

基于 GaN-FET 大功率、超低功耗移相器设计



来晋明^{1,2,3*}, 马晓华¹, 王海龙^{2,3}, 王超杰^{2,3}, 李志友²

(1. 西安电子科技大学微电子学院 西安 710071; 2. 中国电子科技集团公司第 29 研究所 成都 610036;
3. 四川省宽带微波电路高密度集成工程研究中心 成都 610036)

【摘要】提出了一种基于支节加载 GaN-FET 的大功率、低插损、超低功耗移相器。该移相器的核心电路由多节高阻抗微带支节线以及支节末端加载的 GaN-FET 管芯构成。通过对单支节加载 GaN-FET 移相器电路模型的详细分析,得到了移相器的插损和相移表达式,并将其作为基本单元进行拓展可得到满足所需工作带宽的多支节加载 GaN-FET 移相器。由于采用了高阻抗微带支节,该移相器具有大功率处理能力。结合理论分析,对多支节加载 GaN-FET 移相器进行了设计、加工和测试。测试结果表明,所加工的移相器在 9.2~9.8 GHz 范围内,通过控制 GaN FET 的关断实现了 30°和 60°两种相移状态。同时,移相器功率承受能力大于 10 W,插损优于 1 dB,控制电流小于 6 μ A。

关键词 FET; GaN; SAR 成像; 支节加载移相器

中图分类号 TN710 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2021208

Design of GaN-FET Phase Shifter with High Power Handling Capability and Ultra-Low DC Power Consumption

LAI Jinming^{1,2,3*}, MA Xiaohua¹, WANG Hailong^{2,3}, WANG Chaojie^{2,3}, and LI Zhiyou²

(1. School of Microelectronics, Xidian University Xi'an 710071; 2. CETC 29th Research Institute Chengdu 610036;
3. Sichuan Province Engineering Research Center for Broadband Microwave Circuit High Density Integration Chengdu 610036)

Abstract This paper proposes a stub-loaded gallium nitride field-effect transistor (GaN-FET) phase shifter with ultra-low DC power consumption and high power handling capability. The phase shifter consists of multiple micro-strip stubs with high impedance and GaN-FET loaded. By analyzing the circuit model of the single stub-loaded GaN-FET phase shifter in detail, the formulas for insertion loss and phase shift are obtained. Then, as the basic element, the GaN-FET phase shifter using multiple stubs is developed, which can operate at the predefined frequency band. Due to the employment of the high-Z micro-strip stub, the proposed phase shifter can handle high input power. Following the design theory, the GaN-FET phase shifter using multiple stubs is designed, fabricated and measured. The tested results show that the phase shifter achieves the phase shift of 30° and 60° by controlling the GaN FETs within the frequency range of 9.2 GHz to 9.8 GHz. In addition, the power handling capability is over 10 W, insertion loss less than 1 dB and DC current for control less than 6 μ A.

Key words FET; GaN; SAR imaging; stub-loaded phase shifter

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 已在战场态势感知、国土普查、环境监测以及灾害评估等领域得到了广泛应用,其中高分辨率 SAR 是当前研究的热点^[1-3]。因平面有源相控阵具备天线增益高、波束灵活可控及宽角扫描等技术特点,是实现高分辨率 SAR 的主流技术方案^[4]。由于大规模平面有源相控阵存在成本高、结构复杂及散热难的缺点,可通过对天线阵面有源馈电网络中的 T/R 组件

进行稀疏布局来改善。然而,简单的稀疏布阵会导致天线波束栅瓣的产生和增益的下降,这时可在稀疏子阵列内采用相位扰动技术以降低天线波束的栅瓣电平并提高增益^[5]。为对稀疏阵列信号进行相位扰动,可在天线与 TR 组件之间的馈电网络中安装扰动移相器。根据相控阵系统的需求以及安装位置,扰动移相器必须具备高功率承受能力、小型化、低差损、低功耗的特性^[6]。

收稿日期: 2022-05-03; 修回日期: 2022-12-01

作者简介: 来晋明 (1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事射频收发组件、大功率发射等方面的研究。

*通信作者: 来晋明, E-mail: 187291637@qq.com

射频信号的移相方式包括改变信号传输的相位常数、信号传输线的长度以及信号传输网络的传输特性^[7-12]。文献 [7] 中铁氧体移相器通过改变外加电场来改变信号的传播相位常数的方式以实现射频信号的相移。但该类移相器的体积较大,不利于系统集成。对于文献 [8] 中提出的基于 PIN 开关线型移相器则是利用开关切换改变信号的传输线长度以实现移相的目的。由于 PIN 管串联在传输路径中,该类移相器的功率承受能力较低,插损大,直流功耗高。为实现大功率、低插损移相器,文献 [9-10] 提出了基于 PIN 管的支节加载移相器。通过控制 PIN 管的通断可以改变射频信号的传输网络特性,但在切换移相状态时响应速度较慢,PIN 二级管的驱动电流致使直流功耗较大。相较于传统的 PIN 管,GaN FET 作为功率器件,具有高击穿电压、低阈值电压、低的栅极电荷 Q_g ,其开关频率高,导通电阻小,能够承受大功率信号^[12-14]。小导通电阻能使 GaN-FET 型移相器实现低功耗特性。由于 GaN-FET 属于电压驱动型晶体管,采用 GaN FET 设计移相器能够有效降低大规模相控阵系统的功耗、体积,并具有承受大功率的特性。因此,GaN-FET 型移相器受到学者的关注并得以发展^[11]。

本文提出了一款基于 GaN-FET 支节加载大功率移相器,由 2 bit 控制位对移相状态进行切换。通过改变 GaN FET 的栅极电压实现 GaN-FET 开关的导通和关断,从而改变信号的传输网络相移特性。结合系统需求,本文设计的移相器工作在 9.2~9.8 GHz,能够实现 30°/60°两种移相状态。与传统的大功率移相器相比,本文的 GaN-FET 型移相器还具备超低功耗、快速切换、低插损的优势,并且该移相器可通过利用 MMIC 技术进一步小型化,以期满足小型化电路系统的应用需求。

1 电路结构与原理分析

1.1 电路结构

为了实现基于 GaN-FET 开关的低功耗、大功率移相器,图 1 给出了两支节加载移相器的电路结构,并以此作为基本单元进行扩展为多支节加载移相器。两支节加载移相器是由特性阻抗为 Z_0 的微带传输线、特性阻抗为 Z_1 并联高阻抗微带支节以及末端加载的 GaN-FET 组成。通过控制 GaN-FET 开关的导通或者关断来改变整个电路结构的传输网络特性,从而实现射频信号相位的改变。

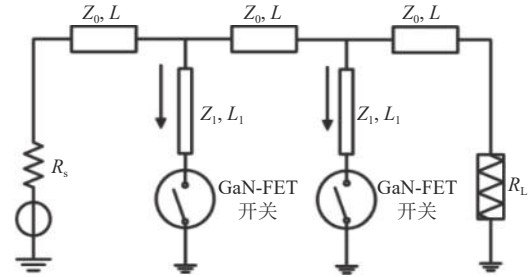


图 1 GaN-FET 型低功耗大功率移相器电路结构

1.2 原理分析

由于 GaN-FET 在导通状态时呈低阻状态(等效为小于 $R_{on} = 2 \Omega$ 的电阻),而在截止状态时呈高阻状态(可等效为小于 $C_{off} = 0.1 \text{ pF}$ 的电容)的特性^[13],因此可用线性等效模型简化分析支节加载移相器的传输网络特性,获得满足工作带宽的相移量,GaN-FET 单支节加载如图 2 所示。

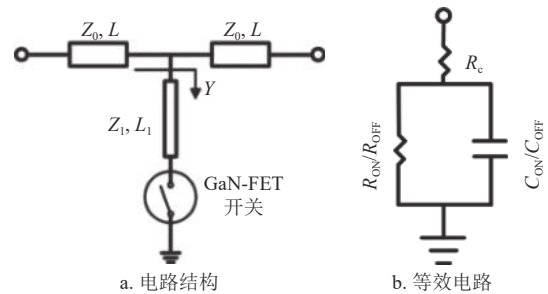


图 2 GaN-FET 单支节加载移相器

文献 [15] 已对两支节加载线移相器进行了详细分析,但结果过于复杂,实际设计过程中只能通过查找图形曲线的方式得到粗略的结果。为简化两支节加载移相器的设计,本文对末端加载 GaN-FET 单支节加载基本电路单元进行了分析并给出了相应的设计公式。利用公式便可得到多支节加载移相器的初始尺寸,后续便可结合高频仿真软件 HFSS 进行建模优化获得满足指标要求的移相器。

根据图 2 所示的单支节加载 GaN-FET 移相器电路结构并结合 ABCD 矩阵与 S 参数的转换关系,其传输网络的 S 参数矩阵中的 S_{21} 可表示为^[16]:

$$S_{21} = \frac{2}{(2 + Z_0 Y)(\cos(2\beta L) + j\sin(2\beta L))} \quad (1)$$

式中, Z_0 为微带传输线的特性阻抗; L 为微带传输线的长度; Y 为从并联高阻抗微带传输线向 GaN-FET 看过去的输入导纳; β 为微波信号的传播常数。当 GaN-FET 处于截止状态时,从并联高阻抗微带传输线看过去的输入导纳近似为:

$$Y = jY_1 \tan(\beta L_1) \quad (2)$$

式中, $Y_1=1/Z_1$ 为并联高阻抗微带传输线的特性导纳。此时传输网络的传输参数为:

$$S'_{21} = \frac{2\cos(2\beta L) - j2\sin(2\beta L)}{2 + jZ_0 Y_1 \cot(\beta L_1)} \quad (3)$$

当 GaN-FET 处于导通状态时, 从并联高阻抗微波传输线看过去的输入导纳 Y 为:

$$Y = -jY_1 \cot(\beta L_1) \quad (4)$$

此时传输网络的传输参数为:

$$S''_{21} = \frac{2\cos(2\beta L) - j2\sin(2\beta L)}{2 - jZ_0 Y_1 \cot(\beta L_1)} \quad (5)$$

此处定义 IL 为单支节加载移相器的插损, $\Delta\theta$ 为相移量, ΔM 为寄生调幅。则由式 (1)~式 (5) 可得单支节加载移相器的插损、相移量以及寄生调幅为:

$$IL = 20\log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_0}{2Z_1} \tan(\beta L_1)\right)^2}} \quad (6)$$

$$\Delta\theta = \operatorname{arccot} \left\{ \frac{Z_0}{2Z_1} \cot(\beta L_1) \right\} + \operatorname{arctan} \left\{ \frac{Z_0}{2Z_1} \tan(\beta L_1) \right\} \quad (7)$$

$$\Delta M = 20\log \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_0}{2Z_1} \cot(\beta L_1)\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{Z_0}{2Z_1}\right)^2 + \{\cot(\beta L_1)\}^2}} \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 取 $\beta L_1=\pi/4$ 时, $\Delta M=0$, 此时移相器的插损 IL 、相移量 $\Delta\theta$ 分别为:

$$IL_{(\beta L_1=\pi/4)} = 20\log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_0}{2Z_1}\right)^2}} \quad (9)$$

$$\Delta\theta_{(\beta L_1=\pi/4)} = 2\operatorname{arccot} \left(\frac{Z_0}{2Z_1} \right) \quad (10)$$

由式 (9) 和式 (10) 可知, 当 $\beta L_1=\pi/4$ 时, 移相器插损和相移量由微带主传输线特性阻抗 Z_0 和并联高阻抗支节加载线的特性阻抗 Z_1 决定。

综上所述, 根据移相器的工作频段可以计算出并联高阻抗微带传输线的长度 L_1 , 由单支节加载移相器的插损和相移量表达式, 可综合出给定插损和相移量的支节加载传输线的数量和并联高阻抗支节加载线的特性阻抗 Z_1 。

2 电路设计

根据某 SAR 系统的实际需求, 本文研究的扰

动移相器技术指标为: 工作频段为 9.2~9.8 GHz, 插损优于 0.8 dB, 相移量为 30°和 60°可选, 承受功率大于 10 W, 控制电流小于 10 μ A。

根据技术指标并结合单支节加载移相器的综合公式, 本次移相器设计确定采用 6 支节加载线结构, 介质基板采用介电常数为 9.8、厚度为 0.254 mm 的 Al_2O_3 陶瓷基片。图 3 为所提出的大功率移相器的版图, 其中开关 $S_1\sim S_6$ 由 GaN-FET 实现, 通过控制电压 V_1 和 V_2 可以实现 30°和 60°相移状态的切换。当 V_1 控制开关 S_1 、 S_2 、 S_3 处于导通状态, V_2 控制开关 S_4 、 S_5 、 S_6 处于关断状态时, 移相器可以实现 30°的相移; 当 V_1 、 V_2 控制开关 $S_1\sim S_6$ 均处于导通状态时, 移相器可以实现 60°的相移。为了能够承受 10 W 的输入功率, 并联支节特性阻抗 Z_1 选取为 100 Ω , 其相关尺寸 L_3 、 L_4 、 L_5 约等于中心频率 9.5 GHz 处的四分之一波长。通过对 L_3 、 L_4 、 L_5 的失谐调节, 以满足所需工作带宽内的相移量。

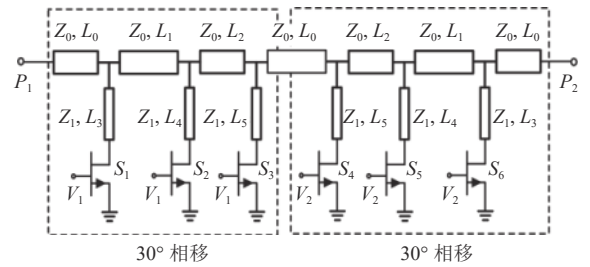


图 3 大功率移相器电路版图

而微带主传输线的特性阻抗 Z_0 选为 50 Ω , 其相关尺寸 L_1 、 L_2 需进行优化以获得良好的输入输出驻波。本文提出的大功率移相器采用高频仿真软件 HFSS 进行建模仿真设计。

为了简化移相器的电路结构, 将 GaN-FET 开关导通时等效为 2 Ω 电阻, 截止时等效为 0.1 pF 电容, 则可得到移相器在两种移相状态下的仿真结果如图 4、图 5 所示。当开关 S_1 、 S_2 、 S_3 处于导通, S_4 、 S_5 、 S_6 处于关断时, 图 4 显示移相器的移相精度变化范围为 $33\pm 2.5^\circ$, 插损小于 0.7 dB, 移相寄生调幅小于 0.1 dB。当开关 $S_1\sim S_6$ 均处于导通时, 图 5 显示移相器的移相精度变化范围为 $65\pm 5^\circ$, 插损小于 0.8 dB, 移相寄生调幅小于 0.2 dB。此时仿真结果与给定相移指标相比有一定偏差, 这与 GaN-FET 的等效电路模型有关, 后续可通过对加工实物进行调试纠正, 以满足技术指标。

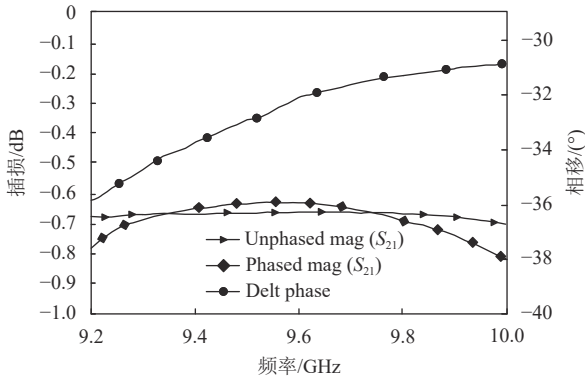


图 4 移相器移相 30°时插损和寄生调幅仿真结果

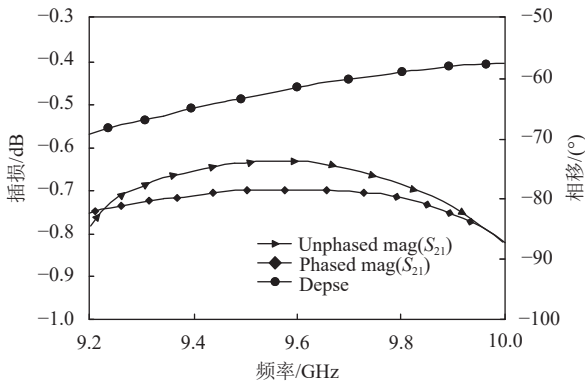


图 5 移相器移相 60°时插损和寄生调幅仿真结果

3 测试结果

图 6 为采用薄膜技术制造的大功率移相器实物，所用的 GaN-FET 开关为裸芯，利用导电银浆粘接在陶瓷基片上。所有的陶瓷基片包括移相器电路、GaN-FET 控制电路也利用导电银浆粘接于腔体底部。

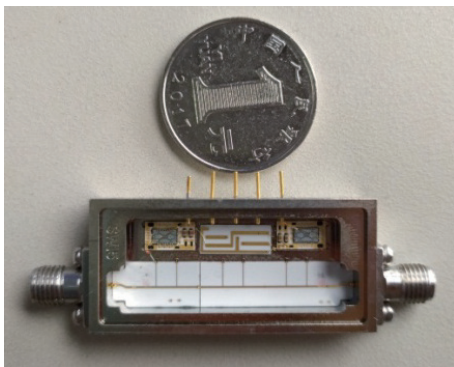


图 6 基于 GaN-FET 大功率移相器实物

大功率移相器的 GaN-FET 开关控制信号 V_1 和 V_2 采用 0 V/-28 V，其中 -28 V 偏置电流小于 6 μ A。GaN-FET 开关在 -28 V 时处于截止状态，在 0 V 时处于导通状态。因此，当 $V_1 = 0$ V、 $V_2 = -28$ V 时，移相器可实现 30°的移相状态；当 $V_1 = V_2 = 0$ V 时，移相器可实现 60°的移相状态。图 7、

图 8 给出了大功率移相器在 9.2~9.8 GHz 范围内经调试后的测试结果。由图 7 可知在 30°移相状态时，移相器的相移精度变化范围为 $-32 \pm 1.5^\circ$ ，未进行移相时的初始插损小于 -0.75 dB，移相寄生调幅小于 0.25 dB。在 60°移相状态时，移相器的相移精度变化范围为 $73 \pm 3^\circ$ ，未进行移相时的初始插损小于 -0.9 dB，移相寄生调幅小于 0.2 dB。虽然所设计的移相器与给定的技术指标存在一定的偏差，但不影响在 SAR 系统中的使用。

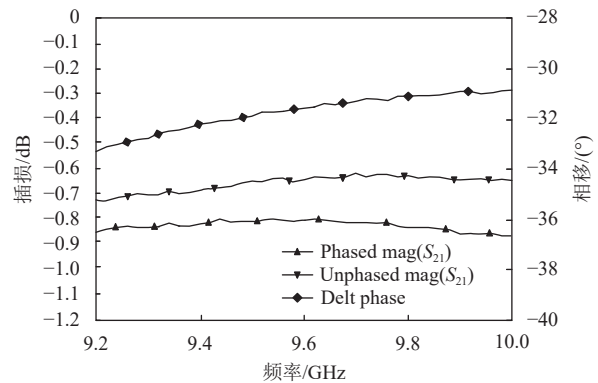


图 7 移相器移相 30°时插损和寄生调幅测试结果

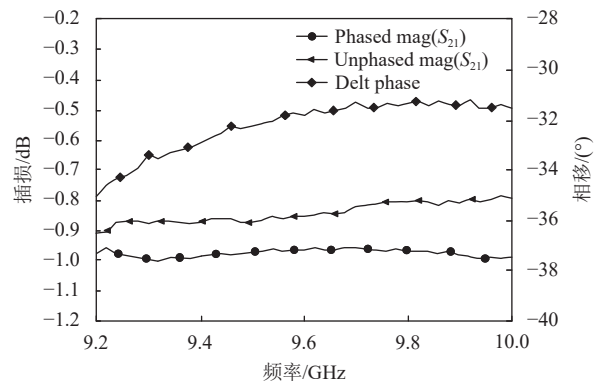


图 8 移相器移相 60°时插损和寄生调幅测试结果

相位均方根方差 $\theta_{\Delta, \text{RMS}}$ 和幅度均方根误差 $A_{\Delta, \text{RMS}}$ 通常被用来衡量移相器的性能优劣，其表达式分别为^[10]：

$$\theta_{\Delta, \text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N |\theta_{\Delta i}|^2} \quad (11)$$

$$A_{\Delta, \text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_{\Delta i}|^2} \quad (12)$$

式中， N 为移相状态数量； $\theta_{\Delta i}$ 为第 i 种移相状态的实际相移量与理想相移量的差值； $A_{\Delta i}$ 为第 i 种移相状态的插损与该种移相状态的插损均值的差值。由图 7、8 和式(11)、式(12)可计算出 $\theta_{\Delta, \text{RMS}}$ 和 $A_{\Delta, \text{RMS}}$ ，

如图9所示。该移相器在整个频率范围内的相位均方根方差为 $8^{\circ}\sim 10.8^{\circ}$, 幅度均方根误差小于0.45 dB。表1给出了所提出移相器与已有移相器的指标对比。由表中可以看出, 所提出的 GaN-FET 移相器具有最优的功耗、插损、功率容量性能。

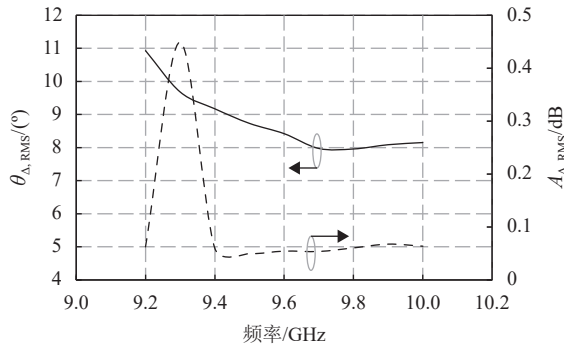


图9 移相器相位和幅度均方根方差

表1 与已报道移相器的性能对比

方法	频率/GHz	相移/ $^{\circ}$	IL/dB	功耗/mW	功率容量/dBm
文献[8]	11.7~12.2	22.5/45/90/180	1.8	36	29
文献[10]	9~10.3	11/22	1.2	100	N/G
文献[11]	6~18	22.5/45/90/180	2.1	8.7	-6.7
	15~26		4.6	11.7	-1.9
文献[12]	8~12	22.5	2	未给出	38
本文	9.2~9.8	30/60	1	0.17	40

4 结束语

本文对以传统传输线加载移相器为基础的电路单元进行了详细的理论分析, 创造性地采用 GaN-FET 管芯实现了超低功耗、低插损的大功率移相器, 实测结果与仿真结果相一致, 验证了所提设计方法的可行性和实用性。文中采用的设计方法可广泛应用在大功率低功耗移相器的设计中, 具有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

[1] 吕海涛. SAR 雷达模拟成像技术研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(5): 70-73.
LYU H T. Research on SAR radar analog imaging technology[J]. Naval Electronics Engineering, 2010, 30(5): 70-73.

[2] XU H P, XIAO Z Y, GAO J, et al. A novel wavenumber domain SAR imaging algorithm based on the fractional fourier transform[J]. Chinese Journal of Electronics, 2014, 23(4): 866-870.

[3] ANDREAS R B, LUDWIG R. Radar imaging of urban areas by means of very high-resolution SAR and interferometric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 2971-2982.

[4] CEREOLO L, TORRE A. The role of performance modelling in active phased array SAR[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE, 2007: 1569-1572.

[5] LEONARDO F Y, DAVID H C, MIGUEL A A, et al. Hybrid sparse linear array synthesis applied to phased antenna arrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 185-188.

[6] LUDWIG M, FELDLE H P, OTT H. A miniaturised X-band T/R-module for SAR-systems based on active phased array techniques[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Firenze: IEEE, 1995, 3: 2063-2065.

[7] 邓广健, 黄文华, 巴涛, 等. 高功率铁氧体移相器的设计与实验研究[J]. 现代应用物理, 2016, 7(3): 030501(1)-030501(6).
DENG G J, HUANG W H, BA T, et al Design and experimental study of high power ferrite phase shifter[J]. Modern Applied Physics, 2016, 7 (3): 030501(1)-030501(6).

[8] GLANCE B, AMITAY W. A fast switching, low loss, low drive, 12 GHz pin phase shifter[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Orlando: IEEE, 1979: 232-234.

[9] SRINIVASA P, KUMAR S A, SHARMA A, et al. Design of a novel S band dual mode low loss high power PIN diode phase shifter with planar folded dipole configuration [C]//IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. TelAviv: IEEE, 2011: 1-4.

[10] SUN X, FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ J, SIERRA-PÉREZ M, et al. Low-Loss loaded line phase shifter for radar application in X band[C]//European Radar Conference. Madrid: IEEE, 2018: 477-480.

[11] KOH K J, REBEIZ G M. 0.13- μm CMOS phase shifters for X-, Ku-, and K-band phased arrays[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, 42(11): 2535-2546.

[12] ROSS T N, CORMIER G, HETTAK K, et al. High-power X-band GaN switched-filter phase shifter[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Tampa: IEEE, 2014: 1-4.

[13] 伍文俊, 兰雪梅. GaN FET 的结构、驱动及应用综述[J]. 电子技术应用, 2020, 46(1): 22-29, 38.
WU W J, LAN X M. Overview of the structure, drive and application of GaN FET[J]. Electronic Technology Application, 2020, 46(1): 22-29, 38.

[14] CARROLL J M. Using GaN FETs for high power RF switches[C]//IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium Digest. Monterey: IEEE, 2008: 1-4.

[15] 喻梦霞, 李桂萍. 微波固态电路[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2008.
YU M X, LI G P. Microwave solid state circuit[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2008.

[16] DAVID M P. 微波工程[M]. 第四版. 北京: 电子工业出版社, 2019.
DAVID M P. Microwave engineering [M]. The 4th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2019.