

一种基于 RF-MEMS 开关的可重构天线设计

范丽聪, 南敬昌

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 辽宁, 葫芦岛 125105)

摘要: 针对天线系统为了实现多频段, 进而增加天线的数量导致的严重电磁耦合干扰问题, 设计了一款 RF-MEMS 开关, 并结合 RF-MEMS 开关设计了一款频率可重构微带天线。该频率可重构天线通过金属辐射贴片上的 RF-MEMS 开关的通断, 将辐射贴片分为内外两部分, 通过改变电流的谐振回路影响微带天线的工作频率。RF-MEMS 开关隔离度达到 43.99dB, 使用频段开关的插入损耗控制在 0.01dB-1.7dB, 同时测试了开关的开启电压, 测得在 22V 时可以使开关完成闭合使用四个 RF-MEMS 开关。通过 HFSS 仿真测得可重构微带天线可以工作在 3.35-3.5GHz 和 4.15-4.95GHz 两个 5G 频段

关键词: 可重构天线; RF-MEMS 开关; 5G 频段; 隔离度

中图分类号: TN822

A Reconfigurable Antenna Design Based on RF-MEMS Switch

Fan Licong, Nan Jingchang

(Liaoning Technical University, School of Electronic and Information Engineering, Huludao, Liaoning, 125105)

Abstract: In order to increase the number of antennas in multi-band antenna system, which leads to serious electromagnetic coupling interference problem, an RF-MEMS switch is designed, and a frequency reconfigurable microstrip antenna is designed based on RF-MEMS switch. The frequency reconfigurable antenna divides the radiation patch into inner and outer parts through the on-off of the RF-MEMS switch on the metal radiation patch, and influences the working frequency of the microstrip antenna by changing the resonant loop of the current. The isolation degree of RF-MEMS switch reached 43.99dB, and the insertion loss of the frequency band switch was controlled at 0.01dB-1.7 dB. At the same time, the opening voltage of the switch was tested, and it was measured that the switch could be closed at 22V using four RF-MEMS switches. Through HFSS simulation, the microstrip antenna can work in two 5G bands of 3.35-3.5GHz and 4.15-4.95GHz.

Keywords: reconfigurable antenna; RF-MEMS switch; 5G frequency band; isolation

0 引言

在信息时代, 天线是一种重要的电磁能转换射频器件, 其性能直接影响着信息通信的质量, 是无线通信的重要组成部分。近五十年以来, 科技和现代工业迅猛发展, 对天线也提出了新的要求: 超宽带、功能多样化、小型化和可重构化^[1-2]。不仅对天线的可重构化有要求, 而且对尺寸也有要求, 做到电路一体化程度高, 这就使 5G 信息化时代对天线的要求越来越高。不过, 在传统天线性能改进的方式上, 更多采取的是天线数量增加的方式, 然而天线数量增加后, 相互之间的电磁干扰也会显著增强, 这也形成了天线向“小型化”发展的掣肘。而利用 RF-MEMS 开关来控制天线可以很好的解决这一问题, 不仅可以让天线系统在多个频

作者简介: 范丽聪 (2001-), 男, 超宽带 MIMO 天线

通信联系人: 南敬昌 (1971 年-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向: 射频电路与器件, 多媒体信息编码, 通信系统仿真等. E-mail: nanjc886@sina.com

段工作，从而实现可重构化，而且 RF-MEMS 开关具有体积小，功耗低，易于集成等优点，是时下人们关注的研究热点。

在信息技术飞速发展的今天，5G 波段的可重构天线设计显得尤为重要，基于以上问题，本文设计了一款 RF-MEMS 开关，并在其基础上提出一种新型的频率可重构天线，用四个 RF-MEMS 开关改变上辐射贴片结构，达到了频率可重构的目的。

1 RF-MEMS 开关设计理论

1.1 RF-MEMS 开关的分类

RF-MEMS 开关按不同的方式分类种类也不同，我们根据分类方式的区别，可以得到如表 1 所示的开关种类。从开关运动方向看，可以分为水平和垂直的两种方向；按输入输出方式划分，有常规的单刀单掷、单刀双掷，甚至单刀多掷如国内近些年有研究出单刀五掷雪花型开关^[3]；从开关驱动方式上来说，可采用静电驱动，压电驱动等；根据开关内可动元件结构来划分，可分为两种：一为单端悬臂梁（为一端固定），二为双端固支悬臂梁（为双端固定约束）两种；按开关实现开启、闭合两种状态的开关接触方式，可以划分为金属接触型和电容耦合型；如果按等效电路划分，RF-MEMS 开关又可以分为串联电路型和并联电路型两种。

表 1 RF-MEMS 开关常见分类
Tab.1 RF-MEMS switch common classification

分类方式	串联电路	并联电路
输入输出方式	单刀单掷	单刀多掷
可动部件结构	单端固支	双端固支
运动方向	水平运动	垂直运动
接触方式	金属接触	电容耦合
驱动方式	静电驱动	压电驱动

本文主要对并联电容式开关结构进行研究设计和仿真，将会在之后的开关设计中，重点调整开关的结构参数，进行优化仿真，同时也会给出并联电容式开关具体的结构。

1.2 RF-MEMS 开关与传统开关的对比

RF-MEMS 开关相对于传统的 PIN、FET 开关，其优势在于^[4]：

- 1) 低功耗：大部分的静电驱动开关都需要驱动电压，基本都百伏以下，且不需要电流，这就造成了相对于传统开关，RF-MEMS 开关的功耗非常低。
- 2) 隔离度很高：RF-MEMS 开关的绝缘介质层和上极板之间有一个空气层，使开关的电容非常小，使开关的隔离度值在常规工作频率 0.1- 40 GHz 时非常高。
- 3) 插入损耗很低：当 RF-MEMS 开关结构优化后，一般在微波信号达到谐振频率时，开关本身的插入损耗一般 1dB 以下，性能优异的开关仅有 0.1dB。
- 4) 互相调制分量很低：MEMS 开关是一种线性度很高的器件，所以造成互相调制分量

70 很低的现象。从性能上来看，一般的 MEMS 开关要比传统的 Pin 二极管或 FET 开关提升 30 dB 左右^[5]。

5) 面积小: RF-MEMS 开关如今工艺可以达到纳米级，相较于传统的开关，在进行电路集成时，可以大幅度减小制版的面积，减小整个天线系统的体积，且开关可以在硅衬底上制造，价格也比较便宜。

75 1.3 RF-MEMS 开关的重要性能参数

(1) 插入损耗

80 开关的插入损耗是衡量开关微波性能高低的一个重要指标^[6]。通常定义为开关在接通时传送到负载的功率与理想开关传送到负载的功率之比，一般要求插入损耗是越小越好。目前研究应用的 RF-MEMS 开关，插入损耗都基本在 3dB 以下，本文所设计的 RF-MEMS 开关的插入损耗，也同样力求符合基本的插入损耗标准，使 RF-MEMS 开关在导通射频电路时，对整个系统有较小的插入损耗值。

(2) 隔离度

85 RF-MEMS 开关另一个重要的微波性能指标就是隔离度^[7]。一般定义为：开关处于断开时传送功率与电路接通时的传送功率的比值^[8]。隔离度是 RF-MEMS 开关设计时，需要重点考量的一个微波性能指标，最好是可以完全隔断信号的传输，一般要求开关在谐振点的隔离度值是要大于 30dB。不论是隔离度还是插入损耗，都是微波性能方面的指标，所以 RF-MEMS 开关的结构参数设计，会对两种指标产生较大的影响。

(3) 开启电压

90 开关的开启电压是指开关悬臂梁下压，开关完全闭合时，需要在信号线上所添加的外部驱动电压^[9]。开启电压称之为 RF-MEMS 开关的机械性能指标，机械性能指标不仅仅只有开启电压，还有下拉时间等。本文限于篇幅原因重点关注开关的开启电压，结构参数设计的调整同样会对开启电压造成影响，而且与开关的微波性能相互制约，这就导致开关在设计时，需要同时考虑微波性能和机械性能，本文力求得到一个平衡点，使得开关的微波性能指标和机械指标都能得到最大程度的兼顾。

95 2 RF-MEMS 开关的设计与优化

2.1 开关的设计

100 开关整体为共面波导结构，通过中间信号线实现传输信号。如图 1 所示，与基片同侧表面的信号线和地线构成共面波导传输线。其原理是 RF-MEMS 开关未添加驱动电压时，上极板悬臂梁未与绝缘介质基板接触，此时开关形成的等效电容较小，射频信号仍可以通过开关处，此时电路导通。当添加外部驱动电压时，悬臂梁受静电力作用下拉，与绝缘介质基板紧密接触形成大电容结构，开关闭合阻断了信号的通过。

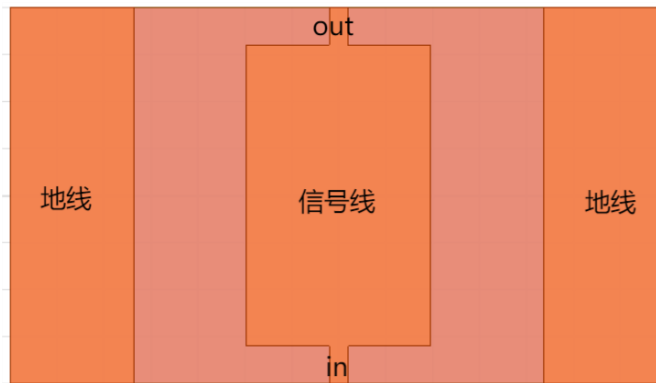


图1 共面波导结构

Fig.1 Coplanar waveguide structure

105 首先将硅衬底进行热氧化一层二氧化硅，选择硅材料作为衬底，是因为其成本相较于砷
化镓更低，虽然不如砷化镓具有很高的介电常数，但是其加工工艺经过多年来的积累，已经
十分成熟，考虑到要将开关实际应用，所以仍选择硅材料作为衬底。然后旋涂一层聚酰亚胺
来降低共面波导的衬底介质损耗。在这一层之上电镀信号线和地线，材质选择为金材质，主
110 要为了降低导体损耗，同样它的电导率得高，常见的加工金属有金、银、铜、铝、铂等材质，
综合考虑化学性质稳定性、电导率、氧化速度和制作工艺等因素，选择金材质作为共面波导
材料^[10]。与其弹性系数直接相关的是梁膜材料的杨氏模量。经过综合考量，选择屈服强度
更高的 Al 作为上电极材料，电阻率更低。信号线覆盖一层氮化硅作为绝缘介质，在地线上
固定四个锚区连接铝材质的上极板。如图 2 所示的并联电容式开关的正面图。



图2 并联式开关结构图

Fig.2 Structure diagram of shunt capacitor switch

2.2 开关的优化

115 在完成模型的建立后，本文将重点放在开关的结构优化方面。主要关注绝缘介质板厚
度、悬臂梁的长度和悬臂梁结构对开关的插入损耗和隔离度的影响，并综合考虑优化后，确
120 定开关的参数。

2.2.1 绝缘介质板厚度的优化

如图 3 所示，是绝缘介质层在开关结构中的图形。

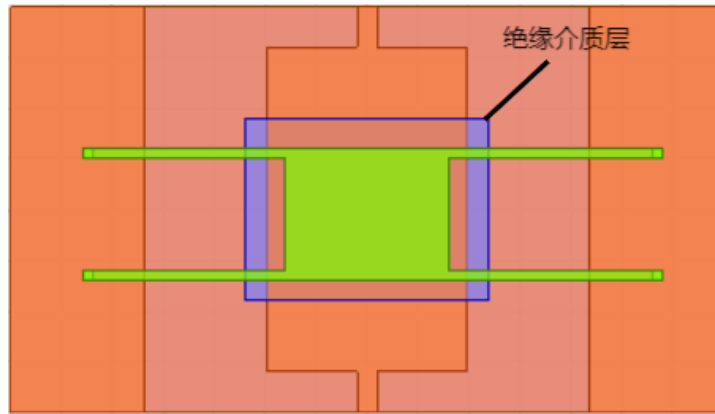


图3 绝缘介质板结构

Fig.3 Insulating dielectric plate construction

125

对绝缘介质基板的优化，主要针对绝缘介质板厚度，设定其它参数暂时保持不变，使用 HFSS 对厚度进行扫描分析。得到开关悬臂梁下压时， h_j 对隔离度的影响，如图 4 所示；得到开关处于恢复完毕时， h_j 对插入损耗的影响，如图 5 所示。

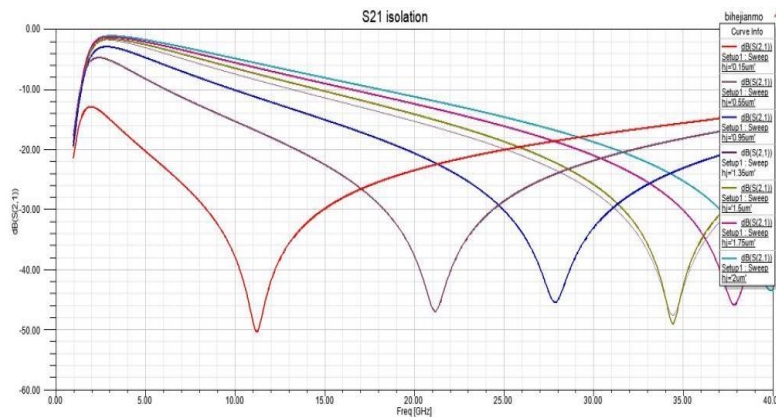


图4 “闭合”时不同 h_j 对隔离度的影响

Fig.4 The influence of different h_j on isolation when "closed"

130

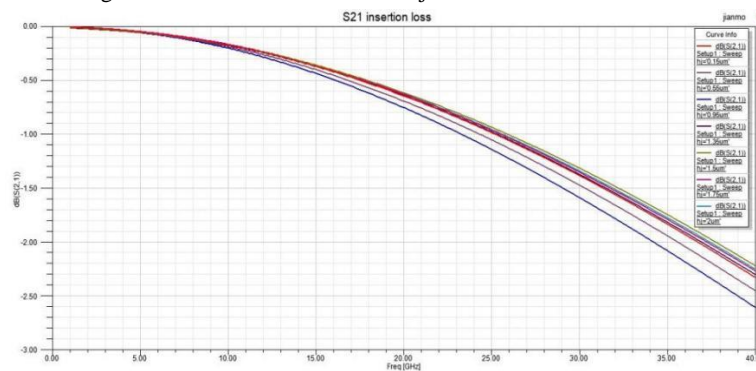


图5 “开启”时不同 h_j 对插入损耗的影响

Fig.5 Effect of different h_j on insertion loss when "on"

135

可以看到，随着绝缘介质层厚度 h_j 值的不断变大，开关悬臂梁下压状态下的中心谐振点的频率处于递增趋势；而开关在未加驱动电压时时， h_j 的值在低频段对插入损耗的影响可以忽略不计。考虑到开关的制作和之后天线工作频率，选定 h_j 为 $1.5\mu\text{m}$ 作为一个优解。

2.2.2 悬臂梁的长度优化

在敲定开关绝缘介质层厚度的情况下，本文对悬臂梁的臂长进行了扫描分析，力求达到更优的性能参数，图 6 所示为悬臂梁长度示意图。

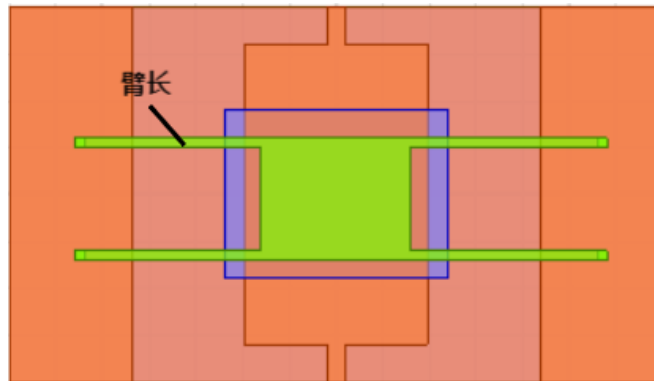


图 6 开关悬臂梁臂长示意图

Fig.6 Switch cantilever arm length diagram

要想改变悬臂梁的长度，就需要知道它的参数值，在本文的设计中，它的值为 $28 * m - k$ ，所以改变参数 k 的值即可完成悬臂梁第长度变化，设置参数扫描分析起始值为 $80 \mu m$ ，截止值为 $98 \mu m$ ，步长为 $5 \mu m$ ，也就是悬臂梁长度从 $200 \mu m$ 缩短至 $182 \mu m$ ，此时分析开关在“闭合”和“开启”两种状态下的性能。如图 7 是悬臂梁长度改变后开关“闭合”时隔离度的变化，图 8 是伴随悬臂梁长度改变对开关插入损耗的影响。

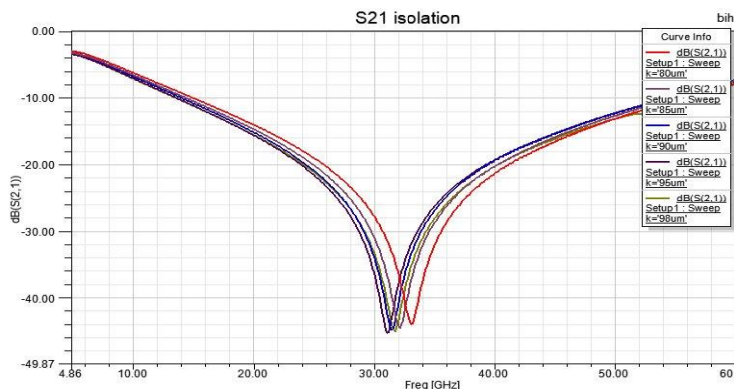


图 7 “闭合”时悬臂梁长度改变对隔离度影响

Fig.7 Influence of length change of cantilever beam on isolation degree when "closed"



图 8 “开启”时悬臂梁长度改变对插入损耗的影响

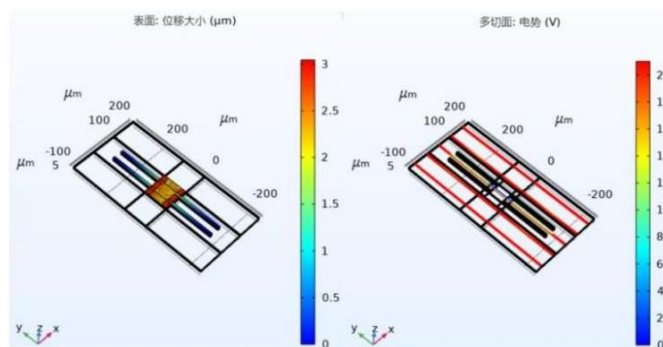
Fig.8 Influence of cantilever length change on insertion loss during "open"

150

155 从结果上可以看到随着开关悬臂梁长度的缩短，悬臂梁长度的改变对开关“开启”时插入损耗的影响并不大，开关“闭合”时的谐振频率随之变小，隔离度随之增大，但根据理论可以得知，悬臂梁长度的缩短同样会导致开关开启电压的增大，悬臂梁长度的改变会导致两个指标相互制约，所以应该综合考虑来确定悬臂梁的臂长参数。

160 由于悬臂梁长度的改变不仅会影响开关的微波性能，同样会影响开关的开启电压，并且相互制约，因此达到一个平衡点显得至关重要。

因此使用 COMSOL 软件对开关进行了开启电压的仿真优化。最终得到开关在悬臂梁长度为 200 μm 时，开启电压为 22V 电压，可以使开关悬臂梁达到 3 μm 位移效果完成闭合，同时开关的电磁性能也达到了较满意的结果。如图 9 所示。

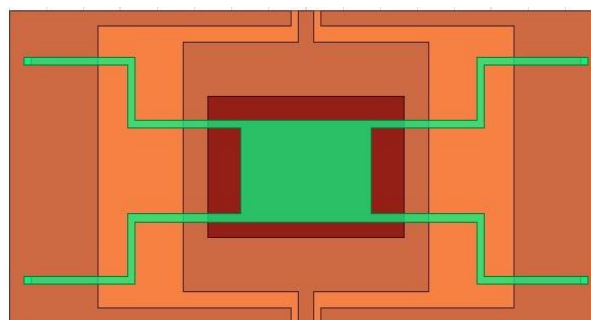


165 图 9 开关开启电压图

Fig.9 Switch on voltage diagram

2.2.3 悬臂梁结构的优化

为了使开关的性能更优，尝试对悬臂梁结构做出优化改变，本文又尝试了一种“曲折梁”式悬臂梁结构，如图 10 所示。



170 图 10 “曲折梁”式开关结构

Fig.10 Zigzag beam type switch structure

175 此种结构是曲折形变之后的固支梁，能够降低开关的弹性系数，提高开关的机械性能，但是此种结构增大了开关的面积。随着集成电路集成度越来越高，使得 RF MEMS 开关等微小型器件的面积应该更小，因此此种结构暂不应用到之后的天线系统设计之中，仅作为与前文所述结构形成对比。

2.3 RF-MEMS 开关优化后参数及性能

最终优化后确定的参数如表 2 所示，其中参数在图 11 中进行了标注。

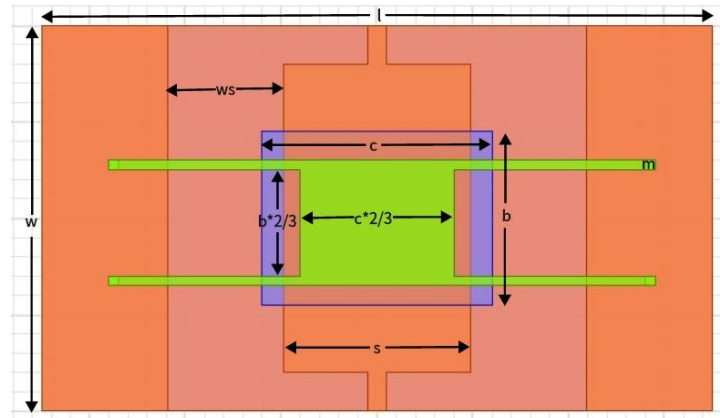


图 11 RF-MEMS 开关参数标注图

Fig.11 RF-MEMS switch parameter annotation diagram

180

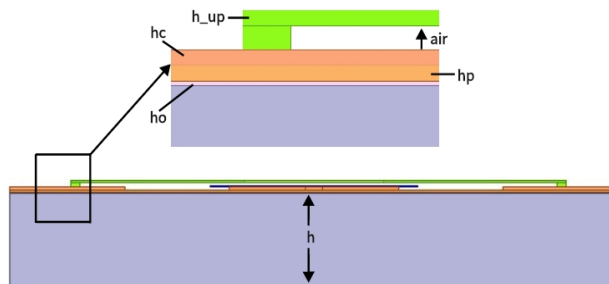


图 12 开关侧面局部参数图

Fig.12 Switch side local parameter diagram

185

开关部分参数指标代表意义如图 12 所示，其中 h 为硅的厚度， h_o 为氧化硅的厚度， h_p 为旋涂的聚酰亚胺厚度， h_c 为共面波导金材质的厚度， air 为空气层厚度， h_{up} 为悬臂梁厚度。具体数值如表 3-1 所示。

表 2 开关参数名称及数值

Tab.2 Switch parameter name and value

变量	w	l	h	h_o	h_p
数值 (um)	400	700	100	0.8	3
变量	s	ws	h_c	a	b
数值 (um)	196	120	3	20	180
变量	c	h_j	air	h_{up}	m
数值 (um)	240	1.5	3	3	10

190

3 可重构天线的设计

3.1 微带天线的设计

对微带天线来说，金属辐射贴片的大小和馈电点的位置可能会对微带天线的辐射性能产生较大的影响，因此本小节将分别讨论这些参数对微带天线的性能的影响。本文设计了一款谐振频率为 2.45GHz 的微带天线，该天线可以用于无线通信网络之中。

195

由理论计算可得天线的相关参数的尺寸，其中辐射贴片的大小为 28mm*37.26mm，环

氧树脂(FR4)的长、宽、高分别为 74.52mm、56mm 和 1.6mm，馈电点距离辐射贴片中心 7mm。使用 HFSS 对反射系数 S11 仿真分析，结果如图 13 所示，

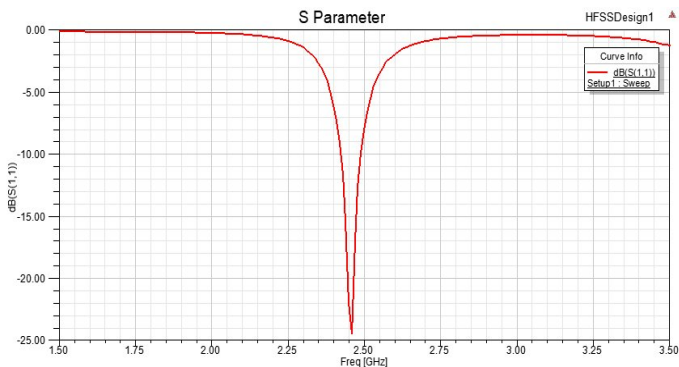


图 13 反射系数结果图

Fig.13 Reflection coefficient result graph

200

从仿真结果可以看到，微带天线的谐振频率与理论预期值基本一致，S11 值为-20.7dB。接下来首先对金属辐射贴片长度 L0 进行扫描参数分析，设置初值为 25mm，截止值为 28mm，步长值为 0.5mm。如图 14 所示为不同的 L0 值对应的反射系数的仿真结果。

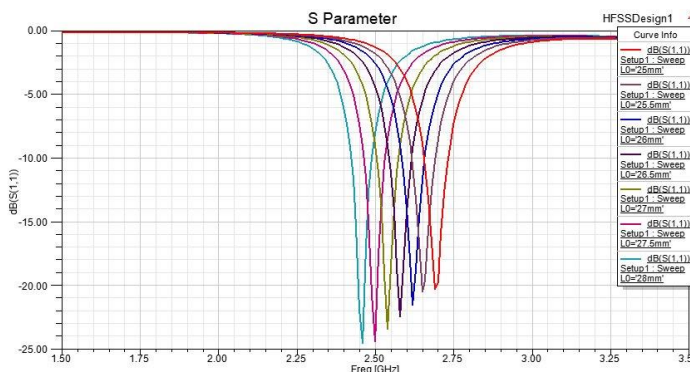


图 14 不同 L0 值对反射系数 S11 的影响

Fig.14 Influence of different L0 values on reflection coefficient S11

205

从仿真结果可以看到，随着金属辐射贴片长度的增加，谐振频率值会减小，反射系数值为变大。接下来对金属辐射贴片的宽度 W0 进行扫参分析，设置初值为 20mm，截止值为 45mm，步长值为 5mm。如图 15 所示为不同的 W0 值对应的仿真结果。

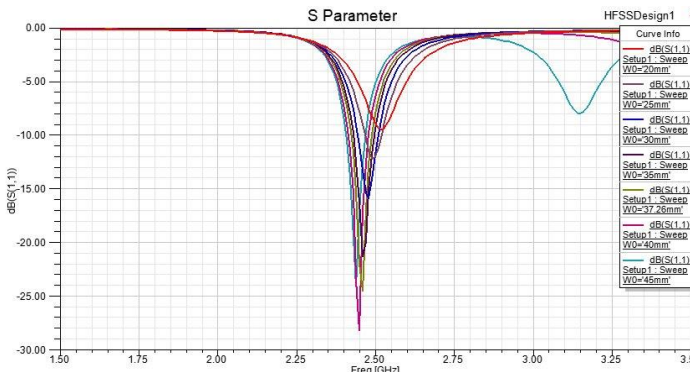


图 15 不同 W0 值时的仿真结果图

Fig.15 Simulation results of different W0 values

210

从图 15 中可以看到，不管是金属辐射片的宽度是增大还是减小，对微带天线的谐振频率影响比较小，可以认为谐振频率不会随着天线辐射片宽度变化，但对反射系数值的大小有较大影响。

215

3.2 可重构天线的设计

微带天线的谐振频率主要由金属辐射贴片来决定的，所以在不改变天线整体结构的情况下，可以使用 RF-MEMS 开关来达到改变金属辐射贴片尺寸的目的，从而使天线谐振频率发生变化，设计方案如图 16 所示，整体由微带天线和 RF-MEMS 开关两部分组成，其中微带天线的金属辐射贴片部分被挖去四个“L”型的隙缝，在隙缝之间的位置预留给 RF-MEMS 开关，四个 RF-MEMS 开关置于预留位置处。

220

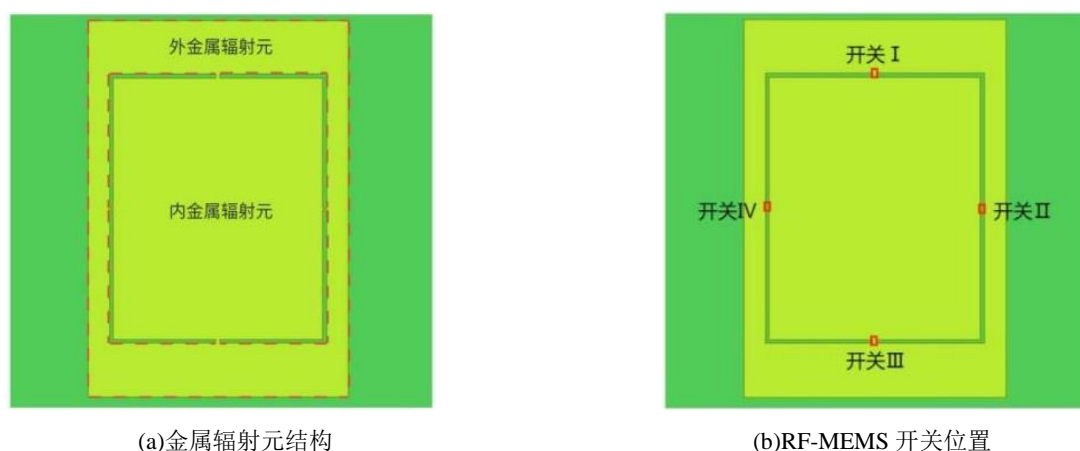


图 16 频率可重构设计方法

Fig.16 Frequency reconfigurable design scheme

225

3.3 天线的微波性能

可重构天线的 RF-MEMS 开关处于“开启态”时，上金属辐射贴片的金属辐射元内外成为一体，电流可以导通，此时微波信号可以通过 RF-MEMS 开关处，通过仿真软件 HFSS 对天线的 S 参数进行模拟优化，最终结果如图 17 所示，天线的谐振频率为 3.4GHz。

230

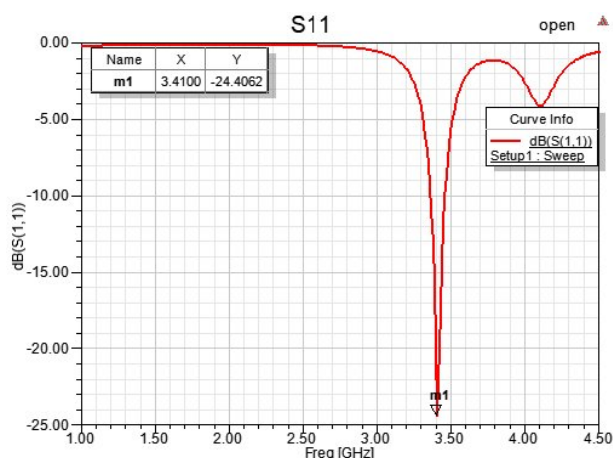


图 17 “开启态”时 S11 仿真结果

Fig.17 Simulation result of S11 in On State

可重构天线的 RF-MEMS 开关处于“闭合态”时,RF-MEMS 开关将金属辐射元分隔开来,形成内、外两个金属辐射元,微波信号此时不能通过 RF-MEMS 开关处,通过 HFSS 对参数进行模拟优化,最终结果如图 18 所示,天线的谐振频率为 4.4GHz。

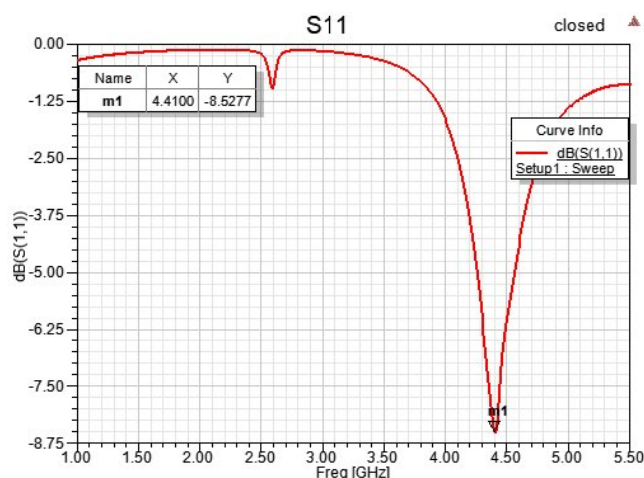


图 18 “闭合态”时 S11 仿真结果

Fig.18 Simulation result of S11 in "closed state"

综上所述,可重构天线通过 RF-MEMS 开关改变金属辐射贴片的结构,使天线可以分别工作在 3.35-3.5GHz 和 4.15-4.95GHz 两个频段,达到了频率可重构的目的。

4 结论

本文给出了一款并联电容式 RF-MEMS 开关,开关整体结构采用金属-绝缘介质-金属的三明治结构,并给出了开关每一层结构的意义。并进一步通过 HFSS 对开关的建模分析和微波性能测试,调整优化绝缘介质板厚度等开关结构参数,使用了 COMSOL 软件测得开关开启电压为 22V,此时可使开关悬臂梁达到 3 μ m 的下压完成闭合,开关最终可工作在 3-35GHz,隔离度最优可达到 43.99dB,开关的插入损耗控制在 0.01dB-1.7dB。

本文在完成对 RF-MEMS 的优化之后,给出了可以应用在 5G 通信场景之下的频率可重构微带天线,在不改变天线整体结构的基础之上,使用 RF-MEMS 开关作为控制器,置于四个“L”型隙缝,来改变上辐射金属贴片,使金属辐射元分成内外两部分,达到天线频率可重构的目的,天线工作在 3.35-3.5GHz 和 4.15-4.95GHz 两个频段。

[参考文献] (References)

- [1] 孟令龙.面向无线通信的宽带和多频段天线关键技术研究[D].北京邮电大学博士研究生学位论文,2018.
- [2] 叶茹梦.频率可重构天线的研究[D].西安电子科技大学硕士研究生学位论文,2018.
- [3] 范丽娜,吴倩楠,王姗姗,韩路路,侯文,李孟委.一种雪花型 MEMS 单刀五掷开关的研究与设计[J].微电子学,2021,51(04):533-538.
- [4] G. M. REBEIZ and J. B. MULDAVIN. RF MEMS switches and switch circuits[J]. IEEE Microwave Mag., 2001, 2(4).
- [5] 宋亮.电容式 RF MEMS 开关设计与性能研究[D].哈尔滨理工大学,2010.
- [6] 吴奕蓬.微波开关芯片的研究与设计[D].电子科技大学,2017.
- [7] 高飞.RF MEMS 开关在射频电路系统中设计与应用[D].辽宁工程技术大学,2022
- [8] M.Mateen H, F. A B.Demonstrator for RF MEMS switch[J].Proceedings of the 9th International Conference on

Circuits, Systems, Signal and Telecommunications (CSST 2015),2015.

[9] 苏锐. RF MEMS 开关的设计与优化[D].北京理工大学,2016.

[10] 刘秋慧.面向 5G 通信应用的射频 MEMS 开关设计与制造关键技术研究[D].中北大学, 2019.

265

[11] 李明洋, HFSS 应用详解.第 1 版.北京: 人民邮电出版社,2010.