

基于运动误差补偿的弹载 SAR 成像 CS 算法*

张冬磊¹, 王 峰¹, 李亚超²

(1 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071)

摘要:针对弹载 SAR 在成像过程中复杂的运动状态, 建立了斜视匀加速运动模型, 在此基础上, 通过补偿运动误差, 将运动模型简化为正侧视匀速运动模型, 进而应用经典 CS 算法, 对点目标进行成像。仿真结果表明该方法可有效完成加速度补偿, 实现点目标的清晰成像。

关键词:弹载 SAR; 加速运动模型; 匀速运动模型; CS 算法; 运动误差补偿

中图分类号: TN957.52 文献标志码: A

CS Algorithm of Missile-borne SAR Based on Motion Error Compensation

ZHANG Donglei¹, WANG Feng¹, LI Yachao²

(1 The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China;

2 National Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A squint constant acceleration movement model was built for the complicated motion state during imaging process of missile-borne SAR. Based on it, the movement model was reduced to side-looking constant speed model by compensating motion error, after which typical CS algorithm was used to image the point target. Simulation results show that the method can excessively compensate the acceleration and image the target clearly.

Keywords: missile-borne SAR; acceleration movement model; constant speed movement model; CS algorithm; motion error compensation

0 引言

弹载 SAR 通过获取目标或目标附近典型地物地貌特征信息的图像(实时图), 与预存在弹上的基准图在计算机中进行配准比较, 得到导弹相对于目标或预定弹道的纵向和横向偏差, 从而修正弹道并将导弹精确导向目标^[1]。

经典 CS 算法^[2-3]和 ECS 算法^[4-5]以及改进的斜视非线性 CS 算法^[6]都是在匀速直线运动模型的基础上推导的, 不适合应用于弹载 SAR 进行成像。

由于导弹速度高, 成像时间短, 可近似认为在成像时间内导弹为匀加速运动, 因此文中建立了匀加速运动模型, 在此基础上, 通过补偿运动误差, 将斜视匀加速运动模型转化为正侧视匀速运动模型, 进而应用经典 CS 算法, 使成像处理得以简化。

1 弹载 SAR 回波信号模型和分析

根据导弹工作特性, 弹载 SAR 通常工作在高频段。导弹再入段飞行速度较高, 合成孔径成像时间短, 根据实际情况可近似认为导弹在合成孔径时间内是保持匀加速直线运动的, 其匀加速运动模型如图 1 所示。

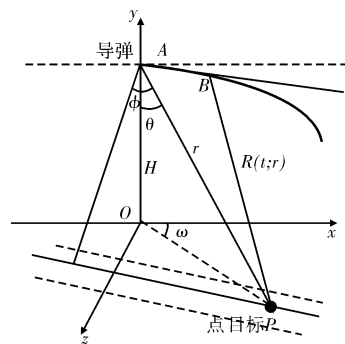


图 1 导弹匀加速运动模型示意图

图 1 中, 粗曲线为导弹的实际运动轨迹, 矢量 AB 为 A 点轨迹的切线, 为简化问题, 在三维坐标系中, 假定 AB 在地面上的投影与 X 轴重合, t_A 时刻天线相位中心位于 A 点, 坐标为 $(0, H, 0)$, 导弹以速度为 V_x 、 V_y 、 V_z 运动, 三方向的加速度分别为 a_x 、 a_y 、 a_z , 点目

* 收稿日期: 2010-05-26

作者简介: 张冬磊 (1985-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向: 模式识别与智能控制。

标 P 位于波束中心, 坐标为 $(r\sin\theta\cos\omega, 0, r\sin\theta\sin\omega)$, 则 t 时刻平台与点目标瞬时斜距满足:

$$R^2(t;r) = \left[V_x(t-t_A) + \frac{1}{2}a_x(t-t_A)^2 - r\sin\theta\cos\omega \right]^2 + \left[H + V_y(t-t_A) + \frac{1}{2}a_y(t-t_A)^2 \right]^2 + \left[V_z(t-t_A) + \frac{1}{2}a_z(t-t_A)^2 - r\sin\theta\sin\omega \right]^2 \quad (1)$$

且有 $\cos\varphi = \cos\omega \cdot \sin\theta, r\cos\theta = H$, 将式(1)作进一步整理, 忽略二次以上的高阶项, 并令:

$$A = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 - r a_x \sin\theta \cos\omega + a_y H - r a_z \sin\theta \sin\omega = V^2 - r a_{LOS} \quad (2)$$

$$B = V_x \sin\theta \cos\omega - V_y \cos\theta + V_z \sin\theta \sin\omega \quad (3)$$

$$a_{LOS} = a_x \sin\theta \cos\omega + a_y \cos\theta - r a_z \sin\theta \sin\omega \quad (4)$$

其中: a_{LOS} 为平台沿视线方向的加速度, B 为平台沿视线方向的速度 V_{LOS} , 成像的等效斜视角可表示为:

$$\varphi = \arcsin(B/V)$$

可得简化的斜距表达式:

$$R(t;r) = \sqrt{r^2 - 2rB(t-t_A) + A(t-t_A)^2} \approx r - B(t-t_A) + \frac{A-B^2}{2r}(t-t_A)^2 - \frac{AB-B^3}{2r^2}(t-t_A)^3 \quad (5)$$

由于积累时间很短, 作用距离较远, 因此三次项对包络的影响可忽略不计, 只需考虑其对相位的影响, 即通过对点目标的回波乘以相位因子:

$$H_0 = \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{AB-B^3}{2r^2} (t-t_A)^3\right\} \quad (6)$$

加以补偿, 从而可对式(4)进一步变换可得到:

$$R(t;r) \approx r - B(t-t_A) + \frac{A-B^2}{2r}(t-t_A)^2 = r - V(t-t_A)\sin\varphi + \frac{V^2 \cos^2\varphi - r a_{LOS}}{2r}(t-t_A)^2 = r - \left[V_{LOS}(t-t_A) + \frac{1}{2}a_{LOS}(t-t_A)^2 \right] + \frac{V^2 \cos^2\varphi}{2r}(t-t_A)^2 \approx \left[r^2 + V^2 \cos^2\varphi (t-t_A)^2 \right]^{1/2} - \Delta r_{LOS} \quad (7)$$

式中, Δr_{LOS} 为平台沿视线方向运动分量所引起的位移或称为距离徙动, 对上式距离模型进行分析, 假设没有最后一项 Δr_{LOS} , 则距离模型变为:

$$R_1(t;r) = \left[r^2 + V^2 \cos^2\varphi (t-t_A)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

这正是正侧视匀速运动模型, 瞬时距离的变化由速度 $V\cos\varphi$ 决定, 为匀速。因此, 具有三方向匀加速度

的弹载运动模型转化为弹载匀速正侧视模型, 其示意图如图 2 所示。

对此模型可进一步应用经典 CS 算法。所以主要问题是对 Δr_{LOS} 的补偿。 Δr_{LOS} 主要是由视线方向的速度和加速度造成的, 可将其视为运动误差, 因此可利用惯导测得的速度和加速度的值在脉冲压缩前进行运动误差补偿。 Δr_{LOS} 主要造成两方面的影响, 一是影响回波包络, 二是影响回波相位, 因此将这两方面的影响补偿掉, 便可以忽略距离徙动的影响, 将式(7)简化为式(8)。所以主要从以下两方面进行补偿:

1) 包络移动补偿。校正由于 Δr_{LOS} 而造成的距离向回波时延的变化, 此补偿通常在快时间域对回波插值实现。文献[7]中提出的一种相邻包络相关技术进行距离对准, 也可有效实现包络移动补偿。如果 Δr_{LOS} 在一个孔径时间内的变化小于距离采样间隔, 可忽略包络误差。

2) 相位补偿。即对相位 $\phi = 4\pi\Delta r_{LOS}/\lambda$ 的补偿, 取相位补偿因子为:

$$H_1 = \exp(-j4\pi\Delta r_{LOS}/\lambda) \quad (9)$$

令 $t_A = 0$, 即零时刻, 点目标位于波束中心, 可得回波信号的数学表达式为:

$$ss(\tau, t, r) = \sigma_A \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_d}\right) \cdot a_r\left[\tau - \frac{2R(t;r)}{c}\right] \cdot a_a(t) \cdot \exp\left\{-j\pi k \left(\tau - \frac{2R(t;r)}{c}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi R(t;r)}{\lambda}\right\} \quad (10)$$

式中: T_d 为合成孔径时间; σ_A 为点目标后向散射特性; c 为光速; λ 为发射脉冲波长; k 为调频率; τ 和 t 分别为距离向快变时间和方位向慢变时间; $\text{rect}(t)$ 为单位矩形函数; $a_a(t)$ 是方位向天线方向性函数; $a_r[\tau]$ 发射脉冲包络; $R(t;r)$ 是点目标 P 到天线相位中心距离的变化函数。

2 成像算法

2.1 运动误差补偿

利用惯导测得的速度和加速度求得视线方向距离徙动, 对点目标回波公式(10)进行包络校正并与相

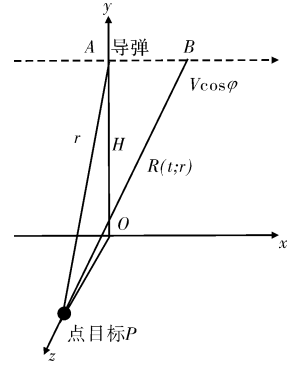


图 2 正侧视匀速运动模型示意图

位补偿因子式(9)相乘,近似得到:

$$ss(\tau, t, r) = \sigma_A \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_d}\right) \cdot a_r \left[\tau - \frac{2R_1(t; r)}{c} \right] \cdot a_a(t) \cdot \exp\left\{-j\pi k \left(\tau - \frac{2R_1(t; r)}{c}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi R_1(t; r)}{\lambda}\right\} \quad (11)$$

2.2 经典 CS 算法

利用驻定相位原理得到点目标回波信号的距离-多普勒域表达式为:

$$sS(\tau, f_t; r) = w \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi r}{\lambda} \gamma(f_t)\right] \cdot \exp\left\{-j\pi k(f_t; r) \left[\tau - \frac{2r}{c} [1 + C_s(f_t)]\right]^2\right\} \quad (12)$$

式中 w 表示调幅项,包括目标后向散射系数、单位矩形函数和天线方向图及距离包络,不影响算法的推导。

$$\gamma(f_t) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_t}{2V \cos \varphi}\right)^2} \quad (13)$$

$$C_s(f_t) = 1/\gamma(f_t) - 1 \quad (14)$$

$$\frac{1}{k(f_t; r)} = \frac{1}{k} - \frac{2\lambda r(1 - \gamma^2(f_t))}{c^2 \gamma^3(f_t)} \quad (15)$$

假定调频斜率 $k(f_t; r)$ 随 r 变化很小,可用参考距离 r_{ref} 处的调频率来近似,即 $k(f_t; r) = k(f_t; r_{\text{ref}})$,所以对式(10)乘以 CS 因子:

$$H_{\text{cs}}(\tau, f_t; r_{\text{ref}}) = \exp\left\{-j\pi k(f_t; r_{\text{ref}}) \left[\tau - \frac{2r_{\text{ref}}}{c} [1 + C_s(f_t)]\right]^2\right\} \quad (16)$$

使得不同距离上的迁移轨迹和参考距离上的迁移轨迹相同,进而将相乘后结果进行距离向 FFT,得到信号的二维频域表达式:

$$SS(f_r, f_t; r) = w \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{\gamma(f_t)}{k(f_t; r_{\text{ref}})} f_r^2\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} [r + r_{\text{ref}} C_s(f_t)] f_r\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi r}{\lambda} \gamma(f_t)\right\} \cdot \exp[j\Delta\theta] \quad (17)$$

其中 $\Delta\theta$ 为 CS 操作后的残余相位误差,表达式为:

$$\Delta\theta = \frac{4\pi}{c^2} k(f_t; r_{\text{ref}}) [1 + C_s(f_t)] C_s(f_t) (r - r_{\text{ref}})^2 \quad (18)$$

式(17)中,补偿第一相位项完成距离压缩和二次距离压缩,第二相位项包含目标的正确距离和徙动距离,补偿此项完成距离徙动校正,由此可得距离向相

位参考函数:

$$H_2 = \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} r_{\text{ref}} C_s(f_t) f_r\right\} \cdot \exp\left\{j\pi \frac{\gamma(f_t)}{k(f_t; r_{\text{ref}})} f_r^2\right\} \quad (19)$$

式(17)与式(19)相乘后进行 IFFT 将信号变到距离多普勒域,完成方位压缩和残余相位补偿,参考函数为:

$$H_3 = \exp\left\{j \frac{4\pi r}{\lambda} [\gamma(f_t) - 1]\right\} \cdot \exp[-j\Delta\theta] \quad (20)$$

将所得信号进行方位向 IFFT,即得到目标图像。基于运动误差补偿的 CS 算法流程如图 3 所示。

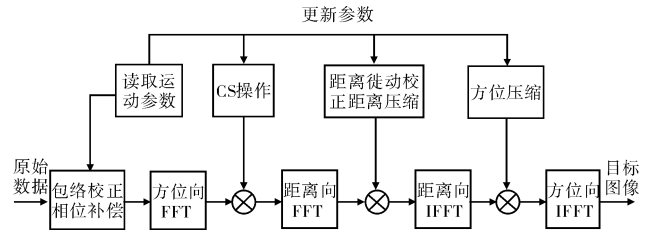


图 3 基于运动误差补偿的 CS 算法流程

3 运动参数的获取

文中算法的关键就是对原始数据进行包络校正和相位补偿,从而通过运动误差补偿将匀加速系统转换到匀速系统,所以获得实时准确的运动参数是必须的。通常运动参数的获取主要通过两种途径:

1) 基于惯导系统测量得到。这种方法获取的运动参数数据率高,适合实时处理。可借鉴当前国外较为先进的 SAR 系统,采用惯性测量系统(INS)和运动补偿专用的 IMU 联合 GPS 并结合算法来完成^[12]。

2) 基于回波数据计算得到。由距离公式(1)得到多普勒参数为:

$$\text{多普勒中心: } f_d = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(t; r)}{dt} = \frac{2B}{\lambda} \quad (21)$$

多普勒调频率:

$$f_r = -\frac{2}{\lambda} \frac{d^2 R(t; r)}{dt^2} = -\frac{2A}{\lambda r} + \frac{2B^2}{\lambda r} \quad (22)$$

从而可通过精确估计多普勒参数计算运动参数:

$$V_{\text{LOS}} = \frac{\lambda f_d}{2} \quad (23)$$

$$V = \frac{\lambda f_d}{2 \sin \varphi} \quad (24)$$

$$a_{\text{LOS}} = \frac{\lambda^2 f_d^2}{4r \sin^2 \varphi} - \frac{\lambda^2 f_d^2}{4r} + \frac{\lambda f_r}{2} \quad (25)$$

4 仿真分析

依据上述提出的方法对点目标进行仿真实验,仿

真参数如表 1 所示。图 4、图 5 为仿真结果,从图中可

表 1 计算机仿真参数

参数	参数值	参数	参数值
调频信号带宽	60MHz	斜视角 φ	60°
采样率	70MHz	V_x	1000m/s
脉冲宽度	$10\mu s$	V_y	-100m/s
脉冲重复频率	10kHz	V_z	-50m/s
载频	10GHz	A_x	-100m/s ²
斜视距离	20km	A_y	-50m/s ²
入射角 θ	30°	A_z	-30m/s ²

以看到,点目标成像质量较好,方位向和距离向的压缩精度都较高,成像质量指标列于表 2,由表可见,分辨率及方位向和距离向的峰值旁瓣比和积分旁瓣比与理论值吻合较好,验证了方法的有效性。

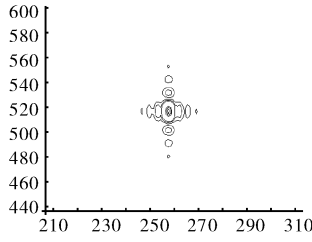


图 4 点目标等高线图

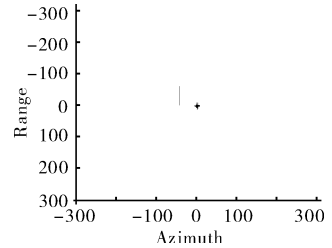


图 5 点目标成像结果

表 2 点目标成像质量参数

	理论值			试验值		
	分辨率/m	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB	分辨率/m	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB
距离向	2.5	-13.34	-9.64	2.9	-13.37	-9.66
方位向	3.8	-13.25	-9.61	4.2	-13.31	-9.62

5 结论

文中通过运动误差补偿,将弹载斜视加速运动问题转化为正侧视匀速运动问题,使得成像处理得以简化,近而利用经典 CS 算法进行成像,并获得了清晰的点目标图像。该方法主要特点有:1)运动补偿后,运动模型得到简化,使得后续成像算法的应用得到了扩展;2)将运动补偿与脉冲压缩处理分离,使得运动补偿环节可适应算法的变化,并且能够与各种基于回波数据的运动补偿相结合,不会增加额外的环节,提高了加速运动条件下的成像质量。

参考文献:

[1] E R Hiller. Synthetic aperture radar map matching for navigation, Raytheon Company, Missile Systems Division[R]. D238025,1979.

[2] H Runge, R Bamler. A novel high precision SAR focusing algorithm based on chirp scaling[C]//Proceedings of IEEE 1992 International Geosciences and Remote Sensing Symposium, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992: 372-375.

[3] 黄岩,李春升,陈杰,等. 高分辨率星载改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报,2000,28(3):35-38.

[4] Alberto Moreira, Josef Mittermayer, Rolf Scheiber. Ex-

tended chirp scaling algorithm for air-and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing,1996,34(5):1123-1136.

[5] 文竹,周荫清,陈杰. 基于 ECS+FIR 的星载快视成像算法[J]. 电子学报,2004,32(6):933-937.

[6] 刘光炎,黄顺吉. 非线性 CS 算法的前斜视 SAR 成像[J]. 电子与信息学报,2003,25(10):1308-1315.

[7] 周振宇,姜义成. 弹载 SAR 成像算法的分析与仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:25-26.

[8] Li Yue-li,Liang Dian-nong. A refined range Doppler algorithm for airborne squinted SAR imaging under maneuvers[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems,2007:389-392.

[9] Zhou Qiang, Qu Chang-wen, Su Feng, et al. A new approach of extended chirp scaling algorithm for high squint missile-borne SAR data processing [C]//IEEE 2008 International Symposium on Computer Science and Computational Technology, Shanghai, 2008:133-136.

[10] 李悦丽. 弹载合成孔径雷达成像技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2008:48-49,68-70.

[11] 丁赤飏. 基于惯导系统的机载 SAR 运动补偿精度分析[J]. 电子与信息学报,2002,24(1):12-18.