

基于 DPCA 杂波抑制的地面振动目标微多普勒提取

张 伟¹, 童创明¹, 张 群², 罗 迎², 朱 丰²

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800;

2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 地面微动目标激励的雷达回波信号的微多普勒调制, 反映了该目标的独有特征, 因此可用于目标检测与识别。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)对地面振动目标检测时, 回波信号中不可避免地包含大量地杂波, 给其微多普勒信息提取造成很大困难。为此, 提出一种基于双通道 SAR/DPCA 杂波抑制的地面振动目标的微多普勒信息提取方法。首先利用双通道 DPCA 技术在复原原始数据域对消地杂波以获取振动目标的回波信息, 然后详细推导了杂波对消后微多普勒频率的参数化表达式。最后, 通过数值仿真验证了该方法的有效性和正确性。

关键词: 雷达成像; 微多普勒; 杂波抑制; 相位中心偏置天线

中图分类号: TN 957

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.04.05

Micro-Doppler extraction of ground vibrating targets based on SAR/DPCA technique

ZHANG Wei¹, TONG Chuang-ming¹, ZHANG Qun², LUO Ying², ZHU Feng²

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China;

2. Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The micro-Doppler modulation induced by mechanical vibration or rotation of structures on a ground target is to be regarded as a unique signature of this target, which can be used for target detection and identification. It's well known that the returned radar signal not only includes the micro-motion target echo but also the strong ground clutter, so it's difficult to extract its micro-Doppler information. In order to solve this problem, the method of micro-Doppler extraction based on dual-channel SAR/DPCA technique is presented. First, the dual-channel DPCA technique is utilized to cancel the ground clutter in the raw-data domain and preserve the echo of the vibrating target, and then the mathematical expression of micro-Doppler frequency is deduced in detail. Finally, a computer simulation combined with the time-frequency analysis is given to verify the validity of the theoretical analysis and the proposed method.

Keywords: radar imaging; micro-Doppler; clutter suppression; displaced phase center antenna (DPCA)

0 引 言

当前, 关于微多普勒信息提取^[1-2]的研究已逐渐成为目标探测与识别领域新的热点, 不仅可以利用逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像技术对空中或空间目标的微多普勒特征^[3-4]进行研究, 也可以借助于合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像技术对地面目标的微多普勒特征进行研究。SAR 地面振动目标的微多普勒特征实际上是目标振动引起的回波相位的正弦调制, 文献[5]中以地面动目标检测(ground moving target indication, GMTI)雷达 APY-6 采集的两个振动角散射器的回波数据为例, 采用自适应时频分析的方法提取了它

们的微动特征。文献[6]着重研究了转动目标的微多普勒特征, 针对由 APY-6 采集的 SAR 场景中旋转天线的回波信号, 分别采用小波分解和自适应 chirplet 分解的方法分析和提取了其微多普勒特征。文献[7-8]详细分析了 SAR 场景中目标匀速、加速、振动和旋转 4 种不同运动状态对目标像的影响, 并通过数值模拟和试验研究了地面振动和旋转目标的微多普勒频移。综观现有文献, 大多是在不考虑地杂波影响或杂波较弱的条件下所做的研究工作。众所周知, 通常情况下 SAR/GMTI 中地面上的慢速运动目标受强地杂波影响而难以检测。同样地, 对地面微动目标(如坦克引擎的振动; 地基或舰载对空监视雷达天线的转动; 悬停直升机螺旋桨的转动等)的检测也面临类似的问题, 因此如何

收稿日期: 2010-03-17; 修回日期: 2010-12-08。

基金项目: 国家自然科学基金(60971100)资助课题

作者简介: 张伟(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雷达目标成像与识别。E-mail: zwtigers@163.com

在强地杂波中检测微动目标并提取其微动特征就成为一个关键问题。文献[9]初步探讨了利用一次相消技术剔除由固定地物引入的地杂波,进而完成含旋转部件的目标成像及微多普勒信息提取。

本文借鉴 SAR/GMTI 中的天线相位中心偏置技术(displaced phase center antenna, DPCA),提出了一种基于复原原始数据域双通道 DPCA 地杂波抑制的地面振动目标的微多普勒信息提取方法。

1 双通道 SAR/DPCA 分析模型

图 1 给出了机载单基双通道 SAR/DPCA 的原理示意图,双通道 DPCA 系统沿飞行轨迹放置两个天线 A_1 和 A_2 , 两天线以固定距离 d 分开,整个系统的脉冲重复周期为 T , 每个通道的脉冲重复周期为 $2T$,即两通道交替发射和接收。

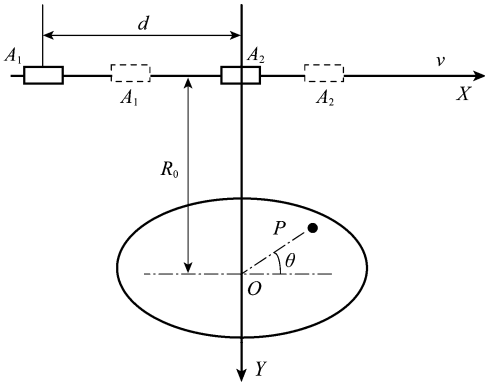


图 1 单基双通道 SAR/DPCA 原理示意图

当天线相位中心间距 d 与载机速度 v , 脉冲重复周期 T 之间满足下式所示关系^[10]

$$d = mvT, m = 1, 3, 5, \dots \quad (1)$$

则天线 A_2 接收的第 1 个脉冲回波信号和天线 A_1 接收的第 $m+1$ 个脉冲回波信号的相位中心恰好重合,即这两路回波信号包含相同的静止目标信息,但是运动目标由于自身的运动而产生了额外的信息,所以二者包含的动目标信息不同。将两路回波信号相减,就能够消除静止目标信息,保留动目标信息。

2 复原原始数据域 DPCA 杂波对消

为便于分析起见,建立以下散射点模型:假设场景内有目标 P 以位于测绘中心处的静止散射点 O 为中心作正弦形式的振动,振动方向与 X 轴夹角为 θ , 振动频率和幅度分别为 f_{vib} 和 a_{vib} 。

如图 1 所示,载机以速度 v 沿方向向运动,假设在方向向慢时间 τ_0 时刻,天线 A_2 的坐标为 $(v\tau_0, 0)$, 天线 A_1 的坐标为 $(v\tau_0 - d, 0)$ 。航迹到场景中心的最近距离为 R_0 , 则振动散射点的坐标为

$$\begin{cases} x(\tau_0) = a_{vib} \cos(\omega_{vib} \tau_0) \cos(\theta) \\ y(\tau_0) = R_0 - a_{vib} \cos(\omega_{vib} \tau_0) \sin(\theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\omega_{vib} = 2\pi f_{vib}$ 为振动角频率。此时天线 A_2 到振动散射点 P 的单程距离为

$$R_2(\tau_0) = \sqrt{(v\tau_0 - x(\tau_0))^2 + y(\tau_0)^2} \quad (3)$$

按照泰勒级数展开式(3)并忽略高次项,距离 $R_2(\tau_0)$ 可被重新表示为

$$R_2(\tau_0) \approx R_0 + \frac{1}{2R_0} (v\tau_0 - x(\tau_0))^2 - a_{vib} \cos(\omega_{vib} \tau_0) \sin(\theta) \quad (4)$$

同理可得在 $\tau_0 + mT$ 时刻,天线 A_1 到振动散射点 P 的单程距离为

$$R_1(\tau_0 + mT) \approx R_0 + \frac{1}{2R_0} (v(\tau_0 + mT) - d - x(\tau_0 + mT))^2 - a_{vib} \cos(\omega_{vib}(\tau_0 + mT)) \sin(\theta) \quad (5)$$

假设 $p(t)$ 为雷达发射的线性调频信号,即

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (6)$$

式中,当 $-1/2 \leq t \leq 1/2$ 时, $\text{rect}(t) = 1$; f_c 是载频; T_p 是脉冲宽度; μ 是调频率; t 表示距离向快时间。则通道 A_2, A_1 所接收信号经相干检波和距离压缩后对应的基带信号分别为

$$s_2(\tau_0) = C_0 \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi R_2(\tau_0)}{\lambda}\right) \quad (7)$$

$$s_2(\tau_0 + mT) = C_0 \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi R_1(\tau_0 + mT)}{\lambda}\right) \quad (8)$$

式中,常数 C_0 是由目标的后向散射系数和天线的双程方向图决定的。忽略载机运动误差的影响,在满足式(1)的条件下,对两路回波信号采用 DPCA 方法处理,在原始数据域完成对消,即

$$\Delta s = s_1(\tau_0 + mT) - s_2(\tau_0) =$$

$$C_0 \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0 + \frac{1}{2R_0} (v\tau_0 - x(\tau_0 + mT))^2 - a_{vib} \cos(\omega_{vib}(\tau_0 + mT)) \sin(\theta) \right]\right\} - C_0 \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0 + \frac{1}{2R_0} (v\tau_0 - x(\tau_0))^2 - a_{vib} \cos(\omega_{vib} \tau_0) \sin(\theta) \right]\right\} \quad (9)$$

由式(9)可知,对于静止目标, ω_{vib} 和 a_{vib} 均为 0, 于是 $\Delta s = 0$, 这表明由静止目标所产生的地杂波被对消掉。而对于振动目标, ω_{vib} 和 a_{vib} 均不为 0, 则 $\Delta s \neq 0$, 因此振动目标信息得以保留。

3 微多普勒信息提取

为便于分析推导,取中间变量

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + \frac{1}{2R_0} (v\tau_0 - x(\tau_0 + mT))^2 \right) - \frac{4\pi}{\lambda} (a_{vib} \cos(\omega_{vib}(\tau_0 + mT)) \sin(\theta)) \quad (10)$$

$$\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + \frac{1}{2R_0} (v\tau_0 - x(\tau_0))^2 \right) - \frac{4\pi}{\lambda} (a_{vib} \cos(\omega_{vib} \tau_0) \sin(\theta)) \quad (11)$$

将式(10)和式(11)代入式(9),并逐步推导可得

$$\Delta s = 2C_0 \sin\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \exp\left(-j\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)\right) \quad (12)$$

式中

$$\sin\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \approx \sin\left\{-\frac{4\pi}{\lambda} a_{vib} \sin(\theta) \cdot \sin\left(\frac{\omega_{vib} mT}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\omega_{vib} \tau_0 + \omega_{vib} mT}{2}\right)\right\} \quad (13)$$

显而易见, DPCA 杂波对消处理后回波信号的幅度随慢时间作正弦形式的变化。

另外, 由式(12)可知地杂波对消后所得回波信号的相位为

$$\psi(\tau_0) = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} - \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

由式(14)对慢时间 τ_0 求导数, 并考虑远场情况, 可得瞬时多普勒频率为

$$f = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\psi(\tau_0)}{d\tau_0} \approx -\frac{2v^2}{\lambda R_0} \tau_0 - \frac{2}{\lambda} a_{\text{vib}} \omega_{\text{vib}} \sin(\theta) \cdot \sin\left(\frac{2\omega_{\text{vib}}\tau_0 + \omega_{\text{vib}}mT}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_{\text{vib}}mT}{2}\right) \quad (15)$$

式中, 右边第一项为由雷达运动产生的多普勒频率; 第二项就是由散射点的振动而引入的微多普勒调制, 即

$$f_{\text{micro-Doppler}} = -\frac{2}{\lambda} a_{\text{vib}} \omega_{\text{vib}} \sin(\theta) \cdot \sin\left(\frac{2\omega_{\text{vib}}\tau_0 + \omega_{\text{vib}}mT}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_{\text{vib}}mT}{2}\right) \quad (16)$$

由式(16)可见, 在双通道 DPCA 消除地杂波基础上, 目标振动激励的微多普勒频移不仅与该目标的微动参数和载波波长等相关, 而且与两通道的相位中心间距有关。这与基于单通道 SAR 所接收的回波信号提取的微多普勒频率不同^[8], 两者的最大值相差一个余弦函数因子。

由式(15)可见, 为获取目标的微多普勒特征, 需要消除由雷达运动引起的多普勒效应。目前有很多方法^[11]用于获取雷达运动引起的方位向多普勒调频率, 既可以从雷达导航参数或雷达回波数据中获取, 也可采用曲线拟合的方法获取。在此假设已经精确补偿了由雷达平动引起的多普勒频移(使杂波对消后的回波信号 Δs 与参考函数 $\exp(-j\pi K_a \tau^2)$ 相乘即可, 其中方位多普勒调频率 $K_a = -2v^2/(\lambda R_0)$, τ 为方位向慢时间)。在此基础上, 由时频分析技术就可获得微多普勒频率随慢时间变化的分布图, 从而可估计目标的振动频率 f_{es} 和最大瞬时微多普勒频移 f_{max} , 进而可获得目标的振动幅度为

$$a_{\text{es}} = \frac{f_{\text{max}}\lambda}{4\pi f_{\text{es}}} \cdot \frac{1}{\sin(\theta) \cos(\pi f_{\text{es}}mT)} \quad (17)$$

综上所述, 图 2 给出了在满足式(1)条件下, 基于复原始数据域双通道 DPCA 杂波对消处理的地面振动目标的微多普勒信息提取流程。

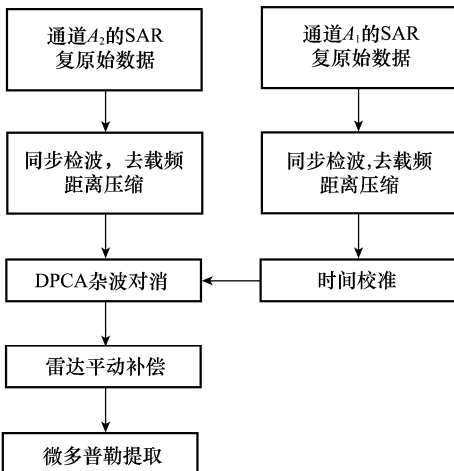


图 2 复原始数据域双通道 DPCA 微多普勒提取流程

4 仿真实验

仿真实验中, 雷达参数设置如下: 雷达载频 $f_c = 94 \text{ GHz}(\lambda = 3.19 \text{ mm})$, 带宽 $B = 200 \text{ MHz}$ 。发射信号为脉宽 $T_p = 1.2 \mu\text{s}$ 的线性调频信号, 载机运动速度 $v = 75 \text{ m/s}$, 系统脉冲重复周期 $T = 260 \mu\text{s}$, 两个天线相位中心间距 $d = 25vT$ 。

假设测绘场景内有 4 个静止点目标, 其回波即为要消除的地杂波。振动点目标的参数为: 振动频率 $f_{\text{vib}} = 10 \text{ Hz}$, 振动幅度 $a_{\text{vib}} = 3 \text{ mm}$, 振动方向 $\theta = \pi/2 \text{ rad}$ (即沿雷达视线方向振动)。经计算每个通道的信杂比(signal clutter ratio, SNR)约为 -6 dB 。图 3 为通道 A_2 所接收回波经相干检波和距离压缩后的基带回波信号的幅度图, 图 4 为双通道 DPCA 杂波对消后回波信号的幅度图。

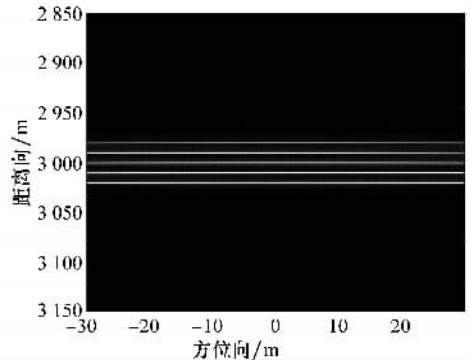


图 3 通道 A_2 距离压缩后基带回波信号的幅度图

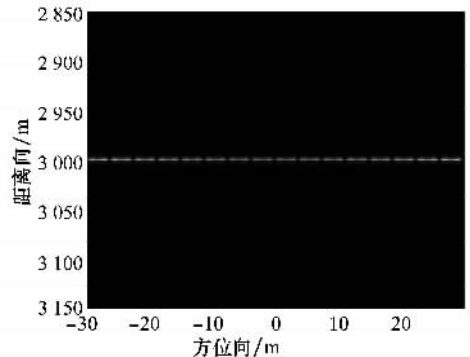


图 4 双通道 DPCA 杂波对消后回波信号的幅度图

由图 3 可见, 通道 A_2 的回波信号中不仅包含微动目标的信息, 还含有地杂波(即静止目标信息), 因此只根据单通道回波信号不能分辨出微动目标回波信号所占据的距离单元。由图 4 可见, 由双通道 DPCA 技术即可消除地杂波的影响, 而只保留微动目标的回波信息, 从而可以检测地面微动目标, 而且受地杂波对消处理的影响, 图 4 中距离压缩后回波信号的幅度呈现周期性明暗交替变化的特点, 这与前述理论分析一致。

一般说来, 地面目标的振动幅度比较小, 典型值在 mm 量级, 远小于 SAR 距离分辨单元, 可以不考虑越距离单元

徙动的影响,因此在图4中振动目标的回波信号近似为一条直线。目标振动引入的微多普勒频移,可通过对此直线所在距离单元的回波信号作时频分析来得到。图5(a)即为经地杂波对消并作雷达平动补偿后回波信号的伪 Wigner-Ville 分布 (pseudo-WVD distribution),图5(b)为按照式(16)计算得到的目标振动激励的微多普勒频率分布图。

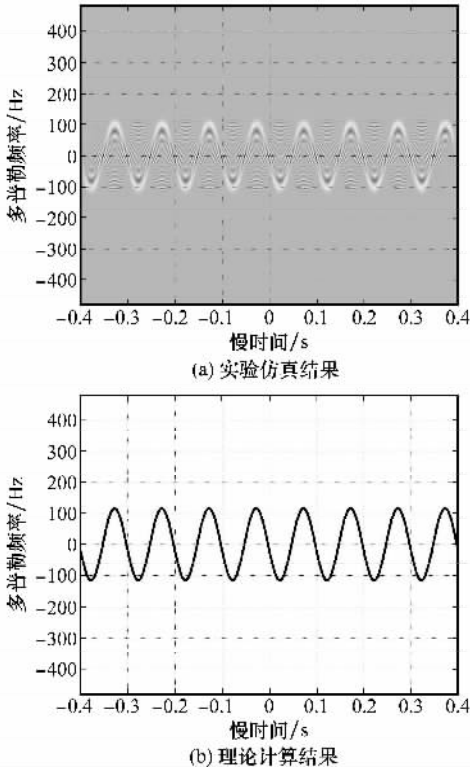


图5 DPCA 杂波对消和雷达运动补偿后的微多普勒频率

由图5(a)和5(b)对比可见,经双通道 DPCA 杂波对消和雷达运动补偿后微多普勒频率的实验仿真结果与理论计算值相吻合,从而验证了理论推导的正确性。另外,由图5(a)可见,微多普勒频率的变化周期约为 0.1 s,由此可知目标的振动频率 f_{es} 约为 10 Hz;并可估计微多普勒瞬时频率的峰值 f_{max} 约为 120 Hz,因此由式(17)可得目标的振动幅度 $a_{es} \approx 3.05$ mm,这与真实值相差很小,从而进一步验证了理论分析的正确性。

5 结论

从实用的角度出发,本文提出了一种基于双通道 DPCA 地杂波对消的 SAR 地面振动目标检测及其微多普勒信息提取方法。区别于 SAR/GMTI 大多在复图像域进行慢速运动目标检测,为便于提取微多普勒信息,利用 DPCA 技术在复原始数据域对消地杂波,从而获取振动目标的回波信息,进

而给出其微多普勒频率的参数化表达式。与单通道 SAR 模式下不同,由此方法提取的微多普勒频率不仅与目标微动参数,载波波长等相关,而且与两天线的相位中心间距有关。该方法的提出将很好地辅助 SAR/GMTI 技术,提高海面运动目标的检测能力,因此具有重要的理论和实际意义。下一步的研究重点是考虑载机起伏、通道失配等因素对地面微动目标检测及其微多普勒信息提取的影响。

参考文献:

- [1] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] Zhang Q, Yeo T S, Tan H S, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the hough transform[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291-299.
- [3] 白雪茹,周峰,邢孟道,等.空中微动旋转目标的二维 ISAR 成像算法[J]. *电子学报*, 2009, 37(9): 1937-1943. (Bai X R, Zhou F, Xing M D, et al. 2D ISAR imaging algorithm for air micro-motion targets[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(9): 1937-1943.)
- [4] 李金梁,王雪松,刘阳,等.雷达目标旋转部件的微 Doppler 效应[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(3): 583-587. (Li J L, Wang X S, Liu Y, et al. Micro-doppler effect of roatation structure on radar targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(3): 583-587.)
- [5] Sparr T, Krane P. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR[J]. *IEE Proc. of Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(4): 277-283.
- [6] Thayaparan T, Abrol S, Qian S. Micro-Doppler analysis of rotating target in SAR[R]. Defence Research and Development Canada Ottawa, TM-2005-204, 2005.
- [7] Rügge M, Meier E, Nüesch D. Constant motion, acceleration, vibration, and rotation of objects in SAR data[C]// *Proc. of the International Society for Optical Engineering*, 2005, 5980: 598005_1-598005_12.
- [8] Rügge M, Meier E, Nüesch D. Vibration and rotation in millimeter-wave SAR[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(2): 293-304.
- [9] 罗迎,张群,封同安,等.强杂波下含旋转部件的目标成像及微多普勒提取[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(2): 261-264. (Luo Y, Zhang Q, Feng T A, et al. Imaging and micro-Doppler extraction of targers with rotating parts in strong ground clutter[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(2): 261-264.)
- [10] 康雪艳,杨汝良.多通道 SAR 杂波抑制技术研究[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(1): 206-210. (Kang X Y, Yang R L. The study of clutter suppression techniques for multi-channel SAR[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(1): 206-210.)
- [11] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社, 2005: 204-205. (Bao Z, Xing M D, Wang T. *Radar imaging techniques*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 204-205.)