

几种共面波导耦合馈电装置的特性研究

柴雯雯^{①②} 张晓娟^①

^①(中国科学院电子学研究所高功率微波与电磁辐射重点实验室 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文研究了 4 种共面波导耦合缝对单贴片微带天线的谐振频率以及带宽的影响, 并利用天线近场分布对其进行解释; 分析并比较了几种耦合缝的馈电特性, 极大地提高了天线设计的灵活性; 运用变频思想对馈电装置进行改进设计出了一阻抗带宽达 28.9% 的宽频带天线, 在 3.76~4.80GHz 的工作频段内天线增益均大于 8dBi, 增益带宽达 24.2%。

关键词: 微带天线; 宽频带天线; 共面波导; 耦合缝; 阻抗带宽

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)01-0241-04

Characteristics and Applications of Several Coplanar Waveguide Feeding Devices

Chai Wen-wen^{①②} Zhang Xiao-juan^①

^①(The Key Laboratory of High Power Microwave and Electromagnetic Radiation, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The effects of four coupling slots on antenna resonance frequency and bandwidth are studied respectively. And these effects are explained with the near field distributions. Feeding characteristics of several coupling slots are analyzed and compared, which greatly improve the flexibility of antenna design. By modifying the feeding device with the conversion idea, a broadband microstrip antenna is designed with a bandwidth of 28.9%. The gain is more than 8dBi in the operating frequency band of 3.76~4.80GHz. The gain bandwidth is 24.2%.

Key words: Microstrip antenna; Wideband antenna; Coplanar waveguide; Coupling slot; Resistance bandwidth

1 引言

微带天线是 20 世纪中后期逐渐发展起来的一种新型的天线。由于其既有尺寸小, 成本低, 结构牢固和工艺简单等优点, 同时还可以方便地实现线极化或圆极化以及双频工作, 因而被广泛应用于通信, 广播和航空航天等领域。但是由于微带天线本身是窄带的, 要想得到宽频带特性通常采用口径耦合^[1,2]或者多层介质的结构^[3]等手段来实现。传统的口径耦合馈电的实现是在天线贴片与馈电网络间加一带有缝隙的接地板, 微带线通过此口径对贴片馈电, 这样就引入了多层介质, 增加了设计的复杂性, 因此由 Wen 在 1969 年提出的共面波导也就日益受到了人们的关注。这种传统的 CPW(共面波导)是由一个中心导带和分布于两侧的两个半无限延伸的共面接地板构成的。CPW 传输线相对于常规的传输线来说, 具有辐射损耗小, 易于和其它元器件实现串连接, 提高电路集成度等优点。

然而至今还没有任何文章对共面波导耦合缝馈电装置的特性进行系统的分析。共面波导矩形缝虽在一些文章中已有研究^[4-8], 但并没有具体分析其尺寸对于天线性能的影响。

本文利用 Ansoft HFSS 仿真软件对共面波导感性矩形缝、双 T 型缝、H 型缝的馈电性能进行了研究, 分析了谐振频率以及阻抗带宽的变化与缝隙形状和尺寸的关系, 并利用近场分布对其进行解释。最后, 利用该类型的耦合装置设计了一双贴片的微带天线, 并利用一变容器对其进行优化, 实验结果证明了该模型的有效性。

2 模型分析

图 1 中是 4 种共面波导耦合装置馈电的单贴片微带天线, 几种天线的不同之处在于馈电缝的形状以及尺寸。水平缝和垂直缝的宽度为 $w_s=1\text{mm}$, 由于缝隙的宽度对于耦合量的影响并不大, 在此仅通过变化垂直缝的长度 l_d ($l_d \geq w_s$) 以及两对称垂直缝的水平距离 l_s 来研究耦合缝的馈电特性。Ansoft HFSS 是一种基于 FEM 的全波 3D 电磁场仿真软件, 其拥有强大的天线设计功能, 可以精确地计算各种天线参量包括带宽, 增益, 远场方向图等, 且计算精度已经得到广大中国工程师的认可。本文利用 HFSS 分别对几种耦合缝馈电天线的性能进行分析。

图 1(a)为共面波导感性矩形缝馈电的单贴片天线。图

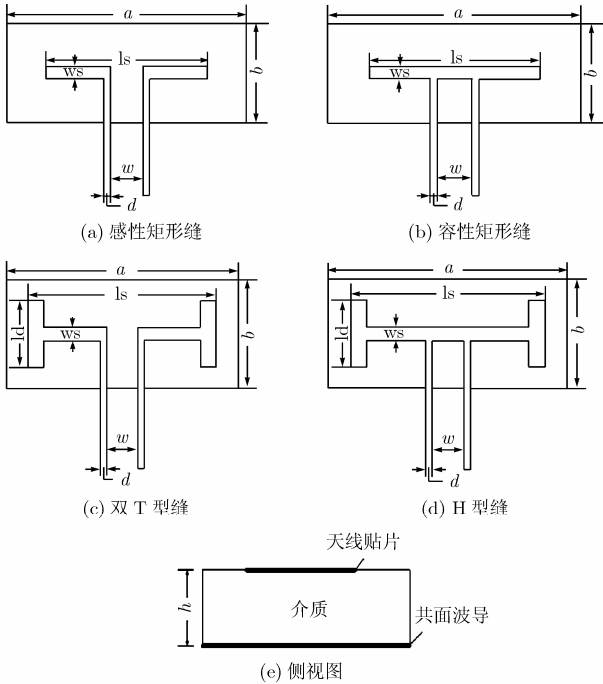


图1 几种共面波导耦合缝隙馈电的微带天线
(固定尺寸: $a=23, b=17.6, h=1.6,$
 $ws=1, w=3, d=0.1,$ 单位: mm; $\epsilon_r=2.2$)

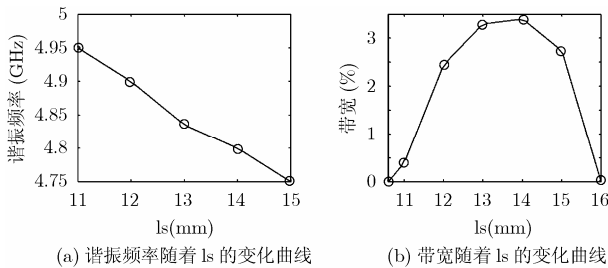


图2 共面波导感性矩形缝馈电天线

2(a), 图 2(b)为天线谐振频率和带宽(下文的带宽均是在 $VSWR < 2$ 时取得)随 l_s 的变化曲线。可以看出, 当 l_s 增大时谐振频率接近线性减小, l_s 仅在一定范围内取值时才可保证带宽大于 0, 将满足带宽大于 0 的 l_s 可取的最大值记为 $l_{s_{max}}$, 最小值记为 $l_{s_{min}}$, 则带宽的最大值大约在 $(l_{s_{min}} + l_{s_{max}})/2$ 附近取得。

图 1(b)为共面波导容性矩形缝馈电的单贴片天线。图 3(a), 图 3(b)为天线谐振频率和带宽随 l_s 的变化曲线, 可以看出, 谐振频率随 l_s 的增大亦接近线性减小, 但与感性矩形缝馈电的带宽曲线一个明显的不同在于带宽随 l_s 的变化并不敏锐, l_s 在很大的范围内都可保证天线良好的频带特性。

图 1(c)为共面波导双 T 型缝馈电的单贴片天线。图 4(a), 4(b)分别为 l_s 取不同值时天线的谐振频率和带宽随 l_d 的变化曲线, 由两曲线得到如下规律: 谐振频率随 l_s 和 l_d 的增加逐渐变小, 且 l_s 越大谐振频率随 l_d 的变化越敏锐; 当 l_s 固定时 l_d 有一个满足带宽大于 0 的最大值, 记为 $l_{d_{max}}$, l_s

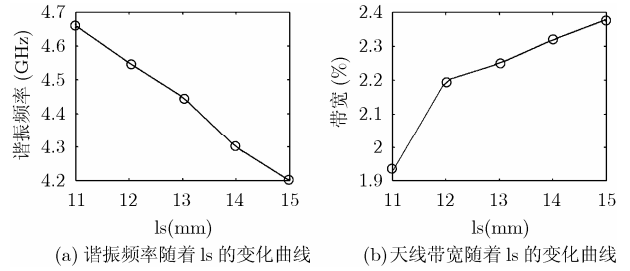


图3 共面波导容性矩形缝馈电天线

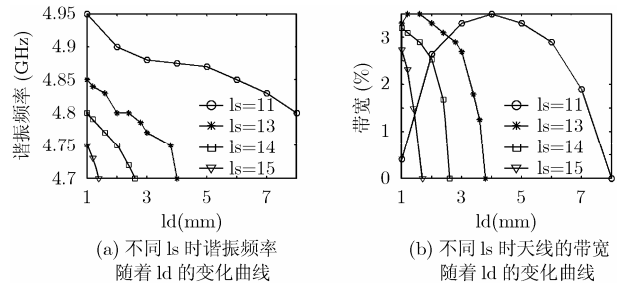


图4 共面波导双 T 型耦合缝馈电天线

增大时 $l_{d_{max}}$ 变小, 当 $l_s < 0.22\lambda_0$ ($\lambda_0 \approx 62.5\text{mm}$) 时最大带宽值基本相同, 约在 $l_{d_{max}}/2$ 处取得, 而当 $l_s \geq 0.22\lambda_0$ 时最大带宽出现在 $l_d = w_s$ 处且随 l_s 的增大逐渐减小。

图 1(d)为共面波导 H 型耦合缝馈电的单贴片天线。图 5(a), 图 5(b) 为 l_s 取不同值时, 天线的谐振频率和带宽随 l_d 的变化曲线, 由两曲线得到如下规律: 谐振频率随 l_s 和 l_d 的增加逐渐变小, 且变化接近线性; 与双 T 型耦合缝馈电的带宽曲线一个明显的不同在于当 l_s, l_d 在一个很大的范围内变化时天线都可以保持较大的带宽, 变化比较平稳。

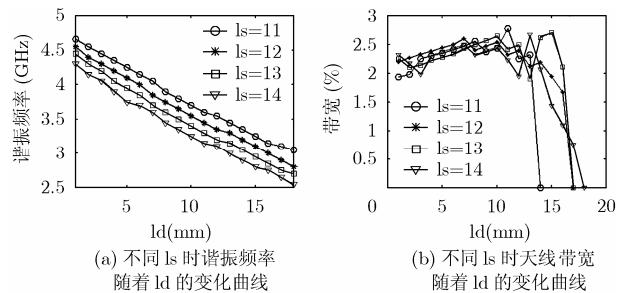


图5 共面波导 H 型耦合缝馈电天线

3 结果比较与讨论

双 T 型缝和 H 型缝均是在矩形缝两端加负载缝构成, 所不同的是两者与共面波导线的连接方式^[4], 前者构成感性馈电, 后者则是容性馈电。根据上面几种耦合装置馈电天线性能的变化曲线, 我们还可得到如下 3 条规律: (1)对于相同形状和大小的耦合缝来讲, 利用感性馈电的天线的带宽和增益要优于容性馈电天线, 但前者的谐振频率要大于后者; (2)

当 l_s 长度固定时，适当地调节 l_d ，可以使得双 T 型缝和 H 型缝的耦合能力远优于矩形缝，从而得到一个更大的驻波比带宽。(3)在天线尺寸和耦合缝隙形状固定的情况下不同的馈电方式会使得天线在不同的谐振频点获得好的带宽特性，例如， $l_s=13\text{mm}$ ， $l_d=1\text{mm}$ 时从感性矩形缝馈电天线到容性矩形缝馈电天线可得到 400MHz 的频率转换，而 $l_s=13\text{mm}$ ， $l_d=2\text{mm}$ 时从双 T 型缝馈电天线到 H 型缝馈电天线可得到 500MHz 的频率转换。故可以使用一个变容二极管来改进耦合装置，在感性和容性之间调节天线的馈电方式从而在一个相当大的频段内转变天线的谐振频点，达到优化天线的目的。

从场的角度解释耦合缝隙对于谐振频率和带宽的影响是比较直观的。图 6(a)，图 6(b)分别是无缝和有缝时微带贴片上的电流分布的示意图，很明显缝的存在使得电流主要分布在缝隙两端至辐射元边缘之区域内，电流路径朝向缝隙偏转且 l_s 越大电流的偏转越明显，这使得电流的等效路径变长从而减小了天线的谐振频率。而带宽特性的变化可用耦合缝周围的电场分布解释。如图 7(a)所示，一方面，对于感性馈电的天线来说，其电场主要沿着耦合缝分布，故缝参数的变化会极大影响缝隙与贴片间的耦合量，从而导致输入阻抗不匹配，能量损耗增大，带宽逐渐降为 0，且缝隙过大会导致背向辐射增大造成天线效率降低；另一方面，由图 7(b)可以看出容性馈电天线的电场主要集中在中心导体与地板之间长度为 w 的缝隙带中，显然在中心导体的长度 w 不变的情况下，缝隙的变化对于带宽的影响并不大，故我们得到上面较为平坦的带宽变化曲线。

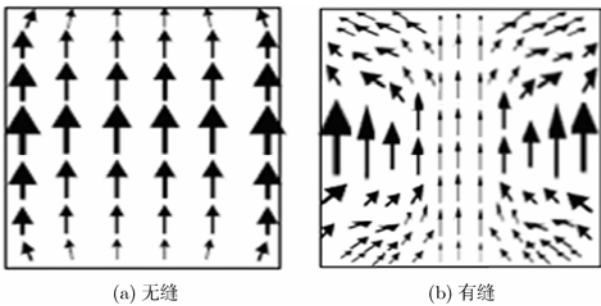


图 6 电流分布示意图

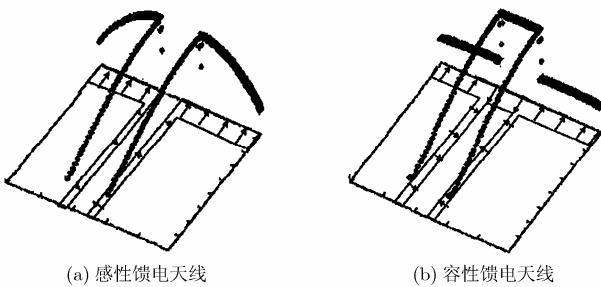


图 7 电场分布示意图

4 应用

利用上面的 H 型耦合缝馈电装置为双层贴片元^[9]馈电，如图 8 所示。用 $\epsilon_r=2.2$ 的新型微波复合介质基板 F₄B-1-2 作为介质材料，地板尺寸为 $G \times G$ ，两贴片之间是厚度 $d_0=4.6\text{mm}$ 的空气层，变容二极管采用的是 TOSHIBA 公司的 ISV287 型号。A，B 两点接变容二极管的两脚。根据以上的实验结果和规律，适当调节贴片和耦合缝隙的尺寸并用变容二极管来优化天线。IE3D 是基于矩量法的 2.5 维的电磁仿真软件，其比较适用于平面微带天线的分析和设计，本部分分别利用 HFSS，IE3D 对该天线模型进行仿真，并与测试数据进行对比。实验结果一方面验证了该模型的有效性，同时又间接测试了两种软件的精确度，为读者以后进行天线设计软件的选取提供了一定的参考价值。

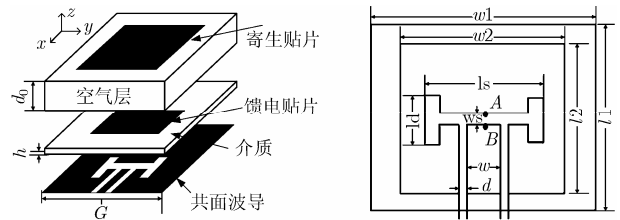


图 8 天线模型
 (天线尺寸： $w_1=l_1=26$ $w_2=l_2=20.3$ $h=1.6$ $l_s=16$ $l_d=6.5$ $w_s=1$ $w=3$ $d=0.1$ $G=100$ 单位：mm)

图9是天线的Return loss曲线，实验结果由矢量网络分析仪Agilent 8510C测量得到。由图可见仿真曲线与测量曲线基本吻合。图中有两个谐振点，其中第一个谐振点基本是由馈电贴片和耦合缝的相互作用产生，而第二个谐振点是两贴片互耦的结果。这是因为大量实验证明，变化二极管的电容值对第二个谐振点的影响很小，而第一个谐振点变化较大。这就论证了前面的结论，利用变容二极管来改变下层贴片和馈电缝的耦合量可以在一个相当大的范围内改变天线的工作频带。由测量结果可知，该微带天线的阻抗带宽为 3.55GHz~4.75GHz(VSWR<2)，相对阻抗带宽达到了28.9% (传统微带天线带宽仅有2%~5%)，测量结果的带宽比仿真结果要宽一些,这可能是由于仿真时没有考虑介质损耗的结果。从图中还可以看出，HFSS仿真得到的曲线与实测曲线更加接近，而IE3D软件的建模库中的有些结构需要近似，故结果相对较差，但其仿真速度较快，可用来进行初步设计。

图 10 是实测天线的增益特性曲线，从图中可以看出在 3.76~4.80GHz 的频段内天线的增益均大于 8dBi，增益带宽达到了 24.2%。

图11给出了天线在整个工作频带边缘频点的实测辐射方向图，可看出天线具有很好的辐射特性，背向辐射在工作频带内均小于-20dB。

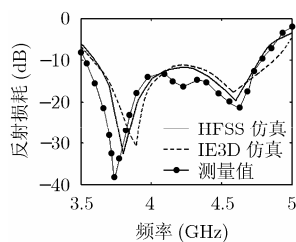


图9 天线的 Return loss 特性曲线

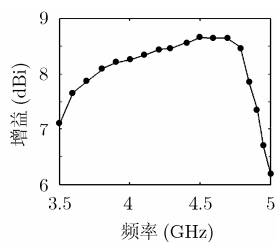


图10 测量的天线增益 特性曲线

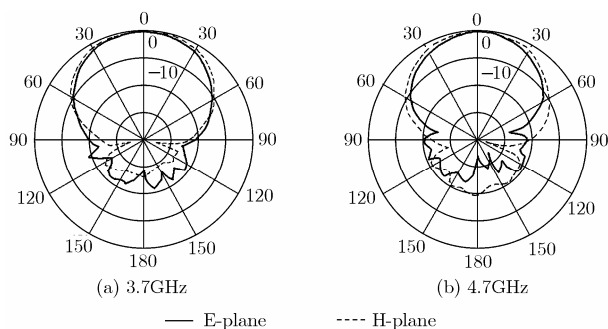


图11 测量的天线方向图

5 结束语

本文分析了不同形状和尺寸的耦合缝隙馈电天线的谐振频率、带宽、以及近场的分布特性，得到了谐振频率和带宽随耦合缝隙尺寸的变化规律，并利用辐射元上的电流分布以及缝隙中的电场分布对其进行解释。利用本文结果灵活地设计出了具有 28.9%的阻抗带宽，工作范围内的增益大于 8dB 的宽频带天线。变容二极管的加入使得天线的调节既简单又有效，与普通的共面波导馈电装置相比，可以使天线获得更好的带宽和增益，实用性很强，在工程上将会发挥很好的应用。此外，这些变频装置同样适用于两层以上的微带贴片天线。

参 考 文 献

[1] Croq F. Wideband aperture coupled microstrip subarray.

IEEE Antennas and Propagation Symp.Dig., 1990, 3: 1128-1131.

[2] Sullivan P L. Analysis of an aperture coupled microstrip antenna. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1986, 34(8): 977-984.

[3] Deshmukh A A. Compact broadband stacked microstrip antennas. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 48(1): 93-96.

[4] Deng S M. Impedance characteristics of microstrip antennas excited by coplanar waveguides with inductive or capacitive coupling slots. *IEEE Micro. and Guide Wave Lett.*, 1995, 5(11): 391-393.

[5] Lee R Q. Coplanar waveguide aperture-coupled microstrip patch antennas. *IEEE Micro. and Guide Wave Lett.*, 1992, 2(4):138-139.

[6] Deng S M. Analysis of coplanar waveguide-fed microstrip antennas. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1995, 43(7): 734-737.

[7] Giauffret L. Theoretical and experimental characterization of CPW-fed microstrip antennas. *IEE Proceedings, Microwaves, Antennas and Propagation, Part H*, 1996, 143(1): 13-17.

[8] Giauffret L. Study of various shapes of the coupling aperture in CPW-fed microstrip antennas. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1997, 45(4): 642-647.

[9] Nishiyama E. Stacked microstrip antenna with wide bandwidth and high gain. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 2004, 52(2): 143-148.

柴雯雯：女，1983年生，硕士生，研究方向为天线和天线馈线的设计。

张晓娟：女，1964年生，副研究员，主要研究方向为微波遥感、天线、计算电磁学、电磁散射与逆散射。