

合成孔径雷达成像中频带分割与子带处理技术研究

宋岳鹏^{①②} 柳祥乐^{①②} 杨汝良^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 采用多收发孔径的合成孔径雷达(SAR)可以获得较常规 SAR 更宽的测绘带和更高的空间分辨率。该文将频带分割技术应用到多收发孔径 SAR 成像中, 在实现方位向高分辨率的同时获得距离向高分辨率。针对同步收发子带脉冲信号, 提出了一种时域先合成再脉冲压缩的方法, 并对频域子带先脉冲压缩再合成的方法进行了扩展, 提出了非零中频子带脉冲压缩合成的方法, 仿真结果证明了方法的有效性。文中研究了子带载频差对压缩结果及成像的影响, 并通过计算机仿真分别对两种相位差的影响进行了说明。

关键词: SAR; 频带分割; 子带合成; 宽测绘带

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0152-04

Study on Intersection of Spectrum and Sub-band Processing Technique in Synthetic Aperture Radar Imaging

Song Yue-peng^{①②} Liu Xiang-le^{①②} Yang Ru-liang^①

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) using multiple transmit-receive apertures can obtain wider swath and higher spatial resolution. In this paper, intersection of frequency spectrum is adopted in the SAR imaging using multiple transmit-receive apertures, which can achieve high range and azimuth resolution simultaneously. As for sub-band pulses synchronously transmit-received, a method of sub-band combination in time domain prior to pulse-compression is proposed and sub-band compression prior to combining is proposed in frequency domain as an extension. The simulation result illustrates the validity of these methods. In addition, there exist some phase differences caused by the carrier frequency and their influence on pulse compression and SAR imaging is studied, the computer simulation is made to show the influence.

Key words: SAR; Intersection of spectrum; Sub-band combination; Wide swath

1 引言

测绘带宽和分辨率是合成孔径雷达(SAR)系统的两个关键指标, 常规 SAR 系统中, 最小天线面积限制使得二者不能同时提高。方位向多波束 SAR 可以同时获得宽测绘带和方位向高分辨率^[1], 该技术已经在新一代 SAR 系统中得到应用。获得高的距离分辨率要求系统具有大的带宽。脉内调频脉冲串波形以其方便灵活的优点, 可在不增加系统瞬时带宽的情况下, 通过信号处理来获得高的距离向分辨率。本文提出了采用多发射机多接收机^[2]情况下同步脉内调频脉冲串时域合成宽带信号的方法, 并对频域子带先脉冲压缩再合成的方法进行了扩展, 提出了子带非零中频压缩合成方法。

宽带信号通过频带分割得到多个子带信号, 分别由多个发射机同时发射, 一方面接收处理中子带时域合成方法不同于单发射机情况下的顺次发射情况^[3]; 另一方面子带载频的

不同使得目标方位回波信号具有不同的多普勒中心频率和多普勒调频斜率, 在子带回波中附加了不同的相位项, 严重影响了脉冲压缩结果和成像效果, 文中针对子带载频差和回波路程差, 研究了由此引入的回波相位差对压缩结果和成像的影响。

2 频带分割与子带合成脉冲压缩方法

对超宽带信号进行频带分割和子带合成脉冲压缩方法是研制高分辨率 SAR 成像的一种有效考虑手段。子带处理技术可以应用在多个收发孔径 SAR 成像中, 见图 1(以三波束为例), 多个发射机在方位向等间距排列, 分别发射不同的子带信号, 接收时每个接收机接收所有子带回波信号。该多波束技术在提高平均发射功率和获得方位向高分辨的同时, 又可获得距离向高分辨率。宽带信号首先通过模拟滤波器组进行频带分割^[4,5], 然后通过多个发射机同时发射; 在接收端对回波信号在每个子带上用相对低速的 A/D 进行采样, 之后进行子带脉冲压缩, 最后对子带脉冲压缩进行插值和子带

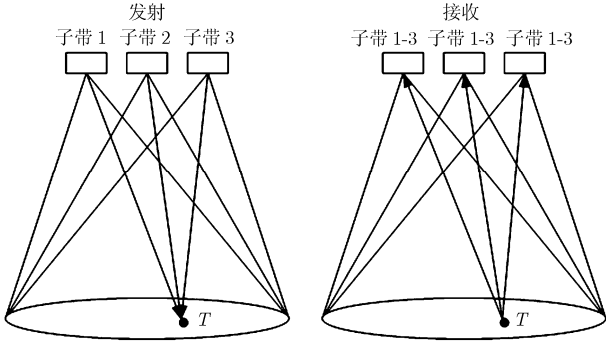


图 1 多发射机-接收机多波束工作原理

合成, 可获得与宽带信号脉冲压缩相同的效果^[6,7]。下面先从时域分析子带合成宽带信号的方法。

多收发孔径下的子带信号在时间上是同步的, 图 2 表示了时频域内超宽带信号和同步脉内调频脉冲的时频关系。假设雷达发射的宽带线性调频信号中心频率 f_c , 带宽 B_W , 脉冲宽度 T_W , 脉冲重复周期 T_r , 线性调频斜率 r 。则宽带信号的表达式为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_W}\right) \exp j(2\pi f_c t + \pi r t^2) \quad (1)$$

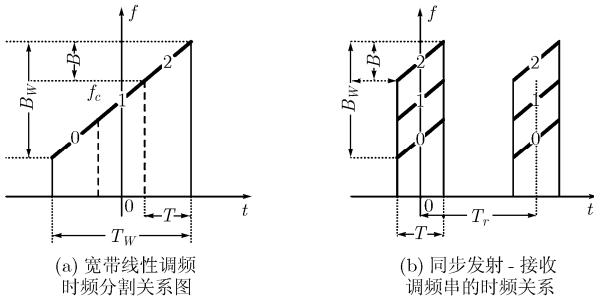


图 2 宽带信号和脉内调频脉冲的时频关系比较

对式(1)表示的宽带信号, 用 N 个带宽为 B , 脉冲宽度为 T 的窄带子带脉冲来合成, 即要求: $B = B_W/N, T = T_W/N$ 。 N 个脉内调频子脉冲的载频分别为

$$f_k = f_c + \Delta f_k, \Delta f_k = (k + 0.5 - 0.5N)B, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2)$$

时移分别为 $\Delta t_k = (k + 0.5 - 0.5N)T, k = 0, 1, \dots, N - 1$ 。

观察图 2, 理想情况下宽带线性调频信号可看作 N 个子脉冲的相参叠加, 宽带回波信号经正交解调后的子带信号表达式为

$$m(t) = \sum_{k=0}^{N-1} m_k^0(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - \Delta t_k - \tau_0}{T}\right) \exp j[2\pi f_k \tau_0 + \pi r (t - \tau_0)^2] \quad (3)$$

τ_0 为斜距 R_0 处的目标回波延。对同步情况, N 个子脉冲在一个脉冲重复周期(PRT)内同时发射和接收, 发射信号和解调后回波信号表示为

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp j[2\pi f_k t + \pi r t^2] \quad (4)$$

$$m(t) = \sum_{k=0}^{N-1} m_{k1}^0(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_0}{T}\right) \exp j[2\pi f_k \tau_0 + \pi r (t - \tau_0)^2] \quad (5)$$

比较式(3)和式(5)中的子脉冲回波, 经过简单推导可以得出

$$m_k^0(t) = m_{k1}^0(t - \Delta t_k) \exp j(2\pi \Delta f_k t) \exp j(-\pi r \Delta t_k^2) \quad (6)$$

$m_k^0(t)$ 和 $m_{k1}^0(t)$ 分别为理想宽带信号和同步发射接收的子脉冲回波经正交解调后的基带信号表达式。由此得出时域子带信号合成宽带信号的步骤: (1) $m_{k1}^0(t)$ 时移 Δt_k 得到信号 $m_{k1}^0(t - \Delta t_k)$; (2) $m_{k1}^0(t - \Delta t_k)$ 频移 $\exp j(2\pi \Delta f_k t)$; (3) 相位补偿 $\exp j(-\pi r \Delta t_k^2)$, 得到 $m_k^0(t)$ 。相参叠加后得到宽带信号, 之后进行脉冲压缩处理。

下面从频域分析频带分割与子带合成处理方法, 令 $s(t), g(t)$ 表示宽带信号的接收信号和脉冲压缩参考信号, $S(\omega), G(\omega)$ 分别表示其 Fourier 变换, ω_k 为与 f_k 对应的角频率, 这里在基带情况下进行分析。 H 表示通带为 $[-B/2, B/2]$ 的理想矩形滤波器, 即

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq B/2 \\ 0, & |\omega| \geq B/2 \end{cases} \quad (7)$$

用于频带分割的滤波器组为

$$H_k(\omega) = H(\omega - (k + 0.5 - 0.5N)B), k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (8)$$

可以得到

$$S(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} S(\omega)H(\omega - \omega_k), G(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} G(\omega)H(\omega - \omega_k) \quad (9)$$

$$R(\omega) = S(\omega)G^*(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} [S(\omega)H(\omega - \omega_k)][G(\omega)H(\omega - \omega_k)]^* \quad (10)$$

$R(\omega)$ 表示发射信号和接收信号互相关函数 $r(\tau) = \int s(t)g^*(t + \tau)dt$ 的 Fourier 变换。

子带信号是非零中频信号, 频谱范围为 $[\omega_k - B/2, \omega_k + B/2]$ 。 A/D 转换前把各子带信号分别搬移至零中频, 子带零中频信号 $s_k(t)$ 和 $g_k(t)$ 的 Fourier 变换为

$$S_k(\omega) = S(\omega + \omega_k)H(\omega), G_k(\omega) = G(\omega + \omega_k)H(\omega) \quad (11)$$

所以有

$$\left. \begin{aligned} R(\omega) &= \sum_{k=0}^{N-1} S_k(\omega - \omega_k)G_k^*(\omega - \omega_k) \\ r(\tau) &= \sum_{k=0}^{N-1} r_k(\tau) \exp(j\omega_k \tau) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中 $r_k(\tau) = \int s_k(t)g_k^*(t + \tau)dt$ 是子带信号的互相关输出。需要注意, 子带脉冲压缩, 结果合成前必须对子带脉冲压缩波形进行插值加细。

对上面的频域分析方法进行扩展得到另一种处理方法^[8], 各子带用相同的载频 f_c 搬移至基频, 则只有中间子带是零中频, 而其余子带频谱对称分布在两侧, 图 3 表示了此时子带间的频谱关系。对子带分别进行脉冲压缩, 然后再叠

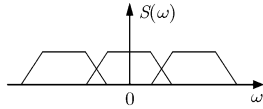


图3 非零中频处理的子带频谱结构

加。

$$S(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} S'_k(\omega), \quad S'_k(\omega) = S(\omega)H_k(\omega) \quad (13)$$

用中间子带的频谱 $S'_{(N-1)/2}(\omega)$ 表示各个子带的频谱可以得到:

$$|S'_k(\omega)| = \left| S'_{(N-1)/2} \left(\omega - \frac{2k - N + 1}{2N} B_W \right) \right| \quad (14)$$

同样可得参考信号:

$$|G'_k(\omega)| = \left| G'_{(N-1)/2} \left(\omega - \frac{2k - N + 1}{2N} B_W \right) \right| \quad (15)$$

于是有

$$R(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} S'_k(\omega) G_k^*(\omega) = A(\omega) \sum_{k=0}^{N-1} S'_{(N-1)/2} \left(\omega - \frac{2k - N + 1}{2N} B_W \right) G_{(N-1)/2}^* \left(\omega - \frac{2k - N + 1}{2N} B_W \right) \quad (16)$$

$$|r(\tau)| = \left| \sum_{k=0}^{N-1} r'_k(\tau) \right| = \left| \sum_{k=0}^{N-1} r'_{(N-1)/2}(\tau) \exp \left(\frac{j\pi B_W (2k - N + 1)\tau}{N} \right) \right| \quad (17)$$

式(17)中的第2个等号相当于零中频子带处理的情况, $A(\omega)$ 为与 k 无关的相位项, 对压缩结果无影响。零中频和非零中频处理可以得到同样的压缩效果, 如图4所示, 并且可以看出子带合成脉冲压缩结果(实线)主瓣宽度较子带脉冲压缩(虚线)降低了 N 倍。采用的主要参数: 中心频率 f_c 为 3.2GHz, 子带数 $N=3$, 子带带宽 B 为 100MHz。

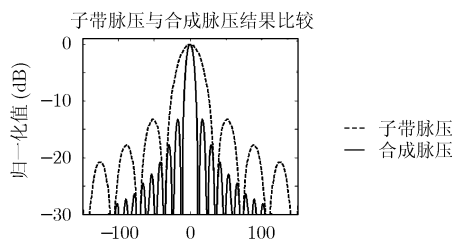


图4 子带脉压与合成脉压结果比较

3 子带处理技术对 SAR 成像的影响

直接对宽带信号进行处理, 由于存在色散现象, 不能使用常规窄带的处理方法^[9,10]。采用子带处理降低了处理的有效带宽, 减轻了宽带信号处理的难度, 但在 SAR 成像的过程中, 必须考虑由于子带处理带来的特有问題。

首先是由于子带载频的差别造成了子带回波信号具有不同的多普勒频移^[11]。多普勒中心频率: $f_d = (2v_a/\lambda_k) \sin \theta_s$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, λ_k 为第 k 子带的载波波长, v_a 为平台速

度, θ_s 为波束中心前向斜视角。子带互相拼接情况下中心频率分别为 $f_k = f_0 \pm B_W/N$, 非彼此拼接时满足: $f_k = f_0 \pm (B_W/N + f)$, f 为一正频率值。两侧子带相对于宽带中心频率(或中间子带中心频率)产生的多普勒频移差为

$$\Delta f_{dn} = \frac{2v_a}{c} \left(n \frac{B_W}{N} + f \right), \quad n = 1, 2, \dots, N-1/2 \quad (18)$$

n 表示中间子带两侧子带的序号。若采用前参数, 即使子带间恰好拼接的情况(即 $f = 0$)也会产生 667Hz 的多普勒频率差。其次就是由于 SAR 方位向回波为线性调频信号, 子带处理时需要考虑调频斜率的不同, 两侧子带与中间子带的多普勒调频斜率差为

$$\Delta f_{Rn} = -\frac{4\pi v_a^2}{Rc} \left(n \frac{B_W}{N} + f \right), \quad n = 1, 2, \dots, N-1/2 \quad (19)$$

从式(19)可以得到, 子带间的调频斜率差比较大, 恰好拼接的相邻的子带间将存在 414Hz/s 的调频斜率差, 因此不能采用同一方位向参考信号进行方位脉冲压缩。

在多收发孔径的多波束 SAR 应用中, 文献[2,12]中分别提出了两种子带处理方法: 子带合成处理与非合成处理, 分别可以获得等效常规 SAR 展宽 $N-1$ 和 $2N-1$ 倍的测绘带。子带间的差别在两种多波束 SAR 体制中对目标的回波附加了不同的相位项, 在成像处理前必须予以消除。

3.1 子带非合成处理时的 SAR 成像

方位向的多个发射机发射中心频率不同的子带信号, 接收端对子带回波进行分离, 排列在方位向, 得到较常规 SAR $2N-1$ 倍的方位采样^[12]。子带中心频率的不同造成子带回波即使经历了相同的传输路径却在方位向产生了不同的回波延时相位: $\Phi_k = \exp(j4\pi R_t f_k/c)$, 以中间子带为参考, 可以得到:

$$\Phi_k = \exp \left(j4\pi f_c \frac{R_t}{c} \right) + \exp \left(j4\pi \Delta f_k \frac{R_t}{c} \right) = \exp \left(j4\pi f_c \frac{R_t}{c} \right) \quad (20)$$

式中 $\exp(j4\pi \Delta f_k (R_t/c))$ 为不同子带产生的相位误差项, 此误差项的存在使得在方位压缩处理时在主瓣两侧产生成对回波, 即在方位向出现虚假目标。从另一个角度分析, 式中, $R_t' = R_t(1 + \Delta f_k/f_c)$, 可等效看作为: 对不同子带来讲, 点目标回波来自不同的方位向位置, 造成目标能量沿方位向分散, 当 $\Delta R_t = R_t \cdot \Delta f_k/f_c$ 大于方位分辨率时就会出现虚假目标。

为了给出更直观的理解, 图5画出了没有补偿相位差时仿真得到的点目标成像结果。部分参数同前, 另外, 平台高度 490km, 波束入射角为 35° , 脉冲宽度 $10\mu s$, 距离分辨率 2m, 方位分辨率取为 5m。从图中看出, 子带间这种相位差的存在使得同一点目标成像在不同的方位位置; 图6为正确位置目标(图5中间目标)的比例放大图, 同时看到, 方位向能量被分散, 这是由于子带回波方位向多普勒调频斜率的不同造成的。

3.2 子带合成处理时的 SAR 成像

为了获得高的距离分辨率, 需要将每个脉冲重复周期

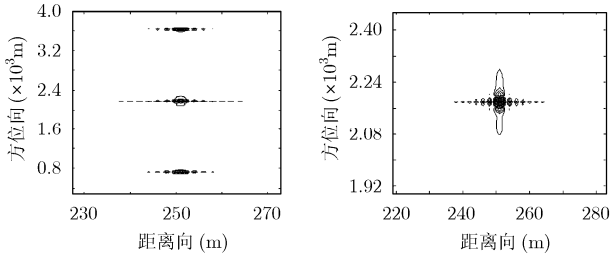


图 5 相位误差未补偿的成像结果 图 6 中间点目标放大图

(PRT)内的子带信号合成宽带信号, 合成处理过程中, 有两种相位差必须考虑: 子带中心频率的不同造成的回波相位差和每个 PRT 内子带脉冲传输路径差引起的相位差, 这里只讨论前者。

合成孔径时间内, 雷达与点目标的斜距为 $R_t = \sqrt{R_c^2 + (v_a t)^2}$, 回波延时可以近似表示为 $\tau = 2R_c/c + (v_a t)^2 / (R_c c) = \tau_0 + \Delta\tau$ 。子脉冲回波信号分别与其线性调频本振混频后得到的信号表达式为

$$s_k(t) = \exp[-j(2\pi f_k \tau + 2\pi r r t - \pi r \tau^2)] \quad (21)$$

则子带间的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_k &= \exp[-j2\pi\Delta f_k(\tau_0 + \Delta\tau)] \\ &= \exp\left[-j2\pi\frac{2R_c}{c}\Delta f_k\right] \exp\left[-j2\pi\frac{(v_a t)^2}{R_c c}\Delta f_k\right] \end{aligned} \quad (22)$$

距离向合成前需要对上述相位差进行补偿, 从上式可以看出, 等式右边第 1 个指数项为常数相位差, 第 2 个指数项在子带非合成处理过程中是作为多普勒调频斜率差存在, 影响方位压缩效果, 而这里出现在子带合成处理中, 影响距离向压缩, 方位向压缩处理时则可以采用参考子带回波信号对应的多普勒调频斜率, 但子带间调频率的不同也使得方位压缩效果变差, 所以为了得到良好的方位压缩效果, 进行方位压缩前必须对该相位差进行补偿。图 7 画出了存在此相位差时的点目标成像, 距离向压缩效果很差, 能量在距离向的散布范围非常宽。相位误差校正后结果见图 8, 注意这里没有考虑子带脉冲传输路程差引起的相位差的影响和距离徙动。

4 结束语

本文将频带分割与子带处理方法应用到多收发孔径 SAR 成像中, 分别从时域和频域研究了子带信号合成宽带信号的方法, 仿真结果证明了 3 种合成方法的有效性; 分析了子带载频不同造成的子带回波信号间多普勒中心频率和调

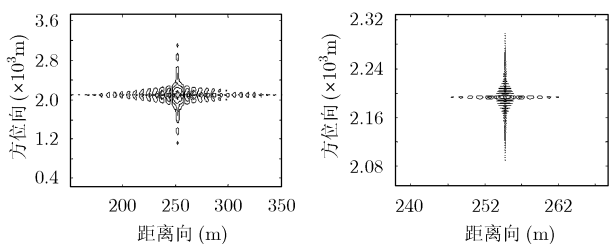


图 7 相位差补偿前 图 8 相位补偿后

频斜率的不同, 针对子带在多波束 SAR 应用中的两种处理方法: 合成与非合成, 分析了两种处理方式中子带载频不同造成的方位向和距离向相位差及对成像的影响。采用子带处理方法为宽带信号处理提供了一种有效的手段, 并与方位向多波束结合, 可以同时获得宽的测绘带和二维高分辨率。

参 考 文 献

- [1] Currie A and Brown M A. Wide-swath SAR. *IEEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation*, 1992, 139(2): 122-135.
- [2] Song Yuepeng and Yang Ruliang. High resolution, wide swath SAR using sub-aperture sub-band technique. *Proceedings of CIE international conference on radar*, Shanghai, China, 2006: 1298-1301.
- [3] 李海英. 超宽带信号波形及合成孔径雷达成像研究. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2002.
- [4] Daniel Rabinkin and Truong Nguyen. Optimum subband filterbank design for radar array signal processing with pulse compression. *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop. Proceedings of the 2000 IEEE*, Cambridge, Massachusetts., USA, 2000: 315-321.
- [5] Rabinkin D and Pulsone N. Subband-domain signal processing for radar array systems. *Proc. SPIE*, 1999, Vol. 3807: 174-187.
- [6] 水鹏朗, 保铮. 基于频带分割的超宽带雷达脉冲压缩方法. *电子学报*, 1999, 27(6): 50-53.
- [7] 杨延光, 黄晓涛. 基于匹配滤波和频带分割的超宽带信号脉冲压缩方法. *雷达科学与技术*, 2005, 3(6): 361-366.
- [8] Zhang Yimin. Adaptive array processing for multipath fading mitigation via exploitation of filter banks. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2001, 49(4): 505-516.
- [9] Zatman Michael. How narrow is narrowband? *IEEE Proceedings: Radar, Sonar, and Navigation*, 1998, 145(2): 85-91.
- [10] Weiss L G. Wavelets and wideband correlation processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1994, 11(1): 13-32.
- [11] Hoffman A and Kogon S M. Subband STAP in wideband radar systems. *Proceedings of IEEE on sensor array and multichannel signal processing*, Cambridge, Massachusetts. USA, 2000: 256-260.
- [12] Song Yuepeng and Yang Ruliang. High resolution, wide swath synthetic aperture radar using multiple transmit-receive aperture. *EUSAR'06*, Dresden, Germany, May 16-18, 2006.

宋岳鹏: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 系统研究与信号处理。
柳祥乐: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为 SAR、InSAR 和层析成像。
杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事星载和机载合成孔径雷达研究。