

高动态接收机的关键问题研究

张伯川, 张其善

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

摘 要: 为检测高动态 GPS(Global Positioning System)信号, 需要设计码环及载波环的捕获与跟踪数字系统. 在高动态下, 在 GPS 信号的码跟踪和载波捕获与跟踪问题中最关键的是要解决在高加速度下的载波跟踪问题. 主要讨论了在高动态下, 结合 GEC 公司的十二通道相关器 GP2021, 载波跟踪环路的特性并在此基础上提出了一个新的方法来改善载波跟踪环路的性能.

关键词: 高动态; 解调; 载频

中图分类号: TN850. 4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1844-03

Research on the Key Issue about High Dynamic Receiver

ZHANG Bo-chuan, ZHANG Qi-shan

(Dept of Electronic Engineering, Beijing university of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To examine the GPS signal in high dynamic situation, it is necessary to design code circuit and carrier circuit. To acquire and track the digital system, in the high dynamic situation, the most important aspect in the problems of code tracking as well as carrier acquisition and tracking is to solve carrier tracking problem. In the high dynamic situation, using the twelve channels correlator - GP2021 of GEC corporation, this paper analyses the peculiarity of carrier tracking circuit. On the ground of it, it also presents a novel method to improve the performance of the carrier tracking circuit.

Key words: high dynamic situation; demodulation; carrier

1 引言

GPS 是美国建立的高精度全球卫星定位导航系统, 在陆地、海洋、航空和航天等领域都有着广泛的应用. 而 GPS 高动态接收机则可应用于导弹、卫星、飞机等许多场合, 但由于高动态 GPS 接收机涉及军工等敏感领域, 故国外的相关技术或产品是对我国封锁或不可靠的, 有关高动态的核心解决技术在各种文献中也无法得到, 相关技术必须自主开发.

当使用对信号同时进行时域(码相位)和频域(多普勒频移)的二维搜索从而对载波多普勒频移逐次逼近扫描的串行搜索法时, 在高动态下, 由于码的捕获是分频段进行的, 载波跟踪环路对码跟踪环路提供速度辅助, 且由于码的跟踪是在频率误差范围 500Hz 以内进行的, 一定范围内的高加速度引起的频率变化率对码的跟踪影响不大, 环路失锁首先从载波跟踪环路开始. 同时, 一定范围内的高速度只影响频率捕获所涉及到的频段数, 即只影响频率捕获时间而对频率跟踪影响不大. 因此, 在高动态下, 在 GPS 信号的码跟踪和载波捕获与跟踪问题中解决在高加速度下的载波跟踪问题具有十分重要的意义.

本文对 GPS 信号的载波跟踪和捕获过程进行了分析, 并对载波跟踪环路进行了设计, 提出了一种新的方法, 改善了在

高加速度下 GPS 信号载波跟踪环路的性能.

2 加速度而引起的信号频率偏移的变化率

由于两个物体在与信号传播方向相同或相反的方向上相对加速度而引起的信号频率偏移的变化率的计算公式为

$$f = \frac{1}{c} \frac{da}{dt} f \quad (1)$$

其中 a 为两个物体的相对加速度在信号传播方向上的投影, c 为光速, f 为信号的频率. 设卫星相对接收机的加速度矢量为 a , 则

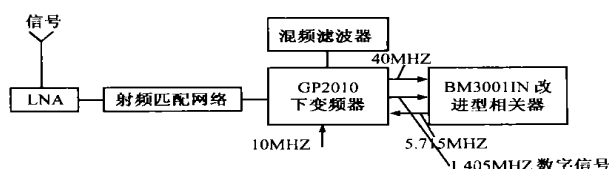
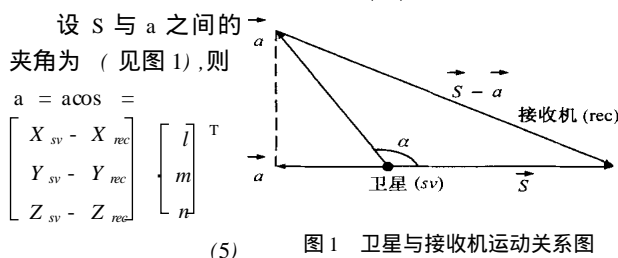
$$a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{sv} - X_{rec} \\ Y_{sv} - Y_{rec} \\ Z_{sv} - Z_{rec} \end{bmatrix} \quad (2)$$

设接收机相对卫星的位置矢量为 S , 模为 $|S|$, 则

$$S = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{rec} - X_{sv} \\ Y_{rec} - Y_{sv} \\ Z_{rec} - Z_{sv} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, X_{rec} , Y_{rec} , Z_{rec} 表示接收机在 WGS-84 坐标系下的 X 轴方向的位置, 速度, 加速度坐标; X_{sv} , Y_{sv} , Z_{sv} 表示 GPS 卫星在 WGS-84 坐标系下的 X 轴方向的位置, 速度, 加速度坐标.

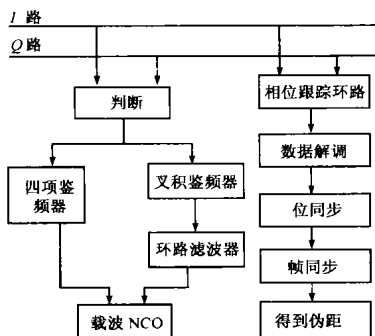
$$S \text{ 的空间方向梯度为 } L = \begin{bmatrix} \frac{X_{rec} - X_{sv}}{|S|} \\ \frac{Y_{rec} - Y_{sv}}{|S|} \\ \frac{Z_{rec} - Z_{sv}}{|S|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} \quad (4)$$



3 高动态下载波跟踪和捕获

3.1 在高动态下的叉积鉴频器

GPS 导航数据是经过直接序列扩频调制及载波调制的扩频信号, 信号发射功率小, 故必须首先对信号进行码相关解扩。载波频率(多普勒频移)的粗略估计包含在 GPS 码同步过程中。在我们的 GPS 接收机中, 选用 GEC 公司的十二通道相关器 GP2021 和 GP2010 射频前端, 采用载波多普勒频移逐次逼近扫描的串行搜索法。在串行搜索过程中, 适当地排列多普勒频移搜索单元的搜索顺序, 可以降低信号的捕获时间。考虑多普勒频移的正负关系(相关器 GP2021 提供一个 5.714MHz 的时钟给 GP2010, 对 GP2010 的已经下变频到 4.309MHz 的信号进行欠采样, 得到 1.405MHz 的中频数字信号。欠采样过程造成中频数字信号频率和相位反转。GP2010 输出中心频率为 1.405MHz 的中频信号给 GP2021, 见图 3), 采用载波多普勒频移逐次逼近扫描法, 从起始单元的两侧依次进行搜索, 起始单元的设置应考虑 GPS 星对地面静止物体的相对速度而造成的预测的多普勒频移值。相关器在整个码周期内进行积分, 积分时间为 1ms。在串行搜索法中, 搜索时先设定某个频率搜索单元(频率偏差在 500Hz 以内), 依次滑动本地码和滞后码, 读取相关器的相关值, 如果相关值超过设定的门限, 则信号已经捕获到, 停止搜索。如果移动完 1023 个码片仍未



搜索到信号, 则进行下一个频率单元的搜索, 直至搜索到信号。码捕获, 进入码跟踪后再进行频率的捕获和跟踪。采用的方法是用四项鉴频器将 500Hz 范围内的频率偏差校正到 10Hz 以内, 再用叉积鉴频器实现精确的频率跟踪。此时, 进入精确的码跟踪和载波跟踪状态。GP2021 相关器 I (同相)、 Q (正交)通道积分-清除器在相关间隔末输出为^[5]:

$$\begin{aligned} I(k) &= 0.5AD(k)R[\cdot(k)]\text{sinc}[f_d(k) \cdot T]\cos\phi_k + n_c(t) \\ Q(k) &= 0.5AD(k)R[\cdot(k)]\text{sinc}[f_d(k) \cdot T]\sin\phi_k + n_s(t) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, A 为信号幅度, $D(k)$ 为调制数据, $\text{sinc}(z) = \sin z / z$, $f_d(k)$ 为多普勒频移估计残差, $\cdot(k)$ 为码相位估计偏差, $R(\cdot)$ 为 PRN 码理想的二电平自相关函数, 均为时间的函数, $\phi_k = f_d(k) \cdot k \cdot T + \phi_0$ 为载波相位(时间函数), $f_d(k) = f - f$, T 为与相关器积分间隔时间, f 为信号多普勒频移值, f 为多普勒频移估计值。

对于叉积鉴频器而言, 由于我们用它来实现精确的频率跟踪, 其线性有效范围就是它的有效工作范围。

由式(6), 叉积鉴频器的控制量可以表达为^[6]:

$$\begin{aligned} I(k-1)Q(k) - I(k)Q(k-1) &= 0.25A^2D(k)D(k-1) \\ &\cdot R[\cdot(k)]\text{sinc}[f_d(k) \cdot T] \\ &\cdot \text{sinc}[f_d(k-1) \cdot T]\sin(\phi_k - \phi_{k-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

设连续测量过程中调制数据位不变, 所以有 $D(k)D(k-1) = 1$, $\phi_k = f_d(k) \cdot k \cdot T + \phi_0$, $\phi_k - \phi_{k-1} = f_d(k) \cdot k \cdot T$, 当 $|f_d(k) \cdot k \cdot T|$ 接近零时, $\text{sinc}[f_d(k) \cdot T]\text{sinc}[f_d(k-1) \cdot T] = 1$, $\sin(\phi_k - \phi_{k-1}) = \phi_k - \phi_{k-1} = f_d(k-1) \cdot T$ 。所以控制量与单位时间内的相位变化成正比。这实际上是将多普勒频移估计残差通过乘以 T 而反映到相位在 T 时间内的变化上, 通过四相鉴频器后, 此时的 $f_d(k)$ 在 10Hz 以内, GEC 公司的十二通道相关器 GP2021, 相邻两次相关的间隔时间 T 为 0.001 秒。对应的相位值在 0.001 秒内的变化值在 0.0314 以内, 处于 $\sin(x)$ 函数的线性区内。通过对相位变化率的控制从而达到控制频率偏差的目的。当接收机有较大的加速度时, 如接收机与 GPS 星在信号传播方向上有 $a = 8g$ 的相对加速度, a 引起的频率变化率为 412Hz/s, T 为 1ms, 处理器两次读取相关器的时间间隔内产生的频率最大变化量为 0.412Hz, 按照 $\phi_k - \phi_{k-1} = f_d(k) \cdot T$, 对应叉积鉴频器的相位变化为 0.001294rad。这时叉积鉴频器仍可正常工作。

3.2 高加速度下的频率跟踪及改善

(1) 对于非相干的 PLL 解调, 导航数据解调则采用载波相位误差校正获得, 即对载波相位作 ϕ_k 的旋转。四项鉴频器和叉积鉴频器实现精确的频率跟踪, 相位跟踪和导航数据解调环路是载波跟踪环路的最后一个环节, 由它来实现载波相位的抽取和数据解调。到叉积鉴频器时只能实现码锁定, 载波锁定。位同步和帧同步状态只有在相位跟踪和导航数据解调环路正确工作后才可实现。而只有当帧同步(即数据可以正确解调下来并实现帧同步)后, 接收机才可得到正确的伪距, 此后建立导航定位方程组并准确定位。故而, 如相位跟踪和导航数据解调环路不能正常工作, 接收机将不能定位。对于相位跟踪环路和导航数据解调环路:

$$I' = I(k) \cos \theta_k + Q(k) \sin \theta_k \quad Q' = Q(k) \cos \theta_k - I(k) \sin \theta_k$$

$$\theta_{k+1} = \text{sign}(I') \theta_k \quad \theta_{k+1} = \theta_k + \Delta \theta_k \quad (8)$$

其中 $I(k) = A \cos \phi_k$, $Q(k) = A \sin \phi_k$, $\phi_k = f_d(k) \cdot k \cdot T + \phi_0$, $A = \sqrt{I^2 + Q^2}$

信号解调由 I' 给出

可以看出,当 $f_d(k)$ 不为零时, I, Q 始终跟踪着 IQ 进行相位的旋转,相位跟踪环路用调整后得出的 Q' 来作为环路的下一次相位旋转值 θ_{k+1} ,用 $\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta \theta_k$ 来作为下一时刻的环路相位旋转值的累加值.只有当 $\theta_{k+1} / 6$ 时, $\sin(\theta_{k+1})$

θ_{k+1} , 导航数据才可以准确的解调下来.

当信号传播方向上加速度为零并且不考虑噪声影响时,相位跟踪环路只需调整到固定相差 ϕ_0 即可抽取正确的相位,此后,相位跟踪环路相位将不再旋转.当加速度不为零时,由于加速度产生信号频率偏移的变化率为 f ,相关时间间隔 T 内的对应频率变化为 fT .此时,频率跟踪环路(叉积鉴频器)与相位跟踪环路两个环路同时启动.由于频率跟踪环路的反应时间较相位跟踪环路滞后一段时间 kT ,而相位跟踪环路则是实时反应环路.此时,频率跟踪环路将始终在工作,但不能准确实时地跟踪上信号的频率变化(滞后时差 kT , k 与锁相环的捕捉时间有关).而相位跟踪环路则有可能实时地跟踪上信号的频率变化.故如相位跟踪环路不能准确地跟踪由于加速度产生的频率变化 $f_k T$ 乘以 T 而反映到相位在 kT 时间内的变化 $f k T^2$,则导航数据解调环路就不能再进行有效的数据解调.

两次相关时间的间隔 T 为 0.001 秒.由式(1),则有

$$(L_1/c) a k T^2 < \pi/6 \quad (9)$$

由上面可以看出,相位跟踪环路对载波跟踪环路具有补偿作用.

(2)适当扩大环路等效噪声带宽 B_{LF} ,跟踪精度降低,载波跟踪环路产生的各项误差会反应到相位跟踪环路,但捕获时间缩短且锁相环的动态范围会得到改善;同时,对于相位跟踪环路,由于 $\sin(\theta_{k+1})$ 的线性牵引有效范围在 $\pi/6$ 以内,如果可以扩大这个范围,则可补偿由于变宽 B_{LF} 而对相位跟踪环路造成的影响,同时增加相位跟踪环路对载波跟踪环路补偿作用的范围,从而改善在高加速度下载波跟踪性能.

$$\text{考虑当 } \frac{\pi}{2} \text{ 时, } \sin \frac{\pi}{2} = \frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\sqrt{\cos^2 \frac{\pi}{2} + 1}}$$

而 I, Q 通道的信号可用 $I = A \cos(\theta_{k+1})$, $Q = A \sin(\theta_{k+1})$ 来表示, $A = \sqrt{I^2 + Q^2}$.

$$A \sin \frac{\pi}{2} = \frac{A \sin(\theta_{k+1})}{2A \sqrt{\frac{\cos^2(\theta_{k+1}) + 1}{2}}} = \frac{A \sin(\theta_{k+1})}{2 \sqrt{\frac{\cos^2(\theta_{k+1}) + 1}{2}}} A^2$$

$$= \frac{A \sin(\theta_{k+1})}{2 \sqrt{A \cos(\theta_{k+1}) + A}}$$

$$= \frac{Q}{2 \sqrt{I^2 + Q^2} \sqrt{\frac{I + \sqrt{I^2 + Q^2}}{2}}}$$

即当 $\frac{\pi}{6}$ 时, $\frac{2}{3}$ 时,用 $A \sin(\theta_{k+1})$ 误差较

大.此时, $A \sin(\theta_{k+1}) < A$, 而用 A 来近似则较

$$2A \sin \frac{\pi}{2} = \frac{Q}{2 \sqrt{I^2 + Q^2} \sqrt{\frac{I + \sqrt{I^2 + Q^2}}{2}}}$$

为准确.

4 结束语

本文着重分析了在高动态下,结合 GEC 公司的十二通道相关器 GP2021,载波跟踪环路的特性及解决方案.从理论上改善了在 GPS 信号的码跟踪和载波捕获与跟踪问题中最关键的在高加速度下载波跟踪性能.并对高动态接收机的载波环捕获与跟踪数字系统的设计做了简单的陈述.

参考文献:

- [1] Daffara F, Vinson P. Improved search algorithm for fast acquisition in a DSP-based GPS receiver[J]. IEEE Trans on Com, 1998, 310 - 314.
- [2] 朱近康. 扩展频谱通信及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1993. 182 - 204.
- [3] 孙礼. GPS 接收机系统的研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 1998.
- [4] 罗兴宇. 基于 DSP 技术的高动态 GPS 接收机的研制[D]. 北京:北京航空航天大学, 2002.
- [5] W Zhang. Modeling and analysis for the GPS pseudorange observable[J]. IEEE Trans On AES, 1995, 31(2): 739 - 751.
- [6] 王银锋. 基于 DSP 技术的 GPS 接收机的研制[D]. 北京:北京航空航天大学, 1999.
- [7] GPS Builder-2 Designer's Guide[Z].
- [8] 李小民. 高动态环境 GPS 应用中的几个关键问题研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 1998.

作者简介:



张伯川 男, 1972 年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.



张其善 男, 1936 年生于浙江浦江, 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.