

非合作双基地雷达测距方法与精度分析

宋杰, 何友, 关健

(海军航空工程学院信息融合技术研究所 山东 烟台 264001)

【摘要】介绍了非合作双基地雷达的基本几何关系,讨论了非合作双基地雷达中4个重要参数(基线距离、双基地距离差、发射站目标方位角、接收站目标方位角)的测量方法,利用这4个参数可构成4种测距算法。在考虑基线距离误差的情况下,推导了这4种算法的测距误差公式。仿真结果表明,各算法测距精度与双基地雷达的几何结构有关,通过优化可得空间测距精度最高区域。实际系统的测距方案应根据所能测出的参数进行选择,同时应注意各算法的适用区域。

关键词 精度; 双基地雷达; 测距; 非合作; 优化

中图分类号 TN957

文献标识码 A

doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.03

Distance Measuring Method and Accuracy Analysis in Non-Cooperative Bistatic Radar

SONG Jie, HE You, and GUAN Jian

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University Yantai Shandong 264001)

Abstract The basic geometrical relationship of non-cooperative bistatic radar is introduced, and the measuring methods of four parameters (baseline distance, bistatic distance difference, transmitter look angle and receiver look angle), which can compose four distance measuring methods, are discussed. In the condition of considering the error of baseline distance, the error expressions of four distance measuring methods are deduced. The simulation results show that the distance measuring accuracy of each method is relative to the geometrical position of bistatic radar, and the district of highest distance measuring accuracy in space can be achieved by optimization. In practical systems, the selection of distance measuring method should depend on the parameters which can be measured, and the applicable region of each method should be taken in consideration.

Key words accuracy; bistatic radar; distance measurement; non-cooperative; optimization

双基地雷达由于收发间隔较远、接收站不发射电磁波而具有良好的抗有源定向干扰和反辐射导弹的能力,因此在雷达界备受重视。常规双基地雷达的接收站和发射站位置固定,接收站和发射站之间采用一定的物理链路进行时间同步与频率同步,被称为合作式双基地雷达。当利用广播、电视或卫星等外辐射源或者己方甚至敌方非合作雷达来探测目标时,接收站和发射站之间没有专门的物理链路进行时间同步与频率同步,则称为非合作式双基地雷达。

本文主要研究基于脉冲雷达辐射源的非合作双基地雷达系统。在一定的同步技术条件下,非合作双基地雷达系统可获得4个观测量:基线距离、双基地距离差、发射站目标方位角、接收站目标方位角。组合上述4个观测量可得到4种不同的测距算法。本文将重点讨论上述4个观测量的测量方法,以及各算法的测距精度。

1 基本几何关系

在如图1所示的应用中^[1],舰载非合作双基地雷达接收机进入敌对或非合作信号环境,利用舰载非合作雷达辐射源的电磁辐射来探测舰船目标。非合作双基地雷达接收机通过接收来自非合作雷达辐射源的直达波和来自目标的散射回波来完成对目标的定位。

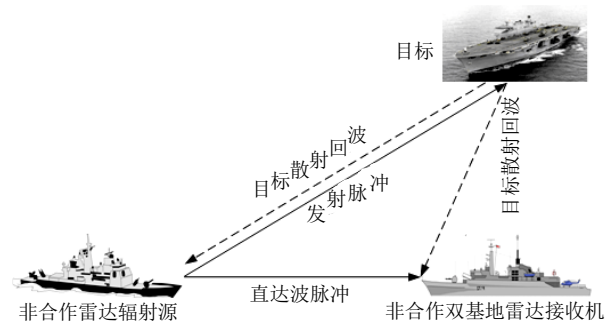


图1 典型的非合作双基地雷达系统

收稿日期: 2007-12-25; 修回日期: 2008-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(60672139, 60672140)

作者简介: 宋杰(1981-), 男, 博士, 主要从事无源雷达信号处理方面的研究。

基于上述应用环境,可以构建双基地平面模型^[2],如图2所示。该模型条件下,辐射源与目标都假设与接收机位于同一平面。即使辐射源、目标和接收机位于不同高度的飞机平台,由于它们之间的水平距离通常远大于它们之间的垂直距离,由该平面模型引起的相对误差很小,此时该双基地平面模型仍然适用^[3]。

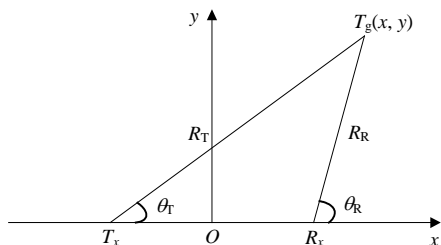


图2 非合作双基地雷达几何关系

图2中, T_x 为发射站; R_x 为接收站; T_g 为目标。 T_x 与 R_x 间距为基线距离 L ; θ_T 和 θ_R 分别为发射站与接收站目标方位角; R_T 和 R_R 分别为目标到发射站与目标到接收站的距离。双基地距离差为 $R_D = R_T + R_R - L$ 。

2 参数测量方法

在一定的同步技术条件下^[4-7],可获得双基地三角形的4个重要参数: L 、 R_D 、 θ_T 和 θ_R 。然而,这些参数的测量受到辐射源的平台位置、扫描方式和接收机的天线配置情况等因素的影响。下面将详细讨论不同情况下的上述参数的测量方法。

2.1 基线距离测量方法

基线距离 L 是非合作双基地雷达中的一个基本参数,可以通过多种方法得到:当发射站位于固定平台且位置已知时,可以通过测量发射站与接收站各自的地理坐标来确定 L ;当发射站位置未知,但辐射源采用圆周机械扫描方式时,接收机可以采用相距为 d 的两部全向天线,通过测量辐射源信号到达两个天线的时差 Δt 、辐射源天线扫描速度 ω 和辐射源入射信号方位角 θ 来确定距离 L ^[8];当发射站位置未知,且辐射源采用非固定速度扫描、扇扫或电子扫描时,接收机可以采用两部相距为 d 的定向天线同步地以预定速度 ω 进行机械圆周扫描的方法来测定距离 L ^[9],通过让接收机天线自身以预定速度扫描,辐射源的距离计算就可以不依靠辐射源的扫描速度来确定。

2.2 双基地距离差测量方法

双基地距离差可以通过测量直达波与目标散射

回波的时差 Δt ,再乘以光速 c 来计算。通常情况下,目标与接收站一般不被发射机天线主瓣同时覆盖,直达波往往来自辐射源的旁瓣辐射,因此要求接收机能够从辐射源的旁瓣连续截获直达波信号。若直达波和目标散射回波受杂波和噪声的干扰较为严重,可以通过互相关杂波处理技术来提高时差 Δt 的测量精度。

2.3 发射站目标方位角测量方法

当辐射源以恒定速度进行圆周扫描时, θ_T 的确定可以通过测量辐射源扫过接收机和目标之间的时间间隔 ΔT 和辐射源扫描一周的总时间 T 来实现。将扫描间隔 ΔT 除以扫描周期 T ,然后再乘以 360° 便可计算出 θ_T 。当辐射源为非固定速度扫描、扇扫或电子扫描时,通常很难直接测得 θ_T ,只能通过其他参数和解双基地三角形间接算得。

2.4 接收站目标方位角测量方法

当接收站采用定向搜索天线或阵列天线时,利用单脉冲等技术可以同时确定直达波与目标散射回波的到达角,从而可以确定接收站目标方位角 θ_R 。有时接收站为了设计简单起见采用全向天线,此时无法直接测得 θ_R ,只能通过其他参数和解双基地三角形间接算得。

3 测距算法与精度分析

对以上4个观测量,只需知道其中的任意3个,就可以解算出接收站到目标的距离 R_R 。利用不同的观测量组合,可以有以下4种测距算法:

算法1(已知 L 、 R_D 和 θ_R):

图2表示了双基地平面上的各个量之间的几何关系。由余弦定理可得:

$$R_T^2 = R_R^2 + L^2 - 2R_R L \cos(180^\circ - \theta_R) \quad (1)$$

令 $R_D = R_T + R_R - L$,将 $R_T = R_D - R_R + L$ 代入式(1),可得:

$$R_{R1} = f_1(L, R_D, \theta_R) = \frac{R_D^2 + 2R_D L}{2(R_D + L + L \cos \theta_R)} \quad (2)$$

算法2(已知 L 、 R_D 和 θ_T):

同理,由余弦定理可得:

$$R_R^2 = R_T^2 + L^2 - 2R_T L \cos \theta_T \quad (3)$$

将 $R_T = R_D - R_R + L$ 代入式(3),可得:

$$R_{R2} = f_2(L, R_D, \theta_T) = \frac{(R_D + L)^2 + L^2 - 2L(R_D + L) \cos \theta_T}{2(R_D + L - L \cos \theta_T)} \quad (4)$$

算法3(已知 L 、 θ_T 和 θ_R):

如图2所示,由正弦定理可得:

$$R_{R3} = f_3(L, \theta_T, \theta_R) = \frac{L \sin \theta_T}{\sin(\theta_R - \theta_T)} \quad (5)$$

算法4(已知 R_D 、 θ_T 和 θ_R):

同理, 由正弦定理可得:

$$\frac{R_R}{\sin \theta_T} = \frac{R_T}{\sin \theta_R} = \frac{L}{\sin(\theta_R - \theta_T)} \quad (6)$$

将 $R_T = R_D - R_R + L$ 代入式(6), 可得:

$$R_{R4} = f_4(R_D, \theta_T, \theta_R) = \frac{R_D \sin \theta_T}{\sin \theta_R + \sin \theta_T - \sin(\theta_R - \theta_T)} \quad (7)$$

为了比较各算法的测距精度, 下面对各算法进行误差分析。假定观测误差服从零均值、高斯分布且相互独立, 对应 L 、 R_D 、 θ_T 和 θ_R 的误差标准差分别为 dL 、 dR_D 、 $d\theta_T$ 和 $d\theta_R$, 则各算法的测距误差 dR_R 为:

算法1:

$$dR_{R1} = \left[\left(\frac{\partial f_1}{\partial L} dL \right)^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial R_D} dR_D \right)^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial \theta_R} d\theta_R \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

利用式(2)计算各个变量的偏导数分别为:

$$\frac{\partial f_1}{\partial L} = \frac{R_D^2 (1 - \cos \theta_R)}{2(R_D + L + L \cos \theta_R)^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial R_D} = \frac{(R_D + L)^2 + L^2 + 2(R_D + L)L \cos \theta_R}{2(R_D + L + L \cos \theta_R)^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \theta_R} = \frac{((R_D + L)^2 - L^2)L \sin \theta_R}{2(R_D + L + L \cos \theta_R)^2} \quad (11)$$

算法2:

$$dR_{R2} = \left[\left(\frac{\partial f_2}{\partial L} dL \right)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial R_D} dR_D \right)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial \theta_T} d\theta_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

利用式(4)计算各个变量的偏导数分别为:

$$\frac{\partial f_2}{\partial L} = \frac{(R_D + 2L)^2 (1 - \cos \theta_T) - 2L^2 \sin^2 \theta_T}{2(R_D + L - L \cos \theta_T)^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial R_D} = 1 - \frac{(R_D + L)^2 + L^2 - 2(R_D + L)L \cos \theta_T}{2(R_D + L - L \cos \theta_T)^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_T} = \frac{((R_D + L)^2 - L^2)L \sin \theta_T}{2(R_D + L - L \cos \theta_T)^2} \quad (15)$$

算法3:

$$dR_{R3} = \left[\left(\frac{\partial f_3}{\partial L} dL \right)^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial \theta_T} d\theta_T \right)^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial \theta_R} d\theta_R \right)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

利用式(5)计算各个变量的偏导数分别为:

$$\frac{\partial f_3}{\partial L} = \frac{\sin \theta_T}{\sin(\theta_R - \theta_T)} \quad (17)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \theta_T} = \frac{L \sin \theta_R}{\sin^2(\theta_R - \theta_T)} \quad (18)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \theta_R} = \frac{-L \sin \theta_T \cos(\theta_R - \theta_T)}{\sin^2(\theta_R - \theta_T)} \quad (19)$$

算法4:

$$dR_{R4} = \left[\left(\frac{\partial f_4}{\partial R_D} dR_D \right)^2 + \left(\frac{\partial f_4}{\partial \theta_T} d\theta_T \right)^2 + \left(\frac{\partial f_4}{\partial \theta_R} d\theta_R \right)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

利用式(7)计算各个变量的偏导数, 可得:

$$\frac{\partial f_4}{\partial R_D} = \frac{\sin \theta_T}{\sin \theta_R + \sin \theta_T - \sin(\theta_R - \theta_T)} \quad (21)$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial \theta_T} = \frac{R_D \sin \theta_R (\cos \theta_T - 1)}{(\sin \theta_R + \sin \theta_T - \sin(\theta_R - \theta_T))^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial \theta_R} = \frac{R_D \sin \theta_T (\cos(\theta_R - \theta_T) - \cos \theta_R)}{(\sin \theta_R + \sin \theta_T - \sin(\theta_R - \theta_T))^2} \quad (23)$$

为了便于比较各算法测距精度与双基地几何结构的关系, 需要将上述测量参数用同一直角坐标系中的 x 和 y 值表示:

$$R_D = \sqrt{(x + L/2)^2 + y^2} + \sqrt{(x - L/2)^2 + y^2} - L \quad (24)$$

$$\theta_T = \arccos \left(\frac{x + L/2}{\sqrt{(x + L/2)^2 + y^2}} \right) \quad (25)$$

$$\theta_R = \arccos \left(\frac{x - L/2}{\sqrt{(x + L/2)^2 + y^2}} \right) \quad (26)$$

假设测量参数 L 固定不变。将式(24)~式(26)代入前面的测距误差公式, 就可以很方便地观察各算法测距精度的空间分布规律。

4 仿真分析

本文对非合作双基地雷达系统中各算法的测距精度进行了仿真, 仿真计算采用的参数如下:

基线距离 $L=100$ km; 观测误差 $dL=100$ m;

$dR_D=100$ m; $d\theta_T = d\theta_R = 0.003$ rad; T_x 代表雷达辐射源; R_x 代表非合作双基地雷达接收站(图中所有数值单位: km)。

图3a~图3d分别为算法1~算法4的测距精度等值线分布图。由仿真结果可看出:

(1) 4种算法都存在一个盲区, 即基线区域, 在该区域内4种算法的测距精度急剧下降。

(2) 算法1和算法2的测距精度总体较好, 其中算法1在接收站近区(不含基线区)精度较高, 算法2在发射站近区(不含基线区)精度较高。在测角误差相同的条件下, 算法1和算法2的测距精度分布具有镜像关系。

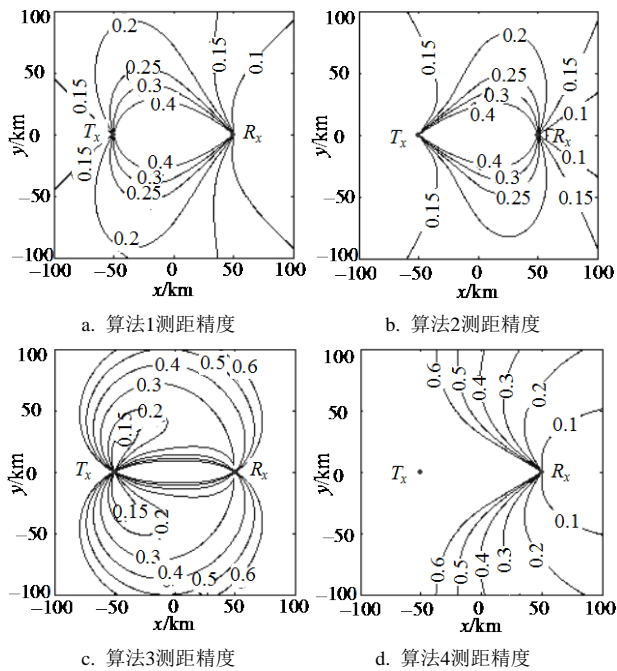


图3 非合作双基地雷达系统测距精度分布图

(3) 算法3的测距精度在基线两侧近区较好, 在基线和基线延长线区域精度很差。

(4) 算法4的测距精度在基线的接收站一侧延长线近区较好, 而在基线、基线两侧近区和基线的发射站一侧延长线区域精度很差。

5 实际系统测距方案的选择

前面的分析表明, 以上4种算法都是可行的。实际系统中, 具体采用哪一种算法依赖于哪几个参数可测。根据可能获得的观测量, 存在如下3种情况:

(1) 当辐射源为非固定速度扫描、扇扫或电子扫描, 接收机采用两部同步圆周扫描的定向天线时, 只能获得3个观测量 L 、 R_D 和 θ_r 。此时, 只能采用算法1。

(2) 当辐射源为圆周机械扫描方式, 而接收站为了设计简单起见采用全向天线时, 只能获得3个观测量 L 、 R_D 和 θ_r 。此时, 只能采用算法2。

(3) 当辐射源为圆周机械扫描方式, 接收站采用定向搜索天线或阵列天线时, 运用前面的参数测量方法可同时得到 L 、 R_D 、 θ_r 和 θ_r 这4个观测量。由于4个观测量中只需知道其中任意3个, 即可对目标进行测距, 于是出现了信息冗余, 因此可以将4种测距算法进行融合处理实现测距性能的优化。

常见的优化算法有简化加权最小二乘法和子集选优法^[10]。考虑到4种算法之间的相关性以及优化的计算量, 实际应用中可基于子集选优法原理, 采用

如下简洁而实用的方法: 事先画出如图4所示的高精度算法分布图(仿真参数不变, 观察范围: x 方向为 ± 100 km; y 方向为 ± 100 km), 然后粗略确定目标所在的大致位置, 根据目标所在的位置选择精度最高的算法。图5为选择测距精度最高的算法进行计算, 即经过优化处理后的测距精度等值线分布图(仿真参数不变, 观察范围不变)。可见, 优化处理后的测距精度在各个区域都较高, 改善了采用单一测量组合时的测距性能。

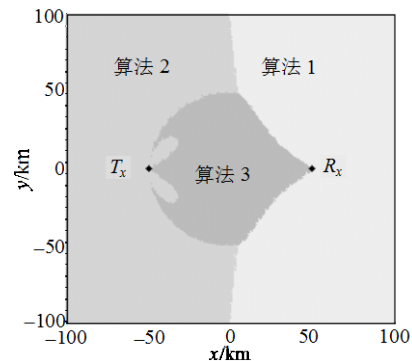


图4 高精度算法分布图

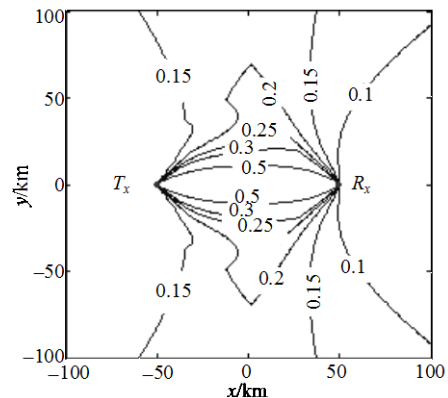


图5 优化后的精度分布图

然而, 非合作双基地测距有一固有盲区, 即在基线区域。就非合作双基地测距而言, 这一盲区无法克服, 必须采用多基地测距的方法来解决。

6 结论

综上所述, 非合作双基地雷达系统中参数的测量方法受到辐射源的平台位置、扫描方式和接收机的天线配置情况等因素的影响, 有时并不是所有的测量参数都能同时测得, 此时, 测距算法应根据所能测出的参数进行选择, 同时应注意各算法的适用区域。如果能同时得到4个观测量, 那么就可以根据各算法精度在空间分布的不同, 选择精度最高的算法进行计算, 从而能得到较好的测距性能。

(下转第221页)