高动态 GPS 卫星信号模拟器导航电文生成

张伯川 常 青 张其善 寇艳红

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了测试全球定位系统 GPS(Global Positioning System)接收机的性能,应用 GPS 信号模拟器来模拟各种条件下真实的 GPS 信号. GPS 卫星信号发生器由硬件、计算机和软件组成. 软件主要由卫星导航参数计算模块、目标运动轨迹计算模块、误差计算模块等模块组成. 导航电文产生功能模块是高动态 GPS 卫星信号模拟器要解决的一项关键技术. 给出了 3 个卫星星钟改正参数的物理意义和星历产生模型,根据这些参数并结合相应的时间参数来形成卫星导航电文. 通过程序仿真并与导航电文进行验证,证明推导出的星历产生模型基本符合 GPS 星的星座排列规律.

关 键 词: 全球定位系统(GPS); 信号发生器; 高动态

中图分类号: TN 850.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)03-0284-04

Research on the production of the navigation data of high dynamic GPS signal simulator

Zhang Bochuan Chang Qing Zhang Qishan Kou Yanhong

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

Abstract: For the purpose of testing the performance of GPS(global positioning system) receivers, a GPS signal simulator is needed that can emulate the real GPS signals under all kinds of conditions. The high dynamic multi-channel GPS signal simulator device consists of hardware, computer and software. The software comprises the satellite navigation parameters calculation module, the target trajectory calculation module, the error calculation module and etc. Producing functional module of navigation data is a key technique that the high dynamic GPS signal simulator must solve. The physical meaning of the three parameters of satellite's clock and the production model of the ephemeris were given. According to these parameters and their corresponding time parameters, Navigation data could be produced. By the procedure simulating and validating it with the navigation data, the results show that ephemeris and almanac correspond to the rules of the satellite's arrangement.

Key words: GPS(global positioning system); signal generators; high dynamics

高动态全球定位系统 GPS(Global Positioning System)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,载体上安装的 GPS 接收机根据这些信号,可测定目标的位置和速度,通过与理论值的比较,可以对 GPS 接收机的捕获、跟踪和测量精度进行鉴定. 模拟器的研制在国外已属成熟产品,国外较早开展了高动态 GPS 卫星信号模拟器技术研究,已研制出多种型号的高动态 GPS 卫星信号模拟器并投入使用,例如英国 SPIRENT 通信公司研制的 STR4750

收稿日期: 2003-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60027001)

作者简介: 张伯川(1972-),男,内蒙古呼和浩特人,博士生, zhangbochuan891@sohu.com.

型卫星信号模拟器、美国计算机应用软件技术有限公司研制的 CCSG-2000 卫星信号模拟器等. 这些模拟器可以模拟 GPS L_1,L_2 频率上的 C/A 码和 P 码. 现在,国外 GPS 卫星信号模拟器功能和性能更加先进,甚至可以模拟差分信号、姿态测量信号. 但模拟器的研制在国内仍是空白. 由于涉及军事保密领域,可参考的有用资料非常少. 由于模拟器的研制涉及到对整个 GPS 系统较全面的了解,所以其开发难度是很大的. 但是,模拟器的研制对于我国有效利用 GPS 系统及开发我国自己的卫星导航系统又有着非常重要的现实意义[1~4].

GPS 卫星信号模拟器有多种功能模块. 其中,导航电文产生功能模块是高动态 GPS 卫星信号模拟器要解决的一项关键技术. 该模块自动编辑各颗 GPS 卫星的导航信息. 卫星的星历和历书直接由用户设定的轨道导出,通过插值或外推得到模拟时刻的有效数据[1].

本文在考虑这些因素的基础上,系统地探讨了 GPS 卫星信号模拟器中卫星导航电文的产生方法.

1　时间参数的产生

模拟器的时间参数包括 GPS 时的周计数 W_N、得到星历参数的时间的周计数 W_{Na}、得到时间转换参数的时间的周计数 W_{Nt}、Z 计数、星历和时间参数的拟和时间间隔 I_{ODE},I_{ODC},t_{oc},t_{oe},t_{oa},t_{ot}等. 其中,t_{oc},t_{oe}指基于 W_N 的周内时间;t_{oa}指基于 W_{Na} 的周内时间;t_{ot}指基于 W_{Nt}的周内时间,W_{Nt}和 t_{ot}为 UTC(Coordinated Univereal Time) 参数生成的时间;I_{ODE}为卫星星历的数据龄期;I_{ODC}为卫星时钟的数据龄期[5,6].

1.1　W_N 和 Z 计数的产生

全部的 T_{OM}计数包含 29 bits(每 1.5 s 计数加 1-X_1历元),其中第 3 ~ 19 bit 是星历 H_{OW}字的 1 ~ 17 bit,是被截短的周内时间 T_{OM}即 Z 计数,指示下一子帧的起始时间.

T_{OM}计数的第 20 ~ 29 bit 是周数(W_N),是第一子帧的第 3 字的前 10 bits. 相对 GPS 时间起点(1980-01-06T00 : 00 : 00)所经过的时间(模 1 024),由于电文仅用 10 bits 表示周数,最大周数为 1 023 周,所以存在模糊度问题. 在利用该周数解算测量时刻的格林尼治时间时,需要结合其它参数确定无模糊的周数. 由于 10 bits 表示的周数只能表示到 1999-08-21T23 : 59 : 59,因此模拟器由目前的格林尼治时间计算周数时得出的数值需减去 1 024;由于 UTC 时有闰秒,1999-12-31T23 : 59 : 59 后,UTC 时与 GPS 时相差 13 s,故 10 bits 表示的周数只能表示到 1999-08-21T23 : 59 : 47;考虑模拟器的本地时间(年月日时分秒)和模拟器所在的时区,将本地时间应转化为格林尼治零时区的时间,再将格林尼治零时区的时间转化为 GPS 时.

$$\left.\begin{aligned} W_N &= \{(y - 1\,980) \times 365 + d_{oy}[m - 1] + \\ &\quad d + D_1 - 6\}/7 - 1\,024 \\ d_1 &= (y - 1\,980) \times 365 + \\ &\quad d_{oy}[m - 1] + d + D_1 - 6 \\ D_1 &= \frac{y - 1\,980}{4} + 1 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

如$(y-1\,980)\%4=0$ 或 $m\leqslant 2$,则 D_1-1

$$t_{sec} = (d_1\%7) \times 86\,400 + (h_h - T_{imezone}) \times 3\,600 + m_m \times 60 + s_s + 13 \tag{2}$$

如 $t_{sec}\leqslant 0$,则 W_N-1,且 $t_{sec}=t_{sec}+604\,800$

$$Z_Count = INT(t_{sec}/6) + 1 \tag{3}$$

其中,y,m,d,h_h,m_m,s_s 为目前的年,月,日,时,分,秒;t_{sec} 为 GPS 时周内秒数;% 为模运算;$d_{oy}(12)=\{0,31,59,90,120,151,181,212,243,273,304,334\}$;$T_{imezone}$为模拟器所在的时区.

1.2　W_{Na}、拟和时间间隔(I_{ODE},I_{ODC}),t_{oc},t_{oe},t_{oa} 的产生

W_{Na}与第一子帧播发的 GPS 周数 W_N的关系是

$$W_{Na} = f \bmod (W_N, 256) \tag{4}$$

$$t_{oc} = (d_1\%7) \times 86\,400 + (h_h - T_{imezone}) \times 3\,600 + m_m \times 60 + s_s + 13 \tag{5}$$

$$t'_{oc} = \frac{t_{oc}}{16}$$

式中,16 为星历中 t_{oc}的系数;t'_{oc}为由 t_{oc}经系数转换后放入星历中的数值. t_{oe}和 t_{oa}的算法与 t_{oc}相同.

I_{ODC}是时钟改正数的外推时间间隔,它向用户指明时钟改正数的置信度,该值越小,时钟改正数的置信度越高[4].

$$I_{ODC} = t_{oc} - t_l \tag{6}$$

其中,t_{oc}星历第一子帧的参考时间,即得到时钟改正数的周内时间;t_l 是用来计算时钟改正数所作测量的最后观测时间.

I_{ODE}是卫星星历的外推时间间隔. 该值越小,卫星星历的置信度越高.

$$I_{ODE} = t_{oe} - t_L \tag{7}$$

其中,t_{oe}指从每星期起始历元,即周六/周日子夜

零点起计算星历的参考时刻;t_L 指用于计算广播星历所作测量的最后观测时间.

1.3 时间参数的限制

星历数据期号 I_{ODE}是一个 8 bits 的数,它与同一组 10 bits 星钟数据期号低 8 bits 的值相等. 子帧 2 和子帧 3 给出 I_{ODE}是用来和子帧 1 给出的 8 位 LSB 的 I_{ODC}来比较. 当它们不相匹配(表示一个新的数据块将要输入),或 2 个 I_{ODE}不一致(表示 2 个 I_{ODE}对应不同的 t_{oe}),此时用户会放弃这个星历.

子帧 4,5 各页的 t_{oa}应相同. 如子帧 2 第 25 页的 t_{oa}与子帧 4,5 其它页的 t_{oa}不同,此时,子帧 5 第 25 页的 W_{Na}只对应子帧 5 第 25 页的 t_{oa},与其它页的 t_{oa}无关,用户会认为该历书无效. 模拟器将 t_{oa}值设为相同值[6].

2 时钟改正数的产生

由于时间误差 $\Delta t(t)$是一个可由多项式表示的以时间 t 为自变量的函数,因此,时间可在 t_{oc}处进行泰勒展开.

$$\Delta t(t) = \Delta t_{t_{oc}} + \Delta t^{(1)}_{t_{oc}}(t - t_{oc}) + \frac{\Delta t^{(2)}_{t_{oc}}}{2!}(t - t_{oc})^2 \tag{8}$$

其中,$\Delta t^{(n)}_{t_{oc}}$为时间误差函数在 $t=t_{oc}$处的 n 阶导数值. 同时,根据星历接口文件,时间误差为[6,7]

$$\Delta t_{sv} = a_{f_0} + a_{f_1}(t - t_{oc}) + a_{f_2}(t - t_{oc})^2$$

其中,a_{f_0}, a_{f_1}, a_{f_2}为 GPS 星的导航电文中的 GPS 星时钟参数.

可知

$$\left.\begin{aligned} a_{f_0} &= \Delta t_{t_{oc}} \\ a_{f_1} &= \Delta t^{(1)}_{t_{oc}} \\ a_{f_2} &= \frac{\Delta t^{(2)}_{t_{oc}}}{2!} = \frac{\Delta t^{(2)}_{t_{oc}}}{2} \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

其中,$\Delta t_{t_{oc}}(a_{f_0})$为在 t_{oc}时刻测得的模拟器与 GPS 时的时间差值;$\Delta t^{(1)}_{t_{oc}}(a_{f_1})$为在 t_{oc}时刻测得的频偏误差;$\Delta t^{(2)}_{t_{oc}}$为在 t_{oc}时刻测得晶体老化率;a_{f_2}为在 t_{oc}时刻测得晶体老化率的值的一半. 通过定期与高精度的原子钟进行频率比对,得到最新的 a_{f_1}, a_{f_2}.

同时,根据星历接口文件,总的时间误差为

$$\Delta t_{sv} = a_{t_0} + a_{f_1}(t - t_{oc}) + a_{f_2}(t - t_{oc})^2 - T_{GD} \tag{10}$$

其中,T_{GD}是 GPS 星发射 L_1, L_2 信号之前存在的群延迟差,该值是根据卫星发射之前工厂测试得出的. 对单频信号模拟器只发出 L_1 载波信号,因此,模拟器设该值为全零. 对信号模拟器而言,a_{f_1}, a_{f_2}反映模拟器频钟的频率偏差和频率漂移且各颗卫星的钟差参数置为同一组参数.

由于模拟器的导航电文中的卫星星钟改正数等均是在一定量的已知参数的基础上进行一段时间外推后得到的. 已知在 T_0, T_1, T_2, T_3, T_4 时刻 a_{f_1}, a_{f_2}的值,可以用曲线拟和的办法来预测 T_5 时刻及后续时刻的值.

3 卫星的星历的产生

卫星的星历直接由用户设定的轨道导出,通过插值或外推得到模拟时刻的有效数据,这样就不再需要用户把星座文件的数据与仿真的日期时间联系在一起.

利用一台 GPS 接收机连续工作 24 h,完整地搜集星座内各颗健康 GPS 卫星的导航电文,对电文解调,可以得到各星的一组星历参数,则以此组参数为基础推算任意时刻 GPS 卫星的星历.

地球非球形摄动对 GPS 星轨道长半径 a、偏心率 e、轨道面倾角 i 没有影响,但可引起轨道升交点赤经 Ω、轨道近地点角矩 ω、平近点角 M 的变化,ω_e 为地球自转速率,Δn 为卫星平均角速度的改正项[7]. 因此

$$\left.\begin{aligned} a(t) &= a(t_0) \\ e(t) &= e(t_0) \\ i(t) &= i(t_0) \\ \Omega(t) &= \Omega(t_0) - \left(\frac{3}{2}a_e^2\frac{J_2}{p^2}n\cos i\right)(t - t_0) \\ \omega(t) &= \omega(t_0) + \frac{3}{2}a_e^2\frac{J_2}{p^2}n \cdot \\ &\quad \left(2 - \frac{5}{2}\sin^2 i\right)(t - t_0) \\ M_0(t) &= M_0(t_0) + \left[n + \Delta n - \frac{3}{2}a_e^2\frac{J_2}{p^2}\right. \\ &\quad \left. n(1 - \frac{3}{2}\sin^2 i)\sqrt{1 - e^2}\right](t - t_0) \\ &\quad [\text{模 } 2\pi] \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

其中

$$p = a(1 - e^2)$$

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$$

$$J_2 = 108\ 263 \times 10^{-8}$$

$$a_e = 6\ 378\ 137\ \text{m}$$

$$\mu = 3\ 986\ 005 \times 10^8 \quad (\text{m}^3/\text{s}^2)$$

$$\Omega_0(t_0) = \Omega(t_0) - G_{\mathrm{ATS}\omega} \tag{12}$$

$$\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t} = \frac{3}{2}a_e^2\frac{J_2}{p^2}n\cos i$$

$$\Omega_0(t) = \Omega_0(t_0) + \frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t}(t - t_0) + \omega_e \times 604\,800 \times (W_{\mathrm{Nt}_0} - W_{\mathrm{Nt}})\ [\text{模}\ 2\pi] \tag{13}$$

其中,$\Omega_0(t_0)$为 t_0 时刻对应的星历中的轨道准经度;W_{Nt_0}为 t_0 时刻对应的星历中的星期数;W_{Nt}为 t 时刻对应的星历中的星期数;$G_{\mathrm{ATS}\omega}$为一个星期的历元开始时刻 t_ω 的格林尼治恒星时[5~7].

以 t_0 时刻的 GPS 星轨道根数 $a(t_0)$,$e(t_0)$,$i(t_0)$,$\Omega_0(t_0)$,$\omega(t_0)$,$M(t_0)$为基础可推导出 t 时刻的 $a(t)$,$e(t)$,$i(t)$,$\Omega(t)$,$\omega(t)$,$M(t)$及各轨道根数的时间变化率并设 6 个摄动修正参数为零.这样,可得 i 时刻的星历.

电离层修正参数、UTC 转换参数均通过接收下传并保持不变.

4　程序仿真结果

使用接收机接收第 16#GPS 卫星的在 2 个不同时刻的的导航电文,见表 1.

表 1　不同时刻的 16#星轨道参数

时刻	轨道参数		
	Ω_0	ω	M_0
t_1	−2.097 165 675 64	−1.716 436 918 20	3.083 731 070 49
t_2	−2.721 179 172 58	−1.675 290 316 69	−2.087 998 590 62
t_2 推算	−2.720 653	−1.666 083	−2.085 210

表 1 中,t_1 为 2003-07-31T16∶00∶00,t_2 为 2003-09-01T12∶00∶00.

由 2003-07-31T16∶00∶00 的星历参数推算 2003-09-01T12∶00∶00 的星历参数,计算出 t_2 推算时刻的 Ω_0,ω 和 M_0.通过使用自主产生的电文来计算 GPS 星的坐标及速度并进行比较,可以证明在自主产生的电文中,可以将摄动力 6 个参数 C_{us},C_{uc},C_{is},C_{ic},C_{rs},C_{ic}及倾角变化率 $\dot{i}$ 均设为零,不会影响 GPS 星的星座排列规律.

5　结 束 语

由于导航电文反映模拟器自身的性质和工作状态和 GPS 星的在轨状态,因此,它的产生模型必须放在整个 GPS 系统中进行考虑.为保证单颗卫星出现故障引起系统性能变差最小,在同一轨道面内的 GPS 卫星的角度间隔进行了最佳化处理.这样,简单地将 GPS 星轨道考虑为圆轨道,利用当前星历参数直接由用户设定的圆轨道导出卫星的星历,当外推时间较长时,自主产生的 GPS 卫星的轨道信息可能会不符合 GPS 卫星星座分布规律.用本文的方法则可在相当的时间内保证模拟器自己定义的卫星的轨道符合 GPS 卫星星座分布规律.

参考文献 (**References**)

[1] 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信息工程学院, 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)

[2] Alison Brown, Neil Gerein. Advanced GPS hybrid simulator architecture[A]. In: Proceddings of ION 57th Annual Meeting[C]. Albuquerque, 2001. 1~8

[3] Alison Brown, Neil Gerein. Modeling and simulation of GPS using software signal generation and digital signal reconstruction[A]. In: Proceedings of the ION National Technical Meeting[C]. Anaheim,2000

[4] Steve Lazar, Martin Bottjer, Don Watanabe, *et al*. A GPS modernization simulator[A]. In:Proceedings of ION GPS[C]. Tennesee, 1998. 1887~1893

[5] Bradford W, Parkinson, James J,*et al*. Global positioning system: theory and application volume 1[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1966

[6] GPSICD200C 接口控制文件[R]. ARINC Research Corporation, 1993
GPSICD200C Interface Control Document[R]. ARINC Research Corporation, 1993(in Chinese)

[7] 张守信. 外弹道测量与卫星轨道测量基础[M]. 北京: 国防工业出版社,1992
Zhang Shouxin. The foundation of the extratellurian trajectory survey and the satellite orbit survey[M]. Beijing: National Defence Industry Press,1992(in Chinese)