

一种双频双极化宽带高温超导微带天线的研究

林士杰 姜 兴 孙逢圆

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 桂林 541004)

摘 要: 为了提高天线的性能, 本文设计了一种口径耦合馈电的多层介质高温超导微带天线。天线的馈电网络部分采用了高温超导材料, 利用了高温超导材料具有低表面阻抗的特性, 提高了天线的效率。高温超导微带天线的衬底介电常数过高, 多层介质的结构引入一层真空衬底, 降低平均介电常数, 这样能展宽天线的带宽。天线缝隙采用 H 型缝隙, 提高了两极化端口间的隔离度。天线的仿真结果表明了设计思路的合理性和可行性。

关键词: 高温超导; 口径耦合; 辐射效率; 宽带; H 型缝隙

A Dual-band Dual-polarized Broadband and HTS Microstrip Antenna

LIN Shi-jie, JIANG Xing, SUN Feng-Yuan

(Information and Communication College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to improve the performance of the antenna, an aperture-coupled multilayered medium high temperature superconducting microstrip antenna is designed in this paper. The high-temperature superconducting materials is mainly used in feed network, so the efficiency of the antenna is improved for its low surface impedance characteristics. As the relative dielectric constant of the high-temperature superconducting microstrip antenna substrate is too high, a vacuum layer is added in it, and the average dielectric constant is reduced, then the antenna bandwidth is broadened. An H-type gap is used in this antenna, and the polarization isolation between ports is improved. The simulation results show that the rationality and feasibility of the design ideas.

Key words: high-temperature superconductivity; aperture-coupled; radiation efficiency; broadband; H-type gap

引 言

随着无线通信技术得到了迅猛的发展, 卫星通信的成本固定、传输容量大, 覆盖面积广等特点, 已经使得卫星通信成为各种民用和军用通信中不可替代的通信技术。卫星天线作为卫星通信系统中的重要部分, 人们也对其提出了更高的要求。微带天线具有剖面薄、重量轻、易与飞行器载体表面共形等特点, 所以微带天线也成为了一种可用的星载天线。星载天线需要高增益的天线, 可通过组成微带天线阵来完成。对于一个大型的微带天线阵, 馈电网络的损耗很大, 使得大阵列天线的效率会降低, 增益的提高也会碰到瓶颈, 这样就会限制微带天线在卫星通信中的应用。

高温超导材料(HTS)与低温超导材料(LTS)的共同特点就是都具有很低的表面电阻, 比普通导体要小 10 到 100 倍(在一定的频率和温度下)。两种材料的主要区别是转换温度不一样, 现在已经可以获得临界温度为 125K 的高温超导薄膜材料, 而低温超导需要在液氮温度 (4.2K) 才能工作。自从 1986 年发现转换温度超过液氮温度的高温

超导体以来, 高温超导体在实际中得到了很多应用, 现在已经制造出很多用超导薄膜做成的无源微波器件, 如多工器^[1]、延迟线^[2]、滤波器^[3]、谐振器^[4]等, 性能比传统材料器件改善很多。天线也可以采用高温超导材料制造, 这样能显著提高天线的性能, 减少天线的损耗, 提高天线的效率和增益。

高温超导材料会使天线的损耗降低, 从而使得天线的 Q 值升高, 带宽变窄, 微带天线本身就是谐振天线, 带宽较窄 (约为 2%-5%) 的天线, 而 HTS 天线的带宽更窄, 一般为 0.85%-1.1%^[5], 这使得 HTS 天线受到了很大的限制。

本文设计了一种双频双极化宽带高温超导微带天线, 天线工作于 Ku 波段, 通过口径耦合馈电^[6, 7]的多层介质的结构来展宽天线的工作带宽, 在两层介质中间加上一层真空衬底, 降低天线的平均介电常数, 降低 Q 值。采用 H 型的缝隙代替矩形缝隙, 有利于增大缝隙与贴片之间的耦合, 还能进一步提高两极化端口之间的隔离度。通过数值仿真, 仿真结果表明了文中设计思路的可行性和有效性。

1 高温超导体的表面阻抗

在微波频段下, 高温超导体的表面电阻比常

基金项目: 认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室 (桂林电子科技大学) 基金资助项目。

规导体小很多, 其理论计算公式为^[8]:

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (1)$$

$$R_s = \frac{1}{2}(\omega^2 \mu^2) \lambda_L^3 \sigma_N \left(\frac{n_n}{n} \right) \quad (2)$$

$$X_s = \omega \mu \lambda_L = \omega L_k \quad (3)$$

上面各式中, ω 为工作角频率, μ 为超导体的磁导率, σ_N 为超导体处于正常状态下的电导率, λ_L 为伦敦穿透深度, n_n/n 为超导体中的常规载流子密度与总载流子密度的比值。

以上的参数中, λ_L 和 n_n/n 又是工作温度 T 的函数, 函数关系式为:

$$\lambda_L = \lambda_0 [1 - (T/T_c)^4]^{-1/2} \quad (4)$$

$$n_n/n = (T/T_c)^4 \quad (5)$$

其中, T_c 为超导材料的转换温度, λ_0 为超导材料在 0K 时的伦敦穿透深度。由 (2) 式中可以了解到, 超导材料的表面电阻 R_s 与 ω^2 成正比, 跟常规导体不同, 常规导体的表面电阻正比于 $\omega^{1/2}$ 。(3) 中的 L_k 也就是通常讲的动态电感, 反映了超导载流子的动能。

2 高温超导微带天线的宽频带技术

高温超导天线在极低天线损耗的同时, 提高了微带天线的 Q 值而使得带宽变窄, 这会限制它的应用。改善微带天线的带宽的方法一般有两类, 第一类是增加天线的瞬时带宽, 也就是降低天线的 Q 值; 第二类是增加天线的有效带宽, 这样不会改变天线的瞬时带宽, 却可以使天线工作在相近的频点, 这样可以有效展宽带宽。降低衬底的介电常数是降低天线 Q 值的基本途径, 但由于高温超导薄膜的制备要求薄膜和衬底之间的晶格要互相匹配, 而这些衬底往往具有很高的介电常数, 这也是造成 HTS 天线带宽过窄的原因。增大衬底的厚度也是降低天线 Q 值的基本途径, 通过增加衬底的厚度可以在一定程度上展宽带宽, 但基片的厚度增加会使得微带天线表面波激励加强, 增加天线的损耗, 所以在实际应用中, HTS 微带天线的衬底厚度通常比较小 ($h \leq 0.01\lambda_0$)。增加寄生单元, 也就是利用附加的微带贴片与天线辐射

射边或非辐射边耦合, 也能增加天线带宽, 但会增大天线尺寸。通过附加阻抗匹配网络也是一种常规导体天线常用的展宽天线的方法, 但经过研究这个方法对 HTS 微带天线带宽展宽的效果不明显。改变贴片的形状也是一种有效改善微带天线的带宽的方法, 可以采用在贴片表面开槽或者采用 E 形天线等方式来增加天线有效带宽。一个更为常用的方法是采用口径耦合馈电的方式来展宽天线带宽, 使用这种方法可以使辐射元和馈电网络的设计分开, 使得设计更自由, 而且避免了馈电网络会对天线辐射性能产生影响, 缝隙的大小和形状也会对天线的带宽有影响, 调节缝隙的大小和形状也能改善天线的带宽。

3 高温超导微带天线的设计

本文设计的天线是口径耦合多层介质高温超导微带天线。天线采用的是双层介质板的结构, 在辐射元基板和接地板之间引入一层空气层, 这样可以有效降低天线的平均介电常数, 从而能进一步展宽天线的带宽。口径耦合馈电属于一种电磁耦合型的馈电方式, 它通过一个公共口径来形成馈线和辐射元之间的耦合。缝隙开在接地板上, 从而使得馈电网络与辐射元基本完全隔离, 因而避免了馈电网络的辐射干扰, 而且可以通过调节贴片的尺寸, 缝隙的大小和形状以及馈线的位置等各种参数来获得天线的宽带特性。缝隙耦合馈电的双极化方式有很多种, 比如“L”形双缝, “十”形双缝, “T”形双缝等。本文采用“T”形双缝的结构, 这样能减少缝隙之间的耦合, 提高天线的端口隔离度, 并且使用 H 型缝隙代替矩形缝隙, 这种结构有利于增大缝隙与贴片的耦合, 进一步提高两极化端口之间的隔离度。利用上述理论, 为了实现高温超导微带天线带宽窄的缺点, 并考虑到天线的实际工作环境, 对 Ku 波段的 HTS 微带天线进行了设计, 其结构图如图 1、2 所示, 其

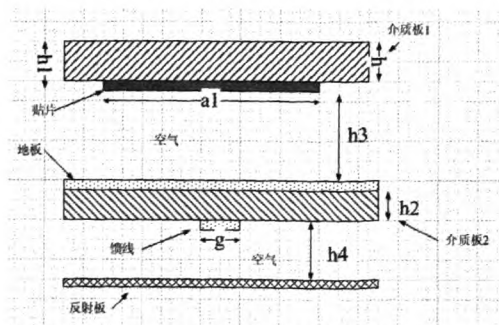


图 1 微带天线侧视图

中贴片位于第一层介质下方可以对贴片起到保护作用, 加反射板是为了防止后向辐射过大。

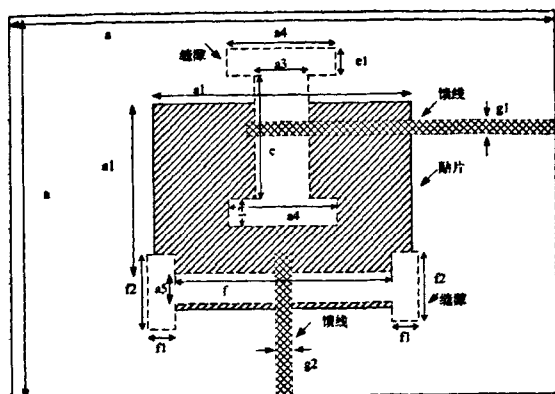


图2 微带天线俯视图

由于微带天线属于高辐射效率天线, 辐射元的导体损耗对天线的性能影响不算很大, 所以天线的矩形贴片采用普通金属, 也就是铜。天线的上层介质用的材料介电常数为 $\epsilon_1=2.2$, 厚度为 $h_1=1\text{mm}$ 的聚四氟乙烯板。天线的下层介质板采用衬底为 LaAlO_3 ($\epsilon_2=23$) 的双面厚度为 d 的 YBCO 高温超导薄膜作为天线的馈电网络, 也就是馈线和接地板都是高温超导材料。通过利用高温超导材料的低表面电阻特性可以显著降低天线的导体损耗, 特别是要用该单元组成大型天线阵时, 馈电网络的损耗的降低会显著提高天线阵的辐射效率。两层介质板中间的真空层还可以有效隔离馈电网络和辐射元之间的热传导。通过对上述的高温超导微带天线进行仿真和优化, 天线的各项具体参数如表 1 所示。

表 1 天线各项参数

方形辐射元	$a1=3.8\text{mm}$
介质参数	$\epsilon_1=2.2, h=1\text{mm},$ $\mu_1=\mu_2=1, \epsilon_2=23, h2=0.5\text{mm},$ $h3=1.99\text{mm}, h4=1.12\text{mm}$
耦合口径(mm)	$e=2.14, a3=0.68, e1=0.76, a4=1.41, f=2.9, a5=0.75,$ $f1=1.06, f2=1.15$
微带馈线(mm)	$g1=0.11, g2=0.11$
HTS 薄膜	$T_c=90\text{K}, d=300\text{nm}, \lambda_0=0.22\mu\text{m}, R_s<0.5\text{ m}$ $\Omega(77\text{K}, 10\text{GHz})$

设天线的工作温度为 77K, 图 3、4 分别给出了利用 CST 仿真软件对天线回波损耗和端口之间的隔离度的仿真结果, 其中实线为 S11 和 S22 的曲线, 虚线为 S12 和 S21 的曲线。图 5 和图 6 给出了天线的两个端口的方向图, 其中实线 E 面图, 虚线为 H 面图。图 7 给出了馈电网络采用高温超导材料线和采用铜的辐射效率仿真对比结果图。

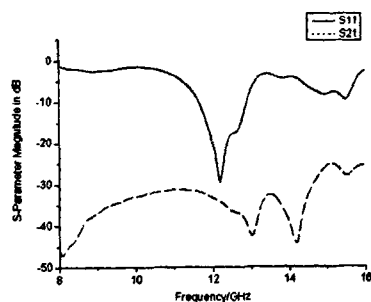


图3 S11 和 S21 的曲线

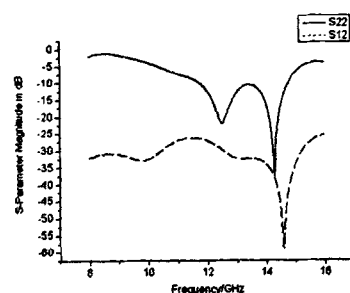


图4 S22 和 S12 的曲线

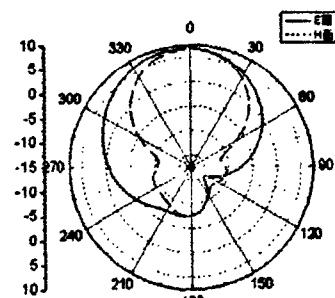


图5 一端口的方向图

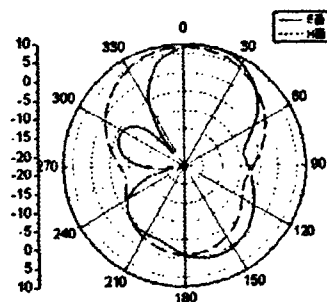


图6 二端口的方向图

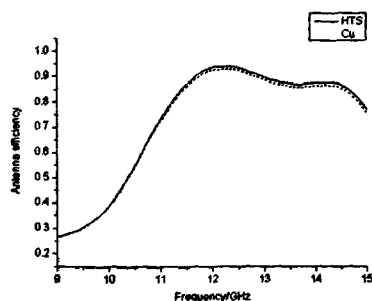


图 7 天线效率图

由图 3、4 可以看出所设计的高温超导微带天线的端口一可获得约 10.3% 的工作带宽 ($S_{11} \leq 10\text{dB}$)，端口二可获得约 21.2% 的工作带宽 ($S_{22} \leq 10\text{dB}$)， S_{21} 和 S_{12} 在带宽范围内均小于 -25dB，两端口具有良好的隔离度。通过图 7 可以看出，馈电网络采用高温超导的微带天线比采用铜的微带天线提高了约 1.3% 的辐射效率，因此，随着单元数目的增加，天线馈电网络会更庞大，天线的导体损耗将会有更大的降低，效率的提高会更明显，超导天线的优势必将会变得更显著。

4 结论

本文设计了一种双频双极化宽带高温超导微带天线，仿真结果表明该天线可以提高天线的辐射效率和展宽天线的工作带宽。设计过程中，通过增加一层真空降低了平均介电常数和口径耦合的方法解决天线带宽过窄的问题，同时提高了天线的辐射效率。采用 H 型的缝隙耦合方式可以增大缝隙与贴片的耦合，进一步提高两极化端口之间的隔离度。最后还可以预测，当要设计天线阵列时，随着天线单元数目的增加，口径耦合多层介质高温超导微带天线的效率和增益都会得到很

大的提高。

参考文献

- [1] Mansour R R, Tammo F, Dokas V. Design of hybrid-coupled multiplexers and diplexers using asymmetrical superconducting filters. IEEE MTT-S Int microwave Symp Digest, 1993, 3: 1281-1284.
- [2] Bourne L C, Hammond R B, Robinson McD, et al. Low-loss microstrip delay line in $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$. Appl. Phys. Lett., 1990, 56(23): 2333-2335.
- [3] Bonetti R R, Williams A E. Preliminary design steps for thin-film superconducting filters. IEEE MTF-S Int microwave Symp Digest, 1990, 1: 273-275
- [4] Walker C, Shen Z Y, Pang P, et al. 5 GHz high-temperature-superconductor resonators with high Q and low power dependence up to 90K. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(9): 1462-1467
- [5] Richard M A, Bashin K B, Claspy P C. Superconducting microstrip antennas: an experimental comparison of two feeding methods. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1993, 41(7): 967-974.
- [6] Croq F and Pozar D M. Millimeter-wave design of wide-band aperture-coupled stacked microstrip antennas. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1991, 39(12): 1770-1776.
- [7] Sullivan P L and Schaubert D H. Analysis of an aperture coupled microstrip antenna. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1986, 34(8): 977-984.
- [8] 沈致远, 盛克敏, 王素玉译. 高温超导微波电路[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

林士杰 男, 硕士研究生, 电磁场与微波技术专业, 研究方向为天线理论与技术。

Email: 0600220422@163.com

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>