

应用 DBS 技术在 SAR/GMTI 模式下高分辨率成像

危嵩¹, 孙文², 王宏远¹

(1. 华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074; 2. 承德石油高等专科学校
电气电子系, 河北 承德 067000)

摘要:多普勒波束锐化成像技术(DBS)能为检测出的动目标定位提供参考,从而有效地实现精确打击。DBS 技术在弹道导航、地形匹配等许多方面有着广泛的应用。首先简述了 DBS 成像方法的一般工作原理,经分析得出结论:DBS 成像在 SAR/GMTI 模式下应用时,如果引入聚焦型的 SAR 处理方法,即通过去距离单元走动、去方位向调频斜率等方法可有效提高雷达成像质量。最后利用雷达实测数据进行处理,得出了较满意的高分辨 DBS 成像结果。

关键词:雷达成像; 多普勒波束锐化; 去调频斜率; 距离单元走动

中图分类号:TN957 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)03-0337-04

High resolution image by DBS with SAR/GMTI

WEI Song¹, SUN Wen², WANG Hong-yuan¹

(1. Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Department of Electrical and Electronic, Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China)

Abstract: Doppler beam sharpening (DBS) technique can provide reference for the location of the moving target detected to attack more accurately and effectively. DBS also can be used in trajectory navigation, landform matching, etc. In this paper, the basic theory of DBS imaging is introduced at first, then SAR processing method is analyzed which includes range cell migration correction technique and azimuth dechirping technique, and can improve image quality effectively in DBS imaging on SAR/GMTI mode. At last, some satisfying images by DBS based on the raw radar data are obtained.

Key words: Radar imaging; Doppler beam sharpening; Dechirping technique; Range cell migration

0 引言

多普勒波束锐化(Doppler beam sharpening, DBS)技术是目前高分辨率雷达成像技术之一,在战术侦察、地形匹配导航、目标识别等方面有着广泛的应用。如在合成孔径雷达/地面动目标定位(Synthetic

Aperture Radar/Ground Moving Target Indication, SAR/GMTI)模式下应用,可对运动目标定位,从而为实现准确打击提供参考。由于较小的计算量,较宽的扫描范围,其实时性、有效性已得到业界认可。自从 1951 年 C. Wiley 提出了 DBS 原理,国外在此技术上有了长足发展,以美国为例,其海军的 S-3、空军的 F-16 等

收稿日期:2004-07-14; 修订日期:2004-08-12

作者简介:危嵩(1976-),男,湖北武汉人,博士生,主要从事雷达信号处理研究。

多种现役战机、预警机、无人机均装配了具有 DBS 功能的雷达系统^[1,2]。

近十几年来,我国也开展了该项技术的研究,参考文献[3]对 DBS 成像原理作了详尽的分析,参考文献[4]对 DBS 技术中若干问题进行了探讨,参考文献[5]则对 DBS 技术的实时性作了详尽研究。但 DBS 技术在 SAR/GMTI 模式下的应用和如何提高 DBS 方位向分辨率方法的讨论并不多见。

本文利用雷达实测数据,进行了 DBS 成像技术研究,探讨了如何有效提高 DBS 成像分辨率的问题。

1 DBS 成像方法

DBS 技术是一种有效的雷达成像技术,由于雷达波束照射下的地面场景与机载雷达存在相对速度,使回波产生类似线性调频信号,依据多普勒分辨理论,得到 DBS 图像。其工作方式与合成孔径雷达(SAR)类似,不同之处在于由于天线处于扫描模式,其图像方位向分辨率要低于 SAR 图像,但运算量较小,而且可在较短时间内获得较大覆盖场景图像。DBS 工作原理如图 1 所示。

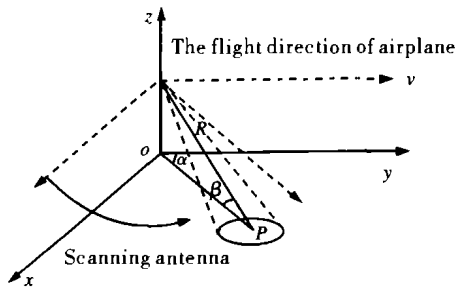


图 1 雷达与地面目标几何关系

Fig.1 Geometry relation of radar and target

雷达载机以速度 v 前进,其主波束方位角为 α ,俯仰角为 β ,入射锥角为 φ ,雷达与地面 P 点斜距为 R ,主波束方位向宽度为 θ ,雷达波长为 λ ,脉冲发射重复频率 PRF ,由于存在天线扫描速度,导致回波多普勒频率不同。雷达视线多普勒频率为:

$$f_{dc} = \frac{2v}{\lambda} \cos\beta \cos\alpha = \frac{2v}{\lambda} \cos\varphi \quad (1)$$

主波束宽度内多普勒频率将被展宽:

$$\Delta F_d = \frac{2v}{\lambda} \theta \cos\beta \sin\alpha \quad (2)$$

由公式(1)、(2)可知:在天线扫描时,天线波束指向的多普勒频率 $f_{dc} \propto \cos\alpha$;多普勒频率随扫描角 α 的变化率 $\frac{df_{dc}}{d\alpha} \propto \sin\alpha$ 。DBS 技术等效于对多普勒带宽 ΔF_d 进行等分割,锐化比为 K 时,相当于用 K 个窄带滤波器覆盖 ΔF_d ,窄带滤波器带宽为:

$$\delta F_d = \frac{2v}{\lambda K} \theta \cos\beta \sin\alpha \quad (3)$$

相干处理时间:

$$T_{DBS} = \frac{1}{\delta F_d} \quad (4)$$

T_{DBS} 也可表示为相干积累点数 N_a 与重复频率 PRF 的关系式:

$$T_{DBS} = \frac{N_a}{PRF} \quad (5)$$

锐化比:

$$K = \frac{2v}{\lambda} \theta \cos\beta \sin\alpha T_{DBS} = \frac{2v}{\lambda} \theta \cos\beta \sin\alpha \frac{N_a}{PRF} \quad (6)$$

在方位向上通过 FFT 处理,即可实现方位向分辨。距离向分辨则通过发射的线性调频信号进行脉冲压缩来实现。

锐化比的恒定对 DBS 图像的几何视觉效果至关重要,当 $v, \lambda, \beta, \theta, N_a$ 保持恒定时, K 随方位角 α 的变化而变化。DBS 系统最早应用于机载火控雷达,通常扫描角度 α 为 $15^\circ \sim 60^\circ$, $\sin\alpha$ 变化范围为 $0.259 \sim 0.866$,故锐化比变化范围较大,这时需要对 PRF 进行分段变化,随着方位角不同使用的 PRF 也不同,也称为变重频处理,这样可以保证锐化比基本恒定。在本文提到的 SAR/GMTI 模式下,扫描角度为 $72^\circ \sim 108^\circ$, $\sin\alpha$ 变化范围为 $0.951 \sim 1$,变化量很小,因此不需要变化重复频率,这也是与传统的 DBS 成像有所区别的地方之一。为了得到更清晰的图像,可对数据进行加窗处理。海明窗又称为升余弦窗,有较好的副瓣抑制作用,海明窗的加窗函数为:

$$\omega(n) = \alpha + (1 - \alpha) \cos\left(\frac{2\pi}{N} n\right) \quad (7)$$

对应的频谱函数为:

$$W(\omega) = \alpha W_R(\omega) + \frac{1}{2} (1-\alpha) \left[W_R \left(\omega - \frac{2\pi}{N} \right) + W_R \left(\omega + \frac{2\pi}{N} \right) \right] \quad (8)$$

当 $\alpha=0.53856$ 时,通过加海明窗处理,可使 99.96% 的能量集中在主瓣内,副瓣电平可压低到 -43 dB,最大限度减小副瓣的不利影响。

2 在 SAR/GMTI 模式下 DBS 成像方法的改进

2.1 去距离走动技术

在 DBS 成像过程中,由于波束以一定倾斜角度照射场景目标,从而产生了距离走动,即在每一个方位时刻,载机同目标之间的距离是变化的,这种变化造成了在不同的方位时刻,同一点目标的回波信号在距离上的位置不同。

设 T_{DBS} 相干时间内,点目标总的距离走动量为 ΔR ,由参考文献[6]得知:

$$\Delta R = \frac{N_f T_{DBS}}{2} \quad (9)$$

δR 为距离分辨单元,当 $\Delta R > \delta R$ 时,需要进行去距离走动处理。设距离压缩后,每个点目标回波信号为 $G(m, n)$ (m, n 分别为距离向、方位向采样点位置),此时只需对其乘一个距离走动校正因子 H ,就可去掉距离走动效应:

$$H = \exp \left[j2\pi \frac{mn\Delta R}{N_r N_a \delta R} \right] \quad (10)$$

式中 N_r 为距离向采样点数; δR 为距离分辨单元。

仿真结果如图 2、图 3 所示,图 2 为距离压缩后未经走动校正的结果,图 3 为距离压缩后经过了走动校正的结果,可明显看出越距离单元走动现象消失了。

2.2 去方位向调频斜率技术

由公式(1)可知, f_{α} 与 $\cos \alpha$ 成正比,当 α 在 $72^\circ \sim 108^\circ$ 变化时, f_{α} 可考虑为随 α 成线性变化,因此可认为点目标在方位向是线性调频信号,去方位向调频斜率的过程实际上是去掉方位向线性调频信号的二次相位项,并使输出的信号能量只集中到单一频率上的过程。

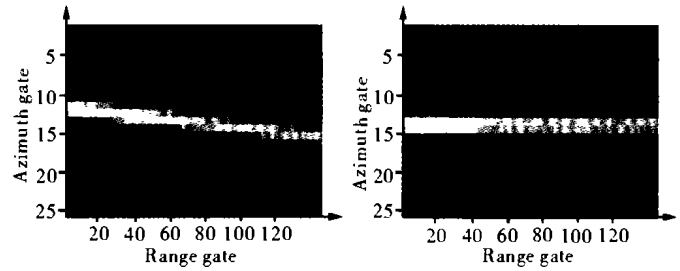


图 2 未经距离走动校正结果 图 3 经过距离走动校正结果
Fig.2 Result before range cell migration correction Fig.3 Result after range cell migration correction

调频斜率:

$$f_r = \frac{2v^2 \sin^2 \varphi}{\lambda R} \quad (11)$$

去调频的实现过程是将原始信号与具有相同调频斜率的参考信号的共轭相乘。

方位向多普勒信号是一个含有二次相位项的线性调频信号,设为:

$$S_a(t) = \exp[j(2\pi f_{\alpha} t + \pi f_r t^2)] \quad (12)$$

若 f_{α} 已补偿,则

$$S_a(t) = \exp[j\pi f_r t^2] \quad (13)$$

构建参考函数为:

$$\text{Re } f_a(t) = \exp[-j\pi f_r t^2] \quad (14)$$

则可完全和信号匹配,实现方位向分辨, f_r 可通过相位差(PDA)等算法估算得到。

图 4 是模拟点目标去方位向调频斜率前、后的仿真结果图,实线所表示的是没有去方位向调频而直接进行方位向 FFT 压缩处理得到的点目标结果,虚线表

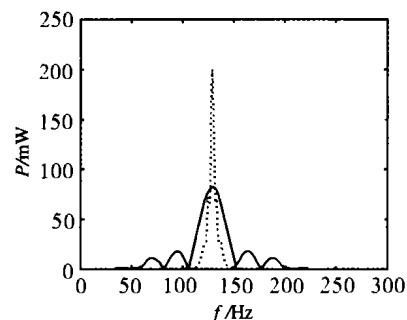


图 4 去方位向调频斜率结果
Fig.4 Result of azimuth dechirping

示的是进行了方位向调频处理后再进行方位向压缩的点目标结果,可看出前者较后者在频谱上有明显展宽,表现在图像上,则后者较前者更清晰。

3 实测数据处理结果分析

利用Ku波段 SAR/GMTI 雷达实测数据进行 DBS 高分辨成像处理,得到了较好的成像结果:

俯仰角 15° ; 锐化比 60;
波束扫描范围 $72^\circ\sim 108^\circ$; 主波束方位向宽 3.5° ;
波束扫描速度 $18^\circ/\text{s}$; 发射信号带宽 80 MHz;
脉冲重复频率 2000 Hz; 脉冲宽度 $40\ \mu\text{s}$ 。

首先对每一段方位向数据通过时域相关法估算多普勒质心(一段方位向数据所占时间长度即方位向相干积累时间 T_{DBS}),在时域中去除距离走动影响,通过 PDA 算法估算出 f_r 后,在方位向解调频处理,再进行方位向加海明窗进行 FFT 处理,经拼接即可得到较高质量图像。

图 5、图 7 分别是未经距离走动校正和未去方位向调频的成像结果,图 6、图 8 分别是去距离走动和去方位向调频处理后的成像结果,可以明显看出图 5、图 7 较模糊,而图 6、图 8 较为清晰。



图 5 未经距离走动校正处理 图 6 进行了距离走动校正处理
Fig.5 Image before range cell migration correction Fig.6 Image after range cell migration correction

图 9 是通过重叠拼接法^[7]拼接后的成像结果,从图中可看出机场、地貌清晰可见,成像质量较好。

4 结论

DBS 技术是一种较成熟的技术,但其在 SAR/GMTI 模式下进行高分辨雷达成像有着重要的意义,能对检测出的动目标提供更全面的地理信息,是 SAR 雷达重要发展方向之一。由于 SAR 雷达在距离向较



图 7 未经方位向去调频处理 图 8 进行了方位向去调频处理
Fig.7 Image before azimuth dechirping Fig.8 Image after azimuth dechirping



图 9 整幅成像结果
Fig.9 Result of whole image

传统雷达有更高分辨率,在 SAR/GMTI 模式下引进聚焦型 SAR 处理方法,能有效提高 DBS 成像质量。本文通过对实测数据处理得到了较好的成像结果。

参考文献:

- [1] Tobin M. Real time simultaneous SAR/GMTI in a tactical airborne environment[A]. European Conference on Synthetic Aperture Radar[C]. 1996. 63-66.
- [2] 倪树新,李一飞. 军用激光雷达的发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 111-114.
- [3] 周荫清. 机载脉冲多普勒雷达 DBS 技术[J]. 航空学报, 1988, 9(12): 574-581.
- [4] 张直中. 多普勒波束锐化(DBS)理论和实践中若干问题的探讨[J]. 现代雷达, 1991, 13(2): 1-12.
- [5] 毛士艺,李少洪,黄永红,等. 机载 PD 雷达 DBS 实时成像研究[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 32-34.
- [6] Curlander J C. Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [7] 孙泓波,顾红,苏卫民,等. 机载脉冲多普勒雷达 DBS 成像实验研究[J]. 数据采集与处理, 2001, 16(4): 423-427.