

# 干扰目标双站测向定位模型

赵杰, 林辉

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**针对干扰目标的空间定位问题,推导出一种双站测向定位的数学模型。提出了测向定位的插值同步计算问题,对水平等速直线飞行目标的航迹进行研究,分析了目标高低角和方位角的变化规律,采用一种有效的有理插值——倒一次插值,作为测向插值同步计算函数,使两雷达站送来的数据在时间上具有同一性,提高了定位精度,具有一定的工程应用价值。

**关键词:**干扰目标,测向定位;插值同步

**中图分类号:** TN953.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1009-3516(2007)05-0025-04

## 1 干扰目标双站测向定位模型

测向交叉定位测距法<sup>[1]</sup>需要至少有两个雷达站点测出干扰机的角度信息,且雷达站之间有一定的距离分布,这样利用一定的数学模型就可解算出干扰机的距离信息,进而确定干扰机在空间的位置。测向交叉干扰定位的模型有很多种<sup>[2-5]</sup>,下面给出双站测向交叉定位的一种简单的数学模型。

如图1所示,设目标某时刻位于空中T点,设两部雷达A、B位于同一水平面内,A、B站测得目标的高低角记为 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ ,方位角记为 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 。 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 角分别为雷达站A、B与基线方向的夹角,规定从基线方向逆时针转出的角度为正。 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 为A、B站的目标视线与基线方向的夹角,规定从基线方向逆时针转出的角度为正。 $\gamma$ 为目标视线AT与BT间的夹角。 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 角根据两站测得的目标方位角 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 和基线方向与正北方向的夹角(记为 $\delta$ ,规定从正北方向顺时针转到基线方向的角度为正)来确定,如图2所示,图2为雷达站A、B所在水平面的平面图。

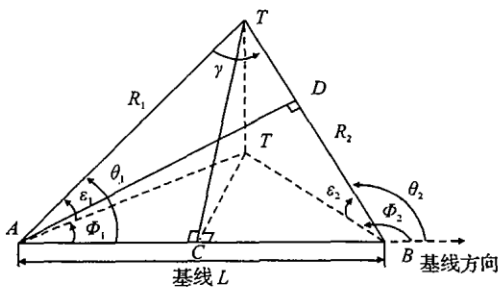


图1 双站测向定位

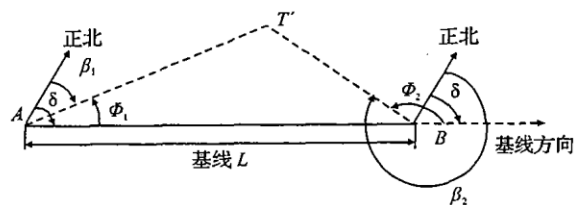


图2  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  角的确定

$\phi_1$ 、 $\phi_2$ 角可按式确定:

$$\phi_i = \begin{cases} |\beta_i - \delta|, & |\beta_i - \delta| \leq \pi \\ 2\pi - |\beta_i - \delta|, & |\beta_i - \delta| > \pi \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

利用图1中 $\triangle ABT$ 和 $\triangle ABT$ 的几何关系,可以推得

收稿日期:2007-03-20

基金项目:国防科技预研基金资助项目(413060402)

作者简介:赵杰(1966-),男,陕西西安人,副教授,博士生,主要从事系统建模与仿真研究;

林辉(1957-),男,福建福州人,教授,博士生导师,主要从事系统建模与仿真研究。

$$\cos \theta_1 = \cos \phi_1 \cos \varepsilon_1, \cos \theta_2 = \cos \phi_2 \cos \varepsilon_2 (0 \leq \theta_1, \theta_2 \leq \pi)$$

则  $\gamma = \theta_2 - \theta_1$ , 做  $AD$  垂直  $BT$  于  $D$  点, 则  $\sin \theta_2 = AD/AB = AD/L, \sin \gamma = AD/AM = AD/R_1$ 。所以有  $R_1 = L \sin \theta_2 / \sin \gamma = L \sin(\arccos(\cos \phi_2 \cos \varepsilon_2)) / \sin(\arccos(\cos \phi_2 \cos \varepsilon_2)) \cos \sin(\arccos(\cos \phi_1 \cos \varepsilon_1)) - \cos \sin(\arccos(\cos \phi_2 \cos \varepsilon_2)) \sin \sin(\arccos(\cos \phi_1 \cos \varepsilon_1))$  (2)

同理可得  $R_2$ 。

## 2 测向插值同步模型

指控中心接收到两部雷达对同一干扰目标的测向信息时, 必须在统一的坐标和时间系统内进行定位计算(融合), 以确定目标在空间的位置。但  $A, B$  两部雷达对同一干扰目标的角度测定时间可能会出现差别, 此差别可能是: 两站扫描周期不同; 两站地理位置的差别; 两站雷达波束扫到目标的时刻不同; 两站接收、处理时间的差别; 两站接收数据送至上级指控中心的延时等。

雷达测向时间的不一致会导致很大的定位误差。这时需要进行测向插值同步计算, 以使  $A, B$  雷达送来的数据在时间上具有同一性, 满足定位精度要求。为了取得时间同步的数据, 可以采用以时间为参变量的插值法。在选取插值函数时, 必须保证产生尽可能小的模型计算误差, 而且还必须考虑到计算的简单性和实时性。为此, 先来研究一下雷达跟踪过程中, 目标高低角  $\varepsilon$  和方位角  $\beta$  的变化规律, 再来选取合适的插值函数。

### 2.1 目标水平等速直线飞行航迹

在地面参数直角坐标系内研究目标的航迹模型<sup>[6-7]</sup>, 采用水平等速直线飞行航迹的目标, 飞行高度、速度和航路捷径保持不变, 伴随和自卫有源干扰飞机一般采用此种航迹飞行, 如图 3 所示。目标的方位角  $\beta$  为

$$\beta = \beta_0 \pm q (p \neq 0); q = \arccos S / \sqrt{P^2 + S^2}$$

式中,  $\beta_0$  为  $OS$  轴的方位角(以正北为基准, 顺时针计)。求导得目标的方位角速度  $\beta$  为

$$\omega_\beta = \beta \pm PV_t / P^2 + S^2 = \pm PV_t / d^2 (P \neq 0) \quad (3)$$

目标方位角  $\beta$  和方位角速度  $\beta$  的变化如图 4 所示(右捷径, 真北在航路轴  $OS$  方向,  $V_t = 400 \text{ m/s}, P = 50\,000 \text{ m}$ )。可见, 目标为右捷径, 且真北方在航路轴  $OS$  方向, 临近飞入时,  $\beta$  由小逐渐变大,  $\beta$  逐渐增大, 目标投影点位于捷径轴时,  $\beta$  达最大,  $\beta_{\max} = V_t / P$  称为目标方位角速度高峰; 目标临近飞出时,  $\beta$  进一步增大, 而  $\beta$  逐渐变小。当真北方在航路轴  $OS$  下方时,  $\beta$  曲线有间断点, 但  $\beta$  的变化速度仍是连续的。

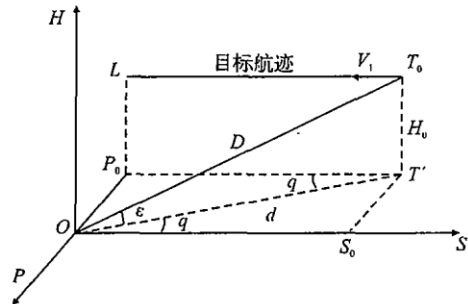


图 3 水平等速直线飞行目标航迹

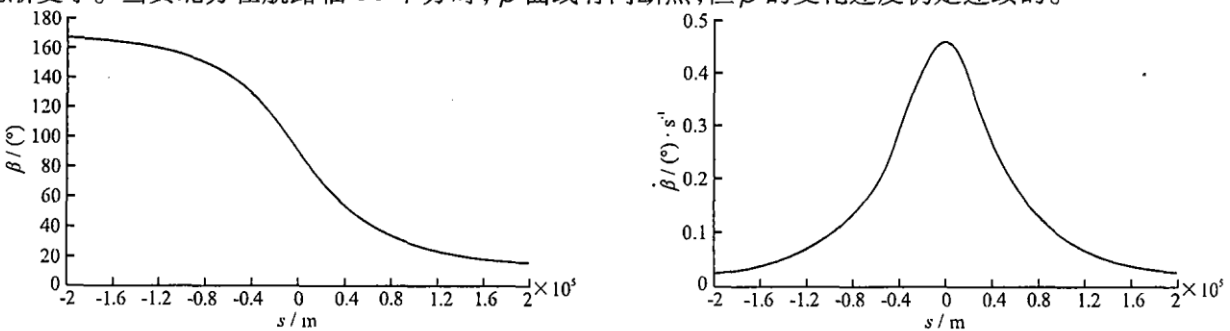


图 4 目标方位角和方位角速度变化曲线

目标高低角  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = \arcsin H / \sqrt{H^2 + S^2 + P^2}$$

求导得目标的高低角速度  $\dot{\varepsilon}$  为

$$\omega_\varepsilon = \dot{\varepsilon} = \frac{HSV_t}{(S^2 + H^2 + P^2) \sqrt{P^2 + S^2}} = \frac{HV_t \sqrt{d^2 - p^2}}{d(d^2 + H^2)} \quad (4)$$

目标高低角  $\varepsilon$  和高低角速度  $\dot{\varepsilon}$  的变化如图 5 所示(右捷径, 真北在航路轴  $OS$  方向,  $P = 10\,000 \text{ m}, H = 10$

000 m,  $V_t = 400$  m/s)。可见,当  $p \neq 0$  时,目标临近飞入,  $\varepsilon$  随时间逐渐增大,且  $\dot{\varepsilon} > 0$ ,也随之逐渐增大,到  $S = S^*$  时,达到最大,称为高低角速度临近高峰;尔后  $\dot{\varepsilon}$  逐渐减小,目标投影点过捷径轴时刻,  $\dot{\varepsilon} = 0$ ,而  $\varepsilon$  达最大值  $\varepsilon_{\max}$ ;目标临远飞出时,  $\dot{\varepsilon} < 0$ ,  $\varepsilon$  由大逐渐变小,  $|\dot{\varepsilon}|$  由小逐渐变大。目标飞至  $S = -S^*$  时,  $|\dot{\varepsilon}|$  达最大,该点称为高低角速度离远高峰,而后,  $|\dot{\varepsilon}|$  又逐渐减小。

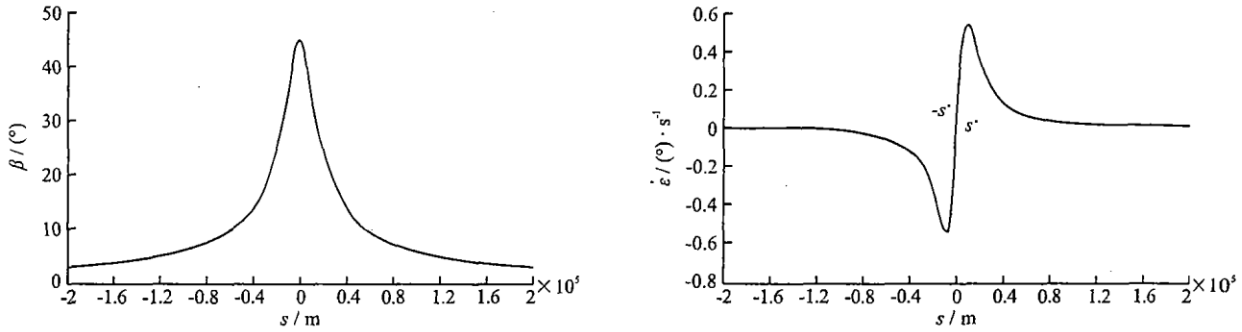


图5 目标高低角及其变化率变化示意图

2.2 插值函数

由式(3)可见,当航路捷径  $P$  与目标速度  $V_t$  均为常数时,目标方位角的变化率  $\beta$  与  $S^2$  成反比。由式(4)可见,在目标高度  $H$ 、航路捷径  $P$  与目标速度  $V_t$  均为常数的条件下,目标高低角的变化率  $\dot{\varepsilon}$  的变化亦大致与  $S^2$  成反比。

设雷达探测到目标后的某一个时刻为时间起点(0时刻),目标飞至航路捷径点( $S = 0$ )所需时间记为  $t_0$ ,在时间起点后目标在时刻  $t$  的  $S$  坐标为  $S = (t_0 - t)V$ ,即  $S$  的变化恰与时间  $(t_0 - t)$  的变化成正比(设目标速度  $V_t$  为常数)。由此分析,可以采用一种特殊的有理插值——倒一次插值,作为测向插值同步计算函数

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{a'(t_0 - t) + b'} = \frac{1}{at + b} \quad ; \quad \beta(t) = \frac{1}{c'(t_0 - t) + d'} = \frac{1}{ct + d} \quad (5)$$

其中  $a, b, c, d$  为插值系数。对方程组(5)求导可得

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{-a}{(at + b)^2} \quad ; \quad \dot{\beta}(t) = \frac{-c}{ct + d} \quad (6)$$

可见式(6)的形式与式(3)和式(4)的形式在效果上相似。所以我们选用这种插值形式。可以避免产生大的模型误差<sup>[8]</sup>。

式(5)在插值计算中,和线性插值一样简单:只需用两个独立的插值基点便可以完全确定  $a, b, c, d$  4个插值系数。设雷达在  $t_1$  时刻测得目标的角度为  $(\varepsilon_1, \beta_1)$ ;  $t_2$  时刻测得目标的角度为  $(\varepsilon_2, \beta_2)$ 。则在  $t_1 - t_2$  区间内雷达测向插值函数的4个插值系数为

$$a = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (t_1 - t_2)}; b = \frac{1}{\varepsilon_1} = \frac{t_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (t_1 - t_2)}; c = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1 \beta_2 (t_1 - t_2)}; d = \frac{1}{\beta_1} = \frac{t_1(\beta_2 - \beta_1)}{\beta_1 \beta_2 (t_1 - t_2)} \quad (7)$$

设  $A, B$  两雷达站对目标的扫描周期为  $\Delta t_A, \Delta t_B$ ,即  $A, B$  两雷达站向指挥协调中心上报的数据率分别为每  $\Delta t_A, \Delta t_B$  时间间隔上报一次。 $A, B$  两雷达站对同一有源干扰目标连续上报测向数据:

$$(\varepsilon_{Ai}, \beta_{Ai}, t_{Ai}); (\varepsilon_{Bj}, \beta_{Bj}, t_{Bj}); i = 1, 2, \dots$$

式中,  $t_{Ai}$  为  $A$  雷达站探测到目标第  $i$  个角度数据  $(\varepsilon_{Ai}, \beta_{Ai})$  时的参照时间(相对于作战单元统一的时间系统);  $t_{Bj}$  为  $B$  雷达站探测到目标第  $j$  个角度数据  $(\varepsilon_{Bj}, \beta_{Bj})$  时的参照时间(相对于作战单元统一的时间系统)。

假设  $\Delta t_A \leq \Delta t_B$ ,从一般的插值法可知,通常外插值精度远不如内插值的精度高,所以,为了提高插值精度,则以  $t_{Ai}$  为基准点,在  $t_{Bj}$  时间序列中找两个与时间  $t_{Ai}$  最近点,设为  $t_{B(j-1)}, t_{Bj}, t_{B(j-1)} < t_{Ai} \leq t_{Bj}$ 。则  $t_{B(j-1)}, t_{Bj}$  时刻,雷达站  $B$  探测到目标角度数据  $(\varepsilon_{B(j-1)}, \beta_{B(j-1)}, t_{B(j-1)})$  和  $(\varepsilon_{Bj}, \beta_{Bj}, t_{Bj})$ ,代入式(7),可求得在  $t_{B(j-1)} - t_{Bj}$  区间内雷达  $B$  的测向插值函数的4个插值系数为

$$a = \frac{\varepsilon_{Bj} - \varepsilon_{B(j-1)}}{\varepsilon_{B(j-1)} \varepsilon_{Bj} (t_{B(j-1)} - t_{Bj})} = - \frac{\varepsilon_{Bj} - \varepsilon_{B(j-1)}}{\varepsilon_{B(j-1)} \varepsilon_{Bj} \Delta t_B}$$

$$b = \frac{1}{\varepsilon_{B(j-1)}} - \frac{t_{B(j-1)} (\varepsilon_{Bj} - \varepsilon_{B(j-1)})}{\varepsilon_{B(j-1)} \varepsilon_{Bj} (t_{B(j-1)} - t_{Bj})} = \frac{1}{\varepsilon_{B(j-1)}} + \frac{t_{B(j-1)} (\varepsilon_{Bj} - \varepsilon_{B(j-1)})}{\varepsilon_{B(j-1)} \varepsilon_{Bj} \Delta t_B}$$

$$c = \frac{\beta_{Bj} - \beta_{B(j-1)}}{\beta_{B(j-1)} \beta_{Bj} (t_{B(j-1)} - t_{Bj})} = - \frac{\beta_{Bj} - \beta_{B(j-1)}}{\beta_{B(j-1)} \beta_{Bj} \Delta t_B}$$

$$d = \frac{1}{\beta_{B(j-1)}} - \frac{t_{B(j-1)}(\beta_{Bj} - \beta_{B(j-1)})}{\beta_{B(j-1)}\beta_{Bj}(t_{B(j-1)} - t_{Bj})} = \frac{1}{\beta_{B(j-1)}} + \frac{t_{B(j-1)}(\beta_{Bj} - \beta_{B(j-1)})}{\beta_{B(j-1)}\beta_{Bj}\Delta t_B}$$

则雷达 B 在  $t_{Ai}$  时刻目标插值方向数据按式(5)计算:

$$\varepsilon_{t_{Ai}}^B = \frac{1}{at_{Ai} + b} \quad ; \quad \beta_{t_{Ai}}^B = \frac{1}{ct_{Ai} + d}$$

为了表示方便,记 A 站在  $t_{Ai}$  时刻探测目标方向数据为  $(\varepsilon_{t_{Ai}}^A, \beta_{t_{Ai}}^A)$ , B 雷达站在  $t_{Ai}$  时刻插值目标方向数据为  $(\varepsilon_{t_{Ai}}^B, \beta_{t_{Ai}}^B)$ , 则利用测向交叉定位模型(2)即可求得目标在  $t_{Ai}$  时刻在空间的位置坐标,这样连续不断地在  $t_{Ai}$  时间序列上测得目标位置坐标,即可用于目标数据融合、跟踪。

### 3 结束语

本文建立了一种简单实用的干扰目标双站测向交叉定位模型,并针对测向插值同步问题进行较为深入的研究,提出了一种采用倒一次插值算法作为测向插值同步计算函数的思想,模型和算法设计合理有效,具有很强的工程应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 孙仲康,周一宇,何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
- [2] 张西川,张平定,王 凯. 干扰目标交叉定位参数算法研究[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(2):770-771.
- [3] 刘海峰,赵英俊,数寿春. 基于多传感器优化布站的干扰目标定位模型[J]. 现代防御技术,2002,30(1):61-63.
- [4] 刘 梅,姚天宾,权太范,等. 干扰机组优化定位算法研究[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(1):49-52.
- [5] 刘以安,陈松灿. 无源定位与数据融合技术在辐射源目标跟踪中的应用[J]. 系统工程与电子技术,2003,25(8):946-970.
- [6] 娄寿春. 导弹制导技术[M]. 北京:宇航出版社,1989.
- [7] 吴 达. 地空导弹作战仿真装备空情系统研究[D]. 西安:西北工业大学,2005.
- [8] 王 雷,刘进忙. 制导雷达组网机对系统误差补偿研究[J]. 现代雷达,2005,27(2):5-7.

(编辑:田新华)

## The Interpolation Synch Algorithm in Direction Measurement Locating Model of Jamming Target

ZHAO Jie, LIN Hui

(Automation School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aiming at jamming target space locating, this paper deduces a mathematic model of direction measurement based on two radars, puts forward the issue of interpolation synch calculation, studies the track of level fixed-velocity straight target, analyzes the change law of pitching angle and azimuth angle and establishes a proper rational interpolation-simple reciprocal interpolation as the synch calculation function. In this way, the data sent from the two radars are identical in time, and the locating precision is improved. The model established in this paper is of engineering application value.

**Key words:** jamming target; direction measurement locating; interpolation synch