

文章编号: 1006-2467(2007)S-0032-04

# 基于 RF MEMS 开关的移相器设计

陈华君<sup>a</sup>, 郭东辉<sup>a,b</sup>

(厦门大学 a. 物理系; b. 电子工程系, 厦门 361005)

**摘要:** 传统电子移相器由于损耗问题难以向更高频率发展, 射频微机电系统(RF MEMS)技术的出现使其得以替代半导体开关来设计更高频率的移相器. 利用具有优异 RF 性能的串联电阻式 RF MEMS 开关来进行开关线式移相器设计, 通过开关切换不同的信号延迟通路, 以实现从  $0^\circ \sim 180^\circ$  步进  $22.5^\circ$  的相移功能. 仿真结果表明, 该移相器在 5.8 GHz 时, 插入损耗在  $-0.3 \sim -0.7$  dB 变化, 输入回损低于  $-20$  dB, 相移功能正确.

**关键词:** 移相器; 开关线式移相器; 相控阵天线; 射频微机电系统

**中图分类号:** TN 432      **文献标识码:** A

## Switch-Line Phase Shifter with RF-MEMS Switch

CHEN Hua-jun<sup>a</sup>, GUO Dong-hui<sup>a,b</sup>

(a. EDA Lab., Dept. of Physics; b. Dept. of Electronic Eng.,

Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Due to the losses of semiconductor switch, traditional electronic phase shifter could hardly perform desirably at higher frequency. RF MEMS technology demonstrates that it could be used in phase shifter design as a substitute for traditional semiconductor switch. Since series resistor RF MEMS switch has excellent RF performance, it is used in the design of switch-line phase shifter. This phase shifter achieves phase shift from  $0^\circ$  to  $180^\circ$  steps  $22.5^\circ$  by using RF MEMS switch to switch between different delay-time lines. The simulation results demonstrate that the insertion loss is from  $-0.3$  dB to  $-0.7$  dB, and the return loss is lower than  $-20$  dB. The function of phase shift is correct.

**Key words:** phase shifter; switch-line phase shifter; phase array antenna; radio frequency micro electro mechanical system (RF MEMS)

随着商业和军事系统日益向小型化、智能化和灵活化系统的发展, 对于低成本、重量轻和高性能天线的设计需求也日益增加. 其中, 相控阵天线作为一种智能化系统得到了很大的发展. 而作为相控阵天线关键组成部分的无源移相器, 由于其相对简单, 故硬件结构成为一个重要的技术. 传统电子移相器通

常使用 p-n 二极管、MESFETs 或者 pHEMT 作为开关在不同电长度信号线之间进行切换, 以得到所需的相移. 这些半导体开关的损耗问题抑制了传统多位移相器向更高频率的发展<sup>[1]</sup>.

随着 RF MEMS 技术的出现, 在毫米波频率, RF MEMS 开关成为低损耗移相器和其他控制电路

收稿日期: 2006-03-05

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(A0410007); 国家人事部留学人员创业基金项目联合资助

作者简介: 陈华君(1977-), 男, 福建晋江人, 博士生, 主要从事射频/微波、微机电系统、集成电路方面的研究. 郭东辉(联系人), 男, 教授,

博士生导师, E-mail: dguo@xmu.edu.cn.

设计的一个关键的革新技术. RF MEMS 开关从直流低频到 120 GHz 的微波毫米波均具有优秀的开关性能<sup>[2-4]</sup>. 其优势在于接近 0 的功耗和很低的插入损耗. 因此, 近年来许多移相器设计中使用了低损耗并联或者串联 MEMS 开关<sup>[5,6]</sup> 代替传统的半导体开关, 其损耗得到了大幅度的降低. 这些 MEMS 移相器有的是基于传统开关线使用单端多掷开关<sup>[5]</sup> 设计, 有的是使用 3 dB 耦合器的反射线设计<sup>[6]</sup>, 还有的是用开关分布式 MEMS 传输线来改变波的相速以产生一个相移, 但是这种移相器的损耗在 Ka 频段仍然达到 -5.1 dB. 在这些 MEMS 移相器设计中, 开关线式结构具有结构简单、计算方便、损耗更低的优点. 然而, 这种结构由于延迟线的长度占用了大量面积而相对较大, 故在多位设计中, 如何优化结构设计使其进一步小型化, 对于大孔径电子扫描天线尤其重要.

为了进一步说明对于移相器设计的低功耗、小型化设计的要求, 本文首先介绍了相控阵天线的基本工作原理, 然后采用 RF MEMS 开关设计了一个从  $0^\circ \sim 180^\circ$  步进  $22.5^\circ$  的开关线移相器, 最后通过仿真分析了 RF MEMS 开关的损耗问题, 并验证了移相器的功能实现, 得到了很好的 RF 性能结果.

## 1 相控阵天线

在相控阵天线中, 对于每个天线单元的相位配置控制是通过移相器来实现的. 这种电子扫描阵列 (ESAs) 可以是有源的也可以是无源的. 在有源相位阵列中 (见图 1(a)), 每个天线后面都直接连接发射/接收 (T/R) 模块, 再连接移相器, 因此移相器损耗不会对发射功率和噪声系数产生影响. 但是, 当需要一个很大的天线扫描阵列时, 如此多的 T/R 模块使得整体系统体积大且非常昂贵. 在无源相位阵列中 (见图 1(b)), 每个天线后面都直接连接移相器, 若干个移相器再连接一个 T/R 模块. 这样虽然移相器的损耗会直接影响系统发射功率及噪声系数, 但其优势在于使用更少数量的 T/R 模块和其他组成部分, 得到一个更简单、花费更低的系统. 然而, 这仅在移相器具有十分低的损耗时才是可行的, 因为 T/R 模块必须补偿移相器的损耗. 一个高损耗的移相器意味着 T/R 模块必须具有更高的发射功率、更大的尺寸和更昂贵的费用, 这样就难以实现使用无源阵列来获得一个简单化的设计. RF MEMS 开关在从直流低频到 120 GHz 范围内仍可保持低损耗和低寄生效应的特性<sup>[2-5]</sup>. 利用这些开关可以消除在传统移相器中存在的主要损耗成分, 显著减少全部通

过移相器的 RF 损耗, 使得单一功率放大器可以供应若干个天线单元, 极大减少了相位阵列硬件的费用、重量和功率耗散问题.

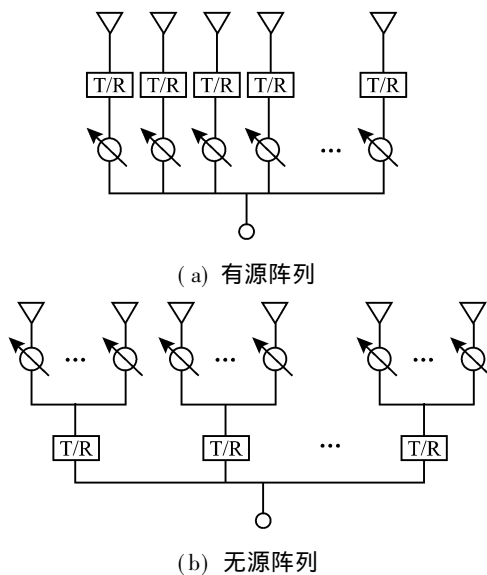


图 1 相控阵天线

Fig. 1 Phase array antenna

## 2 移相器设计

RF MEMS 开关线移相器结构如图 2 所示. 该结构由微带线和串联电阻式 RF MEMS 开关组成, 以高阻硅作为衬底材料. 微带线用来传播 RF 信号, 而串联电阻式 RF MEMS 开关则用来控制信号通路的通/断, 以实现不同信号通路之间的切换. 图 2 是相移从  $0^\circ \sim 180^\circ$  步进  $22.5^\circ$ , 对于从  $0^\circ \sim 360^\circ$  步进  $22.5^\circ$  的移相器, 具有相同的结构原理, 仅需多接一段电长度为  $180^\circ$  的延迟线即可实现.

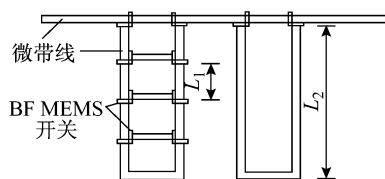


图 2 RF MEMS 移相器结构

Fig. 2 The configuration of RF MEMS phase shifter

图 2 中, 前后 2 个部分的结构设计原理是相同的, 都有 2 条通路. 一个是参考通路, 另一个则是根据需要的相移制作得长一点的延迟通路. 当参考通路上的开关闭合, 而延迟通路上的开关断开时, 信号通过参考通路传播, 此时定义为  $0^\circ$  相移状态. 当参考通路上的开关断开, 而延迟通路上的开关闭合时, 信号通过延迟通路传播, 比参考通路多传播了所需要的电长度, 此时就得到了延迟信号. 为了得到小步进相移, 第一部分的延迟线通路又分为 4 条支

线,连同参考通路,总共 5 条通路,相邻两条通路之间的电长度相差  $22.5^\circ$ 。因此,由第一部分的 RF MEMS 开关可以控制选择从  $0^\circ \sim 90^\circ$  步进  $22.5^\circ$ , 5 个不同的相移值。这样,利用重复使用同一小段信号线可以有效地减小整个设计的尺寸,以进一步达到小型化的目的。第二部分结构仅实现  $0^\circ$  和  $90^\circ$  相移。两个部分结合就可以实现相移从  $0^\circ \sim 180^\circ$  步进  $22.5^\circ$ 。图 3 所示分别为  $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $135^\circ$  相移时的信号通路示意图。

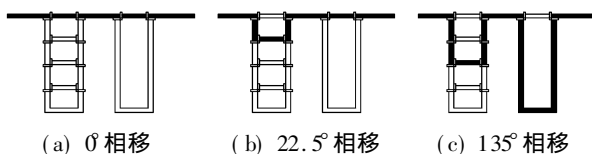


图 3 相移为  $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $135^\circ$  时的信号通路

Fig. 3 Signal route at  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $135^\circ$  phase shift

### 3 仿真分析

移相器的损耗主要来自于传输线损耗和 RF MEMS 开关的损耗。减少传输线长度可以相对有效地降低传输线损耗,这主要是依靠减少参考线长度来获得紧凑的结构设计实现的。RF MEMS 开关在移相器中的损耗主要来自于偏置电极旁路作用以及开关与传输线连接部分的阻抗匹配损耗。偏置电极与开关桥之间存在寄生电容,特别是当开关桥被拉下时电容值最大。这样就造成对 RF 信号的旁路作用,增大信号损耗。

通过使用细导线来作为偏置网络连线,或在偏置通路上加一个  $10\text{ k}\Omega$  偏置电阻的方法<sup>[7]</sup>可以减小偏置电极泄漏的信号。而开关与传输线之间的阻抗不匹配,会产生回波导致传输的能量损耗。通常,  $50\ \Omega$  微带传输线在一定衬底上的宽度有个相应的值。若该值与开关的信号通路宽度相差越小,则造成的损耗也会越小;反之,则越大。在不匹配状态下,开关的信号通路越长,损耗也会越大。因此,应尽可能使得传输线宽度与开关的信号通路宽度接近,或者在两者的接触位置采用楔形连接线也可相对减小损耗。

RF MEMS 开关,在本文设计的移相器中建立的简化等效模型如图 4 所示。图中:微带信号传输线的特性阻抗为  $50\ \Omega$ ,开关的信号通路的特性阻抗为  $75\ \Omega$ ;偏置电极在开关中间,其寄生电容在拉下时最大,约为  $5\text{ pF}$ ;再加一偏置电阻  $10\text{ k}\Omega$ ,以减小损耗。其仿真结果如图 5 所示。由图可见,在  $5.8\text{ GHz}$  时,插入损耗为  $-0.044\text{ dB}$ 。随着频率的增加,即开

关的信号通路电长度增加,插入损耗将逐渐增大。

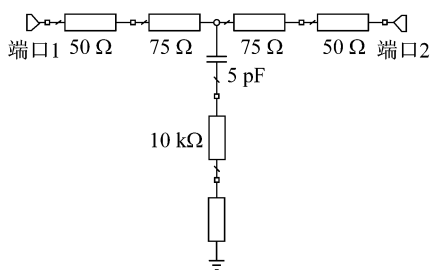


图 4 传输线与开关连接的等效模型

Fig. 4 Equivalent model at the conjunction of transmission line and switch

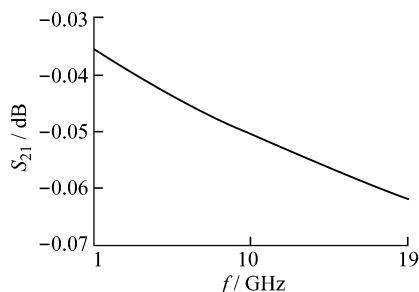


图 5 插入损耗  $S_{21}$

Fig. 5 Insertion loss ( $S_{21}$ )

本文设计的 RF MEMS 移相器选择高阻硅 ( $\epsilon_r = 11.9$ ) 作为衬底材料,其结构(见图 2)由两部分组成:第一部分结构的 8 段纵向延长线的长度都约为  $1/32$  波导波长,即  $L_1 = 0.53\text{ mm}$ 。第二部分结构的纵向延长线长度约为  $1/8$  波导波长,即  $L_2 = 2.12\text{ mm}$ 。2 个部分的参考通路长度皆为  $0.53\text{ mm}$ 。微带传输线的宽度取  $w = 0.13\text{ mm}$ ,使得输入输出阻抗达到  $50\ \Omega$ 。RF MEMS 开关尺寸为  $0.1\text{ mm} \times 0.05\text{ mm}$ 。

通过控制 RF MEMS 开关来切换信号通路,可以得到 9 种相移状态,图 6 所示为该移相器的 RF 性能的仿真结果。由图 6(a)可见,在  $5.8\text{ GHz}$  时,移相器的插入损耗  $S_{21}$  在  $-0.3\text{ dB}$  ( $0^\circ$  相移时)  $\sim -0.7\text{ dB}$  ( $180^\circ$  相移时) 变化。在  $0^\circ$  相移时,由于传输线最短,并且信号通过的开关也最少,故其插入损耗  $S_{21}$  最小,而其他状态则较大,但整体平均损耗仍然很小,约为  $-0.5\text{ dB}$ 。移相器的插入损耗随着频率的增加而有所变大,在  $20\text{ GHz}$  范围内的插入损耗  $S_{21}$  都小于  $-1.8\text{ dB}$ 。由图 6(b)可见,在所有相移状态下,其输入回波损耗  $S_{11}$  都低于  $-20\text{ dB}$ 。该移相器的相移结果如图 7 所示。在  $5.8\text{ GHz}$  时,仿真相移结果与预期结果符合。

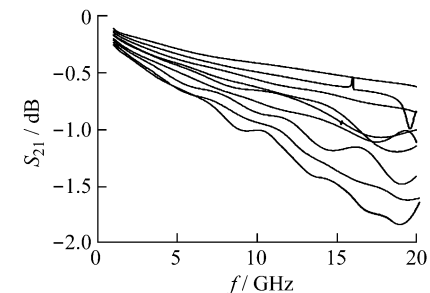
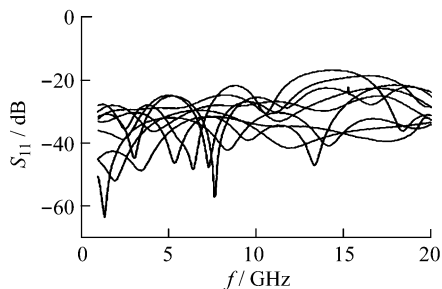
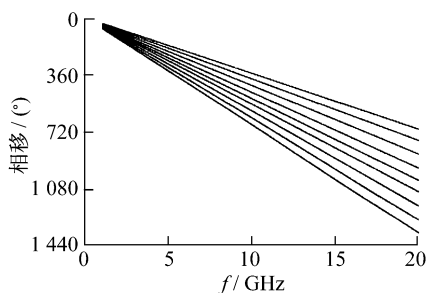
(a) 插入损耗  $S_{21}$ (b) 输入回损  $S_{11}$ 图 6 插入损耗  $S_{21}$  和输入回损  $S_{11}$ Fig. 6 Insertion loss ( $S_{21}$ ) and return loss ( $S_{11}$ )

图 7 相移随频率的变化

Fig. 7 Phase shift vs frequency

## 4 结 语

随着未来通信技术向着毫米波甚至更高频段的深入, RF MEMS 以其优异的 RF 性能逐渐取代传

统半导体开关用于移相器设计中. 本文采用串联电阻式 RF MEMS 开关来设计移相器, 实现从  $0^\circ \sim 180^\circ$  步进  $22.5^\circ$  的相移功能. 该结构对于不同的相移使用了共用部分延迟线, 而非单相移单元延迟线的结构, 因此可以减小整体面积. 并且在 5.8 GHz 时其输入回损小于  $-20$  dB, 插入损耗在  $-0.3 \sim -0.7$  dB 变化. 该结构可以符合相控阵天线中单一功率放大器供应若干个移相器及天线单元的需要.

## 参考文献:

- [ 1 ] Campbell C F, Brown S A. A compact 5-bit phase shifter MMIC for K-band satellite communication systems[ J]. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, 2000, 48: 2652- 2656.
- [ 2 ] Rebeiz G M, Muldavin J B. RF MEMS switches and switch circuits[ J]. **IEEE Microwave Magazine**, 2001, 2( 4 ): 59- 71.
- [ 3 ] Rizk J B, Tan G L, Muldavin J B, *et al.* High-isolation W-band MEMS switches [ J]. **IEEE Microwave and Wireless Components Lett**, 2001, 11: 10- 12.
- [ 4 ] Goldsmith C L, Yao Z, Eselman S, *et al.* Performance of low loss RF MEMS capacitive switches[ J]. **IEEE Microwave Guided Wave Lett**, 1998, 8: 269 - 271.
- [ 5 ] Pillans B, Eselman S, Malczewski A, *et al.* Ka-band RF MEMS phase shifters[ J]. **IEEE Microwave and Guided Wave Lett**, 1999, 9: 520- 522.
- [ 6 ] Malczewski A, Eselman S, Pillans B, *et al.* X-band RF MEMS phase shifters for phased array applications[ J]. **IEEE Microwave and Guided Wave Lett**, 1999, 9: 517- 519.
- [ 7 ] Tan G L, Mililovic R E, Hacker J B, *et al.* Low-loss 2- and 4-bit TTD MEMS phase shifters based on SP4T switches [ J]. **IEEE Trans Microwave Theory and Techniques**, 2003, 51( 1 ): 297- 304.