Radar Science and Technology

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.01.010

非合作多基地雷达系统性能仿真分析

司梦祥',杨风暴',宋杰²

(1. 中北大学,山西太原 030051; 2. 海军航空大学,山东烟台 264001)

摘 要:针对低 RCS(radar cross section)的隐身舰船很难被普通的单基地雷达探测到的问题,提出了采用 非合作多基地雷达系统对海上目标进行探测,创建了一个海上场景,其中多艘商船在S波段(3 GHz)发射电磁 波,作为机会雷达;一艘护卫舰大小的军舰作为雷达系统接收机,目标假定为一艘货船和一艘隐身军舰。采用专 业的电磁软件对海上目标进行仿真,计算普通货船和隐身军舰的双基地 RCS数据,建立了 MATLAB 仿真模型,研 究了非合作多基地雷达的探测覆盖范围。使用 FEKO 的双基地 RCS 仿真表明,通过改变发射机的数量和发射机 到接收机之间的距离,找到一种最优的多基地雷达系统几何结构和系统配置。

关键词: 多基地雷达;性能仿真;探测覆盖范围;探测覆盖率

中图分类号:TN957.51 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2024)01-0069-08

引用格式:司梦祥,杨风暴,宋杰.非合作多基地雷达系统性能仿真分析[J].雷达科学与技术,2024,22(1):69-76. SI Mengxiang, YANG Fengbao, SONG Jie. Performance Simulation Analysis of Non-Cooperative Multistatic Radar System[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(1):69-76.

Performance Simulation Analysis of Non-Cooperative Multistatic Radar System

SI Mengxiang¹, YANG Fengbao¹, SONG Jie²

(1.North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the problem that stealth ships with low RCS (radar cross section) are difficult to be detected by ordinary monostatic radars, a non-cooperative multistatic radar system is proposed to detect sea targets. A maritime scene is created, in which multiple merchant ships emit electromagnetic waves in the S-band (3 GHz) as opportunistic radars. A frigate-sized warship acts as a radar system receiver, and the targets are assumed to be a cargo ship and a stealth warship. The professional electromagnetic software is used to simulate sea targets, and the bistatic RCS data of ordinary cargo ships and stealth warships are calculated. The MATLAB simulation model is established to study the detection coverage of non-cooperative multistatic radar. The bistatic RCS simulation using FEKO shows that an optimal multistatic radar system geometry and system configuration are found by varying the number of transmitters and the distance from the transmitter to the receiver.

Key words: multistatic radar; performance simulation; detection range; detection coverage

0 引 言

随着科技的不断发展,无源雷达凭借其良好的性能逐渐成为新兴探测技术领域的研究重点。 无源雷达的快速发展离不开国内外的专家学者近一个世纪的研究贡献。1922年,美国的Taylor等人 在实验中第一次通过电磁信号成功探测到了正在 江中行驶的木制船舶,所用的探测设备正是类似 于双基地连续波雷达的装置^[1]。之后很长一段时 间,随着雷达收发开关的发明,单基地雷达的研究 热度不断上升,研究者对双基地雷达的关注度下降了很多。在20世纪末期,美国的Lockheed Martin公司用了10多年时间研制的"沉默哨兵"新型 的雷达检测系统^[2],真正实现了无源雷达的商业 化。直到80年代以来,我国才开始研究无源雷达 相关技术。目前,国内对无源雷达探测系统研究 的机构^[3]主要是一些理工类高等院校和专业研究 所。其中,武汉大学,西安电子科技大学,北京理 工大学,哈尔滨工业大学,北京邮电大学,中科院 电子所,中国电科14、36、38研究所,海军航空大学

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61971433);山东省泰山学者计划(No.tsqn202211247)

收稿日期: 2023-08-29; 修回日期: 2023-09-25

等都在无源雷达的研究工作中,积累了大量有价 值的理论和实验结果。目前,这些研究主要集中 在利用多种辐射源,如广播信号、电视信号、卫星 信号和手机基站信号的无源双基地雷达系统,完 成相应的理论研究和实际系统的构建,但是利用 无源雷达自身仅有接收模块的优势来提高系统检 测性能的相关理论研究还是比较缺乏且关键技术 尚未突破。因此,无源雷达探测技术还需要继续深 入研究,探测精度和探测能力均需进一步提高^[46]。

目前对双基地雷达和多基地雷达的研究大致 可以分为3个方面:1)目标探测和参数提取;2)多 基地雷达系统配置;3)目标跟踪和精度。张小宽 等提出可以在不同基线距离下得到双基地雷达对 隐身目标的探测范围^[7];战立晓等研究了变基线地 空双基地雷达的动态检测性能^[8];吴小坡等对T-R 型双基地雷达的探测范围指标进行了研究,通过 仿真,绘制出不同基线距离下的双基地雷达对隐 身目标的探测范围^[9];王芳等提出了一种复合双基 地雷达系统,该系统由两个独立配置的宽波束单 基地雷达配对构成^[10];这些文献只考虑了系统的 基线距离对探测范围的影响,没有考虑到发射机 的数量也可以提高雷达系统的探测范围和探测覆 盖率。

基于以上文献的启发,本文提出了非合作多 基地雷达系统模型对海上目标进行探测,首先对 舰船目标进行三维建模,通过电磁仿真软件仿真 计算出海上目标的双基地 RCS 数据,将得到的 RCS 数据导入到检测覆盖率模型,通过改变系统中 发射机的数量和基线距离,通过普通货船和隐身 舰船的对比实验,验证了非合作多基地雷达系统 可以有效地探测到隐身舰船,得到最优的雷达系 统配置和几何结构。

1 双基地雷达系统理论

双基地雷达是一种发射机和接收机分别位于 不同位置的雷达系统。多基地雷达系统利用多个 发射机和一个接收机,融合来自所有发射机的目 标信息。无源双基地或多基地雷达利用机会雷达 来探测和定位传输源和目标。双基地雷达工作原 理的几何关系如图1所示。



1.1 双基地雷达截面积

目标的双基地雷达截面积取决于入射方向和 接收方向之间形成的角,称为双基地角β。与单基 地雷达截面积不同,双基地雷达截面积是测量在 入射方向上重新辐射回的电磁能量的量,双基地 雷达截面积是在接收机方向上返回的电磁能量的 量。在单基地雷达截面积中只有一组360°值,对 于双基地雷达截面积而言,对应于每个目标的 360°方位角,每个入射方向都有自己的360°雷达 截面积值。因此,要完全绘制出一个海上目标的 双基地雷达截面积,每个目标都要有自己的360组 RCS数据^[11-12]。

RCS的定义可以为

$$\sigma = \lim 4\pi R_2^2 \frac{\left|\vec{E}_s\right|^2}{\left|\vec{E}_i\right|^2} \tag{1}$$

式中,*R*₂为目标到接收机的距离,*E*₃为散射方向距 离目标*R*处探测到的目标散射电场强度,*E*₃为入射 方向入射到目标处的电场强度。

对于简单的几何形状, RCS 可以很容易地 计算:

$$\sigma = \frac{4\pi A_{ea}^2}{\lambda^2} \tag{2}$$

式中:A_{ea}为目标在入射方向上的截面积,单位为 m²; λ为波长,单位为m。在复杂目标形状的情况 下,雷达截面积必须要考虑到目标的"电尺寸",这 是由目标在入射波长方面的最大相对尺寸定义 的。目标的雷达截面积可发生显著变化的频率区 有3个,分别是瑞利区(低频)、谐振区(共振)和光 学区(高频)。这3个区域是根据"电尺寸"的大小 分类的。

1.2 双基地雷达方程

双基地雷达距离方程给出了接收功率与系统 参数、目标散射特性和交互几何形状的函数关系。 解雷达方程得到距离乘积^[8]。

$$\kappa = \left(R_{\rm T}R_{\rm R}\right)_{\rm max} = \left[\frac{P_{\rm T}G_{\rm T}G_{\rm R}\lambda^2\sigma_{\rm B}F_{\rm T}^2F_{\rm R}^2}{\left(4\pi\right)^3kT_{\rm s}B_{\rm n}\left(S/N\right)_{\rm min}L_{\rm T}L_{\rm R}}\right]^{1/2} \quad (3)$$

式中, $R_{\rm T}$ 为发射机到目标的距离; $R_{\rm R}$ 为目标到接收 机的距离; $P_{\rm T}$ 为发射机脉冲功率; $G_{\rm T}$ 为发射机天线 功率增益; $G_{\rm R}$ 为接收机天线功率增益; λ 为波长; $\sigma_{\rm B}$ 为双基地雷达的目标等效反射面积; $F_{\rm T}$ 为发射机 到目标路径的方向图传播因子; $F_{\rm R}$ 为目标到接收 器路径的方向图传播因子;k为玻耳兹曼常数; $T_{\rm s}$ 为接收机噪声温度; $B_{\rm n}$ 为接收机带宽,以保证通过 发射信号所有频率分量; $(S/N)_{\rm min}$ 为检测所需信噪 功率比; $L_{\rm T}$ 为发射损耗因子; $L_{\rm R}$ 为接收损耗因子; κ 为双基地雷达最大距离积。

在双基地雷达距离方程中,最大距离乘积 $R_{\rm T}R_{\rm R}$ 代替了单基地雷达距离方程中的 R^2 ,其中 $R = R_{\rm T} = R_{\rm R}$ 是单基地雷达系统中发射机到目标和目标 到接收机的距离。由于传输路径和接收路径之间 的差异,导致单基地雷达和双基地雷达工作之间 存在显著差。

其中,单基地雷达的探测轮廓是圆,而双基地 雷达的探测轮廓是卡西尼椭圆。卡西尼椭圆被定 义为两点距离乘积为常数的点的轨迹。图2显示 了卡西尼椭圆的两个固定点(F₁和F₂),基线距离 为2c。

将卡西尼椭圆的概念应用于图1中基线为L, 距离积为 $R_{\rm T}R_{\rm R}$ 的双基地三角形中,恒定信噪比 (SNR)功率比的表达式可由式(1)导出:

$$S/N = \frac{K}{R_{\rm T}^2 R_{\rm R}^2} \tag{4}$$

式中,S/N为 R_{T} 和 R_{R} 处的信噪比,K为双基地雷达 常数。

$$K = \frac{P_{\rm T}G_{\rm T}G_{\rm R}\lambda^2\sigma_{\rm B}F_{\rm T}^2F_{\rm R}^2}{(4\pi)^3kT_{\rm s}B_{\rm n}L_{\rm T}L_{\rm R}}$$
(5)

根据图 1,将 R_{T} 和 R_{R} 被转换为极坐标 (r, θ) , 根据余弦定理可得

$$R_{\rm T}^2 = (r^2 + L^2/4) + rL\cos\theta \tag{6}$$

$$R_{\rm R}^2 = (r^2 + L^2/4) - rL\cos\theta$$
(7)

坐标原点在基线的中点。将式(5)、式(6)、式 (7)代入式(4),得到定义恒定信噪比轮廓的表达式:

$$S/N = \frac{K}{(r^2 + L^2/4)^2 - r^2 L^2 \cos^2 \theta}$$
(8)

已知基线L,($R_{\rm R} + R_{\rm T}$)和 $\theta_{\rm R}$ 从机会发射端和接收端得到并测量,则 $R_{\rm T}$ 和 $R_{\rm R}$ 计算为

$$R_{\rm T} = (R_{\rm R}^2 + L^2 + 2R_{\rm R}L\sin\theta_{\rm R})^{1/2}$$
(9)

$$R_{\rm R} = \frac{(R_{\rm T} + R_{\rm R})^2 - L^2}{2(R_{\rm T} + R_{\rm R} + L\sin\theta_{\rm R})}$$
(10)

在图1的双基地三角形中使用余弦定律可以 得到

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{R_{\rm T}^2 + R_{\rm R}^2 - L^2}{2R_{\rm T}R_{\rm R}}\right)$$
(11)

当 $L = 2\sqrt{\kappa}$ 时,卵形在原点处形成尖形。图2 中卡西尼椭圆定义了双基地雷达的3个工作区域:

L > 2√κ, R_T ≫ R_R,接收机中心区域。
L > 2√κ, R_T ≪ R_R,发射机中心区域。
L < 2√κ,接收机-发射机中心区域^[9]。



2 系统探测性能分析

2.1 系统模型

本文所采用的多基地雷达系统是由一个接收 机和多个发射机组成,探测目标假定为一艘货船 和一艘隐身舰船,该场景的图形表示如图3所示。 本文主要的研究难题是如何获取探测目标的RCS 数据,目前最常用的雷达截面积预测方法有物理 光学、微波光学、矩量法、有限元法和有限差分法。 我们在CST Studio 中创建了普通货船和某隐身舰 船的三维模型,并将其导入到FEKO,使用物理光 学法计算它们的雷达散射截面积。物理光学方法 适用于光频区目标的雷达散射截面积预测。



2.2 FEKO模型

利用电磁仿真软件 FEKO 对海上目标的双基 地雷达散射特性进行了建模和分析。选择一艘普 通货船和隐身舰船作为海上目标。在计算机仿真 技术(CST)微波工作室(MWS)中创建了普通货船 和隐身舰船的三维模型,导入到 FEKO中,生成S 波段的双基地雷达截面积数据。图4和图5分别 显示了普通货船和隐身舰船的模型,假设所有表 面都是完美导体。



图4 普通货船模型



图5 隐身舰船模型

图 6 和图 7 显示的是普通货船和隐身舰船在 入射角 10°下的双基地雷达截面积,可以看出,隐 身目标经过整形和雷达吸收材料的处理,雷达系 统很难捕捉到,反射角的微小变化就可以导致 RCS 回波值的显著差异。因此,为了确保模型的准确 性,在给定所需的入射角和接收角的情况下,调用 FEKO来计算准确的 RCS 值是可行的。





2.3 MATLAB模型

在 MATLAB 中使用 FEKO 仿真模拟的海上目标 RCS 对海上场景进行建模。利用 MATLAB 模型 对探测覆盖范围进行了仿真,然后对仿真结果进 行了检验,提出了最优的多基地雷达系统配置和 几何结构。

图8给出了每个步骤的每个发射机-目标-接收 机对的检测覆盖模型的概述。该模型在给定双基 地入射角和接收角的前提下,从预先计算好的RCS 表中通过插值方法提取RCS值,这大大缩短了模拟





图8 MATLAB检测覆盖率模型

探测覆盖模型还计算目标位置的接收信噪 比。该模型需要以下输入文件和参数来生成检测 覆盖率汇总图:

- 1) 目标路径信息;
- 2)目标双基地雷达截面积表;
- 3) 发射机参数;
- 4) 接收机参数。

检测覆盖模型为前者生成目标路径上的接收 信噪比,后者生成检测覆盖图。使用目标的CAD-FEKO模型,在FEKO中预先计算出各种入射角和 接收机双基地角的RCS值表。通过在模拟检测覆 盖之前生成更高分辨率的RCS表,可以提高RCS 表的双基地角度分辨率。最后,发射机、电子战 (EW)和测向(DF)接收机的S波段雷达参数基于 商业可用系统的技术规格。

3 仿真结果

在本节中,使用检测覆盖率模型仿真不同多 基地雷达发射机-目标-接收机几何结构的检测覆 盖率,并提出了最佳的检测覆盖的多基地配置和 几何结构。研究发射机的数量、发射机到接收机 的距离对系统探测性能的影响。

3.1 参数设置

本文选择S波段雷达作为发射机,其参数如表 1所示。

3.2 改变发射机的数量

发射机的数量影响雷达系统的探测覆盖范围和强度。如图9和图10所示,当基线距离为10km

	表1 雷达参数	
序号	雷达参数	量值
1	波束宽度	1.8°
2	扫描率	45 scan/s
3	输出功率	30 kW
4	频率	3 051 MHz
5	天线增益	28 dB
6	波长	0.098 4 m
7	噪声带宽	500 MHz
8	脉冲重复频率	2 000 Hz

时,由于隐身舰船的RCS小于普通货船的RCS,当 系统中有一、两个发射机时,雷达的探测效果很 差,因此我们提出了采用多个发射机对隐身目标 进行探测,以提高雷达系统的探测性能。







3.3 改变发射机到接收机之间的距离

发射机到接收机的距离决定了发射机-接收机 "网"的大小。图11和图12检测覆盖图表明,该系 统对普通货船进行检测,当基线距离为20km时,检 测范围和覆盖率达到最好的效果,当基线距离为 25 km时,虽然检测范围有所增大,但出现了检测 间隙,检测覆盖率有所下降;对隐身军舰检测时, 基线距离为10 km时比15 km时的探测效果要好; 也表明该雷达系统适用于不同的海上目标检测, 对不同的海上目标需要找到其最优的系统配置。 从图11和图12可以看出,当发射机数量越多,距 离越远时,发射机的整体覆盖效果越好,它们能够 提供更好的整体覆盖范围和更小的检测间隙,发 射机的最小数量是4个,为了在系统参数和发射机-接收机特殊组合下实现最大探测覆盖率,因为普 通货船的RCS值容易被检测到,建议基线距离为 20 000 m;隐身舰船的 RCS 值较小,建议基线距离 为10000m。









4 结束语

本文采用非合作多基地雷达系统对海上目标 进行探测性能的分析,由于实验环境受限,只能采 用电磁仿真得到数据,该方法首先构建普通货船 和隐身舰船的三维模型,其次对模型的细节进行 处理,让其达到电磁仿真软件的要求,然后用 FEKO软件对处理好的模型进行电磁计算,得到两 组 360×360的 RCS 值,最后根据计算的 RCS 值,验 证了该系统的有效性。仿真结果表明:得到系统 中存在4个机会发射机就能得到较好的探测范围 和检测覆盖率,8个发射机并不能显著扩大其探测 范围;该系统对不同的海上目标需要设置不同的 基线距离,在一定的基线距离范围内,基线距离越 大,系统的探测范围越大,但超出范围以后,检测 覆盖率有所下降;最后,非合作多基地雷达系统不 仅适用于探测普通货船,对探测低 RCS 的隐身舰 船也是有效的。非合作多基地雷达不需要建造昂 贵的系统,系统需要的信息也很容易从别的舰船 上获取,这些信息还可以被提取出来,然后用来进 行跟踪;在安全性方面,消除了主动雷达被发现的 风险,同时增强了雷达系统的生存能力,保障军舰 在没有工作雷达或雷达损坏的情况下继续跟踪目 标信息,对实际应用有着深远的指导意义。

参考文献:

- [1] 贾玉贵.现代对空情报雷达[M].北京:国防工业出版 社,2004.
- [2] 张军华."静默哨兵"——一种新型无源反隐身雷达[J]. 现代防御技术,2000(1):63-64.
- [3] 谢锐,万显荣,方高,等,外辐射源雷达网络定位性能评 估与实验验证[J].电子与信息学报,2016,38(3):753-757.
- [4] 王婷婷,王肖霞,宋杰.机载非合作双基地雷达杂波仿 真与分析[J].现代雷达,2023,45(5):80-86.
- [5] 闫宇嘉,吉琳娜,宋杰,等.非合作辐射源雷达杂波建模 方法[J].探测与控制学报,2021,43(5):49-54.
- [6] 宋杰,何友,蔡复青,等.基于非合作雷达辐射源的无源 雷达技术综述[J].系统工程与电子技术,2009,31(9): 2151-2156.
- [7] 张小宽,刘尚钞,张晨新,等.隐身目标的双基地雷达探 测技术[J].系统工程与电子技术,2008,30(3):444-446.
- [8] 战立晓,汤子跃,朱振波.变基线地空双基地雷达动态 探测性能研究[J].舰船电子对抗,2009,32(6):58-61.
- [9] 吴小坡,时家明,莫正攀,等.双基地雷达对隐身目标探测区域的计算[J].现代防御技术,2012,40(4):123-127.
- [10] 王芳,李晓东,王宇颢.一种复合双基地雷达系统的探测 性能研究[J].弹箭与制导学报,2013,33(6):182-185.
- [11] SING C S. Passive Multistatic Detection of Maritime Targets Using Opportunistic Radars [D]. USA: Naval Postgraduate School, 2014.
- [12] TAN Q J. Passive Coherent Detection and Target Location with Multiple Non-Cooperative Trans-(下转第86页)