



微波学报

Journal of Microwaves

ISSN 1005-6122, CN 32-1493/TN

## 《微波学报》网络首发论文

题目: Ka 波段 CMOS 有源矢量合成移相器  
作者: 刘帅  
网络首发日期: 2023-04-19  
引用格式: 刘帅. Ka 波段 CMOS 有源矢量合成移相器[J/OL]. 微波学报.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1493.TN.20230418.1633.021.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# Ka 波段 CMOS 有源矢量合成移相器

刘 帅

(中国电子科技集团公司第十研究所, 四川 成都 610036)

**摘要:** 本文基于 65 nm 硅基互补金属氧化物半导体工艺设计了一款 Ka 波段有源矢量合成移相器。该电路由正交耦合器、单端转差分信号的巴伦、可变增益放大器、信号合成网络组成。基于集总 LC 等效模型的正交发生器能够实现紧凑尺寸并获得高精度正交信号; 可变增益放大器采用数字控制的共源共栅架构, 能够实现精准的幅度调节, 并提高输入输出之间的隔离度。实测结果表明, 该移相器在 25 GHz~32 GHz 频带范围内实现 360°移相, 相位步进 5.625°, RMS 相位误差小于 3°, 寄生调幅 RMS 小于 1 dB, 电路面积为 800  $\mu\text{m}\times 400 \mu\text{m}$ , 功耗 11 mW。

**关键词:** 互补金属氧化物半导体; 矢量合成; 移相器, 可变增益放大器, 共源共栅

## A Ka-Band CMOS Active Vector-Modulation Phase Shifter

LIU Shuai

(The 10th Research Institute of CETC, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** A Ka-band active vector modulation phase shifter implemented in 65nm complementary metal oxide semiconductor process is presented. A quadrature generator, single-ended to differential signal balun, variable gain amplifier and a signal combiner are exploited in the proposed phase shifter. Based on lumped LC equivalent model, the quadrature generator can achieve compact size and obtain high precision orthogonal signal. The variable gain amplifier consisting of digitally controlled cascode topology is employed to perform precise gain tuning and improve the isolation between input and output. Measured results prove that the phase shifter can cover full 360°with 5.625°phase step and provide accurate phase tuning with RMS phase error<3°and RMS gain error<1 dB over 25 GHz~32 GHz. The core area is 800  $\mu\text{m}\times 400 \mu\text{m}$  and the power consumption is 11 mW.

**Key words:** complementary metal oxide semiconductor; vector modulation; phase shifter; variable gain amplifier; cascode

### 引 言

近年来, 相控阵天线在卫星通信、雷达、微波通信等方面的应用越来越广。作为相控阵天线 TR 组件中必不可少的一部分, 移相器的作用是改变电磁信号的相位, 从而实现相控阵天线波束指向及切换等功能<sup>[1]</sup>。移相器的相位分辨率及移相精度等性能直接关系着相控阵天线的波束扫描分辨率、辐射效率及系统灵敏度等重要指标。

随着硅基工艺在毫米波频段的广泛应用, 基于互补金属氧化物半导体 (CMOS) 数字移相器的研究也获得了长足的进步<sup>[2-6]</sup>。数字移相器常用架构有两种: 一种是开关选通式, 各个移相基态选择性工作, 该类型电路通常为无源结构; 另外一种是有源矢量合成架构, 通过改变各矢量幅值来实现合成信号相位的改变, 这类结构能够实现更高的移相精度及更小的寄生调幅。矢量合成电路分为无源和有源型, 无源电路结构无直流功耗, 但损耗大; 有源结构需要消耗部分直流功耗, 但插损较小 (或提供正增益)。

在不同的应用场景下, 结合系统指标需求选取合适的电路结构来实现移相器设计。

本文基于 65 nm CMOS 工艺, 设计了一款 Ka 波段 6 位数字有源矢量调制移相器, 该移相器移相

步进为 5.625°, 电路整体拓扑结构如图 1 所示。

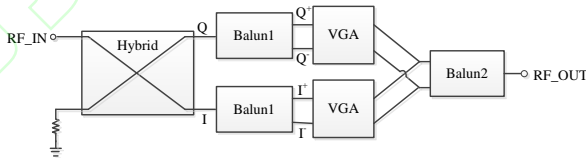


图 1 矢量调制移相器原理图

### 1 移相器设计

如图 1 所示, 该移相器主要原理是将输入信号通过正交发生器 (Hybrid) 及单端转差分巴伦 (balun1) 转换为四路 I-Q 正交信号, 通过可变增益放大器 (variable gain amplifier, VGA) 后进行矢量合成, 从而实现移相功能; 差分信号通过匹配网络 (balun2) 转换为单端信号进行输出。其中, 该移相器矢量合成基本原理如图 2 所示。

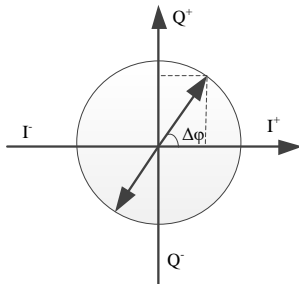


图 2 矢量合成基本原理

### 1.1 正交矢量信号发生器

任何一个无耗互易的四端口网络均具备定向耦合特性。本文 3 dB 正交发生器设计原理是基于等效集总参数模型, 如图 3(a)所示。该模型由一对耦合电感  $L$ 、端口对地电容  $C_1$  及端口互耦电容  $C_2$  组成,  $k$  为电感间耦合系数<sup>[7]</sup>。

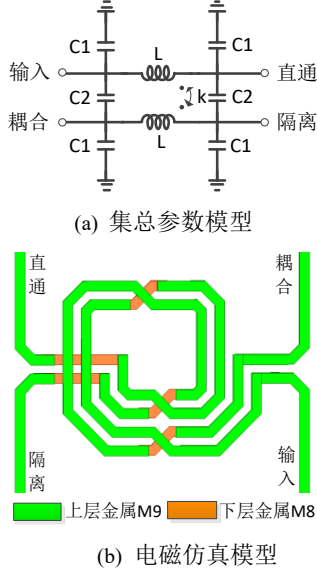


图 3 正交耦合器模型

其中, 电感及电容计算公式如下

$$L = \frac{Z_{0e} + Z_{0o} \sin \theta}{4\pi f} \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{\tan(\theta/2)}{2\pi f Z_{0e}} \quad (2)$$

$$C_2 = \left( \frac{1}{Z_{0o} - 1/Z_{0e}} \right) \frac{\tan(\theta/2)}{4\pi f} \quad (3)$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}}, \quad Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \quad (4)$$

式中,  $Z_{0o}$  与  $Z_{0e}$  分别为耦合传输线的奇偶模特性阻抗,  $Z_0$  为特征阻抗  $50 \Omega$ 。该正交耦合器直通端与耦合端幅度相等, 相位差为  $90^\circ$ , 因此耦合系数  $k = \sqrt{2}/2$ , 相位  $\theta = \pi/4$ ; 设计目标中心频率为  $28.75 \text{ GHz}$ , 将参数代入上述四式可得,  $L=391 \text{ pH}$ ,  $C_1=46 \text{ fF}$ ,  $C_2=134 \text{ fF}$ 。耦合电感模型如图 3(b)所示, 并采用全波电磁仿真对上述参量进行优化拟合, 最终结果如图 4 所示。在  $25 \text{ GHz} \sim 32 \text{ GHz}$  范围内, 直通端与耦合端幅度一致性优于  $0.35 \text{ dB}$ , 相位误差小于  $1^\circ$ 。

正交耦合器两路正交输出信号分别通过巴伦实现单端信号到差分信号的转换, 并同时达到阻抗匹配效果。巴伦的两级线圈主要采用工艺中上面两层厚金属 (M8、M9) 来实现, 物理模型如图 5 所示。巴伦的平衡性仿真结果如图 6 所示, 频段内差分输

出相位误差小于  $1^\circ$ , 幅度误差小于  $0.2 \text{ dB}$ 。

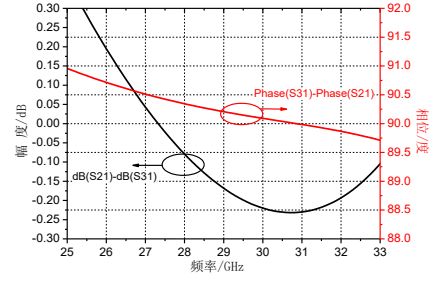


图 4 正交耦合器幅度与相位误差

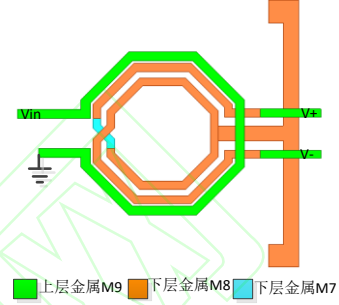


图 5 输入端巴伦电磁模型

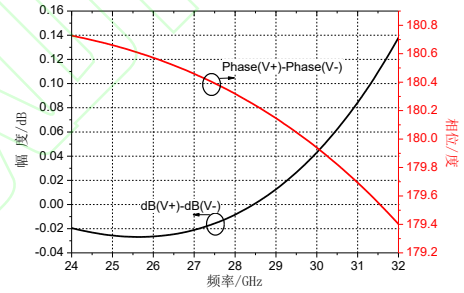


图 6 巴伦的相位与幅度仿真结果

### 1.2 可变增益放大器 (VGA) 及信号合成设计

图 7 为可变增益放大单元及矢量信号合成网络电路架构图。四路 I-Q 正交信号分别通过两组差分共源共栅结构 (cascode) 进行放大。其中, 共源管 M1-M4 (尺寸  $24 \mu\text{m}/60 \text{ nm}$ ) 提供跨导对信号进行放大, 共栅管实现可变增益 (VGA) 功能, 通过电流矢量合成后经输出匹配网络完成信号输出。电感  $L_s$  与节点处晶体管的寄生电容实现并联谐振, 减小节点对地电容的信号泄露, 达到提高增益的效果。

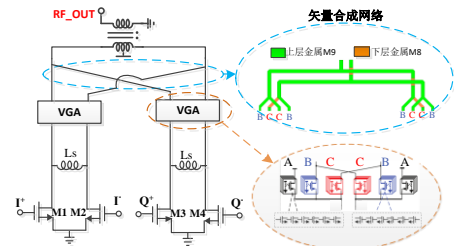


图 7 VGA 及矢量信号合成

每组差分放大路径中 VGA 管均含三对六组相同的晶体管组，分别标记为 A、B、C，每组管又拆分为六只栅压独立可控（漏与源均分别短接）的晶体管单元，如图 7 中局部放大所示。其中，两组 A 晶体管用于电流补偿；B/C 管组用于移相时象限切换，因此同时仅开启两组 B 或两组 C。

矢量调制移相的原理是，通过改变 I 路及 Q 路中电流幅值，实现对合成信号的调相（见图 2）。对应地，通过控制 B 或 C 晶体管组中六只晶体管栅压的开启或关断，实现 I 或 Q 路电流幅值的调节，从而达到移相的目的。在移相过程中，保证 A 组与 B 组（或 C 组）开启的晶体管总尺寸保持不变，从而在实现精准的电流控制。从图 2 可知，I/Q 幅度最小步进越小，移相分辨率越高，这就意味着 A/B/C 组拆分晶体管的单元数越多，主要代价就是控制码位数增多。本文基于指标要求，将晶体管 A/B/C 均拆分为六个晶体管单元，栅宽具体分配为  $0.65 \times (1, 2, 4, 8, 16, 32) \mu\text{m}$ 。

Cascode 电路输出为电流信号，因此利用顶层厚金属 M9 将 I/Q 共栅管输出电流合流实现正交矢量合成，如图 7 所示。最后，矢量合成的差分信号通过一个差分转单端的巴伦实现输出匹配，输出匹配阻抗如图 8 所示，输出能在较宽带宽内与 50 ohm 系统实现良好匹配。

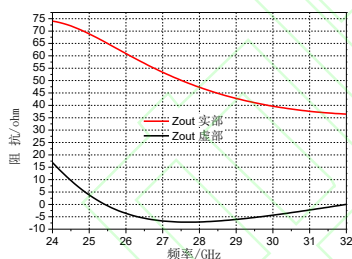


图 8 输出阻抗实部与虚部

## 2 加工与测试

芯片采用 65 nm CMOS 工艺进行加工，核心面积为  $800 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 。在片测试工作由安捷伦的 N5244A 矢量网络分析仪完成，电源和地均绑线到印制板，控制信号由外部串口经片上 SPI 提供，见图 9。

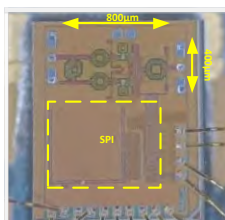


图 9 Ka 有源移相器芯片实物

图 10 为移相器的 64 态相对相位测试曲线。该移相器在 25 GHz~32 GHz 频率范围内，覆盖了全  $360^\circ$  相位，并实现  $5.625^\circ$  的相位步进。图 11 为 64 态相位下 S21 的测试曲线，最大寄生调幅优于  $\pm 1.1 \text{ dB}$ ；带内回波损耗均小于  $-10 \text{ dB}$ ，如图 12 所示。该移相器在 25 GHz~32 GHz 范围内，实现相位均方根值（RMS）小于  $3^\circ$ ，寄生调幅均方根值小于  $1 \text{ dB}$ ，如图 13 所示。

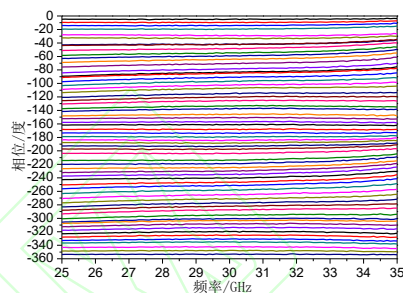


图 10 64 态相对相位测试曲线

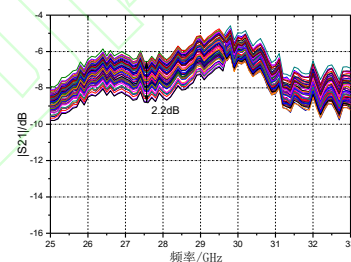


图 11 64 态幅度测试曲线

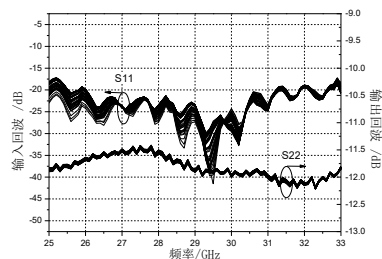


图 12 64 态输入输出回波损耗

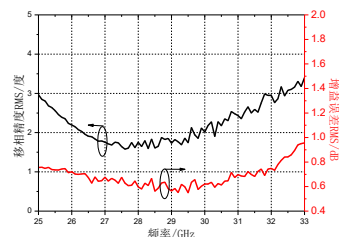


图 13 移相 RMS 及寄生调幅 RMS

表 1 简要列出了本文有源矢量合成移相器与近期部分研究成果的技术指标对比。结果显示，该移相器具有较高的移相精度，并在直流功耗与增益方面取得了良好的折中。

表 1 CMOS 移相器指标对比

文献	工艺	实现方式	频率 /GHz	相位分辨 率/bit	相位精度 RMS/度	寄生调幅 /dB	增益 /dB	功耗 /mW
[2]	130-nm CMOS	开关选通	8~12	6	<5	未给出	-13.5	0
[5]	130-nm BiCMOS	矢量合成	26~28	4	<4	$\pm 0.5$	-0.5	23
本文	65-nm CMOS	矢量合成	25~32	6	<3	$\pm 1.1$	-7.0	11

### 3 结 论

本文基于 65 nm CMOS 工艺, 分析并设计了一款 Ka 频段 6 位有源矢量合成移相器。基于集总参量的正交耦合器及巴伦, 在较宽的频带内获得了四路 I/Q 正交信号。利用 cascode 结构中共栅管作为可变增益功能单元, 实现精准的幅度控制, 并为输入输出提供良好的隔离, 有利于移相器在多功能芯片中级联保持其性能。移相精度及寄生调幅均基于仿真设计的控制码, 实测结果还具有一定的优化空间。

#### 参 考 文 献

- [1] 张若峤, 于志强, 周健义. 一种基于电调移相器的可重构天线[J].微波学报, 2019,35(3): 7-10
- ZHANG Ruo-qiao, YU Zhi-qiang, ZHOU Jian-yi. A polarization reconfigurable antenna based on tunable phase shifter[J]. Journal of Microwaves, 2019,35(3): 7-10
- [2] 孟志朋. X 波段 CMOS 高精度低损耗 6 位数控移相器的研制[J].电子质量, 2019(7): 80-84
- Meng Zhi-peng. Design of X-band 6 bit high precision low loss digital controlled phase shifter in CMOS[J]. Electronics Quality, 2019(7): 80-84
- [3] Shin G S, Kim J S, Oh H M. Low insertion loss, compact 4-bit phase shifter in 65 nm CMOS for 5G applications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016,26(1): 37-39
- [4] Tseng W J, LIN C S, TSAI Z M, et al. A miniature switching phase shifter in 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS[C]// IEEE Asia Pacific Micro. Singapore: IEEE Press, 2009: 2132-2135
- [5] Kalyoncu I, Burak A, Kaynak M, et al. A 26-GHz vector modulator in 130-nm SiGe BiCMOS achieving monotonic 10-b phase resolution without calibration[C]// IEEE Radio Freq. Integr. Circuits Symp. Boston: IEEE Press, 2019:75-78
- [6] Gu Peng, Zhao Dixian, You Xiaohu. Analysis and design of a CMOS bidirectional passive vector-modulated phase shifter[J]. IEEE Transactions on Circuits And Systems, 2021, 68 (4): 1398-1408
- [7] Hoger heiden J, Ciminera M, Jue G. Improved planar spiral transformer theory applied to a miniature lumped element quadrature hybrid [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory

and Techniques, 1997, 45 (4): 543-545

刘帅 男, 1989 年生, 博士, 工程师。主要研究方向: 毫米波 CMOS 芯片及微封装。

E-mail: xf\_liu0120@163.com