

130 GHz CMOS有源矢量合成移相器

李旭光 刘 兵 傅海鹏 马凯学*

(天津大学微电子学院 天津 300072)

摘 要: 面向毫米波相控阵雷达系统应用, 该文基于55 nm CMOS工艺设计了一款工作于130 GHz的有源矢量(VM)合成移相器。该电路包含宽带正交发生器、可变增益放大和矢量合成模块。为提升移相器相位分辨率和移相精度, 该电路可变增益放大采用了具有高频宽带属性的共栅放大结构和具有高增益属性的含中和电容的共源共栅放大结构多级级联的形式。为避免移相器在矢量合成时由自身结构特点产生相位断裂而导致移相范围下降, 该设计电路在矢量合成模块中融入了数控人工介质(DiCAD)结构。通过全波电磁仿真对所设计毫米波移相器进行验证, 在125~135 GHz频率范围内, 所设计移相器平均增益大于1 dB, 移相器可由控制电压控制实现全360°范围内5.625°的相位步进, RMS相位误差小于4°, 电路面积为1100 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$, 功耗33 mW。

关键词: CMOS; 移相器; 矢量合成; 毫米波雷达

中图分类号: TN43

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)06-1559-06

DOI: 10.11999/JEIT210071

A 130 GHz CMOS Active Vector-Modulation Phase Shifter

LI Xuguang LIU Bing FU Haipeng MA Kaixue

(School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A 130 GHz active Vector-Modulation (VM) phase shifter based on 55 nm CMOS process is presented for millimeter-wave phased array radar applications. A wideband quadrature generator, three stages variable gain amplifiers and a Gilbert-based summator are exploited in the proposed phase shifter. For improving the phase resolution and accuracy of the phase shifter, multi-stage wide gain-range variable gain amplifiers, which consists of stack common-gate amplifiers and the cascode amplifier based on capacitance neutralization technology, are employed. In addition, the Digital Controlled Artificial Dielectric (DiCAD) structure are also adopted in the proposed phase shifter to cover the phase gap result by VM structure. The full-wave electromagnetic simulation results show that the average gain of the proposed phase shifter is above 1 dB at 125 to 135 GHz. The phase shifting range can cover full 360° with a 5.6° phase step, and the RMS phase error is less than 4° at operating frequency range. The area of the phase shifter is 1100 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$, and the power consumption is 33 mW.

Key words: CMOS; Phase shifter; Vector-Modulation(VM); Millimeter-wave radar

1 引言

相控阵技术可应用于通信和雷达等系统前端, 实现信号的波束赋形和波束扫描。在信号发射端, 相控阵技术可以提升信号的有效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP), 在信号接收端提升系统灵敏度^[1,2]。近年, 随着毫米波通信和雷达技术的发展, 相控阵系统以其优势可有效地

提升通信系统的通信速率和雷达系统的探测精度, 被广泛地应用于如5 G毫米波通信、汽车雷达^[2-4]等。

在相控阵系统中, 移相器作为相控阵功能实现最为核心的电路模块, 移相器的分辨率和移相精度等性能直接关系相控阵系统的波束扫描分辨率和波束宽度, 对相控阵系统的性能起着至关重要的作用。在毫米波频段, 随着频率升高, 基于半导体工艺实现的毫米波集成电路面临着损耗增加、寄生效应恶化、晶体管增益衰减等问题。面向毫米波相控阵应用, 多种毫米波移相器架构被提出, 尝试克服毫米波集成电路设计难点, 追求移相器的低插损、高移相分辨率、高移相精度, 以及小芯片面积^[5-10]。

收稿日期: 2021-01-21; 改回日期: 2021-04-27; 网络出版: 2021-05-14

*通信作者: 马凯学 makaixue@tju.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2202500)

Foundation Item: The National Key R&D Program of China (2018YFB2202500)

本文将面向毫米波相控阵雷达应用, 阐述一款工作于D波段的有源矢量合成移相器。该移相器采用了宽带共栅放大器和基于电容中和的高增益共源共栅放大器混合级联, 并在矢量合成结构中借助数控人工介质(Digital Controlled Artificial Dielectric, DiCAD)补偿结构, 实现了全 360° 相位范围内 5.625° 的移相分辨率。第2节将介绍移相器的基本架构; 第3节将就正交发生器、可变增益级和矢量合成结构进行电路原理介绍; 移相器的验证结果将在第4节进行讲述; 第5节对全文进行总结。

2 移相器架构

图1所示为一个常见的基于射频移相的相控阵雷达接收系统示意图。相控阵雷达具有多个接收阵元, 由于移相器的存在, 相邻两阵元的接收信号可受移相器控制产生相移并获得相对延时。假设相邻阵元间的信号延时均为 $\Delta\tau$, 则相控阵便可接收指向角为 θ 的电磁波束, 其中 θ 可表达为

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{c \Delta\tau}{d} \right) \quad (1)$$

其中, c 为光速, d 为相控阵阵元间距离。相似地, 若接收系统中天线后的低噪声放大器变成相反方向的功率放大器, 信号经移相器和功率放大器后从天线辐射出去, 即可实现波束指向角为 θ 的相控阵雷达发射系统。

由上可知, 移相器是相控阵系统实现的关键。然而, 由于硅基毫米波集成电路面临信号损耗大的问题, 面向毫米波相控阵雷达应用, 为降低毫米波信号在相控阵雷达接收和发射链路中损耗过大的问

题, 并提升移相器移相分辨率和移相精度, 本文基于矢量合成原理提出了一款工作于D波段的多级可变增益放大器级联的有源移相器, 如图2所示。信号输入后, 经由宽带Lange耦合器和巴伦产生4路相位和幅度平衡的正交(Inphase-Quadrature, IQ)信号, IQ信号失配将影响移相精度^[1]。为提升移相器的分辨率, IQ信号分别经过3级级联的可变增益放大器获得较大范围的增益变化。其中, 3级可变增益放大器采用堆叠共栅放大器和共源共栅放大器两种结构以满足增益和带宽折衷。最后经过矢量合成结构, 将不同增益的IQ信号合成获得期待的相位。

当矢量合成移相器中IQ信号增益控制相互独立时, I路和Q路信号很难完全地断路, 导致矢量合成时在 0° , 90° , 180° 和 270° 相位附近形成相位断裂^[12]。为避免移相器产生相位断裂导致移相范围减小、精度下降, 本文所设计移相器在矢量合成结构中带入DiCAD结构对IQ信号相位进行补偿, 最终实现全 360° 高精度移相。

3 移相器电路分析

3.1 可变增益放大器

本文所设计有源移相器的增益控制结构采用了3级可变增益放大器级联的结构, 通过多级级联可以增加对IQ信号的增益控制范围, 以此减小IQ信号在矢量合成输出的相位步进, 提升移相器的分辨率。图3所示为所设计移相器采用的两种可变增益放大器结构。

移相器前两级增益控制电路结构如图3(a)所示, 采用了堆叠共栅可变增益放大器。相比于常用的共源放大器, 共栅结构避免了晶体管栅漏间米勒(Miller)电容的影响, 在高频下可实现宽带的增益放大效果, 且易实现级联匹配。信号输入经由变压器匹配与 $M_1 \sim M_4$ 组成堆叠共栅放大器相连。为提升堆叠共栅放大器的增益, 在堆叠共栅晶体管间串联了 120 pH 的电感 L_1 和 L_2 , 以补偿晶体管 M_3 与 M_4 的寄生电容 C_{gs} 和 C_{sb} 。放大器增益控制通过电流引导(current steering)结构实现, M_5 和 M_6 的源级与 M_3 和 M_4 的源级相连, 通过改变引导至晶体管

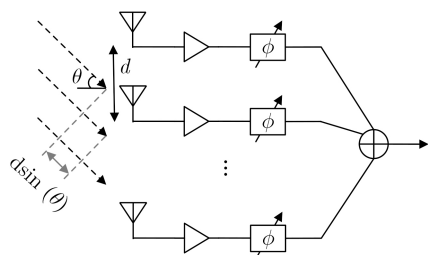


图1 射频移相架构的相控阵雷达接收系统示意图^[1]

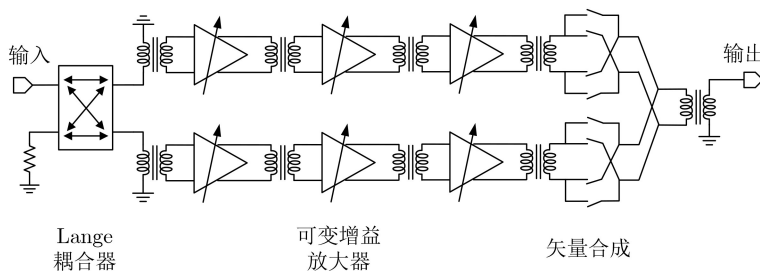


图2 有源矢量合成移相器结构示意图

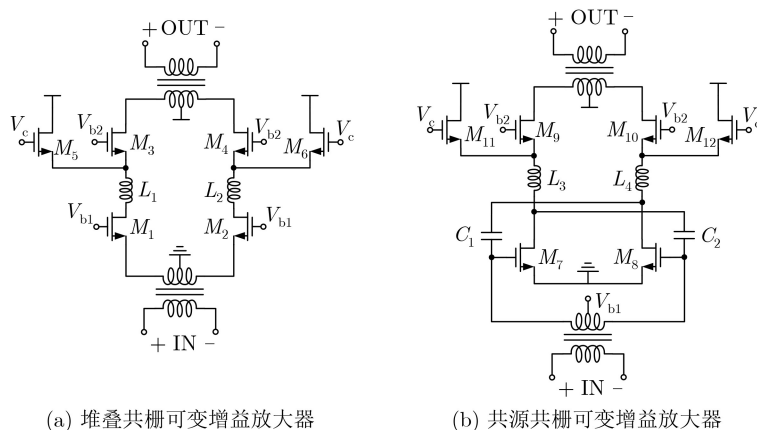


图3 可变增益放大器电路结构

M_5 和 M_6 支路的电流比例进而改变增益。流经 M_3 和 M_5 的电流比例由它们的栅端控制电压比和晶体管尺寸比决定。为权衡增益控制范围和增益压缩^[6], M_3 和 M_5 的晶体管尺寸分别为55 nm/24 μm 和55 nm/36 μm 。

为提升链路增益, 移相器中第3级可变增益放大器采用了共源共栅放大器结构, 如图3(b)所示。与共栅放大器不同的是, 在共源共栅放大器结构中, 信号通过变压器匹配输入至晶体管 M_7 和 M_8 的栅极。相比于传统结构, 该文所设计移相器引入了中和电容技术^[13], 在晶体管 M_7 和 M_8 的栅端和漏端并联8 fF的交叉耦合电容 C_1 和 C_2 , 移除共源放大器固有的米勒电容效应, 提升放大器增益和反向隔离。

经过3级可变增益放大器, IQ信号可以分别获得14 dB的增益变化范围。

3.2 矢量合成电路

图4所示为有源移相器的矢量合成结构电路图, 该结构基于Gilbert单元实现。同样地, 为提高增益, 在矢量合成电路中采用了中和电容技术。其原理如图, 在电路I-路径, 控制字 B_1 决定晶体管

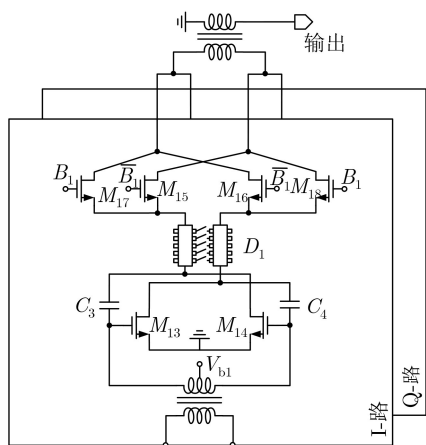


图4 矢量合成结构电路图

$M_{15} \sim M_{18}$ 导通与否, 当 B_1 为高电平, 晶体管 M_{17} , M_{18} 与晶体管 M_{13} , M_{14} 形成共源共栅放大器, 此时输出相位定义为参考态; 当 B_1 为低电平, 晶体管 M_{15} 和 M_{16} 导通, 则输出相位与参考态相反, 为 180° 。与此同时, Q路径受 B_2 控制可产生 90° 和 270° 两种状态。I路和Q路通过矢量合成后进变压器实现单端输出。

如3.1小节, 当IQ信号的增益变化范围为14 dB时, IQ信号的幅度比值最大约为5.01。经过矢量合成, IQ信号合成后将在 0° 和 90° 相位处产生约 11° 的相位断裂, 如图5所示。为弥补矢量合成导致的相位断裂, 实现完整的 360° 移相范围, 在矢量合成电路中引入了DiCAD结构, 如图4中 D_1 所示位置。DiCAD结构如图6(a)所示, 它由差分共面传输线、包围传输线的悬空金属条和 π 型开关网络组成。当开关网络导通时, 差分传输线周围的金属条短路, 近似构成虚拟地; 当开关网络断开, 金属条呈悬空状态。两种状态下的传输线等效电容发生改变, 即传输线的有效介质发生变化, 导致信号经过时相位状态发生改变^[14,15]。图6(b), 图6(c)显示了DiCAD结构带入单路矢量合成电路后, 通过Vtune控制产生的相位变化和幅度变化。当Vtune由0 V升至1.2 V, 在130 GHz频点处相移变化量为 20° , 附加幅度变化约为0.4 dB。可以弥补矢量合成导致的相位断裂。

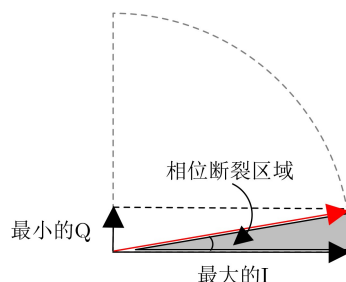


图5 矢量合成结构的相位断裂示意图

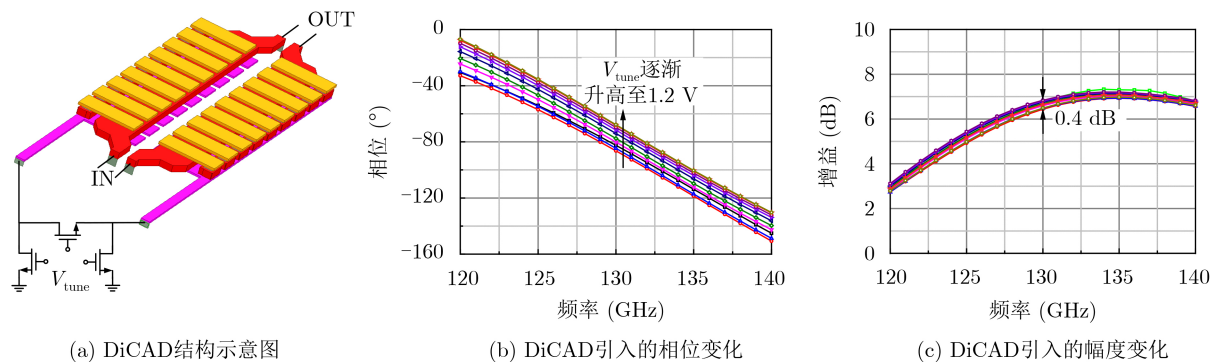


图6 DiCAD结构及性能

4 电路仿真验证

本文提出的有源矢量合成移相器基于55 nm CMOS半导体工艺进行设计, 电路版图如图7所示, 面积为 $1100\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$ 。为验证所设计有源移相器性能, 电路版图被拆分为有源和无源两部分, 分别通过calibre寄生参数提取和HFSS全波电磁仿真进行建模, 并进行联合仿真验证。

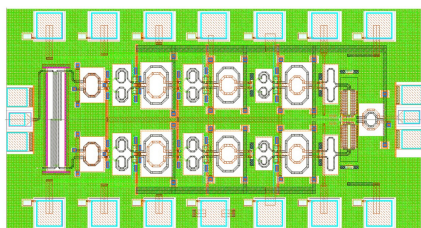


图7 D波段有源矢量合成移相器电路版图

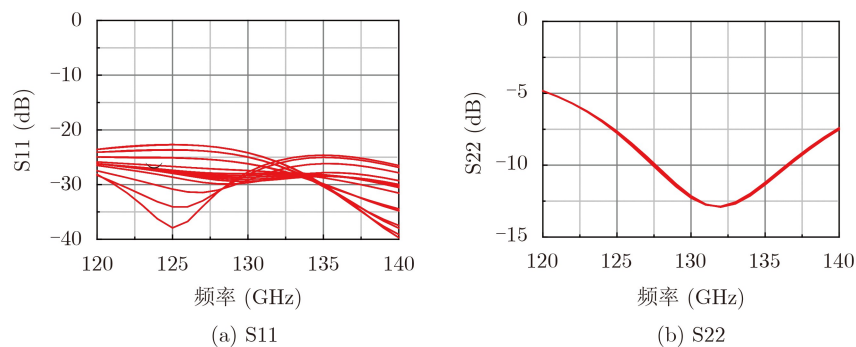


图8 移相器各状态回波损耗

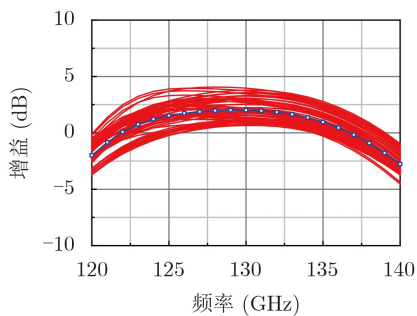


图9 移相器各状态增益及平均增益

所设计有源移相器在电压为1.2 V时, 功耗为33 mW。经小信号S参数仿真验证, 结果如图8—图10所示。电路S11在120~140 GHz频率范围内均小于-20 dB, S22在125~135 GHz频率范围小于-7.5 dB。图9所示为移相器的增益, 125~135 GHz频率范围内移相器平均增益为1~2 dB, 幅度变化小于 ± 2 dB。在130 GHz频点, 以 5.6° 相位步进选取64个移相状态, 如图10所示, 可以发现, 其可以很好地覆盖 360° 移相范围, 其均方根(RMS)相位误差在130 GHz时为 1.4° , 125~135 GHz范围内RMS相位误差小于 4° 。表1给出了近年国际上发表的相关移相器文章性能对比, 在近似工作频率附近, 本文所设计移相器在相位分辨率和移相精度方面具有优势。

5 结束语

本文面向毫米波相控阵雷达应用, 基于55 nm

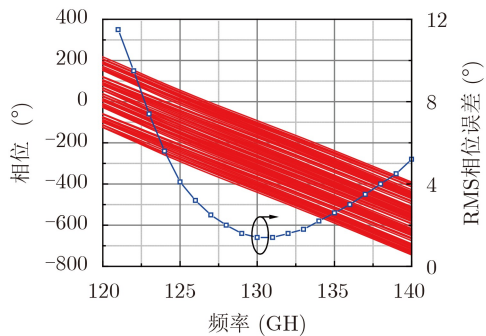


图10 移相器各状态相位和RMS相位误差

表 1 移相器性能比较

序号	频率(GHz)	工艺	分辨率(°)	增益(dB)	RMS相位误差(°)	功耗(mW)	面积(mm ²)
文献[5]	57~64	65 nm CMOS	11.25	-16.3	4.4~9.5	0	0.094 [#]
文献[6]	56~65	40 nm CMOS	2.7	-5~-0.4	1.4	38	1.12
文献[7]	80.2~96.8	28 nm SOI	22.5	0.83	<11.9	21.6	0.06 [#]
文献[8]	71.5~84.5	0.13 μ m SiGe	5.625	7	1.35~3.5	60	0.82
文献[9]	162~190	130 nm SiGe	22.5	-6.2	<8	9.9~15.3	0.07 [#]
本文*	125~135	55 nm CMOS	5.625	1~2	1.4~4.0	33	0.66

#: 核心面积; *: 仿真结果。

CMOS工艺设计了一款有源矢量合成移相器。为提升移相器的相位分辨率, 本文采用了多级可变增益放大器级联的结构, 并采用了DiCAD结构进行相位补偿。所设计移相器可在125 GHz至135 GHz频率范围内, 实现全360°的移相范围, 在5.625°的移相分辨率下RMS相位误差小于4°。

参 考 文 献

- [1] 贾海昆, 池保勇. 硅基毫米波雷达芯片研究现状与发展[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 173-190. doi: [10.11999/JEIT190666](#).
- [2] NATARAJAN A, KOMIJANI A, GUAN X, *et al.* A 77-GHz phased-array transceiver with on-chip antennas in silicon: transmitter and local LO-path phase shifting[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2006, 41(12): 2807-2819. doi: [10.1109/JSSC.2006.884817](#).
- [3] PANG Jian, LI Zheng, KUBOZOE R, *et al.* A 28-GHz CMOS phased-array beamformer utilizing neutralized Bi-directional technique supporting dual-polarized MIMO for 5G NR[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, 55(9): 2371-2386. doi: [10.1109/JSSC.2020.2995039](#).
- [4] JIA Haikun, KUANG Lixue, ZHU Wei, *et al.* A 77 GHz frequency doubling two-path phased-array FMCW transceiver for automotive radar[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, 51(10): 2299-2311. doi: [10.1109/JSSC.2016.2580599](#).
- [5] MENG Fanyi, MA Kaixue, YEO K S, *et al.* A 57-to-64-GHz 0.094-mm² 5-bit passive phase shifter in 65-nm CMOS[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2016, 24(5): 1917-1925. doi: [10.1109/TVLSI.2015.2469158](#).
- [6] WANG Bindu, GAO H, MATTERS-KAMMERER M K, *et al.* A 60 GHz 360° phase shifter with 2.7° phase resolution and 1.4° RMS phase error in a 40-nm CMOS technology[C]. *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, Philadelphia, USA, 2018: 144-147. doi: [10.1109/RFIC.2018.8428980](#).
- [7] PEPE D and ZITO D. Two mm-wave vector modulator active phase shifters with novel IQ generator in 28 nm FDSOI CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(2): 344-356. doi: [10.1109/JSSC.2016.2605659](#).
- [8] LI Huanbo, CHEN Jixin, HOU Debin, *et al.* A W-band 6-bit phase shifter with 7 dB gain and 1.35° RMS phase error in 130 nm SiGe BiCMOS[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2020, 67(10): 1839-1843. doi: [10.1109/TCSII.2019.2944166](#).
- [9] TESTA P V, CARTA C, and ELLINGER F. A 160-190-GHz vector-modulator phase shifter for low-power applications[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 30(1): 86-89. doi: [10.1109/LMWC.2019.2952766](#).
- [10] LI Xuguang and FU Haipeng. A 100-GHz full 360° reflection-type phase shifter using a balanced phase inverter[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(5): 1935-1939. doi: [10.1002/mop.32263](#).
- [11] KIM S Y, KANG D W, KOH K J, *et al.* An improved wideband all-pass I/Q network for millimeter-wave phase shifters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(11): 3431-3439. doi: [10.1109/tmtt.2012.2212027](#).
- [12] MOHSENPOUR M M and SAAVEDRA C E. Variable 360° vector-sum phase shifter with coarse and fine vector scaling[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(7): 2113-2120. doi: [10.1109/TMTT.2016.2574843](#).
- [13] CHAN W L and LONG J R. A 58-65 GHz neutralized CMOS power amplifier with PAE above 10% at 1-V supply[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2010, 45(3): 554-564. doi: [10.1109/JSSC.2009.2039274](#).
- [14] HUANG Daquan, HANT W, WANG Ningyi, *et al.* A 60

- GHz CMOS VCO using on-chip resonator with embedded artificial dielectric for size, loss and noise reduction[C]. IEEE International Solid State Circuits Conference, San Francisco, USA, 2006. doi: [10.1109/ISSCC.2006.1696168](https://doi.org/10.1109/ISSCC.2006.1696168).
- [15] LAROCCA T, TAM S W, HUANG Daquan, *et al.* Millimeter-wave CMOS digital controlled artificial dielectric differential mode transmission lines for reconfigurable ICs[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Atlanta, USA, 2008: 181–184. doi: [10.1109/MWSYM.2008.4633133](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2008.4633133).
- 李旭光: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为射频、毫米波集成电路设计.
- 刘 兵: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为射频、毫米波集成电路设计.
- 傅海鹏: 男, 1985年生, 副教授, 研究方向为射频、毫米波集成电路设计, 太赫兹探测器, 晶体管可靠性及建模.
- 马凯学: 男, 1973年生, 教授, 研究方向为射频、毫米波集成电路设计.
- 责任编辑: 马秀强