

基于实测数据的地面慢速动目标检测

李真芳,保 铮,王 彤,廖桂生

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 2001年夏对某机载战场侦察雷达的 GMTI 功能进行了挂飞试验,并录取了一批双通道(天线)数据.本文给出此数据的部分处理结果,包括地面场景的多普勒波束锐化(DBS)成像,落在旁瓣区的动目标的检测和干涉定位,空时联合处理杂波抑制和动目标检测.

关键词: 地面动目标检测;多普勒波束锐化;空时二维自适应处理

中图分类号: TN958; TN959 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 09-1437-04

Slowly Moving Ground Target Detection Based on Measured Data

LI Zhen-fang,BAO Zheng,WANG Tong,LIAO Gui-sheng

(Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: In the summer of 2001, the ground moving target indication (GMTI) of an airborne battlefield reconnaissance radar was first tested in China and the data of two real channels were recorded. This paper presents some processing results, including DBS imaging of ground scene, detection and interferometric location of ground moving targets which fall in sidelobe clutter, space-time adaptive procession for detection of ground moving targets in mainlobe clutter.

Key words: ground slowly moving target detection; DBS; space-time adaptive processing (STAP)

1 引言

未来战争对雷达等军事传感器提出了更多、更高的要求,为了对敌方地面目标进行有效的侦察和打击,战场感知系统必须对更加广阔的区域进行有效的监视.它不仅要获得监视区域的精细的雷达图像,从中寻找有价值的固定目标,也要具备检测运动目标的能力.美国的联合监视目标攻击雷达系统(Joint STARS)就利用这种战场感知系统寻找敌方的移动导弹发射架等高价目标.其最重要的突破是利用了 SAR 和 GMTI 雷达之间的协同关系,即利用 SAR 成像发现敌方的静止目标,利用 GMTI 发现敌方的运动目标并对其进行精确定位,两者协同工作就可以对战场内的运动目标进行连续跟踪和监视,并将运动目标的位置标注在 SAR 图像上.

机载雷达地面动目标检测面临的最大问题是机载雷达下视时较强的地杂波难以有效抑制.针对战场感知雷达系统,文献[1]提出了用干涉仪天线抑制地杂波的方法,文献[2]对 DPCA 方法和干涉仪方法进行了比较.本文提出用机载预警雷达中广泛讨论的先进的空时二维联合处理的方法来提高系统的抑制杂波能力,指出空时二维联合方法^[3]可以有效提高系统的慢速目标检测性能.实测数据的处理结果证明了空时二维联合处理可以有效提高系统对地杂波的抑制能力和对弱目标的检测能力,可以以较小的代价大幅度提高系统的性能.

本雷达系统采取波束扫描方式,天线沿飞行方向分为前后两部分,发射时采用全孔径,而接收则分为前后两个子孔径接收,并有两路接收通道输出.雷达系统参数如表 1 所示.

表 1 雷达系统主要参数

载波波长	发射带宽	两天线相位 中心间距	发射波束 宽度	接收波 束宽度
0.03m	5MHz	0.787m	1.5°	3°

2 地面场景成像

2.1 DBS 工作原理^[4]

飞机以速度 v 前进,机载雷达波束朝飞机侧向某个角度照射.在波束照射区内,侧向角度不同,回波的多普勒谱也不同,因而通过多普勒滤波器组即可对横向不同角度进行分辨.由于实际雷达波束宽度不太大,因而为了在较短时间内对较大范围成像,它必须进行扫描.

假设波束视线 LOS 与正侧方向的夹角为 θ ,波束宽度为 $\Delta\theta$,则信号的多普勒主瓣频带宽度为:

$$f_d = \frac{2v \cos \theta \cos \Delta\theta}{\lambda} \quad (1)$$

上式中 θ 为俯仰角, λ 为波长.由上式,对一定的锐化比 N 可得多普勒分辨率和角度分辨率为:

$$f_d = \frac{f_d}{N} = \frac{2v \cos \theta_0 \cos \alpha}{N} = \frac{2v \cos \theta_0 \cos \alpha}{N} \quad (2)$$

$$= \frac{f_d}{2v \cos \theta_0 \cos \alpha} \quad (3)$$

所以对一定的 θ_0 , 锐化角分辨率 $\Delta \theta$ 与频率分辨率 f_d 成正比, 如果想得到固定的角分辨率 $\Delta \theta$, 频率分辨率 f_d 必须与 $\cos \theta_0$ 成正比, 这样式(3)分母上的 $\cos \theta_0$ 就会去掉. 若相干积累脉冲数为 M , 脉冲重复频率为 f_r , 则在距离为 R 处的横向分辨率为:

$$R_a = R \cdot \Delta \theta = \frac{R f_r}{2Mv \cos \theta_0 \cos \alpha} \quad (4)$$

2.2 用 DBS 对地面场景成像

用 DBS 方法对地面场景成像, 其纵向分辨率为 30 米 (信号频宽为 5MHz), 横向分辨率由式(4)得出. 把表 1 的雷达参数代入式(4)中得: $R_a = 18\text{m}$. 用这样的横向和纵向分辨率可以描绘地貌特征. 用 DBS 法对地貌轮廓成像, 实际上只用了主瓣杂波谱内的多普勒通道. 对应于 132 个相干脉冲积累数, 位于主瓣内的多普勒通道数有 75 个 (单孔径波束). 图 4 为 DBS 地面场景成像结果 (5 次扫描非相干叠加结果, 以抑制相干斑).

3 动目标检测原理

3.1 常规处理 (CST)

机载多普勒雷达检测空中目标的常规处理方法是通过对空域波束形成级联时域窄带滤波完成对目标信号的相干积累. 然而由于杂波谱的空时耦合特性, 主波束的地杂波谱在时频域被扩展, 旁瓣杂波更扩散到整个多普勒域, 因此其可检测的最低速度不可能做低.

3.2 和差波束 ADPCA 处理

和差波束 DPCA 的基本思想是用差波束来补偿雷达运动引起的杂波谱的展宽. 对偏离主波束方向, 而从不同入射角 θ_0 (主波束内) 来的各杂波分量的相邻两次回波 (设为第 $m-1$ 次和第 m 次) 通过和差支路的组合均已调整为等值且同相. 若主杂波射线方向的和波束杂波分量已调整为同相, 则偏离波束射线角的杂波分量, 由于载机运动的多普勒效应, 两次回波有一定的相位差, 且偏离的 θ_0 越大, 它们之间的相位差也越大. 上述两回波的相位差可通过差波束加以补偿, 其原理如图 1 所示.

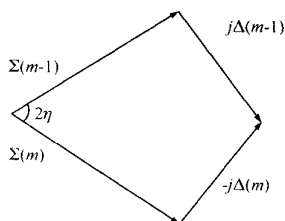


图 1 和差波束 DPCA 相位补偿原理

不难证明, 如果主波束内所有分量均能按图 1 那样很好补偿, 则和差方向量必须满足下式:

$$\sin(\theta_0 + \eta) = \sin(\theta_0 - \eta) \tan(\eta) \quad (5)$$

式中 θ_0 表示杂波入射方向与波束射线 LOS 的偏离角, $2\eta = 2v \sin(\theta_0 + \eta) T_r / \lambda$ 表示相邻两次回波之间的相位差, 其中 v 为载机速度, T_r 为脉冲重复周期, λ 为载波波长.

然而实际中我们再在差波束的输出端加一个自适应权 w 来调整差波束的幅值和相位使总的输出功率最小.

3.3 干涉仪方法

干涉仪方法利用地杂波的空时耦合, 即不同滤波器输出的固定杂波对应不同的指向, 因而可利用空间多个通道 (通常为两天线) 的组合波束在这些方向上形成波束零点以滤除主瓣内的杂波^[2].

设对于第 k 个多普勒滤波器, 其中心频率与动目标的多普勒频率很接近, 动目标信号将从该多普勒滤波器输出. 与其相同的地杂波的多普勒频率为

$$f_{d,c} = 2v \sin \theta_0 \cos \alpha \quad (6)$$

其中 θ_0 表示地杂波的方位角和俯视角, v 为载机速度.

在中、低重复频率条件下由于存在多普勒模糊, 同一个多普勒点会对应几个不同的方位角 θ_0 , 这些方位角中既有主瓣区的也有旁瓣区的. 干涉法主要用于对消方位角来自主瓣区的那部分杂波. 这部分杂波在两个子孔径上的相位差为

$$= \frac{2d}{\lambda} \sin \theta_0 \cos \alpha \quad (7)$$

所以只要令权系数 $w = e^j$, 就可以在方位角 θ_0 处形成零点. 干涉仪方法要求对不同的多普勒通道分别计算权系数.

实际上, 上述方法只是用多普勒处理将杂波分割后, 用空域处理 (空间差波束) 来抑制杂波. 由于地杂波有很强的空时耦合性, 用空时联合处理可得到更好的效果.

3.4 和差波束 3DT-STAP 处理

由于机载相控阵雷达的杂波有很强的空时耦合, 所以采用空时二维联合自适应处理能够得到更好的性能. 它能针对地杂波的具体特性形成斜凹口与杂波更好地匹配. 空时二维自适应处理的原理可以从多个角度加以解释, 其基本结构都是一个二维滤波器. 通常直接法的权矢量可以写成协方差矩阵的逆与导向矢量的乘积, 可以表示为

$$w = R^{-1} S = R^{-1/2} \cdot (R^{-1/2} S) \quad (8)$$

式中 $R^{-1/2} S$ 相当于数据的二维白化滤波器, $R^{-1/2} S$ 相当于白化后的导向矢量. 所以权系数对数据滤波的过程可以看作是对数据进行白化、匹配滤波的过程, 相当于一个二维色噪声条件下的匹配滤波器, 其输出信杂噪比被最大化. 只是杂波的统计特性是未知的, 只能通过估计得到.

空时二维自适应处理的方法很多, 考虑到工程实现问题我们通常采用和差波束 3DT 方法^[3,5]. 采用广义旁瓣自适应相消法, 以和波束的某一多普勒通道作为二维主波束, 用其余的五个二维波束作为辅助波束来对消主波束内的杂波.

4 比相单脉冲法对动目标精确横向定位

对动目标进行横向精确定位是不容易的, 不像对固定杂波那样可以通过 DBS 来实现. 由于运动目标存在一个由于自身运动速度引起的多普勒项, 这个多普勒项与 θ_0 没有确知关系, 因此通过 DBS 的锐化波束不可能把运动目标进行横向定位. 要对动目标进行横向定位至少需要两个子孔径作干涉, 即利用比相单脉冲法进行横向定位.

假设目标位于空间方位角 $\theta_0 + \Delta\theta$ ($\Delta\theta < \Delta\theta_0/2$) 处,其中 θ_0 为波束中心射线 LOS 的方位角, $\Delta\theta_0$ 为波束宽度,两子孔径的接收信号为:

$$x_1 = s(t), x_2 = s(t) \exp\left[-j \frac{2d \sin(\theta_0 + \Delta\theta)}{\lambda} \cos\theta_0\right] \quad (9)$$

上式中 d 为两孔径的相位中心间距, λ 为波长, $s(t)$ 为动目标的回波信号. 把两子孔径的输出信号共轭相乘:

$$y = x_1 \text{conj}(x_2) = |s(t)|^2 \exp\left[j \frac{2d \sin(\theta_0 + \Delta\theta)}{\lambda} \cos\theta_0\right] \quad (10)$$

上式中的相位会存在相位模糊,不能直接得到其相位,把上式与 $\exp\left[j \frac{2d \sin\theta_0 \cos\theta_0}{\lambda}\right]$ 相乘并整理得到动目标的方位角:

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta = \theta_0 + \frac{\arg\{y\}}{2d \cos\theta_0} \quad (11)$$

进而,运动目标的横向位置为:

$$R_a = R \cdot \sin\theta \quad (12)$$

式中 R 为运动目标的斜距.

5 实测数据的动目标检测与定位

在第 3 节中对几种动目标检测方法作了简要的介绍,下面用这些方法对这批杂波数据进行处理,并比较它们之间的性能.为了便于定量分析和计算,先在杂波中注入一个运动目标,来检验这些方法的处理结果.注入的动目标位于第 750 个距离单元,信杂噪比为 -20dB. 这些方法所得到的信杂噪比改善因子曲线分别如图 2 所示.

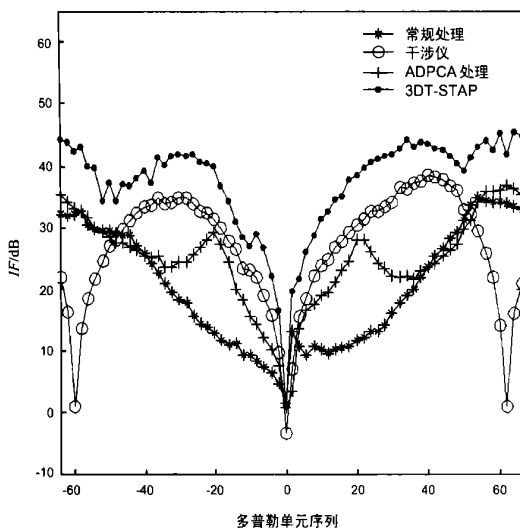


图 2 信杂噪比改善因子曲线

从图 2 可以看到,传统的常规处理是最差的,它的凹口最宽,这对检测地面低速目标是极不利的.和差波束 ADPCA 是多普勒前处理,而且只用一个自适应权,因此在和差波束不满足式(5)的条件下,它只在非常靠近主杂波的地方有比较好的改善,而在离开主杂波的地方其性能跟常规处理差不多.干涉仪是多普勒后处理,对每一个多普勒点分别调整权以对消掉某个与该多普勒通道具有相同多普勒频率的空间杂

波,它在主杂波区的性能比 ADPCA 好的多.干涉仪在旁瓣区的性能突然变得很差,这是由于两子孔径的相位中心间距 $d \gg \lambda/2$,而发生相位模糊导致“盲速”,把目标消掉了,因此在旁瓣区不适合用干涉仪方法.和差波束 3DT-STAP 是最好的,它的凹口比较窄,利于地面低速目标检测.3DT-STAP 由于用了更多的自由度,无论在主瓣区还是在旁瓣区都取得比较好的性能.

对应图 2 的第-13 号多普勒通道的输出杂波沿距离分布如图 3 所示,进一步验证了这些方法对运动目标的检测能力.可以看到,3DT 空时自适应处理后的目标远远高出背景杂波,而常规处理的目标完全被淹没在了杂波背景中. ADPCA 方法的虚警概率要高于干涉仪方法的虚警概率.

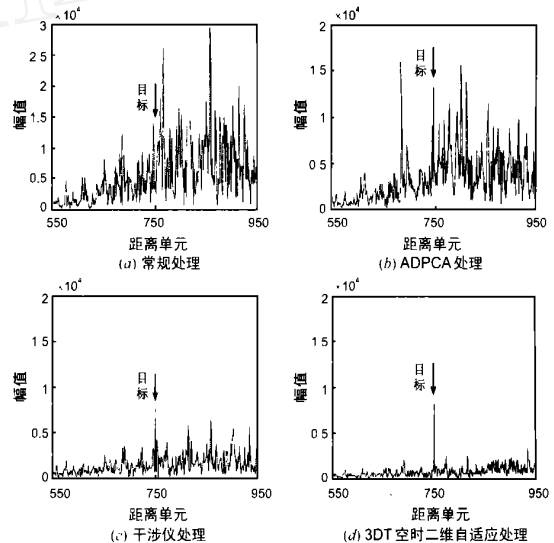


图 3 第-13 号多普勒通道的输出杂波沿距离分布图

下面检测实际的动目标,目标检测为:杂波抑制 + CFAR, CFAR 所用距离门为左右各 8 个,门限取为 20dB.

本雷达系统只有两个子孔径,只能用干涉法对常规处理的旁瓣杂波区中动目标进行横向定位,图 4 是用干涉法进行

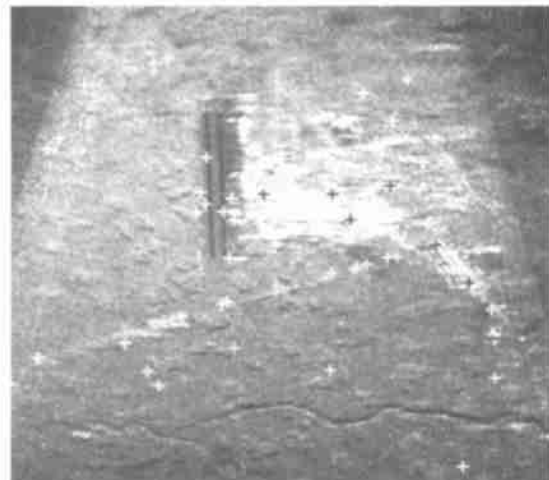


图 4 干涉法定位的旁瓣区动目标

横向定位的旁瓣区动目标. 可以看到, 经过干涉定位后目标聚集于公路上. 因此用干涉法对远距离的运动目标精确横向定位是必要的, 这就要求系统在杂波抑制后至少剩余两个空间自由度.

6 结论

把 DBS 用于波束扫描的战场感知雷达的 GMTI 模式, 可以快速得到大面积的低分辨地面场景图像, 而且可同时进行地面动目标检测, 并把动目标标定到场景图像上. 这批实测数据的 GMTI 处理结果表明空时二维自适应处理 (STAP) 可以大大提高动目标的检测性能, 而且 3DT-STAP 的运算量不大, 工程实现也不困难. 因此, 结合我国的国情把 3DT-STAP 用于战场感知雷达的 GMTI 模式, 可以大大提高战场侦察能力.

参考文献:

- [1] E Yadin. A Performance Evaluation Mode for a Two Port Interferometer SAR-MTI[C]. USA: IEEE 1996 National Radar Conference, 1996. 261

- 266.

- [2] 林幼权. 机载合成孔径成像与地面动目标检测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2000.
- [3] 王彤, 保铮. 机载慢速目标检测的 STAP 方法[J]. 电子学报, 2000, 28(9): 123 - 125.
- [4] 张剑云. 有关雷达成像的几个问题的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1994.
- [5] 廖桂生, 保铮. 机载雷达空时二维自适应处理框架及其应用[J]. 中国科学(E), 1997, 27(8): 336 - 341.

作者简介:

李真芳 男, 1977 年 11 月生于山东寿光市, 1999 年本科毕业于西安电子科技大学, 同年免试推荐为该校雷达信号处理重点实验室硕博连读生, 主要研究方向: 地面动目标检测 (GMTI) 和综合孔径雷达成像 (SAR). E-mail: lzf @xidian. edu. cn.

保 铮 男, 1927 年 12 月出生于江苏南通, 1953 年毕业于中国人民解放军通讯工程学院, 现为中国科学院院士, 中国电子学会会士, 研究领域为雷达信号处理及现代信号处理.

电子学报

2003 年第 9 期 Acta Electronica Sinica No. 9 2003

(总期 237 期) (Monthly) (Series No. 237)

主管单位	中国科学技术协会	China Association for Science and Technology
主办单位	中国电子学会	Published by the Chinese Institute of Electronics, Beijing
协办单位	南京才华科技有限公司	Nanjing Caihua Technology Co., Ltd.
编辑	《电子学报》编辑委员会	Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica
主 编	王 守 觉	Chief Editor: WANG Shou-jue
总 编 辑	刘 力	Director: LIU Li
通 信 处	北 京 1 6 5 信 箱 (邮政编码 100036)	Add: Editorial Office of Acta Electronica Sinica (POBox 165, Beijing 100036, China)
电 话	(010) 68279116, 68285082	Tel: 86-10-68279116, 68285082
传 真	(010) 68173796	Fax: 86-10-68173796

Home page: <http://www.elecjournal.org>; <http://dzxu.chinajournal.net.cn>

Email: cje@elecjournal.org; dzxu@chinajournal.net.cn

排版印刷 北京育兴达印刷厂 Printed by Yuxingda, Beijing, China

国内总发行 北京市报刊发行局 Distributed by

Domestic: Beijing Baokan Faxingju, China

国外总发行 中国国际图书贸易总公司 Foreign: China International Book Trading Corporation

国内订购处 全国各邮电局 Subscription Office — All Local Post Offices in China