

高灵敏度 GPS 信号捕获技术研究*

李怀建, 刘 莉, 杜小菁

(北京理工大学宇航科学技术学院, 北京 100081)

摘 要: 分析了影响 GPS 信号捕获灵敏度的因素, 提出了减小相干损耗、降低噪声功率等实现高灵敏度信号捕获的技术途径; 研究了相干损耗对灵敏度的影响, 提出了高灵敏度捕获的搜索步长选择方案; 研究了相干积分和非相干积分的信噪比增益, 提出了相干积分+非相干积分的信噪比增加方案; 进行了信号捕获仿真, 仿真结果表明, 所提出的技术途径可行, 能够实现对 30dB-Hz 的低信噪比信号的捕获。

关键词: 高灵敏度; GPS; 信号捕获

中图分类号: P228.4 文献标志码: A

Study on High-sensitivity GPS Signal Acquisition Techniques

LI Huajian, LIU Li, DU Xiaojing

(School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The factors which affect GPS signal acquisition sensitivity were analyzed. Some signal acquisition techniques with high sensitivity such as reducing wastage and noise power were proposed. In addition, the influence of wastage on sensitivity was studied; The selection scheme of search step in high sensitivity signal acquisition was also presented. Furthermore, the SNR gain of correlative and non-correlative integral was studied. An approach which combines correlative and non-correlative integral was provided to increase SNR. Finally, the simulation of signal acquisition was carried out. The results demonstrate that the techniques proposed in this paper are feasible; with these techniques such low SNR signal as 30dB-Hz can be acquired successfully.

Keywords: high sensitivity; GPS; signal acquisition

0 引言

现代战场电磁环境复杂, 存在热噪声干扰以及人为干扰等宽带噪声, 噪声功率比常规环境高 10~30dB。由于噪声功率增加, 接收机收到的 GPS 信号载噪比相应降低, 对 GPS 信号的捕获算法提出了很高的要求。文中首先分析了影响 GPS 信号捕获灵敏度的因素; 然后分别研究了相干损耗对灵敏度的影响和相干积分和非相干积分的信噪比增益; 最后进行了信号捕获仿真。

1 信号捕获原理

GPS 信号搜索捕获原理如图 1 所示。以某个搜索点的频率和码相位为参数, 接收机产生一个伪码和载波, 形成本地信号; 将本地信号与接

收信号进行相干积分; 将积分结果与预定捕获门限进行判决, 如果超过预定的捕获门限, 则认为捕获成功。如果低于预定的捕获门限, 则以下一个搜索点的频率和码相位为参数, 重新生成本地信号, 重复以上过程。

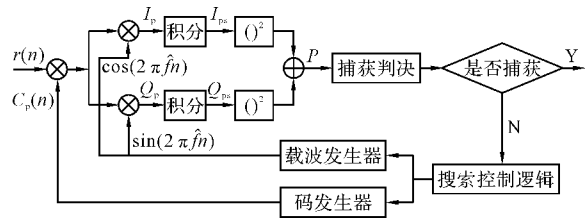


图 1 GPS 信号捕获原理框图

图 1 中, 本地信号与接收信号进行相干积分后的输出为:

$$I_{ps}(k) \approx \frac{A}{2} d_c(k) R(\Delta\tau) \cos(2\pi\Delta f k T_b - \pi\Delta f T_b + \Delta\phi_0) \sin c(\pi\Delta f T_b) + n_1 \quad (1)$$

* 收稿日期: 2008-08-26

作者简介: 李怀建(1973-), 男, 贵州锦屏人, 讲师, 博士, 研究方向: 卫星导航系统。

$$Q_{ps}(k) \approx -\frac{A}{2}d_c(k)R(\Delta\tau)\sin(2\pi\Delta f k T_b - \pi\Delta f T_b + \Delta\phi_0)\text{sinc}(\pi\Delta f T_b) + n_Q \quad (2)$$

式中： $R(\cdot)$ 为伪码的自相关函数； $\Delta\tau$ 为本地信号与接收信号的伪码相位失配； Δf 为本地信号与接收信号的频率失配； T_b 为相干积分时间； d_c 为信号中调制的数据码，有 $d_c(k)^2 = 1$ 。

将式(1)和式(2)代入，捕获判决量 P 为：

$$P = I_{ps}(k)^2 + Q_{ps}(k)^2 = \left[\frac{A}{2}R(\Delta\tau)\text{sinc}(\pi\Delta f T_b)\right]^2 + n_p^2 \quad (3)$$

式(3)显示，捕获判决量 P 由相干积分结果

$\left[\frac{A}{2}R(\Delta\tau)\text{sinc}(\pi\Delta f T_b)\right]^2$ 和噪声 n_p^2 两部分组成。

如果失配 $\Delta\tau$ 和 Δf 不为零， P 中的相干积分结果将减小，出现所谓的相干损耗。当相干损耗使得相干积分结果低于噪声 n_p ，则无法进行捕获鉴别。可见，提高捕获灵敏度的途径有两点：① 减小相干损耗，即减小式(3)中第一项的损耗；② 降低噪声功率，即降低式(3)中第二项。

2 减小相干损耗技术途径研究

2.1 频率失配损耗分析

当伪码对齐时， $\Delta\tau = 0$ ， $R(\Delta\tau) = 1$ ，忽略噪声，捕获函数式(3)变为：

$$P = \left[\frac{A}{2}\text{sinc}(\pi\Delta f T_b)\right]^2 \quad (4)$$

由式(4)可得频率失配 Δf 对捕获判决量 P 的影响，如图 2。

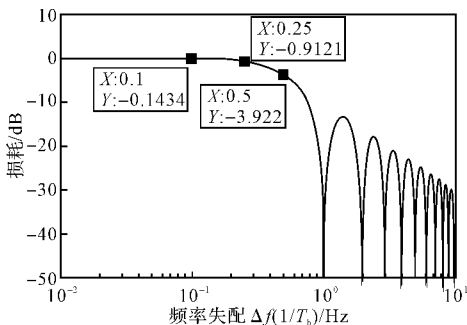


图 2 频率失配对判决函数的影响

图 2 显示， Δf 对 P 呈现非线性的滚降衰减。

在 Δf 小于 0.1 倍 $1/T_b$ 时，失配损耗变化很小；当 Δf 大于 0.1 倍 $1/T_b$ 时，失配损耗快速增加。

2.2 伪码相位失配损耗分析

当信号频率已经对准， $\Delta f = 0$ ， $\text{sinc}(\pi\Delta f T_b)$

$= 1$ ，忽略噪声，捕获函数式(3)变为：

$$P = \left[\frac{A}{2}R(\Delta\tau)\right]^2 \quad (5)$$

由式(5)可得伪码相位失配 $\Delta\tau$ 对捕获判决量 P 的影响，如图 3。

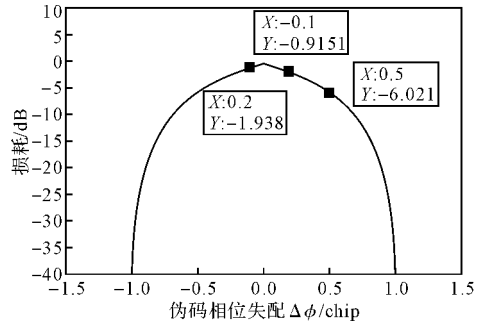


图 3 伪码相位失配对判决函数的影响

图 3 显示， $\Delta\tau$ 也会对 P 产生很大的衰减。在 $\Delta\tau$ 小于 0.5 chip 时，失配损耗与 $\Delta\tau$ 基本呈线性变化；当 $\Delta\tau$ 大于 0.5 chip 时，失配损耗快速增加。

2.3 减小相干损耗技术途径

前述分析显示，随着频率失配 Δf 和伪码相位失配 $\Delta\tau$ 的增加，相干损耗会快速增大。减小相干损耗的途径就是降低捕获过程中的 Δf 和 $\Delta\tau$ 。

减小失配是通过减小搜索步长来实现的。减小失配也就意味着搜索点数增多，捕获时间变长。捕获灵敏度与捕获时间需要综合考虑。

3 降低噪声功率技术途径研究

降低噪声功率的办法是增加积分时间。增加积分时间有两种方式，一种是增加相干积分时间，另外就是进行非相干积分。

3.1 相干积分

相干积分时间由 1 个伪码周期增加到 n 个伪码周期获得的信噪比增益为^[1]：

$$G_c = 10\log(n) \quad (6)$$

由式(6)可得到相干增益与相干积分次数的关系曲线，如图 4。图 4 显示，增加相干积分时间可以提高信噪比增益。

但是，相干积分的时间长度受到信号动态、数据码码率、捕获速度等因素限制，一般小于 10 ms^[3]。对于更长的积分时间，则需要采用非相干积分来实现。

3.2 非相干积分

非相干积分是对捕获量 P 再进行累加。非相干积分的信噪比增益为^[1]:

$$G_i(n) = G_c(n) - L(n) \quad (7)$$

式中: $G_c(n)$ 为相干积分增益; $L(n)$ 为非相干积分损耗,有:

$$L(n) = 10 \log \left[\frac{1 + \sqrt{1 + 9.2n/D_c(1)}}{1 + \sqrt{1 + 9.2/D_c(1)}} \right]$$

$$D_c(1) = (\operatorname{erf}^{-1}(1 - 2P_{fa}) - \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2P_d))^2$$

$$x = \operatorname{erf}^{-1}(y)$$

$$y = \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

其中: P_d 为检测概率, P_{fa} 为虚警概率, $\operatorname{erf}^{-1}(y)$ 为误差函数的反函数。

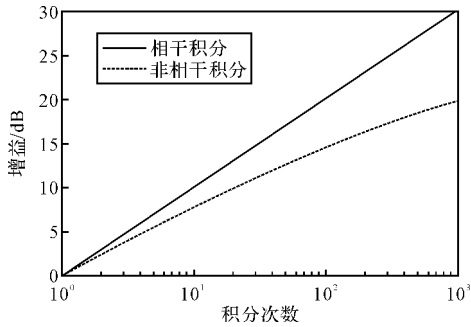


图 4 信噪比增益与积分次数 n 的关系曲线

利用式(7)可以得到非相干积分增益与积分次数 n 的曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知,非相干积分也可以增加信噪比。但是,同样积分次数,非相干积分增益比相干积分增益要小,而且随着积分次数的增加,这种差别会越来越来大。其中原因是,非相干积分累加的是经过平方后的信号包络,噪声功率也进行了累加。在增加积分时间时,应优先考虑相干积分方法。

非相干积分是对判决量 P 进行累加,消除了导航数据翻转的影响,积分时间长度不再受 GPS 信号中的数据码码片宽度限制。

4 高灵敏度信号捕获算例

信号捕获算法与接收信号的信噪比和动态相关。本节以信噪比为 30dB-Hz,信号动态速度为 900m/s,加速度 4g 为例,进行 GPS L1 频点

的高灵敏度信号捕获算法的设计和仿真。

信噪比为 30dB-Hz,相对于常规信号的 44dB-Hz,信噪比低了 14dB;速度为 900m/s 的动态产生的多普勒频率为 4730Hz;加速度为 4g 的动态产生的多普勒频率变化率为 210Hz/s。

4.1 高灵敏度信号捕获算法设计

4.1.1 相干积分时间和非相干积分次数

受 GPS 信号中数据码的限制,相干积分取 10ms,即 10 个伪码周期,获得的信噪比增益为 10dB;非相干积分次数取 3 次,获得的信噪比增益为 4dB。采用如上的相干积分和非相干积分组合方案获得的总增益为 $10 + 4 = 14$ dB。采用此方案时,搜索一步需要时间为 $10\text{ms} \times 3 = 30\text{ms}$ 。

4.1.2 捕获搜索步长

综合考虑捕获速度和相干损耗,伪码相位搜索步长取 0.2chip,产生的最大失配为 0.1chip,由此产生的损耗为 0.9dB;频率搜索步长取 0.5 倍 $1/T_b$,产生的最大失配为 0.25 倍 $1/T_b$,由此产生的损耗为 0.9dB。由于相干积分时间取 10ms,频率搜索步长为 $0.5 \times 1/0.01 = 50\text{Hz}$ 。

采用如上的搜索步长,接收信号与本地信号失配产生的损耗在 $0.9 + 0.9 = 1.8$ dB 左右,相对于常规捕获算法的 3.4dB 损耗,灵敏度提高了 1.6dB。

4.1.3 对动态信号的捕获性能分析

对于 210Hz/s 的多普勒频率变化率,在搜索一步消耗的 30ms 内,多普勒频率变化 $210 \times 0.03 = 6.3\text{Hz}$,小于频率搜索步长 50Hz 的一半,频率搜索步长能够满足动态要求。

由频率搜索步长和多普勒频率变化率可知,在一步搜索消耗的 30ms 内,最大频率失配为 $50/2 + 210 \times 0.03 = 31.3\text{Hz}$,其引起的伪码相位失配为 $31.3 \times 1.023e6/1575.52e6 = 0.02\text{chip}$,小于伪码相位搜索步长 0.2chip 的一半,伪码相位搜索步长能够满足动态要求。

4.1.4 算法小结

频率搜索步长:50Hz

伪码相位搜索步长:0.2chip

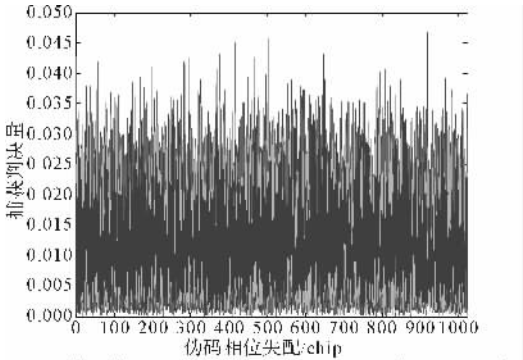
相关积累时间:10ms

非相干积分次数:3 次

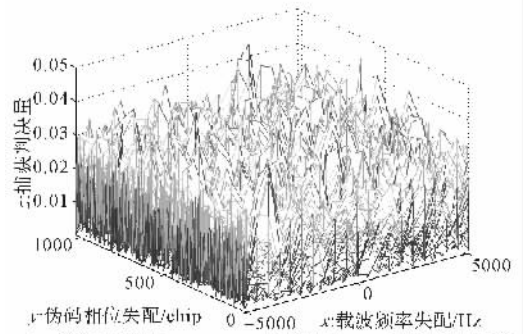
相对常规捕获算法的增益： $1.6 + 14 = 15.6\text{dB}$

4.2 仿真分析

本节对常规捕获算法和 4.1 节高灵敏度信号捕获算法进行仿真。仿真预设的伪码相位失配为 400.3chip ，频率失配为 775Hz 。常规捕获算法为：相干积分时间 1ms ，非相干积分次数 0 ，伪码相位搜索步长 0.5chip ，频率搜索步长 500Hz 。仿真结果如图 5 和图 6 所示。



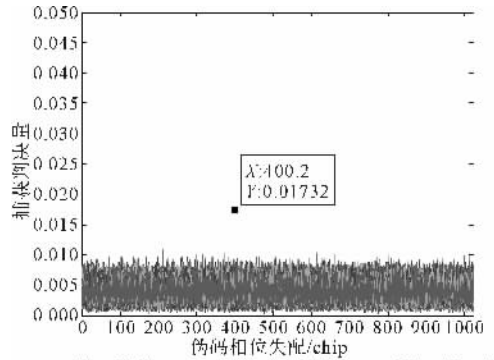
(a) 输入信噪比 30dB-Hz ，相关积累 1ms ，非相关积累次数 0



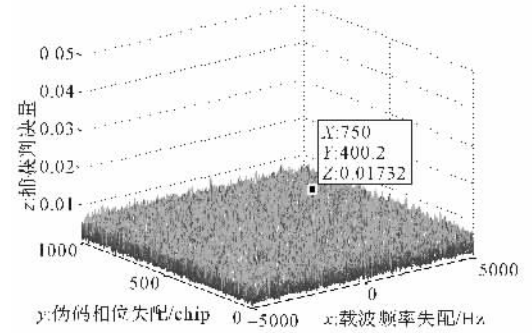
(b) 输入信噪比 30dB-Hz ，相关积累 1ms ，非相关积累次数 0

图 5 常规捕获算法仿真结果

仿真结果说明，对于 30dB-Hz 的低信噪比信号，接收码与本地码相关计算的峰值在 0.02 左右。采用常规算法时，噪声功率没有得到有效抑制，由噪声引起的相关计算峰值接近 0.05 ，完全淹没了接收码与本地码的相关计算峰值，不能得到正确的捕获结果。采用高灵敏度捕获算法后，噪声功率被明显降低，由噪声引起的相关计算结果降到了 0.01 以下，接收码与本地码相关计算的最大峰值为 0.01732 ，明显突出于噪声平面，能够获得正确的捕获结果。本算例的捕获结果为伪码相位失配 400.2chip ，载波频率失配 750Hz ，与预设的伪码相位失配 400.3chip ，频率



(a) 输入信噪比 30dB-Hz ，相关积累 10ms ，非相关积累次数 3



(b) 输入信噪比 30dB-Hz ，相关积累 10ms ，非相关积累次数 3

图 6 高灵敏度捕获算法仿真结果

失配 775Hz 相符，其中的差别是由于搜索步长引起的。

5 结论

文中分析了影响信号捕获灵敏度的原因，提出了减小频率和伪码相位失配损耗；采用相干积分和非相干积分组合来提高信噪比等提高捕获灵敏度的技术途径。算例仿真结果表明，以上技术途径能够有效提高信号捕获的灵敏度，实现对低信噪比信号的捕获。

参考文献：

- [1] James Bao-Yen Tsui, Fundamentals of global positioning system receivers: A software approach [M]. John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [2] 蔡昌听, 皮亦鸣. 高灵敏度 GPS 技术的研究进展 [J]. 全球定位系统, 2006(2): 1-4.
- [3] 唐卫涛, 唐斌. 一种新的微弱 GPS 信号捕获算法研究 [J]. 遥测遥控, 2007, 28(3): 25-30.
- [4] Psiaki M L. Block acquisition of weak GPS signals in a software receiver [C] // Proceedings of the ION GPS 2001: 2838-2850.