

文章编号 1005-0388(2004)03-0286-04

高温超导天线在天线 RCS 减缩中的应用*

刘英 龚书喜 傅德民

(西安电子科技大学天线与电磁散射研究所, liuying@xaht.com, 陕西 西安 710071)

摘要 高温超导(HTS)体由于具有较低的表面电阻, 在天线应用中, 它可以提高天线的效率。天线作为特殊的散射体, 会将部分接收的入射场再辐射出去, 而超导天线散射场的强度可以通过控制温度来进行控制, 并且高温超导微带天线可以实现天线小型化, 这就可以实现减缩天线雷达散射截面(RCS)的目的。对高温超导线天线和微带贴片天线的分析结果证明了结论的可行性。这是超导体除了增加天线效率以外的在天线设计方面的另一个应用。

关键词 高温超导(HTS), 雷达散射截面(RCS), 微带天线

中图分类号 TN011 **文献标识码** A

Application of high-temperature superconducting antenna in RCS reduction

LIU Ying GONG Shu-xi FU De-min

(Institute of Antennas and EM Scattering, Xidian University,

liuying@xaht.com, Xi'an Shanxi 710071, China)

Abstract The high-temperature superconductors (HTS) bearing low surface resistance can be used to raise the efficiency of antenna. The scattering strength of HTS antenna can be controlled by the temperature change and the HTS microstrip patch can be designed with a much smaller size, so the radar cross section (RCS) of antenna may be reduced effectively. The simulation results for the HTS wire antenna and microstrip patch antenna are presented to prove the proposed ideas.

Key words high-temperature superconducting (HTS), radar cross section (RCS), microstrip antenna

1 引言

超导电性是由荷兰物理学家 Heike Kamerlingh Onnes (翁纳斯)在 1911 年发现的。他发现的第一个超导体是汞。具有在低温下电阻消失这一特性的物质称为超导体, 产生超导体现象时的温度称为超导转变温度 T_c 。高温超导体(HTS)最根本的一个特点是它的转变温度超过液氮温度(77K), 因这一突破大大降低了其所要求的制冷设备的重量、体积和费用, 以致许多应用都更加切实可行。高温超导体对于微波工程来说是一种崭新的材料。由高

温超导材料制成的微波电路具有许多独特的优点, 包括低损耗(或高 Q 值)、低噪声、低功率损耗以及电路的小型化。自 80 年代后期以来, 高温超导对微波工程产生了巨大影响。世界范围内关于高 T_c 材料的研究已经取得了很大的进展^[1]。某种实际高温超导薄膜材料的转变温度已经达到了 125K, 高温超导电路在液氮温度(77K)下很好工作。应用于微波的薄膜超导体的重要参数是其表面电阻 R_s , 它决定了微波电路的损耗。在液氮温度下表面电阻比起铜来要低 100 倍的薄膜超导体目前已经商品化了, 这开拓了微波电路子系统或系统集成化的可能性。

* 收稿日期: 2003-06-26. 基金项目: 国家部委预研资助项目(4131002062)

高温超导天线在天线辐射方面已经得到了广泛的应用^[2,3],在天线散射方面的有关线天线的分析^[4],还未有超导微带天线散射的分析。本文探索高温超导天线在天线散射中的应用,根据高温超导体的特殊性能,分析其散射场在温度变化前后的减缩效果。由于高温超导体对应高介电常数介质,由此可以设计小尺寸天线,文章分析了高温超导线天线和小型化高温超导微带贴片天线的散射性能。

2 高温超导天线在天线散射减缩中的应用

高温超导体用于制作天线辐射单元或者其馈电网络以提高电小天线的效率,但是高温超导体另一个与天线有关的特性是电导率随温度变化。利用此特点可以将其用于天线散射中。由天线的散射原理^[5]知天线在一定负载状态下会将部分接收到的入射场再次辐射出去,这部分散射场会导致较大的回波。因此天线在不使用的时候应尽量隐身。由超导体制成的天线的电导率在温度高于 T_c 时会减小,这点在减小天线散射方面比较有意义。通过控制 T_c 附近的温度可以控制天线的散射,即雷达散射截面(RCS),从而实现天线的时域隐身。超导体对应高介电常数介质,由此可实现天线小型化,这些是超导体除了增加天线效率以外的在天线散射方面的应用。

2.1 高温超导线天线分析

用矩量法计算超导体偶极子天线的散射。与常规天线的计算不同的是线表面阻抗 Z_s 对常规阻抗矩阵要进行修正,该阻抗由超导体在转变温度 T_c 附近的电导率 σ 或电阻率 ρ 来确定,

$$Z_s = (\omega \mu / \sigma)^{1/2} \quad (1)$$

对于低于 T_c 的温度采用二流体模型^[6]来近似 σ ,然后再用矩量法来求解散射场。对高于 T_c 的温度采用 YBCO 的电阻率经验公式,假设

$$\rho = 2.1T + \text{const}, \mu\Omega\text{cm} \quad (2)$$

矩量法使用分段正弦基函数和检验函数,对于给定的电导率,阻抗矩阵元素调整为

$$\frac{Z_s}{2\pi a} \int_{l_m, l_n} I_n(\alpha) W_n(\alpha) d\alpha \quad (3)$$

其中区域 (l_m, l_n) 是电流展开函数和检验函数所在的线分段区域, a 是导线半径。利用此方法计算了振子天线的散射场,振子半径为 0.001λ ,振子长度为 0.5λ 。

超导体采用 YBCO, 常规天线采用铜, 分别计算

两种天线在转变温度 T_c 前后的散射场。YBCO 从 77K 到 93K, 铜变化从 80K 到 100K。YBCO 在小于 T_c 时表面阻抗为 $9.4 \times 10^{-7} + j2.7 \times 10^{-3}$, 高于 T_c 时表面阻抗为 $7.02 \times 10^{-2}(1+j)$; 铜的表面阻抗由 $2.18 \times 10^{-3}(1+j)$ 增加到 $2.74 \times 10^{-3}(1+j)$ 。图 1 和图 2 给出在温度变化前后两种天线 RCS 减缩量的比较,在转变温度前,两者具有相类似数量级的散射场,但是当高于转变温度后,YBCO 的散射场大大减小,而铜则变化不大,从图 1 可以看出在温度变化后,超导体 YBCO 的散射场减缩量在 25dB 左右,而一般的常规铜天线的 RCS 减小量在 2.5dB 左右。由图 1 和图 2 都可以看出超导天线的减缩量远远大于常规的铜天线。

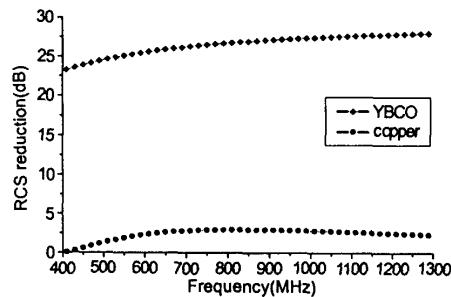


图 1 RCS 减缩随频率的变化

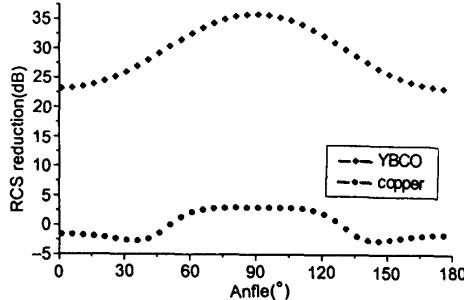


图 2 RCS 减缩随角度的变化

2.2 高温超导微带天线分析

小天线的辐射质量因子 Q_{rad} 定义为一段时间内存储在天线近场的平均能量 W 与辐射能量的比值:

$$Q_{rad} = \omega W / P_{rad} \quad (4)$$

如果天线的尺寸减小到远小于 λ_0 , Q_{rad} 会剧烈增加。如果天线匹配网络也在内,可以看作是天线的一部分,这样(4)中的 W 也包括匹配电路中存储的能量。由于导体损耗 P_c 和介质损耗 P_{diel} , 辐射功率 P_{rad} 小于天线的总功率, 定义辐射效率为:

$$\eta = P_{rad} / (P_{rad} + P_c + P_{diel})$$

$$= 1/(1 + Q_{rad}/Q_c + Q_{rad}/Q_{die}) \quad (5)$$

其中 $Q_c = \omega W/P_c$ 和 $Q_{die} = \omega W/P_{die}$ 。

式(5)表明由天线小型化导致较大的 Q_{rad} 使天线的辐射效率对耗散损耗较敏感。为了保持较高的辐射效率, Q_{rad} 值越大, 耗散损耗就必须越低。通过用高温超导体代替一般导体增加 Q_c , 使用低损耗介质增加 Q_{die} 就可以得到有相同辐射效率的小尺寸天线, 因此超导天线虽然尺寸小了许多, 但是仍能保持其辐射效率。

采用谱域格林函数全波分析法^[7,8] 分析实现小型化的高温超导微带天线, 考虑到超导体天线结构, 引入阻抗边界条件。假设接地板为无穷大, 贴片表面的边界条件为

$$E_{tan}^{inc} + E_{tan}^{rat} = Z_s J \quad (6)$$

将电流用分段三角基展开

$$J(x, y) = \hat{x} J_x(x, y) + \hat{y} J_y(x, y) \quad (7)$$

$$J_x(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N+1} I_x^m \Lambda(x - x_m) \Pi(y - y_n) \quad (8)$$

$$J_y(x, y) = \sum_{m=1}^{M+1} \sum_{n=1}^N I_y^m \Pi(x - x_m) \Lambda(y - y_n) \quad (9)$$

其中:

$$\Lambda(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{\Delta x} & |x| < \Delta x \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$\Pi(y) = \begin{cases} 1 & |y| < \frac{\Delta y}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

上式中 x, y 分别以每个划分段的中点为原点。选用与基函数相同的权函数 J' , 利用谱域分析法 (SDA) 对上式求解, 得到矩阵方程。确定矩阵方程后就可以求解电流展开系数 I_x, I_y , 从而可得任意方向的散射场 $E^{ra}(\theta_2, \varphi_2)$, 进而求出对应的 RCS 结果。

常规天线为 RT-Duroid ($\epsilon_r = 2.2$) 介质, 超导天线在 LaAlO₃ 介质 ($\epsilon_r = 25$) 上。它们实现在同一谐振频率 2.4GHz, 则常规天线边长尺寸为 42mm, 而超导天线边长尺寸为 12.5mm。这里介质的高介电常数是与超导体相关的, 如果普通导体, 高介电常数会恶化天线性能。图 3 所示为超导天线和常规天线的 RCS 比较, 可以看出使用超导天线在谐振频率点有大约 23dB 左右的减缩效果。

上面的分析中都没有考虑到馈电网络, 天线是作为散射体来分析的, 但是很明显, 如对匹配网络也

采用超导体来实现, 可进一步增加 RCS 随温度的变化, 从而得到更好的减缩效果。

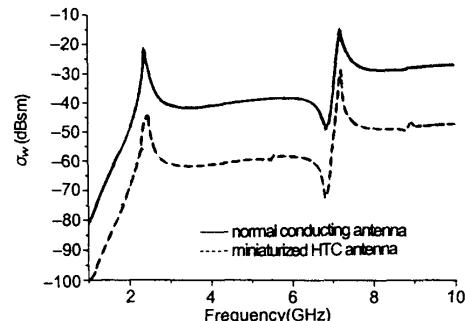


图 3 小尺寸的超导天线实现的 RCS 减缩效果

3 结论

超导天线用于辐射时可以提高天线的效率。用于天线散射时, 通过控制温度可以控制天线的散射, 使用超导薄膜材料又可实现小型化的微带天线从而实现 RCS 减缩, 这些都是超导体在天线散射方面的应用。随着超导天线研究的推广, 超导天线的实现和测试都早已成为可能, 所以该方法在天线散射减缩方面有一定的实用价值。将两种不同的学科融合在一起, 既拓宽了超导天线的应用范围, 也为实现天线减缩提供了新途径。

参考文献

- [1] Lauder, A C Wilker, D J Kountz. High performance superconducting thin films on large area substrates [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond., 1993, 3: 1683~1686.
- [2] Dinger, V O, K B Bowling et al.. A survey of possible passive antenna applications of high-temperature superconductors [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39: 1498~1507.
- [3] R C Hansen. Antenna applications of superconductors [J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(19): 1508~1512.
- [4] G G Cook, S K Khamas. Temperature control of radar cross section using electrically small high Tc superconducting antennas for stealth applications [J]. Proc. Inst. Elec. Eng. H, 1993, 140(4): 326~328.
- [5] Ying Liu, De-min Fu, Shu-xi Gong. A novel model for analyzing the RCS of microstrip antenna [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Application, 2003, 17

- (9): 1301~1310.
- [6] Cook, G G, Khamas, *et al.*. Performance prediction of high T_c superconducting small antennas using a two-fluid-moment method model[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 60: 123~125.
- [7] 贺秀莲, 龚书喜, 纪奕才等. 快速计算通信天线宽频带内的电特性[J], 电波科学学报, 2002, 17(2): 187~191.
- X L He, S X Gong, Y C Ji. Efficient broadband evaluation of communication antenna[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(2): 187~191.
- [8] D M Pozar. Radiation and scattering from a microstrip patch on a uniaxial substrate [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1987, 35(6): 613~621.

(上接第 279 页)

- [22] A A Hussein, W A Scales. Simulation studies of parametric decay processes associated with ionospheric stimulated radiation[J]. *Radio Sci.*, 1997, 32(5): 2099~2107.
- [23] R W Schunk, J C Walker. Theoretical ion densities in the lower ionosphere[J]. *Planet. Sp. Sci.*, 1973, 21(8): 75~1896.
- [24] P A Bernhardt, L M Duncan. The feedback-diffraction theory of ionospheric heating[J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1982, 44(12): 1061~1074.
- [25] J D Hansen. Large scale ionospheric modification by high power radio waves: Theory and Observation [R]. UCLA-PPG Report, No. 1298, April, 1990.
- [26] A J Stocker, E Honary, T R Robinson, *et al.*. EISCAT observations of large scale electron temperature and electron density perturbations caused by high power HF radio waves[J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, 54(12): 1555~1572.

刘英 (1977—), 女, 河南人, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士研究生。主要研究方向为计算电磁学, 电磁散射, 分形天线, 天线散射减缩等。

龚书喜 (1957—), 男, 河北人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师。主要研究方向为电磁理论、电磁辐射、电磁散射与隐身技术等。

傅德民 (1941—), 男, 陕西人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师。主要研究方向为天线的近远场变换理论及辐射与散射的近场测量; 天线数值分析与设计。



倪彬彬 (1978—), 男, 湖北人。2000 年毕业于武汉大学无线电物理系。2002 年于武汉大学空间物理系获硕士学位。现在武汉大学攻读博士学位。主要从事电离层阿尔芬谐振器和电离层人工变态方面的研究。



赵正予 (1952—), 男, 吉林人。武汉大学电子工程系教授, 博导。现主要从事电离层人工变态和电离层斜向返回探测雷达方面的研究。

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，一直致力于专注于微波、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>