

CPW 馈电缝隙耦合蝶形毫米波贴片天线

顾东华 丁桂甫 陈伟强 孙晓峰 沈民谊 黎滨洪

(上海交通大学微纳科学技术研究院 微米/纳米加工技术国家重点实验室
薄膜与微细加工技术教育部重点实验室 上海 200030)

摘要: 该文研究了一种工作在Ka波段共面波导(CPW)馈电缝隙耦合的蝶形贴片天线。耦合缝隙位于接地板上,而不需要额外的缝隙耦合层,使天线更易与电路相集成。耦合缝隙的存在改变了接地板上原有表面电流的分布,使电流沿着缝隙边缘流动,因此馈线与辐射源的电磁耦合效率得到提高。用有限元分析软件(Ansoft HFSS)对衬底厚度、贴片角度、耦合缝隙大小等参数变化时的天线性能进行了仿真。比较并分析了 S_{11} ,增益等天线性能参数的变化规律,并在带宽最优的条件下给出了一组参数值,此时天线的工作频率为35.5GHz,带宽为1.22GHz,增益为6.38dB。

关键词: 共面波导; 蝶形天线; 贴片天线; 缝隙耦合

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2392-04

CPW-Fed Bow-Tie Slot-Coupled Millimeter Wave Patch Antenna

Gu Dong-hua Ding Gui-fu Chen Wei-qiang Sun Xiao-feng Shen Min-yi Li Bin-hong

(National Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Key Laboratory of Thin Film and Microfabrication of Ministry of Education, Institute of Micro and Nano Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A CPW-fed slot-coupled millimeter wave (Ka band) patch antenna is discussed. The coupling slot is on the ground plane, hence there is no need for a couple slot layer. The presence of the coupling slot changes the current distribution on the ground plane, and the current is guided by the slot, the coupling between the feed part and the radiation part is enhanced. Ansoft HFSS, a high frequency structure simulation software based on Finite Element Method (FEM), is used to analyze the antenna performances. Variations of parameters such as: substrate thickness, bow-tie patch angle, coupling slot size, etc. are discussed. A set of parameters is given after comparing and analyzing the simulation results, such as S_{11} and gain of the antenna. The antenna works at the center frequency of 35.5GHz, the bandwidth is 1.22GHz, and the gain is 6.38dB.

Key words: CPW; Bow-tie antenna; Patch antenna; Coupling slot

1 引言

随着卫星通信的发展和无线电频道的日益拥挤,无线电技术向越来越短的毫米波、亚毫米波方向发展。毫米波介于微波和波光之间,因而兼有两者的优点:宽带宽,高分辨率,小尺寸,易小型化、集成化。因此毫米波技术在军事(雷达、制导、电子对抗等)、通信、安全(汽车、直升飞机防撞系统)等领域中有着广泛的应用。

在毫米波等无线通讯系统中,天线是连接内部电子系统与外部环境的重要组件^[1]。天线性能的优劣直接决定了毫米波系统的分辨率、有效作用距离等主要性能参数。现代的雷达系统通常选用天线阵列来提高天线的性能,如目前雷达广泛使用的波导缝隙天线,采用在波导上开一系列缝隙,形成辐射缝隙阵列来提高辐射性能^[2]。但是此类波导缝隙天线在毫

米波段遇到了新的困难,随着频率的提高,对加工精度的要求越来越高,传统的机械加工已经不能满足这种要求了,必须借助于新的高精度的加工技术。此外,辐射单元也必需重新设计,以满足毫米波系统小型化、集成化等要求。贴片天线是符合这一要求的形式之一,它具有体积小、重量轻、低剖面、增益高、便于与有源器件集成等优点^[3]。而且贴片天线可以使用MEMS微加工技术加工,加工精度能够得到保证。共面波导(CPW)除了保留微带线重量轻、剖面低、易于集成等优点外,还具有低损耗和色散小等优点,越来越受到研究人员的关注^[4]。

本文研究了一种工作在Ka波段的CPW馈电蝶形贴片天线,此辐射元结合了贴片天线和CPW传输线的优点。使用有限元仿真软件(Ansoft HFSS)对天线设计参数进行了仿真优化。仿真结果表明,天线中心频率为35.5GHz,增益6.38dB,驻波比1.5时带宽为1.22GHz,比传统的蝶形贴片天线的带宽要宽^[5]。

2006-03-06 收到, 2006-08-09 改回

国家部级基金和国家自然科学基金(100377009)资助课题

2 天线设计

天线结构如图 1 所示,采用高致密、低损耗的氧化铝陶瓷基片,纯度为 99.5%,Ka波段时,其损耗角 $\tan \delta$ 为 2×10^{-4} ;介电常数为 9.0,这样可以进一步减小辐射元的尺寸,衬底大小为 $10 \times 10 \text{mm}^2$,厚度为 h 。贴片部分采用图 1(a)所示的蝶形结构。贴片长为 L_p ,宽 W_p 为 4mm,贴片角度为 α ,中间连接部分长度 L 为 1mm。贴片与接地板形成一个谐振腔,但是此谐振腔四周没有真正封闭,因此在开路边沿会产生辐射。该碟形贴片腔可看作由矩形贴片腔把两条 X 方向直线边沿改为 V 形边沿而成,基本腔膜理论仍适用。两个最低模式为 TM_{010} 和 TM_{100} ,用等效磁流原理分析计算它们的远区辐射场时,一般结论为:一对边沿的等效磁流 ($\mathbf{M} = -\mathbf{n} \times \mathbf{E}$)是同向的,而另一对边沿的等效磁流是反向的。前者在贴片法向方向上叠加成主波束,获得较高的增益,后者在贴片法向方向相抵消形成零陷。在此,我们激励的主要是 TM_{010} 模,由于辐射边沿为 V 形,按 Y 方向长度应为约 $\lambda_g/2$ 的原理,现在该长度在一定范围内是变化的,因此可以增加工作频带。

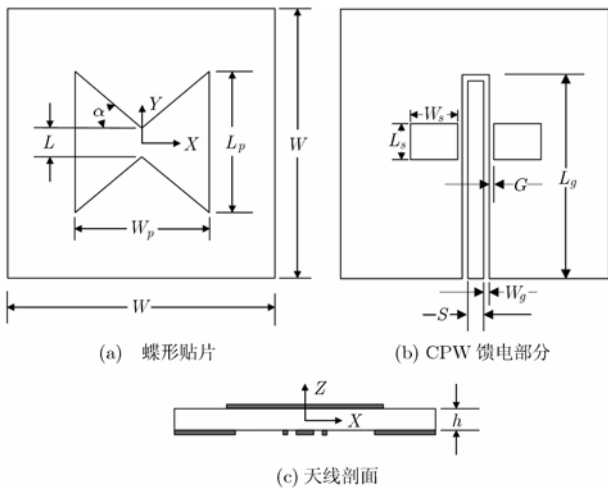


图 1 天线结构示意图

蝶形贴片采用终端开路、缝隙耦合的CPW馈电,如图 1(b)所示。调节CPW的尺寸,使其特征阻抗为 50Ω ,CPW长度为 L_g 。长为 L_s ,宽为 W_s 耦合缝隙位于贴片正下方,耦合缝隙的作用是使整个贴片都受到激发,而不需要额外的缝隙耦合层^[6],使其更易与电路相集成。这是由于存在耦合缝隙时,原先接地板上沿着CPW缝隙两岸流动的电流会沿着耦合缝隙边缘流动,使CPW与辐射贴片间的电磁耦合得到加强,耦合效率提高。耦合缝隙与CPW的缝隙的间距 G 为 0.1mm,这个距离不能过大,否则大部分电流仍沿着CPW缝隙边缘流动,耦合缝隙没有起到应有的作用,使耦合效率降低。

3 仿真结果分析

用有限元仿真软件(Ansoft HFSS),对这种 CPW 馈电的蝶形贴片天线进行了系统的仿真分析。为了得到此设计下最佳的辐射性能,研究了如下一些参数变化时天线辐射性能的变化:衬底材料厚度 h ,CPW 传输线长度 L_g ,耦合缝隙宽度 W_s ,耦合缝隙长度 L_s 和贴片角度 α 。主要分析了天线的中心频率变化、带宽特性及增益变化,然后以带宽做为基准,选取最优的一组参数。图 2 至图 6 显示了各参数变化时 S_{11} 变化曲线,表 1 至表 3 列出了各参数变化时 35GHz 时的增益特性。对每组参数,其他参数分别设为: $h=0.6\text{mm}$, $L_g=7.5\text{mm}$, $W_s=1.8\text{mm}$, $L_s=1.4\text{mm}$, $\alpha=0.7$,这些参数值是大量仿真分析后得出的结果。并使用 CST 微波工作室对最终所得天线进行了验证性仿真,两个软件仿真结果相一致,这说明了仿真结果是正确的。

3.1 衬底厚度对天线性能的影响

图 2 显示了衬底厚度变化时, S_{11} 的变化曲线。从图中可以看出,当厚度增加时天线的谐振频率降低。这是由于厚度增加时,衬底的有效介电常数增加,有效介质波长减小,使天线的电尺寸增加,天线的谐振频率也相应降低来保持谐振时的电尺寸不变。天线的带宽在 $h=0.6\text{mm}$ 时达到最宽为 1.22GHz,中心频率为 35.5GHz,此时增益也较高,为 6.38dB。

3.2 贴片角度对天线性能的影响

图 3 显示了贴片角度 α 变化时 S_{11} 的变化曲线,可以看到当贴片角度变大时天线的谐振频率降低。因为贴片的总宽 W_p 固定为 4mm,贴片边沿长度 L_p 随 α 的增加而增加,天线尺寸变大,所以谐振频率随之而减小。选择带宽最宽增益较好的 $\alpha=0.7$ 作为角度的最优参数。

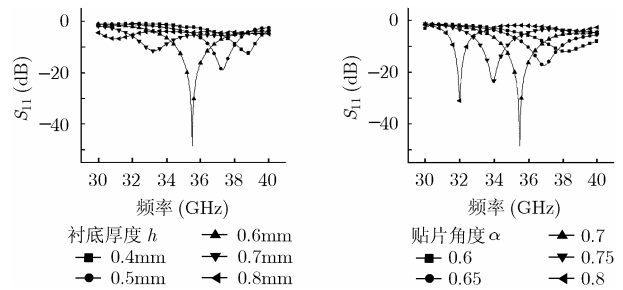


图 2 衬底厚度(h)变化时 S_{11} 变化曲线

图 3 贴片角度(α)变化时 S_{11} 变化曲线

表 1 衬底厚度(h)变化增益特性表

衬底厚度(mm)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
增益(dB)	5.37	6.50	6.38	4.07	3.62

表 2 贴片角度(α)变化时增益特性表

贴片角度(rad)	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
增益(dB)	6.44	6.82	6.38	5.07	3.30

表 3 CPW长度(L_g)变化时增益特性表

CPW 长度(mm)	6.5	7.0	7.5	8.0
增益(dB)	4.39	4.91	6.38	6.79

3.3 CPW 长度对天线性能的影响

图 4 显示了CPW馈电长度变化时 S_{11} 的变化情况, 可以看到当CPW长度变化时, 谐振频率变化不大, 但是反射损耗变化很大, 致使带宽变化较大。当CPW长度较短时, 贴片的前半部分与馈线间的耦合不够, 因而天线整体的电磁耦合效率低, 回波损耗较大; 而当CPW过长时, 会激励起表面波, 使天线的效率降低, 所以 L_g 为 7.5mm时, 带宽达到最大值。

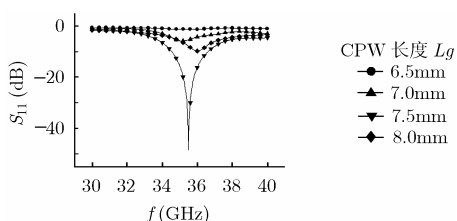


图 4 CPW长度(L_g) 变化时 S_{11} 变化曲线

3.4 耦合缝隙大小对天线性能的影响

图 5 与图 6 显示了耦合缝隙的大小变化时, S_{11} 参数的变化情况。从中可以看出天线的谐振频率随着耦合宽度 W_s 的增加而降低, 但随着耦合缝隙长度 L_s 的增加而升高。从表 4 与表 5 可以看到, 增益随耦合缝隙宽度的增加而减小, 随耦合缝隙长度增加而增加; 但是带宽却并非如此, 带宽存在极值, 当 W_s 取 1.8mm, L_s 取 1.4mm时, 天线的带宽达到最宽。此时馈电部分与贴片上的电流分布如图 7(a)所示, 贴片边沿的电流密度是最强的, 且在接地板上电流密度最强的是与贴片相对应的地方。图 7(b)为没有耦合缝隙, 其他条件均与图 7(a)相同时的表面电流分布图。比较两图可以得到如下结论: 耦合缝隙的存在改变了接地板上原有表面电流的分布, 使之沿着耦合缝隙流动; 当耦合缝隙与贴片的尺寸相接时, 能使整个贴片都能得到激发, 此时的电磁耦合效率最高, 天线带宽最宽。

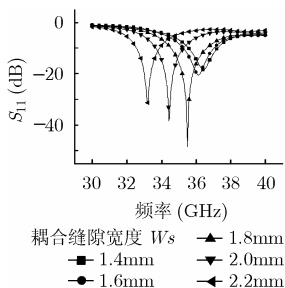


图 5 耦合缝隙宽度(W_s) 变化时 S_{11} 变化曲线

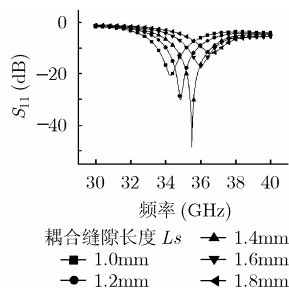
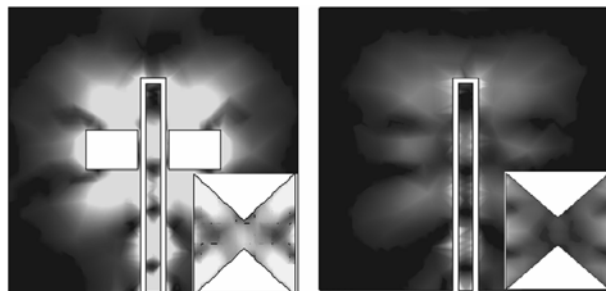


图 6 耦合缝隙长度(L_s) 变化时 S_{11} 变化曲线



(a) 有耦合缝隙时表面电流分布 (b) 无耦合缝隙时表面电流分布

图 7

表 4 耦合缝隙宽度(W_s)变化时增益特性表

耦合缝隙宽度(mm)	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
增益(dB)	7.02	6.76	6.38	5.38	3.42

表 5 耦合缝隙长度(L_s)变化时增益特性表

耦合缝隙长度(mm)	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
增益(dB)	4.74	5.67	6.38	6.68	6.99

3.5 天线方向图

图 8 给出了天线的辐射方向图, H 面最大辐射方向出现在 $\theta = 5^\circ$, $\Phi = 270^\circ$ 的地方, 与天线所设计时的法向辐射相差 5° 角度, 这是由于天线结构关于 X-Z 平面不对称而引起的 CPW 的终端并非位于碟形贴片的正下方, 而是超出碟形贴片一定距离, 这是阻抗匹配所要求的结果。且在 $\theta = 140^\circ$, $\Phi = 90^\circ$ 处出现一个副瓣, 这是因为 CPW 终端缝隙与开路缝隙产生辐射, 导致此副瓣的出现。

3.6 仿真结果的验证

使用 CST 微波工作室对最终所得的天线进行了验证性仿真, 图 9 给出了使用 CST 与 HFSS 仿真 S_{11} 图。从图中可以看出, CST 仿真结果的中心频率在 35.7GHz, 比 HFSS 仿真结果高了 0.2GHz, 相差约 0.56%; 驻波比 1.5 时的带宽为 1.24GHz, 比 HFSS 仿真结果大了 0.02GHz, 相差约 1.64%。比较两曲线可知, CST 与 HFSS 的仿真结果基本相一致, 这说明了仿真结果基本是正确的。

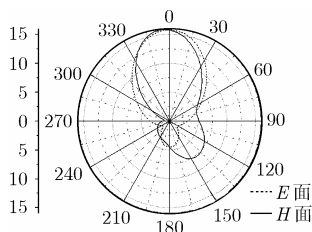


图 8 天线电场方向图

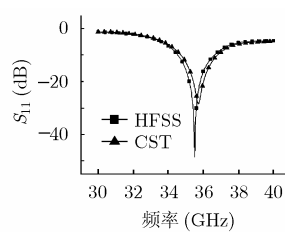


图 9 使用CST仿真的 S_{11} 图

4 结束语

本文研究了一种工作在 Ka 波段的贴片天线, 采用缝隙

耦合的 CPW 馈电方式, 此耦合缝隙位于接地板上, 比传统的缝隙耦合的贴片天线少了一个金属层, 使天线更易于与电路相集成。耦合缝隙的存在改变了接地板上原有表面电流的分布, 使电流沿着缝隙边缘流动, 因此馈线与辐射源的电磁耦合效率得到提高。使用 Ansoft HFSS 对天线进行了优化仿真, 并得出一组最佳参数, 此时天线的工作频率为 35.5GHz, 带宽为 1.22GHz, 增益为 6.38dB, 并使用 CST 微波工作室对最终所得天线进行了验证性仿真, 两个软件仿真结果相一致。

参 考 文 献

- [1] Varadan V K, Vinoy K J, and Jose K A. RF MEMS and Their Applications. John.Wiley. & .Sons, 2003: 343-344.
- [2] 郭陈江, 丁君, 许家栋. 一种特殊波束的 8mm 波导缝隙阵列天线. 电波科学学报, 2004, 19(2): 233-236.
Guo Chen-jiang, Ding Jun, and Xu Jia-dong. A 8mm waveguide slot array with special beam. *Chinese Journal of Radio Science*, 2004, 19(2): 233-236.
- [3] 张钧, 刘克诚等, 微带天线理论与工程. 北京国防工业出版社, 1988 年 7 月, 2-3.
- [4] Mestdagh Steven and Raedt W De, *et al.*. CPW-fed stacked microstrip antennas. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2004, 52(1): 74-83.
- [5] Anguera J and Puente C, *et al.*. Small and high-directivity bow-tie patch antenna based on the Sierpinski fractal. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001, 31(3): 239-241.
- [6] Richard Q Lee and Simons N R. Coplanar waveguide aperture-coupled microstrip path antenna. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 2004, 2(4): 138-139.

顾东华: 男, 1982 年生, 硕士生, 从事微小型 MEMS 天线的设计与研究.

丁桂甫: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事射频 MEMS 器件设计和微细加工技术的研究.

陈伟强: 男, 1982 年生, 硕士生, 从事微小型 MEMS 天线的设计与研究.