

高动态 GPS 模拟器信号产生模型研究

张伯川¹, 张其善², 常 青²

(1. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 高动态 GPS 卫星信号模拟器可以根据载体的动态环境, 精确产生载体收到的 GPS 卫星信号。在对 GPS 接收机接收信号进行深入分析后发现 GPS 信号模拟器以接收时刻为标准以一定的时间间隔计算模拟器信号码和载波速率及信号的传播延时, 由于接收机与 GPS 星之间存在的径向加速度, 使得对应的信号发出时刻的间隔不等于计算机进行样点计算的间隔。本文给出了在高动态条件下 GPS 卫星信号模拟器的信号模型, 在对模型误差进行分析计算的基础上讨论了通过增加采样率来减小由于模拟高加速度信号而带来的误差的方法。

关键词: 全球定位系统; 高动态信号模拟器; 信号控制

中图分类号: TN850.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 06-1084-04

Development on the High Dynamic GPS Signal Simulator Signal Model

ZHANG Bo-chuan¹, ZHANG Qi-shan², CHANG Qing²

(1. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China

2. School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: According to receiver's dynamic environment, high dynamic GPS signal simulator can precisely generate GPS signal that the receiver get. After a thorough analysis of the signal received by the GPS receiver, it is found that in the GPS signal simulator the frequency of the code and carrier and the time delay of the signal spreading are computed at a certain interval according to the receiver time. Since there is an acceleration between the receiver and GPS satellites, the interval of the signal transmit time is not equal to the interval of the signal sampled time. The computation method for the GPS signal in the high dynamic condition is presented. Based on the error analysis of the model, the method with the increasing the sampling rate for minimizing the errors caused by the simulation of the high acceleration signal is proposed.

Key words: GPS; high dynamic signal simulator; signal controlling

1 引言

GPS 接收机在当前时刻测量的卫星信号, 是卫星在之前某一时刻发射的。对不同卫星, 虽然接收机同一时刻采样, 但这些信号是不同卫星在不同时刻发出的。当卫星发射的信号到达接收机时, 接收机测出信号的伪码频率、载波频率由于卫星和接收机之间的相对径向运动的影响使它们较信号发出时刻发生了较大改变。模拟器以接收时刻为标准以一定的时间间隔计算码和载波速率及信号的空间传播时间, 由于接收机与 GPS 星之间的相对径向加速度使得对应的信号发出时刻的间隔不等于计算机进行采样点计算的间隔, 而模拟器的数学模型必须解决这一情况。本文给出了在高动态条件下模拟器的信号模型, 在对模型误差进行分析计算的基础上讨论了减小由于模拟高加速度信号而带来的距离和速度

误差的方法。

2 GPS 信号分析

要使高动态 GPS 信号模拟器真实地模拟出接收机在运动状态下接收到的 GPS 信号, 首先需要分析接收到的 GPS 信号及其在动态环境下发生的变化。

若不考虑 P 码调制信号, 设第 i 颗卫星的星历数据为 $D_i(t)$, 调制码为 $C_i(t)$, 则当各个卫星信号到达接收机时, 由于延时不同、各颗卫星的信号衰减不同且各颗卫星信号的多普勒频移不同, 则接收机在时刻接收到的 GPS 信号

$$r(t) = \sum_{i=1}^M A_i C_i(t_1 - \tau_i) D_i(t_1 - \tau_i) \sin[2\pi(f_0 + f_{di})t_1 + \phi_i] + n(t) \quad (1)$$

其中 τ_i 为接收机在 t_1 时刻接收到的信号的空间传播时

间,包括卫星到测点几何斜距时延、卫星相对测点运动产生的多普勒时延、极移和地球自转不均匀等地球运动因素产生的时延、路径中传播介质折射引起的时延、相对论效应引起的时延及其它因素引起的时延之和^[1].

$f_{id_{t_1}}$ 为 t_1 时刻第 i 颗卫星和接收机的径向速度 v_{i,t_1} 产生的瞬间多普勒频移, $f_0 = 1575.42\text{MHz}$. A_i 为第 i 颗卫星信号到达接收机时的信号幅度, ϕ_i 为第 i 颗卫星的初相, $n(t)$ 为噪声, M 为接收机可同时观测到的卫星数目^[2].

接收机在下一个采样点时刻 $t_1 + t$ 接收到的 GPS 信号

$$r(t) = \sum_{i=1}^M A_i C_i(t_1 + t - t_{i,t_1}) D_i(t_1 + t - t_{i,t_1}) \sin[2(f_0 + f_{id_{t_1}})(t_1 + t) + \phi_i] + n(t) \quad (2)$$

其中, t 为接收机采样计算间隔, t_{i,t_1} 为模拟器得出的接收机在 $t_1 + t$ 时刻接收到的信号其空间传播延时, $f_{id_{t_1}}$ 为 $t_1 + t$ 时刻第 i 颗卫星和接收机的径向速度 v_{i,t_1+t} 产生的瞬间多普勒频移.

3 高动态 GPS 信号模拟器信号模型分析

模拟器以接收时刻为标准计算码和载波速率及信号的空间传播时间,模拟器和接收机采用相同的时间,模拟器开始工作时刻为 t_1 ,采样计算间隔为 t .由于在每个采样点时刻都要计算码和载波速率及信号的空间

传播时间 t_{i,t_1+t} ,假如在 t_1 与 $t_1 + t$ 之间接收机和 GPS 星之间存在径向速度变化,如 GPS 卫星信号模拟器按 t_1 时刻的码和载波速率 $f_{id_{t_1}}$ 及空间传播时间 t_{i,t_1} 产生信号,则在 $t_1 + t$ 时刻模拟器得到的 t_{i,t_1+t} 不等于 t_{i,t_1} ,这样会出现信号载波相位连续,但码相位不连续的现象.为解决这个问题,在给出 t_1 时刻的模拟器信号模型时,必须结合预先计算出 t_1 的下一个采样时刻点信号的空间传播延时来进行计算时刻载波和码的速率.

3.1 对于有加速度和加加速度的载体模拟器信号的产生模型

在考虑接收机和 GPS 星在 t_1 和 $t_1 + t$ 期间存在径向速度变化后, t_1 时刻的模拟器信号模型为

$$r(t) = \sum_{i=1}^M A_i C_i(t_1 - t_{i,t_1}) \sin[2(f_0 + f_{id_{t_1}})t_1 + \phi_i] + n(t) \quad (3)$$

$f_{C_{t_1}}$ 为由 $f_{id_{t_1}}$ 引起的码频率的改变值, $f_{D_{t_1}}$ 为由 $f_{id_{t_1}}$ 引起的导航电文频率的改变值

$$f_{C_{t_1}} = \frac{f_{id_{t_1}}}{1540} \quad f_{D_{t_1}} = \frac{f_{id_{t_1}}}{31508400} \quad (5)$$

3.2 试验

时间:2005.1.5. 星号:7、4、24、28、5

接收机位置:- 2171778,4385892,4076386.

表 1 t_1 时刻数据

星号	接收机接收信号时间 t_1 (GPS 周,秒)	接收机测得的信号发出时刻 t_{i,t_1} /s	解算的卫星与接收机相对速度(m/s)	多普勒频移测量值 $f_{id_{t_1}}$ /Hz	高度角/度	方位角/度
7	280,290790.38	290790.311411553	104.583	549.21	70	111
4	280,290790.38	290790.311475593	-133.622	-687.46	66	297
24	280,290790.38	290790.310438447	-148.744	-781.11	64	292
28	280,290790.38	290790.302400613	692.240	3635.2	18	177
5	280,290790.38	290790.299754873	-473.715	-2492.9	17	315

表 2 t_2 时刻数据

星号	接收机接收信号时间 t_2 (GPS 周,秒)	接收机测得的信号发出时刻 t_{i,t_2} /s	解算的卫星与接收机相对速度/m/s	多普勒频移测量值 $f_{id_{t_2}}$ /Hz	高度角/度	方位角/度
7	280,290791.38	290791.31141117	125.593	659.59	70	111
4	280,290791.38	290791.311476055	-134.665	-733.44	66	297
24	280,290791.38	290791.310438962	-161.787	-849.61	64	292
28	280,290791.38	290791.30239834	670.958	3523.51	18	177
5	280,290791.38	290791.299756455	-473.014	-2480.22	17	315

表 3 数据处理

星号	接收机接信号时间间隔($t_2 - t_1$)/s	信号发出时刻间隔($t_{i,t_2} - t_{i,t_1}$)/s	$[(t_1 - t_{i,t_1}) - (t_2 - t_{i,t_2})]f_0$ (周)	多普勒频移测量值 $f_{id_{t_1}}$ /Hz	载波相位测量变化值/周
7	1.0	0.9999996170	-603.38	549.21	-605.9
4	1.0	1.0000004462	702.95	-687.46	709.51
24	1.0	1.000000515	811.3	-781.11	802.9
28	1.0	0.999997727	-3580.9	3635.2	-3587.2
5	1.0	1.000001582	2492.3	-2492.9	2488.7

在间隔 1 秒内可认为卫星钟差、相对论效应影响、电离层误差、对流层折射误差及接收机钟差是相同的。由表 3 可知,由于卫星与接收机的相对径向速度导致的接收机在一秒的间隔接收到的信号其信号发出时刻差所对应的载波周期与接收机测量的载波相位变化值是大致相等的。多普勒频移测量值与载波相位测量变化值正负号的不同是由于接收机 4.3MHz 中频信号被 5.714MHz 信号采样所致。

4 模拟初始信号状态计算

按照式(3)、(4)来产生模拟器信号,对于伪码则只须知道其初始状态即可,而不用在每个采样点来计算信号发出时刻码的状态。

接收机 t_1 时刻(GPS 系统时)收到的第 j 颗 GPS 卫星信号是卫星在 t_{sv} (卫星时)时刻发送的,卫星到目标的几何距离为 R ,则

$$t_1 = t_1 - t_{sv} = \frac{R}{c} - t_{sv} - t_{r1} + t_{ion} + t_{trop} \quad (6)$$

式中, t_{sv} 、 t_{r1} 为卫星钟差和相对论效应影响, t_{ion} 、 t_{trop} 分别为电离层、对流层折射误差。其中,计算这些误差时应采用模拟器内部专门使用的参数,与用户误差修正使用的参数不同^[3]。

发射信号信号码状态用如下内容描述:

Z. Count—导航电文 Z 计数,允许范围 0 ~ 100799,单位 6s

T. 20msEpoch—20ms 历元计数,允许范围 0 ~ 299,单位 20ms;

T. 1msEpoch—1ms 历元计数,允许范围 0 ~ 19,单位 1ms;

ChipCnt—伪码 Chip 计数,允许范围 0 ~ 1022,单位 $\frac{1}{1.023} \times 10^{-6}$ s

ChipNcoCnt—码 NCO 相位,范围 0 ~ 12319(1540 * 8 - 1),单位 $\frac{1}{1.260336} \times 10^{10}$ s

按系统指标要求伪距精度 80mm, $\frac{1}{1.260336} \times 10^{10} \times 3 \times 10^8 = 23.8$ mm

根据 t_{sv} 计算上述参数,方法如下:

$$Z. \text{Count} = \text{INT}[t_{sv}/6] + 1$$

$$\text{temp1} = f \bmod(t_{sv}, 6.0) \times 1000$$

$$T. 20\text{msEpoch} = \text{INT}[\text{temp1}/20]$$

$$\text{temp2} = f \bmod[\text{temp1}, 20]$$

$$T. 1\text{msEpoch} = \text{INT}[\text{temp2}]$$

$$\text{temp3} = f \bmod(\text{temp2}, 1.0) \times 1023$$

$$\text{ChipCnt} = \text{INT}[\text{temp3}]$$

$$\text{temp4} = f \bmod(\text{temp3}, 1.0) \times 12320$$

$$\text{ChipNCO} = \text{INT}(\text{temp4})$$

5 模型误差分析

当径向加速度 a 在 t_1 与 $t_1 + t$ 之间的某个点 $t_1 + t_1$ 产生,且接收机和 GPS 星径向速度增大,由(4)可得

$$f_{idt_1} = \left[1 + \frac{a(t - t_1)^2}{2v_{t_1} t} \right] f_{idt_1} \quad (8)$$

在 $t_1 + t_1$ 处有最大距离误差

$$t_1 = \frac{(f_{idt_1} - f_{idt_1})}{a} + t \quad (9)$$

在 $t_1 + t_1$ 处带来的最大距离误差为

$$p_{\max} = (f_{idt_1} - f_{idt_1}) t_1 - \frac{1}{2} a(t_1 - t_1)^2 \quad (10)$$

为对应 f_0 的载波波长,0.19m。

最大速度误差为

$$v_{\max} = \max \left[\frac{(f_{idt_1} - f_{idt_1}) c}{f}, \frac{(f_{idt_1} - f_{idt_1 + t}) c}{f} \right] \quad (11)$$

假定 a 为 20g、 v_{t_1} 为 5000m/s、 f_{idt_1} 为 26257Hz,计算不同 t 和 t_1 情况下的最大距离和速度误差。

表 4 模型误差计算 1

t/t_1 (s)	f_{idt_1}/Hz	t_1 (s)	p_{\max}/m	$v_{t_1} + t$ (m/s)	$v_{\max}/(\text{m/s})$
1s/0.5s	26388	0.62472	14.028	5100	-74.832
0.5s/0.25s	26323	0.31236	3.5069	5050	-37.416
0.1s/0.05s	26270	0.062472	0.14028	5010	-7.4832
0.05s/0.025s	26264	0.031236	0.035069	5005	-3.7416

当径向加速度 a 在 t_1 与 $t_1 + t$ 之间保持恒定,且接收机和 GPS 星的径向速度增大,

$$f_{idt_1} = \left[1 + \frac{a t}{2v_{t_1}} \right] f_{idt_1} \quad (12)$$

v_{t_1} 为 t_1 时刻第 i 颗卫星和接收机的径向运动速度。

在 $t_1 + t_1$ 处有最大距离误差

$$t_1 = \frac{t}{2} \quad (13)$$

在 $t_1 + t_1$ 处带来的最大距离误差为

$$p_{\max} = \frac{a}{8} t^2 \quad (14)$$

最大速度误差为

$$v_{\max} = \frac{a t}{2} \quad (15)$$

假定 a 为 10g、 v_{t_1} 为 5000m/s, 计算不同 t 情况下的最大距离和速度误差。

可以看出,当计算机的采样周期变小时,由模型带来的距离误差和速度误差很

表 5 模型误差计算 2

t/s	p_{\max}/m	$v_{\max}/(\text{m/s})$
1	12.5	50
0.5	3.125	25
0.1	0.125	5
0.05	0.03125	2.5
0.01	0.00125	0.5

快降低. 在 a 为 $10g$, v_{t_1} 为 5000m/s 的情况下, 为保证模拟器伪距精度 80mm , 在不考虑数字化误差的情况下, 采样周期必须达到 20Hz .

6 结论

本文给出了在高动态条件下模拟器模拟运动载体的信号模型及模拟器信号状态计算方法, 并对由于模拟接收机和 GPS 星之间径向加速度而产生的模型误差进行了分析, 通过数据分析给出了削弱模型误差影响的解决办法. 同时, 该 GPS 模拟器信号产生模型同时适用于“北斗二代”高动态信号模拟器. 随着我国自主控制的“北斗二代”卫星导航系统研制工作的进一步深入并最终投入应用, “北斗二代”高动态信号模拟器在军事和民用方面存在巨大需求, 可以借助于高动态 GPS 卫星信号模拟器研制的经验, 积极开发“北斗二代”高动态信号模拟器及 GPS 和北斗的兼容产品. 这对于研究开发具有多星技术和信息冗余能力的多系统兼容接收机及相关产品, 提高接收机性能及安全可靠性有着非常重要的现实意义, 对于我国的军方用户尤其如此.

参考文献:

- [1] 陆娟. 高动态 GPS 信号模拟器的研制[D]. 北京: 北京航空航天大学电子工程系, 2003.
Lu Juan, The Design of a High Dynamic GPS Simulator[D]. Beijing: Dept of Electronic Engineering, Beijing university of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)
- [2] 张伯川, 张其善. 高动态接收机的温启动快捕问题研究[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 530 - 533.
Zhang Bo-chuan, Zhang Qi-shan. A satellites signals quick acquisition algorithm for the high dynamic GPS receivers in cold start[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 530 - 533. (in Chinese)
- [3] 赵军祥. 高动态智能 GPS 卫星信号模拟器软件数学模型研究[D]. 北京: 北京航空航天大学电子工程系, 2003.
Zhao Junxiang. The Study on Mathematical Model of High Dynamic and Intelligent GPS Satellite Signal Simulator's software [D]. Beijing: Dept of Electronic Engineering, Beijing university of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)
- [4] W Zhang. Modeling and analysis for the GPS pseudo-range observable[J]. IEEE Trans on AES, 1995, 31(2): 739 - 751.
- [5] Vladan M Jovanoic, Elvino S Sousa. Analysis of non-coherence correlation in DS/BPSK spread spectrum acquisition[J]. IEEE Transaction on communication, 1995, 43(2): 565 - 573.

作者简介:

张伯川 男, 1972 年出生于内蒙古自治区呼和浩特市, 博士, 现就职于北京航天自动控制研究所, 从事专业为通信与信息系统. 主要研究方向为 GPS、扩频通信、图像处理.

E-mail: zhangbochuan891@sohu.com

张其善 男, 1936 年出生于浙江浦江, 北京航空航天大学教授, 博士生导师, 国家级有突出贡献的科技专家. 中国电子学会会士, 美国 IEEE 高级会员. 主要从事信息传输与处理、GPS 等方面的研究.