

文章编号: 1672-2892(2010)02-0163-06

基于加载线型 Ka 频段的五位数字移相器

刘玥玲, 康小克, 王永帅

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 数字移相器广泛应用于相控阵雷达中, 本文采用一前一后加载支线的方法设计了 11.25°, 22.5° 和 45° 移相单元, 以 3 dB 支线耦合器的形式设计 90° 和 180° 移相单元, 在 Ka 频段研制出五位数字移相器。该移相器在 30 GHz~31 GHz 工作频带内, 各移相单元实测相移误差最大为 6.5°, 最小为 0.2°; 插入损耗最大为 11.8 dB, 最小为 8.6 dB; 输入驻波比小于 2, 整个电路尺寸为 110 mm × 55 mm × 25 mm。

关键词: Ka 频段; 数字移相器; 一前一后加载支线; 3 dB 支线耦合器

中图分类号: TN623

文献标识码: A

Design of 5-bit digital phase shifter in Ka-band using tandem stub

LIU Yue-ling, KANG Xiao-ke, WANG Yong-shuai

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: The digital phase shifter is widely used in phased-array radar. The phase shifter was fabricated using tandem stub for 11.25°, 22.5° and 45°, and using 3 dB branch-line coupler type for 90° and 180°. A 5-bit digital phase shifter circuit in Ka-band was presented. The measurement results indicated that the maximum of the phase error was 6.5°, the minimum of the phase error was 0.2°, the maximum of insertion loss was 11.8 dB, the minimum of insertion loss was 8.6 dB, and the VSWR was better than 2 in the frequency band of 30 GHz–31 GHz. The whole volume of the phase shifter was 110 mm × 55 mm × 25 mm.

Key words: Ka-band; digital phase shifter; tandem stub; 3 dB branch-line coupler

近年来, 毫米波技术得到长足的发展, 广泛应用于卫星通信和雷达等系统中, 特别在相控阵雷达中应用最多。移相器是相控阵雷达发射/接收组件的重要组成部分。在功率合成方面, 为了获得更大的功率输出, 采用多路大功率合成技术是最经济的方法之一, 毫米波移相器也是多路大功率合成技术的关键部件。数字式微带PIN管移相器以其体积小、成本低、制作简单等优点已成为目前移相器的主流。使用小相移移相器可使功率合成效率更高, 损耗更小。小相移(45°及以下)移相器常采用负载线移相器, 因其衰减小, 峰值功率容量大, 驻波较小。

但是, 现在公开报道用传统微带负载线移相器方法研制的小相移移相器, 在毫米波最小相移只做到22.5°^[1-4], 因为传统负载线移相器主要靠改变加载在传输线上的分支线控制相移, 用来改变相移、调节匹配的变量过少, 给设计工作造成了一定的困难。本文运用一前一后加载支线形式设计小相移毫米波数字移相器。

1 基本设计原理

为了克服传统负载线移相器的局限性^[5], 本文运用改进型一前一后加载支线式移相器设计11.25°, 22.5°和45°移相单元, 见图1。在PIN管的正、负端均接入具有各自特性阻抗和长度的分支线。

一前一后加载支线移相器, 是利用单刀单掷开关为移相器提供2种加载状态^[6]。图1中, 开关器件由与电容 C_d 并联的理想开关表示。开关器件前后均有一段支线, 此时两个加载电纳均为非零正值。

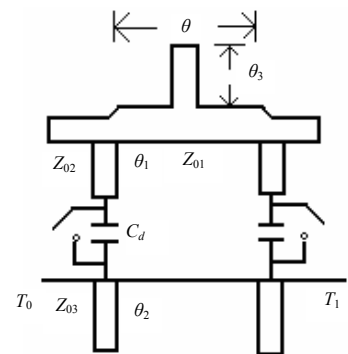


Fig.1 Equivalent circuit of tandem stubs phase shifter
图1 一前一后加载支线移相器等效图

如果开关电容可以忽略,即 $C_d \approx 0$, 开路线的输入导纳为 $Y_1 = jY_{02} \tan \theta_1$, 欧姆损耗极低即电导 $G_1 \approx 0$, 则前支部分电长度为:

$$\theta_1 = \tan^{-1}(B_+/Y_{02}) \tag{1}$$

当开关导通时,由 T_0, T_1 向下看,分支线的输入导纳:

$$Y_2 = jY_{03} \tan \theta_2 \tag{2}$$

总的分支线输入导纳:

$$Y = jY_{02} \tan \left[\tan^{-1}(Y_{03} \tan \theta_2 / Y_{02}) + \theta_1 \right] \tag{3}$$

此处 $Y = -jB_-$, 可求出 θ_2 。式(1)~式(3)中: Y_{01}, Y_{02}, Y_{03} 为图 1 中对应阻抗部分的导纳; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 为图 1 中对应部分的电长度; B_+ 和 B_- 分别为二元负载线移相器的加载电纳^[7]。

经典的一前一后加载支链式移相器结构中,加入了电长度为 θ_3 的调谐支节,通过调整该支节的长度和宽度,使移相器更容易匹配。

在 3 dB 耦合器的基础上运用支链耦合形式设计 90° 和 180° 移相单元(见图 2)。1 端口接信号源,2 端口接匹配负载,同时把二个短路器放在 3,4 端口,1,2 口之间信号的相移受 3,4 端口短路面位置的控制。在实际电路中采用电控 PIN 管作为电抗负载接于 3,4 端口,以偏压控制 PIN 管的工作状态^[8]。

3,4 臂的短路器位置之差为 Δl , 则二极管通断两状态的相位差 $\Delta\phi$ 为:

$$\Delta\phi = 2k\Delta l = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta l \tag{4}$$

式中: λ 为主传输线的波导波长; k 为传播系数。对短路器的短路面位置即距 3 dB 电桥 3,4 臂参考面的距离 l 进行选择, 则从参考面向短路器看去的电纳 jB_+ 为:

$$jB_+ = -jY_0 \cot \frac{2\pi}{\lambda} l \tag{5}$$

如 B_+, B_- 在二极管通断两状态的短路器位置的相位差为 $\Delta\phi$, 则相应的短路面位置变动 $\Delta l = \frac{\Delta\phi\lambda}{4\pi}$, 故短路面位置距参考面为 $l + \Delta l$, 此时短路线的输入电纳即对应于 jB_- , 即^[9]:

$$jB_- = -jY_0 \cot \frac{2\pi}{\lambda} (l + \Delta l) = -jY_0 \cot \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\Delta\phi\lambda}{4\pi} \right) \tag{6}$$

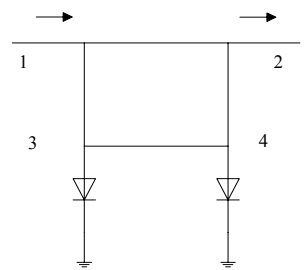


Fig2. Configuration of branch-line coupler phase shifter
图 2 支链耦合移相器原理图

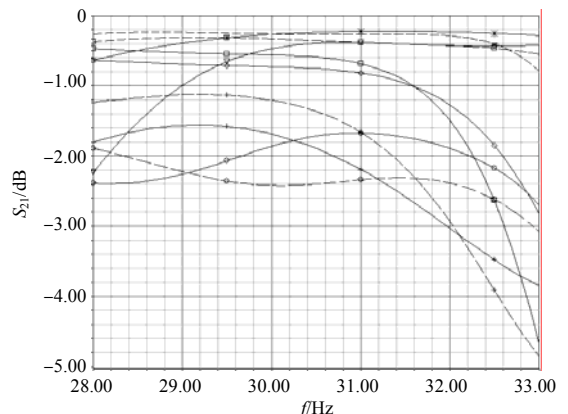
2 设计仿真和实测结果

一前一后加载支链形式的小移相量移相单元, 后向支链和匹配支节是决定移相器性能的主要参数。支链耦合形式的大移相量移相单元主要是靠微带网络调节匹配和相移量。在初值计算的基础上利用 Ansoft HFSS 仿真软件进行更为精确的三维仿真, 微带线的特性阻抗是 50Ω 。图 3 为仿真结果, (a),(b),(c) 分别为插入损耗(S_{21})、输入回波损耗(S_{11})、相移量随频率变化情况。

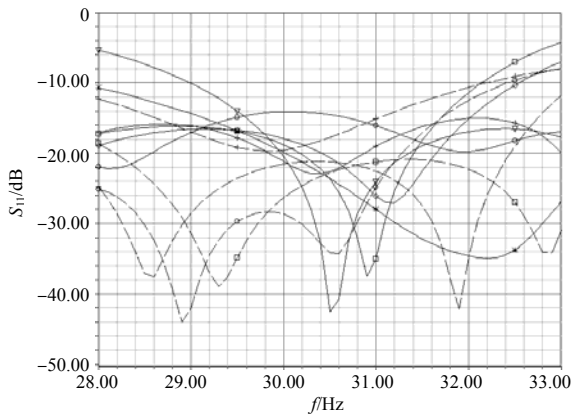
图中:

- 11.25°移相单元正向; ----- 11.25°移相单元反向;
- *— 22.5°移相单元正向; —□— 22.5°移相单元反向;
- ▽— 45°移相单元正向; —◇— 45°移相单元反向;
- 90°移相单元正向; ---+--- 90°移相单元反向;
- 180°移相单元正向; —+— 180°移相单元反向。

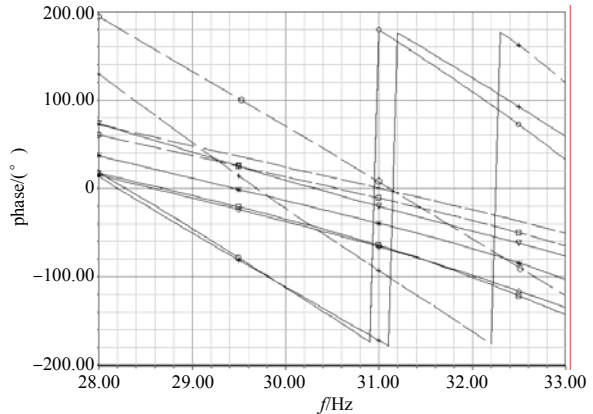
由图 3 仿真结果可看出, 该移相器所有移相单元在 30 GHz~31 GHz 的频率范围内, 仿真结果为驻波小于 1.2, 插入损耗小于 -2.5 dB, 相位误差最大为 3° 。



(a) simulation results of S_{21}



(b) simulation results of S_{11}



(c) simulation results of the phase shift

Fig.3 Simulation results of phase shifter
图3 各移相单元的 HFSS 仿真结果

3 PIN 管的等效

由于电路尺寸很小，对二极管的性能要求高，所以采用PIN二极管管芯。PIN二极管管芯没有管壳电容，芯片与微带间利用导电胶连接，因此引线电感很小。本设计选用的PIN二极管管芯为M/A-COM公司的MA4AGFCP910。根据客户数据手册，其正向偏置电阻 $R_S=5.2 \Omega$ ，反向偏置电容 $C_P=18 \text{ fF}$ 。该PIN二极管在射频微波频率下的正偏电模型和反偏电模型等效电路如图4所示，正向状态用正向电阻 R_S 表示。反向状态由反向串联电阻 R_P 和反向电容 C_P 串联表示。由于 R_P 远小于容抗，故反向状态可近似以反向电容 C_P 表示。

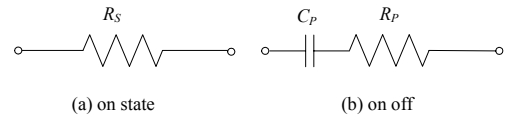


Fig.4 Equivalent circuit of the PIN switch
图4 PIN管等效电路

4 五位数字移相器的实测结果

通过三维 HFSS 仿真确定了各移相单元的尺寸，在此基础上加上偏置网络和直流通路，对五位移相单元进行级联制作、调试及测试，实物图见图 5。

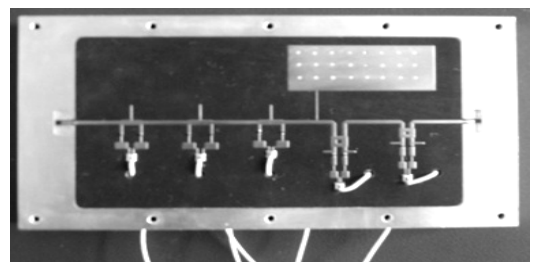
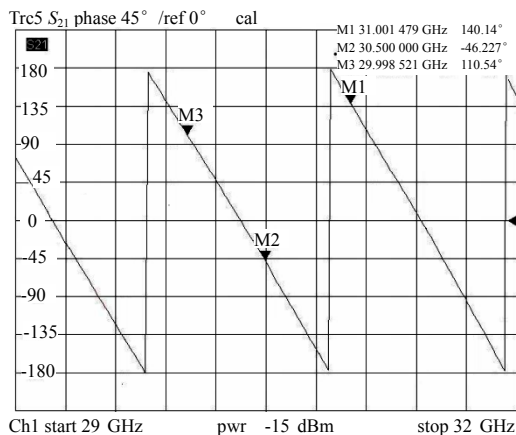


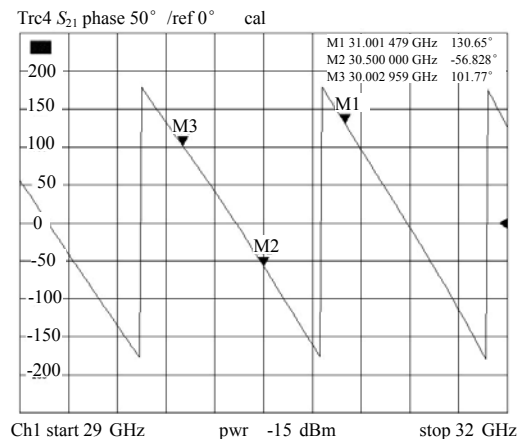
Fig.5 Fabricating circuit of 5-bit phase shifter
图5 Ka 频段五位数字移相器实物图

根据仿真模型制作五位移相器，其实测结果示于图 6~图 7。图 6 为各移相单元的相位测试结果，M1,M2,M3 分别为中心频率 31 GHz,30.5 GHz 和 30 GHz 处的相移量。图 7 为各移相单元的 S 参数测试结果，M1,M2,M3 分别为中心频率 31 GHz,30.5 GHz 和 30 GHz 处的 S 参数测量结果。

由图可以看出，在要求的频带范围内，设计的移相器具有好的性能指标，各移相单元实测相移误差最大为 6.5°，最小为 0.2°；插入损耗最大为 11.8 dB，最小为 8.6 dB；输入驻波比小于 2。



(a) measure result of PIN diode in reverse bias



(b) measure result of PIN diode in forward bias in 11.25°

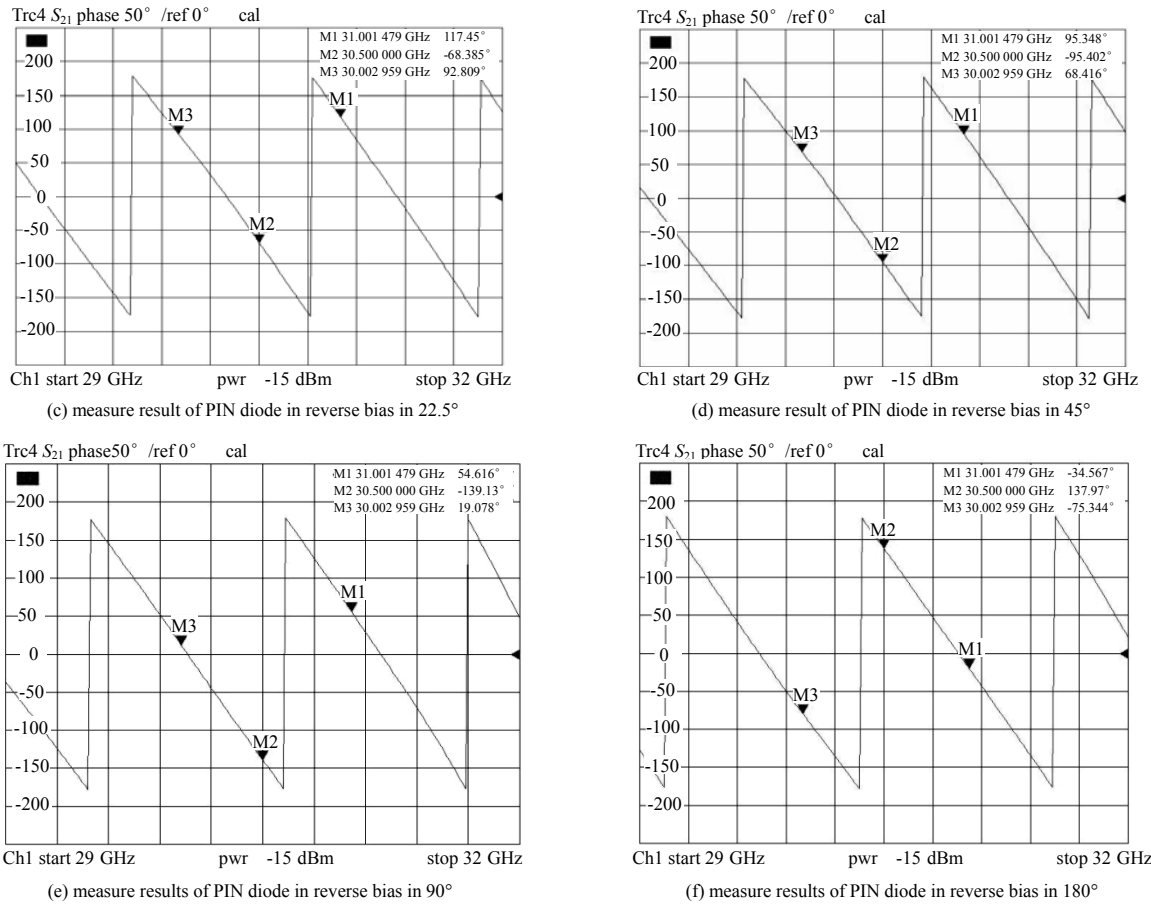


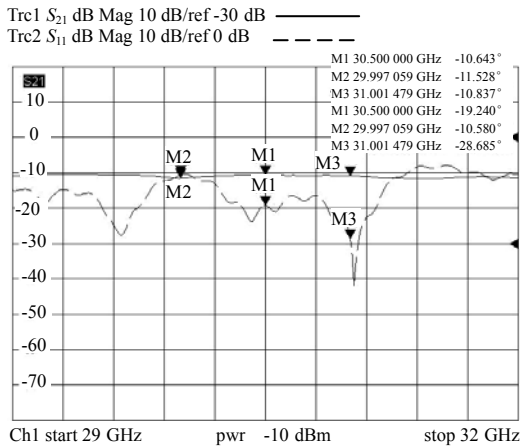
Fig.6 Measure result of phase shift
图6 相移测试结果

与仿真结果相比较,实际制作的五位数字移相器除了相位的误差有所增加以外,插入损耗增加了 3 dB 左右,在边缘频段处回波损耗也有一定的恶化。产生相移误差主要有 2 个原因: a) 二极管建模时电感的选择不准确。b) PIN 管芯的等效模型参数直接采用了客户数据手册,不够精确,导致相移量和移相精度的偏差。产生 S 参数误差的主要原因: a) 仿真时没有考虑二极管自身的插入损耗和隔离度; b) 五位移相单元间的相互影响,相互干扰; c) 每一位移相单元距离过远,级联微带线过长造成一定的插损。

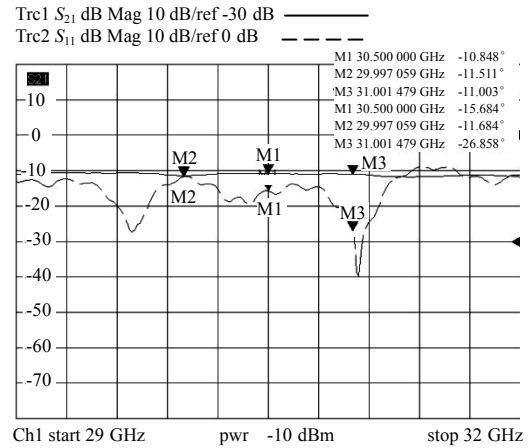
表 1 为 Ka 频段五位数字移相器在 30.5 GHz 处测试的结果。

表 1 Ka 频段五位数字移相器 30.5 GHz 处测试结果
Table1 Measure results of 5-bit digital phase shifter at 30.5 GHz in Ka band

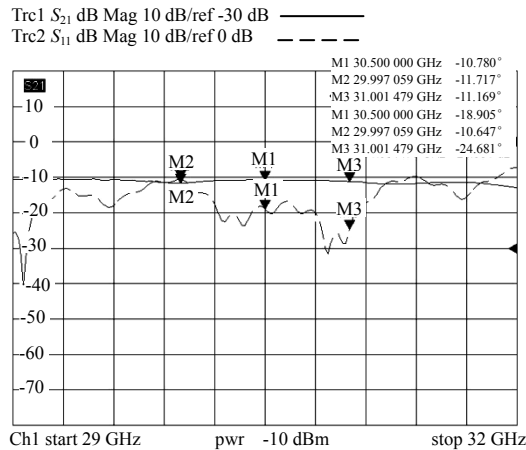
phase shift/(°)	parameters		
	S_{11}/dB	S_{21}/dB	phase shift/(°)
0	-15.4	-12.5	0
11.25	-20.9	-12.7	10.6
22.50	-18.6	-13.2	22.2
33.75	-29.5	-12.3	32.0
45.00	-24.3	-12.1	49.2
56.25	-35.0	-12.2	58.0
67.50	-22.4	-12.7	70.0
90.00	-16.4	-12.1	92.8
101.25	-21.9	-12.1	100.0
112.50	-18.0	-12.7	113.0
135.00	-24.0	-12.7	134.0
180.00	-17.1	-11.2	183.2
191.25	-25.0	-11.1	195.0
202.50	-22.2	-11.7	209.0
225.00	-30.8	-11.8	231.0
270.00	-14.7	-11.3	277.0



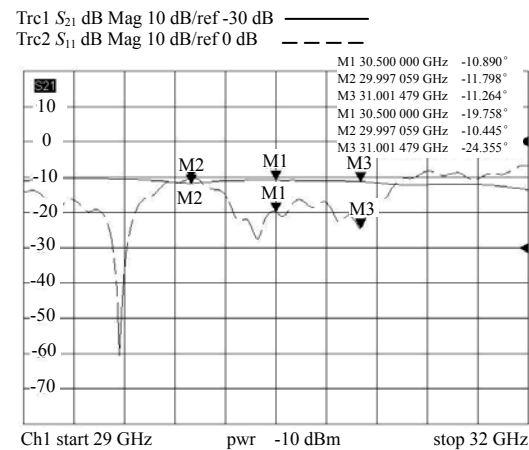
(a) measure results of PIN diode in reverse bias



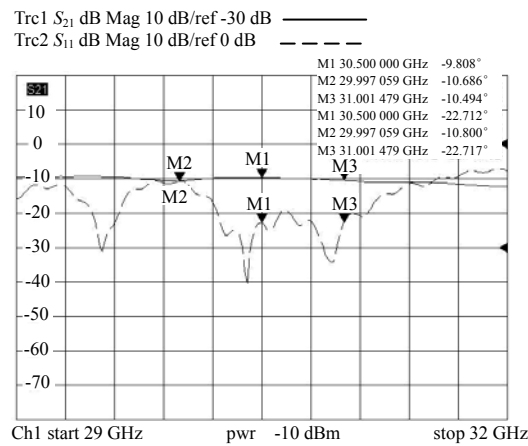
(b) measure results of PIN diode in forward bias in 11.25°



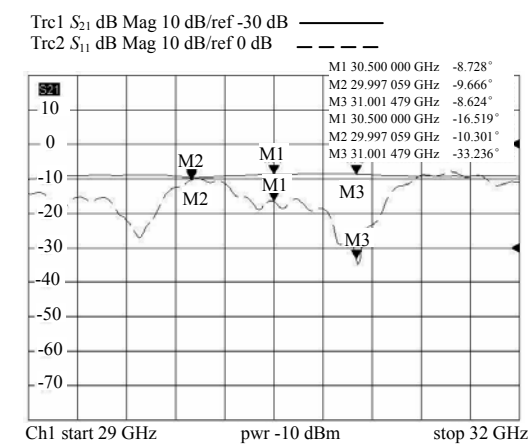
(c) measure results of PIN diode in reverse bias in 22.5°



(d) measure results of PIN diode in reverse bias in 45°



(e) measure results of PIN diode in reverse bias in 22.5°



(f) measure results of PIN diode in reverse bias in 45°

Fig.7 Measure results of S-parameter
图 7 S 参数测试结果

5 结论

运用改进型一前一后加载支线形式和支线耦合形式分别设计小相移量移相器和大相移量移相器,并利用仿真软件设计了一个工作在 30 GHz~31 GHz 的五位数字移相器模型。该移相器实测结果与仿真结果吻合,在频率范围内具有好的性能指标。

参考文献:

- [1] Yue Yu, YanBo, Xu Ruimin. A Millimeter-Wave 4-bit Digital Phase Shifter[C]// 2005 Asia-Pacific Microwave Conference. 2005,2:4-7.
- [2] Maruhashi K, Mizutani H, Ohata K. Design and Performance of a Ka-Band Monolithic Phase Shifter Utilizing Nonresonant FET Switches[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000,48(8):1313-1317.
- [3] Zhang Yonghong, Feng he, Fan Yong. Ka-band 4-bit Phase Shifter with Low Phase Deviation[C]// IEEE 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceeding. 2004:382-385.
- [4] Hayden J S, Rebeiz G M. A Low-Loss Ka-Band Distributed MEMS 2-Bit Phase Shifter Usir Metal-Air-Metal Capacitors[C]// IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest. 2004.
- [5] 杨荣振, 黎滨洪. 实现小相移数字式微带负载线移相器的一种新方法[J]. 上海交通大学学报, 2001,35(1):44-46.
- [6] Atwater H A. Circuit Design of the Loaded-Line Phase Shifter[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 1985(33): 626-634.
- [7] 王琳. 数字移相器的小型化研究[D]. 成都:电子科技大学, 2002.
- [8] 刘玥玲, 杨永辉, 周邦华. 一种毫米波大相移量移相器设计方法[J]. 信息与电子工程, 2008,6(6):478-481.
- [9] 清华大学《微带电路》编写组. 微带电路[M]. 北京:人民邮电出版社, 1976.

作者简介:



刘玥玲(1984-), 女, 辽宁省鞍山市人, 在读硕士研究生, 主要从事毫米波五位数字移相器的研究. email:l_yueling@126.com.

康小克(1979-), 男, 河南省禹州市人, 在读硕士研究生, 主要从事微波毫米波电路方面的研究工作.

王永帅(1982-), 男, 山东省临沂市人, 2008年毕业于电子科技大学物理电子学院, 主要从事微波毫米波电路方面的研究工作.

(上接第 162 页)

- [5] 应嘉年, 顾茂章, 张克潜. 微波与光导波技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1996.
- [6] Zhang Yu Lin, Hong Wei, Wu Ke, et al. Novel Substrate Integrated Waveguide Cavity Filter With Defected Ground Structure[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and techniques, 2005,53(4):1280-1287.
- [7] 甘本祯, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计[M]. 北京:科学出版社, 1973.
- [8] Chen Xiao ping, Hong Wei, Cui Tiejun, et al. Substrate Integrated Waveguide Linear Phase Filter[J]. IEEE Trans. on Microwave and Wireless components Letters, 2005,15(11):787-789.
- [9] Guglielmi M, Montauti F, Pellegrini L, et al. Implementing transmission zeros in inductive-window bandpass filters[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and techniques, 1995,43(8):1911-1915.

作者简介:



黄 祥(1985-), 男, 广西钦州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波电路设计. email:huangx03@gmail.com.

唐高弟(1963-), 男, 四川省三台县人, 研究员, 主要从事微波电路、雷达系统研究.

李中云(1971-), 男, 四川省泸州市人, 副研究员, 主要从事微波电路和雷达系统研究.

张贵福(1977-), 男, 黑龙江省绥化市人, 助理研究员, 主要从事微波频率源研究.