

直升机载调频连续波旋转式 SAR 信号分析与成像算法研究

李东* 廖桂生 王威 徐青 党博
(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文研究基于调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)的直升机载旋转式合成孔径雷达(ROtating Synthetic Aperture Radar, ROSAR)成像, 提出一种直升机载 FMCW-ROSAR 成像的新方法。该方法首先利用等效相位中心原理, 将收发分置天线系统的回波信号等效为“自发自收”单基系统。在此基础上, 给出了其精确的2维频谱同时分析了载机在发射信号和接收信号过程中天线连续运动的影响——产生多普勒频移及其补偿方法; 然后运用高效的逆 Chirp-Z 变换校正了距离徙动空变性。整个算法只包含快速傅里叶变换和复乘操作, 不涉及插值, 易于工程实现。仿真结果验证了分析结论的正确性和算法的有效性。

关键词: 直升机载旋转式合成孔径雷达; 调频连续波; 逆 Chirp-Z 变换; 2 维频谱

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2460-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01689

Performance Analysis and Image Formation Algorithm for Helicopter-borne Rotating Synthetic Aperture Radar Using Frequency Modulated Continue Waveform

Li Dong Liao Gui-sheng Wang Wei Xu Qing Dang Bo

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel helicopter-borne Frequency Modulated Continue Wave (FMCW) ROtating Synthetic Aperture Radar (ROSAR) imaging method is proposed. Firstly, by performing the equivalent phase center principle, the separated transmitting and receiving antenna system is equalized to the case of system configuration with antenna both for transmitting and receiving signals. Based on this, accurate two-dimensional spectrum is obtained and the Doppler frequency shift effect induced by the platform's continuous motion while radar transmits and receives signals is analyzed in detail and compensated. Then, efficient inverse Chirp-Z transform is applied to correct the range-variant Range Cell Migration (RCM). With only FFT and complex multiplication and no interpolation, the proposed method can be efficiently implemented. Finally, correctness of the analysis and effectiveness of the proposed algorithm are demonstrated through simulation results.

Key words: Helicopter-borne ROtating Synthetic Aperture Radar (ROSAR); Frequency Modulated Continue Wave (FMCW); Inverse Chirp-Z transformation; Two-dimension spectrum

1 引言

目前, SAR 成像已经在许多平台上得到了广泛的应用, 而直升机是迄今为止机动性最优的一种空中运载平台, 可以垂直起降、贴地飞行、可以在未经平整的地点着陆, 但前提条件是天气状况必须足够良好。如何能够在不良气候条件下探测直升机飞行路径上的障碍物, 选择安全的飞行路径至关重要。而调频连续波合成孔径雷达使得直升机载成像雷达系统具有高可靠、高紧凑、低成本的特点。因此,

直升机载调频连续波合成孔径雷达成为直升机防撞系统的一种最佳选择, 也是目前世界各国不断追求发展的一种高技术防撞设备, 这已经成为当今的研究热点^[1,2]。

传统的条带式、聚束式等合成孔径雷达成像系统一般工作在侧视模式, 可以实现对载机飞行航线左右两侧场景的高分辨成像, 然而对载机飞行航向正前方感兴趣区域则不具备高分辨成像能力, 存在固有的成像盲区^[3]。前视合成孔径雷达可以对载机正前方扇形区域进行特定分辨率的成像^[4], 但其分辨率受作用距离、载波波长和实孔径长度的制约, 一般不是很高; 而且其分辨率也会随着作用距离的变化而发生变化, 通常只能用于近程。旋转式合成孔径

2012-12-24 收到, 2013-04-27 改回

国家 973 计划项目(2011CB707001), 国家自然科学基金(61101242), 长江学者和创新团队发展计划(IRT0954)资助课题

*通信作者: 李东 lidongcuit@126.com

雷达是一种基于旋转天线的合成孔径雷达，最早是由德国宇航局(DLR)提出^[5]。它具有高时空分辨率、短重访周期、广域成像等特点。尤其适用于以直升机作运载平台的场合，如天线安装在直升机旋翼叶片的末端，利用叶片的旋转运动形成合成孔径得到高分辨图像，且不需要直升机平台的运动就可以完成周围 360° 成像。然而国内外关于旋转式合成孔径雷达(ROSAR)研究公开发表的文献非常有限，主要有文献[6]提出用时域相关成像方法，该方法计算复杂性高不适合实时成像处理。文献[7]提出的子孔径成像方法，具有分辨率低等缺点。调频连续波和直升机载旋转式合成孔径雷达的结合使得直升机载成像雷达系统具有高可靠、高紧凑、低成本的特点。然而调频连续波(FMCW)与SAR技术结合有其特殊性，与传统的脉冲式SAR不同，调频连续波SAR采用收、发天线分离的体制，较长的扫频时间决定了在发射信号的过程中目标与雷达平台之间的距离是变化的。也就是脉冲式SAR基于“一步一停”的工作方式不成立。这就给调频连续波旋转式合成孔径雷达成像带来新的挑战，需要研究适合于FMCW-ROSAR的成像算法。

本文针对直升机载调频连续波旋转式合成孔径雷达成像几何模型提出一种新的成像方法。首先利用等效相位中心原理，将收发分置天线系统的回波信号等效为“自发自收”单基系统的情况。同时分析了载机在发射信号和接收信号过程中天线连续运动的影响——产生多普勒频移，对其补偿的方法。在此基础上，提出了一种基于逆 Chirp-Z 变换的直升机载调频连续波 ROSAR 成像算法。

2 直升机载 FMCW-ROSAR 几何模型

图 1 是带有收发分置天线的直升机载旋转式合成孔径雷达(ROSAR)基本配置。雷达天线安装在直升机旋翼叶片末端或高于旋翼叶片的刚性支架位置上，它是利用旋翼叶片的旋转来实现方位向合成孔径，从而使得方位向具有分辨能力。雷达天线相位中心在高度为 H 的平面内作以 O 点为圆心， L 为半径，角速度为 ω 的匀速圆周运动；波束指向始终与旋翼叶片切线方向垂直，且保持下视角 φ 不变。

调频连续波收发天线被分别安装在直升机相互垂直的两个不同旋翼上，如图 2 所示，其中 \square 为发射天线， \triangle 为接收天线，发射和接收波束视线方向的交点位于发射和接收天线的中心，即发射和接收天线的等效相位中心在旋翼轨迹平面上夹角为 45° 处。当旋翼叶片旋转一周后，在地面上形成内径为 r_1 ，中心半径为 r_0 ，外径为 r_2 的圆环型成像区域；

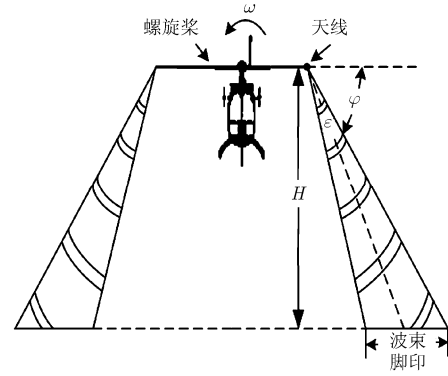


图 1 ROSAR 成像前视图

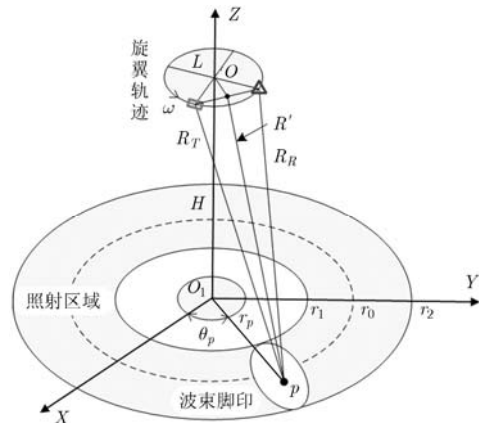


图 2 FMCW-ROSAR 成像几何模型

且成像区域大小取决于直升机飞行的高度 H 、天线俯仰向波束宽度 ε 和下视角 φ ，具体关系为

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= H \tan \varphi \\ r_1 &= H \tan \left(\varphi - \varepsilon/2 \right) \\ r_2 &= H \tan \left(\varphi + \varepsilon/2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

令 τ 为方位慢时间变量，设 $\tau = 0$ 时刻波束中心照射在 x 轴的正半轴上，则在 $\tau = \tau_p$ 时刻波束中心照射点位于以 O_1 点为圆心，半径为 r_p ，方位角(定义与 x 正半轴的夹角)为 θ_p 的点目标 p ，则点目标 p 的坐标可表示为 $[r_p \cos \theta_p, r_p \sin \theta_p, 0]$ 。而安放在直升机旋翼叶片末端的雷达天线发射调频连续波，其发射通道天线相位中心的运动过程可写为

$$\left. \begin{aligned} x_T(\tau) &= L \cos \theta_T \\ y_T(\tau) &= L \sin \theta_T \\ z_T(\tau) &= H \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 $\theta_T = \omega\tau + 45^\circ$ ， $[x_T(\tau), y_T(\tau), z_T(\tau)]$ 为 τ 时刻发射天线相位中心的瞬时坐标。同理可知，相对应的接收通道天线相位中心的运动过程可写为

$$\left. \begin{aligned} x_R(\tau) &= L \cos \theta_R \\ y_R(\tau) &= L \sin \theta_R \\ z_R(\tau) &= H \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 $\theta_R = \omega\tau - 45^\circ$, $[x_R(\tau), y_R(\tau), z_R(\tau)]$ 为 τ 时刻接收雷达天线相位中心的瞬时坐标。则在 τ 时刻发射和接收通道的天线相位中心到点目标 p 的瞬时斜距可分别表示为

$$\begin{aligned} R_T(\tau) &= \sqrt{(L \cos \theta_T - r_p \cos \theta_p)^2 + (L \sin \theta_T - r_p \sin \theta_p)^2 + H^2} \\ &= \sqrt{L^2 + r_p^2 + H^2 - 2Lr_p \cos(\omega(\tau - \tau_p) + 45^\circ)} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_R(\tau) &= \sqrt{(L \cos \theta_R - r_p \cos \theta_p)^2 + (L \sin \theta_R - r_p \sin \theta_p)^2 + H^2} \\ &= \sqrt{L^2 + r_p^2 + H^2 - 2Lr_p \cos(\omega(\tau - \tau_p) - 45^\circ)} \quad (5) \end{aligned}$$

3 双基等效单基处理

如图 3 所示, 由于调频连续波接收和发射天线安装在不同的位置, 可认为是处于双基工作模式。由等效相位中心原理可知, 对于收、发分置的两根天线, 当基线长度相对于雷达到目标的距离来说很短时, 可以等效为在两者连线(基线)的中心作自发收, 相当于单基工作情况, 但需要补偿一个常数相位^[8]。

由 ROSAR 几何模型可知, 收发基线中点的坐标 $[x_{\text{equa}}(\tau), y_{\text{equa}}(\tau), z_{\text{equa}}(\tau)]$ 为

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{equa}}(\tau) &= (L \cos \theta_R + L \cos \theta_T)/2 \\ y_{\text{equa}}(\tau) &= (L \sin \theta_R + L \sin \theta_T)/2 \\ z_{\text{equa}}(\tau) &= H \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

则等效斜距可写为

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \sqrt{(x_{\text{equa}}(\tau) - r_p \cos \theta_p)^2 + (y_{\text{equa}}(\tau) - r_p \sin \theta_p)^2 + H^2} \\ &= \sqrt{\frac{L^2}{2} + r_p^2 + H^2 - \sqrt{2}Lr_p \cos(\omega(\tau - \tau_p))} \quad (7) \end{aligned}$$

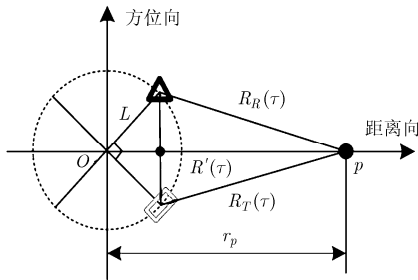


图 3 FMCW-ROSAR 俯视图

收发分置的斜距和等效斜距两者之间的误差为

$$\begin{aligned} \Delta R &= R_T(\tau) + R_R(\tau) - 2 \cdot R(\tau) \\ &\approx \frac{Lr_p \theta_c^2}{2\sqrt{L^2 + r_p^2 + H^2} - 2Lr_p} \quad (8) \end{aligned}$$

其中 $\theta_c = 45^\circ \times \pi / 180$ 为常数, 斜距近似误差如图 4 所示(仿真参数选择如表 1), 可知斜距近似误差远小于距离分辨单元, 引起的相位误差也远小于 $\pi/4$ 。近似误差大小依赖于具体的参数选择, 一般需要补偿一个相位项 $\phi = 2\pi\Delta R/\lambda$ 。其中 λ 为波长。

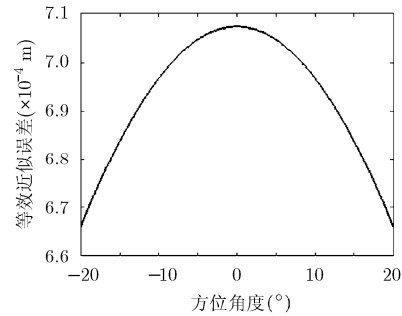


图 4 双基等效单基的斜距近似误差

式(7)为 FMCW-ROSAR 等效单基后斜距的精确表达式。由于斜距表达式中含有余弦项, 因此很难直接通过驻定相位原理得到点目标精确的 2 维频谱, 处理时必须做一些近似。由 $(\cos x = 1 - x^2/2 + x^4/24 + \dots)$ 和 $r_p \gg L$, 令 $r_0 = \sqrt{L^2/2 + r_p^2 + H^2} - \sqrt{2}Lr_p$ 对式(7)斜距公式进行泰勒级数展开, 并忽略四阶以上高次项可得

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \sqrt{L^2/2 + r_p^2 + H^2 - \sqrt{2}Lr_p \cos(\omega(\tau - \tau_p))} \\ &\approx \sqrt{r_0^2 + \sqrt{2}Lr_p \omega^2 (\tau - \tau_p)^2 / 2} \quad (9) \end{aligned}$$

4 直升机载 FMCW-ROSAR 信号处理

4.1 信号模型及其 2 维频谱

假设雷达在任意 τ 时刻发射信号其瞬时斜距为 $R(\tau)$, 经过 τ_d 时间后返回接收端其对应的瞬时斜距为 $R(\tau + \tau_d)$, 双程延时 τ_d 为

$$\tau_d = \frac{R(\tau) + R(\tau + \tau_d)}{c} \quad (10)$$

其中

$$R(\tau) = \sqrt{r_0^2 + \frac{\sqrt{2}Lr_p \omega^2 (\tau - \tau_p)^2}{2}} \quad (11)$$

$$R(\tau + \tau_d) = \sqrt{r_0^2 + \frac{\sqrt{2}Lr_p \omega^2 (\tau - \tau_p + \tau_d)^2}{2}} \quad (12)$$

把式(11)和式(12)代入式(10)中得到一个关于 τ_d 的二次方程, 解这个方程得

$$\tau_d = 2\mu \left[\frac{R(\tau)}{c} + \frac{\sqrt{2}Lr_p\omega^2}{2c^2}(\tau - \tau_p) \right] \quad (13)$$

其中 $\mu = 1/(1 - \sqrt{2}Lr_p\omega^2/(2c^2))$ 。

发射信号为线性调频信号 $ss_t(t_r) = \exp(j(2\pi \cdot f_0 t_r + \pi K_r t_r^2))$, 则点目标接收的回波信号可写为 $ss(t_r, \tau; \tau_p, r_0)$

$$= \sigma \cdot \exp[j2\pi f_0(t_r - \tau_d)] \cdot \exp[j\pi K_r(t_r - \tau_d)^2] \quad (14)$$

式中 σ 为点目标的后向散射特性, f_0 为载波频率, t_r 为快时间变量, K_r 为距离向调频率。在调频连续波雷达中, 发射脉冲宽度一般可达毫秒级, 因此为了降低距离向采样频率, 距离向一般采用解线频调处理。则经过 Dechirp 后, 同时移除剩余视频 (RVP) 项^[9]后的回波信号可表示为

$$ss_2(t_r, \tau; \tau_p, r_0) = \sigma \cdot \exp[-j2\pi f_0(\tau_d - \tau_c)] \cdot \exp[-j2\pi K_r(\tau_d - \tau_c)(t_r - \tau_c)] \quad (15)$$

其中 τ_c 为参考距离处的延时, 这里取为 $\tau_c = 2\mu r_{\text{ref}}/c$, r_{ref} 为场景中心对应的斜距。

由时频替换 $K_r(t_r - \tau_c) \rightarrow f_r$ 得

$$Ss(f_r, \tau; \tau_p, r_0) = \sigma \cdot \exp[-j2\pi(f_0 + f_r)(\tau_d - \tau_c)] \quad (16)$$

把式(13)的表达式代入式(16)得

$$Ss_1(f_r, \tau; \tau_p, r_0) = \sigma \cdot \exp \left\{ -j4\pi\mu(f_0 + f_r) \cdot \left[\frac{R(\tau)}{c} + \frac{\sqrt{2}Lr_p\omega^2}{2c^2}(\tau - \tau_p) - \frac{r_{\text{ref}}}{c} \right] \right\} \quad (17)$$

利用驻定相位原理(POSP)对方向向做傅里叶变换^[3,10], 得到点目标的 2 维频谱为^[11]

$$SS(f_r, f_r; \tau_p, r_0) = \sigma \cdot \exp[-j\Phi(f_r, f_r; \tau_p, r_0)] \quad (18)$$

其中相位项 $\Phi(f_r, f_r; \tau_p, r_0)$ 为

$$\begin{aligned} \Phi(f_r, f_r; \tau_p, r_0) &= \frac{4\pi\mu r_0}{c} \sqrt{(f_0 + f_r)^2 - \left[\frac{v(r_p)}{c}(f_0 + f_r) + \frac{cf_r}{2\mu v(r_p)} \right]^2} \\ &\quad - 2\pi f_r \frac{f_r}{K_r} - \frac{4\pi\mu r_{\text{ref}}}{c}(f_0 + f_r) \\ &\quad - \frac{4\pi\mu r_{\text{ref}}}{c} f_r - 2\pi f_r \tau_p \end{aligned} \quad (19)$$

其中, 速度 $v(r_p) = \sqrt{0.707Lr_p}\omega$, 其大小依赖于场景目标的位置。在调频连续波 SAR 成像中场景一般不大, 这里我们用参考距离处速度近似代替。脉冲式

雷达中平方根里并不包含 $v(r_p)(f_0 + f_r)/c$ 和 $2\pi f_r f_r / K_r$ 项^[9], 这是由于调频连续波发射脉冲宽度一般可达毫秒级, 导致在一个脉冲周期内雷达与目标的距离发生变化, 即脉冲雷达中的“一走一停”假设不再成立所引起的距离方位耦合项。下面校正由天线连续运动引起的耦合项以及不随距离变化的常数相位:

$$\begin{aligned} H_{\text{DFC}}(f_r, f_r; r_{\text{ref}}) &= \exp \left(-j2\pi f_r \frac{f_r}{K_r} - j \frac{4\pi\mu r_{\text{ref}}}{c}(f_0 + f_r) \right. \\ &\quad \left. - j \frac{4\pi\mu r_{\text{ref}}}{c} f_r \right) \end{aligned} \quad (20)$$

在校正由天线连续运动引起的距离方位耦合和不随距离变化的常数相位后, 2 维频谱相位项变为 $\Phi_1(f_r, f_r; \tau_p, r_0)$

$$\begin{aligned} \Phi_1(f_r, f_r; \tau_p, r_0) &= \frac{4\pi\mu r_0}{c} \sqrt{(f_0 + f_r)^2 - \left[\frac{v(r_p)}{c}(f_0 + f_r) + \frac{cf_r}{2\mu v(r_p)} \right]^2} \\ &\quad - 2\pi f_r \tau_p \end{aligned} \quad (21)$$

4.2 基于逆Chirp-Z的成像算法

上面得到了调频连续波直升机载 ROSAR 的 2 维频谱, 并对频谱进行了分析, 下面给出具体的成像算法。从式(21)可知距离频率 f_r 和多普勒频率 f_r 还是耦合在一起的, 因此无法分别进行 1 维处理。为了消除 2 维频率耦合, 把式(21)中的 2 维频谱在 $f_r = 0$ 泰勒级数展开并保留至三次项整理可得

$$\begin{aligned} \Phi_1(f_r, f_r; \tau_p, r_0) &= \phi_0(f_a; r_0) + \phi_1(f_a; r_0) f_r \\ &\quad + \phi_2(f_a; r_0) f_r^2 + \phi_3(f_a; r_0) f_r^3 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_0(f_a; r_0) &= \frac{4\pi\mu r_0 D f_0}{c} - 2\pi f_r \tau_p \\ \phi_1(f_a; r_0) &= \frac{4\pi r_0}{c} \frac{\mu(1 - \xi_1 \xi_2)}{D} \\ \phi_2(f_a; r_0) &= -\frac{2\pi\mu r_0 (\xi_1 - \xi_2)^2}{cf_0 D^3} \\ \phi_3(f_a; r_0) &= \frac{2\pi\mu r_0 (1 - \xi_1 \xi_2)(\xi_1 - \xi_2)^2}{cf_0 D^5} \\ D(f_r, v(r_{\text{ref}})) &= \sqrt{1 - \xi_1^2} \\ \xi_1 &= \frac{v(r_{\text{ref}})}{c} + \frac{cf_r}{2\mu v(r_{\text{ref}})}, \xi_2 = \frac{v(r_{\text{ref}})}{c} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

下面我们首先在 2 维频域完成一致距离徙动校正和二次距离压缩, 由于二次距离脉压项是随距离空变的, 实际处理中通常以场景中心处近似处理。则相应的一致距离徙动校正和二次距离压缩函数为

$$H_{\text{BULK,SRC}}(f_r, f_r; r_{\text{ref}}) = \phi_1(f_a; r_{\text{ref}})f_r + \phi_2(f_a; r_{\text{ref}})f_r^2 + \phi_3(f_a; r_{\text{ref}})f_r^3 \quad (24)$$

经过一致距离徙动校正和二次距离压缩后, 回波信号可写为

$$SS_1(f_r, f_r; \tau_p, r_0) = \sigma \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi\mu r_0 D f_0}{c} - j\frac{4\pi(r_0 - r_{\text{ref}})}{c}\beta f_r + j2\pi f_r \tau_p\right] \quad (25)$$

其中 $\beta = \mu(1 - \xi_1 \xi_2)/D$ 为变标因子, 从式(25)可知, 距离单元徙动是随目标距离变化的, 下面我们考虑去除距离徙动的空变性。对于距离向经过 Dechirp 接收处理后的回波数据, 通常有两种方法可以实现距离向空变性校正: 一种方法是使用频率变标 (Frequency Scaling, FS) 算法^[2], 另一种方法是采用 Chirp-Z 变换。其中 FS 算法有其一定的适用性, 当波束宽度较宽时或存在一定的斜视角时, FS 变标函数本身存在模糊而会导致 FS 算法失效。为了避免这种情况, 只有增大原始 Dechirp 数据的采样频率, 由于 FMCW 雷达较长的扫频周期, 这会带来数据量的明显增大。然而基于 Chirp-Z 变换的变标处理不会存在这个问题, 考虑到 ROSAR 的方位波束一般都较宽, 因此在这里我们采用高效的逆 Chirp-Z 变换校正距离徙动的空变性^[3]。首先定义一个新的核函数 $H(f_r, f_r, t_r)$, 则逆 Chirp-Z 变换可写为

$$SS_1(t_r, f_r; \tau_p, r_0) = \int SS_1(f_r, f_r; \tau_p, r_0) H(f_r, f_r, t_r) df_r \quad (26)$$

其中变换核函数能写为

$$H(f_r, f_r, t_r) = \exp(-j2\pi\beta f_r t_r) \cdot \exp\left\{j\pi\beta[(f_r - t_r)^2 - f_r^2 - t_r^2]\right\} \quad (27)$$

因此, 式(27)可重新写为

$$SS_1(t_r, f_r; \tau_p, r_0) = \exp(-j\pi\beta t_r^2) \int SS_1(f_r, f_r; \tau_p, r_0) \cdot \exp(-j\pi\beta f_r^2) \exp\left[-j\pi\beta(f_r - t_r)^2\right] df_r \quad (28)$$

由式(28)可知逆 Chirp-Z 变换能高效实现, 仅仅包含一次卷积和二次复数乘, 经过逆 Chirp-Z 变换处理后信号在距离多普勒域可写为

$$SS_1(t_r, f_r; \tau_p, r_0) = \sigma w_r \left(t_r - \frac{\mu(r_0 - r_{\text{ref}})}{c}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi\mu r_0 D f_0}{c} + 2\pi f_r \tau_p\right] \quad (29)$$

其中 $w_r(t_r)$ 是距离向压缩包络。从式(29)我们发现经过逆 Chirp-Z 变标处理, 距离单元徙动已经完全被

校正。在完成距离向处理后, 然后完成方位脉冲压缩处理, 方位向频域匹配函数为

$$H_{\text{AMF}} = \exp\left(j\frac{4\pi\mu r_0 f_0 D}{c}\right) \quad (30)$$

进行 $f_r \rightarrow \tau$ 的方位向逆傅里叶变换, 将信号变换到距离频域和方位时域完成了方位向的压缩, 得到压缩后的信号为

$$ss(t_r, \tau; \tau_p, r_0) = \sigma w_r \left(t_r - \frac{\mu(r_0 - r_{\text{ref}})}{c}\right) w_a(\tau - \tau_p) \quad (31)$$

自此, 已经完成了整个算法实现, 更详细的成像算法流程图见图 5。

5 仿真结果及其分析

为了验证上述分析的正确性和所提算法的有效性, 我们进行了多点目标仿真处理, 其中仿真参数如表 1 所示。假设场景中分布 9 个点目标, 9 个点目标分别位于圆心、内圆和外圆上, 中心半径为 2000 m, 内外圆环半径分别为 1900 m, 2100 m, 方位向夹角 θ 大小为 20° , 如图 6 所示。图 7 是用本文方法 9 个点目标的成像处理结果, 可以看出, 本文算法对不同距离的点目标在距离向和方位向都能很好地聚焦。并且仿真结果很好地和理论分析结果相吻合。表 2 给出了两种方法在上述参数下的成像质量评价结果, 成像处理中均未作任何加窗处理。可见采用本文方法得到的成像结果性能指标与理论值比较接近。

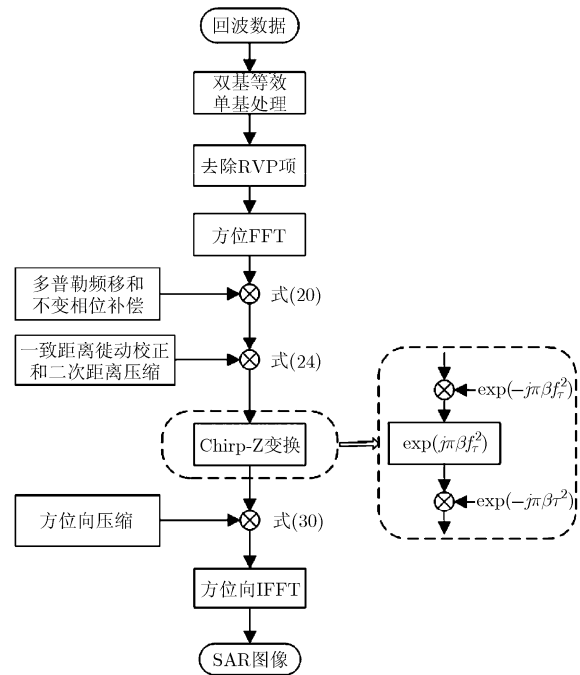


图5 成像算法实现流程图

表 1 系统仿真参数

载频	10 GHz
信号带宽	200 MHz
飞行高度	2000 m
场景中心距离	2000 m
采样频率	3 MHz
扫频频率	2000 Hz
刚性支架旋转角速度	30 rad/s
刚性支架长度	2 m
方位向波束宽度	30°
场景大小(距离×方位)	200 m×40°

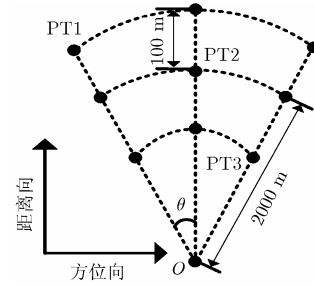


图 6 场景中点目标分布示意图

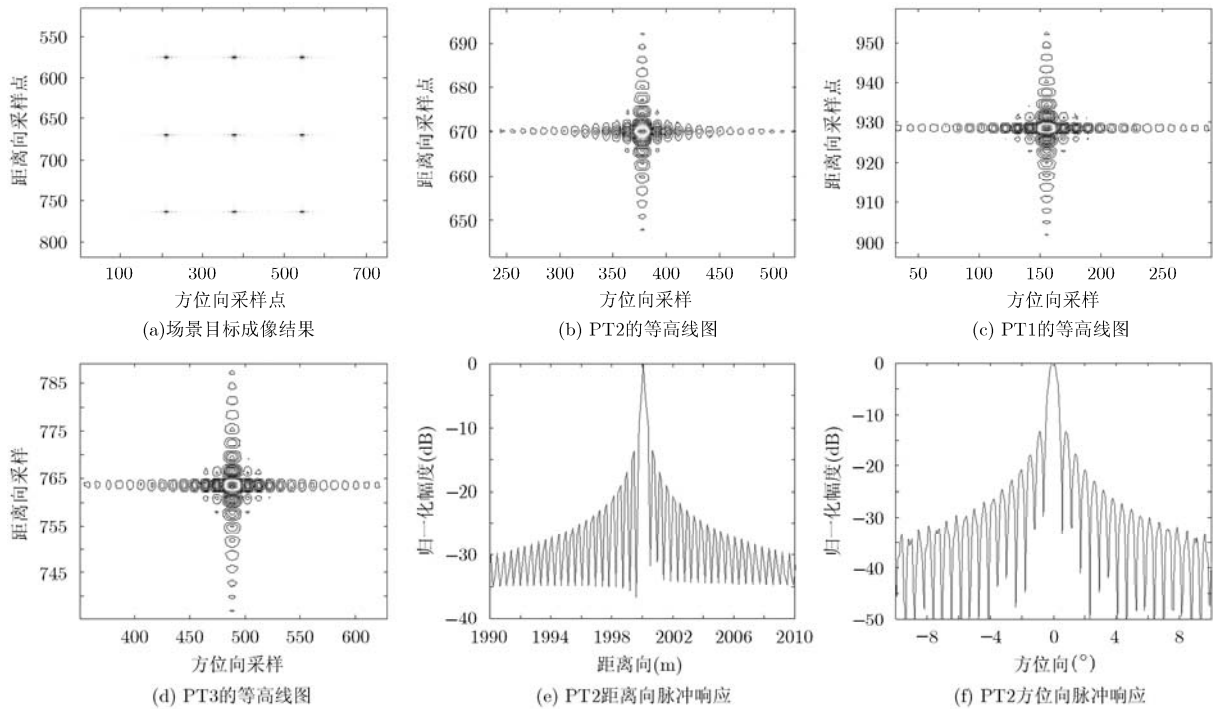


图 7 本文方法成像结果示意图

表 2 本文方法目标成像质量评估

目标点	距离向			方位向		
	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(°)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
PT1	0.78	-13.15	-9.70	0.532	-12.70	-9.52
PT2	0.77	-13.20	-9.78	0.528	-12.83	-9.56
PT3	0.78	-13.18	-9.75	0.535	-12.65	-9.49
理论值	0.75	-13.26	-9.80	0.520	-13.26	-9.80

6 结论

直升机载调频连续波旋转式合成孔径雷达成像作为一种全新的雷达成像模式，是依靠其自身特殊的天线配置实现对载机前方扇形区域高分辨成像，能够克服传统 SAR 成像固有的成像盲区。而结合 FMCW 技术使得直升机载 ROSAR 成像系统具有

高可靠、高紧凑、低成本的特点，尤其适合于小飞行平台。本文根据其成像几何模型给出了基于 FMCW 的旋转式合成孔径雷达回波信号表达式，首先利用等效相位中心原理，将收发分置的天线系统的回波信号等效为“自发自收”系统时的情况，同时分析了载机在发射信号和接收信号过程中连续运

动的影响——产生多普勒频移, 及其补偿方法。在此基础上, 提出了一种基于逆 Chirp-Z 变换高效的成像方法, 得到了聚焦良好的图像。

参 考 文 献

- [1] Mangogno A. Development of a helicopter obstacle detection and air data[C]. IEEE 20th Digital Avionics Conference, Germany, 2001: 10-18.
- [2] Young Kwag. Obstacle awareness and collision avoidance radar sensor system for low altitude flying vehicle [C]. Proceedings of IEEE the 23rd DASC, Salt Lake City, 2004: 20-25.
- [3] Sun G C, Jiang X W, Xing M D, *et al.* Focus improvement of highly squinted data based on azimuth nonlinear scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2308-2322.
- [4] Mittermayer J, Wendler M, and Krieger G. Sector Imaging Radar for Enhanced Vision (SIREV): simulation and processing techniques[C]. Enhanced and Synthetic Vision 2000 Proceeding of SPIE, Orlando, FL, USA, 2000: 298-305.
- [5] Kreitmair-Steck W and Wolfram A P. HeliRadar — a rotating antenna synthetic aperture radar for helicopter all weather operations[C]. Proceedings of the AGARD-59th Guidance and Control Panel, Italy, 1994: 56-62.
- [6] Helmut Klausing and Wolfgang Keydel, Feasibility of a Synthetic Aperture Radar with ROTating antennas (ROSAR)[C]. IEEE International Radar Conference, America, 1999: 51-56.
- [7] 孙兵, 周荫清, 陈杰, 等. 广域观测圆轨迹环扫 SAR 成像模式研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2805-2808.
Sun Bing, Zhou Yin-qing, Chen Jie, *et al.* Operation mode of circular trace scanning SAR for wide observation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(12): 2805-2808.
- [8] 梁毅, 调频连续波 SAR 信号处理[D]. [博士学位], 西安电子科技大学, 2009,
- [9] Meta A, Hoogeboom P, and Ligthart L P. Signal processing for FMCW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [10] 杨东, 廖桂生, 朱圣棋, 等. 宽绘带 SAR 成像的一种侧摆模式及其压缩知处理方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2595-2600.
Yang Dong, Liao Gui-sheng, Zhu Sheng-qi, *et al.* A lateral swing mode for wide swath SAR imaging based on the compressive sensing approach[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2595-2600.
- [11] Wang R, Loffeld O, and Nies H, *et al.* Focus FMCW SAR data using the wavenumber domain algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2109-2118.
- [12] Mittermayer J, Moreira A, and Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [13] Liu Yue, Deng Yun-Kai, and Wang R. Focus squint FMCW SAR data using inverse Chirp-Z transform based on an analytical point target reference spectrum[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(5): 866-871.
- 李 东: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 实时成像、运动目标检测。
- 廖桂生: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、空时自适应处理、地面动目标检测等。
- 王 威: 男, 1990 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理、SAR 实时成像。