

文章编号: 1672-2892(2010)05-0656-04

## T-R型双基地跟踪雷达有关问题及仿真分析

谢军伟, 张旭春, 张启亮, 冯广飞

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:** 雷达在电子对抗中起着极其重要的作用。本文针对 T-R 型双基地跟踪雷达, 分析了系统的特殊性及其要解决的关键技术问题, 介绍了发射站和接收站之间的时间同步、频率同步和空间同步技术, 分析了传统的单基距解算方法的不足, 讨论了基于调整发射站触发脉冲和接收站测距同步脉冲两种距离解算方法, 对双基地雷达测量值的校准方法进行了描述, 最后对双基地雷达的定位准确度及采用联网多基地雷达系统提高距离的定位准确度进行了研究。仿真结果表明, 联网双(多)基地雷达的数据融合, 可明显改善基线附近的单基距准确度。

**关键词:** 双(多)基地雷达; 同步技术; 定位准确度

**中图分类号:** TN953<sup>+</sup>.7

**文献标识码:** A

## Relevant problems and simulation analysis on bistatic tracking radar of T-R

XIE Jun-wei, ZHANG Xu-chun, ZHANG Qi-liang, FENG Guang-fei

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan Shaanxi 713800, China)

**Abstract:** Radar plays a great role in electronic antagonizing. The special characteristics of system and key technique problems needed to be solved on bistatic tracking radar of Transmitter-Receiver(T-R) type were analyzed. The time synchronization technique, the frequency synchronization technique and space synchronization technique between transmitter station and receiver station were introduced. The deficiency of traditional single range solving method was analyzed. Then two range solving methods based on adjusting the transmitted spring pulse and received range synchronization pulse were discussed. The time calibration methods on the measure value of bistatic radar were described. Finally the position precision of bistatic radar and the improvement on position precision of range by adopting networking multi-static radar system were studied. The simulation results show that the networked bi-(multi)static radar systems can apparently improve the ranging accuracy near the baseline by data fusion.

**Key words:** bi-(multi)static; synchronization technology; positioning accuracy

随着现代电子战的发展, 传统的单基地雷达面临着电子干扰、隐身目标、低空突防和反辐射导弹四大威胁, 由于双基雷达固有的优势, 日益受到人们的重视。T-R型双基地跟踪雷达采用专门的发射站对目标进行照射, 接收站接收目标的散射信号, 对目标的高低角、方位角和距离进行精确的测量。由于发射站和接收站是分置的, 因此必需解决发射站和接收站之间的时间同步、空间同步和频率同步问题; 接收站可对目标的高低角和方位角进行精确测量, 但距离上测到的是双基距离和, 必须解决单基距解算问题; 对于单基地跟踪雷达, 特别是采用相对坐标体制的制导雷达来说, 系统误差对相对测量准确度影响不大, 而对于双基地雷达来说, 在进行单基距解算时, 系统误差可能很大, 必须对系统误差进行校准; 双基地雷达测距误差受目标相对发射站和接收站空间位置的影响, 在基线附近误差很大, 不能满足跟踪雷达的性能要求, 因此通常需要采用联网的方式构成多个双基地雷达系统, 通过数据融合提高目标的定位性能。

### 1 发射站和接收站之间的同步问题

发射站和接收站之间的同步问题包括时间同步、频率同步和空间同步。

1.1 时间同步

雷达依据回波相对于发射脉冲的时延来测距,因此收发站之间必须保持严格的时间同步,通常的同步方式有直接同步、间接同步和独立同步。

直接同步技术是通过数传通道将发射脉冲直接传输到接收站,这种同步方法的准确度取决于数传通道引入的误差,由于要求脉冲前后沿陡直,且要求数传通道具有较高的带宽,对通信系统的要求则较高。

间接同步是在收发站之间各设置一个高稳定的时钟,其同步准确度取决于两个钟的稳定度和校准的周期。

独立同步是通过设置辅助的接收通道截获发射机的直达信号,从中提取同步信号,通常难以获得较高的准确度,只用于告警和粗测<sup>[1]</sup>。

1.2 频率和相位同步

为了保证收发站的协调工作,还需要进行频率同步,对于脉压和动目标等相参工作方式,还需要实现相位同步。既可以通过直接传递频率和相位同步信息实现直接同步,也可采用高稳定的时钟实现间接同步<sup>[2]</sup>。

1.3 空间同步

为了实现对目标的跟踪,还必须实现空间同步,常用的空间同步方法有:发射窄波束扫描,接收宽波束泛光照射;发射窄波束扫描,接收多波束接收;发射宽波束泛光照射,接收天线窄波束扫描接收;发射天线泛光照射,接收天线多波束接收;发射和接收窄波束同步扫描,在两窄波束条件下的脉冲追赶式扫描方法,可以达到与单基地雷达同样的空间扫描特性,但要求在扫描过程中接收波束改变宽度和扫描速度。

2 T-R 双基地雷达的单基距解算

在双基地雷达中,接收站得到的是双基到目标的双基距离和(以后简称“距离和”),如何解算目标到接收站的距离(以后简称“单基距”),是系统要解决的关键技术问题。传统的方法是根据距离和以及目标的高低角、方位角,通过双基方程解算出单基距;第2种方法是通过调整双基地雷达发射站触发脉冲的延时,使双基信号与接收站单基工作时的信号重合,可使距离跟踪系统的输出等于单基距;第3种方法是通过调整接收站测距同步脉冲的延时,以保证接收站坐标跟踪系统对双基信号进行跟踪时,输出的距离为单基距。

2.1 双基地雷达基本方程

图1为双基地与目标的示意图, $\theta_R$ 为双基与目标平面上的目标视角, $L$ 为双站距, $R_T$ 为目标到发射站的距离, $R_R$ 为单基距,设 $R_S = R_T + R_R$ 为距离和,在 $\triangle TOR$ 中,按余弦定理有<sup>[2-3]</sup>:

$$R_T^2 = R_R^2 + L^2 - 2R_R L \cos \theta_R$$

将 $R_T = R_S - R_R$ 代入上式得:

$$R_R = \frac{R_S^2 - L^2}{2(R_S - L \cos \theta_R)} \tag{1}$$

式(1)为双基地雷达基本方程。由图1几何关系,还可以证明有:

$$\cos \theta_R = \cos \varepsilon_R \cdot |\cos \beta_R| \tag{2}$$

将式(2)代入式(1),可得双基地方程的实用形式:

$$R_R = \frac{R_S^2 - L^2}{2(R_S - L \cos \varepsilon_R |\cos \beta_R|)} \tag{3}$$

这种方法通过解三角形求单基距,简单明了。当把现有的单基地雷达用作双基地雷达接收站时,必须对系统的软、硬件进行改进,另外由于收到的是距离和,还必须进行显示校正。

2.2 调整发射站触发脉冲延时的双基地雷达测距方法

除了采用双基方程进行单基距的解算,也可通过调整发射站触发脉冲延时的方式,使接收站双基信号和接收站单基工作时的信号重合,通过接收站对双基信号的跟踪可直接得到单基距。

接收站双基工作时,目标反射信号相对发射信号的延时为 $(R_R + R_T)/c$ ,而接收站单基工作时,目标反射信号

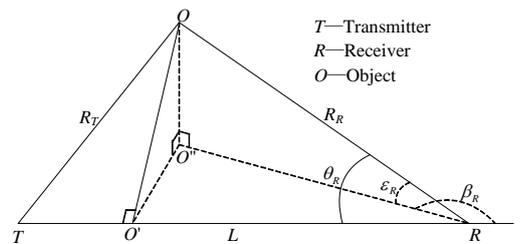


Fig.1 Geometry of bistatic radar and target  
图1 双基地与目标间的几何关系

相对发射信号的延时为  $2R_R/c$ ，如图 2 所示，在双基地工作时，可通过调整发射站发射机触发脉冲的延时，使双基信号与接收站单基工作时的信号重合，从而实现接收站的双基测距。图中  $\Delta\tau = (R_R - R_T)/c$ ， $\Delta\tau$  为正，则脉冲应向右调整  $|\Delta\tau|$ ，反之向左调整  $|\Delta\tau|$ 。

该方法在将现有的单基地雷达改装为双基地雷达时，可避免对接收站的改装，同时可实现双基显示信号的校正。缺点是对通信系统要求高，当通信系统延时大时，回路不稳定，因此采用该方法测距时，必须对接收站和发射站间的通信延时进行限定<sup>[4]</sup>。

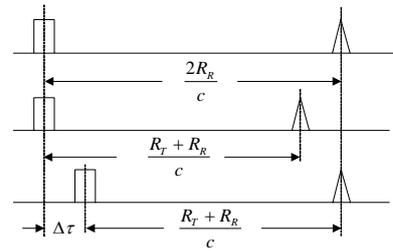


Fig.2 Range solving schematic drawing of bistatic radar in adjusting of the transmitted spring pulse  
图 2 调整发射站触发脉冲双基测距示意图

### 2.3 调整接收站测距同步脉冲延时的双基地雷达测距方法

通过调整发射站触发脉冲延时的测距方法对通信系统要求高，为了降低对通信系统的要求，可通过调整接收站测距同步脉冲的延时，以保证接收站坐标跟踪系统对双基信号进行跟踪时，输出的距离为目标的双基距离。通过调整接收站测距同步脉冲延时进行双基地测距与采用调整发射站触发脉冲延时的方法原理基本相同，所不同的是调整测距同步脉冲延时的方法所有的运算都在接收站进行，而目标坐标与当前时刻的延时小，可有效解决对通信系统延时要求高的矛盾<sup>[5]</sup>。

## 3 双基地雷达测量误差问题

雷达的测量存在 2 种误差：随机误差和系统误差。随机误差原则上可通过匹配滤波的方法减到最小，而系统误差是一种确定性误差，只能通过校准的方法来解决。当然在校准过程中，还会产生一些新的随机误差，如校准设备本身引入的随机误差。距离和、高低角和方位角的系统误差，可通过对已知目标的跟踪，通过最小二乘或最优化的方法来估计，已知目标可以是带有 GPS 的目标机，也可以把具有更高测量准确度雷达的测量结果作为真值，这种方法通常实现困难。当接收站具有单站工作能力时，可借鉴组网雷达的误差配准算法，通过多站对同一目标的跟踪，估算出各站高低角和方位角的系统误差。根据坐标系的不同，可分为基于球极投影的误差配准算法，如实时质量控制(Real-Time Quality Control, RTQC)误差配准算法、最小二乘(Least Squares, LS)误差配准算法、广义最小二乘(Generalized Least Squares, GLS)误差配准算法、精确极大似然配准算法和基于大地坐标系(Earth Centered Earth Fixed, ECEF)的误差配准算法，这些方法计算都比较复杂。

一种简便的方法是将同一时刻各站的数据变换到某一站后，将各坐标差值的平方和作为目标函数，采用非线性规划或遗传算法等方法，使目标函数最小，求出各站的系统误差<sup>[6-8]</sup>。需要说明的是双基距离和的系统误差只能通过跟踪地标或已知目标来估计。

## 4 双基地雷达的单基距测量准确度及其改进

设距离和  $R_S$ 、方位角  $\beta_R$ 、高低角  $\varepsilon_R$  及  $L$  的标准差(均方根误差)分别为  $\sigma_{R_S}, \sigma_{\beta_R}, \sigma_{\varepsilon_R}, \sigma_L$ ，由式(3)解算单基距，则单基距标准差为：

$$\sigma_{R_R} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_R}{\partial R_S}\right)^2 \sigma_{R_S}^2 + \left(\frac{\partial R_R}{\partial \beta_R}\right)^2 \sigma_{\beta_R}^2 + \left(\frac{\partial R_R}{\partial \varepsilon_R}\right)^2 \sigma_{\varepsilon_R}^2 + \left(\frac{\partial R_R}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2} \quad (4)$$

假定发射站相对于接收站的极坐标为  $\varepsilon_0 = 0^\circ, \beta_0 = 0^\circ, L = 40 \text{ km}$ ，目标高度为  $8000 \text{ m}$ ， $\sigma_{\varepsilon} = 2', \sigma_{\beta} = 2', \sigma_{R_S} = 5 \text{ m}$ ， $\sigma_L = 2 \text{ m}$ ，单基距解算标准差的仿真结果如图 3 所示。从图中可以看出，在基线附近误差比较大。为了改善定位性能，可通过联网的方法形成联网的多个双基地系统。在联网双基地雷达系统中，每个双基地系统首先对目标进行定位，然后将定位数据传送到中心站，中心站通过坐标转换，将各双基地系统的定位数据转换到公共坐标系中，然后通过数据融合，得到目标的定位标准差<sup>[9-10]</sup>。

数据融合可采用简化加权最小二乘算法，得到目标位置估计值：

$$\hat{\mathbf{X}}_{\text{WLS}} = \left\{ \sum_{i=1}^N [\mathbf{P}^{(i)}]^{-1} \right\}^{-1} \sum_{i=1}^N [\mathbf{P}^{(i)}]^{-1} \mathbf{X}^{(i)} \quad (5)$$

式中： $\mathbf{X}^{(i)}$ 、 $\mathbf{P}^{(i)}$  为第  $i$  个接收站得到的位置矢量及其误差协方差矩阵。图 4 为以一发四收的多基地系统为例进行

简化加权最小二乘算法数据融合的仿真结果,发射站居于中心,接收站距照射站40 km,照射站和接收站位于同一平面上,设各站的测量标准差为 $\sigma_{\varepsilon_R} = 2'$ , $\sigma_{\beta_R} = 2'$ , $\sigma_{R_S} = 5$  m, $\sigma_L = 2$  m,目标的高度为8 000 m。由图中可以看出,在基线附近单基距标准差得到明显改进。

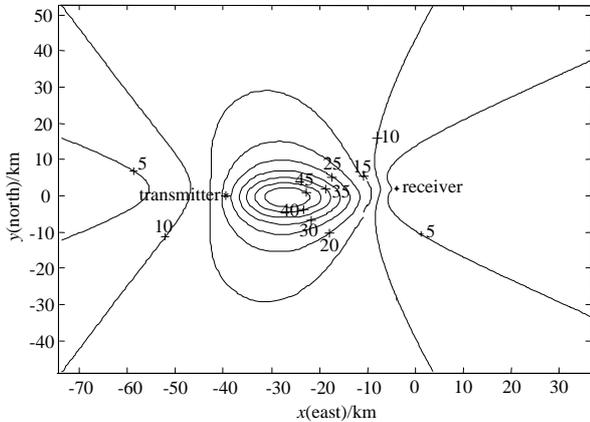


Fig.3 Distribution of standard deviation for a single base range  
图3 单基距解算标准差分布图

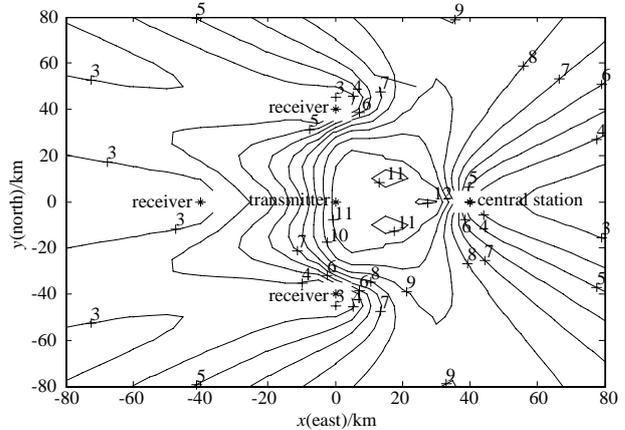


Fig.4 Distribution of standard deviation after fused in central station  
图4 数据融合后中心站单基距解算标准差分布图

## 5 结论

本文针对T-R型双基地跟踪雷达,对其时间同步、频率和相位同步、空间同步等进行了阐述,分析讨论了双基地雷达的3种单基距解算方法,尤其调整发射站或接收站脉冲延时的测距方法,对现役单基地跟踪雷达改装为双基地有一定的实用价值。然后对双基地雷达测量误差问题进行了简单讨论。文章重点对联网双基地雷达数据融合算法进行研究,对一发四收的多基地雷达单基距解算准确度进行仿真,仿真结果表明,通过联网双多基地雷达数据融合,基线附近单基距标准差得到了明显改进,提高了双多基地跟踪雷达测距的准确度。

## 参考文献:

- [1] 朱敏. 双(多)基地雷达系统中的若干关键技术研究[J]. 现代雷达, 2002,24(6):1-5.
- [2] 杨振起,张永顺,骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
- [3] 谢军伟,余江明,张启亮,等. 调整发射站触发脉冲的双基地雷达测距方法[J]. 空军工程大学学报, 2007,8(6):31-33.
- [4] 谢军伟,张永顺. 双基地雷达系统中的单基距解算[C]// 信息产业部雷达网第十七届年会暨雷达技术应用研讨会文集. [出版者不详], 2007.
- [5] 朱永文. 双基地雷达定位误差模型与保精度空域划分方法[J]. 空军工程大学学报, 2006,7(1):20-22.
- [6] 何友,修建娟. 雷达数据处理及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2006:215-225.
- [7] Zhou Y F, Henry L. An Exact maximum likelihood registration algorithm for data fusion[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1997,45(6):1560-1572.
- [8] Zhou Yifeng, Henry L. Sensor alignment with Earth-Centered Earth-Fixed(ECEF) coordinate system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1993,35(2):410-417.
- [9] 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, 1996:6-18.
- [10] 何黎星,孙仲康. 双基地及其联网系统的定位方法及精度分析[J]. 航空学报, 1993,14(3):A542-54.

## 作者简介:



谢军伟(1979-),男,河南禹州人,博士,教授,主要研究方向为雷达组网、抗干扰性能评估,email:zxcxjw@126.com.

张旭春(1972-),女,甘肃陇西人,博士,副教授,主要研究方向为宽带天线研究.

张启亮(1981-),男,辽宁辽阳人,硕士,讲师,主要研究方向雷达信号处理,现代雷达体制及组网技术.

冯广飞(1984-),男,陕西眉县人,在读硕士研究生,主要研究方向为现代雷达体制及组网技术.