

基于集总电容加载技术的小型化槽天线研究

程巍,戴豪宇,杨俊秀,李霖

(浙江理工大学信息学院,杭州 310018)

摘要:提出了一种加载集总电容的小型化槽天线设计方案,首先给出该槽天线的物理结构和对应的等效传输线模型;其次依据电路模型推导出容性加载槽天线的谐振条件;然后由理论分析表明加载集总电容的槽天线具有更低的谐振频率,所提出的容性加载槽天线实现了小型化效果;最后通过建立电磁仿真和电路板制作验证方案的可行性。采用以上方法设计了一个中心频率为900 MHz、带宽为5.4%、增益为4.24 dBi的小型化槽天线。传输线模型、电磁仿真与实物测量结果表明,通过加载集总电容设计的槽天线体积比未加载电容的槽天线体积减小了42%,有效地实现了槽天线的小型化。

关键词:容性加载;槽线;等效电路

中图分类号: TN713⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2017)06-0838-05

0 引言

无线通信技术的高速发展对无线通信系统提出了更高的要求。电小天线作为无线通信系统的重要组成部分,在很大程度上影响着通信系统的性能。因此研究电小天线的小型化具有重要的价值。槽线具备小型化、低成本和易于集成等优点,近年来已成为实现小型化天线设计的重要方式,并已在天线设计中得到应用^[1-3]。Caekenberghe等^[1]采用感性加载折叠槽线实现了槽天线的小型化设计,但是采用该方法设计的天线增益较低。张壹等^[2]、张梅等^[3]、Wang等^[4]和Chen等^[5]分别采用碟形开口槽、方形环加载槽、阶跃阻抗槽和C型环嵌入式槽实现了槽天线的小型化设计,然而他们设计的槽天线电路尺寸还有待进一步减小。Wang等^[6]通过引入两个电容提出了一种短于八分之一波长的开口槽天线设计方法,然而这种槽天线只能应用于天线结构的介质板边缘。Scardelletti等^[7]和游灏等^[8]分别采用容性加载槽和阻性加载槽实现了槽天线的小型化设计,但是以上方法设计的槽天线尺寸分别只减小

了22%和35%。

本文提出了一种容性加载槽天线设计方案,与文献[7-8]中不同的是,本文的设计中在槽线中心位置加载了一个集总电容。本文首先建立了槽天线的等效电路模型,通过分析等效电路模型推导槽天线结构的谐振条件;然后通过等效电路的理论对本文的设计方案进行分析;最后通过高频结构仿真器(high frequency structure simulator, HFSS)仿真和电路板制作及测试验证方案的可行性。

1 槽线结构的建模与理论分析

本文设计的容性加载槽天线的三维物理结构如图1所示。该结构由一段 $50\ \Omega$ 短路微带线和一段槽线组成。与传统的侧馈槽天线类似,槽线是由介质板底部金属接地平面中蚀刻出的槽缝构成,槽线的物理长宽分别为 L_s 和 W_s ,微带馈线的物理宽度为 W_{50} 。槽线馈电位置离槽线右端点距离为 L_1 。与传统的侧馈槽天线不同的是,该天线结构在槽线中点处加载了一个集总电容。

收稿日期:2017-06-27 网络出版日期:2017-10-10

基金项目:浙江省教育厅科研项目(Y201329492)

作者简介:程巍(1993-),女,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事微波电路设计、天线技术的研究。

通信作者:李霖, E-mail: lilin_door@hotmail.com

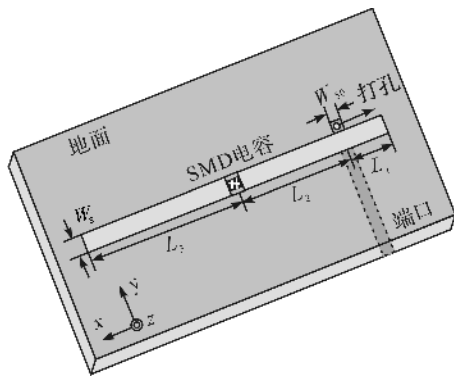


图1 容性加载槽天线物理结构

采用文献[9-10]中类似的方法,该天线结构可以用图2中的等效传输线模型来表示。如图2所示,槽线可以等效为特性阻抗为 Z_s 、电长度为 θ 的传输线。该段传输线被微带馈线和集总电容分为三个部分,其中电长度 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 分别对应槽线的物理长度 L_1 、 L_2 与 L_3 。另外,由于电容在槽线中心位置,因此存在以下的关系式: $\theta_1 + \theta_2 = \theta_3 = \theta/2$ 。电容 C 表示集总电容器的电容量。电阻 R 则表示该天线的辐射电阻、金属损耗和介电损耗等所有电阻效应。

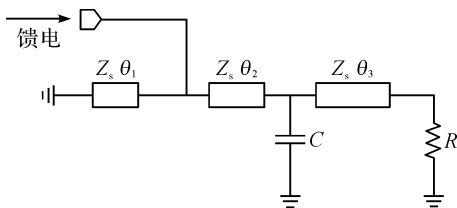
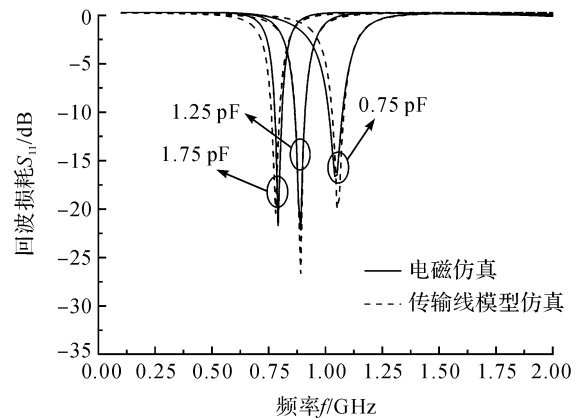


图2 槽天线等效传输线模型

根据电磁仿真结果,通过优化拟合可提取出等效电路中的所有参数值。首先,在HFSS中单独仿真未加载电容的槽线获得槽线的特性阻抗 Z_s 和电长度 θ 的值;其次,对侧馈容性加载槽线进行电磁仿真。通过曲线拟合方法从电磁仿真中提取电阻 R 的最优值。

本文为验证等效传输线模型的可行性,首先在HFSS软件中建立物理模型进行电磁仿真,然后在先进设计系统(advanced design system, ADS)中建立等效传输线模型进行电路仿真,仿真结果如图3所示。图3对比分析了电容值 C 不同时,电磁仿真与传输线模型仿真的回波损耗(S_{11})。槽天线的几何参数如表1所示,整个天线结构的地面尺寸为 $150\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 。对应的等效电路提取出的参数值如表2所示。观察图3可知:电磁仿真和传输线模型仿真之间有着很好的一致性,表明所提出的传输线模型可用于表示该天线结构的谐振特性。

图3 当加载电容 C 值不同时,传输线模型与电磁仿真的 S 参数表1 容性加载槽天线的几何参数($C = 1.2\text{ pF}$)

| 参数/mm | H | W_{50} | W_s | L_1 | L_2 | L_3 |
|-------|-----|----------|-------|-------|-------|-------|
| 值 | 0.8 | 1.5 | 4.0 | 9.0 | 36.0 | 45.0 |

注: H 为槽天线结构介质板的厚度。

表2 等效电路模型提取出的参数($C = 1.2\text{ pF}$)

| 参数 | R/Ω | Z_s/Ω | $\theta_1/(\circ)$ | $\theta_2/(\circ)$ | $\theta_3/(\circ)$ |
|----|------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 值 | 25.0 | 230.0 | 11.0 | 43.0 | 54.0 |

假设槽线结构无损,并且忽略所有的不连续性效应和辐射损耗等因素,则槽线结构的输入导纳可以推导如下:

$$Y_{in} = -\frac{\tan \theta_3 (1 + \tan^2 \theta_2)}{Z_s (\tan \theta_3 - \tan \theta_2)} \frac{R(1 - 2Z_s \pi f C \tan \theta_3) + 2jZ_s (1 - Z_s \pi f C \tan \theta_3)}{Z_s (\tan \theta_2 + \tan \theta_3 - 2Z_s \pi f C \tan \theta_2 \tan \theta_3) - jR(1 - 2Z_s \pi f C \tan \theta_2)} \quad (1)$$

通常情况下,当 $\text{Im}(Y_{in}) = 0$ 时,槽天线工作在谐振频率处。从式(1)可推导出谐振条件应满足下列公式:

$$Z_s \pi f C \tan \theta_3 = 1 \quad (2)$$

由式(2)可知,存在无穷多组频率解。但是考虑到天线尺寸的小型化,在天线设计中优先选择最小谐振条件处对应的频率解。

令 f_{r0} 为槽的自然基本谐振频率,那么在 f_{r0} 处, θ_3 约为 $\pi/2$ 。如果将 f_{r1} 定义为式(2)的最低频解,则显然存在 $f_{r1} < f_{r0}$,表明所提出的槽天线可以工作在比槽的固有谐振频率 f_{r0} 更低的频率处。由此可知,对于具有相同工作频率的特定槽线,本文所提出的槽天线结构占用的电路尺寸比传统槽天线更小。由于引入的集总电容抵消了槽线在较低频率处的感抗,因此有效地实现了槽天线尺寸的小型化。

为了进一步研究集总电容 C 对槽天线小型化的影响,首先在物理模型和传输线模型仿真中分别

改变加载电容值的大小,得到加载电容值与谐振频率之间的关系,然后由 Matlab 绘制出谐振频率与加载电容值 C 的关系曲线。图 4 显示了电磁仿真和传输线模型仿真中频率 f_{r1} 与加载电容 C 的关系曲线。传输线模型仿真与电磁仿真具有很好的一致性。如图 4 所示,加载电容值 C 越大,则谐振频率 f_{r1} 越小。因此,较大的电容 C 有利于槽天线尺寸的小型化。此外,如果选择适当的电容值,谐振频率可以降低到未加载电容时槽线体积的一半。然而,天线增益和阻抗带宽将随着电容 C 的增加而减小。

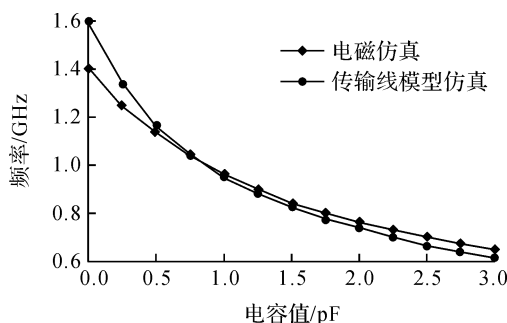


图 4 传输线模型仿真与电磁仿真中频率 f_{r1} 与加载电容 C 的关系曲线

由式(1)可知,通过调整馈电位置(θ_1)可以灵活地调整槽天线输入导纳的实部。这种调整对天线谐振频率的输入导纳虚部没有影响。输入匹配的方法即通过选择不同的馈电位置对输入阻抗曲线进行调试,其中 $L_1=5, 10, 15$ mm 和 20 mm,对应等效电路中的 θ_1 分别为 $8^\circ, 13^\circ, 19^\circ$ 和 25° 。如图 5 所示,通过调节馈电位置可获得槽天线的输入匹配。

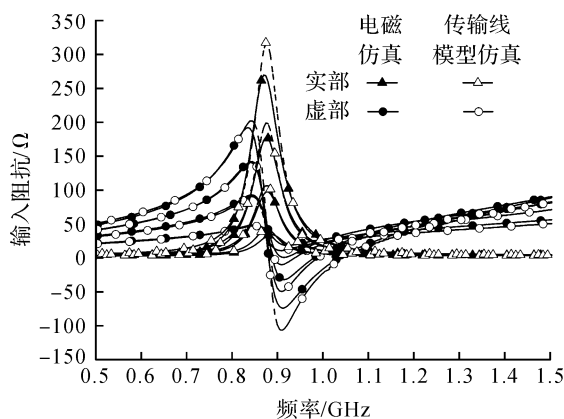


图 5 选择不同的馈电位置时,电磁仿真与传输线模型仿真中的输入阻抗值

根据以上理论分析,当预先确定槽线宽度时,容性加载槽天线的设计可按照以下步骤进行:

a) 设计一个无负载槽天线在工作频率处谐振,并使其槽线长度约为半波长;

b) 对无负载槽线进行电磁仿真,提取出槽线的特性阻抗 Z_s ;

c) 由式(2)中槽线谐振条件下预期的小型化尺寸计算所需加载电容值的大小;

d) 选择合适标准的陶瓷电容,使其电容值接近理论计算的电容值 C ;

e) 由式(1)中推导出 θ_1 和对应的 L_1 值;

f) 调整槽天线结构的尺寸,使得电磁仿真与传输线模型结果达成一致。

2 容性加载槽天线的制作与测量

根据图 2 中关于槽天线等效传输线模型的分析,本文设计了一个中心频率为 900 MHz 的容性加载槽天线。与传统的无负载槽线相比,所提出的天线结构目的是将天线尺寸减小 42%。容性加载槽天线采用厚度为 0.8 mm、介电常数为 4.4、损耗角正切值为 0.03 的 FR4 介质板制作。基于上述分析,通过电磁仿真、优化拟合确定最优的物理尺寸。电路的最终物理尺寸为: $L_1=9$ mm, $L_2=36$ mm, $L_3=45$ mm, $W_s=4.0$ mm, $W_{50}=1.5$ mm, $C=1.2$ pF,在设计中采用型号为 Murata 0603 的 1.2 pF 电容器实现集总电容器。所制作的槽天线电路板的顶视图与底视图分别如图 6(a)、(b)所示。该槽天线具有简单的结构,并且具有相当紧凑的尺寸,主要电路大小仅为 $90\text{ mm} \times 4.9\text{ mm}$,对应于 $0.004\lambda_0^2$ ($0.27\lambda_0 \times 0.015\lambda_0$),其中 λ_0 是其中心频率处对应的自由空间的引导波长。

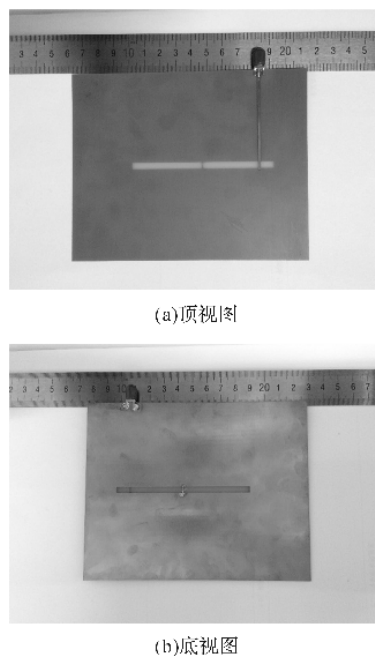


图 6 侧馈槽天线的实物照片

电磁仿真和实物测量的回波损耗(S_{11})如图 7 所示。天线的回波损耗测试使用的仪器是 Agilent 8510 C 矢量网络分析仪。首先校准矢量网络分析仪,设置中心频率、测量范围等相关参数;然后通过射频线将天线电路板与矢量网络分析仪连接好即可测得天线的回波损耗。通过图 7 中的曲线可知,电磁仿真与实物测量的 S_{11} 在 0~2 GHz 的频率范围内基本一致。测量的中心频率为 915 MHz, -10 dB 阻抗带宽约为 5.4%。在中心频率 915 MHz 处,测量的 $S_{11} < -25$ dB。电磁仿真与实物测量的 xoz 平面和 $yo z$ 平面辐射图如图 8 所示。天线的辐射图是在微波暗室的测试环境下测量得到的,测试系统采用的是 SG24 多探头测量方案,噪底为 -66 dB。在微波暗室条件下,首先信号源在中心频率 900 MHz 处产生射频信号,被测的天线电路板放置在喇叭天线正对面的旋转台上,其次由天线喇叭将射频信号辐射出去,通过调整天线电路板放置的角度分别测量 xoz 面和 $yo z$ 面的方向图,最后由频谱仪分析被测天线的频谱特性。通过图 8 中的曲线可知,在中心频率 915 MHz 处测得的峰值增益为 4.24 dBi,测量

结果表明该天线在中心频率处具有良好的辐射特性。由于制造误差以及 SMA 连接器的插入损耗,电磁仿真和实物测量的中心频率和方向图之间产生了一些微小的差异。电磁仿真与实物测量结果表明,通过在槽线中间加载 1.2 pF 集总电容,该天线可工作在 915 MHz,有效降低了槽天线的谐振频率,并且改善了槽天线在低频端的辐射特性,获得了一个较好的增益与带宽。测量结果验证了该设计方法的可行性与准确性。

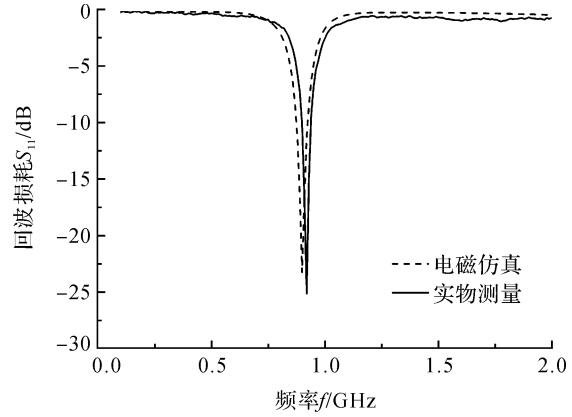


图 7 电磁仿真与实物测量的回波损耗(S_{11})

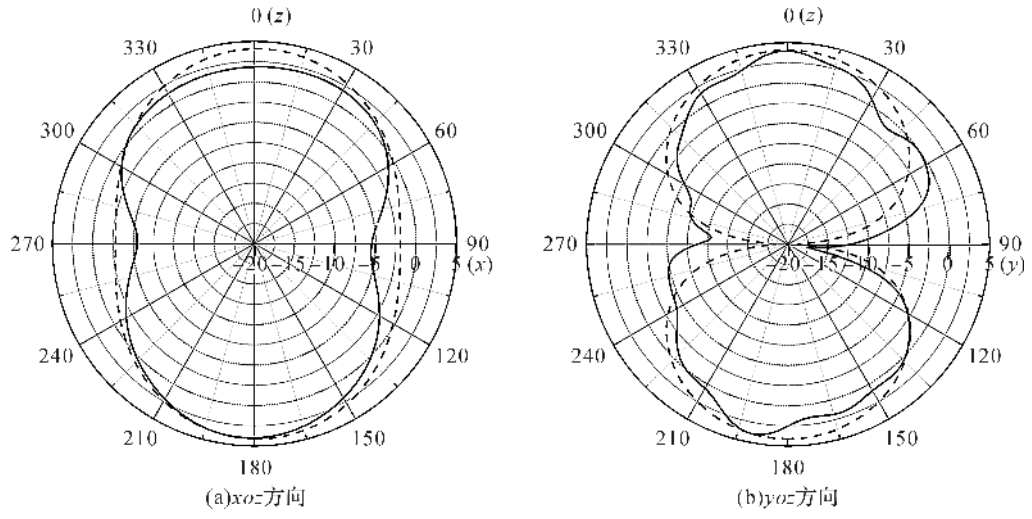


图 8 电磁仿真(虚线)与实物测量(实线)的辐射图

对所提出的侧馈槽天线与其他文献中提出的槽天线性能的比较结果见表 3。如表 3 所示,本文设计的侧馈槽天线在电路尺寸、带宽和增益之间有一个较好的平衡。虽然所提出的槽天线电路尺寸大于文献[1]和[6]中所提出的槽天线,但是相比于其他槽天线,本文中提出的槽天线具有更宽的带宽以及除文献[7]以外较高的峰值增益。此外,当加载更大的电容时,所提出的槽天线尺寸仍然可以进一步减小。

表 3 槽天线性能对比

| 指标 | 文献 | | | | | | | 本文 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | [6] | [7] | |
| 电路尺寸/mm | 0.001 λ_0^2 | 0.074 λ_0^2 | 0.061 λ_0^2 | 0.010 λ_0^2 | 0.010 λ_0^2 | 0.001 λ_0^2 | 0.014 λ_0^2 | 0.004 λ_0^2 |
| 带宽/% | 4.300 | 4.700 | 1.926 | — | 1.600 | 4.400 | 5.100 | 5.400 |
| 峰值增益/dBi | -9.600 | 2.500 | 1.460 | 3.070 | 2.000 | 1.890 | 5.600 | 4.240 |

3 结 论

本文提出了一种基于集总电容加载技术的小型化槽天线设计方案,等效电路分析、电磁仿真和实物测量表明:采用该结构可有效实现槽天线电路尺寸的小型化,并且该结构可应用于集成电路与无线通信设备中。与传统的无负载侧馈槽天线相比,通过在槽线中心处加载 1.2 pF 集总电容,使得容性加载槽天线的尺寸在相同的工作频率下降低了 42%。

参考文献:

- [1] CAEKENBERGHE K V, BEHDAD N, BRAKORA K M, et al. A 2.45-GHz electrically small slot antenna[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2008, 7:346-348.
- [2] 张壹,左建宏,陈新伟,等.一种接地板开槽的小型化蝶形天线设计[J].测试技术学报,2016,30(3):227-230.
- [3] 张梅,刘基姣,冯立波.一种基于LTE的新型小型化加载开槽微带贴片天线设计[J].大理学院学报,2015,14(12):7-11.
- [4] WANG C J, CHEN L T. Modeling of stepped-impedance slot antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014, 62(2):955-959.
- [5] CHEN R H, LIN Y C. Miniaturized design of microstrip-fed slot antennas loaded with C-Shaped rings[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 203-206.
- [6] WANG Y S, CHUNG S J. A short open-end slot antenna with equivalent circuit analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2010, 58(5):1771-1775.
- [7] SCARDELLETTI M C, PONCHAK G E, MERRITT S, et al. Electrically small folded slot antenna utilizing capacitive loaded slot lines[C]//Radio and Wireless Symposium. IEEE, 2008:731-734.
- [8] 游灏,朱全江.基于电阻和槽加载的小型化超宽带 Vivaldi 天线[J].电子信息对抗技术,2017,32(2):70-74.
- [9] AKHAVAN H G, MIRSHEKAR-SYAHKAL D. Approximate model for microstrip fed slot antennas[J]. Electronics Letters, 1994, 30(23):1902-1903.
- [10] ZHU L, WU K. Complete circuit model of microstrip-fed slot radiator: theory and experiments[J]. IEEE Microwave & Guided Wave Letters, 1999, 9(8):305-307.

Study on Small Slot Antenna Based on lumped Capacitance Loading Technology

CHENG Wei, DAI Haoyu, YANG Junxiu, LI Lin

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In this study, the small slot antenna which is used to load lumped capacitance was presented and investigated. Firstly, physical structure of the slot antenna and corresponding equivalent transmission line model were given. Secondly, the resonance condition of the capacitive loaded slot antenna was investigated intensively. Thirdly, the theoretical analysis revealed that the proposed antenna has a lower resonant frequency. Thus the proposed capacitive loaded slot antenna exhibits size-reduction effect. Finally, the feasibility of the method was well verified by electromagnetic simulation and circuit board making. A miniaturized capacitive loaded slot antenna with the center frequency of 900 MHz, the bandwidth of 5.4% and peak gain of 4.24 dBi was designed by using the above method. The results of transmission line model, electromagnetic simulation and physical measurement indicated that the size of the proposed capacitive loaded slot antenna decreases by 42%, and miniaturization of slot antenna is achieved effectively.

Key words: capacitive load; slot antenna; equivalent circuit

(责任编辑:康 锋)