软件定义的 GNSS反射信号接收机设计

杨东凯 丁文锐 张其善

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 分析了导航卫星反射信号的特点,给出了反射信号软件接收机的总体结构及其主要模块,主要包括接收直射和反射信号的天线、射频前端和高速 A/D 变换器,以及数据处理用的计算机. 重点介绍了反射信号处理的基本过程,其中主要讨论了本地反射信号 C/A 码的生成模式,在此基础上分析了反射信号相关功率的计算方法,并给出了具体的仿真计算实例. 设计了反射信号处理的具体实现软件,包括详细的流程图,关键参数和主要函数的定义及用户界面,利用实际采集的数据进行了验证,结果表明所设计的反射信号接收机运行稳定,能根据用户输入的不同参数提供导航卫星反射信号的相关功率输出.

关 键 词: 全球定位系统; 信号处理; 接收机; 反射; 相关功率

中图分类号: P 228. 4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965 (2009) 09-1048-04

Software defined GNSS reflections receiver design

Yang Dongkai Ding Wenrui Zhang Qishan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The characteristics of navigation satellite reflected signal was analyzed. Both the architecture and the components for GNSS (global navigation satellite system) reflections receiver were presented including the two antennas, two RF (radio frequency) front ends, two high speed A/D converter and the computer for data processing. The basic reflections processing workflow was elaborated on, where C/A code generation for the reflected signal was mainly discussed following the correlation power computation with one simulation example. The software was designed and its detailed flowchart, key parameters and functions definition, user interface were also proposed. Field test data were feed into the designed software receiver, and the displayed result show that the receiver runs stably. And it can give correlation power with user defined different parameters.

Key words: global positioning system (GPS); signal processing; receiver; reflection; correlation power

尽管全球导航卫星系统 (GNSS, Global Navigation Satellite System)卫星信号经由反射体表面产生的反射信号在测距定位中是一种干扰信号,但是,自 1994年国外学者发现并开始研究利用目标所反射的全球定位系统 (GPS, Global Positioning System)卫星信号来实现遥感后,利用 GPS海面反射信号进行海面风场遥感已成为倍受关注的前沿课题[1],美国、欧洲以及中国都投入了很多精力进行研究,并开展了多次有关的地基、空基和星基实验,取得了有意义的研究结果,为进一步开展研究和应用奠定了基础[2-4]. 随着新的 GNSS系统的建成,如欧洲的 GALILEO系统及中国的 COMPASS系统,为了能够更好地接收多个导航系统卫星的反射信号,已经设计好的接收机将面临升级问题,软件接收机利用升级方便的软件可以满足这一要求[5]. 同时,利用软件接收机可以重复处理采集的原始数据,并基于不同的处理算法或者设置不同的处理参数进行处理,以便为不同的应

收稿日期: 2009-02-27

基金项目: 国家 863计划资助项目 (2007AA12Z340)

作者简介: 杨东凯 (1972 -),男,山东莱芜人,副教授, edkyang@buaa.edu.cn.

用如土壤盐碱度的反演、海洋风场的反演等提供基础数据源[6]. 本文在分析导航卫星反射信号特点的基础上,给出了反射信号软件接收机的整体结构,并具体介绍了反射信号的处理流程,最后设计了软件接收机的信号处理流程和用户界面,并利用实际采集的数据进行了验证.

1　导航卫星反射信号特性

导航卫星信号具有右旋圆极化特性 (RHCP, Right Hand Circularly Polarized),而经过目标反射的信号呈左旋极性 (LHCP, Left Hand Circularly Polarized)为主. 反射表面的特性将直接影响信号反射的形式和强度,不同目标反射面介质及空间粗糙度参数、同一目标不同运动速度及姿态、反射信道传输介质及环境变化等都对信号反射和接收特性有不同的影响,如海水介质和目标介质 (如舰船、石油平台、空间飞行器等)介电常数不同,反射信号的强度也不同,并且随着结构差异呈现不同的反射方向. 接收机收到的反射信号一般为前向反射信号,只有当卫星信号入射角为 90 时,才出现后向反射信号.

在导航卫星反射信号应用中,反射信号一般利用相关功率来描述. 假定 $a(t)$为本地 C/A码序列, $u(t)$为接收信号, t_0 为信号接收时刻, τ为在 $\{-M, +N\}$码元区间的延迟量, T_i为积分时间.

下式可用于反映信号接收互相关函数:

$$Y(\tau, t_0) = \int_0^{T_i} a(t + t_0 - \tau)\, u(t + t_0)\, \mathrm{d}t \quad (1)$$

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 (1)相当于对来自镜面反射点周围一个椭圆形环状区域的反射信号进行互相关,如图 1.

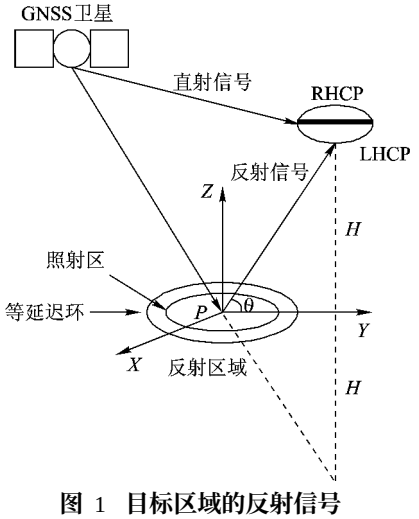

图 1　目标区域的反射信号

产生显著互相关的椭圆形区域称为照射区,每一个椭圆形圆环上相对于直射信号的路径延迟是一样的,称为等延迟环. 为了增加输出数据的可靠性和避免过大的数据量,实际输出可取反射信号在时间段 T_0 内的平均相关功率. 平均相关功率可通过计算散射信号同相、正交分量的平方和并取均值得到,如式 (2)所示,也即是反射信号软件接收机的主要输出.

$$\bar{Y}(\tau) = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_i} |Y(\tau, t_0)|^2 \mathrm{d}t_0 \quad (2)$$

2　GNSS反射信号软件接收机设计

2.1　软件接收机总体结构

GNSS反射信号软件接收机的总体结构见图 2. 其中,右旋天线和左旋天线分别用于接收导航卫星直射信号和反射信号. 直射信号和反射信号经过 L1波段低噪声放大器 (LNA, Low Noise Amplifier)放大后分别输入到两个射频前端,将其下变频后生成低中频信号,经过高速 A/D采样后送入 PC机处理. 在 PC机中,完成卫星信号快速捕获和跟踪,利用卫星直射信号提供的信息进行导航定位求解,在求得卫星、接收机位置等参数基础上,对反射信号进行相关处理,得到相关功率值.

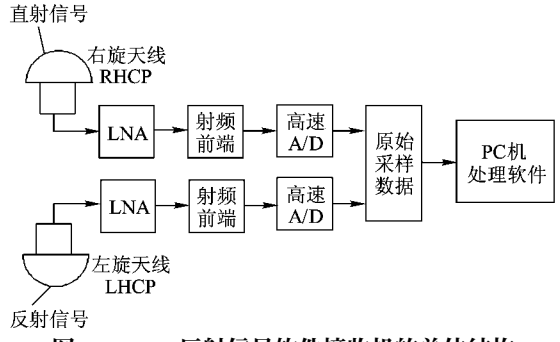

图 2　GNSS反射信号软件接收机的总体结构

2.2　反射信号处理过程

如图 3所示为反射信号处理过程,其中原始采样数据中的直射和反射信号分别由直射通道 (虚线上部)和反射通道 (虚线下部)进行处理. 对于直射信号的处理过程与普通的软件接收机类似,载波剥离后的信号分别与超前、即时和滞后等三路本地码进行相关运算,相关结果积分累加后送至捕获和跟踪模块进行处理,得到直射信号的载波频率和码相位,经过导航解算,提取用户所需要的伪距、多普勒频移、导航电文等观测量,求得导航卫星位置、接收机位置.

直射通道中载波 NCO (Numerical Control Oscillator)的输出用于反射通道中反射信号的载波

剥离,导航卫星和接收机的位置信息用于计算镜面反射点的时间延迟,此延迟信息与码 NCO的输出相结合即可求解本地反射信号的 C/A码,将其与接收到的反射信号进行相关,即可得到反射信号相关功率的波形.

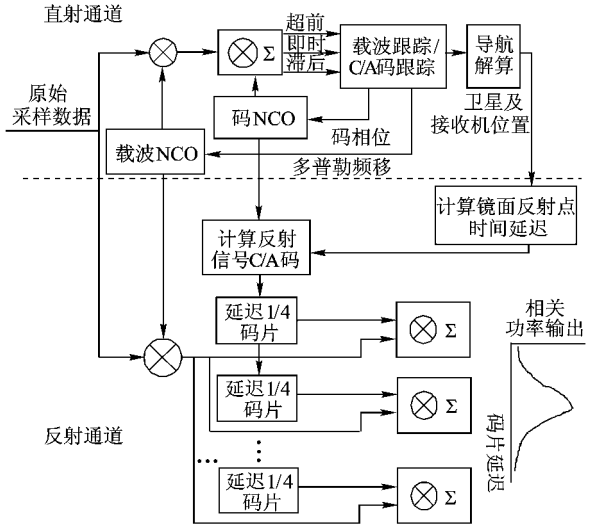

图 3 反射信号处理过程

2.3 本地反射信号 C/A码计算

在图 1中,自镜面反射点 P的反射信号到达接收机的时间与直射信号的到达时间与卫星的仰角 θ和接收机的高度 H有关,H和 θ均由直射通道的导航解算得到,接收机右旋天线和左旋天线之间的垂直距离可以忽略不计,则有 P点反射信号相比直射信号到达接收机的时间延迟 τ_0 (单位:s)可表示为

$$c \cdot \tau_0 = 2H \cdot \sin\theta \qquad (3)$$

式中 c为光速 3×10^8 m/s

直射通道中求解出的 C/A码经过 τ_0时间延迟即可得到用于计算反射信号相关功率的本地反射信号的 C/A码.

2.4 一维相关功率计算

假设接收机收到的反射信号与直射信号的多普勒频率之间的差别忽略不计,则直接利用直射通道输出的载波多普勒频偏值控制载波 NCO,生成的载波与原始数据中的反射信号相乘实现其载波剥离,得到反射信号的 C/A码信息.

将本地反射信号 C/A码每隔一定的时间间隔进行延迟,而后与载波剥离后的反射信号 C/A码信息进行相关运算,得到反射信号相对于时延的一维相关功率. 在软件接收机中,C/A码延迟的时间间隔可根据需要进行设置,以提供不同分辨率的相关功率值. 为了提高处理速度,常用 FFT进行时域到频域的变换,在频域完成相乘后,再利用逆 FFT变换到时域. 图 4为仿真计算的 1号卫星反射信号一维时延相关功率,接收机高度设置为 5 km,卫星仰角为 60°,多普勒频偏为 500 Hz

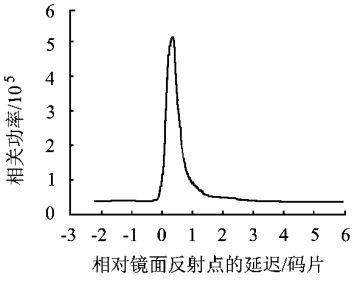

图 4 反射信号一维时延相关功率图

3 反射信号处理的软件实现

GPS反射信号软件处理流程如图 5所示.

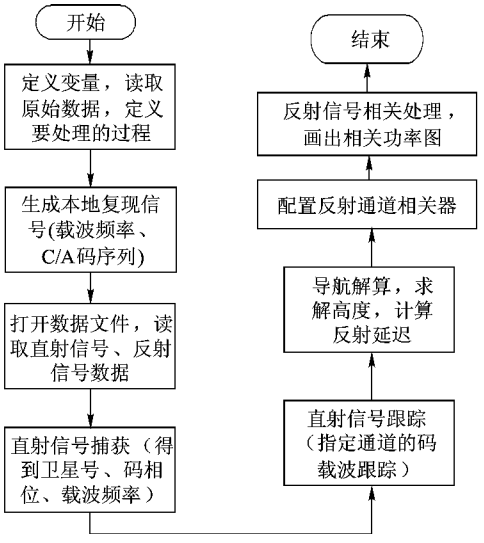

图 5 GPS反射信号软件处理流程

首先,初始化函数 initial()定义程序中使用的各种变量并赋初值;读取导航卫星参数;定义结构体数组 channel[24],分配接收处理通道,如 channel[0]～channel[11]用于处理直射信号,channel[12]～channel[23]用于与 channel[0]～channel[11]对应的反射信号.

初始化完成后,codegenaration()函数生成本地复现信号,即载波频率、C/A码相位,用于直射信号的捕获跟踪. 利用 readdata()函数打开采集的原始数据读取直射和反射数据,并存放在 Directdata[ ]和 Reflectdata[ ]两个不同的数组中. Directdata[ ]传递给直射信号捕获函数 acquisition(),估计信号频率和 C/A码相位的结果置于结构体 AcqResults中. 跟踪函数 tracking()初始化所有软件通道,读取捕获结果并实施信号的闭环跟踪,其结果置于结构体 TrackResults中,同时,该函数还用来检测导航电文的位边界,实现数据解码之

后的卫星星历存于结构体 Eph中.

函数 calGPSposition()寻找导航电文子帧头,计算发送时间并估算所有卫星的空间位置及其到接收机的伪距,传递给函数 calReceiverPosition()以计算接收机的位置.

函数 channelsetting()基于直射通道的处理结果进行反射通道的配置,包括与直射通道一一对应的卫星号、卫星仰角、C/A码、码延迟间隔等参数.配置完成后则进入反射信号相关处理程序 correlation(),完成反射信号的相关处理,结果被存储在数组 CorrResults[ ]中并以图形方式显示在用户界面上. correlation()函数的结算流程如图 6所示.函数 correlation读取 1ms的反射通道数据,将直射信号跟踪得到的载波与反射数据相乘以实现反射信号的载波剥离.根据计算求得的镜面反射点时间延迟 τ_0,由式 $\tau_0 = T/N \cdot n_d$,计算出 τ_0 对应的码片延迟 n_d,得到反射信号 C/A码,其中 T为 C/A码周期,N 为 C/A码片数,其中的码片间隔 1/4在软件中可以根据需要进行设置.

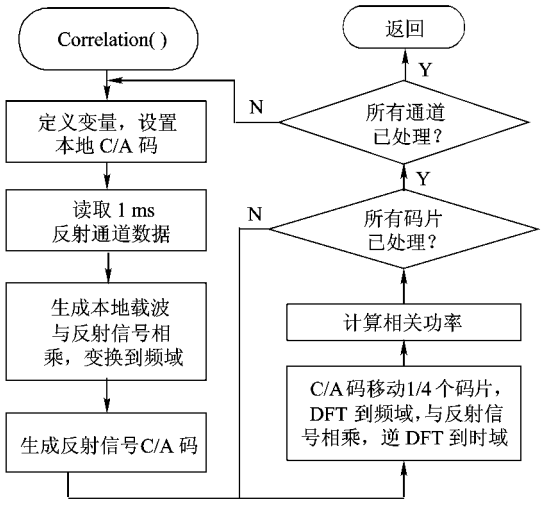

图 6　反射信号一维时延相关处理流程图

图 7中显示了反射信号软件接收机的用户界面,其中的一维相关功率是实际飞行试验采集的数据(采集日期:2009年 2月 11日上午 9:39).

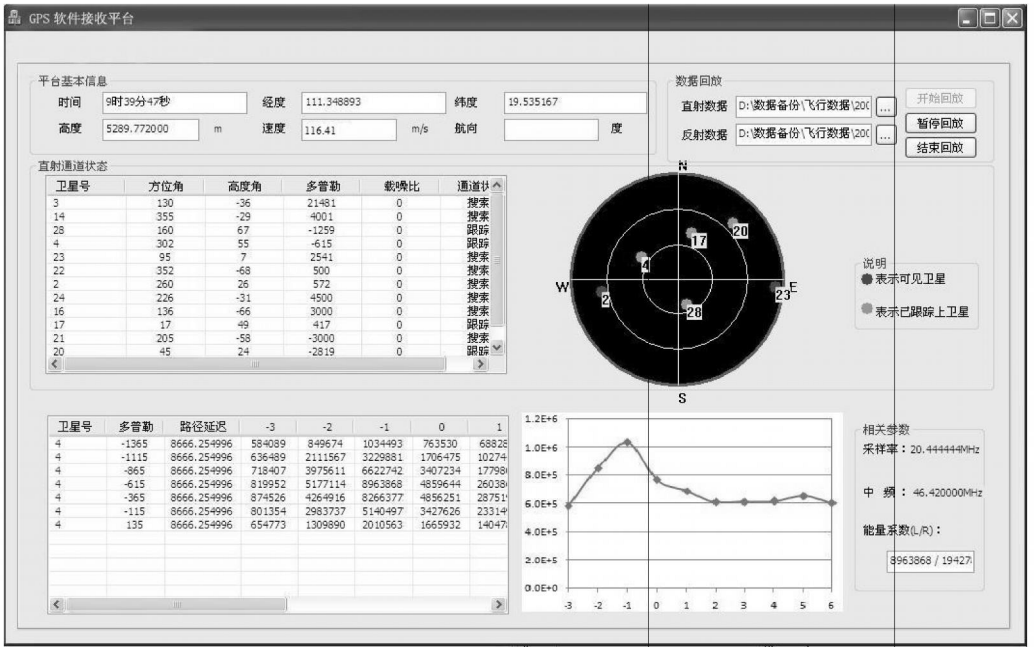

图 7　软件接收机用户界面和实际飞行试验的结果

4　结　论

本文详细分析了导航卫星反射信号的特点,给出了 GNSS反射信号软件接收机的总体结构,并着重就反射信号的处理过程进行了讨论,包括本地反射信号的 C/A码计算,一维相关功率计算等,对于软件实现,提供了整个程序的实现流程,以及有关的调用函数和指标参数.该 GNSS反射信号软件接收机可以设置码片延迟的大小,如 1/4, 1/2, 1/20等,为不同的应用提供不同时延分辨率的相关功率值.由于反射信号的处理均由 PC机编程实现,所以对于多个导航系统信号的处理只需要进行软件升级即可,大大降低了开发成本,缩短了开发周期,为反射信号的应用提供了一个开放的公共的研究平台.同时,该软件接收机对于直射信号的处理给出了接收机的位置信息和所采用的导航卫星的几何构型和信号状态,同样为 GNSS接收机的研制提供了参考.

(下转第 1071页)

of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2001, 24 (1): 61 - 65 (in Chinese)

[4] 董晓蕾,曹珍富,李晓红. 基于双难题的两个数字签名方案的密码分析 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40 (7): 1174 - 1177
Dong Xiaolei, Cao Zhenfu, Li Xiaohong. Cryptanalysis of two signature schemes based on two hard problems [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40 (7): 1174 - 1177 (in Chinese)

[5] 李子臣,徐国爱,杨义先. He-Wu数字签名方案的攻击方法 [J]. 北京邮电大学学报, 1999, 22 (4): 6 - 8
Li Zichen, Xu Guoai, Yang Yixian. Cryptanalysis of improved Rabin's crypto-system [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1999, 22 (4): 6 - 8 (in Chinese)

[6] 张明志. 用圆锥曲线分解整数 [J]. 四川大学学报:自然科学版, 1996, 33 (4): 356 - 359
Zhang Mingzhi. Factoring integer with conics [J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 1996, 33 (4): 356 - 359 (in Chinese)

[7] 曹珍富. 基于有限域 F_P上圆锥曲线的公钥密码系统 [C]//刘木兰,龚奇敏. 密码学进展—ChinaCrypt '98. 北京:科学出版社, 1998: 45 - 49
Cao Zhenfu. A public key cryptosystem based on the conic curve over finite fields F_P [C]//Liu Mulan, Gong Qimin. Advances in Cryptology-ChinaCrypt '98. Beijing: Science Press, 1998: 45 - 49 (in Chinese)

[8] 孙琦,朱文余,王标. 环 Z_n上圆锥曲线和公钥密码协议 [J]. 四川大学学报:自然科学版, 2005, 42 (3): 471 - 478
Sun Qi, Zhu Wenyu, Wang Biao. The conic curves over Z_n and public-key cryptosystem protocol [J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2005, 42 (3): 471 - 478 (in Chinese)

[9] 王标,朱文余,孙琦. 基于剩余类环 Z_n圆锥曲线的公钥密码体制 [J]. 四川大学学报:工程科学版, 2005, 37 (5): 112 - 117
Wang Biao, Zhu Wenyu, Sun Qi. Public-key cryptosystem based on the conic curves over Z_n [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2005, 37 (5): 112 - 117 (in Chinese)

[10] 肖龙,王标,孙琦. 基于环 Z_n上的圆锥曲线数字签名和多重数字签名 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40 (6): 648 - 651
Xiao Long, Wang Biao, Sun Qi. Digital signature and multiple digital signatures based on the conic curve over Z_n [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40 (6): 648 - 651 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)

(上接第 1051页)

参考文献 (References)

[1] 张益强,张其善,杨东凯,等. 基于 GPS遥感的延迟映射接收机关键技术 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32 (3): 333 - 336
Zhang Yiqiang, Zhang Qishan, Yang Dongkai, et al. Design of delay mapping receiver for GPS remote sensing [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32 (3): 333 - 336 (in Chinese)

[2] 刘经南,邵连军,张训械. GNSS - R研究进展及其关键技术 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2007, 32 (11): 955 - 960
Liu Jingnan, Shao Lianjun, Zhang Xunxie. Advances in GNSS-R studies and key technologies [J]. Journal of Wuhan University (Geomatics and Information Science), 2007, 32 (11): 955 - 960 (in Chinese)

[3] Gleason S, Hodgart S, Mackin S, et al. Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low earth orbit for the purpose of ocean remote sensing [J]. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 2005, 43 (6): 1229 - 1241

[4] Masters D, Akos D, Esterhuizen S. Integration of GNSS bistatic radar ranging into an aircraft terrain awareness and warning system [C]//Proc ION GNSS. Long Beach, CA: Institude of Navigation, 2005: 1739 - 1748

[5] James Bao-yen Tsui. GPS软件接收机基础 [M]. 陈军译. 北京: 电子工业出版社, 2007
James Bao-yen Tsui. Fundamentals of global positioning system receivers a software approach [M]. Translated by Chen Jun. Beijing: Publishing House of Electponic Industry, 2007

[6] Mansndhar D, Shibasaki R. Pototype software-based GPS receiver for reflected signal analysis [C]// Proc IGARSS. Seoul, Korea: NSC, 2005, 7: 4689 - 4692

(责任编辑:娄　嘉)