

如何为非GEO空间应用 选择天线前端组件

Jim Ryan，产品营销经理

摘要

采用有源电子扫描天线(AESA)进行卫星通信(satcom)，为运营商和消费者提供了更大的灵活性。本文介绍为这些波束成形阵列选择天线前端(FE)组件（低噪声放大器和功率放大器）的设计考虑因素。

简介

卫星技术问世已有60多年的时间。尽管早期的卫星受发射条件和尺寸的限制，都是发射到近地轨道(LEO)，我们最熟悉的要属地球同步轨道(GEO)卫星，它们为我们提供电信、卫星电视、地球观测等服务，也为政府和军队提供广泛的服务。但是，现在情况大为转变，LEO和中轨道(MEO)成为对许多大型星座更具吸引力的轨道，这些星座提供多种基于数据的服务（例如卫星通信、地球观测和地图、导航和定位等）。图1显示LEO、MEO和GEO之间的相对位置。

导致向非GEO转变的因素有很多，例如发射成本降低、采用批量卫星制造技术、通信、天线技术和传感器技术的发展、支持卫星互联的光学技术，以及大量私有资本涌现，为这些大型项目提供资金支持。

由于LEO中越来越多地使用航天器，这给在轨卫星通信链路设计人员带来了新的挑战。GEO的固定通信链路现在已被可适应性的链路取代，使得这些链路即使在7.5 km/s以内的速度绕地球运行时，也能与地球上的地点进行通信。这些现代化的卫星通信系统使用AESA，不仅能根据预期目标将天线信号调整到正确方向，还支持多波束，以便同时为多位用户提供支持。对于组件

选择，在轨卫星有独特的要求，对于将天线元件连接至发射和接收信号链的FE组件，其要求尤甚。本文从设计角度出发，详细探讨为这类系统选择FE（放大器）组件时需考虑的因素。

从GEO转向LEO

GEO卫星也能提供出色的服务——为何要做出改变？

虽然GEO卫星存在发射成本高这个缺点，但它也有诸多优点，比如说，因为轨道与地球同步转动，所以它们在天空中的位置是固定的。这让我们能够部署位置固定的卫星天线和成本相对较低的VSAT端子，该端子采用抛物面天线，这是助力提供数据服务，特别是直接入户(DTH)卫星电视服务的关键推动因素。GEO中的卫星提供最大的地球覆盖面积（如图2所示），只需要三个GEO卫星，就能覆盖整个地球表面。^{iv}

尽管GEO具有这些优势，但在多种关键因素的推动下，我们开始转向LEO中的卫星，最主要是因为通信网络在不断发展。我们生活在高度互联的世界，但实际上，全球有很大部分人口都居住在互联网连接匮乏，甚至是没有网络连接的地区，比如说，位于赤道平面的GEO给极地地区提供的服务就会减少。LEO中的大型通信星座就能给这些地区带来相对高速的网络连接。而对于目前已部署互联网连接的地区，LEO星座能为消费者和B2B提供更高的等同于光纤的数据速率。推荐使用的LEO星座的尺寸中包含一些内置冗余，随着可用卫星的数量不断增多，使其获得了网络弹性优势。对政府和军事用户，以及商界来说，这种弹性优势非常有用。最后，其制造和发射成本更低，这意味着出现新技术时易于升级卫星网络。

ⁱ LEO 是指地球表面上方约 160 km 至 2000 km 的范围。

ⁱⁱ GEO 是指地球表面上方约 35,786 km (22,236 英里) 的范围。

ⁱⁱⁱ MEO 介于 LEO 和 GEO 之间，例如，O3b 位于地球表面上方 8000 km 的 MEO 中。

^{iv} 覆盖范围限于南北纬度。

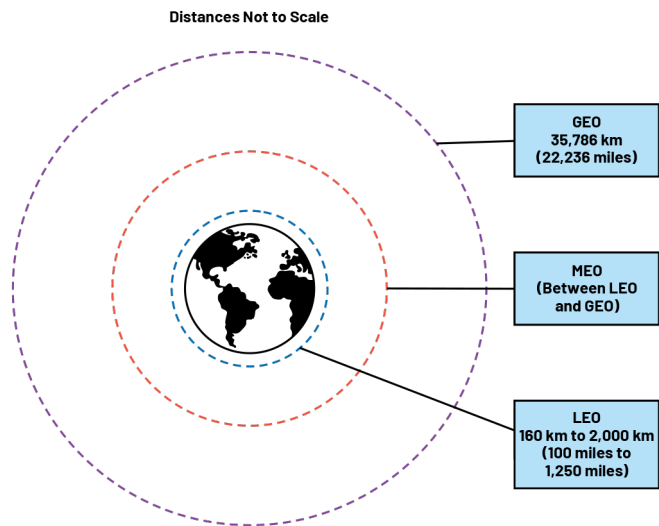


图 1. LEO、MEO 和 GEO 轨道的比较。

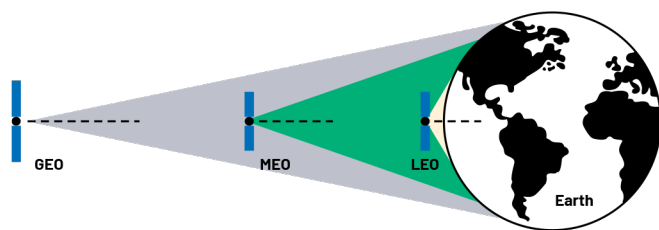


图 2. GEO、MEO 和 LEO 的地球表面覆盖范围。

卫星轨道

非GEO星座由特定轨道中的卫星，或者由多个轨道中的卫星混合而成。常用的轨道包括赤道轨道（MEO中的SES O3b mPOWER星座使用的轨道），其中的卫星通常绕赤道运行；倾斜轨道，该轨道偏离赤道轨道一定的角度，方向从西到东，与地球自转的方向一致；以及极地轨道，其中每颗卫星将沿着特定的经度线绕每个极点运行（例如OneWeb）。有一些大型LEO星座，例如Telesat Lightspeed和SpaceX Starlink，混合使用倾斜轨道和极地轨道来实现对北方地区的最佳覆盖，这是因为倾斜轨道只能在一定的纬度范围内运行。极地轨道是这三种轨道中全球覆盖率最佳的轨道，但是，它需要耗费更多能量来进行定位，所以，一般与倾斜轨道中的卫星配合使用，在纬度范围提供额外的覆盖范围。极地轨道也更易受到辐射影响。卫星呈环状排列，它们距离地球表面的高度是恒定的。星座的规模等于平面的数量乘以每个面中的卫星数量（参见图3）。^v

探秘LEO星座

有些星座已经发射，或者计划向LEO发射几百颗，在有些情况下为几千颗小型卫星。比起GEO链路，LEO中的卫星具有两个明显的卫星通信优势。第一，因为轨道本身的高度，信号延迟降低。地球与LEO卫星之间的信号传输路径距离更短（约为GEO卫星的1/35），信号延迟降低了一个数量级，约25 ms，有人认为，凭借着自身提供数据密集型实时服务的潜力，LEO卫星通信将能助力扩展5G服务。第二个优势在于，单个LEO卫星的数据容量一般都集中在更小的区域，因此能为个人用户提供更大的数据带宽，具体取决于该星座的整体数据容量。在覆盖范围内，卫星一般会生成多条下行链路波束，以连接多个用户/集线器。这些在空间中彼此独立的波束可以重复使用分配的频率，由此避免波束之间相互干扰，并优化数据的可用性。高通量卫星（HTS和vHTS）也具有集中提供数据的能力；但是，GEO卫星的总数据容量要低于典型LEO星座的容量。^{vi}具有高数据容量的大型星座的限制在于，每次提供给用户的数据容量只占总数据容量的一部分（33%至50%），因为有些卫星航空器的运行轨迹恰好是在海洋上空，或是在无人居住的区域。

星座的规模会影响到成本及其工作寿命

星座卫星采用量产技术制造，其成本更低，而因为其工作寿命更短、所处的环境辐射更低，因此能采用成本更低、非气密、通常为塑料封装的组件。LEO卫星的工作寿命一般为5到7年。随着LEO中的大气阻力增加，保持在轨运行需要耗费更多燃料，而LEO卫星尺寸小，能携带的燃油量有限，这会影响到其工作寿命。LEO卫星的辐射耐受性要求一般也更低。例如，对于LEO卫星使用的组件，其可接受的总电离辐射剂量(TID)^{vii}性能水平在30 krad以内，而GEO卫星的工作寿命更长，遭受的辐射更强，该性能值一般需要达到100 krad。



图 3. LEO 星座的轨道配置组合。

^v 除此以外，还有一些额外的备用卫星，用于实现冗余。

^{vi} Telesat Lightspeed 最初的设计目标是提供 294 颗卫星的 15 Tbps 数据容量。一颗典型的 VHTS 可以提供 2 Tbps 到 3 Tbps 数据容量（2022 年）。

^{vii} TID- 累积暴露在电离源中，可能导致设备阈值发生变化，导致泄漏风险增大，或者出现故障。

LEO面临的挑战和关键的推动技术

现在，管理星座数据流的复杂程度越来越高。我们通过卫星间的链路(ISL)（使用射频链路或光学链路）将数据从地面接收站路由到星座。因为LEO卫星并非始终都在地面接收站的接收范围之内，所以这种传输非常必要。

从地面观察，会发现非GEO卫星在天空中移动，这一点与位置固定的GEO卫星不同。这是影响保持卫星在轨所需的轨道速度的因素之一。由于大气阻力增加且所处的轨道位置更低，相比更高轨道中的卫星，LEO卫星必须以更快速度运行。建议Starlink星座使用的其中一个卫星空间站距离地面550 km。在这个高度，飞行速度为7.5 km/s，这意味着对于用户来说，这个空间站中单个卫星的可见时间仅为4.1分钟。GEO卫星用户可以使用卫星上的固定天线，而LEO卫星服务用户则必须使用能够跟踪LEO卫星轨迹的天线，在该卫星划过天际时进行跟踪。同样，卫星在轨移动时，其天线必须能够跟踪地面服务区域。MEO中的卫星（例如O3b星座）使用机械转向天线，可能是因为它们的轨道速度更慢。LEO卫星可能需要使用某种形式的AESA，因为机械转向系统可能无法满足其跟踪要求。LEO除了需要可转向波束外，还需要多波束。多波束使卫星能够优化面向多个数据网关或服务区域的服务和数据吞吐量。LEO应用需要的是一种能够独立支持多波束电子波束转向的天线。有些星座建议每颗卫星提供多达16束可转向的用户波束。

这些星座保持灵活性的关键在于：采用支持波束转向的天线来保持通信链路——主要的卫星通信/E0上行链路/下行链路，或者辅助性的跟踪、遥测和控制(TT&C)链路。

AESA和波束成形

传统的抛物形天线一般是为发送器和接收器提供单个馈电，天线一般指向固定方向，或者可通过机械方式调节方向。电子波束转向阵列天线由多个天线元件组成，这些元件的辐射图从结构上与阵列中的相邻元件组合，构成所谓的主瓣（参见图4）。主瓣将辐射能量传输至所需的方向。理想情况下，主瓣携带要发射的所有能量，但因为一些非理想情况，有些能量会辐射到旁瓣，也就是说，偏离所需的方向。天线设计力求使主瓣携带的能量尽可能多，旁瓣携带的能量尽可能少。我们可以通过调节天线元件的单个振幅和相位来调节主瓣的形状和方向。现代IC技术可以采用以微秒量级更新的可调增益和相位，即使在卫星和空中应用使用的大型元件阵列中也能提供快速转向。^{viii}旁瓣减少对于LEO应用来说非常关键，因为卫星对地的距离很近，旁瓣会导致干扰。

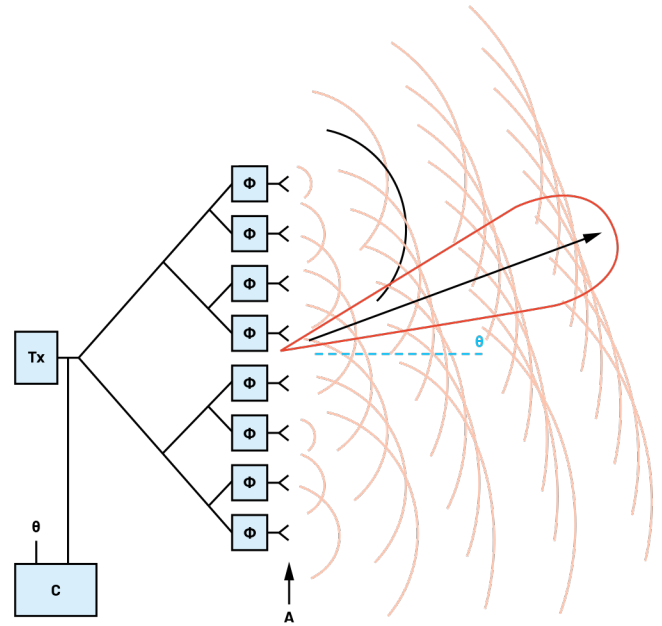


图 4. 一维阵列中的波束转向概念。ⁱ

AESA的FE元件选择

卫星通信系统属于频分双工(FDD)系统，发送器和接收器采用不同的频率。这些系统通常使用单独的天线，按照分配的频段进行上行链路和下行链路通信。

与航空航天和防御领域的大部分应用一样，尺寸、重量、功率和成本(SWaP-C)是决定在系统和子系统中选用具体元件的关键特性。对于在轨应用，尺寸和重量受到发射能力限制，发射的系统更大、更重，发射成本会更高昂。事实上，在大型星座中，每颗卫星都必须和预先确定的形状一致，以便火箭的发射台发射多颗卫星。此外，由于在轨系统几乎完全依靠太阳能供电，所以在选择元件时，电池备用系统、功耗都是关键的规格参数。

对于在轨应用阵列天线设计师来说，受阵列尺寸和元件间距影响，FE元件（接收天线采用LNA；发射天线采用驱动器/PA）的尺寸应尽可能小，因为阵列中的每个元件都配有前端，需要配备多个元件，这些元件必须尽可能贴近元件天线，以降低线路损耗。线路损耗会直接影响到噪声系数。典型的实施方案可能包括一个波束成形核心芯片，该芯片对接多个天线元件，每个元件都采用自己的FE器件（接收器采用LNA，收发器采用驱动器和/或PA）。高增益接收天线在实现FE时，可能会将几个高增益LNA串联起来，以实现所需的输入增益。在这种情况下，元件尺寸非常重要，因为元件间距会随着频率的增高而减小。在使

^{viii} 请阅读以下文章，了解有关波束成形的更多详细信息。

用Ka频段接收器（26 GHz至28 GHz）时，对于 $\lambda/2$ 晶格间距，元件间距约为5 mm。LEO应用要保持宽扫描角度，这就决定了阵列元件要按 $\lambda/2$ 的间距排列。GEO平台使用的天线阵列的扫描要求不会如此严格($\pm 9^\circ$)，在确定元件之间的最小间距时，具有更高的灵活性。最新的LNA采用2 mm × 2 mm封装，更易于管理关键元件布局，许多LNA的封装中还包含DC模块和RF扼流圈，以进一步简化布局流程。

为在轨应用选择放大器时，器件性能非常关键。对于LEO卫星接收器天线，噪声系数（NF，单位为dB）是非常关键的因素，它会影响系统的噪声系数，后者直接影响阵列中需使用的元件数量，因此也会影响天线的尺寸。大家回想一下，LEO卫星要比GEO卫星小巧，所以，部署天线的空间会非常有限。在典型的阵列中，系统噪声系数必须<2 dB，才能保持阵列尺寸可控。系统噪声系数降低1 dB，天线元件的数量可以减半，所以，LNA噪声系数是影响系统噪声系数的关键因素。LNA增益也很重要，因为要恢复和放大接收信号，都需要高增益。一般会部署多个FE LNA级来提供足够的增益。我们必须在多变的大气环境下保持通信链路，所以FE器件线性度（通过输出IP3测量）是一项关键规格。虽然接收器信号强度主要是由地面发射站决定的，但要保持可行的最大数据速率（使用复杂的调制方案），接收器线性度非常重要。ADL8142（低功耗Ka频段LNA）等器件可以通过调节功耗(I_{DD})来补偿接收路径的变化，以扩展其线性度。对于发射天线，FE是驱动器放大器或PA。同样，线性度也是确保可行的最高传输速率的关键，但是输出功率(OP1dB)将决定每个天线元件可贡献的功率量。对于在轨应用，输出放大器的功率附加效率(PAE)非常重要，原因有两个：(1)太阳能板（或备用电池）能提供的功率有限，(2)低效放大器需要更多的冷却来处理非转换功率产生的热量。

ADI用于卫星通信的IC

ADI公司开发了多种器件来满足各种应用的要求，这些应用采用波束成形技术，包括卫星通信、民用和军用雷达，以及5G通信。特别是，在卫星通信领域，ADAR3000和ADAR3001分别提供星载Ka频段发射和接收波束成形。两种器件均能提供4波束/16通道波束成形功能，采用可编程的时间延迟和衰减。每种器件都采用紧凑的BGA封装。为了完善该波束成形IC，我们采用ADAR5000

（4:1 Wilkinson功率分配器/功率合成器）来进行波束分配，采用包括ADL8142 LNA在内的天线FE选项来支持Ka频段（23 GHz至31 GHz）中的在轨应用。ADL8142采用小型2 mm × 2 mm LFCSP/ QFN封装，旨在优化实现低噪声系数(1.6 dB)、高线性度(20 dBm OIP3)和高增益(27 dB)，在采用1.5 V输入电压时，功耗仅为50 mW。请参见图5获取有关ADL8142增益和噪声系数的详细信息。ADL8142提供COTS和商用版本。在发射端，可以使用ADL8107（8 GHz至15 GHz，28 dB增益，19 dBm P1dB）或HMC498（17 GHz至24 GHz，22 dB增益，26 dBm P1dB）等高增益和高线性度器件来作为元件驱动器。请参见图6，获取有关ADL8107增益和输出P1dB的更多信息。

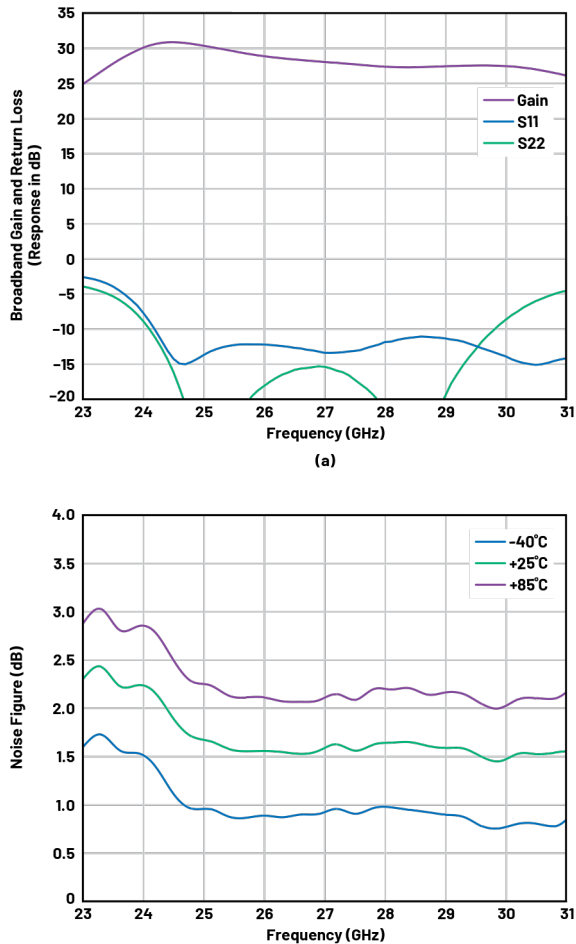


图 5. ADL8142—增益（左）和噪声系数（右）与温度和频率的关系。²

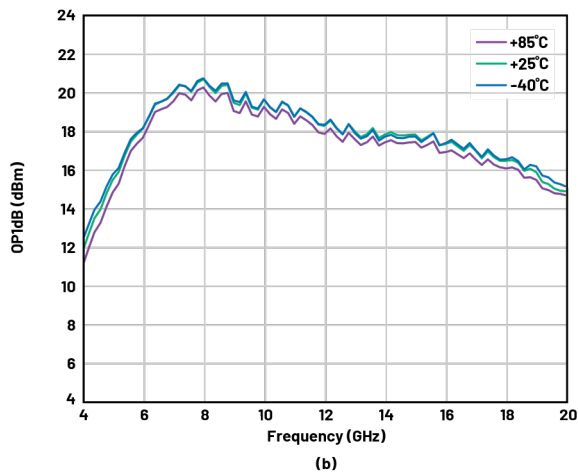
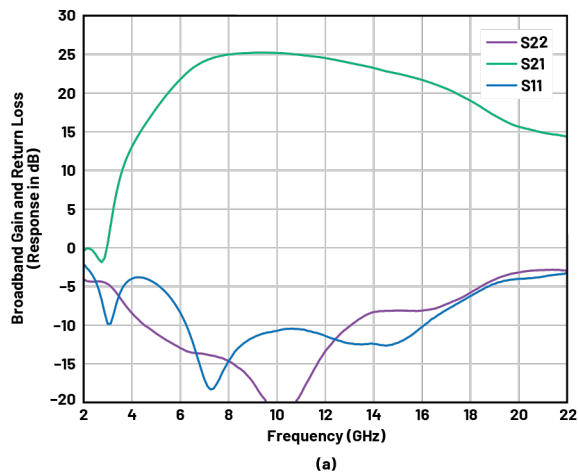


图 6. ADL8107 增益 (S21) (左) 和 P1dB (右)。³



作者简介

Jim Ryan是爱尔兰利默里克航空航天产品部的产品营销工程师。他拥有利默里克大学的电子学士学位和计算机系统工程硕士学位，以及英国开放大学的工商管理硕士学位。他在ADI公司工作了30多年，担任过多种职位，包括测试工程、产品应用和营销，负责过多种类型的产品，包括精密转换器、消费电子A/V和RF。

结论

波束成形天线使最新的非GEO卫星星座能够提供普遍、灵活和高带宽的数据通信。波束成形天线设计师能够利用ADI公司灵活的信号链元件产品，从数据转换器到频率转换器，以及波束成形器到FE元件。在整个信号链中，天线前端至关重要，它们不仅决定整个系统的噪声性能，还必须符合具体的机械和功耗限制。ADI将开发一系列高性能器件，例如ADL8142 LNA来满足在轨卫星通信的独特需求。

参考资料

- ¹ Keith Benson。“相控阵波束成形IC简化天线设计。”模拟对话，第53卷第01期，2019年1月。
- ² ADL8142数据手册。(ADI公司，2022年)
- ³ ADL8107数据手册。(ADI公司，2022年)

