

文章编号:1005-0523(2016)05-0081-07

# 基于 GNSS-R 技术的北极黄河站雪深反演研究

刘智康,安家春,冯 鱼,王泽民

(武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉 430079)

**摘要:**雪深探测在两极地区的气候和环境变化研究中有重要作用,但现有的观测手段在获取高时空分辨率的雪深资料上有较多的局限性。近年来,利用 GNSS 多路径信号反演陆地、海洋等表面信息的 GNSS-R 技术得到广泛重视。在系统分析 GNSS-R 雪深反演原理的基础上,在中国北极黄河站设计了 GNSS-R 雪深反演实验,并利用信噪比资料提取了 2015 年上半年的黄河站雪深变化情况,实验结果表明,GNSS-R 雪深反演结果与实测结果吻合很好,这表明 GNSS-R 技术可以用于极区的雪深探测。

**关键词:**GNSS-R;雪深;多路径;信噪比

中图分类号:P228.4 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.05.013

雪是水在水文循环中的一种关键储蓄形式,雪深测量对于季节性白雪覆盖的区域是一种非常重要的观测,高精度的雪深观测值配合其它手段可以用于计算当地潜在淡水资源含量,在气象学、水文学和农业研究中具有重要意义。在极地研究中,对雪深进行探测,不仅能给极地科考活动提供重要信息,更能在一定程度上揭示两极地区气候及环境变化,进而分析全球气候及环境变化。

目前,全球很多区域雪深观测资料尚不够充足,一方面由于常规的雪深测量仪器(如超声波雪深探测仪)只能对局部区域进行测量,无法开展大范围甚至全球范围内的观测,另一方面传统的遥感手段(如 MODIS 和 SAR)只能得出雪的覆盖面积,很难得出深度信息。GNSS-R (Global Navigation Satellite System Reflectometry)技术自 20 世纪 90 年代以来逐渐发展起来,逐渐成为国内外遥感探测和导航技术领域研究的热点之一<sup>[1-2]</sup>。相对于传统的雪深的观测手段,GNSS-R 具有以下优点:可采用现有的 GPS 接收机或反射信号接收机接收信号,接收机的复杂度、体积、重量和成本低。全天时、全天候,数据量大,有利于实现低成本、大范围、高时空分辨率数据采集和目标反演应用。反射信号直接携带反射面特性信息,反射信号的幅值、相位、极性和频率等参量的变化,都直接与反射面有关,具有很高的研究价值。对于一些环境相对恶劣的地区如极区、海面,GNSS-R 技术具有极大的方便性和安全性。

国外学者在南北极地区、美国、日本等设计了大量的雪深探测实验<sup>[3-9]</sup>,并取得了较好的反演结果。国内学者的相关研究工作主要是利用国外实验的数据进行了分析<sup>[10-13]</sup>。整体而言,当前用 GNSS-R 探测雪深仍处于起步阶段。在系统分析 GNSS-R 雪深反演原理的基础上,在中国北极黄河站设计了 GNSS-R 雪深反演实验,并获得了良好的反演结果。

## 1 GNSS-R 雪深探测原理

自 1993 年欧空局科学家 Martin-Neira 首次提出 GNSS 反射信号可以被利用以来<sup>[1]</sup>,GNSS-R 作为一个新的研究领域,近年来正逐渐引起国内外学术界的广泛关注。从电磁波传播基本理论出发,该反射信号中携

收稿日期:2016-04-18

基金项目:国家自然科学基金(41531069);国家海洋局南北极环境综合考察与评估专项基金(CHINARE2015-02-02)

作者简介:刘智康(1993—),男,硕士研究生,研究方向为大地测量。

通讯作者:安家春(1985—),男,博士,讲师,研究方向为大地测量与测量工程。

带着反射面的特征信息,反射信号波形的变化,极化特征的变化,幅值、相位和频率等参量的变化都直接反应了反射面的物理特性,或者说直接与反射面相关。对反射信号的精确估计和接收处理,可以实现对反射面的物理特性的估计与反演。一些研究表明,积雪深度与 GNSS 信号的多路径效应有密切关系。因此,可以通过研究 GNSS 直射和反射信号的振幅、频率等特征得出雪深信息。基于此,国内外不同学者开展了一些研究,这些研究主要分为两大类。

第一类采用传统的 GNSS 大地测量接收机所采集的数据进行研究,传统的 GNSS 大地测量接收机为了抑制多路径效应,仅有一副方向向上的右旋圆极化天线,即单天线模式。这类研究充分利用了当前已有的 GNSS 接收机资源,数据来源广。但是,由于信号在反射面反射之后在低高度角时只有部分信号极化方式发生改变,所以接收机接收到的信号既包含直射信号又包含反射信号,可以得出雪深和观测量特征值的经验关系。然而这类方法没有深究雪的内部情况和不同雪层的对信号的反射情况。Larson 等人首先于 2009 年研究了科罗拉多州春季暴风雪开始前和结束后 PBO 站采集的 GPS 信噪比观测数据。初步得出了处理后的信噪比资料与信号反射面高度存在一定关系的结论,为利用 GNSS-R 技术反演雪深奠定了基础<sup>[5]</sup>。随后,Larson 等人进一步利用 PBO 提供的野外 GPS 站分析了不同测站的雪深反演结果,GNSS-R 技术并不是在所有测站的反演效果都好,而是受到不同环境的影响<sup>[6]</sup>。2014 年 Nievinski 等人基于 GPS 多路径效应的物理正演模型,提出了一个 8 参数的统计反演模型<sup>[7-8]</sup>,对 3 种不同环境(草地、森林和高山)下的雪深进行参数估计,得出雪深估计值,并且将结果与实测数据和 SNOTEL(积雪遥测)站的数据进行对比分析。此后,北海道大学 Ozeki 利用 L4 和信噪比观测值对日本北海道 GEONET GPS 观测站数据进行了研究,得出了较好的雪深反演精度<sup>[9]</sup>。

另一类则采用专门的 GPS 反射信号接收机,这种接收机采用两副或三副天线,即多天线模式。采用两副天线的其中一副天线为方向向上的右旋圆极化天线,用于接收直射信号,另一副天线为方向向下的左旋圆极化天线,用于接收反射信号的左旋分量。采用三副天线的在前者基础上增加一副方向向下右旋圆极化天线,用于接收反射信号的右旋分量。这类方法能将直射信号和反射信号区分开来,通过分别考察直反射信号来得出雪深信息,而且能得出不同雪层的反射情况。但是这类方法必须采用专门的反射信号接收机,成本高,而且数据有限。Fabra 等学者的雪深反演方法关注的是不同深度的干雪对 GPS 信号的反射情况<sup>[4]</sup>。实验采用欧空局地球观测中心提出的多路射线单次反射模型(MRSR)反演雪深的方法,对欧空局 2009 年 12 月 20 日 8 号卫星采集 GPS-SIDS 的实验数据进行分析。该方法首先用迭代法计算各层干雪对信号造成的延迟和各层干雪对反射信号幅度产生的影响。然后对每个延迟接收到的反射信号波形进行傅里叶运算,并进行累加,可以大致得到干雪在不同深度的回应值。最后用真实数据与相同几何条件下的仿真结果(用 GPSC/A 码三角函数近似表示每层雪中的信号波形)进行对比,从而得出结论。真实实验结果和仿真结果具有很好的 consistency,这为以后的干雪研究做了基础性工作。

## 2 基于中国北极科考站的雪深反演初探

本文采用的雪深反演方法基于传统大地测量 GPS 接收机采集的信噪比(SNR, Signal-Noise-Ratio)数据。数据源为 2015 年 1 月~6 月北极黄河站上自己布设的 GPS 观测站采集的 L1 信号信噪比观测数据,接收机类型为和芯星通 UR4B0,天线类型为诺瓦泰 GNSS-750,采样率为 30 秒。黄河站位于挪威斯瓦尔巴群岛新奥尔松(Ny-Ålesund)科学城内。数据处理中选取反射信号最低入射角为 5°,测站四周 21 m 范围内地势较为平坦,故可将反射面坡度近似看作水平面来处理。图 1 为黄河站地形图。

基于传统测地型接收机获取的 GPS 信号来构建雪面的反射模型,为了数据处理方便,在该模型中,假设反射面无倾斜且暂不考虑信号在积雪中的穿透。设天线高为  $H$ ,天线中心距反射面的垂直距离为  $h$ ,卫星高度角(即入射角)为  $\theta$ 。

GPS 卫星发射的信号是右旋圆极化信号,信号在经过反射面反射之后极化方式部分发生改变,改变量与信号入射角有关系。一般地,信号入射角越小,改变量越少,即卫星在低高度角情况下,信号反射之后仍然有大部分反射信号为右旋信号,这些反射右旋信号进入 GPS 接收机后会与直射右旋信号形成干涉,从而影响到

GPS 观测质量。这也是在低卫星高度角的情况下多路径效应严重的原因。干涉现象会影响到 GPS 接收机的信噪比(SNR)观测值,使其在低卫星高度角的情况下出现严重震荡的现象,这也是利用 SNR 资料进行雪深反演的理论基础。反演流程如下:

选取某一颗卫星连续观测得到的原始信噪比(SNR)资料进行预处理,设原始信噪比资料为  $SNR(t)$ ,先将其单位由 dB 转化为比值,再固定噪声强度  $An$  恒为 0.1 Volts,此时信噪比时间序列转化为混合信号强度时间序列  $Ac(t)$ ,转换公式如下。图 2 为黄河站 2015 年 1 月 5 日 PRN20 号卫星 L1 混合信号强度时间序列。可以看出,低高度角下的信噪比观测值受到多路径影响较大,故信号震荡明显,且低高度角下的信号强度较低。

$$Ac(t) = 10^{\frac{SNR(t)}{10}} \cdot An \quad (1)$$

传统大地测量 GPS 接收机接收到的 GPS 信号是包括直射信号和反射信号的混合信号,故其混合信号强度时间序列  $Ac(t)$  中包含直射成分和反射成分。其中直射成分体现为  $Ac(t)$  的长期趋势,反射成分体现为  $Ac(t)$  的局部震荡。用一个多项式对  $Ac(t)$  拟合可以得出直射信号强度时间序列  $Ad(t)$ 。再用  $Ac(t)$  与  $Ad(t)$  做差可以得到去除长期趋势项的 SNR 资料  $dSNR$ ,在接下来的讨论中称之为差分信噪比时间序列。图 3 为黄河站 2015 年 1 月 5 日 PRN20 号卫星 L1 直射信号强度时间序列和差分信噪比时间序列。

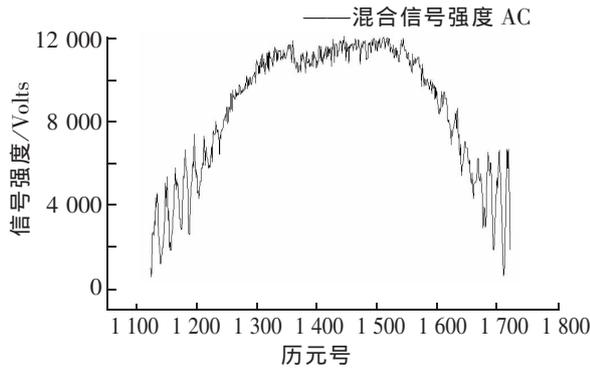


图 2 2015 年 1 月 5 日黄河站 20 号卫星的 L1 的混合信号强度时间序列

Fig.2 L1 Mixed-signal intensity time series of satellite 20 on January 5, 2015 at Chinese Arctic Yellow River Station



图 1 黄河站在新奥尔松城内的位置

Fig.1 Position of Chinese Arctic Yellow River Station in Ny-Ålesund

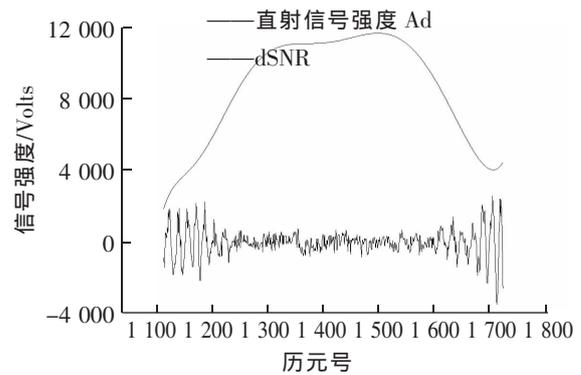


图 3 2015 年 1 月 5 日黄河站 20 号卫星的 L1 直射信号强度和 dSNR 时间序列

Fig.3 L1 Direct-signal intensity time series and dSNR time series of satellite 20 on January 5, 2015 at Chinese Arctic Yellow River Station

$dSNR$  可以看成是反射信号对总信号强度的影响,它可以由下面的余弦函数来表示

$$dSNR = A \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin E + \varphi\right) \quad (2)$$

该余弦函数的自变量为  $\sin E$ , 频率  $f = \frac{2h}{\lambda}$ , 其中  $\lambda$  为信号波长,  $E$  为卫星高度角。鉴于低卫星高度角时多路径效应显著,本实验提取卫星高度角为  $5^\circ \sim 25^\circ$  的  $dSNR$  序列来进行频谱分析。分析前需要进行下面两步数据编辑: 由于按照历元来采样的  $dSNR$  序列并非等间隔的  $\sin E$  的函数,故需要对截取的  $5^\circ \sim 25^\circ$  的  $dSNR$  序列进行重采样。本实验采用的重采样方法为三次样条插值法,重采样周期为 0.001,插值后得出对应卫星高

度角区间的等间隔的  $dSNR$  序列。 为进行频谱分析, 还需要对处于下降阶段的卫星的  $dSNR$  序列按照  $\sin E$  升序作倒序处理。 最终可获得用于频谱分析的  $dSNR$  序列。

对  $dSNR$  序列进行频谱分析可得出主频信号频率  $f$ 。 本次实验采用快速傅里叶变换法进行频谱分析。 又  $H=h+h'$  ( $H$  取 1.7 m), 其中  $h'$  为雪深, 故有

$$h' = H - \frac{f\lambda}{2} \quad (3)$$

至此, 可以实现雪深的反演。

图 4 三幅图依次表示黄河站 2015 年 1 月 5 日, 3 月 1 日和 4 月 30 日 PRN20 号卫星高度角  $5^\circ \sim 25^\circ$  的 L1 信号的  $dSNR$  序列。 由于低卫星高度角时多路径效应显著, 故提取低卫星高度角的  $dSNR$  序列来分析。 图 5 三幅图依次表示黄河站 2015 年 1 月 5 日, 3 月 1 日和 4 月 30 日 PRN20 号卫星高度角为  $5^\circ \sim 25^\circ$  的 L1 信号  $dSNR$  序列频谱图。 其中 4 月 30 日积雪最多, 3 月 1 日次之, 1 月 5 日最少。 可见, 不同雪深对应的主频信号有较大差异, 雪深与主频信号频率负相关。

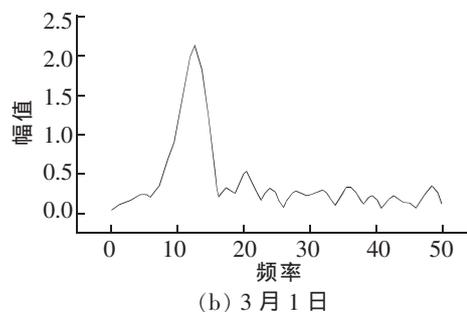
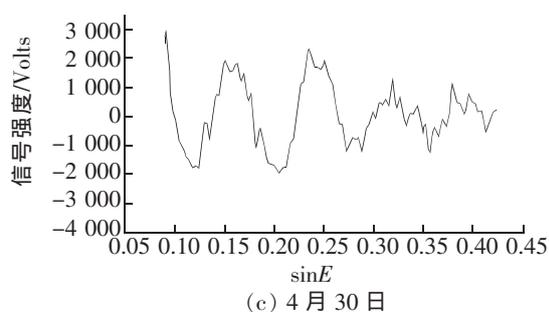
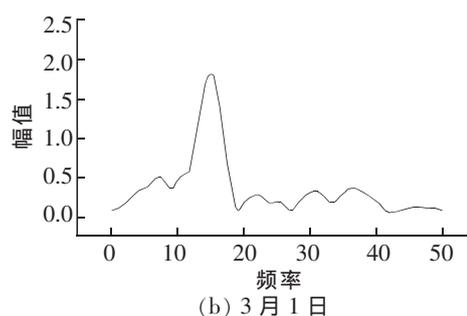
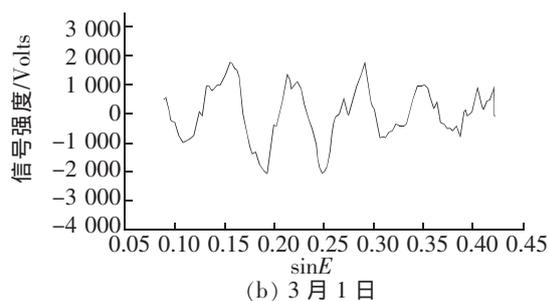
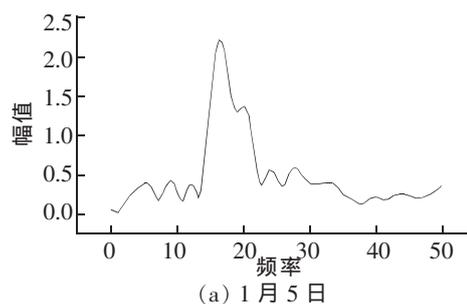
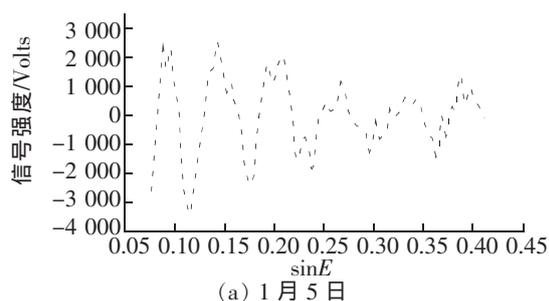


图 4 黄河站 2015 年 1 月 5 日, 3 月 1 日和 4 月 30 日 PRN20 号卫星高度角  $5^\circ \sim 25^\circ$  的 L1 信号的  $dSNR$  序列  
Fig.4 L1  $dSNR$  time series of satellite 20 at Chinese Arctic Yellow River Station on January 5, March 1 and April 30, 2015 with the elevation angle varying from  $5^\circ \sim 25^\circ$

图 5 黄河站 2015 年 1 月 5 日, 3 月 1 日和 4 月 30 日 PRN20 号卫星高度角  $5^\circ \sim 25^\circ$  的 L1 信号的  $dSNR$  序列频谱图  
Fig.5 L1  $dSNR$  time series spectrogram of satellite 20 at Chinese Arctic Yellow River Station on

January 5, March 1 and April 30, 2015 with the elevation angle varying from  $5^\circ \sim 25^\circ$

用上述反演方法分别处理 2015 年年积日 1~161 天的 PRN05,16,20,25,30 号卫星的数据,得出 5 颗卫星各自的雪深反演结果和平均值如图 6 所示(剔除部分无效数据)。

为了验证 GNSS-R 的雪深反演结果,利用新奥尔松气象站的实测雪深资料进行对比。新奥尔松气象站建于 1974 年,提供降水、温度、雪深、风速和风向等气象参数,该气象站与黄河站距离在 2 km 之内,因此,其雪深测量结果可以作为真值,用以检验 GNSS-R 的反演结果。图 8 给出了 2015 年年积日 1~161 天的雪深实测结果。

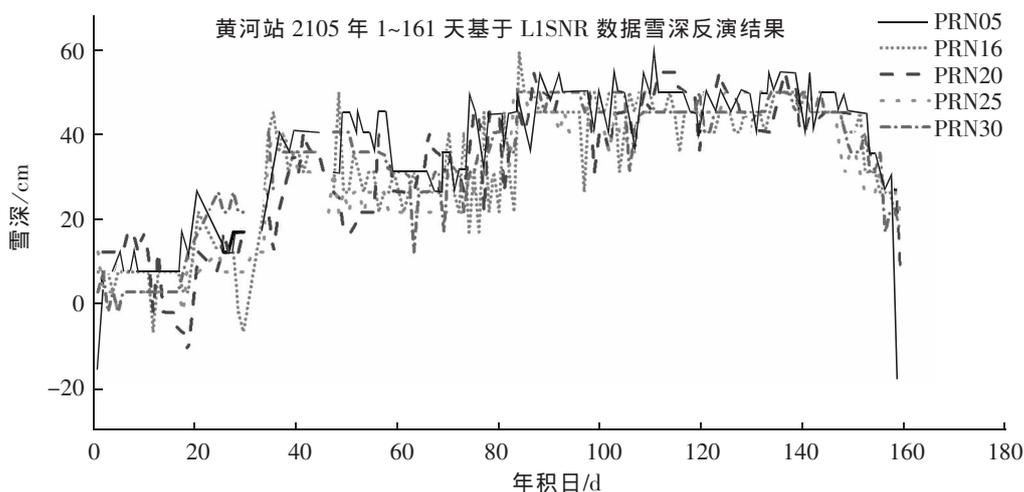


图 6 黄河站 PRN05,16,20,25 及 30 号卫星的雪深反演结果

Fig.6 Snow depth inversion results of satellite 05,16,20,25 and 30 at Chinese Arctic Yellow River Station

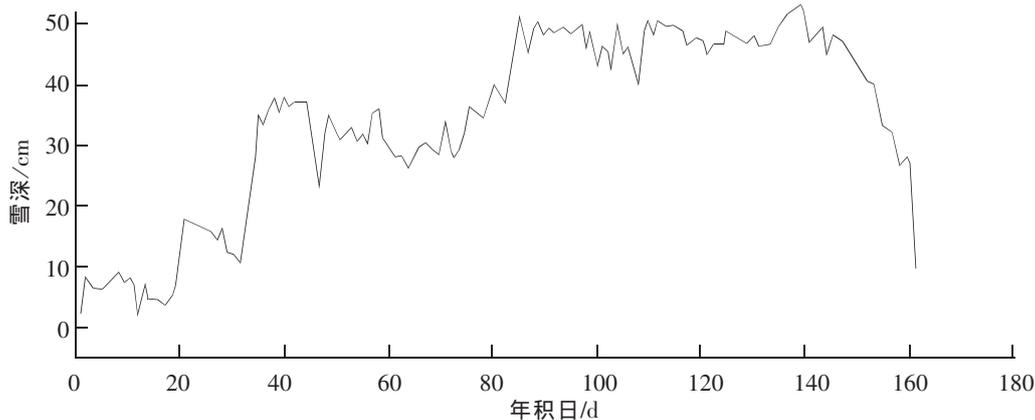


图 7 黄河站 PRN05,16,20,25 及 30 号卫星的雪深反演结果平均值

Fig.7 Average snow depth inversion results of satellite 05,16,20,25 and 30 at Chinese Arctic Yellow River Station

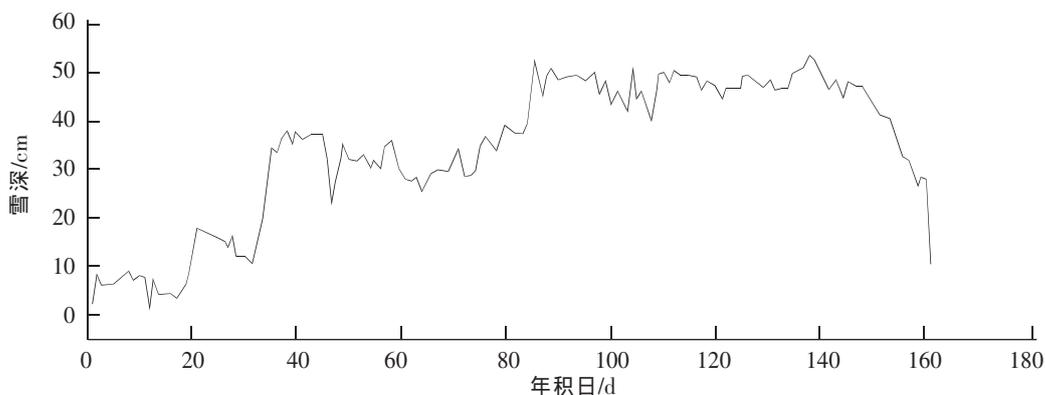


图 8 新奥尔松气象站的雪深实测结果

Fig.8 snow depth Measured results of Ny-Alesund weather station

将图6和图7的GNSS-R反演的雪深结果和图8的实测结果进行比较。从整体来看GNSS-R的反演结果,有雪期间的雪厚及其变化均准确反映了出来,但在无雪期间,由于反射面复杂,使得雪深探测结果较差。从不同卫星的反演结果来看,虽然5颗卫星均能反演出黄河站的雪深变化趋势,但是各颗卫星之间的变化量级相差较大。而多颗卫星的平均值与实测的雪深数据基本一致。因此,使用该方法时,单颗卫星的反演结果精度较低,需要多颗卫星的平均结果才能正确的表征雪厚的变化。从年积日1~161天的变化来看,反映出了1月底~3月底有几次较大的降雪过程,4月~5月的积雪深度最大但较为稳定,而6月初期间的雪深迅速减小也准确的反映了出来。

### 3 总结

本文在系统分析GNSS-R技术的基础上,利用中国北极黄河站的GPS信噪比观测资料,反演了黄河站区的雪深变化,并与实测结果进行比较,得出了较好的反演结果,初步验证了基于GNSS-R遥感技术反演雪深的可行性。基于GNSS-R遥感的雪深反演技术有独特优势和良好的应用前景,但目前国内的相关研究尚处于起步阶段,要得出更精确和准确的反演结果,仍然任重道远。

(致谢:感谢iGMAS提供的GPS观测数据,感谢国家海洋局提供的北极黄河站现场科学考察,感谢新奥尔松气象站提供的雪深资料。)

#### 参考文献:

- [1] MARTIN N M. A Passive Reflectometry and Interferometry System(PARIS): Application to Ocean Altimetry[J]. ESA, 1993, 17(4): 331-355
- [2] KOMJATHY A, MASLANIK J, ZAVOROTNY V U. Sea Ice Remote Sensing using surface reflected GPS signals[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE 2000 International, Honolulu, HI, 2000: 2855-2857.
- [3] FABRA F, CARDELLACH E, NOGUES C O, et al. Monitoring sea ice and dry snow with GNSS reflections[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IEEE-IGARSS), 2011: 3837-3840.
- [4] FABRA F, CARDELLACH E, RIUS A, et al. Phase altimetry with dual polarization GNSS-R over sea ice[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(6): 2112-2121.
- [5] LARSON K M, GUTMANN E D, ZAVOROTNY V, et al. Can we measure snow depth with GPS receivers[J]. Geographical Research Letters, 2009, 36(17): 153-159.
- [6] LARSON K M, NIEVINSKI F G. GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory[J]. GPS Solut, 2013, 17(1): 41-52.
- [7] NIEVINSKI F G, LARSON K M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation—Part I: Formulation and Simulations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6555-6563.
- [8] NIEVINSKI F G, LARSON K M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation—Part II: Application and Validation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6564-6573.
- [9] OZEKI M, HEKI K. GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases[J]. Journal of Geodesy, 2011, 86(3): 209-219.
- [10] JIN S, NAJIBI N. Sensing snow height and surface temperature variations in Greenland from GPS reflected signals[J]. Advances in Space Research, 2014, 53(11): 1623-1633.
- [11] 邵礼明, 张云, 孟婉婷, 等. 基于GNSS-R干雪深度检测的研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(17): 9-12.
- [12] 戴凯阳, 张双成, 张勤, 等. GPS信噪比用于雪深监测研究[J]. 测绘科学, 2015, 40(12): 112-115.
- [13] 刘风玲, 张云, 孟婉婷, 等. UK-DMC卫星接收机GNSS反射信号的应用分析[J]. 遥感信息, 2015(1): 90-95.

(下转第111页)

## Cross-Disciplinary Construction of Biologically Inspired Computer Communication with Metaphor Interpretations

Zheng Chenyu

(School of Journalism and Communication, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper firstly explores the motivation of constructing the biologically inspired computer communication (BICC). By introducing the concepts of primary, secondary, and tertiary colors in the color theory, the concepts of primary, secondary, and tertiary disciplines are established accordingly. Based on the deconstruction of computer communication, biologically inspired communication, and biologically inspired computing, i.e., the three secondary disciplines, a tertiary discipline of BICC is constructed with diagrammatic patterns. Finally, the paper interprets the theoretical framework, methodology, and application paradigms of BICC based on the taxonomy of biological metaphors.

**Key words:** biologically inspired computer communication; cross-disciplinary intelligence fusion; constructive and deconstructive interpretations

(责任编辑 姜红贵)

---

(上接第 86 页)

## Research on Snow Depth Inversion at Arctic Yellow River Station Based on GNSS-R Technique

Liu Zhikang, An Jiachun, Feng Yu, Wang Zemin

(Wuhan University, Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan, 430079, China)

**Abstract:** Snow depth detection plays an important role in the research of climate and environment for the polar regions. However, the existing observational approaches have many limitations in snow depth detection. In recent years, GNSS-R technology, which utilizes GNSS multipath signal to retrieve surface information on land and ocean, has attracted wide attention. In this paper, the snow depth inversion principle of GNSS-R technology is firstly analyzed. A self-designed GNSS-R snow depth inversion experiment is then carried out at Chinese Arctic Yellow River Station. Finally, the snow depth changes in the first half of 2015 are extracted by SNR data. This experimental results show that snow depth derived from GNSS-R is in good agreement with field measurements, which means GNSS-R technology can be used to obtain snow depth in polar regions.

**Key words:** GNSS-R; snow depth; multipath; SNR

(责任编辑 姜红贵)