

GPS 海面散射信号探测技术研究

张益强^① 杨东凯^① 张其善^① 张伯川^① 胡荣磊^① 李紫薇^②

^①(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

^②(北京时空港天地科技有限公司 北京 100038)

摘要 该文简述了利用 GPS 散射信号进行微波遥感的背景和优点, 并从 GPS 海面散射信号极化特性、信号波动情况、波程差引起散射信号相对直射信号的码延迟以及由于海面粗糙度引起的散射信号相关功率扩散几个方面详细分析了海面散射 GPS 信号检测技术。给出了自行研制的延迟映射接收机的工作原理, 在天津近海进行了首次搭载飞行试验, 数据分析结果与理论分析符合。

关键词 全球定位系统, 微波遥感, 延迟映射接收机, 散射

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-1091-04

Detection Technique of GPS Sea Surface Scattered Signal

Zhang Yi-qiang^① Yang Dong-kai^① Zhang Qi-shan^① Zhang Bo-chuan^①
Hu Rong-lei^① Li Zi-wei^②

^①(School of Electronic and Information Engineering, Bei Hang University, Beijing 100083, China)

^②(Beijing Spatial Port Geosystems Co., Ltd, Beijing 100038, China)

Abstract Background and advantages of GPS based remote sensing are introduced, characteristics of forward scattered GPS signal such as polarization, variation, code delay due to the wave travel distance difference between direct and scattered signal, and the cross-correlation power expansion due to sea surface roughness are discussed in detail. Working principle of the self-developed delay mapping receiver is also presented. The first test flight experiment is done at Tianjin near sea with the delay mapping receiver mounted on an airplane. Analysis shows that results have good agreement to the theory discussed above.

Key words Global Position System (GPS), Microwave remote sensing, Delay mapping receiver, Scatter

1 引言

GPS全球定位系统除应用于定位和导航外, 也已成功应用于大气温度、湿度监测, 气象预报等新的领域, 这些都是基于对GPS直射信号传播特性的分析处理, 而通常情况下, GPS反射信号对定位和跟踪是极其不利的, 人们也研究了各种方法来减弱和消除反射信号的影响; 但科学家发现利用海面反射的GPS信号可以进行微波遥感^[1], 通过散射理论模型与采集的GPS散射信号波形进行比对, 可以反演海面风场, 从而开辟了利用GPS散射信号的新型微波遥感手段。另外, 利用GPS散射信号还可应用在海冰探测、陆地土壤湿度监测、海洋测高等方面。采用该项新技术作为遥感手段, 有以下一些特点。

(1) 异源观测模式 无需发射机, 设备复杂度和成本低。

(2) 扩频技术 扩频处理适于接收微弱的 GPS 散射信号。

(3) 大量信号源 GPS 现代化计划以及未来的欧洲伽利略全球定位系统将带来更多的信号源。

美国自 1997 年开始针对GPS散射信号研究和机载试验,

取得了大量研究成果^[1-5], 并已开始星载研究^[6], 我国对GPS海面散射信号的研究刚开始, 散射信号接收理论以及接收机的研制尚处于初级阶段。本文第 2 节详细讨论了GPS海面散射信号的检测理论如极化特性、信号波动、传播延迟以及相关功率扩散等; 第 3 节介绍了用于检测散射信号的延迟映射接收机(Delay Mapping Receiver, DMR)的工作原理; 第 4 节分析了测试结果, 最后给出了结论。

2 GPS 海面散射信号检测理论

2.1 散射信号极化方向旋转, 信号波动大

GPS信号是圆极化平面波, 发射信号具有右旋极性, 而经过海面散射的信号主要分量呈左旋极化特性^[2]。因此, 为有效接收海面散射信号, 必须通过一个左旋极化的天线来接收。

由于海面的时间相关性, 海面状态具有随机性, 导致散射的信号出现随机变化, 所以与直射卫星信号相比, 海面散射信号会出现更大的变动。另外由于微波视距传播特性, 对于直射和散射信号, 都必然受到遮挡的影响。

2.2 传播波程差造成码延迟

由于散射信号和直射信号的波程差, 必然造成散射信号对于直射信号的码延迟。在接收直射与散射信号并计算码延

迟的延迟映射接收机中, 镜面反射点码延迟的粗略计算方法是采用 $2h \sin \theta$ 计算^[7], 其中 h 为载体距离反射面的飞行高度, θ 为观测卫星的高度角。

精确码延迟用下述方式计算。在地心直角坐标系下, 利用 GPS 卫星位置 (X_G, Y_G, Z_G) 和 DMR 接收机导航推算得到的接收散射信号的左旋天线位置 (X_L, Y_L, Z_L) , 按照以下几何关系并取 $\rho(\phi_S, \lambda_S)$ 的最小值来确定海面镜面反射点的位置 (X_S, Y_S, Z_S) :

$$\rho(\phi_S, \lambda_S) = \sqrt{(X_L - X_S)^2 + (Y_L - Y_S)^2 + (Z_L - Z_S)^2} + \sqrt{(X_G - X_S)^2 + (Y_G - Y_S)^2 + (Z_G - Z_S)^2} \quad (1)$$

其中 ϕ_S, λ_S 为镜面反射点在地心球坐标系下参数。假定 a, b 分别为地球长半轴和短半轴, 则在地心直角坐标系下:

$$\left. \begin{aligned} X_S &= \frac{a^2 \cos \phi_S \cos \lambda_S}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi_S + b^2 \sin^2 \phi_S}} \\ Y_S &= \frac{a^2 \cos \phi_S \sin \lambda_S}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi_S + b^2 \sin^2 \phi_S}} \\ Z_S &= \frac{b^2 \sin \phi_S}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi_S + b^2 \sin^2 \phi_S}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

利用 $(X_G, Y_G, Z_G), (X_L, Y_L, Z_L), (X_S, Y_S, Z_S)$ 可计算经过镜面反射点的几何路径延迟 τ_0 。

2.3 粗糙海面导致散射信号相关功率扩散

GPS 互相关操作可以用互相关积分函数表达, 对于直射信号:

$$Y(t) = \int_0^{T_i} a(t) \cdot u(t) dt \quad (3)$$

其中 $a(t)$ 为本机 C/A 码序列, $u(t)$ 为接收信号, T_i 是积分时间。

对于海面散射信号:

$$Y(\tau, \tau_0, t) = \int_0^{T_i} a(t + \tau_0 - \tau) \cdot u(t + \tau_0) dt \quad (4)$$

其中 τ_0 是镜面反射点信号码延迟, τ 是在 $\{-M, +N\}$ 码元区间的延迟量。由于伪随机噪声的特性, 只有当 $u(t)$ 与 $a(t)$ 具有相同的时间延迟时, 才能产生显著相关。因此, 对于每个设定的 τ , 式(4)相当于对来自镜面反射点周围一个椭圆形环状区域的散射信号进行互相关(见图1)。

为了增加输出数据的可靠性和避免过大的数据量, DMR 实际输出值为散射信号在时间段 T_a 内的平均相关功

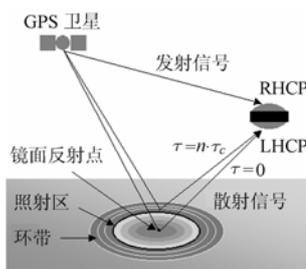


图1 GPS信号散射的几何关系
Fig.1 Geometry of GPS scattered signal

率, 可通过计算散射信号同相和正交分量的平方和并取均值得到, 如式(5)所示:

$$\bar{Y}(\tau, \tau_0) = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} |Y(\tau, \tau_0, t)|^2 dt \quad (5)$$

由此得到以相关功率表达的来自于镜面反射点周围照射区的散射信号强度。

由于海面粗糙度的影响, 在不同环带的 GPS 散射信号到达左旋圆极化(Left Hand Circular Polarization, LHCP)天线的时刻不同, 除相对于直射信号的码延迟外, 还造成了海面散射信号相关功率的扩散。如图2所示。

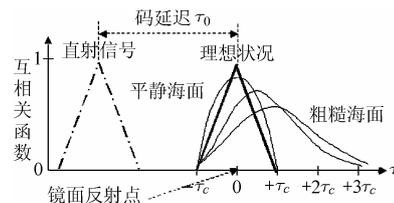


图2 GPS互相关函数受海面粗糙度影响造成的扩散
Fig.2 Expansion of the cross-correlation due to the sea surface roughness

3 延迟映射接收机工作原理

为有效接收海面散射GPS信号, 接收设备需要两个射频前端分别接收直射卫星信号和散射卫星信号, 内置软件也需要特殊设计, 普通商用GPS接收机无法满足上述要求, 为此, 我们以Zarlink公司的GP2000芯片组为基础, 自行研制了延迟映射接收机^[8], 其工作原理如图3所示。

延迟映射接收机包含12个并行通道, 其中1~6通道与右旋圆极化(Right Hand Circular Polarization, RHCP)天线连接, 接收GPS卫星的发射信号, 通过闭合码跟踪环路获得GPS伪距和多普勒观测值以及导航解; 其余通道则与LHCP天线连接, 接收GPS卫星的海面散射回波信号, 通过开路的码跟踪环路得到经镜面反射点的路径延迟, 并以1/2码元长度为延迟步长在 $\{-M, +N\}$ 半码元区间对接收信号进行互相关, 得到相应的回波功率值。

延迟映射接收机技术指标如下:

通道数目 12通道, 通道1~6跟踪直射GPS信号, 通道7~12跟踪散射GPS信号。

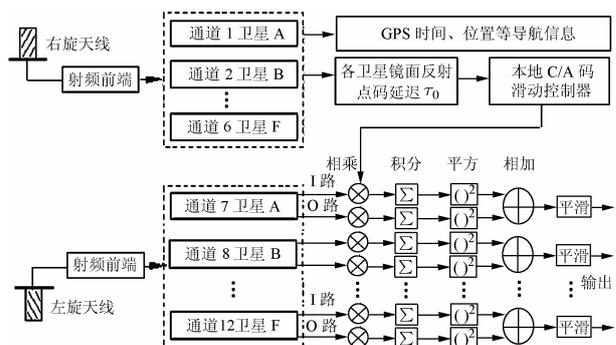


图3 延迟映射接收机工作原理图
Fig.3 Working diagram of DMR

数据内容 导航定位解(时间, 经纬度, 速度)、6 个直射通道直射卫星信号高度角、方位角和相关功率、6 个散射信号 32 半码片延迟时刻的相关功率、直射和散射通道的码延迟。

输出速率 1Hz。

4 试验结果与分析

为了验证上述检测理论和接收机设计, 在中国海监有关部门协助下, 延迟映射接收机安装于运-12 飞机上, 2004 年 8 月 3 日, 在天津近海进行了首次搭载飞行试验。其中右旋天线安装在飞机机舱顶部, 接收 GPS 卫星发射信号, 左旋天线安装在机舱腹部, 接收 GPS 海面散射回波信号。

飞行高度: 约 950m;

采样速率: 1Hz 采样数据: 8590;

操作过程: 为了防止沙尘进入机舱, 在飞机起飞阶段和降落阶段, 飞机底部试验舱门关闭, 遮挡了接收散射信号的左旋天线。

表 1 为飞行过程中, 6 个直射通道的卫星跟踪的情况。

表 1 直射 1-6 通道卫星跟踪情况

Tab.1 Satellites tracking in direct channel 1-6

通道	1	2	3	4	5	6
跟踪卫星	SV18	SV22	SV09 →SV24	SV15→ SV30	SV14	SV05

4.1 反射信号相关功率

我们以通道 2 为例进行分析。图 4 为通道 2(22 号卫星)直射通道相关功率及反射通道相关功率(32 个码片中最大值)。表 2 为 22 号卫星直射和散射信号波动情况。

表 2 22 号卫星直射和散射信号波动情况

Tab.2 Variation of direct and scattered signal satellite No.22

卫星	均方差	均值	归一化
22 号直射	2.2300e+006	1.4563e+007	0.1531
22 号散射	2.3471e+006	3.1258e+006	0.7509

从图 4 可以直观地看出, 散射信号波动情况比直射信号大, 表 2 数据也表明, 散射信号相关功率归一化均方差明显要大, 这也说明散射信号波动大, 符合前面讨论的散射信号受到海面粗糙度影响造成的结果。

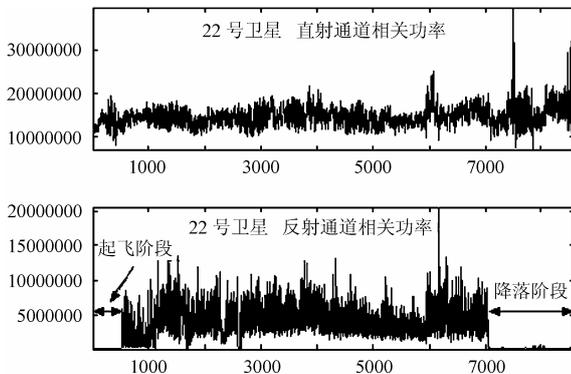


图 4 22 号卫星直射通道相关功率及反射通道相关功率
Fig.4 Direct and scattered signal cross-correlation power of satellite No.22

另外, 还可以注意到, 在图 4 反射通道数据整个过程中, 开始阶段和结束阶段相关功率很低, 没有散射信号出现, 这是由于起飞前和降落前关闭试验窗, 接收散射信号的天线遮挡所致, 造成没有信号被接收机的左旋天线所接收。

4.2 传播路径差造成码延迟, 散射信号在镜面反射点附近出现

图 5 为整个数据采集过程中飞机高度。图 6 为 22 号卫星散射信号镜面反射点相对于直射信号实际的码延迟 τ_0 。

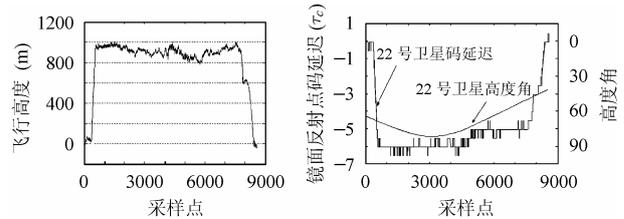


图 5 飞机飞行高度 h 曲线
Fig.5 Diagram of aircraft flight altitude h

图 6 22 号卫星高度角及镜面反射点码延迟
Fig.6 Code delay of specular point and elevation angle of satellite

由图 5, 图 6 可以看出 22 号卫星随着飞机飞行高度 h 和卫星高度角 θ 的变化而引起的码延迟变化情况。图 6 中 3000 采样点之后, 我们可以看出镜面反射点码延迟随着卫星高度角的降低引起的波程差 ($2hsin\theta$) 导致码延迟降低的情况。

图 7 为 6 个散射通道相关功率相对于镜面反射点码延迟 (τ) 的关系图, 可以看出, 散射信号均出现在镜面反射点 (图中横轴 0 点) 附近。

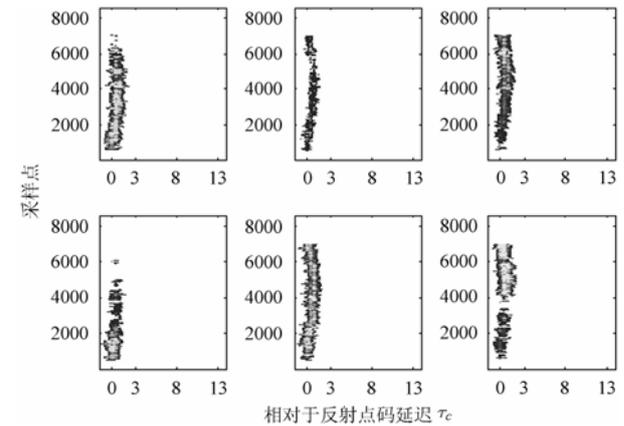


图 7 6 个散射通道相关功率集中情况

Fig.7 Diagram of cross-correlation power of 6 scattered channel

4.3 海面粗糙度引起相关功率扩散

图 8 为截取 22 号卫星散射功率 6700 到 7300 共 600 个采样点的波形。

根据 GPS 系统工作原理, 其本身的 C/A 码相关功率仅仅存在于一个码片时间内。从图 8 可以看出, 散射信号功率扩散在码片 $-0.5 \sim 1.5$ 共 2 个码片之间, 这与图 2 示意图完全相符, 这也可以说明, 由于海面风场的影响, 造成的多径效应使得相关功率扩散。基于此, DMR 的相关功率输出结合

一定的风场反演模型即可实现利用 GPS 卫星散射信号进行测风的目的。

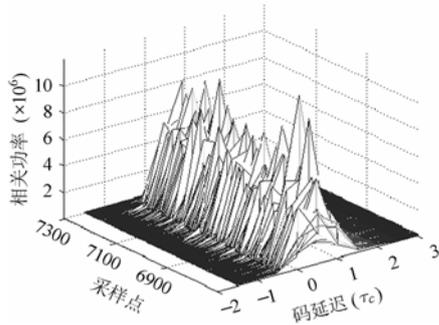


图 8 22 号卫星散射信号功率扩散情况

Fig.8 Cross-correlation power expansion of satellite No.22

5 结束语

本文从信号波动, 波程差, 相关功率扩散, 信号遮挡等几个方面对海面散射信号的可探测性进行了分析, 设计了 DMR 接收机并完成了首次飞行搭载试验, 自行研制的 DMR 接收机能够准确测量 GPS 卫星海面散射信号。取得了令人满意的结果, 为今后利用 GPS 散射信号研究海面风场开辟了新的途径。

参考文献

- [1] Garrison J L, Katzberg S J, Howell C T III. Detection of ocean reflected GPS signals: theory and experiment. In Proceedings of the IEEE Southeastern '97: Engineering the New Century, Blacksburg, VA, 1997: 290–294.
- [2] Thompson D R, Elfouhaily T M, Gasparovic R F. Polarization dependence of GPS signals reflected from the ocean. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International, Hawaii, U.S.A, 24-28 July 2000, vol.7: 3099–3101.
- [3] Komjathy A, Zavorotny V, Axelrad P, Born G, Garrison J. GPS signal scattering from sea surface between experimental data and theoretical model. 5th Int. Conf. On Remoting Sensing for Marine & Coastal Environments, San Diego, California, 1998, vol1: 530–539.
- [4] Zavorotny V U, Voronovich A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application. *IEEE Tran. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38 (2): 951–964.
- [5] Armatys M, Masters D, Komjathy A, Axelrad P, Garrison J L. Exploiting GPS as a new oceanographic remote sensing tool. National Technical Meeting of the U.S. Institute of Navigation, Anaheim, CA, 26-28 January, 2000: 339–347.
- [6] Armatys M, Axelrad P, Masters D. GPS-based remote sensing of ocean-surface wind speed from space. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International, Sydney, Australia, 9-13 July, 2001, Vol 6: 2522–2524.
- [7] 林洪文, 张益强. GPS 遥感测风延迟映射接收机设计及应用. 全国信号与信息处理专业第八届联合学术会议; 贵阳, 2004: 144–148.
- [8] 杨东凯, 张益强. 基于 DSP 芯片的延迟映射接收机设计. 第二届中国电子学会 DSP 应用学术会议, 天津; 2004: 264–267.

- 张益强: 男, 1974 年生, 博士生, 主要研究方向为 GPS 接收机、射频识别等.
- 杨东凯: 男, 1972 年生, 博士后, 副教授, 主要研究方向为卫星定位、智能交通、位置服务系统等.
- 张其善: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星导航、信息传输与处理、智能交通等.
- 张伯川: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为高动态 GPS 模拟器、接收机等.
- 胡荣磊: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为信息安全、卫星导航等.
- 李紫薇: 女, 1959 年生, 研究员, 目前主要研究方向为遥感遥测等.