

引用格式:卿浩博,吕小龙,黄珏,等.基于大潜深耐压天线罩模型的四面阵干涉仪测向算法[J].信息对抗技术,2024,3(1):81-86.[QING Haobo, LYU Xiaolong, HUANG Jue, et al. An algorithm of four-face array interferometer direction finding based on deep-submergence radome model[J]. Information Countermeasure Technology, 2024, 3(1):81-86. (in Chinese)]

基于大潜深耐压天线罩模型的四面阵干涉仪测向算法

卿浩博^{1*},吕小龙¹,黄珏²,向川云¹,张慧君¹

(1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所,四川成都 610063 2. 海军研究院,北京 100036)

摘要 基于大潜深耐压实心厚壁柱状天线罩模型,提出一种四面阵干涉仪测向算法,推导了该模型下干涉仪相位差及信号入射角度的相关计算公式。该算法可以解决天线罩插入相位移不均匀性引入的相位误差问题。最后通过计算机仿真验证了所提算法的有效性,能够很好地解决经典干涉仪算法在实心壁天线罩模型下带来的阵元相位差严重失真以及测向误差大的问题。

关键词 干涉仪;四面阵;大潜深耐压天线罩;相位差;测向误差

中图分类号 TN 958.97 **文章编号** 2097-163X(2024)01-0081-06

文献标志码 A **DOI** 10.12399/j.issn.2097-163x.2024.01.008

An algorithm of four-face array interferometer direction finding based on deep-submergence radome model

QING Haobo^{1*}, LYU Xiaolong¹, HUANG Jue², XIANG Chuanyun¹, ZHANG Huijun¹

(1. No. 29 Research Institute of CETC, Chengdu 610063, China; 2. Naval Research Institute, Beijing 100036, China)

Abstract An algorithm of four-face array interferometer direction finding based on deep-submergence radome model was put forward in this paper. The detailed formulas of interferometer phase difference and incidence angle were derived as well. The proposed algorithm is able to correct the phase error leading by phase inconsistency. Simulations were carried out to demonstrate the performance of the proposed scheme under varied circumstances. The conclusions are drawn that the proposal is able to modify the phase error and direction finding error of classic interferometer under deep-submergence radome model.

Keywords interferometer; four-face array; deep-submergence radome; phase error; direction finding error

0 引言

天线罩^[1-2]是保护其内部天线正常工作的一种装置,例如地面天线罩主要用于防风沙、雨雪等自然环境对天线的侵袭;机载天线罩则除了兼顾自然环境外,还需要考虑高温、气动载荷等因

素;大潜深天线罩需要考虑承受下潜至极限深度时的水压,而无功能性变形、泄露和损坏。天线罩内部一般布置多个天线组成阵列,来实现测向、定位与跟踪等功能。

大潜深天线罩需要承受深海中的静水压力,潜深越大,罩体直径越大,天线罩的耐压、密封设

计难度就越大。大潜深天线罩一般选择力学性能、低介电损耗性能兼顾的石英及环氧树脂复合材料。考虑流体阻力,大潜深耐压天线罩外形一般选择为柱状或水滴形,通过缠绕成型工艺,充分保证实心壁罩筒体特殊外形的可设计性。法兰密封采用金属嵌件与复合材料,满足连接强度和密封防漏要求。在解决耐压前提的同时,还需满足电性能要求,采用多阶半波壁设计能确保雷达收发频段的高透波性。

受两端曲率半径、外形曲面差异以及罩体结构、制作工艺等影响,电磁波不同入射位置会产生不同的相位延迟,带来插入相位移的不均匀性。用作干涉仪时,会引入额外的相位误差,导致干涉仪测向误差增大^[3-5]。天线罩插入相位移不均匀性是系统设计中必须面对的关键问题,其性能直接影响系统的测向指标。

本文基于大潜深耐压实心厚壁柱状天线罩模型,提出并推导了一种四面阵干涉仪相位差计算方法,该方法能够解决上述经典干涉仪测向误差问题,并通过计算机仿真实验验证了所提算法的有效性。

1 大潜深耐压天线罩模型

1.1 经典天线罩模型

图1为经典天线罩模型。天线罩厚度很薄,对测向的影响可以忽略不计,天线罩半径为 R ,天线罩介电常数为 ϵ 。干涉仪长度为 l ,阵元A、B、C、D非均匀布置,形成干涉仪阵,并满足通过虚拟基线解模糊条件,即最短基线长度AB不能超过半波长。入射信号按传统电磁波传播路径直接进入进入天线罩,不会发生折射现象。

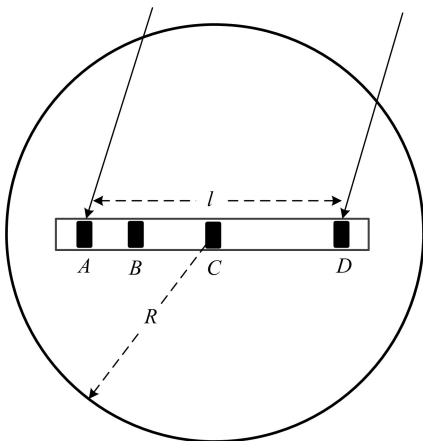


图1 经典天线罩模型示意图

Fig. 1 Principle of classic radome model

1.2 实心厚壁柱状罩模型

图2所示为实心厚壁柱状天线罩内干涉仪四面阵布局。天线罩外半径为 R 、内半径为 r ,即罩壁厚度为 $R-r$,天线罩介电常数为 ϵ 。四面阵对角线长度为 d ,阵元A、B、C、D非均匀布置,形成干涉仪阵,并和经典天线罩模型一样,满足通过虚拟基线解模糊条件。每个单面阵覆盖 $-45^\circ \sim 45^\circ$,4个面阵共同实现 360° 覆盖。

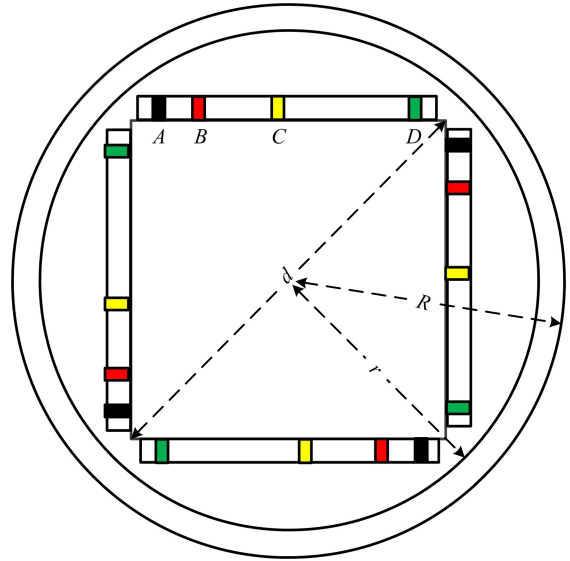


图2 四面阵干涉仪布局示意图

Fig. 2 Structure of four-face array interferometer

当同一辐射源信号沿空气入射到图2中的实心厚壁柱状天线罩表面时,由于天线罩厚度和介电常数的存在,天线罩的入射信号和出射信号均会发生折射现象,如图3中的实线所示。而经典干涉仪测向算法依然按传统电磁波传播模型进行处理,如图3中的虚线所示。可以看出,大潜深耐压实心厚壁柱状天线罩中的折射现象会造成同一辐射源信号到达天线阵列的各天线之间的相位差发生变化,进而带来严重的测向误差,直接影响了系统的测向指标。

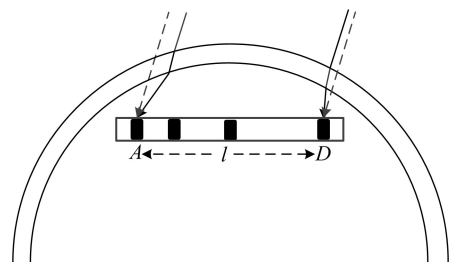


图3 实心厚壁柱状罩干涉仪模型

Fig. 3 Solid thick walled cylindrical radome interferometer model

2 大潜深耐压天线罩模型测向算法

2.1 干涉仪测向经典模型

干涉仪测向^[6-10]是利用测量同一辐射源信号到达天线阵列的各天线之间的相位差来确定其方向的一种测向体制,测向原理如图 4 所示。

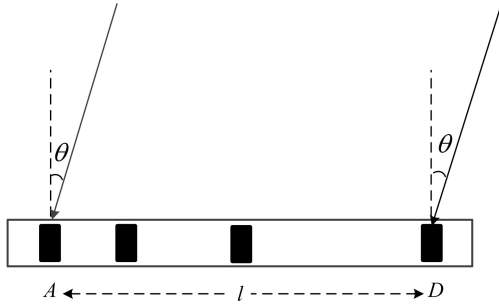


图 4 干涉仪测向原理图

Fig. 4 Principle of interferometer direction finding

空间放置的 2 个天线阵元 A、D,其间距为 l ,当空间来波的方向为 θ 时,2 个阵元天线收到的信号分别为:

$$P_A = U \exp\left(j\left(\omega t - \frac{2\pi R}{\lambda} - \frac{2\pi l \sin \theta}{\lambda}\right)\right) \quad (1)$$

$$P_D = U \exp\left(j\left(\omega t - \frac{2\pi R}{\lambda}\right)\right) \quad (2)$$

式中, U 代表接收信号幅度, R 为信号传播距离, λ 与 ω 分别表示信号波长与频率。

将式(1)~(2)取对数处理,得:

$$\ln P_D - \ln P_A = j \frac{2\pi l \sin \theta}{\lambda} \quad (3)$$

因此,到达天线 A、天线 D 的相位差为:

$$\Phi = \frac{2\pi l \sin \theta}{\lambda} \quad (4)$$

可通过鉴相器获得相位差,测量出信号载频以及天线间距,则辐射源信号的来波方向可表示为:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\pi l} \Phi\right) \quad (5)$$

2.2 实心厚壁柱状罩模型测向算法

本小节建立数学模型,分析当信号入射到图 2 中的天线罩时干涉仪相位误差情况。为了简化处理同时不失一般性,图 5 选取四面阵的一个阵面来进行分析,其余阵面的分析过程同理。

由图 5 可见,当信号沿空气入射到天线罩上的 G 点时,其与 G 点法线夹角为 α 。由于天线罩壁的介电常数大于空气中的介电常数,信号

传播至 G 点处将会发生折射进入天线罩中。G 点与天线罩圆心 O 点的连线相交于天线罩内壁 F 点。同理,当信号从天线罩中的 E 点(其与 E 点法线夹角为 β)进入空气时也会发生折射,出射信号最终传播到阵面上的 K 点。K 点即为干涉仪上的某阵元,其与四面阵边缘距离 \overline{NK} 为常数。E 点与圆心 O 点的连线相交于阵面上的 J 点。

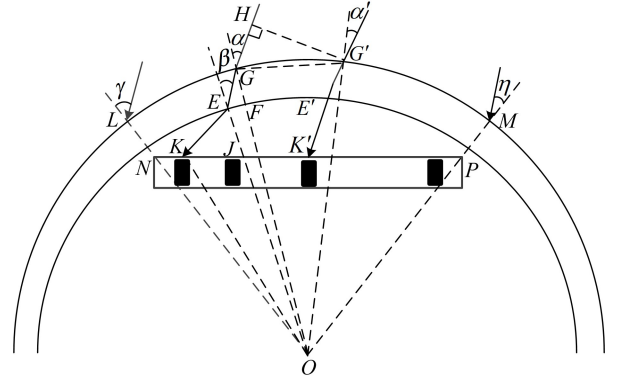


图 5 实心厚壁柱状罩干涉仪算法原理

Fig. 5 Principle of solid thick walled cylindrical radome interferometer direction finding algorithm

根据折射定理,有:

$$\angle EGF = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\epsilon}\right) \quad (6)$$

在 $\triangle OEG$ 中,根据正弦定理有:

$$\angle OEG = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \angle EGF}{r} R\right) \quad (7)$$

$$\overline{EG} = \frac{r}{\sin \angle EGF} \sin(180^\circ - \angle EGF - \angle OEG) \quad (8)$$

且

$$\beta = 180^\circ - \angle OEG \quad (9)$$

$$\angle EOG = 180^\circ - \angle OEG - \angle EGF \quad (10)$$

同理,根据折射定理有:

$$\angle KEJ = \sin^{-1}(\epsilon \sin \beta) \quad (11)$$

在 $\triangle ONK$ 中,根据几何关系和正弦定理、余弦定理,可知

$$\overline{ON} = d/2 \quad (12)$$

$$\angle ONK = 45^\circ \quad (13)$$

$$\overline{OK} = \sqrt{\overline{ON}^2 + \overline{NK}^2 - 2\overline{ON} \cdot \overline{NK} \cos \angle ONK} \quad (14)$$

$$\angle NOK = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \angle ONK \overline{NK}}{\overline{OK}}\right) \quad (15)$$

在 $\triangle OEK$ 中,根据几何关系和正弦定理,

可知：

$$\overline{OE} = r \quad (16)$$

$$\angle EKO = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \angle KEJ \overline{OE}}{OK} \right) \quad (17)$$

$$\angle KOE = 180^\circ - \angle EKO - \angle KEJ \quad (18)$$

图 5 中的单面阵覆盖区域为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ ，其中 -45° 与 45° 这 2 个边界分别对应于天线罩上的 L 与 M 点。该 2 点对应的入射信号与法线夹角分别为 γ 和 η ，且其法线与单面阵分别相交于 N 与 P 点。

根据几何关系，可知：

$$\angle FOP = 90^\circ - \angle NOK - \angle KOE - \angle EOG \quad (19)$$

$$\angle JOP = \angle FOP + \angle EOG \quad (20)$$

$$\angle KJE = \angle OJP = 180^\circ - \angle JOP - 45^\circ \quad (21)$$

在 $\triangle JOP$ 中，根据正弦定理有：

$$\angle OPJ = 45^\circ \quad (22)$$

$$\overline{OJ} = \frac{d/2}{\sin \angle OJP} \sin \angle OPJ \quad (23)$$

且

$$\overline{EJ} = r - \overline{OJ} \quad (24)$$

在 $\triangle KEJ$ 中，根据正弦定理可得：

$$\overline{KE} = \frac{\overline{EJ}}{\sin(180^\circ - \angle KEJ - \angle KJE)} \sin \angle KJE \quad (25)$$

当来波信号入射到单面阵上 K 、 K' 2 点时，解 $\triangle GG'O$ ，有：

$$\angle GOG' = \alpha - \alpha' \quad (26)$$

$$\overline{GG'} = 2R \sin \frac{\angle GOG'}{2} \quad (27)$$

$$\angle G'GO = \frac{180^\circ - \angle GOG'}{2} \quad (28)$$

且

$$\angle HGG' = 180^\circ - \alpha - \angle G'GO \quad (29)$$

$$\overline{GH} = \overline{GG'} \cos \angle HGG' \quad (30)$$

由于耐压天线罩介电常数的影响，此时到达 2 点的相位差应修正为：

$$\Phi' = \frac{2\pi}{\lambda} (\overline{KE} - \overline{K'E'} + \overline{GH}) + \frac{2\pi}{\lambda/\epsilon} (\overline{EG} - \overline{E'G'}) \quad (31)$$

式中，第 1 项表示空气中的路径差带来的相位差，第 2 项表示折射进天线罩后的路径差导致的相位差。可以看出，修正后的相位差表达式不同于经典的干涉仪相位差表达式，故直接沿用经典的干

涉仪相位差计算方法不适用于大潜深耐压天线罩场景。

对于天线阵的第 i 个和第 j 个阵元 ($i, j = 1, 2, \dots, N$)，其在采用经典干涉仪模型和本文所提耐压天线罩干涉仪模型时的相位差分别为 Φ_{ij} 和 Φ'_{ij} ，则插入相位误差 $\Delta\Phi_{ij}$ 可表示为：

$$\Delta\Phi_{ij} = \Phi'_{ij} - \Phi_{ij} \quad (32)$$

结合式(31)和式(4)可知，

$$\Delta\Phi_{ij} = \frac{2\pi}{\lambda} (\overline{KE} - \overline{K'E'} + \overline{GH}) + \frac{2\pi}{\lambda/\epsilon} (\overline{EG} - \overline{E'G'}) - \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha \quad (33)$$

可以看出，插入相位误差直接影响了信号真实入射角度，且入射信号频率越高，对插入相位误差的影响越大。

在式(31)中， Φ' 可通过鉴相器获得， λ 可通过测频获得， \overline{KE} 、 $\overline{K'E'}$ 、 \overline{GH} 、 \overline{EG} 、 $\overline{E'G'}$ 为与 α 、 r 、 R 、 ϵ 、 π 相关的变量，其中 r 、 R 、 ϵ 、 π 均为常数，故式(31)为与入射角度 α 相关的表达式。从上述公式推导可以看出，不同于经典干涉仪算法表达式(5)，大潜深耐压天线罩模型干涉仪相位差无法给出闭合解数学表达式，只能通过计算机搜索或查表寻找最接近鉴相器实测相位差 Φ' 时对应的入射角度 α ，如下式所示：

$$\alpha = \underset{\alpha \in (-45^\circ \sim 45^\circ)}{\operatorname{argmin}} |\Phi_\alpha - \Phi'| \quad (34)$$

即计算机在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 入射角度范围内进行搜索并可计算出每个入射角度对应的相位差，将该相位差和真实接收相位差进行对比，寻找最接近鉴相器相位差所对应的入射角度即为信号入射角。假设搜索步进角度为 $\Delta\alpha$ ，则本文所提方法测角结果与真实角度的最大误差为 $\Delta\alpha/2$ 。

3 仿真验证

本节通过计算机仿真实验验证大潜深耐压天线罩模型下电子战四面阵干涉仪相位差算法的有效性。在图 2 的天线罩场景中，选取天线罩外径为 900 mm、内径为 850 mm，即罩壁厚度为 25 mm，天线罩介电常数 ϵ 为 3.1，干涉仪四面阵对角线长度为 800 mm， A 、 D 2 个天线阵元对称分布于干涉仪左右两侧且其间距为 550 mm。

图 6 所示为采用经典干涉仪模型与大潜深耐压天线罩模型仿真得到的 A 、 D 2 个天线阵元之间所接收到信号的相位差。其中，经典干涉仪模型未考虑天线罩厚度和介电常数的影响，

大潜深耐压天线罩模型考虑了天线罩折射效应所引入的相位差。可以看出,到达两阵元之间的相位差随着入射信号频率的升高而增大,并随着入射角度的增加而变大。当入射角度为 0° 时,此时信号垂直入射到两阵元基线上,相位差为 0° 。

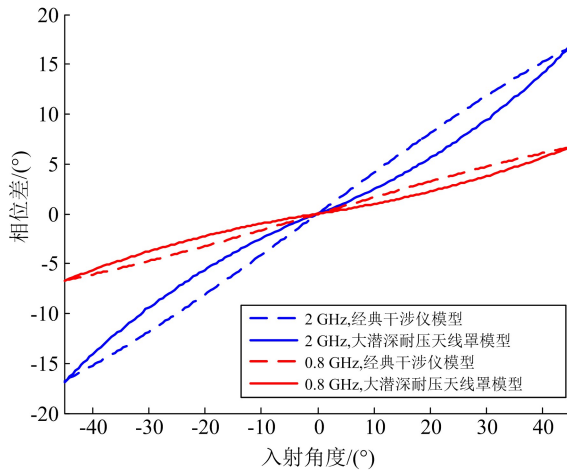


图 6 两阵元之间的相位差

Fig. 6 Phase difference under interferometer model

下面验证天线罩效应存在时, A、D 2 个天线阵元之间所接收到信号相位差的不同,即本节图 6 中 2 种模型下相位差之间的误差。将 2 个阵元在经典干涉仪模型和本文所提耐压天线罩干涉仪模型下的相位差作对比,即式(33)的插入相位误差,如图 7 所示。可以看出,入射角度的变化会影响到天线罩所带来的相位误差。随着入射信号频率的增加,天线罩所带来的相位误差急剧增大。

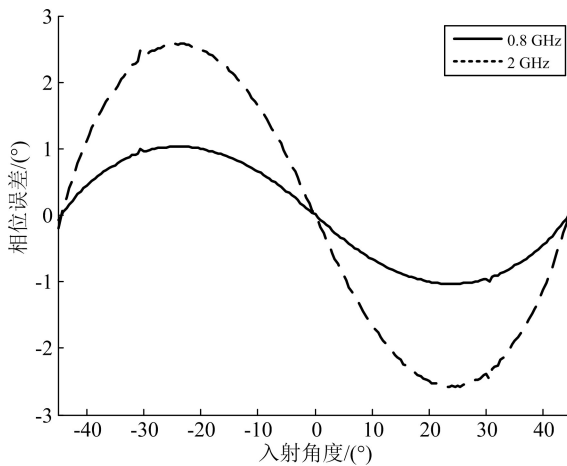


图 7 2 种天线罩模型下干涉仪测向算法之间的插入相位误差

Fig. 7 Phase error of interferometer direction finding algorithm between two radome model

下面验证噪声对角度估计性能的影响。图 8 所示为信噪比对测向均方根误差的关系,采样率 1 GHz,信号载频 500 MHz,每次实验分别进行 1 000 次独立的 Monte-Carlo 实现。可以看出,随着信噪比的提升,角度均方根误差逐步变小,测向性能逐步提高。此外,在工程应用中,测向性能还应综合考虑计算机搜索步进、天线相位一致性、接收机通道相位误差、北斗定向误差、测频误差、基线长度误差等因素。

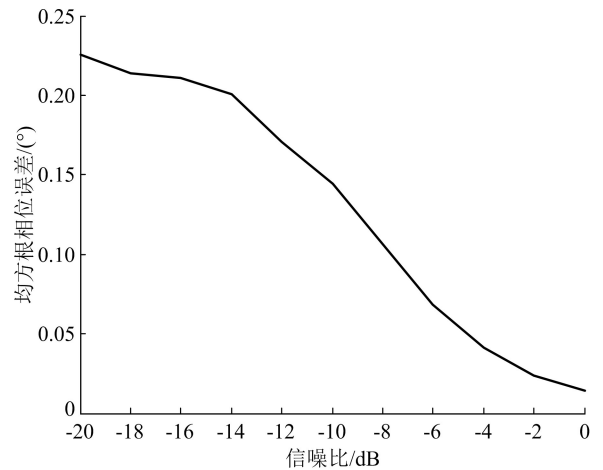


图 8 信噪比对测向均方根相位误差的影响

Fig. 8 Impacts of SNR versus root mean square phase error of direction finding

4 结束语

本文分析了大潜深耐压实心厚壁柱状天线罩模型对天线阵元相位差和测向精度的影响,并从数学上推导了实心厚壁柱状罩四面阵干涉仪测向算法,解决了经典干涉仪算法在实心壁天线罩模型下带来的阵元相位差严重失真以及测向误差大的问题。同时,本文通过计算机仿真实验验证了所提算法的有效性。

参考文献

[1] DUBROVKA R, PALIKARAS G, BELOV P. Near-field antennas radome based on extremely anisotropic metamaterial [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11(2): 438-441.

[2] FISHER B E, LAHAIE I J, PUNNETT M B. Determining the effect of an electromagnetic window or radome wall upon a circularly polarized transmission [J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2007, 49(1): 122-128.

[3] 眭韵,曹群生,李豪,等. 天线阵列-天线罩系统的相位

- 不一致性研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 260-264.
- SUI Yun, CAO Qunsheng, LI Hao, et al. Research on phase inconsistency of the antenna array-radome system[J]. Journal of CAEIT, 2015, 10(3): 260-264. (in Chinese)
- [4] 李高生, 徐弘光, 曹群生. 天线罩相位误差研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 39-44.
- LI Gaosheng, XU Hongguang, CAO Qunsheng. Research on radome phase error[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 39-44. (in Chinese)
- [5] 李高生. 任意天线罩曲面建模和电磁特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- LI Gaosheng. Research on arbitrarily shaped radomes modeling and electromagnetic characteristics [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [6] 姚家苗, 郑林华, 杨鹏. 均匀圆阵相关干涉仪相位模糊问题研究[J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(6): 88-94.
- YAO Jiamiao, ZHENG Linhua, YANG Peng. Study of phase ambiguity problem of uniform circular array correlation interferometer [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44(6): 88-94. (in Chinese)
- [7] 亓亮, 束坤, 李迪. 基于时差解相位干涉仪模糊的测向方法研究[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(6): 30-34.
- QI Liang, SHU Kun, LI Di. Research into direction finding method based on solving phase interferometer ambiguity by using time difference[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2018, 41(6): 30-34. (in Chinese)
- [8] 黎伟, 甘建超, 刘高高, 等. 均匀椭圆阵干涉仪测向[J]. 电子信息对抗技术, 2022, 37(1): 70-75.
- LI Wei, GAN Jianchao, LIU Gaogao, et al. Uniform elliptic array interferometer direction finding[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2022, 37(1): 70-75. (in Chinese)
- [9] 吴迎春, 蒋开创, 陈祎, 等. 基于最优模糊的均匀圆阵干涉仪测向算法[J]. 制导与引信, 2017, 38(3): 16-19.
- WU Yingchun, JIANG Kaichuang, CHEN Yi, et al. Circular array phase interferometer direction finding algorithm based on optimizing ambiguity[J]. Guidance and Fuze, 2017, 38(3): 16-19. (in Chinese)
- [10] 胡富增. 多波束比幅和干涉仪测向的研究与仿真分析

[J]. 舰船电子工程, 2018, 9(1): 71-75.

HU Fuzeng. Research and simulation analysis of multi beam amplitude comparison and interferometer direction finding[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 9(1): 71-75. (in Chinese)

作者简介

卿浩博

男, 1988年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为电子对抗、检测与估计
E-mail: 121775582@qq.com



吕小龙

男, 1988年生, 工程师, 研究方向为无源定位
E-mail: lorita125@126.com



黄珏

男, 1988年生, 工程师, 研究方向为电子对抗
E-mail: nudt_huangjue@163.com



向川云

男, 1984年生, 高级工程师, 研究方向为信号处理
E-mail: cyxiangsc@aliyun.com



张慧君

男, 1990年生, 工程师, 研究方向为信号检测
E-mail: 987607363@qq.com



责任编辑 董莉