

编队飞行 InSAR 的平地效应与地形高度效应分析

唐 智, 李景文

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在编队飞行条件下, 推导了 InSAR 干涉相位特性与平地之间的关系以及相位特性与地形高度之间的关系, 定量分析了平地效应对相位的影响以及地形高度对相位的影响. 平地与地形高度二者共同影响了 InSAR 信号的相位, 因此相位表达式可以写成二个偏导数的和的形式. 以圆锥体为例仿真了地面场景, 在不同视角, 不同雷达波长, 不同基线长度的条件下做了仿真, 仿真实验的结果与理论分析的结果一致.

关键词: InSAR; 编队飞行; 平地效应; 地形高度效应

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2183-04

Flat Earth Effect and Terrain Height Effect in Formation Flying InSAR

TANG Zhi, LI Jing-wen

(School of Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Under the condition of formation flying, the relation between InSAR phase characteristic and flat earth, was deduced as well as the relation between phase characteristic and terrain height. The influence of flat earth and terrain height to phase was thoroughly analyzed. Flat earth and terrain height have common effect on InSAR phase. Thus the phase can be written in the form of sum of 2 partial derivatives. An example of cone was given as simulated real terrain. Simulation of different look angle, different radar wavelength and different baseline length was performed. The simulated result was in accordance with theoretical analysis result.

Key words: InSAR; formation flying; flat earth effect; terrain height effect

1 引言

InSAR(Interferometric synthetic aperture radar)作为一种测量地形的遥感手段,近年来在地形勘测,地震测量,土地规划等方面的应用发展迅速^[1].它以2幅或多幅SAR图像形成干涉的相位为依据,提取地形高度的信息.其信号处理包括图像配准,形成干涉,去平地效应,降噪滤波,二维相位展开等一系列环节.加拿大遥感中心的双天线机载InSAR系统在1991年到1992年的试飞中,取得了C波段干涉结果,在相对平坦的地区,测量高度的偏差可以控制在5m以内^[2].

编队飞行InSAR最近发展很快,它可以追溯到1998年美国的Tech Sat 21空间计划^[3,4].以多颗小卫星编队飞行,取代一颗大卫星而获得遥感数据,在系统成本、可靠性方面有单颗卫星不可比拟的优势^[5~7].在信号处理中,来源不同的数据的处理与融合可以提高SAR图像的空间分辨力,提高地形图的高程精度.编队飞行一般采用单发多收模式,现在多采用机载编队飞行SAR系统进行验证与演示,为星载编队飞行的SAR系统探索道路,打下基础.由于飞机编队飞行的气流作用,跟随长机飞行的飞机所需的推力较小,可以节省燃料^[8].

Patti C在文献[9]中给出了斜距改变与相位之间的关系,

但是没有给出地面的平地,地形的高度对于相位的影响.穆冬在文献[10]中给出了地形高度对相位的影响,指出相位与地形高度成正比,通过换算可以利用相位求取地形高度.本文通过对平地效应和地形高度的研究和整理,推导了在编队飞行情况下的平地效应和地形高度效应,得出它们与相位之间定量计算关系.由于回波信号的相位同时受到平地 and 地形高度的影响,可以写成2个偏导数的和的形式.推出的相位特性公式在理论上给出了相位与地面场景的关系,可以提高去平地的精度,为去平地服务;可以利用相位反推高度,为InSAR建立数字高度地形图服务.InSAR系统参数设计时,需要知道地形高度与相位之间的定量关系,以决定波长,基线尺寸和飞行高度这些重要参数.

2 编队飞行 InSAR 的平地效应

编队飞行SAR系统为了降低系统复杂度,减少能量消耗,多为一个主动雷达发射线形调频信号,编队中的所有雷达接收回波的形式.由于编队飞行比较灵活,可以设置任意长度的基线,使系统在最优基线状态下工作.在得到的InSAR干涉图中,即使地面为水平,也会因为地面随距离向由近及远的变化而产生干涉条纹,这种干涉条纹完全是由平地产生的,与地

形高度无关。Parti C 给出了重复航过情况下的公式,用以说明相位变化与斜距的关系^[9]:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi B_{\perp} \Delta r_s}{\lambda r_0 t \sin\theta} \quad (1)$$

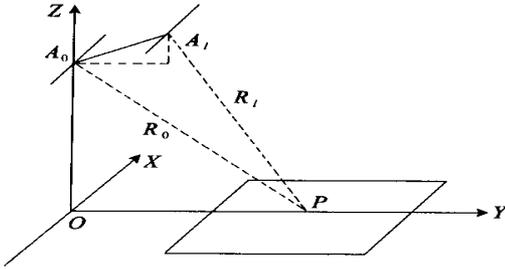


图 1 编队飞行 InSAR 几何关系

其中 $\Delta\phi$ 为干涉相位差的变化, B_{\perp} 为基线在垂直斜距方向的投影, Δr_s 为斜距方向的距离分辨率, λ 为雷达波长, r_0 为斜距长度, θ 为视角。但是在实际应用中,获得的先验知识是大地坐标系下的地形信息,需要将已知的地面水平间隔和高度起伏换算成斜距,才能应用公式(1)。

2.1 干涉空间几何关系

雷达位置如图,两个天线 A_0 和 A_1 同时接收回波信号。干涉条纹的产生是由于地面某点与两个天线的距离不同,当距离差(在干涉中也被称为波程差)恰好为波长 λ 的整数倍,即

$$R_0 - R_1 = k\lambda, k \text{ 为整数} \quad (2)$$

时,出现干涉亮条纹;当波程差为半波长的奇数倍,即

$$R_0 - R_1 = (2k + 1)\lambda/2, k \text{ 为整数} \quad (3)$$

时,出现干涉暗条纹。在换算成相位时,编队飞行 InSAR 与重复航过不同,由于不是收发双程,干涉相位为两个接受复信号的单程相位差

$$\phi = 2\pi(R_0 - R_1)/\lambda \quad (4)$$

2.2 平地与相位的关系

设编队飞行基线满足公式

$$\mathbf{B} = B_H \mathbf{y} + B_V \mathbf{z} \quad (5)$$

其中 \mathbf{B} 为基线矢量,长度为 B , B_H 为 \mathbf{B} 的水平分量的标量, B_V 为 \mathbf{B} 的垂直分量的标量, \mathbf{y}, \mathbf{z} 为 Y 轴和 Z 轴的单位矢量。天线 A_0, A_1 是基线 \mathbf{B} 的端点, \mathbf{B} 与 Z 轴正方向的夹角为 α 。

平地效应公式推导如下。如图,取图 1 中 $X = 0$ 的截面,在地面 P 点的靠 Y 轴正方向的位置有与 P 点相距 Δy 的 Q 点。各点坐标为 $P(0, y_0, 0), Q(0, y_0 + \Delta y, 0), A_0(0, 0, z_0), A_1(0, B_H, z_0 + B_V)$, 由于距离向变化 Δy 引起的相位差的变化

$$\Delta\phi_y = \frac{2\pi}{\lambda} [(R'_0 - R'_1) - (R_0 - R_1)] \quad (6)$$

而

$$\begin{aligned} & (R'_0 - R'_1) - (R_0 - R_1) \\ &= [(y_0 + \Delta y)^2 + z_0^2]^{1/2} + [(y_0 - B_H)^2 + (z_0 + B_V)^2]^{1/2} \\ & \quad - [(y_0 + \Delta y - B_H)^2 + (z_0 + B_V)^2]^{1/2} - [y_0^2 + z_0^2]^{1/2} \\ &= (y_0^2 + z_0^2)^{1/2} \left\{ \left[1 + \frac{(\Delta y)^2 + 2y_0(\Delta y)}{y_0^2 + z_0^2} \right]^{1/2} - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. + \left[1 + \frac{B_H^2 + B_V^2 + 2z_0 B_V - 2y_0 B_H}{y_0^2 + z_0^2} \right]^{1/2} - \left[1 + \frac{(\Delta y)^2 + 2y_0(\Delta y) + B_H^2 + B_V^2 + 2z_0 B_V - 2y_0 B_H - 2B_H(\Delta y)}{y_0^2 + z_0^2} \right]^{1/2} \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

令 $B_H^2 + B_V^2 + 2z_0 B_V - 2y_0 B_H = M, (\Delta y)^2 + 2y_0(\Delta y) = N$, 上式可化为

$$\begin{aligned} & (R'_0 - R'_1) - (R_0 - R_1) \\ &= (y_0^2 + z_0^2)^{1/2} \left\{ \left[1 + \frac{N}{y_0^2 + z_0^2} \right]^{1/2} + \left[1 + \frac{M}{y_0^2 + z_0^2} \right]^{1/2} \right. \\ & \quad \left. - \left[1 + \frac{M + N - 2B_H(\Delta y)}{y_0^2 + z_0^2} \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

在视角 θ 不是很小的情况下,例如 $\theta > 10^\circ$ 时,由于

$$B_H \ll y_0, B_H \ll z_0, B_V \ll y_0, B_H \ll z_0 \quad (9)$$

由泰勒公式将上式在 0 附近展开,得到

$$\begin{aligned} & (R'_0 - R'_1) - (R_0 - R_1) \\ &= (y_0^2 + z_0^2)^{1/2} \left\{ \left[1 + \frac{N}{2(y_0^2 + z_0^2)} - \frac{N^2}{8(y_0^2 + z_0^2)^2} \right] \right. \\ & \quad \left. + \left[1 + \frac{M}{2(y_0^2 + z_0^2)} - \frac{M^2}{8(y_0^2 + z_0^2)^2} \right] \right. \\ & \quad \left. - \left[1 + \frac{M + N - 2B_H(\Delta y)}{2(y_0^2 + z_0^2)} - \frac{(M + N - 2B_H(\Delta y))^2}{8(y_0^2 + z_0^2)^2} \right] - 1 \right\} \\ &= (y_0^2 + z_0^2)^{1/2} \left[\frac{2B_H(\Delta y)}{2(y_0^2 + z_0^2)} \right. \\ & \quad \left. + \frac{4B_H^2(\Delta y)^2 + 2MN - 4MB_H(\Delta y) - 4NB_H(\Delta y)}{8(y_0^2 + z_0^2)^2} \right] \quad (10) \end{aligned}$$

将 $M = B_H^2 + B_V^2 + 2z_0 B_V - 2y_0 B_H, N = (\Delta y)^2 + 2y_0(\Delta y)$ 代入,并且注意到上式括号中第二项的分子含有关于 y_0, z_0 的二次项,一次项和常数项,由于分母是关于 y_0, z_0 的四次项,且 y_0, z_0 的绝对数值较大,忽略分子中关于 y_0, z_0 的一次项和常数项,保留 y_0, z_0 的二次项,得

$$\begin{aligned} & (R'_0 - R'_1) - (R_0 - R_1) \\ &= (y_0^2 + z_0^2)^{1/2} \left[\frac{B_H(\Delta y)}{y_0^2 + z_0^2} + \frac{y_0 z_0 B_V(\Delta y) - y_0^2 B_H(\Delta y)}{(y_0^2 + z_0^2)^2} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

由图 2 几何关系, $y_0 = R_0 \sin\theta, z_0 = R_0 \cos\theta, B_V = B \cos\alpha,$

$B_H = B \sin\alpha$, 所以

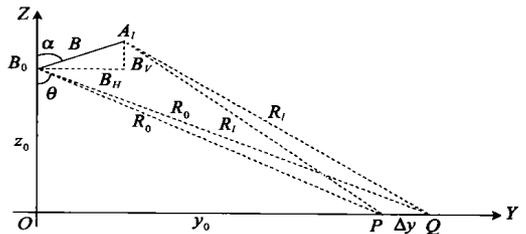


图 2 平地效应几何关系

$$\begin{aligned} & (R'_0 - R'_1) - (R_0 - R_1) \\ &= R_0 \left[\frac{B_H(\Delta y)}{R_0^2} + \frac{R_0^2 \sin\theta \cos\theta B_V(\Delta y) - R_0^2 \sin^2\theta B_H(\Delta y)}{R_0^4} \right] \\ &= \frac{B \sin(\alpha + \theta) \cos\theta}{R_0} (\Delta y) \\ &= \frac{B_{\perp} \cos\theta}{R_0} (\Delta y) \quad (12) \end{aligned}$$

其中 $B\sin(\alpha + \theta) = B_{\perp}$, 为基线在垂直于斜距方向上的投影。

因此

$$\Delta\phi_y = \frac{2\pi B_{\perp} \cos\theta}{\lambda R_0} (\Delta y) \quad (13)$$

3 编队飞行 InSAR 的高度效应与平地效应的共同作用

当地面有地形高度 Δz 时, 所引起的相位差变化, 仿照平地效应部分的近似, 推导结果如下:

$$\Delta\phi_z = \frac{2\pi}{\lambda} [(R'_{0'} - R'_{1'}) - (R_0 - R_1)] = \frac{2\pi B_{\perp} \sin\theta}{\lambda R_0} (\Delta z) \quad (14)$$

实际干涉相位是由平地效应与地形高度效应共同引起的。相位全增量

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \Delta\phi_y + \Delta\phi_z = \frac{\partial\phi}{\partial y} (\Delta y) + \frac{\partial\phi}{\partial z} (\Delta z) \\ &= \frac{2\pi B_{\perp} \cos\theta}{\lambda R_0} (\Delta y) + \frac{2\pi B_{\perp} \sin\theta}{\lambda R_0} (\Delta z) \\ &= \frac{2\pi B_{\perp}}{\lambda R_0} [(\Delta y) \cos\theta + (\Delta z) \sin\theta] \end{aligned} \quad (15)$$

其中, 偏导数

$$\frac{\partial\phi}{\partial y} = \frac{2\pi B_{\perp} \cos\theta}{\lambda R_0}, \quad \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{2\pi B_{\perp} \sin\theta}{\lambda R_0} \quad (16)$$

由此可见, B_{\perp} 是干涉中一个重要的系统参数, 它的选取对干涉条纹的疏密及条纹清晰度有很大影响。

4 仿真实验结果

在验证平地效应和地形高度效应的影响时, 需要设置易于表明干涉效果的典型地面场景。本文设置了圆锥体场景, 以考察干涉相位在不同坡度, 不同基线长度, 不同波长, 不同视角条件下的变化, 图中竖向为距离向, 横向为方位向, 场景大小为距离向 256 点, 方位向 256 点, 距离向间隔设为 4 米, 方位向间隔设为 3 米。本文从原理上验证, 仿真过程中没有加入噪声, 不同参数的结果如下。

当波长 0.24m, 飞行高度 5000m, 视角 45° , 基线水平分量 10.0m, 基线垂直分量 0.0m 时, 设置圆锥体高度 100 米, 锥角 75.96° , 考察缓变斜坡的干涉相位图。理想去除平地后的效果应该是平地上各点的相位完全相同, 圆锥体各点的相位

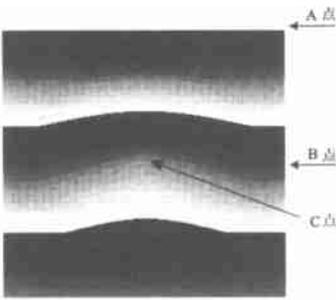


图 3 大视角圆锥体仿真结果

随高度不同而异。取平地上 A 点(场景右边上角), B 点(场景右边中间), 和圆锥体顶点(场景中心), 由公式(13)和公式(14)、(15)计算得

$$\Delta\phi_{AB} = \frac{2\pi B_{\perp} \cos\theta}{\lambda R_0} (\Delta y) = \frac{2\pi B_{\perp} \cos^2\theta}{\lambda_0} (\Delta y) = 9.479 \text{ rad}$$

$$\Delta\phi_{BC} = \frac{2\pi B_{\perp} \sin\theta}{\lambda R_0} (\Delta z) = \frac{2\pi B_{\perp} \sin^2\theta \cos\theta}{\lambda_0} (\Delta z) = 1.851 \text{ rad}$$

$$\Delta\phi_{AC} = \Delta\phi_{AB} + \Delta\phi_{BC} = \frac{2\pi B_{\perp} \cos\theta}{\lambda_0} [(\Delta y) \cos\theta + (\Delta z) \sin\theta]$$

$$= 11.330 \text{ rad}$$

实际仿真结果为(相位展开后)

$$\Delta\phi_{AB} = \phi_B - \phi_A = 9.246 \text{ rad},$$

$$\Delta\phi_{BC} = \phi_C - \phi_B = 1.821 \text{ rad},$$

$$\Delta\phi_{AC} = \phi_C - \phi_A = 11.067 \text{ rad}$$

推导结果与实际仿真结果吻合。

由公式(13)可见, 视角 θ 越小, 平地效应引起的相位差变化越大; 而地形高度效应引起的相位差变化仅在 $\theta = 45^{\circ}$ 时最大, 视角过大或过小, 都会使相位差变化减小。在波长 0.24m, 飞行高度 5000m, 视角 10° , 基线水平分量 10.0m, 基线垂直分量 0.0m 的情况下, 图 4 的仿真结果说明了这种情况。

小的波长会使干涉条纹整体变密集, 本文进行的仿真实验设置波长 0.03m, 飞行高度 5000m, 视角 10° , 基线水平分量 10.0m, 基线垂直分量 0.0m, 仿真结果说明了公式(15)中的波长与相位差变化成反比。

基线设计当中的水平基线与垂直基线决定公式(15)中的 B_{\perp} , 基线的尺寸和夹角对干涉条纹均有影响, 当基线尺寸固定, $\alpha + \theta = 90^{\circ}$ 时, $B_{\perp} = \sqrt{B_H^2 + B_V^2}$, 此时基线对相位差变化影响最大, 图 5 是波长 0.24m, 飞行高度 5000m, 视角 45° , 基线水平分量 10.0m, 基线垂直分量 10.0m 的仿真结果。

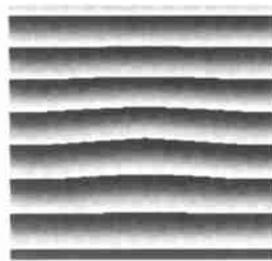


图 4 小视角圆锥体仿真干涉条纹

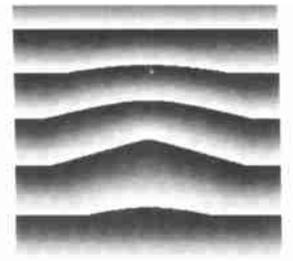


图 5 存在垂直分量基线仿真结果

图 6 给出了波长 0.24m, 飞行高度 5000m, 视角 20° , 基线水平分量 10.0m, 基线垂直分量 0.0m 条件下, 随平地远近变化, 相位差(弧度)的变化情况, 从图中看出, 推导公式做了近似与忽略, 推得理论值呈现严格线性关系, 而仿真结果(虚线)带有高于一次的非线性项。

图 7 给出了波长 0.24m, 飞行高度 5000m, 视角 20° , 基线水平分量 10.0m, 基线垂直分量 0.0m 条件下, 随地形高度变化, 相位差(弧度)的变化情况, 从图中看出, 当高度较小时, 公式理论值与仿真值吻合很好, 随高度变大, 二者差异逐渐明

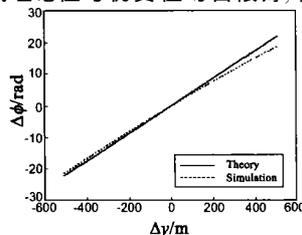


图 6 相位差随平地变化的关系

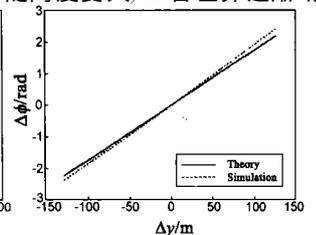


图 7 相位差随地形高度变化的关系

显,这是由于高度变化较大时,不满足 $\Delta z \ll z_0$, 公式当中的高次项不能被完全忽略导致的.

5 结论

本文在编队飞行的条件下,推导了 InSAR 回波的相位特性与平地之间的关系,以及相位特性与地形高度之间的关系,定量分析了这些关系,最终将相位表达式写成二个偏导数的和的形式.这一分析可以为编队飞行时去除平地效应提供理论依据,还可为精确解算 DEM 中的高度服务.本文在不同视角,不同波长,存在水平基线与垂直基线的多种情况下作了仿真,设置了圆锥体地面场景,分析了仿真结果与公式推导结果的微小差异.

参考文献:

- [1] L C Graham. Synthetic interferometer for topographic mapping[J]. Proceeding of the IEEE, 1974, 62(6): 763- 768.
- [2] A L Gray, P J Farris-Manning. Repeat-pass interferometry with airborne synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 180- 191.
- [3] Das Alok, Cobb Richard. Techsat 21-space missions using collaborating constellations of satellites[A]. 12th AIAA/USU Conference on Small Satellites[C]. Logan, UT: 12th AIAA/USU CSS, 1998. 1- 5.
- [4] Luu K, Schlossberg H. University nanosatellite distributed satellite capabilities to support TechSat 21[A]. 13th AIAA/USU Conference on Small Satellites[C]. Logan, UT: 13th AIAA/USU CSS, 1999.
- [5] 林来兴. 小卫星编队飞行及其轨道构成[J]. 中国空间科学技术, 2001, 2: 23- 28.
- [6] 詹亚峰, 马正新, 曹志刚. 现代微小卫星技术及发展趋势[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 102- 106.
- [7] 肖业伦, 张晓敏. 编队飞行卫星群的轨道动力学特性与构形设计[J]. 宇航学报, 2001, 22(4): 8- 12.
- [8] Hanson Curtis, Ryan Jack, Allen Michael J, Jacobson Steven R. An overview of flight test results for a formation flight autopilot[A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit[C]. Monterey, CA, Aug. 5-8, 2002.
- [9] Parti C, Rocca F. Limits to resolution of elevation maps from stereo SAR images[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(12): 2215- 2235.
- [10] 穆冬, 朱兆达, 张焕春. 干涉合成孔径雷达成像技术研究[J]. 遥感技术与应用, 2000. 15(4): 256- 259.

作者简介:



唐智男, 1977年11月生于湖北十堰, 2000年获得北京航空航天大学电子工程系学士学位, 博士研究生, 主要研究领域为数字信号处理与干涉合成孔径雷达信号仿真等. E-mail 地址: tangzhi1977@sohu.com.



李景文男, 1964年出生于黑龙江齐齐哈尔, 教授, 中国电子学会高级会员, 主要从事信号信息获取与处理和雷达信号仿真与处理等方面的教学与科研工作, 发表了学术论文 40 余篇.