



毫米波波束成形和 相控阵基础知识

Anokiwave Is Now
Qorvo



cn.qorvo.com



beamforming-sales@qorvo.com

2024 年，Qorvo 收购了 Anokiwave。两家公司各自优势的结合，让 Qorvo 得以提供高度集成的完整解决方案和 SiP，满足国防、航天和网络基础设施应用的需求。

Anokiwave 创新的有源天线 IC 产品组合，结合 Qorvo 在产品互补性、全球影响力和市场占有率方面的优势，为实现高度集成和高性能的有源天线提供了新的选择，有望将[有源相控阵天线技术普及开来](#)。

本白皮书旨在阐述毫米波系统的核心技术，即有源天线波束成形的基本概念，并介绍在 5G 网络、卫星通信平板阵列和国防与航天系统等应用中，有源天线所采用的通用波束成形架构。鉴于 Anokiwave 已被收购，白皮书对所有相关引用都进行了更新。

© 06-2024 Qorvo US, Inc. 版权所有 | QORVO 是 Qorvo US, Inc. 的商标。

摘要

爆发式增长的数据需求需要更多频谱来承载。由于低频段的稀缺性，业界把目光转向了高频段，也就是毫米波频谱。利用毫米波频谱的系统可以轻松支持更高的数据速率，并适应不断增长的流量需求，为用户提供更快速、更稳健的连接体验。

构建毫米波系统并非易事。多年来，国防和航天市场一直使用相控阵天线技术来克服与毫米波频段相关的高路径损耗，但这些系统结构复杂、成本高昂，而且对专业技术水平有很高的要求。随着商业应用市场的发展，相控阵天线的对称实现方案（在印刷电路介质中采用硅基四路波束成形架构）因具有大容量、低成本、易于扩展等优势，已经成为满足系统的性能和成本目标的首选技术之一。

本文讨论了毫米波系统的核心技术，即有源天线波束成形的基本概念，并介绍在 5G 网络、卫星通信平板阵列和国防与航天系统等应用中，有源天线所采用的通用波束成形架构。



目录

摘要III

无处不在的连接需要毫米波频谱和有源天线 1

有源天线基础知识 2

波束成形原理和考量因素 3

阵列方向性和增益 4

有源天线波束成形考量因素 13

模拟波束成形 13

数字波束成形 14

混合波束成形 16

理想的毫米波解决方案 18

可扩展性 18

性能 19

成本 20

结论 21

尾注 22

“预计到 2030 年，全球毫米波技术市场规模将达到 298.5 亿美元，2023 年至 2030 年期间的复合年增长率为 40.20%。无线通信需求、5G 网络部署、高数据速率、数据密集型应用的带宽容量、改善网络延迟的需求、新兴物联网 (IoT) 应用、先进雷达和成像系统、安防和监控应用以及对高速无线回程解决方案的需求，都是推动这一市场增长的动力。”¹

无处不在的连接需要毫米波频谱

作者：David Corman, Anokiwave 公司

爆发式增长的数据需求正推动毫米波技术市场不断增长。数据消费量的指数级增长需要更多的频谱资源来支撑。中低频段的频谱越来越稀缺，而利用毫米波频谱的无线电可以轻松支持更高的数据速率，并适应不断增长的流量需求，为用户提供更快速、更稳健的连接体验。

有源电子扫描天线 (AESA)，也称为有源电子相控阵或天线，是实现毫米波通信的关键支持技术。相控阵天线是国防和航天应用所采用的一项成熟技术，用于克服与毫米波频段相关的高路径损耗。过去，这项技术成本高昂且结构复杂，不是商业应用的可行选择。但现在，硅基 IC 技术的创新使它成为新一代通信网络不可或缺的一部分。

本文讨论了毫米波系统的核心技术，即有源天线波束成形的基本概念，并介绍在 5G 网络、卫星通信平板阵列和航天与国防系统等应用中，有源天线所采用的通用波束成形架构。



5G 网络、国防、航天、军事和卫星通信领域的部署有源天线，正在推动毫米波频谱的应用大幅增长。

有源天线基础知识

《相控阵天线手册》² 将有源天线定义为“由多个固定元件组成，这些元件以相干方式馈电，每个元件使用可变相位或时间延迟控制，以使波束扫描空间中的给定角度”。因此，有源天线具有电子扫描波束，而没有移动部件；由位于天线辐射元件处的 IC 实现方向调整。

带波束成形 IC 的有源天线具有所谓的“软故障机制”，即由于阵列中存在许多元件，因此少数元件的故障通常对天线整体的性能影响不大。有源天线可以在微秒时间内调整波束方向，并且支持多个同步、独立控制的波束。有源天线没有机械万向节部件，因此外形扁平，性能可靠。有源天线能够控制零点方向，而且由于具有许多元件，因此有源天线可以非常灵活地阻挡干扰源和干扰器。有源天线能够产生精确的辐射孔径方向图。

对于 5G 通信，天线工作在毫米波频率，例如 24 GHz、26 GHz、28 GHz、37 GHz 和 39 GHz，而卫星通信平板天线工作在 Ku 频段（10.7 至 14.5 GHz）和 Ka 频段（17.7 至 31 GHz）。在这些高频率下，波长非常短，许多天线元件可以放置在紧凑、高度定向的孔径中，从而抵消毫米波频率下的高路径损耗。高度定向波束的另一个关键优点是提供了空间分集，多个波束可以复用相同的频谱，从而大幅提高系统容量。

为使毫米波系统实用且高效，Anokiwave（现为 Qorvo 的一部分）将有源天线的基本技术应用于 Silicon Core IC 系列，以覆盖 5G 和卫星通信网络的不同毫米波频段，并创建满足商业成本要求的高性能系统。

波束成形原理和考量因素

有源天线波束成形分析本质上是复数运算。如图 1 所示，我们有一个沿 x 轴排列的线性阵列，天线元件间距为 d ，等于自由空间波长除以 2。如果每个元件都由适当的相位激发，那么就可以在远场中以期望的方向相干地形成波束。

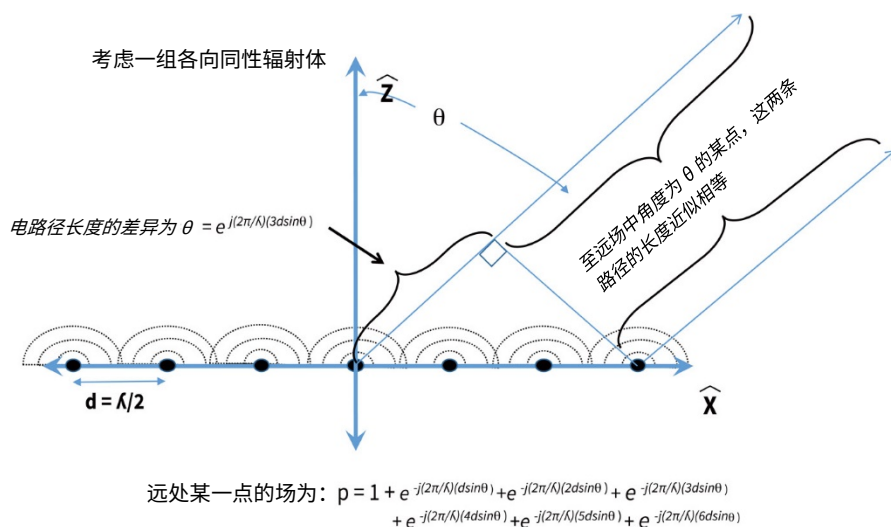


图 1：有源天线波束成形分析

在图 2 中，我们以不在阵列瞄准方向上的飞机目标为例，飞机到阵列中每个元件的距离略有不同。假设元件之间的间距为 d ，来自飞机的能量的到达角为 θ ，则相邻元件之间的增量路径长度差为 $d \cdot \cos(\theta)$ 。为了补偿路径长度的差异，我们可以在每个元件后面放置移相器。当应用适当的相移时，便可在远场相干地形成波束。请记住，要形成波束，能量必须以相同的相位和幅度在相同的时间到达求和节点。我们称之为“相干合并”。

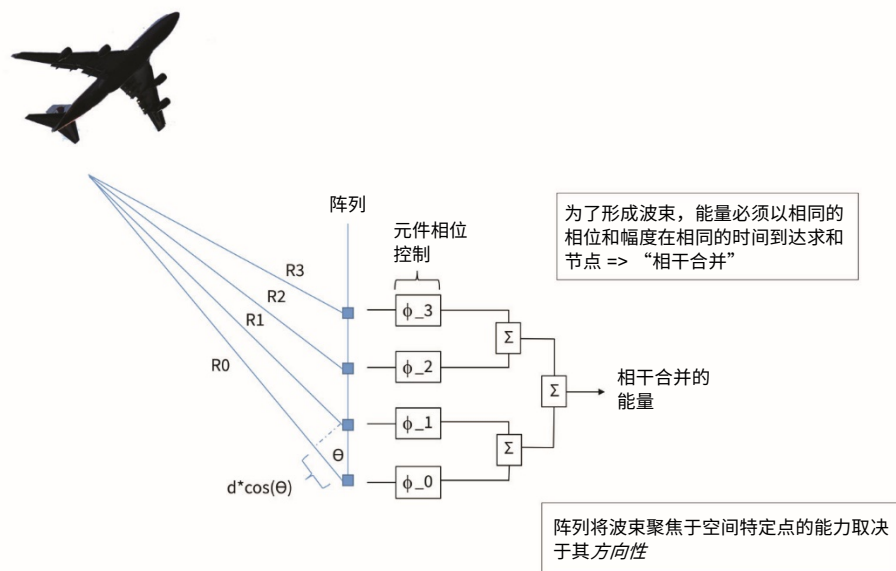


图 2：能量相干求和 - 线性阵列

阵列方向性和增益

方向性用于衡量天线增益在给定方向上相对于各向同性辐射体的集中程度。它遵循 $10 \cdot \log(N)$ 的关系，其中 N 为阵列中的元件数量。然而，增益除了考虑方向性之外，还要考虑欧姆损耗和扫描损耗。

因此，一般来说，阵列增益等于 $10 \cdot \log(N)$ 加上嵌入式元件增益 (G_e)，再减去欧姆损耗和扫描损耗：

$$\text{阵列增益} = 10 \cdot \log(N) + G_e - L_{\text{OHMIC}} - L_{\text{SCAN}}$$

G_e 为嵌入式元件增益，即嵌入阵列中的单个辐射体的增益。如果辐射元件在方位角和仰角方向上的间距均为 $\lambda/2$ ，则每个元件的面积为 $\lambda^2/4$ 。天线增益为 $4\pi/\lambda^2 \cdot A_e$ ，其中 A_e 为天线的有效面积，因此 G_e 等于 π 或 5 dBi。

请注意，每向阵列添加一个元件，接收器 (Rx) 阵列的 G/T 都会增加 $10 \cdot \log(N)$ 。随着孔径尺寸增大，噪声系数保持不变。相比之下，发射器 (Tx) 阵列的等效全向辐射功率 (EIRP) 增加 $20 \cdot \log(N)$ ，每添加一个元件，远场的阵列增益和发射功率都会增加。显然，利用有源天线实现 G/T 比实现 EIRP 要难得多。

图 3A 显示了 G/T 如何随阵列大小而变化。此图假设格栅间距为 $\lambda/2$ ，系统噪声系数为 5 dB，馈电损耗和天线罩损耗均为 0.5 dB。图 3B 显示了 EIRP 如何随天线尺寸和每个元件的 RF 功率而变化。此图使用相同的 $\lambda/2$ 格栅间距，并假设每个元件的发射功率为 +9 dBm。

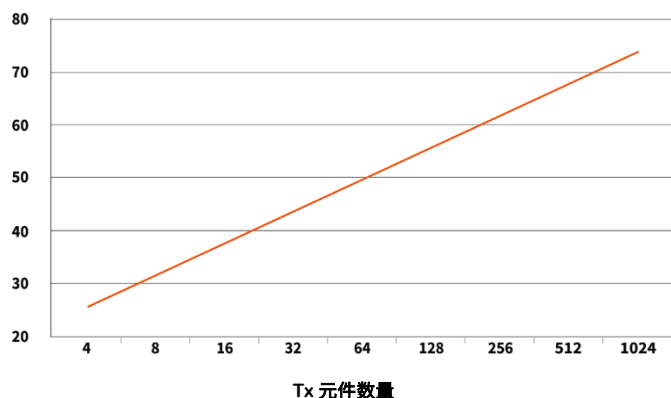


图 3A: G/T 随元件数量而变化的示例

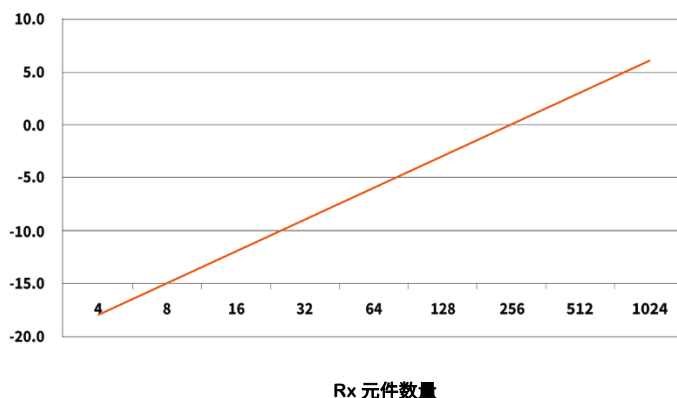


图 3B: EIRP 随元件数量而变化的示例

系统工程师为了生成详细的 G/T 和 EIRP 预算，通常会考虑广泛的变量，包括系统噪声系数、嵌入式元件增益、工作频率、每个元件的发射功率、元件与 T/R 功能之间的损耗、扫描损耗、极化器和天线罩的影响以及温度。

图 4 显示了线性阵列的一些示例，具体来说，包含 16、32 和 64 个元件。图中显示了主瓣和旁瓣。天线方向性遵循先前确定的 $10 \cdot \log(N)$ 关系，其中 N 为阵列中的元件数量。天线规模每增加一倍，波束宽度就会减半，方向性也会提高一倍，或者提高 3 dBi。

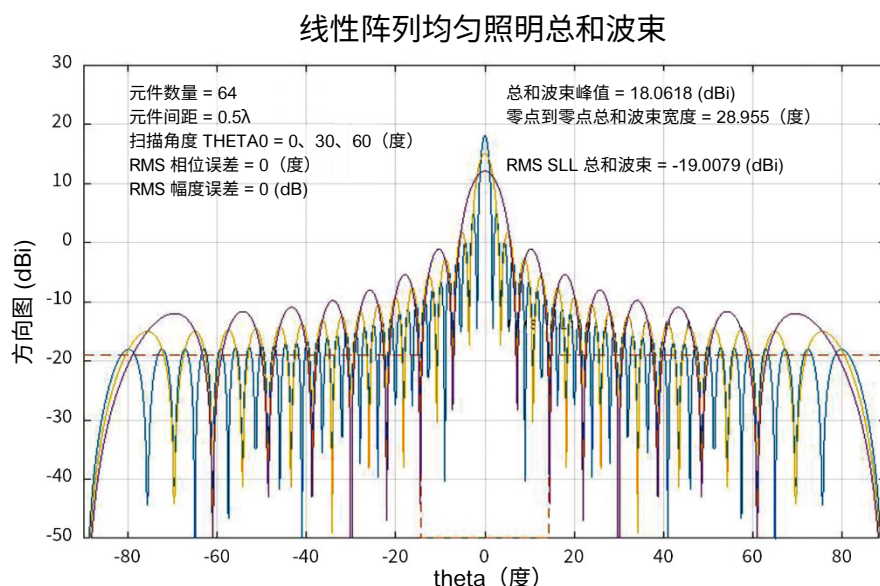


图 4：均匀照明线性阵列的示例：64、32、16 个元件

使用移相器来控制有源天线波束时，会涉及一种称为“波束偏斜”的特性（图 5）。移相器通过近似计算时间延迟，以电动方式控制波束。结果是，移相器只能在中心频率时良好地控制波束；在最大工作频率时，波束会转向不足；在最小工作频率时，波束会转向过度。然而，权衡精度与电路尺寸，移相器比时间延迟功能更受青睐。事实上，除了瞬时带宽非常宽的应用（如电子战）或非常大的阵列，移相器几乎可以为所有有源天线应用提供良好的精度。

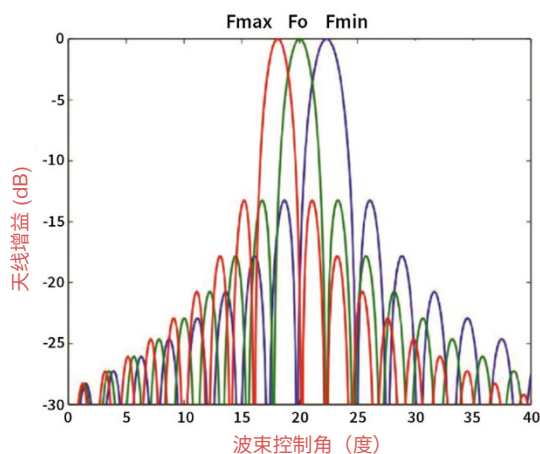


图 5：波束偏斜

所有有源天线的另一个特性是，当波束偏离瞄准方向（定义为 $\theta=0$ ）时，孔径增益会有损失。此特性称为扫描损耗，遵循 $10 \cdot \log(\cos^N(\theta))$ 的关系，其中 θ 为偏离瞄准方向的扫描角度， N 为数值，通常在 1.3 以内，用于修正嵌入式元件增益的非理想各向同性行为。

图 6 显示了扫描损耗（以 dB 为单位）与扫描角度（以度为单位）的关系。请注意，在零点处，瞄准角为零度，没有扫描损耗。当扫描角度增加到 45 度时，扫描损耗为 2 dB。如果扫描角度增加到实际可行的极限 60 度，则扫描损耗为 4 dB。因此，有源天线必须设计得比标准尺寸更大，以便在最大扫描条件下提供所需的 G/T 和 EIRP。

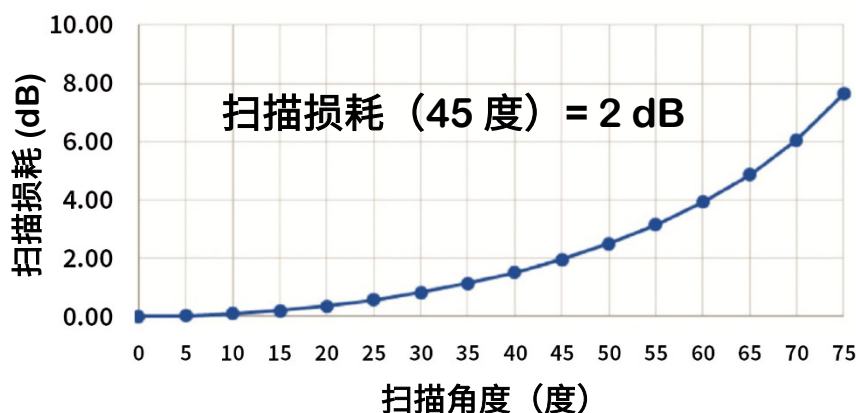
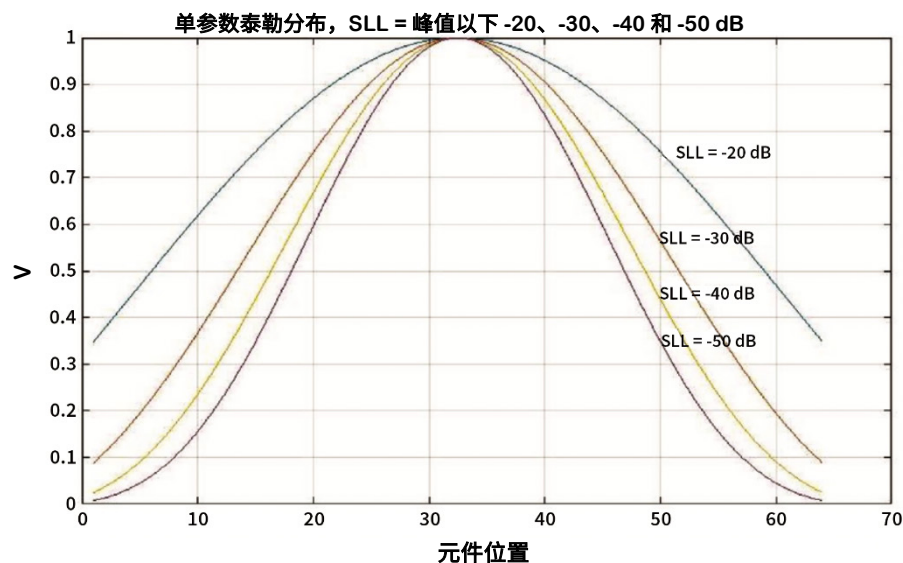


图 6：扫描损耗

锥化是为阵列中的各个元件分配不同增益的过程。其中，中心元件被分配最高增益，而外围元件被分配较低增益。图 7 展示了如何实现不同程度的锥度。所示例子是一个 64 元件阵列，因此每条曲线的最大增益出现在元件 32 处，即阵列中心处。请注意，随着元件距阵列中心越来越远，元件增益降低得越快，旁瓣的抑制就越强。图 7 中的曲线显示了 -20、-30、-40 和 -50 dB 的旁瓣电平的影响。



低旁瓣分布“锥化”至孔径：

-20 dB、-30 dB、-40 dB、-50 dB（相对于峰值）

图 7：锥化与旁瓣电平

这就是为什么波束成形通常包括每个元件的幅度控制，而不仅仅是相位控制。如果所有元件都以相同的增益处理，则称之为“均匀照明”。均匀会导致第一旁瓣电平为 -13 dBc，由于监管、干扰或隐身原因，这对于某些应用来说可能是无法接受的。

通过增益控制，系统工程师可以调整每个元件的增益，实现所需的较低旁瓣电平。

图 8 显示了施加不同锥度（具体来说相对于峰值的 -20、-30、-40 和 -50 dB）后的叠加旁瓣电平。观察应用锥度所造成的旁瓣电平抑制。这是一个 64 元件阵列，方向性为 18 dBi ($10 \cdot \log(64)$)。

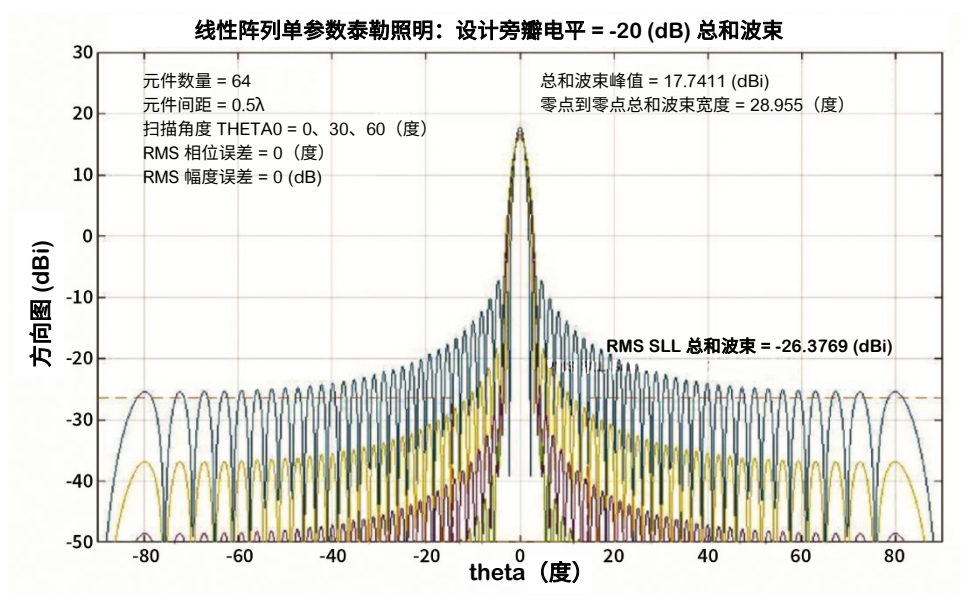


图 8：泰勒分布示例：-20 dB、-30 dB、-40 dB、-50 dB（相对于峰值）

Qorvo IC 通常在 0-31.5 dB 范围内以 0.5 dB 的步长提供元件增益控制，这通常足以满足幅度锥化和其他主机系统控制的需求。最后要注意的是，锥度不会随着扫描角度而变化。

锥度可能是一件好事，但它是有代价的。对于相同规模的阵列，当应用锥度时，方向性会小于均匀照明，并且波束宽度会更宽。表 1 列出了应用于阵列的一系列锥度。顶行是均匀照明，旁瓣为 -13 dBc，如前所述。下面显示的是 -20、-30、-40 和 -50 dB 旁瓣电平的行。注意其方向性逐渐降低，效率也不断降低。如表所示，如果应用 -50 dB 锥度，阵列将损失整整 2 dB 的效率。

所需 SLL dB (相对于峰值)	B	D - 方向性 (dBi)	η - 效率 (dB)	$B_{\text{null-to-null}}$
-13.26	0	18.06	0.0	3.6
-20	0.7386	17.74	-0.32	4.5
-30	1.2762	17.05	-1.01	5.8
-40	1.7415	16.51	-1.55	7.2
-50	2.1793	16.08	-1.98	8.1

表 1：单参数泰勒分布中所需旁瓣电平的 B 值

有源天线的另一个特性是波瓣，它主要受格栅间距（即元件之间的间距，变量 d ）影响。为了避免寄生波瓣（即在不希望的波束方向上出现天线响应），格栅间距必须遵循以下规则：

- 对于矩形格栅， $d/\lambda_0 < 1/(1 + \sin\theta)$ （最小间距 = $0.5 \lambda_0$ ，90 度扫描）
- 对于三角格栅， $d/\lambda_0 < 1.15/(1 + \sin\theta)$ （最小间距 = $0.575 \lambda_0$ ，90 度扫描）

其中， λ_0 为自由空间波长， θ 为最大扫描角度， d 为天线元件的间距。对于矩形格栅的有源天线，格栅间距的常见值为 $0.55 \lambda_0$ 。

图 9 显示，所需的格栅间距是频率的函数。该图反映了格栅间距（以毫米为单位）与工作频率的关系。请注意，频率较低时，较大格栅间距会使平面有源天线的设计变得容易点。但看看 28 GHz 及以上频率发生的情况：格栅迅速收缩，留给 T/R 功能和波束成形电子元件的空间非常小。对于高性能有源天线来说，将其放入格栅内非常重要，只有这样才能保证馈电损耗尽可能低，EIRP 尽可能大，接收器噪声系数 (NF) 尽可能小。

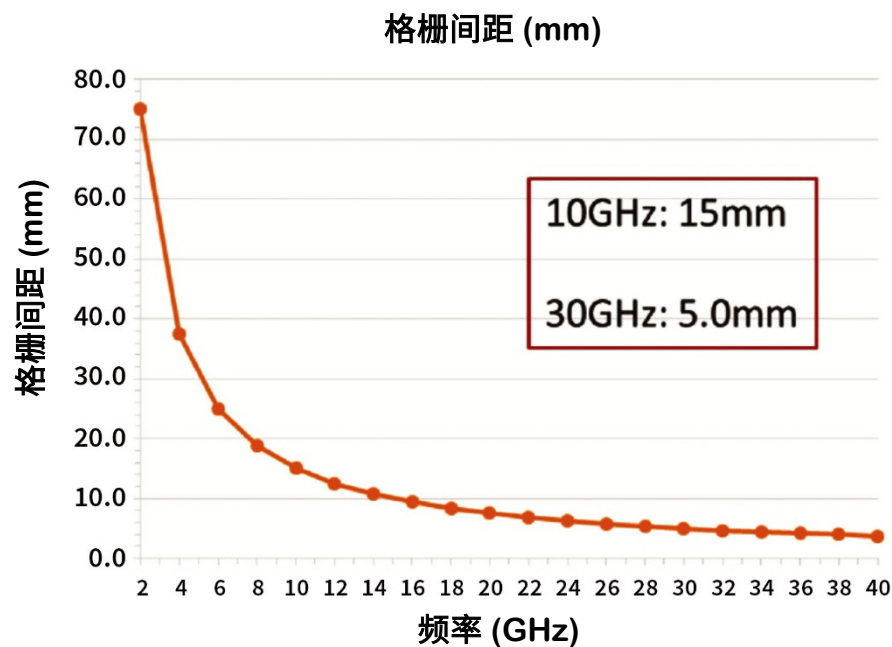


图 9：格栅间距计算示例

毫米波频段的 $\lambda/2$ 格栅非常小：14.5 GHz 时为 10.3 mm，28 GHz 时为 5.4 mm，39 GHz 时为 3.85 mm。在这里，芯片的高集成度至关重要。如上所述，要实现毫米波平面有源天线，最高效的方法之一是使用高度集成的硅 IC 将电子元件放入格栅内，与辐射元件位于同一平面上。如下图 10 所示，四元件 IC 最适合信号路由和与其他元件集成。

毫米波频段的 $\lambda/2$ 格栅很小：39 GHz 时为 3.85 mm。高集成度至关重要；要实现毫米波平面有源天线，最高效的方法之一是使用高度集成的硅 IC 将电子元件放入格栅内，与辐射元件位于同一平面上。

四元件 IC 非常适合信号路由和与其他元件集成。

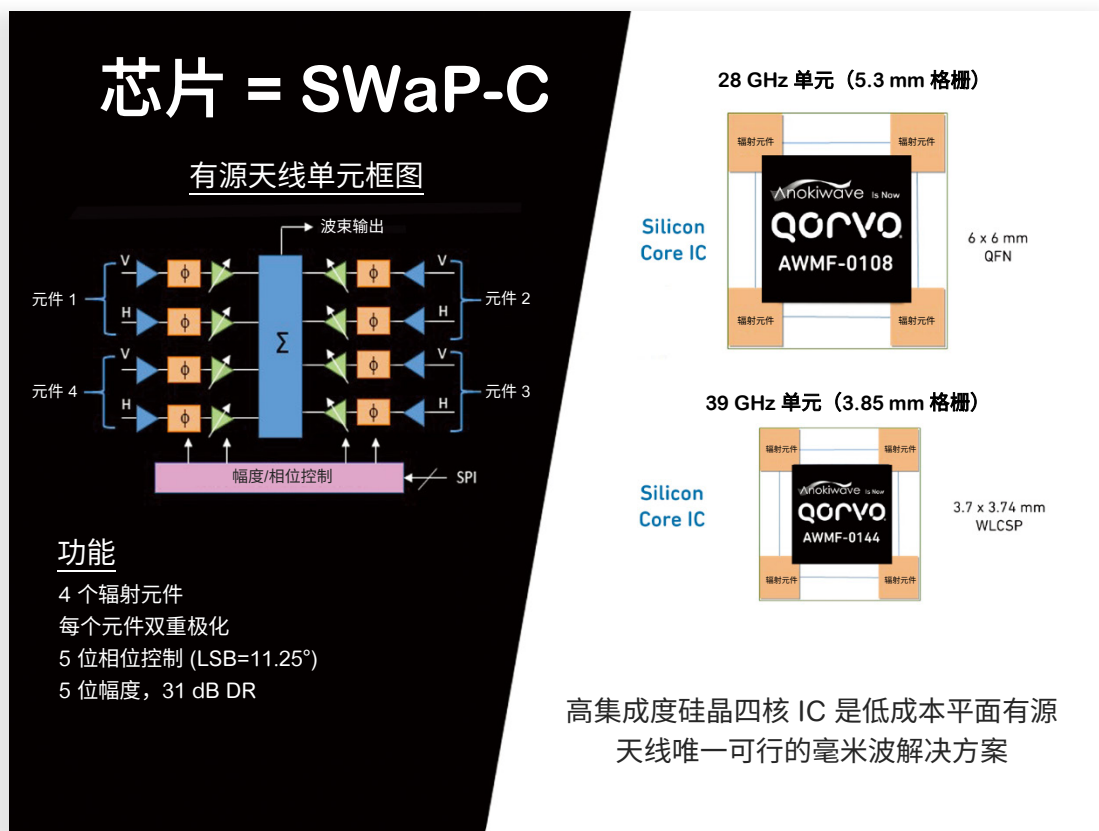


图 10：高集成度的硅 IC 对于实现毫米波频率的平面有源天线至关重要

有源天线波束成形考量因素

有源天线采用的通用波束成形架构有三种：模拟波束成形、数字波束成形和混合波束成形。本部分先概要介绍每种方法，然后比较每种方法的优缺点。请注意，在下面的部分中，框图都是接收器框图。发射器框图看起来类似，只是方向相反，并且使用 DAC 而不是 ADC。

模拟波束成形

到目前为止，我们讨论的都是模拟波束成形，其工作原理是：对阵列中的每个元件应用相移，然后进行相干功率求和。框图（图 11）中包含了适当的下变频器和 ADC，以构成完整系统。

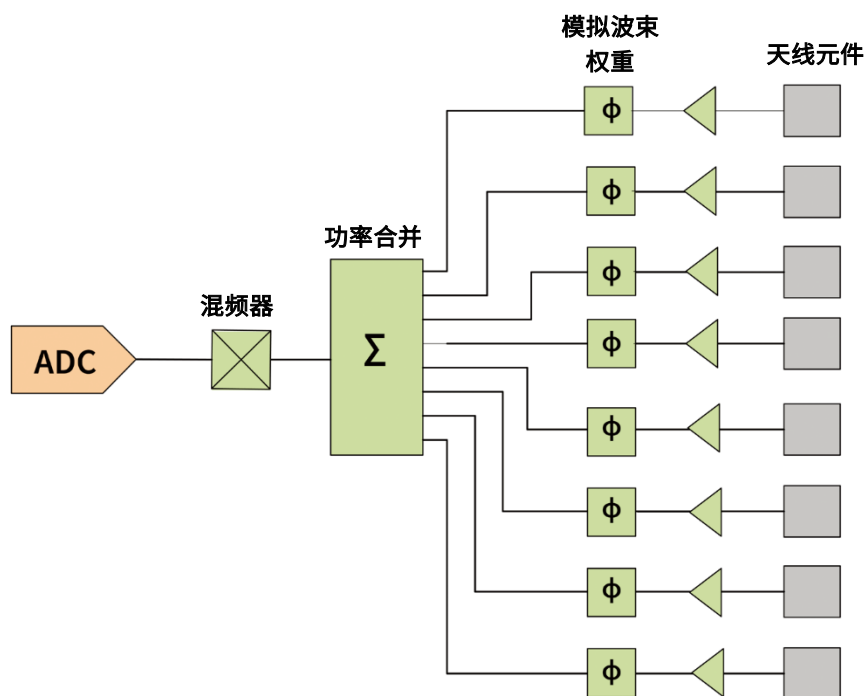


图 11：模拟波束成形框图

模拟波束成形的优点	缺点
硬件实现起来最简单	单波束
在高频率情况下，硬件可以放入格栅内	波束数量由硬件固定，无法更改
波束可利用全阵列的增益	
系统直流功耗最低	

表 2：模拟波束成形考量因素

数字波束成形

在数字波束成形中，波束是使用复数数字权重形成的，而不是使用模拟移相器（图 12）。为此，阵列中的每个元件都需要从天线元件到数字的完整接收链。这仅在低频（如 S 频段）情况下实用，此时格栅很大，有足够的空间在阵列上放置所需的硬件。这种方法在毫米波频率情况下并不实用，因为格栅紧密导致空间不足。

其他重大挑战包括：高直流功耗，特别是如果要对大带宽进行数字化；信号路由复杂性，须将多位的 I 和 Q 线从阵列布线到数字处理器（想象一下路由 8 位 I 和 8 位 Q 乘以阵列中的元件数量！）；以及阵列内的 LO 信号路由。从好的方面看，如果能够解决这些挑战，那么这种架构是最灵活的，因为它能动态形成多个波束和零点，而无需改变硬件，并且每个波束都能利用全阵列的增益。

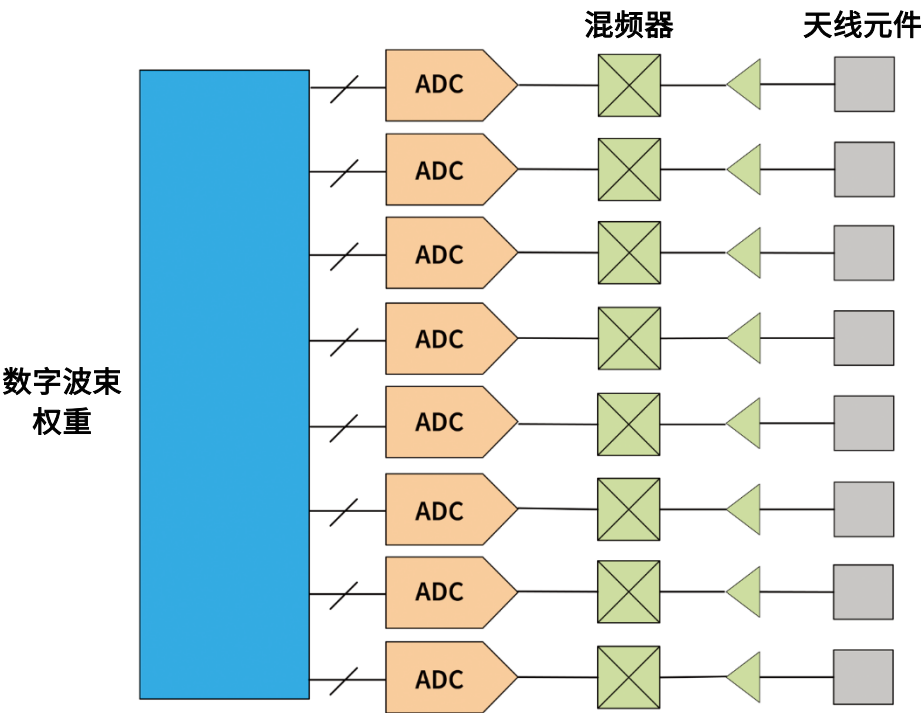


图 12：数字波束成形框图

数字波束成形的优点	缺点
波束和零点数量方面具有极大的灵活性	直流功耗最高
可提供大量波束	I/Q 信号路由复杂
波束数量可动态改变，而无需改变硬件	LO 信号路由复杂
每个波束都能利用全阵列的增益	硬件复杂度最高——阵列中每个元件都有完整的 RF 链
	在高频率情况下，硬件无法放入格栅内

表 3：数字波束成形考量因素

混合波束成形

混合波束成形是模拟波束成形和数字波束成形的结合。波束概念（图 13）涉及从全阵列的一部分形成模拟（子阵列）波束。在图 14 中，较宽黑色波束表示嵌入式元件的增益，红色波束是模拟子阵列波束，两个蓝色波束是数字波束。为简单起见，图中仅显示了两个数字波束，但实际上可以形成许多波束。

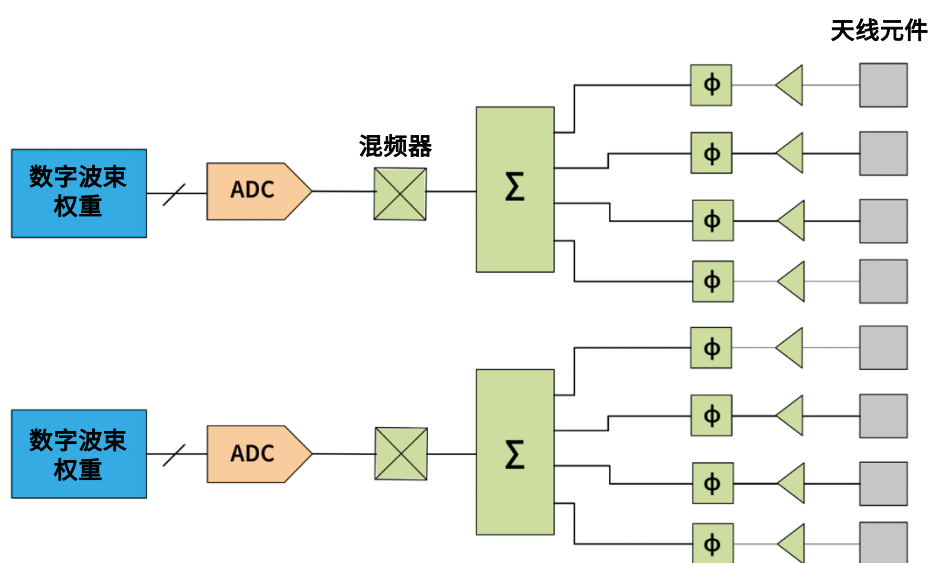


图 13：接收混合波束成形框图

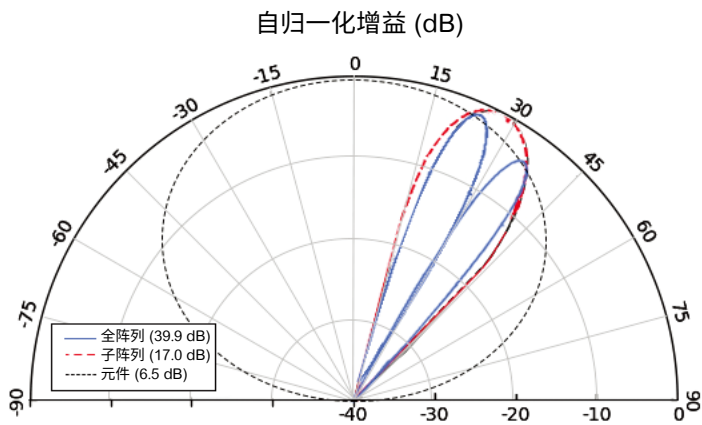


图 14：混合波束成形波束图示

整个阵列被分成多个子阵列，每个子阵列分配一个单独可控制的模拟波束。然后，利用数字波束成形在模拟波束内形成许多波束。这种方法的优点在于：适用于毫米波频率；提供了数字灵活性，可以在不改变硬件的情况下动态形成许多波束和零点；不需要为每个元件配备完整的 RF 链，只需要为每个子阵列配备完整的 RF 链。鉴于这种方法具有诸多优点，它理所当然地成为当今新兴毫米波通信系统中最常用的波束成形方法之一。

混合波束成形的优点	缺点
波束和零点数量方面具有极大的灵活性	数字波束只能在模拟波束内形成
可提供大量波束	
波束数量可动态改变，而无需改变硬件	
在高频率情况下，硬件可以放入格栅内	
无需复杂的信号路由	
阵列中无 LO 可供分配	

表 4：混合波束成形考量因素

理想的毫米波解决方案

Qorvo 提供非常丰富的毫米波产品组合，并致力于通过关键创新为市场提供至关重要的解决方案，帮助 OEM 保持领先地位。

Qorvo 的目标是向客户提供见解、知识、专业经验和工具，让无线电和天线制造商能够以快速且经济高效的方式大规模地成功构建有源天线。

可扩展性

卫星通信和 5G 系统在各自市场中有着截然不同的用例。卫星通信系统在 EIRP（有效全向辐射功率，发射功率的一个指标）和 G/T（Rx 天线增益/系统噪声温度，衡量接收器的质量）方面有着不同的要求，而 5G 系统由于用例的多样性（小基站、GNodeB、消费类），其 EIRP 也各不相同。

相控阵天线自然是一种很好的技术解决方案，因为只要设计得当，其规模可以非常方便地进行扩展。这可通过可扩展子阵列构建模块来实现，所设计的系统规模可以根据应用需求轻松调整。

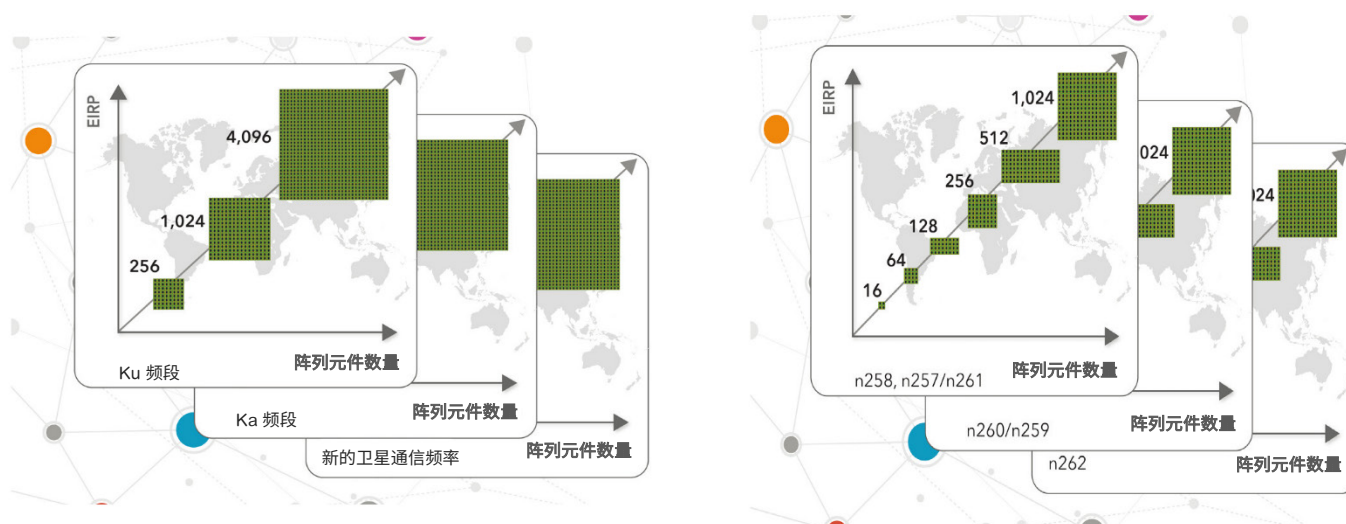


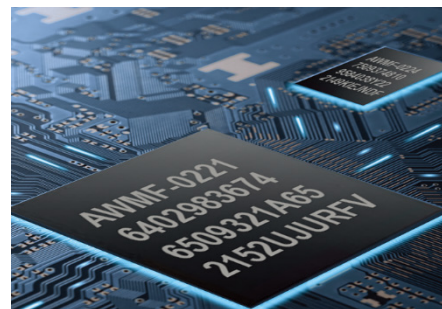
图 13：借助 Qovo 的四通道架构，客户可以在可扩展平台内为任何给定用例快速设计阵列。

性能

Qorvo 的全硅基智能天线解决方案成本更低，性能更高，可满足商业市场的需求。这些产品自首次发布以来经过多代优化，先进的独特架构让制造商能够构建 EIRP 范围从 30 dBm 到 70 dBm 的可扩展阵列。

我们通过创新为制造商带来的一些性能优势包括：

- Kinetic Green™：通过动态阵列控制和快速衰减器控制来降低能耗，可关闭某些元件和阵列行来塑造波束并降低直流功耗，支持 5G 行业的可持续发展目标。
- ZERO-CAL®（已获专利，零校准）：每个 IC 都能自行调整至规定的性能水平，同时减少阵列校准需求。
- 数字预失真 (DPD)：通过更高的线性 EIRP、更低的直流功耗、尽可能小的散热器和其他创新方法，提升系统效率。
- 超快速波束控制（已获专利）：天线能够快速改变波束方向，从而满足 5G 时序协议的要求。
- 可变最大线性功率 (vMLP)：能够灵活地调整系统的功率量，并避免不同要求之间的干扰。
- 智能阵列：由 IC 中包含的数字核心定义，允许用户监控阵列操作中的 IC 性能并实时应用关键校正。
- 极化灵活性：在卫星通信天线中，产生和控制任意极化的能力对于支持不同系统要求至关重要。

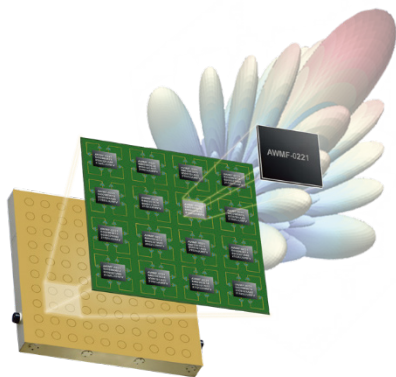


Anokiwave（现为 Qorvo 的一部分）提供商用波束成形器 IC 已有 20 多年的经验，对商用毫米波相控阵天线的精细之处有着其他公司所不具备的独到见解和深刻理解。这种独特的优势体现在 IC 的诸多特性上，并帮助我们的客户取得成功。

成本

对于多元件阵列而言，每平方毫米 GaAs 和 GaN 的高昂成本导致大规模毫米波应用的解决方案过于昂贵。高集成度的硅基波束成形器 IC 提供了兼容的尺寸，可轻松集成到阵列格栅中，并且其成本可以随着产量增加而降低，非常适合大规模应用。通过结合新的印刷电路板 (PCB) 材料/制造能力，成本可以降低，更重要的是，大规模量产成为可能。较新的架构基于商业上可行的多层 PCB，一面放置辐射元件，另一面放置表贴 IC。这些架构采用现有广泛用于生产大批量商用手机和 WiFi 接入点产品的技术制造，因此在成本和性能上具有可行性。

底层 IC 架构使单个 IC 能够支持四个天线元件的双极化馈送。这些 IC 具有低压单电源和集成逻辑控制等特性，可轻松集成到相控阵天线终端中。专为批量生产而设计的商用芯片制造工艺确保能以低成本实现高性能。



Anokiwave (现为 Qorvo 的一部分) 发明的四通道 BFIC 架构使得相控阵天线能够以对称的方式实现，同时具备大容量、低成本、可扩展的优势。它已被应用于毫米波系统中，大幅降低了系统成本。

Anokiwave (现为 Qorvo 的一部分) 自创立以来交付了数百万片 IC，成本降低了 95% 以上。这些 IC 满足各种 AESA 天线要求，并在商用的卫星通信终端和 5G 系统中表现出了可靠的性能。

结论

我们介绍了有源天线毫米波波束成形的关键性能指标。

为了构建和制造用于毫米波系统的真正平面有源天线，所有必需的波束成形和波束控制电子元件都必须集成在天线平面中，并安装在辐射元件之间。格栅尺寸与波长成反比，在毫米波频率情况下，格栅尺寸非常小，因此元件的集成和安装变得越来越困难。将所有必需的波束成形功能集成到一个 IC 中，是实现极小尺寸下多元件波束成形功能的最高效方法之一。

目前，Qorvo 已批量生产多代采用四通道架构硅基 IC 的毫米波产品，用于卫星通信、国防和航天以及 5G 领域。

凭借服务多个细分市场的能力，我们得以将各个市场中的创新应用到我们的产品中。这样一来，我们就可以不断利用所有细分市场的发展成果，并将这些成果引入新的细分市场，找到新的应用场景。

Qorvo 的毫米波 IC 提供高性能、低成本的解决方案，使得相控阵天线能够应用于卫星通信用户终端、5G 网络以及国防和航天系统，而且目前已实现大批量生产。



关于 Anokiwave

2024 年，Qorvo 收购了 Anokiwave。Anokiwave 创新的有源天线 IC 产品组合，结合 Qorvo 在产品互补性、全球影响力和市场占有率方面的优势，为实现高度集成和高性能的有源天线提供了新的选择，有望将相控阵有源天线技术普及开来。

两家公司通过技术融合，实现了技术创新、商业规模和良好声誉的独特组合，在 5G 毫米波、卫星通信、国防和航天市场取得了公认的商业成功。

- 毫米波硅基 IC
- Intelligent Array IC Solutions®
- mmW Algorithms to Antennas®

尾注

1 - “到 2030 年，毫米波技术的市场规模预计将飙升至 298.5 亿美元以上”，SkyQuest 最新全球研究，2024 年 1 月 30 日

[文章链接](#)

2 - 《相控阵天线手册》（第二版），Robert J. Mailoux 著，版权所有 2005。ISBN：9781580536899 Artech House。