

利用频谱合成实现分布式卫星 SAR 高距离分辨力成像

闫鸿慧^{***} 王岩飞^{*}

^{*}(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^{**}(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 在正侧视模式下,以不同视角对同一地域进行观测可获得多组回波数据,通过对多组回波数据的综合处理可提高 SAR 的距离向分辨力。该文研究了由收发分置平台以不同视角、不同观测模式(正侧视和斜视)对同一地域进行观测获取的多组回波数据,指出由于雷达天线波束中心与卫星垂直轨道面夹角的不同,导致回波信号所处频段的不同;通过对不同频段回波信号的频谱合成可提高距离向分辨力。此外,该文还讨论了分布式卫星 SAR 系统的一些参数对频谱合成的影响。

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(2005)06-0928-04

Distributed Satellites SAR High Range Resolution Imaging Using Spectral Synthesis

Yan Hong-hui^{***} Wang Yan-fei^{*}

^{*}(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^{**}(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Different data sets relative to the same scene acquired with different view angles can be exploited to improve slant-range resolution of SAR in broadside mode. Distributed satellites SAR is a special kind of SAR system, whose transmitters and receivers are placed separately and work in different mode (broadside mode and squint mode). In this paper, data sets acquired from distributed satellites SAR system is discussed. It points out that, different angles between the radar Line Of Sight (LOS) and the satellite's vertical orbital plane correspond to different bands of the ground reflectivity's spectrum. Therefore, the range resolution can be improved by using combined spectra. In addition, the influence of distributed satellites SAR system's parameters on spectral synthesis is also discussed.

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

1 引言

合成孔径雷达距离向分辨力取决于发射信号的带宽,较高的距离向分辨力要求 SAR 系统具有较大的有效带宽及较高的发射功率^[1]。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。

分布式卫星 SAR 是指一组小卫星雷达系统协同工作,共同完成 SAR 的成像功能;可用于高分辨率成像、干涉测量、运动目标检测、宽测绘带成像等^[1]。分布式卫星 SAR 有多种构成方式,但最基本的是一发多收方式,即一颗卫星发射信号,多颗卫星共同接收其回波信号。利用分布式卫星 SAR 对同一地域进行观测可获得多组回波数据。

利用由同一地域获取的多组回波数据实现距离向高分

辨力成像的方法主要有 Prati 提出的频谱合成的方法^[2]和 Fornaro 的基于信号统计估计的方法^[3],二者均基于正侧视 SAR。Prati 指出在正侧视情况下,不同视角的卫星对应于不同频段的回波信号,利用不同回波数据的相对频移,经频谱合成可形成一个具有较大带宽的回波信号,利用该回波信号就可提高距离向分辨力。

在分布式卫星 SAR 系统中,各卫星对同一地域观测时,具有不同的视角及观测模式(多数为斜视,且具有不同的斜视角)。此外,对于一发多收模式的分布式卫星 SAR,其收发平台是分置的。分布式卫星 SAR 系统的这些特点,使其有别于文献[2,3]所研究的情形。本文在文献[2]的基础上,对其进行拓展。本文指出:雷达天线波束中心与卫星垂直轨道面夹角的不同导致回波信号所处频段的不同,通过对不同频

段回波信号的频谱合成可提高距离向分辨力。可以证明, Prati 的结论为本文的特例。

2 分布式卫星 SAR 回波信号频谱分析

由文献[1,4]关于小卫星运行特点的论述可知,分布式卫星 SAR 的接收器和发射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, y 轴方向为小卫星编队的运行方向(如图 1 所示)。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。 $P_c(X_c, Y_c, -Z_0)$ 为地面波束覆盖区中心。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 ; B 的坐标可表示为: $B(-r\sin\theta\sin\varphi, r\cos\theta, r\sin\theta\cos\varphi)$ 。卫星 A 的视角为 θ_A , 斜视角为 θ_{sA} , 波束中心 AP_c 与垂直轨道面的夹角为 α_A 。卫星 B 的视角为 θ_B , 斜视角为 θ_{sB} , 波束中心 BP_c 与垂直轨道面的夹角为 α_B 。

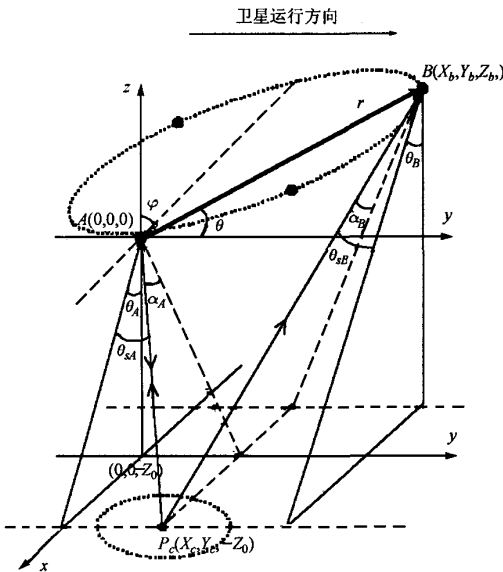


图 1 分布式 SAR 示意图

由图 1 所示几何关系, 可导出天线波束中心与垂直轨道面($y-z$ 平面)的夹角与卫星视角、斜视角间的关系:

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha_A &= \sin \theta_A \cos \theta_{sA} \\ \sin \alpha_B &= \sin \theta_B \cos \theta_{sB} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在分布式小卫星 SAR 系统中, 卫星间的基线长度远小于卫星距地面的高度, 在发射信号卫星(即卫星 A)斜视角较小的情况下, 天线波束中心与垂直轨道面间的夹角与卫星视角满足如下近似关系

$$\alpha_A \approx \theta_A \approx \alpha_B \approx \theta_B \quad (2)$$

设卫星 A, B 至 P_c 点的斜距分别为 $R_A, R_B, P(X_c + x, Y_c + y, -Z_0)$ 为地面波束覆盖区内任意一点, 则 $|AP|, |BP|$ 可

表达为

$$|AP| = \sqrt{R_A^2 + 2X_c x + x^2 + 2Y_c y + y^2} \quad (3)$$

$$|BP| = \sqrt{R_B^2 + 2(X_c - X_b)x + x^2 + 2y(Y_c - Y_b) + y^2} \quad (4)$$

其中

$$R_A = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 + Z_0^2}$$

$$R_B = \sqrt{(X_c - X_b)^2 + (Y_c - Y_b)^2 + (-Z_0 - Z_b)^2}$$

当测绘区域远小于斜距时, 式(3), 式(4)可近似为

$$|AP| \approx R_A + \frac{X_c}{R_A} x + \frac{Y_c}{R_A} y = R_A + x \sin \alpha_A + y \sin \theta_{sA} \quad (5)$$

$$|BP| \approx R_B + \frac{X_c - X_b}{R_B} x + \frac{Y_c - Y_b}{R_B} y = R_B + x \sin \alpha_B + y \sin \theta_{sB} \quad (6)$$

为简化分析, 假设雷达发射冲击信号, 地面为平面, 则卫星 A 接收的回波信号可表示为

$$s_A(t) = \iint f(x, y) \delta[t - (|AP| + |PA|)/c] dx dy \quad (7)$$

其中 $f(x, y)$ 为地面反射系数, 零均值, 高斯分布。因主要进行距离向分辨力的分析, 故假设 y 为一定值, 令 $y = y_0$, 则式(7)可表示为

$$s_A(t) = \int f(x, y_0) \delta[t - (|AP| + |PA|)/c] dx \quad (8)$$

由于 SAR 的发射及接收系统具有一定的频带宽度, 实际接收的回波信号相当于式(8)与一带通滤波器在时域的卷积^[2], 即

$$s_A(t) = \int f(x, y_0) \delta[t - (|AP| + |PA|)/c] dx * [w(t) \exp(j\omega_0 t)]$$

其中 $w(t)$ 为窗函数, $\omega_0/2\pi$ 为系统中心频率。经下变频后可得

$$s_A(t) = \left\{ \int f(x, y_0) \delta[t - (|AP| + |PA|)/c] dx \exp(-j\omega_0 t) \right\} * w(t) \quad (9)$$

对 x 进行积分, 式(9)仅在 $t = (|AP| + |PA|)/c$ 时有非零值。在由发射信号卫星(即卫星 A)决定的斜距面进行分析, 令

$$\tau = 2x \sin \theta_A / c = \gamma x \quad (10)$$

则由式(5), 式(10)可得

$$t = (|AP| + |PA|)/c = \frac{2}{c} (R_A + y_0 \sin \theta_{sA}) + \frac{\sin \alpha_A}{\sin \theta_A} \tau \quad (11)$$

将式(10)和式(11)代入式(9), 忽略幅度项, 结合式(2)中的近似关系, 可得^[2]

$$s_A(t) \approx s_A(\tau) = \left\{ f(\tau/\gamma, y_0) \exp \left[-j \frac{2\omega_0}{c} (R_A + y_0 \sin \theta_{sA}) - j\omega_0 \frac{\sin \alpha_A}{\sin \theta_A} \tau \right] \right\} * w(\tau) \quad (12)$$

设 $F(\omega, y_0)$, $W(\omega)$ 分别为 $f(\tau/\gamma, y_0)$, $w(\tau)$ 的傅里叶变换, 则式(12)的傅里叶变换可表示为

$$S_A(\omega) = F\left(\omega + \omega_0 \frac{\sin \alpha_A}{\sin \theta_A}, y_0\right) \exp\left[-j \frac{2\omega_0}{c} (R_A + y_0 \sin \theta_{sA})\right] W(\omega) \quad (13)$$

用同样方法对卫星 B 接收的回波信号进行分析。考虑雷达系统频带宽度的限制, 当 $y = y_0$ 时, 卫星 B 接收的回波信号经下变频后可表示为

$$s_B(t) = \left\{ f(x, y_0) \delta\left[t - \frac{(|AP| + |BP|)}{c}\right] \exp(-j\omega_0 t) \right\} * w(t) \quad (14)$$

上式仅在 $t = (AP + BP)/c$ 时有非零值, 由式(5), 式(6), 式(10)可得

$$t = \frac{(|AP| + |BP|)}{c} = \frac{1}{c} (R_A + R_B + y_0 \sin \theta_{sA} + y_0 \sin \theta_{sB}) + \frac{\sin \alpha_A + \sin \alpha_B}{2 \sin \theta_A} \tau \quad (15)$$

将式(10), 式(15)代入式(14), 忽略幅度项, 结合式(2)中的近似关系, 可得

$$\begin{aligned} s_B(t) &\approx s_B(\tau) \\ &= \left\{ f(\tau/\gamma, y_0) \exp\left[-j \frac{\omega_0}{c} (R_A + R_B + y_0 \sin \theta_{sA} + y_0 \sin \theta_{sB})\right] \right. \\ &\quad \left. \cdot \exp\left[-j \omega_0 \frac{\sin \alpha_A + \sin \alpha_B}{2 \sin \theta_A} \tau\right] \right\} * w(\tau) \quad (16) \end{aligned}$$

对其进行傅里叶变换可得

$$S_B(\omega) = F\left(\omega + \omega_0 \frac{\sin \alpha_A + \sin \alpha_B}{2 \sin \theta_A}, y_0\right) \cdot \exp\left[-j \frac{\omega_0}{c} (R_A + R_B + y_0 \sin \theta_{sA} + y_0 \sin \theta_{sB})\right] W(\omega) \quad (17)$$

由式(12), (13), (16), 和式(17)可导出 $s_A(t)$, $s_B(t)$ 的相位差及相对频段位移。

二者的相位差可表示为

$$\Phi = \frac{\sin \alpha_B - \sin \alpha_A}{2 \sin \theta_A} \omega_0 \tau + \frac{\omega_0}{c} (R_B - R_A + y_0 \sin \theta_{sB} - y_0 \sin \theta_{sA}) \quad (18)$$

A, B 回波信号的相对频段位移为

$$\Omega = \frac{\sin \alpha_B - \sin \alpha_A}{2 \sin \theta_A} \omega_0 = K_\Omega \omega_0 \quad (19)$$

其中 $K_\Omega = \frac{\sin \alpha_B - \sin \alpha_A}{2 \sin \theta_A}$ 为相对频谱位移系数。

由式(13)和式(17)可知, 波束中心与卫星垂直轨道面的夹角决定着回波信号所处的频段(在一发多收模式分布式小卫星 SAR 系统中, θ_A 唯一), 该夹角的不同导致回波信号所

处的频段不同。式(18)表明回波信号的相位差与卫星的视角、斜视角、斜距差、波束中心与垂直轨道面的夹角有关。由式(19)可知, 在给定载频情况下, 卫星视角、波束中心与垂直轨道面夹角正弦的差值的大小决定着相对频移的大小。

若卫星 A, B 均发射信号, 并接收自身所发射回波信号, 则可分析得出二者的回波信号相位差为

$$\begin{aligned} \Phi' &= \frac{\sin \alpha_B - \sin \alpha_A}{\sin \theta_A} \omega_0 \tau \\ &\quad + \frac{2\omega_0}{c} (R_B - R_A + y_0 \sin \theta_{sB} - y_0 \sin \theta_{sA}) = 2\Phi \quad (20) \end{aligned}$$

式(18)和式(20)表明, 回波信号的相位差除与卫星的视角、斜视角、斜距差、波束中心和垂直轨道面的夹角有关外, 还与信号传播的路径有关。由式(20)知, 卫星 A, B 均发射并接收自身信号情况下的相位差为卫星 A, B 均接收卫星 A 所发射信号情况下相位差的 2 倍。

当 A, B 均处于正侧视时, 斜视角 $\theta_{sA} = \theta_{sB} = 0$ 。由式(1)知, 此时波束中心与垂直轨道面夹角与卫星的视角相等, 即 $\sin \alpha_A = \sin \theta_A$, $\sin \alpha_B = \sin \theta_B$ 。由式(20)可得

$$\Phi' = \frac{\sin \theta_B - \sin \theta_A}{\sin \theta_A} \omega_0 \tau + \frac{2\omega_0}{c} (R_B - R_A) \quad (21)$$

式(21)结论与 Prati 的结论一致, 这表明 Prati 所研究的情形可看作是分布式小卫星 SAR 系统中各卫星均正侧视、均发射并接收自身信号情况下的一个特例。

3 通过频谱合成提高距离向分辨率

由上述分析知, 卫星的视角、斜视角、斜距差、波束中心与垂直轨道面的夹角、信号的传播路径等决定着回波信号频谱的结构及相对频段位移的大小, 通过对回波信号的频谱和相位移动相加, 合成一个较宽的频谱, 可提高距离向分辨率。Prati 指出具有较高分辨力的回波信号可表示为

$$s(t) = s_A(t) + e^{j\Phi} s_B(t) \quad (22)$$

可得证^[2]

$$s(t) = s_A(t) * [w(t) + w(t)e^{j\Omega t}] \quad (23)$$

式(23)表明, 由式(22)合成的回波信号相当于雷达以更宽的频带对目标观测所得的回波信号, 因此由式(22)得到的信号可用于提高距离向分辨率。分辨率提高的程度取决于合成带宽的大小, 合成带宽越大, 分辨率越高。

在实际应用中, 不可能预先知道两个回波信号的相位差。当 $s_A(t)$, $s_B(t)$ 频谱部分重叠, 即相对频移小于系统有效带宽时, 可借鉴 INSAR 中干涉相位的估计方法对回波信号的相位差进行估计^[2]。在完成相位补偿后, 信号合成的实

际工作只需进行振幅相加、幅度均衡。此外,在信号合成之前,信号 $s_A(t)$, $s_B(t)$ 应过采样,即对于子像素的重采样,然后进行信号合成,否则会出现信号偏差。

对分布式小卫星 SAR 系统中的 3 颗卫星的回波信号进行频谱合成。假设分布式小卫星相对轨道倾角为 60° ,发射信号的中心频率为 9.3 GHz,带宽为 40 MHz。卫星 A 发射并接收信号,正侧视,视角 21° ,距地高 500 km。卫星 B, C 接收信号,斜视。卫星 B, C 与卫星 A 之间的基线长均为 2km,基线与飞行方向夹角分别为 70° 和 250° 。由式(19),可计算得出等效频移分别为 -26.66 MHz 和 26.84 MHz,按式(22)进行频谱合成。图 2 为频谱合成前后点目标距离向的幅度图。由图 2 可知,频谱合成后分辨率得到了明显的提高,合成频谱越大,分辨率越高。

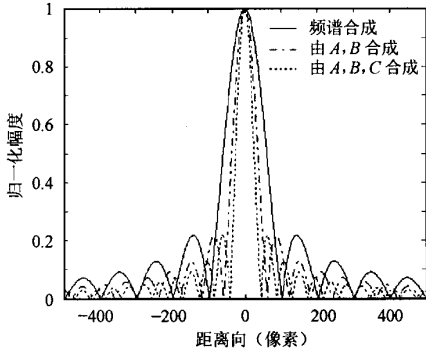


图 2 频谱合成前后点目标的幅度图

4 卫星参数对相对频谱位移系数 K_{ρ} 的影响

由式(1), (19)和图 1 所示几何关系知,相对频谱位移系数 K_{ρ} 值与基线长度、基线与飞行方向的夹角、相对轨道面与垂直轨道面的夹角、发射信号卫星视角等参数有关。在利用频谱合成提高距离向分辨率时,必须对雷达系统的上述参数进行合理设计。在采用式(22)利用 INSAR 技术进行频谱合成时,为保证算法的鲁棒性,需使回波信号的频谱有一定的重叠,具有一定的相干性^[2]。在此条件下, $|K_{\rho}|$ 值越大,所能提高的距离向分辨率越大。

图 3 为发射信号卫星正侧视,视角 30° ,距地高 500km,相对轨道倾角 60° 时,基线长度、基线与飞行方向的夹角与 $|K_{\rho}|$ 的关系图。由图 3 可知,基线在相对轨道面上垂直于飞行方向的分量($r \sin \theta$)决定着 $|K_{\rho}|$ 值的大小, $r \sin \theta$ 越大, $|K_{\rho}|$ 越大。基线垂直于飞行方向时, $|K_{\rho}|$ 达到最大值,基线与飞行方向平行时, $|K_{\rho}|$ 值很小,不能有效提高距离向分辨率。

图 4 为发射信号卫星正侧视,距地高 500km,基线长

2km,基线与飞行方向的夹角为 85° 时,发射信号卫星的视角、相对轨道面的倾角与 $|K_{\rho}|$ 的关系图。由图 4 可知,当发射卫星视角较小,相对轨道倾角较大时,有较大的 $|K_{\rho}|$ 值。而当二者的角度大小相近时, $|K_{\rho}|$ 值很小,不能用于提高距离向分辨率。

综上所述,当系统的相对轨道倾角较大、基线在垂直于飞行方向的分量较大、发射信号卫星视角较小时,具有较大的 $|K_{\rho}|$ 值,此时可较大程度地提高距离向分辨率。

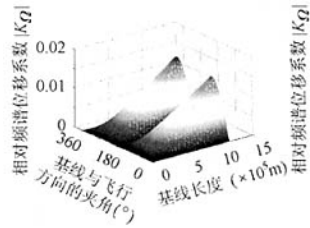


图 3 基线长度、基线与飞行方向夹角 θ 与 $|K_{\rho}|$ 关系图

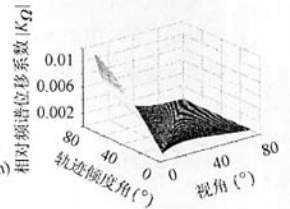


图 4 发射信号卫星视角、相对轨道倾角与 $|K_{\rho}|$ 关系图

5 结束语

本文在假设地面为平面的条件下,讨论了利用频谱合成方法提高分布式卫星 SAR 距离向分辨率的方法。指出雷达波束中心与垂直轨道面的夹角决定着回波信号所处的频段,通过对不同频段回波信号的频谱合成可提高距离向分辨率。在采用 INSAR 技术实现频谱合成时,还应注意到为保证算法的鲁棒性,应对雷达系统的参数进行综合设计,使回波信号在具有一定的相干性的前提下具有较大的频谱偏移。

参考文献

- [1] 王岩飞,张冰尘,廖蜀燕,等. 分布式小卫星合成孔径雷达综合成像系统方案研究. 微小卫星编队飞行及应用论文集,北京,2000,7: 103-114.
- [2] Prati C, Rocca F. Improving slant-range resolution with multiple SAR surveys. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 1993, 29(1): 135-143.
- [3] Fornaro G, Pascazio V, Schirizzi G. Resolution improvement via multipass SAR imaging, IGARSS'2001, Sydney (AUS), July 2001, 6: 2734-2736.
- [4] 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.

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。