

# Detection of Ship Target in Wide Area Surveillance by Space-Based Radar

Ying Liu

Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu  
Email: [liuying1927@126.com](mailto:liuying1927@126.com)

Received: Oct. 10<sup>th</sup>, 2015; accepted: Oct. 26<sup>th</sup>, 2015; published: Oct. 29<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The method of ship target detection is studied by space-based radar in wide area surveillance. The factures of ship target in time domain and frequency domain are analyzed trough the modeling of space-based radar signal. A detection method of ship target using two dimensions compensation of time and frequency domains is proposed in this paper. The validity of the method is validated using the simulation results.

## Keywords

Space-Based Radar, Wide-Area-Surveillance, Ship Target Detection, Range Migration Correction, Doppler Compensation

---

# 天基雷达广域监视舰船目标检测技术

刘 颖

南京电子技术研究所, 江苏 南京  
Email: [liuying1927@126.com](mailto:liuying1927@126.com)

收稿日期: 2015年10月10日; 录用日期: 2015年10月26日; 发布日期: 2015年10月29日

---

## 摘 要

本文研究了天基雷达广域监视情况下舰船目标检测技术, 通过天基雷达信号建模, 分析了舰船目标信号

的时域特性和多普勒特性，提出了一种基于时频二维补偿积累的天基雷达广域监视舰船目标检测方法，性能分析和仿真实验验证了方法的有效性。

## 关键词

天基雷达，广域监视，舰船目标检测，走动校正，多普勒补偿

## 1. 引言

为满足维护我国周边海域主权和海洋权益的需求，需要探测系统能够进行远距离探测和全球海域监视。现有的舰载雷达、机载雷达是目前实现对海远程预警监视的两大支柱，但远远满足不了对海面目标远距离探测感知的需求，更无法做到全球海域监视。电子侦察卫星和光学卫星虽然可实现最低探测威力要求，但定位精度差和无法全天时全天候工作却分别成为了其各自的短板。因此，研究基于雷达卫星的海面目标远距离探测和全球海域监视[1] [2]，具有非常重要的战略意义。

机载预警雷达对海面舰船目标进行检测时，由于舰船目标的速度较慢，在多普勒域无法与主杂波区分开，好在舰船目标 RCS 较大，回波强度一般比海杂波强度大得多，所以利用脉冲串的相干或非相干积累检测技术[3] [4]，仍然可以从主杂波中检测出舰船目标。而在天基雷达情况下，平台的高速运动使得主杂波的多普勒进一步的展宽，同时，为了满足天基雷达远距离大幅宽的探测要求，通常采用中/低脉冲重复频率，杂波多普勒模糊现象必然存在且通常都较为严重，存在多倍模糊的杂波强度会高于舰船目标的强度；平台的高速运动还使得舰船目标回波存在距离走动现象[5]，综上，天基雷达情况下，不论是采用多普勒域检测技术还是常规的时域非相干积累检测技术，都无法对舰船目标进行有效检测。

文中研究了天基雷达广域监视情况下舰船目标的信号模型及回波特性，提出了一种基于二维补偿积累的天基雷达广域监视舰船目标检测方法，并对该方法进行了性能分析，最后通过仿真数据验证了方法的有效性。

## 2. 天基雷达广域监视舰船目标回波特性

天基雷达对海检测时，超高速平台的运动导致目标回波存在跨距离徙动和多普勒展宽的现象，下面分别进行分析。

### 2.1. 跨距离徙动

目标回波存在距离徙动的主要原因有两个，平台高速运动和平台运动，两种情况可以独立量化分析。

#### 1) 平台运动引起的距离走动和距离弯曲

如图 1 所示为平台引起的距离走动示意图。假设地面存在静止目标  $P$ ，卫星平台沿航线以速度  $v$  飞行，目标相对于平台的方位角为  $\theta$ ，从  $t=0$  到  $t=n \cdot PRI$  时刻的积累时间内，目标到平台的距离变化为：

$$\Delta R = R - \sqrt{(R \sin \theta - vn \cdot PRI)^2 + (R \cos \theta)^2} \approx vn \cdot PRI \sin \theta \quad (1)$$

其中  $n$ 、 $R$  和  $PRI$  分别为积累脉冲个数、 $t=0$  目标到平台的距离和脉冲重复周期。当距离变化量  $\Delta R$  大于距离分辨率时就存在距离走动，且从上式看出，距离走动随扫描角的增大而增大。

图 2 所示为平台运动引起的距离弯曲示意图。若  $\alpha$  为方位波束宽度，则波束覆盖范围内由平台运动产生的最大距离弯曲量为：

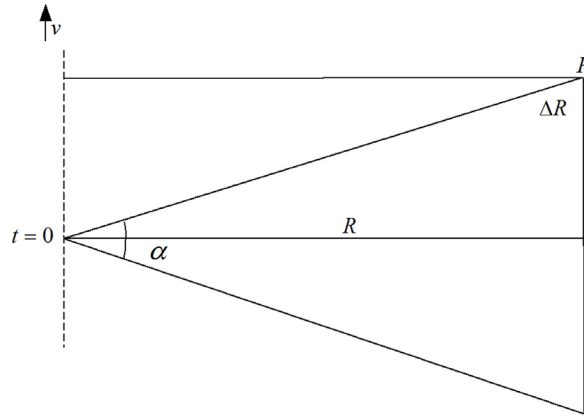


Figure 1. Sketch map of range walk  
图 1. 距离走动示意图

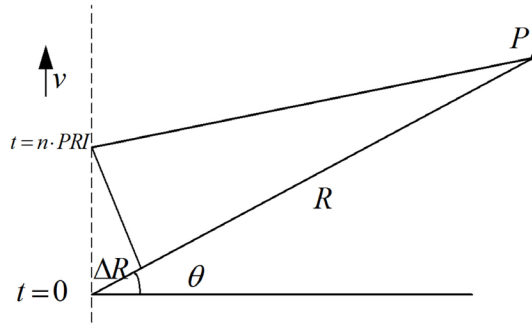


Figure 2. Sketch map of range curvature  
图 2. 距离弯曲示意图

$$\Delta R = \sqrt{R^2 + \left(\frac{R \cdot \alpha}{2}\right)^2} - R \approx \frac{R\alpha^2}{8} \quad (2)$$

从上式看出，距离弯曲随探测距离和方位波束宽度的增大而增大。

2) 目标运动引起的距离门跨越

假设运动目标的地面速度为  $v_r$ ，则积累时间内由目标运动引起的最大距离走动量为：

$$\Delta R = v_r \sin \varphi t = v_r \cdot n \cdot PRI \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

其中  $\varphi$  为下视角。

## 2.2. 多普勒特性

卫星平台的高速运动会导致目标的多普勒展宽，同时目标的运动会引起多普勒的偏移和散焦，下面分别分析。

1) 平台引起的多普勒展宽(图 3)

相干积累时间内由平台运动产生的目标的多普勒带宽为：

$$B_1 = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta - \frac{2v}{\lambda} \sin \theta' = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta - \frac{2v}{\lambda} \frac{\left(R \sin \theta - \frac{vn}{PRF}\right)}{\sqrt{\left(R \sin \theta - \frac{vn}{PRF}\right)^2 + (R \cos \theta)^2}} = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta - \frac{2v}{\lambda} \sin(\theta - \Delta\theta) \quad (4)$$

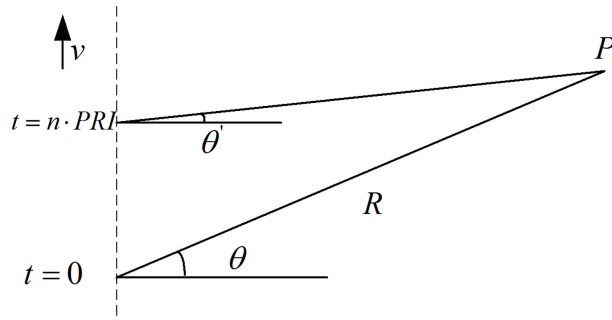


Figure 3. Sketch map of Doppler broadening  
图 3. 多普勒展宽示意图

其中  $\Delta\theta \approx \frac{vn}{R} PRI$ 。从上式可以看出，在相干积累时间内，目标的多普勒存在一定宽度的展宽，若在多普勒域进行分析，则目标回波分布在多个多普勒单元中，而杂波虽然也存在多普勒展宽，但由于主杂波对应的带宽通常大于重复频率，即存在多普勒模糊，同一个多普勒单元中是多个角度的杂波回波的叠加，信杂比降低，需要对目标进行多普勒补偿。

## 2) 目标运动引起的多普勒偏移和散焦

由于目标径向速度的存在，导致运动目标会出现多普勒偏移：

$$f_{da} = \frac{2v_r}{\lambda} \sin \varphi \quad (5)$$

若目标的多普勒偏移超过 PRF，则目标可能与主杂波混叠在一起，影响检测性能。

由于目标方位向速度的存在，导致运动目标在方位向会出现散焦，但散焦的严重程度与目标和平台速度的比值、相干积累时间等有关系。

通过推导，由目标运动产生的调频斜率为：

$$\Delta k_a = -\frac{2(v_a^2 - 2V_s v_a + v_r^2)}{\lambda R} \quad (6)$$

若用平台运动产生的调频斜率进行匹配滤波处理，则运动目标的信号会存在二次相位误差  $\Delta\phi$ ：

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi(v_a^2 - 2V_s v_a + v_r^2)}{\lambda R} t^2 = -\frac{2\pi(v_a^2 - 2V_s v_a + v_r^2)}{\lambda R} (n \cdot PRI)^2 \quad (7)$$

若在相干积累时间内，上述二次相位误差只要不超过  $\pi/4$ ，可以认为不影响聚焦效果。

## 3. 基于二维补偿积累的舰船目标检测方法

通过上述分析，天基雷达广域监视舰船目标检测面临着跨距离门、跨多普勒的“双跨”问题，从后面的性能分析一节中可以看出，为了保证宽观测带而采用低重频的情况下，相干积累时间内，舰船目标回波存在几十个距离门的跨越，同时多普勒的展宽也可能多达 10 个多普勒单元，要想对舰船目标进行有效检测，必须实现目标的“双跨”补偿积累。

对于距离门跨越的补偿，可以采用距离走动校正[6] [7]的方法。距离走动校正可以在距离频域进行，走动校正参考函数为：

$$sref = \exp\left(-j * 4\pi \frac{\Delta R(t_m)}{C} f_r\right) = \exp\left(-j * 4\pi \frac{V_s \sin \theta \cdot t_m}{C} f_r\right) \quad (8)$$

其中,  $\theta$  为波束与天线法向夹角,  $t_m$  为慢时间,  $f_r$  为快时间频域。

舰船回波跨多普勒主要由卫星平台超高速运动引起, 回波信号表现为 LFM 信号。在平台速度先验已知情况下, 可用时域 Dechirp 处理实现目标的多普勒域聚焦[7], 参考函数如下:

$$sref = \exp(-j\pi f_{dr} t_m^2) \quad (9)$$

式中  $f_{dr} = -\frac{2V^2 \cos^2 \theta}{\lambda R}$  为方位向调频斜率。

经过上述处理, 实现目标距离向的包络对齐与多普勒的相参积累, 减小“双跨”目标积累损失。图 4 为舰船目标检测流程图。其中, 跨多普勒校正采用上节介绍的时域 Dechirp 处理方法来实现, 相参积累采用常规的方位 FFT 方法, 恒虚警检测(CFAR)是利用目标的对比度信息, 在全局或局部背景统计模型已知的条件下, 自适应的选取检测阈值的一类检测方法。

## 4. 仿真实验及性能分析

### 4.1. 回波特性仿真分析

下面分别对第 2、3 节分析的回波特性和提出的舰船目标检测方法进行仿真验证。采用 MATLAB 仿真程序, 对第 2 节的回波特性分析进行仿真, 得到结果如图 5~图 8 所示。其中用到的主要仿真参数如表 1。

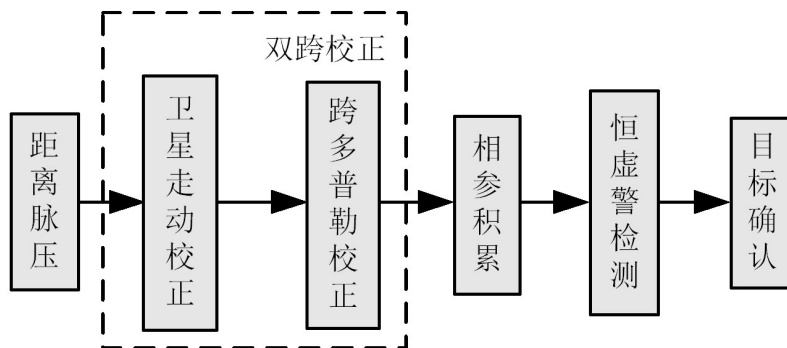


Figure 4. Processing of ship target detection

图 4. 舰船目标检测处理流程图

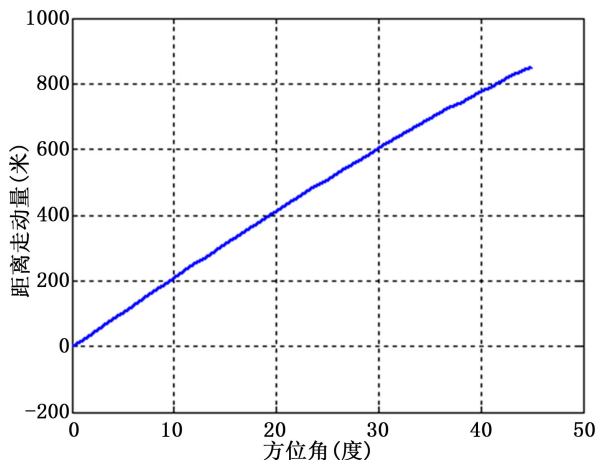


Figure 5. Range walk caused by platform moving

图 5. 平台运动引起的距离走动

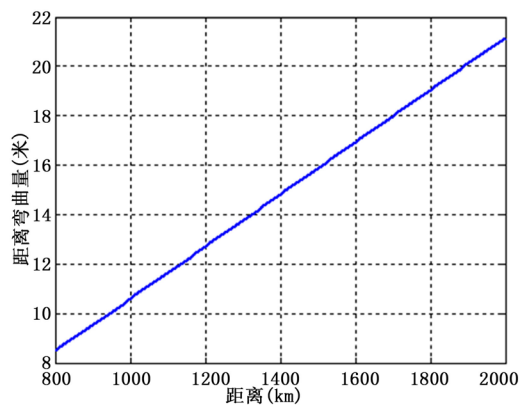


Figure 6. Range curvature caused by platform moving  
图 6. 平台运动引起的距离弯曲

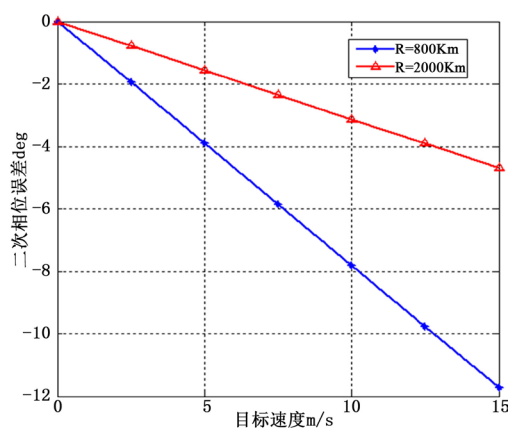


Figure 7. Quadric phase error caused by target moving  
图 7. 目标运动产生的二次相位误差

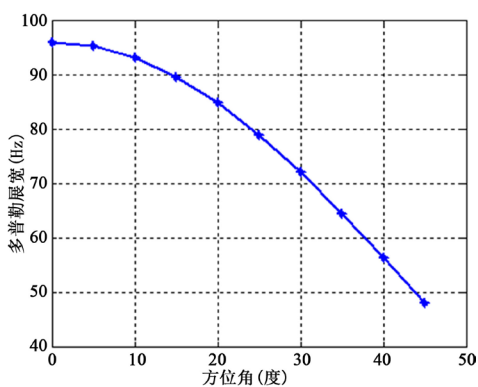


Figure 8. Doppler broadening caused by platform moving  
图 8. 平台运动引起的多普勒展宽

Table 1. Simulation parameters  
表 1. 仿真参数

重复频率 150 Hz	信号带宽 15 MHz	平台速度 7.5 km/s
信号时宽 200 us	积累脉冲数 24 个	平台高度 400 km
目标速度 12 m/s	信杂比 6 dB	

从图 5 中可以看出，当方位角为 30 度时，由平台引起的距离走动达到 600 米；图 6 所示 1500 Km 作用距离处由平台运动引起的距离弯曲约为 16 米；图 7 所示当方位角为 30 度时，由平台运动引起的多普勒展宽超过 70 Hz；以上误差均会影响目标检测性能，需要进行补偿；而图 8 可见，由目标运动产生的二次相位误差不超过  $\pi/4$ ，可以忽略不计。

#### 4.2. 舰船目标检测仿真验证

图 9 和图 10 给出了二维补偿积累前、后舰船目标的聚焦结果，从图中可以看出，经过图 4 的舰船目标检测处理流程，舰船目标信杂比得到了很大提高，可以有效检测。

### 5. 结论

天基雷达远距离大幅宽对海探测时，由于平台高速运动和杂波多普勒的高度模糊，舰船目标在时、

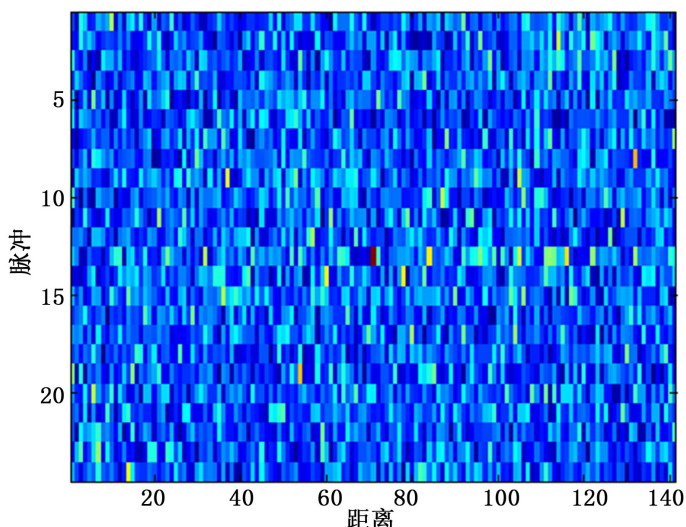


Figure 9. Result before two dimensions compensation and accumulation  
图 9. 二维补偿积累前的结果

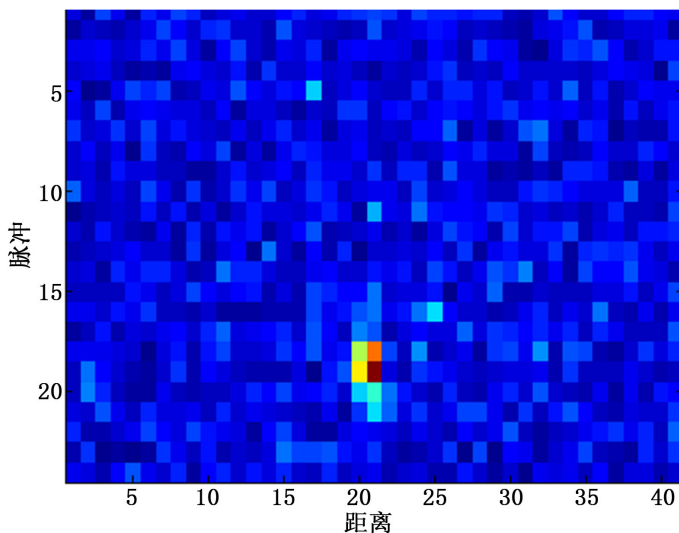


Figure 10. Result after two dimensions compensation and accumulation  
图 10. 二维补偿积累后的结果

频域均淹没在杂波中而无法检测。文中通过分析天基雷达广域监视情况下舰船目标的信号模型及回波特性,提出了一种基于二维补偿积累的天基雷达广域监视舰船目标检测方法,并对该方法进行了性能分析,最后通过仿真数据验证了方法的有效性。

### 参考文献 (References)

- [1] Ke, Y.L., Mangiat, S., Zulchb, P. and Pillai, U. (2007) Clutter impacts on space based radar GMTI: A global. *IEEE on Perspective*.
- [2] 贲德, 林幼权 (2005) 天基监视雷达. *现代雷达*, **27**, 1-4.
- [3] Bon, N., Khenchaf, A. and Garelo, R. (2008) GLRT subspace detection for range and Doppler distributed targets. *IEEE Transactions on AES*, **44**, 678-696.
- [4] Bandiera, F. and Maio, A.D. (2007) Adaptive radar detection of distributed targets in homogeneous and partially homogeneous noise plus subspace interference. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **55**, 1223-1237.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TSP.2006.888065>
- [5] Tang, C.L., Wang, X.G., Chen, Z.M., et al. (2009) Space-time clutter simulation and characteristics analysis for SBR. *2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*.
- [6] Curlander, J.C. (1991) Synthetic aperture Ptadar: Systems and signal processing. Wiley, New York, 116-120.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤 (2005) 雷达成像技术. 电子工业出版社.