

GPS IF 信号的计算机模拟和实现

郭际明^{1,2} 汪 伟¹ 巢佰崇¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 辽宁工程技术大学地理空间信息技术与应用实验室,阜新市中华路 47 号,123000)

摘 要:提出了用 GPS 卫星星历来近似模拟计算载波多普勒频率和卫星信号延迟,进而用计算机模拟 GPS 接收机的中频数字信号,为软件 GPS 接收机的模型算法提供数据源。与实际接收的卫星中频数字信号的频谱进行比较,结果表明,用计算机模拟 GPS IF 信号是可行的和有效的。
关键词:GPS; 中频; 信号模拟
中图法分类号:P228.41

自 1992 年 Joe Mitola 提出软件无线电的概念^[1]以来,其以软件模块化设计的观点和独特的、自由的信道配置方式受到了广泛的关注。随之发展起来的 GPS 软件接收机的设计方案^[2-5]也在不断地改进。GPS 软件接收机的信号捕获和跟踪模型的验证取决于数字化的 GPS 中频信号。Akos 指出^[6],在未来几年的计算机水平下,直接对高达 1.5 GHz 的射频信号采样并分析是不太现实的。所以,目前的 GPS 中频数字信号都是对接收到的射频信号(RF signal)先经前端低噪放大器(LNA)放大并混频,转化为中频信号(IF signal),再由 A/D 采样并量化后得到。现有的 GPS 信号接收前端有 Atmel 公司的 ATR 系列、GPS CREATION 的 GPS10 系列等,其造价一般都比较 高,而且不能人为设置及模拟不同环境下的噪声参数(如多路径误差的能量、相关时间延迟等)。鉴于此,本文用计算机模拟 GPS L_1 中频采样后的数字信号,并存储为文本格式,方便 GPS 软件接收机信号捕获和跟踪模型的验证,并为研究各种噪声环境下 GPS 软件接收机跟踪环路的特性提供数据源。

1 GPS IF 信号的数学模型

1.1 接收信号经混频后的输出模型

设 t 时刻 GPS 天线接收到的可见卫星信号

为 $s(t)$ (为方便起见,只考虑 L_1 C/A 信号),则有:

$$s(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2P_k}d_k(t-\delta t_k)c_k(t-\delta t_k)\cos(2\pi(f_{L_1}+\delta f_{\text{dop},k})(t-\delta t'_k)+\varphi_k)+MP(t)+n(t) \tag{1}$$

其中, k 是接收到的卫星顺序编号; N 是可见卫星的个数; $\sqrt{2P_k}$ 、 δt_k 、 $\delta t'_k$ 、 $\delta f_{\text{dop},k}$ 、 φ_k 分别为第 k 个卫星的能量、码相位总时间延迟、载波相位总延迟、多普勒频率和随机相位; $MP(t)$ 和 $n(t)$ 为多路径效应和噪声; $d_k(\cdot)$ 、 $c_k(\cdot)$ 、 $\cos(\cdot)$ 分别为接收机接收的第 k 颗卫星的数据码、C/A 码和载波。该信号经过前端放大器放大并用频率为 f'_{L_1} 的本地信号混频。设接收机产生 f'_{L_1} 的晶振误差为 δt_{rev} ,本地混频信号为 $s_{\text{rev}}(t)$,则有:

$$s_{\text{rev}}(t) = \cos(2\pi f'_{L_1}(t-\delta t_{\text{rev}})) \tag{2}$$

由式(1)和式(2)混频得到的信号经低通滤波器滤除掉高频部分后,输出为 $s_{\text{IF}}(t)$,则有:

$$s_{\text{IF}}(t) = \sum_{k=1}^N A_k d_k(t-\delta t_k) c_k(t-\delta t_k) \cos(2\pi(f_{\text{IF}}+\delta f_{\text{dop},k})t+K+\varphi_k)+MP'(t)+n'(t) \tag{3}$$

式中, K 为混频后的频率误差影响,其表达式为:

$$K = 2\pi(-(f_{L_1}+\delta f_{\text{dop},k})\delta t'_k+f'_{L_1}\delta t_{\text{rev}}) \tag{4}$$

$f_{\text{IF}}=f_{L_1}-f'_{L_1}$ 为混频后的频率; A_k 、 $MP'(t)$ 、 $n'(t)$ 分别为混频后中频信号的振幅、多路径效应和噪声。

对 $s_{IF}(t)$ 信号,依据采样定理^[7],经 A/D 采样并量化,输出即为 GPS 中频数字信号。为方便起见,且不失一般性,本文对中频信号采用目前商用 GPS 接收机通用的二位量化处理^[8]。

1.2 IF 信号的时间延迟模拟

根据卫星信号延迟特性,式(3)中的时间延迟 δt_k 和 $\delta t'_k$ 可以分别写为:

$$\delta t_k = \frac{\rho_k}{C_{light}} + \delta t_{sat,k} + \delta t_{torp,k} + \delta t_{ion,k} \tag{5}$$

$$\delta t'_k = \frac{\rho_k}{C_{light}} + \delta t_{sat,k} + \delta t_{torp,k} - \delta t_{ion,k} \tag{6}$$

式中, ρ_k 、 $\delta t_{sat,k}$ 、 $\delta t_{torp,k}$ 、 $\delta t_{ion,k}$ 、 C_{light} 分别为第 k 颗卫星到接收机之间距离、卫星钟的时间误差、信号传播的对流层延迟、信号传播的电离层延迟和光速常数。在软件模拟时,卫星和接收机之间距离的模拟过程是:假设接收机安置在地面已知点上固定不动,根据导航电文的卫星轨道参数计算出卫星坐标,进而得到卫地距离。其他时间参数均按照导航电文提供的数据和现有的模型近似模拟。

1.3 IF 信号的多普勒模拟

对低速动态的 GPS 接收机,载波的多普勒频率 $\delta f_{dop,carrier}$ 的范围为 $(-5\text{ kHz}, +5\text{ kHz})$ ^[6],而对测距码来说,其多普勒频率 $\delta f_{dop,C/A}$ 很小,可以表示为:

$$\delta f_{dop,C/A} = \frac{f_{C/A}}{f_{L_1}} \delta f_{dop,carrier} = \frac{1}{1\ 540} \delta f_{dop,carrier} \tag{7}$$

这在中频 GPS 信号数据模拟中可忽略不计。

假设地球是圆球, GPS 卫星轨道是圆形,则载波的多普勒频率近似模拟可表示为:

$$\delta f_{dop,k} = \frac{v_k \cos(\alpha_k + \theta_k)}{C_{light}} f_{L_1} \tag{8}$$

其中, v_k 、 α_k 、 θ_k 分别为第 k 颗卫星的速度、卫星高度角、卫星-测站-地心所决定的大圆的夹角。该夹角可以用卫星坐标和测站坐标由余弦定理算

出。也就是说,载波相位的多普勒频率模拟可以由卫星坐标和测站坐标联合计算概略给出。

1.4 IF 信号的多路径和噪声模拟

对信号的多路径可以表达为:

$$MP'(t) = \sum_i A'_i s'_{IF,i}(t + \delta t_{MP,i}) \tag{9}$$

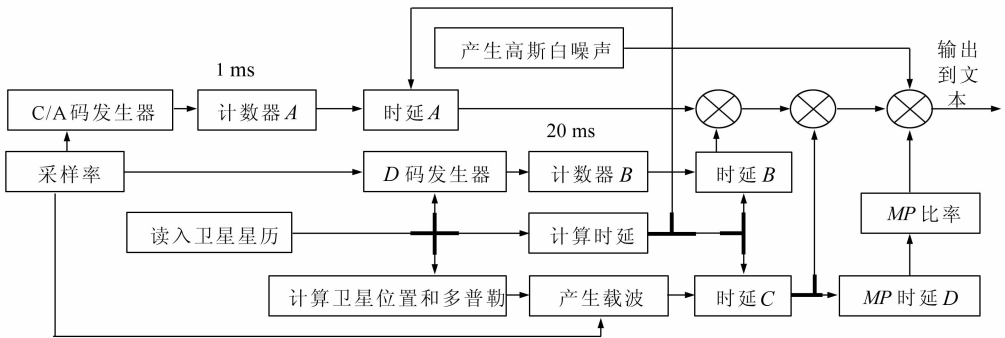
其中, A'_i 为经物体反射后进入接收机的信号幅值与直接入射到接收机的信号幅值的比值,其大小与物体的反射特性有关,满足 $A'_i < 1$; $\delta t_{MP,i}$ 为信号经过反射后的时间延迟,为了体现多路径效应,取值为 $\delta t_{MP,i} < (1 + d/2) C_{chip}$ ^[9],其中, C_{chip} 为伪随机码的一个码元宽度, d 为跟踪 C/A 码的延迟锁环路的相关空间,一般取 1 个码元宽度; $s'_{IF,i}(\cdot)$ 的形式与式(3)同,但表示的是某一颗卫星的中频信号。

系统噪声被认为是高斯白噪声,直接用 Marsaglia-Bray 的方法产生。

2 GPS IF 信号模拟的软件实现

通过对 GPS IF 信号模拟模型的讨论,设计了程序流程图,并编程实现。通过读入导航电文文件和测点坐标来模拟计算 GPS IF 信号模型中的各项,并得到对应卫星的数据码 $d_k(\cdot)$ 。对伪随机码 $c_k(\cdot)$ 的计算机模拟,只需要根据两个十级线性移位寄存器产生 GOLD 码的特性,依据 ICD-GPS-200 的说明,由计算机模拟产生;而表征信号强度的信噪比 SNR,则通过人为输入来控制。模拟模型采样数据经二位量化(3, 1, -1, -3)后,存成文件输出。整个过程由输入的采样率和 C/A 码的周期计数来控制数据输出。模拟过程的原理如图 1 所示(粗短黑线表示该点为连接点)。

以 GPS 时间为 2007 年 3 月 30 日 11:33:00 的 22 号卫星为例,模拟的和实际接收数据的中频频率均为 20 491 635 Hz,采样频率为 16 367 667 Hz,得到的数据输出频率为 4 123 968



Hz。模拟的 GPS IF 数字信号的频谱如图 2 所示,用 New-Star210A GPS 中频信号采样器采集的同一时刻包含该卫星的原始二位量化数字信号的频谱如图 3 所示,模拟的没有噪声的 GPS IF 信号频谱如图 4 所示。

从图 2、图 3、图 4 可以看出,模拟的 GPS 中频数字信号的频谱(图 2)跟实际采集的 GPS 中频信号的频谱(图 3)相似。但两者跟理想状态下的 GPS 中频数字信号的频谱(图 4)相比,旁瓣明

显消退。这是因为理想状态下的 GPS 中频数字信号的频谱无任何噪声,图 2 中模拟的 GPS 中频数字信号考虑了噪声的影响,实际接收的 GPS 中频数字信号也存在噪声影响。此外,实际接收的 GPS 中频信号在射频信号下变频为中频信号时,对旁瓣作了数字滤波处理。但无论是模拟中频信号还是实际接收的中频信号,都保留了主瓣的特性,可为卫星信号的捕获和跟踪算法提供测试数据源。

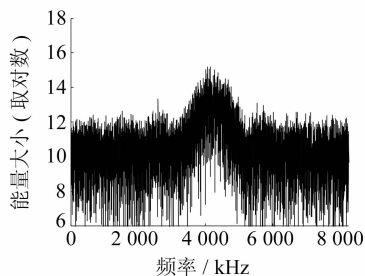


图 2 模拟的 GPS IF 数字信号频谱图

Fig. 2 Spectrum of Simulated GPS IF Signal

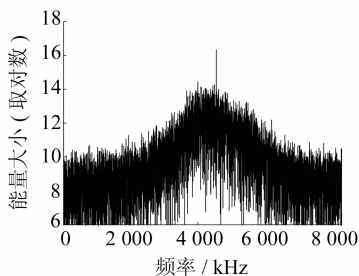


图 3 NewStar210A 采集的 GPS IF 数字信号频谱图

Fig. 3 Spectrum of Collected GPS IF Signal

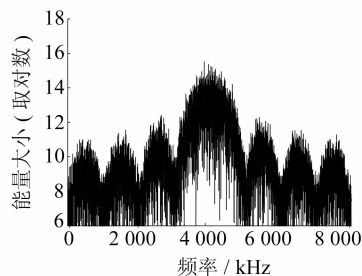


图 4 模拟的理想状态下的 GPS IF 信号频谱图

Fig. 4 Spectrum of Ideal GPS IF Signal

3 结 语

本文在分析 GPS IF 信号数学模型的基础上,提出了用卫星的导航电文模拟生成载波的多普勒频移,并对 GPS IF 信号的计算机模拟过程进行了理论分析和软件实现。通过对比模拟的某卫星中频信号的频谱与实际接收的该卫星中频信号的频谱,证明了模拟结果的可行性和有效性。模拟产生的中频数字信号可用于研究 GPS 信号的捕获与跟踪,可为 GPS 软件接收机的研究提供数据源。

参 考 文 献

- [1] Milota I I I J. Software Radios Survey, Critical Evaluation and Future Directions[C]. IEEE Fairfax, VA, 1992
- [2] Gustavsson P. Development of a Matlab-based GPS Constellation Simulation for Navigation Algorithm Developments[D]. Lulea: Lulea University, 2005
- [3] Hill J M. Development of an Experimental Global Positioning System (GPS) Receiver Platform for Navigation Algorithm Evaluation[D]. Massachu-

setts: Worcester Polytechnic Institute, 2001

- [4] Principe F, Terzi C, Luise M, et al. SOFT-REC: a GPS/EGNOS Software Receiver [C]. The 14th IST Mobile & Wireless Communication Summit, Dresden, Germany, 2005
- [5] Lei Dong. IF GPS Signal Simulator Development and Verification [D]. Calgary: Calgary University, 2003
- [6] Akos D M. A Software Radio Approach to Global Navigation Satellite System Receiver Design [D]. Ohio: Ohio University, 1997
- [7] 王宏禹. 信号处理相关理论综合与统一法[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:28-83
- [8] 张欣. 扩频通信数字基带信号处理算法及其 LVSI 实现[M]. 北京:科学出版社, 2004:46-58
- [9] Braasch M S. Autocorrelation Sidelobe Considerations in the Characterization of Multipath Errors [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1): 290-295

第一作者简介:郭际明,教授,博士生导师。主要研究方向为 GNSS 技术及其应用。

E-mail:jmguo@sgg.whu.edu.cn