

# The Experiment and Data Analysis about Sea Ice Monitoring Base on Reflect Signal of Navigation Satellite

Wei Wang<sup>1†</sup>, Qiang Gao<sup>2</sup>, Chunxi Huang<sup>2</sup>, Tianyu Hou<sup>2</sup>, Caixia Wang<sup>2</sup>, Bingui Wu<sup>1</sup>, Yi Lin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074, China

<sup>2</sup> Meteorological Administration of Tianjin Binhai New Area, Tianjin 300480, China

<sup>†</sup>Email: wwei356@163.com

## Abstract

In order to check out the ability and the advantage of monitoring the sea ice by reflect signal of navigation satellite, authors did the experiments of sea ice observations in Hangu coast of Tianjin in February 2014. The vertical polarization signal and horizontal polarization signal firstly were received by receiver in the experiment. Afterwards, authors design a polarization index for data processing, which was merged vertical polarization information and horizontal polarization information. Finally, the methods of the polarization index and Bayes minimal error classification was used to distinguish the sea water and sea ice. As the result shown, the method can well be used to distinguish the sea water and sea ice.

**Keywords:** Reflect Signal; Sea Ice Monitor; Data Processing; Polarization Characteristic; Polarization Index

## 导航卫星反射信号海冰监测试验及数据分析\*

王炜<sup>1</sup>, 高强<sup>2</sup>, 黄纯玺<sup>2</sup>, 侯天宇<sup>2</sup>, 王彩霞<sup>2</sup>, 吴彬贵<sup>1</sup>, 林毅<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 天津市气象科学研究所, 天津 300074

<sup>2</sup> 天津市滨海新区气象局, 天津 300480

**摘要:** 为了检验导航卫星反射信号监测海冰的能力, 发挥其高时间分辨率和高空间分辨率的海冰监测优势。作者于 2014 年 2 月在天津市汉沽沿海地区开展了导航卫星反射信号的海冰观测试验。这次观测试验首次增加了反射信号的垂直极化和水平极化信息接收。作者通过建立极化指数方法在数据处理中融合了垂直极化信息和水平极化信息, 然后利用贝叶斯最小错误率分类方法区分了海冰和海水。结果表明, 用极化指数和贝叶斯最小误差分类方法区分海冰和海水的总体准确率是 90%, 中海水的准确率 100%, 海冰的准确率为。

**关键词:** 反射信号; 海冰监测; 数据处理; 极化特征; 极化指数

## 引言

在中国的环渤海地区, 每年冬季都有 1 年期海冰生成。严重的海冰会威胁环渤海地区的海洋设施和海洋经济活动<sup>[1]</sup>。因此, 海冰的观测成为海洋气象灾害预防的重要工作。目前, 卫星遥感是海冰监测的重要手段之一, 它可以获得大范围的海冰数据<sup>[2]</sup>。随着遥感新技术的发展, 欧美国家已经成功利用 GPS 反射信号监测海表面变化, 形成了海洋表面状态监测的新遥感技术<sup>[3-5]</sup>。反射信号监测海冰的工作原理就是利用航空、卫星遥感平台或地面的接收装置, 接收导航卫星发射的右旋直射信号以及经过海洋表面反射的左旋反射信号。导航卫星的右旋极化信号经过海洋表面反射后变成了左旋极化信号后, 左旋极化反射信号就包含了海洋表面的一些信息, 因此利用左旋反射信号可以提取海洋表面信息<sup>[6-7]</sup>。美国 NASA 已将 GPS 反射信号的研究计划列

\*科技兴海项目 (KJXH2012-25), 天津市气象局博士基金资助

成最有发展前途的新技术项目，并且开展了热带台风的风速观测实验，证实反射信号功率与低风速有很好的相关性<sup>[8]</sup>。为了跟踪国外的新技术，中国也开展了 GPS 反射信号监测海冰的研究工作<sup>[9-13]</sup>。但是，国内尚未开展反射信号的水平极化和垂直极化的海洋观测研究，本文将重点分析反射信号的水平极化信息和垂直极化信息处理技术分析导航卫星反射信号的海冰监测能力。

## 1 导航卫星反射信号的海冰观测站点及资料获取

### 1.1 观测站点和观测方式介绍

项目组在天津市汉沽区的渔船码头开展了导航卫星反射信号的海冰观测试验（见图 1）。观测点位于海岸线一侧向海洋方向深入约 100m（E117.96, N39.02）。项目组设计了一个 4.8m 天线架，将反射信号接收天线伸入到海面，减少多路径信号影响。直射天线和反射天线的海拔高度  $h=6.5\text{m}$ 。直射天线指向天空，反射信号以  $45^\circ$  指向海面，反信号接收天线的方位角为  $150^\circ$ 。海面在天线架方位角  $30^\circ$  至  $220^\circ$  范围内。

反射信号采集设备采用了中国科学院空间科学与应用研究中心研制的反射信号接收设备。接收设备可以接收右旋直射信号、左旋反射信号、垂直反射信号和水平反射信号 4 种信号。这也是国内首次利用垂直极化和水平极化方式开展反射信号观测试验。



图 1 天津市汉沽反射信号观测试验点

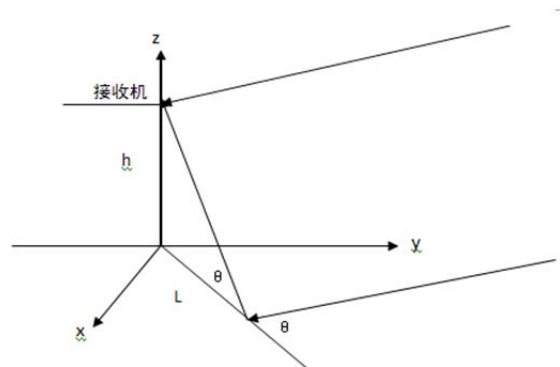


图 2 反射信号镜像点计算示意图

### 1.2 观测数据收集与预处理

本次反射信号观测资料收集于 2014 年 2 月 15 日至 21 日的渤海融冰期，采样对象分成海水和海冰 2 种类型。

每天观测数据采样分为早晨和下午 2 个时段，保证采样期间处于高潮期间。由于受到野外供电条件的影响，每个时段持续 2 个小时。接收设备的原始采样数据是电信号数据，反射信号的电信号采样数据持续 1ms，采样数据之间间隔 1min。

作者利用设备研制单位提供的数据预处理软件，将反射信号和直射信号的电信号处理为功率信号，并且计算出接收每一组数据时卫星的高度角和方位角。

## 2 反射信号海冰观测数据处理方法及其数据分析

### 2.1 导航卫星反射信号镜像点轨迹和反射点面积计算方法

#### 2.1.1 反射信号镜像点轨迹计算方法

反射信号数据分析前期工作首先要解决反射信号镜像点计算问题<sup>[17]</sup>。因为镜像点能够确定反射信号监测海面的位置。岸基反射信号观测试验的接收天线位置同卫星发射源位置相距很远，因此可以假设接收的直射信号与镜像点的入射信号平行，即卫星仰角  $\theta$  与反射角相等（如图 2）。同时，用  $h$  表示反射信号接收天线与杆下点高度，则直角三角形中天线杆的铅直投影点至镜像点的直线距离  $L$  可以用下列公式计算：

$$L=h*\text{ctg}\theta \quad (1)$$

在极坐标系中，用卫星方位角  $\alpha$  和距离  $L$  就可以确定镜像点位置。将 1 颗卫星的每个时刻镜像点绘成图，就可以取得卫星的反射点的位置图。

### 2.1.2 反射信号的反射面积计算方法

分析海冰的反射信号数据，会遇到反射信号数据空间大小的代表性问题，即反射信号数据空间分辨率。反射信号数据的空间分辨率可以用一个椭圆型的镜像点面积表示。镜像点面积表示了反射信号接收天线能够接收到的反射信号区域。在实际计算工作中，镜像点椭圆面积的长短轴分别用  $a$  和  $b$  表示，计算公式如下：

$$a=\sqrt{2hc\tau \sin \theta} / \sin^2 \theta \quad (2)$$

$$b=\sqrt{2hc\tau \sin \theta} / \sin \theta \quad (3)$$

其中， $h$  为导航卫星反射信号接收机距地面的高度， $c$  为光速， $\theta$  为卫星仰角， $\tau$  为信号脉冲长度，则镜像点的椭圆面积的大小为：

$$S=\pi ab \quad (4)$$

### 2.1.3 反射信号镜像点轨迹和镜像点面积计算分析

在本次反射信号的观测试验中，2014 年 2 月 15 日下午 16:40 到 17:10 观测区域出现了海冰。在天线方位角  $30^\circ$  至  $220^\circ$  的范围内，海面上空有 GPS 的 PRN12、PRN14、PRN25 三颗 GPS 导航星。利用 3 颗卫星的方位角数据和仰角数据，使用公式 (1) 计算出每颗卫星的每个采样时间的反射信号镜像点，并且绘制出了镜像点轨迹（如图 3a）。

由于观测试验期间是渤海的融冰期，高潮时海岸线 5m 内区域海冰覆盖度为 100%，5m 以外的区域都为海水。分析 3 颗卫星的镜像点轨迹，PRN25 卫星的镜像点位于理想的海冰覆盖区域。选取 PRN25 数据可以确保的反射信号数据代表了海冰信息。

在用公式 (2) 和公式 (3) 计算镜像点椭圆面积时，椭圆的长短轴分别选取第一菲涅尔反射点的长短轴。GPS 的  $L_1$  波段的频率是 1.575GHZ，并且反射信号功率取反射信号码片的峰值，则以上两个公式中的  $c\tau=0.19\text{m}$ 。在这些假设条件下，可以计算出了不同仰角下的镜像点面积（见表 1）。计算结果表明，在  $10^\circ$  低仰角状态下，反射信号的镜像点面积是  $257\text{m}^2$ 。随着导航卫星的仰角的升高，反射信号镜像点面积逐渐变小。当仰角高于  $65^\circ$  时，反射点镜像点面积小于  $10\text{m}^2$ 。当仰角升高到  $85^\circ$  时，镜像点面积为  $7.8\text{m}^2$ 。

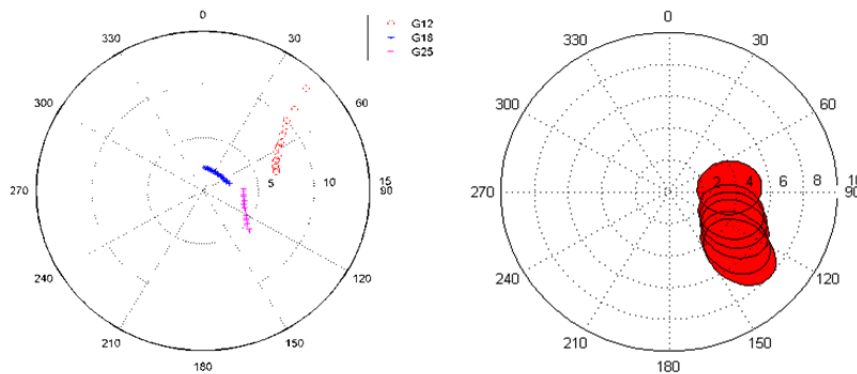


图 3 观测数据镜像反射点 (a) 和镜像反射点面积 (b)

15 日下午 GPS 的 PRN25 星采集数据的仰角值为  $49^\circ$  至  $60.9^\circ$ ，方位角值为  $132^\circ$  至  $86^\circ$ （见图 3a），卫星是由观测点的西南向西北方向运动。计算 PRN25 星的镜像点轨迹和镜像点面积，PRN25 星反射信号的镜像点海冰距离接收天线 2-8m，镜像点面积在  $10.1\text{m}^2$  到  $13.6\text{m}^2$  之间（如图 3b）。这个结果表明，PRN25 卫星可以监测到天线 2-8m 范围的海冰，每个反射点代表海冰面积在  $10\text{m}^2$  左右。数据的采样间隔可以达到

1min。因此，导航卫星反射信号数据提供的海冰信息是一种高空间分辨率观测信息。

表 1 镜像点面积与卫星仰角关系表（单位：平方米）

仰角	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
面积	257.3	115.8	66.3	43.4	31.0	23.6	18.8	15.5	13.2	11.6	10.3	9.4	8.8	8.3	8.0	7.8

## 2.2 反射信号极化指数方法建立及其数据分析

### 2.2.1 极化指数方法建立

本次观测试验的特殊性在于首次采集了反射信号的垂直极化和水平极化数据。这两种极化数据在微波遥感中常用到，但是在反射信号数据采集中却少有报道。因此，如何利用这两种数据分析海冰信息成为反射信号数据处理的重点内容。作者改进了卫星微波遥感中的极化指数方法<sup>[18]</sup>，建立了融合垂直极化和水平极化信息的极化指数。改进后的处理反射信号的海冰观测数据的极化指数 PI 计算方法如下：

$$PI = \frac{\gamma_h - \gamma_v}{\gamma_h + \gamma_v} \quad (5)$$

上式中， $\gamma_v$  是垂直极化反射率， $\gamma_h$  是水平极化反射率。

为了增强观测数据的极化指数应用的可信度，作者尝试着利用理论计算方法分析了反射信号的海冰与海水极化指数特征。在极化指数的理论计算前，首先要明确反射率  $\gamma$  与菲涅尔系数  $R$  之间的关系式，它们之间的关系可以用下式表示：

$$\gamma = |R|^2 e^{-h \cos \theta_1} \quad (6)$$

上式中， $h$  是海面粗糙度， $\theta_1$  是卫星的仰角， $R$  是菲涅尔系数。公式（6）利用菲涅尔系数建立了反射率与海冰的复介电常数的关系。菲涅尔系数表征了空气与海冰的介质不连续性特性。它又细分为垂直菲涅尔系数  $R_V$  和水平菲涅尔系数  $R_H$ 。垂直菲涅尔系数和水平菲涅尔系数的理论公式如下：

$$R_V = \frac{\varepsilon_1 \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2 - (\varepsilon_1 \sin \theta_1)^2}}{\varepsilon_1 \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2 - (\varepsilon_1 \sin \theta_1)^2}} \quad (7)$$

$$R_H = \frac{\varepsilon_2 \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2 - (\varepsilon_1 \sin \theta_1)^2}}{\varepsilon_2 \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2 - (\varepsilon_1 \sin \theta_1)^2}} \quad (8)$$

其中， $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  是空气和介质（海冰或海水）的介电常数。

使用上面的公式可以讨论极化指数理论值。极化指数理论分析的优点是假设观测区域的海冰粗糙度参数  $h$  相同时，在极化指数计算过程中可以忽略粗糙度参数。这样，极化指数主要反映了反射界面的物理特性。

### 2.2.2 基于观测数据的反射信号的极化指数特征分析

渤海湾的海冰是 1 年期的冰，冰期集中于冬季的 1-2 月份。1 年期冰的冰期分成了初冰期、盛冰期和融冰期 3 个时期。在初冰期和融冰期，海冰会跟随潮水有规律地出现在观测区域。因此，在反射信号观测数据分析时，需要区分海冰与海水。

在极化指数的理论计算中，选取海冰电介常数为  $3.2+0.007i$ ，海水电介常数  $87+41i$ 。极化指数的理论计算结果表明（见图 4），海冰在仰角  $60^\circ$  至  $70^\circ$  之间，极化指数的绝对值最大；海水在仰角  $80^\circ$  至  $90^\circ$  之间，极化指数的绝对值最大。导航卫星仰角在  $45^\circ$  至  $70^\circ$  之间时，海冰的极化指数明显小于海水。当导航卫星仰角在  $80^\circ$  至  $89^\circ$  之间时，海冰的极化指数明显大于海水。这种显著差异有利于使用极化指数区分海水和海冰。这种差异的形成原因可能是因为海冰的布儒斯特角在  $58^\circ$  附近，而海水的布儒斯特角在  $85^\circ$  附近。因为，布儒斯特角的极化电磁波具有极化滤波特性，即水平极化被反射介质吸收，只有垂直极化信号反射到天线。

这种理论计算结果表明了反射信号观测数据分析的最佳仰角范围是  $45^\circ$  至  $70^\circ$ 。因此，利用 2014 年 2 月

的 1 周的水平极化和垂直极化观测数据，选取了卫星仰角在 45°至 70°之间和方位角位于 110°至 170°之间的数据，并且计算出了反射信号观测数据的极化指数。

2014 年 2 月 15 日下午观测期间，在观测区域附近有海冰。通过反射点的镜像点轨迹分析。PRN25 星满足海冰观测条件。PRN25 星是从低仰角逐渐到高仰角。当 PRN25 以低仰角进入观测区时，反射信号的镜像点位于海水区，极化在正的 0.4 以上；当进入海冰区时，极化指数迅速下降，进入了负值区（见图 5）。由于本次观测期间是融冰期，海面没有被冰完全覆盖。观测区域总体的海冰覆盖率 70%左右。在海冰数据采样时段，有半个小时的时间，观测区域出现了反射信号镜像点的海冰覆盖率 100%。伴随着海面上潮水的涨落，海冰和海水的交替变化，因此形成了图 5 中极化指数的交替变化现象。当镜像点布满海冰时，反射信号极化指数小于-0.4。当镜像点布满海水时，极化指数大于 0.0。因此，使用极化指数-0.4 作为识别海冰的阈值。

对比观测数据的极化指数和理论计算的极化指数，发现观测数据极化指数明显要高于理论计算极化指数。这种差异成因可能有两种情况：（1）实际观测时，反射点与接收点常常不满足理论公式的反射点与接收点需在同一个反射面的假设。（2）实际观测数据有多路径干扰信号，并且反射点的介电常数比理论上的介电常数更为复杂。

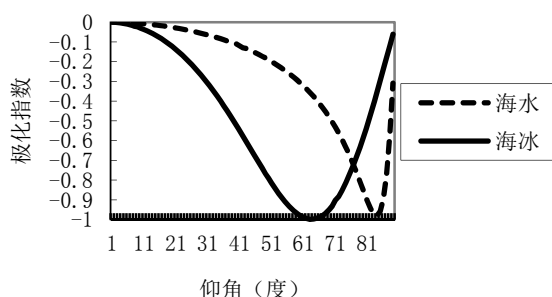


图 4 极化指数理论计算结果

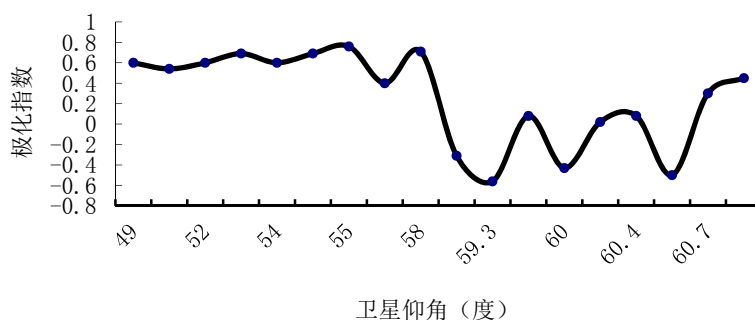


图 5 PRN25 的极化指数图

## 2.3 反射信号区分海冰与海水的贝叶斯原理的分类方法构建

### 2.3.1 贝叶斯分类原理

在反射信号的观测数据分析过程中，作者发现海水和海冰的反射信号数据具有随机性的统计特征。如果用极化指数-0.4 的单一阈值方法区分海冰和海水，尤其是冰水混合情况下会增加区分的误判率。如果采用随机分类方法区分海水和海冰，有可能提高判别的准确性。

本文将探讨应用随机分类方法中的贝叶斯分类方法进行海水的海冰区分。如果假设  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别表示海水和海冰类型； $P(\omega_1)$  和  $P(\omega_2)$  分别表示海水和海冰的先验概率； $P(x|\omega_1)$  和  $P(x|\omega_2)$  分别表示海水和海冰的类概率密度。同时，反射信号的极化指数的全概率密度为

$$P(x) = p(x|\omega_1)p(\omega_1) + p(x|\omega_2)p(\omega_2) \quad (9)$$

在极化指数样本  $x$  出现的条件下，海水和海冰的后验概率分别为：

$$p(\omega_1 | x) = \frac{p(x | \omega_1) p(\omega_1)}{p(x)} \quad (10)$$

$$p(\omega_2 | x) = \frac{p(x | \omega_2) p(\omega_2)}{p(x)} \quad (11)$$

使用上式进行分类判别的判别原则：如果  $P(x|\omega_1) > P(x|\omega_2)$  则认为是海水；如果  $P(x|\omega_1) < P(x|\omega_2)$  则认为是海冰。

### 2.3.2 基于反射信号观测数据的贝叶斯分类方法检验

在海冰和海水混合存在条件下，海冰和海水的区分阈值可能是一个模糊的过渡带。这样，为了增加极化指数-0.4 作为区分海水和海冰阈值的鲁棒性，尝试采用随机分类的贝叶斯方法构建海冰和海水的分类方法。

贝叶斯分类方法需要确定海冰和海水的均值和方差等参数。如果假设海水和海冰的类概率密度为正态概率分布，可以利用极化指数的均值和方差确定海冰和海水的类概率密度。本文选用了观测期间的 113 个有效反射信号观测数据，统计了融冰期的海水和海冰极化指数的均值和方差参数（见表 2）。海水的极化指数均值为 0.4，位于正值区，它的方差为 0.9。海冰的极化指数均值-0.5，位于负值区，它的方差为 0.8。由于观测试验是在融冰期，因此海水出现先验概率偏高于海冰的先验概率，海水先验概率为 0.55，海冰的先验概率为 0.45。

确定了贝叶斯分类中的参数，就可以利用公式（10）和公式（11）构建海水和海冰的分类判别函数。作者使用 2014 年 1 月 17 日和 18 日的 10 组反射信号观测数据，评估了分类判别函数的准确性。2014 年 1 月 17 日观测区域被海冰覆盖。2014 年 1 月 18 日观测区域的海冰消失，观测区域被海水覆盖。

检验数据的分类结果表明（见表 3），用极化指数和贝叶斯最小误差分类方法区分海冰和海水的总体准确率是 90%，其中海水的准确率 100%，海冰的准确率为 80%。这表明了反射信号的极化指数结合贝叶斯最小错误率分类方法可以很好地区分出海冰和海水。它也为反射信号海冰监测的应用奠定了基础。

表 2 海水和海冰的极化指数的贝叶斯参数统计表

类型	均值	方差	先验概率
海水	0.4	0.9	0.55
海冰	-0.5	0.8	0.45

表 3 极化指数分类方法检验结果

观测类型	观测极化指数	P( $\omega_1$ )	P( $\omega_2$ )	分类结果	正确性
海水	0.2459	0.242	0.136	海水	√
	0.6453	0.238	0.087	海水	√
	0.2063	0.237	0.153	海水	√
	0.5543	0.242	0.103	海水	√
	0.0356	0.231	0.169	海水	√
海冰	-0.4247	0.164	0.223	海冰	√
	-0.8345	0.100	0.209	海冰	√
	-0.6970	0.116	0.218	海冰	√
	-0.3071	0.180	0.218	海冰	√
	-0.0639	0.209	0.198	海水	×

## 3 结论

通过 1 个星期的海冰野外观测试验，验证了导航卫星反射信号的垂直极化和水平极化信息号具有区分海冰和海水的能力。

反射信号的极化指数理论计算结果表明，使用卫星仰角在 45° 至 70° 之间的反射信号观测数据计算极



化指数,并用它识别海冰效果最佳。观测数据统计的反射信号极化指数的海冰阈值是-0.4。

导航卫星反射信号的极化指数与贝叶斯最小误差分类方法相结合的方法,在反射信号的海水与海冰区分工作中准确率高。

本文的研究工作是利用导航卫星反射信号反演海冰厚度的前期准备工作,今后作者将利用反射信号数据进一步反演海冰厚度。

## 致谢

作者感谢李黄研究员和曹云昌研究员在观测试验期间给予的大力支持与帮助。

## REFERENCES

- [1] 张启文. 渤海海冰变化与气象条件的关系[J]. 海洋预报, 1986, 3(1): 49-54
- [2] 张晰. 极化SAR渤海海水厚度探测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011
- [3] Komjathy, A., Zavorotny, V. U., and Garrison J.L. GPS: a new tool for ocean science[J]. GPS World, 10: 50-56
- [4] Garrison, J. L., S. J. Katzberg, and M. I. Hill. 1998. Effect of sea roughness on bistatically scattered range coded signals from the Global Positioning System[J]. Geophys. Res. Lett., 1999, 25: 2257-2260
- [5] arson K. M. and Nievinski F. G.. GPS snow sensing: results from the Earth Scope Plate Boundary Observatory[J]. GPS Solutions, 2013,17(1): 41-52
- [6] 杨东凯, 张其善. GNSS反射信号处理基础与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011a
- [7] 杨东凯, 樊江滨, 张波, 等. GNSS应用与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011b
- [8] Stephen J. K., Richard A. W., James H. R., et al .First GPS signals reflected from the interior of a tropical storm: Preliminary results from Hurricane Michael. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2001, 28(10): 1981-1984
- [9] 曹云昌, 方宗义, 夏青, 等. 中国地基GPS气象应用站网建设展望[J]. 气象, 2006, 32(11): 42-47
- [10] 周晓中, 邵连军. GNSS-R 航空遥感海面风场仿真技术[J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 143-153
- [11] 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(8): 51-54
- [12] 张云, 孟婉婷, 顾祈明, 等. 基于GPS反射信号技术的渤海海冰实验[J]. 海洋学报, 2014, 36(11): 64-73
- [13] 李黄, 夏青, 尹聪, 等. 我国GNSS-R遥感技术的研究现状与未来发展趋势[J]. 雷达学报, 2013, <http://radars.ie.ac.cn/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=121>
- [14] 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. AMSR-E微波极化指数与MODIS植被指数关系研究. 国土资源遥感, 2007, 71: 27-31

## 【作者简介】



王炜(1965-), 男, 汉族, 博士, 高级  
工程师, 研究方向: 大气遥感。  
Email: [wwei356@163.com](mailto:wwei356@163.com)

高强(1972-), 男, 汉族, 本科, 工程师, 研究方向: 电  
子学。Email: [gaoq@eyou.com](mailto:gaoq@eyou.com)