

文章编号: 2095-4980(2016)01-0127-04

基于微机电系统开关的四位移相器设计

刘若林, 鲍景富*, 黄裕霖, 李昕熠

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 为了解决相控阵雷达小型化和低损耗的问题, 设计了一个工作频率为 2.2 GHz 的射频微机电系统(MEMS)四位开关线型移相器。首先分析了直接接触式 MEMS 串联开关的插入损耗和隔离度, 并得到仿真结果。在此基础上设计了基于该开关的移相范围为 0~180° 的四位移相器电路, 相移量为 12° 每步。采用 HFSS 软件对其进行仿真, 得到移相精确度、插入损耗和隔离度等关键结果, 移相器工作在 2.2 GHz 时, 隔离度大于 20 dB, 插入损耗小于 1 dB。该设计与传统移相器相比体积更小, 且具有更小的插入损耗和更大的隔离度。

关键词: 微机电系统开关; 移相器; 移相精确度; 插入损耗; 隔离度

中图分类号: TN623

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0127

Design of a 4-bit phase shifter based on the MEMS switches

LIU Ruolin, BAO Jingfu*, HUANG Yulin, LI Xinyi

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: A four-bit linear phase shifter@2.2 GHz based on the Radio Frequency(RF) Micro-Electro-Mechanical Systems(MEMS) switch is designed in order to realize miniaturization and low insertion of the phased array radar. The insertion loss and isolation loss of the direct contact cascade MEMS switch have been analyzed firstly, and the simulation results are obtained. Then a 4-bit phase shifter from 0 to 180° based on the former MEMS switches is designed. The phase shift magnitude is 12° per step. The simulation results including phase shift precision, insertion loss and isolation are obtained by using HFSS software. As the simulation results indicated, the phase shifter has an isolation greater than 20 dB and the insertion loss is less than 1 dB. The phase shifter is more compact compared with the traditional one, and has smaller insertion loss and larger isolation.

Key words: Micro-Electro-Mechanical Systems(MEMS) switch; phase shifter; phase shift precision; insertion loss; isolation

微波和毫米波移相器是电信和雷达中相控阵天线的关键组件, 基于微机电系统(MEMS)开关的移相器具有结构简单、易于实现、低插损、高精确度的特点, 在未来有着广阔的应用空间和巨大的发展前景。MEMS 技术属于新型多学科交叉技术, 它涉及机械、电子、化学、物理、光学、生物、材料等多学科。通过采用微电子技术和微加工技术(包括体微加工、表面微加工、LIGA 和晶片键合等技术)相结合的制造工艺, 制造出各种性能优异, 价格低廉, 微型化的传感器、执行器、驱动器和微系统^[1-2]。作为射频(Radio Frequency, RF)MEMS 中的关键与核心元件, RF MEMS 开关具备低插入损耗、高隔离度、大线性带宽(0.1 GHz~120 GHz)、低功耗等特性, 因而受到越来越多的关注和重视^[3]。在通信和雷达应用中, 移相器是必不可少的基本元件, 而以 RF MEMS 开关为基本部件构成的 RF MEMS 移相器继承了 RF MEMS 开关的各种优点, 性能远优于半导体场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)移相器或二极管(Positive-Intrinsic-Negative diode, PIN)移相器^[4-5]。MEMS 开关的研究是当前 MEMS 技术的热点, 开关的仿真在 MEMS 技术中显得尤为重要。目前的开关仿真主要目的是为了完成开关的设计, 而关于 MEMS 开关运用的仿真相对较少。本文采用 HFSS 软件对开关进行仿真, 得到其插入损耗和隔离度等主要性能参数, 并以此为基础, 完成了基于 MEMS 开关的四位移相器的仿真设计。

收稿日期: 2014-11-28; 修回日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金资助项目(U1430102)

*通信作者: 鲍景富 email:baojingfu@uestc.edu.cn

1 串联接触式 RF MEMS 开关的电路模型

串联接触式 MEMS 开关的结构见图 1。通过给 MEMS 膜桥下方的驱动电极施加一定的直流电压，使膜桥下拉，开关导通；当撤去电压时，膜桥在自身回复力作用下复位，使开关断开。

根据微波散射参数的定义，两端都匹配情况下，反射信号可表示为 S_{11} ，传输信号为 S_{21} ，导通下的 S_{21} 即为插入损耗，断开下的 S_{21} 即为隔离度。导通和断开状态下的散射参数分别如下：

$$\text{导通: } S_{11} = \frac{R_{\text{on}}}{R_{\text{on}} + 2Z_0}, \quad S_{21} = \frac{2Z_0}{R_{\text{on}} + 2Z_0}。$$

$$\text{断开: } S_{11} = \frac{1}{1 + j\omega C_3 2Z_0}, \quad S_{21} = \frac{j\omega C_3 2Z_0}{1 + j\omega C_3 2Z_0}。$$

式中： Z_0 为传输线的特征阻抗； ω 为通过开关信号的角频率。通常，串联接触式开关在导通时的接触电阻 R_{on} 是非常小的，当 $\frac{R_{\text{on}}}{Z_0} \ll 2$ 时， $S_{11} \approx \frac{R_{\text{on}}}{2Z_0}$ ， $S_{21} \approx 1$ 。而断开时的串联电容 C_3 也是非常小的，当 $\omega C_3 Z_0 \ll 0.5$ 时， $|S_{11}| \approx 1$ ， $|S_{21}| \approx 2\omega C_3 Z_0$ 。由这些近似的公式，可以在已知接触电阻或串联电容时，求出大致的隔离度和插入损耗，反之也可以在得到开关的仿真或测试结果之后，反求接触电阻或串联电容^[6-9]。

在 MEMS 开关设计中，开关结构见图 2。此处采用 HFSS 仿真，开关插入损耗和隔离度的仿真测试电路见图 3。从图中可以看到介质层为 2 层：下层介质层采用硅材料，上层则为氧化硅。

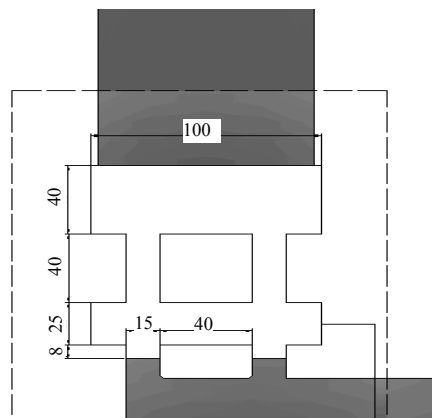
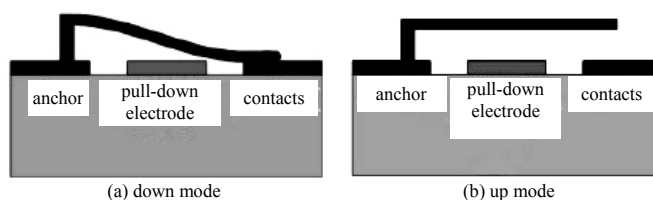


Fig.2 Anatomical diagram of the MEMS switch
图 2 开关解剖示意图



(a) down mode (b) up mode
Fig.1 Structure of DC-contact MEMS series switches
图 1 串联接触式 MEMS 开关的结构示意图

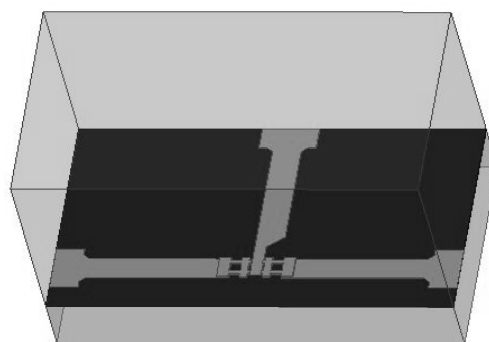
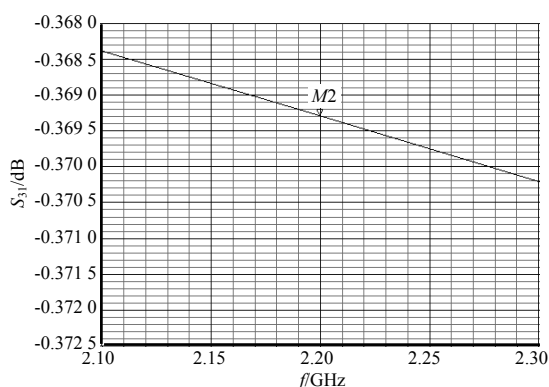
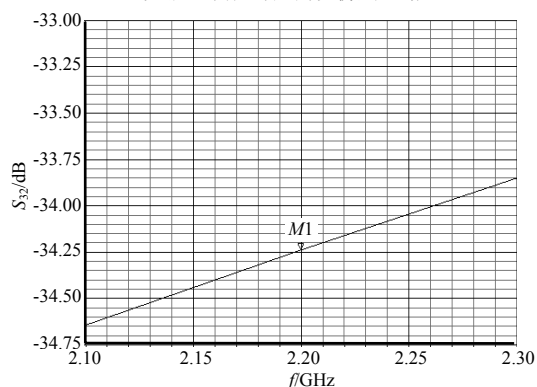


Fig.3 Diagram of switch insertion loss and isolation simulation circuit
图 3 开关插入损耗与隔离度仿真电路图



(a) simulation results of insertion loss



(b) simulation results of isolation

Fig.4 Simulation results of insertion loss and isolation

图 4 开关插入损耗与隔离度仿真结果

在此基础上再铺设第 2 层介质层。仿真结果见图 4。可以看到，在 2.2 GHz 处插入损耗约为 -0.37 dB，隔离度约为 -36 dB。

2 MEMS 开关线性移相器设计

2.1 移相器原理

就原理而言，均匀传输线上两点之间的相位差，等于相移常数 β 和两点之间距离 λ 的乘积，即与 λ 成正比而与 λ_g (传输线中的波长) 成反比，即 $\psi_1 - \psi_2 = \beta \lambda = \frac{2\pi}{\lambda_g} \lambda$ 。因此移相器可分为波程式移相器和波导波长式移相器。前者改变波程，后者改变相移常数。基于 MEMS 开关的波程式移相器的代表为开关线型 MEMS 移相器 (Switched Line MEMS Phase Shifters)，通过 MEMS 开关来选择不同的信号通道，从而实现移相功能^[10-11]。

2.2 MEMS 开关线性移相器设计

此处利用 LineCalc 工具，可以很方便地计算出需要的数据。以相移量为 180° 的四位移相器电路为例，可以得到微带宽度 $W \approx 1.09 \text{ mm}$ ，移相步进所对应的微带长度 $L \approx 2.70 \text{ mm}$ 。

电路设计：四位即是说能得到的相位状态有 $2^4=16$ 种。在搭建电路时，以一条通路为 0 相位路径，在此基础上通过改变其他通路的电长度 (分别与 0 相位路径相差 L 的不同的整数倍)，来构建其余 15 种不同的移相器微带电路通路。此处采用一种 4×4 式的电路设计方法，见图 5， $\theta_i (i=1, 2, \dots, 8)$ 分别代表对应微带线的电长度。而 MEMS 开关的作用即为选通特定的路径，并通过不同路径的切换来完成相移。

移相器仿真时开关沿用前文测试中的开关模型。使用 HFSS 软件仿真，可将不同开关梁的高度设置为一组变量，模拟开关导通，则设置开关梁的高度使梁与其下极板接触；模拟开关断开，则设置相应开关梁的高度使梁不与其下极板接触。

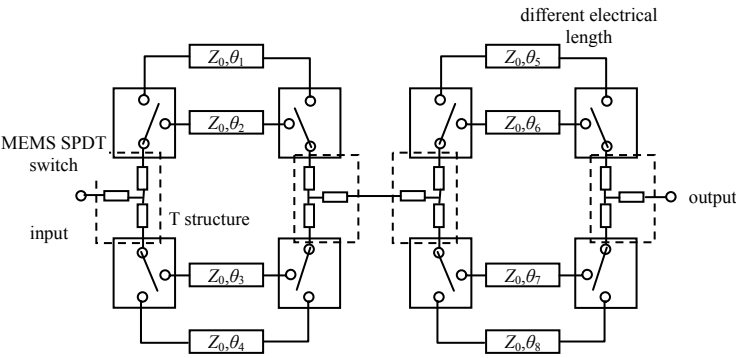


Fig.5 4×4 phase shifter structure
图 5 4×4 式移相器结构

绘制出的相移量为 180° 的移相器的 HFSS 仿真电路见图 6。通过扫描分析，可以得到 16 种移相结果。结果见表 1，从表中数据可以看出仿真电路在移相、移相精确度、电压驻波比、回波损耗和插入损耗等方面都有较好结果。基本满足在 2.2 GHz 的频率工作时，隔离度大于 20 dB，插入损耗小于 1 dB。

3 结论

本文以研究 MEMS 开关为基础，给出了串联接触式 RF MEMS 开关插入损耗和隔离度的理论分析和 HFSS 验证。在此基础上设计了一个四位 RF MEMS 开关线型移相器，通过 HFSS 仿真验证了一些关键参数如移相精确度、移相范围、插入损耗和隔离度，说明了由 MEMS 开关构建的实时延移相器具有低插入损耗、高隔离度、线性度好和移相精确度高等优势，同时体积较小，对构建小型化相控阵雷达有一定的价值。

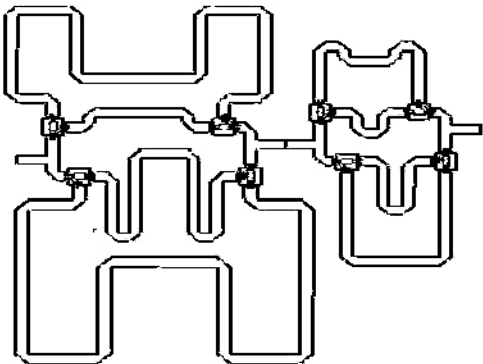


Fig.6 Diagram of phase shifter simulation circuit
图 6 移相器仿真电路图

表 1 移相器仿真结果

Table1 Simulation results of the phase shifter				
phase difference/(°)	phase/(°)	voltage standing wave ratio	S_{11}/dB	S_{21}/dB
0	165.09	1.14	-23.59	-0.38
12	152.55	1.33	-16.98	-0.39
24	141.35	1.21	-20.14	-0.45
36	128.49	1.20	-25.75	-0.39
48	116.72	1.11	-19.23	-0.37
60	103.37	1.25	-26.52	-0.37
72	92.96	1.10	-21.27	-0.40
84	80.21	1.19	-25.65	-0.47
96	68.81	1.11	-18.53	-0.47
108	56.03	1.27	-29.47	-0.47
120	44.90	1.07	-19.69	-0.40
132	32.04	1.23	-25.46	-0.48
144	22.43	1.11	-17.88	-0.48
156	9.62	1.29	-22.04	-0.40
168	-1.12	1.17	-20.79	-0.43
180	-14.41	1.20	-20.76	-0.38

参考文献:

- [1] LEE H G, PARK J Y, BU J U, et al. MEMS technology for advanced telecommunication applications[J]. International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2002, 12(2): 215–233.
- [2] 朱键. RF MEMS 国内外的发展趋势及我国的发展对策[J]. 中国机械工程, 2005, 16(z): 4–7. (ZHU Jian. The domestic and overseas development trend of RF MEMS and the development countermeasures of our country[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(z): 4–7.)
- [3] GABRIEL M Rebeiz, Jeremy B Muldavin. RF MEMS switches and switch circuits[J]. IEEE Microwave Magazine, 2001, 2(4): 59–71.
- [4] YAO J, CHANG M F. A surface micromachined miniature switch for Telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz[C]// The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden: [s.n.], 1995: 384–387.
- [5] 张永华, 丁桂甫, 蔡炳初, 等. 发展中的 RF MEMS 开关技术[J]. 微纳电子技术, 2003, 40(5): 28–32. (ZHANG Yonghua, DING Guifu, CAI Bingchu, et al. The development of RF MEMS switch technology[J]. Micronanoelectronic Technology, 2003, 40(5): 28–32.)
- [6] SZE S M. Physics of Semiconductor Devices[M]. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [7] 张万里, 彭斌, 文旭, 等. 串联 MEMS 开关的一种等效电路模型[J]. 微波学报, 2002, 18(4): 45–48. (ZHANG Wanli, PENG Bin, WEN Xu, et al. An equivalent circuit model of series MEMS switches[J]. Journal of Microwaves, 2002, 18(4): 45–48.)
- [8] 孙建海, 崔大付, 肖疆. 接触式悬臂梁 RF-MEMS 开关的研制与数值模拟分析[J]. 半导体学报, 2006, 27(2): 309–312. (SUN Jianhai, CUI Dafu, XIAO Jiang. Manufacture and numerical simulation analysis of contact cantilever RF MEMS switch[J]. Journal of Semiconductors, 2006, 27(2): 309–312.)
- [9] 张宇峰. 毫米波 MEMS 开关和 MEMS 移相器的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007. (ZHANG Yufeng. The study of millimeter wave MEMS switches and MEMS phase shifters[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2007.)
- [10] 靳炉魁. RF MEMS 开关及移相器的分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. (JIN Lukui. Analysis and design of RF MEMS switches and phase shifter[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [11] 高杨, 柏鹭, 郑英彬, 等. 基于 SP4T 开关的 4 位 MEMS 开关线式移相器设计[J]. 微纳电子技术, 2012, 48(12): 792–796. (GAO Yang, BAI Lu, ZHENG Yingbin, et al. Design of a 4-bit MEMS switch-line phase shifter based on SP4T switches[J]. Micronanoelectronic Technology, 2012, 48(12): 792–796.)

作者简介:



刘若林(1992–), 男, 成都市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微电子机械系统(MEMS)。

鲍景富(1964–), 男, 浙江省义乌市人, 博士生导师, 教授, 主要研究领域为射频电路与系统、射频微机电器件及系统等。email: baojingfu@uestc.edu.cn。

黄裕霖(1990–), 男, 重庆市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为微电子机械系统(MEMS)。

李昕熠(1991–), 男, 浙江省义乌市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为微电子机械系统(MEMS)。