

一种用于浅层探冰雷达的改进型宽带小型化 TSA 天线

张 锋* 刘小军 纪奕才 方广有 巨汉基

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘 要: 该文介绍了一种用于高分辨率浅层探冰雷达(工作于 500 MHz-2 GHz)的小型化 TSA 天线。该天线采用共面波导到槽线的转换结构实现馈电,天线的两侧边采用波纹结构,构成波纹结构的金属细条带的长度从馈点端到辐射孔径端逐渐减小。仿真结果表明,比之传统的 TSA 天线,该天线的工作频带可向低频扩展,同时低频段端射向增益能够提高 3 dB。测试结果表明,除 550 MHz 附近的一个窄频带($S_{11} < -8.2$ dB)外,天线的阻抗带宽($S_{11} < -10$ dB)大于 10:1。此外,在 500 MHz-2 GHz 内测量得到的端射向增益大于 3.9 dBi,测量得到的辐射方向图与仿真值有较好的一致性。

关键词: TSA 天线; 宽带; 小型化; 波纹型边缘

中图分类号: TN957.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1471-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01136

A Novel Wideband Compact Tapered Slot Antenna for Shallow Icecap Detection Radar Applications

Zhang Feng Liu Xiao-jun Ji Yi-cai Fang Guang-you Ju Han-ji

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: A novel compact Tapered Slot Antenna (TSA), which is used for high resolution polar ice penetrating radar (0.5 GHz-2 GHz), is proposed. This antenna is fed by a CoPlanar Waveguide (CPW) to slot-line transition. The lateral edges of the antenna are corrugated, and lengths of the corrugations gradually decrease from the feeding terminal to the open aperture. Simulated results show that the lowest operating frequency of this novel antenna is lower compared to conventional TSA, and the peak gain is enhanced about 3 dB at low frequencies. Measured bandwidth is larger than 10:1 ($S_{11} < -10$ dB), which agrees well with the simulated results except at about 550 MHz ($S_{11} \leq -8.2$ dB). Furthermore, in the operating band of shallow icecap detection radar, the measured patterns agree well with the simulated results at most frequencies except that the back lobes are higher, and the measured gain is higher than 3.9 dBi.

Key words: Tapered Slot Antenna (TSA); Wideband; Compact; Corrugated edge

1 引言

超宽带系统和雷达要求天线具有很大的工作带宽^[1-3]。TSA 天线具有大带宽、端射向辐射、增益适中、造价低、易于制作等优点,因此得到了广泛的应用^[3]。TSA 天线有共面结构和异面结构之分,而异面结构又有反对跖和双边结构。反对跖异面 TSA 通常采用槽线到微带或者槽线到平行双线的馈电结构,具有很宽的带宽^[3,4]。但由于结构的不对称性,其交叉极化电平较高。双边异面 TSA 没有交叉极化电平高的问题,且带宽也很宽,但其加工较为复杂,造价较高^[5,6]。共面 TSA 一般采用槽线到微带

或者槽线到共面波导的馈电结构^[7,8],能够保证较大的带宽和较低的交叉极化电平,且易于加工,因此应用较多。

为了定量地分析南极冰盖冰雪的积累和融化与气候变化的关系,需要测量冰雪的累积率,浅层高分辨率雷达可以完成这一工作。这种雷达是一种宽带雷达,采用调频连续波体制,因此要求天线具有宽带特性。TSA 天线是一个合适的选择,但是传统的观点认为 TSA 的长度和孔径的宽度应分别满足: $2\lambda_L \leq L \leq 12\lambda_L$, $W \geq \lambda_L/2$, λ_L 是最低工作频率时的自由空间波长^[3]。对于浅层探冰雷达而言,这样的尺寸是不可接受的。小型化 TSA 天线的长度和宽度均保持在 $\lambda_L/4$ 的量级上,这能够满足浅层探冰雷达对于天线小型化的要求。但小型化 TSA 的增益较低,特别是在低频端,因此提高其低频端增益成为

2010-10-25 收到, 2010-12-03 改回

国家自然科学基金(40976114)和国家 863 计划项目(2008AA121702-3)资助课题

*通信作者: 张锋 zhangfeng.1981@gmail.com

了一个紧迫目标。文献[8]中介绍一种使用波纹型侧边的 TSA 天线, 该天线工作于 UWB 频段, 具有较为稳定的辐射方向图。本文将波纹型结构应用于小型化 TSA 天线, 以展宽天线的带宽, 并提高天线在低频端的增益。

2 天线的结构

采用电磁仿真软件 HFSS10 对天线进行仿真优化, 以确定天线的尺寸参数。图 1 所示为天线及馈电巴伦的结构示意图。图中的渐变线代表辐射区域金属边缘的形状, 该渐变线可用式(1)来表示^[3]。

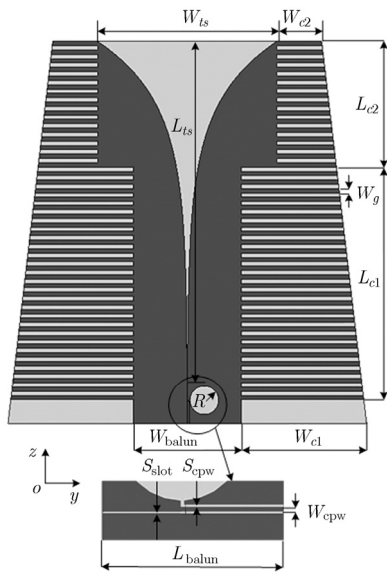


图 1 天线及馈电巴伦的结构

$$z = c_1 e^{ay} + c_2 \quad (1)$$

式中 c_1 , c_2 根据渐变线的起始和终止位置来决定, a 是渐变率(这里 0.02 mm^{-1})。

图 1 中天线的渐变线尺寸为 $L_{ts} = 285 \text{ mm}$, $W_{ts} = 150 \text{ mm}$, 大约为 $\lambda_L / 2$ 和 $\lambda_L / 4$ (λ_L 是 500 MHz 时的波长)。波纹型结构的尺寸为 $W_{c1} = 105 \text{ mm}$, $L_{c1} = 200$, $W_{c2} = 37.5 \text{ mm}$, $L_{c2} = 100 \text{ mm}$, $W_g = 3.61 \text{ mm}$ 。馈电巴伦的尺寸为 $L_{balun} = 35 \text{ mm}$, $W_{balun} = 90 \text{ mm}$, $W_{cpw} = 1.6 \text{ mm}$, $S_{cpw} = 0.25 \text{ mm}$, $S_{slot} = 0.2 \text{ mm}$, and $R = 12 \text{ mm}$ 。

3 仿真、测试结果及分析

3.1 馈电巴伦的特性分析

天线的带宽主要决定于其馈电区域和天线孔径到自由空间的转换区域, 这里采用共面波导到槽线的转换结构^[9]来实现馈电。一般来讲, 馈电巴伦还须实现阻抗变换的功能, 但这会引入较高的插入损耗。当使用介电常数较低的基板时, 为了获得较低的特

性阻抗, 槽线的宽度必须很窄。基板采用强度较高的 FR4 板材, 介电常数为 4.4, 厚度为 1.5 mm 。由于工作频率较低, 且使用了介电常数较低的基板, 需要对馈电巴伦的特性进行研究。图 2 所示为两个背靠背联接的巴伦在 $100 \text{ MHz} - 4 \text{ GHz}$ 频带内的仿真与测试结果。由图可见, 传输损耗的测量值与仿真值有着很好的一致性, 在 $200 \text{ MHz} - 4 \text{ GHz}$ 的频带内, 两个巴伦的传输损耗小于 4 dB , 而在 $400 \text{ MHz} - 3 \text{ GHz}$ 的频带内, 传输损耗小于 2 dB , 这意味着在 $500 \text{ MHz} - 2 \text{ GHz}$ 的工作频带内, 单个巴伦的传输损耗小于 1 dB 。回波损耗的差异在低频时较大, 这主要是由测试中巴伦两端口处使用的 SMA 接头与巴伦端口的不匹配性导致的。

3.2 天线的特性及分析

TSA 的辐射机制主要有两种: 一种是行波机制, 传统的 TSA 天线均属于这一类型; 另一种是谐振机制, 小型化 TSA 在低频时应当是以这种机制工作的, 当频率升高时以行波机制工作。影响天线增益的参数主要是天线的长度和孔径的宽度, 因此小型化的代价是增益的降低, 特别是低频端。为了保证天线增益不会太低, 本文天线的长度选取为约 $\lambda_L / 2$, 这依然满足探冰雷达对于小型化的要求。

采用波纹型结构的目的是主要有两个: 一是提高天线在低频端的增益, 二是保证天线在低频端的回波损耗特性良好。波纹条带的长度及宽度是通过优化确定的, 仿真过程中发现, 条带的长度不宜过长, 因为那会在工作频带内引入较窄的阻带。TSA 天线侧边金属上的表面电流会导致方向图旁瓣的增加并使端射向增益降低, 大多数的研究者认为波纹结构可以抑制表面电流, 从而改善天线的辐射特性^[7, 10]。多数的设计均采用尺寸很小且长度一致的波纹结构, 且天线的尺寸均满足行波工作机制的要求。还有研究者认为, 波纹结构可以看作是由短振子构成的阵列, 阵列的辐射能够增强端射向增益^[8]。

为了说明波纹结构对天线特性的影响, 对一个与本文中的天线完全相同但没有使用波纹结构的 TSA 天线也进行了仿真。图 3 所示为两种天线在 $0.4 \text{ GHz} - 2 \text{ GHz}$ 频带内的回波损耗的仿真结果。从图中可以看出, 波纹型 TSA 的最低工作频率低于传统型 TSA, 说明波纹结构可以降低 TSA 的最低工作频率。图 4 所示为两种天线在 $0.5 \text{ GHz} - 2 \text{ GHz}$ 频带内的端射向最大增益的仿真结果。由图可知, 在低于 $0.5 \text{ GHz} - 1.7 \text{ GHz}$ 的频带内, 波纹型 TSA 的增益均高于传统型 TSA, 特别在 0.5 GHz 处, 二者的差异达到 3 dB ; 当频率高于 1.7 GHz 时, 波纹型 TSA 的增益开始下降, 低于传统型 TSA。这说明波纹型

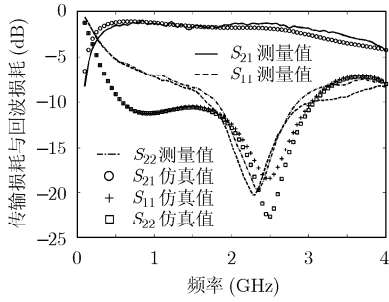


图2 两个背靠背巴伦的传输损耗和回波损耗的仿真与测试结果

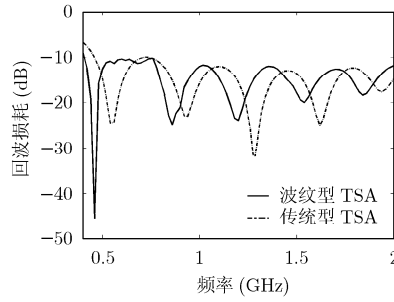


图3 波纹型和传统型 TSA 的回波损耗

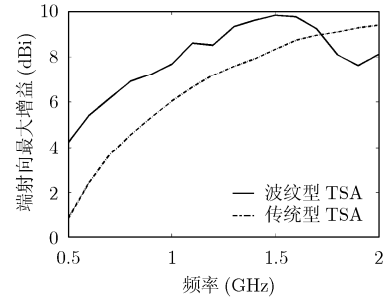


图4 波纹型和传统型 TSA 的端射向增益

结构可以有效提高小型化 TSA 的端射向增益。

按照优化的尺寸加工了天线，并进行了测试。图 5 所示为天线回波损耗在 100 MHz-4 GHz 频带内的测试结果。由图可见，天线在 550 MHz 附近的一个窄频带内的回波损耗大于 -10 dB，但最大值不超过 -8.2 dB，而在 400 MHz-4 GHz 频带内的其他频点上，回波损耗均小于 -10 dB。550 MHz 附近回波损耗的恶化应当是由于天线馈电端波纹缝隙较长所导致的，此外 SMA 接头与天线端口的不匹配也是导致结果变差的一个原因。

图 6 所示为天线端射方向增益在工作频带 500 MHz-2 GHz 内的测量结果。由图可知，天线在全频带内的增益大于 3.9 dBi，满足浅层探冰雷达的要求 (增益 ≥ 4 dBi)。测量结果与仿真结果有较为一致的变化趋势，但大于 1.6 GHz 时测量结果下降较明显，与仿真结果的最大差异达到 3 dB。测试结果证明波纹结构能够有效提高小型化 TSA 在低频端的端射向增益。但由于使用了较长的波纹条带，当频率升高时，其辐射方向图旁瓣增加，导致天线的端射增益下降，因此波纹结构的条带不宜过长。

图 7 所示为工作频带内 0.5 GHz, 1.2 GHz 和 2 GHz 处归一化增益方向图的测量结果和仿真结果。由图可见，测量结果与仿真结果在各个频点上均有较好的一致性，但是测量得到的方向图后瓣较高。

这主要是由于波纹结构中较长条带的辐射造成的，而仿真过程中后向的辐射边界距离天线端口很近，因此没有反映出较高的后瓣电平。从图中还可以看出，随着频率的升高，辐射方向图的旁瓣逐渐增多。如前所述，这正是导致天线在高频端增益下降的原因之一。

4 结论

本文介绍了一种用于极地浅层冰盖探测雷达的改进型小型化 TSA 天线。为了提高小型化 TSA 在低频端的辐射增益，并使其阻抗带宽向低频端扩展，天线的侧边采用了波纹型结构。首先分析了采用低介电常数基板的共面波导到槽线的馈电巴伦在工作频率较低时的传输特性，测量结果表明该巴伦在工作频带 0.5 GHz-2 GHz 内的传输损耗小于 1 dB。天线的仿真结果表明，波纹型 TSA 最低工作频率比传统型 TSA 更低，且低频时的端射向增益更高。实际测量的结果证明了这一结论。天线的阻抗带宽可达到 10:1 ($S_{11} < -8$ dB)，且在大部分的频点上满足 $S_{11} < -10$ dB。测量得到端射向增益在 0.5 GHz-2 GHz 内大于 3.9 dBi，与仿真结果有较为一致的变化趋势。测量得到的增益方向图与仿真结果较为一致，但后瓣电平较高。这些结果说明这种改进型小型化 TSA 天线能够满足浅层探冰雷达的工作要求。

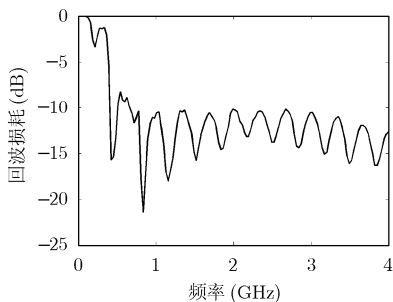


图5 天线回波损耗的测量值

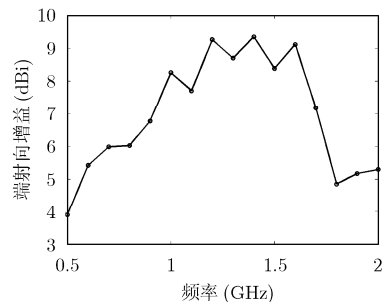


图6 天线端射向增益的测量值

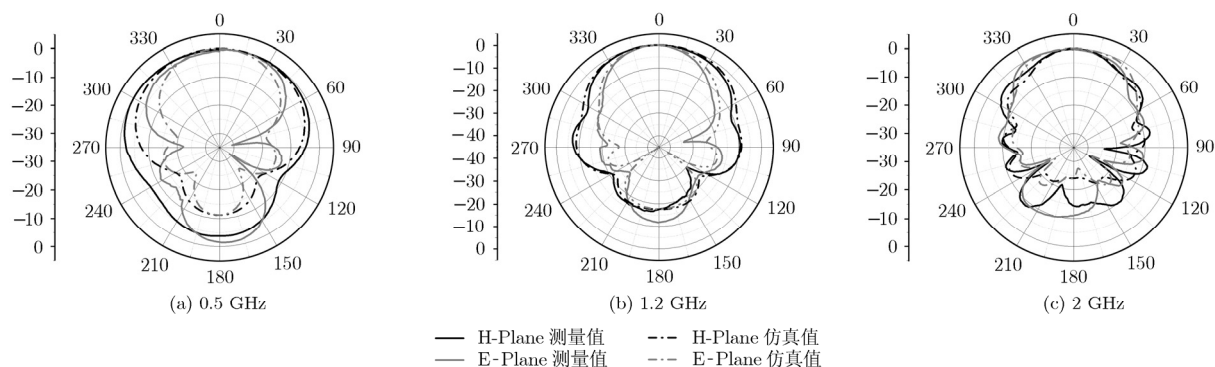


图 7 天线在不同频点处的归一化增益方向图

参 考 文 献

- [1] 赵波, 张晓娟, 方广有. 一种新型超宽带磁天线[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 1004-1006.
Zhao Bo, Zhang Xiao-juan, and Fang Guang-you. A novel UWB magnetic antenna [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 1004-1006.
- [2] 吴秉横, 纪奕才, 方广有. 一种新型探地雷达天线的设计分析[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1487-1489.
Wu Bing-heng, Ji Yi-cai, and Fang Guang-you. Design and analysis of a novel GPR antenna [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1487-1489.
- [3] Lee Kai Fong and Chen Wei. *Advances in Microstrip and Printed Antennas* [M]. Wiley Inter-science, New York: 1997, Chapter 9: 443-495.
- [4] Fang Guang-you. New design of the antipodal vivaldi antenna for a GPR system [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 44(2): 136-139.
- [5] 赵捷, 王岩飞. 12-20GHz的TSA天线[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1253-1255.
Zhao Jie and Wang Yan-fei. A 12-20 GHz tapered slot antenna [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(5): 1253-1255.
- [6] Guillanton E, Dauvignac J-Y, and Pichot C, et al. A new design tapered slot antenna for ultra-wideband applications [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1998, 19(4): 286-289.
- [7] Chen Nan-wei, Chuang Chao-tang, and Shi Jin-wei. A W-band linear tapered slot antenna on rectangular-grooved silicon substrate[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, 6(1): 90-92.
- [8] Xu H-Y, Zhang H, and Wang J, et al. A new tapered slot antenna with symmetrical and stable radiation pattern[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2008, 5: 35-43.
- [9] Ho Chien-hsun, Fan Lu, and Chang Kai. Broad-band uniplanar hybrid-ring and branch line couplers [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1993, 41(12): 2116-2119.
- [10] Hees A, Hasch J, and Detlefsen J. Characteristics of a corrugated tapered slot antenna with dielectric rod and metallic reflector [C]. *IEEE Proceedings of the International Conference on Ultra-wideband*, Hanover, 2008, 1: 1-4.
- 张 锋: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为宽带天线理论及应用.
- 刘小军: 男, 1974 年生, 副研究员, 研究方向为雷达系统技术及信号与图像处理.
- 纪奕才: 男, 1974 年生, 副研究员, 研究方向为天线数值计算和电磁兼容.
- 方广有: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为超宽带电磁学理论及其应用、超宽带成像雷达技术、微波成像新方法、新技术.