



## 技术指南

低轨卫星：推动卫星通信的未来

QORVO®



## 卫星通信 (SATCOM)

行业正经历快速增长。

### 概述

得益于低地球轨道 (LEO) 卫星技术的进步以及对低延迟、高速连接的需求日益增加，卫星通信 (SATCOM) 行业正经历快速增长。预计到 2029 年，LEO 星座将占据商业卫星市场 70% 的份额，这一转变将为电信、物联网 (IoT)、国防和灾害恢复等领域带来巨大的创新机遇。

推动这一变革的关键因素包括有源电子扫描阵列 (AESA) 天线和波束成形技术，它们显著提升了性能、灵活性和可靠性。这些系统支持不同轨道间的无缝通信，促进高速数据传输和全球覆盖。此外，非地面网络 (NTNs) 的出现更是将连接扩展到偏远和服务不足的地区。借助 3GPP 第 17 版及即将在第 18 版中实现的增强功能，NTNs 支持智能手机直连、实时物联网通信和应急响应等应用。

随着卫星通信技术的持续发展，它们将在下一代无线网络中发挥关键作用。Qorvo 的卫星通信产品组合旨在满足这些需求，提供可扩展的射频 (RF) 解决方案，增强地面及空间应用的连接能力。



LEO 卫星运营商的未来从未如此光明。2024 年的 126 亿美元飙升至 2029 年的 232 亿美元。这一快速增长 (复合年均增长率 13.0%) 反映了市场对下一代连接技术的强劲需求, 以及对全球通信网络进行革命性变革的迫切愿望。<sup>1</sup>

## 卫星通信市场的驱动因素

对新型通信卫星星座的大规模投资, 催生了对价格更低、功能更强新技术的需求。不仅如此, 随着卫星部署数量的增加, 市场对信号链中所用的组件也提出了更高要求, 需要它们具备更高的效率、更紧凑的体积, 以及更可靠的性能, 涵盖从 RF 功率放大器到低噪声放大器再到波束成形 ICs。

卫星通信应用广泛, 覆盖多个市场领域。这些终端的需求往往因其所运行的星座和所面向的市场而异。

其中, 四大主要市场包括 **消费电子市场、商业运输市场、企业市场和政府市场**。这些市场在许多需求上存在重叠, 包括性能要求、尺寸、重量、功耗、吞吐量性能、成本和耐用性。一般来说, 消费市场的需求重叠最少, 因为其需求最为独特, 且在目标市场以外的适用性极为有限。

其它三个市场在需求上则呈现更多重叠, 其中耐用性是区别于消费应用的一个关键因素。这通常伴随着更高的价格、更高的功耗承受能力, 以及更高的吞吐量性能需求。尽管许多需求存在重叠, 但每个市场都有其独特的一套标准; 如第 4 页图 1 所示。



鉴于近年来创纪录的卫星发射数量、日益增多的卫星应用, 以及在众多太空项目计划中投入的巨额资金,

**卫星运营商的未来从未如此光明。**

<sup>1</sup> Markets and Markets LEO 卫星市场报告, 2024 年 5 月。



## 卫星通信用户终端的四大主要市场：

- 1 消费：**家庭互联网用户、车辆及私人海事用户。
- 2 企业：**数据中心、中大型企业 and 卫星地面接收站。
- 3 政府：**航空、地面移动、海事及地面可移动终端。
- 4 商业运输：**农业、建筑、采矿、海事、航空及地面运输。

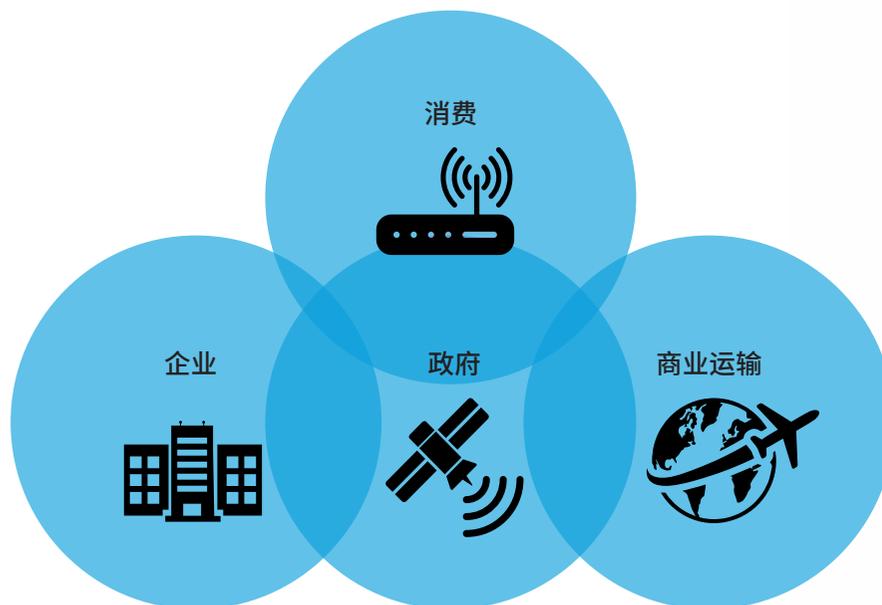


图1, 主要市场对终端的需求存在重叠, 集中在企业、政府和商业运输市场; 消费市场终端的需求则相对独立。

系统所运行的星座也会影响所需的性能能力和要求。卫星轨道可分为两大类：传统地球静止轨道 (GEO) 和非地球静止轨道 (NGSO)。非地球静止轨道包括低地球轨道 (LEO)、中地球轨道 (MEO) 和高椭圆轨道 (HEO)，这些轨道均对终端性能提出了独特要求。

LEO 巨型星座预计将提供比传统 GEO 卫星高出 **100 倍的带宽**，同时将延迟降低 10 倍，并能服务更多用户。

MEO 卫星相较于 GEO，同样能带来更低的延迟、更高的吞吐量，并服务更多用户，但其全球覆盖范围小于 LEO 卫星。HEO 卫星则用于填补 GEO 和 MEO 系统的“空白”，为高纬度地区和极地提供覆盖。

MEO 卫星 (如 GPS) 常用于导航领域，尽管具有一定的优势，但与 GEO 一样，发射和维护成本较高。虽然 GEO 和 MEO 卫星各有其用途，但它们都存在延迟和数据速度方面的不足。第 5 页的图 2 描述了各类卫星的覆盖范围。



参数	LEO: 500-1,200 公里	MEO: 5,000-20,000 公里	GEO: 36,000 公里
高度	非常低	低	高
地球覆盖范围	小	大	非常大
所需卫星数量	数千	6	3
数据网关	本地大量	区域灵活	少数固定
天线速率	10 分钟快速跟踪	1 小时慢速跟踪	固定

LEO 卫星相较于地球静止轨道和中地球轨道的同类卫星具有显著优势；能够为地球上偏远和欠发达地区带来低延迟（比GEO 快 30 倍）且高速的互联网连接。LEO 卫星需要数百到数千颗卫星来覆盖地球表面，从而形成交叉链接的网状网络。这种网状网络不仅扩大了全球覆盖范围，还提高了连接的可靠性——例如，如果一颗卫星离线，另一颗卫星可立刻补位以防信号丢失。目前，大多数LEO卫星的部署均由私营企业和政府机构推动；SpaceX、OneWeb、亚马逊的 Kuiper 项目和 Telesat 等公司都大举投资 LEO 卫星的部署，为全球网络互连和数据的轻松访问开辟了新纪元。

图 2, LEO、GEO、MEO 卫星的覆盖区域。  
 LEO 卫星开启了全球网络互连和数据轻松访问的新纪元。

## 卫星通信 轨道定义

- **GEO:** 距地表 35,786 公里。应用场景：
  - 电信、广播、天气预报、遥感、导航。
- **MEO:** 距地表 5,000-20,000 公里。应用场景：
  - 电信、GPS 及其它导航应用。
- **LEO:** 距地表 500-1,500 公里。应用场景：
  - 低延迟关键应用、金融交易、自动驾驶车辆、远程视频手术。

卫星在促进全球互联中发挥着重要作用。如图 3 所示，其主要承担两大任务：一是直接与地球通信，为不同行业的众多最终用户终端提供支持；二是直接或经由卫星间链路 (ISL) 将数据回传至地球。随着更多 LEO 卫星发射升空，通信速度得到显著提升，覆盖范围日益扩大；信息从太空到地球的传输变得更加便捷，延迟也更小。

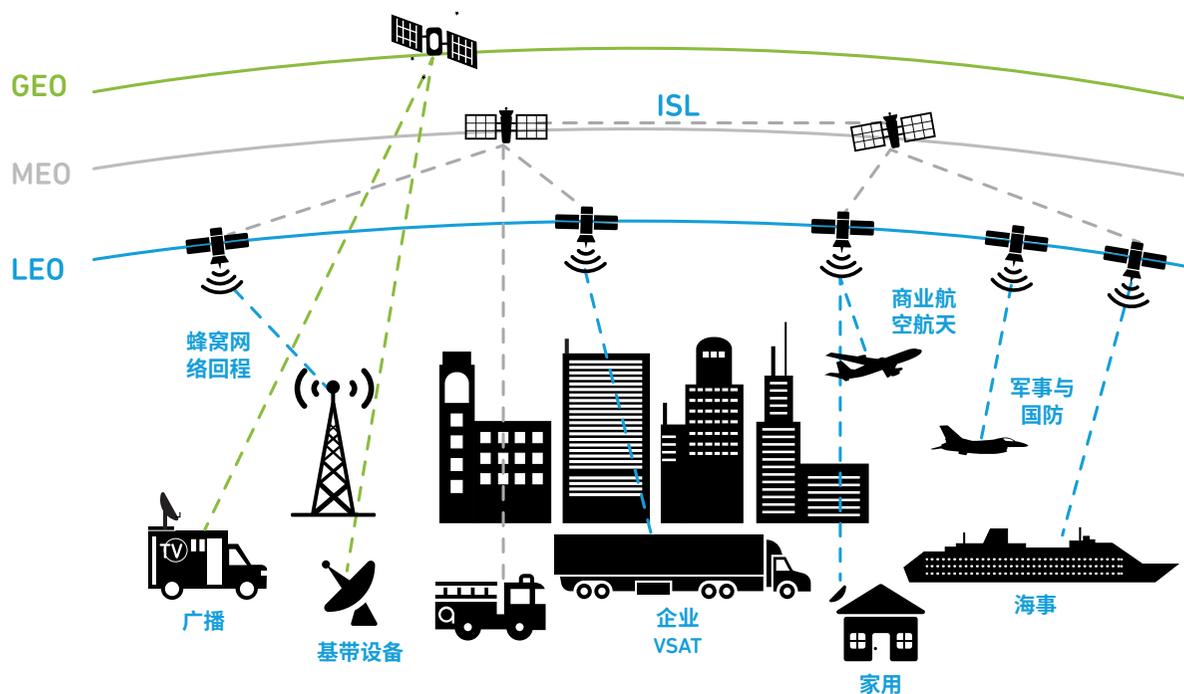


图3, 包含地面 ISL 的卫星网络。LEO 巨型星座预计将在带宽上比传统 GEO 卫星提升 100 倍, 同时将延迟降低 10 倍, 并能服务更多用户。

图 3，包含地面 ISL 的卫星网络。LEO 巨型星座预计将在带宽上比传统 GEO 卫星提升 100 倍，同时将延迟降低 10 倍，并能服务更多用户。

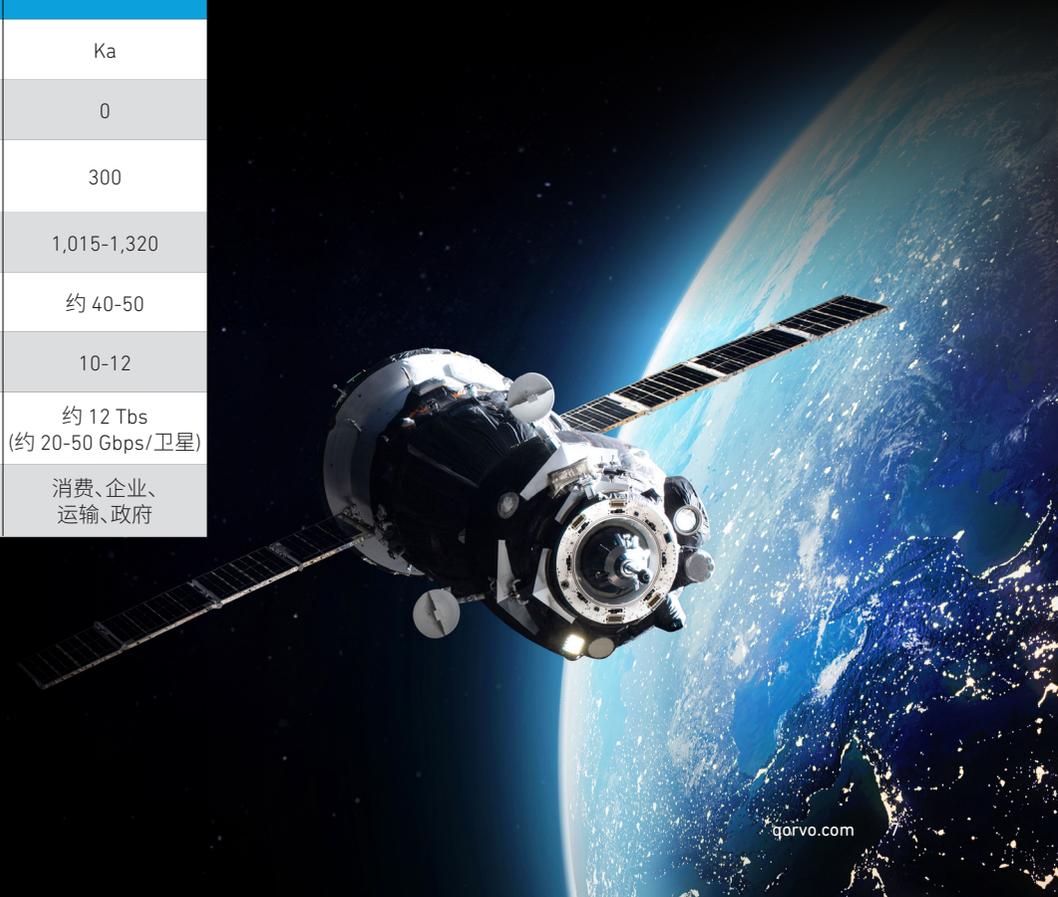
四大星座规模对比见表 1。随着政府和商业运输市场需求的不断增长，加之卫星星座容量的迅猛扩张，预计到 2030 年，该领域的年复合增长率（CAGR）将达到 6%-12%。2021 年，该市场规模为 38.77 亿美元，预计到 2028 年将超过 60 亿美元<sup>2</sup>。这一需求和增长态势，为那些能够以合理价格开发、制造和认证终端的终端制造商带来了巨大机遇。

系统	GEO	Kuiper	OneWeb	Starlink	Telsat
频段	Ku 和 Ka	Ka	Ku	Ku	Ka
在轨卫星数量	563	2	660	8,050	0
计划发射卫星数量	到 2030 年达到 700 (每年约 15-20)	3,232	7,088	20,000	300
轨道高度 (公里)	35,786	590-630	1200	540-570	1,015-1,320
时延 (毫秒)	560	约 30	约 40	约 30	约 40-50
卫星寿命 (年)	-	7	约 5	5-7	10-12
满负荷容量	3 Tbs	约 30-32 Tbs	约 50 Tbs (约 7.5 Gbps/卫星)	约 75 Tbs (约 17 Gbps/卫星)	约 12 Tbs (约 20-50 Gbps/卫星)
目标市场	消费、企业、 运输、政府	消费、企业、 运输、政府	企业、运输、政府	消费、企业、 运输、政府	消费、企业、 运输、政府

表 1，四大 LEO 卫星星座概况<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Market Research.com 2028 年卫星通信终端市场预测，2022 年 1 月。

<sup>3</sup> Jonathan McDowell, 哈佛-史密森天体物理中心天文学家及轨道物体监测领域权威专家，2025 年 3 月 8 日。





## 用于卫星通信的频率频谱

大多数卫星部署使用 L 至 Ka 频段。然而，当前更多的卫星正在向 Q/V 和 E 频谱等更高频段发展；具体见表 2。为服务于 5G 非地面网络应用，3GPP 还分配了 NTN 频段。表 3 显示了 L 与 S 频段的现有 NTN 频段，以及在 K 和 Ka 频段中新拟议的频段。

卫星通信频段	下行链路频率 GHz	下行链路带宽 GHz	上行链路频率 GHz	上行链路带宽 GHz	说明
L-频段	1.535-1.56	0.025	1.635-1.66	0.025	实时监控远程位置的设备状态，并实现机器间通信
S-频段	2.5-2.54	0.04	2.65-2.69	0.04	用于气象雷达、水面舰艇雷达和 NASA 通信、卫星电视、移动宽带服务、无线电广播和机载互联网
C-频段	3.4-4.2	0.8	5.8-6.725	0.925	提供从船舶到陆地的语音和数据传输服务
X-频段	7.25-7.75	0.5	7.9-8.4	0.5	用于卫星通信、军用卫星通信和雷达应用
Ku-频段	10-13	3	14-18	4	用于卫星通信、固定卫星服务和广播卫星服务
Ka-频段	17.7-21.2	3.5	27.5-31	3.5	用于卫星通信、军用卫星通信和 5G 电信
Q/V-频段	37.5-42.5	5	42.5-51.4	8.9	用于语音、数据和视频通信
E-频段	71-76	6	81-86	5	提供极高吞吐量的卫星通信服务

表 2, 卫星通信所分配的频谱范围。

## NTN 频段

NR 工作频段	上行链路工作频段 基站接收 用户设备发射	下行链路工作频段 基站发射 用户设备接收	双工模式	区域	别名
	FDL_low-FDL_high	FDL_low-FDL_high			
n255	1626 MHz-1660.5 MHz	1525 MHz-1559 MHz	FDD	全部	MSS L-频段
n256	1980 MHz-2010 MHz	2170 MHz-2200 MHz	FDD	全部	MSS S-频段

## K 频段和 KA 频段 (VSAT) 中新拟议的 3GPP NTN 频率范围 2-1

NR 工作频段	上行链路工作频段 基站接收 用户设备发射	下行链路工作频段 基站发射 用户设备接收	双工模式	区域	别名
	FDL_low-FDL_high	FDL_low-FDL_high			
n510	17.7 GHz-20.2 GHz	27.5 GHz-28.35 GHz	FDD	全部	MSS K 与 Ka-频段
n511	17.7 GHz-20.2 GHz	28.35 GHz-30 GHz	FDD	全部	MSS K 与 Ka-频段
n512	17.7 GHz-20.2 GHz	27.5 GHz-30 GHz	FDD	全部	MSS K 与 Ka-频段

表 3, 当前及拟议中的 NTN 频段。

## 卫星与 5G 网络的融合

全球范围内，大型 LEO 卫星星座提供的宽带服务正逐渐普及。这一趋势，加之卫星网络与 5G 生态系统的整合，进一步推动了卫星通讯市场的增长。

此外，蜂窝通信正在成为卫星生态系统的一部分。随着 5G 无线技术在 3GPP 第 17 版<sup>4</sup>中的引入，使得 5G 系统能够服务于 NTN。NTNs 旨在扩大全球网络覆盖范围，特别是在农村及偏远地区，并促进移动设备、物联网 IoT 和商业自动驾驶车辆与卫星之间的直接连接。这种整合使卫星产业能够充分利用 5G 生态系统的规模效应。

3GPP 第 17 版定义了 5G 新空口 (NR) NTN 与 5G IoT NTN, 如图 4. 所示。其专注于利用卫星透明有效载荷架构和具有 GNSS 功能的用户设备 (UE); 图 4 展示了 5G NTN 的预期用例。

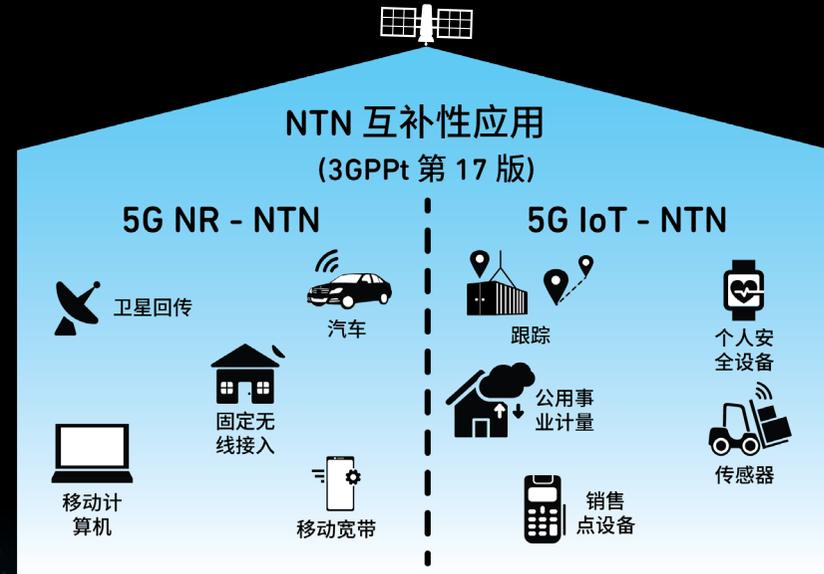


图 4, NTN 5G NR 和物联网的互补性应用场景

其它 5G NTN 应用场景还包括：

- 农业、采矿和林业等覆盖不足的地区。
- 当陆地通信网络受损时的灾区通信。
- 在极广范围内的广播信息。

<sup>4</sup>3GPP 第 17 版标准文档。

## 推动通信发展: 低轨卫星在全球无线通信扩展中的角色

在上一节中, 我们探讨了卫星通信市场的诸多方面, 并初步讨论了其对 5G 新空口 (NR) 蜂窝网络和物联网 (IoT) 网络的影响。在这一章节, 我们将更深入地探索卫星网状网络与 NTN 的融合, 以及它们如何改变未来的通信格局。

NTN 卫星作为中继站, 扩展了地面网络的无线覆盖范围和容量。这些网络为紧急情况、灾难及物联网网络设备等其它服务提供通信手段。此外, 一些公司正推出协议, 将卫星通信功能集成到最新的高端智能手机中。借助 LEO 卫星网络, 可实现全球双向紧急信息传递、面向偏远地区的低成本互联网服务、远程文本通信, 以及其它基于手机的通信功能。

此外, 3GPP 第 17 版标准增加了新的 5G 卫星网络应用, 涵盖 GEO, MEO 和 LEO 卫星技术。5G NTN NR 卫星网络包括两个通信链路——一个在卫星与用户之间, 另一个在卫星与连接至地球数据网络的地面站间。它将提供 NTN-IoT 及 5G NR 通信服务, 将智能手机和其它支持 5G 的设备连接到 NTN 服务网络。

### 5G NR NTN 与卫星技术的进步

如图 5 所示, 位于地球上空 35,000 公里的 GEO 卫星延迟为 280 毫秒 (ms), 而运行在 500 至 1,200 公里高度的 LEO 卫星则可将延迟降低至仅 6 至 30 毫秒。因此, 从用户设备 (UE) 到 LEO 卫星的最大单向传播延迟远低于 MEO 和 GEO。

图 5: 3GPP-TS 22.261 标准下, 从 UE 到卫星的最大单向传播延迟对比



融合卫星技术的 5G NR NTN 架构有望实现全球蜂窝无线连接。3GPP 第 17 版标准侧重于增强全球 5G-NTN 和 IoT NTN 服务，并引入低延迟的直通蜂窝服务，将 sub-6 GHz 频段的速度提升至数十 Mbps。

此外，第 18 版标准旨在通过使用 10 GHz 以上的频率——特别是 Ku 和 Ka 频段，来改善覆盖范围及移动性。由此，将使速度达到数百 Mbps 有利于部署较小尺寸的 AESA 天线；如 SpaceX 星链所使用的天线。这些技术进步提升了速度，可支持灾后恢复工作，还将覆盖范围扩展至传统网络无法触及的偏远地区。

如前一节所述 (详见表 3)，3GPP 标准下的 5G NTN 演进包括频谱的扩展，以涵盖 L, S, K 和 Ka 频段，从而增强上行链路覆盖，并支持移动服务。第 18 版标准还特别针对新引入的三个 10GHz 以上 NTN 频段 (n510, n511 和 n512) 以进一步完善 5G NTN 设计，实现更佳的性能和更广泛的接入。

NTN 网络的另一个关键目标是提高无线电频谱这一有限资源的效率。该频谱经常处于拥塞状态；最近的技术研究正在寻找更好的方法来管理这种拥塞；例如在空间网络中采用时分双工 (TDD) 模式，改变了为发送和接收信号分配不同路径的传统方法。如表 4 所示，使用 TDD 频段有助于移动运营商在繁忙的 sub-6 GHz 频谱上腾出更多空间。这些改进正在推动卫星技术向前发展，使其更为智能，更加符合地面网络的要求。

频段详情	频段	上行链路 (GHz)	下行链路 (GHz)	双工模式
现有 3GPP 频率范围 2 内的频段	n257	26.5-29.5	26.5-29.5	TDD
	n258	24.25-27.5	24.25-27.5	TDD
	n259	39.5-43.5	39.5-43.5	TDD
	n260	37-40	37-40	TDD
	n261	27.5-28.35	27.5-28.35	TDD
	n262	47.2-48.2	47.2-48.2	TDD

表 4, 未来 TDD NTN 频段正推动卫星技术向前发展, 使其更加智能, 并与地面网络更加兼容。



## 3GPP NTN 的发展目标:

第 17 版: 提升 5G NTN 和物联网 NTN 服务。

第 17 版: 在 sub-6 GHz 频段引入低时延直连蜂窝服务

第 18 版: 利用 Ku 和 Ka 波段的频率提升覆盖范围和移动性, 实现数百 Mbps 的传输速度, 适用于更小型 AESA 天线。

## 单向与双向卫星通信的对比

卫星通信分为单向和双向系统。单向通信涉及从卫星到地面的信号传输，应用于 GPS、卫星电视和广播等服务。相比之下，双向通信能够实现卫星与地面站之间的交互式信号交换，支持互联网服务和电话通话。图 6 展示了涉及地球站和卫星单、双向通信间的差异。

如图所示，单向通信（左图）——如直播卫星（DBS）服务等，传统上依赖 GEO 卫星。GEO 卫星与地球自转同步，仅环绕地球赤道运行。从地面视角看，GEO 卫星在天空中处于固定位置。GEO 卫星是地球同步轨道（GSO）卫星的一种，两者都用于电信及地球观测。

非地球静止轨道（NGSO）是指卫星相对于地球表面的非静止轨道类型。NGSO 卫星的轨道高度低于 GEO 卫星，且完成一圈轨道所需时间更短。NGSO 卫星在天空中不断移动，能够为移动卫星服务提供更好的覆盖，并改善全球连接。NGSO 轨道有多种类型，包括 LEO, MEO 和 HEO, 其中 LEO 距离地球最近。

双向 LEO 卫星架构进一步提升了整体卫星通信能力。此类双向卫星通信超越了过去的单向“弯管”式设置，融入了诸如 AESA 天线等技术。“弯管”架构的运作方式类似于中继器，而双向架构则超越了这种单向通信方式。这些先进的系统对于增强地面与卫星间的通信至关重要。

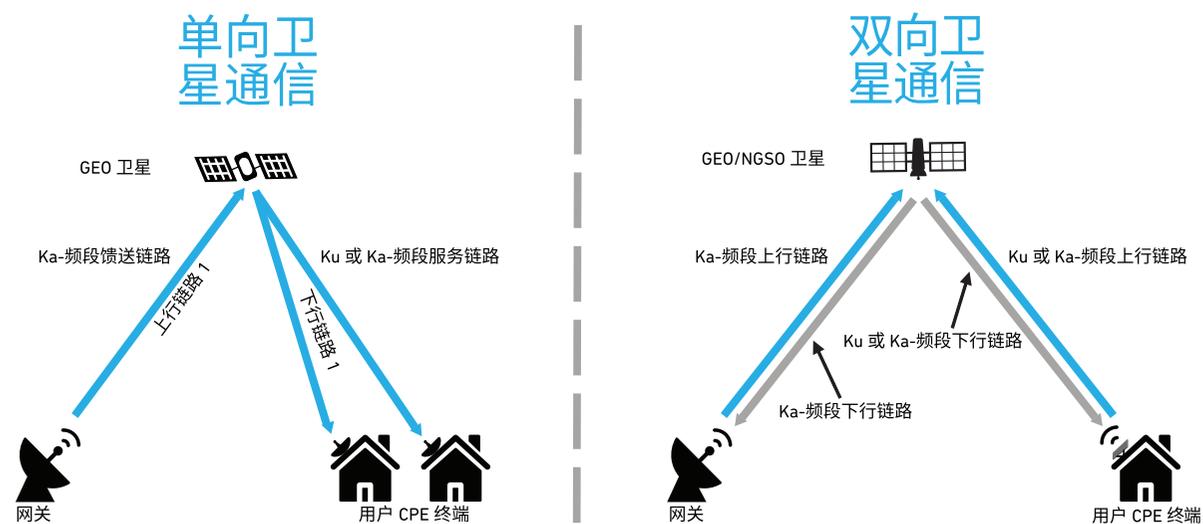


图 6: 单向和双向卫星通信应用场景示例; 双向架构对于加强地面与卫星之间的通信至关重要。

## NTN 的透明与再生架构

新一代地面站系统基础设施正朝着灵活且互联的方向发展，配备了更小的平板用户终端，类似于蜂窝网络。为了将卫星接入网络融入 5G, 3GPP TR38.821 引入了两种基于卫星的下一代无线接入网 NG-RAN 架构：透明架构和再生架构。

如图 7 (左) 所示，在透明有效载荷架构中，3GPP 5G NR 基站 (gNB) 位于地球上，而卫星则扮演“弯管”中继器的角色。在透明有效载荷通信中，RF 滤波、变频和放大等操作均在卫星上进行。

在图 7 (右) 所示的再生有效载荷架构中，全部或部分 gNB 功能在卫星上实现。因此，在再生有效载荷通信中，RF 滤波、变频和放大、解调、编码/解码、切换或路由，以及调制等操作均在卫星上完成。这就如同在卫星上搭载了全部或部分 gNB 传统地面蜂窝基站的功能。此类用于 LEO 卫星的再生系统架构相较于传统“弯管”转发器具有诸多优势；且由于当前的 LEO 星座拥有自己专用的波形和机载处理系统，其已成为未来架构的方向。

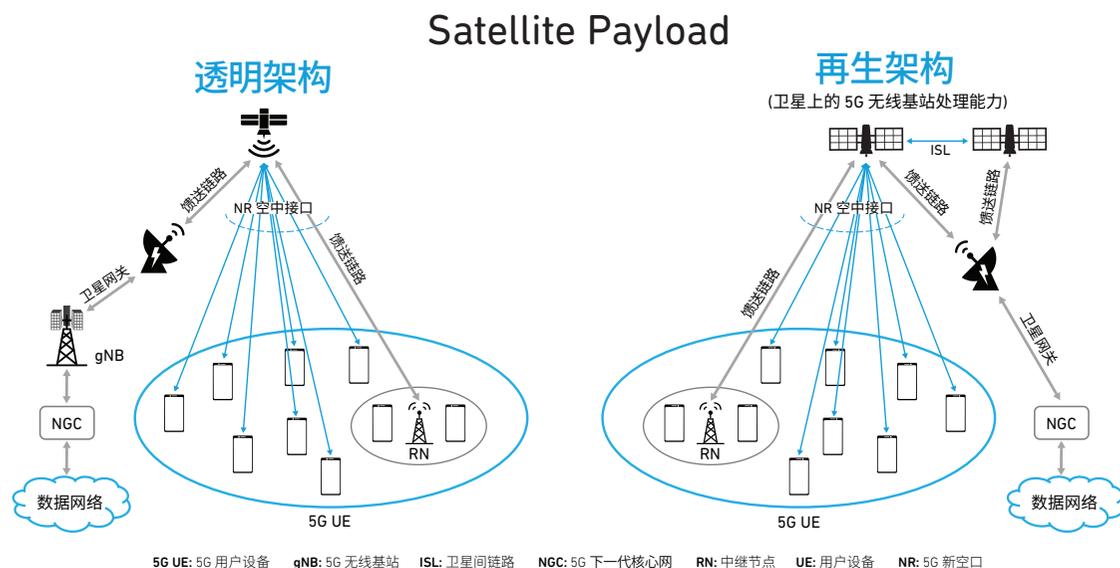


图 7 卫星有效载荷透明网络和再生网络。再生卫星架构在性能、灵活性和效率方面具有显著优势，是现代数据密集型应用的理想选择。

随着连接需求的不断增长，

卫星将在城市网络密集区以外的地区发挥更大作用，以满足移动连接、关键紧急服务、边缘网络和连接设备 (物联网) 等需求。

## 卫星技术

卫星通信市场正处于增长阶段，不仅体现在在轨卫星数量的增加，也体现在地面终端设备的发展；且二者均需要广泛的 RF 信号链组件，包括低噪声放大器 (LNAs) 和 RF 功率放大器 (PAs) 等。其它关键组件还包括滤波器和开关。随着对 LEO 卫星通信需求的不断上升，市场对卫星的尺寸、重量和功耗等属性也愈发关注。此外，轻便的固定和便携式卫星通信用户终端的出现，正推动业界不断创新现有技术，例如在天线设计方面。

### AESA 和波束成形技术的引入

卫星通信用户终端的增长正引发天线技术的重要变革。

传统抛物面(碟形)天线的局限性已使其难以满足当前的需求，由此推动了向 AESA 或相控阵天线等电子扫描天线的过渡。AESA 天线可以电子方式改变信号方向，而无需物理移动，这在灵活性上大大优于机械扫描天线。

此外，AESA 可以利用波束成形技术创建和发送信号，实现快速且准确的波束方向调整。这使得与任何轨道上的卫星建立连接成为可能，并能在卫星间实现快速切换。

如下图 8 所示，用户 CPE 终端是用户与卫星间的直接连接。这些设备成本低廉、易于设置，可固定或移动(如移动卫星通信、海事应用等)。其利用 AESA 天线将各种技术集成到更紧凑、更轻巧的设计中。这包括用于灵活跟踪和导向的波束成形技术，同时采用商用现成品 (COTS) 组件；此外，它们还支持更快的数据传输方式。

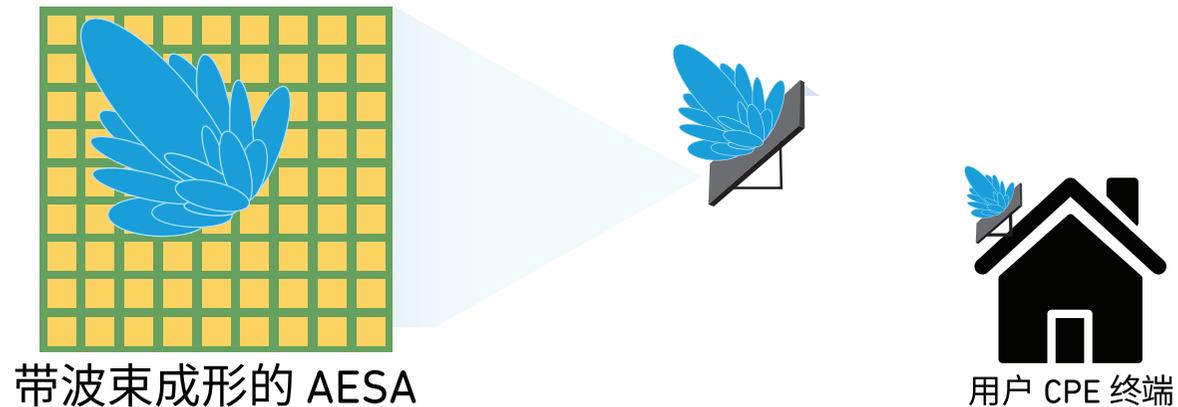


图 8. 家用 AESA 波束成形终端。AESA 技术提高了数据传输速度，并有效利用了可用频段。这使得互联网连接速度更快、覆盖范围更广，即使在偏远地区也能提供更可靠的服务。

## 波束成形和 AESA 天线在卫星通信中的角色

在前面几节中，我们探讨了卫星市场的多个维度，并介绍了波束成形和 AESA 技术如何推动卫星 NTN 的发展。本章节将深入探讨波束成形和 AESA 天线怎样主导卫星通信设计趋势，并使该领域的工程人员获益。

波束成形是一种用于天线阵列的信号处理技术，可实现信号的指向传输或接收。这项技术可以提高信号功率，从而增强性能和效率，因而对于无线通信系统至关重要。

波束成形、多入多出 (MIMO) 和 AESA 是现代无线通信的基础技术，在信号质量、网络效率和用户体验方面带来了显著优势。这些技术的应用范围从移动网络、Wi-Fi 到卫星通信和雷达，是推动无线技术进步的关键工具。

## 什么是有源电子扫描阵列 (AESA) 或有源天线?

有源天线，也称为相控阵天线，由多个相干馈电的固定振子组成。为形成电子波束，每个振子都会以适当的相位通电，从而在远场中按所需方向形成相干波束。它利用每个振子的可变相位控制，将波束扫描至空间中的特定角度，如下图 9 所示。这种无移动部件的电子波束转向由每个辐射振子上的 IC 管理。

远场天线图案是每个振子激励的综合结果。

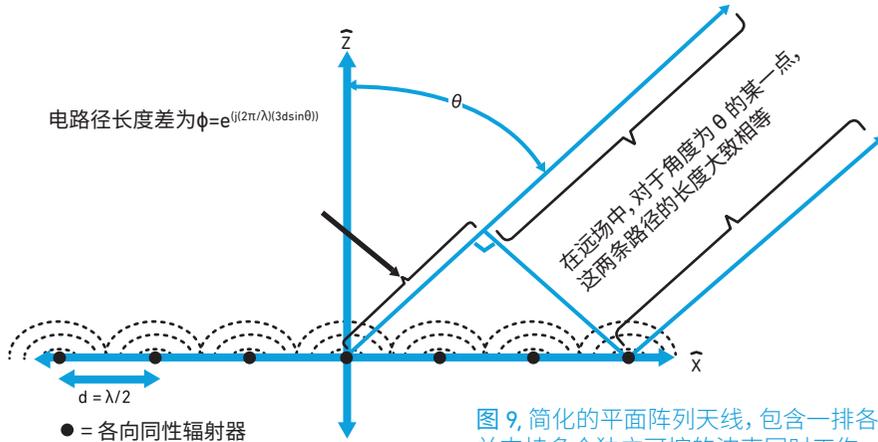
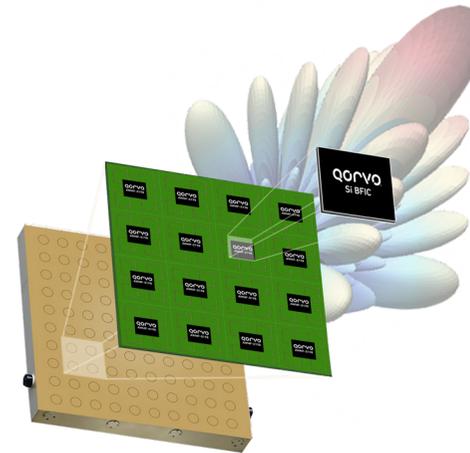


图 9，简化的平面阵列天线，包含一排各向同性辐射器。有源天线可在微秒级时间内完成波束指向，并支持多个独立可控的波束同时工作。



带有波束成形 IC 的有源天线具有一种被称为软失效机制的优势，这意味着少数振子的失效通常对整体性能影响甚微。此外，AESA 波束成形天线能够在微秒级时间内引导波束，并支持多个同时且独立可控的波束。由于没有机械部件，这些天线外形小巧，性能可靠。此外，它们还能够引导零点，并具有高度自由度来阻挡干扰源和干扰器，从而实现精确的辐射孔径模式。

对于大多数 NTN 通信而言，天线在 GHz 频段内的毫米波 (mmWave) 范围内工作，如 24, 26, 28, 37 或 39 GHz。这些高频具有较短的波长，使得许多天线振子能够紧凑地安装在高指向性孔径中，从而抵消高路径损耗，如 15 页图 9 所示。高指向性波束还提供了空间分集，允许多个波束复用相同的频谱，从而显著提高系统容量。

## 什么是波束成形?

波束成形可以根据系统要求以模拟或数字格式执行。稍后我们将更深入地探讨各种架构类型。

波束成形涉及操纵阵列中每个辐射振子上信号的相位和幅度。这种技术使得特定角度的信号获得相干干涉，而其它信号则受到相消干涉。射频 (RF) 能量由此在特定方向上“聚焦”，形成类似波束的形态，如图 10 所示。在图中，我们可以看到天线阵列中的引导波束在给定角度上形成主波瓣，并最小化旁波瓣。波束成形提高了接收端的信噪比 (SNR)，减少了多径衰落，并将来自其它方向的干扰降至最低。

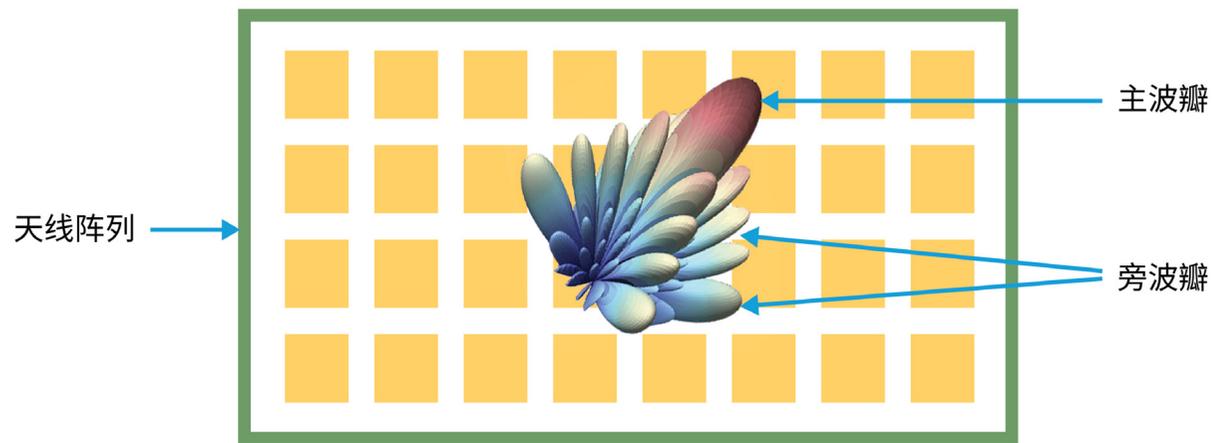


图 10, AESA 天线中的波束成形信号波瓣。信号波束通过 TDU 的移相器进行指向控制。

AESA 天线可以使用移相器或时延单元 (TDU) 来引导信号波束；当然，每种方法都有其利弊权衡。对于具有较大瞬时带宽的系统，TDU 可能是更好的选择，以避免波束失真，即所谓的“倾斜”现象，如下面图 11 所示。然而，对于较低带宽的系统，移相器已足够，并且是最广泛实施的解决方案。需要注意的是，也有将 TDU 和移相器结合到同一系统中的架构，这也有助于减少倾斜现象。

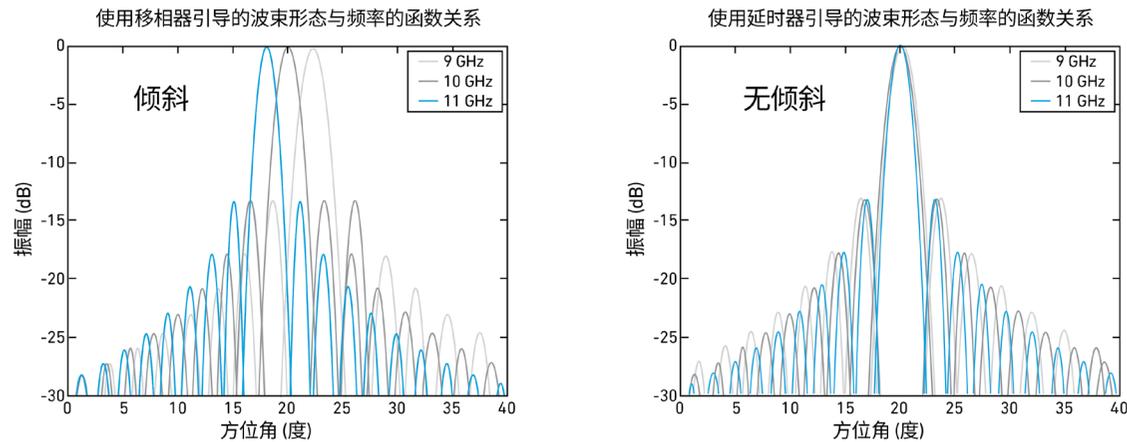


图 11, 波束倾斜/失真

TDU 在整个频率范围内表现出恒定的相位斜率，因此可以消除波束倾斜效应。而移相器在工作频率范围内保持恒定相位；但移相器的设置可能会导致不同频率的波束转向角不同，这就是为什么移相器在较窄的系统带宽中表现最佳的原因。

移相器通过近似时延对波束进行电子转向，从而在中心频率上产生最佳波束。然而，移相可能导致最大工作频率下的欠转向和最小工作频率下的过转向。当然，移相器架构的成本效益显著，因此更为常用。

归根结底，这两种方法都能奏效，但工程人员必须权衡利弊，以实现最佳效果。首先，通过评估阵列尺寸和瞬时带宽需求，以确定移相器是否足够。其次，需评估混合解决方案是否足够；即在振子中使用移相器，并在大型阵列的某些子集振子后实施 TDU。如果瞬时带宽和/或阵列尺寸足够大，则可能需要在每个天线振子处都使用 TDU。



波束成形技术通过定向电磁能量，

## 提升信号质量与 传输效率；

这对移动通信网络、Wi-Fi 及卫星通信至关重要。

如今的系统能够提供精确、可靠的波束指向，有效提升现代通信网络的性能、信号覆盖范围及数据吞吐量。

## 波束成形类型

有源天线主要采用三种通用的波束成形架构：模拟波束成形、数字波束成形和混合波束成形。本章节将从宏观层面介绍每种方法，并对比它们的优缺点。

**模拟波束成形：**需要在每个天线振子上调整 RF 信号以将波束指向所需方向。与数字波束成形相比，它更简单、通常更便宜，且功耗更低，但灵活性较差。

**数字波束成形：**每个天线振子连接到自己的数字信号处理器。通过数字方式操控信号来形成和引导波束。这能够实现更精确的控制，并从同一阵列中同时形成多个波束。不过，这种方法仅在低频段（如 S 频段）切实可行，因为在这些频段，阵列的晶格较大，有足够的空间在阵列上放置所需的硬件。

**混合波束成形：**结合了模拟和数字技术，通常用于纯数字方法成本过高或过于复杂的系统中，在 5G 毫米波网络中颇受欢迎。这种方法降低了采用数字波束成形所固有的复杂性，并减少了 RF 链组件的数量，从而简化了整个系统。

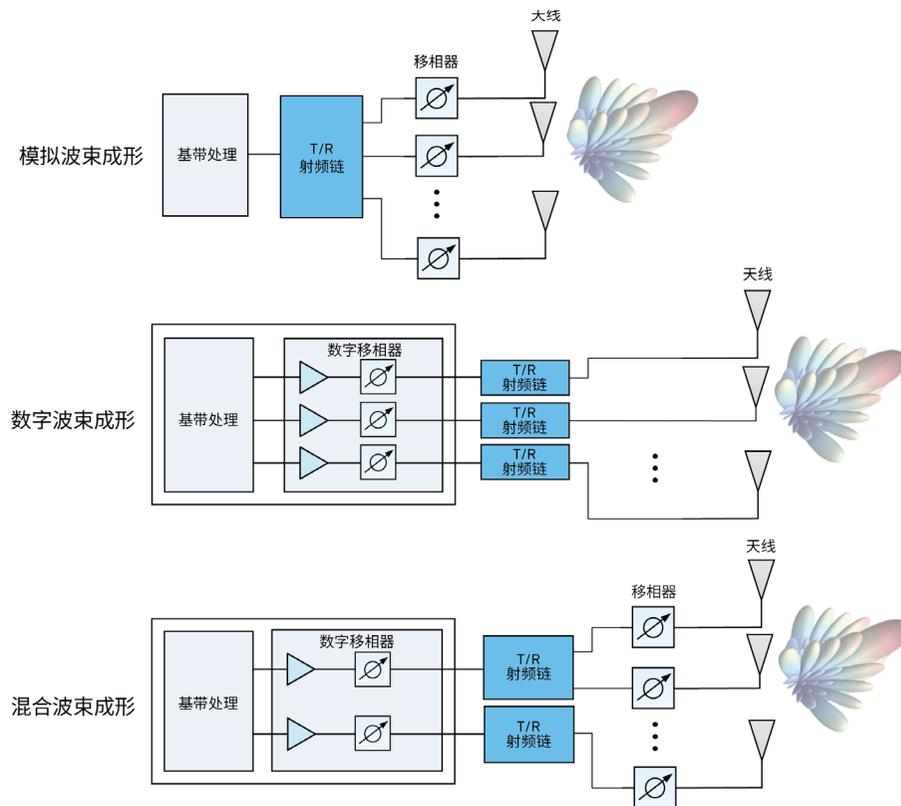


图 12, 模拟、数字与混合波束成形架构对比。

参数	模拟	数字	混合型
移相控制	模拟移相器	数字信号处理	模拟与数字结合
载波带宽	较窄	最宽	较宽
复杂度	较低	较高	中等
成本	最低	最高	中等
功耗	最低	最高	中等
应用	最广泛市场	高端市场	高性能市场

表 5, 波束成形类型对比

## 波束成形在无线领域的应用概览

无线通信市场开始向更多采用波束成形技术的卫星通信应用转变，以利用更宽的频段实现更高的数据吞吐量。在蜂窝网络中，波束成形可以提高带宽效率和覆盖范围，让基站能够将信号集中于单个用户，减少干扰并提升数据速率。在 Wi-Fi 网络中，波束成形技术可用于提升信号质量和覆盖范围；尤其是在用户设备众多的拥挤环境中。此外，借助波束成形技术，卫星通信可精准规划卫星信号的覆盖范围，得以实现对特定区域的定向广播与通信。在雷达系统应用中，波束成形技术通过将发射脉冲聚焦于特定方向，增强了分辨率和探测范围，也提高了目标检测能力。

## QORVO 的卫星通信 技术资源

Qorvo 是您在卫星通信领域值得信赖的合作伙伴。我们为卫星通信应用提供创新技术和规模化产品阵容。从用户终端到 LEO/GEO/MEO 卫星系统，我们全面的系统级支持和广泛的解决方案正通过太空连接世界。

### 网络研讨会：

- 卫星通信创新与新兴 ESA 技术
- LEO 卫星系统的关键组件
- 卫星通信用户终端设计中的选型权衡空间解析

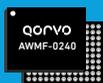
### 赞助电子书：

- 《LEO 卫星系统射频技术趋势》

此外，您可访问我们的卫星通信解决方案页面，获取更多信息，或发送邮件至 [beamforming-sales@qorvo.com](mailto:beamforming-sales@qorvo.com)。

# 地面应用

## 平板阵列



### Ku-频段

接收: 10.7 to 12.75 GHz; 发射: 13.75 to 14.5 GHz



### Ku 频段四通道波束形成器 IC

AWMF-0240<sup>新</sup>, AWMF-0241<sup>新</sup>

AWMF-0146, AWMF-0147

新型四通道 4x2 收发集成 IC  
提升效率及性能。

推荐接收增益级: CMD264P3

推荐发射驱动器: CMD264P3



### Ka-频段

接收: 17.7 to 21.2 GHz; 发射: 27.5 to 31.0 GHz



### Ka-频段四通道波束形成器 IC

AWMF-0197, AWMF-0198

四通道 4x2 收发集成 IC, 简化有源天线设计。

推荐接收增益级: QPA2626

推荐发射驱动器: QPA2628

## 卫星通信终端



### Ku-频段

接收: 10.7-12.75 GHz

发射: 13.75-14.5 GHz



8, 15 或 25W GaN 发射功率放大器

QPA0015, QPA0016, QPA0017

SMT 封装



### 超低噪声接收放大器

CMD320C3

市场领先的噪声系数 NF=1.07 dB,  
增益 18 dB; 无需外部直流阻断器或  
RF 匹配; 低功耗。



### Ka-频段

接收: 17.7-21.2 GHz; 发射: 27.5-31.0 GHz

25W GaN 发射功率放大器

QPA2212D



### GaAs 接收低噪声放大器

CMD298C4

市场领先的噪声系数 NF=1.07 dB, 增益 18 dB;  
无需外部直流阻断器或 RF 匹配; 低功耗。

# 空间应用

## 空间载荷



### Ku-频段

接收: 13.75-14.5 GHz; 发射: 10.7-12.75 GHz



17.5 或 35W GaN 发射功率放大器

QPA1006D, QPA1009D



### Ka-频段

接收: 27.5-31.0 GHz; 发射: 17.7-21.2 GHz



20 或 30W GaN 发射功率放大器

QPA1721D, QPA1724



### GaAs 接收低噪声放大器

QPA2628

市场领先的噪声系数 NF=1.6 dB, 增益 23 dB;  
无需外部直流阻断器或 RF 匹配。



### GaAs 接收低噪声放大器

QPA2735

市场领先的噪声系数 NF=1.3 dB, 增益 25.5 dB;  
无需外部直流阻断器或 RF 匹配。

