

一种联合测向共形天线系统设计方法

任 财*, 李 归, 邬 诚, 吴久涛

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

摘要:综合考虑传统测向体制特点,在干涉仪测向原理的基础上,为了消除相位模糊和兼顾测向精度,设计了比幅测向解最短基线模糊方法,并对其测角精度要求进行了分析,仿真结果表明该方法可行。从安装要素出发,为提升其适装性,提出联合测向天线系统采用共形设计方法,进而改善系统对空中辐射源目标的测向性能,大幅提高系统综合作战效能,在实际工程应用上具有一定的实用和参考价值。

关键词:干涉仪测向;比幅测向;共形

中图分类号:TN820 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2023)02-0086-03

引用格式:任 财, 李 归, 邬 诚, 等. 一种联合测向共形天线系统设计方法[J]. 现代雷达, 2023, 45(2): 86-88.

REN Cai, LI Gui, WU Cheng, et al. Design of conformal antenna system based on joint direction finding[J]. Modern Radar, 2023, 45(2): 86-88.

Design of Conformal Antenna System Based on Joint Direction Finding

REN Cai*, LI Gui, WU Cheng, WU Jiutao

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: Considering the characteristics of traditional measurement direction systems, for eliminating the phase ambiguity and covering the precision of direction finding, a method for dispelling the ambiguity of short-baseline using amplitude comparison direction finding is designed, and the precision of direction finding is analyzed on the basis of interferometer direction finding theory, the simulation results show that the method is feasible. For improving the mounting adaptability, a design method of conformal antenna system based on joint direction finding is proposed, and then the performance of measurement direction for the air radiation source target is improved, the comprehensive combat effectiveness of the system will be greatly improved, showing great practical and reference value for actual engineering application.

Key words: interferometer direction finding; amplitude comparison direction finding; conformal

0 引 言

随着电子战装备技术的不断发展,未来海战场对测向系统的性能要求越来越高,尤其在舰船装舰要素比较苛刻的平台上,测向系统需具有测向精度高、体积小等特点;同时,为改善平台隐身性能,测向系统需采用共形设计,提高综合作战效能。

目前,传统的舰载电子侦察装备测向系统可以采用的测向体制有比幅法、比相法、时差法、空间谱估计等。对于测向精度要求高的系统,相位干涉仪因其具有测向精度高、宽频、宽开等特点,在电子战对抗、雷达等领域得到广泛应用,但其存在相位模糊问题,需利用多基线实现高精度测向,设备量较大;比幅测向法技术成熟、设备简单,但精度较差;时差法对天线安装要素(基线长度)要求太高;空间谱估计法能够实现高精度测向,但算法复杂,实时性较差。

综合各测向体制特点,本文从干涉仪测向原理出发,为消除相位模糊和兼顾测向精度,设计了三基线干

涉仪保精度测向加比幅测角解模糊的方法;考虑装舰要素,为提升其适装性,改善空中目标辐射源测向性能,提高综合作战效能,提出采用共形设计方法,在实际工程应用上具有一定的实用和参考价值。

1 联合测向原理

1.1 干涉仪测向原理

以单基线干涉仪测向为例,对其测向原理^[1]及精度进行分析,原理示意图如图1所示。

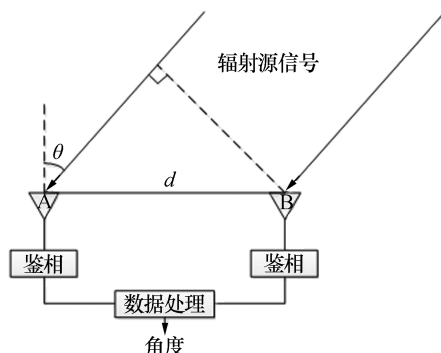


图1 干涉仪测向原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interferometer direction finding

辐射源信号到达天线 A、B 后, 经鉴相器取出两条接收链路的相位差信息, 利用其对入射角进行测量。

由图 1 可得

$$\varphi = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (1)$$

式中: φ 为两天线接收被测信号的相位差; d 为两天线的基线长度; λ 为被测信号波长; θ 为信号的入射角。

由式(1)可得

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\varphi \lambda}{2\pi d}\right) \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 入射角与基线长度、相位差、信号波长有关。

在干涉仪测向系统中, 鉴相器的相位检测范围为 $[-\pi, +\pi]$, 则最大无模糊测角为

$$\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right) \quad (3)$$

1.2 干涉仪测向精度分析

对式(2)进行微分, 得

$$\Delta \theta = \frac{\Delta \varphi}{\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \tan \theta + \frac{2\pi \sin \theta}{\lambda} \Delta d \quad (4)$$

式中: $\Delta \theta$ 为角度测量误差; $\Delta \varphi$ 为相位测量误差; $\Delta \lambda$ 为载频测量误差; Δd 为基线长度误差。

目前的测向系统中, 频率测量精度可达兆赫兹级别, 天线安装精度较高, 由其带来的测向误差均可忽略。测向误差可近似为

$$\Delta \theta = \frac{\Delta \varphi}{\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta} \quad (5)$$

由于单通道信号的测向相位误差由信号的信噪比 (SNR) 决定, 相位误差服从均值为零的高斯分布 $N(0, \frac{1}{2SNR})$, 故式(5)可变为

$$\Delta \theta = \frac{\lambda}{2\pi d \cos \theta \sqrt{SNR}} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 要想得到高的测向精度, 必须加大基线长度; 而由第 1.1 节可知, 基线长度的增加会带来测向模糊问题。为解决这个矛盾, 采用多基线保精度, 比幅测向获取无模糊角, 解其模糊问题。

1.3 比幅测向精度要求

由上述分析可得出, 最短基线长度为

$$d_{\min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (7)$$

比幅测向的测量结果可等效为最短基线的测量结果。将比幅测向误差^[2]转换为相位误差, 由式(5)可得

$$\Delta \varphi = \pi \Delta \theta \cot \theta \quad (8)$$

能否解模糊取决于两基线的相位误差, 对相位误差的要求为

$$n \Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2 < \pi \quad (9)$$

式中: $\Delta \varphi_1$ 为短基线的相位差; $\Delta \varphi_2$ 为较长基线的相位差; n 为基线长度比。

假设短基线和长基线^[3]的相位误差一致, 由此可得到解模糊对比幅测向误差的要求为

$$\Delta \theta < \frac{\pi - \Delta \varphi}{n \pi \cot \theta} \quad (10)$$

当 $\theta = 0$ 时, 将 $n = d/\lambda$ 代入式(10), 可得最大比幅测向误差为

$$\Delta \theta' < \frac{\lambda}{2d} \left(1 - \frac{\Delta \varphi_{\max}}{\pi}\right) \quad (11)$$

下面以 6 GHz~18 GHz 频段为例, 分析其测向精度和比幅测向精度要求。假设测角范围为 $-47^\circ \sim 47^\circ$, 舰载电子侦察设备对空中辐射源目标测角精度方位需求为 1° (r. m. s), 信号检测 SNR 为 10 dB, 根据式(5)可得, 最长基线取 300 mm, 由式(7)可得, 最小基线约 10 mm。此时, 根据式(10)可得, 比幅测向误差要求 $\leq 18.47^\circ$ 。由于比幅测向精度与比幅天线波束宽度相关, 综合电子侦察比幅测向系统内各类误差影响, 根据经验值, 常规比幅测向系统测向精度等效 $1/6 \sim 1/10$ 波束宽度, 比幅测向系统单象限比幅波束宽度不会大于 90° , 可得, 比幅测角精度 $\leq 15^\circ$, 满足要求。

2 仿真分析

根据以上分析结果, 6 GHz~18 GHz 频段比幅比幅联合测向天线设计如图 2 所示。

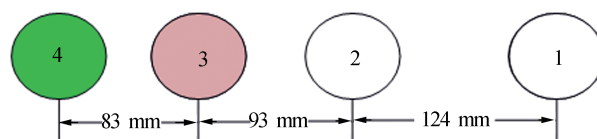


图 2 联合测向天线设计图

Fig. 2 Design of joint direction finding antenna

天线单元 1、4 形成长基线^[4], 保证测向精度; 天线单元 3、4 形成比幅测向, 用来解干涉仪虚拟基线模糊。详细设计如下: (1) 基线 1、2 与基线 2、3 之间的虚拟基线为 31 mm; (2) 基线 2、3 的基线为 93 mm; (3) 基线 4、1 的基线为 300 mm。依据以上设计参数, 测向精度仿真结果如图 3 和图 4 所示。由仿真结果可知, 四单元三基线联合测向能够达到 99.9% 以上解模糊概率, 且测角精度 $< 1^\circ$, 满足系统需求。

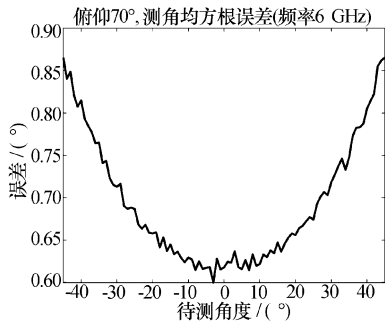


图3 测角精度

Fig. 3 Angle measurement accuracy

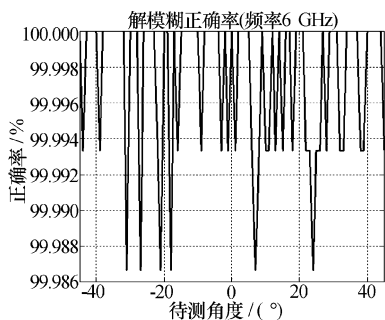


图4 解模糊概率

Fig. 4 Ambiguity resolution propability

3 系统设计

现役舰艇干涉仪测向天线通常采用平面线阵。考虑安装条件为圆形结构情况,为提升天线对于原型结构的适装性,本文采用比幅解干涉仪模糊测向系统^[5]架构,如图5所示。

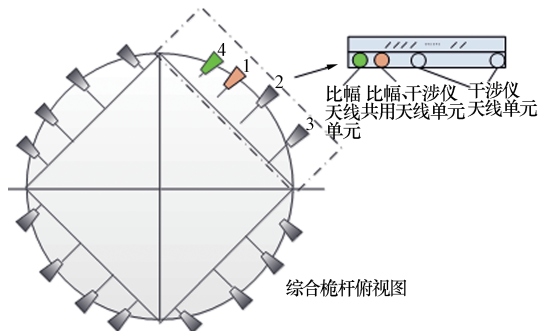


图5 共形天线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of conformal antenna

测向阵列天线安装于综合桅杆圆弧上,360°全方位覆盖,天线单元按一定间距布置,共形成四条线阵;每条线阵增加一个天线,并抽出一个天线单元,形成二比幅^[6]测向天线阵。实现如下:最长基线 d_{14} 保证测向系统精度 1° , $d_{32} \sim d_{12}$ 形成最小虚拟基线解基线 d_{23} 的模糊, d_{23} 基线解最长基线 d_{34} 的模糊,而最小虚拟基线依据比幅测角 d_{14} 的结果来解模糊。

4 结束语

针对舰载电子侦察测向系统高精度、低设备量、适装性好等要求,从干涉仪测向原理出发,结合比幅测向

特点,设计了采用比幅测向解干涉仪最短基线模糊联合测向方法,并对其测角精度要求进行了分析;从安装要素出发,为提升其适装性,改善对空中辐射源目标的测向性能,提出联合测向天线系统采用共形设计方法^[7],在实际工程应用上具有一定的实用和参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 吴宝东, 陈舒. 基于相位干涉仪测向系统的相位误差分析[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(3): 74-76.
WU Baodong, CHEN Shu. Analysis of the phase error of direction finding system based on phase interferometer[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014, 36(12): 18-20.
- [2] 张文旭, 邵丽鹏, 张春杰. 一种基于比幅比相测角解模糊方法[J]. 应用科技, 2006, 33(4): 21-23.
ZHANG Wenxu, GAO Lipeng, ZHANG Chunjie. A method to resolve the angle-measuring ambiguity based on comparing amplitude and phase[J]. Applied Science and Technology, 2006, 33(4): 21-23.
- [3] 居易, 邵文建. 基于多基线相位干涉仪的测向算法研究[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(3): 96-99.
JU Yi, SHAO Wenjian. Study of direction finding algorithm based on multi-baseline phase interferometer[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2018, 41(3): 96-99.
- [4] KUWATA Y, RICHARDS A, SCHOUWENAARS T, et al. Decentralized robust receding horizon control for multi-vehicle guidance[C]// Proceedings of the IEEE American Control Conference. Minneapolis: IEEE Press, 2006: 2047-2052.
- [5] GOODMAN G. New horizons for shipboard EW-US navy undertakes major renewal of its SLQ-32 ESM system[J]. The Journal of Electronic Defense, 2009(1): 25-32.
- [6] 梁皓泓. 一种基于天线单元的四比幅测向校正方法[J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(3): 103-106.
LIANG Haohong. A correction method of 4-channel amplitude-comparison DF based on antenna unit[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2022, 45(3): 103-106.
- [7] 舒亚海. 一种面向综合射频效能的舰载共形天线优化设计方法[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 121-125.
SHU Yahai. Efficiency optimization method for ship-based integrated RF antenna[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(4): 121-125.

作者简介:

任 财 男, 1984 年生, 硕士, 高级工程师, 研究方向为舰载雷达系统总体方案设计;

李 归 男, 1986 年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为舰载雷达系统总体方案设计;

邬 诚 男, 1981 年生, 硕士, 高级工程师, 研究方向为舰载雷达系统总体方案设计;

吴久涛 男, 1988 年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为舰载雷达系统总体方案设计。