摘 要

随着无线功率传输、生物医学、工业微波成像、RFID读卡系统等应用的兴起，近场聚焦阵列在各领域的应用逐渐广泛。大部分对天线的研究侧重于远场辐射特性方面，近年来天线的近场特性也得到了广泛的研究，其核心目标是实现能量在目标区域的高度集中。针对使用传统方法设计的天线通常有着近场能量不集中、浪费严重、副瓣高等问题，本文研究了一种基于最大功率传输效率法的近场聚焦阵列，主要研究内容如下：

1. 设计基于2.5GHz侧馈贴片微带天线，天线由介质基板、辐射贴片、接地板和馈线结构组成。侧馈属于直接接触式馈电，为了构成侧馈的馈电方式，需要将馈线和贴片的边缘直接相连，通过调整馈电点的位置来实现阻抗匹配。同时，不断优化馈电点的位置、天线尺寸、介质基板的介电常数等关键设计参数，实现天线频率处于2.5GHz附近且S11参数低于-10dB。
2. 设计了两款工作频率在2.5GHz的近场聚焦阵列，分别为4×4和8×8的微带阵列天线，实现了基于最大功率传输效率法的近场聚焦阵列。在设计的微带阵列天线中，均构成了N端口的反射天线和一个接收天线的系统，通过散射矩阵将入射波与反射波组成的矢量联系起来，利用CST仿真软件运行出来的S11参数构成的矩阵，并通过Matlab的最大功率代码进行计算，最终得到每个天线单元所需要的幅度和相位，实现理想的聚焦效果。比较相位补偿法和最大功率传输效率法的能量分布图。结果表明，在相同的设定焦距下，最大功率传输效率法的聚焦精度更高，从发射端到负载的功率传输效率最优，副瓣更低，焦偏更小，能更精准的聚焦信号。

【关键词】微带贴片，最大功率传输效率法，聚焦天线，近场天线，相位补偿

ABSTRACT

With the rise of applications such as wireless power transmission, biomedical engineering, industrial microwave imaging, and RFID card reading systems, the application of near-field focusing arrays has gradually become widespread in various fields. Most studies on antennas focus on the far-field radiation characteristics. In recent years, the near-field characteristics of antennas have also been extensively researched, with the core goal being to achieve a high concentration of energy in the target area. In view of the problems that antennas designed using traditional methods usually have, such as non-concentration of near-field energy, serious waste, and high side lobes, this paper studies a near-field focusing array based on the maximum power transmission efficiency method. The main research contents are as follows:

1. The design is based on a 2.5GHz side-fed patch microstrip antenna. The antenna consists of a dielectric substrate, a radiation patch, a ground plane and a feed structure. Side feeding is a direct contact type of feeding. To form the side feeding mode, it is necessary to directly connect the edge of the feed line and the patch. The impedance matching can be achieved by adjusting the position of the feeding point. Meanwhile, the positions of the feeding point, the antenna size, and the dielectric constant of the dielectric substrate are continuously optimized to ensure that the antenna frequency is around 2.5GHz and the S11 parameter is lower than -10dB.
2. Two near-field focusing arrays with working frequencies of 2.5 GHz were designed, namely 4×4 and 8×8 microstrip array antennas. Based on the maximum power transmission efficiency method, near-field focusing arrays were realized. In the designed microstrip array antennas, both N-port reflector antennas and a receiving antenna system were formed. The incident wave and the reflected wave were connected by the scattering matrix, and the matrix composed of the S11 parameters obtained by running the CST simulation software was used to calculate. Finally, the amplitudes and phases required for each antenna unit were obtained to achieve the ideal focusing effect. The energy distribution diagrams of the phase compensation method and the maximum power transmission efficiency method were compared. The results show that under the same setting of focal distance, the focusing accuracy of the maximum power transmission efficiency method is higher. The power transmission efficiency from the transmitting end to the load is the best, the side lobes are lower, and the focal deviation is smaller. It can focus the signal more precisely.

【KEY WORDS】: Microstrip patch, maximum power transmission efficiency method, focusing antenna, near-field antenna, phase compensation

1. 绪论
2. 研究背景与意义

近年来，无线通信技术的迅猛发展推动了无线功率传输[1]、工业微波成像[2]和生物医学局部热疗[3]等领域的创新突破。在这些应用中，提升无线传输系统的能量效率成为关键技术挑战，这使得天线阵列设计研究备受关注。然而，传统微带天线在Ka波段毫米波系统中面临带宽窄、增益低、方向性差等固有缺陷，难以满足现代雷达和卫星通信的高标准需求。同时，现有阵列设计方法往往无法同时优化传输效率和聚焦性能，这一局限性促使研究者将目光转向能够在有限输入功率下实现能量最大化利用的近场聚焦阵列天线。针对这一技术需求，当前主流的聚焦天线设计方法可分为两类：一是采用微带阵列天线结合聚焦透镜的方案[4]，二是基于球面阵列排布的设计[5]。这些传统方法虽然在特定场景下有效，但仍存在能量传输效率低、聚焦效果不理想等共性问题。在此背景下，近场无线能量传输技术因其独特的性能优势逐渐成为研究热点。作为该技术的核心组件，近场聚焦阵列的设计优化对提升系统整体性能具有决定性作用。

近场聚焦天线的核心原理是通过精确调控阵列中各辐射单元的相位，使电磁波在菲涅耳区的目标点实现同相叠加[6]-[14]，从而在特定区域形成高强度的电磁场分布。当这一原理与最大功率传输效率法（MPTE）相结合时，不仅能实现能量的高效聚焦，还能确保负载端获得最大功率传输。这种创新方法有效解决了传统设计中效率与聚焦性能难以兼顾的矛盾，为近场无线能量传输技术的实际应用开辟了新途径。

本研究聚焦于开发基于MPTE方法的近场聚焦阵列系统，通过多参数协同优化和结构创新，旨在实现两大目标：一是显著提升近场能量传输效率，二是获得精确可控的电磁场聚焦效果。这一研究不仅具有重要的理论价值，更能为医疗、通信、工业等多个领域提供突破性的技术解决方案。从更广泛的社会影响来看，该技术的应用将推动精准医疗的发展，促进绿色能源利用，加速智能制造升级，并为构建智能化社会和实现可持续发展目标提供关键技术支撑。其在提升能源利用效率、改善医疗服务质量、促进社会公平等方面的潜在贡献，彰显了重要的科学研究价值和社会意义。

1. 国内外研究现状
2. **近场聚焦阵列的国内外研究现状**

国内的近场聚焦阵列研究方向包括理论分析、算法优化和实际应用，提出了多种近场聚焦算法研究不同阵列结构对进场聚焦性能的影响。国外技术成熟，聚焦算法、阵列优化及在无线能量传输、医学成像和雷达通信中的应用取得了显著进展，研究了多频段、宽带宽的近场聚焦阵列设计。目前，近场聚焦阵列的研究热点集中在算法优化以及应用拓展等。

在近场范围内，W.F. Richards 等（1980s）提出了微带阵列的近场优化方法，为后续近场聚焦阵列设计提供了理论工具。李英均[15]设计了一种一分八Wilkinson功率分配器加载数字移相器的馈电网络和U型槽天线单元，验证了平面阵列天线在近场实现焦距可调和焦点扫描的能力；还提出了一种赋形聚焦方法，通过相位和幅度调控，实现了将电磁波能量聚焦到特殊形状区域（如四角星、正方形和三角形）。衣延翔[16]设计了一款8×8近场聚焦微带阵列天线，利用部分辐射单元馈电的方式验证了近场聚焦天线的汇聚过程，并总结了近场聚焦天线的辐射特性规律。应用基于代理模型的差分进化算法优化了天线的聚焦参数，实现了指定聚焦位置和焦深的微带阵列天线。还实现了一种圆极化近场聚焦 SL-RLSA。将近场聚焦天线的相位分布引入径向线缝隙阵列天线的口径场控制过程实现了聚焦效应，该聚焦径向线缝隙阵列天线的聚 焦位置随相位分布变化而变化。

图示

AI 生成的内容可能不正确。

* + - 1. 用于产生近场聚焦的柱面共形阵列天线

图示

AI 生成的内容可能不正确。

* + - 1. 近场聚焦平面阵列天线分析模型

叶苗等人[17]基于电磁聚焦理论，设计并制作了一个工作频率为2.45 GHz的4×4近场聚焦平面微带阵列天线。该天线通过精确控制辐射单元的相位分布，实现了近场聚焦效果，最大电场强度出现在距离天线表面300 mm处，聚焦区域直径约为124 mm。其还设计并研究了一款工作频率为2.45 GHz的4×4近场聚焦平面微带阵列天线，并将其应用于微波热疗领域。该天线采用嵌入式矩形微带贴片天线作为阵元，通过并联馈电方式实现激励，并完成了T型功率分配器和四分之一波长阻抗变换器的设计。测试结果表明，天线在距离表面300 mm处电场强度最大，聚焦深度为62 cm，焦平面上的3 dB区域为直径约110 mm的圆形光斑。王守源等人[21]设计了一种用于微波热疗的4×4近场聚焦微带阵列天线，工作于2.45GHz频段。他们采用U形天线作为阵元，通过调整微带馈线长度控制各辐射单元的相位，实现了电磁波在近场焦点处的同向叠加，达到能量聚焦的目的，并通过HFSS18仿真验证了天线在焦点位置的聚焦效果。Yu Jian Cheng等人[28]设计并实现了一种Ka波段的近场聚焦阵列天线，创新性地使用SIW技术和金属圆孔阵列实现了焦点位置的可调性和低旁瓣电平，但存在焦点调整范围有限和设计复杂等缺陷。

形状

AI 生成的内容可能不正确。图表, 箱线图

AI 生成的内容可能不正确。

1. （b）

游戏的屏幕

AI 生成的内容可能不正确。

（c）

* + - 1. 微带阵列天线模型

1. 微带聚焦阵列天线的国内外研究现状

在2007年，K.D.Stepha 等人提出了一种用于温度感知系统的近场聚焦阵列天线[39]。该天线工作在12.5GHz频段，采用8×8微带贴片阵列结构，整体尺寸为154mm×154mm，工作带宽达到0.65GHz。采用相位补偿机制，每个天线单元的相位通过微带线的电长度调节，确保电磁波在目标焦点处实现同相叠加，从而增强聚焦效果。在12.5GHz工作频率下，天线在距离30.5 cm处形成聚焦点，其6 dB 焦斑宽度（即聚焦区域的半功率束宽）为66 mm，表明该设计能够有效集中电磁能量。Farzad Tofigh等人[22]设计并实现了一种2.4 GHz的4×4近场聚焦微带阵列天线，创新性地应用于微波能量控制包虫病囊肿生长的医疗领域，实现了小聚焦点和低旁瓣电平，但存在工作频率低、聚焦深度有限和效率较低的缺陷。

李鹏发[19]聚焦于近场聚焦相控阵天线的设计方法及其在多个领域的应用，提出了基于几何光学法和矢量分析的简化建模方法、基于子阵的近场聚焦阵列天线、开槽天线阵列以及双极化微带天线单元等创新设计，并首次实现了具有二维焦点扫描能力的相控聚焦阵和焦距可调的频率扫描聚焦阵。这些成果显著提高了天线设计效率并降低了系统成本。施秉权等人[24]提出了一种采用最大功率传输效率（MMPTE）方法设计的毫米波微带天线阵列。该天线由4×4矩形贴片辐射单元和微带线馈电网络组成，通过MMPTE优化天线的相位和幅度，实现了高辐射效率、高增益和良好的性能，适用于Ka波段毫米波天线系统。创新点在于利用MMPTE方法显著提高了天线的传输效率和性能，同时设计的天线结构简易、成本低廉、体积小。

图示

AI 生成的内容可能不正确。

* + - 1. 二维焦点扫描微带阵列天线

近场聚焦天线技术已发展出多种实现方法，主要包括：基于球面波相位补偿的传统方法，通过移相器或微带线调节实现静态聚焦；采用遗传算法、差分进化等智能优化算法和深度学习技术的新型方法，可处理复杂优化问题并实现动态聚焦；特殊阵列结构方法如共形阵列和稀疏阵列，可满足不同平台需求；以及相位-幅度联合调控等混合方法，能实现特殊形状聚焦。这些方法各具特色并适用于不同应用场景，未来发展趋势是智能化、自适应化和多物理场协同设计。

1. 论文的主要研究内容和写作安排

本论文主要讨论了近场聚焦阵列天线的研究，其中对阵列天线的不同算法形成的聚焦能力进行了分析与总结。首先设计侧馈微带贴片天线，然后基于贴片天线阵元的基础上，设计了两种用于近场聚焦的阵列天线，最后通过幅度与相位调控进行对比与分析。

本论文将主要内容分为五个部分进行详细分析，各章的研究内容如下：

第一章，绪论部分。主要介绍了关于近场聚焦天线的研究背景和意义，以及目前国内外相关的研究现状。

第二章主要介绍了聚焦算法的研究现状。首先对贴片天线的基本原理进行了叙述，包括同轴馈电和侧馈并比较他们的优缺点；然后介绍近场聚焦阵列设计基本原理，对近场区域和远场区域的划分进行讲解，以及衡量的参数介绍，例如：焦距、焦宽、焦偏等，为最后算法优化对比提供了性能指标；最后对聚焦算法的基本原理进行了介绍，例如：相位补偿法、最大功率传输效率法等等，并分析了这些算法的优缺点。

第三章主要设计了基于2.5GHz的侧馈微带贴片天线。首先介绍了构成贴片天线的基本单元及其参数设置，观察S11参数是否达标。针对未达规定功率的贴片天线，设定参数区域进行扫参优化，达到设定天线功率。在基础单元的条件下，构成4×4和8×8的阵列模型，通过不同的聚焦算法得到不同的幅度和相位，实现理想的聚焦效果。最终证明最大功率传输效率法具有高增益、高传输效率、低副瓣和小型化的特点。

第四章主要介绍了在相同设定焦距下的聚焦算法的仿真验证对比，对他们的性能优略进行阐述。最后采用同轴馈电的方式重新设计贴片天线，并将其组成4×4的阵列天线，并对比分析最大功率传输效率的聚焦方法与其它聚焦方法的性能优略。

第五章主要是对本文所做的工作进行总结，对本文所用到的方法以及相关实验进行归纳，同时对论文的不足之处以及后续工作进行展望。

1. 聚焦算法研究现状
2. 微带贴片天线基本原理

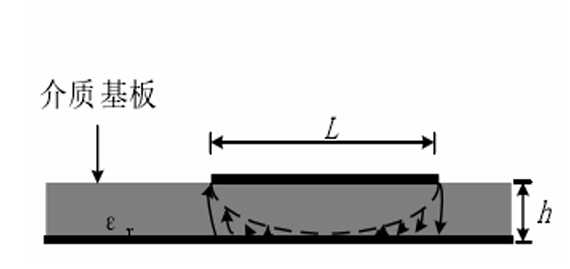
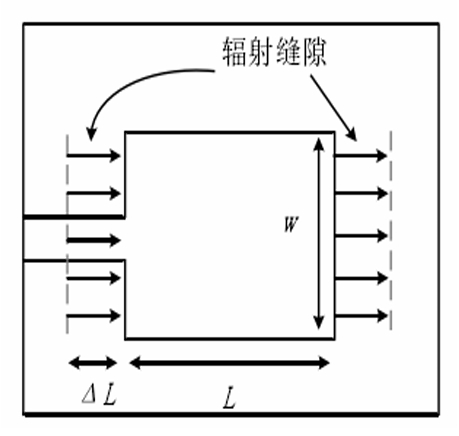
微带天线凭借其独特的结构设计和优异的性能表现，已成为现代无线通信系统中的关键元件。该天线采用三层构架设计：以厚度远小于工作波长的介质基板为载体，基板背面覆有完整的金属接地层，正面则通过精密印刷工艺制作出各种形状的辐射单元，其中矩形贴片、缺陷矩形贴片和圆形贴片是当前市场主流形态。在电气特性方面，微带天线不仅支持灵活的线极化和圆极化配置，还能通过结构优化实现多频段工作和双极化特性。其突出的可塑性使得研究人员能够开发出满足多样化需求的天线设计。从制造角度看，微带天线具有高度集成化、适合规模化生产的特点，制造成本优势明显，这些特性使其成为智能手机等移动终端设备的理想选择，并在5G通信、物联网等领域展现出广阔的应用前景。

如图2.1所示的形状较为简单的三层结构，是最基础的矩形微带贴片天线模型，下文设计的工作频点为2.5GHz的天线将以此为参照。在该模型中分别用L表示矩形贴片的长度（约等于λ/2），用W表示矩形贴片宽度，则 h为介质基板的高度。以这款基础结构的天线模型为例，图 2.2（a）、（b）分别从两个角度更加直观地分析出微带天线的辐射机理 [50]。

图片包含 游戏机, 钢琴, 桌子

AI 生成的内容可能不正确。

1. 矩形微带贴片天线结构



1. （b）
2. 微带贴片天线辐射机理

从电磁场理论的角度分析，微带天线的工作原理可以这样理解：整个天线结构（包含辐射贴片、介质基板和接地板）在激励状态下可等效为一段特性阻抗较低的λ/2传输线。为确保单模工作，介质基板厚度h必须远小于工作波长（通常h<λ/10），这一设计约束使得电场在垂直于辐射贴片方向保持均匀分布（如图3.2(a)所示）。通过电磁场分布分析发现，沿贴片长度方向（L方向）的场变化显著大于宽度方向（W方向），因此研究重点应放在L方向的场分布特性上。

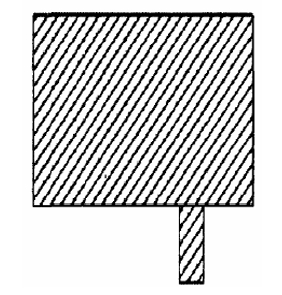
在二维简化模型中，当仅考虑主模激励时，电场方向与馈电电流方向保持一致。其辐射机制本质上源于贴片边缘与介质基板交界处的时变电场。对开路端边缘电场进行矢量分解显示：垂直于接地板的分量因相位相反而相互抵消，而平行于接地板的分量则同相叠加，这使得天线的主要辐射能量集中在地板上方的平行空间内。基于这一特性，可将矩形贴片天线辐射场等效为沿宽度方向（W方向）对称分布的两个缝隙辐射场的叠加，这种等效模型为理解微带天线辐射特性提供了理论依据。

1. **微带天线的馈电方式**

微带天线可以通过微带线或同轴线馈电或者电磁耦合的方式馈电。正常情况下， 第3章4.85GHz二元阵列天线的设计与分析 辐射贴片和地板分别贴覆在基板的两侧，所以多用微带线馈电和同轴线馈电。但馈电点的位置也会影响辐射特性，为了达到理想的50Ω传输线阻抗，需要选择适当的位置 进行匹配。

1. 侧馈电

微带天线的馈电位置直接影响其激励模式和阻抗匹配特性。以图2.3所示的侧馈微带馈电方式为例，在设计过程中首先需要基于工作频率计算矩形贴片的初始尺寸，随后进行阻抗匹配优化。由于50欧姆阻抗在耐压性能、功率传输能力和低损耗等方面具有综合优势，因此通常选择50欧姆作为匹配目标阻抗。值得注意的是，贴片的几何中心往往并非最佳馈电点，通过适当调整微带馈线的位置和尺寸，通常能够获得更优的阻抗匹配效果，从而提升天线的整体性能。



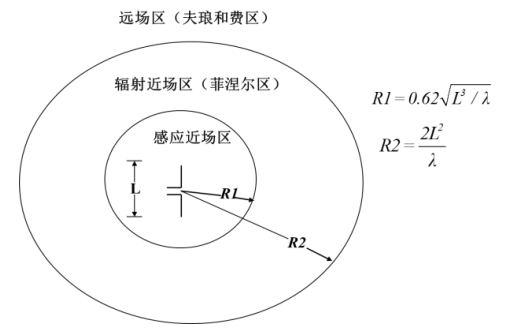
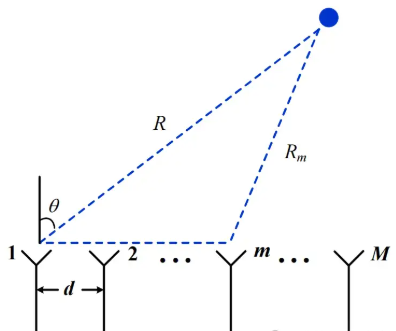
1. 侧馈微带馈电方式
2. 同轴线馈电方式

同轴线馈电微带天线的工作原理可以通过电磁场理论进行深入解析。如图2.4所示，该馈电结构中，同轴线穿透介质基板，其内导体分别连接接地板和辐射贴片。根据惠更斯原理，这种结构可等效为一个电流圆柱模型：馈电点处的同轴内导体模拟了从底部到顶部的轴向电流分布，而接地板开口处则形成一个环形磁流带。在理想情况下，假设电流沿圆柱体均匀分布且忽略边缘效应时，该电流圆柱可进一步简化为等效电流带模型。在实际设计中，工程师通常基于经验优化同轴馈点的位置，通过调整馈点与贴片中心的距离来实现最佳阻抗匹配，这种方法能有效改善天线的辐射特性和工作效率。这种馈电方式特别适用于需要精确控制激励模式的高性能微带天线设计。

图示, 工程绘图

AI 生成的内容可能不正确。

1. 同轴馈电方式
2. **近场聚焦阵列设计基本原理**
3. **天线厂区划分**



（a） （b）

1. 天线场区划分示意图

余弦定理：

则第m个阵元与第1个阵元接收到的信号时间差为：

泰勒展开（二阶）得：

则对应两个阵元接收到的相位差为：

当满足时，后一项可忽略，此时称满足远场条件。

1. **近场聚焦理论**

**图示

AI 生成的内容可能不正确。**

1. 聚焦原理示意图

聚焦就是将能量聚焦到理想区域，此时在焦点处的理论功率值最大。目前实 现聚焦的方法很多，但是聚焦的原理都是相同的。对于平面阵列聚焦天线而言， 阵列中的每个阵元到焦点的初始相位都是不一样的，因此需要给每一个天线单元 补偿由路程引起的相位差，当在焦点位置实现同相叠加的时候，焦点处的功率将会达到最大值。而要达到这一目的，就需要精准的馈电网络连接至天线，使天线 发射能量并聚焦到理想位置，从而达到聚焦状态。

近场聚焦阵列天线的原理如图2.6所示，M×N 的阵列天线位于XOY平面，天线单元位于 *Gmn*(*xm*, *yn*, 0)，焦点位置设计在 *F*(0, 0, *fz*)，天线单元之间的间距为*d*，这时候，天线单元距离焦点*F* 的距离应该为：

这时，设在(*xm*, *yn*, 0)处的天线单元的激励电流为*Imn*，可以表示为：

因此，在(*xm*, *yn*, 0)处的天线单元在焦点处产生的辐射场可以表示为：

其中*φ*为相位中心原点的时候天线单元的相位，*I*0为天线阵列阵元的电流模值。

阵列天线所辐射的电场总和为：

阵元和焦点的之间的距离，通过近似可以表示为 1/*Rmn*≈1/*r*，因此整个辐射场可以表示为：

综上所述，当所有的阵元所辐射的电磁波在焦点处同相叠加的时候，焦点处的能量值将会达到最大，这时候阵列天线中每个阵元满足的相位可以表示为：

这就是微带阵列天线在近场聚焦应用中的设计原理。

1. **参数介绍**

在设计聚焦天线的过程中，会通过一些参数去评判聚焦天线的性能。通常聚焦天线是由众多的天线单元构成的聚焦天线阵，因此要设计一个性能好的聚焦天线首先需要设计性能好的天线单元。单元天线的性能参数主要有以下几个：

1. 反射系数

反射系数是为入射电压与反射电压之间的比值，阻抗匹配就是通过反射系数来衡量。通常情况下，在设计优化天线的时候，当S11小于-10dB，就可以认为匹配良好。

1. 天线增益

天线增益是射频输入功率在空间中产生信号能力的大小，天线在向空间辐射的时候，在每个方向上的增益都是不同的，可以理解为输入功率相同的情况下，在空间中的同一个位置处全向天线辐射的功率和所设计天线辐射功率的比值。

组合成聚焦阵列天线，也会有一些性能去评判所设计的聚焦天线性能的好坏，主要有以下几个参数：

1. 焦宽（focus width） 电磁波能量被聚焦在焦平面上，形成焦斑。这里仅关注焦点处能量在焦平面上减小到一半所形成的焦斑。其中焦斑越小、聚焦能力越好。
2. 焦深（The Depth of Focus, DoF）

焦点处能量在焦点的垂直方向上减小一半的距离。

1. 焦偏

近场聚焦天线辐射场实际功率密度的峰值并不出现在预设的观测点处，而出现在预设观测点与天线口径之间的某一位置处。

1. 焦斑

聚焦天线工作的过程中，把垂直于传输面的平面称为焦平面。在焦平面上可以清楚的看到所在平面的能量分布，当比最大功率值低 3dB 的范围称为焦斑。在设计聚焦天线的时候，所设计的焦点称为理想焦点，但是由于聚焦天线在空间传输的时候会受到电场分量的影响，实际焦点的位置可能会不在理想焦点的位置。因此，当实际的焦点位置与理想焦点的位置越接近的时候，所设计的聚焦天线的性能越好，聚焦效果也就越好。当实际焦点在理想焦点的 3dB 焦深范围内，就可以认为所设计的聚焦天线性能良好。

1. **最大功率传输效率法基本原理**

本设计通过最大功率传输效率法优化馈电网络，得到每个端口最优激励的相位和幅值使效率提高。

优化阵列天线激励分布时将发射天线、接收天线作为一个功率传输系统，如图2.7所示。

图片包含 图示

AI 生成的内容可能不正确。

1. N+1端口微波网络系统示意图

整个系统由N端口的发射天线和一个接收天线组成，可看成N+1端口的网络，通过散射矩阵S将端口的入射波和反射波组成的矢量联系起来。