

引 用 格 式: Feng Qi, Chen Erxue, Li Zengyuan, *et al.* Forest Height Estimation from Airborne X-band Single-pass InSAR Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(3): 551-557. [冯琦, 陈尔学, 李增元, 等. 机载 X-波段双天线 InSAR 数据森林树高估测方法[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 551-557.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.3.0551

机载 X-波段双天线 InSAR 数据森林树高估测方法

冯 琦^{1,2}, 陈尔学^{1,2}, 李增元^{1,2}, 李 兰^{1,2}, 赵 磊^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091;

2. 国家林业局遥感与信息技术重点开放性实验室, 北京 100091)

摘要:短波长的干涉合成孔径雷达(InSAR)适用于数字表面模型(DSM)提取,但难以提取准确的林下地相位,在缺乏高精度数字高程模型(DEM)的森林区域,短波长 InSAR 数据估测树高的能力受到限制。针对这一问题,采用机载 X-波段单极化(HH)双天线 InSAR 数据开展了森林树高估测方法研究。双天线 InSAR 可以忽略时间去相干的影响,并且 X-波段波长较短,入射角较大(中心入射角 45.77°),地表对干涉去相干的贡献可以忽略,因此可将干涉复相干作为体去相干,对体去相干模型中的结构函数进行勒让德展开,截取第 0 阶展开式得到了基于相干幅度的森林树高估测模型,利用均匀选取的 LiDAR 冠层高度模型(CHM)检验样本对估测结果进行严格的精度评价,并与差分法的树高估测结果进行对比。精度评价结果显示:相干幅度法与差分法都得到了较高的估测精度,两者的 R^2 、RMSE、总精度分别为 0.81、0.86;1.20 m、0.97 m;86.4%、88.7%。研究结果表明:相干幅度与森林树高具有负相关关系,适用于估测树高,基于单极化相干幅度的估测模型也可以得到较高的估测精度,与差分法的估测结果相比,虽然估测精度略有降低,但此方法具有两方面的优势:一方面,估测结果不需要实测样地数据标定,对于没有实测样地数据的森林区域亦能进行高精度的树高估测;另一方面,相干幅度法不需要高精度的 DEM,具有更强的实用性。

关 键 词:机载 SAR;X-波段;双天线;树高;SINC 模型

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)03-0551-07

1 引 言

森林树高作为重要的森林垂直结构参数,是估测森林地上生物量(AGB)进而估测森林碳储量的重要因子。InSAR 技术已经日渐应用于森林树高的估测,按波长可分为长波长 InSAR 与短波长 InSAR。长波长 InSAR 数据通常需要通过重轨获取,难以避免时间去相干的影响,并且长波长穿透性较强,不采用极化干涉 SAR 测量模式往往难以得到理想的冠层相位中心高度。相比较而言,短波

长双天线模式 InSAR 则凸显出一些优势:①无时间去相干,干涉相干主要由地表和植被本身引起,具有潜在的森林参数估测能力;②波长较短,可以认为干涉相位高度位于树冠顶部,InSAR 测量的 DSM 代表了冠层高度。目前国内外 X-波段无时间基线 InSAR 观测系统主要包括多个国家都已拥有的机载双天线 InSAR 系统(包括本文所采用的中国测绘科学研究院牵头研制的机载多波段多极化干涉 SAR(CASMSAR)系统)和德国的 TanDEM-X 卫星。

收稿日期:2015-04-17;修订日期:2016-04-06

基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)“高分林业遥感应用示范系统”(21-Y30B05-9001-13/15-1);国家 973 计划项目“复杂地表遥感信息动态分析与建模”(2013CB733404)。

作者简介:冯 琦(1987—),男,山东临沂人,博士研究生,主要从事 SAR 森林参数估测研究。E-mail:fengqi19872005@163.com。

通讯作者:陈尔学(1968—),男,山东菏泽人,博士,研究员,主要从事雷达应用技术研究。E-mail:chenrx@caf.ac.cn。

目前国内外学者已针对 TanDEM-X 数据开展了森林树高估测方法研究,其中最为常用的方法有两类:一类为基于结构函数假设的估测法,通过体去相干模型^[1-4]或者基于双层模型估测森林树高^[5-6],但此两种方法需要已知的高精度的 DEM 估测地相位;另一类方法为基于无结构函数假设的估测法,通常利用干涉相位得到 DSM,进而通过已知的高精度 DEM 得到树高^[7-9]。

以上研究反映了 TanDEM-X 估测树高的潜力,同时也反映出存在的问题,即由于 X-波段难以探测地相位,不论是基于结构函数假设的估测法还是无结构函数假设的估测法,只要涉及到地相位,都必须借助已知的高精度 DEM,难以应用于缺乏高精度 DEM 的森林区域。因此,在忽略地相位的情况下,利用相干幅度信息估测森林树高成为重要途径,具有更高的实际应用价值。

Cloude 等^[10]就这一方法开展了相关研究,其通过勒让德展开式第 0 阶得到 SINC 模型,利用相干幅度得到了树高估测结果,但所用的相干幅度是通过 TanDEM-X 双极化优化得到,对于单极化相干幅

度能否得到高精度的估测结果尚没有进行研究,并且文中基于林分尺度验证方法不够严格,验证结果缺乏说服力。

因此,本文针对上述问题进行进一步研究,一方面,提取单极化 InSAR 相干幅度比提取双极化优化相干幅度更为简单易行,但利用单极化相干幅度能否有效地估测树高尚不可知;并且,针对这种树高估测法,尚未有基于机载短波长 InSAR 数据相关报道。本文将研究机载 X-波段 HH 极化双天线 InSAR 数据树高估测方法,并与差分法进行对比,评价模型性能;另一方面,为使模型精度的评价更有说服力,本文将以 LiDAR CHM 为验证数据,在实验区均匀选取样本,对模型精度进行严格验证。

2 实验区及数据

2.1 实验区概况

实验区位于内蒙古依根农林交错区,如图 1 所示,中心经纬度坐标为 $50^{\circ}2'35.2''\text{N}$, $120^{\circ}6'14.64''\text{E}$,地面平均高程 650 m,地势起伏相对平缓。实验区主要树种为白桦 *Betula platyphylla* Suk。

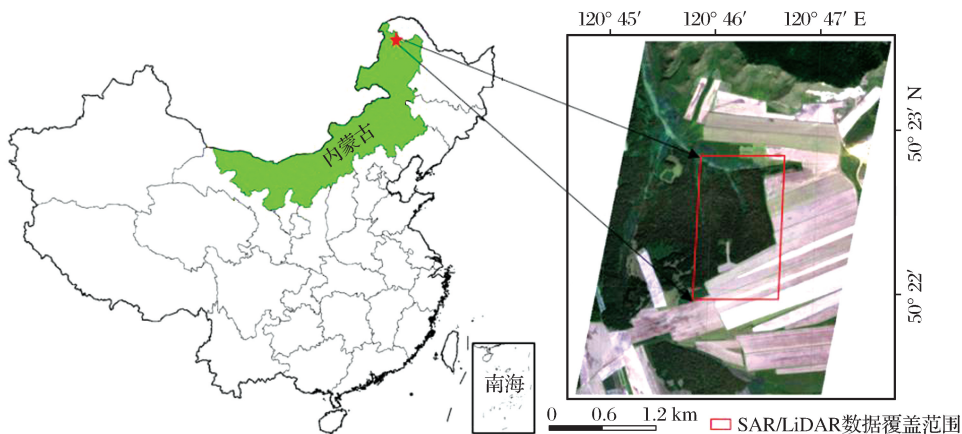


图 1 实验区位置及数据覆盖范围

Fig.1 The location of test site and the coverage area of SAR/LiDAR data

2012 年 8~9 月、2013 年 9 月分别在此实验区开展了机载 LiDAR、机载 SAR 飞行试验,红色四边形区域为机载 LiDAR、机载 SAR 数据覆盖范围。

2.2 机载 LiDAR 数据获取与处理

2012 年 8~9 月在实验区开展了机载 LiDAR 飞行试验,以“运-5”飞机为平台,载有 Leica 机载雷达系统,获取了 LiDAR 点云数据,激光点云密度为平均 5.6 个/ m^2 ,波长为 1 550 nm。

根据庞勇等^[11]的方法,基于 LiDAR 点云数据提取了实验区高精度的 DSM(图 2)和 DEM(图 3),空间分辨率为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,并由两者之差得到了

CHM,CHM 为分辨单元内最大高度,即冠层顶部高度^[12]。一些激光点可能来自林冠下层的灌丛等低矮植被或者来自林冠上层物体的反射,对树高的反演造成一定的影响,鉴于研究区树高分布特点,本文对大于 30 m 和小于 1.5 m 的点进行了剔除,最终得到的 CHM 如图 4 所示。

2.3 机载 SAR 数据获取与预处理

2013 年 9 月 13~16 日在实验区开展了机载 SAR 飞行试验,利用中国测绘科学研究院牵头研制的机载多波段多极化干涉 SAR(CASMSAR)系统获取了 X-波段 HH 极化双天线 InSAR 数据,以“奖

状Ⅱ”为飞行平台,飞行高度为 5 807 m,飞行航向由西向东,右视方向观测,成像数据为单视复数据(SLC),波长为 0.03 m,方位向分辨率为 0.35 m,距离向分辨率为 0.25 m,中心入射角为 45.77°。

InSAR 数据预处理是提取高质量的相干幅度、干涉相位关键因素,主要包括主辅影像的配准、干涉图生成、基线估计、平地效应去除、相干性估计和相位解缠等步骤,具体流程如图 5 所示。

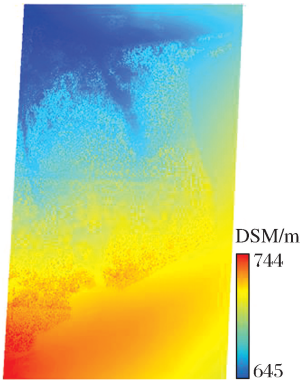


图 2 LiDAR DSM
Fig.2 LiDAR DSM

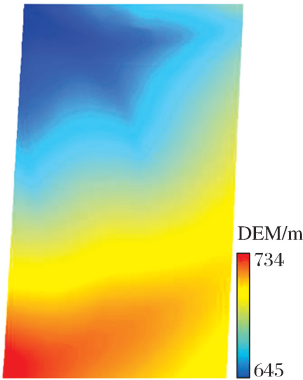


图 3 LiDAR DEM
Fig.3 LiDAR DEM

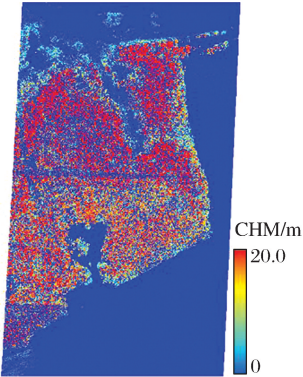


图 4 LiDAR CHM
Fig.4 LiDAR CHM

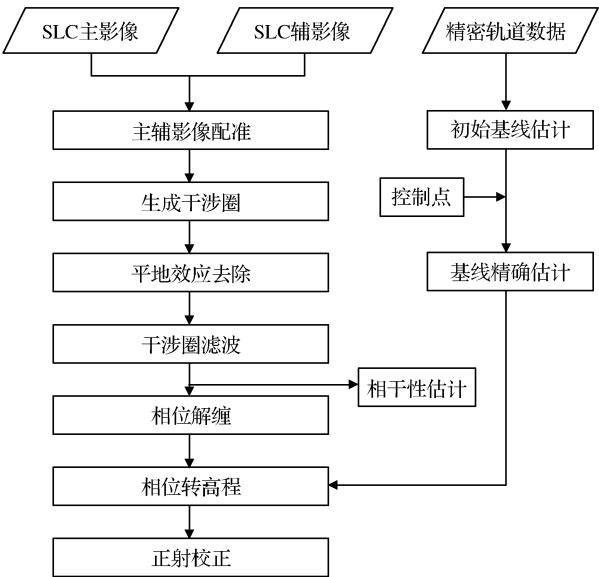


图 5 干涉处理流程图
Fig.5 Processing flowchart of InSAR

3 估测模型与精度检验方法

3.1 估测模型

总的干涉相干通常由以下几项去相干组成,如式(1)所示:

$$|\gamma| = \gamma_n \gamma_t \gamma_{proc} \gamma_B \gamma_v \tag{1}$$

其中: γ_n 表示噪声去相干; γ_t 表示两次采集时,由散射体的变化引起的去相干,称为时间去相干; γ_{proc} 表示数据处理误差引起的去相关,如配准误差等; γ_B 称为基线去相干,表示两次采集时,由几何参数的差异引起的去相干,如入射角等; γ_v 是由分辨单元内垂直方向的散射体的分布引起两次采集时散射发生差异,从而产生去相干,称为体去相关。

在这几项去相干中, γ_n 、 γ_B 可在预处理时通过滤波等方法改善, γ_{proc} 可以由精配准获得最大程度的补偿,对于双天线 InSAR 数据, γ_t 可以忽略。

随机体—地表散射(RVoG)模型(式(2))能够较好地反映出植被结构参数和简化散射过程的复杂度,是极化干涉 SAR 估测树高最为常用的模型,其包含了地面散射和体散射两部分。由于X-波段由于穿透能力弱,并且入射角较大,难于探测到地表,可以合理地假设地表贡献为0,则地体散射比 $\mu=0$,这时根据 RVoG 模型,可以认为体去相干近似等于总去相干。

$$\gamma = e^{j\varphi_0} \left[\gamma_v + \frac{\mu}{1 + \mu} (1 - \gamma_v) \right] \tag{2}$$

其中: γ 为总去相干, μ 为地体散射比, φ_0 为地形相位。

如果森林垂直方向上随高度变化的相对反射率用函数 $f(z')$ 表示,则:

$$S_1 S_2^* = \int_{Z_0}^{Z_0+h} f(z') e^{jk_z z'} dz' \quad (3)$$

其中: S_1 和 S_2 是基线两端的复信号。 Z_0 是林层下

$$\gamma_v = e^{jk_z z_0} \frac{\int_0^h f(z) e^{jk_z z} dz}{\int_0^h f(z) dz} \xrightarrow{Z_L = \frac{2Z}{h_v} - 1} e^{jk_z z_0} e^{j \frac{k_z h}{2}} \frac{\int_{-1}^1 (1 + f(z_L)) e^{j \frac{k_z h}{2} Z_L} dZ_L}{\int_{-1}^1 (1 + f(Z_L)) dZ_L} \quad (5)$$

对 $f(z_L)$ 进行勒让德展开,即:

$$f(Z_L) = \sum_n a_n P_n(Z_L) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v &= e^{jk_z z_0} e^{jk_v} \frac{\int_{-1}^1 (1 + \sum_n a_n P_n(Z_L)) e^{jk_v Z_L} dZ_L}{\int_{-1}^1 (1 + \sum_n a_n P_n(z_L)) dZ_L} \\ &= e^{jk_z z_0} e^{jk_v} \frac{(1 + a_0) \int_{-1}^1 e^{jk_v Z_L} dZ_L + a_1 \int_{-1}^1 P_1(Z_L) e^{jk_v Z_L} dZ_L + a_2 \int_{-1}^1 P_2(Z_L) e^{jk_v Z_L} dZ_L + \dots}{(1 + a_0) \int_{-1}^1 dZ_L + a_1 \int_{-1}^1 P_1(Z_L) dZ_L + a_2 \int_{-1}^1 P_2(Z_L) dZ_L + \dots} \\ &= e^{jk_z z_0} e^{jk_v} \frac{(1 + a_0) f_0 + a_1 f_1 + a_2 f_2 + \dots}{(1 + a_0)} \\ &= e^{jk_z z_0} e^{jk_v} (f_0 + a_{10} f_1 + a_{20} f_2 + \dots) \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $a_{i0} = \frac{a_i}{1 + a_0}$, $k_v = \frac{k_z h}{2}$ 。

截取第 0 阶展开式得到式(9):

$$\gamma_v = e^{jk_z z_0} e^{jk_v} f_0 = e^{jk_z z_0} e^{j \frac{1}{2} k_z h} \frac{\text{sinc}\left(\frac{1}{2} k_z h\right)}{\frac{1}{2} k_z h} \quad (9)$$

其中:

$$f_0 = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 e^{jk_v Z_L} dZ_L = \frac{\sin(k_v)}{k_v} \quad (10)$$

对式(9)两边取模,则得到相干幅度与树高的关系(式(11)),进而得到树高估测模型,如式(12)所示:

$$|\gamma_v| = \frac{\text{sinc}\left(\frac{1}{2} k_z h\right)}{\frac{1}{2} k_z h} \quad (11)$$

$$h = \frac{2 \text{sinc}^{-1}(|\gamma_v|)}{k_z} = \frac{2\pi(1 - 2 \text{asin}(|\gamma_v|^{0.8})/\pi)}{k_z} \quad (12)$$

其中:

$$|\gamma_v| = \frac{\langle |s_1 s_2^* e^{-j\varphi_0}| \rangle}{\sqrt{\langle |s_1|^2 \rangle \langle |s_2|^2 \rangle}} \quad (13)$$

其中: $|\gamma_v|$ 为相干幅度, φ_0 为地形相位, $|*|$ 表示

地面的高度, h 是分辨单元内树的平均高,对积分范围做变换,设 $Z = Z' - Z_0$,则有式(4):

$$S_1 S_2^* = e^{jk_z z_0} \int_0^h f(z) e^{jk_z z} dz \quad (4)$$

相应的体去相干表达式为:

$$a_n = \frac{2n+1}{2} \int_{-1}^1 f(z_L) P_n(z_L) dz' \quad (7)$$

则体去相干表达式变换为式(8):

取模, $\langle * \rangle$ 表示取平均。

k_z 为有效波束,其表达式如式(14)所示:

$$k_z = n \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta\theta}{\sin\theta} \approx n \frac{2\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \sin\theta} \quad (14)$$

本研究所用的 InSAR 数据获取模式为双天线模式, $n=1$,则:

$$k_z = \frac{2\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin\theta} \quad (15)$$

3.2 精度检验方法

以往研究中,多以少量的实测样地数据或者采用大尺度的林分平均高对森林树高的估测结果进行验证,但此验证方法不够严谨。为使本文的精度检验更具说服力,将 2.2 节得到的 LiDAR CHM 作为验证数据,CHM 代表每个分辨单元的冠层顶部高度,在整个实验区内均匀选取精度检验样本,样本分布如图 6 所示,共选取了 159 个样本,红色点代表样本中心点,样本大小为 60 m×60 m,每个样本值为样本内所有高度值大于 0 的分辨单元的算术平均高。

4 实验结果与分析

图 7 为式(13)得到的相干幅度,由于没有时间

去相干的影响,相干幅度值较高,其统计分布如图 9 所示,与 LiDAR CHM(图 8)比较可以看出,相干幅度与树高呈负相关关系,树高越高,相干性越低,两者的相关性如图 10 所示, R^2 为 0.75,表明相干幅度具有估测树高的潜力。

基于估测模型(式(12))得到了估测树高分布图(图 11(a)),比较图 11(a)和图 8 可以看出,估测结果与 LiDAR CHM 具有很好的一致性,体现出了此方法的有效性。为对估测结果进行严格的定量评价,

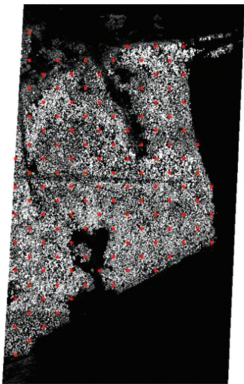


图 6 检验样本分布图

Fig.6 Distribution of test samples

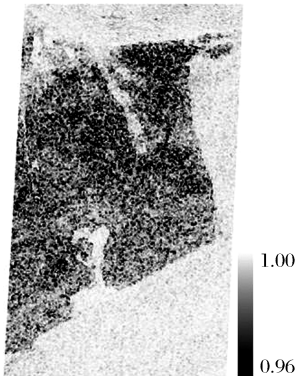


图 7 相干幅度
Fig.7 Coherence

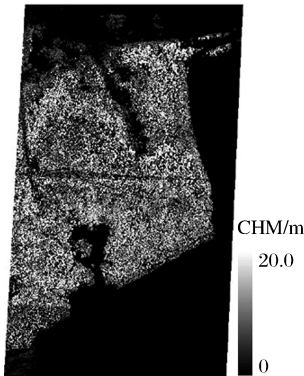


图 8 LiDAR CHM
Fig.8 LiDAR CHM

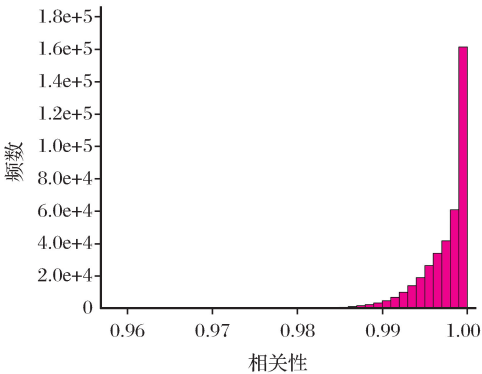


图 9 相干幅度统计直方图
Fig.9 Histogram of coherence

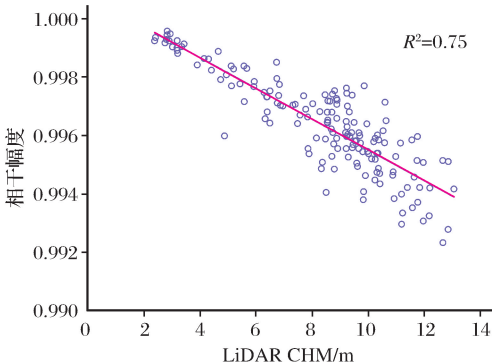


图 10 相干幅度与 LiDAR CHM 相关性
Fig.10 Correlation between coherence and LiDAR CHM

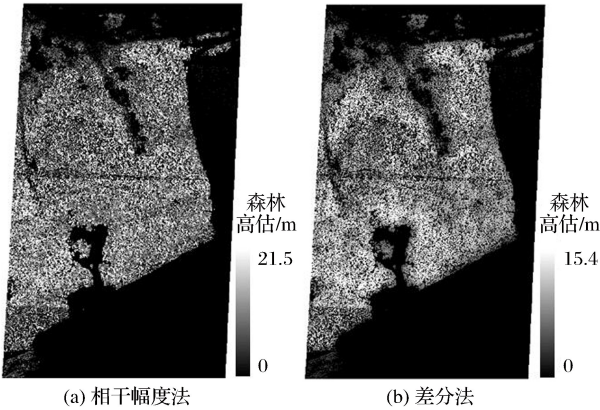


图 11 森林树高估测结果
Fig.11 Estimated forest height

利用均匀选取的检验样本进行精度检验,精度检验结果如图 12(a)所示, R^2 为 0.81, RMSE 为 1.20m,总精度为 86.4%,可以看出,样本点分布在 1:1 线上,表明估测得到的高度可作为实际树高,不需要实测树高进行标定。

为评价相干幅度法的性能,本文将此估测方法与差分法进行了对比,利用差分法估测树高是指基于干涉相位得到的 DSM 与已知 LiDAR DEM 作

差,从而得到树高,估测结果如图 11(b)所示,利用相同的检验样本进行精度评价(图 12(b)), R^2 为 0.86, RMSE 为 2.74 m,总精度为 68.2%,由图 12(b)可以看出,估测结果总体偏低,这是由于验证样本值为冠层顶部高度的算术平均高,而实验区内

树高偏低,密度偏小,X-波段呈现出了一定的穿透性,因此,相位中心低于冠层顶部高度。利用样本对估测结果进行标定,标定后与 LiDAR CHM 的关系如图 12(c)所示, R^2 为 0.86, RMSE 为 0.97 m,总精度为 88.7%,精度有大幅度提高。

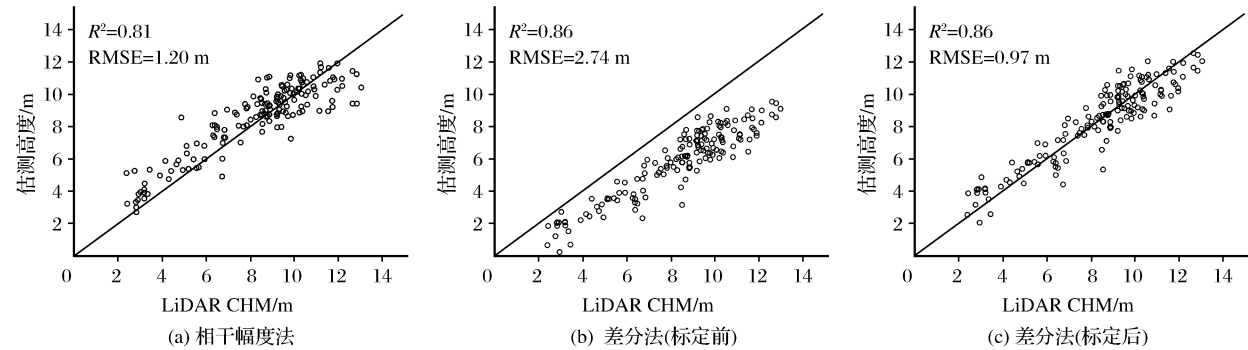


图 12 森林树高估测精度评价

Fig.12 Precision evaluation of estimated forest height

相干幅度法与差分法都得到了较高的估测精度,前者的估测精度稍低于后者(图 12(a)、(c)),但后者需要已知的高精度 DEM,并且由于微波的穿透性相位中心偏低,估测结果还需要实测数据标定,而前者的估测树高不需要实测数据标定,也不需要已知的高精度 DEM,相比而言,相干幅度法更具有推广性。

5 结 语

本文基于机载 X-波段 HH 极化的双天线 In-SAR 数据研究了森林树高估测方法,对体去相干模型中的结构函数进行勒让德展开,得到了基于相干幅度的森林树高估测模型,利用均匀选取的 LiDAR CHM 检验样本对估测树高进行了精度检验,并将相干幅度法与差分法的估测结果进行了对比。

研究表明,相干幅度与森林树高具有负相关关系,适用于估测树高,基于单极化相干幅度的估测模型也可以得到较高的估测精度,与差分法的估测结果相比,虽然估测精度略有降低,但此方法具有两方面的优势:一方面,估测结果不需要实测样地数据标定,对于没有实测样地数据的森林区域亦能进行高精度的树高估测;另一方面,相干幅度法不需要高精度的 DEM,具有更强的实用性。

本文针对我国东北大兴安岭林区森林研究了基于 InSAR 相干幅度估测森林树高的方法。大兴安岭林区森林相对较稀疏,树高较低,地形起伏较缓,该方法在这类区域较为适用;但在亚热带、热带林

区,森林茂密,垂直结构复杂,并且地形比较复杂,相干幅度法是否仍然适用尚有待进一步研究。

参考文献 (References):

[1] Praks J, Hallikainen M, Antropov O, *et al.* Boreal Forest Tree Height Estimation from Nterferometric Tandem-X Images [C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012:1262-1265.

[2] Kuglerl F, Sauerl S, Seung-Kuk L, *et al.* Potential of TanDEM-X for Forest Parameter Estimation[C]//Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010 8th European Conference on, 2010:1-4.

[3] Kugler F, Hajnsek I. Forest Characterisation by Means of TerraSAR-X and TanDEM-X (Polarimetric and) Interferometric Data[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011:2578-2581.

[4] Kugler F, Schulze D, Hajnsek I, *et al.* TanDEM-X Pol-InSAR Performance for Forest Height Estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6404-6422.

[5] Soja M J, Ulander L M H. Two-level Forest Model Inversion of Interferometric TanDEM-X Data[C]//EUSAR 2014, 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2014:1-4.

[6] Jerzy S M, Persson H, Ulander L M H. Estimation of Forest Height and Canopy Density from a Single InSAR Correlation Coefficient[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(3): 646-650.

[7] Jerzy Soja M, Ulander L M H. Digital Canopy Model Estimation from TanDEM-X Interferometry Using High-resolution LiDAR DEM [C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013:165-168.

[8] Sadeghi Y, St-Onge B, Leblon B, *et al.* Mapping Forest Cano-

py Height Using TanDEM-X Dsm and Airborne LiDAR DTM[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS),2014:76-79.

[9] Solberg S,Weydahl D J,Astrup R.Temporal Stability of X-Band Single-pass InSAR Heights in a Spruce Forest: Effects of Acquisition Properties and Season[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2015,53(3):1607-1614.

[10] Cloude S R,Chen H,Goodenough D G.Forest Height Estimation and Validation Using Tandem-X PolInSAR[C]//2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS),2013:1889-1892.

[11] Pang Yong,Zhao Feng,Li Zengyuan,*et al.* Forest Height Inversion Using Airborne LiDAR Technology[J].Journal of Remote Sensing,2008,12(1):152-158.[庞勇,赵峰,李增元,等.机载激光雷达平均树高提取研究[J].遥感学报,2008,12(1):152-158.]

[12] Li Wenjuan,Zhao Chuanyan,Bie Qing,*et al.* Retrieval of the Forest Structural Parameters Using Airborne LiDAR Data [J].Remote Sensing Technology and Application,2015,30(5):917-924.[李文娟,赵传燕,别强,等.基于机载激光雷达数据的森林结构参数反演[J].遥感技术与应用,2015,30(5):917-924.]

Forest Height Estimation from Airborne X-band Single-pass InSAR Data

Feng Qi^{1,2},Chen Erxue^{1,2},Li Zengyuan^{1,2},Li Lan^{1,2},Zhao Lei^{1,2}

(1.*Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry,Beijing 100091,China*;
2.*Remote Sensing and Information Technology,State Forestry Administration Key Lab,Beijing 100091,China*)

Abstract: The ground topography of forestry areas is difficult to derive based on short wavelength InSAR data for it is more applicable to estimate Digital Surface Model (DSM).The tree height estimation based on short wavelength InSAR data is restricted without high precision Digital Elevation Model (DEM).To address the problem,The X-band HH polarization single-pass InSAR data was used for tree height estimation.The X-band single-pass InSAR data is characterized by non-temporal decorrelation,and the surface return would be ignored.Thus the volume decorrelation equals to the interferometric coherence.The Fourier-Legendre polynomials can be used to describe the structure function of volume decorrelation term,and the zeroth-order Legendre polynomial yields a SINC function developed as the tree height estimation model,namely coherent amplitude method.The model precision was validated with LiDAR CHM data compared with the method based on phase difference.The results showed that the estimation precision of both methods were high,for the R^2 were 0.81,0.86,respectively,the RMSE were 1.20m,0.97m and the overall accuracy were 86.4%,88.7%.It can be concluded that there is a remarkable negative correlation between coherent amplitude and tree height,and the single-polarization coherent amplitude can be used to obtain a satisfactory estimation result based on coherent amplitude method.Though the estimation precision of coherent amplitude method was slightly lower compared with the method based on phase difference,there are two advantages: firstly,the estimation result of this method don't need to be calibrated,so it can be used for forest areas without true data.Secondly,it is more practical for the high precision DEM is not required.

Key words: Airborne SAR;X-band;Dual-antenna;Tree height;SINC model