

李绪平,张盛华,杨亚兵,等. 3毫米波段缝隙阵天线的热电一体化设计研究[J]. 电波科学学报, 2014, 29(1): 276-281. doi: 10.13443/j.cjors.2013050701.

LI Xuping, ZHANG Shenghua, YANG Yabing, et al. Thermal-electronic integration design of 3mm wave-band waveguide-slot array antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(1): 276-281. (in Chinese). doi: 10.13443/j.cjors.2013050701.

3毫米波段缝隙阵天线的热电一体化设计研究

李绪平¹ 张盛华² 杨亚兵³ 李斌³ 史小卫¹

(1. 西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072; 3. 西安电子工程研究所, 陕西 西安 710100)

摘要 在3毫米波段雷达导引头系统中,收发组件与波导缝隙阵天线集成装配,其工作过程会使天线温度上升,从而导致天线性能恶化. 为了使天线在不同温度下均保持最佳性能,提出一种基于电磁与热一体化的设计方法. 通过对天线样机在典型工作温度下的仿真分析与实验验证,证明了此设计方法的有效性和可行性.

关键词 3毫米波段;波导缝隙阵天线;热电一体化设计

中图分类号 TN823+.24 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2014)02-0276-06

Thermal-electronic integration design of 3 mm wave-band waveguide-slot array antenna

LI Xuping¹ ZHANG Shenghua² YANG Yabing³ LI Bin³ SHI Xiaowei¹

(1. National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China;

3. Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract The waveguide-slot array antenna and the transmitter/receiver (T/R) module are assembled together in the 3mm wave-band radar seeker system, which results in an increase in the working temperature and may lead to performance degradation. The thermal-electronic integration design method is proposed to keep the optimal characteristics of antenna in different temperature. An antenna prototype is designed and fabricated in the typical working temperature. The measured results demonstrate the effectiveness and feasibility of the design method.

Key words 3mm wave-band; waveguide-slot array antenna; thermal-electronic integration design

引言

3毫米波段(频率约100 GHz)频率高、波长短、绝对带宽大,可应用于高清成像、高速无线通信、高精度雷达导引头等^[1-3]. 平板波导缝隙阵天线具有效率高、结构紧凑、副瓣低的特点,是雷达和通信系统常用的天线形式^[4].

平板缝隙阵应用于弹载3毫米波段雷达导引头时,将发射/接收(Transmitter/Receiver, T/R)组件紧贴天线安装,省去了旋转关节,结构更加紧凑. 但是,目前3毫米波段T/R组件技术不成熟,组件效率很低,工作过程中会产生大量的热. 通过热传导作用,天线温度迅速上升,使天线产生热变形,性能偏离设计值.

收稿日期: 2013-05-07

资助项目: 总装“十二五”装备预研项目

联系人: 李绪平 E-mail:lixuping@163.com

为了应对温度变化,传统的做法是天线加工成型后对其进行环境适应性实验,这仅仅能观察天线性能的恶化程度,但无法保证天线性能达到最佳工作状态。为了使天线在实际工作环境中保持良好性能,提出电磁计算与热分析一体化设计方法,在设计阶段就考虑温度变化对天线性能的影响。

为了验证提出的设计方法,研制了一部 3 毫米波段平板缝隙阵天线样机,并且针对典型工作温度进行分析计算和实验测试,两者结果较好吻合,证明了该设计方法的可行性和有效性。

1 热电一体化设计方法

图 1 给出了所设计的平板缝隙阵天线的模型图。它由两层波导腔体组成:第一层是辐射层,由若干波导组成,波导上开宽边纵缝,作为辐射单元;第二层是馈电层,由馈电波导和 T 型结功分器组成,馈电波导上开有宽边斜缝,向上层波导耦合能量。

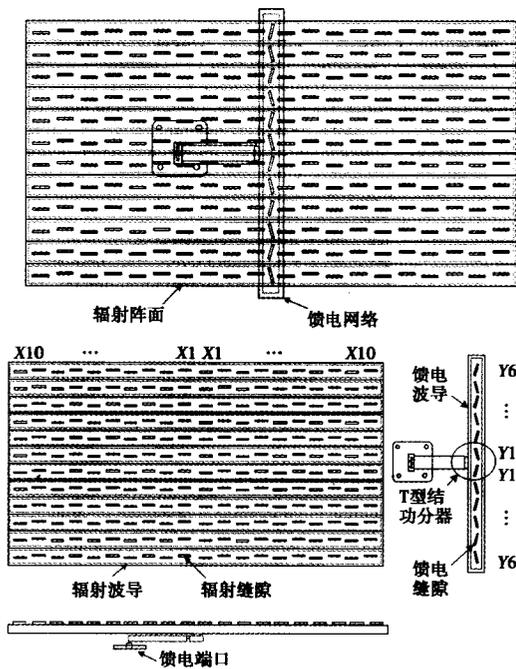


图 1 平板波导缝隙阵模型图

图 2 为提出的热电一体化设计方法流程图,整个设计工程主要分为以下步骤:

第一步,进行天线阵参数提取与优化设计。根据波束宽度、增益、副瓣电平输入条件,确定阵列尺寸、口径分布,再按照 Elliott 方法对辐射缝隙和馈电缝隙进行参数提取^[5-7]。

第二步,按照设计好的参数在电磁仿真软件高频结构仿真软件(High Frequency Structure Simu-

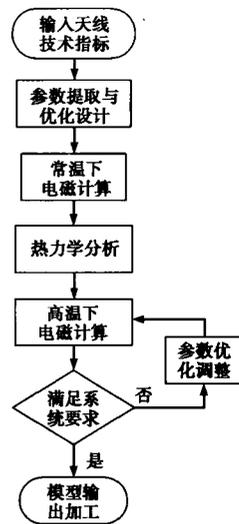


图 2 设计流程图

lator, HFSS)中建立三维模型,设置边界条件和端口激励,进行初次电磁仿真计算,得到常温条件下天线的特性。

第三步,进行热分析。设天线在自由状态下的变形量为

$$\delta = \alpha L T. \quad (1)$$

式中: α 为线胀系数,材料的线胀系数按实验方法测定,例如平板缝隙阵天线用铝材,其线胀系数为 $2.35 \times 10^{-5} \text{ m}/(\text{m} \cdot \text{k})$; L 为天线的最大外形尺寸; $T=f(x, y, z, \tau)$ 为温度场, x, y, z 为空间坐标, τ 为时间坐标,当 $\partial T/\partial \tau=0$ 时,该温度场为稳定温度场,当 $\partial T/\partial \tau \neq 0$ 时,该温度场为瞬态温度场。

运用上述方法可以简单迅速的估算出天线热变形量。但实际平板缝隙阵天线内部有空气腔体,其线胀系数的分析比较复杂。为了准确评估温度变化对天线性能的影响程度,可将在 HFSS 中建立的三维模型导入有限元分析软件 ANSYS,以天线工作状态温度变化曲线为输入条件,运用热力学分析模块对其进行计算,可得比较准确的高温变形量。

第四步,将高温条件下的 ANSYS 计算的变形三维模型重新导入 HFSS,进行二次电磁仿真分析,得到高温条件下天线变形后的阻抗特性和温度特性,从而评估温度变化对天线性能的影响。

如果天线高温性能满足系统要求,则设计到此为止。否则,分析上述结果,根据天线使用环境要求,预测其温度变化曲线,对天线性能进行温度折中设计。最终优化目标是使天线特性在不同工作温度下均满足技术指标要求。

2 仿真计算实例

通过设计一部中心频率为 95 GHz 的平板缝隙阵天线,来具体说明设计过程,进而验证所提出设计方法的可行性和有效性.仿真计算采用基于有限元法的电磁仿真软件 HFSS,常温仿真模型和三维辐射方向图如图 3 所示.

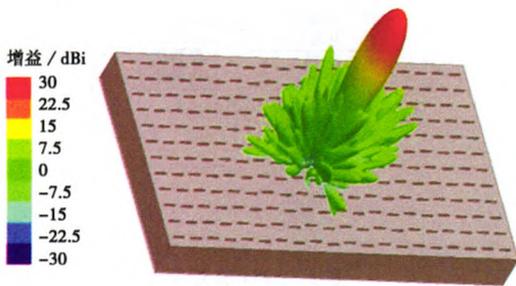


图3 仿真模型和三维辐射方向图

方位面为波导宽边纵缝,每根波导上有 20 个辐射缝隙,以方位面中心为分界线,左右缝隙设计参数一致,为了实现同相辐射,左右对称位置缝隙偏移波导宽边中心线方向呈上下交错排布.辐射缝隙编号如图 1 所示,从中心往两边依次为 X1, X2, ..., X10,缝隙参数见表 1.辐射波导宽边尺寸为 2.2 mm,窄边尺寸为 1.27 mm.

表 1 缝隙参数列表

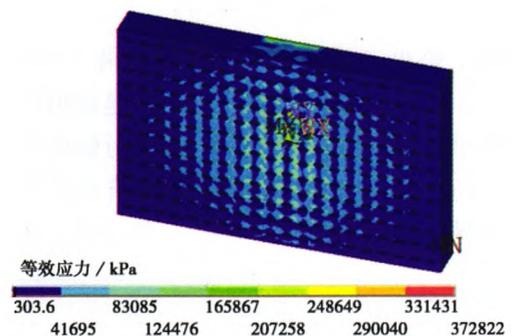
编号	长度/mm	偏移/mm	编号	长度/mm	倾角/(°)
X1	1.58	0.19	Y1	1.56	14.9
X2	1.58	0.18	Y2	1.56	13.2
X3	1.58	0.17	Y3	1.56	10.2
X4	1.57	0.15	Y4	1.56	7.1
X5	1.57	0.13	Y5	1.56	5.2
X6	1.57	0.11	Y6	1.56	4.3
X7	1.57	0.09			
X8	1.56	0.07			
X9	1.56	0.06			
X10	1.56	0.05			

俯仰面通过波导宽边斜缝馈电,有 12 个馈电缝隙,以俯仰面中心为分界线,上下缝隙呈镜像关系.馈电缝隙编号如图 1 所示,从中心往两边依次为 Y1, Y2, ..., Y6,缝隙参数见表 1.馈电波导宽边尺寸为 1.95 mm,窄边尺寸为 1.27 mm.

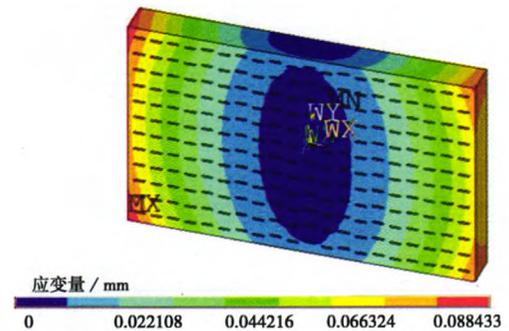
辐射缝隙和馈电缝隙宽度均为 0.3 mm,考虑到加工缝隙的铣刀为圆柱形,存在倒角,故缝隙端头为圆头,方便加工,圆头直径与缝隙宽度一致.

在弹载雷达导引头应用中,安装支架在天线背面正中心,T/R 组件沿支架四周安装,也就是说天

线的约束点在天线背面中心位置,发热源也在天线背面.根据前期实验测量,T/R 组件传导到天线背面的温度约 70℃,天线周围和正面的环境温度设定为常温 20℃.将电磁仿真软件 HFSS 中建立的模型导入有限元分析软件 ANSYS,运用热力学分析模块对其进行计算.图 4 是 ANSYS 热力学模块对此天线仿真结果.等效应力云图如图 4(a)所示,背面约束位置受到应力最大,约 372 MPa,正面边上最小,约 303 kPa.图 4(b)是应变云图,背面约束位置形变最小,正面形变最大,最大形变量 $\delta_{\max} \approx 0.088$ mm.



(a) 等效应力云图



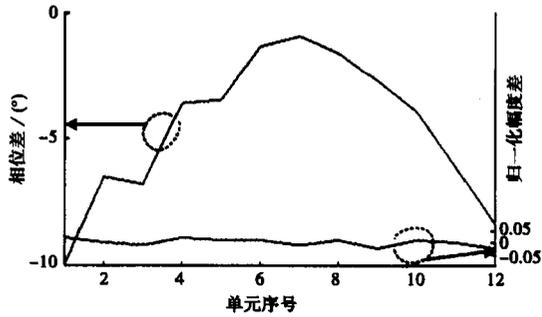
(b) 应变云图

图4 ANSYS 仿真结果

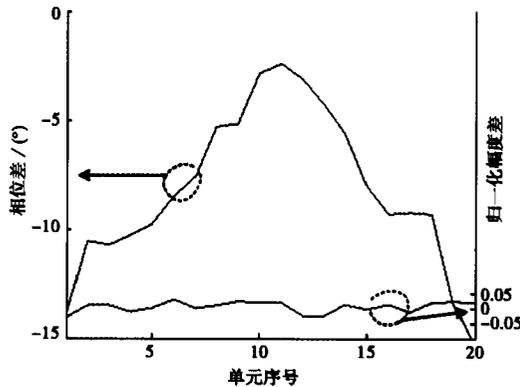
天线随工作温度发生形变,会引发波导腔体、缝隙等尺寸变化,使辐射单元不再满足原先设计的谐振要求,造成天线的阻抗特性和辐射特性发生恶化.为了评估恶化程度,将 ANSYS 热分析后的形变模型,重新导入电磁软件 HFSS 进行分析.

图 5 给出了温度变化引发辐射单元幅度相位变化量,左边纵坐标给出了相位变化值,即高温 70℃ 时辐射单元相位减常温 20℃ 时相位;右边纵坐标给出了归一化幅度变化量,即温度变化造成辐射单元辐射量变化的百分比.可以看出,两维单元辐射量变化均不大,小于 $\pm 3\%$;两维相位变化均呈现中间

小,边缘大的趋势,方位面变化量为 $-14^{\circ}\sim-2.6^{\circ}$,俯仰面变化量为 $-10^{\circ}\sim-2.5^{\circ}$. 此结果与 Elliott 方法计算结果吻合^[7]. 这种相位误差符合平方相差规律,不会对波束指向造成影响,但如果相位误差严重,会造成零点抬升,甚至第一零点消失,使第一副瓣包进主瓣,主波束展宽、副瓣电平抬升、增益下降,影响雷达测角精度和作用距离.



(a) 方位面幅度相位变化量



(b) 俯仰面幅度相位变化量

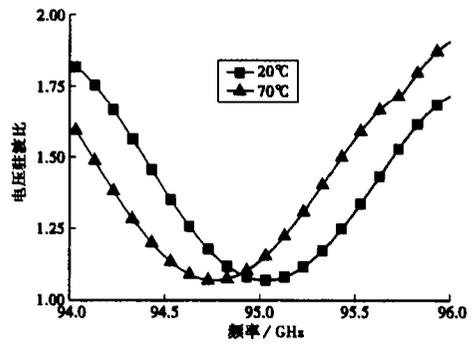
图 5 温度变化对单元幅相的影响仿真结果

相位变化的原因主要是因为温度升高造成天线体积膨胀. 一方面,波导变长,电磁波到达边缘辐射单元经过的路程更长;另一方面,波导内腔变宽,使得波导波长变短,又进一步增加了电磁波传输的电尺寸. 因此,离中心越远,单元辐射相位滞后越严重.

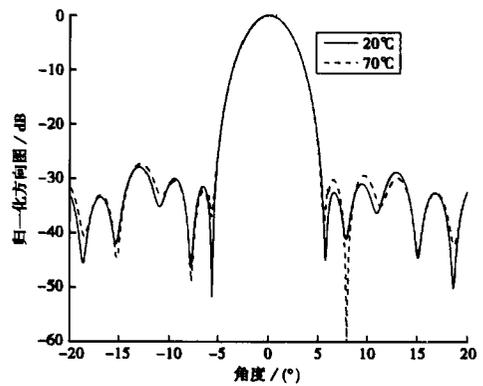
辐射单元幅度变化的原因为:首先,辐射缝隙距波导中心的偏移量决定辐射能量的大小,馈电缝隙的倾斜角度决定耦合能量的大小,天线体积膨胀会对偏移量和倾角产生少量影响;另一方面,天线热变形造成缝隙偏离原来设计的谐振频率,会造成每个单元辐射量的下降,但经过归一化,对整个阵面幅度分布的影响并不明显. 整体来说,温度升高对口径幅度分布影响微弱,因此对辐射方向图影响不大,但会造成天线阵列阻抗失配,电压驻波 (Voltage

Standing Wave Ratio, VSWR) 发生变化.

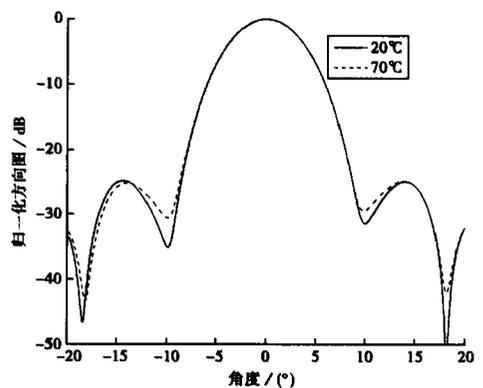
温度升高造成天线体积膨胀,相当于电尺寸变大,天线的整体匹配频率向低频偏移,从图 6(a)可以看出,与常温 20°C 相比, 70°C 时电压驻波比向低频偏移 220 MHz ,即 0.23% . 在要求的 1 GHz 工作带宽内,电压驻波比最大值从 1.38 恶化为 1.55 .



(a) 电压驻波比



(b) 95 GHz 方位面方向图



(c) 95 GHz 俯仰面方向图

图 6 仿真计算结果

图 6 还分别给出了常温 20°C 和高温 70°C 的仿真方向图. 温度升高对方位面和俯仰面方向图的影

响基本一致,表现为波束宽度展宽约 0.05° ,最大副瓣抬升约 0.2 dB ,增益下降约 0.1 dB ,总的来说变化不大,但第一零点明显抬升,方位面抬升 16 dB ,俯仰面抬升 5.5 dB . 根据前文分析,这主要是相位误差造成的影响.

3 实测结果验证

根据上述仿真模型,加工了天线样机,如图 7 所示. 该天线采用多层铝板高速数控铣机械加工,真空铝钎焊焊接,其外形尺寸约为 $60\text{ mm}\times 32\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,质量约为 38 g .

对天线样机在常温 20°C 和高温 70°C 条件下的阻抗特性和辐射方向图特性分别进行测试. 阻抗特性测试在实验室进行,辐射方向图特性在暗室内远场进行,保持室温约 20°C . 天线背面表贴温度传感器,用热风机将天线吹热到 70°C 以上,当温度降到 70°C 附近时进行测试,在测试过程中,根据温度变化情况,及时进行加热. 测试结果如果图 8 所示.

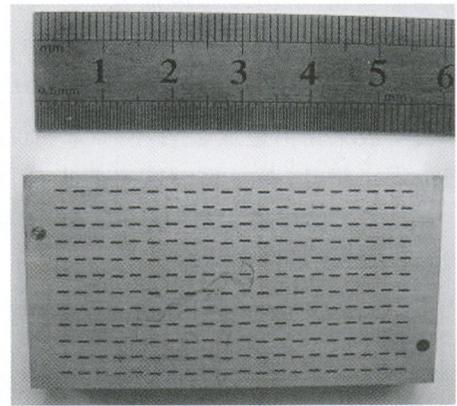


图 7 中心频率 95 GHz 的天线样机照片

从图 8(a)可以看出, 20°C 时天线中心频率为 95.02 GHz ,工作带宽内的电压驻波比最大值为 1.92 ; 70°C 时天线中心频率为 94.86 GHz ,工作带宽内的电压驻波比最大值为 2.1 . 可见,随着工作温度的升高,实测中心频率向低频移动 160 MHz ,这与仿真得到的中心频率向低频移动 220 MHz 基本吻

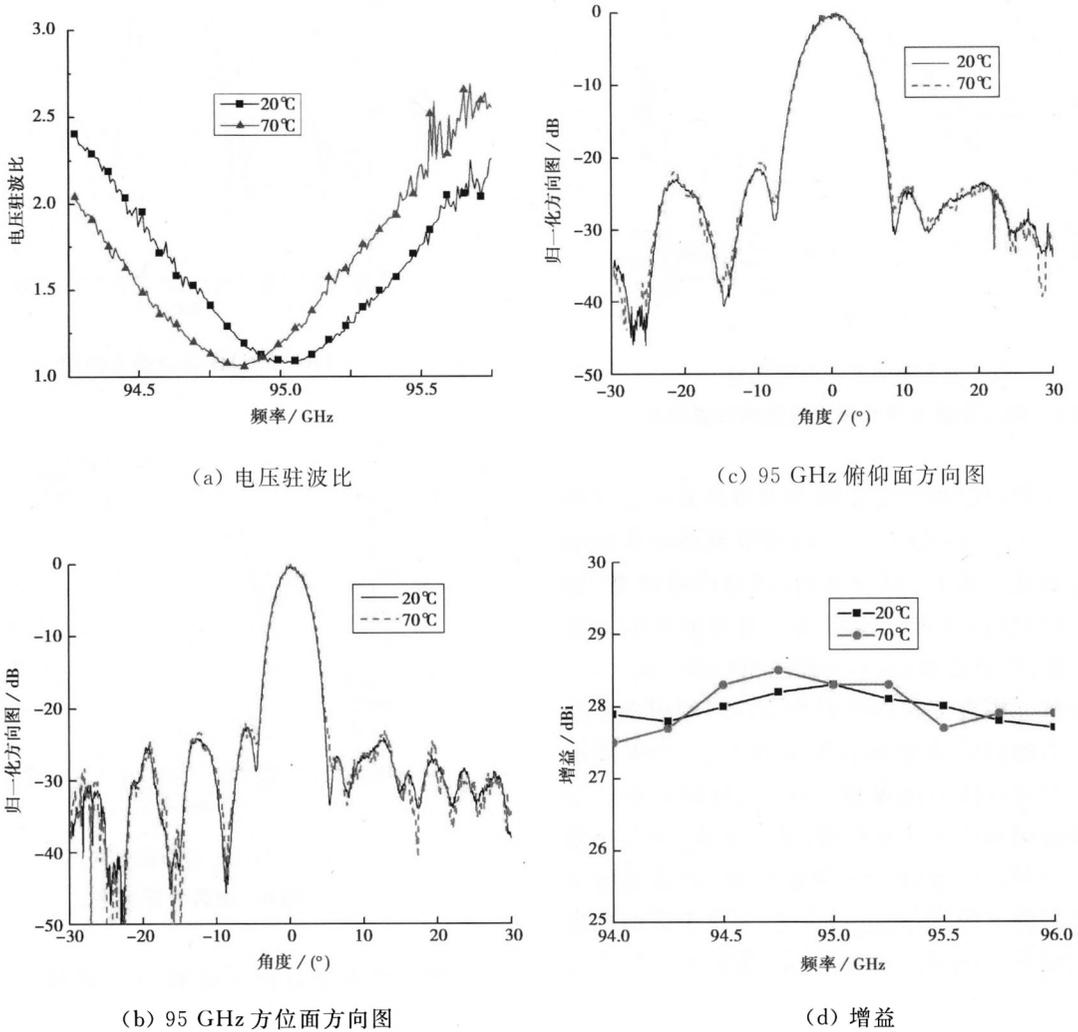


图 8 天线样机实测结果

合. 因此,为了实现在 20℃ 到 70℃ 温度区间工作时,天线频带内电压驻波比均小于 2.0 或者更优,可将天线中心频率提高 100 MHz 进行仿真设计.

如图 8(b)和图 8(c)所示,对比 20℃ 和 70℃ 天线阵两个正交面的实测方向图,第一零点明显抬升,波瓣宽度变化不大,这与仿真结果完全吻合. 实测结果副瓣电平随温度变化抬升较大,近副瓣抬升约 1 dB,方位面远副瓣抬升近 3 dB,超过仿真结果,主要原因是 3 毫米波段仪表稳定程度不高,副瓣区域接收电平较弱,曲线不够光滑,测试时局部会出现毛刺,影响对副瓣电平的判断. 总的来说副瓣电平的变化规律与仿真结果一致.

从图 8(d)增益测试曲线可见,各频点 20℃ 和 70℃ 天线阵增益变化规律不同,但在 ± 0.4 dB 范围内,这是由于仪表精度和环境影响造成的测试误差,可以判定温度变化对增益影响比较小,这与仿真结果增益下降 0.1 dB 基本吻合.

4 结 论

为了使 3 毫米波段平板缝隙阵天线在要求的环境工作温度范围内保持良好性能,提出电磁计算和热力学分析一体化设计方法. 在天线研制过程中,根据使用环境要求,预测其温度变化曲线,分析天线特性随温度变化规律,针对不同工作温度对天线性能的影响进行优化设计. 实验结果表明所提出的电热一体化设计方法正确有效,具有一定的工程应用价值.

参考文献

- [1] 赵国强,时亮,陈卓著,等. 一种 W 波段圆极化微带天线研究[J]. 电波科学学报,2013,28(3):479-484.
ZHAO Guoqiang, SHI Liang, CHEN Zhuozhu, et al. Circular polarization microstrip antenna at W band[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(3): 479-484. (in Chinese)
- [2] ROZBAN D, AKRAM A A, LEVANON A, et al. W-band chirp radar mock-up using a glow discharge detector[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(1): 139-145.
- [3] GHASSEMI N, WU K, CLAUDE S, et al. Low-cost and high-efficient W-band substrate integrated waveguide antenna array made of printed circuit board process[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(3): 1648-1653.
- [4] 孙良,刘其中,邹艳林. 有限元、边界元混合算法分析波导裂缝阵列天线[J]. 电波科学学报,2011,26(4):704-708.
SUN Liang, LIU Qizhong, ZOU Yanlin. FE-BI analysis of rectangular waveguide longitudinal slots array antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(4): 704-708. (in Chinese)
- [5] 王宏建,刘世华,郝启焱,等. 星载 Ku 波段波导缝隙天线的缝隙特性分析[J]. 电波科学学报,2012,27(6): 1225-1231.
WANG Hongjian, LIU Shihua, HAO Qiyan, et al. Slots characterization of space-borne waveguide slots array antenna in Ku band[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(6): 1225-1231. (in Chinese)
- [6] SUZUKI T, HIROKAWA J, ANDO M. Iteration-free design of waveguide slot array with cavities[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(12): 3891-3986.
- [7] ELLIOTT R S. An improved design procedure for small array of shunt slots[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1983, 31(1): 48-53.

作者简介

李绪平 (1981—),男,陕西人,博士生,高级工程师,主要研究方向为波导缝隙阵天线、相控阵天线.

张盛华 (1978—),男,湖南人,博士生,高级工程师,主要研究方向为天线结构设计、热力学分析.

杨亚兵 (1984—),男,陕西人,工程师,主要研究方向为宽带有源相控阵天线及其集成技术等.

李斌 (1978—),男,陕西人,博士,高级工程师,主要研究方向为相控阵雷达总体设计.

史小卫 (1963—),男,广东人,教授,博士生导师,主要研究方向为计算电磁学、智能天线以及射频识别.

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>