

基于相位干涉仪的单站无源定位技术探讨

谭儒鑫 胡尧文 李德松 任小平

成都大学 四川 成都 610106

【摘要】：一直以来，我国都在利用传统的多站无源定位技术，加大了定位成本，且定位的机动性比较差。而基于相位干涉仪的单站无源定位技术具有成本低、机动性强等优势，可为定位工作提供多重帮助。技术人员在应用该技术时，可以先利用相位干涉仪这一设备获取目标相位差信息，之后再利用相关算法进行可靠计算，并利用观测平台速度进行径向距离的计算，最后技术人员可以根据径向距离完成定位工作。

【关键词】：相位干涉仪；单站无源定位；相位差

前言

和多站无源定位技术相同，单站无源定位也是常用的定位技术手段，在定位时，单个观测站可以实现目标辐射源信号的连续接收，之后分析信号，明确目标位置。相比于传统的多站无源定位，单站无源定位技术的成本更低，独立性、隐蔽性以及灵活性更强，适用范围比较广泛。在此基础上增加相位干涉仪，可以增强定位技术的优势，提高定位的准确性。

1 构建观测平台相位干涉仪侧向模型

无人机机载运动平台单站无源定位的常用方法有很多，其中常用的方法主要包括侧向定位法、多普勒频率定位法、到达时间定位法以及联合定位法等。而以相位干涉仪为基础的单站无源定位技术主要是以相位差变化率定位法为主。和传统的侧向定位法相比，在定位过程中应用相位差变化率定位法可以增强定位的实时性与准确性。

从图1当中可以清楚的看到相位干涉仪接收的目标辐射信号的情况。从实际情况来看，目标和观测平台这两者之间存在俯仰角，因此需要在观测平台上放置两台相位干涉仪。观测平台一直保持直线匀速运动，因此，可以将观测平台的质心设为 O' 点，将观测平台的运动方向设为 X' 轴，并使 O' 轴的方向指向机头。同时，需使 O' 点指向 Y' 轴，并明确 Z' 轴，从而形成两个直角坐标系，即 $O-XYZ$ 与 $O'-X'Y'Z'$ ，并使两个直角坐标系保持平行^[1]。

相位干涉仪一共包括三个单元天线，其中一个单元天线在 O' 处，一个单元天线在无人机的尾轴上，一个单元天线在左侧的机翼轴上。目前，可以假设目标辐射信号是固定不变的，在这种情况下相位干涉仪可以获取观测目标的所有方位信息。从图一当中可以看出， E_a 是架设在机载平台质心上的单元天线， E_b 是架设在机尾轴上的单元天线，且 E_aE_b 的基线长度是 d_1 ，而 E_c 是架设在左侧机翼轴上的单元天线， E_aE_c

的基线长度是 d_2 。 E_a 、 E_b 、 E_c 所接收的目标辐射信号用 l_1 、 l_2 、 l_3 表示，且 l_1 、 l_2 、 l_3 是相互平行的。利用 β 表示机载平台检测到的目标方位角，利用 ϵ 表示机载平台检测到的俯仰角。此外，需要利用 A 、 E_bB 、 E_cC 表示 l_1 、 l_2 、 l_3 在观测平台上的水平面投影。 E_aB 与 E_bB 是相互垂直的； E_aC 与 E_cC 是相互垂直的。因此， E_bD 的辐射信号是到达 E_a 、 E_c 的波程差，而 E_cF 是到达 E_a 、 E_b 的波程差。

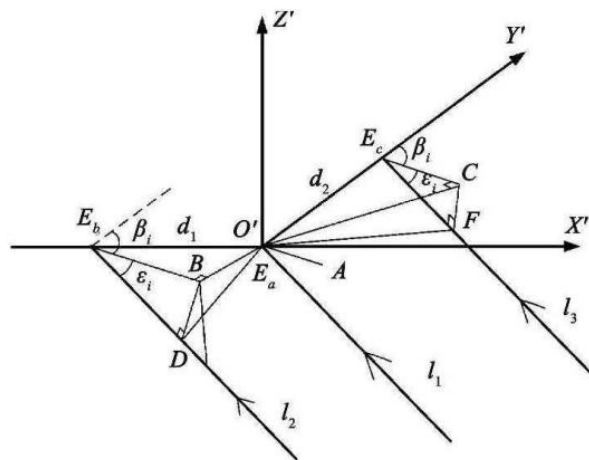


图1 相位干涉仪接收目标辐射信号示意图

2 加强单站无源定位技术算法设计

2.1 灵活应用目标相位差测量方法

在应用目标相位差测量方法时，技术人员应当先利用相位干涉仪检测出的目标相位以及角度信息进行计算。从图一当中可以看出，在 $Rt\triangle E_aBE_b$ 当中， E_bB 与 E_aE_b 是相等的，而 $\cos\angle E_aE_bB = d_1 \cos(\beta - 90^\circ) = d_1 \sin\beta$ ^[2]。且 $\angle BE_bD = \epsilon$ 。

$$\text{因此， } E_bD = E_bB \cos \epsilon = d_1 \sin \beta \cos \epsilon \quad (1)$$

同理，在 $Rt\triangle E_aCE_c$ 当中， $E_cC = E_aE_c \cos\angle E_aE_cC = d_2 \cos(180^\circ - \beta) = d_2 \sin\beta$ 。且在 $Rt\triangle E_bDB$ 当中， $\angle BE_bD = \epsilon$ 。

$$\text{因此, } E_c F = E_c C \cos \angle C E_c F = -d_2 \cos \beta \cos \varepsilon \quad (2)$$

根据上述内容可以计算出基线 E_a 、 E_b 构成的相位干涉仪接收目标信号的相位差是

$$\Psi_1 = \frac{2\pi d_1}{c} f_1 \sin \beta \cos \varepsilon \quad (3)$$

而基线 E_a 、 E_c 构成的相位干涉仪接收目标信号的相位差是

$$\Psi_2 = \frac{2\pi d_2}{c} f_1 \cos \beta \cos \varepsilon \quad (4)$$

2.2 灵活应用相位差解模糊算法

若观测平台所测得的相位差超过了 $(-\pi, \pi]$ rad 这个范围的话, 需要对超出的部分进行相位差解模糊。将来波信号假设为 $f_1 = 2.4 \times 10^9 \text{ Hz}$ 。在理想状况下, 若达到来波入射时差最长, 相位差就会最大。将相应数据带入之后, 可以发现相位差的值可以在多个周期当中, 技术人员可以对一个周期之外的相位部分进行还原, 而这一过程就属于相位差解模糊。从上述 (3) 公式与 (4) 公式来看, 当距离足够远, 就可以将俯仰角设置为 0, 测量公式就会变为

$$\Psi_x = \frac{2\pi d_x \sin \beta}{\lambda} \quad (5)$$

$$\Psi_y = \frac{2\pi d_y \cos \beta}{\lambda} \quad (6)$$

若基线的长度大于 λ 的二分之一时, 相位差的数据范围便会超过 $(-\pi, \pi)$ rad 这个范围, 这就会出现相位模糊的情况。需要将两台相位干涉仪放置在同一条轴线上, 将基线划分为短基线与长基线两种, 其中短基线的长度小于 λ 的二分之一, 没有模糊数, 可以直接利用短基线求解长基线的相位差模糊数。而技术人员可以将长基线的长度设为 d_L , 且 $d_s/d_L = V$, 从而得到

$$\Psi_{ms} = \Psi_s + \Delta \Psi_s \quad \Psi_{ms} \in (-\pi, \pi) \quad (7)$$

$$\Psi_{mL} = \Psi_L \bmod(2\pi) + \Delta \Psi_s \quad \Psi_{mL} \in (-\pi, \pi) \quad (8)$$

$$\frac{\Psi_L}{\Psi_s} = \frac{\Psi_{mL} + 2\pi k - \Delta \Psi_{mL}}{\Psi_{ms} - \Delta \Psi_s} = \frac{d_L}{d_s} = V \quad (9)$$

假设 $k' = V * \Psi_{ms} \text{round}(2\pi)$, $\Psi_A = V * \Psi_{ms} - 2\pi k'$, 便可以

$$\Psi_A - \Psi_{mL} = V * \Psi_{ms} - 2\pi k' - \Psi_{mL} \quad (10)$$

长基线的相位差测量值是 Ψ_{mL} , 短基线为 Ψ_{ms} 。同时,

长基线相位差的真实值是 Ψ_L , 测量误差是 $\Delta \Psi_L$, 而短基线为 Ψ_s , 测量误差值是 $\Delta \Psi_s$ [3]。将长基线的整周期模糊数设为 k , 并利用 mod/round 表示向下取余操作与向上取余操作。进行解模糊之后的相位差是 $\Psi_{AL} = \Psi_{mL} + 2\pi k$ 。可以根据 Ψ_{AL} 以及 Ψ_{mL} 在区间 $(-\pi, \pi]$ rad 当中的分布情况计算 k 值, 并利用短基线进行长基线的相位模糊数计算, 明确其最大的可解范围是 $[-2\pi d_x/\lambda, 2\pi d_x/\lambda]$ rad。

2.3 灵活应用定位解算算法

可以根据目标与观测平台的角度信息以及径向距离进行目标定位。利用解模糊处理得到的相位差信息获取角度信息。

$$\text{可以令 } k_1 = \frac{2\pi d_1}{c} \text{ 与 } k_2 = \frac{2\pi d_2}{c}, \text{ 并将其带入到公式 (3) 与}$$

公式 (4) 当中, 从而得到 $\sin \beta$ 、 $\sin \varepsilon$ 、 $\cos \beta$ 、 $\cos \varepsilon$ 的值以及相位差变化率, 即 Ψ_1 、 Ψ_2 , 之后可以计算出方位角的变化率 β 以及俯仰角变化率 ε 。

在明确角度信息之后, 需要计算目标和观测平台之间的径向距离。在 O-XYX 这个坐标当中, 设某一时刻为 i , 观测平台的坐标就是 (x_i, y_i, z_i) , 之后需科学设置观测平台的运动速度以及固定目标的坐标。将目标距观测平台的径向距离设置为 r_i , 由于目标的方位角以及俯仰角一直不变, 所以技术人员可以计算径向距离。

3 仿真结果与分析

3.1 相位差解模糊算法的仿真验证分析

从解模糊原理来看, 若想进行解模糊处理, 就需要使相位干涉仪的测量误差满足一定的条件。且从不等式关系来看, 只有满足一定的条件才能计算出正确的相位模糊值。从长短基线相位模糊原理来看, 技术人员需要先进行仿真验证才能够充分掌握相位差。从最终的仿真结果来看, 在进行解模糊处理之后没有改变之前数据的误差分布情况, 且能够利用长短基线法求解无模糊相位差 [4]。

3.2 定位解算算法的仿真验证分析

在进行仿真验证时, 可以设置两种不同的情况。对两种情况的仿真结果进行对比分析后可以发现, 当目标距离观测平台越远, 定位点和真实目标之间的位置距离偏差就越大, 因此可以明确二者之间呈现正比关系。

结语

技术人员在应用以相位干涉仪为基础的单站无源定位技术时, 应进行模型构建与算法设计。通过仿真分析发现,

基于相位干涉仪的单站无源定位技术在目标定位中发挥着重要作用,且可以降低成本,增加经济效益,提高定位的精度,因此应高度重视基于相位干涉仪的单站无源定位技术。

参考文献:

- [1] 徐茂,马坤涛.基于非理想阵元相位干涉仪的极化和到达角联合估计[J].电子信息对抗技术,2020,35(02):6-8+76.
- [2] 赵云,刘国栋,陈蓓,郑淑梅,孙志刚.一种无人飞行器测控系统高动态目标角捕获方法[J].无线电工程,2021,51(07):568-572.
- [3] 崔凯,姜建军,张建峰.一种空中二次雷达目标单站无源定位技术[J].电子信息对抗技术,2018,33(06):12-16+21.
- [4] 尤明懿,史斌华,黄凯,叶云霞.基于均匀圆阵相位干涉仪的正确解相位模糊概率值方法[J].中国电子科学研究院学报,2021,16(10):1038-1046.

作者简介:

谭儒鑫,性别:男,民族:汉,籍贯:河南省固始县,学历:本科,职称:无,研究方向:信号处理,基金项目:无,工作单位:成都大学,单位地址:四川省成都市成洛大道十陵上街 2025 号,单位邮编:610106。

胡尧文,性别:男,民族:汉,籍贯:四川省江油市,学历:本科,职称:无,研究方向:信号处理,基金项目:无,工作单位:成都大学,单位地址:四川省成都市成洛大道十陵上街 2025 号,单位邮编:610106。

李德松,性别:男,民族:汉,籍贯:四川省内江市资中县,学历:本科,职称:无,研究方向:电力系统自动化,基金项目:无,工作单位:成都大学,单位地址:四川省成都市成洛大道十陵上街 2025 号,单位邮编:610106。

任小平,性别:男,民族:汉,籍贯:四川省凉山彝族自治州西昌市,学历:本科,职称:无,研究方向:信号处理,基金项目:无,工作单位:成都大学,单位地址:四川省成都市成洛大道十陵上街 2025 号,单位邮编:610106。