

# 来自太空的互联网： 大容量、低延迟LEO卫星的 用户和地面终端中的RFIC进展

Donal McCarthy, 市场营销与业务发展总监

## 简介

本文介绍了推动近地轨道(LEO)卫星部署的主要市场趋势。本文将讨论LEO卫星系统的基本运行情况，并展示半导体RFIC技术取得的一些进展，这些进展推动实现下一代Ku和Ka频段LEO用户终端和地面终端。

## LEO连接—通向成功之路

卫星通信(satcom)是一种成熟的语音、视频和数据传输方式，在所有主要轨道（包括地球同步赤道轨道(GEO)、中地球轨道(MEO)和LEO)上广泛使用。卫星通信被认为是传输GPS导航信号、天气信息、电视广播、语音、数据的有效手段，同时也用于成像和科学应用。承诺提供高速互联网连接的新一波计划已经围绕LEO卫星星座展开，它将为下一代互联网通信提供低延迟、大容量的宽带连接。

在持续部署5G蜂窝网络方面，LEO卫星发挥着重要作用。卫星网络越来越多地参与到3GPP标准化中，其在未来网络中的预期作用早就在研发当中。2017年，3GPP标准机构启动相关活动，以了解卫星通信网络在5G连接中的可行性。通过3GPP标准第15、16、17和18版的发布，已有多种活动来支持卫星网络的集成。LEO卫星可以为服务欠缺的地区提供大范围覆盖，可以为移动中的人们提供连续服务，可以连接到机器到机器(M2M)/物联网(IoT)设备，而且是一条值得关注的具有成本效益的5G升级途径。

下一代LEO系统将在距离地球表面500公里到2000公里的轨道上运行，实现比过去的卫星网络更具技术优势的解决方案。如此接近地球意味着它们将能提供更低延迟的连接，这对于消费类或商业使用场景（如互联网游戏或实时控制工业/医疗设备）非常重要。LEO卫星的延迟约为50 ms（下一代技术会将此延迟改善到20 ms以下），而GEO则为700 ms。

LEO卫星的一个关键推动因素是，由于轨道较低，其辐射暴露量要低得多。这很重要，因为这意味着可以放宽昂贵且有时令人望而却步的抗辐射测试要求。由此将产生规模经济性，现在建造LEO卫星的成本已大大降低。更少的辐射意味着有更广泛的半导体工艺和更多的元器件可供使用。

鉴于轨道较低，预计部署的卫星数量会多很多。此类卫星的平均寿命将比以前的类似卫星短得多。也许经过5到8年，这些卫星就会脱离轨道并需要替换。LEO卫星必须具有成本效益才能支撑卫星和替代卫星的发射。

随着LEO宽带连接业务开始变得强大，所有这些趋势引起了行业监管机构的注意。回忆1990年代，这种互联网业务是多家公司的目标，但遗憾的是，由于部署成本高且需求有限，它以失败告终。快进到今天，我们看到半导体技术有了长足进步，能够提供不同以往的性能和集成度。再加上相对偏远或服务欠缺的地方对高速、低延迟互联网连接的需求急剧增长，以及卫星通信与5G标准的整合，使得未来的LEO星座处在一个好得多的基础之上，取得成功的可能性更大。

在撰写本文时，预计用户可以实现100 Mbps的最大下行数据速度，未来可能会提高到150 Mbps，从而很好地满足多用户全时视频流传输需求。

LEO面临的一个挑战是卫星始终在不断移动，星座只有完全部署好才能提供最低可行的服务。这意味着初始支出会很高，因为LEO卫星的轨道较低，因而数量巨大。但即便如此，这似乎也并未阻挡其现在的成功，而且投资者对无处不在的覆盖的商业前景十分看好。

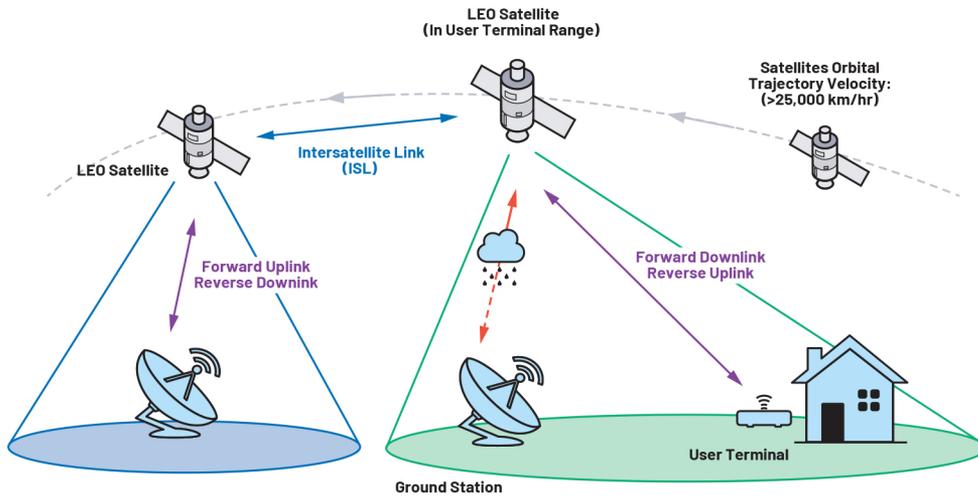


图1. LEO卫星通信的地空场景示例

## LEO卫星系统如何工作?

LEO卫星通信系统主要由三部分组成，如图1所示。

### 用户终端/用户设备(UE)

这些终端是用户和卫星之间的直接联系手段，往往成本低、易于设置且位于家中，但也可以是移动终端，如海事卫星通信、移动中的卫星通信、战术单人无线电等。用户终端利用高水平的IC集成来简化物料清单(BOM)，降低成本，并保持较小的外形尺寸。

### 地面站/网关

这些是连接到服务器（用于互联网连接的数据中心）的地面连接，通常通过光纤连接。它们将卫星连接到地面，部署于地球上的固定位置。

### 卫星

卫星群被称为星座，在轨道上绕着地球运转，提供同时连接终端和网关的链路。

LEO卫星在太空中移动，通常一颗卫星环绕地球一圈的时间在90分钟到110分钟之间，这称为轨道周期。因此，连接到卫星的用户处于该卫星的范围内的时间很短（最多20分钟）。普通用户在正常运行期间会连接到多颗卫星。经过一定时间后，系统必须将用户移交给进入范围内的其他卫星，此方式类似于在行驶的汽车中使用手机的人，蜂窝网络中的一个基站将用户移交给另一个基站。这对如何控制波束以保持与最合适卫星的最佳链接提出了严格要求。

另一个有趣的演变是卫星系统在超出地面站的范围时如何维持运行。图1展示了一些可能影响通向地面站的链路速度的不利天气状况。传统上，卫星使用弯管技术，也就是卫星必须始终找到一条通往地球或其他物体（如飞机）的链路，将其作为跳板来连接太空中的另一颗卫星，后者当时可能处在地面站的范围内。一项新技术是通过卫星间链路，在太空中使用光学或V/E频段连接来链接卫星。

## 用户终端上/下变频器的进展

用户终端对IC集成度提出了很高要求，ADI公司利用硅工艺技术的性能和集成能力来响应这一需求。这些解决方案需要非常高的IC集成度，以实现尺寸非常小的无线电终端，同时保持非常低的功耗，并严格遵守优化的无线电成本要求。

上/下变频器(UDC)是用户终端中的基础产品，它们将调制解调器IF或基带信息直接连接到Ku频段或Ka频段。

RFIC UDC的频率覆盖目标是：

- ▶ Ku频段：~10.7 GHz至~14.5 GHz
  - 下行链路（卫星到地面）：10.7 GHz至12.7 GHz
  - 上行链路（地面到卫星）：14 GHz至14.5 GHz
- ▶ Ka频段：~18 GHz至~31 GHz
  - 下行链路（卫星到地面）：17.7 GHz至21 GHz
  - 上行链路（地面到卫星）：27 GHz至31 GHz

下行链路和上行链路在频率上是分开的，故从卫星到用户终端的通信使用两个单独的频段。因此，RFIC公司必须针对不同频段设计每个用户终端的上下变频器。

用户终端链路通常覆盖125 MHz至250 MHz的通道带宽(BW)，网关覆盖250 MHz至500 MHz的带宽，具体带宽取决于上行链路还是下行链路。不过，一些部署具有在用户和网关链路之间共享带宽的能力，因此通道带宽可以在其工作的频率中重新配置。

LEO卫星在不断移动，如图1所示。因此，终端内上/下变频器的频率合成器必须实现快速锁定以提供不间断连接。频率合成器用于辅助上变频和下变频。它们在赋能终端在运行期间连接和重新连接不同卫星方面发挥着至关重要的作用，因为从一颗卫星到另一颗卫星，空中频率在工作频段（即Ka和Ku频段）内不断变化。

ADI公司开发了一系列针对用户终端的Ku和Ka频段UDC，以解决尺寸、重量、面积、功耗和成本(SWaP-C)问题。这些UDC包含众多RF和IF信号调理功能，例如滤波器、放大器、衰减器、PLL VCO和功率检测。所有IC的设计都考虑到了用户终端的信号链性能。[ADMV4630/ADMV4640](#)是Ku频段UDC，支持卫星调制解调器的IF接口，如图2和图3所示，表中显示了IC性能的亮点。

针对更高频率的Ka频段，ADI公司开发了[ADMV4530/ADMV4540](#) UDC (图4和图5)，它们支持需要I/Q基带接口的卫星通信调制解调器。请注意，ADMV4530上变频器是双模器件，它还能支持IF接口。这些解决方案采用硅工艺设计，集成度非常高，可应对大批量终端应用中常见的集成压力。

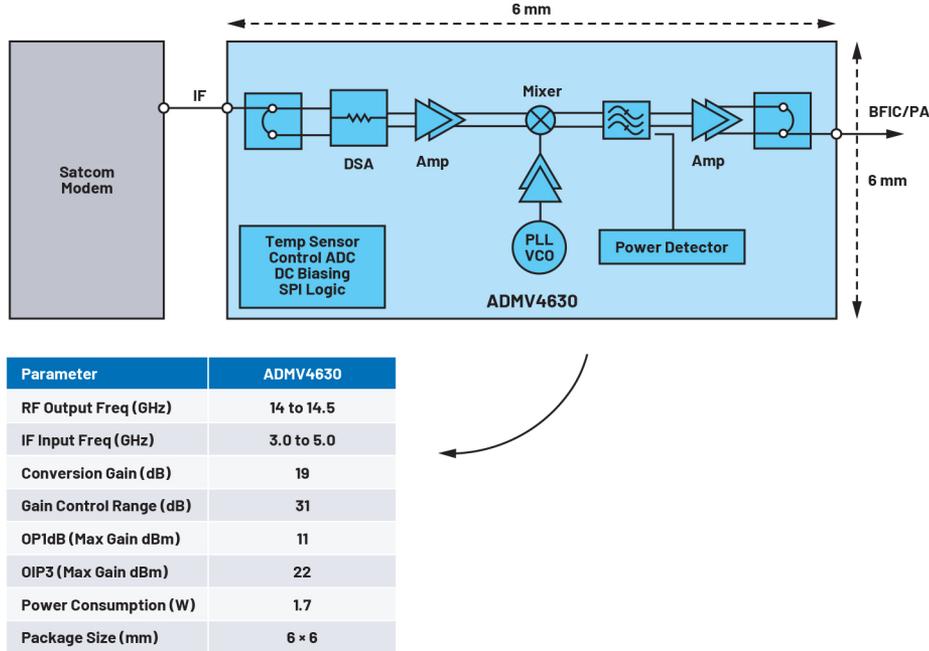


图2. 高度集成的Ku频段上变频器，IF接口直接来自卫星通信调制解调器

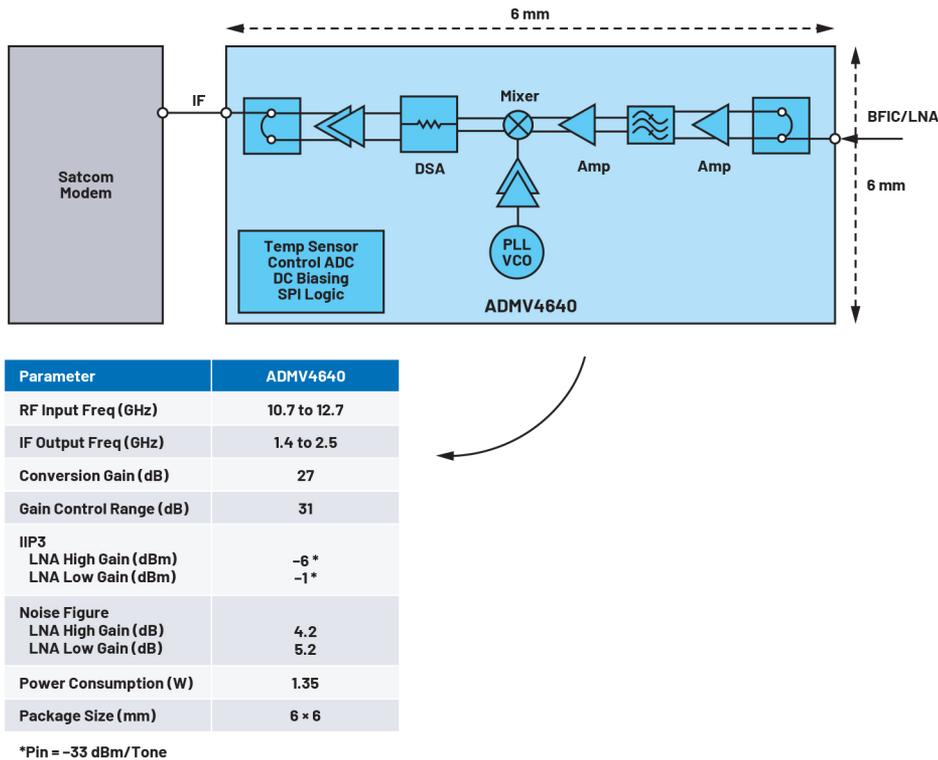
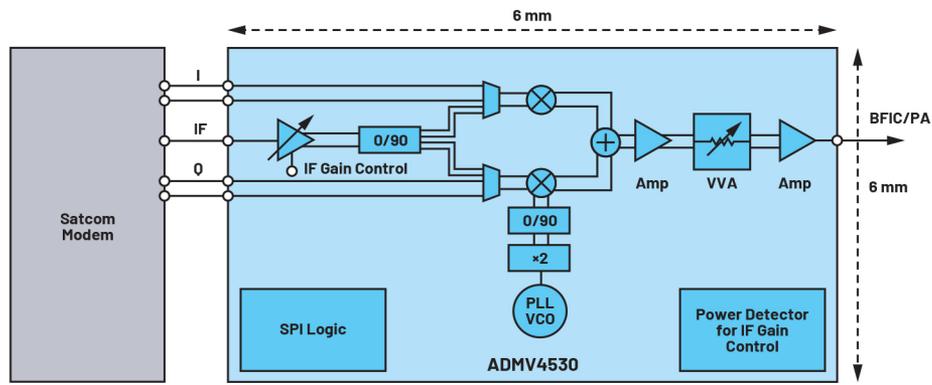
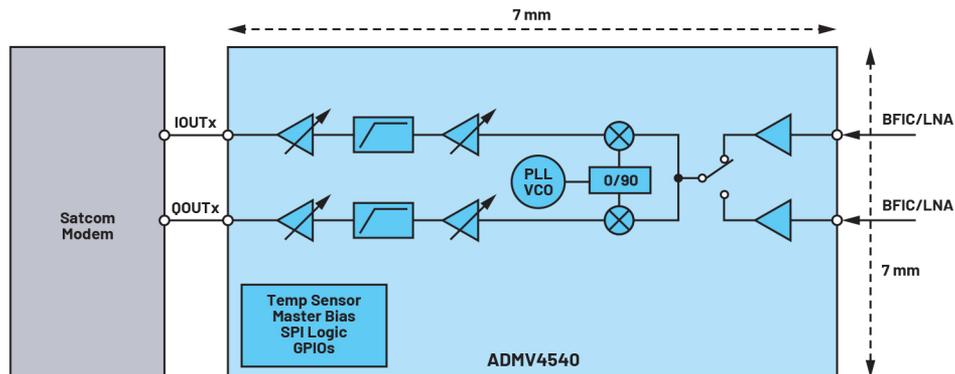


图3. 高度集成的Ku频段下变频器，IF接口直接通向卫星通信调制解调器



Parameter	ADMV4530
RF Output Freq	27 to 31
IF Input Freq (GHz)	2 to 3
Baseband (I/Q) (GHz)	DC to 0.5
Conversion Gain (dB)	21
Gain Control Range (dB)	30
OP1dB (Max Gain dBm)	19
OIP3 (Max Gain dBm)	29
Power Consumption (W)	1.9
Package Size (mm)	6 × 6

图4. 高度集成的Ka频段上变频器，I/Q和IF接口直接来自卫星通信调制解调器



Parameter	ADMV4540
RF Input Freq (GHz)	17 to 22
Baseband 1 dB BW (I/Q) (GHz)	DC to 0.5
Max Conversion Gain (dB)	>50
Gain Control Range (dB)	>50
IIP3_High Gain (dBm)	-3**
Noise Figure (dB)	5 at max gain
Power Consumption (W)	3.2
Package Size (mm)	7 × 7

\*\*Pin = -30 dBm Composite Input

图5. 高度集成的Ka频段下变频器，I/Q接口直接通向卫星通信调制解调器

## 更高性能的终端UDC

终端市场中的一些应用是由性能驱动的，对尺寸和最低成本设计目标的限制较少。这些应用可以选用分立RFIC解决方案。由于元器件位于不同封装中，因此可以混合使用多种工艺技术——包括MESFET、pHEMT、BiCMOS和CMOS IC——来优化设计要求。分立设计允许对性能与尺寸进行多方面权衡，设计过程的灵活性非常大。设计人员可以创建更高性能、提供更高输出功率并支持更宽带宽的无线电。此外，设计人员可以提高接收器灵敏度以改善动态范围和杂散性能。应当注意的是，地面站/网关也属于此类解决方案。网关的尺寸更大，其集成度要求当然不能与终端同日而语。网关利用不同的工艺技术来为市场提供性能优化的解决方案。ADI公司将继续扩大分立解决方案产品系列以应对这种使用场景。图6展示了一种分立式高性能解决方案。

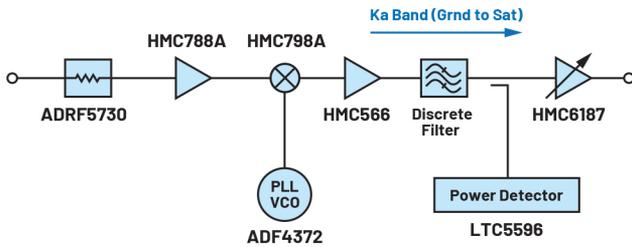


图6. 分立式HMC798A Ka频段用户终端的功能框图

## 使用电子可控天线降低用户终端成本

传统上需要专业承包商来安装设备和定位卫星位置，与此相关的安装成本很昂贵，故多家公司致力于消除这种安装成本以降低用户终端的部署成本。为实现这一目标，须将天线与处理通信链路所需的所有电子设备（如移相元件、RFIC UDC）结合在一

个室外单元(ODU)中。ODU是位于室外并瞄准天空的天线阵列。室内单元(IDU)连接到ODU，用作传统路由器（有线或无线），为用户（如PC或电话）提供互联网连接。

如前所述，LEO星座会有许多卫星进出地面终端的视野，而电子可控天线(ESA)可以通过电子方式控制卫星方向上的发射和接收能量束，从而实现高指向性，故使用ESA的效率要高得多。因此，当卫星进出用户终端的视野时，从一颗卫星到另一颗卫星的切换几乎瞬时完成，最佳链路得以保持。事实上，考虑到轨道周期和正常运行过程中需要连接的卫星数量，那么ESA几乎是一项必不可少的要求。

为了应对这一挑战，ADI公司开发了Ku频段波束成形集成电路(BFIC)技术。ADMV4680是一款针对用户终端设计的硅解决方案，允许通过半双工通道独立控制信号的增益和相位。令人惊异的是，该IC的尺寸只有8.2 mm<sup>2</sup>，如图7所示。

为了开发BFIC技术以使整体无线电成本最小化，最重要的是系统和阵列专业知识。机械组装和PCB设计（包括堆叠和层数）是无线电成本驱动因素的一部分。在开发BFIC的时候顾及到机械和PCB设计，就能尽量降低整体无线电成本。ADI公司与客户密切合作，并有内部PCB专家来帮助解决这个问题。事实上，IC设计和最终配置是系统权衡研究的一部分。

采用ESA来跟踪LEO卫星并优化链路速度，可以实现低成本设置，这些设备通常是即插即用的。ESA和向集成度更高的ODU的迁移，从根本上简化了系统的部署并降低了成本。ESA还有利于实现更扁平的面板和赏心悦目的设计。

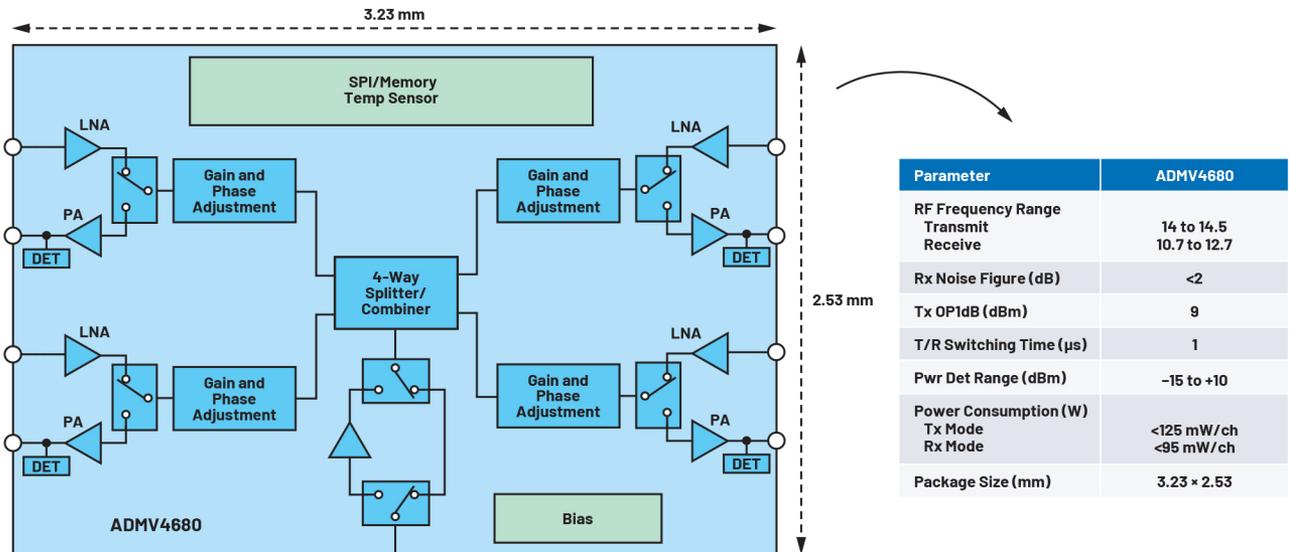


图7. 高度集成的半双工Ku频段4通道波束成形IC

值得注意的是，最高性能的终端应用会使用双抛物面操纵的天线。在这种情况下，成本和美观不是主要驱动因素，整体性能才是重点。对于消费类和注重成本的小型企业解决方案，ESA是实现低无线电成本并且达成系统设计目标的有效方式。

## 结语

LEO互联网连接是一个令人激动的新领域，如今大多数政府和互联网提供商都在思考这场太空竞赛。随着世界的互联程度不断提高，LEO将进一步增强3GPP标准从太空到农村地区的连接能力，从而在5G中发挥重要作用。用户终端的RFIC集成要求变得越来越有挑战性，ADI公司将继续在这一领域开发解决方案并按规划推出IC新产品。



## 作者简介

Donal McCarthy是ADI公司微波通信部（爱尔兰科克）市场营销与业务发展总监。他拥有科克大学的工商管理学士学位、波士顿学院的工商管理硕士学位和都柏林爱尔兰管理学院的市场营销学位。Donal担任过多个职位，包括MACOM设计工程师、Hittite现场销售工程师和营销职位以及ADI公司营销经理和总监职位。

## 参考资料

Shkelzen Cajaj. “The Parameters Comparison of the 'Starlink' LEO Satellites Constellation for Different Orbital Shells”. *Frontiers in Communications and Networks*, 第2卷, 2021年5月。

Tasneem Darwish、Gunes Karabulut Kurt、Halim Yanikomeroglu、Michel Bellemare和Guillaume Lamontagne. “LEO Satellites in 5G and Beyond Networks: A Review from a Standardization Perspective”. *IEEE Access*, 第10卷, 2022年3月。

Brad Hall. “Ka频段需要更多带宽？这里有三个选项”。ADI公司, 2017年11月。

Yasmine King. “商业航天卫星的新时代”。ADI公司。

