

# 地面慢速目标检测的 STAP 方法

王 彤, 保 铮, 廖桂生

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 西安 710071)

**摘 要:** 本文研究机载火控雷达检测地面慢速目标的空时二维处理方法. 由于机载火控雷达是前视阵, 工作波长短, 载机运动速度快, 脉冲重复频率低, 使得杂波多普勒频率多重模糊, 主瓣杂波带宽大, 常规处理性能很差. 本文重点分析了机载火控雷达检测地面慢速目标的特点, 指出主瓣杂波是制约系统检测性能的主要因素, 并结合这些特点比较了机载火控雷达滤除主瓣杂波的时空级联自适应处理和空时联合自适应处理的区别, 比较了几种情况下系统对慢速目标的检测性能.

**关键词:** 地面慢速目标显示; 空时二维自适应处理; 杂波抑制

**中图分类号:** TN957.51; TN959.73

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2000) 09-0123-03

## STAP for Ground Slowly Moving Target Detection

WANG Tong, BAO Zheng, LIAO Gui-sheng

(Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In this paper, STAP (space time adaptive processing) for an airborne fire-control radar to detect slowly moving ground targets is discussed. The system of this kind is characterized by its forward looking antenna, short wavelength, high flight velocity and low PRF, which results in the highly ambiguous Doppler frequency of ground clutter and large Doppler bandwidth of mainbeam clutter. Conventional processing can not give good performance of detection. This paper is focused on the features of detection of slowly moving ground targets by use of the airborne fire-control radar, and the cascade processing and joint processing are compared. Finally, simulation results are included to validate the conclusions.

**Key words:** GMTI (ground moving target indication); STAP (space time adaptive processing); clutter suppression

## 1 引言

具备地面慢速目标检测能力是战斗机对敌方地面目标进行有效打击的必要条件. 机载火控雷达的天线多为前视阵; 与机载预警雷达相比, 其工作波长短, 载机运动速度快; 同时, 在多普勒域目标十分靠近主杂波谱, 机载火控雷达倾向于采用低重复频率. 这些特点使机载火控雷达的地杂波谱在距离上不平稳, 在多普勒频率上多重模糊, 使杂波的多普勒频率随锥角变化很快. 这样对于常规处理而言, 主瓣杂波的多普勒频率分布在很宽的一段频率范围内, 在这种情况下, 对慢速车辆目标进行检测是十分困难的. 主瓣杂波成为制约雷达性能的主要因素, 多普勒频率落在主瓣杂波多普勒频带内的慢速目标很难被发现. 这样, 即使实现了超低副瓣, 也不能有效提高系统的检测性能.

机载雷达空时二维自适应处理 (STAP) 技术可以有效抑制地杂波, 提高系统的检测性能, 受到了广泛的重视<sup>[1~5]</sup>. 随着技术的发展, 机载火控雷达采用相控阵天线已经成为一种必然趋势. 采用相控阵雷达为空时二维处理提供了条件. 文献[4, 5]提出了空时二维处理用于前视阵的一些问题.

在过去的研究中, 文献[1~3]主要针对机载预警的特点进行讨论. 文献[4~5]主要针对杂波分布进行讨论, 并未考虑低重复频率情况下杂波多普勒频率多重模糊的实际情况. 本文结合机载火控的若干特点, 分析机载火控雷达检测地面慢速目标的主要特点, 指出主瓣杂波是制约系统检测性能的主要因素, 并结合这些特点比较了机载火控雷达自适应滤除主瓣杂波的时空级联自适应处理和空时联合自适应处理的区别, 通过系统仿真比较了几种情况下系统对慢速目标的检测性能.

## 2 机载火控对地面慢速目标进行检测的特点

举一个例子, 说明机载火控雷达对地面慢速目标进行检测的特点. 设载机速度为  $300\text{m/s}$ , 飞行高度  $3000\text{m}$ , 天线阵面为前视阵, 波长为  $0.03\text{m}$ , 脉冲重复频率为  $f_r = 2500\text{Hz}$ . 用  $\theta$  表示地杂波散射体相对于天线轴向的方位角,  $\alpha$  为天线轴向与速度方向的夹角, 此处  $\alpha = -90^\circ$ ,  $\theta_0$  为散射体相对于天线的高低角 (与所观测的距离有关),  $\theta$  为散射体相对于天线轴的锥角,  $\cos \theta = \cos \alpha \cos \theta_0$ . 按照散射体回波的多普勒频率的公式, 可得

收稿日期: 1999-07-27; 修回日期: 2000-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 69831040)

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos(\theta + \alpha) \cos \psi = \frac{2V}{\lambda} (\cos \theta \cos \psi - \sqrt{\cos^2 \theta - \cos^2 \psi} \sin \psi) \\ = \frac{2V}{\lambda} \sqrt{\cos^2 \theta - \cos^2 \psi} \quad (1)$$

由式(1)可知  $f_d$  随  $\cos \psi$  的变化曲线,即二维杂波分布图为正椭圆。杂波多普勒频率的最大值为 20000Hz 左右,远远大于脉冲重复频率,所以地杂波在频域上是多重模糊的。将杂波频率按脉冲重复频率

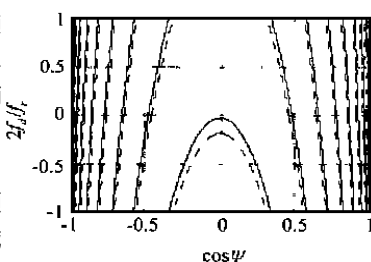


图1 归一化二维地杂波图

归一化,可得归一化多普勒频率 ( $2f_d/f_r$ ) 随  $\cos \psi$  的变化曲线,如图1所示。图中虚线表示 20km 距离环上的地杂波分布;实线表示 55km 距离环上的地杂波分布。

现在推导波束主瓣内的杂波的多普勒带宽,定义主瓣宽度为主瓣两个零点间的宽度。限于理论研究,这里暂以等距线阵为例,考虑  $N$  个阵元的等距线阵,阵元间距  $d = \lambda/2$ ,主波束不加锥削,设波束指向为  $\theta_0$ ,天线阵归一化方向图函数为

$$F(\psi) = \frac{|E(\psi)|}{|E(\psi)|_{\max}} = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin \left[ \frac{Nd(\cos \psi - \cos \theta_0)}{\lambda} \right]}{\sin \left[ \frac{d(\cos \psi - \cos \theta_0)}{\lambda} \right]} \right| \\ = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin \left[ \frac{N}{2} (\cos \psi - \cos \theta_0) \right]}{\sin \left[ \frac{1}{2} (\cos \psi - \cos \theta_0) \right]} \right| \quad (2)$$

其中  $E(\psi) = E_{k=0}^{N-1} e^{jk(\cos \psi - \cos \theta_0)} = E_{k=0}^{N-1} e^{jk(2d \cos \psi - 2d \cos \theta_0)}$ ,则整个主波束宽度为主波束两个零点之差  $|\psi_2 - \psi_1|$ ,由方向图的公式可求得主瓣两个零点  $\psi_1, \psi_2$  分别满足

$$\cos \psi_1 = \cos \theta_0 - (2/N), \cos \psi_2 = \cos \theta_0 + (2/N) \quad (3)$$

即  $\cos \psi_2 - \cos \psi_1 = 4/N$ 。

在波束主瓣不包含  $\psi = 90^\circ$  时,主瓣内的杂波多普勒频带宽度可以用两个主瓣零点对应多普勒频率之差  $|f_{d2} - f_{d1}|$  来表示。将  $\psi_1, \psi_2$  代入上面公式可得

$$f_{d1} = \frac{2V}{\lambda} \sqrt{\cos^2 \theta_0 - (\cos \theta_0 - \frac{2}{N})^2}, f_{d2} = \frac{2V}{\lambda} \sqrt{\cos^2 \theta_0 - (\cos \theta_0 + \frac{2}{N})^2} \quad (4)$$

$$|f_{d2} - f_{d1}| = \frac{16V}{\lambda} \frac{|\cos \theta_0|}{\sqrt{\cos^2 \theta_0 - (\cos \theta_0 + \frac{2}{N})^2} + \sqrt{\cos^2 \theta_0 - (\cos \theta_0 - \frac{2}{N})^2}} \quad (5)$$

当观察距离远大于载机高度时,  $\theta_0 = 0^\circ$ ,对于机载火控雷达,通常  $N \gg 2$ ,上式可以近似为

$$|f_{d2} - f_{d1}| = \frac{16V}{\lambda} \frac{|\cos \theta_0|}{N |2 \sin \theta_0|} = \frac{8V}{\lambda} |\cot \theta_0| \quad (6)$$

由余切函数的特性可知,越偏离于  $90^\circ$  (阵面法线方向),主瓣杂波带宽越大。按照上面公式,可以将带宽对重复频率归一化,作出主瓣杂波归一化带宽  $B_1$  随锥角  $\theta_0$  变化的示意图,如图2所示,阴影部分表示的物理意义实际是常规处理

多普勒盲区占整个多普勒频率宽度的比例,例如在  $\theta_0 = 45^\circ$  或  $135^\circ$  时(波束偏离法线方向  $\pm 45^\circ$ )时,多普勒盲区达到了 66.67%。可见由于主瓣杂波的多普勒扩散,大大降低了采用常规处理的机载火控雷达发现地面慢速目标的能力。如果天线加锥削后,主瓣还会展宽,主瓣杂波带宽还会进一步变大,这里不详细讨论。

由图1和图2中可以看到,机载火控雷达的杂波分布与机载预警雷达有着显著的区别,其检测慢速目标有如下特点。首先,机载火控雷达的杂波在距离上是不平稳的,应该采用分段或递推处理的方法。其次,机载火控雷达多采用前视阵,工作波长短,倾向于采用低重复频率。这些特点加上载机运动速度很高,使得地杂波的多普勒频率多重模糊,杂波分布在  $(2f_d/f_r) \sim \cos \psi$  图上的斜率非常大,主瓣内杂波在频率上分布很宽。这样,主瓣杂波成为制约雷达性能的主要因素,多普勒频率落在主瓣杂波多普勒频带内的慢速目标很难被发现。这样,即使实现了超低副瓣,也不能有效提高系统的检测性能。所以,要提高对慢速目标的检测能力,必须有效抑制主瓣杂波。

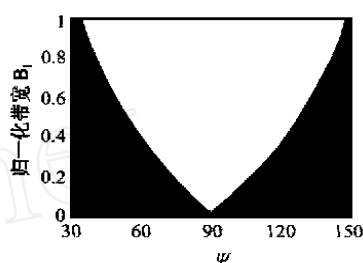


图2 归一化主瓣杂波带宽

### 3 空时二维处理抑制主瓣杂波

Klemm 指出空时二维滤波应该用二维滤波和色噪声条件下的匹配滤波的观点来解释<sup>[2]</sup>。所以,二维滤波器的设计必须结合二维杂波谱的特性,在此处就必须根据主瓣杂波的特点来选择自适应处理的方案。在此比较常用的时空级联处理和时空联合处理抑制主瓣杂波的性能。

由图1可以看到,地杂波谱在  $(2f_d/f_r) \sim \cos \psi$  平面上的分布是相当复杂的,接近  $90^\circ$  的地方,归一化杂波谱的斜率相对比较小,常规处理就可以取得好的效果;偏离  $90^\circ$ ,归一化杂波谱的斜率变大,应该采用较多的空域自由度和一定的时域自由度,一方面,依靠空域自由度在空间上避开主瓣杂波,另一方面,时域上的自由度也可以起一些辅助作用,使滤波器的凹口在二维平面上斜过来,使滤波器特性和杂波谱更加匹配。在机载火控雷达的条件下,主瓣杂波是限制系统性能的主要因素。仅考虑旁瓣杂波,通常可以采用时域空域级联处理,先多普勒滤波,再通过空域自适应让旁瓣避开杂波,在杂波方向形成零点即可。而主瓣杂波的杂波谱在二维平面上非常接近目标信号,仅用空域自适应难以在滤除杂波的同时有效地保护目标信号。在此必须强调时空联合处理的重要性,这就是说,抑制主瓣杂波必须有足够多的空间自由度和一定的时间自由度。

为了更好地比较在机载火控雷达时空联合处理的重要性,可以比较时空级联处理和时空联合处理杂波协方差矩阵的特征谱,本文采用文献[3]中的二维滤波器结构进行说明。以一个 48 列的面阵为例,在总自由度均为 48 的情况下,比较

两种方法的特征谱,在实验中发现时空级联的大特征值看起来比较比较集中,但其小特征值也比较大,时空联合的大特征值与小特征值之比(条件数)比较大.推断时空联合结构应该能够取得较好的性能,而且硬件通道数少,便于实现.

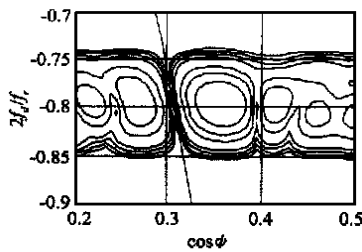


图 3 时空联合处理的二维响应

对于两种情况下系统的响应,时域空域级联处理只能在空间图方向上形成凹口,这时系统二维响应的多普勒中心频率被挤偏,远离杂波的多普勒频率;而时空二维联合处理可以按归一化杂波谱的斜率形成斜凹口,更好地和杂波匹配,如图 3 所示.由于形成斜凹口可以有效滤除杂波,并有效保护杂波谱附近的慢速目标不受影响,所以它对低速目标的检测是十分重要的.

#### 4 仿真实验结果举例

仿真实验采用如下参数:脉冲数为 128,阵面大小  $48 \times 8$ ,波束俯仰角  $= -3.126^\circ$  (对应距离 55km),方位预加权 -40dB,阵元幅相误差为 5%.

图 4 表示波束锥角  $= 120^\circ$  (即波束偏离阵面法线方向  $30^\circ$ ) 系统的改善因子,这时,波束指向方向的归一化杂波多普勒频率为 -0.1718,所以改善因子曲线在此处出

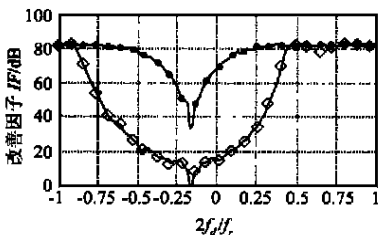


图 4 二维处理和常规处理的改善因子

现了凹口.图中菱形表示常规处理,圆点表示时空联合处理的方法.由图中可见,常规处理的多普勒盲区分远远大于自适应的情况.按照通常战场环境情况的信杂比和杂噪比,假定系统的改善因子大于 65dB 时可以完成对目标的检测,则由图 4 可得,自适应处理可以检测到径向速度绝对值大于 5.84km/h 的目标,常规处理只能检测到径向速度绝对值大于 26.03km/h 的目标.在锥角继续变大的情况下,常规处理的检测性能还要进一步变差.

在仿真中对时空联合方法和时空级联方法的对比情况,时空联合方法改善因子曲线的凹口宽度比时空级联方法进一步缩窄.说明时空联合方法可以进一步减小多普勒盲区,这正是检测地面慢速目标所需要的.举例来说,当波束偏离阵面法线方向  $30^\circ$  的情况下,常规处理、时空级联处理,时空联合处理的多普勒盲区分别为 60.16%、21.88%和 12.50%,系统对地面目标的最小可检测速度分别为 40.90km/h、14.87km/h 和

8.50km/h.可见二维处理,特别是时空联合处理对慢速目标的检测的好处是很明显的.实验还表明,在严重非均匀环境中联合处理仍然比级联方法有较大的优势,这里不作详细讨论.

#### 5 结论

机载火控雷达的地杂波在距离上不模糊,但在多普勒频率上多重模糊,使二维杂波在多普勒-方位平面上分布斜率很大.对于常规处理而言,主瓣杂波的多普勒频率分布在很宽的一段频率范围内,对地面低速目标进行检测是十分困难的.主瓣杂波成为制约雷达性能的主要因素,即使实现了超低副瓣,也不能有效提高系统的检测性能.时空二维自适应技术可以有效地抑制主瓣杂波,极大地提高机载火控雷达对慢速目标的检测性能.实验表明时空联合处理是一种较好的方法.

#### 参考文献:

- [1] L. E. Brennan, J. D. Mallett, I. S. Reed. Adaptive arrays in airborne MTI [J]. IEEE Trans., 1976, AP-24, (5): 607 - 615.
- [2] R. Klemm. Adaptive airborne MTI with tapered antenna arrays [J]. IEE Proc. - Radar, Sonar Navig, Feb 1998, 145(1).
- [3] 廖桂生,等.机载雷达时空二维部分联合自适应处理[J].电子科学学刊,1993,15(6):576 - 580.
- [4] R. Klemm. Adaptive airborne MTI: comparison of sideways and forward looking radar [A]. Proceedings of IEEE International Radar Conference [C]. Alexandria, VA, USA, MAY 1995: 614 - 618.
- [5] P. G. Richardson and S. D. Hayward. Adaptive space-time processing for forward looking radar [A]. Processing of IEEE International Radar Conference [C]. VA, USA, MAY 1995: 629 - 634.

#### 作者简介:



王 彤 1974 年出生,1996 年毕业于西安电子科技大学,获学士学位.现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室博士生.主要研究兴趣:阵列信号处理、时空二维自适应信号处理.

保 铮 (见本期第 30 页)



廖桂生 1963 年出生,教授,博士生导师,近期研究领域为统计信号与阵列信号处理及其在雷达和移动通讯中的应用.