

星载 SAR 的空中运动目标检测和成像

尹建凤^{1,2}, 李道京¹, 汤立波^{1,2}, 吴一戎¹

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

摘要: 根据星载 SAR(Synthetic Aperture Radar)通常信号带宽较大的特点,本文提出了一种子带双频共轭处理方法,降低合成信号的等效中心频率,去除多普勒模糊,进而利用 Keystone 变换完成低信噪比高速运动目标的距离走动校正.运动目标的距离弯曲校正后,采用时频分析实现目标的低分辨率成像和检测.利用检测过程中获得的目标径向速度,进一步完成了各个运动目标的高分辨率成像处理.仿真结果表明了本文方法的有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 运动目标检测; 运动目标成像; Keystone 变换

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)06-1032-05

Spaceborne SAR Detecting and Imaging of Airborne Moving Targets

YIN Jian feng^{1,2}, LI Dao jing¹, TANG Li bo^{1,2}, WU Yi rong¹

(1. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Beijing 100080, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: According to the characteristic that the bandwidth of spaceborne SAR(Synthetic Aperture Radar) is generally quite wide, a method called "Sub band Double Carrier Frequency Conjugated Processing" is presented. The approach can decrease the equivalent central frequency of the synthetic signal and remove the Doppler ambiguity. Consequently, Keystone transform can be used to correct the linear range migration of the fast moving target with low input SNR. After the target range curvature is corrected, time frequency analysis can be used to implement low resolution imaging and targets detecting. The radial velocities of targets can be obtained from targets detection, and high resolution imaging process can be completed to each moving target. The simulation results show the effectiveness of the new method.

Key words: SAR(Synthetic Aperture Radar); moving targets detection; moving targets imaging; Keystone transform

1 引言

对空中运动目标,如飞机、导弹的成像一般是由地基 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)完成的,随着技术的发展,利用星载和机载 SAR 实现空中运动目标检测和成像也逐步成为研究的热点^[1].空中运动目标成像的难点之一是距离徙动校正,文献[2]研究了机载 SAR 对低空运动目标成像问题,用包络对齐进行距离徙动校正,但传统的包络对齐方法不适用于低信噪比情况.Keystone 变换^[3]可以有效地去除低信噪比目标的距离走动^[4],但由于空中运动目标的速度较高,其产生的多普勒模糊,又使 Keystone 变换的应用受到限制.

本文提出了一种基于 SAR 距离向的子带双频共轭处理方法,解决了低重复频率时 Keystone 变换应用受限的问题,并给出了基于该方法的较为系统的空中运动目标检测和成像方案.

2 运动目标的距离走动校正

设 SAR 回波信号为

$$s(\tau, t_m) = \sum_{n=1}^N A_n p\left[\tau - \frac{2R_n(t_m)}{c}\right] \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} R_n(t_m)\right] \quad (1)$$

其中, f_c 是载波频率, $p(\tau)$ 是线性调频脉冲, $\tau = t - mT$ 为快时间, 而 $t_m = mT$ 为慢时间, N 为散射点的个数, c 为光速.对信号 $s(\tau, t_m)$ 沿快时间 τ 作傅立叶变换有

$$S(f, t_m) = p(f) \sum_{n=1}^N A_n \exp\left[-j \frac{4\pi(f_c + f)}{c} R_n(t_m)\right] \quad (2)$$

式中, $p(f)$ 表示 $p(\tau)$ 的傅立叶变换.进一步将 $R_n(t_m)$ 在 $t_m = 0$ 处进行泰勒展开,有

$$S(f, t_m) = p(f) \sum_{n=1}^N A_n \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi(f_c + f)}{c} (r_n + \dot{r}_n t_m + \phi_n(t_m))\right] \quad (3)$$

式(3)中, $r_n = R_n(0)$, $\dot{r}_n = R_n(0)$, $\phi_n(t_m)$ 为二阶及二阶以上的高阶项. 由式(3)可见, 由于距离走动存在, 距离频率 f 和方位时间 t_m 存在线性耦合. 在 (f, t_m) 域进行 Keystone 变换^[3], 即令

$$\tau_m = [(f_c + f)/f_c] t_m \quad (4)$$

则有

$$S(f, \tau) = p(f) \sum_{n=1}^N A_n \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) r_n - j \frac{4\pi}{c} \tau f_c \right] - j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) \phi_n \left[\frac{f \tau}{f_c + f} \right] \quad (5)$$

从式(5)中可见, 经过 Keystone 变换后, 运动目标的距离-多普勒线性耦合作用被消除. 由于此过程与信噪比无关, 所以 Keystone 变换可用于对低信噪比目标的距离走动校正.

Keystone 变换要求 SAR 回波信号的方位向采样率满足 Nyquist 定理, 即

$$\left| f_{dc} \pm \frac{1}{2} B_a \right| < \frac{1}{2} \text{PRF} \quad (6)$$

其中 f_{dc} 为信号的多普勒中心频率, B_a 为多普勒带宽, PRF 为 SAR 重复频率.

3 子带双频共轭处理和 Keystone 变换

当目标高速运动时, 其产生的多普勒模糊会导致

Keystone 变换无效. 针对这一问题, 本文提出了对 SAR 的宽带信号进行子带双频共轭处理的方法, 以降低合成信号的等效中心频率, 去除多普勒模糊.

将 SAR 接收的宽带 LFM 回波信号平分成两个子带信号, 如图 1 所示.

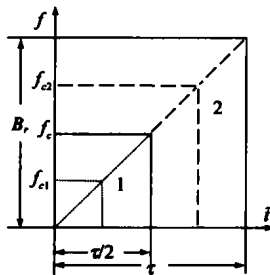


图 1 子带双频共轭处理原理图

其中 B_r 为原 LFM 信号的带宽, τ 为时宽, 两个子带信号的中心频率差为 $|f_{c2} - f_{c1}| = B_r/2$, 带宽均为 $B_r/2$ 分别对这两个信号进行距离压缩, 得到运动目标的距离像为

$$s_{R1}(l, t_m) = \sum_{n=1}^N A_n \sin c \left[\frac{\pi B_r}{2} \left(t - \frac{2R_n(t_m)}{c} \right) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} f_{c1} R_n(t_m) \right] \quad (7)$$

式(7)中的 $l(l=1, 2)$ 用来区分中心频率, 对这两个不同中心频率的运动目标距离像做共轭相乘, 得到合成信号

$$s_m(l, t_m) = s_{R2}(l, t_m) \cdot \text{conj}(s_{R1}(l, t_m)) \quad (8)$$

显然, 上式为一多项式, 由目标各个散射点信号的自身项和交叉项组成. 由于两个子带信号的时差通常

仅在十微秒量级, 在此期间目标的运动远远小于一个距离分辨单元, 其运动对自身项的影响很小. 与此同时, 由于只要各散射点的斜距差大于一个距离分辨单元, 其交叉项的幅值就远远小于自身项, 式(8)中的交叉项就可忽略, 尤其是在分辨率较高的情况下.

例如当 $N=2$ 时, 两散射点之间的交叉项为

$$s_{m_cross}(l, t_m) = A_1 A_2 \sin c \left[\frac{\pi B_r}{2} \left(t - \frac{2R_1(t_m)}{c} \right) \right] \times \sin c \left[\frac{\pi B_r}{2} \left(t - \frac{2R_2(t_m)}{c} \right) \right] \times \left\{ \exp \left[j \frac{4\pi}{c} f_{c1} R_1(t_m) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} f_{c2} R_2(t_m) \right] + \exp \left[j \frac{4\pi}{c} f_{c1} R_2(t_m) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} f_{c2} R_1(t_m) \right] \right\} \quad (9)$$

上式表明当两散射点间的斜距差大于距离分辨单元时, 则其交叉项的幅值接近于 0.

基于上述分析, 再对信号幅值开方, 将功率量纲调整为电压量纲, 则式(8)可转化为

$$s_m(l, t_m) \approx \sum_{n=1}^N A_n \left| \sin c \left[\frac{\pi B_r}{2} \left(t - \frac{2R_n(t_m)}{c} \right) \right] \right| \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_{c2} - f_{c1}) R_n(t_m) \right] \quad (10)$$

此时, 合成信号的中心频率为两子带信号中心频率之差, 则合成信号中目标各散射点的多普勒中心频率为

$$f'_{dn} = \frac{2(f_{c2} - f_{c1})}{c} R_n = \frac{B_r}{c} R_n \quad (11)$$

因通常情况下 $B_r \ll f_c$, 则可有

$$f'_{dn} \ll f_{dn} = \frac{2f_c}{c} R_n \quad (12)$$

这里 f_{dn} 为原始回波中各散射点的多普勒频率. 由此可见, 该处理使合成信号的等效波长大大增加, 可大大降低合成信号中目标的多普勒频率, 从而去除了多普勒模糊. 对式(10)进行 Keystone 变换, 则可完成高速运动目标的距离走动校正.

若已知目标的最大径向速度为 V_{\max} , 则不产生多普勒模糊的最大频差为

$$\Delta f = |f_{c2} - f_{c1}| < \frac{1}{4} \frac{\text{PRF} \cdot c}{V_{\max}} \quad (13)$$

因此, 即使目标的运动造成了多次多普勒模糊, 只要目标的最大径向速度与 Δf 和 PRF 之间的关系满足上式, 则依然可以去除多普勒模糊, Keystone 变换仍有效.

又从式(4)可知, Keystone 变换的物理意义要求 $f_c \geq |f|_{\max}$, 其中 $|f|_{\max}$ 为距离频率的上限. 原信号中有

$$|f|_{\max} = \frac{F_S}{2}, \text{ 对应于合成信号, 因其快时间域采样率减}$$

半, 故可得频差的下限为

$$\Delta f \geq \frac{F_s}{4} \quad (14)$$

其中 F_s 为原回波信号的快时间域采样率。

4 运动目标的距离弯曲粗校正

运动目标的距离弯曲, 尤其是合成孔径时间较长时, 距离弯曲对成像的影响很大. 要实现低信噪比目标的成像检测, 只去除距离走动是不够的, 还需要校正距离弯曲. 因雷达平台的速度远大于空中目标的速度, 距离弯曲主要是由雷达的运动引起的, 所以直接由卫星的速度得到空中运动目标调频率的近似值^[5]

$$f_{m} = \frac{2(|V_a| \pm |V_{ta}|)^2}{\lambda R} \approx \frac{2|V_a|^2}{\lambda R} \quad (15)$$

其中 V_a 为卫星速度, V_{ta} 为空中运动目标的方向速度, λ 为等效波长. 在 (f, τ_m) 域构造相位函数

$$\Psi(f, \tau) = \mathcal{F}_m \frac{\tau^2}{1 + f/f_c} \quad (16)$$

用这个相位值修正经过距离走动校正后的信号, 可去除信号的大部分二阶相位项, 并较好地完成距离弯曲校正. 实际应用时, 应按聚焦深度在距离向分块处理, f_m 可根据聚焦深度调整.

5 运动目标的低分辨率成像及检测

对运动目标完成距离走动校正和距离弯曲粗校正后, 即可进行成像处理. 由于合成信号的等效波长大大增加, 且目标的距离徙动校正不精确, 此时的成像分辨率较低. 但这个过程已大大提高了信噪比, 这对运动目标的检测极为有利.

在多目标环境下, 时频分析是解决成像问题的主要手段^[6]. 为避免交叉项的影响, 本文用短时傅立叶变换^[5]实现多运动目标成像, 而后在距离-多普勒域实施目标检测, 并估计目标的运动参数.

在测得各目标的等效多普勒中心频率 f_{dex} 后, 根据式(17)

$$f_{dex} = \frac{2V_r}{\lambda_e} \quad (17)$$

可求得各目标的径向速度 V_r . 此时由于等效波长变大, 合成信号的多普勒带宽较小, 用这种方法获得的径向速度也较为准确.

6 运动目标的高分辨率成像

利用上述检测过程中获得的目标径向速度, 可得到 SAR 原始回波中各目标的真实多普勒中心频率 f_{dn} . 若欠采样导致折叠后的多普勒中心频率为 f_{in} , 则通过式(18)

$$f_{dn} = f_{in} + F \cdot \text{PRF} \quad (18)$$

可计算出各目标的多普勒模糊因子 F , 并以此为依据分别对 SAR 原始回波信号进行方位向插值, 也就是将 PRF 提高到相应的倍数, 从而去除各运动目标的多普勒模糊.

对去除多普勒模糊后的各运动目标信号在原中心频率下进行的高分辨率成像处理过程如下:

- (1) 用 Keystone 变换完成目标距离走动校正;
- (2) 利用式(16)对运动目标的距离弯曲实施粗校正;
- (3) 在 (f, τ_m) 域进行剩余二阶相位和高阶相位估计并实施精确相位校正^[3];
- (4) 在距离-多普勒域获得运动目标的高分辨率图像.

7 仿真结果与讨论

为了验证本文提出方法的有效性, 用星载参数对包含两个运动目标(其一存在严重的多普勒模糊)的回波数据进行仿真. 图 2 为星载 SAR 对空中目标成像的几何示意图, 其中 XOY 为地表, Z 轴由右手定则确定, 卫星沿 Y 轴正方向飞行. $P(x, y, z)$ 为 SAR 平台的位置, $T(x_T, y_T, z_T)$ 为目标的位置. 设成像的初始时刻 SAR 及目标的位置分别

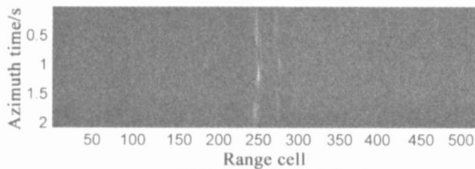
图 2 星载 SAR 对空中目标成像示意图

为(单位为 km) $P = (0, 0, 630)$, $T_1 = (630, 7, 5)$, $T_2 = (629, 8, 4.7)$. SAR 平台的速度 $V_{\text{radar}} = 7000 \text{ m/s}$, 两个目标都由成十字形的五个散射点组成, 相邻两点间隔为 20m. 目标 1 以 $V_{T1} = 700 \text{ m/s}$ 的速度沿与 Y 轴负向成 45° 的方向水平飞行, 目标 2 以 $V_{T2} = 25 \text{ m/s}$ 的速度沿与 Y 轴正向成 45° 的方向水平飞行. SAR 工作频率 $f_c = 1.2 \text{ GHz}$, 信号带宽 $B_r = 50 \text{ MHz}$, 时宽 $\tau = 10 \mu\text{s}$, $\text{PRF} = 2 \text{ kHz}$, 成像时间 $T_s = 2.048 \text{ s}$. 检测所用的低分辨率图像的距离向和方位向分辨率分别为 6m 和 347m, 最后的高分辨率图像的距离向分辨率为 3m, 方位向分辨率约为 7.2m.

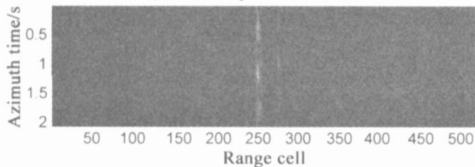
图 3 为运动目标距离像, (a) 图中目标 1 和目标 2 的信噪比分别为 3dB 和 8dB, (b) 图中两目标的信噪比分别为 -3dB 和 2dB, 也就是检测所用数据的信噪比. 图 4 为对图 3(b) 进行距离徙动校正的结果. 若直接对图 3(a) 做该变换, 则因目标 1 存在多普勒模糊, 将不能校正它的距离走动. 校正距离徙动后, 用时频分析对两目标进行低分辨率成像 ($\tau_m = 0.9 \text{ s}$ 时刻), 图 5 为低分



(b) 子带双频共轭处理之后
图 3 运动目标距离像



(a) 进行 Keystone 变换之后



(b) 进行距离弯曲粗校正之后

图 4 对子带双频共轭处理后的信号进行距离徙动校正的结果

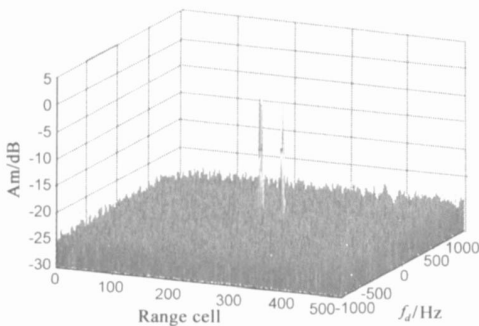


图 5 低分辨率图像的检测信噪比情况

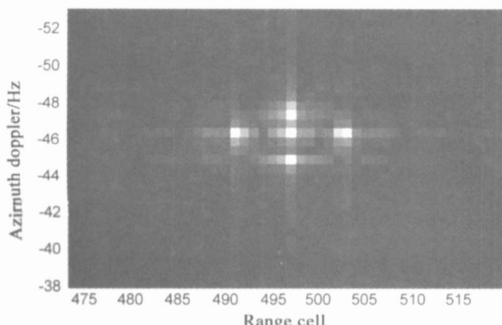


图 6 目标 2 的高分辨率图像

分辨率图像的输出信噪比情况, 经统计, 两个目标的信噪比均约为 32.6dB, 远大于实现目标检测所需的信噪比

门限. 在低分辨率图像中估计出两目标的等效多普勒中心频率 $f_{dce1} = 58\text{Hz}$, $f_{dce2} = -0.6\text{Hz}$, 再估计出目标的径向速度 $V_{r1} = 349\text{m/s}$, $V_{r2} = -3.6\text{m/s}$, 继而得到原始回波中两目标的多普勒中心频率分别约为 $f_{dc1} = 2788\text{Hz}$, $f_{dc2} = -29\text{Hz}$. 可知目标 1 存在多普勒模糊, 而目标 2 没有. 所以可直接对原始回波做 Keystone 变换去除目标 2 的距离走动, 而后对其成像, 得到图 6. 但由于目标 1 存在 2 次的多普勒模糊, 故对原始回波信号在方位向做 3 倍插值就可以去除该目标的多普勒模糊, 再进行高分辨率成像处理, 可得到图 7, 仿真成像结果中的多普勒中心频率为 2664.7Hz, 与估计值吻合的较好.

8 结束语

本文对星载 SAR 的空中运动目标检测和成像进行了研究, 针对高速运动低信噪比目标的距离徙动校正问题, 提出用子带双频共轭处理去除目标的多普勒模糊, 以确保 Keystone 变换能同时校正合成信号中多个运动目标的距离走动, 并分步实现了对多个空中运动目标的检测和高分辨成像. 仿真结果表明了该方法的有效性.

参考文献:

- [1] Tim J Nohara, Peter Weber, Al Prenji, Chuck Livingstone. SAR GMTI processing with Canada's Radarsat 2 satellite [A]. Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000 AS-SPCC [C]. Lake Louise, Alta, Canada: IEEE Press, 2000. 379-384.
- [2] 汪枫, 向家彬, 马晓岩. 用条带 SAR 数据对低空运动目标聚束成像新方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(1): 26-29.
Wang Feng, Xiang Jia bin, Ma Xiaoyan. Method of imaging low-altitude moving target with spotlight mode based on stripmap SAR data [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(1): 26-29. (in Chinese)
- [3] R P Perry, R C Dipietro, R L Fante. SAR imaging of moving targets [J]. IEEE Trans on AES, January, 1999, 35(1): 188-199.

- [4] 陈文驰, 保铮, 邢孟道. 基于 Keystone 变换的低信噪比 ISAR 成像[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学报), 2003, 30(2): 155-159.
Chen Wen chi, Bao Zheng, Xing Meng dao. Keystone transformation based ISAR imaging at the low SNR level[J]. Journal of XiDian University, Apr. 2003, 30(2): 155-159. (in Chinese)
- [5] 汤立波, 李道京, 吴一戎, 丁赤飏. 机载 SAR 的地面运动目标成像处理[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(10): 1681-1684.
Tang Li bo, Li Dao jing, Wu Yi rong, Ding Chi biao. Imaging of ground moving targets based on airborne SAR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(10): 1681-1684. (in Chinese)
- [6] 李道京, 宋祖勋, 彭进业, 俞卞章. 基于 KEYSTONE 变换和时频分析的 ISAR 成像研究[J]. 西北大学学报(自然科学网络版), 2003, 10(4): 1-6.
Li Dao jing, Song Zu xun, Peng Jin ye, Yu Bian zhang. ISAR image formation based on Keystone transform and time frequency analysis[J]. Journal of Northwest University, 2003, 10(4): 1-6.

作者简介:

尹建凤 女, 1982 年 1 月生于内蒙古赤峰市, 中国科学院电子学研究所博士研究生, 主要研究方向为合成孔径雷达的运动目标检测与成像. E-mail: glidingyin@163.com



李道京 男, 1964 年 11 月生于陕西省西安市, 中国科学院电子学研究所研究员, 主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理. E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn

汤立波 男, 1975 年生, 中国科学院电子学研究所博士研究生, 主要研究方向为合成孔径雷达运动目标检测与成像.

吴一戎 男, 1963 年生, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理.