

甚长基线近区时差测向联合定位及特性分析

石荣, 邓科, 张伟, 李洲

(电子信息控制重点实验室, 成都 610036)

摘要: 双站协同无源制导是一种全新的反辐射导引体制, 具有隐蔽性高、抗干扰能力强等特点。针对此应用中末制导阶段的目标无源协同定位问题, 构建了甚长基线近区时差测向无源定位模型, 分析了在这个模型下测距精度随测向夹角的变化规律, 以及在各种攻击方向上所能达到的定位精度, 并利用这个结果分析了无源末制导阶段导弹攻击阵位的优选条件, 提高了无源定位精度。最后通过仿真验证了理论分析的有效性, 从而为双站协同无源制导和反辐射精确打击等应用提供了新的参考。

关键词: 双站协同无源制导; 甚长基线近区无源定位; 时差测向联合定位; 定位精度分析; 反辐射精确打击

中图分类号: TJ765 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0010-05

Joint Location and Characteristic Analysis with TDOA Direction Finding Nearby Very-Long Baseline

SHI Rong, DENG Ke, ZHANG Wei, LI Zhou

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

Abstract: The cooperative passive guidance by two stations is a brand-new anti-radiation guidance system, characterized by high concealment and strong anti-jamming capability. To cooperative passive target locating problem in the terminal guidance phase of this application, a passive location model of Time Difference of Arrival (TDOA) direction finding nearby very-long baseline was constructed. The change rule of ranging accuracy with the direction angle between the object and station is thoroughly analyzed with this model, as well as the location accuracy that can be achieved in various attack directions. With this result, the optimal condition for missile attack position in the passive terminal guidance phase was analyzed, increasing the accuracy of passive location. Finally, validity of the theoretical analysis was verified through simulation, thus providing a new reference for such applications as cooperative passive guidance by two stations and anti-radiation precision attack.

Key words: cooperative passive guidance by two stations; passive location nearby very-long baseline; joint location with TDOA direction finding; analysis of location accuracy; anti-radiation precision attack

0 引言

随着电子防御技术的发展, 机载自卫干扰技术不断进步, 压制式与欺骗式干扰手段的广泛应用使得采用雷达主动导引头导弹的脱靶率也逐渐增大。提高导弹的命中率, 除了进一步提高雷达导引头的综合性能之外, 也可以采取其他的制导方式, 相对于雷达导引头采用的有源制导方式来说, 被动导引头采用无源制导

方式, 具有隐蔽性高、抗干扰能力强等特点, 广泛应用于各种反辐射打击^[1-4]。实际战场中的雷达、通信与干扰机等设备均是辐射源, 无论上述辐射源是装载于地面、舰载平台, 还是装载于空中飞机平台, 都可以成为反辐射打击的对象。由于采用无源导引方式, 传统上安装于单个导弹的导引头一般只能对辐射源的来波方向进行测量, 打击的目标类型大多限定于处于静止状态或慢速运动状态的辐射源目标。虽然可以采用运动单站无源定位方法来获得有关目标距离的信息, 但是整个单站无源定位的精度目前还难以满足攻击引导的要求^[5-9]。由此可见, 完全依赖导弹上的无源导引头实施单站导引具有一定的局限性。

收稿日期: 2014-05-13

修回日期: 2015-01-31

基金项目: 预研基金项目共用技术基金(9140A21XX01XXDZX9066)

作者简介: 石荣(1974—), 男, 四川岳池人, 博士, 研究员, 研究方向为电子对抗、通信与雷达系统。

文献[10-11]中提出的各种协同制导技术一般应用于导弹的中制导阶段,而在末制导阶段大多仍然依靠导弹自身的导引头来实施导引;虽然文献[12]针对半主动制导模式提出过双站协同制导方法,但是并没有探讨末制导过程中对目标的定位问题。而双站协同无源制导是一种全新的无源制导方式,它是在原先仅依靠导弹自身单站无源制导的基础上增加了一个远区制导站,该制导站与导弹之间通过高速弹载数据链相联系,从而形成了一个典型的双站协同无源定位模式。在整个无源导引过程中末制导阶段的影响最大,所以主要针对这个阶段中的双站协同无源制导场景,构建了甚长基线近区时差测向无源定位模型,分析了在这个模型下,导弹对目标的定位精度随目标、导弹、远区制导站之间夹角的变换规律,揭示了双站协同无源制导在末制导阶段的无源定位特点,并按照此规律来优化末制导阶段的攻击阵位,从而提高末制导阶段的无源定位精度提供了条件。

1 双站 TDOA 与测向联合定位

双站协同无源制导采用的是时差(Time Difference of Arrival, TDOA)与测向联合无源定位体制。有效避免了在有源制导模式下,制导雷达即有源导引头被目标所携带的干扰机所干扰,以及隐身目标的雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)过小等不足,可实现对辐射源目标的反辐射打击。在整个应用过程中,无源制导站、带有无源导引头的导弹,以及被攻击的辐射源目标之间的空间位置关系如图1所示。导弹与制导站都具有无源测向的能力,导弹与制导站之间通过弹载数据链相连,从而整个系统具备了对目标辐射源信号的时差 TDOA 的测量能力。

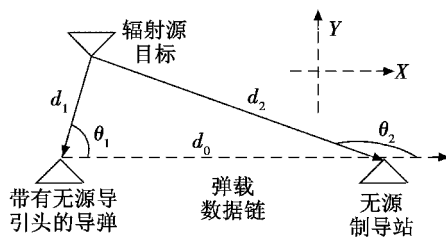


图1 空间位置关系示意图

Fig.1 Spacial position relationship

由图1可见,双站协同无源制导过程中可以获得3个测量参数,分别是:

- 1) 目标信号到达制导站与导弹之间的时间差 τ ;
- 2) 目标信号到达导弹的来波方向角 θ_1 ;
- 3) 目标信号到达制导站的来波方向角 θ_2 。

设在以目标、导弹、制导站3点所在平面构成的直角坐标系中,目标、导弹与制导站的位置坐标分别为

$(x_T, y_T), (x_M, y_M), (x_G, y_G)$,于是可以得到如下的1个时差方程与2个测向方程,即

$$\sqrt{(x_G - x_T)^2 + (y_G - y_T)^2} - \sqrt{(x_M - x_T)^2 + (y_M - y_T)^2} = c\tau \quad (1)$$

$$\frac{y_M - y_T}{x_M - x_T} = \tan \theta_1 \quad (2)$$

$$\frac{y_G - y_T}{x_G - x_T} = \tan \theta_2 \quad (3)$$

式中, c 表示电磁波的传播速度。在已知导弹位置坐标 (x_M, y_M) 和制导站位置坐标 (x_G, y_G) 的条件下,由上述方程组可以求解出目标辐射源的位置坐标 (x_T, y_T) ,从而实现目标的无源定位。

虽然由两个测向方程式(2)、式(3)也可以完成测向交叉定位,但是在图1所示的应用场景中,制导站与目标之间的距离非常远,制导站的测向信息只能用于发射段与中段的导引,在中后段与末制导阶段,导弹与目标之间的距离 d_1 远远小于制导站与目标之间的距离 d_2 ,以及导弹与制导站之间的距离 d_0 ,即

$$d_1 \ll d_2 \quad (4)$$

$$d_1 \ll d_0 \quad (5)$$

按照上述条件,在末制导阶段,式(3)相对于式(2)来说,得到的定位误差更大。所以在实际应用中,主要是依赖于式(1)、式(2)来求解目标位置。由于式(1)、式(2)组成的是一个非线性方程组,所以通常采用最陡下降法迭代求解。

2 甚长基线近区无源定位模型

如前所述,在末制导阶段,导弹与制导站之间形成了一个时差测量的定位基线,在这条基线上以导弹为参考点,目标位于该基线的近区,此条件可以如式(5)所表达。由于时差测量基线长度远大于目标到其中一个测量站的距离,这意味着目标位于其中一个测量站的附近区域内,称此时的无源定位问题为甚长基线近区定位问题。

在末制导阶段,虽然导弹与制导站之间的实际距离大约在100~200 km范围,但是目标与导弹之间的距离则在10 km以内,两者对比,显然定位基线的长度相对于弹目距离来说,高了一个数量级。而且随着导弹进一步飞向目标,导弹与目标之间的距离会进一步减小,从几公里缩短到几百米,这个过程持续下去,定位基线的长度相对于弹目距离来说,会逐渐高出2~3个数量级。所以使用了“甚长基线”一词来描述这个特点。为了从理论上定量描述该问题,在此以导弹与制导站之间的距离 d_0 为参考做归一化处理,建立如图2所示的定位分析模型。

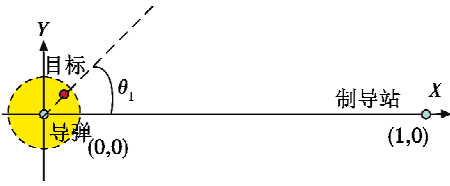


图2 归一化后的甚长基线近区定位模型
Fig.2 Normalized location model in local area of ultra-long baseline

图中,导弹的坐标为(0,0),制导站的坐标为(1,0),目标位于导弹的近区,如图中虚线所围区域内,目标与导弹两者之间的归一化距离记为 k_r ,于是式(5)在本模型中可以表示为

$$k_r = (d_1/d_0) \ll 1 \quad (6)$$

在本模型中参照式(1)、式(2),与导弹相关的时差方程与测向方程可以表示为

$$\sqrt{(x-1)^2 + y^2} - \sqrt{x^2 + y^2} = k_d \quad (7)$$

$$y/x = \tan \theta_1 \quad (8)$$

式中: (x, y) 表示归一化坐标系中目标的位置坐标; $k_d = c\tau/d_0$,表示归一化距离差。

在整个甚长基线无源定位过程中,导弹只需要计算时差方程式(7)和测向方程式(8)即可获得目标的定位坐标。从物理意义上讲,式(7)确定了一条以导弹和制导站为焦点的双曲线,式(8)确定了一条从导弹发出的直射射线,两条线的交点处即为目标所在位置,如图3所示。

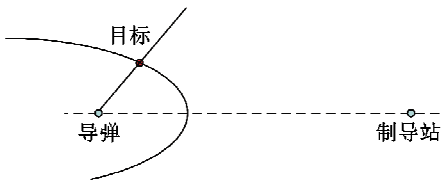


图3 时差测向联合定位示意图

Fig.3 Joint location using TDOA and beam-crossing

如果将上述双站协同无源末制导与导弹单站主动末制导进行对比,可以发现其具有如下特点:导弹单站主动末制导采用的是有源雷达导引头,由雷达的测向与测距两个条件来确定目标位置;而双站协同无源末制导中,导弹的无源测向与有源雷达导引头的测向一样,都是为了获得目标的相对角度信息,但距离信息的获得是依赖于时差测量方程。也就是说,在甚长基线近区无源定位模型中,式(7)发挥了测距的等效作用。在单站有源雷达导引头中,测距是由雷达自发自收来完成的;而双站协同无源末制导的测距是通过目标辐射源信号到达两个观测站(导弹与远区制导站)之间的时间差测量来实现的。

显然在双站协同无源末制导应用中,无源导引头

几乎不受被打击目标所携带的自卫干扰机的影响。一方面,因为采用的是无源定位手段,导弹上的无源导引头本身并不对外辐射电磁信号,所以目标上携带的自卫干扰机接收不到照射信号,无法实施干扰频率引导,也就无法完成瞄频干扰过程;另一方面,即使目标上的干扰机发射全频段噪声干扰信号,这时干扰机本身会变成一个电磁辐射源,导弹与远区制导站同样可以对此噪声辐射源所辐射的信号进行测向和时差测量,从而对其实施无源定位。由此可见,无论被攻击目标所携带的自卫干扰机工作与否,双站协同无源制导体制都不会受其影响,这也同时体现了双站协同无源制导的优越性所在。

3 甚长基线近区定位特性分析与利用

为了分析甚长基线近区无源定位所能达到的定位精度,对式(7)进行微分运算和近似处理之后可得

$$\frac{dk_d}{dx} = \frac{x-1}{\sqrt{(x-1)^2 + y^2}} - \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \approx -1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (9)$$

$$\frac{dk_d}{dy} = \frac{y}{\sqrt{(x-1)^2 + y^2}} - \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \approx -\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (10)$$

在上述推导过程中,利用了甚长基线近区条件式(6),有 $|y| \ll |x-1|$ 成立。

定义在辐射源来波方向上距离差这个参数变化的方向梯度为

$$\beta(\theta_1) = \frac{dk_d}{dx} \cos \theta_1 + \frac{dk_d}{dy} \sin \theta_1 \quad (11)$$

实际上, $\beta(\theta_1)$ 反映了甚长基线近区时差测向无源定位中导弹与目标之间距离的相对测量精度。因为如前所述,在这个过程中式(7)发挥了等效测距的作用。对于甚长基线近区定位中的测距来说,将式(8)~式(10)代入式(11),简化后可得

$$\beta(\theta_1) = -\cos \theta_1 - 1 \quad (12)$$

式(12)从本质上描述了双站协同无源末制导过程中的测距精度相对于测向角度之间的关系。式中, θ_1 为目标、导弹、制导站之间的夹角,取值范围为 $(-\pi, \pi]$ 。 θ_1 可以分为如下4个区段:

- 1) 当 $\theta_1 = 0$ 时, $\beta(0) = -2$;
- 2) 当 $\theta_1 = \pi$ 时, $\beta(\pi) = 0$;
- 3) 当 $\theta_1 \in [-0.5\pi, 0) \cup (0, 0.5\pi]$ 时, $-2 < \beta(\theta_1) \leq -1$;
- 4) 当 $\theta_1 \in (-\pi, -0.5\pi) \cup (0.5\pi, \pi)$ 时, $-1 < \beta(\theta_1) < 0$ 。

上述4个区段见图4。图4中:当目标位于图中圆形近区的右半圆覆盖区域时, $-2 \leq \beta(\theta_1) \leq -1$;当目标位于图中圆形近区左半圆覆盖区域时, $-1 < \beta(\theta_1) \leq 0$ 。

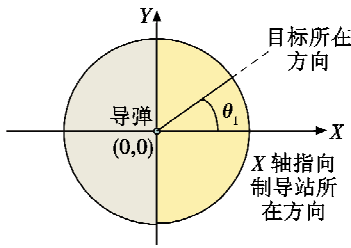


图 4 甚长基线近区定位精度分区图

Fig. 4 Block area display for location precision in local area of ultra-long baseline

为了便于对比,还可以计算出在导弹单站主动雷达导引头应用时的 $\beta_r(\theta_1)$ 值。由于主动雷达导引头测量的是发射脉冲与回波脉冲之间的时间差,对应的是双重距离,所以 $\beta_r(\theta_1)$ 为一个固定值,即 $\beta_r(\theta_1) = -2$ 。而在图 4 所示的甚长基线近区时差测向联合定位过程中,特别需要注意的是,当 $\theta_1 = \pi$ 时, $\beta(\pi) = 0$, 系统将不具备任何测距能力,换句话说,当目标刚好位于制导站与导弹连线的延长线上时,整个双站协同无源制导系统仅具有测向能力,并不具备距离测量能力;而当目标刚好位于制导站与导弹连线的直线段上时, $\theta_1 = 0$, $\beta(0) = -2$, 系统具有最好的等效测距精度,此时的等效测距精度与有源雷达导引头的等效测距精度是相当的。在其他情况下,导弹对目标的等效测距精度将是随角度 θ_1 变化的,如图 5 所示。

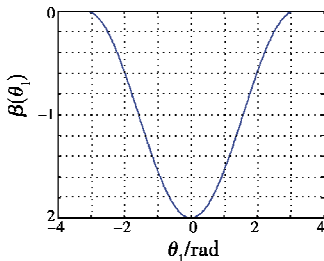


图 5 等效测距精度随测向角度的变化关系

Fig. 5 Relationship between equivalent ranging precision and direction angle

设甚长基线近区无源定位过程中,导弹上的无源导引头对目标辐射源测向的均方根误差为 σ_θ , 导弹与无源制导站对目标辐射源信号的时差测量的均方根误差为 σ_τ 。结合上面的分析结果可得,三维空间中甚长基线近区对目标辐射源的无源定位的均方根误差 σ_L 为

$$\sigma_L = \sqrt{(d_1 \sigma_\theta)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau c}{\beta(\theta_1)}\right)^2} \quad (13)$$

由此可见,双站协同无源末制导的测距精度是随测向角度变化的,变化规律由式(12)决定。显然 $\beta(\theta_1)$ 的绝对值越大,在相同的时差测量精度下,等效距离测量精度也越高,这就决定了双站协同无源末制导条件下有一个最佳攻击阵位条件,即在无源末制导阶段,导弹攻击阵

位要尽量使目标、导弹、制导站三者所形成的夹角 θ_1 越接近于零越好,这样,整个系统对目标的测距精度越高,无源定位精度也就越高,对目标攻击越有利。

4 仿真验证

仿真条件:在导弹攻击目标的末制导阶段,无源制导站与导弹之间的距离 d_0 为 150 km, 导弹与目标之间的距离 d_1 为 2 ~ 10 km, 导弹上的无源导引头对目标辐射源信号的来波方向角测量的均方根误差为 0.5° , 导弹与无源制导站对目标辐射源信号进行时差测量的均方根误差为 30 ns。

下面分别在目标、导弹、制导站三者所形成的夹角 θ_1 取不同数值时,通过求解时差测向联合定位方程式(1)、式(2)来得到目标的坐标位置,经过多次仿真后对目标的定位误差进行统计,可得如图 6 所示的无源定位误差曲线。

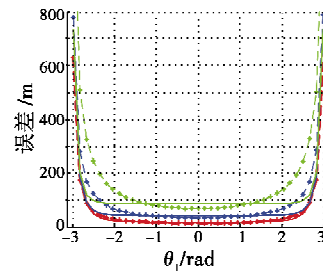


图 6 d_1 为 2 ~ 10 km 时的无源定位误差曲线

Fig. 6 Passive locating error curve when d_1 is from 2 km to 10 km

在图 6 中,实线是根据式(13)绘制的曲线,带点的虚线是通过式(1)、式(2)多次仿真后统计得到的实际曲线。图中:绿色曲线表示距离为 10 km 的情况;蓝色曲线表示距离为 5 km 的情况;红色曲线表示距离为 2 km 的情况。从上述几组曲线的对比可知,导弹与目标之间的距离从 10 km 变化到 2 km 的过程中,仿真结果与理论分析结果的吻合度越来越高,这也印证了前面理论分析的合理性与有效性。

从上述仿真结果也可以看出,在双站协同无源制导过程中,目标、导弹、制导站三者所形成的夹角 θ_1 对无源定位精度的影响也非常大,在 $|\theta_1|$ 越接近 π 时,定位误差急剧增大,所以在实际应用中可参照图 4 所示的定位精度分区指示信息,通过攻击阵位和导弹飞行路线的优化,使目标、导弹、制导站三者所形成的夹角 θ_1 越接近于零越好,这样所获得的对被攻击目标的无源定位精度也越高。图 7 所示为一个局部放大对比图。

图 7 中数据表明:只要保证在 $\theta_1 \in (-0.5\pi, 0.5\pi)$ 的条件下,弹目距离为 10 km 时,最大定位误差在 100 m 以内;弹目距离为 5 km 时,最大定位误差在

50 m 以内;弹目距离为 2 km 时,最大定位误差小于 20 m。由此可见,随着弹目距离的逐渐减小,对目标的无源定位误差也越来越小,最终将收敛于导弹的杀伤范围之内,从而确保对目标的有效打击。

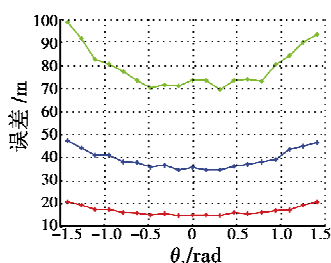


图7 不同距离下无源定位误差曲线局部对比图

Fig. 7 Passive location error curves for different distances

5 结论

本文以构建的甚长基线时差测向联合定位模型为基础,推导得到了近区时差测向无源定位过程中等效距离测量精度随测向角度之间的变化关系,并将此理论研究结果与双站协同无源制导应用相结合,对无源末制导过程中目标、导弹、制导站三者之间的位置关系进行了分析与讨论,为无源末制导阶段导弹与制导站对目标的无源定位精度的提高和反辐射精确打击的实施奠定了良好的基础。在无源制导体制的工程实现过程中,还要以弹载高速通信数据链为基础,进一步考虑通信延迟所产生的影响,这也成为后续工程化过程中需要研究的主要方向。

参考文献

- [1] SHIMA T. Optimal cooperative pursuit and evasion strategies against a homing missile[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2011, 34(2):414-425.
- [2] ISAAC A, WILLETT P, BAR-SHALOM Y. MCMC methods for tracking two closely spaced targets using monopulse radar channel signals[J]. *IET Radar Sonar & Navigation*, 2007, 1(3):221-229.
- [3] RATNOO A, SHIMA T. Line-of-sight interceptor guidance for defending an aircraft[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2011, 34(2):522-532.
- [4] LI D X, CRUZ J B. Defending an asset: A linear quadratic game approach[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2):1026-1044.
- [5] FOWLER M L. Analysis of single platform passive emitter location with terrain data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 2001, 37(2):495-507.
- [6] SHAN Y H, AN W, SUN Z K, et al. Research on passive locating method using phase rate of changing with variant posture of the observer[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2002, 15(3):166-170.
- [7] DENG X P, LIU Z, JIANG W L, et al. Passive location method and accuracy analysis with phase difference rate measurements[J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar & Navigation*, 2001, 148(5):302-307.
- [8] WANG J H, WANG Y S, GUO T, et al. Rate of phase difference change estimation in single airborne passive locating system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(2):184-190.
- [9] LI Z H, FENG D W, SUN Z K, et al. Passive location using time of arrival along with direction of arrival and its changing rate[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, 2003:261-265.
- [10] 付昭旺,于雷,寇英信,等. 导弹协同制导中未交接班目标截获概率研究[J]. *弹道学报*, 2012, 24(4):31-36. (FU Z W, YU L, KOU Y X, et al. Target acquisition probability in midcourse and terminal guidance handing-off for cooperative guidance of missile[J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(4):31-36.)
- [11] 牛晓川,陈少华,吴宗一,等. 协同制导条件下空空导弹中末制导交接班能力[J]. *弹箭与制导学报*, 2011, 31(4):41-44. (NIU X C, CHEN S H, WU Z Y, et al. Investigation of air-to-air missile's midcourse and terminal guidance handing-off based on cooperative guidance[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(4):41-44.)
- [12] 高坚,佟明安. 双机编队协同制导的火控机理[J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34(12):38-40. (GAO J, TONG M A. Fire control principle on cooperative guidance with two-fighters team[J]. *Fire Control and Command Control*, 2009, 34(12):38-40.)

欢迎订阅期刊 欢迎登刊广告