

基于 DPCA 的机载 SAR-MTI 系统误差分析及补偿方法研究

张 英, 李景文

(北京航空航天大学电子信息工程学院 201 教研室, 北京 100083)

摘 要: 基于 DPCA 技术的机载 SAR-MTI 系统普遍存在的一个问题是: 雷达平台的运动误差会导致 DPCA 条件不满足, 从而引起系统杂波抑制性能下降. 本文基于插值理论提出了一种针对该运动误差的补偿方法. 本文从回波模型入手对系统误差进行分析, 从理论上给出了运动补偿方法及其实现方法. 该补偿方法的精度主要取决于雷达平台速度的估计精度, 这个问题可以通过经典的运动参数估计方法得到很好的解决. 计算机仿真结果表明, 该方法能够有效补偿雷达平台的运动误差, 提高 SAR-MTI 系统性能的稳定性的, 由于降低了对硬件系统的要求, 这种方法在工程上易于实现.

关键词: 合成孔径雷达 (SAR); 动目标检测 (MTD); 偏置相位中心天线 (DPCA)

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2031-04

System Error Analysis and Calibration Method for Airborne SAR-MTI System Based on DPCA Technique

ZHANG Ying, LI Jing-wen

(School of Electronics and Information Engineering, BUAA, Beijing 100083, China)

Abstract: A main problem of air borne SAR-MTI system based on DPCA technique is the performance decline of clutter suppression and moving target detection caused by the dissatisfying of DPCA condition, which is conducted by the velocity variety of radar platform. On the ground of interpolation theory, a new calibration method for this problem is presented in this paper. Based on signal model, system error is analyzed and the calibration method is provided. The key issue for the calibration precision is the accurate estimation of the velocity of radar platform, which can be obtained by conventional movement parameter estimation methods. It is demonstrated by the simulation results that the system error can be successfully removed by this method. Since the requirement to hardware instruments is reduced, this method can be easily realized in engineering practice.

Key words: synthetic aperture radar; moving target detection; displaced phase center antenna

1 引言

DPCA 技术^[1~3]是一种传统的雷达杂波抑制技术, 经过几十年的发展, 已被现役机载雷达广泛采用. DPCA 技术的原理基于雷达脉冲重复频率与平台速度之间满足一定关系的条件下, 利用多通道天线所接收回波的相关性进行杂波抑制.

DPCA 技术被 PD 雷达普遍采用, 但由于只考虑了两个时间采样, 时域分辨率不良^[4], 不能满足对动目标高分辨力聚焦的要求, 本文将 DPCA 技术与 SAR 相结合, 通过回波的相干积累提高分辨率; DPCA 技术要求雷达脉冲重复频率与平台速度之间严格满足一定关系, 机载雷达平台的不稳定会使 DPCA 条件不满足而导致系统性能变差, 本文提出的运动补偿方法可有效解决这一问题, 从而提高 SAR-MTI 系统的稳定性.

2 理论分析

2.1 三孔径 DPCA 检测、测速及定位

图 1 给出了空间几何关系图. 雷达采用一发三收正侧视模式, 中间的子天线发射波长为 λ 的线性调频信号, 三个子天线接收回波, 每两个子天线之间间隔 $D = 2v_a T$ (T 为脉冲采样时间间隔). 假设机载雷达平台运动速度为 $v_a + \Delta v_a$ (Δv_a 为平台速度误差), 动目标在 $t = 0$ 时刻位置为 $(X, Y, 0)$, 地面动目标径向速度分量 v_y , 斜距 R_0 . 忽略收发天线增益、距离向处理及噪声的影响 (用 $\tilde{G}$ 表示), 距离压缩后三个接收孔径在 t 时刻接收到的信号为

$$S_1(t) = \tilde{G} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}[R_1(t) + R_2(t)]} \quad (1)$$

$$S_2(t) = \tilde{G} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}[R_2(t) + R_2(t)]} \quad (2)$$

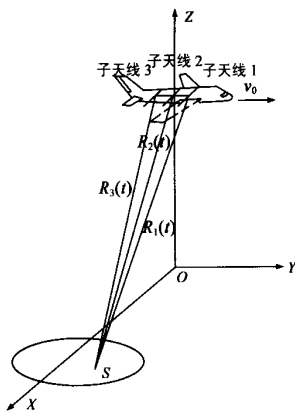


图1 三天线 DPCA 空间几何关系图

$$S_3(t) = \tilde{G} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}[R_3(t) + R_2(t)]} \quad (3)$$

对 $R_1(t)$, $R_2(t)$, $R_3(t)$ 进行菲涅尔近似, 得到各通道分别在 $t_1 = t - T$, $t_2 = t$, $t_3 = t + T$ 时刻接收到的回波信号

$$S_1(t_1) = \tilde{G} e^{j(\alpha(t_2) + \phi_1 + \pi_1^2)} e^{j\phi_1} e^{\beta} \quad (4)$$

$$S_2(t_2) = \tilde{G} e^{j(\alpha(t_2) + \phi_2 + \pi_2^2)} \quad (5)$$

$$S_3(t_3) = \tilde{G} e^{j(\alpha(t_2) + \phi_3 + \pi_3^2)} e^{j\phi_3} e^{\beta} \quad (6)$$

其中 $\alpha(t_2) = 2\pi \cdot \frac{(v_a + \Delta v_a) \cdot 2X}{\lambda R_0} \cdot t_2$,

$$\phi = -2\pi \cdot \frac{2v_y Y}{\lambda R_0}, \phi_3 = -2\pi \cdot \frac{(D + 2X)[D - 2(v_a + \Delta v_a)T]}{2\lambda R_0},$$

由于孔径间隔 D 满足 $D = 2v_a T$, 即 $D - 2v_a T$, $\phi_1 = 2\pi \cdot \frac{(D - 2X) \Delta v_a}{\lambda R_0} \cdot T = \phi_1 \cdot T$, $\phi_3 = 2\pi \cdot \frac{(D + 2X) \Delta v_a}{\lambda R_0} \cdot T = \phi_3 \cdot T$,

对各通道间由于孔径间隔引起的多普勒中心频率进行补偿, 并去掉相位中的线性调频项后表示为

$$S_1(t_1) = S_1(t - T) = \tilde{G} e^{j(\alpha(t) + \phi)} e^{-j\phi T} e^{j\phi_1 T} \quad (7)$$

$$S_2(t_2) = S_2(t) = \tilde{G} e^{j(\alpha(t) + \phi)} \quad (8)$$

$$S_3(t_3) = S_3(t + T) = \tilde{G} e^{j(\alpha(t) + \phi)} e^{j\phi T} e^{j\phi_3 T} \quad (9)$$

假设在时间段 $t_B \sim t_E$ 内进行回波相干积累, 利用回波信号在时域进行杂波对消, 对消后的前、后路残差信号分别通过傅里叶变换进行相干积累转换至图像域, 用 $I_1(f)$ 、 $I_2(f)$ 表示,

$$\begin{aligned} I_1(f) &= \int_{t_B}^{t_E} [S_1(t - T) - S_2(t)] \cdot e^{j2\pi f t} \cdot dt \\ &= \tilde{G} \cdot 2j \cdot e^{j\frac{\phi_1 - \phi}{2} \cdot T} \cdot \sin\left(\frac{\phi_1 - \phi}{2} \cdot T\right) \cdot I'(f) \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2(f) &= \int_{t_B}^{t_E} [S_2(t - T) - S_3(t)] \cdot e^{j2\pi f t} \cdot dt \\ &= \tilde{G} \cdot 2j \cdot e^{j\frac{\phi_3 - \phi}{2} \cdot T} \cdot \sin\left(\frac{\phi_3 - \phi}{2} \cdot T\right) \cdot I'(f) \quad (11) \end{aligned}$$

其中 $I'(f) = \int_{t_B}^{t_E} e^{j\alpha(t)} \cdot e^{j2\pi f t} \cdot dt$. 则杂波对消特性如下所示

$$|I_1(f)|^2 = 4|\tilde{G}|^2 \sin^2\left(\frac{\phi_1 - \phi}{2} \cdot T\right) \quad (12)$$

$$|I_2(f)|^2 = 4|\tilde{G}|^2 \sin^2\left(\frac{\phi_3 - \phi}{2} \cdot T\right) \quad (13)$$

$$\text{其中 } \frac{\phi_1 - \phi}{2} \cdot T = 2\pi \cdot \frac{(D - 2X) \Delta v_a + 2v_y Y}{2\lambda R_0} \cdot T \quad (14)$$

$$\frac{\phi_3 - \phi}{2} \cdot T = 2\pi \cdot \frac{(D + 2X) \Delta v_a - 2v_y Y}{2\lambda R_0} \cdot T \quad (15)$$

杂波对消性能分析如下: 若雷达平台无速度误差, 即 $\Delta v_a = 0$, 则满足 DPCA 条件, 对于静止目标 $v_y = 0$, 有 $|I_2|^2 = 4|\tilde{G}|^2 \sin^2\left(\frac{\phi}{2} \cdot T\right) = 0$, 表明静止目标被对消; 而具有径向速度的动目标信号随径向速度不同其对消特性呈周期变化. 若 $\pi v_a \neq 0$, 则 DPCA 条件不满足, 对于静止目标, $|I_2|^2 = 4|\tilde{G}|^2 \sin^2\left(\frac{\phi'}{2} \cdot T\right) \neq 0$, 通道之间无法完全对消杂波, 而位于主瓣杂波区的动目标则会在非盲速点处被对消.

以下给出测速、定位公式. 假设在两幅残差图像中检测到动目标的分辨单元为 $I_1(f_T)$ 、 $I_2(f_T)$, 由式(10)、(11)得到

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{2} \arg\{I_1(f_T) \cdot I_2(f_T)^*\} \\ &= \frac{\phi'_1 - \phi'_3 - 2\phi}{2} \cdot T \\ &= 2\pi \cdot \frac{2v_y Y}{\lambda R_0} \cdot T - 2\pi \cdot \frac{2X \Delta v_a}{\lambda R_0} \cdot T \quad (16) \end{aligned}$$

则由包含径向速度 v_y 信息的相位 φ 可确定径向速度

$$v_y = \frac{\lambda R_0}{4\pi Y T} \cdot \varphi + \frac{X}{Y} \Delta v_a \quad (17)$$

在残差图像中, 动目标由于具有径向速度分量而偏离真实方位位置, 检测到动目标的图像单元的方位位置为动目标的虚假方位位置. 假设检测到动目标的多普勒频率为 f_T , 对应方位位置 X_T , 则目标的真实方位位置 x_R 由以下表达式得到

$$X_R = \frac{v_y Y}{v_a} + X_T \quad (18)$$

2.2 运动误差补偿

2.2.1 运动补偿方法 图2所示为采用三天线 DPCA 进行动目标检测、测速及定位的流程图. 由于诸多因素的影响, 载机在实际飞行过程中很难保持匀速平稳飞行, 这将导致回波数据在空间上为非均匀采样而无法完全满足 DPCA 条件, 从而降低系统的杂波对消性能. 图中虚线框内表示误差补偿处理部分. 本文提出的运动误差补偿方法基于对雷达平台真实运动速度的精确估计, 通过平台速度的估计值得到平台在各脉冲收发时刻的精确位置, 然后对回波数据进行插值重采样得到满足 DPCA 条件的数据, 再进行杂波对消处理得到改善的系统性能. 以下为具体分析.

如图2所示, 运动误差补偿在各通道原始回波数据完成多普勒中心频率补偿和去线性调频项处理后、杂波对消前进行. 此时相邻脉冲的回波在空间上的采样间隔为 $D' = 2(v_a + \Delta v_a)T = D + \Delta D$. 运动补偿的目的是对回波数据重新采样, 使各通道数据通过相应延迟可以在空间上重合, 图3给出补偿原理示意图.

图3(a)所示为平台速度无误差即满足 $D = 2v_a T$ 的情况, 其中 ' $\times$ ' 表示某一脉冲时刻接收孔径位置, 0, 1, ..., 4 表示脉冲次序编号. 由图可以看出, 第二通道接收孔径经脉冲延迟即可与第一通道接收孔径重合, DPCA 正是基于这一原理通过两

通道回波数据相减实现杂波对消。图 3(b) 所示为存在平台速度误差,即孔径间隔 $D = 2v_a T \neq 2(v_0 + \Delta v_a) T = D + D'$ 的情况。图中 'x' 表示采样时刻接收孔径的位置,'·'表示对两通道回波进行插值重采样处理后的采样位置,由图可知,补偿后的情况同图 3(a) 的理想情况。由图可以看到,重采样后的数

据空间采样间隔为 D ,满足 DPCA 条件,可以实现理想的杂波对消效果。

由于三次样条函数计算简单,边界条件易满足,适用于波动较大的瞬态过程的测量分析^[8],且具有较好的数值稳定性^[9],所以本文采用三次样条插值函数进行数据的插值处理。

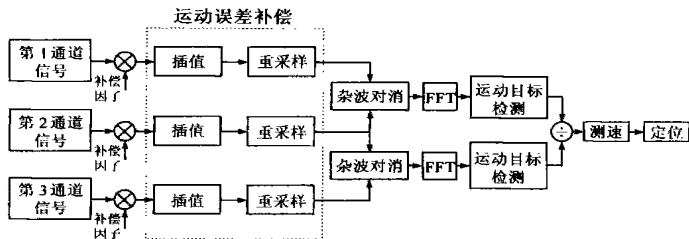


图2 DPCA 动目标检测及定位处理框图

2.2.2 运动补偿精度分析 上述补偿方法利用平台速度的精确测量值确定插值后数据的重采样点位置,而采样点位置能否满足 DPCA 条件是杂波抑制性能能否提高的关键,所以平台速度的精确测量是该方法有效的关键;由样条插值理论可知,用三次样条函数对采样数据进行内插来恢复波形,存在一定的失真,其失真情况与采样频率等因素有关,当降低采样率时,其波形失真将增大^[5],因此增加数据采样率(即脉冲重复频率),可在一定程度上提高插值精度从而改善补偿效果。

由式(17)、(18)可以得出,经过运动补偿后,平台速度测量精度是影响运动目标测速定位精度的主要因素。

3 计算机仿真

计算机仿真采用以下参数: X 波段机载雷达,阵列天线由沿载机飞行方向以等间隔 $D = 2vT$ 线性排列的三个子接收天线组成,每个子天线波束宽度均为 1.5° ,中间的子天线以重频 $f_{PRF} = 1000\text{Hz}$ 发射线性调频信号,线性调频信号脉冲宽度为 $\tau = 20\mu\text{s}$,带宽为 70MHz ,载机速度 $v_a = 150\text{m/s}$,载机高度 $H = 4000\text{m}$ 。杂波背景采用后向复散射系数幅度为 σ 的固定点散射源,雷达截面积密度为 $\sigma_s = 1.0$ 。其中 σ 服从瑞利分布。下面给出仿真结果,其中杂波抑制性能用杂波对消前后系统的输出信杂比的改善即 $SCR_{\text{改善}} = SCR_{\text{对消后}} - SCR_{\text{对消前}}$ 来表征。

图 4 给出杂波对消性能曲线,其中横坐标表示动目标径向速度,纵坐标表示信杂比改善。由图 4 可以看出,在平台运动误差为 10% ,不进行运动补偿时,由于雷达平台运动误差

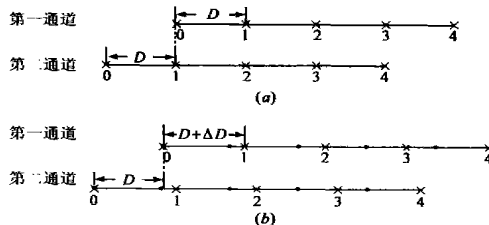


图3 DPCA 运动误差补偿原理示意图

引起的杂波对消性能下降约为 15dB ;对运动误差进行补偿后,对消性能提高约 10dB 。补偿后的性能未达到理想性能,但理论上可以通过提高脉冲重复频率(即提高插值精度)使补偿性能更接近理想情况。

图 5 所示为平台运动误差为 10% ,平台测速误差分别为 0.5% 、 10% ,经过运动补偿的性能曲线。由图知,平台速度测量误差会导致运动补偿精度下降甚至使补偿方法失效。这表明此方法有效的前提是雷达平台速度的精确测量,与理论分析相符。

图 6 给出不同脉冲重复频率下对存在 10% 平台速度误差的数据进行补偿的性能曲线,图中横、纵坐标的意义同图 5。由图 6 可以得出,脉冲重复频率提高,插值精度提高,从而杂波对消性能提高。可以看到,当脉冲重复频率为 3000Hz 时,性能已经非常接近理想情况。

图 7 所示为平台速度测量精度对系统定位精度影响,其中纵坐标表示定位误差。从图中可以看出,无论平台运动速度满足 DPCA 条件与否,只要能测量出其精确值,就能对动目标进行精确定位,而存在速度估计误差时,动目标的定位有明显偏差。这里对图中的定位误差曲线规律性的波动解释如下:由式(18)可知,动目标的定位与检测到动目标的单元位置有关,其中 Y 由检测到动目标的距离门确定,对于动目标检测系统,为保证动目标在合成孔径时间内不移出一个距离门,采用低距离分辨率,从而导致曲线出现波动。

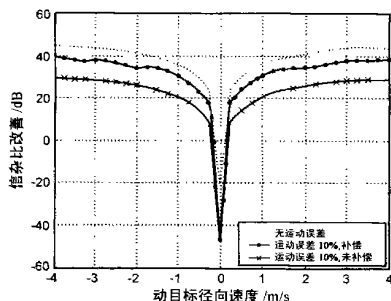


图4 杂波对消效果曲线

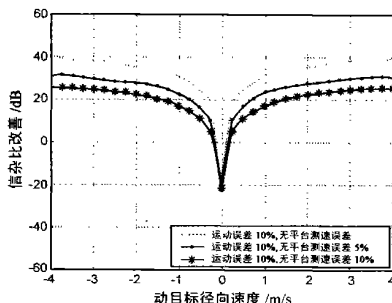


图5 测速误差对杂波对消效果的影响

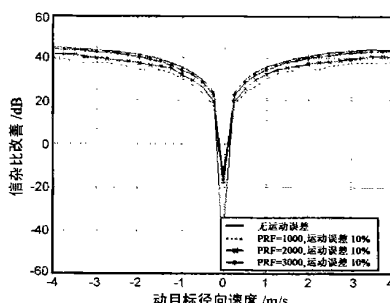


图6 脉冲重复频率对杂波对消性能的影响

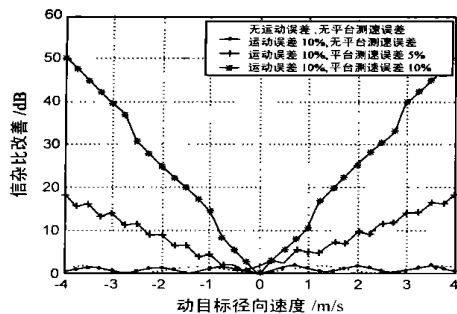


图7 平台速度测量精度对定位精度的影响

4 结论

基于 DPCA 技术的机载 SAR-MTI 系统由于雷达平台的运动误差会导致 DPCA 条件不满足,从而引起系统杂波抑制及动目标检测性能下降.理论分析和仿真结果表明,本文提出的回波插值重采样方法在不对系统硬件设备有更多要求的情况下,可以有效补偿运动误差带来的系统性能的下降.雷达平台速度的精确估计值是这一运动补偿方法有效的关键,当平台速度估计误差达到 10% 时,系统的杂波对消性能明显下降,补偿方法失效.通过增加系统的脉冲重复频率从而提高插值精度也可以提高补偿方法的精度,但同时增加了硬件的复杂度和信号处理的数据量,具体参数的确定需根据工程可实现性和系统要求折衷考虑.

参考文献:

- [1] L Lightstone, et al. Multiple phase centre DPCA for airborne radar[A]. Radar Conference, 1991 'Proc of the 1991 IEEE National[C]. Boston, Massachusetts: IEEE, 1991. 36 - 40.
- [2] W E Ng, et al. Simulated DPCA performance for dual-channel SAR processing[A]. IGARSS 99 Proc. IEEE 1999 International[C]. Hamburg, Germany: IEEE, 1999. 547 - 549.

- [3] Nohara TJ. Comparison of DPCA and STAP for space-based radar[A]. Radar Conference, 1995 Record of the IEEE 1995 International[C]. Washington D C, US: IEEE, 1995. 113 - 119.
- [4] 李景文. 合成孔径雷达动目标检测与成像[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999. 9.
- [5] 林幼权, 等. 一种用于非侧视相控阵天线的机载动目标检测方法[J]. 现代雷达, 2001. 10, (5): 68 - 71.
- [6] 王永良, 等. 现代 DPCA 技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 118 - 121.
- [7] 《数学手册》[A]. 北京: 高等教育出版社, 1979. 894 - 899.
- [8] 陈屹. 利用三次样条插值实现雷达信号采样波形复现[J]. 电子对抗技术, 2000, 15(3): 40 - 43.
- [9] 曹德欣, 等. 三次样条插值函数的数值稳定性[J]. 中国矿业大学学报, 2001. 3, 30(2): 213 - 216.

作者简介:



张 英 女, 1978 年生于陕西省延安, 2001 年在北京航空航天大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学信号与信息处理专业硕士研究生, 主要研究方向: 高分辨力 SAR 成像处理、SAR 动目标检测与成像.



李景文 男, 1964 年生于黑龙江省齐齐哈尔, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 博士, 中国电子学会高级会员, 主要从事信号与信息处理、机载及星载高分辨率 SAR 成像、动目标检测与成像、机载、弹载 DBS 技术、机载脉冲雷达的信号处理, 系统仿真, 数字信号处理, 杂波谱估计等方面的研究工作.