

一种星载单双基地雷达系统混合工作新方式

李华 汤俊 彭应宁
(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要: 单轨道星载双基地雷达系统的收发机卫星平台位于同一轨道上。该文分析了该系统模式下的杂波角度-归一化多普勒谱,发现目标最小可检测速度与天线扫描角度有很大关系,对某些角度进行检测时性能严重恶化。提出一种单双基地雷达混合工作方式并计算出模式转换的门限,该新方式可以节约雷达发射功率并减小卫星重量。采用空时二维信号处理方法进行仿真,结果表明该方式可以改善检测性能。

关键词: 双基地雷达; 杂波抑制; 最小可检测速度; 空时二维信号处理

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0889-04

A New Method of Jointly Applying Monostatic and Bistatic Space-Based Radar

Li Hua Tang Jun Peng Ying-ning

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Single orbit bistatic space based radar is composed of two radars in the same orbit. The paper analyzes the clutter angle-Doppler spectrum in this radar system, and finds out that minimum detectable velocity(MDV) is dependent on detecting angles and will degrade a lot in some angles. A new combined monostatic and bistatic radar mode with potential savings in size and weight of the solar array-battery system on-board each satellite is then introduced and angle threshold is calculated. Simulation results with Space-Time Adaptive Processing(STAP) also verify the improved detection performance.

Key words: Bistatic radar; Clutter suppression; MDV; STAP

1 引言

星载单/双雷达系统能提供比机载雷达系统更广阔的覆盖范围和更长的预警时间,越来越受到人们的重视^[1-5]。但由于星载雷达系统采用下视工作的方式,使它在接收到目标信号的同时还接收到大量来自地面的回波,称为地杂波。卫星平台的运动速度非常快,使得杂波主瓣展宽很大,一维时域处理很难将目标从杂波中提取出来,通常采用空时二维信号处理来进行杂波抑制^[6,7]。

星载双基地雷达主要分为同轨道模式和交叉轨道模式^[8]。本文主要研究一种单轨道星载双基地雷达系统对地面慢速目标的检测,该系统的两颗卫星位于同一低轨道,一前一后,这样配置的优点是两颗卫星位置相对固定,定时和波束追赶等更加容易。在进行动目标检测时,主瓣杂波展宽对目标的最小可检测速度影响很大。通过研究发现,该系统的杂波主瓣展宽随天线扫描角度发生变化,使得对某些方位的检测性能严重下降。本文继而提出了一种单双基地雷达混合工作方式,它可以减小这些方向的杂波展宽并提高检测性能。

2 杂波角度-归一化多普勒谱分析

杂波角度-归一化多普勒谱线在杂波特性分析中很有用,

它定义为一个等距离环上各杂波单元归一化多普勒频率与角度的函数^[9,10]。设星载单基地和星载双基地雷达均采用相控阵天线,阵元之间等间隔。天线长轴与卫星平台的飞行方向一致,即天线为正侧视放置。

单基地雷达的杂波归一化多普勒频率为 $\frac{2V \cos \phi_R}{\lambda f_r}$,其中 V 是平台运动速度, λ 是波长, d 是阵元间距, ϕ_R 是杂波单元相对于平台运动方向的锥角, f_r 是脉冲重复频率。杂波归一化多普勒频率与角度 $\cos \phi_R$ 成正比,因此角度-归一化多普勒线是一条斜率为 β 的直线:

$$\beta = 2V/(\lambda f_r) \quad (1)$$

对于双基地雷达,归一化多普勒频率与发射机和接收机都有关,它表示为

$$f_d = \frac{V_R \cos \phi_R}{\lambda f_r} + \frac{V_T \cos \phi_T}{\lambda f_r} \quad (2)$$

其中 V_R , V_T 分别为发射机和接收机的速度。一般情况下,双基地的杂波谱都不再是一条直线,谱形状由双基地中发射机和接收机的飞行速度,相互运动方向等参数决定。

在星载单轨道双基地雷达系统中,发射机和接收机在同一轨道上,它们到地心连线的夹角为 α ,其工作原理示意图如图1所示,参数如表1所示。

星载单基地($\alpha = 0^\circ$)和星载单轨道双基地($\alpha = 10^\circ$)的杂

波角度-归一化多普勒谱如图2所示。这里主要关注谱线的斜率，画的是未折叠的谱线。设双基地系统中发射机和接收机除了位置不同，其他的雷达参数都相同，如表1所示。

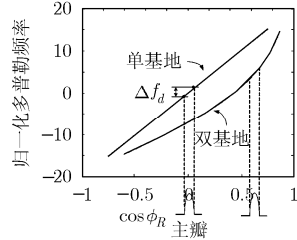
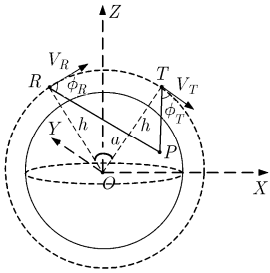


图1 星载单轨道双基地雷达工作示意图

图2 杂波角度-归一化多普勒谱

表1 星载雷达系统参数

符号	定义	取值
N	阵元数	80
M	脉冲数	8
d	阵元间距	0.15m
λ	波长	0.3 m
f_r	脉冲重复频率	2469.6Hz
H	卫星平台高度	850 km
V	卫星平台速度	7408 m/s
ξ	卫星轨道倾角	0°

对于单基地雷达来说，杂波谱为一条直线，谱线上各点的斜率均为 β ，因此每个方向的杂波主瓣展宽 Δf_d 是一样的。双基地的谱线为曲线而不再是直线，它的斜率 β 随角度发生变化。主瓣展宽随扫描角度发生变化。 β 越大，主瓣杂波谱越宽。因此，该双基地雷达系统的检测性能对扫描角度很敏感。

3 最小可检测速度

雷达有 N 个接收阵元，一个相参处理间隔内 M 个脉冲，最优空时二维信号处理器的权系数为

$$W = R_{n+c}^{-1} S \tag{3}$$

其中 R_{n+c} 为杂波加噪声协方差阵， S 为期望信号的空时二维导引矢量。

与其它环境不同，在雷达检测中由于存在杂波，常常使得检测性能比仅有白噪声时要恶化，对这一不良影响的度量一般通过输出信干噪比损失(SINR Loss)来描述的。它定义为最优处理在有无杂波两种情况下对应的输出信干噪比的比例^[6]，即

$$\text{SINR Loss} = \frac{S^H R_{n+c}^{-1} S}{MN} \tag{4}$$

符号 H 表示共轭转置。

最小可检测速度为信噪比损失为-5dB 时的凹口宽度，

凹口宽度越小，盲速区越小，对慢速目标的检测性能越好^[6]。图3和图4采用最优 STAP 比较了单双基地雷达对不同角度进行检测时的信干噪比损失曲线，并可求出最小可检测速度，仿真参数如表1。单基地的情况下，由于各角度杂波主瓣展宽相同，使得3条曲线重合，因此雷达对于各角度的检测性能相同。而在双基地情况下，由图2知， β 随着 $\cos \phi_R$ 的增加而增加。这使得主瓣杂波谱宽随 $\cos \phi_R$ 的增加而变大，信干噪比损失曲线凹口宽度变宽，对慢速目标的检测性能也在下降。因此，为了提高双基地雷达对某些角度的检测能力需要增大天线尺寸，增加自适应处理的维数。但是这必然会增加卫星重量，提高系统造价，同时加重星上处理系统的运算量。

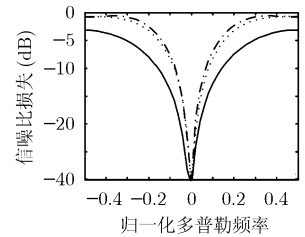
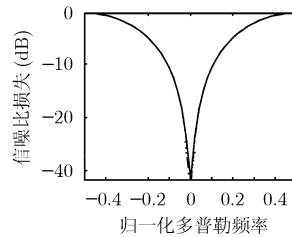


图3 单基地雷达不同角度的检测性能

图4 双基地雷达不同角度的检测性能

4 单双混合新模式

上节分析了杂波谱线斜率 β 对检测性能的影响。图5 画出了单基地雷达和双基地雷达对于不同距离门的杂波谱斜率 β 与角度的关系。图中 L 代表双基地距离和。对于单基地雷达来说，不同距离门的杂波谱线都重合且为直线，因此不同距离门和角度的 β 都相同。双基地系统不同距离门的 β 角度线略有偏移但趋势一致。从图中可以看出，当 $\cos \phi_R$ 较大时，双基地的 β 值大于单基地的 β 值。当 $\cos \phi_R$ 减小，双基地的 β 值小于单基地。由于 β 越大，检测性能越差，本文结合两种模式提出一种单双基地混合工作模式来提高检测性能。以相对于双基地雷达中接收机飞行方向的锥角余弦 $\cos \phi_R$ 为参照，当双基地雷达对 $\cos \phi_R$ 较小的方向进行检测时，仍采用双基地模式，即发射机在前发射信号，接收机在后接收信号。当 $\cos \phi_R$ 较大时，变成单基地模式，即接收机自己发射信号和接收信号。这种混合模式能有效减小各角度的杂波展宽。模式转变的角度门限是图5 曲线的交点，当检测距离增加时，门限略有减小。

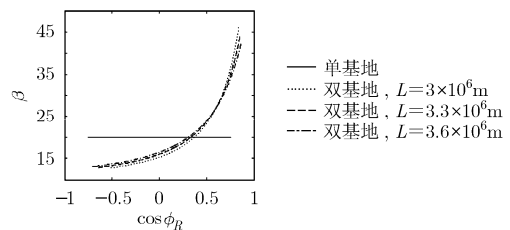


图5 β 随角度变化曲线

5 门限的确定

模式转换的角度门限是一个关键值。由图 5 可以看出，角度门限是使得单双基地 β 值相等的点，因此如果能求出 β 与角度的关系，就可以随之解出角度门限。下面先求取双基地雷达的 β 与角度的关系。主要思想是先求出杂波等距离环方程，解出环上每点杂波单元对应的角度和归一化多普勒频率，并将归一化多普勒频率表示成角度的函数。然后对归一化多普勒频率求导得到 β ，于是得到 β 与角度的函数关系。

如图 1 所示，接收机和发射机在相同轨道上，它们的球心夹角为 α ，等距离和为 $2a$ ，即前文的 L 。现建立如下坐标系，以球心 O 为原点，接收机 R ，发射机 T 和 O 所在平面为 XOZ 平面，以角 ROT 的角平分线为 Z 轴， X 轴平行于 RT ，则 R 坐标为 $(-h \sin(\alpha/2), 0, h \cos(\alpha/2))$ ， T 坐标 $(h \sin(\alpha/2), 0, h \cos(\alpha/2))$ 。对应于一个距离门的杂波等距离环为以发射机和接收机为焦点的椭球与地球球面的交线。

该旋转椭球面方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2 + (z - h \cos(\alpha/2))^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

地球球面方程为

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad (6)$$

根据式(5)，式(6)可得到

$$z = \frac{1}{2h \cos \frac{\alpha}{2}} \left[r^2 + h^2 - a^2 - \frac{h^2}{a^2} \sin^2 \frac{\alpha}{2} x^2 \right] \quad (7)$$

求距离环上某点 $P(x, y, z)$ 到 R 和 T 的锥角，对 R 有

$$\cos \phi_R = \frac{x \cos(\alpha/2) + z \sin(\alpha/2)}{a + (h/2) \sin(\alpha/2) x} \quad (8)$$

$$\cos \phi_T = \frac{x \cos(\alpha/2) - z \sin(\alpha/2)}{a - (h/2) \sin(\alpha/2) x} \quad (9)$$

将式(7)代入式(8)， x 可以用 $\cos \phi_R$ 表示：

$$x = \frac{-b' \pm \sqrt{b'^2 - 4a'c'}}{2a'} \quad (10)$$

其中 $a' = (h^2/a^2) \sin^3(\alpha/2)$, $b' = 2h \cos(\alpha/2) \left((h/2) \sin(\alpha/2) \cos R - \cos(\alpha/2) \right)$, $c' = 2h \cos(\alpha/2) a \cos R - \sin(\alpha/2) (r^2 + h^2 - a^2)$ 。

将式(7)，式(10)代入式(9)，可将 $\cos \phi_T$ 用 $\cos \phi_R$ 表示。最后利用式(2)，将归一化多普勒频率 f_d 表示成 $\cos \phi_R$ 的函数，即 $f_d = F(\cos \phi_R)$ 。然后对 $\cos \phi_R$ 求导，可以求出 β 。单基地 β 由式(1)给出，是与检测角度无关的常数。最后，使得单双基地的 β 值相同的 $\cos \phi_R$ 即为角度门限。

6 仿真结果

设发射机和接收机星下点的经纬度分别为 $(10^\circ, 0^\circ)$, $(0^\circ,$

$0^\circ)$ ，仿真参数如表 1。发射机在前，接收机在后。地面上两个待检测点 P_1, P_2 的经纬度分别为 $(10^\circ, 5^\circ)$, $(-5^\circ, 6^\circ)$ 。它们到发射机和接收机的双基地距离和为 $3.3e6m$ ，相对于接收机的锥角余弦分别为 0.7 和 -0.46 。由图 5 可知，此时的角度门限为 0.33 。检测 P_1 点的角度大于门限，采用单基地模式，检测 P_2 点时采用双基地模式，信噪比损失分别如图 6 和图 7 所示。

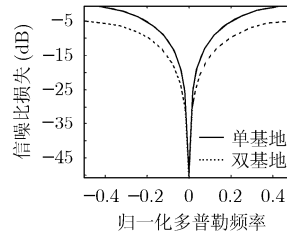


图 6 P_1 点检测的性能图

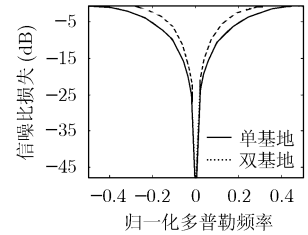


图 7 对 P_2 点检测的性能图

可以看出，采用混合模式确实可以有效减小凹口宽度，减小最小可检测速度，提高对全方向的检测能力。同时，此方法还有一个更加实际的优点。卫星上的能源和卫星重量是星载系统设计的重点，该方法使得两颗卫星轮流发射信号，可以节约单颗卫星的发射功率，减小星上太阳能板的尺寸和卫星的重量，从而减小整体系统造价。

7 结束语

本文针对在星载双基地雷达中检测性能会随雷达扫描角度发生变化的问题，提出一种单双基地雷达混合工作的方式并计算出该新模式转换的角度门限，仿真结果表明该新方式可以较好地提高检测性能。同时该方法还能节约雷达发射功率并减小卫星重量，这是在卫星系统设计时需要考虑的重要问题。

参考文献

- [1] Willis N. Bistatic Radar. New York: Artech House, 1993, Chapter 1.
- [2] Nohara T J. Design of a space-based signal processor. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 1998, 34(2): 366-377.
- [3] Davis M E. Technology challenges in affordable space based radar [C]. Proceedings of IEEE International Radar Conference. Arlington, USA, 2000: 18-23.
- [4] Davis M E. Space based radar moving target detection challenges[C]. Proceedings 2002 IEE Radar Conference, Edinburgh Scotland, 2002: 143-147.
- [5] Rosen P A and Davis M E. A joint space-borne radar technology demonstration mission for NASA and the air force[C]. Proceeding IEEE 2003 Aerospace Conference, USA, 2003: 1-8.
- [6] Ward J. Spce-time adaptive processing for airborne radar [M].

- MIT Lincoln Laboratory, Technical Report 1015, Massachusetts Institute of Technology, USA, December 1994: 53-153.
- [7] Klem R. Space-Time Adaptive Processing Principles and Applications[M].The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1998, Chapter 4.
- [8] Leopold J. Cantafio: Space-Based Radar Handbook[M]. New York: Artech House, 1989:167-172.
- [9] Himed B. Effects of bistatic clutter dispersion on STAP systems [J]. *IEE Proc., Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(1): 28-32.
- [10] Klemm R. Comparison between Monostatic and Bistatic Antenna Configurations for STAP [J]. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 2000, 36(2): 596-608.
- 李 华: 女, 1981年生, 博士生, 研究方向为星载雷达动目标检测.
- 汤 俊: 男, 1973年生, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理和阵列信号处理.
- 彭应宁: 男, 1939年生, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理.