

基于时差信息的超视距目标定位与跟踪

何 友¹, 修建娟¹, 唐小明¹, 董士嘉²

(1. 海军航空工程学院信息融合技术研究所, 山东烟台 264001; 2. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210013)

摘 要: 本文对超视距目标定位与跟踪问题进行了研究, 并给出了一种把主动跟踪技术和无源时差定位技术结合起来对超视距目标进行侦测的新方法. 该方法的定位系统由地面站和空中站组成, 地面站上的无源侦收设备测得经空中站转发(或反射)的目标信号到达时间差, 同时地面站上的主动雷达对空中站进行精密定位, 计算出目标信号在这段距离上的传播时间, 进而可获得目标信号到达空中站的时间差, 此时就相当于在在空中站的位置对目标进行超视距侦测, 利用时差定位技术就可估计目标的位置信息. 通过仿真分析可看出, 利用本文的方法可对超视距目标进行良好的定位与跟踪.

关键词: 时差定位; 超视距目标; 主动雷达; 被动雷达

中图分类号: TN958. 93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1917-04

Location and Tracking of the Over-the-Horizon Target on TDOA

HE You¹, XIU Jian-juan¹, TANG Xiao-ming¹, DONG Shi-jia²

(1. Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai, Shandong 264001, China;

2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

Abstract: This paper studies the location and tracking problem of the over-the-horizon target (OTHT). A new method is proposed, which uses active tracking technology and time difference of arrival (TDOA) location method to track the OTHT. This location system is composed of several air platforms and ground stations. The target signal is transmitted (or reflected) by air platforms and received by ground stations. TDOA information is measured by ground stations. At the same time the position of air platform is located by active radar in ground station. Then the time of target signal propagated between air platform and ground station is obtained. By simple calculation we can obtain the TDOA information of these air platforms, which is used to locate the OTHT. Simulation results show that the OTHT can be located and tracked by the method proposed.

Key words: TDOA location; OTHT; active radar; passive radar

1 引言

现代战争是电子技术和高新技术的对抗, 为了取得制空权、制海权, 武器系统就必须具有远程探测、定位和精确打击能力^[1]. 目前, 解决超视距目标探测的主要技术途径有侦察卫星、直升机、主动微波超视距雷达等^[2,3]. 超视距目标定位方法概括来讲可分为直接定位法和间接定位法^[4,5]. 直接定位法是利用地面上的传感器直接对目标进行定位, 常用的天波和地波超视距雷达作为岸基预警雷达具有较广泛的用途, 但它们庞大的天线设施限制了其在海上平台的运用, 而且这类方法相对而言定位精度较差. 间接定位法是利用与地面站协同工作的中继站(直升飞机、卫星等)对目标进行定位^[6,7]. 由于不同的超视距目标定位方法都有其优、缺点, 因此要在现代高科技战争中实现对目标的超视距侦测, 就必须综合运用多种探测手段, 多渠道、全方位的对目标进行探测和监视. 为此,

本文对基于时差信息的超视距目标无源定位和跟踪问题进行了研究, 并给出了一种把主动跟踪技术和无源时差定位技术结合起来对超视距目标进行侦测的新方法. 该方法的定位系统由几个地面站和空中站组成, 地面站上的无源侦收设备测得经空中站转发(或反射)的目标信号到达时间差, 同时地面站上的主动雷达对空中站进行精密定位, 计算出目标信号在这段距离上的传播时间, 进而可获得目标信号到达空中站的时间差, 此时就相当于在在空中站的位置对目标进行超视距侦测, 利用时差定位技术就可获得目标位置的估计信息. 通过仿真分析可看出, 利用本文提出的方法地面上的无源探测系统可对超视距目标进行较好的定位和跟踪.

2 空中站定位

这里我们假设目标是航母, 采用三个空中站 p_0 、 p_1 和 p_2 和三个地面站 s_0 、 s_1 和 s_2 对其进行超视距侦测. 地面站和空

中站的分布如图 1 所示,这里为了简单起见仅以一个空中站和一个地面站为例加以说明,并假设地面站为固定站,空中站为运动站.设地面站上主动雷达所测得的空中站径向距离、方位角和俯仰角分别为 R 、 α 和 γ ,则经过简单的数学运算可求得空中站的位置坐标 x_p, y_p, z_p ($p = 0, 1, 2$)

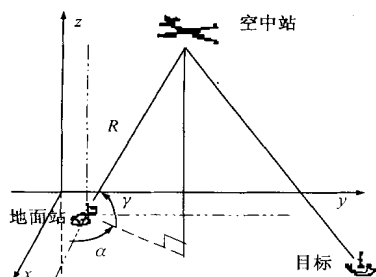


图 1 地面站和空中站分布图

$$\begin{aligned} x_p &= R \cos \alpha \cos \gamma + x_s \\ y_p &= R \cos \alpha \sin \gamma + y_s \\ z_p &= R \sin \alpha + z_s \end{aligned} \quad (1)$$

其中 x_s, y_s 和 z_s 表示地面站的 x, y 和 z 轴位置坐标.

通过对式(1)求导可求得空中站在 $x-y-z$ 平面上的定位误差 dx_p, dy_p 和 dz_p ,进而可求得其方差和互协方差,用矩阵形式可表示为

$$\begin{bmatrix} 2 & x_p & x_p y_p & x_p z_p \\ x_p & 2 & y_p & y_p z_p \\ x_p y_p & y_p & 2 & y_p z_p \\ x_p z_p & y_p z_p & z_p & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_p}{\partial R} & \frac{\partial x_p}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_p}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial y_p}{\partial R} & \frac{\partial y_p}{\partial \alpha} & \frac{\partial y_p}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial z_p}{\partial R} & \frac{\partial z_p}{\partial \alpha} & \frac{\partial z_p}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial x_p}{\partial R} & \frac{\partial x_p}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_p}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial y_p}{\partial R} & \frac{\partial y_p}{\partial \alpha} & \frac{\partial y_p}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial z_p}{\partial R} & \frac{\partial z_p}{\partial \alpha} & \frac{\partial z_p}{\partial \gamma} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: R 、 α 和 γ 分别为主动雷达径向距离、方位角和俯仰角测量误差的标准差; x_s, y_s 和 z_s 为地面站自身位置误差的标准差.各测量误差假设是零均值、彼此不相关的高斯白噪声.

在获得了空中站位置测量值和测量误差后,利用卡尔曼滤波就可对空中站进行跟踪.设 k 时刻空中站位置滤波值为 $(\hat{x}_p(k), \hat{y}_p(k), \hat{z}_p(k))$,由此可求得滤波后空中站到地面站的距离 R_{sp} 和电磁波在这段距离上的传播时间 t_{sp}

$$t_{sp} = \frac{R_{sp}}{c} \quad (3)$$

其中: c 为光速,下标 s 和 p 分别表示地面站和空中站.

3 目标信号到达空中站时差获取

航母上舰载雷达发射的信号脉冲经三个空中站转发(或反射)被三个地面站接收,这里我们取地面站 s_0 和空中站 p_0 作为主站,其它站为辅站,左右两个辅站接收的辐射源信号脉冲再转发到主站,在主站进行脉冲配对和时差提取^[8].假设三个地面站所测得的目标信号到达时间差分别为 t_{s10} 和 t_{s20}

$$t_{s10} = t_1 - t_0 \quad (4)$$

$$t_{s20} = t_2 - t_0 \quad (5)$$

其中: t_s ($s = 0, 1, 2$) 分别为目标信号经空中站转发到达地面主、辅站的时间.

由式(3)~(5)可求得目标信号到达三个空中站的时间差 t_{10} 和 t_{20}

$$t_{10} = t_{s10} - (t_{11} - t_{00}) \quad (6)$$

$$t_{20} = t_{s20} - (t_{22} - t_{00}) \quad (7)$$

其中: t_{00}, t_{11} 和 t_{22} 分别为目标信号在三个空中站和三个地面站之间的传播时间,可由式(3)获得.

在获得了目标信号到达三个空中站的时间差 t_{10} 和 t_{20} 后,此时就相当于在三个空中站的位置对超视距目标进行定位和跟踪,利用时差定位技术就可获得目标位置的估计信息^[9].

4 时差定位原理

4.1 定位模型

设目标位置为 (x, y) ,它到空中站主站 (x_0, y_0, z_0) 和两个辅站 (x_i, y_i, z_i) 的距离分别为 r_0 和 r_i ($i = 1, 2$),而它们之间的距离差设为 n_i

$$r_i = r_0 - n_i = c \cdot t_{i0}, \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

其中: t_{i0} 为目标信号到达空中主、辅站的时间差,可由式(6)和(7)获得,而

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2 \quad (9)$$

$$r_0^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2 \quad (10)$$

将 r_0 移到式(8)的左边,两边取平方,再将式(9)、(10)代入式(8)中整理、化简可得,

$$(x_0 - x_i)x + (y_0 - y_i)y = k_i + n_0 \cdot r_i \quad (11)$$

$$\text{其中: } k_i = \frac{1}{2} [r_i^2 + d_0^2 - d_i^2] \quad (12)$$

$$d_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \quad (13)$$

$$d_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \quad (14)$$

将式(11)写成矩阵形式为

$$AX = B \quad (15)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} x_0 - x_1 & y_0 - y_1 \\ x_0 - x_2 & y_0 - y_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

$$B = \begin{bmatrix} k_1 + n_0 & r_1 \\ k_2 + n_0 & r_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

当三个传感器不在同一直线上时矩阵 A 可逆,可得

$$X = A^{-1}B \quad (19)$$

$$\text{其中: } A^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (20)$$

那么, x, y 的 n_0 参数解为

$$\begin{cases} \hat{x} = m_1 n_0 + n_1 \\ \hat{y} = m_2 n_0 + n_2 \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{其中: } m_i = \frac{2}{j=1} a_{ij} \quad r_j \quad (22)$$

$$n_i = \sum_{j=1}^2 a_{ij} k_j \quad (23)$$

将式(21)代入式(10)中整理化简可得

$$(m_1 n_0 + n_1 - x_0)^2 + (m_2 n_0 + n_2 - y_0)^2 + z_0^2 = n_0^2 \quad (24)$$

而将式(24)化简可得:

$$a n_0^2 + b n_0 + c = 0 \quad (25)$$

其中:

$$a = m_1^2 + m_2^2 - 1 \quad (26)$$

$$b = 2 m_1 (n_1 - x_0) + 2 m_2 (n_2 - y_0) \quad (27)$$

$$c = (n_1 - x_0)^2 + (n_2 - y_0)^2 + z_0^2 \quad (28)$$

将由式(25)求得的 n_0 代入式(21)就可求得目标位置的估计值^[9].

4.2 定位精度分析

对式(8)两边求微分,并结合式(9)和式(10)可得

$$d r_i = \left[\frac{x - x_i}{r_i} - \frac{x - x_0}{n_0} \right] dx + \left[\frac{y - y_i}{r_i} - \frac{y - y_0}{n_0} \right] dy - d p_i \quad (29)$$

$i = 1, 2$

$$\text{其中: } d p_i = \frac{x - x_i}{r_i} dx_i + \frac{y - y_i}{r_i} dy_i - \frac{z_i}{r_i} dz_i - \frac{x - x_0}{n_0} dx_0 - \frac{y - y_0}{n_0} dy_0 + \frac{z_0}{n_0} dz_0 \quad (30)$$

式中 dx_0 、 dy_0 、 dz_0 和 dx_i 、 dy_i 、 dz_i 分别为地面站上主动雷达对空中主、辅站的定位误差,它与地面站主动雷达的测量精度、地面站自身的位置误差等因素有关。

式(29)用矩阵形式可表示为

$$d R = F d X - d X_P \quad (31)$$

其中:

$$d R = [d r_1 \quad d r_2]^T \quad (32)$$

$$F = \begin{bmatrix} \frac{x - x_1}{r_1} - \frac{x - x_0}{n_0} & \frac{y - y_1}{r_1} - \frac{y - y_0}{n_0} \\ \frac{x - x_2}{r_2} - \frac{x - x_0}{n_0} & \frac{y - y_2}{r_2} - \frac{y - y_0}{n_0} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$d X = [dx \quad dy]^T \quad (34)$$

$$d X_P = [d p_1 \quad d p_2]^T \quad (35)$$

由式(31)可解得目标在 $x-y$ 平面的定位误差 dX ,用伪逆形式可表示为

$$d X = (F^T F)^{-1} (F^T (d R + d X_P)) \quad (36)$$

由式(36)可看出目标的定位误差与目标相对各空中站的位置、空中主、辅站自身的定位误差以及空中主、辅站之间距离差的测量误差等因素有关,而空中主、辅站之间距离差的测量误差又与时差测量精度有关。

5 仿真分析

本文对以上几节所述算法作了仿真,仿真时假设地面站位置分别为 $s_1 = (-10\text{km}, 18\text{km}, 0\text{km})$ 、 $s_0 = (5\text{km}, 3\text{km}, 0\text{km})$ 和 $s_2 = (20\text{km}, -12\text{km}, 0\text{km})$;主动雷达距离、方位角和俯仰角测量误差标准差分别为 $r = 60\text{m}$ 和 $\theta = 0.9\text{mrad}$;空中站为飞机,运动速度大小为 250m/s ,三个空中站的初始位置分别为 $p_1 = (235\text{km}, 190\text{km}, 10\text{km})$ 、 $p_0 = (250\text{km}, 220\text{km}, 10\text{km})$ 和 p_2

$= (265\text{km}, 190\text{km}, 10\text{km})$;目标假设为航母,初始位置为 $(500\text{km}, 450\text{km})$,速度为 23 节;目标到地面站和空中站的初始距离分别为 670km 和 350km 左右,时差测量误差的标准差为 20ns。

图 2 给出了三个空中站的真实和滤波轨迹,图 3 和图 4 为 50 次 Monte-Carlo 实验后目标 x 轴和 y 轴位置跟踪精度图。由这三个图可看出,利用本文的方法地面站上的无源探测系统可对超视距目标进行较好的定位和跟踪,其 x 轴和 y 轴的跟踪误差能分别由 16.6km 和 17.2km 很快收敛到 2.9km 和 2.6km 左右,同时地面站上的主动雷达也可对空中站进行较准确的定位和跟踪。通过仿真分析还可看出,地面站和空中站的布站对跟踪结果均有一定的影响,尤其是空中站的布站影响较大;地面站上主动雷达对空中站定位的准确度对目标定位精度影响也较大,如果主动雷达的角度测量误差由 0.9mrad 下降到 0.2mrad,则目标 x 轴和 y 轴定位误差能由 2.9km 和 2.6km 下降到 1.1km 和 0.9km 左右。

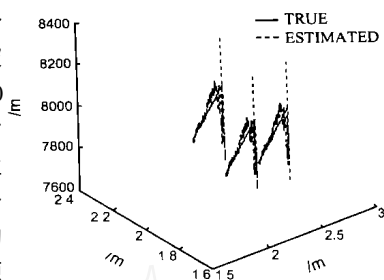


图 2 三个空中站的真实和滤波轨迹

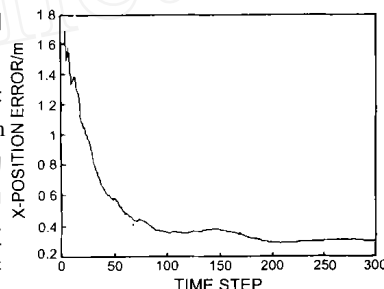


图 3 目标 x 轴跟踪精度图

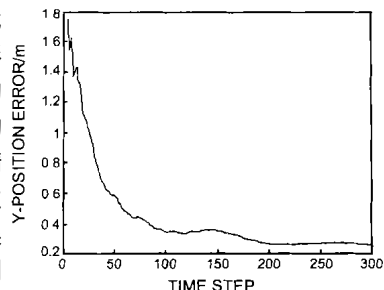


图 4 目标 y 轴跟踪精度图

6 结论

时差定位具有精度高、定位快和“四抗”能力强等优点,但由于受系统自身一些特性的限制,时差定位系统的探测距离无法满足对超视距目标进行侦测的要求,这里我们采用了一种将主动跟踪技术和无源时差定位技术结合起来对超视距目标进行侦测的新方法。通过仿真分析可看出,利用本文的方法地面上的无源探测系统可对超视距目标进行良好的定位和跟踪。由于本文只是对超视距目标无源侦测问题作了一些初步探讨,还有许多问题(例如多目标情况下的参数配对等)还需作进一步的探讨。另外利用时差技术对超视距目标进行定位虽然定位精度较高,但该方法有些情况下会存在定位模糊,而且由于该系统工作时需要多个空中和地面侦察测量站协同工作,因此在工程应用中还有许多问题需加以进一步的研究。

[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(3): 27 - 29.

参考文献:

- [1] 何友, 王国宏, 陆大, 彭应宁. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 1 - 11.
- [2] 王小谟, 张光义, 贺瑞龙, 王德纯. 雷达与探测—现代战争的火眼金睛[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 143 - 160.
- [3] 吴晓进. 超视距雷达及其防空应用[J]. 电子工程, 2002(2): 24 - 28.
- [4] Wang Wei, Peng Ying-ning, Quan Tai-fan, Liu Yong-tan. HF OTHR target detection and estimation subsystems [J]. IEEE AES Systems Magazine, 1999, (4): 39 - 42.
- [5] V I Tislenko, V A Kurakov, G S Sharygin. Passive tracking of the moving object by UHF beyond-the-horizon three position bearing system [A]. International Conference Radar-97 [C]. Edinburgh: IEEE, 310 - 313.
- [6] 李相民, 王建国, 范洪达. 中继站与超视距目标指示[J]. 海军航空工程学院学报, 2002, 17(5): 518 - 520.
- [7] 李相民, 史建国, 姜文志. 岸用型超视距指控系统基本问题探讨[J]. 海军航空工程学院学报, 2002, 17(2): 223 - 224.
- [8] 孙正波, 余健. TDOA 定位中脉冲信号时差精确估计方法研究[J]. 电信技术研究, 2001(8): 1 - 14.
- [9] 邓勇, 徐晖, 周一宇. 平面三站时差定位中的模糊及无解研究

作者简介:



何友男, 1956年10月生于吉林省, 教授, 博士生导师, 1982年毕业于武汉海军工程大学, 1991、1992年在西德不伦瑞克工业大学作访问学者, 1997年6月在清华大学通信与信息系统专业获博士学位, 现为烟台海军航空工程学院副院长、中国电子学会会士, 主要研究领域有: 多传感器信息融合、多目标跟踪、模式识别、雷达自适应检测方法、分布检测理论及应用等, 发表论文 280 余篇, 出版专著 4 部, 有 22 项研究成果获省部级科技进步奖, 1999 年入选国家“百千万”人才工程第一、二层次, 2001 年被授予“全国优秀教师”称号。



修建娟女, 1971年4月生于山东省蓬莱市, 硕士学位, 现为武汉海军工程大学博士研究生, 主要研究方向为多传感器信息融合。