Radar Science and Technology

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.014

基于罗特曼透镜的宽带多波束天线系统

向海生^{1,2},杨宇宸¹,卢晓鹏^{1,2},万笑梅¹,余 峰¹,刘 浩¹,莫 骊¹,张 琦¹

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088;

2. 孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室, 安徽合肥 230088)

摘 要:宽带多波束天线系统广泛应用于电子侦察领域。为了实现宽带、宽角扫描,波束形成网络需 采用实时延时单元。针对这一需求,介绍了一个由宽带天线阵列、射频前端和罗特曼透镜等组成的宽带多 波束天线系统,详细描述了系统的组成及工作原理、单元设计、副瓣电平仿真、校正和测试。测试结果表明, 系统能够实现多波束的小角度扫描,减小扫描波束的灵敏度损失;在8~12GHz频率范围、±27°方位覆盖范 围内,多波束的峰值副瓣电平达到-20dB。应用结果表明该系统具有较强的空域抗干扰能力。

关键词:罗特曼透镜;宽带;多波束;天线

中图分类号:TN974; TN82 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2337(2017)01-0081-04

Wideband Multiple-Beams Antenna System Based on Rotman Lens

XIANG Haisheng^{1,2}, YANG Yuchen¹, LU Xiaopeng^{1,2}, WAN Xiaomei¹, YU Feng¹, LIU Hao¹, MO Li¹, ZHANG Qi¹

(1. The 38th Research Institute of CETC, Hefei 230088, China;

2. Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Hefei 230088, China)

Abstract: Wideband multiple-beams antenna system has been widely used in electronic reconnaissance domain. In order to achieve wideband and wide-angle scanning, beamforming network should use true time delay device. In view of this requirement, a wideband multiple-beams antenna system is proposed, which includes wideband antenna array, RF front-end and Rotman lens, etc. The composition, element design, side-lobe simulation, calibration and testing of system are described in detail. The test results show that the system can achieve small angle scan of multiple-beams, and reduce the sensitivity loss of scan beams. The maximum sidelobes of multiple-beams are less than -20 dB in the range of $8 \sim 12 \text{ GHz}$ and $\pm 27^{\circ}$ scan angle. The application results show that the system has quite strong ability of anti-jamming in space domain.

Key words: Rotman lens; wideband; multiple-beams; antenna

0 引 言

在复杂电磁环境中,电子侦察系统通常需要 同时侦收多个方向的宽带辐射源信号。要实现对 多个方向的宽带信号同时接收、测量,就必须采用 宽带多波束天线系统。宽带多波束形成方法包括 模拟波束形成、数字波束形成和光波束形成。3种 方法各有优缺点,模拟波束形成易于工程实现、性 能适中、灵活性稍差;数字波束形成灵活性高,但存 在定时、抖动和功耗等问题,且受限于元器件水平, 瞬时信号处理带宽在1GHz以下;光波束形成能实 现更大的带宽,但动态范围较小^[1]。因此,对于瞬时 信号带宽达到 4 GHz 的宽带多波束天线系统,模拟 波束形成是当前工程应用的一个较好选择。

罗特曼透镜是一种低剖面、轻重量、小体积的 实时延时网络,能够在宽角扫描条件下实现宽带信 号合成。基于罗特曼透镜的多波束天线系统具有全 方位截获概率大、测向精度高、动态范围大、灵敏度 高的特点^[2],而且设备量适中,因此,非常适合在体 积、重量和功耗要求较高的机载平台上使用。

1 系统组成

该系统采用一维相控阵体制,俯仰向直接合成,方位向同时多波束。系统由宽带天线阵列、射

频前端和罗特曼透镜等组成,其原理框图如图1所示。其中,宽带天线阵列由16个列线源和1个校 正网络组成,宽带天线阵列、16个射频前端和1个 阵面监控集成为有源天线阵面;波束形成网络是 16单元输入、16波束输出的罗特曼透镜。



2 单元设计

天线单元采用微带天线,单元形式为偶极子, 其仿真模型如图2所示。该单元适于采用印刷电 路技术大批量生产,加工精度高;同时,馈电方式 灵活,易于与有源器件和电路一体化集成。



图 2 天线单元仿真模型

按工程实现形式,罗特曼透镜包括平行板透 镜^[3]、微带/带状线透镜^[4-6]和基板集成波导透镜^[7] 等。文献[3]给出了最早的透镜设计方程;文献[8] 对透镜设计方程进行改进优化;文献[9]中描述的 微带透镜的设计参数如图 3 所示,曲线 Σ_1 、 Σ_2 分 别排列波束端口和阵列端口。

文献[9]给出的微带透镜设计方程如式(1)~ (3)所示,其基本原理是等光程原理,即任意由 F_1 点发出的电磁波经过 $\overline{F_1PQN}$ 和 $\overline{F_1O_1O_2M}$ 传播 的光程是相等的。

 $\sqrt{\varepsilon_{\rm r}(F_1 P)} + \sqrt{\varepsilon_{\rm eff}} W + D \sin\theta = \sqrt{\varepsilon_{\rm r}} F + \sqrt{\varepsilon_{\rm eff}} W_0$ (1)



 $\sqrt{\varepsilon_{r}(F_{2}P)} + \sqrt{\varepsilon_{eff}}W - D\sin\theta = \sqrt{\varepsilon_{r}}F + \sqrt{\varepsilon_{eff}}W_{0}$ (2) $\sqrt{\varepsilon_{r}(F_{0}P)} + \sqrt{\varepsilon_{eff}}W = \sqrt{\varepsilon_{r}}G + \sqrt{\varepsilon_{eff}}W_{0}$ (3) 式中, ε_{r} 和 ε_{eff} 分别为基板的相对介电常数和微带 线的等效介电常数。

以微带或带状线形式实现的罗特曼透镜,电路简单,制造工艺比较容易,成本低,因而得到了越来越广泛的应用^[10]。本文设计的透镜是微带线形式的,经仿真后的微带版图如图4所示,图中左侧为波束端口,右侧为单元端口。



图 4 微带透镜版图

射频前端主要完成列合成信号的限幅放大、 滤波、移相和衰减等功能,其设计需要对增益、噪 声系数、动态范围和幅相一致性等指标进行综合 考虑和权衡。本设计中的射频前端采用微波单片 集成电路和微带板实现,其框图如图 5 所示。



根据系统需求,射频前端的主要设计指标如下: 抗烧毁能力:1W(连续波,持续5min) 增益:43±1 dB 动态范围: ≥55 dB(扩展动态为 30 dB) 噪声系数: ≤3 dB 幅度一致性: ≤0.3 dB(RMS 值) 相位一致性: ≤3°(RMS 值)

3 副瓣电平仿真

在系统设计过程中,针对系统的关键指标—— 副瓣电平进行仿真,对系统的幅相误差分解并约束 模块的设计指标。仿真条件如下:在±27°扫描范围 内,峰值副瓣电平要求不大于-20 dB;单元方向图 假设为余弦函数;阵列口径使用 30 dB 泰勒加权, 且权值量化为 0.5 dB 的整数倍。对系统的副瓣电 平指标进行 200 次仿真,中心频点 10 GHz 的法线 波束和 27°扫描波束仿真结果如图 6 所示,法线波 束的峰值副瓣电平为-21.3 dB,27°扫描波束的峰 值副瓣电平为-20.1 dB。



根据仿真结果,对系统的各组成单元幅相误 差(最大值)分解如下:列线源的幅相误差1dB、 10°,射频前端的幅相误差 1.5 dB、15°,多波束网络的幅相误差 1.5 dB、10°。

4 校正

宽带有源多波束系统装配完成后,为了去除 系统的固有幅相误差,需要对系统进行校正。该系 统运用 FFT 反演算法^[11]进行校正。使用微波暗室 平面近场测试系统的探头发射信号、被测系统接 收信号,采集被测系统中间波束的近场幅度、相位 值,计算天线系统口径的幅度和相位值。进而得到 系统中各单元的幅度和相位补偿码值。

以中心频率 10 GHz、中间波束为基准进行系 统校正和补偿,校正后测量的系统口径幅度和相 位分布与理想的幅度和相位分布对比如图 7 所示, 其中理想的幅度分布为 30 dB 的泰勒加权。



5 测试结果

系统完成设计、装配和调试后,进行了相应的 测试,以下给出系统应用的 10 个波束(波束 4~

112

13)测试结果。

1) 多波束方向图

以中心频点 10 GHz 为例,4~13 波束的方向 图如图 8 所示。为了减小波束扫描的灵敏度损失, 系统应用时,调整射频前端中的非色散移相器可 进行小角度扫描。



系统初始设计输出的 4~13 波束覆盖±27°空 域,而经过小角度扫描(3°)调整后,4~13 波束覆 盖-24°~+30°空域。

2) 副辦电平

在微波暗室中,进行天线系统的方向图测试, 处理得到多频点、4~13 波束的副瓣电平。表1为 天线系统的副瓣电平测试结果,测试频率步进 为1GHz。

在该系统应用中,8~12 GHz、±27° 空域覆盖范围内,多波束副瓣电平能达 到-20 dB。

表 1	副瓣电平测试结果	
13.1		

					uр		
波束号	频率/GHz						
	8	9	10	11	12		
4	-23.5	-25.4	-22.9	-24.2	-24.8		
5	-21.3	-20.1	-20.9	-20.9	-25.7		
6	-22.8	-23.2	-22.6	-20.7	-25.1		
7	-22.8	-22.9	-22.4	-21.4	-24.3		
8	-23.6	-23.3	-22.6	-21.2	-25.3		
9	-22.4	-23.4	-22.4	-21.1	-25.3		
10	-22.2	-23.2	-22.5	-21.4	-24.6		
11	-23.3	-23.5	-23.4	-23.1	-23.9		
12	-23.9	-23.9	-26.7	-23.8	-23.8		
13	-21.8	-22.8	-25.7	-26.1	-24.5		

6 结束语

本文针对一个基于罗特曼透镜的宽带多波束 天线系统进行论述,介绍了系统组成、罗特曼透镜 的实现原理和微带透镜方程,分析了射频前端的 设计思路,通过副瓣电平仿真,对列线源、射频前 端和罗特曼透镜的幅相误差进行分解。从系统校 正后的测试结果看,系统具有较强的抗干扰能力 和灵活的波束调度能力,具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] ROTMAN R, TUR M. Antenna and Beamformer Requirments for Wideband Phased Array Systems: A Review[C] // IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, New Jersey: IEEE, 2009:1.
- [2] 桂盛,姚申茂. 罗特曼透镜馈电的多波束阵列系统设计[J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(4):102-104.
- [3] ROTMAN W, TURNER R. Wide-Angle Microwave Lens for Line Source Applications[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1963, 11(6):623-632.
- [4] MUSA L, SMITH M S. Microstrip Port Design and Sidewall Absorption for Printed Rotman Lenses [J]. IEE Proceedings H, Microwaves, Antennas and Propagation, 1989, 136(1):53-58.
- [5] CARLEGRIM B, PETTERSSON L. Rotman Lens in Microstrip Technology [C] // 22nd European Microwave Conference, Helsinki, Finland: IEEE, 1992: 882-887.
- [6] KIM J, CHO C S, BARNES F S. Dielectric Slab Rotman Lens for Microwave/Millimeter Wave Applications [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(8):2622-2627. (下转第 88 页)