797.
- [29] ZHANG S, ZENG Y C, SONG L W, et al. A simplified model for calculating efficiency loss of aperture illumination with phase errors for microwave power transmission [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021,20(4):468-472.

- [30] ZHOU H W, YANG X X, RAHIM S. Array synthesis for optimal microwave power transmission in the presence of excitation errors [J]. IEEE Access, 2018, 6: 27433-27441.
- [31] STEINER G, WEBER A, MAGELE C. Managing uncertainties in electromagnetic design problems with robust optimization [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2):1094-1099.
- [32] ZHANG B T, RAHMAT-SAMII Y. Worst-case sensitivity analysis (WCSA) by particle swarm optimization (PSO): Applications in realistic optimal antenna designs [C]//2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Queensland: IEEE, 2016:974-977.
- [33] ZHANG B T, RAHMAT-SAMII Y. Robust optimization with worst case sensitivity analysis applied to array synthesis and antenna designs[J]. IEEE Transactions on An-

tennas and Propagation, 2018, 66(1):160-171.

- [34] XU S H, RAHMAT-SAMII Y. Boundary conditions in particle swarm optimization revisited [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(3):760-765.
- [35] 柳坤鹏,李勋,段宝岩,等.用于微波传能发射天线系 统馈电激励的鲁棒性设计方法:CN116542074A[P]. 2023-08-04.
- [36] HAUPT R L. Antenna arrays: a computational approach
 [M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2010.
- [37] HASHIMOTO K, NIIJIMA S, EGUCHI M, et al. Optimization of uniformly excited phased array for microwave power transmission [C]//International Symposium on Antennas and Propagation, Niigata: ISAP, 2007.
- [38] 陈宁,梁煜,张为.一种高精度紧凑型 X 波段 6 位数控 移相器[J]. 西安电子科技大学学报,2022,49(3): 222-229.
- 作者简介:柳坤鵰(2000—),安徽阜阳人,博士研究生。主要研究方向为徽波无线能量传输技术。E-mail:pkliu@stu.xidian.edu.cn 通讯作者:李勋(1990—),陕西西安人,博士,副教授、硕士生导师。主要研究方向为徽波无线电力传输、阵列天线综合、进化优 化技术、空间太阳能卫星。E-mail:lixun@xidian.edu.cn