

利用频谱合成实现分布式 SAR 高分辨力成像

闫鸿慧^{①②} 王岩飞^① 张冰尘^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 该文主要研究了利用频谱合成实现分布式 SAR 高分辨力成像的方法。在分布式 SAR 系统中,不同卫星对同一地域观测时,其距离向频谱及方位向频谱均具有一定的相对频谱偏移。利用该频谱偏移进行频谱合成形成较宽的距离向频谱及方位向频谱,从而提高系统的距离向分辨率及方位向分辨率。在频谱合成过程中可首先利用 INSAR 技术估计出多幅图像的相位差,再利用该相位差进行相位校正、图像合成即可形成具有较高分辨率的图像。该文对这一方法进行了理论分析,并给出了仿真结果。

关键词 分布式卫星,合成孔径雷达(SAR),高分辨力成像

中图分类号: TN958, TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2006)02-0345-05

Distributed Satellites SAR High Resolution Imaging via Spectral Synthesis

Yan Hong-hui^{①②} Wang Yan-fei^① Zhang Bing-chen^②

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

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

Abstract In this paper, a distributed satellites SAR high resolution imaging method based on spectral synthesis is introduced. In distributed satellites SAR system, the scattering spectrums relative to the same scene acquired by different satellites have spectrum shifts in both range and azimuth directions, when join these shifted spectrums to a wider range and azimuth spectrum, a higher range and azimuth resolution can be acquired. In the processing, InSAR technique can be used to estimate the phase difference of the images. And after phase correction procedure, image combination procedure has been done, a higher resolution image both in range and azimuth direction would be generated. In this paper a theoretical analysis of this method is given, and the simulation results are also provided.

Key words Distributed satellites, Synthetic Aperture Radar (SAR), High resolution imaging

1 引言

分辨率是决定合成孔径雷达(SAR)系统性能的一个重要指标,它直接反映了雷达获得目标信息的多少。SAR距离向分辨率取决于发射信号的带宽,较高的距离向分辨率要求SAR系统具有较大的有效带宽及较高的发射功率,带宽及功率的增加会加大系统的复杂度,给SAR系统的实现带来一定的困难。SAR方位向分辨率是由SAR系统的许多参数和技术条件共同决定的,并且这些条件和参数是相互制约的。这些制约因素的存在使传统SAR分辨率的提高受到很多的限制,要达到很高的分辨率存在着一定的困难^[1]。分布式SAR是一种新体制的SAR,它的出现为SAR分辨率的提高开辟了一个新的途径,利用分布式SAR可采用多种方法来实现分辨率的提高。

分布式SAR可看作是一个稀疏分布的、不规则的三维多孔径阵列。Goodman^[2,3]把分布式SAR系统作为一个整体来考虑,认为传统的匹配滤波方法已不能适应分布式SAR的成像处理要求。他设计了采用Wiener滤波的新成像算法,认为采用Wiener滤波的成像算法可较好地解决分布式SAR的成像问题。该算法是新发展的算法,在实际应用中尚有一些亟需解决的问题。

Massonnet^[4,5]在讨论Cartwheel的应用时,提出了一种称之为“PhaseMap”的方法来实现分布式SAR高分辨力成像。该方法建立在SAR已有成像算法的基础上,与Goodman算法相比较,该方法是较易实现的。其主要思想是:利用InSAR技术估计出多幅图像的相位差,利用该相位差进行相位校正、图像合成即可形成具有较高分辨率的图像。

Massonnet 对 PhaseMap 方法仅作了简单介绍, 未叙述其原理及实现途径, 在目前所能查阅的资料中也未见有相关的论述。该方法在本质上是频谱合成的方法, 本文在 Massonnet 的基础上, 以频谱合成的观点论述分布式 SAR 高分辨力成像的实现方法及其原理。

2 PhaseMap 基本原理

2.1 频谱分析

由文献[6]关于分布式小卫星运行特点的论述可知, 分布式卫星 SAR 的信号发射器与接收器在一定条件下可近似认为以相同的速度在空间平行运动。以 $t=0$ 时刻发射信号卫星的位置为原点建立坐标系(如图 1 所示), y 轴方向为小卫星编队的运行方向。卫星 A $(0,0,0)$ 发射并接收信号, 卫星 B (X_b, Y_b, Z_b) 只接收信号。设小卫星运行的相对轨道面与垂直轨道面($y-z$ 平面)的夹角为 φ , 在相对轨道面上, 基线 $|AB|=r$, 基线与飞行方向(y 轴)的夹角为 θ , 卫星 B 位置用坐标可表示为 $B(-r \sin \theta \sin \varphi, r \cos \theta, r \sin \theta \cos \varphi)$ 。

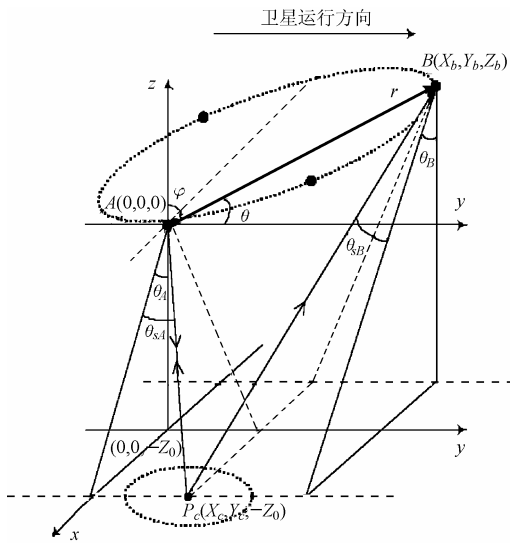


图 1 分布式 SAR 示意图

为简化分析, 忽略地球曲率, 假设测绘区域为一平面。取地面¹⁾ 双基SAR的分辨特性不同于单基SAR, 但因分布式卫星的卫星高度远大于卫星编队尺寸, 为结果简明, 在一定范围内可用分布式卫星SAR的沿航迹向分辨率和垂直航迹分辨率来近似其多普勒分辨率和距离分辨率一小块成像区域进行分析, 设 $P_c(X_c, Y_c, -Z_0)$ 为该区域中心点, 并设卫星 A 的视角为 θ_A , 斜视角为 θ_{sA} , 卫星 B 的视角为 θ_B , 斜视角为 θ_{sB} 。设 R_A, R_B 为卫星 A, B 至所分析成像区域中心点 P_c 的斜距。当所分析成像区域远小于斜距时, 卫星 A, B 至成像区域内任意一点 $P(X_c + x', Y_c + y', -Z_0)$ 的距离 $|AP|, |BP|$ 可近似为

$$|AP| \approx R_A + \frac{X_c}{R_A} x' + \frac{Y_c}{R_A} y' = R_A + x' \sin \theta_A \cos \theta_{sA} + y' \sin \theta_{sA} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} |BP| &\approx R_B + \frac{X_c - X_b}{R_B} x' + \frac{Y_c - Y_b}{R_B} y' \\ &= R_B + x' \sin \theta_B \cos \theta_{sB} + y' \sin \theta_{sB} \end{aligned} \quad (2)$$

根据 Li^[7] 的单视复图像(SLC)模型, 卫星 A 获取的单视复图像可表示为

$$s_A(x', y') = \iint f(x'', y'') \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} |AP|\right] h(x' - x'', y' - y'') dx'' dy'' \quad (3)$$

其中 $f(x', y')$ 为地面复反射系数, $h(x', y')$ 为 SAR 系统的冲击响应函数。

在一般情况下, SAR 的冲激响应可表示为^[7]

$$h(x', y') = \text{sinc}\left(\frac{\pi x'}{\rho_x}\right) \text{sinc}\left(\frac{\pi y'}{\rho_y}\right) \quad (4)$$

其中 $\text{sinc}(x') = \sin(x')/x'$, ρ_x, ρ_y 分别为 x, y 方向的分辨率。

为使结果简明, 这里假定分布式卫星 SAR 的多普勒分辨率和距离分辨率即为其沿航迹向分辨率(y 轴)和垂直航迹分辨率(x 轴)¹⁾。令

$$\begin{cases} t = 2x' \sin \theta_A / c = \gamma x' \\ \tau = y' / v \end{cases} \quad (5)$$

其中 θ_A 为卫星 A 的视角, v 为卫星相对于地平面的运行速度。结合式(4), 式(5), 对式(3)整理可得

$$\begin{aligned} s_A(t, \tau) &= \text{sinc}(\pi B_r t) \otimes \text{sinc}(\pi B_a \tau) \otimes f(t/\gamma, v\tau) \\ &\cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_A + \frac{c}{2} t \cos \theta_{sA} + \tau v \sin \theta_{sA}\right)\right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $B_r = c/(2\rho_r)$, $B_a = v/\rho_a$, B_r, B_a 分别为距离向带宽及方位向带宽。

设 $F(f_r, f_a)$ 为 $f(t/\gamma, v\tau)$ 关于 t, τ 的二维傅氏变换, 则式(6)的傅氏变换可表示为

$$\begin{aligned} S_A(f_r, f_a) &= \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) \text{rect}\left(\frac{f_a}{B_a}\right) \\ &\cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_A\right] F(f_r + f_0 \cos \theta_{sA}, f_a + f_{DC}^A) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $f_{DC}^A = 2v \sin \theta_{sA} / \lambda$, 为卫星 A 的多普勒中心。

因两个卫星的视角不同, 故二者获取图像的像素不可能一一对应, 像素单元的大小也不完全相同, 需对其进行配准。以卫星 A 为基准, 配准后的卫星 B 的单视复图像可表示为

¹⁾ 双基SAR的分辨特性不同于单基SAR, 但因分布式卫星的卫星高度远大于卫星编队尺寸, 为结果简明, 在一定范围内可用分布式卫星SAR的沿航迹向分辨率和垂直航迹分辨率来近似其多普勒分辨率和距离分辨率。

$$s_B(x', y') = \text{sinc}\left(\frac{\pi x'}{\rho_x}\right) \otimes_{x'} \text{sinc}\left(\frac{\pi y'}{\rho_y}\right) \otimes_{y'} f(x', y') \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(|AP| + |BP|)\right] \quad (8)$$

将式(1), 式(2), 式(5)代入式(8), 则其关于 t , τ 的二维傅氏变换可表示为

$$S_B(f_r, f_a) = \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) \text{rect}\left(\frac{f_a}{B_a}\right) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_A + R_B)\right] \cdot F\left[f_r + f_0 \frac{\sin\theta_A \cos\theta_{SA} + \sin\theta_B \cos\theta_{SB}}{2\sin\theta_A}, f_a + f_{DC}^B\right] \quad (9)$$

其中 $f_{DC}^B = v(\sin\theta_{SA} + \sin\theta_{SB})/\lambda$, 为卫星 B 的多普勒中心。

由式(7), 式(9)知, 两卫星单视复图像的距离向频谱及方位向频谱均处于不同的频段, 存在着相对频谱偏移, 相对频谱偏移如图2所示。由分析式(7), 式(9)中的距离向频谱可知, 卫星视角、斜视角决定着距离向频谱所处的频段。当卫星处于正侧视时, 斜视角为0, 此时距离向频谱所处的频段就由卫星的视角来决定, 这正与Prati^[8]及Gatelli^[9]的结论一致。由分析式(7), 式(9)中的方位向频谱可知, 卫星的斜视角决定着方位向频谱所处的频段。斜视角不同导致多普勒中心不同, 从而导致其方位向频谱所处的频段不同。

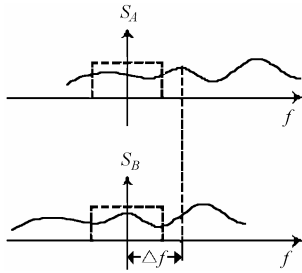


图2 相对频谱移动示意图

由式(7), 式(9)可求出距离向频谱及方位向频谱的偏移量。设距离向频谱的偏移量为 Δf_r , 方位向频谱的偏移量为 Δf_a , 则可表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \Delta f_r &= f_0 \frac{\sin\theta_A \cos\theta_{SA} - \sin\theta_B \cos\theta_{SB}}{2\sin\theta_A} \\ \Delta f_a &= \frac{v}{\lambda}(\sin\theta_{SA} - \sin\theta_{SB}) = f_{DC}^A - f_{DC}^B \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(10)表明, 距离向的相对频谱偏移与发射信号的载频、卫星的视角及斜视角有关, 而方位向的相对频谱偏移与斜视角、卫星相对于地面的速度等有关, 其实质上是卫星回波信号多普勒中心的差值。

2.2 频谱合成

由 SAR 的分辨理论可知, 距离向频谱带宽越大, 距离

向分辨率越高; 方位向频谱带宽越大, 方位向分辨率越高。

由于两卫星在空间立体分布, 对同一地域进行观测时有着不同的视角及斜视角, 由上述分析知, 这导致其距离向频谱及方位向频谱均有一定的相对频谱偏移。若能利用这些频谱偏移合成一个较大的距离向频谱及方位向频谱, 则能提高 SAR 的距离向分辨率及方位向分辨率。

与Prati提出的利用合成频谱实现距离向高分辨力成像的方法^[8]类似, 可以证明采用如下信号合成方法可提高分布式 SAR 系统的距离向分辨率及方位向分辨率:

$$s(x', y') = s_A(x', y') + s_B(x', y')e^{j\Phi} \quad (11)$$

其中 $s(x', y')$ 为信号合成后的图像, Φ 为两卫星单视复图像对应像素的相位差

$$\Phi = -\frac{2\pi}{\lambda}(|AP| - |BP|) \quad (12)$$

结合式(3), 式(5), 式(8), 对式(11)进行二维傅氏变换, 可得

$$S(f_r, f_a) = \left[\text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) \text{rect}\left(\frac{f_a}{B_a}\right) + \text{rect}\left(\frac{f_r + \Delta f_r}{B_r}\right) \text{rect}\left(\frac{f_a + \Delta f_a}{B_a}\right) \right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_A\right] F(f_r + f_0 \cos\theta_{SA}, f_a + f_{DC}^A) \quad (13)$$

式(13)表明, 利用式(11)可使距离向频谱及方位向频谱均得到扩展, 如图3(a)所示, 图3中阴影部分为合成的频谱。由图3及式(13)可知合成的距离向频谱的最大带宽为 $B_r + \Delta f_r$, 方位向频谱的最大带宽为 $B_a + \Delta f_a$, 如图中虚线框所示。

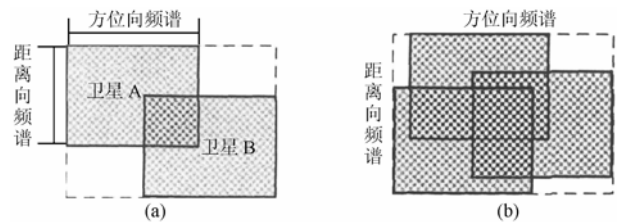


图3 频谱合成示意图

当合成频谱的距离向带宽及方位向带宽均达到最大时(即合成频谱覆盖图3(a)所示虚线框时), 对应的合成频谱可表示为

$$S(f_r, f_a) = \left[\text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) + \text{rect}\left(\frac{f_r + \Delta f_r}{B_r}\right) \right] \cdot \left[\text{rect}\left(\frac{f_a}{B_a}\right) + \text{rect}\left(\frac{f_a + \Delta f_a}{B_a}\right) \right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_A\right] F(f_r + f_0 \cos\theta_{SA}, f_a + f_{DC}^A) \quad (14)$$

经幅度均衡后, 可表示为

$$S(f_r, f_a) = \text{rect}\left(\frac{f_r - \Delta f_r / 2}{B_r + \Delta f_r}\right) \text{rect}\left(\frac{f_a - \Delta f_a / 2}{B_a + \Delta f_a}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_A\right) F(f_r + f_0 \cos \theta_{sA}, f_a + f_{DC}^A) \quad (15)$$

对式(15)进行傅氏逆变换后,即可求出其对应的分辨率:

$$\left. \begin{aligned} \rho_r' &= \frac{c}{2(B_r + \Delta f_r)} = \frac{c}{2B_r(1 + \Delta f_r / \Delta B_r)} = \frac{\rho_r}{1 + \Delta f_r / B_r} \\ \rho_a' &= \frac{\rho_a}{1 + \Delta f_a / B_a} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由式(16)知,利用式(11)进行频谱合成,当合成频谱的距离向带宽及方位向带宽均达到最大时,距离向分辨率提高 $1 + \Delta f_r / B_r$ 倍,方位向分辨率提高 $1 + \Delta f_a / B_a$ 倍。

如图 3(a)所示,若距离向频谱的频谱偏移部分占距离向带宽的 α_r ,方位向频谱的频谱偏移部分占方位向带宽的 α_a ,则进行频谱合成后距离向分辨率最大可提高至 $\rho_r / (1 + \alpha_r)$,方位向分辨率最大可提高至 $\rho_a / (1 + \alpha_a)$ 。由于图 3(a)中虚线框中空白的部分没有频谱覆盖,故其对应的图像不能达到由 $\rho_r / (1 + \alpha_r)$, $\rho_a / (1 + \alpha_a)$ 决定的最高分辨率。要使合成图像达到此最高分辨率,可采用增加卫星颗数的方法,并使之在空间合理分布,使整个虚线框中均有频谱覆盖。图 3(b)为 3 颗卫星合成频谱的情况,因频谱覆盖范围较图 3(a)增大,故其合成的图像有着更好的分辨特性。

2.3 参数选择与实现步骤

由式(7),式(9),式(10)及图 1 所示几何关系知,卫星的视角、斜视角、基线长度、信号载频等参数影响着频谱的相对偏移。就信号合成的角度而言,合成频谱带宽越大所能提高的分辨率越高。为最大限度地提高分辨率就需要设计系统参数使频谱的相对偏移较大。

但是,两幅图像的频谱偏移越大,其相干性就越低,这在某种程度上导致利用 InSAR 技术进行相位差估计的不精确性^[8]。相位差估计的不精确影响着分辨率的提高。因此,在利用式(11)方法提高分辨率时,必须在兼顾信号相干性的前提下进行。系统参数的选择要综合考虑分辨力提高与相位差估计精确性两方面的因素,要在保证相位差估计精确性的前提下,尽可能地增大频谱偏移,从而最大限度地提高分布式卫星 SAR 系统的分辨率。

相位差 Φ 能否准确地求出是利用频谱合成提高 SAR 分辨率的关键。可借鉴 InSAR 中干涉相位的估计方法对相位差 Φ 进行估计。在完成相位补偿后,图像合成的实际工作只需进行振幅相加、幅度均衡。此外,在图像合成之前, $s_A(x', y')$, $s_B(x', y')$ 应过采样,即对于子像素的重采样,然后进行合成,否则会出现信号偏差。

利用上述频谱合成方法实现分布式卫星 SAR 高分辨率成像可采用以下步骤进行:

(1)各卫星接收回波数据并分别成像,生成单视复图像;

(2)将各单视复图像过采样,并进行预滤波;

(3)进行像素配准;

(4)生成干涉图,求得相位差 Φ ;

(5)利用 $s(x', y') = s_A(x', y') + s_B(x', y')e^{j\Phi}$ 进行图像合成,得到高分辨率的图像。

由式(11)知,在信号合成时需进行信号相加,这样导致信号频谱公共部分振幅是原信号的两倍,而信号带宽扩展部分(相对公共部分来说)则维持原信号水平,这样就出现了信号不平衡,为此必须进行幅度均衡处理。

假设信号合成后的频谱为 $S(\omega)$,则幅度均衡器 $H(\omega)$ 可表达为 $H(\omega) = 1/|S(\omega)|$,其中 $\omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$,为信号合成以后频谱范围。在工程实现中幅度均衡可采用信号合成前幅度均衡和信号合成后幅度均衡两种方法进行。在进行幅度均衡时,所设计的幅度均衡器应满足以下条件:

- (1)对于频谱非公共部分,幅度均衡器应满足 $H_A(\omega) = 1$, $H_B(\omega) = 1$;
- (2)对于频谱的公共部分,幅度均衡器应满足 $H_A(\omega) + H_B(\omega) = 1$;
- (3)幅度均衡器相位为零,以保证信号的正确合成。

3 信噪比分析

设分布式 SAR 系统中有一颗卫星发射信号, N 颗卫星接收信号。对接收来的信号分别进行成像处理,形成单视复图像,对这些图像进行过采样、相位校正、相加后形成具有较高分辨率的图像。

假设各卫星所获取的单视复图像(SLC)的均值为零,并设各 SLC 间的相关系数均为 γ 。若 s_i 为第 i 个 SLC 的信号包络,则其对应的功率可表示为 $S_{in} = s_i^2$ 。在大多数情况下,各 SLC 的功率可认为是相等的。假定所有的 SLC 经相位校正后累加,则输出信号可表示为 $s_{out} = \sum_{i=1}^N s_i$ 。经计算可得出,

$$\text{输出平均信号功率 } S_{out} = E\left[\sum_{i=1}^N s_i\right]^2 = (N + N(N-1)\gamma)S_{in}。$$

如果系统的主要噪声源为热噪声及由信号处理引入的噪声,设每个卫星的噪声输入是独立的,且为零均值。平均输入噪声功率可表示为: $E[N_{in}] = E\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N n_i^2\right]$ 。由于噪声是不相关的,因此噪声不会相位累加,故输出噪声的电压可表示为 $n_{out} = \sum_{i=1}^N n_i$ 。可证得输出平均噪声功率为 $E[N_{out}] =$

$$NE[N_{in}]。因此输出信噪比为$$

$$\text{SNR} = \frac{S_{out}}{E[N_{out}]} = \frac{(N + N(N-1)\gamma)S_{in}}{NE[N_{in}]} = (1 + (N-1)\gamma)(\text{SNR})_1$$

其中 $(\text{SNR})_1$ 为单幅图像的信噪比。由此可见,利用式(11)方法进行信号合成可使合成图像信噪比提高到原图像信噪比的 $1 + (N-1)\gamma$ 倍。

表1 合成图像的性能指标(按工程定义计算)

		单个卫星	两颗卫星合成	多颗卫星合成
分辨率(m)	方位向	5.2	4.61	3.57
	距离向	3.3	2.92	2.28
峰值旁瓣比 (PSLR)(dB)	方位向	-13.13	-13.36	-14.15
	距离向	-13.56	-13.69	-14.42
积分旁瓣比 (ISLR)(dB)	方位向	-9.64	-10.40	-11.77
	距离向	-9.77	-10.28	-11.59

4 仿真结果

对分布式 SAR 系统中的两颗卫星的单视复图像进行频谱合成。假设分布式小卫星相对轨道倾角为 50° ，发射信号的中心频率为 9.3 GHz，带宽为 45 MHz。卫星 A 发射并接收信号，正侧视，视角 30° ，距地高 492 km，多普勒带宽为 1523 Hz。卫星 B 接收信号，斜视。卫星 B 与卫星 A 之间的基线长为 4.8 km，基线与飞行方向夹角分别为 68° 。由式(10)可计算得：距离向频谱偏移为 -21.38 MHz，与信号带宽之比 $\alpha_r = 0.475$ ，方位向频谱偏移为 742 Hz，与多普勒带宽之比 $\alpha_a = 0.487$ 。按式(11)进行频谱合成，图 4 为频谱合成前后仿真图像中某一选定分辨单元的幅度响应图，表 1 为频谱合成前后各图像的性能比较。由图 4 和表 1 可看出，由卫星 A、B 合成图像的分辨特性有所改善，分辨率有一定的提高，但不能达到由式(16)决定的最大分辨率。可看出，当用多颗卫星使合成频谱覆盖图 3 中矩形时，图像分辨率得到进一步的提高，经计算其改善的分辨率接近于理论值。

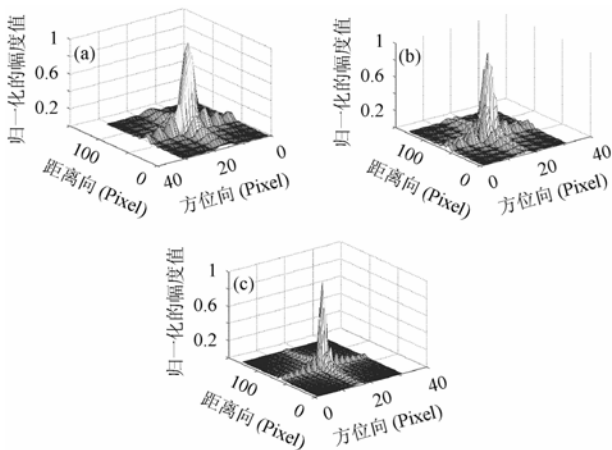


图4 频谱合成前后的图像对比
(a)单颗卫星(b)卫星 A、B 合成的图像
(c)频谱覆盖图 3 中矩形时对应的图像

5 结束语

通过对多颗卫星单视复图像的频谱分析，可知：卫星的视角、斜视角决定着距离向频谱所处的频段，卫星的斜视角决定着方位向频谱所处的频段。不同的卫星由于在空间立体稀疏分布，在对同一地域进行观测时，有着不同的视角及斜视角，因此不同卫星所成单视复图像的频谱就具有一定的相对频谱偏移。利用该频谱偏移进行频谱合成，可形成较宽的

频谱，从而提高了 SAR 系统的分辨力。在具体实现过程中，可利用 InSAR 技术估计出分布式 SAR 多幅图像的相位差，并利用该相位差进行相位校正、图像合成。这种信号合成的方法充分利用了 InSAR 技术，建立在已有的成熟算法的基础上，是目前较易实现的一种分布式 SAR 高分辨力成像方法。

参考文献

- [1] 张冰尘, 王岩飞. 空间虚拟微波成像雷达系统技术总结报告. 中国科学院电子学研究所研究报告, 中国科学院电子学研究所, 2004.
- [2] Goodman N, Stiles J. Resolution and synthetic aperture characterization of sparse radar arrays. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics System*, 2003, 39(3): 921 – 934.
- [3] Goodman N, Lin S, et al.. Processing of multiple-receiver spaceborne arrays for wide-area SAR. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(4): 841 – 852.
- [4] Massonnet D. The interferometric cartwheel, a constellation of low cost receiving satellite to produce radar images that can be coherently combined. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(2): 2413 – 2430.
- [5] Massonnet D. Capabilities and limitation of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. on Geoscience And Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506 – 520.
- [6] 林来兴. 微小卫星编队飞行组成虚拟卫星研究. 微小卫星编队飞行及应用论文集, 北京, 2000.7: 1 – 35.
- [7] Li F K, Goldstein R M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(1): 88 – 96.
- [8] Prati C, Rocca F. Improving slant-range resolution with multiple SAR surveys. *IEEE Trans. on Geoscience Remote Sensing*, 1993, 29(1): 135 – 143.
- [9] Gatelli F, Guarnieri A M, et al.. The wavenumber shift in SAR interferometry. *IEEE Trans. on Geoscience, and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 855 – 865.

闫鸿慧: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像理论及信号处理.

王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等.

张冰尘: 男, 1973 年生, 副研究员, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论.