

# 微带阵列天线设计及其在高频雷达系统中的应用

苏甜<sup>1</sup> 周琦竣<sup>1</sup> 杨天虹<sup>1</sup> 魏子豪<sup>2</sup> 张可<sup>1</sup>

1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院 辽宁沈阳 110136

2. 东北大学冶金学院 辽宁沈阳 110819

**摘要:** 随着现代雷达系统对高性能天线的需求日益增加,微带阵列天线因其成本低、重量轻及易于集成等优点,成为雷达系统中广泛应用的关键组件。然而,传统的微带天线设计往往存在增益不足、旁瓣电平过高以及馈电网络复杂等问题,限制了其在高频雷达系统中的有效应用。为了解决这些问题,本文设计了一种基于切比雪夫综合法的微带阵列天线,以满足雷达系统对高增益和低旁瓣电平的要求。通过优化阵列的电流分布,成功地提高了天线的增益并有效抑制了旁瓣。设计中采用了 $1 \times 10$  矩形微带贴片阵列结构,并利用威尔金森功率分配器和非等功率分配器网络优化了馈电网络。最终,仿真和实验结果表明,该设计不仅在 77 GHz 频段实现了较高的增益,且旁瓣电平得到了有效降低,显著提高了雷达系统的抗干扰能力和工作可靠性。该研究为高频雷达系统提供了一种高效且可行的微带阵列天线设计方案。

**关键词:** 微带阵列天线; 雷达系统; 馈电网络; 切比雪夫方法; 77 GHz

## 引言

随着现代雷达技术的迅速发展,对天线性能的要求日益提高。雷达系统在执行目标探测任务时,需要具备高天线增益和宽波束宽度,以确保在广泛的角度范围内能够精确捕获目标信号。此外,在复杂的电磁环境中,天线的抗干扰能力显得尤为重要,尤其是要抑制旁瓣电平,以降低干扰和提高信号的接收质量。为了满足这些要求,天线的设计必须具有更高的灵活性和性能优化,尤其是在高频段应用中的表现。

微带阵列天线作为一种重要的天线结构,因其低成本、轻量化以及易于集成的特点,已广泛应用于雷达系统、通信系统等多个领域。然而,传统的微带天线设计通常面临着增益不足、旁瓣电平过高以及馈电网络复杂等问题。这些因素限制了天线在高频段和高性能雷达系统中的有效应用。因此,如何设计一种具有高增益、低旁瓣电平、且结构简单的微带阵列天线,成为了当前研究的热点之一。

本研究的目标是设计一种符合现代雷达系统要求的微带阵列天线,重点解决高增益和低旁瓣电平的设计难题。在本文中,我们采用了切比雪夫综合法来优化阵列的电流分布,以达到抑制旁瓣电平的效果,并通过合理的阵列结构和馈电网络设计,进一步提高天线的整体性能。通过这些创新的设计方法,本研究旨在为高频雷达系统提供一种可行的天线解决方案,同时为微带天线的进一步研究提供理论依据和

技术支持。

为了验证该设计的有效性,本文结合了详细的仿真分析和实验验证,评估了设计方案在 77 GHz 频段的实际应用效果。研究表明,通过切比雪夫方法对天线阵列的优化,不仅显著提高了增益,还有效降低了旁瓣电平,确保了系统的抗干扰能力和可靠性。最终,该设计为高频雷达系统提供了一种具有高增益、低旁瓣电平和简单馈电结构的高效天线解决方案。

## 1 相关工作

近年来,随着雷达技术的迅猛发展,微带阵列天线在雷达系统中的应用逐渐成为研究热点。许多学者对微带天线的设计进行了大量的研究,特别是在增益、波束宽度和旁瓣抑制方面。在早期的研究中,传统的微带天线设计通常面临增益不足以及旁瓣电平较高的问题,这些问题影响了雷达系统在复杂电磁环境下的性能。因此,如何优化微带天线的设计,尤其是提升其增益并有效抑制旁瓣,成为了亟待解决的关键课题。

许多研究采用了不同的阵列结构来提高微带天线的性能。例如,一些研究采用了更复杂的阵列设计,如使用了双层或多层阵列结构,以增加天线的增益,并通过设计优化阵列间距来控制旁瓣电平。此外,切比雪夫综合法作为一种有效的旁瓣抑制方法,在多个研究中得到广泛应用。许多学者

通过调节电流分布,成功地抑制了阵列天线的旁瓣,提升了系统的抗干扰能力和工作可靠性。

馈电网络的设计也是影响微带阵列天线性能的一个重要因素。在传统设计中,馈电网络常常较为复杂,需要较多的空间并且会导致较大的传输损耗。为了简化设计和降低损耗,一些研究提出了基于威尔金森功率分配器的馈电网络设计方案,这种设计不仅减小了馈电网络的复杂度,还提高了功率分配的效率。与此同时,考虑到高频应用的特殊需求,许多研究还对馈电网络中的阻抗匹配问题进行了深入探讨,以确保天线的最佳工作性能。

尽管这些研究为微带天线设计提供了许多宝贵的经验和方法,但在高频应用领域,尤其是在 77 GHz 频段的雷达系统中,仍面临着一些挑战。高频设计不仅要求天线具有更高的增益,还需在空间和功率分配上做出更多优化。为了满足这些高要求,本研究结合了现有的设计方法,提出了一种创新的微带阵列天线设计方案,旨在解决当前设计中面临的挑战,并进一步提升系统性能。通过这些研究,微带阵列天线的设计不断走向成熟,为未来雷达系统的性能提升提供了更可靠的技术支持。

## 2 天线设计

在雷达系统的目标探测中,天线的性能直接影响探测能力和信号的质量。高天线增益和宽波束宽度是实现精确目标探测的基本要求。增益较高的天线可以增强接收信号的强度,而宽波束宽度则确保雷达能够在更大的角度范围内有效探测目标。此外,在复杂的电磁环境下,雷达系统的抗干扰

能力是其性能的另一个关键指标。为了减少不必要的干扰并提高信号的质量,抑制天线阵列的旁瓣电平显得尤为重要。旁瓣电平过高容易导致雷达系统接收到来自其他方向的干扰信号,进而影响目标的准确检测。因此,如何通过天线设计来优化增益、波束宽度和旁瓣电平,成为现代雷达系统设计中必须考虑的核心问题。

为了满足这些需求,本文提出了一种微带阵列天线的设计方案。采用了切比雪夫综合法来优化天线阵列的电流分布,以有效抑制旁瓣电平,并在保证较高增益的同时降低干扰。切比雪夫法在天线阵列设计中已被广泛应用,其主要优点是通过调整阵列中各单元的激励电流幅度来优化天线性能,能够有效抑制旁瓣,同时保持主瓣的增益水平。因此,采用这一方法能够确保雷达系统在复杂环境下的高效稳定工作。

本研究所设计的微带阵列天线采用了  $4 \times 10$  平面阵列结构,进一步提高了天线的增益。为了实现所需的高增益,设计中采用了  $1 \times 10$  矩形微带贴片天线阵列。通过阵列理论计算得出,在增大天线阵列单元数目的同时,天线的增益也随之增大。单个贴片天线的增益大约为 6.5 dBi,然而在阵列设计中,通过将阵列单元数量翻倍,增益得到了显著提升,最终阵列的总增益可达到 12 dBi。为了使得该阵列能够满足高增益和低旁瓣的需求,本设计中采用了线性阵列结构,并精确计算了阵列单元之间的间距,  $1 \times 10$  线性阵列结构图如图 1 所示。

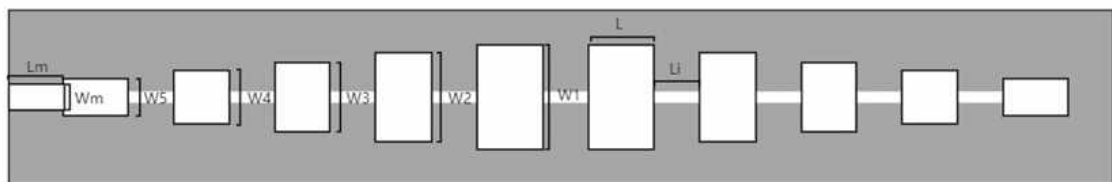


图 1  $1 \times 10$  线性阵列结构图

在微带阵列天线的设计过程中,最重要的技术难点之一是如何最大限度地减少地面杂波或其他方向的信号干扰,这要求对旁瓣电平进行严格控制。为了实现这一目标,本研究在阵列设计中选用了切比雪夫综合法,依据该方法调整阵列中每个天线单元的电流分布,从而控制电流幅度的分布以抑制旁瓣。由于制造公差的限制,馈线宽度的调整方法不适用于 77 GHz 的工作频率,因此我们采取了改变微带贴片宽度

的方法来调整电流的幅度分布,从而进一步优化天线性能。通过这些优化,阵列的旁瓣电平得到了有效抑制,系统的抗干扰能力得到了大幅提升。

为了确保天线阵列的高效运行,馈电网络的设计也起着至关重要的作用。在本设计中,我们采用了威尔金森功率分配器来实现多天线单元的馈电。威尔金森功率分配器具有结构简单、性能稳定的优点,能够高效地将功率分配到每个天

线单元。然而，在高频设计中，馈电网络常常面临着传输损耗和空间需求增加等问题，尤其是在阵列单元数量较多时。因此，本设计采用了一种非等功率分配器网络，具体采用 1:4 功率分配方案如图 2 所示。。这种设计不仅能够降低复杂性和空间需求，还能保持每个天线单元的高效功率分配。

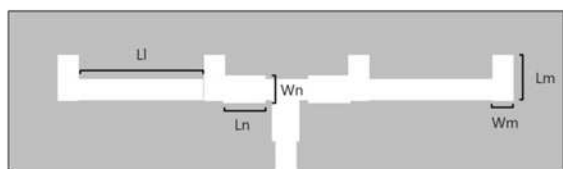


图 2 一分四的不等幅功分结构图

馈电网络中的阻抗匹配是实现高效功率分配和减少信号反射的关键因素。在本设计中，阵列的输入阻抗设置为  $50\Omega$ ，且设计中充分考虑了各级阻抗匹配。具体而言，馈电网络中的阻抗变换采用了  $25\Omega$  和  $35.35\Omega$  的中间结点以及四分之一波长阻抗变换级。通过这些优化的阻抗匹配设计，能够确保系统的功率有效传递，最大限度地减少反射损耗。

与传统的多路功率分配器相比，本设计的馈电网络更加简化，具有更低的传输损耗和更小的外形，有助于提高制造可行性，特别适用于 77 GHz 等高频频段的应用。通过合理的馈电网络设计，我们成功降低了整体系统的复杂性，并进一步提升了系统的可靠性和稳定性。最终，设计的微带阵列天线不仅在增益和旁瓣抑制方面取得了优异的性能，还为高频雷达系统提供了一个高效且可行的解决方案。

### 3 结论

本研究设计了一种高性能的微带阵列天线，满足了雷达系统在宽角度范围内目标探测所需的高增益和宽波束宽度的要求。通过采用切比雪夫综合法有效地抑制了旁瓣电平，并设计了一个具有高增益和低旁瓣的天线阵列。设计过程中，切比雪夫方法不仅优化了天线增益至 12 dBi，而且成功地将旁瓣电平降低到所要求的水平。这一设计显著提升了雷达系统的抗干扰能力，使其能够在复杂的电磁环境中更加稳定地工作。

为了进一步提高天线的性能，本研究对微带天线单元进行了详细的设计和参数分析。通过选择合适的阵列结构和馈电网络，我们确保了天线阵列的增益和方向性均能满足高频应用的需求。具体而言， $1 \times 10$  的线性阵列结构提供了足够的增益，而通过调整贴片宽度，成功控制了电流分布，从

而优化了阵列的整体性能。与传统的天线设计方法相比，采用串联馈电结构和不等幅功分网络的组合，使得馈电网络更加简单高效，减少了设计复杂性并提高了系统的可靠性。

在高频设计中，馈电网络的挑战尤为突出，尤其是对于 77 GHz 频段的微带阵列天线。为了应对这些挑战，本研究设计了采用 1:4 功率分配的非等功率分配器网络，并通过精确的阻抗匹配确保了最优的功率分配。这种设计不仅降低了空间需求，还减少了传输损耗，充分满足了高频天线设计的严苛要求。最终的设计结果证明，在高频应用中，采用简化馈电网络和合理的阻抗匹配方案可以有效提高系统的整体性能。

总之，本研究的微带阵列天线设计为高增益和低旁瓣电平的雷达系统提供了一种可靠的解决方案。通过创新的设计方法和优化策略，成功地提高了天线的性能，使其能够适应更加复杂的工作环境。这一研究不仅为未来高频微带天线的设计提供了理论依据和技术参考，也为相关领域的应用提供了可行的技术支持。

### 参考文献：

- [1] 王丽黎, 张诗雨, 李君君, 等. 应用于 24 GHz 车载雷达的阵列天线 [J]. 电波科学学报, 2025, 40(2): 331–337, 394.
- [2] 乔慧, 姚金杰, 周建会. 载体共形北斗微带天线设计 [J]. 舰船电子工程, 2024, 44(5): 67–66.
- [3] 史光华, 郭斌, 王真, 等. 铜基微同轴技术及其在毫米波太赫兹领域的应用 [J]. 空间电子技术, 2024, 21(5): 30–39.
- [4] 王令旭, 曾昭发, 鹿琪, 等. 探测地下目标的矩形波导天线的研究设计 [J]. 世界地质, 2025, 44(2): 285–298.
- [5] 梁梓宣, 贾丹, 刘亚昆. 基于特征模理论的共形阵列天线散射栅瓣缩减 [J]. 现代雷达.
- [6] 辛京钰, 谷继红, 杨婕, 等. 角反射器阵列排布设计及其散射特性研究 [J]. 电波科学学报, 2025.
- [7] 姚华飞, 邱琳琳, 王安康, 等. 高增益低旁瓣宽扇形波束脊形波导缝隙天线阵列设计 [J]. 电波科学学报, 2024, 39(3): 544–551.
- [8] 李杨, 周世钢, 李建瀛. Ka 波段宽角扫描圆极化相控阵天线研究 [J]. 电波科学学报, 2025.