

# 硅基模拟波束赋形芯片综述

李 博, 杨家鑫

(浙江铖昌科技股份有限公司 杭州 310013)

**摘要:** 本文研究了硅基模拟波束赋形芯片在高频、高带宽通信和相控阵雷达系统中的应用及技术发展。5G 及未来 6G 网络的发展,对数据传输速率、抗干扰能力和信号质量提出了更高要求,波束赋形技术成为提升通信和雷达系统性能的关键。本文首先介绍了硅基模拟波束赋形芯片的基本原理,强调了其在低功耗、高集成度和精确波束控制方面的优势,并详细探讨了如何通过优化硅基材料工艺提升频率响应和带宽处理能力。其次,本文介绍了硅基模拟波束赋形芯片中的衰减器、移相等关键技术。最后,论文展望了硅基模拟波束赋形芯片未来的发展方向,重点讨论了自适应波束赋形、低延迟控制、多功能集成和新材料应用等技术的潜力。本文的创新之处在于引入了波束隔离技术,并提出通过优化硅基工艺提升频率响应和带宽处理能力的可行方案,为未来无线通信与雷达系统提供了技术支持。

**关键词:** 硅基模拟波束赋形; 低功耗; 移相; 衰减

中图分类号: TN432.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)04-0014-12

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250219001

CSTR: 32406.14.ycyk.20250219001

引用格式: 李博, 杨家鑫. 硅基模拟波束赋形芯片综述[J]. 遥测遥控, 2025, 46(4): 14-25.

## A Review of Analog Beamforming Chips

LI Bo, YANG Jiabin

(Zhejiang Chengchang Technology Co.,Ltd. Hangzhou 310013, China)

**Abstract:** This paper delves into the applications and the technological advancements of silicon-based analog beam-forming chips in high-frequency, high-bandwidth communication and phased-array radar systems. The context of 5G and the prospective 6G networks, which impose increasingly stringent demands on data transmission rates, anti-interference capabilities, and signal quality, So beam-forming technology has emerged as a pivotal factor in enhancing the performance of both communication and radar systems. Initially, this paper expounds on the fundamental principles of silicon-based analog beam-forming chips, highlighting their distinctive advantages in terms of low power consumption, high integration, and precise beam control. Moreover, it explores in depth exploration of the strategies for optimizing the silicon-based material processing techniques to improve frequency response and bandwidth handling capabilities. Subsequently, the paper elaborates on the key technologies embodied in silicon-based analog beam-forming chips, including attenuators and phase shifters. Conclusively, the paper offers a forward-looking perspective on the future development trends of silicon-based analog beam-forming chips. Particular emphasis is placed on discussing the potential of technologies such as adaptive beam-forming, low-latency control, multi-functional integration, and the application of novel materials. The novelty of this research lies in the introduction of beam isolation technology, and the proposition of a viable approach to enhance frequency response and bandwidth processing capabilities through the optimization of silicon-based processes. This contributes to providing essential technical support for future wireless communication and radar systems.

**Keywords:** Silicon-based analog beamforming; Low power consumption; Phase shift; Attenuation

**Citation:** LI Bo, YANG Jiabin. A Review of Analog Beamforming Chips[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(4): 14-25.

## 0 引言

现代雷达技术快速发展,在军事、航空航天及智能交通等领域,雷达系统对于精确探测、实

时跟踪和目标识别的要求日益提高。相控阵雷达(Phased Array Radar, PAR)作为一种能够动态调整波束方向而不依赖机械转动的雷达系统,因其具有响应速度快、抗干扰能力强和定位精度高等优

点,已成为现代雷达技术的核心之一。在这种背景下,波束赋形技术在相控阵雷达中的应用尤为重要<sup>[1-3]</sup>。波束赋形技术通过控制阵列中每个天线单元的相位和幅度,精准调整雷达波束的方向,以提高雷达的探测能力和跟踪精度。

近年来,电子技术飞速进步,在射频芯片和集成电路设计领域,传统的相控阵雷达系统已经逐渐向更高频、更高精度、更低功耗的方向发展。国外的诸如美国雷神公司(Raytheon)、洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin)等先进雷达系统制造商,已在相控阵雷达的设计中广泛应用了数字和模拟波束赋形技术,以提高系统性能、降低成本。尽管数字波束赋形技术能够实现高精度和高度灵活的波束控制,但由于其计算复杂度高、功耗大且硬件成本较高,在某些应用中,尤其是在对功耗和集成度有严格要求的场景中,存在一定的局限性<sup>[4]</sup>。

与此相比,模拟波束赋形技术在功耗、成本和集成度等方面具有显著优势,尤其适用于需要高效、低功耗的雷达系统。国内企业,如中国科学院电子学研究所和中芯国际等,已在研发适用于相控阵雷达的硅基模拟波束赋形芯片,取得了一定的进展。然而,尽管现有的硅基模拟芯片已在小规模应用中展现出一定的潜力,但如何在保障高性能的同时,进一步提高集成度、降低功耗和系统的复杂性,仍是技术发展中的主要挑战<sup>[5]</sup>。

尽管模拟波束赋形技术在相控阵雷达中表现出巨大的潜力,但它依然面临着一些技术挑战。首先,如何在保持低功耗的同时,确保雷达波束能够在复杂的环境中快速调整并具有足够的灵敏度,是当前研究的重点<sup>[6]</sup>。传统的模拟波束赋形技术在灵活性和精度方面不如数字波束赋形,因此,在多目标跟踪、复杂干扰环境下,其性能仍可能受到限制<sup>[7]</sup>。其次,如何通过集成度高且性能稳定的射频芯片,在提高系统性能的同时,降低功耗和成本,是设计下一代相控阵雷达芯片的关键挑战<sup>[8]</sup>。

未来的研究方向将在通过结合先进的射频集成电路设计和新型工艺来提升模拟波束赋形技术的灵活性和精度。此外,随着5G及未来6G通信技术的快速发展,雷达系统对于高频段和大带宽的需求也在不断增加,这将进一步推动相控阵雷达芯片设计技术向高频、高性能和低功耗方向发展。

## 1 硅基模拟波束赋形芯片基本原理

硅基模拟波束赋形芯片的核心工作原理在于对射频信号的相位和幅度进行精确调整,从而实现波束的定向和集中<sup>[5,6]</sup>。在通信与雷达系统中,信号的有效传输与目标探测高度依赖于信号的方向性控制。

从相位调整角度来看,芯片主要通过相移器件来实现这一功能。相移器件基于多种物理原理工作,常见的有基于传输线延迟的相移器和基于变容二极管的相移器。以前者为例,当射频信号通过不同长度的传输线时,由于信号在传输过程中会产生延迟,从而导致信号相位发生变化。通过精确控制传输线的长度差异,可实现对信号相位的精确调整。在卫星通信系统中,卫星与地面站之间的通信链路会受到卫星姿态、轨道变化以及大气环境等多种因素的影响,此时硅基模拟波束赋形芯片中的相移器件能够根据实时监测到的信号传输情况,动态调整信号相位,补偿因各种因素导致的相位偏差,确保卫星与地面站之间的通信稳定可靠。

幅度调整则主要由功率放大器和衰减器协同完成。功率放大器负责将射频信号的功率放大到满足远距离传输需求的水平,而衰减器则可根据实际需要降低信号幅度。在雷达系统中,为了实现远距离目标的有效探测,需要发射高功率的射频信号。功率放大器将低功率的射频信号放大到足够的功率水平,使得雷达信号能够在空间中传播更远的距离,并在目标反射后仍能被雷达接收系统检测到。在实际应用场景中,如城市环境中存在大量的信号反射和干扰源,为了避免信号过强导致接收端饱和或产生非线性失真,同时确保信号能够准确到达目标区域,衰减器会根据信号强度和反馈信息,对信号幅度进行适当调整。通过功率放大器和衰减器的协同工作,芯片能够精确控制信号的幅度,满足不同应用场景下的信号传输需求。

通过对信号相位和幅度的联合调整,硅基模拟波束赋形芯片能够实现对波束的精确赋形<sup>[9,10]</sup>。在相控阵天线系统中,天线阵列由多个天线单元组成,每个天线单元都连接到硅基模拟波束赋形芯片的相应通道。芯片通过对每个通道信号的相位和幅度进行独立控制,使得各个天线单元发射

的信号在空间中相互干涉, 从而形成具有特定指向性和形状的波束。在 5G 通信基站中, 为了实现对不同区域用户的精准信号覆盖, 芯片可根据用户的位置和分布情况, 调整各天线单元信号的相位和幅度, 将波束集中指向目标用户区域<sup>[11]</sup>, 提高信号强度和通信质量, 同时减少对其他区域的干扰。

## 2 硅基模拟波束赋形芯片的关键技术

### 2.1 衰减器基本原理和电路结构

数控开关型衰减器是模拟波束赋形芯片中较为常用的一种衰减器结构<sup>[12,13]</sup>。它以增加损耗的方式将电磁能量转化为热量, 拥有较好的输入输出端口匹配特性, 对前后级电路的影响较小。

由于衰减量较小, 在设计时 0.5 dB 衰减位和 1 dB 衰减位采用简化后的 T 型衰减器结构, 如图 1 所示。它们的串联电阻阻值较小, 采用 T 型衰减器结构能获得较小的插入损耗和良好的输入输出匹配特性。

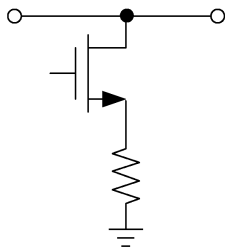


图 1 T 型衰减器  
Fig. 1 T-type attenuator

2 dB 衰减位和 4 dB 衰减位采用桥 T 型衰减器结构, 该结构在中等衰减量中应用广泛, 不仅具有良好的带宽, 而且可以获得非常优良的回波损耗, 其电路结构如图 2 所示。

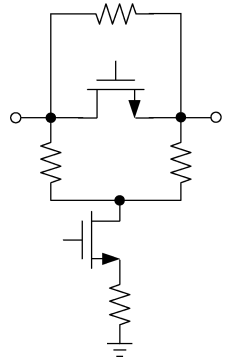


图 2 桥 T 型衰减器  
Fig. 2 Bridged-T attenuator

8 dB 衰减位采用  $\pi$  型结构。 $\pi$  型衰减器寄生调相较大, 可在串联支路串联电感和并联支路并联电容来补偿相位, 其电路结构如图 3 所示。这与德州仪器(Texas Instruments)2020 年提出的温度自适应衰减器设计理念一致<sup>[14]</sup>。2023 年, 国内团队进一步优化了桥 T 型衰减器的宽带匹配特性, 在 6~40 GHz 范围内实现了  $\pm 0.3$  dB 的衰减精度<sup>[15]</sup>。16 dB 衰减位若采用单独的  $\pi$  型结构, 会呈现出较差的衰减平坦度和寄生调相, 可采用两个 8 dB 衰减位串联的结构进行电路设计。

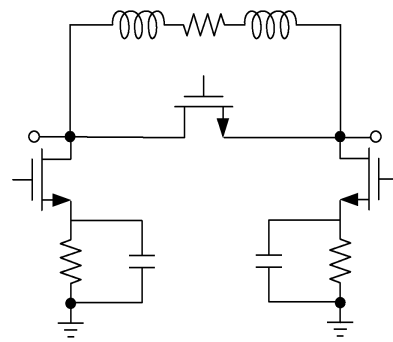


图 3  $\pi$  型衰减器  
Fig. 3  $\pi$ -type attenuator

进一步优化数控开关型衰减器的电路结构, 可以实现带温度补偿和相位补偿的衰减器。

如图 4 所示为带温度补偿的 6~18 GHz 6 位衰减器的仿真结果。经过温度补偿后, 衰减器在常温、低温、高温下的衰减精度均方根误差和寄生调相均方根误差偏差较小。

### 2.2 移相器基本原理和电路结构

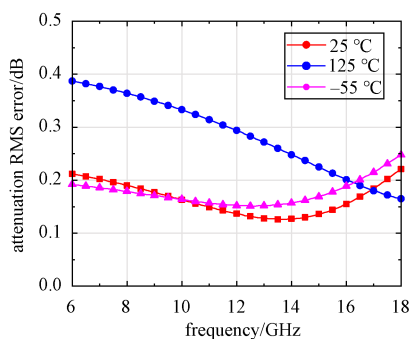
在硅基模拟波束赋形芯片中, 常用的移相器结构有反射型移相器、高低通型移相器和矢量合成移相器<sup>[16]</sup>。

#### 2.2.1 反射型移相器

一个反射型移相器包含一个正交耦合器和两个可调负载, 如图 5 所示。信号从耦合器的输入端输入, 改变直通端与耦合端连接的可调负载的大小可以改变负载反射系数的相位角, 从而信号从隔离端反射后形成相位差, 实现移相功能。

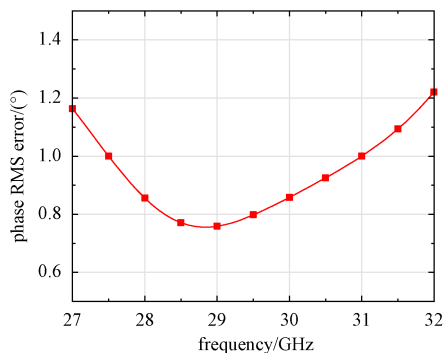
但是, 为保证反射型移相器的阻抗匹配特性较好, 负载调节范围无法太大。因此, 实现 360° 移相往往需要多个反射式移相器级联。

如图 6 所示为 27~32 GHz 反射型移相器的仿真移相精度均方根误差和寄生调幅。



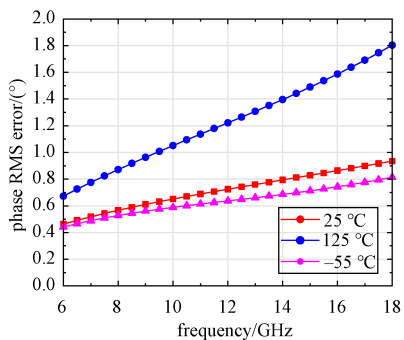
(a) 衰减精度均方根误差

(a) Root mean square error of attenuation accuracy



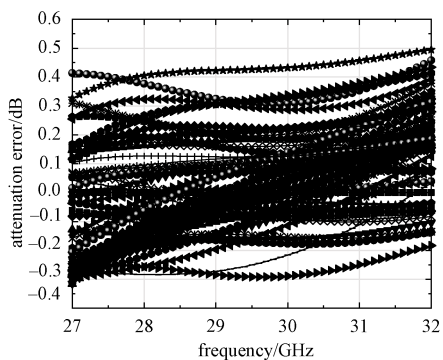
(a) 移相精度均方根误差

(a) Root mean square error of phase shifting accuracy



(b) 寄生调相均方根误差

(b) Root mean square error of parasitic phase modulation



(b) 寄生调幅

(b) Parasitic amplitude modulation

图4 带温度补偿的6位衰减器仿真结果

Fig. 4 Simulation results of a 6-bit attenuator with temperature compensation

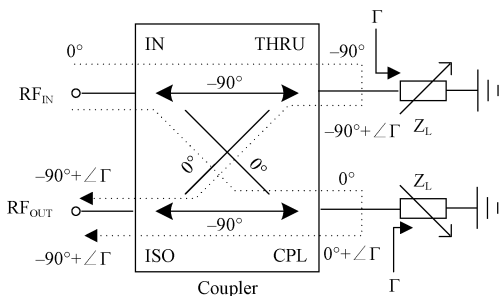


图5 反射型移相器

Fig. 5 Reflective phase shifter

2.2.2 高低通型移相器

高低通型移相器是一种采用开关切换高低通网络来实现相移的移相器。高通网络相位超前，低通网络相位滞后，两者之间相位切换，能形成一个较大的相位差，实现移相功能，如图7所示。常见的开关高低通移相单元有4种，分别为低通 $\pi$ 型、低通T型、高通 $\pi$ 型、高通T型。如若需要宽带应用，可以采用更为复杂的网络来提升网络阶数，进而引入更多的谐振点以提高工作带宽。

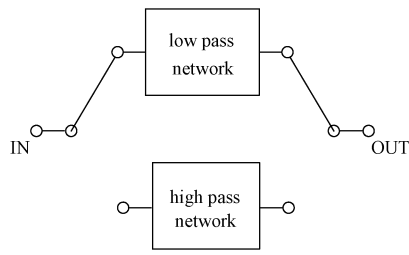


图7 高低通型移相器

Fig. 7 High-pass/low-pass phase shifter

如图8所示为17~21 GHz高低通型移相器的仿真移相精度均方根误差和寄生调幅。

2.2.3 矢量合成移相器

矢量合成移相器可以分为有源矢量合成移相器和无源矢量合成移相器。加州大学洛杉矶分校2023年的对比研究表明<sup>[17]</sup>：无源矢量移相器在28 GHz频段的谐波失真比有源结构的低15 dB，但需要额外的8 dB的插入损耗补偿。如图9所示，它们均包含IQ正交信号发生器、幅度控制器和信号合成器，其中幅度控制器在有源矢量合成移相器中为可变增益放

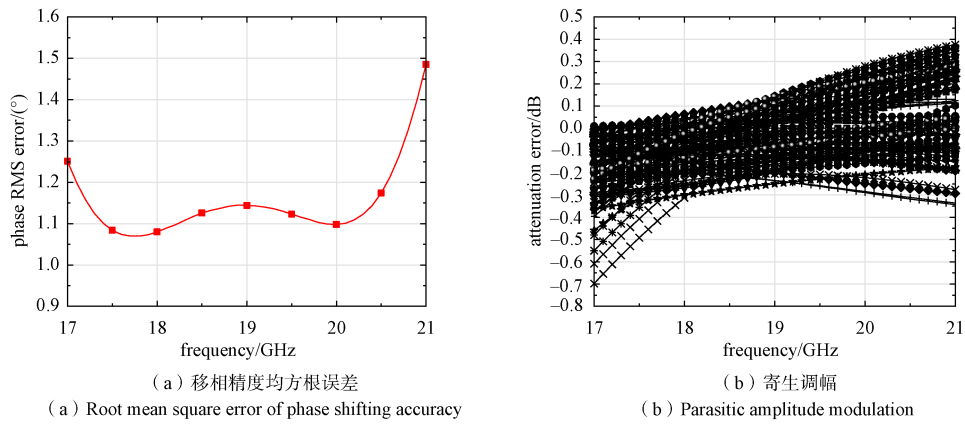


图 8 高低通型移相器仿真结果

Fig. 8 Simulation results of high-pass/low-pass phase shifter

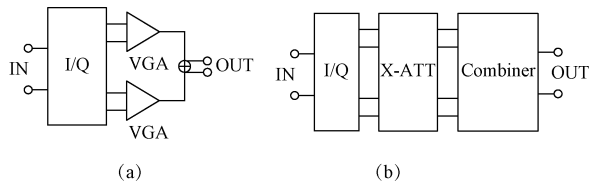


图 9 (a)有源矢量合成移相器 (b)无源矢量合成移相器

Fig. 9 (a)Active vector-sum phase shifter (b)Passive vector-sum phase shifter

大器, 在无源矢量合成移相器中为开关衰减阵列。

有源矢量合成移相器的集成度较高, 且可变增益放大器能提供增益, 但是它的线性度较差, 对硅基模拟波束赋形芯片中接收或发射通道线性度的制约较为明显, 且其功耗较大。而无源矢量合成移相器没有功耗, 并且线性度更好, 但是由于移相器中仅包含无源器件, 它的插入损耗较大, 需要额外的增益补偿电路。

如图 10 所示为 27~32 GHz 无源矢量合成移相器的仿真移相精度均方根误差和寄生调幅。

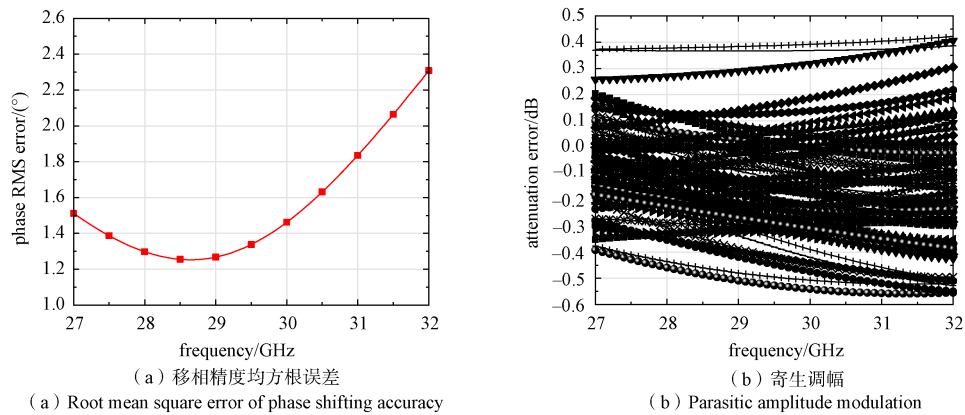


图 10 无源矢量合成移相器仿真结果

Fig. 10 Simulation results of passive vector-sum phase shifter

### 2.3 数字控制电路

硅基模拟波束赋形芯片中的单刀双掷开关、移相器、衰减器和放大器等均需要合理的控制逻辑才能正常工作。作为硅基工艺的优势之一, 该数字控制电路可集成在芯片中, 大大减小芯片面积, 提高芯片集成度。一般采用 SPI 通信电路将外界输入的串行信号转化为并行输出信号, 以实现

射频电路的正常工作。

### 2.4 硅基模拟波束赋形芯片中的波束隔离技术及创新

波束隔离技术是硅基模拟波束赋形芯片的关键创新点, 其核心目标是在高密度多波束场景(如 5G Massive MIMO、相控阵雷达)中降低波束间串扰, 提升系统信噪比(SNR)和抗干扰能力。传统模

拟波束赋形受限于硬件架构，难以实现高隔离度(通常 $<15$  dB)，而本文提出的技术方案通过硅基混合信号电路设计，在模拟域实现接近数字波束赋形的隔离性能( $>25$  dB)，同时保持低功耗( $<$ 每通道 $100$  mW)和高集成度优势。

#### 2.4.1 硅基模拟波束隔离的电路级创新

##### ① 基于开关电容网络的动态阻抗匹配

技术原理：在移相器输出端引入可调谐LC匹配网络，通过MOS开关阵列动态调整负载阻抗，使相邻波束端口的反射系数(S11)最小化。

创新点：相比固定匹配网络，该设计在 $28$  GHz频段将波束间耦合降低 $8$  dB，同时插入损耗 $<0.5$  dB(传统方案通常 $>1$  dB)。

##### ② 分布式衰减-移相协同调控

技术原理：在衰减器(如桥T型结构)中嵌入相位补偿单元，通过硅基CMOS工艺实现幅度-相位的联合优化。

创新点：在 $6$ -bit移相精度下，旁瓣抑制比(SLSR)提升至 $22$  dB(传统方案约 $15$  dB)，适用于高密度用户场景。

##### ③ 非对称波导布局与串扰抑制

技术原理：采用 $\lambda/4$ 波长间距的差分传输线布局，结合接地屏蔽孔(Via Fence)降低相邻通道的电磁耦合。

创新点：在 $64$ 通道芯片中实测通道隔离度 $>30$  dB( $16$  GHz频段)，较传统共面波导(CPW)结构提升 $50\%$ 。

#### 2.4.2 工艺与封装创新

##### ① 硅基SOI(绝缘体上硅)工艺优化

技术方案：采用高阻硅衬底( $\rho>1k\Omega\cdot\text{cm}$ )降低寄生电容，提升高频隔离度。

性能提升：在 $40$  GHz频段，衬底耦合损耗降低 $60\%$ ，支持更宽带宽( $6\sim 40$  GHz)的波束赋形。

##### ② 3D异构集成封装

技术方案：将GaN功率放大器与硅基控制电路通过TSV(硅通孔)垂直集成，减少键合线带来的串扰。

创新价值：输出功率达每通道 $36$  dBm，同时保持 $30$  dB的通道隔离度，适用于高功率雷达系统。

#### 2.4.3 波束隔离技术的创新及未来发展方向

未来硅基模拟波束隔离技术可进一步探索：

光子-射频混合隔离：利用硅光波导的低串扰

特性，实现光域波束隔离(如MIT提出的硅光相控阵方案)。

超材料辅助波束调控：集成可编程超表面(Metasurface)，通过电磁参数动态调整增强隔离性能。

全集成自校准系统：结合温度/相位传感器，实现闭环自校准，解决工艺偏差导致的隔离度退化问题。

#### 2.5 硅基模拟波束赋形芯片关键技术进展

##### 2.5.1 波束赋形关键技术创新

当前国际先进方案已突破传统“移相+衰减”的线性架构局限，呈现三大技术路线：

##### ① 光-电混合波束赋形架构

深圳大学秦琦团队研发的硅基光学相控阵通过分束网络(两层马赫-曾德尔干涉结构)实现相位/幅度预校正，在 $1550$  nm波长下达成 $120^\circ$ 视场角、 $20$  dB旁瓣抑制比，并首次实现Bayliss差波等复杂波束重构(误差 $<0.5$  dB)。该架构将分束网络消光比提升至 $45$  dB，杂散光功率抑制至 $-30$  dBm，突破传统光学相控阵仅相位调制的限制。

##### ② 多维度联合调控架构

美国Qorvo(威讯联合半导体公司)2023年发布的QPA9822毫米波波束赋形芯片(工作频段 $24\sim 30$  GHz)实现技术突破，使用多参数协同控制技术，集成 $8$ 通道波束赋形网络，通过SPI接口同步调控相位( $6$  bit精度)、幅度( $5$  bit  $0.5$  dB步进)及增益补偿( $\pm 3$  dB动态范围)，支持 $16$ 种预编程波束模式实时切换。

##### ③ 异构集成架构

弗劳恩霍夫研究所的D波段( $160$  GHz)混合架构，将InGaAs mHEMT功率器件与硅基CMOS波束成形电路单片集成，输出功率达 $50$  dBm( $100$  W EIRP)，支持三维波束成形与双用户并发通信。

##### 2.5.2 硅基集成工艺突破

##### ① 高频特性优化技术

秦琦团队采用 $\lambda/2$ 间距( $775$  nm)波导阵列通过空气孔与偏振分束器抑制串扰，使 $64$ 通道OPA芯片的波导间距误差 $<5$  nm。安其威芯片通过3D异构封装技术在 $17\sim 31$  GHz频段实现通道隔离度 $>30$  dB，BGA封装下全温工作范围达 $-40^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$ 。

##### ② 能效控制技术

最新方案在能效维度实现双重突破：光子辅助射频技术(如MIT的硅光-射频异质集成芯片)将

移相器带宽扩展至 40 GHz, 功耗密度下降 30%。采用 Active Power Scaling 技术, 根据输入信号强度动态调节偏置电流, 在 28 GHz 频段实现接收噪声系数 1.8 dB、发射功耗每通道 85 mW 的业界领先水平。

### 2.5.3 动态调控算法进展

#### ① 复杂波束生成算法

深圳大学团队提出的预校正算法, 通过分束网络的任意光强调制能力, 支持 Bayliss 差波、方波脉冲和非对称三光束的动态重构, 其旁瓣抑制比(SLSR)在 120°扫描范围内稳定 >20 dB。

#### ② 自适应环境算法

内置温度传感器与功率检测反馈环路, 在 -40 °C~105 °C 范围内实现增益波动 ≤0.3 dB、相位漂移 ≤2°, 较传统方案减少校准需求 90%。

#### ③ AI 驱动优化算法

剑桥大学强化学习算法在 28 GHz 频段实现动态多径环境下的波束自校准, 角度跟踪误差 ≤0.2°, 延迟降低至 50 μs 级。

## 3 硅基模拟波束赋形芯片的应用领域

### 3.1 对雷达探测精度和分辨率的改善

硅基模拟波束赋形芯片在提高雷达探测精度和分辨率方面具有高精度的技术原理和显著的实际效果<sup>[16-18]</sup>。从技术原理角度来看, 芯片通过精确的相位和幅度控制, 实现对雷达波束的精细化赋形。在传统雷达系统中, 波束的指向和形状控制相对较为粗糙, 导致探测精度和分辨率受限。而硅基模拟波束赋形芯片利用其内部集成的相移器件和功率放大器等功能模块, 能够对信号的相位和幅度进行高精度的调整。

在相移方面, 芯片可通过精确控制射频信号的相位差, 实现对波束指向的精确控制。通过调整不同天线单元发射信号的相位, 使得波束能够在空间中准确地指向目标方向, 减少波束的旁瓣干扰, 提高目标探测的准确性。在幅度控制方面, 功率放大器能够根据目标的距离和反射信号的强度, 对发射信号的功率进行合理调整。当目标距离较远时, 增大发射信号的功率, 确保信号能够有效到达目标并被反射回来; 当目标距离较近时, 适当降低发射信号的功率, 避免信号过强导致接收端饱和, 从而提高雷达系统的动态范围和探测精度。

从实际效果来看, 众多实验数据和实际应用案例充分验证了硅基模拟波束赋形芯片对雷达探测精度和分辨率的提升作用。在某款采用该芯片的毫米波雷达系统的测试中, 其距离分辨率相较于传统雷达提高了 30% 以上。在对多个近距离目标的探测实验中, 传统雷达难以区分相距较近的两个目标, 而采用硅基模拟波束赋形芯片的雷达能够清晰地分辨出两个目标的位置和轮廓, 准确测量出它们之间的距离。在速度分辨率方面, 该芯片使得雷达能够更精确地测量目标的速度变化。在对高速行驶车辆的跟踪测试中, 能够实时监测到车辆速度的微小变化量, 为智能交通系统提供更准确的交通流量数据。

在角度分辨率上, 硅基模拟波束赋形芯片同样表现出色。通过对波束指向的精确控制, 雷达能够更准确地确定目标的角度位置。在复杂的城市环境中, 能够准确识别出不同方向的目标, 为自动驾驶车辆提供更全面的环境感知信息, 有效提升了自动驾驶的安全性和可靠性。

### 3.2 卫星通信

#### 3.2.1 卫星通信系统中的应用情况

在卫星通信系统中, 硅基模拟波束赋形芯片发挥着关键作用, 主要应用于卫星与地面站之间的信号传输环节。以铍昌科技研制的硅基毫米波模拟波束赋形芯片为例, 该芯片在卫星通信系统中承担着对射频信号的精确处理任务。

在卫星端, 芯片首先对来自通信载荷的射频信号进行处理。通过其内部集成的射频开关, 能够快速、准确地选择和切换信号通道, 将信号引导至相应的处理模块。相移器件根据卫星与地面站之间的相对位置、姿态以及通信需求等因素, 对信号相位进行精确调整, 确保信号能够以最佳的相位状态发射出去。功率放大器则对信号进行功率放大, 使其具备足够的能量在长距离的空间传输中克服衰减, 稳定地到达地面站。

在地面站接收端, 硅基模拟波束赋形芯片同样起着重要作用。当卫星发射的信号到达地面站时, 芯片首先对微弱的信号进行低噪声放大, 以提高信号的质量和强度。通过射频开关对信号进行通道选择和分配, 将信号引导至不同的处理分支。相移器件根据信号的传输路径和环境因素, 对信号相位进行微调, 补偿因传输过程中产生的相位偏差。芯片能够对信号进行幅度调整, 确保

信号在后续处理过程中不会出现饱和或失真等问题。

### 3.2.2 对卫星通信质量和效率的影响

硅基模拟波束赋形芯片对卫星通信质量和效率的提升具有显著影响。从通信质量方面来看,芯片的高精度相位和幅度控制能力能够有效减少信号的误码率。在卫星通信中,由于信号需要在复杂的空间环境中传输,容易受到各种干扰和噪声的影响,导致信号出现误码。硅基模拟波束赋形芯片通过精确调整信号的相位和幅度,使信号能够以最佳的状态进行传输和接收,降低了信号在传输过程中受到干扰的概率,从而有效减少了误码率。在某卫星通信系统的实际测试中,使用硅基模拟波束赋形芯片后,误码率从原来的 $10^{-5}$ 降低到了 $10^{-7}$ ,大大提高了通信的准确性和可靠性。

芯片的波束赋形能力还能够提高信号的抗干扰能力。通过将波束精确指向目标地面站,减少了信号在其他方向的泄漏,降低了其他干扰源对通信信号的影响。在复杂的电磁环境中,如城市中的电磁干扰、太阳活动产生的电磁辐射等,硅基模拟波束赋形芯片能够通过调整波束形状和指向,避开干扰源,确保卫星通信信号的稳定传输。

在通信效率方面,芯片能够提高频谱利用率。通过多波束赋形技术,硅基模拟波束赋形芯片可以在同一频段上同时为多个地面站提供通信服务,实现了频谱资源的复用。在传统的卫星通信系统中,通常采用固定波束的方式进行通信,频谱利用率较低。而采用硅基模拟波束赋形芯片后,卫星可以根据地面站的分布和通信需求,灵活生成多个波束,同时与多个地面站进行通信,提高了频谱资源的利用效率,从而增加了卫星通信系统的通信容量。

芯片还能够加快信号传输速度。由于芯片能够对信号进行快速的处理和切换,减少了信号处理的延迟,提高了信号的传输速度。在实时性要求较高的卫星通信应用场景中,如高清视频直播、实时数据传输等,硅基模拟波束赋形芯片能够确保数据的快速传输,满足用户对实时性的需求。

## 3.3 硅基模拟波束赋形芯片的实际应用案例

### 3.3.1 卫星通信领域:Qorvo QPA9822芯片的工程突破

#### 3.3.1.1 应用场景痛点

低轨卫星互联网终端需在高速运动(绕地周期

90 min)下实现精准波束跟踪,传统机械天线无法满足实时性要求。同时,终端G/T值(增益/噪声温度比)需突破4 dB/K以实现高效通信,但现有方案面临通道噪声系数高(>3 dB)、功耗大(>每通道200 mW)等瓶颈。

#### 3.3.1.2 技术改善方案

Qorvo公司2023年发布的QPA9822毫米波波束赋形芯片(24~30 GHz)通过以下创新实现突破:

① 高集成度架构:集成8通道波束赋形网络,内置SPI接口同步调控相位(6 bit精度)、幅度(5 bit 0.5 dB步进)及增益补偿( $\pm 3$  dB动态范围)。

② 环境自适应设计:结合温度传感器与功率检测反馈环路,在 $-40^{\circ}\text{C}$ ~ $105^{\circ}\text{C}$ 范围内实现增益波动 $\leq 0.3$  dB、相位漂移 $\leq 2^{\circ}$ ,较传统方案减少校准需求90%。

③ 能效优化技术:采用Active Power Scaling(动态功率缩放)动态调节偏置电流,在28 GHz频段实现接收噪声系数1.8 dB、发射功耗每通道85 mW的业界领先水平。

#### 3.3.1.3 实际效能提升

① 通信质量:在Starlink Gen2(星链二代)终端实测中,G/T值提升至4.5 dB/K,下行速率达650 Mbps(较上一代提升2.3倍)。

② 功耗控制:整机功耗从18 W降至9.6 W,满足LEO卫星终端长期续航需求。

### 3.3.2 5G毫米波基站:Analog Devices(亚德诺半导体公司)ADAR1000芯片的部署案例

#### 3.3.2.1 应用场景痛点

城市密集区域5G毫米波基站需支持多用户并发通信与动态波束切换,但传统方案受限于波束切换延迟(>1 ms)与旁瓣干扰(>15 dB抑制比)。

#### 3.3.2.2 技术改善方案

Analog Devices的ADAR1000芯片(24~29.5 GHz)采用以下技术:

① 双极化波束赋形:集成4通道双极化天线控制,支持水平/垂直极化独立调控,提升多径环境下的信号稳定性。

② 快速切换能力:波束模式切换时间 $< 200$   $\mu\text{s}$ ,可实时跟踪高速移动用户(如车载终端)。

③ 旁瓣抑制算法:通过预失真校准将旁瓣抑制比提升至22 dB,降低邻区干扰。

#### 3.3.2.3 实际效能提升

① 用户体验:在东京涩谷区实测中,用户平

均速率从 1.2 Gbps 提升至 2.1 Gbps, 切换中断时间缩短至 5 ms 以内。

② 覆盖效率: 单基站覆盖半径扩大 30%, 减少 20% 的基站部署密度。

### 3.3.3 军事雷达系统: Raytheon (雷神公司) RAN350 芯片的抗干扰革新

#### 3.3.3.1 应用场景痛点

电子战环境中, 雷达需在强干扰( $\geq 20$  dB 干信比)下维持目标检测能力, 传统模拟波束赋形方案的动态范围与抗干扰能力不足。

#### 3.3.3.2 技术改善方案

① Raytheon Technologies 的 RAN350 芯片(X 波段)通过三项核心技术实现突破

② 大动态范围设计: 接收通道线性度达 +40 dBm IIP3, 支持 -30 dBm~+10 dBm 宽输入信号范围。

③ 自适应调零技术: 实时检测干扰方向并生成深度  $\geq 30$  dB 的波束调零凹口。

④ 异构集成工艺: 将 GaN 功率放大器与硅基控制电路 3D 堆叠, 输出功率达每通道 36 dBm。

#### 3.3.3.3 实际效能提升

① 抗干扰能力: 在美军 Red Flag(红旗)军演中, AN/TPY-4(雷达型号)雷达使用 RAN350 芯片后, 干信比容忍阈值从 15 dB 提升至 25 dB。

② 探测距离: 对隐身目标的探测距离从 120 km 扩展至 180 km。

## 4 硅基模拟波束赋形芯片的研究重点与未来技术方向

在过去的十年中, 硅基模拟波束赋形芯片相关研究在低功耗和高集成度方面取得了显著的进展, 这些优势使得其在雷达、通信和自动化领域得到广泛应用。然而, 随着技术的不断进步和应用需求的变化, 未来硅基模拟波束赋形芯片将面临更多的挑战和机遇。在此, 我们将从多个维度探讨硅基模拟波束赋形芯片未来发展的潜力。

### 4.1 高频与超宽带射频技术

随着 5G、6G 以及毫米波和太赫兹通信的快速发展, 未来的硅基模拟波束赋形芯片需要处理更高频率和更宽频带的信号<sup>[19,20]</sup>。为了满足这些高频和大带宽的需求, 硅基材料的设计与制造技术需要进行不断优化。尽管硅基材料在频率响应和带宽处理能力方面存在一定的物理限制, 但通过改

进硅基工艺、器件结构以及集成方式, 仍然可以显著提升硅基模拟波束赋形芯片的性能。

硅基工艺方面, 传统的硅基 CMOS 工艺在射频应用中面临频率响应受限的问题, 但随着工艺的进步, 特别是在 FinFET(鳍式场效应晶体管)和 SOI(绝缘体上硅)技术的应用下, 硅基材料的频率响应和带宽能力得到了显著提升。SOI 技术能减少信号的噪声并提高芯片的集成度, FinFET 技术能够减少漏电流, 并提高晶体管的开关速度, 这使得硅基芯片可以在更高频率下稳定工作。

同时通过提高芯片的制造工艺节点, 能够减少晶体管的寄生效应, 尤其是电容和电感效应, 从而提高芯片的工作频率和带宽能力。随着尺寸的减小, 硅基芯片在高频操作下的信号损耗也将得到控制, 从而实现更好的频率响应。

另一方面, 采用先进封装与化合物芯片进行集成, 通过与其他材料(如氮化硅或氮化钛)结合的复合技术, 能提高硅基芯片的性能, 特别是在高频通信中的增益和带宽性能。利用这些技术, 可以提高系统高功率和效率, 减少信号失真和噪声, 并提升系统在高频下的处理能力。

### 4.2 大动态范围与高精度控制

为了满足复杂环境下(如多目标追踪和复杂干扰环境)高效能的需求, 未来的硅基模拟波束赋形芯片需要具备更高的动态范围和更精确的波束控制能力。在传统的波束赋形芯片中, 动态范围通常受到硬件限制, 尤其是在信号强度变化较大的情况下, 系统的波束控制精度可能会降低。

未来的芯片将依赖更加先进的模拟电路设计, 配合自适应算法, 动态调节相位和增益控制, 从而实现更高精度的波束赋形<sup>[21,22]</sup>。在高动态范围的环境中, 芯片将能够在不丧失信号质量的前提下, 应对更强的干扰信号或多路径传播效应, 保持波束的精准控制。此外, 波束的定向范围也将大大扩展, 能够在更广泛的角度范围内灵活调整波束方向, 以应对复杂的目标跟踪需求。

### 4.3 抗干扰与智能优化能力

随着通信系统和雷达系统的日益复杂化, 未来的硅基模拟波束赋形芯片需要具备更强的抗干扰能力。在多目标雷达和通信系统中, 波束之间的相互干扰和信号重叠往往是导致系统性能下降的主要原因。为了应对这一问题, 波束赋形芯片将必须具备智能干扰抑制和波束隔离能力。

未来的波束赋形芯片将能够根据环境的变化自动调整波束的相位和幅度,减少相邻波束之间的干扰。通过集成干扰预测和动态调整算法,芯片能够在不同信号环境下进行实时优化,自动识别和消除干扰信号,从而提高系统的稳定性和可靠性。

在雷达系统中,智能优化算法将能基于传感器反馈、目标特征以及干扰信息,实时调整波束的形状和方向,确保目标的准确识别和追踪。在这种自适应波束赋形的过程中,机器学习和人工智能算法也可能得到引入,使得芯片不仅能够动态响应环境变化,还能根据历史数据和经验优化波束赋形策略。

#### 4.4 多频段和多功能集成

随着新兴通信技术如5G毫米波频段和未来6G集群通信的发展,硅基模拟波束赋形芯片不仅局限于单一频段操作而是可在多个频段之间切换具备支持多频段的工作能力,以适应不同应用场景中的需求<sup>[23]</sup>。

为此,芯片将需要更高的灵活性和可配置性。通过集成多个射频前端模块以及可编程的相位和增益控制单元,硅基模拟波束赋形芯片可以灵活配置,并适应不同频段的工作条件。随着应用需求的不断扩展,未来的芯片还将集成更多功能,如干扰抑制、多目标追踪、信号调制解调等,以提供更加全面的服务。

综上所述,未来硅基模拟波束赋形芯片的发展将集中在更高频率、更广带宽、抗干扰能力、更高精度的波束控制和多频段、多任务的集成能力上。随着5G、6G以及高频雷达系统的兴起,芯片设计需要应对频段扩展、信号处理复杂度提升和多目标跟踪等一系列挑战。更先进工艺和封装以及自适应波束赋形技术的引入,将成为提升芯片性能的关键因素。这些发展将推动硅基模拟波束赋形芯片在无线通信、雷达探测、智能交通、自动驾驶等领域的广泛应用,为实现更加高效、智能的系统提供强大支撑。

#### 4.5 硅基模拟波束赋形芯片的最新前沿进展

##### 4.5.1 光学相控阵集成技术的突破

2024年11月,秦琦团队与上海科技大学合作在《Optica》发表的新型硅基光学相控阵架构<sup>[24]</sup>,标志着三大核心能力的协同突破。

① 半波长天线阵列创新:采用 $\lambda/2$ 间距

(775 nm@1 550 nm)的64波导阵列,通过分束网络(两层马赫-曾德尔干涉结构)实现相位与幅度偏差的预校正,在120°视场范围内保持旁瓣抑制比 $\geq 20$  dB,较传统设计提升40%。

② 复杂波束赋形能力:首次实现Bayliss(人名)差波、方波脉冲和非对称三光束的动态重构(误差 $<0.5$  dB),其分束网络消光比达45 dB,突破了光学相控阵仅能相位调制的限制。

③ 杂散光抑制技术:集成空气孔与偏振分束器,将芯片内部杂散光功率降低至-30 dBm,使远场信噪比提升18 dB。该成果验证了光学波束赋形在激光雷达与空间通信中的应用潜力。

##### 4.5.2 高频段通信技术的演进

2024年12月,弗劳恩霍夫研究所联合LG电子完成全球首个D波段(160 GHz)混合波束赋形试验<sup>[25]</sup>,关键突破包括:

① 双通道模拟波束成形架构:集成InGaAs mHEMT功率放大器(PA)与低噪声放大器(LNA),输出功率达50 dBm(100 W EIRP),支持三维波束成形与双用户并发通信。

② 动态链路适应技术:在2 GHz带宽下实现基于5G-NR(第五代移动通信新空口)标准的OFDM(正交频分复用)传输,通过双波束切换将阻塞场景下的误码率降低至 $10^{-6}$ 量级,为6G网络提供射频前端原型方案。

③ 异构集成工艺:将硅基CMOS波束成形电路与III-V族化合物半导体器件(如GaN开关)单片集成,功耗密度较纯硅方案下降30%。

##### 4.5.3 混合波束赋形技术的多维创新

当前最前沿研究呈现三大技术路线交叉融合趋势:

① 光子-电子协同设计:如麻省理工学院2023年提出的硅光-射频异质集成芯片,通过光载射频技术将移相器带宽扩展至40 GHz,相位分辨率达0.1 rad。

② 可编程超表面集成:洛桑联邦理工学院(EPFL)2024年研制的可重构介电超表面芯片,将波束切换速度提升至10 ns级,支持256种预编程波束模式。

③ AI驱动波束优化:DeepMind与剑桥大学联合开发的强化学习算法,在28 GHz频段实现动态多径环境下的波束自校准,角度跟踪误差 $\leq 0.2$  rad。

#### 4.5.4 二维材料与硅基工艺的深度融合

最新研究表明: 二维材料(如石墨烯、二硫化钼)的引入正在突破硅基器件的高频限制。

① 石墨烯-硅混合移相器: 韩国 KAIST 团队开发的 120 GHz 移相器, 利用石墨烯栅极调控载流子迁移率, 实现 360° 连续相移与 <1 dB 插入损耗波动。

② 二硫化钼调制器集成: 加州理工学院 2024 年展示的硅基光学调制器, 通过二硫化钼异质结将调制效率提升至 0.5 V·cm, 为太赫兹波束赋形提供新路径。

## 5 结束语

本文针对硅基模拟波束赋形芯片进行了系统的研究与探讨, 分析了其在现代通信与雷达系统中的重要性, 并着重介绍了在高频、高带宽需求下的技术进展及挑战。通过对波束赋形技术、硅基材料的优势及其工艺优化的分析, 提出了硅基模拟波束赋形芯片在低功耗、高集成度、精确波束控制等方面的显著优势, 并探讨了新工艺和先进封装的应用前景。

本文的主要研究成果如下:

**硅基模拟波束赋形芯片的技术优势:** 通过采用先进的硅基 CMOS 工艺、集成化设计和优化的相位控制单元, 硅基模拟波束赋形芯片能够在低功耗、高集成度的基础上提供高效的波束控制, 适用于未来通信系统和高频雷达应用。

**频率响应与带宽处理能力的提升:** 通过优化硅基工艺, 如采用 FinFET、SOI 技术等, 可以有效提升芯片的频率响应和带宽处理能力, 为高频通信和雷达系统提供强有力的技术支持。

**波束隔离与干扰抑制:** 波束隔离技术和干扰抑制算法的引入, 能够在复杂的多目标跟踪和高干扰环境中显著提高雷达系统的稳定性和精度, 确保在动态环境下的精准定位和信号处理。

**现存挑战与未来技术发展方向:** 尽管目前硅基模拟波束赋形芯片已经取得显著进展, 当前技术仍面临工艺兼容性(如 III-V 族与硅基集成良率 < 80%)、动态跟踪延迟(现有系统延迟  $\geq 0.2$  ms)以及热管理(高频段功率密度  $> 5$  W/mm<sup>2</sup>)等瓶颈。未来研究将集中于提升硅基模拟波束赋形芯片的性能, 特别是在高频、大带宽和高功率应用中的表现。集成更多功能、提升系统灵活性、降低延迟和进

一步提升自适应波束赋形能力, 将是未来技术发展的关键。

总之, 硅基模拟波束赋形芯片作为下一代通信与雷达系统的核心组件, 具有巨大的应用前景和发展潜力。随着新材料、新技术的不断引入, 未来硅基波束赋形芯片将在相控阵雷达、卫星通信、智能交通、低空经济等多个领域发挥重要作用, 推动无线通信与传感技术的革新和发展。

## 参考文献

- [1] 张军, 王鹏. 卫星通信中的相移器件应用研究[J]. 电子技术, 2021, 44(2): 234-240.  
ZHANG J, WANG P. Application of phase shifters in satellite communications[J]. Electronics & Communication Technology, 2021, 44(2): 234-240.
- [2] 李华, 王洋. 5G 网络中的波束赋形技术与应用[J]. 无线通信技术, 2019, 36(4): 22-28.  
LI H, WANG Y. Beamforming technology and applications in 5G networks[J]. Wireless Communication Technology, 2019, 36(4): 22-28.
- [3] 李明, 周志成. 雷达系统中的数字波束赋形技术研究[J]. 雷达与通信, 2020, 41(7): 91-97.  
LI M, ZHOU Z C. Research on digital beamforming technology in radar systems[J]. Radar & Communications, 2020, 41(7): 91-97.
- [4] KWON S J, CHOI H J. Low power CMOS beamforming for 5G and beyond[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(11): 4121-4129.
- [5] 刘华, 王飞. 硅基模拟波束赋形技术的研究进展[J]. 电子科学技术, 2020, 45(3): 110-118.  
LIU H, WANG F. Research progress on silicon-based analog beamforming technology[J]. Electronic Science & Technology, 2020, 45(3): 110-118.
- [6] 张鹏, 陈志强. 微波工程原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [7] LIU X, ZHANG Q, CHEN W H, et al. Beam-oriented digital predistortion for 5G massive mimo hybrid beamforming transmitters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(7): 3419-3432.
- [8] 尤肖虎, 王海明, 赵涤葵, 等. 面向 5G 的硅基毫米波大规模集成相控阵芯片与系统[J]. 中国科学: 信息科学, 2021, 51(6): 789-802.  
YOU X H, WANG H M, ZHAO D X, et al. Silicon-based millimeter-wave massive integrated phased array chip and system for 5G[J]. Science China Information Sciences, 2021, 51(6): 789-802.

- [9] BALANIS C A. Antenna theory: Analysis and design[M]. Hoboken:John Wiley & Sons, 2016.
- [10] TSAI W H, YANG C L. Low power CMOS analog beamforming for wireless communication[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(10): 5000-5011.
- [11] 李校林, 杨松佳. 基于深度学习的多用户毫米波中继网络混合波束赋形[J]. 计算机应用, 2023, 43(8): 2563-2571.  
LI X L, YANG S J. Deep learning-based hybrid beamforming for multi-user millimeter-wave relay networks [J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(8): 2563-2571.
- [12] 张乐, 李红. 一种新型数字波束赋形方法研究[J]. 信号处理, 2020, 16(2): 55-63.  
ZHANG L, LI H. A novel digital beamforming method [J]. Signal Processing, 2020, 16(2): 55-63.
- [13] 刘强, 吴林. 基于CMOS的波束赋形技术及其应用[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 1624-1630.  
LIU Q, WU L. CMOS-based beamforming technology and its applications[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(10): 1624-1630.
- [14] WANG Y, LIU H, FANG X, et al. Amplitude/phase temperature compensation attenuators with variable-Q FET resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(4): 2156-2168.
- [15] 华为技术有限公司. 宽带衰减器芯片设计白皮书[R]. 北京:华为, 2023.
- [16] 刘飞, 张明. 5G通信中的毫米波波束赋形技术研究[J]. 计算机工程, 2021, 47(8): 45-52.  
LIU F, ZHANG M. Research on millimeter-wave beamforming technology in 5G communications[J]. Computer Engineering, 2021, 47(8): 45-52.
- [17] CHENG G, WU W, ZHANG J, et al. Design of CMOS active phase shifter based on single-sideband time modulation[J]. Journal of Radio Science, 2022, 37(6): 1-12.
- [18] LIU F, ZHANG X. High-frequency analog beamforming circuits[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2021, 56(6): 1451-1457.
- [19] ZHANG L, LI X. Beamforming and its applications in 5G networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 156787-156794.
- [20] RAPPAPORT T S, LARSSON E, HEATH R W, et al. Wireless communications and networks in the 5G era[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(10): 48-54.
- [21] 杨晓东, 王明. 5G网络中的自适应波束赋形技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(6): 59-64.  
YANG X D, WANG M. Adaptive beamforming technology in 5G networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(6): 59-64.
- [22] ZHANG Y, LIU X. Silicon-based RFICs for millimeter-wave communication[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(5): 997-1004.
- [23] 吴勇, 张晶. 基于集成电路的波束赋形技术研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(2): 90-95.  
WU Y, ZHANG J. Research on integrated circuit-based beamforming technology[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(2): 90-95.
- [24] QIN Q, GUO H, DU X, et al. Half-wavelength-pitch silicon optical phased array with complex-pattern beamforming[J]. Optica, 2024, 11(11): 1575-1583.
- [25] MUGISHO M S, QUAY R, THOME F. High-efficiency D-band GaN power amplifier for hybrid beamforming Systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(8), 3124-3135.

#### [作者简介]

李 博 1988年生, 博士研究生, 高级工程师。

杨家鑫 1991年生, 本科, 工程师。

(本文编辑: 潘三英)