

高动态接收机的温启动快捕问题研究

张伯川,张其善,常青

(北京航空航天大学,北京 100083)

摘要: 快速捕星和定位是研制高动态 GPS(Global Positioning System)接收机所必须解决的一项关键技术.本文主要讨论了 GPS 星有效历书的推算和接收机接收到的 GPS 信号的载波多普勒频移各组成部分对接收机的星捕获时间的影响.提出了一种大大缩短 GPS 接收机的温启动时间的方法.

关键词: GPS 高动态接收机;温启动;快速捕星

中图分类号: TN850.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)03-0530-04

A Satellites Signals Quick Acquisition Algorithm for the High Dynamic GPS Receivers in Warm Start

ZHANG Bo-chuan, ZANG Qi-shan, CHANG Qing

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

Abstract: Quick acquisition of satellites signals and positioning is a key technology in the high dynamic GPS receiver's research and development. In this paper, the method for estimating valid almanac for the GPS satellites is introduced, and for the received GPS signals how the Doppler shift components impact the satellites signals acquisition time are analyzed. On the basis of above, a new algorithm for satellites signals quick acquisition is proposed, which can efficiently shorten the warm start time for the GPS receivers.

Key words: high dynamic GPS receivers; warm start; quick acquisition of satellites signals

1 引言

GPS 是美国建立的高精度全球卫星定位导航系统,在导航(含制导)、定位、测地等领域都有广泛应用.而 GPS 高动态接收机则可应用于导弹、卫星、飞机的导航等许多场合,并且 GPS 高动态接收机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重要的现实意义.但由于高动态 GPS 接收机涉及军工等敏感领域,有关高动态的核心技术在各种文献中很少见到,相关技术必须自主开发.由于高动态 GPS 接收机常用于导弹导航等军事领域,短的温启动时间是 GPS 高动态接收机必须解决的一项关键技术^[1,2].

接收机的温启动时间是指接收机在无有效历书或接收机初始概略位置较准确位置相差 500 公里的情况下,从开机到初次给出有效定位解的时间.

当接收机无历书存储或由于长时间未开机造成历书无效时,接收机开机即处于温启动状态.而历书预报误差较大时,接收机将花费较长时间进行 GPS 星的捕获和星历下传后才可准确定位.而准确的轨道参数和星钟参数推算并辅之以合理的算法则可使接收机快速定位.

美国 JAVAD 公司的 JPSEuro 高动态 GPS 接收机(动态特性高达 30g)其温启动时间在 45 秒钟左右;NovAtel 公司的

PowerPak-4E/PowerPak-4 高动态接收机其温启动时间在 40 秒钟左右;我国自行研制的高动态 GPS 接收机其温启动时间则更长,一般在 1 分钟左右.国外高动态 GPS 接收机温启动算法虽已很成熟,但由于技术保密等原因,算法未见发表.本文对接收机接收到的 GPS 信号的载波多普勒频移进行分析并给出了各组成部分的计算公式,同时对其各组成部分对接收机星捕获时间的影响进行了分析,提出通过消除时钟频率漂移并辅之以有效历书推算的新的温启动算法,大大缩短了高动态 GPS 接收机温启动的时间.在静止的接收机中预先输入接收机本地概略地址和时间的情况下,温启动时间缩短至 25 秒以内.

2 接收机载波的多普勒频移

我们的接收机采用 GEC 全球定位系统接收机的第二代射频前端 GP2010 和 GP2021.在 GP2010 中将接收到的 GPS 信号经 3 次下变频后,再经 5.715MHz 本振欠采样为 1.405MHz 的数字中频信号输出,由于欠采样会造成中频信号频率和相位的反转,同时由于延时不同、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,总的接收信号 $r(t)$ 可以表示为^[3-5]:

$$r(t) = \sum_{i=1}^M A_i C_i \left[\begin{matrix} 1 - \frac{f_{i0}}{1540} \\ kT_s - i \end{matrix} \right] \cdot D_i \left[\begin{matrix} 1 - \frac{f_{i0}}{31508400} \\ kT_s - i \end{matrix} \right] \cdot \sin[2 (f_1 - f_{i0}) (kT_s - i) - \phi_i] + n(t) \quad (1)$$

式中 A_i 为接收信号强度,第 i 颗卫星的星历数据为 $D_i(t)$,调制码为 $C_i(t)$, i 为第 i 颗卫星信号从卫星到达接收机总的传播时间, ϕ_i 为第 i 颗卫星的初相, $T_s = \frac{1}{5.715M}$, $f_1 = 1.405\text{MHz}$, M 为接收机可同时观测到的卫星数目

$$f_{i0} = f + f_{rec} + f_s \quad (2)$$

f_{rec} 为接收机时钟频率漂移带来的频率误差, f_s 为 GPS 星频率漂移, f 为第 i 颗卫星相对接收机运动而产生的多普勒频移, f 可按下式计算

$$f = -\frac{v \cdot f}{c} = f_{sv} + f_{rec} \quad (3)$$

其中 v 为卫星和接收机的相对速度 v 在信号传播方向上的投影, c 为光速, f 为信号的频率, f_{sv} 为 GPS 星相对于静态接收机在信号传播方向上的相对速度引起的信号频率偏移, f_{rec} 为接收机在信号传播方向上的相对速度引起的信号频率偏移^[6].

3 GPS 星时钟参数和 GPS 星频率漂移 f_s 的推算

产生时钟信号的参考晶振的相位可以表示成时间的函数,即^[7]

$$\phi_c = f_{sv} [(1 + \epsilon) t + \frac{1}{2} \epsilon^2 t^2] \quad (4)$$

GPS 星发出的信号的相位 $\phi(t) = f_0 [(1 + \epsilon) t + \frac{1}{2} \epsilon^2 t^2]$

$$f_0 = kf_{sv}$$

其中, ϵ 为频偏误差, ϵ 为晶体老化速率, f_{sv} 为晶体的标称频率, f_0 为 1575.42MHz, k 为由 f_{sv} 产生 f_0 的上变频系数.

GPS 星发出信号的实际频率可表示为

$$f_r = \frac{d\phi(t)}{dt} = f_0 [(1 + \epsilon) + \epsilon t] \quad (5)$$

时间误差

$$T = t_{t_{oc}} + \int_0^{t-t_{oc}} \left[1 - \frac{f_r}{f_0} \right] dt \quad (6)$$

$$t = t_{t_{oc}} + \int_0^{t-t_{oc}} (1 + \epsilon t) dt$$

$$= t_{t_{oc}} + (t - t_{oc}) + \frac{1}{2} \epsilon (t - t_{oc})^2 \quad (7)$$

同时,根据 GPSICD200 C 接口控制文件,时间误差为^[7]

$$t_{sv} = af_0 + af_1 (t - t_{oc}) + af_2 (t - t_{oc})^2 \quad (8)$$

其中, af_0 、 af_1 、 af_2 为 GPS 星的导航电文中的 GPS 星时钟参数.比较 (7) (8) 可知,

$$af_0 = t_{t_{oc}}, af_1 = \epsilon, af_2 = \frac{1}{2} \epsilon \quad (9)$$

其中 $af_1 = (f_r - f_0) / f_0$, $af_2 = \frac{1}{2} \frac{df_r}{dt}$ (10)

可推出

$$af_{0_2} = af_{0_1} + af_{1_1} (t_2 - t_1) + af_2 (t_2 - t_1)^2 \quad (11)$$

$$af_{1_2} = af_{1_1} + af_2 (t_2 - t_1) \quad (12)$$

式中, af_{0_2} 、 af_{1_2} 为推算时刻 t_2 的 af_0 和 af_1 值, af_{0_1} 、 af_{1_1} 为已获得的在 t_1 时刻的 af_0 和 af_1 值.

$$\text{可得在推算时刻 } t_2 \text{ 的 } f_s \quad f_s = af_{1_2} \times f_0 \quad (13)$$

4 GPS 星相对速度引起的信号频率偏移 f_{sv} 和接收机时钟频移 f_{rec} 的推算

4.1 f_{sv} 的推算

以 t_0 时刻的 GPS 星的星历中的轨道根数轨道长半轴 $a(t_0)$ 、偏心率 $e(t_0)$ 、轨道面倾角 $i(t_0)$ 、轨道准经度 $\omega(t_0)$ 、轨道近地点角距 $\nu(t_0)$ 、平近点角 $M_0(t_0)$ 为基础可推导出 t 时刻的 $a(t)$ 、 $e(t)$ 、 $i(t)$ 、 $\omega(t)$ 、 $\nu(t)$ 、 $M_0(t)$, 并设六个摄动修正参数为零.这样,可得 t 时刻的历书.

由于 GPS 卫星轨道高度在 2 万公里左右,可忽略大气阻力摄动,同时不考虑 GPS 星受到的月球和太阳及其他行星的引力,电磁力,光压及 GPS 星自身发出的扰动力(如姿态控制)等因素的影响,则地球引力场摄动函数 R 的表达式^[8]

$$R = -\frac{GM}{r} \left[\left(\frac{a_e}{r} \right)^2 \frac{J_2 p_2(\sin \theta)}{2} + \left(\frac{a_e}{r} \right)^3 \frac{J_3 p_3(\sin \theta)}{3} + \left(\frac{a_e}{r} \right)^4 \frac{J_4 p_4(\sin \theta)}{4} \right] \quad (14)$$

其中 GM 为地球引力常数, r 为 GPS 星地心矢径, a_e 为地球椭球的长半径,

\bar{J}_n 为正常化球谐系数, $J_n = \frac{1}{\sqrt{2n+1}} \bar{J}_n$, 与地球上经度有关, J_n 为带谐系数;

$p_n(x)$ 为正常化的勒让德多项式, $p_n = (\sin \theta) = \sqrt{2n+1} p_n(\sin \theta)$, $p_n(x)$ 为勒让德多项式, θ 为 GPS 星在地心坐标系中的地心纬度, θ 和 f 的关系满足下式^[8]

$$\sin \theta = \sin i \sin(\nu + f)$$

其中 i 为 GPS 星轨道面倾角, ν 为 GPS 星近升角距, f 为 GPS 星真近点角;

在地球非质心摄动力中,影响最大的是地球非球形部分引起的摄动力,称为地球形状摄动,即地球引力场二阶带球谐系数 J_2 引起的摄动 R_2 .

对 R 进行化简后取含 J_2 的项 R_2 ^[8]

$$R_2 = \frac{GM}{r} A_2 \left(\frac{a_e}{r} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \sin^2 i \right) + \frac{1}{2} \sin^2 i \cos 2(\nu + f) \right] \quad (15)$$

$$\text{其中 } A_2 = -\frac{3\sqrt{5}}{2} J_2 = -\frac{3}{2} J_2$$

只考虑 R_2 的长期项 $R_{2c} = GMa_e^2 \frac{A_2}{a^3} \left(1 - e^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2 \sin^2 i} \right)$

将其代入拉格朗日行星运动方程中,并加入修正项,得

$$a(t) = a(t_0)$$

$$e(t) = e(t_0) \quad i(t) = i(t_0)$$

$$\nu(t) = \nu(t_0) - \left[\frac{3}{2} a_e^2 \frac{J_2}{p^2} n \cos i + \phi_i \right] (t - t_0) \quad (16)$$

$$\nu(t) = \nu(t_0) + \frac{3}{2} a_e^2 \frac{J_2}{p^2} n \left[2 - \frac{5}{2} \sin^2 i \right] (t - t_0)$$

$$M_0(t) = M_0(t_0) + [n + n - \frac{3}{2} a_e^2 \frac{J_2}{p^2} n$$

$$\left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i\right) \sqrt{1 - e^2} + i](t - t_0) \text{ [模} = 2 \text{]}$$
 其中, $p = a(1 - e^2)$, $n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$, $J_2 = 108263 \times 10^{-8}$, $a_e = 6378140\text{m}$, $\mu = 3986005 \times 10^8 \text{m}^3/\text{s}^2$, 为轨道升交点赤经, n 为卫星平均角速度的改正项, ϕ_i 为 $\frac{dM_0}{dt}$ 的修正参数, i_i 为 $\frac{dM_0}{dt}$ 的修正参数, i 表示不同的 GPS 星.

和 t_0 的关系满足下式^[8-11]

$$t_0(t) = (t_0) - \text{GATS} \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{3}{2} a_e^2 \frac{J_2}{p^2} n \cos i + \phi_i \quad (18)$$

$$t_0(t) = t_0(t_0) + \frac{d}{dt} (t - t_0) + e \times 604800 \times (WN_{t_0} - WN_t) \text{ [模} = 2 \text{]} \quad (19)$$

WN_{t_0} 为 t_0 时刻对应的星历中的星期数, WN_t 为 t 时刻对应的星历中的星期数, GATS 为一个星期的历元开始时刻 t 的格林尼治恒星时, e 为地球自转速率.

根据时刻的 GPS 星轨道参数, 可以得出 t 时刻的 GPS 星的位置和速度, 再根据接收机的位置, 从而可计算出 t 时刻的 f_{sv} .

4.2 接收机时钟频移的推算

由于接收机时钟频移具有较长的时间稳定性且不同接收机的时钟频移是不同的, 因而应预先将接收机时钟频移算出并在接收机中直接使用.

由于 $f_{io} = f_{sv} + f_{rec} + f_{rec} + f_s$, 且由于 GPS 星的星历在几个小时内是不变的, 通过在观测时刻前几分钟下传的 GPS 星的星历及在观测时刻接收机的位置可计算出观测时刻第 j 颗 GPS 星的 f_{sv}^j , 同时根据式 (12) 和 (13) 可以推导出观测时刻该 GPS 星的 f_s^j .

让接收机在观测时刻处于静止状态, 这时 $f_{rec} = 0$, 同时接收机可实时给出观测时刻关于第 j 颗 GPS 星的总的频率偏移 f_{io}^j , 则该时刻观测第 j 颗 GPS 星得出的 f_{rec}^j 为

$$f_{rec}^j = f_{io}^j - f_{sv}^j - f_s^j \quad (20)$$

对各可接收到的 GPS 星的 f_{rec}^j 进行加权平均, 可得

$$f_{rec} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (f_{rec}^j) \quad (21)$$

其中 α_j 为 f_{rec}^j 的加权系数, 它由该 GPS 星相对于接收机的高度角决定

$$\alpha_j = \frac{1}{N}$$

N 为在观测时刻可接收到的 GPS 星总数.

我们用美国 JAVAD 公司的 JPSEuro 高动态 GPS 接收机进行观测, 得出该接收机的 $f_{rec} = 7196\text{Hz}$, 接收机 10M 晶振频偏 45.6Hz.

在接收机中, f_{rec} 的值也可由程序根据当前的各可接收到的 GPS 星的 f_{io}^j 、 f_{sv}^j 、 f_s^j 、 f_{rec}^j 自动计算得出, 存储于外存储器中, 并在下次开机时将 f_{rec} 读入接收机程序内使用.

5 GPS 信号的捕获过程

不考虑漏警的情况下, C/A 码的捕获时间可以表示为^[5]:

$$T_q = \frac{N_s}{1} T_d \cdot N_d \cdot P_f \quad (22)$$

T_q 为信号捕获时间; T_d 为每个单元的驻留时间; N_s 为信号搜索单元数; N_d 为每个单元驻留次数; P_f 为虚警概率.

在盲捕的状况下, 高动态 GPS 信号频率的搜索范围为 $\pm f_{io}$, 驻留时间 T_d 为 GP2021 的相关时间 1ms, 一个多普勒搜索单元为 500Hz, 则有效搜索频段为

$$N = \frac{f_{io}}{500} = \frac{f_{sv} + f_{rec} + f_{rec} + f_s}{500} \quad (23)$$

码相位步进量为 $1/2$ 码片, GPS 信号有 1023 个码片, 所以每一频段码搜索单元数为 2046. 由于逐次逼近扫描法是从起始单元的两侧依次进行搜索, 则总计搜索数目

$$N_s = 2046 * 2 * N \quad (24)$$

多次逗留滑动相关法在没有信号单元的驻留次数为 1 次, 有信号的搜索单元的驻留次数 N_d 为 3 次, 发生虚警时, 驻留次数最多为 3 次.

如 $f_{rec} = 7196\text{Hz}$

由式 (23), f_{rec} 对应的搜索频段 $N_{rec} = 7196/500 = 14$, 由 f_{rec} 造成的对接收机星捕获时间的影响 $T_{q_{rec}}$ 为 56 秒, 当接收机消除了 f_{rec} 后, 星捕获时间可减少 $T_{q_{rec}}$.

如接收机的晶振具有较大的频偏, 则 $T_{q_{rec}}$ 会更大.

设卫星相对接收机的位置矢量 s 与卫星相对接收机的速度矢量 v 之间的夹角为 θ , 当 $\theta < 90^\circ$, f_{sv} 为正值, 考虑到 GPS 星的速度, f 的数值可能达到 3675Hz 左右. 同时由于接收机如长时间不开机, 则接收机中原存储的历书会失效, 接收机开机即处于盲捕状态.

6 结论

一般的 GPS 接收机中在温启动时, 初始多普勒频移只考虑 f_{sv} , 而不考虑 f_{rec} . 这样, 星捕获时间一般在 1 分钟以上; 同时, 一般接收机中无历书推导, 这样, 如接收机中存储的轨道参数和星钟参数误差较大, 在花费较长的时间完成星捕获后也必需再等待 $(6 + (5 - a) \times 6)$ 秒, a 为接收机捕获到星时 GPS 星所播发星历的电文子帧号) 后才可完成温启动. 在我们研制的高动态接收机可较准确长时间地进行轨道参数及星钟参数的推算后, 接收机在温启动时预先将接收机频率偏移和 GPS 星相对速度引起的信号频率偏移消除掉, 这样不仅可以在温启动时避免盲捕, 更可使星捕获时间大大缩短并在 4 颗星捕获后立即就可较准确地定位.

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.
- [2] 张伯川, 张其善. 高动态接收机的关键问题研究[J]. 电子学报.
- [3] 王银锋. 基于 DSP 技术的 GPS 接收机的研制[D]. 北京: 北京航

- 空航空航天大学电子工程系,1999.
- [4] W Zhang. Modeling and analysis for the GPS pseudorange observable [J]. IEEE Trans on AES,1995,31(2):739-751.
- [5] 罗兴宇,张其善. 高动态 GPS 信号 C/A 码捕获方案及实现[J]. 北京航空航天大学学报,2002(3),358-361.
- [6] 薛文芳. GPS 接收机中伪随机码快速捕获技术的研究[T]. 北京航空航天大学学报,2001,29,5,489-492.
- [7] 王广运等. GPS 精密测地系统原理[M]. 北京:测绘出版社,1991.306-309.
- [8] 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.
- [9] Global Positioning System: Theory and Application Volume 1 [M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 2002.
- [10] 张守信. GPS 卫星测量定位理论与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1996:146-149.
- [11] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京:国防工业出版社,2000.

- [12] 孙礼. GPS 接收机系统的研究[D]. 北京:北京航空航天大学电子工程系,1998.

作者简介:



张伯川 男,1972 年出生于内蒙古自治区呼和浩特市,现于北京航空航天大学攻读博士研究生,从事专业为通信与信息系统,主要研究方向为 GPS,扩频通信. 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.