

# 一种支持广域覆盖的5G机载相控阵高增益天线设计

陈天夫\*, 杨春艳, 王梓涵, 刘亚召, 侯甲, 陈璐, 王兆轩, 王必成

西安航天天绘数据技术有限公司天线产品室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年5月12日; 录用日期: 2025年6月5日; 发布日期: 2025年6月11日

## 摘要

机载5G ATG (Air-to-Ground)通信系统作为实现地空高速连接的关键技术, 其核心部件——相控阵天线的性能直接影响着整个系统的通信质量和容量。本文针对机载5G ATG系统的特殊需求, 设计并实现了一种高增益、大角度覆盖的相控阵天线方案。首先分析了机载5G ATG系统对天线的性能需求, 并针对平台限制、复杂空域环境特性等挑战, 提出了相应的解决方案。在天线设计方面, 采用新型天线结构, 实现了低剖面和高增益的特性; 在波束赋形方面, 提出了一种基于改进粒子群算法的波束赋形方法, 有效提高了天线抗干扰能力和波束指向精度; 在射频组件设计方面, 采用高集成度、低功耗的芯片方案, 满足了机载平台对尺寸和功耗的严格要求。最后, 搭建了测试平台, 对天线的性能进行了测试验证。结果表明, 该天线方案具有良好的辐射特性、波束覆盖能力, 能够满足机载5G ATG系统的应用需求。

## 关键词

机载5G, ATG, 相控阵天线, 广域覆盖, 波束赋形

## Design of a High-Gain Phased Array Antenna with Wide-Area Coverage for 5G Airborne Applications

Tianfu Chen\*, Chunyan Yang, Zihan Wang, Yazhao Liu, Jia Hou, Lu Chen, Zhaoxuan Wang, Bicheng Wang

Antenna Products Department, Xi'an Aerospace Tianhui Data Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: May 12<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 5<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 11<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 陈天夫, 杨春艳, 王梓涵, 刘亚召, 侯甲, 陈璐, 王兆轩, 王必成. 一种支持广域覆盖的 5G 机载相控阵高增益天线设计[J]. 天线学报, 2025, 14(2): 15-25. DOI: 10.12677/ja.2025.142002

## Abstract

The 5G ATG (Air-to-Ground) communication system serves as a pivotal technology for establishing high-speed air-ground connectivity, where the performance of its core component—the phased array antenna—directly impacts the overall communication quality and system capacity. To address the unique requirements of airborne 5G ATG systems, this study designs and implements a high-gain, wide-angle coverage phased array antenna solution. First, the performance demands of antennas for airborne 5G ATG systems are analyzed and targeted solutions are proposed to overcome challenges such as platform constraints and complex airspace environmental conditions. In terms of antenna design, a novel antenna structure is adopted to achieve both low-profile characteristics and high gain. In terms of beamforming, an improved Particle Swarm Optimization (PSO)-based beamforming method is proposed to significantly enhance anti-interference capability and beam-pointing accuracy. In terms of RF component design, a highly integrated, low-power chipset solution is adopted to meet stringent size and power consumption requirements for airborne platforms. Finally, a test platform is established to validate the antenna's performance. Experimental results demonstrate that the proposed solution exhibits excellent radiation characteristics and beam coverage, fully satisfying the application requirements of airborne 5G ATG systems.

## Keywords

Airborne 5G, ATG, Phased Array Antenna, Wide-Area Coverage, Beamforming

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在 5G 赋能智慧航空建设的关键时期，航空互联网正迎来前所未有的机遇。作为连接飞机与地面网络的关键技术，机载 5G ATG (Air-to-Ground) 通信系统备受关注。其中，相控阵天线凭借其波束赋形、快速扫描和高增益、低剖面等优势，成为机载 5G ATG 系统的核心部件，对提升通信质量、扩大覆盖范围和增强系统容量具有重要意义[1]。

传统机械扫描天线体积庞大、重量高、扫描速度慢，难以满足现代航空互联网对高速率、低时延和高可靠性的要求。相控阵天线通过电子方式控制波束指向，具有灵活、快速、可靠等优点，能够有效克服机械扫描天线的局限性。然而，将相控阵天线应用于机载 5G ATG 系统仍面临诸多挑战：复杂空域环境：飞机在高空飞行时，面临着复杂的空域环境，包括多普勒频移和干扰等，这对天线的抗干扰能力和波束稳定性提出了更高要求；平台限制：飞机平台空间有限，对天线的尺寸、重量和功耗都有严格限制，需要在天线性能和平台适应性之间进行权衡[2]。

针对上述挑战，近年来国内外学者开展了大量研究工作，主要集中在以下几个方面：新型天线设计：研究低剖面、宽频带、高增益的天线架构，以满足机载平台对天线尺寸和性能的要求；波束赋形算法优化：研究适用于机载环境的波束赋形算法，提高天线抗干扰能力和波束指向精度[3]-[6]。

本文旨在针对机载 5G ATG 系统的特殊需求，设计一种高性能、低剖面的相控阵天线方案。该方案将结合新型天线架构、高效波束赋形算法和高集成射频技术，有效提升机载 5G ATG 系统的通信性能，希望能为航空互联网的发展提供一点技术支撑。

## 2. 天线组成及工作流程

### 2.1. 天线组成

ATG 通信天线主要由天线罩、L 频段通信天线、C 频段相控阵天线、波控模块、电源模块、雷电抑制器和整机结构等组成，天线的组成图如图 1 所示。其中，L 频段天线为无源天线，由一个垂直极化和水平极化天线组成；C 频段天线由多组相控阵天线组成。C 频段相控阵天线为单收天线(频率覆盖 3400 MHz~3600 MHz，中国电信的 5G 频段)，L 频段通信天线为收发天线(接收频率：1038 MHz  $\pm$  2.5 MHz；发射频率范围 973 MHz  $\pm$  2.5 MHz)，两波段天线均支持水平和垂直极化。L 波段天线负责与地面基站建立双向通信链路，负责跨基站切换时相邻基站信号扫描、选择与接入，天线采用全向天线形式。C 波段天线用于接收地面基站的业务信号，保持电子波束始终指向选定的地面基站，采用相控阵形式。对机上乘客来说，下载和浏览占用的流量和带宽较高，因此业务天线采用相控阵形式，波束指向性好、增益高的特点，正好符合该业务需求。

C 波段相控阵天线采用新型多面体三维阵列构型，由阵面 A、阵面 B 两组主天线阵面和阵面 C、阵面 D 两组补盲天线阵面构成。主阵面共有 32 个天线阵元组成，补盲阵面共有 16 个天线阵元组成，每个天线阵元具有垂直和水平两个输出接口。ATG 天线两种极化方式可同时工作，形成双波束，支持 MIMO 与极化合成，实现波束跨区域切换时业务无感。考虑到基站的分布在航线的两侧或前后，阵面 A 和阵面 B 不需要同时工作，阵面 C 和阵面 D 不需要同时工作，可降低系统功耗。射频单元主要由低噪放模块、多功能芯片和合成网络等部分组成，与天线单元垂直互联。主阵面射频模块，64 个通道对应 A、B 两组天线阵面共 32 个天线阵元(双极化)；补盲阵面射频模块，32 个通道对应 C、D 两组天线阵面共 16 个天线阵元。接收组件将四个阵面的信号经过开关选择后，送入多功能芯片完成信号的移相、衰减，最后通过合成网络合路后输出。

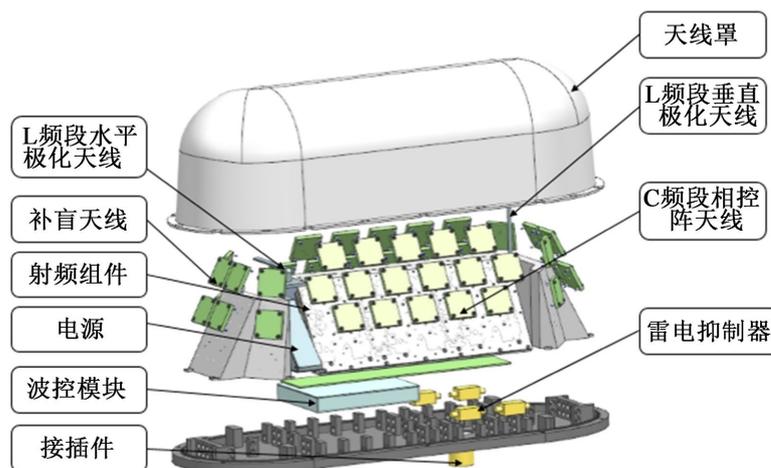


Figure 1. Component diagram of ATG communication antenna

图 1. ATG 通信天线组成图

### 2.2. 天线工作流程

ATG 天线通过对 L 频段信号的收发和 C 频段信号的接收，实现飞机和地面基站实时通讯。L 频段天线接收到基站的信号后反馈给基带，基带解算出最强信号的基站位置信息，转化为飞机坐标下的波束指向信息后回传给 ATG 天线。ATG 天线能响应来自基带处理单元的控制指令，包括波束指向角度、天线

状态、软件版本更新等。基带处理单元通过 ARINC429 总线连接飞机惯导组件和 GNSS 系统组件，获取飞机速度、经纬高和姿态等数据，结合要接入的地面基站位置信息计算出 ATG 天线应指向的角度，并将该角度数据发送给 ATG 天线执行；ATG 天线的波控模块根据接收到指向信息判断选择需要工作的天线阵面后，计算出对应阵元的配相信息，再发送给各个移相衰减通道，最终完成基站切换并保持指向最强信号的基站，实现数据传输的不中断。ATG 天线工作流程如下图 2 所示。

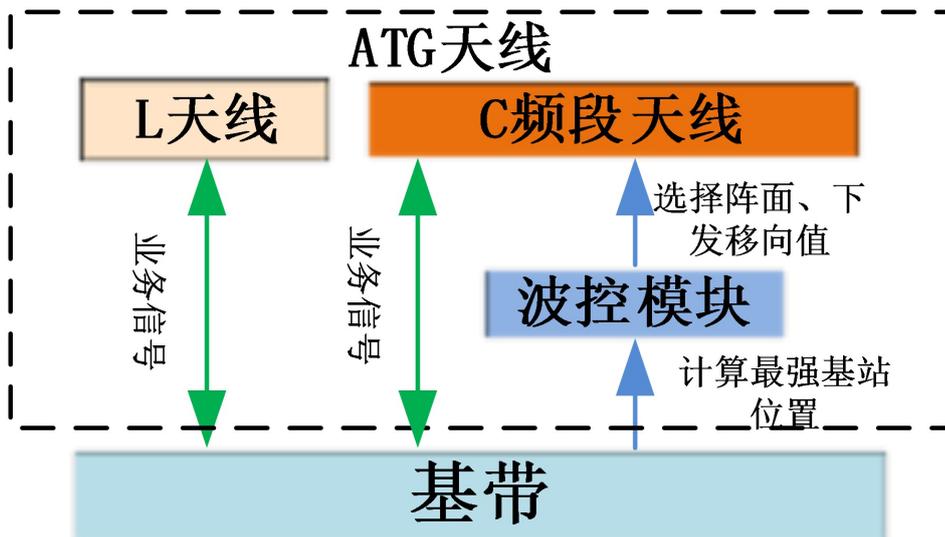


Figure 2. ATG antenna workflow diagram  
图 2. ATG 天线工作流程图

### 3. 天线设计与仿真

#### 3.1. 天线波束覆盖性分析

天线设计的原则是要求低剖面，适应机载安装，还要高增益波束覆盖广，减少地面基站的数量。因此，天线设计时要充分考虑这两个因素。天线安装在机腹下方，地面基站分布在飞机航线的两侧，与基站进行通信[7] [8]。通常民航飞机飞行高度约为 10 km，以北京 - 成都 - 昆明一期建设的试验基站为例，相邻的两个基站距离 150 km，因此飞机距离地面最远的基站距离为 75 km，此时基站与飞机的最大夹角为 82°，要求天线波束指向的最大俯仰角为 82°。天线波束覆盖与最远基站关系如图 3 所示。机载坐标系如下图 4 所示，其中  $\phi$  为飞机方位面， $\theta$  为飞机俯仰面。机头方向为方位 0°，机尾方向为方位 180°，飞机正下方为俯仰 0°，飞机正上方为俯仰 180°。

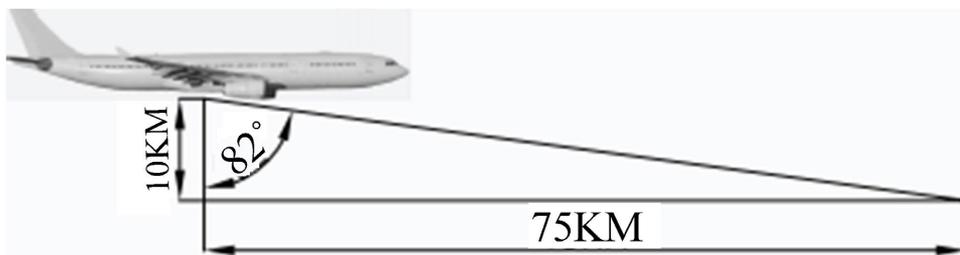


Figure 3. Relationship between antenna beam coverage and the farthest base station  
图 3. 天线波束覆盖与最远基站的关系

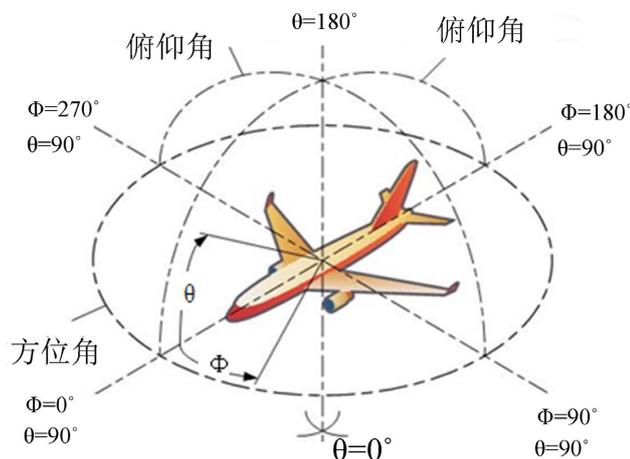


Figure 4. Aircraft coordinate system

图 4. 机载坐标系

理论上飞机正下方(俯仰  $0^\circ$  时)离地面基站最近, 空间损耗较小, 需要的天线增益低, 飞机前方(俯仰  $82^\circ$  时)离地面基站远, 空间损耗较大, 需要的天线增益高。传统的平板天线不能满足该需求, 本文采用新型多面体三维阵列构型相控阵天线设计, 让阵面 A、阵面 B 两个主天线与底板夹角呈  $45^\circ$ , 同时设计 2 组补盲阵面 C、阵面 D, 即可以保证波束扫描时兼顾远端增益。阵面 A 和阵面 B 工作时可以保证天线与两侧基站接入。相控阵天线阵面排布关系如下图 5 所示。

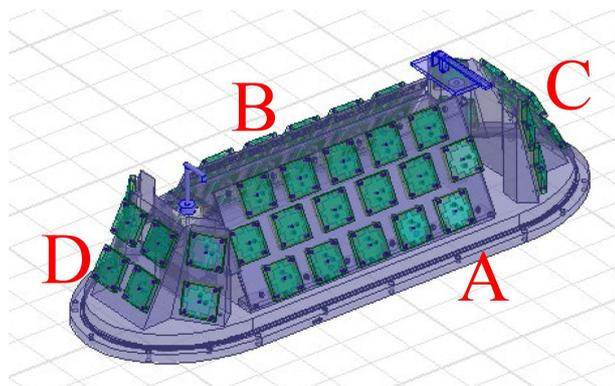


Figure 5. Array element configuration relationship of phased array antenna

图 5. 相控阵天线阵面排布关系

C 频段相控阵天线阵面 A、阵面 B、补盲阵面 C、补盲阵面 D 共同作用, 实现方位面  $360^\circ$ , 俯仰面  $0^\circ \sim 82^\circ$  广域覆盖。

### 3.2. 天线单元与阵列仿真

天线单元采用新型微带贴片天线形式, 是一种在介质基片上的一面敷以金属辐射贴片, 另一面敷以金属接地板构成的平面天线[9]。微带贴片天线特有的低剖面, 可以紧贴安装表面, 不影响载体的空气动力学性能, 适合飞机、导弹等高速飞行器, 重量轻、体积小适合用于空间受限的场合, 同时微带贴片天线材料成本低、制造工艺简单, 适合大规模生产, 降低天线成本。本文设计了一款规则多边形微带贴片天线, 优化了匹配介质, 降低了天线高度, 比传统阵子天线高度降低  $40\%$ , 仿真模型如图 6 所示。天线

通过两个探针与组件垂直互联，通过四角的螺钉孔与组件固定。天线的端口驻波特性如图 7 所示，天线的 3D 方向图及 2D 方向图如图 8、图 9 所示。

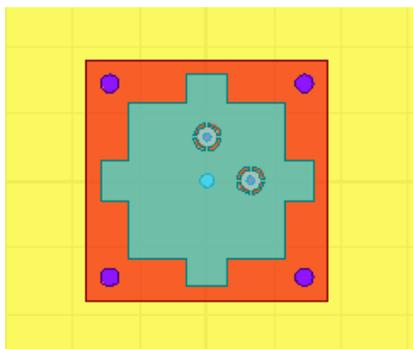


Figure 6. Antenna element model  
图 6. 天线单元模型

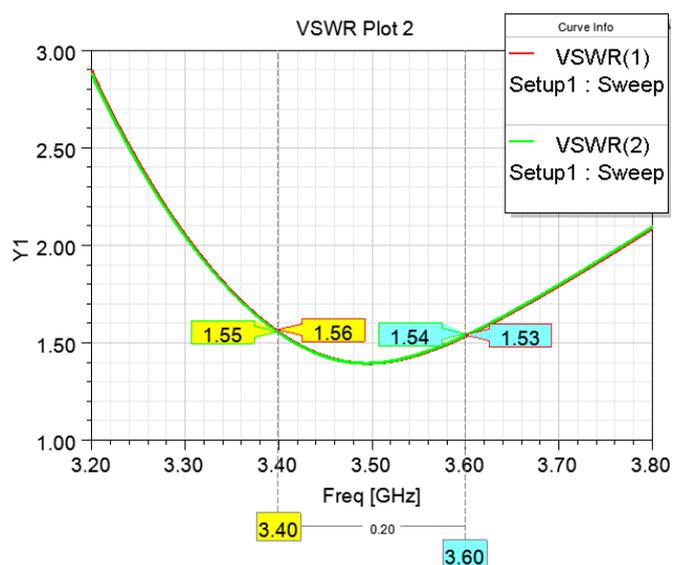


Figure 7. Antenna element port VSWR characteristics  
图 7. 天线单元端口驻波特性

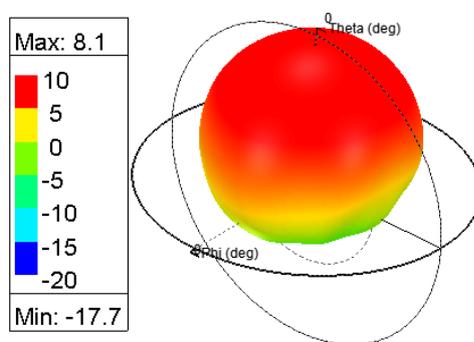


Figure 8. Antenna element 3D radiation pattern  
图 8. 天线单元 3D 方向图

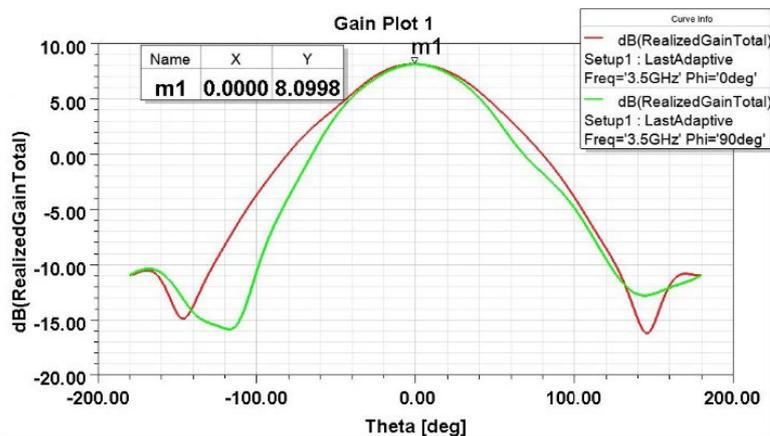


Figure 9. Antenna element 2D radiation pattern  
图 9. 天线单元 2D 方向图

从上图仿真结果可以看出，天线单元的电气性能良好，两个端口的一致性较好，驻波在频带内均小于 1.6，且单阵元增益值最高可达 8.0 dB，适合组阵。

组阵后的主阵面 A 和 B 均由三行天线组成，呈 565 的三角形栅格布局，如图 10 所示。补盲阵面 C 和 D 均由大补盲天线和小补盲天线组成，大补盲天线为  $2 \times 2$  阵列布局，小补盲天线为  $2 \times 1$  阵列布局，特殊的多面体三维阵列设计平衡了天线高度和增益要求。补盲阵面 D 天线排布如图 11 所示。主阵面 A 天线方位、俯仰面方向图如图 12、图 13 所示。

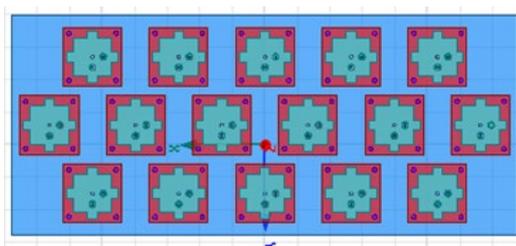


Figure 10. Antenna arrangement of main array A  
图 10. 主阵面 A 天线排布

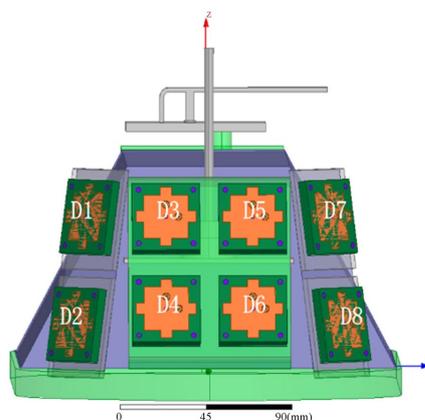


Figure 11. Blind-spot-filling array antenna model  
图 11. 补盲阵面天线模型

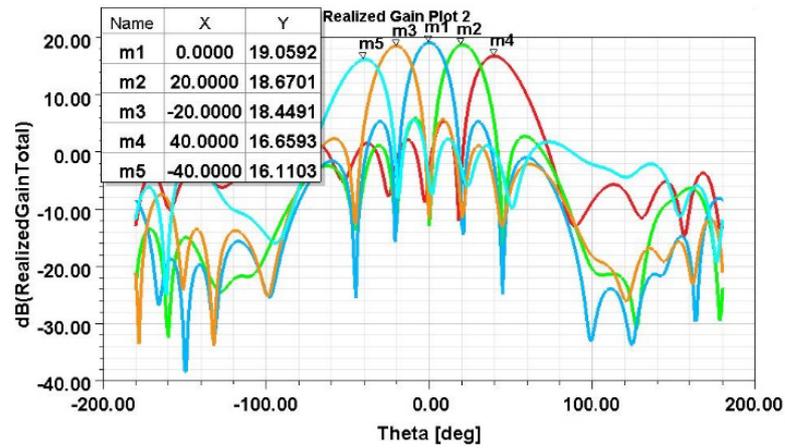


Figure 12. Main-array-A azimuthal plane radiation pattern  
图 12. 主阵面 A 天线方位面方向图

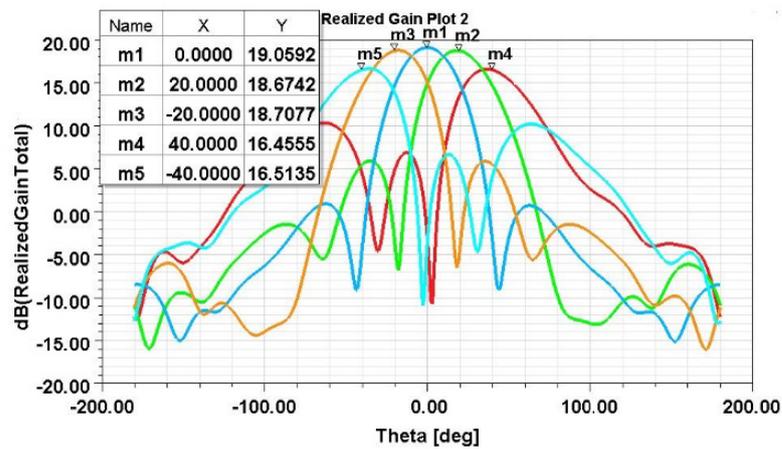


Figure 13. Main-array-A elevation plane radiation pattern  
图 13. 主阵面 A 天线俯仰面方向图

下表 1 为相控阵天线典型角度的增益统计表， $\phi$  为方位面， $\theta$  为俯仰面。由于天线阵面对称分布，仅需统计 1/4 空域即可。

Table 1. Statistical table of antenna gain at typical angles  
表 1. 天线典型角度增益统计表

角度	天线增益(dBi)					
	$\phi = 0$	$\phi = 20$	$\phi = 40$	$\phi = 60$	$\phi = 80$	$\phi = 90$
$\theta = 0$	15.5	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4
$\theta = 20$	14.6	15.0	15.2	15.6	15.5	15.6
$\theta = 40$	12.2	13.3	16.5	16.7	17.9	18.9
$\theta = 60$	13.9	12.2	14.4	15.1	16.4	16.8
$\theta = 80$	13.3	12.9	14.4	16.7	16.4	17.2
$\theta = 86$	13.3	12.2	13.3	14.5	16.5	16.7

考虑到载体的影响, 仿真时将飞机载体抽象为长 4 米、宽 2 米的金属板。由表 1 可知, 天线最大增益出现在飞机的俯仰角  $40^\circ$  附近, 最小增益在飞机的前上方附近。最小增益大于等于 12.2 dBi, 可保证设备入网通信最小增益 10 dBi 的要求。

### 3.3. 波束赋形与扫描精度设计

本文采用了一种基于改进粒子群算法的波束赋形方法, 有效提高了天线抗干扰能力和波束指向精度。粒子群算法是一种基于群体智能的优化算法, 具有收敛速度快、参数设置简单等优点, 被广泛应用于波束赋形领域[10] [11]。本文主要改进包括: 1) 增加了自适应惯性权重, 传统粒子群算法采用固定惯性权重, 难以平衡全局搜索和局部搜索能力。本文采用自适应惯性权重策略, 在迭代初期赋予较大的惯性权重以增强全局搜索能力, 在迭代后期赋予较小的惯性权重以提高局部搜索精度。2) 引入动态学习因子, 传统粒子群算法的学习因子为固定值, 容易导致算法陷入局部最优。本文采用动态学习因子策略, 根据粒子适应度值动态调整学习因子, 提高算法的全局搜索能力和收敛速度。图 14 为主阵面 A 16 个单元天线两种算法下的方向图对比结果。

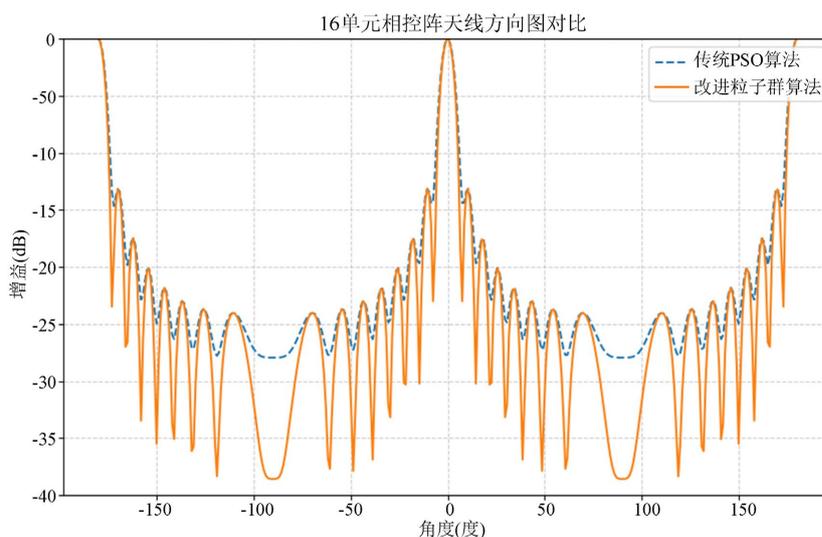


Figure 14. Main-array 16-element two-algorithm radiation pattern comparison

图 14. 主阵面 16 个单元两种算法方向图对比

结果表明, 与传统粒子群算法相比, 本文提出的改进算法能够有效提高波束赋形的精度和收敛速度, 在复杂干扰环境下仍能保持良好的波束指向性能。

### 3.4. 射频组件设计

在射频组件设计中, 采用高集成度、低功耗的多功能芯片方案。多功能芯片为双通道芯片, 集成了移相、衰减等功能, 它有着体积小、收发通道全集成、成本低等特点, 移相步进  $5.625^\circ$ , 衰减步进 0.5 dB, 接收双通道小信号工作时功耗仅为 5 V/65 mA。

射频组件设计时还要考虑对空间复杂电磁环境的抗干扰。通道最前端第一级滤波器主要用于滤除到达链路的干扰信号, 由于干扰信号频率均低于天线工作频率, 主要集中在 1 GHz 左右, 因此选用高通滤波器。为了保证链路的噪声系数, 并确保干扰信号大信号经过放大后不饱和, 第一级放大器需选用噪声系数小、线性度高的放大芯片。通道链路如图 15 所示。

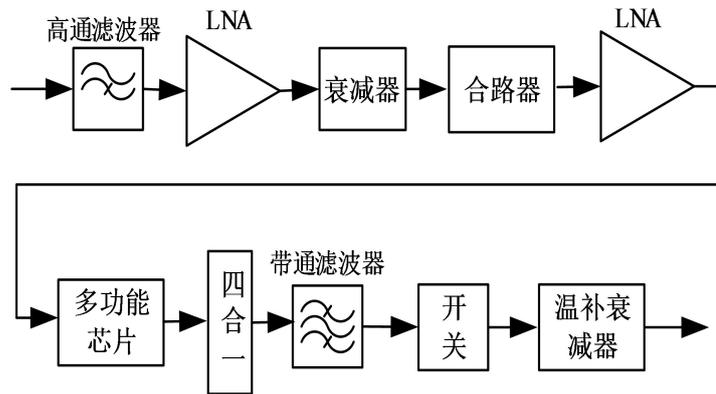


Figure 15. Channel link design  
图 15. 通道链路设计

#### 4. 天线测试与结果分析

为验证相控阵天线的性能，设计了原理样机，并在暗室进行了方向图、增益、指向精度等指标的测试工作。图 16 为天线在球面场进行测试的场景。表 2 为天线实测增益的统计结果。

试验结果表明，天线的较大增益出现在飞机的两侧俯仰角 40°附近，较小增益在飞机的左前方附近，与仿真相符。最小增益大于等于 11 dB<sub>i</sub>，满足 5G 机载通信的高速率、低延时的需求。

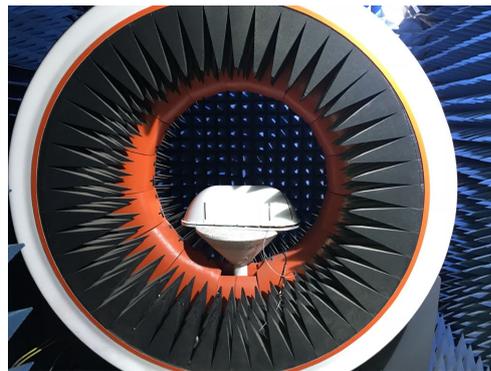


Figure 16. Antenna spherical field test installation scenario  
图 16. 天线在球面场测试安装场景

Table 2. Statistical table of measured antenna gain  
表 2. 天线实测增益统计表

角度	天线增益(dBi)					
	$\Phi = 0$	$\Phi = 20$	$\Phi = 40$	$\Phi = 60$	$\Phi = 80$	$\Phi = 90$
$\theta = 0$	15.1	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0
$\theta = 20$	14.1	14.6	14.6	15.1	15.0	15.0
$\theta = 40$	11.8	12.9	16.0	16.2	17.5	18.5
$\theta = 60$	13.4	11.8	14.0	14.6	15.9	16.3
$\theta = 80$	12.9	12.5	14.0	16.2	15.9	16.8
$\theta = 86$	13.9	11.8	12.9	14.0	16.1	16.2

## 5. 结语

本文设计并测试了一款用于 5G 的机载 ATG 通信相控阵天线, 通过暗室测试验证了其在方向图、增益、指向性等方面的性能。结果表明, 该天线具备最远 75 km、方位 360°、俯仰 82° 的广域覆盖, 且最小增益大于 11 dBi, 能够满足民航客机 5G 通信的需求, 相比传统的抛物面和平板天线降低了整体高度, 波束切换时间提高了一个量级。然而, 研究还存在一定的局限性, 首先测试环境与实际飞行环境存在差异, 未能完全模拟空域条件; 其次, 天线的宽频带特性和抗干扰特性还需要进一步优化。下一步研究将聚焦提升天线的环境适应性和多频段兼容性, 同时探索智能化的波束赋形算法, 以应对更复杂的通信场景。

## 参考文献

- [1] 肖君. 5G 技术在民用飞机设计运营领域的应用分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(4): 113-117.
- [2] 张明, 李华, 王强. 机载 5G 通信系统关键技术研究进展[J]. 通信学报, 2022, 43(10): 1-15.
- [3] Liu, Y., Wang, J., Zhang, Y., *et al.* (2021) A Survey on Air-to-Ground Communication Channel Modeling for 5G and beyond. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **23**, 2197-2226.
- [4] Li, X., Zhang, H., Zhang, J., *et al.* (2020) Beamforming Techniques for 5G Millimeter-Wave Air-to-Ground Communications: A Survey. *IEEE Access*, **8**, 138879-138900. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963514>
- [5] Wang, Y., Li, X., Zhang, J., *et al.* (2021) Deep Learning for Beam Management in 5G Millimeter-Wave Air-to-Ground Communications. *IEEE Wireless Communications*, **28**, 104-111.
- [6] Zhang, Y., Liu, Y., Wang, J., *et al.* (2021) A Survey on Antenna Array Designs for 5G Millimeter-Wave Air-to-Ground Communications. *IEEE Access*, **9**, 101123-10114. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3077309>
- [7] 李宗林, 骆润, 郭世伟, 等. 基于 5G 的 ATG 实现方式及网络部署规划[J]. 移动通信, 2020, 44(9): 14-18.
- [8] 陈冀鹏. 空地通信系统波束成形与切换方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022.
- [9] 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): 67-71.
- [10] 徐诚. 改进粒子群算法在阵列天线波束赋形中的应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [11] 魏法, 杨明磊, 何小静, 等. 基于改进粒子群算法的平面阵同时多波束赋形方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(6): 1789-1797.