

文章编号 1005-0388(2011)05-0951-05

# 双基地雷达的主要性能分析与试验方法研究

戴征坚 谭 昕 许建平

(海军装备研究院, 北京 100161)

**摘 要** 双基地雷达的主要性能指标均与收/发两站的布站方式及目标所处的空间位置有关, 这与单基地雷达有很大的差异, 不能直接采用单基地雷达的试验方法来检验双基地雷达的主要性能指标。为解决双基地雷达的试验与性能评估问题, 重点围绕双基地雷达的探测范围、测量精度、分辨力等主要性能进行了理论分析与计算, 据此提出了合理可行的双基地雷达主要性能试验方法, 有关研究成果已经在实用双基地雷达中得到了成功的应用。

**关键词** 双基地雷达; 测量精度; 分辨力; 试验方法

**中图分类号** TN958

**文献标志码** A

## 1. 引 言

双基地雷达因采用收/发分置、无源被动接收的技术体制而被认为是对抗“隐身目标、反辐射导弹、电子干扰”的一种有效方法<sup>[1]</sup>, 目前双基地体制雷达已经逐步实用化, 并向着空载、星载、多基地等方向发展<sup>[2-3]</sup>。双基地雷达和单基地雷达有许多相似之处, 亦存在着一些显著的差异, 双基地雷达收/发分置, 由此带来两个方面的问题, 一是系统复杂性增加, 因为收/发站间必须实现时间、空间和相位同步; 二是双基地雷达的战术性能指标已不能用与单基地雷达相类似的方法来衡量, 因为双基地雷达的探测范围、测量精度、分辨力等战术性能指标均与收/发两站的布站方式及目标所处的空间位置有关。这在双基地雷达的研制、试验、性能评估及使用中将面临许多新问题, 需要针对双基地雷达的探测范围、测量精度、分辨力与试验方法等问题进行充分的研究, 以利于双基地雷达的研制、试验、性能评估与使用。

## 2. 理论分析

### 2.1 双基地雷达的探测范围

双基地雷达以收/发分置为其本质特征, T-R 型双基地雷达的几何关系如图 1 所示。

其中  $L$  为双基地雷达基线距离,  $\theta_T$  和  $\theta_R$  分别为双基地平面上以发射站 T 和接收站 R 为本地坐

标原点的方位角,  $R_T$  和  $R_R$  分别为发射站和接收站到目标  $T_g$  间的距离,  $\beta = \theta_R - \theta_T$  称为双基地角, 它是以目标为顶点, 发射站、接收站与目标连线之间的夹角。

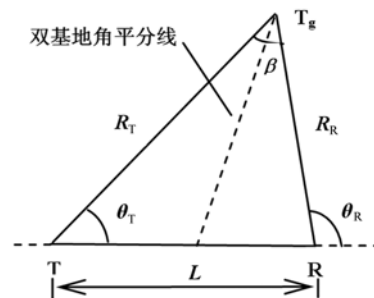


图 1 双基地雷达的几何关系

#### 2.1.1 视线约束下双基地雷达的观察面积

受地球曲率的影响, 对给定高度的发射站和接收站, 目标必须同时位于发射站和接收站的视线内, 因此对目标观察的视线受发射站、接收站为圆心的覆盖圆约束(如图 2 所示)。

视线约束下双基地雷达观测面积指的是以目标高度  $h_t$  为参数两覆盖圆相交线所围成的面积(如图 2 中的  $A_c$ ), 视线约束下双基地雷达观察面积  $A_c$  可近似为<sup>[4]</sup>

$$A_c \approx \frac{1}{2} [R_R^2 (\varphi_R - \sin \varphi_R) + R_T^2 (\varphi_T - \sin \varphi_T)]$$

(1)

收稿日期: 2010-11-30

联系人: 戴征坚 E-mail: tx1119996@sina.com

式中:  $\varphi_R = 2\cos^{-1}(\frac{R_R^2 - R_T^2 + L^2}{2R_R L})$ ;  
 $\varphi_T = 2\cos^{-1}(\frac{R_T^2 - R_R^2 + L^2}{2R_T L})$ . 式(1)适用于  $L + R_T > R_R > L - R_T$  (或  $L + R_R > R_T > L - R_R$ ) 的情况。

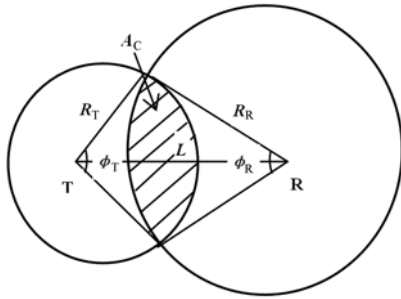


图2 视线约束下双基地雷达的观测面积  $A_C$

### 2.1.2 能量约束下双基地雷达的对空探测范围

能量约束下双基地雷达平面上的探测范围为卡西尼(Cassini)曲线。不考虑地球曲率及大气折射的影响,双基地雷达的探测范围用直角坐标表示为

$$(x^2 + y^2)^2 - 2(\frac{L}{2})^2(x^2 - y^2) = k_B^2 - (\frac{L}{2})^4 \quad (2)$$

$$k_B^2 = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma_b(\beta) (F'_T F'_R)^2 (f_T f_R)^2}{(4\pi)^3 k T_s B_n (S/N)_{\min} L_T L_R} = k_0^2 f_T^2 f_R^2 \quad (3)$$

式(3)中:  $k_0 = k_B / (f_T f_R)$ ,  $f_T^2$ 、 $f_R^2$  分别为发射和接收天线的功率增益方向性系数,其它参数为双基地雷达方程的相关参数。由卡西尼曲线绕 X 轴旋转而成的卡西尼曲面方程为

$$(x^2 + y^2 + z^2)^2 - 2 \cdot (\frac{L}{2})^2(x^2 - y^2 - z^2) = k_B^2 - (\frac{L}{2})^4 \quad (4)$$

如图3所示,以发射站 T 为坐标点,当计算双基地雷达在方位  $\theta_{T0}$ 、仰角  $\phi_T$  上的探测距离时,可通过系列坐标变换后计算得到。

式(4)在垂直面  $y''=0$  上的极坐标表示式为<sup>[5]</sup>

$$r^4 - 2L\cos\theta_{T0}\cos\phi_T r^3 + L^2 r^2 - k_B^2 = 0 \quad (5)$$

令  $g_T(\phi_T) = f_T^2$ ;  $g_R(\phi_R) = f_R^2$ , 则式(5)可表示为  $r^4 - 2L\cos\theta_{T0}\cos\phi_T r^3 + L^2 r^2 - k_0^2 g_T(\phi_T) g_R(\phi_R) = 0$  (6)

### 2.2 目标至接收站距离 $R_R$ 的定位精度

对于两坐标双基地雷达,只能直接测量得到目标的距离和  $R_S = R_T + R_R$ 、目标相对于接收站的角

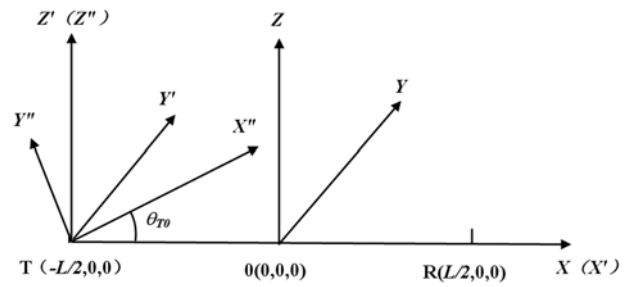


图3 坐标平移变换关系几何图

度  $\theta_R$  和基线长度  $L$ . 在双基地平面上,  $R_R$  是  $R_S$ 、 $\theta_R$ 、 $L$  等测量值的函数,利用距离和一角度定位方法可以求解目标至接收站的距离  $R_R$ . 假设各测量值是相互独立的,且各自的测量误差是不相关的零均值高斯分布随机过程,只考虑高信噪比下的随机误差,由几何关系可推得

$$R_R = (R_S^2 - L^2)/2/(R_S + L\cos\theta_R) \quad (7)$$

从测量误差理论出发,估算  $R_R$  的均方根误差  $dR_R$  为

$$dR_R = \left\{ \left( \frac{\partial R_R}{\partial R_S} dR_S \right)^2 + \left( \frac{\partial R_R}{\partial L} dL \right)^2 + \left( \frac{\partial R_R}{\partial \theta_R} d\theta_R \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

式中:

$$\frac{\partial R_R}{\partial R_S} = (R_S^2 + L^2 + 2LR_S\cos\theta_R)/2/(R_S + L\cos\theta_R)^2 = (1 + e^2 + 2e\cos\theta_R)/2/(1 + e\cos\theta_R)^2$$

$$\frac{\partial R_R}{\partial L} = -[(R_S^2 + L^2)\cos\theta_R + 2LR_S]/2/(R_S + L\cos\theta_R)^2 = -[(1 + e^2)\cos\theta_R + 2e]/2/(1 + e\cos\theta_R)^2$$

$$\frac{\partial R_R}{\partial \theta_R} = -L(R_S^2 - L^2)\sin\theta_R/2/(R_S + L\cos\theta_R)^2 = -L(1 - e^2)\sin\theta_R/2/(1 + e\cos\theta_R)^2$$

式中  $e = L/R_S = L/(R_T + R_R)$ , 为距离等值线(椭圆)的离心率。

### 2.3 双基地雷达的目标分辨力

对单基地雷达,目标分辨力定义为两个或两个以上具有大致相等的幅度和任意恒定的相位的目标在一维或几维空间上能被区分开的程度。双基地雷达目标分辨力的定义与单基地雷达类似,不同之处在于,单基地雷达目标分辨力是以雷达到目标的视线为参考基准,而双基地雷达则通常是以双基地角平分线为参考基准<sup>[6]</sup>。

#### 2.3.1 双基地雷达的距离分辨力

双基地雷达距离分辨力定义为双基地雷达能分辨的两个目标之间的最小距离间隔<sup>[7]</sup>。双基地雷达

距离分辨单元宽度定义为两个同心的双基地距离等值线椭圆之间的间距  $\Delta R_B$ , 即两个共焦点椭圆  $R_T + R_R = 2a$  和  $R'_T + R'_R = 2a'$  ( $a' > a$ ) 间的间距; 可见, 双基地雷达的距离分辨力与单基地雷达不同, 它不仅与接收机输出脉冲宽度有关, 而且还与目标所处位置以及波束宽度有关。双基地雷达距离分辨单元宽度  $\Delta R_B$  的隐含表达式为

$$\begin{aligned} [R_T^2 \sin^2(\beta/2) + (R_T \cos(\beta/2) + \Delta R_B)^2]^{1/2} + \\ [R_R^2 \sin^2(\beta/2) + (R_R \cos(\beta/2) + \Delta R_B)^2]^{1/2} = 2a' \quad (9) \end{aligned}$$

式中:

$$R_T = a + [(L^2/2 - 2a^2)/(1 + \cos\beta) + a^2]^{1/2}$$

$$R_R = a - [(L^2/2 - 2a^2)/(1 + \cos\beta) + a^2]^{1/2}$$

当两目标(目标1和目标2)连线与双基地角平分线共线时, 两目标实际空间距离为:  $\Delta R_B \approx c\tau/(2\cos(\beta/2))$ 。当两个目标的连线与双基地角平分线不共线, 而是与双基地角平分线有一夹角  $\phi$  时, 两目标的实际间隔  $\Delta R_\phi$  可近似表示为

$$\Delta R_\phi \approx \Delta R_B / \cos\phi \approx \frac{c\tau}{2\cos(\beta/2)\cos\phi} \quad (10)$$

### 2.3.2 双基地雷达的角度分辨力

单基地雷达的角度分辨力定义为同一距离上能分辨两目标的最小角度, 在双基地雷达中, 角度分辨力是用距离等值线上能分辨两目标的最小实际距离间隔来表示的<sup>[7]</sup>。双基地雷达发射波束和接收波束在目标处的横向尺寸分别为  $\Delta\theta_T R_T$  和  $\Delta\theta_R R_R$  (其中  $\Delta\theta_T$ 、 $\Delta\theta_R$  分别为发射和接收天线单程方向图半功率波束宽度), 它们一般不同, 这种差异是由于目标距离不同 ( $R_T \neq R_R$ ) 以及发射孔径和接收孔径不同 ( $\Delta\theta_T \neq \Delta\theta_R$ ) 所致。可见, 在距离等值线上, 由于  $R_T$ 、 $R_R$  的变化, 双基地雷达角分辨力是变化的。

当发射波束横向尺寸大于接收波束横向尺寸时, 由于发射波束横向尺寸较大, 以致对角分辨力不产生影响, 两目标间足够的分辨角度取决于接收波束的横向尺寸, 两目标可分辨的实际横向尺寸间隔为

$$\begin{aligned} (\Delta R_\theta)_u &\approx 2\Delta\theta_R R_R / \sin(90^\circ - \beta/2) \\ &= 2\Delta\theta_R R_R / \cos(\beta/2) \quad (11) \end{aligned}$$

当发射波束横向尺寸等于接收波束横向尺寸时, 在同一距离等值线上由于  $\Delta\theta_T R_T = \Delta\theta_R R_R$ , 发射和接收波束对角分辨力都起作用, 此时两目标可分辨的实际横向尺寸间隔为:

$$(\Delta R_\theta)_u = \Delta\theta_R R_R / \cos(\beta/2) \quad (12)$$

当发射波束横向尺寸小于接收波束横向尺寸时, 两目标可分辨的实际间隔为

$$(\Delta R_\theta)_u = 2\Delta\theta_T R_T / \cos(\beta/2) \quad (13)$$

## 2.4 双基地雷达的试验方法

### 2.4.1 探测范围的试验方法

#### 2.4.1.1 对海探测范围的试验方法

检验双基地雷达的对海探测范围, 主要是检验接收站对海上目标的探测能力, 而这主要受地球曲率的影响。在已知发射站和接收站天线架高的情况下, 可以求得两站的公共视线覆盖区域(如图2所示阴影区域), 也即接收站的对海探测范围。为检验双基地雷达的对海探测范围, 试验目标的航路应选择在图2所示的公共视线覆盖区域内。

#### 2.4.1.2 对空探测范围的试验方法

在进行单基地雷达的对空探测范围试验时, 一般要求试验目标等高匀速从一定距离朝雷达方向直航飞行, 试验目标距雷达约一定距离后转向重新进入, 通过统计若干个有效航次的平均发现距离, 即可得到单基地雷达的对空最大作用距离等指标。双基地雷达对空探测区域有其特殊性, 且目标的双基地雷达截面随双基地角度等因素而变化; 随着双基地角大小的变化, 双基地雷达截面大致可分为三个区域: 准单基地区、前向散射区和双基地区。

准单基地区指的是某个双基地角区域, 在该区域内, 目标的双基地雷达截面可用某个角度上的单基地雷达截面来表示, 对于不同的目标, 其准单基地区的范围将会不同。前向散射区指的是双基地角接近  $180^\circ$  时的区域, 此时目标位于基线附近; 在该区域内, 由于前向散射的作用, 双基地雷达截面显著增大而使小目标有可能被探测到。双基地区指的是准单基地区与前向散射区之间的双基地角区域, 在该区域, 复杂目标的双基地雷达截面一般比其单基地雷达截面小。

针对上述情况, 对空探测范围试验航路的设计应以式(6)计算得到的双基地雷达对空探测范围图为基础, 结合目标的双基地雷达截面进行严密设计。试验目标的航路应能涵盖双基地雷达截面的三个区域, 试验目标的飞行高度应参考双基地雷达对空探测范围图进行合理设置。

#### 2.4.2 测量精度和分辨力的试验方法

对于单基地雷达, 在进行测量精度试验时, 只需要将试验目标的真值和雷达测量值进行比对分析就可以得到雷达的测量精度; 在进行分辨力试验时, 只需要两个试验目标按要求完成相互靠近和远离的动作, 对试验数据进行分析即可完成分辨力试验。双基地雷达的测量精度和分辨力试验如果沿用单基地

雷达的试验方法,试验目标的航路设计将异常困难,在实际情况下也将很难操作。

由于双基地雷达的  $\theta_R$  与  $R_\Sigma$  两参数是直接测量值,通过式(7)解算才能得到目标相对接收站的距离值  $R_R$ ;因此距离值  $R_R$  的测量精度和分辨力均与收/发两站的位置及目标所处的位置有关(双基地雷达的角度分辨力情况类似),无法像单基地雷达一样可用常量表述距离的测量精度与分辨力和角度的分辨力。由于可以通过方位  $\theta_R$ 、距离和  $R_\Sigma$  与收/发站基线  $L$  等测量参数计算得到空间任意目标到接收站的距离的测量精度与分辨力和角度的分辨力,为便于用真实试验目标对双基地雷达的测量精度和分辨力进行试验考核,可以对双基地雷达部分战术指标的表述方式作适当修改,如可采用直接测量得到的方位  $\theta_R$ 、距离和  $R_\Sigma$  的精度和分辨力来表述,试验数据处理也针对方位  $\theta_R$ 、距离和  $R_\Sigma$  的测量值进行;只要方位  $\theta_R$ 、距离和  $R_\Sigma$  的测量精度和分辨力满足规定的要求,则双基地雷达的测量精度和分辨力就是合格的。这样可以在简便、易操作的情况下顺利地完成对双基地雷达测量精度和分辨力的外场试验考核。

### 3. 数值结果分析

当已知发射和接收天线的方向性系数时,对  $\phi_1$  和  $\theta_{10}$  在空间连续取值。利用式(6)即可得双基地雷达的对空探测范围。对于发射和接收波束均为余割平方形式的双基地雷达,假设基线长度  $L=80$  千米、 $k_B=22500$  平方千米时,可计算得到图 4(见 1026 页)所示的结果。

利用式(8),图 5 给出了在  $R_\Sigma=100$  千米、 $L=80$  千米、 $e=0.4$ 、 $dL=100$  米、 $dR_\Sigma=100$  米、 $d\theta_R=0.34^\circ$  情况下,目标至接收站距离  $R_R$  的均方根误差  $dR_R$  随  $\theta_R$  变化的曲线。

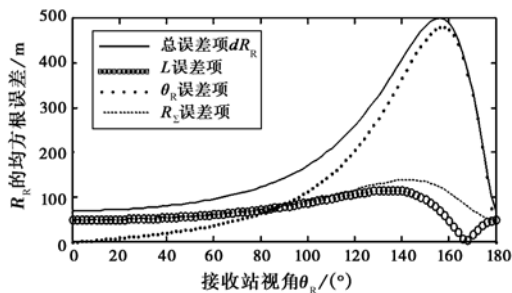


图 5  $R_R$  的均方根误差  $dR_R$  随  $\theta_R$  变化的曲线

利用式(9)和式(10),图 6 给出了在  $L=80$  千

米、 $a=0.55L$ 、 $a'-a=100$  米情况下,双基地雷达距离分辨单元随双基地角  $\beta$  变化的曲线。

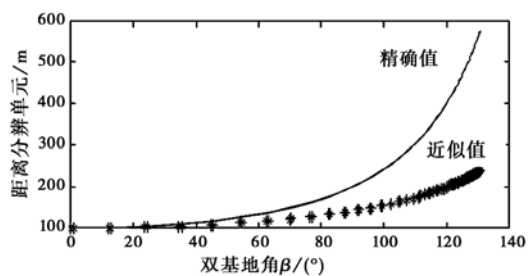


图 6 双基地雷达距离分辨单元随双基地角  $\beta$  变化的曲线

利用式(11)和式(13),图 7 给出了在  $L=80$  千米、半短轴  $a=0.55L$  的椭圆上,计算得到的双基地雷达角分辨力随双基地角  $\beta$  变化的曲线。可见,单基地雷达角度分辨力是恒定的,不随目标的距离和角度变化而变化;而双基地雷达角分辨力随目标空间位置变化而变化,且角分辨力一般都低于单基地雷达。

采用与前面分析相类似的双基地雷达试验方法,文献[8]中设计了飞机目标的试验航路,并给出了双基地雷达性能试验的部分测试结果,证明了该双基地雷达试验方法的有效性。

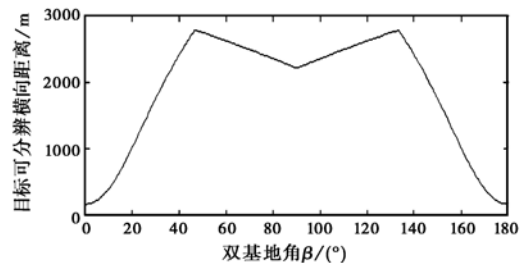


图 7 双基地雷达角分辨力随双基地角  $\beta$  变化的曲线

### 4. 结 论

双基地雷达的主要性能与单基地雷达有很大的差异,不能直接采用单基地雷达的试验方法来检验双基地雷达的主要性能指标。这里系统地分析了双基地雷达的探测范围、测量精度、分辨力与主要性能试验方法,有关研究成果已经在一个实用双基地雷达的研制、试验和评估中得到了成功的应用。有关研究结论可以推广应用到岸—海、地—空、空—地、空—空等双/多基地雷达的场合。

### 参考文献

- [1] BLYAKHMAN A B, RUNOVA I A. Forward scat-

- tering radiolocation bistatic RCS and target detection [C]//Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference, 1999: 203-208.
- [2] 刘立东,袁伟明,吴顺君,等. 基于GPS照射源的天地双基地雷达探测系统[J]. 电波科学学报, 2004, 19(1): 109-113.  
LIU Lidong, YUAN Weiming, WU Shunjun, et al. Bistatic radar system based on GPS illumination[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(1): 109-113. (in Chinese)
- [3] 刘春波,陈伯孝,陈多芳,等. 岸-舰双基地高频地波雷达一阶海杂波特性和分析[J]. 电波科学学报, 2007, 22(4): 61-65.  
LIU Chunbo, CHEN Baixiao, CHEN Duofang, et al. Characteristic of first-order sea clutter for coast-ship bistatic HF-SWR[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(4): 61-65. (in Chinese)
- [4] SKOLNIK M I. Radar Handbook[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1990.
- [5] DAI Zhengjian, WANG Jian, DENG Jianhui, et al. The detection performance of bistatic seacoast surveillance radar[C]//Proceedings of the 2006 IEEE Radar Conference, 2006: 388-390.
- [6] WILLIS N J. Bistatic radar [M]. Boston: Artech House, 1991.
- [7] 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.  
YANG Zhengqi, ZHANG Yongshun, LUO Yongjun. Bistatic(Multistatic) Radar System[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1998. (in Chinese)

- [8] 徐晓靖,刘克胜,查林. 一种基于DBF的双基地雷达系统的性能分析与实验研究[J]. 雷达科学与技术, 2004, 2(6): 327-332.  
XU Xiaojian, LIU Kesheng, ZHA Lin. Performance analysis and experiment research of a DBF-based bistatic radar system[J]. Radar Science and Technology, 2004, 2(6): 327-332. (in Chinese)

### 作者简介



**戴征坚** (1968—),男,江西人,高级工程师,2000年毕业于国防科技大学电磁场与微波技术专业,获工学博士学位。主要研究方向为雷达工程、电子信息系统。



**谭昕** (1969—),女,重庆人,高级工程师,工学学士。主要研究方向为电子科技情报信息。



**许建平** (1960—),男,陕西人,高级工程师,工学硕士。主要研究方向为电子信息系统。

## Main performance analysis and experiment method research of bistatic radar

DAI Zheng-jian TAN Xin XU Jian-ping

(Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

**Abstract** The main performance of bistatic radar are related with its transmitter site, receiver site and the target position. This is different from monostatic radar. The main performance of bistatic radar can not been tested directly by using the monostatic radar's experiment method. The coverage area, measurement accuracy, resolution capacity of bistatic radar are analyzed and calculated for testing and evaluating its main performance. The rational experiment method of bistatic radar is also given out. The results have been successfully used in a practical bistatic radar.

**Key words** bistatic radar; measurement accuracy; resolution capacity; experiment method