

文章编号 1004-924X(2015)增-0272-07

集成 MEMS 移相器缝隙耦合相控阵天线

韩琦*, 徐立新, 王婷, 丛琳

(北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要:研究了相控阵天线系统使用的 MEMS 移相器的结构设计以及与耦合馈电相控阵天线的集成方法。根据相移原理和波束扫描原理,提出了移相器传输线的长度计算方法;对悬臂梁结构的 MEMS 开关进行设计,总结了优化开关结构的途径;最后给出了 MEMS 移相器与耦合馈电天线阵的集成方法。提出的制作工艺简单易于实现。结果显示:优化的 MEMS 开关在 25 GHz 频率内插入损耗小于 0.2 dB,隔离度大于 -15 dB;移相器在 15~20 GHz 的频段内阻抗匹配良好,相移特性呈良好的线性变化,相移度数为 45°,最大相移误差为 ±5°。基于此移相器集成的 2×2 MEMS 耦合天线阵在 17.3 GHz 的工作频率下波束可以进行 ±30° 的扫描,最大增益为 9.3 dB,满足低成本单片集成相控阵天线的要求。

关键词:微机电系统(MEMS);MEMS 移相器;开关线型移相器;MEMS 开关;单片集成;相控阵天线

中图分类号:TN821.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0272

Coupled feed phased array antenna integrated with MEMS phase shifter

HAN Qi*, XU Li-xin, WANG Ting, CONG Lin

(School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: hanqi1988@bit.edu.cn

Abstract: The structure design of a MEMS (Micro-electromechanical System) phase shifter used in phase array antennas was studied and its integration method with a coupled feed phased array antenna was given. The length of the transmission line according to the phase shift principle and the beam scanning principle was calculated. Then, the cantilever MEMS switch was designed and the optimization method of the switch was summarized. Finally, the integration method of the MEMS phase shifter with the coupled feed antenna array was presented. The results show that the insertion loss and the isolation of the optimized switch are less than 0.2 dB and more than -15 dB within 25 GHz, respectively. The phase shifter has a good impedance matching in 15 GHz-20 GHz, and its phase shift characteristics vary linearly. The shift phase is 45° with a maximum phase error of ±5°. The 2×2 MEMS coupled antenna array integration with this phase shifter can complete a beam steering angle of ±30° at 17.3 GHz. The highest gain of the array is 9.3 dB. This phase shifter meets low-cost monolithic integrated demand of the phased array antennas.

Key words: Micro-electromechanical System(MEMS);MEMS phase shifter; switched-line phase shifter; MEMS switch; monolithic integration; phased array antenna

收稿日期:2015-04-07;修订日期:2015-05-15.

基金项目:总装备部预研基金资助项目

1 引言

移相器是相控阵天线和雷达系统中的重要器件,通过它可以实现不依赖机械设备的电磁波扫描,其插入损耗、工作频段等直接影响收发系统的效率和灵敏度,影响系统的体积、重量和成本等。随着相控阵天线地发展,传统的铁氧体移相器暴露出难以小型化和集成化的不足,而易集成化的半导体移相器在射频性能方面又很难令人满意,而且这些传统器件的功耗和成本也较高。微机电系统(MEMS)的出现为实现和利用微型化、集成化,提高器件和系统的功能密度、互连密度提供了重要途径。射频微机电(RF MEMS)是 MEMS 技术在射频领域的分支,利用 RF MEMS 技术研究和开发的开关具备低功耗、低成本、低插入损耗和高隔离度等优点^[1],基于开关的 MEMS 移相器也得到了越来越广泛地应用。

国内外对 MEMS 移相器集成的相控阵天线都有一定的研究。国内研究报道的 MEMS 移相器微波性能优异^[2],可以满足相控阵的应用需求,但没有具体提到与相控阵系统的集成方法。国外研究报道的 MEMS 移相器集成方法主要有基于 PCB 加工技术的混合集成方法^[3-7]和基于 MEMS 加工技术的直接集成方法^[8-9]。混合集成方法是将移相器与 PCB 基板的的天线阵集成,其中包含利用引线键合技术将移相器接入天线阵的馈线系统中完成集成^[3-5]和直接利用 PCB 加工技术将移相器制作在馈线系统中完成集成^[6-7]两种。直接集成方法是移相器与天线阵一起制作,最后通过封装互连集成^[8-9]。两类集成方法都存在一定的缺点:引线键合的集成方法由于在传输线中增加了引线的损耗,会导致系统的损耗增大,以及影响端口的阻抗匹配;利用 PCB 加工技术直接制作的集成方法由于工艺的限制,制作出的开关不如 MEMS 技术制作的开关性能优异,插入损耗相对较大、隔离度较小;直接集成方法中由于器件数量多,结构复杂,造成体积相对较大,封装互连密度高,制作成本较高。

本文提出了一种可用于与相控阵天线单片集成的移相器的设计及制作方法,基于此移相器提出了与缝隙耦合相控阵天线的集成方法。移相器以高阻硅为衬底,射频性能优异,与天线基片封装

过程简便;集成的相控阵天线辐射性能良好,可以满足低成本 MEMS 相控阵系统的应用需求。

2 MEMS 移相器设计与分析

MEMS 移相器主要包括分布式 MEMS 传输线型、反射型、开关线型和开关网络型。为了尽可能的减小集成系统体积、降低成本,采用了结构简单、开关数量使用较少的开关线型 MEMS 移相器。开关线型 MEMS 移相器结构如图 1 所示。包括两条电长度不同的传输线,以及 1 和 2 及 3 和 4 两组单刀双掷开关。

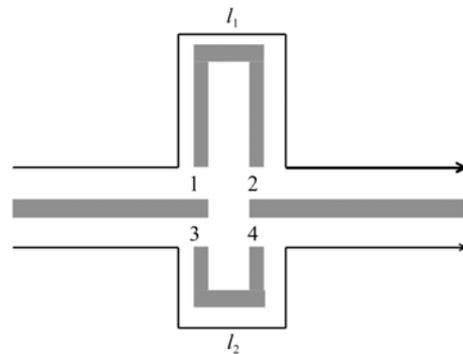


图 1 开关线型 MEMS 移相器

Fig. 1 Switched-line MEMS phase shifter

工作时,利用开关通断来切换传输线信号通路,产生相移。产生的相移为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_g}(l_2 - l_1), \quad (1)$$

式中: λ_g 为介质内的导波波长, l_2 和 l_1 分别为不同通路的两条传输线长度。传输线的长度差决定了移相器可以产生的相移。根据相控阵理论^[10],产生的相移与天线阵波束的指向直接相关,具体表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta, \quad (2)$$

其中: d 为天线阵元的间距,侧射阵一般取 $0.5\lambda \sim \lambda$, θ 为天线波束指向与法线方向夹角,侧射阵 $\theta = 0^\circ$ 。由式(1)、(2)可以得出开关线型移相器传输线长度的计算方法。如天线阵元间距 $d = 0.5\lambda$,要想使天线波束达到 30° 的扫描,根据式(2)可求得需要产生的相移 $\Delta\varphi = \pi/2$ 。再根据式(1)式得到此时两条传输线的长度差 $l_2 - l_1 = \lambda_g/4$ 。

由于移相器位于天线阵元和信号源之间,其

损耗会影响整个收发系统的性能和效率。移相器的损耗主要包括传输线的传输损耗、MEMS 开关的损耗等。减小移相器的损耗通常可采用以下方法：(1)采用低损耗的衬底，如高阻硅衬底，减小传输线的损耗；(2)优化 MEMS 开关性能，降低开关损耗。

本文采用的接触式悬臂梁开关结构如图 2 所示。



图 2 悬臂梁开关结构

Fig. 2 Cantilever beam switch structure

在悬臂梁与下电极之间外加电压时，产生静电力，使悬臂梁发生弯曲，当梁的前端接触到下方的信号线时，形成通路信号接通。开关衬底材料采用高阻硅，信号线、电极及悬臂梁的金属均采用 Cu，在下电极上方淀积一层 Si_3N_4 ，防止悬臂梁下拉时上下电极直接接触而造成开关失效。悬臂梁开关的设计需要考虑插入损耗、隔离度、驱动电压、开关响应时间等。

在外加电压下，悬臂梁和下拉电极可以看作平板电容，利用平板电容的静电力进行计算：

$$F_e = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC(g)}{d(g)} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A V^2}{g^2}, \quad (3)$$

式中：C 为悬臂梁与下拉电极间的电容，A 为等效平板电容有效面积，g 为梁与下拉电极之间的间隙，V 为电压。在静电力作用下，梁开始向下弯曲，但随着位移量的增大又会引起梁的弹性回复力增大，静电力与机械回复力相等，可表示为：

$$F_e = k(g_0 - g), \quad (4)$$

其中： g_0 为初始电极间距，k 为梁结构的弹性系数，与材料的杨氏模量、泊松比、结构参数（梁的长、宽、厚度）等决定。联立式(3)、(4)，可得：

$$V = \sqrt{\frac{2kg^2}{\epsilon_0 A} (g_0 - g)}. \quad (5)$$

对式(5)求导并令导数等于零，得到稳定临界点的位置为 $g = 2g_0/3$ 。代入式(5)中，得到临界电压值为：

$$V_P = V \left(\frac{2g_0}{3} \right) = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\epsilon_0 A}}, \quad (6)$$

当驱动电压超过临界电压值时，上极板会被迅速塌陷下拉到下极板上。一般驱动电压取临界电压的 1.2~1.4 倍。此时，开关的闭合时间为：

$$t_s \approx 3.67 \frac{V_P}{V_s \omega_0} = 3.67 \frac{V_P}{V_s} \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (7)$$

可以看出，开关的各个参数之间相互影响，相互制约。在结构设计中综合应用 ANSYS 和 HF-SS 有限元分析软件来进行各参数的调整。采用的优化 MEMS 开关的方法有：(1)保证梁的厚度和宽度，提高梁的刚度，但由于梁厚和梁宽影响梁的弹性系数，弹性系数太大导致开关闭合需要的驱动电压太高，而弹性系数太小会使梁的回复力不够，在较长时间处于吸附位置后容易产生黏连造成开关失效，所以梁厚度和宽度的确定需要做折衷的选择。(2)在长度有限的条件下，尽量增大悬臂梁上电极极板宽度，增大电容面积，降低驱动电压，同时也提高了梁的刚度。(3)在上电极板上打孔，既可以降低开关下拉过程中的空气阻尼，减少开关闭合时间，又可以减小一部分梁的质量，降低梁的弹性系数。(4)在悬臂梁前端引入触角设计，既减小接触电阻，又减小了开关在断开时信号线与悬臂梁之间的耦合电容，提高隔离度。适当加大梁与信号线的间距也可以减小耦合电容^[11]，但是会增大开关的闭合时间。在相同的悬臂梁高度下，有触角和无触角结构对隔离度的影响对比如图 3 所示，可以看出，有触角结构对开关的隔离度有一定的提升。

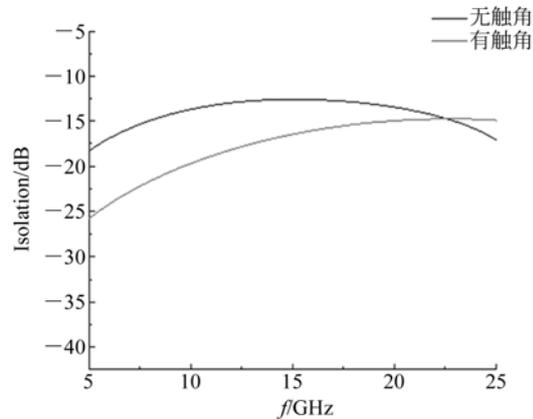


图 3 开关有触角与无触角的隔离度对比

Fig. 3 Isolation comparison of switch with and without a contact

得到的开关模型如图 4 所示,开关结构各参数如表 1 所示。

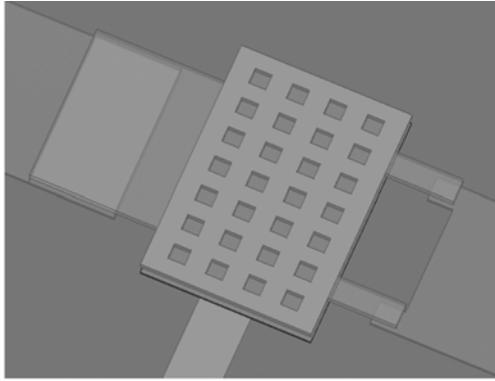


图 4 开关模型

Fig. 4 Model of switch

表 1 开关结构参数

Tab. 1 Structure parameters of switch

参数	数值
悬臂梁长/mm	0.35
悬臂梁宽/mm	0.2
悬臂梁厚/ μm	3
电极面积/ mm^2	0.3×0.2
小孔面积/ mm^2	0.02×0.02
触角长/mm	0.08
触角宽/mm	0.03
Si_3N_4 厚度/ μm	0.8
梁与极板间距/ μm	5

利用 ANSYS 有限元软件对开关结构进行模态仿真,得到开关的谐振频率为 29.4 kHz,开关质量为 1.3 μg ,由此计算出开关的弹性系数、下拉电压以及开关时间,具体数值如表 2 所示。

表 2 开关性能参数

Tab. 2 Performance parameters of switch

参数	数值
机械谐振频率/ $f/(\text{kHz})$	29.4
开关质量/ $m/(\mu\text{g})$	1.302 96
弹性系数/ $k/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	44.2
吸合电压/ $V_P/(\text{V})$	57
开关时间/ $t_s/(\mu\text{s})$	14.2

利用此开关构成的移相器模型如图 5 所示。

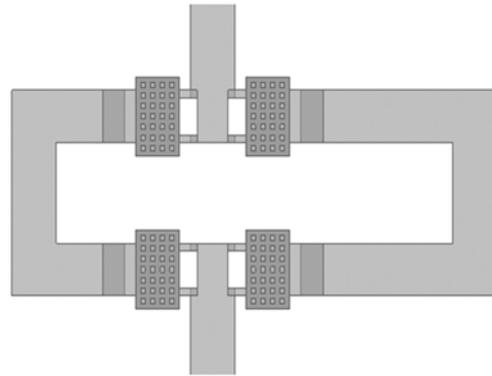


图 5 MEMS 移相器模型

Fig. 5 Model of MEMS phase shifter

移相器中的信号线与传输线均采用 50Ω 特征阻抗的微带线,所有的金属线都采用相同的材料。开关直接制作在传输线上,这样在设计加工时,只需在信号线和下电极的掩模版上多画出移相器传输线的图形,即可在加工开关的同时得到完整的移相器结构,不需要单独设计移相器的掩模版,节省了加工成本。

3 MEMS 移相器与缝隙耦合相控阵天线的集成

缝隙耦合馈电 MEMS 天线因其双层衬底结构设计灵活、带宽较侧馈天线更宽、在构成阵列系统中馈线排布更容易的优点,在相控阵天线阵中得到了大量应用^[12-13]。MEMS 天线的衬底多采用高阻硅材料,也可采用介电常数更小的玻璃材料作为天线层衬底^[14]。现有的 MEMS 键合技术可以完成硅-硅直接键合,硅-玻璃阳极键合,所以在耦合馈电相控阵天线中,只需要将天线阵贴片层和含有移相器的馈线层分别单独加工制作,最后通过 MEMS 键合技术将含有 2 层结构的衬底黏接即可完成集成,工艺成熟,操作简便。本文的 MEMS 移相器由于采用高阻硅为衬底以及微带线形式的信号传输线,因此在加工天线馈线层时可以直接将移相器进行制作,避免了引线互连。将移相器应用于玻璃-高阻硅衬底的 2×2 耦合馈电贴片天线阵中,如图 6 所示,通过阵元间移相器产生不同的相移,控制天线阵波束的转向。

天线阵列各参数如表 3 所示。

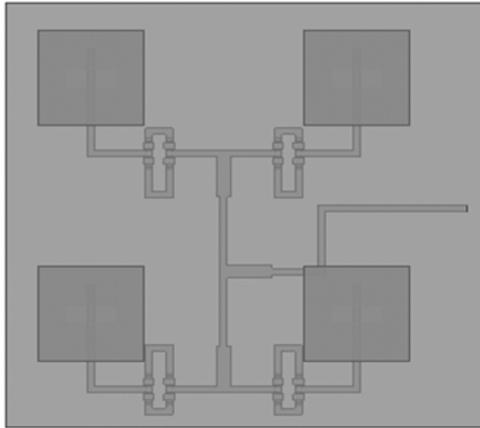


图 6 集成 MEMS 移相器的耦合馈电天线阵列

Fig. 6 Coupled feed antenna array integrated with MEMS phase shifter

表 3 天线阵列参数

Tab. 3 Parameters of antenna array

参数	数值
工作频率/GHz	17.3
玻璃衬底厚度/ μm	500
高阻硅衬底厚度/ μm	250
贴片长/mm	5.3
贴片宽/mm	5.3
缝隙长/mm	2.5
缝隙宽/mm	0.8
耦合馈线长/mm	5.6
馈线宽/mm	0.2
贴片单元间距/mm	7.675

天线采用 $50\ \Omega$ 特征阻抗的微带线馈电,在 T 型功分处采用 $35\ \Omega$ 四分之一微带线进行阻抗匹配,移相器两条传输线通路的长度差为 $\lambda_g/4$ 。设计天线阵元间距约为 $0.75\ \lambda$,根据式(1)和(2)求得此时阵元间相位差为 45° ,天线波束扫描角为 30° 。

4 仿真结果与分析

4.1 MEMS 开关仿真结果

优化设计的开关结果如图 7 所示。在 25 GHz 的频段内,开关闭合时 S_{11} 小于 $-15\ \text{dB}$,阻抗匹配良好,见图 7(a)。插入损耗小于 $-0.2\ \text{dB}$,隔离度大于 $-15\ \text{dB}$,电学性能良好,见图 7(b)。

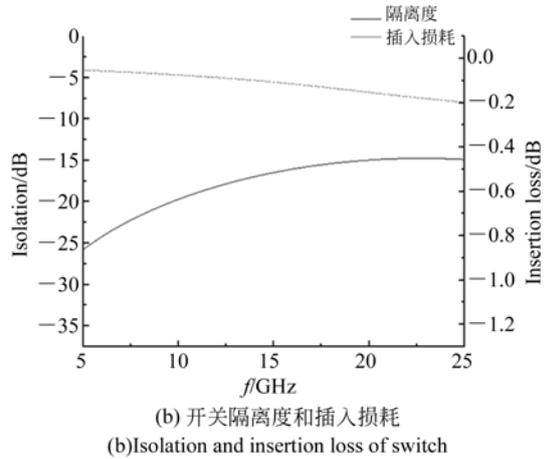
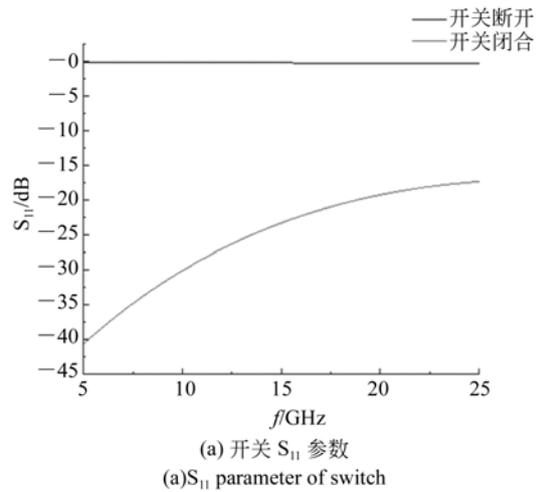
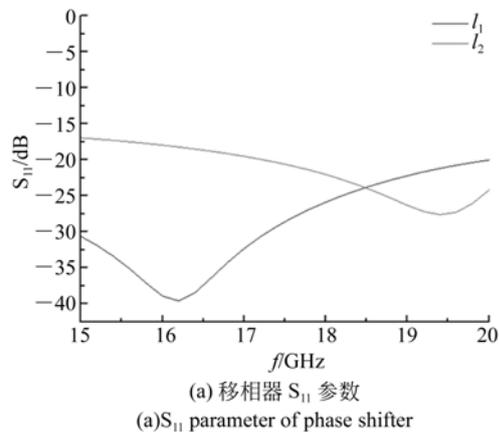


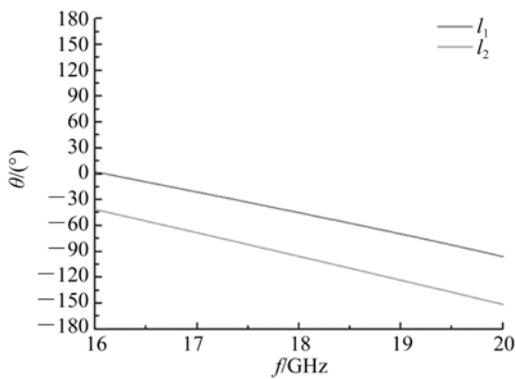
图 7 MEMS 开关仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the MEMS switch

4.2 MEMS 移相器仿真结果

图 8(a)为开关在切换两条通路时移相器的 S_{11} 曲线,在 $15\sim 20\ \text{GHz}$ 的频段内, S_{11} 均低于 $-10\ \text{dB}$,最低值达到 $-40\ \text{dB}$,移相器阻抗匹配良好。在 $16\sim 20\ \text{GHz}$ 的频带内,移相器的相移特





(b)移相器的相移特性
(b)Phase character of phase shifter

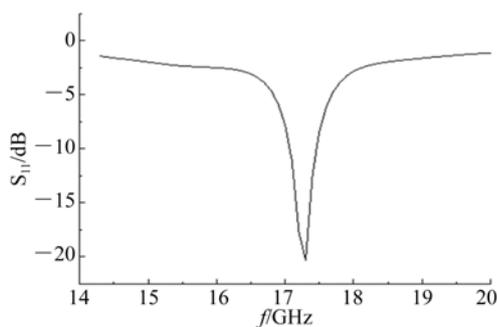
图 8 MEMS 移相器仿真结果

Fig. 8 Simulation results of MEMS phase shifter

性表现出良好的线性,同时在此频带内的相移误差小于 $\pm 5^\circ$,在 17~19 GHz 的频带内,相移误差小于 $\pm 2^\circ$,如图 8(b)所示。

4.3 MEMS 相控天线阵仿真结果

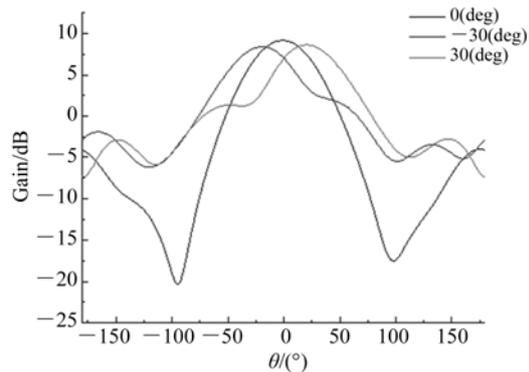
集成 MEMS 移相器的耦合馈电相控阵仿真结果如图 9 所示,图 9(a)为天线阵在 17.3 GHz 工作时的 S_{11} 曲线,图 9(b)为阵元间移相器产生不同相位时,天线波束扫描的远场辐射图。天线阵结构完全对称,远场辐射也表现出很好的对称性。在 0° 角时天线增益最大,为 9.3 dB。



(a)天线阵工作时回波损耗
(a)Return loss of antenna array

参考文献:

[1] REBEIZE G M, MULDAVIN J B. RF MEMS Switches and Switch Circuits [J]. *IEEE Micro Wave Magazine*, 2001, 10(12):59-71.
 [2] 郁元卫,姜理利,朱健. 4 位毫米波 MEMS 移相器 [J]. *固体电子学研究和进展*, 2013, 33(6):528-532.
 YU Y W, JIANG L L, ZHU J. A 4 bit Millimeter-



(b)天线波束扫描时远场辐射图
(b)Farfield radiation patterns with the beam steering

图 9 MEMS 相控天线阵仿真结果

Fig. 9 Simulation results of MEMS phased array antenna

5 结 论

本文针对小体积、低成本、高性能的相控阵天线系统的应用需求,提出了可与耦合馈电相控阵单片集成的 MEMS 移相器设计方法,研究了 MEMS 移相器传输线长度计算和开关优化方法,最后给出了与缝隙耦合馈电相控阵天线的集成方法。结果表明,此 MEMS 移相器在 15~20 GHz 频段内阻抗匹配良好,在 16~20 GHz 的频带内,移相器的相移特性表现出良好的线性,所设计相移度数为 45° ,在此频带内的相移误差小于 $\pm 5^\circ$,在 17~19 GHz 的频带内相移误差小于 $\pm 2^\circ$ 。基于此 MEMS 移相器集成的 2×2 耦合馈电相控阵天线在 17.3 GHz 时可进行波束 $\pm 30^\circ$ 扫描,最大增益 9.3 dB。此移相器结构简单,便于加工制作,可以满足低成本单片集成相控阵天线的需求。

wave MEMS Phase Shifter[J]. *Research and Progress of SSE*, 2013, 33(6): 528-532. (in Chinese)
 [3] KELLER S D, HARRIS R W, KINGKEO K. Coplanar Waveguide Slot-Coupled Patch Antenna Electronic Scanning Array for On-The-Move SATCOM [C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, 2009:1-4.
 [4] CHIN-HSIANG K, KEVIN M J, GABRIEL M R. An electronically-scanned 1.8-2.1 GHz base-sta-

- tion antenna using packaged high-reliability RF MEMS phase shifters[J]. *IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(2): 979-985.
- [5] WILLIAM G, ARMIN S, CHRISTIAN S, *et al.*. Hybrid Integrated RF-MEMS phased array antenna at 10 GHz [C]. *Proceedings of the 38th European Microwave Conference*, IEEE, 2008:139-142.
- [6] CHRISTIAN J A A, STUART P, ANDY M. Reconfigurable phased array antennas with RF-MEMS on a PCB substrate [C]. *Antennas and Propagation Conference*, IEEE, 2012:1-5.
- [7] CHRISTIAN J A A, STUART P, IAIN W, *et al.*. DC-Contact RF-MEMS cantilever switch on a PCB substrate for monolithic integration with microstrip phased array antenna [C]. *Antennas and Propagation Conference*, IEEE, 2013:467-472.
- [8] KOEN V C, TAUNO V H, REBEIZE G M, *et al.*. Ka-Band MEMS TTD passive Electronically Scanned Array(ESA)[C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, 2006: 513-516.
- [9] PURI M, DAS A, SENGAR J S. A novel design of monolithically integrated phased array antenna employing 4-bit DMTL phase shifter[C]. *Wireless and Optical Communication Networks*, IEEE, 2013: 1-6.
- [10] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- ZHANG G Y. *Principles of Phased Array Radar* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [11] 侯智昊, 刘泽文, 李志坚. DC~30GHz 并联接触式 RF MEMS 开关的设计与制造[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8):1922-1927.
- HOU ZH H, LIU ZH W, LI Z J. Design and fabrication of DC to 30 GHz DC-contact shunt RF MEMS switch[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1922-1927. (in Chinese)
- [12] 雷雪, 陈国虎, 安娜, 等. 一种宽带多波束微带阵列天线的设计[J]. *微波学报*, 2014, 30(4):29-33.
- LEI X, CHEN G H, AN N *et al.*. Design and Realization of a broadband multi-beam microstrip antenna array[J]. *Journal of Microwaves*, 2014, 30(8):29-33. (in Chinese)
- [13] 王朝阳, 朱瑞平. 一种双极化宽带相控阵贴片天线的设计[J]. *现代雷达*, 2015, 37(1):56-58.
- WANG CH Y, ZHU R P. Design of dual-polarized wideband phased array patch antennas [J]. *Modern Radar*, 2015, 37(1): 56-58. (in Chinese)
- [14] 侯芳, 朱健, 吴璟, 等. MEMS 层叠式毫米波天线设计[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(2):329-332.
- HOU F, ZHU J, WU J *et al.*. Millimeter-wave design of stacked micromachined patch antennas [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(2):329-332. (in Chinese)

作者简介:



韩琦(1988—),男,山西长治人,博士,2009年于中北大学获学士学位,主要从事 RF MEMS 器件设计与集成研究。E-mail:hanqi1988@bit.edu.cn



王婷(1979—),女,山东济宁人,博士,副教授,硕士生导师,2001年于山东大学获学士学位,2006年于北京工业大学获博士学位,主要从事射频微机电系统、目标探测与毁伤控制等方面的研究。E-mail:tina@bit.edu.cn

导师简介:



徐立新(1969—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,1991年于国防科技大学获学士学位,1997于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事射频微机电系统、智能探测与控制等方面的研究。E-mail:lxu@bit.edu.cn



丛琳(1988—),女,内蒙古呼伦贝尔人,博士,2010年于天津职业技术师范大学获得学士学位,主要研究方向为柔性 MEMS 天线。E-mail:lincong@bit.edu.cn