中国首次岸基 GNSS-R 海洋遥感实验

王鑫, 孙强, 张训械, 吕达仁, 邵连军, 胡雄, Ruffini Giulio, Dunne Stephen, Francois Soulat

中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080;

国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005;

中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071;

中国科学院大气物理研究所, LAGEO, 北京 100029;

武汉大学 GPS 研究中心, 武汉 430079;

Starlab, C. de l'Observatori Fabra s/n, 08035 Barcelona, Spain

E-mail: twinklemars@gmail.com

2007-06-05 收稿, 2007-12-07 接受

国家自然科学基金(批准号: 40505007, 40333034)和中国博士后科学基金资助项目

摘要 GNSS-Reflection 技术是一种崭新的海洋遥感技术. 它利用导航卫星的海面反射信号可获取海浪、潮汐及海面风场等重要信息, 是海洋遥感的前沿领域. 报道了中国岸基 GNSS-R 海洋遥感实验——CORE 实验, 研究了利用 GPS 卫星直达波与反射波信号反演海洋参数的方法, 给出了有效波高的最新反演结果, 并利用同步观测进行了对比验证.

关键词

GNSS

海洋

遥感

反射

有效波高

GNSS-R(Global Navigation Satellite System-Reflection)技术是一种崭新的海洋遥感技术. 它利用导航卫星的反射信号对海面进行遥感, 可获得有效波高、潮位、海面风速风向等参数, 具有重要的研究意义和广阔的应用前景^[1-3]. 与传统的卫星遥感手段相比, GNSS-R海洋遥感信息资源丰富, 现在及将来会有GPS, GLONASS及GALILEO系统的数十颗导航卫星可作为免费的信号源使用. 每天全球均匀覆盖的反射事件可达数十万个, 将成为海洋中尺度涡旋的有效遥感手段. GNSS-R为全天候工作, 可用于台风、海啸等恶劣天气条件下的海洋环境监测, 对海洋学、海气相互作用、海上交通等研究与应用意义重大.

自 1993 年Martin-Neira等人^[1]提出PARIS(Passive Reflectometry and Interferometry System)概念建议进行海洋遥感以来, 美国与欧洲的众多研究人员投入到了GNSS-R遥感技术的研究当中. 在近 10 年的时间里, 利用岸基、热气球、飞机、飞船及卫星等平台, 分别开展了信号接收、原理性验证、实际参数反演等实验, 证明了GNSS-R海洋遥感理论及技术的有效性与

可行性^[2,4-11]. 在GNSS-R遥感技术逐渐成为一个崭新的研究领域的同时, 许多新的问题也相应出现. 首先, 对于GNSS-R信号的接收、处理与接收机研制, GNSS海面反射信号微弱, 反射波振幅通常小于直达波 1/3 甚至 1/2 以上, 需要提高接收天线增益, 并使用相干积分或其他技术对信号进行处理, 尽可能提高信噪比. 同时, GNSS电波经海面反射后, 由右旋圆极化变为左旋圆极化, 电波信号随海面状况快速变化, 多普勒频移可达 25 Hz以上, 常规锁相环接收机常常失锁, 难以捕获有效信号, 因此需要新的接收机以供使用. 目前, 欧洲Starlab研究所、欧洲空间技术研究中心、美国科罗拉多大学等单位都在进行开环接收机的相关研究, 并已取得了相当的进展^[12-14] (<http://starlab.es/Sections/Library.html>).

反演技术方面, 不同的研究组分别利用岸基、机载及星载数据对海面高度、有效波高及海面风速风向反演进行了研究, 提出了各自的反演方法^[11,15,16]. 当前国际研究关注于长期连续观测, 特别是利用独立仪器的同步原位观测, 对参数反演进行比对、验证,

对反演方法进行改进. 而岸基实验是 GNSS-R 技术研究的重要途径. 它利于开展长时间的多种仪器的联合观测, 便于数据连续积累, 是数据采集与参数反演技术研究的基础. 鉴于此, 我们与当前国际该领域的前沿组织之一西班牙的 Starlab 研究所进行了联系与交流, 经双方研究决定开展中国首次岸基 GNSS-R 海洋遥感实验, 选择理想的地点, 尽可能长地进行连续同步观测, 为 GNSS-R 技术研究特别是反演技术研究及验证打下基础.

1 实验

本次实验从 2006 年 9 月 2~16 日, 命名为 CORE (China Ocean Reflection Experiment), 地点选择在厦门附近的海洋观测站. 该站朝南面向开阔海面, 周围没有高大建筑物对 GPS 信号接收构成遮挡, 具有很好的方位角和仰角视场. 天线到海面最大距离约 33 m, 海水深度 2~20 m, 潮差约 7 m, 经常出现大浪, 是一个理想的观测场地, 如图 1 所示.

图 1 CORE 观测站

GPS 反射接收设备采用西班牙 Starlab 研制的 Oceanpal 接收机. 该接收机由天线、信号采集前端、信号处理单元及电脑终端四部分构成. 信号采集前端连接两副独立天线, 一副是右旋极化天线, 朝上安装用于接收 GPS 直达信号, 另外一副是左旋极化天线, 朝向海面用于接收 GPS 海面反射信号. 两副天线被安装在观测站的顶部, 在海面的正上方 (如图 1 所示).

实验过程中, 利用超声波浪仪、潮位计、风速风向仪进行同步原位观测. 实验初始阶段主要进行信号接收测试, 确定天线指向及信号接收范围. 以正北向为 0° , 在朝向海面范围内对天线指向做水平旋转,

进行信号接收及分析, 最终确定在该站点, 约 90° 方向为最佳指向, 同时将信号接收设定在仰角 $15^\circ \sim 90^\circ$, 方位角 $30^\circ \sim 225^\circ$ 范围, 以尽可能减少礁石反射带来的影响. 图 2 是该设定下, 每小时形成反射事件的 GPS 卫星分布. 纵轴为 GPS 卫星序号, 横轴为时间. 可看出 GPS 卫星的平均连续观测时间在 2~4 h 之间, 观测时间最长的是 PRN3 卫星, 达到 7 h.

图 2 每小时中形成反射事件的 GPS 卫星

2 数据及反演

在海面反射事件中, GPS 直达信号与反射信号的振幅与相位是最直接的观测量. 经相干积分后, 可得到直达波与反射波的相关波形, 被定义为 0 级数据. 如图 3, 4 是由 2006 年 9 月 4 日第 5 号 GPS 卫星的一个反射个例处理所得的直达波与反射波波形.

利用 GNSS-R 数据可反演有效波高、海面高度、潮位、风速风向等参数. 这里, 首先利用 CORE 实验

图 3 直达波波形

图4 反射波波形

数据进行了波浪参数,即有效波高(significant wave height, SWH)的反演研究. 2004年, Soulat等人提出利用相干方法求解有效波高,认为有效波高是相关时间 τ'_F 的函数^[17]. 基于该原理,取出部分GNSS-R观测数据,求解得到相关时间,与对应的有效波高真值进

行拟合,得到计算SWH的二阶经验公式:

$$SWH=a\left(\frac{1}{\tau'_F}\right)^2+b\left(\frac{1}{\tau'_F}\right)+c, \quad (1)$$

其中 a, b 和 c 分别为待定系数. 当 a, b, c 确定后,如 τ'_F 已知,则有效波高可得. 在 CORE 实验中,由 0 级数据求得相关时间 τ'_F ,同步超声波浪仪 SWH 实测数据作为真值. 利用 2006 年 9 月 2~12 日的 GNSS-R 及 SWH 观测数据进行拟合得到(1)式,其中 $a = 0.0038, b = -0.0733, c = 0.8267$. 其余数据用于反演及对比验证.

3 实验结果

利用 2006 年 9 月 12 日后的 GNSS-R 反射事件,由 0 级数据计算得到对应相关时间,通过确定后的反演算式,求解得到有效波高参数. 图 5 给出了 9 月 13~15 日 3 d 共 65 组反演结果,如图 5 所示,三角代表 GNSS-R 反演结果,星号代表同步超声波浪仪观测结果. 从图中可以看出,GNSS-R 反演结果与同步观测非常接近. 特别是 9 月 13 日,反演结果与观测几乎完全一致. 反演平均误差 2.88 cm,标准差 3.28 cm,相对偏差小于 10%.

图5 GNSS-R 反演所得有效波高参数与超声波浪仪观测数据对比

(a)~(c) 分别为 2006 年 9 月 13, 14 和 15 日反演结果及其对比

4 结论及讨论

CORE实验是中国首次GNSS-R岸基海洋遥感实验, 历时 15 d, 取得了初步的成果. 利用GNSS-R实测及超声波浪仪同步观测数据, 修正了反演算式, 计算了有效波高参数. 与波浪仪实测数据对比, 反演平均误差 2.88 cm, 标准差 3.28 cm, 相对偏差小于 10%. 与 2004 年 Soulat研究结果相比^[17], 达到了较高精度. 有效波高反演结果与观测数据对比系统偏小, 分析认为GNSS-R反射点通常距离海岸数十米至百米, 而超声波浪仪观测点在站点正下方, 容易受到近岸地形影响, 两者观测点并不完全重合是主要原因. 由于在已进行的反演中, 海面环境相对平静, 因此还需要利用尽可能多的观测数据进行反演分析, 以检验该方法在较大观测值域内,

特别是有大浪出现时的反演精度.

与国际同类研究相比, 实验站点海面开阔, 自然条件良好, 同时使用波浪仪、潮位计、风速风向仪做接近原位的同步观测, 实验条件优越. 后续进行了约 5 个月的连续观测, 积累了大量数据, 为反演技术的进一步研究、验证及改进提供了可能. 利用 GNSS-R 技术还可能反演波速及波向参数. 从图 3 可以看出, 一颗卫星能够长时间出现在接收机观测范围之内, 而一个固定观测点往往能够同时收到多个卫星形成的反射事件. 这样就可以在相对较小的区域内得到一个连续时间的观测序列, 使得利用 GNSS-R 反射数据反演波向参数成为可能. 目前, 其余参数的反演及完整数据的检验、对比分析正在进行当中, 结果也将尽快发表公布.

致谢 感谢各位参加实验及相关研究人员的辛勤工作. 感谢审稿人的宝贵意见.

参考文献

- Martin-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry. *ESA J*, 1993, 17: 321—355
- Wu S C, Meehan T, Young L. The potential use of GPS signals as ocean altimetry observable. National Technical Meeting. Santa Monica, Canada, 1997
- Garrison J L, Katzberg S J. The application of reflected GPS signals to ocean remote sensing. *Rem Sen Environ*, 2000, 73: 175—187 [DOI](#)
- Hajj G A, Zuffada C. Theoretical description of a bistatic system for ocean altimetry using the GPS signal. *Radio Sci*, 2003, 38(5): 1089—1107 [DOI](#)
- Garrison J L, Katzberg S J. Effect of sea roughness on bistatically scattered range coded signals from the Global Positioning System. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(3): 2257—2260 [DOI](#)
- Elfouhaily T, Chapron B, Katsaros K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves. *J Geophys Res*, 1997, 102(C7): 15781—15796 [DOI](#)
- Komjathy A, Zavorotny V U, Axelrad P, et al. GPS signal scattering from sea surface: wind speed retrieval using experimental data and theoretical model. *Rem Sens Environ*, 2000, 73: 162—174 [DOI](#)
- Zavorotny V U, Voronovich A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application. *IEEE Trans Geosci Rem Sen*, 2000, 38(2): 951—964 [DOI](#)
- Garrison J L, Komjathy A, Zavorotny V U, et al. Wind speed measurement using forward scattered GPS signals. *IEEE Trans Geosci Rem Sen*, 2002, 40(1): 50—65 [DOI](#)
- Armatys M, Komjathy A, Axelrad P, et al. A Comparison of GPS and Scatterometer Sensing of Ocean Wind Speed and Direction. *IEEE IGARSS 2000*. Honolulu Hawaii, America, 2000
- Lowe S T, Zuffada C, Chao Y, et al. 5-cm-Precision aircraft ocean altimetry using GPS reflections. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(10): 1375—1378 [DOI](#)
- Ruffini G, Francois S, Caparrini M, et al. The Eddy Experiment: Accurate GNSS-R ocean altimetry from low altitude aircraft. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L12306, doi:10.1029/2004GL019994 [DOI](#)
- Ruffini G, Caparrini M, Ruffini L. PARIS Alpha, PARIS altimetry with L1 frequency data from the Bridge 2 campaign. 2002. <http://starlab.es/Sections/Library.html>
- Lowe S T, Korger P, Franklin G, et al. A delay/doppler-mapping receiver system for GPS-Reflection remote sensing. *IEEE Trans Geosci Rem Sen*, 2002, 40(5): 1150—1164 [DOI](#)
- Lowe S T, LaBrecque J L, Zuffada C, et al. First spaceborne observation of an Earth-reflected GPS signal. *Radio Sci*, 2002, 37(1): 1007, 10.1029/2000RS002539 [DOI](#)
- Gleason S, Hodgart S, Sun Y, et al. Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low earth orbit for the purpose of ocean remote sensing. *IEEE Trans Geosci Rem Sen*, 2005, 43(6): 1229—1241 [DOI](#)
- Francois S, Caparrini M, Germain O, et al. Sea state monitoring using coastal GNSS-R. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L21303, doi: 10.1029/2004GL020680 [DOI](#)