

基于GNSS卫星反射信号的海冰厚度探测

高洪兴* 杨东凯 张波 王强 王峰
(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 为了解决近海岸海冰探测的难题, 该文针对岸基平台提出一种利用GNSS卫星反射信号进行海冰厚度探测的方法。该方法首先计算GNSS卫星反射信号和直射信号的强度比, 即反射信号相关功率和直射信号相关功率的比值; 然后根据海冰厚度的经验模型得到海冰厚度的信息。为了验证该方法的有效性, 在辽宁鲅鱼圈区进行的实验中对GNSS卫星反射信号进行了长期观测, 结果表明, GNSS卫星反射信号反演的海冰厚度值为10~20 cm, 与同比观测值之间具有很好的一致性。

关键词: GNSS卫星反射信号; 海冰厚度; 强度比; 经验模型

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1096-05

DOI: 10.11999/JEIT160765

Remote Sensing of Sea Ice Thickness with GNSS Reflected Signal

GAO Hongxing YANG Dongkai ZHANG Bo WANG Qiang WANG Feng
(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics
and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To detect the sea ice in small-scale fixed sea area, a shore-based sea ice detecting method is developed using GNSS reflected signal. Firstly, the method needs to calculate the intensity ratio of GNSS satellite reflected signal and direct signal, which is the ratio of the reflected signal correlation power and the direct signal correlation power. Then the sea ice thickness is obtained based on the empirical model. Preliminary analysis of the GNSS reflected signal collected during the sea ice experiment can obtain sea ice thickness which is 10~20 cm and shows good agreement between the GNSS-R sea ice thickness.

Key words: GNSS satellite reflected signal; Sea ice thickness; Intensity ratio; Empirical model

1 引言

海冰是冰雪圈的重要组成部分, 对海上交通运输、海洋渔业、海洋油气资源开发、海岸港口作业和全球气候变化等方面有重大的影响。随着全球温室效应的影响, 国内外对海冰的研究十分重视, 采用不同手段对海冰进行探测^[1]。

我国卫星海洋应用中心早在20世纪80年代就通过卫星遥感进行海冰分析。其中主要是通过基于可见光的遥感和基于微波遥感两种方式进行海冰探测。可见光海冰遥感中主要是根据中低分辨率光学传感器进行探测^[2], 能够得到比较直观的图像, 但是经常会受限于云、雾等自然天气的影响, 不能保证实时连续的海冰监测。微波海冰遥感主要是通过SAR(合成孔径雷达)进行探测^[3], 虽然能够保证实时

的成像, 但是在进行大范围的海冰监测时, 需要的成本较高。

GNSS-R是基于全球导航卫星系统反射信号的一种技术^[4], 该技术利用经过陆地表面、海面、探测目标反射面的GNSS导航信号, 可以进行森林覆盖、海面风场等参数的遥感测量。GNSS-R技术具有稳定的信号源, 不用发射机, 不存在近海岸盲区等优点。近年来在国内外海洋、大气和陆地遥感领域得到了广泛的应用。1993年, 欧洲空间局Martin-Neira^[5]首次提出了利用GPS信号进行海面高度测量的PARIS(PASSive Reflectometry and Interferometry System)概念, 随后又将这项技术用于探测海面高度^[6]、海面风场^[7]和土壤^[8]中的多种地球物理参数。

利用GNSS-R进行海冰探测是该领域比较新的研究方向。2000年, Komjathy等人^[9]通过计算GPS反射信号功率, 从中得到了海冰表面有效介电常数的经验值。2007年, Rivas等人^[10]通过对GPS反射信号波形进行拟合, 从中得到了海冰表面的粗糙度。

收稿日期: 2016-07-20; 改回日期: 2016-12-23; 网络出版: 2017-02-28

*通信作者: 高洪兴 gaohonghx@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(61171070)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61171070)

2012年, Fabra等人^[11]通过对GPS反射信号功率与直射信号功率的比值趋势进行拟合, 从中得到了海冰密集度变化的趋势。

国内对GNSS-R技术应用于海冰的研究尚处于起步阶段。2013年, Zhang等人^[12]通过分析欧空局在格陵兰岛收集的GPS反射信号数据, 验证了基于GPS反射信号进行海冰探测的可行性。2014年, zhang等人^[13]通过分析在天津滨海新区进行的海滨探测试验, 提出了根据GPS反射信号极化比进行海冰检测的方法。同年, 文献^[14,15]对海冰后续观测进行了论述。

海冰厚度^[16]参数反演模型和方法研究是GNSS-R海冰观测的关键问题, 这依赖于长期观测数据的积累, 岸基观测是现实可行的手段。另一方面, 岸基GNSS-R在近海探测方面具有很大的优越性, 是星载设备和岸基高频地波雷达在近海盲区很好的补充。

本文提出了利用岸基 GNSS 卫星反射信号进行海冰厚度探测的方法。接收机安装在某一固定位置, 反射天线朝向观测的海域, 通过接收 GPS 卫星直射信号和反射信号, 并计算 GPS 卫星信号的强度比(反射信号和直射信号的比值), 根据海水和海冰的强度比值差异可以对海冰进行有效的判别, 并根据强度比拟合的经验模型可以计算海冰厚度值。通过原理分析和海冰试验数据的验证, 证明了使用 GNSS 卫星反射信号进行海冰厚度探测的可行性。

2 GNSS 信号探测海冰的原理与方法

GNSS 卫星发射的直射信号极化方式为右旋圆极化, 当 GNSS 卫星直射信号入射到海面时, 经过海面发生反射, 在较高的高度角时反射回来的信号极化方式主要为左旋圆极化。在空气、海冰和海水的界面处, 电磁波的反射与入射的能量关系由菲涅尔反射系数确定。当考虑海冰的厚度时, 电磁波垂直极化和水平极化菲涅尔反射系数的表达式为^[17]

$$\mathfrak{R}_V = \frac{(\eta_V \eta_{2V} - \eta_V \eta_{1V}) \cos \alpha d + j(\eta_V^2 - \eta_{1V} \eta_{2V}) \sin \alpha d}{(\eta_V \eta_{2V} + \eta_V \eta_{1V}) \cos \alpha d + j(\eta_V^2 + \eta_{1V} \eta_{2V}) \sin \alpha d} \quad (1)$$

$$\mathfrak{R}_H = \frac{(\eta_H \eta_{2H} - \eta_H \eta_{1H}) \cos \alpha d + j(\eta_H^2 - \eta_{1H} \eta_{2H}) \sin \alpha d}{(\eta_H \eta_{2H} + \eta_H \eta_{1H}) \cos \alpha d + j(\eta_H^2 + \eta_{1H} \eta_{2H}) \sin \alpha d} \quad (2)$$

其中, η , η_1 , η_2 分别为海冰、空气和海水的波阻抗; $\alpha = \beta \cos \theta$, $\beta = 2\pi f \sqrt{\mu \varepsilon}$, μ 为磁导率, ε 为介电常数; $\theta = \arcsin(\beta_1 \sin \theta_1 / \beta)$, θ_1 为卫星高度角。

根据垂直极化和水平极化的菲涅尔反射系数可

以得到海冰的反射系数为

$$|\Gamma| = \frac{1}{2}(\mathfrak{R}_V - \mathfrak{R}_H) \quad (3)$$

式中, “V” 和 “H” 分别表示垂直线极化和水平线极化。

海水和海冰的介电常数不同, 海水的介电常数为 $\varepsilon_{se} = 80$, 海冰的介电常数为 $\varepsilon_{si} = 7$ 。GPS 卫星信号经过不同厚度的海冰(0.1~0.5 m)时反射信号的右旋分量和高度角的变化关系如图 1 所示。由图 1 可知, 海冰的反射率随着 GNSS 卫星高度角的增大而增大, 并且随着海冰厚度的增大, 其反射率会越来越小; 同时从图中可以看出当 GNSS 卫星高度角大于 40° 时, 在不同海冰厚度下, 其反射率变化趋于平稳。

GNSS 卫星信号经过海水和海冰后的反射信号与直射信号相比功率更低, 在进行后续处理前需要对反射信号进行相关积分来获得较高的增益。在 t 时刻, 接收到的直射信号相关功率为 P_d , 则反射信号的相关功率为

$$P_r = \frac{P_d}{G_d} |\Gamma|^2 |L| G_r \quad (4)$$

式中, G_d 为接收机直射天线增益, G_r 为接收机反射天线增益, $|\Gamma|$ 为海冰反射系数, $|L|$ 为海冰粗糙度, 不失一般性, 本文假设其值为 1。

岸基条件下, 闪耀区及天线足印面积远小于第 1 等延迟区大小, 很难由反射信号相关功率波形反演获得海冰信息。然而, 在岸基条件下反射信号的相关值和直射信号的相关值在海水和海冰两种状态下显著不同, 这使得利用反射信号相关功率和直射信号相关功率的比值, 即强度比可以反演海冰物理参数成为了可能。反射信号和直射信号的强度比可通过式(5)计算。

$$\gamma = P_r / P_d \quad (5)$$

将式(4)代入, 则

$$\gamma = |\Gamma|^2 G_r / G_d \quad (6)$$

由于近岸区域海冰不能充分生长, 在对海冰厚度进行探测时需要针对海冰特点建立相应的经验模型。由于当 GNSS 卫星高度角大于 40° 时海冰反射率基本不变, 所以考虑选取卫星高度角为 50° 时不同海冰厚度对反射率的影响。图 2 为不同海冰厚度和海冰强度比的关系。由图 2 可得到海冰厚度和海冰强度比存在一定的关系, 通过拟合结果得出比较理想的经验模型为

$$H_{si} = a \cdot \gamma^b + c \quad (7)$$

其中, a , b 和 c 为待定参数。

3 海冰探测实验

3.1 实验场景

综合考虑东北辽东湾海域历史海冰发生时间和结冰状况以及观测条件, 实验由2016年1月13日至3月15日于辽宁省营口市鲅鱼圈海洋站观测站(40.283°N, 122.092°E)进行。观测环境如图3所示: 观测点相对于海平面高度约为20 m, 与海岸线的水平距离约为10 m; 为了接收GPS卫星的反射信号, 反射信号天线指向观测点南偏西方向, 可观测卫星高度角范围为25°~55°, 方位角范围为180°~270°。

实验中直射信号接收采用兼容北斗/GPS的右旋宽波束天线; 为了提高反射信号强度、消除陆地反射信号对海洋反射信号的影响, 反射信号接收采用高增益(12 dB)、窄波束(38°)左旋圆极化天线。数字中频信号采用2 bit量化, 采样率为16.369 MHz。实验期间, 在采集卫星原始数据的同时收集海洋站观测的海冰厚度作为同比数据。

3.2 数据处理

数据处理软件包括数字中频信号处理和海冰厚度反演两个单元, 处理流程如图4所示。

数字中频信号处理单元针对GPS系统信号结构设计, 首先读取数字中频文件并对直射和反射信号进行分离, 并通过对直射信号的同步和反射事件几何关系获取数据位和反射信号在镜面反射点处的时

延, 求得不同时间延迟下的直射信号和反射信号在1 ms相干积分下的复相关值。为了验证数字中频信号处理单元的正确性, 图5中给出了GPS卫星反射信号的复相关值经1 s非相干累加后相关功率波形, 反射信号相关功率波形的峰值点的路径延迟公式为 $\tau = 2h \sin \theta / c$, 由图中可知 $\tau = 36.74$, 得出 h 为 21.21 m。

海冰厚度反演单元首先是计算GPS卫星反射信号的强度比, 即对波形文件中镜面反射点对应延迟(岸基条件可近似为相关功率峰值点)下复相关值按式(5)和式(6)进行序列长度为1 min 的相关功率累加平均处理, 通过式(7)获得反射信号相关值的强度比。然后根据和海洋站观测提供的同比数据经过拟合后得到的经验模型反演出海冰厚度值。

4 海冰观测数据分析

本次实验期间, 海冰的生成对观测点附近海域通行造成了一定的影响。在 GPS 反射信号有效采集时间内, 海冰经历从形成到消融的过程。实验连续采集了 GPS 卫星经过天线照射区域内的信号, 通过对数据处理得到直射信号和反射信号的相关功率。根据海水和海冰的反射信号相关功率不同, 通过计算海水和海冰的强度比 γ , 即反射信号相关功率和直射信号相关信号功率的比值。图 6 给出了(a)2015-01-13 全海冰和(b)2015-03-13 全海水两种状态

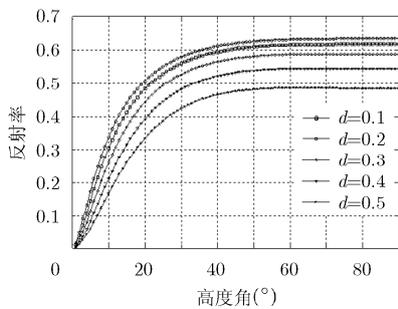


图 1 不同海冰厚度的海冰反射率和卫星高度角的关系

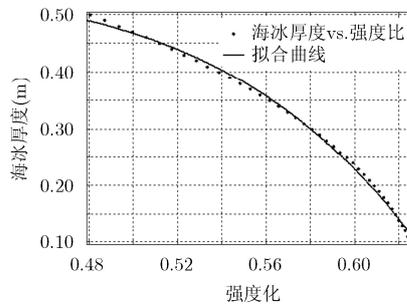


图 2 海冰强度比和海冰厚度的拟合结果



图 3 实验地点观测环境

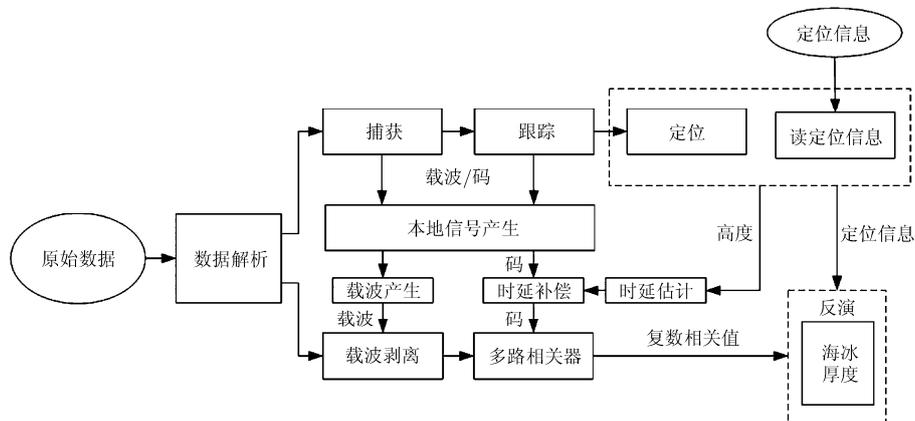


图 4 GPS 反射信号处理流程

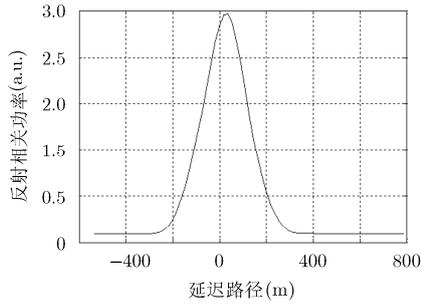
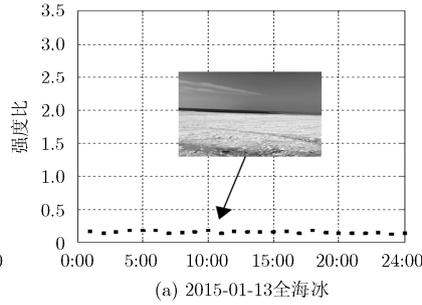
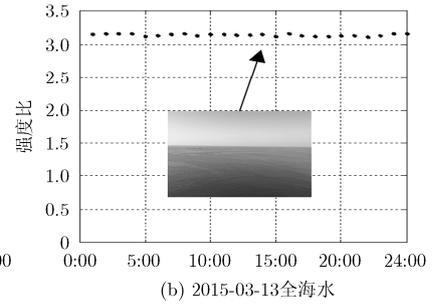


图 5 GPS 卫星反射信号相关功率波形



(a) 2015-01-13 全海冰



(b) 2015-03-13 全海水

图 6 海冰和海水的强度比

下的强度比值。从图6可知，图6(a)海冰的强度比值要小于图6(b)海水的强度比值，通过计算不同海况下的强度比值可以对海冰进行有效监测。

在实验期间，通过对采集的数据进行处理，计算出海水和海冰的强度比值，结合鲅鱼圈海洋站提供的观测海冰厚度信息，并与同比海冰厚度进行对比分析。图 7 为海冰厚度与强度比的关系。从图 7 中可知，反射信号的强度比与海冰厚度成反比例关系，即随着强度比的增大，其海冰厚逐渐变小。

如图 7 所示，反演的海冰强度比和海冰厚度观测数据之间可以采用经验模型式(7)，通过前期观测进行训练分别得到的参数值为 $a = 2.086$ ， $b = -0.021$ ， $c = -2.697$ 。

基于该经验模型及模型参数，利用海冰观测期间 GPS 反射信号强度比对海冰厚度值进行反演。图 8 为实验期间根据海冰强度比得到的海冰厚度，其厚度值为 10~20 cm。反演的海冰厚度和鲅鱼圈海洋站所提供的海冰数据具有时间一致性。

5 结束语

本文利用 GPS 卫星在岸基 GNSS-R 观测下，提出了基于 GNSS 卫星反射信号强度比的海冰厚度观测方法。并在 2016 年于营口市鲅鱼圈区进行了海冰实验，通过对实验期间采集的 GPS 反射信号数据处理，对该方法进行了验证。实验结果表明本文提出的经验模型能够有效地反演海冰厚度。

本文所提出的基于 GNSS 卫星反射信号的海冰厚度探测方法，通过合理的架设天线布局，对固定海域能够实现长期连续的观测。这为海上运输和海上作业等提供了有效、可靠的监测信息。为进一步验证本文提出的方法对利用 GNSS 卫星反射信号进行海冰探测的通用性，将在后续的海冰观测中进行多次实验，综合考虑不同海况的影响因素来对模型进行修正。文中方法同样可用于地基土壤湿度测量、岸基目标探测等领域，为 GNSS 系统在气象、海洋等方面的应用提供了理论依据和实验支撑。

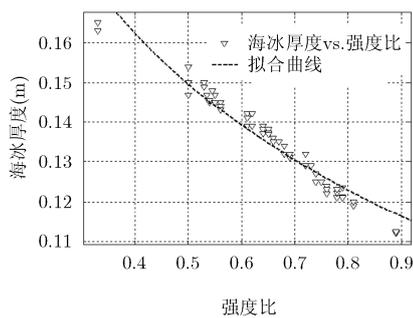


图 7 GPS 卫星反射信号强度比与海冰厚度拟合结果

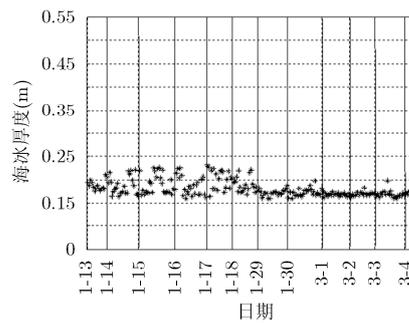


图 8 海冰厚度变化趋势

参考文献

[1] 刘良明, 刘延, 刘建强, 等. 卫星海洋遥感导论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 60-75.
LIU Liangming, LIU Yan, LIU Jianqiang, et al. An Introduction to Satellite Oceanic Remote Sensing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005: 60-75.

[2] 朱海天, 曾韬, 梁超, 等. 卫星遥感海冰监测系统在渤海海冰监测中的应用[J]. 海洋预报, 2012, 28(6): 55-59.
ZHU Haitian, ZENG Tao, LIANG Chao, et al. Satellite remote sensing of sea ice monitoring system in the Bohai Sea [J]. Marine Forecasts, 2012, 28(6): 55-59.
[3] LANG Wenhui, ZHANG Pan, WU Jie, et al. Incidence angle

- correction of SAR sea ice data based on locally linear mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(6): 3188-3199. doi: 10.1109/TGRS.2015.2513159.
- [4] 杨东凯, 丁文锐, 张其善等. 软件定义的 GNSS 反射信号接收机设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(9): 1048-1051. YANG Dongkai, DING Wenrui, ZHANG Qishan, *et al.* Software defined GNSS reflections receiver design[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(9): 1048-1051.
- [5] MARTIN-NEIRA M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, 17(4): 331-355.
- [6] ALBERTO A, ADRIANO C, HYUK P, *et al.* Retrieval of significant wave height and mean sea surface level using the GNSS-R interference pattern technique: Results from a three-month field campaign[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(6): 3198-3209. doi: 10.1109/TGRS.2014.2371540.
- [7] 周旋, 叶小敏, 于暘, 等. 基于 GNSS-R 的海面风速探测技术研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1575-1580. ZHOU Xuan, YE Xiaomin, YU Yang, *et al.* Sea surface wind speed measurement using GNSS reflection signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(7): 1575-1580.
- [8] PENG Xuefeng, CHEN Xiuwan, XIAO Han, *et al.* Estimating soil moisture content using GNSS-R technique based on statistics[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, 2015: 2004-2007.
- [9] KOMJATHY A, ZAVOROTNY V U, AXELRAD P, *et al.* GPS signal scattering from sea surface: Comparison between experimental data and theoreticcal model[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, 2000: 2855-2857.
- [10] RIVAS M B, MASLANIK J A, SONNTAG J G, *et al.* Sea ice roughness from airborne LIDAR profiles[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3032-3037. doi: 10.1109/TGRS.2006.875775.
- [11] 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. doi: 10.1109/TGRS.2011.2172797.
- [12] 张云, 郭建京, 袁国良, 等. 基于 GNSS 反射信号的海冰检测的研究[J]. 全球定位系统, 2013, 38(2): 1-6. ZHANG Yun, GUO Jianjing, YUAN Guoliang, *et al.* Sea ice study based on GNSS-R signal[J]. *GNSS World of China*, 2013, 38(2): 1-6.
- [13] ZHANG Yun, MENG Wanting, Gu Qiming, *et al.* Detection of Bohai Bay sea ice using GPS-Reflected signals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, 2015, 8(1): 39-46. doi: 10.1109/JSTARS.2014.2357894.
- [14] 杨明华, 曹云昌. 基于 GNSS-R 的后续海冰观测实验[J]. 全球定位系统, 2014, 39(4): 51-54. YANG Minghua and CAO Yunchang. The following experiment of sea ice observation using GNSS-R signals[J]. *GNSS World of China*, 2014, 39(4): 51-54.
- [15] 程朋根, 郑守住, 陈晓勇, 等. GNSS-R 技术在海冰反演中的应用[J]. 测绘工程, 2014, 23(4): 1-5. CHENG Penggen, ZHENG Shouzhu, CHEN Xiaoyong, *et al.* Application of GNSS-Reflection technology to sea-ice retrieval[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2014, 23(4): 1-5.
- [16] KALESCHKE L, TIAN X X, RICKER R, *et al.* Improved retrieval of sea ice thickness from SMOS and CRYOSAT-2 [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, 2015: 5232-5235.
- [17] 苏东林, 陈爱新, 谢树国, 等. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 434-440. SU Donglin, CHEN Aixin, XIE Shuguo, *et al.* *Electromagnetic Field and Wave*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 434-440.
- 高洪兴: 男, 1987 年生, 博士, 研究方向为卫星导航信号及其在海冰中的应用.
- 杨东凯: 男, 1972 年生, 博士, 研究方向为卫星导航信号处理及应用技术、无线传输等.
- 张波: 男, 1972 年生, 博士, 研究方向为卫星导航信号及其在模拟器的应用.
- 王强: 男, 1988 年生, 博士, 研究方向为卫星导航信号及其在风场中的应用.
- 王峰: 男, 1989 年生, 博士, 研究方向为卫星导航信号及其在海洋中的应用.