

基于 RVoG 模型的极化干涉 SAR 最优基线分析

周勇胜^{1,2,3}, 洪文^{1,2}, 王彦平^{1,2}, 曹芳^{1,2}, 吴一戎^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2. 微波成像技术国家重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对极化干涉 SAR 体散射体参数估计应用, 基于随机体散射体/地表二层(RVoG)模型分析研究了其最优基线问题. 在基线去相干、RVoG 模型、相位管等相关理论分析基础之上, 证明了最优基线的存在性, 给出了其定义与计算方法, 比较了其与常规干涉 SAR 最优基线的异同. 通过仿真验证并讨论了雷达、成像几何和体散射体参数对最优基线选取的影响.

关键词: 合成孔径雷达; 极化干涉; 最优基线; RVoG; 相位管

中图分类号: TN959. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2008) 12 2367 06

Analysis of Optimal Baseline of Polarimetric Interferometric SAR Based on RVoG Model

ZHOU Yong sheng^{1,2,3}, HONG Wen^{1,2}, WANG Yarping^{1,2}, CAO Fang^{1,2}, WU Yirong^{1,2}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The optimal baseline of polarimetric interferometric synthetic aperture radar (POLinSAR) is analyzed based on the random volume over ground (RVoG) model in the application of estimating parameters of the volume scatterers. Based on the basic concepts of baseline decorrelation, RVoG model and phase tube, the existence of POLinSAR optimal baseline is proved. Then the definition of POLinSAR optimal baseline is given and the method for calculating its value is derived. The differences between InSAR optimal baseline and POLinSAR optimal baseline are also presented. Finally, by the experimental simulation, the optimal baseline is validated and the effects of various parameters on the choice of optimal baseline are discussed, which include radar system parameters, imaging geometry parameters and volume scatterer parameters.

Key words: synthetic aperture radar; polarimetric interferometry; optimal baseline; RVoG; phase tube

1 引言

极化干涉合成孔径雷达 (POLinSAR, Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术利用了干涉测量(相干性和干涉相位)随极化变化的特性, 既具有干涉雷达获取目标高程的能力, 又具有极化雷达对不同散射机理的分辨能力, 还具有提高干涉 SAR (InSAR) 相干性的能力以及提取体散射体(如森林, 农作物, 冰雪等)参数的潜力^[1,2].

基线是 POLinSAR 两幅天线之间的距离(如图 1 所示), 它的大小与系统干涉相干性以及系统性能的优劣密切相关. 针对典型应用如何选择基线是 POLinSAR 系统设计时面临的一个重要问题. 目前 POLinSAR 的基线一般是根据经验或者参照 InSAR 有关的结论^[3-6]进行

选取的, 但这有以下几方面的不足: 一是未考虑极化的影响, 二是未考虑与基线也密切相关的体散射去相干的影响, 三是未考虑 POLinSAR 与 InSAR 应用及相应性能标准的不同, 前者是以不同极化(或散射机理)的相位中心(如植被冠层的相位中心与其下地表的相位中心)的区分精度来衡量^[7], 后者是以单一极化的相位中心的估计精度来衡量.

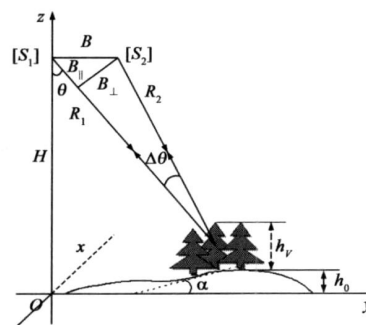


图1 POLinSAR成像空间几何关系

本文首先介绍了与 POLinSAR 基线密切相关的几何去相干和体散射去相干,介绍了将体散射去相干与极化联系起来的随机体散射体/地表二层(RVoG - Random Volume over Ground)模型^[8],这一模型是目前 POLinSAR 体散射体参数估计应用中所用到的最为成功的模型^[9].它不仅用地体幅度比描述了极化的影响,也表征了体散射去相干与基线的关系.此外还介绍了基于 RVoG 的相位管,它是衡量 POLinSAR 系统性能的一个有效方法^[7].接着针对 InSAR 和 POLinSAR 应用性能标准的不同证明了两者最优基线的存在性;根据 POLinSAR 的典型应用定义了最优基线,并给出了其求解方法;此外还总结了 InSAR 和 POLinSAR 最优基线的异同.最后通过仿真进行了验证,并分析了雷达、成像几何和体散射体参数对最优基线的影响.

2 POLinSAR 系统性能分析

2.1 基线去相干^[10]

POLinSAR 的干涉相干性是表征其系统性能的重要指标之一.造成相干性损失的因素主要有:热噪声去相干 \tilde{Y}_{SNR} 、量化去相干 \tilde{Y}_{Quant} 、距离和方位模糊去相干 \tilde{Y}_{Amb} 、配准去相干 \tilde{Y}_{Coreg} 、几何去相干 \tilde{Y}_{Geo} 、多普勒中心去相干 \tilde{Y}_{Az} 、体散射去相干 \tilde{Y}_{Vol} 以及时间去相干 \tilde{Y}_{Temp} 等.假定各去相干源加性独立,则系统复相干性可以表示为^[7]

$$\tilde{Y} = \tilde{Y}_{\text{SNR}} \cdot \tilde{Y}_{\text{Quant}} \cdot \tilde{Y}_{\text{Amb}} \cdot \tilde{Y}_{\text{Coreg}} \cdot \tilde{Y}_{\text{Geo}} \cdot \tilde{Y}_{\text{Az}} \cdot \tilde{Y}_{\text{Vol}} \cdot \tilde{Y}_{\text{Temp}} \quad (1)$$

式中与基线大小密切相关的是几何去相干和体散射去相干,统称为基线去相干.

POLinSAR 成像空间几何如图 1 所示. B 为基线,其垂直于视向分量 B_{\perp} 称为垂直基线,是决定干涉相干性的重要参数(下文提及基线时,如无特别说明,是指垂直基线).

基线对系统相干性的影响主要包括几何去相干 \tilde{Y}_{Geo} 和体散射去相干 \tilde{Y}_{Vol} ^[11]:

$$\tilde{Y}_{\text{Geo}} = \frac{\int \exp\{i2K_y y'\} h_1(x-x') h_2^*(R-R') dx' dy'}{\int h_1(x-x') h_2^*(R-R') dx' dy'} \quad (2)$$

$$\tilde{Y}_{\text{Vol}} = \frac{\int \sigma_{ve}(z') \exp\{i2K_z z'\} dz'}{\int \sigma_{ve}(z) dz} \quad (3)$$

式中 K_y 为水平波数; K_z 为垂直波数; $h(\cdot)$ 为系统响应; $\sigma_{ve}(z)$ 为主要散射体的高度分布.

几何去相干从频域来看是由于视向差异引起的频谱不重叠造成的.因此,对于乒乓工作模式可通过在获取辅图像时调整发射信号中心频率来抑制几何去相干;对于标准工作模式可通过谱移滤波来抑制几何去相干.由于谱移不能超过系统带宽 B_{rg} ,相应的基线为临界基线^[10].

$$B_{\perp c} = \frac{B_{rg} R \tan(\theta - \alpha)}{c_0} \quad (4)$$

式中 R 为斜距, B_{rg} 为波长, c_0 为波速, θ 为入射角, α 为坡度角.谱移滤波后,垂直波数 K_z 为:

$$K_z = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\Delta\theta}{\sin\theta} = \frac{4\pi B_{\perp}}{R \tan\theta} \quad (5)$$

K_z 也称高度灵敏度,其倒数 $1/K_z$ 为高度模糊数,表示引起一个 2π 相位变化所对应的高度变化.

几何去相干是标量影响,即不影响相位中心的大小,和系统的其他标量去相干(如 SNR 去相干、配准去相干等)一样都只影响干涉相位的估计精度.在分析最优基线时,将其作为影响干涉相位估计精度的一个因素进行考虑.

与基线有关的另一个去相干是体散射去相干,它是由于两幅图像的频谱形状发生改变造成的复去相干,同时影响相干性和干涉相位.尽管体散射去相干无法通过上述谱移滤波等方法进行抑制,但由于它与体散射体物理参数相关,因此可以建立起复相干性模型(如 RVoG 模型,见下一节)利用 POLinSAR 数据来估计体散射体的参数.

2.2 RVoG 模型^[8,9]

对于 POLinSAR 体散射体参数估计的应用,随机体散射体/地表二层(RVoG)模型是目前得到了广泛应用和证实了的简单有效模型^[8,9].它是包括体散射体和地面的两层的模型,将体散射体层看作是厚度为 h_v 的各向同性均匀媒质,并用与极化无关的平均衰减系数 σ 描述电磁波在其中的散射和吸收损失:

$$\sigma_{ve}(z) = \exp\left[-\frac{2\sigma(h_v - z)}{\cos\theta}\right], \quad 0 \leq z \leq h_v \quad (6)$$

根据式(6),式(3)可以进一步表示为

$$\tilde{Y}_{\text{Vol}} = \frac{p}{p_1} \cdot \frac{e^{p_1 h_v} - 1}{e^{p h_v} - 1} \begin{cases} p = 2\sigma / \cos\theta \\ p_1 = p + iK_z \end{cases} \quad (7)$$

此外 RVoG 模型用地体幅度比 μ 表示地面层对总相干性和相位的影响:

$$\tilde{Y}_{\text{Vol}} = \exp(i\phi_0) \frac{\tilde{Y}_v + \mu(w)}{1 + \mu(w)} \quad (8)$$

式中 ϕ_0 为地面相位.地体幅度比 μ 是式(8)中唯一随极化变化的量(w 表示极化状态或散射机理^[11]), $\mu \rightarrow \infty$ 表示地面散射机理占主导, $\mu \rightarrow 0$ 表示体散射机理占主导^[9].地体幅度比一方面能反映极化对系统的影响;另一方面能反映了相位中心随极化的变化,因此,分析 POLinSAR 系统性能时通过地体幅度比这个参数来进行.

2.3 相位管^[7]

POLinSAR 的系统性能是以不同散射机理的相位中心的区分精度来衡量.这与各种极化方式下的相位中心

的位置以及系统对相位中心的测量精度有关。前者可由 RVoG 来进行表示, 如图 2 中虚线所示; 后者可用相位估计标准差来表示^[12], 它与系统总相干性和等效视数有关, 如式(9)所示。两者结合形成相位管, 它是系统性能分析和系统设计的一个有效工具^[7]。

$$\sigma_\phi = \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} \phi^2 p_\phi d\phi} \quad (9)$$

$$p_\phi(\phi) = \frac{\Gamma(n+1/2)(1-\gamma_{tot}^2)^n \gamma_{tot} \cos\phi}{2\sqrt{\pi}\Gamma(n)(1-\gamma_{tot}^2 \cos^2\phi)^{n+1/2}} + \frac{(1-\gamma_{tot}^2)^n}{2\pi} F\left[n, 1; \frac{1}{2}; \gamma_{tot}^2 \cos^2\phi\right] \quad (10)$$

式中 $p_\phi(\phi)$ 为相位估计的概率密度函数; n 为等效视数; F 为高斯超几何函数; Γ 为伽玛函数; γ_{tot} 为系统的相干性(如式(1)所示)。

在相位管中, 相位中心与随极化的变化程度表现为管子的陡峭程度; 相位中心的估计精度表现为管子的纤细程度。为定量描述 POLinSAR 对相位中心的区分精度, 亦即相位管的陡峭和纤细程度, 定义“地体幅度比变化量 $\Delta\mu$ ”: $\Delta\mu$ 范围内的相位中心变化量等于中点 μ_0 处的 2 倍相位标准差, 如图 2 和式(11)所示。定义中等号左边表述陡峭程度, 右半部分表示纤细程度。 $\Delta\mu$ 同时定量地表征相位管陡峭和纤细程度。

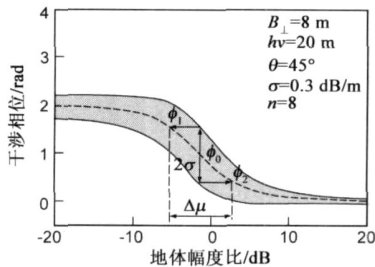


图2 干涉相位和相位标准差关于地体幅度比的函数

$$2\sigma_\phi(\mu_0) = \phi_1\left(\mu_0 - \frac{\Delta\mu}{2}\right) - \phi_2\left(\mu_0 + \frac{\Delta\mu}{2}\right) \quad (11)$$

式中, μ_0 为相位中心从最大值变化到一半处时对应的地体幅度比。通过上述分析可知: 通过相位管和地体幅度比变化量, 可以分析各系统参数、成像几何参数及体散射体参数对性能的影响去相干影响和极化变化的影响。本文主要关注基线, 下面将着重分析基线对相位管及地体幅度比范围 $\Delta\mu$ 的影响, 计算多大的基线可获得最好的系统性能。

3 POLinSAR 最优基线

3.1 最优基线的存在性

在 InSAR 数字表面模型(DSM)应用中, 首先是基于两个通道的观测数据估计出散射中心的干涉相位, 然后再将该干涉相位转化为高程(如图 3 所示)。高程精度 σ_{h_0} 不仅与干涉相位估计精度(如式(9)所示)有关, 还和

干涉相位转化为高程的灵敏度(如式(5)所示)有关。InSAR 基线越大则相干性越低, 干涉相位估计精度越低; 但是基线越大, 干涉相位差转化为高度的模糊数 $1/k_2$ 越小, 由干涉相位和基线本身长度的不确定性引起的最终高程的测量误差越小, 这样就存在着使 InSAR 工作在最佳状态的最优基线。

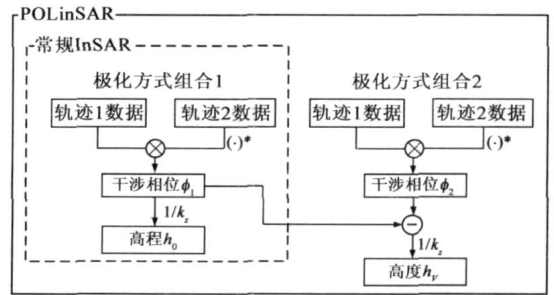
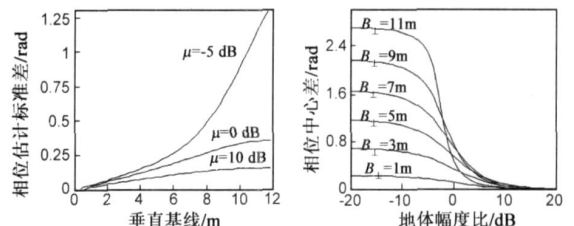


图3 InSAR DSM应用、POLinSAR体散射体参数估计应用示意图

在 POLinSAR 体散射体参数估计应用中, 首先是找出某种极化方式组合(如 HV 极化)估计出体散射体的相位中心 ϕ_1 , 然后找出另一种极化方式组合(如 HH-VV 极化)估计出地面的相位中心 ϕ_2 , 最后将两个相位中心相减再转化为高度(如图 3 所示)。因此高度估计精度一方面与各极化方式组合对应的相位中心差、干涉相位转化为高程的模糊数有关, 另一方面也和干涉相位估计精度有关。由式(7)知相位中心差与 k_2 成正比, 亦即与基线成正比。因此 POLinSAR 基线越大, 相位中心差越大, 相位转化为高度的模糊数越小; 而基线越大, 干涉相位估计精度越低, 因此也存在着使 POLinSAR 工作在最佳状态的最优基线。

图 4(a) 给出了相位估计标准差与基线的关系, 可以看出基线越大, 相位估计标准差越大。图 4(b) 给出了相位中心差关于地体幅度比的函数, 可以看出随着基线的增大, 相位中心差越大, 变化也越快。



(a) 相位估计精度与垂直基线的关系 (b) 不同基线时的相位中心变化

图4 最优基线的存在性

通过以上分析可以看出: InSAR DSM 应用和 POLinSAR 体散射体参数估计应用的精度都与相位估计的精度、高度模糊数有关, 而不同之处在于后者的精度还与相位中心差(亦即极化方式和体散射去相干)有关。

3.2 最优基线的定义与求解

最优基线的定义应根据具体的应用和性能准则来

进行. 对于 InSAR DSM 应用, 其最优基线定义为使目标高程估计误差最小的基线. 目标高程误差可以表示为^[4]

$$\sigma_{\bar{h}}^2 = (\sigma_R \cos \theta)^2 + (R \sigma_{\theta} \sin \theta)^2 \quad (12)$$

σ_R 表示斜距 R 的方差^[5],

$$\sigma_R = \frac{\rho_R^N}{\sqrt{12}} = \frac{\rho_R / (1 - B_{\perp} / B_{\perp c})}{\sqrt{12}} \quad (13)$$

式中 $\rho_R = c_0 / (2B_{rg})$ 为 SLC 图像斜距分辨率.

σ_{θ} 表示视角 θ 方差^[6],

$$\sigma_{\theta}^2 = \left[\frac{\lambda}{2B_{\perp} \sqrt{\text{SNR}}} \right]^2 + \left[\frac{0.6 \rho_R^N}{R \tan(\theta - \alpha)} \right]^2 \quad (14)$$

式中 SNR 为信噪比.

将式(13)和(14)代入(12), 并对 B_{\perp} 求偏导, 再令导数为零可得 InSAR 最优基线的表达式为:

$$B_{\perp \text{opt}} = \frac{B_{\perp c}}{1 + \sqrt[3]{b \rho_R^2 B_{\perp}^2 / d}} \quad (15)$$

式中 $b = \cos^2 \theta / 12 + 0.36 \sin^2 \theta / \tan^2(\theta - \alpha)$, $d = \lambda^2 R^2 \sin^2 \theta / (16 \text{SNR})$. 可以看出: InSAR 最优基线由波长, 斜距, 系统带宽, 视角, 坡度角及信噪比共同决定.

对于 POLinSAR 体散射体参数估计应用, 精度主要取决于相位中心差、相位估计标准差和高度模糊数. 相位中心差与极化方式以及体散射去相干有关, 实际中并没有确定的某种极化状态对应体散射体顶部相位中心或底部相位中心, 需要通过 POLinSAR 相干最优方法^[7]实现. 地体幅度比表示的是体散射和地面散射的比重关系, 反映了极化的变化, 与复相干性有确定的关系, 因此可用地体幅度比的变化来衡量相位中心的变化. 由于不同的体散射体在各种极化状态变化下有复杂的散射特性, 地体幅度比的变化范围也很难确定. 因此考虑最小的地体幅度比范围实现相位中心的分离. 根据 2.3 节, POLinSAR 最优基线定义为使地体幅度比变化量 $\Delta\mu$ 最

小的基线.

根据上述定义, 为求解最优基线, 需从式(11)求解 $\Delta\mu$ 关于 B_{\perp} 函数, 然后令其偏导为 0 从而得到最优基线值. 但由于式(10)的复杂性, 难以得到 POLinSAR 最优基线的解析表达式. 二分法是有限集中收敛最快的信息查询方式, 并有低的计算复杂度和时间复杂度, 因此下面利用二分法搜索使 $\Delta\mu$ 最小的基线, 即最优基线 $B_{\perp \text{opt}}$. 算法流程如图 5 所示. 其中计算给定 B_{\perp} 下对应的 $\Delta\mu$ 值, 即式(11)的求解, 可归结为求零点问题. 令

$$f(\Delta\mu) = \phi_1 \left[\mu_0 - \frac{\Delta\mu}{2} \right] - \phi_2 \left[\mu_0 + \frac{\Delta\mu}{2} \right] - 2\sigma_0(\mu_0) = 0 \quad (16)$$

式(16)的求解算法如图 5(b) 所示.

3.3 POLinSAR 与 InSAR 最优基线的比较

(1) InSAR 和 POLinSAR 都存在着使其各自性能最优的基线. 由于前者的性能以单极化时相位中心的高程估计精度来衡量, 后者以不同极化下相位中心区分精度来衡量, 这就决定了两者具有不同的最优基线;

(2) InSAR 最优基线与系统参数、成像几何参数有关, POLinSAR 最优基线除了和上述两者有关外, 还和体散射体参数有关;

(3) 从去相干角度来说, InSAR 最优基线和 POLinSAR 最优基线都考虑几何去相干的影响, 它反映在相位估计标准差中. POLinSAR 最优基线还要考虑体散射去相干以及相位中心随极化变化这两个因素. 因此 InSAR 估计出来的最优基线不能直接搬到 POLinSAR 体散射参数估计的应用中. 对于 POLinSAR DSM 应用, 它的最优基线是和 InSAR 的最优基线是等价的.

4 实验仿真与分析

设 POLinSAR 系统平台的高度 $H = 3000\text{m}$, 入射角 $\theta = 45^\circ$, 植被高度 $h_V = 20\text{m}$, 衰减系数 $\sigma = 0.3\text{dB/m}$, 信噪比 $\text{SNR} = 17\text{dB}$, 等效视数 $n = 8$. 利用图 5(b) 所示的算法可计算得到 $\Delta\mu$ 关于 B_{\perp} 的函数如图 6 所示(L 波段, $\lambda = 23.6\text{cm}$). 由曲线变化情况可知存在着唯一的最优基线使系统性能最优. 此外从图 6 还可看出当 B_{\perp} 在 $2\text{m} \sim 8\text{m}$ 时曲线平坦, 这说明若实际中 B_{\perp} 偏离最优基线值时, 系统性能仍然能保持较好, 最优基线比较稳定. 最后由

图 5(a) 算法, 可得最优基线 $B_{\perp \text{opt}} = 4.1\text{m}$, 与已有几种机载 POLinSAR 系统的实际基线接近.

下面分析系统、成像几何和体散射体参数对 $B_{\perp \text{opt}}$ 的影响. 在 L 波

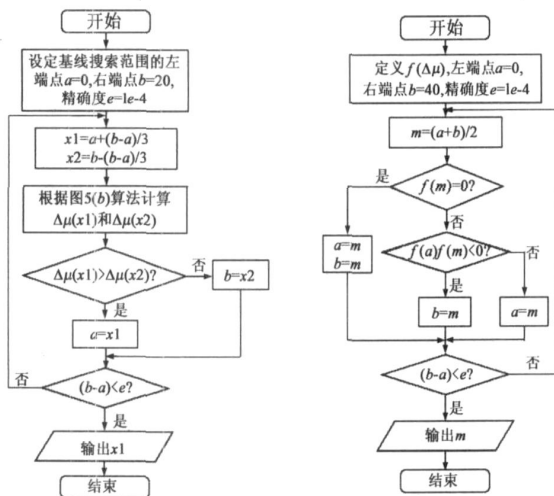


图5 最优基线求解方法

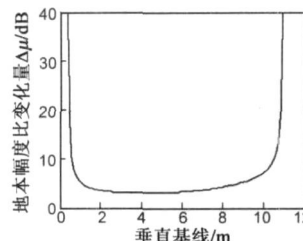


图6 $\Delta\mu$ 与垂直基线的关系(L波段)段 ($\lambda = 23.6\text{cm}$)、C 波段

($\lambda = 5.66\text{cm}$)、X 波段($\lambda = 3.12\text{cm}$)时 $B_{\perp\text{opt}}$ 关于体散射体高度 h_V 的函数如图 7(a) 所示. 可以看出, L 波段时最优基线较大, h_V 和 $B_{\perp\text{opt}}$ 近似成线性变化关系, 当 h_V 从 10m 变为 20m 时, $B_{\perp\text{opt}}$ 从 8.4m 变为 4.1m; 而在 C、X 波段时, $B_{\perp\text{opt}}$ 较小, 随 h_V 变化不明显. 衰减系数 σ 对 $B_{\perp\text{opt}}$ 的影响如图 7(b) 所示. 可以看出, $B_{\perp\text{opt}}$ 不敏感于衰减系数 σ 的变化: 衰减系数 σ 从 0 变为 0.5dB/m 时, $B_{\perp\text{opt}}$ 仅从 4.44m 变为 3.95m. 图 7(c) 给出了 $B_{\perp\text{opt}}$ 关于入射角 θ 的函数, 可以看出 L 波段时 $B_{\perp\text{opt}}$ 随 θ 的变化明显: 在 $10^\circ \sim 50^\circ$ 范围内, $B_{\perp\text{opt}}$ 随 θ 的增加而近似线性增加; 而在 C、X 波段时, $B_{\perp\text{opt}}$ 随 θ 的变化较小. 图 7(d) 给出了 $B_{\perp\text{opt}}$ 关于平台高度 H 的函数, 可以看出 L 波段时最优基线随平台高度变化明显, 而在 C、X 波段时, $B_{\perp\text{opt}}$ 变化较小. L 波段时基线对性能的影响较大, 而 L 波段一般只能重轨实现, 因此实际基线应尽量接近最优基线.

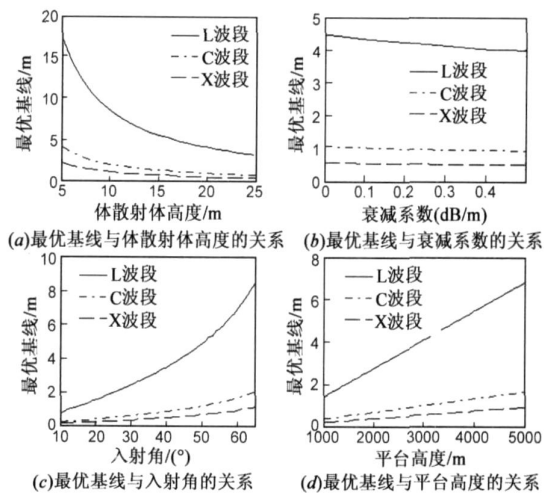


图7 系统参数、成像几何参数和体散射体参数对最优基线的影响

5 结论

针对典型应用如何选择基线是 POLinSAR 系统设计时面临的一个重要问题. 本文基于 POLinSAR 体散射参数估计中简单有效的 RVoG 模型, 分析定义并计算了 POLinSAR 的最优基线. 基于 RVoG 模型的应用主要有森林参数估计, 冰雪厚度估计等, 因此本文的最优基线计算方法适用于上述的应用. 对于 InSAR 和 POLinSAR 的 DSM 应用, 都将体散射看作标量去相干影响, 因此它们的最优基线需依据 InSAR 的方法进行. 通过实验仿真可以看出: 计算得到的最优基线具有稳定性, 若实际基线略微偏离最优基线值, 系统性能仍能保持较优, 因此具有实际适用性. 本文的分析方法和分析结论, 有助于开展 POLinSAR 数据处理和系统的研制.

致谢 感谢重点基金 No. 9140A21020106ZK1301 和实验室基金 No. 9140C1903020801 提供支持.

参考文献:

- [1] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1551- 1565.
- [2] 吴一戎, 洪文, 等. 极化干涉 SAR 的研究现状与启示[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1258- 1262.
Wu Yirong, Hong Wen, et al. The current status and implications of polarimetric SAR interferometry[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(5): 1258- 1262. (in Chinese)
- [3] Gatelli F, Guarnieri A M, et al. The wavenumber shift in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 855- 865.
- [4] Mršak V, Vanlsaric G, et al. Terrain height measurement accuracy of interferometric synthetic aperture radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(1): 219- 228.
- [5] 胡庆东, 毛士艺, 等. 干涉合成孔径雷达系统的最优基线[J]. 电子学报, 1999, 27(5): 93- 95.
Hu Qing-dong, Mao Shi-yi, et al. The optimum baseline of interferometric SAR system[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(5): 93- 95. (in Chinese)
- [6] 徐华平, 周荫清, 等. 星载干涉 SAR 中的基线问题[J]. 电子学报, 2003, 31(3): 437- 439.
Xu Huar-ping, Zhou Yin-qing, et al. The analysis of baseline in spaceborne interferometric SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(3): 437- 439. (in Chinese)
- [7] Krieger G, Papathanassiou K P, et al. Spaceborne polarimetric SAR interferometry: performance analysis and mission concepts[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005, 20: 3272- 3292.
- [8] Treuhaft R N, Siqueira P R. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar[J]. Radio Science, 2000, 35(1): 141- 177.
- [9] Cloude S R, Papathanassiou K P. Three stage inversion process for polarimetric SAR interferometry[J]. IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(3): 125- 134.
- [10] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Inverse Problems, 1998, 14(4): R1- R54.
- [11] Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry[D]. Austria: Technical University Graz, 1999.
- [12] Lee J S, Hoppel K W, et al. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(5): 1017- 1027.

作者简介:



周勇胜 男, 1982 年 5 月出生于浙江省临海市. 博士研究生. 主要研究方向为极化干涉 SAR 机理、机制与植被信息提取等.
E mail: zhyosh@gmail.com



曹 芳 女, 1980 年 1 月出生于湖南省冷水江市. 现为中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室助理研究员. 主要研究领域为极化 SAR 处理、地物分类、极化散射模型和极化干涉 SAR 研究. 她于 2005 年获得由 IEEE 国际地理学与遥感协会颁发的学生论文竞赛奖, 并于 2007 年获中国科学院院长奖学金.
E mail: sntuotuo@gmail.com



洪 文 女, 1968 年 6 月出生于陕西省西安市. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室研究员、博士生导师. 主要研究领域为雷达信号处理理论、合成孔径雷达成像算法、微波遥感图像理解及其应用等.
E mail: whong@mail.ie.ac.cn



吴一戎 男, 1963 年 7 月生于北京. 中国科学院院士、中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室研究员、博士生导师. 主要研究领域为微波成像、信号与信息的处理和应
E mail: wyr@mail.ie.ac.cn



王彦平 男, 1976 年 2 月生于山东. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室副研究员. 主要研究领域为干涉 SAR 数据处理与定标、干涉 SAR 新技术新体制、极化干涉 SAR 数据处理与信息提取.
E mail: ypwang@mail.ie.ac.cn