

去调频 FM-CW SAR 距离维成像研究*

耿淑敏,皇甫堪

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要 :调频连续波(FM-CW)合成孔径雷达因其体积小、重量轻、成本低及分辨率高等特点越来越受到关注。详细分析了去调频 FM-CW SAR 距离维成像过程,得到了 FM-CW SAR 残留视频相位在距离维傅立叶变换过程中被消除的有用结论,分析了影响距离维分辨率的因素,提出了改善 FM-CW SAR 距离分辨率,同时降低距离维采样率的方法。理论分析表明,去调频连续波 SAR 同样存在斜置现象,因此,还详细分析了 FM-CW SAR 斜置的产生以及去斜的方法,提出了包含去斜的距离维成像算法,为方位向更好的聚焦提供了条件。

关键词 :SAR ;FM-CW ;距离维成像算法 ;分辨率 ;残留视频相位 ;去斜

中图分类号 :TN958 **文献标识码** :A

Study on Range Imaging of De-chirped FM-CW SAR

GENG Shu-min, HUANGFU Kan

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract :There is a growing interest in the frequency modulated continuous wave(FM-CW)SAR for its advantages such as small cubage, light weight, cost-effective and high resolution. In this paper, imaging process in range direction was analyzed in detail, and a useful conclusion was drawn that the RVP is removed in the course of performing Fourier transform in range direction; Then, the factors affecting range resolution for the de-chirped FM-CW SAR was discussed, and the method improving the range resolution as well as decreasing the range sample frequency was put forward. The deduction of the process shows that the slope factor exists in FM-CW SAR. Therefore, the generation of the slope factor and the method of de-sloping were analyzed, and the corresponding range imaging algorithm was also presented, creating better focus conditions for the azimuth direction.

Key words :SAR ;FM-CW ;range imaging algorithm ;resolution ;RVP ;de-sloping

由于线性调频连续波雷达具有结构简单、体积小、重量轻、成本低和适合于近距离应用的特点,因而特别适合近距离成像雷达。将线性调频连续波技术与合成孔径雷达技术相结合,发展低功耗、低成本、高分辨率的合成孔径雷达,成为近年来备受关注的课题^[1-6]。脉冲合成孔径雷达的发展已经很成熟,然而,经典的脉冲体制下的成像算法并不完全适合连续波体制下的 SAR 成像系统,因此,发展一套与连续波体制相适应的成像算法成为 FM-CW SAR 课题研究的关键。针对目前国内外连续波 SAR 发展不成熟的现状,为配合 FM-CW SAR 系统设计,对其距离维成像过程和成像算法进行详细的分析、推导和仿真,得出一系列有用的结论,加深和充实了对 FM-CW SAR 的认识和理解,为 FM-CW SAR 成像算法的设计提供了有效的依据。

1 去调频 FM-CW SAR 距离维成像基本原理

FM-CW 雷达发射信号为^[7]:

$$s_T(t') = \text{rect}\left(\frac{t'}{T_r}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 t' + \frac{1}{2} \alpha t'^2\right)\right] \quad (1)$$

其中, f_0 为载波频率, α 为调频信号调频斜率, t' 为距离维快时间, $t' \in \left[-\frac{T_r}{2}, \frac{T_r}{2}\right]$, T_r 为扫频周期。由

* 收稿日期 2006-06-20
作者简介 耿淑敏(1979-),女,博士生。

于信号幅度对成像影响很小,为方便起见,在后面的所有讨论中,不论是发射信号还是接收信号,其幅度均视为1。接收信号为:

$$s_R(t', \tau) = s_T(t' - \tau) \quad (2)$$

其中, τ 为回波延时。将回波信号与发射信号混频,得到去调频后的中频回波信号:

$$s_{IF}(t', \tau) = \begin{cases} \exp\left[-j2\pi\left(f_0\tau + at'\tau - \frac{1}{2}a\tau^2\right)\right], & t' \in \left[-\frac{T_r}{2} + \tau, \frac{T_r}{2}\right] \\ \exp\left[-j2\pi a(\tau - T_r)t'\right] \exp\left[-j2\pi(f_0 + aT_r)\tau\right] \exp(j\pi a\tau^2), & t' \in \left[-\frac{T_r}{2}, -\frac{T_r}{2} + \tau\right] \end{cases} \quad (3)$$

混频过程如图1所示。由于只对傅立叶变换后的负频率感兴趣,因此在分析过程中,主要考虑式(3)中的第一项。通常采用对式(3)作傅立叶变换来实现距离维压缩^[3]:

$$S_{IF}(f_r, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t' - \tau}{T_r}\right) \exp\left[-j2\pi\left(f_0\tau + at'\tau - \frac{1}{2}a\tau^2\right)\right] \exp[-j2\pi f_r t'] dt' \quad (4)$$

由图1可知,式(4)的积分函数只在 $t' \in \left[-\frac{T_r}{2} + \tau, \frac{T_r}{2}\right]$ 时显著不为零,因此,积分结果可记为:

$$S_{IF}(f_r, \tau) = (T_r - \tau) \exp(-j2\pi f_0 \tau) \exp(-j\pi f_r \tau) \sin[\pi(a\tau + f_r)(T_r - \tau)] \quad (5)$$

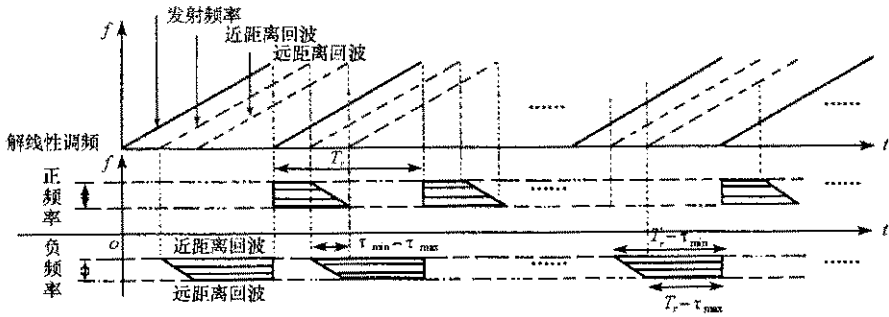


图1 FM-CW SAR 收/发关系及用发射信号作参考函数的混频过程

Fig. 1 Relationship between the transmitted and received signals for FM-CW signals with a mixer performing by the transmitted signal as reference signal

2 FM-CW SAR 距离维分辨率改善及距离维去斜研究

由式(5)可知,距离脉压信号幅度与 $(T_r - \tau)$ 成正比。由于调频连续波 SAR 发射信号占空比为 100%, 信号持续时间长, 因此距离维回波信号强度将明显增强。因此, 目标对发射功率的要求将大大降低, 体现了连续波 SAR 在发射功率上的优势。

同时, 由式(5)可知, 经过去调频的回波信号傅立叶变换后, 残留视频相位项 $\exp(j\pi a\tau^2)$ 已经消除, 这与脉冲体制下的结果有很大不同, 这一结论简化了后续的信号处理分析过程, 对简化方位向成像十分有利。以上两点是 FM-CW SAR 所特有的优点。

另一方面, 还可以发现以下问题:

首先, 去调频后的点目标距离维回波频谱是一正弦函数, 峰值位于 f_r , 如果定义正弦函数主瓣的 3dB 宽度为其分辨率^[8], 则其频谱分辨率可以近似表示为:

$$\Delta f_r = \frac{1}{T_r - \tau} \quad (6)$$

令 B 为调频信号带宽, c 为光速, 相应得去调频信号的时间分辨率为:

$$\Delta t' = \frac{\Delta f_r}{a} = \frac{\Delta f_r T_r}{B} \quad (7)$$

因此斜距向分辨率为:

$$\rho_r = \frac{1}{2} c \Delta t' = \frac{T_r}{T_r - \tau} \cdot \frac{c}{2B} \quad (8)$$

显然, 随着目标斜距的增大, 回波延时长, 系统距离维分辨率增大, 因此 FM-CW SAR 通常更适合近距离遥感成像, 最大斜距通常不超过 10km。由于回波延时 $0 < \tau < T_r$, 所以实际的距离维分辨率 $\rho_r > \frac{c}{2B}$ 。

其次, 由于矩形的时域脉冲通过傅立叶变换的频率波形为正弦函数, 主瓣附近的旁瓣是相当高的, 为抑制旁瓣必须进行加权处理。由于去调频处理只能在时域加权, 当所有回波信号在时间上均匀对齐时, 各脉冲均能统一地作良好的加权, 从而得到低副瓣的脉压。而对于如图 1 所示不同距离的目标回波在时间上是错开的, 称之为“斜置”, 无法对其进行合适的加权。因此, 必须消除斜置带来的影响, 即去斜。

2.1 改变去调频参考函数, 改善距离分辨率, 降低距离维采样率

对于大斜距 FM-CW SAR, 采用发射延时信号(时间与条带中心回波时间对齐)与回波信号作混频, 降低 τ 对距离分辨率的影响。具体过程如图 2 所示。令去调频参考信号为:

$$s_{\text{ref}}(t' - \tau_{\text{ref}}) = \text{rect}\left(\frac{t' - \tau_{\text{ref}}}{T}\right) \exp\left\{j2\pi\left[f_0(t' - \tau_{\text{ref}}) + \frac{1}{2}\alpha(t' - \tau_{\text{ref}})^2\right]\right\} \quad (9)$$

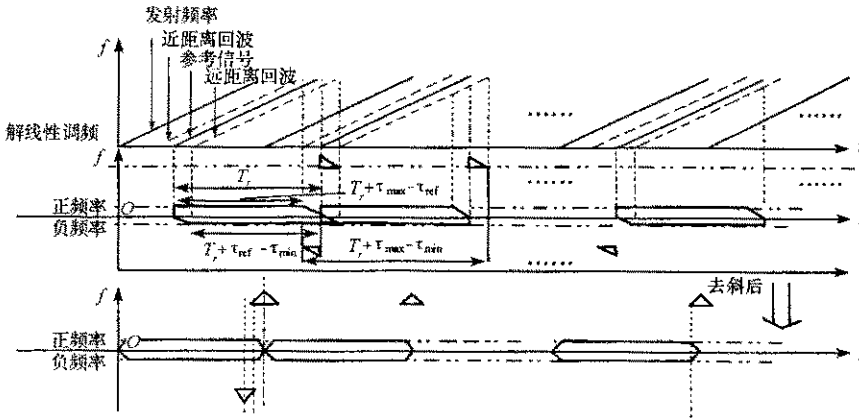


图 2 发射信号的延时信号作参考函数的混频过程
Fig.2 Mixer performing by the delayed version of the transmitted signal

其中 $\tau_{\text{ref}} = \frac{2R_S}{c}$, R_S 为条带中心处垂直斜距。经与回波信号混频, 形成新的中频信号:

$$s_{\text{IF}}(t', \tau) = \text{rect}\left(\frac{t' - \tau}{T}\right) \text{rect}\left(\frac{t' - \tau_{\text{ref}}}{T}\right) \exp\left\{-j2\pi\left[f_0(\tau - \tau_{\text{ref}}) + \alpha t'(\tau - \tau_{\text{ref}}) - \frac{1}{2}\alpha(\tau^2 - \tau_{\text{ref}}^2)\right]\right\} \quad (10)$$

距离维傅立叶变换得:

$$S_{\text{IF}}(f_r, \tau) = \sin\{\pi(T_r - |\tau - \tau_{\text{ref}}|) [\alpha(\tau - \tau_{\text{ref}}) + f_r]\} \cdot \exp[-j2\pi f_0(\tau - \tau_{\text{ref}})] \cdot \exp[-j\pi(\tau + \tau_{\text{ref}})f_r] \quad (11)$$

此时, 距离维分辨率为:

$$\rho_r = \frac{T_r}{T_r - |\tau - \tau_{\text{ref}}|} \cdot \frac{c}{2B} \quad (12)$$

对于去调频体制 SAR, 其测绘带通常不会很大, 满足 $|\tau - \tau_{\text{ref}}| < \tau$, 因此, 当采用发射信号的延迟信号(延迟时间为条带中心斜距对应的回波时延)作为去调频混频信号时, 距离维分辨率得到改善。

采用新的混频方式, 还可以大大降低距离维采样率。

直接与发射信号混频, 距离维采样率为:

$$f_s \geq 2a\tau_{\text{max}} \quad (13)$$

采用条带中心处回波信号作混频信号,需要的距离维采样率为:

$$f_s \geq 2a |\tau_{\max} - \tau_{\text{ref}}| \tag{14}$$

因此,由(13)(14)式可知,采用新的去调频方法,还可大大减小处理系统 A/D 变换器的采样率和采用 FFT 算法的运算量,对进一步降低硬件成本及程序复杂度十分有益。

2.2 FM-CW SAR 距离维去斜

式(11)中的两个相位项,第一项为多普勒项,这是正常方位向聚焦所需要的项,第二项为斜置项,如果不去除其影响,一方面将影响距离维加权,同时由于它与方位向信息的耦合,也会降低方位向压缩的效果。因此,令去斜因子为:

$$S_r(f_r) = \exp[j\pi(\tau + \tau_{\text{ref}})f_r] \tag{15}$$

由(15)式可知,去斜因子与延时 τ 有关,不同的斜距应该作不同的补偿。但是,差频回波变换到频域后,成为宽度很窄的正弦函数,其峰值位于 $f_r = -a(\tau - \tau_{\text{ref}})$,因此当对距离为 R 的目标进行补偿时,只要补偿 $f_r = -a(\tau - \tau_{\text{ref}})$ 处的相位即可,考虑到这一点,去斜因子可简化为:

$$S_r(f_r) = \exp\left[j\pi \frac{1}{a}(2a\tau_{\text{ref}} - f_r)f_r\right] \tag{16}$$

式(11)与去斜因子相乘后再逆变换到距离时域,就完成了距离维去斜。具体过程如图3所示。

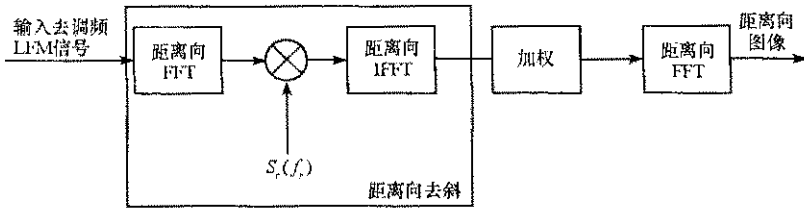


图3 去调频 FM-CW SAR 信号的距离维成像算法

Fig. 3 Imaging algorithm of de-chirped FM-CW SAR in range direction

去斜后,即可对距离维回波加权,并进一步进行傅立叶变换完成距离维压缩。

图4分别是载机高度为300m的情况下经过去斜和没有去斜处理的点目标距离、方位二维压缩后的结果。由结果可知,经过去斜的脉冲压缩结果峰值提高了约0.16dB,改善了成像结果;同时由仿真结果可知,对于FM-CW SAR,其成像距离不会很大,在斜置相位 $\Delta\varphi(f_r, \tau) = -\pi(\tau + \tau_{\text{ref}})f_r/a$ 的变化范围很小的情况下,斜置的影响通常可以忽略不计,这使成像算法大大简化。

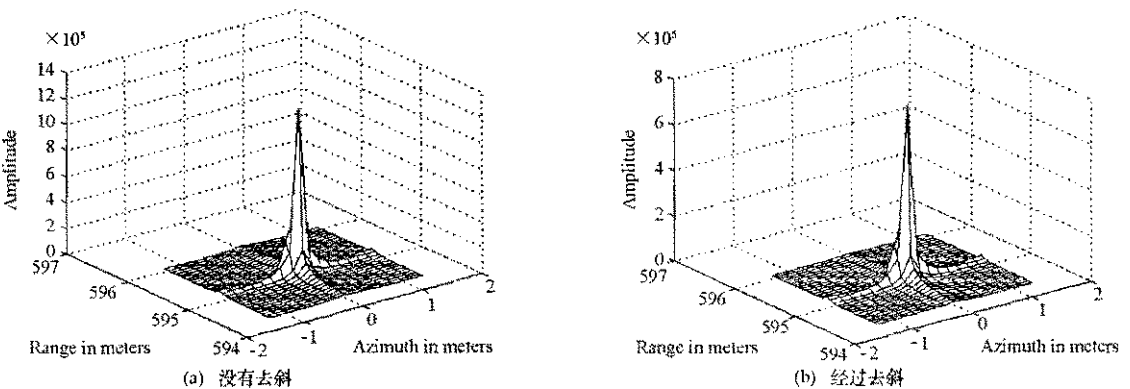


图4 距离、方位二维压缩后结果

Fig. 4 Range and azimuth compression result

3 结论

FM-CW SAR 是一种新近被提出来的新的雷达成像体制,它结合连续波与合成孔径成像技术,具有结构简单、体积小、重量轻、分辨率高等一系列优点,备受越来越多科研机构的关注。本文详细分析了去调频 FM-CW SAR 距离维成像过程,得到了 FM-CW SAR 无需附加算法去残留视频相位的有用结论;分析了影响距离维分辨率的因素,提出了通过将回波信号与发射延迟信号混频去调频,达到改善 FM-CW SAR 距离分辨率,同时降低距离维采样率的目的。理论分析表明,去调频连续波 SAR 同样存在斜置现象,在调频连续波 SAR 中,斜置现象又与脉冲 SAR 不完全相同,有其自身的特点,而现有的文献中并没有关于这一点的讨论。本文详细分析了 FM-CW SAR 斜置的产生以及去斜的方法,提出了包含去斜的距离维成像算法,为方位向更好的聚焦提供了条件。同时,关于 RVP 和斜置问题的讨论也为 FM-CW SAR 成像算法设计和简化提供了有效依据。

参考文献:

- [1] Wit J J M d, Meta A, Hooeboom P. First Airborne FM-CW SAR Campaign-preliminary Results[C]//Proc. IRS 2004, Warszawa, Poland, 2004: 165-170.
- [2] Wit J J M d, Hooeboom P. Performance Analysis of a High Resolution Airborne FM-CW Synthetic Aperture Radar[C]//Proc. IRS 2003 Dresden, Germany, 2003.
- [3] Wit J J M d, Hooeboom P. High Resolution FM-CW SAR: Design and Processing Aspects[C]//Proc EUSAR 2002, Cologne, Germany, 2002: 163-166.
- [4] Connan G, Griffiths H D, Brennan P V. FMCW-SAR Development for Internal Wave Imaging[C]//MTS/IEEE OCEANS '97 Conference, Halifax, 1997, 1: 73-78.
- [5] Connan G, Griffiths H D, Brennan P V, et al. Experimental Imaging of Internal Waves by a Mm-wave Radar[C]//OCEANS '98 Conference Proceedings, 1998, 2: 619-623.
- [6] Connan G, Garello R, Griffiths H D, et al. Millimeter-wave Radar Back-scattering from Water Waves[C]//Radar Conference, 2000, the Record of the IEEE 2000 International, 2000: 347-351.
- [7] Meta A, Hooeboom P. Time Analysis and Processing of FM-CW SAR Signal[C]//Proc. IRIS 2003, Dresden, Germany, 2003: 263-268.
- [8] 张澄波. 综合孔径雷达:原理、系统、分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1989.
- [9] 郭微光,刘光平,董臻,等. 运动补偿与 UWB SAR 中 RD 成像算法结合的实现方法[J]. 国防科技大学学报, 2004(1).

