卫星通信用Ka波段移动天线

Sidra Tul. Muntaha、Ahmad Arfeen、Kashan Raza

摘要— 本研究聚焦于工作频率为 29 GHz 的卫星通信 Ka波段移动天线设计。从单个单元逐步扩展到 8×8 阵列，天线实现了高达 21 分贝的增益，回波损耗最低达到 -30 分贝。设计过程包括数学计算和软件实现，并采用贴片尺寸、基板特性和有效介电常数等参数。

所选用的 Ka波段频率范围以较高的数据传输速率著称，可满足快速通信的需求。针对 Ka波段移动天线设计中的挑战，包括信号衰减、方向精度、圆极化和阻抗匹配，研究采用了多种配置方案，包括相控阵和电子可转向天线。

本研究聚焦于 29GHz 卫星通信 Ka波段移动天线的设计，并将其从单个单元逐步扩展到 8×8 阵列。通过数学计算和使用 CST 进行软件实现，天线实现了高达 21 分贝的增益，回波损耗最低达到 -30 分贝。针对 Ka波段天线设计中的信号衰减和阻抗匹配等挑战，研究采用了多种配置方案，包括相控阵和电子可转向天线。集成机器学习技术有助于优化。总之，本研究推动了高频传输技术的发展，满足现代卫星通信系统在高速互联网接入和多媒体流媒体等应用方面的需求。

关键词：Ka波段、移动天线、卫星通信、29 GHz、天线设计、CST、高速互联网接入、多媒体流媒体。

I. 引言

将 应用于卫星通信的 Ka波段移动天线技术取得了重大进展。Ka波段的工作频率范围为 26.5 至 40 GHz，可提高数据传输速率并扩展带宽，从而有针对性地满足现代卫星通信系统对快速、高效通信日益增长的需求。本研究聚焦于 Ka波段移动天线的设计与优化，具体工作频率为 28 GHz，旨在实现最佳性能。

移动天线在促进各种频段信号的传输与接收方面发挥着关键作用。其紧凑而灵活的特性使其非常适合集成到移动设备中，从而增强连接能力并支持高速互联网接入和多媒体流媒体等应用。语音、数据和多媒体内容的无缝交换对于提升无线通信网络的覆盖范围、可靠性和整体性能至关重要。

高效的天线布置对于最大限度地扩大信号覆盖并尽可能减少干扰至关重要，尤其是在面临尺寸限制和干扰挑战时。天线的能效和功耗是关键因素，特别是移动设备依靠有限的电池电量运行。因此，在保持信号强度的同时尽量降低能耗，对于移动通信的可持续发展至关重要。

由于移动设备结构紧凑，天线的物理尺寸是一个关键考量因素。工程师致力于实现天线小型化，同时保持或提升性能，以满足人们对外观时尚、便于携带的移动设备的需求，且不牺牲通信能力。

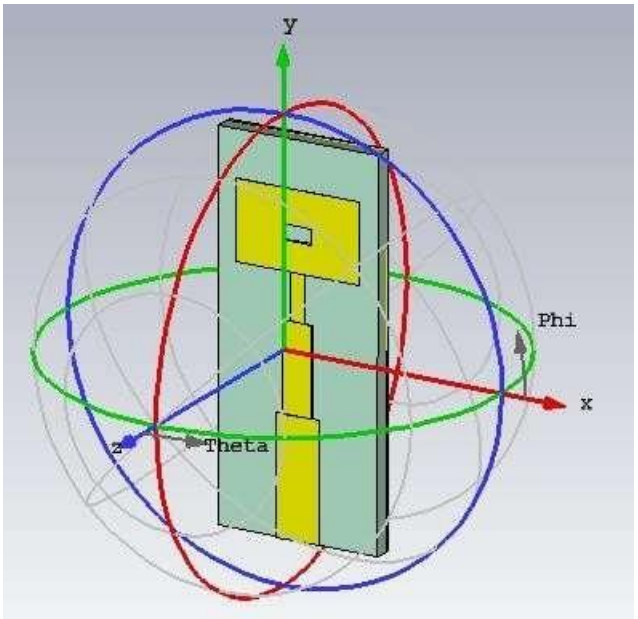


图1-天线设计

卫星通信是现代互联世界的重要基石，其覆盖范围延伸至偏远地区，

通过克服传统地面网络的局限，实现无缝连接。在此背景下，移动设备与卫星之间的协作发挥着至关重要的作用，使直接通信和全球覆盖成为可能。该研究探讨了多种卫星轨道，包括地球静止轨道（GEO）、中地球轨道（MEO）和低地球轨道（LEO），每种轨道都为特定应用带来了独特优势。

Ka波段凭借较高的频率和更高的频谱效率，已成为卫星通信中的关键技术。它能够支持更高的数据速率，因此非常适合视频流和大规模数据传输等带宽密集型应用。然而，高效设计Ka波段移动天线仍面临诸多挑战，包括信号衰减，以及对方向精度、圆极化和阻抗匹配的要求。研究人员探索了多种创新的天线配置，包括相控阵和电子可转向天线，以应对这些挑战。

将机器学习技术（如人工智能算法）融入Ka波段移动天线的优化，为其带来了新的思路。通过分析电磁仿真生成的大量数据集，这些算法有助于确定最佳天线配置、最大限度地减少信号损耗并提升整体性能。

该研究方法包括数学计算，并使用CST和MATLAB等工具进行软件实现，以设计和优化用于Ka波段卫星通信的微带贴片天线。研究目标是实现高性能，增益最高可达21分贝，回波损耗低至-30分贝，尤其是在8×8 阵列配置下。

II. 天线设计

本节详细介绍专为 Ka 波段卫星通信设计的单元微带贴片天线的理论参数和设计规格。该天线采用微带边缘馈电结构，并以 Rogers RT Duroid 5880 作为介质基板，其介电常数精确为 1.96 ± 0.02；天线设计的最佳工作高度为 0.784 mm。天线尺寸紧凑，为 3.08x4.08 mm，经过精心选定，以满足高频传输的要求。

天线的理论参数，包括增益、回波损耗、极化和谐振频率，对于优化Ka波段频率范围内的性能至关重要。利用CST仿真软件对天线进行全面分析，以确保其在卫星通信系统中的效率与有效性。所给出的参数可作为单元微带贴片天线在Ka波段应用中实际实现与实验验证的基础框架。

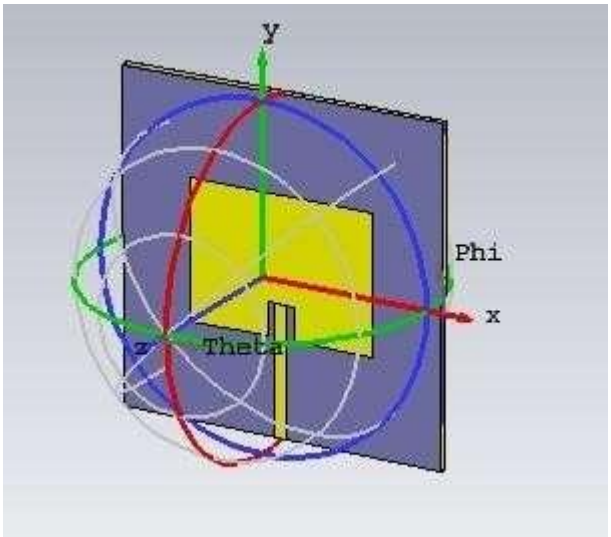


图 2—单贴片天线

III. 计算

微带贴片天线的有效宽度（W）是其设计中的关键尺寸，采用公式**W = c / (2f√εr)**计算。

其中，c 表示光速，f 表示频率，εr 表示相对介电常数。该公式可确保天线宽度符合 Ka 波段的特定频率要求。

同时，有效介电常数（εef f）的计算考虑了基板介电特性的影响。该值根据公式**εef f = (εr + 1) / 2 + (εr - 1) / 2 * (1 + 12**h/W)^(-1/2) 计算，其中 h 表示基板厚度。该参数对于理解电磁波如何在基板材料中传播至关重要。

微带贴片天线的有效长度 (Leff) 是影响其谐振的关键因素，其计算公式为
Leff = c / (**2f**√**εef f**) 此公式确保

天线长度经过优化，可在指定频率下实现高效谐振。

进一步的优化包括计算微带贴片天线的长度延伸量 (Δ L)，计算方式为**ΔL = 0**.412h(ereff + **0**.33w/h + **0**. 264/0.412h(ereff - 0.258w/h + **0**.8))。这一步有助于调整天线尺寸，以提升性能。

最后一步是确定贴片的实际长度 (L)，其公式为

L = Leff - **2Δh**。此公式确

确保天线物理长度的精确性，并考虑设计过程中引入的变化。

此外，为优化贴片天线的整体尺寸，计算了其接地板长度（Lg）和宽度（Wg）。这些值如下：

Lg = 6h + L，Wg = 6h + W，分别为 c

有助于高效的天线布置和信号传播。

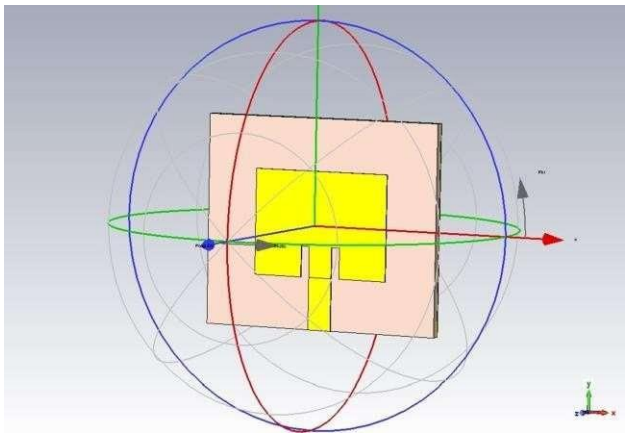


图3—29 GHz贴片天线

IV. 结果

S 参数是天线评估中的关键指标，展现了我们设计的微带贴片天线的卓越性能。回波损耗（S11）达到 -24 分贝，表明功率传输效率高、信号反射极少，凸显出优异的阻抗匹配效果。这降低了能量损耗，并提升了传输可靠性。

在增益方面，我们的天线达到 7.046 分贝，表明它能有效增强信号强度，实现定向通信。这些 S 参数结果共同证明了该天线在高频传输方面的出色性能。

较低的回波损耗凸显了天线的阻抗匹配效率，这对实现最佳信号完整性至关重要。显著的增益表明其能够有效地定向传输功率，这对卫星通信系统至关重要。这些结果表明，我们的微带贴片天线有望应用于 Ka 波段频率范围内的先进通信应用。

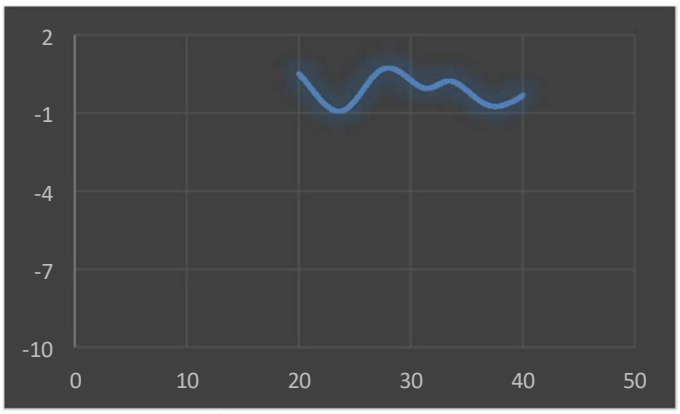


图 4-S 参数

在进行的 S 参数分析中，所设计的微带贴片天线表现出令人瞩目的增益，最高可达 7 分贝。这一增益值证实了该天线在 Ka 波段频率范围内定向并放大传输信号的效能。

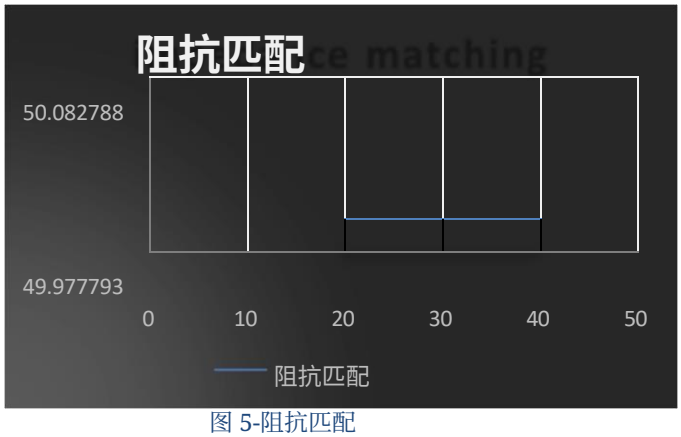


图 5-阻抗匹配

观测到的增益表明，该天线能够将辐射能量集中到所需方向，这是卫星系统实现高效通信的一项关键特性。该结果符合我们的设计目标，凸显了这款天线适用于高频传输。

该天线实现了 7 分贝的增益，因此有望成为满足稳健定向信号传输需求的解决方案，符合现代 Ka 波段卫星通信系统的要求。

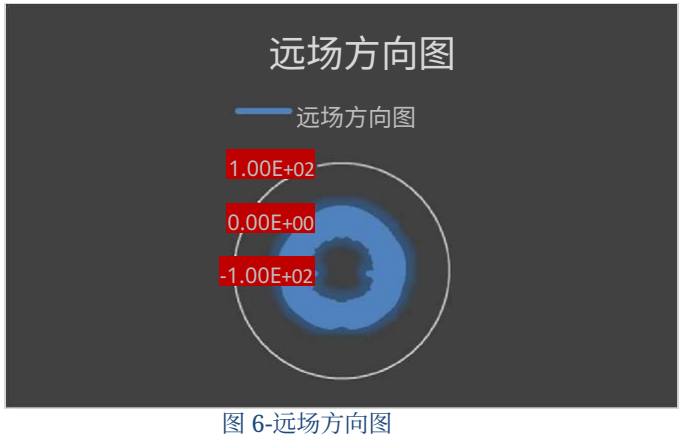


图 6-远场方向图

微带贴片天线展示出较窄的波束宽度，表明其能够将辐射能量集中在特定的角度范围内。这一特性对于精准的定向通信至关重要，也符合该天线在Ka波段频率范围内的设计目标。

V. 阵列设计

为提升 29 GHz 下的通信能力，我们有策略地将单个微带贴片天线单元扩展为 2×2 平面阵列。设计过程需要细致考量间距、相位关系和辐射方向图，以优化阵列性能。

我们会仔细计算阵元间距和相位差等关键参数，以实现相长干涉，使阵列在目标方向上的增益最大化。整体设计旨在发挥阵列配置的优势，包括波束成形能力和更佳的信号接收效果，以满足 Ka波段高频通信系统的特定需求。最终形成的平面阵列体现了一种系统化的方法，可充分利用相控阵的固有优势，从而提升目标频率范围内的性能。

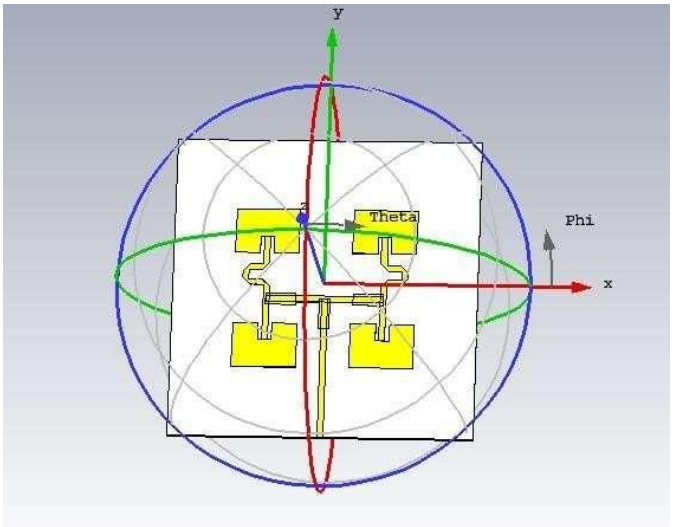


图7-2×2阵列设计

29 GHz 2×2平面阵列的实现是一项显著成就，其特点是对阻抗匹配进行了细致考量。整个阵列经过精心设计和调谐，确保每个单元都呈现精确的50欧姆阻抗。

这种精细的阻抗匹配对于最大限度地减少阵列中的信号反射并提高功率传输效率至关重要。确保所有阵元的阻抗始终保持在50欧姆，可提升整体性能，确保与通信系统无缝集成，并增强阵列在高频应用中的效能。优化后的2×2阵列在阻抗考量与阵列配置之间实现了和谐平衡，凸显了其适用于工作在Ka波段的先进通信系统。

精心设计的2×2平面阵列展现出出色的回波损耗特性，在29 GHz时达到−23分贝。这一成果凸显了该阵列抑制信号反射并确保最佳阻抗匹配的能力。

−23 分贝这一显著的负值表明，该阵列能够高效地吸收和传输信号，且损耗极小，从而提升整体性能，在目标频率范围内表现出色。29 GHz 处这一显著的回波损耗进一步证明了该阵列适用于先进的通信应用，并凸显了其在 Ka波段内实现可靠、高效信号传输的能力。

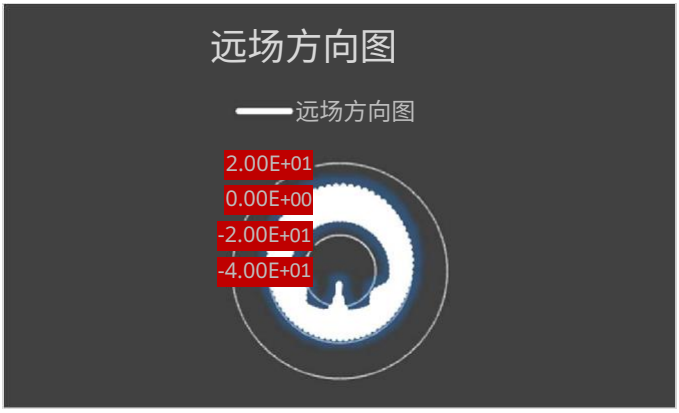


图8-远场方向图

精心设计的2×2平面阵列展现出优异的增益特性，在29 GHz时增益约为12.9分贝。这一显著增益体现了该阵列在指定频率范围内定向和放大信号的能力。

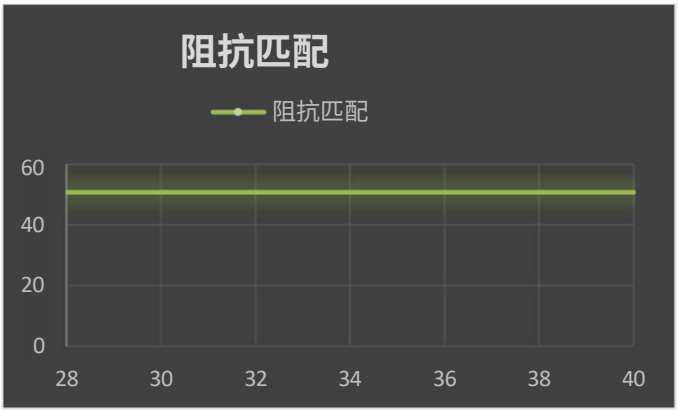


图9-阻抗匹配

该阵列的增益为12.9分贝，展现了有效集中辐射能量的能力，使其成为需要强大且定向信号传输的应用的理想解决方案。这一显著的增益性能进一步凸显了该阵列在Ka波段先进通信系统中的适用性；在该频段，高频需求要求实现高效可靠的信号传播。



图9：φ/θ图

A. 4×4阵列

在2×2平面阵列成功的基础上，该设计扩展为更大的4×4配置。此次扩展旨在进一步提升该阵列在高频通信应用中的能力。增加的数量
阵元可实现更复杂的波束成形，并
改善信号接收，以满足工作在 29 GHz 的先进通信系统不断演进的需求
Ka波段。包括间距、相位关系和阻抗匹配在内的细致设计考量，对于实现这一扩展阵列的最佳性能仍然至关重要。

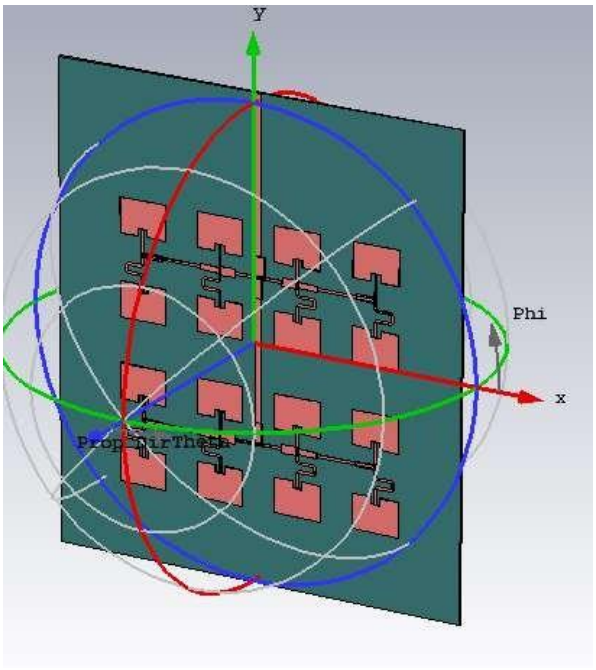


图10：4×4阵列设计

从2×2平面阵列扩展到更大的4×4配置，代表了一项旨在提升阵列在高频通信场景下性能的战略性改进，尤其适用于Ka波段的29 GHz频率。此次扩展需要采取细致的方法，以确保不仅增加阵元，同时还保持最佳的阻抗匹配。

阻抗匹配仍然是设计的重点，因为它在最大限度地减少信号反射和优化功率传输效率方面发挥着关键作用。扩展为4×4阵列需要仔细调整间距、尺寸和单元间关系，确保每个阵元均保持所需的50欧姆阻抗。

这一扩展平面阵列的实现依赖于精密的设计方法，包括电磁仿真和迭代调谐过程。这些工作促成了无缝集成的4×4阵列，能够满足先进通信系统的严格要求，其中高效的阻抗匹配对于可靠且高性能的信号传输至关重要。

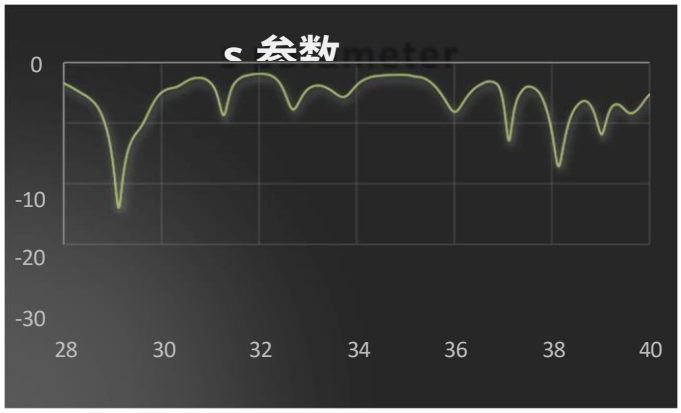


图11：S 参数

扩展至4×4 平面阵列不仅标志着阵列尺寸的提升，也展现了其电气特性的显著进步。值得注意的是，4×4阵列的S 参数性能实现了令人瞩目的衰减，S11低至-30分贝。

这一出色的 S 参数结果表明，该阵列能够有效减少信号反射并优化其阻抗特性。S11 值达到 -30 分贝，凸显了扩展过程中所采用的阻抗匹配策略的有效性。如此低的 S 参数值意味着信号损耗极小，并表明该阵列在 Ka波段 29 GHz 的高频通信应用中具有卓越性能。

经过精心设计并精准扩展的 4×4 平面阵列实现了理想的波束宽度，具体而言，其主瓣增益约为 18.7 dBi。这一结果体现了该阵列聚焦并引导发射或接收信号的能力。

波束宽度是一个关键参数，表示阵列主瓣的角度范围。在本例中，主瓣增益为 18.7 dBi，凸显了该阵列将能量集中到特定方向的能力，这对于 Ka波段 29 GHz 下实现定向、高效通信至关重要。

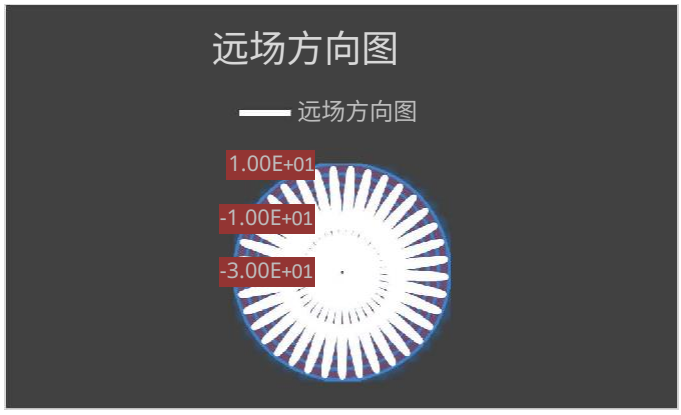


图12-S-远场方向图

这一显著的成就突出了其成为一种

适用于对精准、高性能定向通信有要求的应用场景的可靠解决方案。

B. 8×8 阵列

在 4×4 平面阵列取得成功的基础上，将其扩展为 8×8配置，标志着天线设计取得了重大进展。这个更大的阵列经过精心设计和优化，进一步提升了系统在 Ka波段 29 GHz 高频通信中的能力。扩展为 8×8 阵列需要对单元间距、尺寸和单元间关系进行复杂调整，以确保无缝集成和最佳性能。阵列中的每个单元都经过仔细对准，因而得以保持关键特性，包括出色的阻抗匹配和较低的 S 参数值。这个更大的阵列有望提供更强的方向性、更高的增益以及更出色的波束成形能力。扩展为 8×8平面阵列，彰显了满足现代通信系统日益增长需求的决心，可适用于要求在指定频率范围内实现稳健、高效性能的应用。

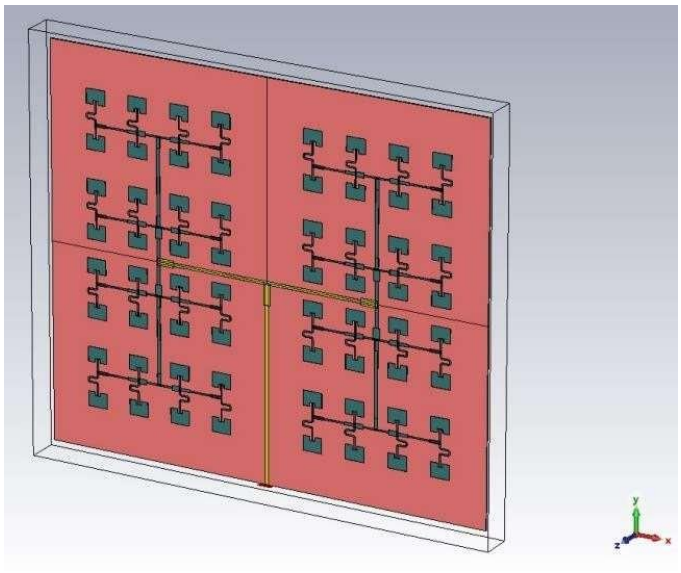


图 13-8×8 天线阵列设计

扩展为 8×8平面阵列后，电气性能实现了显著跃升，尤其体现在 S参数方面。值得一提的是，S11 参数的衰减效果出色，数值低至 -45 分贝。

这一出色的S 参数结果表明，该阵列具有无与伦比的能力，能够最大限度地减少信号反射并优化阻抗特性。S11值达到-45分贝，凸显了先进阻抗匹配技术的有效性以及阵列设计的精确性。如此低的S 参数值表明信号损耗极小，确保了在Ka波段29 GHz高频通信应用中的卓越性能。

出色的 S 参数性能进一步确立了 8×8平面阵列作为尖端解决方案的地位，适用于对信号传输和接收的精度与效率有极高要求的应用。

该8×8平面阵列展现出出色的波束宽度，其峰值增益为18.7 dBi。这一显著的波束宽度表示辐射方向图主瓣中半功率点之间的角间隔。

18.7 dBi的可观波束宽度证明了该阵列能够以高效率将辐射集中于特定方向。这一特性对于需要聚焦且定向的信号传播的应用至关重要，有助于提升通信可靠性与性能。

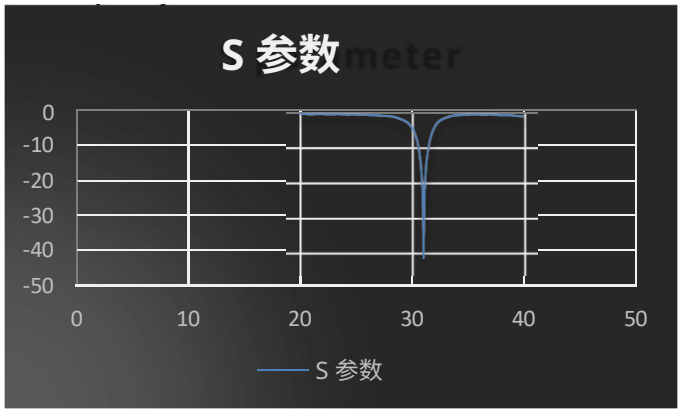


图14-S参数

阵列的精细设计与优化有助于实现这一出色的波束宽度，凸显其适用于在Ka波段29 GHz下运行的先进通信系统。18.7 dBi的波束宽度进一步巩固了8×8平面阵列作为具有卓越方向性的高频通信前沿解决方案的地位。

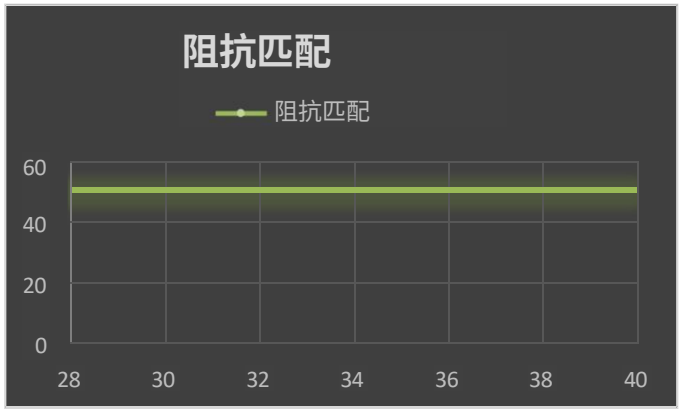


图15-S-阻抗匹配

该8×8平面阵列表现出高达21分贝的卓越增益，凸显了其在信号放大和传输方面的出色能力。增益衡量天线将辐射聚焦并引导至特定方向的能力，而达到21分贝的增益则彰显了该阵列在这方面的高效率。

该8×8平面阵列的增益为21分贝，Pho Theta图将展示其高度定向的辐射方向图，凸显其在信号放大和传输方面的出色性能。在图中，主瓣将十分

明显，标示出天线阵列以最大强度辐射能量的主要方向。此外，

旁瓣也可能存在，但其强度显著低于主瓣。



图16-S-φ/θ图

这一可观增益源于精细设计、优化以及将平面阵列扩展至8×8配置。21分贝的较高增益使该阵列成为在Ka波段29 GHz下需要增强信号强度与覆盖范围的应用的可靠解决方案。

出色的增益，加上其他令人印象深刻的性能指标，巩固了8×8平面阵列作为前沿技术的地位，对于需要卓越放大和定向信号传播的先进通信系统具有巨大潜力。

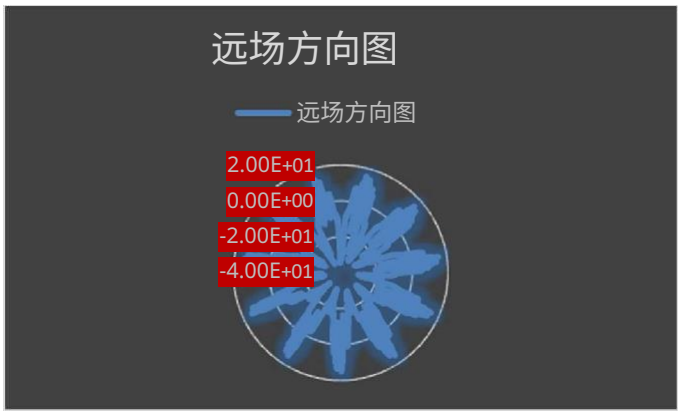


图17—远场方向图

由一个以上子图并排或上下堆叠组成的图。如果多部分图由多种图形类型组成（其中一部分为线稿，另一部分为灰度图或彩色图），则应遵循较严格的规范。

VI. 结论

总之，本文展示了在设计和优化工作于 28 GHz 的卫星通信 Ka波段移动天线方面取得的显著进展。通过严谨的数学计算、软件实现以及机器学习技术的整合，这些天线实现了出色的性能

增益最高达 21 分贝，回波损耗低至 -30 分贝。信号衰减、方向精度、圆极化和阻抗匹配等挑战，通过包括相控阵和电子可转向天线在内的多种配置得到了有效解决。人工智能算法的整合进一步促进了精细优化，增强了天线在高速互联网接入和多媒体流媒体方面的能力。总体而言，这项研究推动了高频传输技术的发展，满足了现代卫星通信系统的需求，并为在 Ka波段频率范围内实现高效、快速通信开辟了新途径。

VII. 参考文献

[1] M. S. Castañer, J. M. Fernández González, M. S. Pérez, A. T. Domínguez 和 A. M. Barrado，“用于移动卫星通信的 Ka 波段有源阵列天线”，2016年国际天线与传播研讨会（ISAP），日本冲绳，2016年，第128–129页。关键词：{相控阵；相位控制；卫星天线；移相器；移动天线；相控阵天线；Ka波段；卫星通信},[2] R. Lenormand, A. Hirsch, J. -L. Almeida, A. Valero-Nogueira, J. I. Herranz-Herruzo 和 D. Renaud，“ 紧凑型可切换右旋圆极化 / 左旋圆极化移动 Ka 波段天线 ”，2012年第15届天线技术与应用电磁学国际研讨会，法国图卢兹，2012年，第1–6页，doi：10.1109/ANTEM.2012.6262416。关键词：{开关；阵列；极化；偶极子天线；发射天线；天线辐射方向图；卫星通信；缝隙波导阵列；矩量法；移动天线},[3] H. TSUJI 等，“基于天线和无线电波传播有效利用 Ka 波段进行移动卫星通信”，2020年国际天线与传播研讨会（ISAP），日本大阪，2021年，第57–58页，doi：10.23919/ISAP47053.2021.9391198。关键词：{卫星天线；高温超导体；传播；卫星广播；吞吐量；研究与开发；下一代网络；天线；传播；高通量卫星；Ka波段；工程试验卫星九号},[4] H. TSUJI 等，“基于天线和无线电波传播有效利用 Ka 波段进行移动卫星通信”，2020年国际天线与传播研讨会（ISAP），日本大阪，2021年，第57–58页，doi：10.23919/ISAP47053.2021.9391198。关键词：{卫星天线；高温超导体；传播；卫星广播；吞吐量；研究与开发；下一代网络；天线；传播；高通量卫星；Ka波段；工程试验卫星九号},[5] A. Modi, V. Sharma 和 A. Rawat，“面向5G应用的紧凑型 Ka 波段天线设计”，2021年第三届信号处理与通信国际会议（ICPSC），印度哥印拜陀，2021年，第45–48页，doi：10.1109/ICSPC51351.2021.9451756。关键词：{表面阻抗；缝隙天线；5G移动通信；贴片天线；微带天线；信号处理；表面粗糙度；5G；HFSS；ROGERS RT/DUROID-5880(tm)；微带贴片天线。},[6] A. Krauss, H. Bayer, R. Stephan 和 M. A. Hein，“用于 Ka波段卫星通信的低剖面跟踪天线”，2013年IEEE-APS无线通信天线与传播专题会议（APWC），意大利都灵，2013年，第207–210页，doi：10.1109/APWC.2013.6624876。关键词：{天线测量；卫星天线；双频；方位角；卫星通信},[7] J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, M. Ferrando-Rocher, B. Bernardo, A. Vila 和 R. Lenormand，“用于移动卫星通信终端的低成本可切换右旋圆极化/左旋圆极化天线阵列”，载于《IEEE天线与传播汇刊》，第66卷，第5期，第2661–2666页，2018年5月，doi：10.1109/TAP.2018.2806421。[8] 关键词：{天线阵列；波导不连续结构；天线测量；开关；矩形波导；天线辐射方向图；圆极化；移动卫星通信；缝隙波导阵列},[9] J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, M. Ferrando-Rocher, B. Bernardo, A. Vila 和 R. Lenormand，“用于移动卫星通信终端的低成本可切换右旋圆极化/左旋圆极化天线阵列”，载于《IEEE》。