

文章编号:1004-9037(2012)04-0581-05

# 一种去除回波频谱调制的直升机SAR成像方法

张红波 何 涛 陈德民

(中国航空工业集团公司雷达与电子设备研究院,无锡,214063)

**摘要:**直升机机载合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)信号受到主旋翼遮挡和直升机振动的调制,给合成孔径成像造成很大影响。本文采用时频分析方法对调制产生的原因和特征进行分析和研究,提出利用去斜后的方位相位误差作补偿,再进行相位梯度自聚焦(Phase gradient autofocus, PGA)处理,实现调制雷达回波的高质量SAR成像。实测数据表明,本方法较好地解决了回波调制情况下的成像问题,对直升机平台SAR成像具有重要的参考价值。

**关键词:**合成孔径雷达;时频分析;调制信号;自聚焦

**中图分类号:**TN957.51

**文献标识码:**A

## Removal of Spectral Modulation from Echoes for Helicopter-Borne SAR Imaging

Zhang Hongbo, He Tao, Chen Demin

(Radar and Avionics Institute, Aviation Industry Corporation of China, Wuxi, 214063, China)

**Abstract:** Since radar signals are modulated by rotor blades shadowing and helicopter vibration, the helicopter-borne synthetic aperture radar (SAR) imaging is difficult. Therefore, modulation reasons are analyzed and investigated based on time-frequency method. The modulation phase errors are extracted from the dechirped data and then compensated to remove modulation. Subsequently, the phase gradient autofocus is performed to achieve a high quality SAR image. The method has great reference value to the helicopter-borne SAR imaging.

**Key words:** synthetic aperture radar(SAR); time-frequency analysis; modulated signal; autofocus

## 引 言

直升机作为合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)搭载平台,一直是国内外SAR系统设计的选择之一<sup>[1-4]</sup>。由于直升机平台的特殊性,给高性能合成孔径雷达成像带来了一些棘手的问题。直升机的飞行高度较低、速度慢,气流对速度、偏流角的影响较大,且旋翼高速转动引起强烈振动,增加了直升机平台SAR成像的难度。文献[1,3-4]对直升机SAR成像的系统设计进行了论述。对于直升机机载SAR,国内的研究方向呈现多样化:文献[5-6]主要研究利用调频步进信号进行直升机合成孔径雷达成像;文献[7]主要研究基于直升机平台的运动目标成像方法;文献[8]采用魏格纳-维尔分布(Winger-

Ville distribution, WVD)估计多普勒频率,然后利用估计出的运动参数进行运动补偿;文献[9]研究了在直升机机载平台上组合SAR和动目标指示(Moving target indication, MTI)两种功能的系统设计,对SAR成像的研究则主要利用机载惯导给出的运动参数进行运动补偿。文献[10]仿真了航迹偏移随方位时间变化(模拟真实航迹)的SAR扩展场景目标原始数据,但缺乏对直升机平台振动特性及航迹偏移情况的具体分析。综合目前的研究成果,可以看到直升机平台的特殊运动对雷达回波的调制给SAR成像带来的影响还缺乏相关的研究。

针对直升机SAR成像的难题,利用某直升机平台上录取的SAR实测数据,本文对此进行了研究。实验雷达通过桅杆安装在直升机旋翼主轴顶部,数据录取过程中直升机尽量平稳飞行收集雷达

回波。然而雷达下方转动的主旋翼周期性地对雷达信号遮挡,给雷达回波信号附加了幅度和相位调制<sup>[11-13]</sup>。此外,直升机的强烈振动对雷达信号也产生了附加的寄生调制,这些调制因素均会严重影响 SAR 成像的质量。

本文通过对直升机机载 SAR 雷达实测数据进行时频分析,提出相位补偿去调制的 SAR 成像方法,经实测数据验证得到高质量图像。本方法简单,易于在工程中应用,可为其他去除信号调制的 SAR 成像处理提供参考。

## 1 实测数据的时频分析

### 1.1 时域分析

由于空气动力学的原因,现役各种直升机的主旋翼叶片外端线速度大致为 260 m/s,录取实测 SAR 数据的直升机主旋翼由 4 片叶片组成,叶片长 6 m 左右,故转速为 5~6 r/s。雷达安装在旋翼主轴顶部,雷达信号被转动主旋翼周期性遮挡,该调制频率为转动频率的 4 倍,即 24 Hz 左右。主旋翼遮挡调制雷达回波的周期为

$$\tau_1 = \frac{1}{N_r \cdot N} \quad (1)$$

式中:转速  $N_r = 6$  r/s,叶片数  $N = 4$ 。根据式(1)得到周期  $\tau_1 = 41.6$  ms。

由于 SAR 成像的积累时间较长,雷达接收到一串受调制的脉冲串,旋翼遮挡调制导致信号幅度呈现为周期性的低谷。因为主旋翼叶片为复合材料,旋翼叶片与雷达波束重合时,电磁波穿透叶片损耗能量,回波最弱。

积累 1 s 的雷达回波,数据矩阵的幅度图局部如图 1 所示,在方位维周期性地出现暗线。图 2 画出了图 1 的方位序列幅度,采用多条方位线幅度平均。低谷(暗线)的周期为 41 ms 左右,与式(1)计算的主旋翼叶片调制周期相符,验证了主旋翼遮挡对信号的调制作用。除此以外,信号还有因直升机强

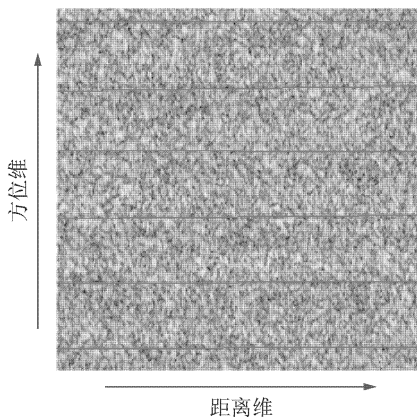


图 1 数据矩阵幅度图

烈振动带来的调制而产生的波动。为更好地显示直升机振动的调制,图 3 画出了图 2 中的幅度细节,可以看到回波幅度被周期约为 23 ms 的直升机振动调制(用虚线标示),当振动导致较大的回波波动时,具有很大的影响。

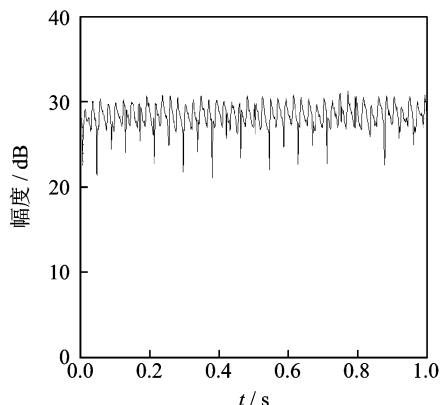


图 2 调制回波的方位维幅度

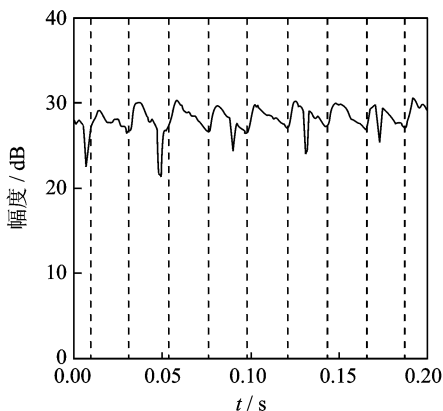


图 3 方位维幅度细节

### 1.2 频域分析

直升机各调制因素使得信号幅度和相位都是变化的,多普勒频率有复杂变化。对实测数据进行频域分析,图 4 为幅度信号的频域形式,频谱上既出现旋翼遮挡调制产生的频率间隔为 24 Hz 的调制分量(调制脉冲时域周期为 41 ms 左右),又出现直升机振动产生的频率间隔为 43 Hz 的调制分量(调制脉冲时域周期为 23 ms 左右)。

提取相位解斜后的任一条方位线信号(不考虑幅度调制),频谱如图 5 所示,方位谱形状反映出天线方向图。但相位调制造成频谱中的周期谱线,同时存在频率间隔 24 Hz 左右和 43 Hz 左右的调制分量,在图 5 右半部分尤其明显。

试验中主旋翼遮挡与直升机振动调制了雷达信号,比较图 4 与图 5,图 4 中最大调制分量与信号相差 20 dB 左右,而在图 5 中,最大调制分量与信号

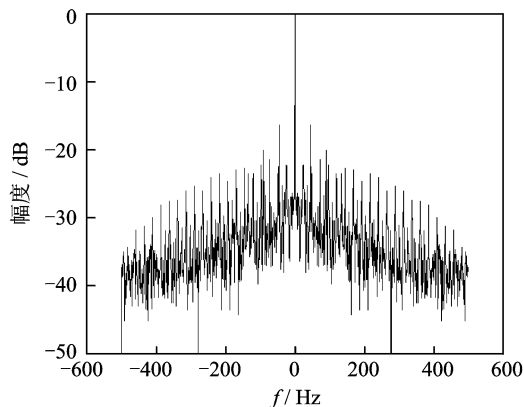


图4 调制幅度信号的频谱

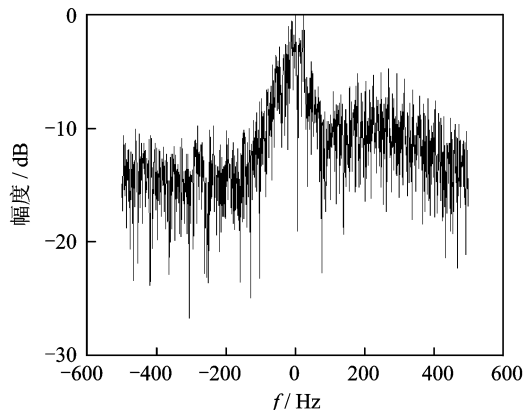


图5 调制相位信号的频谱

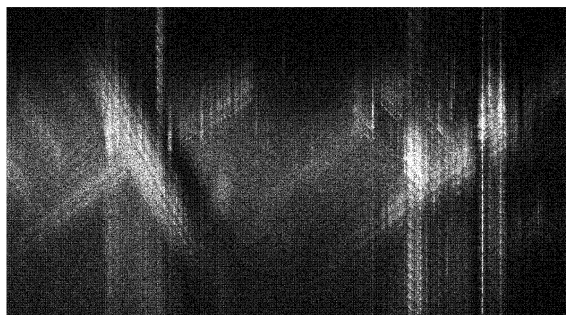
相差仅 5 dB 左右,故相位调制信号所占的比重较大,调制作用对相位的影响比对幅度的影响要大。

## 2 SAR 成像处理

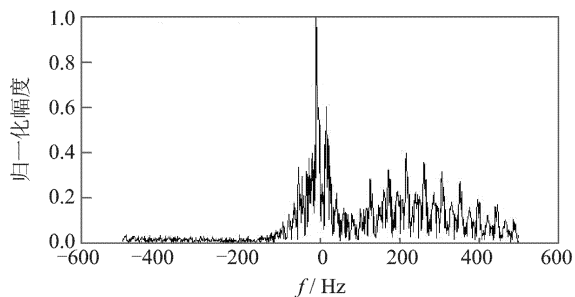
试验中主旋翼遮挡及直升机振动对雷达回波产生调制,使得对该实测数据进行 SAR 成像处理有一定困难,必须对相位甚至幅度都进行去调制补偿,才能得到高质量的 SAR 图像。

SAR 成像处理采用频谱分析(Spectral analysis, SPECAN)算法来实现。对实测数据进行 SAR 成像研究,图 6(a)为未采取任何补偿措施的 SAR 成像结果。由于未采取精细运动补偿,图像方位散焦;由于直升机各因素调制雷达回波,图像方位向出现调制分量,呈现为周期性重影。图 6(b)画出其中一条方位线剖面。图像方位既有间隔 24 Hz 的重影,又有间隔 43 Hz 的重影,调制信号将主图像做了复制搬移。

在 SAR 成像里通常采用自聚焦技术来提高图像质量,其中相位梯度自聚焦(Phase gradient autofocus, PGA)算法是一种不依赖模型的相位误差估计方法,在 SAR 领域应用广泛,是一种稳健的高



(a) 未补偿的SAR图像



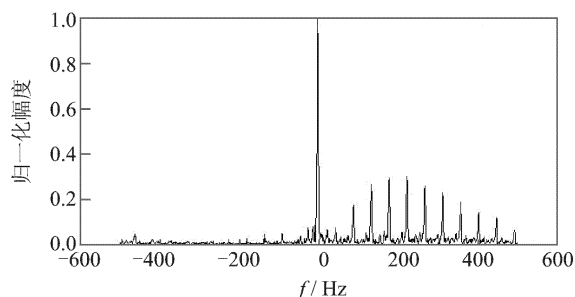
(b) 方位线剖面

图6 未补偿的 SAR 成像结果及方位线剖面

分辨率 SAR 自聚焦方法。PGA 是基于图像中某些特显点的散焦状况进行自聚焦处理,从而使整个图像因相位误差造成的散焦情况得到改善。PGA 自聚焦过程经过几次迭代,即可基本消除引起图像散焦的相位误差。经过 PGA 处理的 SAR 图像如图 7(a)所示,同一条方位线剖面如图 7(b)所示。此时的 SAR 图像方位聚焦良好,但仍残留有调制信号,主图像被周期性重复。



(a) PGA处理的SAR图像



(b) 方位线剖面

图7 由PGA算法得到的 SAR 图像及方位线剖面

PGA 处理利用孤立散射点的相位误差对整幅图像进行相位补偿,处理中对强散射点加窗,提高数据序列的信噪比,并随着迭代窗宽不断减小,只要保证窗宽大于特显点散布函数的宽度。然而PGA 方法提取的相位误差只是造成散焦的相位误差信息,处理之后的回波仍有主旋翼遮挡和直升机振动的调制信息残留,需要采取进一步的措施去除。

考虑到特显点的调制效果明显,其方位数据序列的表达式如下

$$s(m) = Ae^{-jm\Delta k_x x_0} \cdot e^{j\varphi_m}$$

$$m = 0, 1, \dots, N_a - 1 \quad (2)$$

式中: $\Delta k_x$  为离散波数域的波数单元; $x_0$  为特显点的方位位置; $\varphi_m$  主要为调制作用引起的相位误差, $\varphi_m$  随  $m$  改变( $N_a$  为方位向积累的脉冲数)。SAR 成像积累时间内接收一串受调制的脉冲,调制作用贯穿整个孔径时间,且每条方位线信号的调制作用基本相同,调制相位误差大致相同。若能提取出调制作用引入的相位误差,并将该相位差补偿为零,就可以去除回波频谱调制。

特显点的相位误差提取表达式如下

$$\varphi_m = \arg(\text{IFFT}[\text{shift}[\text{FFT}[s(m)], x_0]]) \quad (3)$$

式中: $\arg$  表示提取复数的相位,FFT 为傅里叶变换,IFFT 为逆傅里叶变换,shift 为圆周移位函数, $x_0$  为特显点所在的位置。

上述表达式将特显点的数据序列通过 FFT 变换到图像域,并将图像特显点圆周移位,再 IFFT 变换到方位数据序列,便消除表达式(2)中的第 1 个指数项,仅保留了调制相位误差。

相位误差补偿的数学表达式如下

$$s(n, m) = s(n, m) \cdot \text{conj}(e^{j\varphi_m})$$

$$n = 0, 1, \dots, N_r - 1 \quad (4)$$

式中:conj 为复数共轭; $N_r$  为方位线总数,即处理的距离门数。对每个距离门的方位数据序列与表达式(3)求出的调制相位误差共轭相乘,相位补偿后便可去除回波调制。

根据多次实测数据成像试验及分析,去除回波频谱调制的补偿方法如下:

(1) 选择数据序列里强度大的若干条方位线,因为这些单元里存在强特显点的可能性大;

(2) 对这些方位线作傅里叶变换到图像域,从中选择相对孤立的最强特显点;

(3) 将最强特显点所在的方位线作圆周移位,最强特显点移到  $x_0=0$  处。在图像域作圆周移位相当于对数据序列乘以线性相位的复指数,等效于去除式(2)的第 1 个指数项。

(4) 对该方位线作傅里叶逆变换,得到仅包含相位误差指数项的数据序列,并提取相位误差;

(5) 将该方位线相位误差对每条方位线数据序列作相位补偿,调制相位误差补偿为 0,去除了主旋翼遮挡引入的 24 Hz 调制和直升机振动引入的 43 Hz 调制。

完整的 SAR 成像处理流程如图 8 所示。

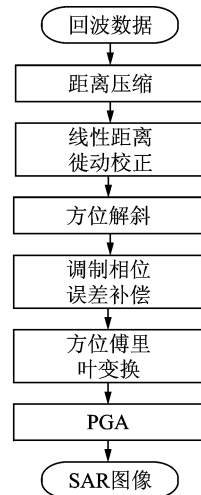
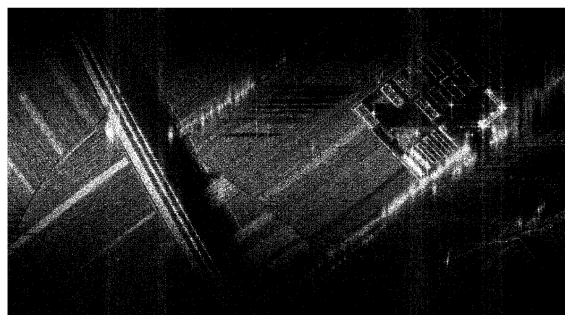
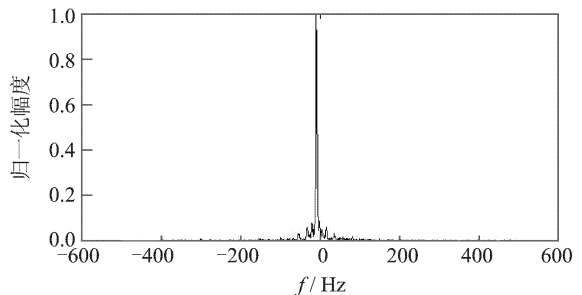


图 8 SAR 成像处理流程

经过上述流程处理的 SAR 图像如图 9(a)所示,同一条方位线剖面如图 9(b)所示。可以看到,直升机各因素对雷达回波的调制作用已被去除,且图像聚焦良好。经实测数据验证的去调制 SAR 成像流程简单有效。



(a) 去除调制作用的 SAR 图像



(b) 方位线剖面

图 9 去除调制作用的 SAR 图像及方位线剖面

### 3 结束语

利用直升机SAR实测数据,从时域、频域两方面分析了直升机主旋翼遮挡和直升机振动对回波的调制特征,并针对这些特征提出了有效去除调制合成孔径雷达成像的处理方案,经实测数据验证,该方案能解决回波调制情况下成像难的问题,得到了高质量的SAR图像。本文方法简单易实现,可在工程中推广,并且能给其他调制回波的SAR成像处理提供参考。

#### 参考文献:

- [1] Barclay M W, Williams N K. High resolution SAR/ISAR imaging from a helicopter platform[C]//IEE Radar 1997. Edinburgh, UK: [s. n.], 1997: 109-113.
- [2] Cumming Von Ian G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation[M]. [S.l.]: Artech House, 2005.
- [3] Kreitmaier S, Klausning W H, Wolfram A. Helicopter—a synthetic aperture radar with rotating antennas[C]//Proceedings of the 23rd European Microwave Conference. Madrid, Spain: IEEE Conference Publications, 1993: 463-467.
- [4] 王友林. 舰载直升机机载合成孔径雷达的技术分析[J]. 现代雷达, 2001, 23(6): 5-8, 15.  
Wang Youlin. Technical analysis on shipboard helicopter synthetic aperture radar[J]. Modern Radar, 2001, 23(6): 5-8, 15.
- [5] 常文胜, 李亚超, 邢孟道. 基于实测数据的直升机调频步进SAR成像[J]. 现代雷达, 2009, 31(4): 38-42.  
Chang Wensheng, Li Yachao, Xing Mengdao. Helicopter SAR imaging based on FM step recorded data[J]. Modern Radar, 2009, 31(4): 38-42.
- [6] Hong Xiangru, Zhang Tao, Du Zicheng. Helicopter-borne SAR imaging processing of chirp-stepped signal[C]//International Conference on Radar, 2006. Shanghai, China: [s. n.], 2006: 1-5.
- [7] 李亚超, 周峰, 邢孟道, 等. 一种直升机的舰船Dechirp实测数据SAR成像方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1794-1798.  
Li Yachao, Zhou Feng, Xing Mengdao, et al. A helicopter SAR imaging method based on ship dechirp data[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(8): 1794-1798.
- [8] Li Yachao, Zhou Feng, Bao Zheng, et al. An effective method for ship imaging of real data in helicopter SAR system[C]//International Conference on Radar, 2006. Shanghai, China: [s. n.], 2006: 1-4.
- [9] Axelsson S, Nelander A. SAR/MTI from helicopters[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France: IEEE Conference Publications, 2003, 7: 4242-4245.
- [10] 鹿浩, 曹宁, 胡居荣, 等. SAR扩展场景原始数据混合域仿真方法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(6): 716-721.  
Lu Hao, Cao Ning, Hu Jurong, et al. Hybrid domain simulation method for SAR extended scenes raw data [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2010, 25(6): 716-721.
- [11] 杜兰, 保铮, 邢孟道. 直升机雷达回波的分析与检测[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2003, 30(5): 574-579.  
Du Lan, Bao Zheng, Xing Mengdao. Analysis and detection of helicopter radar echo[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(5): 574-579.
- [12] 郗莹, 李道京, 吕杨, 等. 直升机信号的采集和分析[J]. 雷达与对抗, 1999, 4: 33-36.  
Xi Ying, Li Daojing, Lü Yang, et al. Collection and analysis for helicopter signal [J]. Radar & ESM, 1999, 4: 33-36.
- [13] 汤子跃, 王永良, 蒋兴舟. 悬停直升机检测问题研究[J]. 现代雷达, 2000, 22(1): 15-19, 38.  
Tang Ziyue, Wang Yongliang, Jiang Xingzhou. Research on hovering helicopter detection[J]. Modern Radar, 2000, 22(1): 15-19, 38.

**作者简介:**张红波(1983-),女,工程师,研究方向:合成孔径雷达系统设计与信号处理,E-mail:zhanghongbo217@sina.com;何涛(1980-),男,高级工程师,研究方向:合成孔径雷达信号处理与工程应用;陈德民(1977-),男,高级工程师,研究方向:合成孔径雷达系统设计与信号处理。