

# GNSS-R 研究进展及其关键技术

刘经南<sup>1</sup> 邵连军<sup>2</sup> 张训械<sup>3</sup>

(1 武汉大学校长办公室,武汉市珞珈山,430072)

(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 中国科学院武汉物理与数学研究所,武汉市小洪山 1 号,430071)

**摘要:**全面评述了 GNSS-R 技术的研究进展,主要包括海面测高、海面风场遥感、土壤湿度探测以及星载实验等几个主要方面,从软件接收机和反演模型两个方面分析了 GNSS-R 的关键技术,并指出了存在的问题和发展方向。

**关键词:**GNSS-R; 测高; 海面风场; 软件接收机; 星载观测

**中图法分类号:**P228.42; P229.2

GPS 系统作为目前世界上应用最为广泛的卫星导航定位系统,对科研、军事与交通等诸多领域产生了巨大的影响。将来,将有更多导航星座在太空中运行,给人们提供更加方便和精确的服务。随着 GNSS 系统研究的深入,一些学者发现,GPS 的反射信号是可以被接收并利用的,由此开辟了一个新的研究领域——GNSS-R(global navigation satellite system-reflection)技术。本文介绍了 GNSS-R 技术的研究进展,研究了 GNSS-R 接收机和反演理论两个主要方面,指出了存在的问题和发展方向。

## 1 GNSS-R 的研究进展

在 ION-GPS-94 年会上,法国科学家 Auber 首次报道了他们在进行机载飞行实验时,GPS 接收机意外发现了 GPS 海面反射信号。这种信号在常规的测量中通常是作为多路径信号进行剔除的,因为它严重地干扰定位精度<sup>[1]</sup>。法国科学家的报道说明,GPS 反射信号是可以被接收并检测的。随后,美国科学家敏锐地意识到,GPS 反射信号可能成为一种新的遥感手段。美国 NASA 的科学家 Katzberg 和 Garrison 提出利用海面前向散射的双频 GPS 信号来获取海洋上空的电离层延迟,这将可以有效地克服传统卫星高度计在

剔除电离层延迟误差中的不足<sup>[2]</sup>。为了验证 GPS 反射信号能否被传统的接收机检测并跟踪,美国 NASA 的兰利研究中心首先进行了地基实验,将接收机固定在海岸的建筑物上进行观测,接着他们利用波音 737 飞机在 1996 年 8 月 6 日、8 日和 27 日分别进行了 3 次飞行实验。实验结论是:传统的接收机难以进行有效的锁相和长时间跟踪,需要研制特殊的接收机<sup>[3]</sup>。后来,他们于 1997 年 8 月至 10 月采用一个 12 通道可重构的 GEC-Plessey GPS 软件接收机进行了 5 次飞行实验,接收机的 6 个通道用于接收卫星直射信号,另外 6 个通道用于接收反射信号,通过实验研究了反射信号相关函数的特性,并发现,GPS 反射信号相关函数的宽度与反射面的粗糙度有密切的关系,通过反射信号可以获取海面信息<sup>[4]</sup>。后来,这种基于 GPS 反射信号的遥感技术被简称为 GNSS-R 技术。

从 1997 年起,NASA 兰利研究中心与科罗拉多大学开始联合开展 GNSS-R 反演海面风场的算法研究,并利用专门的接收机 DMR(delay-mapping receiver)做了多次机载飞行实验。实验发现,GPS 反射信号的相关功率波形与风速具有直接的关系,海面风速越大,波形的后沿变化越趋于平缓;反之,则越陡峭。在 GNSS-R 风场反演模型中,Zavorotny 和 Voronovich 提出的 Z-V 模型是较为系统和成熟

的<sup>[5]</sup>。后来,Elfouhaily等学者对该模型进行了改进和补充。1999年8月,西班牙 IEEC/CSIC、Starlab 与美国 NASA 在地中海联合进行了气球实验,称为 GPSR-MEBEX 实验。实验采用低增益天线在 38 km 高度成功检测到反射信号,海面风速反演精度约 2 m/s<sup>[6]</sup>。目前,GNSS-R 反演海面风场的理论与算法虽然基本成形,但还处于科学研究阶段,尚不能实现业务化。

欧空局的科学家 Martin-Neira 于 1993 年首次提出 PARIS(passive reflectometry and interferometry system)概念,其主要思想是利用 GPS 海面反射波作为测距信号。由于一台接收机可以同时接收多颗卫星的反射信号,其时空分辨率较之传统的高度计具有明显的优势<sup>[7]</sup>。Jason-1 和 Topex 测高卫星的重访周期大概是 10 d,这对某些特殊地区或者特殊时间是难以满足需要的。采用 GNSS-R 技术,一台接收机可以同时接收视场中的多颗卫星信号<sup>[7]</sup>,这种双基雷达测量模式可以大大提高时空分辨率。由于 GNSS-R 接收机属于被动接收方式,本身不需要发射信号,所以在体积和重量上都很小,同时所需的功耗也很小,可以采用卫星搭载的方式。GNSS-R 高度计的基本思想就是测量直射信号和反射信号到达的时间差,从而确定海面高度。

为了验证 GNSS-R 测高的可行性,Martin-Neira 等人于 1997 年 9 月在荷兰的 Zeeland 桥进行了 PARIS 高度计桥 I 实验<sup>[8]</sup>。利用 C/A 码相关函数的延迟,5 s 的均方根误差为 3 m(C/A 码长的 1%)。随后,他们于 2001 年 6 月和 2003 年 2 月又进行了桥 II 和桥 III 实验,其中,桥 III 实验采用相位测量的方法,误差小于 10 cm。美国 JPL 的 Lowe 和 Zuffada 等人也进行了湖畔和海上机载实验,在机载实验中,采用高仰角卫星和 3~5 min 平均,可以得到 5 cm 精度<sup>[9]</sup>。在湖畔实验中,采用低仰角卫星,由于湖面很平静,用相位法得到了 2 cm 的高精度<sup>[10]</sup>。

美国 NASA 和科罗拉多大学等机构还联合开展了利用 GNSS-R 遥感土壤湿度的研究工作。由于 GPS 信号对反射表面的电磁特性十分敏感,特别是介电常数对反射信号的强弱有着重要的影响,而介电常数与土壤湿度之间有直接关系,所以可以通过反射信号的强弱来探测土壤湿度。后来,他们于 2000 年 3 月(暴雨后)和 4 月(干早期)使用 DMR 接收机分别做了机载观测实验,结果表明,反射信号的峰值对土壤湿度是敏感的。2002 年 6~7 月,他们又进行了一系列 GNSS-R

土壤湿度遥感实验(SMEX02-03)。另外,还开展了海冰和积雪厚度的遥感实验(CLPX)<sup>[11]</sup>。

开展 GNSS-R 研究的最终目标是能够实现星载观测。事实上,许多学者对卫星观测 GPS 反射信号已经进行了初步的研究。从事掩星研究的学者发现,掩星事件中存在 GPS 反射信号。德国 GFZ 的学者 Beyerle 等在针对 1997 年 2 月 2~16 日的 GPS/MET 掩星数据进行能量谱分析时发现,部分谱分量比 GPS 掩星信号分量弱 10~20 dB。通过研究,他们认为,这些分量是地球表面的反射信号。同时发现,对  $L_1$  波段,反射信号分量占 28%,对  $L_2$  波段,则下降为 10%~15%,这是因为  $L_2$  信号的发射功率比  $L_1$  弱<sup>[12]</sup>。他们还于 2001 年 5 月 14 日至 6 月 10 日期间 CHAMP 卫星的掩星事件进行分析,发现在 3 783 个掩星事件中,有 1 212 个是含有反射信号的,并且反射事件在高纬度地区比较频繁<sup>[13]</sup>。通过这些研究结果可以看出,在卫星上是可以接收到反射信号的。目前开展的星载 GNSS-R 实验主要有:一是由美国科罗拉多大学等四所高校、NASA 和 NOAA 等多家单位联合制定的 SuRGE(student reflected GPS experiment)卫星观测实验计划<sup>[14]</sup>;二是英国于 2003 年 9 月发射的 UK-DMC 灾害监测卫星上载有萨里卫星技术公司提供的 GPS 反射信号接收设备,目的是研究利用星载 GNSS-R 设备遥感海态参数、冰雪和陆地的可行性。结果证明,星载接收机成功地接收到了来自海洋、冰雪区域和陆地的 GPS 反射信号<sup>[15]</sup>。此外,2000 年发射的 CHAMP 卫星和 SAC-C 卫星、2002 年发射的 GRSCE 卫星以及 2003 年发射的 ICESAT 卫星都载有用于 GPS 反射实验的接收设备。目前,星载实验还处于起步阶段,要建立完善的反演模型还需收集更多的观测数据。

目前,国内的北京航空航天大学从事 GNSS-R 接收机的研制,进行了飞机平台的观测,得到了一些结果。总参大气环境研究所和解放军理工大学开展了风场反演的研究。国内比较系统开展研究的小组是由中科院武汉物理与数学研究所、海洋局第三海洋研究所、中科院大气物理研究所、中科院空间科学应用研究中心以及武汉大学等单位组成的。他们开展了 GNSS-R 的仿真研究,分析了 CHAMP 掩星观测数据中的海洋反射信息,模拟海洋反射功率,在厦门建立了一个实验研究基地,利用 GNSS-R 反射信号反演海态和潮位。他们已经积累了连续 6 个月的观测数据,得到了许多具有重要价值的资料,为开发我国星载 GNSS-

R 观测技术提供了有益的经验。

## 2 GNSS-R 的关键技术

GNSS-R 技术与常规导航定位技术最主要的区别在于它接收的信号是经过海洋、陆地或者冰雪等表面散射后的结果,这个散射信号与直射信号在能量、相位和极化特性等方面有很大的不同,这就导致必须使用特殊的接收机才能进行有效的接收和处理。本文从 GNSS-R 接收机和反演理论两个方面进行分析。

### 2.1 接收机

GNSS-R 接收机的任务是完成信号的接收和后处理工作,它与常规的导航定位接收机具有很大的区别。早期的接收机是在常规接收机的基础上改进的,采用单个右旋圆极化(RHCP)天线,在观测时,将天线指向水平方向,这样既可以接收直射信号,也可以接收低仰角的反射信号,文献[10]采用的就是这个方法。通常情况下,仅接收低仰角的反射信号是不够的。如果接收高仰角信号,一般需要采用两副天线,一副低增益 RHCP 天线朝上,接收直射信号,另一副高增益的左旋圆极化(LHCP)天线朝下,接收反射信号。后来,美国 JPL 在常规接收机的基础上又开发了 16 通道的接收机,采用 4 个射频前端,使系统具有很大的灵活性,可以根据不同需要配置天线方案。最初的接收机是 DMR,只提供相关功率波形的延时数据,后来发展为 DDR(delay/doppler-mapping receiver)接收机,既可以提供延时数据,同时也可以提供多普勒数据,称为延时-多普勒接收机。

美国科罗拉多大学 GNSS-R 研究组利用 GPS 模块开发了专门的开环软件接收机<sup>[16]</sup>,其前端采用硬件。图 1 是 GNSS-R 接收机前端框图。

西班牙的 Starlab 公司承担了欧空局 GNSS-R 的相关研究项目,在多年研究成果积累的基础上,也开发了一套专用接收机——Oceanpal。目前,该接收机已经商品化。其设计思路和科罗拉多大学基本相同,采用双天线,其前端将射频信号转换为中频数据后,得到原始文件,然后用专门的

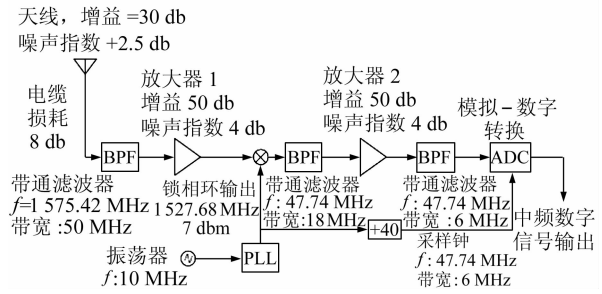


图 1 GNSS-R 接收机前端框图

Fig. 1 GNSS-R Receiver Front End

软件接收机进行处理,得到的结果是  $L_1$  上 C/A 码的相关函数及多普勒数据。

软件部分信号处理的关键环节为:从接收机硬件部分一般可以得到两个中频数据文件,一个来自 RHCP 天线,另一个来自 LHCP 天线,它们都是二进制文件。软件接收机读取数据文件,然后进行处理,处理流程如图 2 所示,虚线方框内部为软件接收机信号处理的总流程。首先处理直射信号,搜索直射信号中可能含有的 GPS 信号。在没有先验信息的情况下,需要对所有 GPS 卫星的 C/A 码逐个搜索,搜索方法是把不同延迟的 C/A 码与接收的数据做相关,逐个比较,如果信号中含有该 PRN 信号,通过相关处理可以检测出来。软件接收机通常采用 FFT 算法来执行该搜索过程。在搜索过程中,可以得到 PRN 信号和粗略的多普勒值。根据该结果去搜索导航码的起始位置,确定数据前面需要删除的字节数,从而实现导航码同步,即解扩。在此基础上,进一步精确估计多普勒频移值。根据得到的 PRN 码和精确的多普勒值,将直射信号和反射信号分别与 PRN 码进行相关,得到带有延时标记的一维相关波形,这就是早期的 DMR 接收机输出的 0 级数据结果。如果需要得到延时-多普勒波形,需要以先前估计的精确多普勒值为中心,计算其附近的的不同多普勒情况下的相关函数,得到具有延时和多普勒标记的二维相关函数,这就是后来 DDR 接收机输出的 0 级数据结果。

在地面和机载情况下,反射信号衰减较小,目前已经得到较好的实验结果。但在星载情况下,

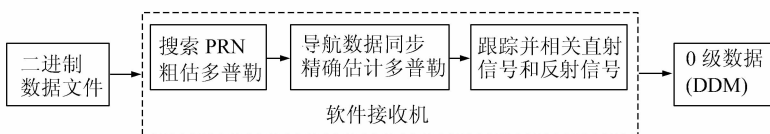


图 2 软件接收机信号处理流程图

Fig. 2 Flowchart of Software Receiver Signal Processing

接收到的反射信号非常微弱,这要求接收机的下视天线具有很高的增益,但天线增益的提高必然伴随着体积和成本的增加。由于散射信号的微弱,信号处理的算法也是一个难题。目前这个方面还需要不断地进行实验和改进。

### 2.2 反演模型

如前所述,GNSS-R的研究在海洋领域主要是海面风场、有效波高、潮位和海水盐度的反演;在陆地主要是土壤湿度的遥感,还有冰川和雪地等寒冷地区的遥感。目前,研究多集中在海洋遥感领域。要建立反演模型,必须从信号传播的角度出发,通过研究电磁散射理论,将观测结果与反射面的物理特性联系起来。

当GPS信号入射到两种媒质分界面时,会产生透射和反射现象,这主要与GPS信号的波长、入射角、分界面的电特性(如电导率和介电常数)及表面粗糙度有关。从能量角度来说,LEO卫星上接收到的GPS散射信号通常比直射信号的功率小20~30 dB,这主要取决于分界面的电特性和信号的传播路径。实验结果表明,来自海面的散射信号往往比陆地的散射信号的能量要强,雨后的土壤散射信号往往强于干旱时期的散射信号。从相位的角度来说,需要研究散射信号的相关性。散射面的光滑度直接决定散射信号的相关性。在遥感领域,一般采用瑞利判据来判断表面的光滑度。当表面非常粗糙时,GPS散射信号的相关性很差,导致接收机无法完成锁相,所以也就不能得到相位数据。从极化特性的角度来说,GPS信号为右旋圆极化波,经过反射后,其极化特性将发生改变。极化特性改变的程度与信号入射的角度和散射介质的介电常数有关。以GPS信号的 $L_1$ 载波为例,在某一个假定介电常数下,得到左、右旋极化反射系数随入射角的变化,如图3所示, $R_{r_r}$ 和 $R_{r_l}$ 分别表示反射信号中右旋分量和左旋分量菲涅耳反射系数随角度变化的关系。可以看出,对于相同的散射介质,随着高度角的增

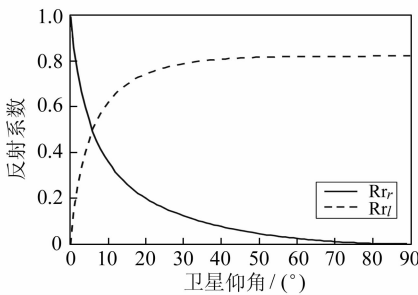


图3 菲涅耳反射系数随仰角的变化

Fig. 3 Fenel Reflection Coefficient Versus Elevation

大,反射信号的右旋分量逐渐减少,左旋分量逐渐增加。

传统的雷达微波散射属于后向散射,其电磁散射理论比较成熟。而GNSS-R属于L波段前向散射,目前采用的散射模型基本上是原有模型的延伸,是否完全适用还需检验。计算GNSS-R散射场时,通常采用柯希可夫近似模型,当只考虑镜向反射的情况时,可以得到几何光学近似模型,然而该模型对极化不敏感。为了克服这个问题,可以采用小扰动法或者二尺度模型来计算。

从接收机得到的0级数据一般是相关功率波形。C/A码的相关函数是一个三角形,接收机下视天线接收到的是来自散射面诸多散射信号的合成,其相关函数不再是三角形,后沿将产生畸变,畸变程度的大小与散射面的特性、接收机天线的高度以及GPS卫星-接收机-镜点的几何结构有着直接的关系。同时,由于三者之间的相对运动,会产生多普勒频移。图4是GNSS-R延时-多普勒区域示意图。来自不同的菲涅耳带和多普勒区域的散射信号对测量结果的贡献是不同的,利用接收机测量的延时和多普勒数据做反演研究。下面主要介绍海面风场遥感、测高和海态反演三个方面。

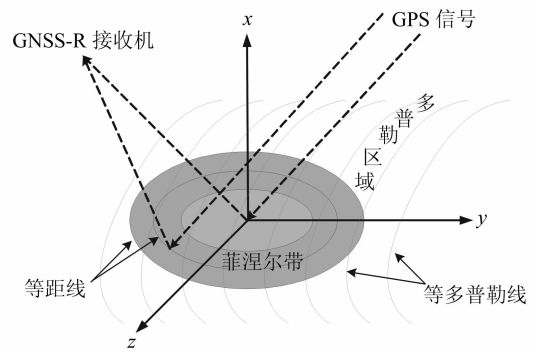


图4 GNSS-R延时-多普勒区域示意图

Fig. 4 GNSS-R Delay-Doppler Area

在风场遥感中,Z-V模型较为成熟,它从柯希可夫散射理论出发,结合Elfouhaily随机海浪谱模型<sup>[17]</sup>,把海面风场和观测数据通过海浪谱联系起来。观测数据通常是相关功率波形,它是延迟时间的函数。通过将Z-V模型的后沿与实测数据波形的后沿斜率作最佳匹配,可以估计海面的风场。需要指出的是,Elfouhaily海浪谱模型适用的条件是开阔海域,对近岸海域是不适用的。

在海面测高中,关键技术在于如何计算直射信号和反射信号相关功率波形的时间差。目前,通常采用再跟踪技术,即首先用程序产生C/A码的相关函数,然后以该函数为基准,采用回归算法

分别计算直射信号和反射信号波形到该函数的时间差,两个时间差再求差,即可得到所求的结果。将时间差乘以光速,得到路程差,然后再根据 GPS 卫星、接收机和镜点之间的几何关系,即可得到接收机天线到海面的距离。

在海态反演中,主要利用反射信号的自相关特性。笔者在研究中使用 Oceanpal 接收机输出的直射信号和反射信号的最大相关值对应的复数时间序列。为了剔除与海面运动无关的分量,采用干涉法,即通过对反射场和直射场求比,得到干涉复数场,可以消除两个分量中指数项的公共误差,如残留多普勒、导航码相位偏差、卫星发射功率变化以及绝大部分由电离层和中性大气引起的附加时间延迟。通过计算干涉复数场的自相关时间  $\tau_F$ ,得到了有效波高 SWH 与  $\tau_F$  的经验公式:

$$SWH = a\left(\frac{1}{\tau_F}\right)^2 + b\left(\frac{1}{\tau_F}\right) + c \quad (1)$$

式中, $a=0.0038$ , $b=-0.0733$ , $c=0.8267$ 。通过对厦门岸基实验数据的研究,反演精度为 3 cm。

### 3 存在的问题与发展方向

GNSS-R 作为一个新的遥感手段,已经引起了广泛的关注。美国和欧洲等主要国家都投入了很多精力进行研究,开展了地基、机载和星载的观测实验,为进一步开展研究和应用奠定了基础。目前,GNSS-R 在理论、技术和数据反演等方面逐步完善,其主要发展方向是卫星遥感海面高度和风场,但目前技术上存在的两个主要问题是星载 GNSS-R 应用中必须解决的问题。

1) 星载 GNSS-R 天线问题。由于 GNSS-R 信号经过海面散射再返回到卫星高度,信号强度有 30 dB 左右的衰减,为了保证在卫星高度上接收到足够强的信号,必需通过提高天线增益来弥补电波传播损耗。在天线设计中,遇到的一个重要问题是海洋等效散射截面问题,它是系统设计必需的科学依据。天线增益大小与海洋等效散射截面密切相关。笔者曾经利用地基海洋 GNSS-R 实验数据分析了海洋等效散射截面与入射角和波浪高度的关系。但是,这个结果是不够的,还需要开放海洋,而且是在不同浪高等海况下的海洋散射截面的数据。

2) 提高反演产品的精度。目前,利用 GNSS-R 技术测量海洋参数是基于 C/A 码的观测量,测量精度比较低。为了克服这个缺点,人们采用开

环软件接收机对接收的信号进行处理,试图通过先进的算法来提高测量精度。地基测量时,可以采用相干测量技术提高产品精度。另外一种发展方向是采用 P 码测量技术,但是目前还没有很多的实验结果。由于海洋散射信号包含了大量的多路径信号,其相位和幅度会发生很大的改变,对 P 码跟踪会带来什么影响,尚需通过实验去研究。

目前,GNSS-R 技术在地基测量中主要用于监测有效浪高、海平面变化、潮位等参数。这里特别强调的是,由于 GNSS 导航卫星可以在未来几十年为人类提供精确、无偿的探测信号,信号具有长期的稳定性,因此,这项技术为监测海平面的长年稳定变化提供了一种非常理想的手段。这种测量技术简单,设备费用低,易于推广。

GNSS-R 技术一个重要的应用方向是星载海洋探测。目前,欧洲空间局已经计划利用星载 GNSS-R 技术监测海啸,这颗卫星不久即将发射。星载 GNSS-R 测高技术对于研究中尺度的海洋变化具有重要意义。除了美国的 GPS 星座外,当前各个大国都在积极发展导航卫星。最近报道指出,俄罗斯在导航星座的建设方面也计划 2007 年底发射 6 颗“GLONASS-M”卫星,2008~2009 年再发射 6 颗卫星,从而使 GLONASS 系统的卫星总数达到设计标准所规定的 24 颗,实现全球覆盖。欧洲的 Galileo 星座也在建设中。不久将有 100 多颗导航卫星在地球上空飞行,大大提高了时空分辨率,使利用 GNSS-R 技术探测中小尺度的海洋变化成为可能。

土壤湿度是水文、气候、农业等领域研究中的一个重要的物理量,应该继续探索 GNSS-R 在探测土壤湿度上的应用。土壤表面的电磁散射是比较复杂的,因为地形地貌和土壤成分本身对散射都有一定的影响,要建立反演模型,需要进行大量的实验。GNSS-R 观测设备比较简单,既可以采用全天候定点观测,也可以采用机载重复观测,因此,在土壤湿度探测方面具有很好的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Auber J C, Bilbaut A, Rigal J M. Characterization of Multipath on Land and Sea at GPS Frequencies [C]. ION-GPS-94 Conference, Paris, France, 1994
- [2] Katzberg S J, Garrison J L. Utilizing GPS to Determine Ionospheric Delay over the Ocean[R]. Technical Memorandum, TM-4750, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 1996
- [3] Garrison J L, Katzberg S J, Howell C T. Detection of Ocean Reflected GPS Signals: Theory and Experiment

- [C]. IEEE Southeaston'97, Blacksburg, VA, 1997
- [4] Lowe S T, Hajj G. LEO Detection of an Ocean-Reflected GPS Signal [C]. GPS Surface Reflections Workshop at Goddard Space Flight Center, JPL, Pasadena, CA, 1998
- [5] Zavorotny V, Voronovich A. Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application [J]. IEEE TGRS, 2000, 38(2): 951-964
- [6] Cardellach E, Ruffni G, Pino D, et al. Mediterranean Balloon Experiment: Ocean Wind Speed Sensing from the Stratosphere, Using GPS Reflections [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88: 351-362
- [7] Martin-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry [J]. ESA Journal, 1993, 17: 321-355
- [8] Martin-Neira M, Caparrini M, Font-Rossello J, et al. The PARIS Concept: an Experimental Demonstration of Sea Surface Altimetry Using GPS Reflected Signals [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 142-150
- [9] Lowe S T, Zuffada C, Chao Y, et al. 5-cm-Precision Aircraft Ocean Altimetry Using GPS Reflections [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(10): 4 359-4 362
- [10] Treuhaft R N, Lowe S T, Zuffada C, et al. 2-cm GPS Altimetry over Crater Lake [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(23): 4 343-4 346
- [11] Masters D S. Surface Remote Sensing Applications of GNSS Bistatic Radar Soil Moisture and Aircraft Altimetry [D]. Colorado: University of Colorado, 2004
- [12] Beyerle G, Hocke K. Observation and Simulation of Direct and Reflected GPS Signals in Radio Occultation Experiment [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(9): 1 895-1 898
- [13] Beyerle G, Hocke K, Wickert J, et al. GPS Radio Occultations with CHAMP: a Radio Holographic Analysis of GPS Signal Propagation in the Troposphere and Surface Reflections [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D24): 4 802
- [14] Emery W J, Axelrad P, Nerem R S, et al. Student Reflected GPS Experiment (SuRGE) [C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Systems (IGARSS) 2001, Sydney, Australia, 2001
- [15] Gleason S, Adjrard M. Sensing Ocean, Ice and Land Reflected Signals from Space; Results from the UK-DMC GPS Reflectometry Experiment [C]. ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, CA, 2005
- [16] Esterhuizen S. The Design, Construction, and Testing of a Modular GPS Bistatic Radar Software Receiver for Small Platforms [D]. Colorado: University of Colorado, 2004
- [17] Elfouhaily T, Chapron B, Katsaros K, et al. A Unified Directional Spectrum for Long and Short Wind-driven Waves [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 15 781-15 796

---

第一作者简介:刘经南,教授,博士生导师,中国工程院院士。现主要从事空间大地测量和地球动力学研究。代表成果:国家高精度GPS数据处理理论和方案;GPS卫星定位处理综合软件;WADGPS数据处理;青藏高原地壳运动与形变的GPS研究等。  
E-mail: jnliu@wtusm.edu.cn

## Advances in GNSS-R Studies and Key Technologies

LIU Jingnan<sup>1</sup> SHAO Lianjun<sup>2</sup> ZHANG Xunxie<sup>3</sup>

(1 Presidential Secretariate, Wuhan University, Luojia Hill, Wuhan 430072, China)

(2 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Wuhan Institute of Physics and Mathematics, CAS, 1 Xiaohongshan, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The advances in research of GNSS-R, including the key areas, such as altimetry, sea wind, soil moisture remote sensing and space-borne experiment, etc, are reviewed, the key technologies of the GNSS-R software receiver and the retrieving model are analyzed. And the problems and development direction are pointed out.

**Key words:** GNSS-R; altimetry; sea wind; software receiver; space-borne observation

---

**About the first author:** LIU Jingnan, professor, Ph. D supervisor, Academician of Chinese Academy of Engineering. He is mainly engaged in the research on spatial geodesy and geodynamics. His typical achievements are the theory and scheme of high precision GPS data processing in China; the comprehensive software of GPS satellite positioning processing; the software of WADGPS data processing; monitoring the crustal movement and deformation of Qinghai-Tibet Plateau with GPS.  
E-mail: jnliu@wtusm.edu.cn