

一种超高灵敏度 GPS 信号的跟踪方法

巴晓辉¹ 刘海洋² 陈 培³ 陈 杰⁴

(1 中国科学院微电子研究所通信与多媒体 SOC 研究室,北京市朝阳区北土城西路 3 号,100029)

摘 要:分析了 Costas 环路不适于弱信号跟踪的原因,提出了一种基于 FFT 的跟踪方案,分析了 FFT 的点数与多普勒变化率之间的关系,当接收机静止时,平均多普勒变化率为 0.54 Hz/s,128 点 FFT 可提供最大的信噪比增益。为防止载波更新环路的错误调整,提出了一种基于 NP 准则的门限,只有当 FFT 的计算结果超越门限时,载波 NCO 才作相应的调整。实验结果表明,当接收机静止时,采用 128 点 FFT,本文的跟踪方案可以跟踪至-163 dBm 的 GPS 信号。如果对多普勒变化率进行相应的补偿,则本文方案的跟踪灵敏度还可进一步提高。

关键词:GPS 接收机;FFT;高灵敏度

中图法分类号:P228.41

在手机中嵌入 GPS 芯片是移动定位的热点技术。这要求嵌入手机的 GPS 芯片应该在手机能使用的地方发挥功能,也就是说,不仅能在露天环境中使用,还应能在室内、树林等地方使用。首个要求在手机中嵌入 GPS 芯片的系统是美国的 E911 系统^[1]。美国联邦通信委员会(FCC)已经要求美国的移动电话在 2007 年都具备向基站发送自身位置的功能。因而提高 GPS 接收机的鲁棒性,使得接收机能够在城市峡谷或者室内使用是非常必要的,而体现 GPS 接收机鲁棒性的参数之一就是灵敏度。

GPS 接收机的灵敏度主要体现在捕获和跟踪性能上。文献[2-5]提出了高灵敏度捕获方案;文献[6]分析了晶振和带宽对 Costas 环路跟踪能力的影响。虽然有关高灵敏度跟踪的文章较少,但却出现了很多高灵敏度跟踪的 GPS 接收机^[7]。本文分析了经典的 Costas 环路不适于弱信号跟踪的原因,提出了一种基于 FFT 的 GPS 高灵敏度跟踪方案。

经典的 GPS 载波跟踪方法是基于数字锁相环技术的方法^[8,9],这种方法在低信噪比下,为确保环路鉴相器的正常工作,往往需要很长的相干积分时间以获得足够的信噪比增益,而相干积分时间的大幅增加使得环路的稳定性和抗噪声性能

发生恶化,因此,传统的数字锁相环并不利于实现高灵敏度的载波跟踪。

1 基于 FFT 的超高灵敏度跟踪算法

1.1 FFT 点数选取

图 1 给出了基于 FFT 跟踪算法的结构图,FFT 替换了原来的数字锁相环,相关器积分之后的数据经过导航电文剥离后进行 FFT 运算。

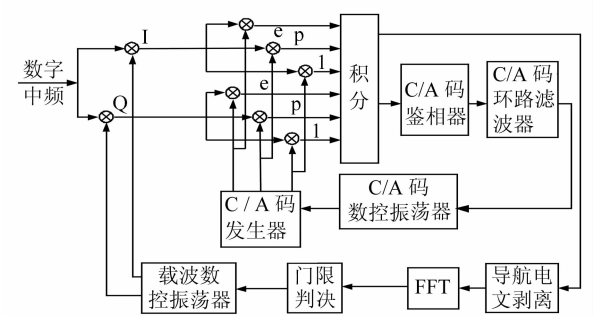


图 1 FFT 跟踪算法结构图
Fig.1 Diagram of FFT Tracking Algorithm

假设当前 GPS 接收机接收的某路卫星信号为:

$$r(t) = AD(t)c(t)\cos\theta + n(t)$$

式中, A 表示 GPS 信号振幅; $n(t)$ 表示功率为 σ^2 的加性高斯白噪声; $D(t)$ 表示卫星电文数据; $c(t)$

表示 C/A 码; $\theta=\int 2\pi(f_c+\dot{f}_d t)dt=2\pi f_c t+\pi \dot{f}_d t^2$,
 f_c 表示中频载波, \dot{f}_d 表示多普勒变化率(Hz/s)。

接收机基带的输入信号为数字中频信号, $r(t)$ 离散化表示为 $r(kT_s)$, T_s 表示采样间隔。如图 1 所示,积分之前的 P 路信号可表示为 $I(kT_s)$ 和 $Q(kT_s)$,当 P 路本地码与接收到的 GPS C/A 码对齐时,可得:

$$I(kT_s)+jQ(kT_s)=\frac{A}{2}D(kT_s)e^{j[2\pi(f_L-f_c)kT_s+\pi\dot{f}_d(kT_s)^2]} \tag{1}$$

式中, f_L 表示本地复现载波。式(1)滤掉了高频部分。图 1 的积分过程可表示为:

$$M(n)=\int_{nT}^{(n+1)T}[I(t)+jQ(t)]dt \tag{2}$$

式中, T 表示积分时间; n 为非负整数。

导航电文前三子帧每 2 h 更新一次,后二子帧每几个月更新一次,因此,可利用此重复性进行电文数据比特剥离。经过数据剥离之后, $M(n)$ 的 FFT 可表示为:

$$F(k)=\sum_{n=0}^{N-1}M(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \tag{3}$$

式(2)的积分会出现 Fresnel 正弦余弦积分,无法用闭合形式表示,因此,此处采用数值分析的方法分析式(3)的性能。

当接收机静止时,卫星运动造成的多普勒变化率最大不超过 1 Hz/s,平均多普勒变化率为 0.54 Hz/s,而当接收机处于运动状态,多普勒变化率则可能超越 1 Hz/s,因此在本文给出的数值分析实验中, \dot{f}_d (Hz/s)取值分别为 0、0.3、0.5、1 和 5。图 2 表示 FFT 点数 $N=32、64、128$ 和 256 时式(3)求模的结果,设定更新时间 $T=20$ ms。

以图 2(d)为例,FFT 点数为 256,进行 FFT 所用的数据长度为 256×20 ms=5.12 s,若多普勒变化率 $\dot{f}_d=5$ Hz/s,则此段时间频率的变化量为 $5\times 5.12=25.6$ Hz,频谱分辨率为 $50/256\approx 0.2$ Hz,这样约有 $25.6/0.2=128$ 根谱线分布着能量。若多普勒变化率 $\dot{f}_d=1$ Hz/s,则此段时间频率的变化量为 $1\times 5.12=5.12$ Hz,频谱分辨率为 $50/256\approx 0.2$ Hz,这样约有 $5.12/0.2\approx 26$ 根谱线分布着能量,图 2(d)也证实了这一点。这说明在 FFT 点数确定的情况下,多普勒变化率越高,频谱能量越分散。因此,FFT 点数的选取需要考虑到多普勒变化率的范围。

为分析方便,定义 $|F(k)|$ 的峰值对应的输出信噪比为 $\text{SNR}_{\text{out}}(\text{dB})$ ($\text{SNR}=A^2/2\sigma^2$),输入的 GPS 信号信噪比为 SNR_{in} ,由多普勒变化率造成

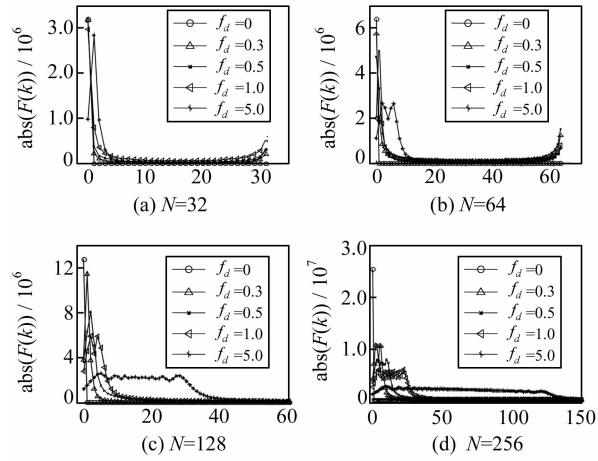


图 2 不同多普勒变化率下 FFT 的求模结果
Fig.2 Absolute Value of Different Point FFT Results Under Different Rate-of-Change of Doppler

的信噪比损失记作 SNR_{f_d} ,则:

$$\text{SNR}_{\text{out}}=\text{SNR}_{\text{in}}+46+10\lg N-\text{SNR}_{f_d} \tag{4}$$

式中, N 为 FFT 点数;46 表示 1 个导航电文比特解扩后得到的信噪比增益, $10\lg(2\ 046\times 20)\approx 46$ 。若输入信号功率为 -163 dBm,则信噪比等效为 $\text{SNR}_{\text{in}}=-163+111=-52$ dB;若采用 128 点 FFT,则 $N=128$;若多普勒变化率 $\dot{f}_d=0$,则 $\text{SNR}_{f_d}=0$ dB;由式(4)可计算得到 $\text{SNR}_{\text{out}}=-52+46+21=15$ dB。

表 1 统计了输入信号为 -163 dBm 的情况下,在不同多普勒变化率和不同 FFT 点数的条件下得到的 $|F(k)|$ 的峰值对应的输出信噪比的结果。从表 1 可知,若 $\dot{f}_d=0$,则 $|F(k)|$ 的峰值对应的输出信噪比随 FFT 点数的增加而线性增加;若 $\dot{f}_d\neq 0$, $|F(k)|$ 的峰值对应的输出信噪比不随 FFT 点数的增加而单调增长,因此并不是 FFT 的点数越多带来的处理增益越高。可以看出,当 $\dot{f}_d=0.3$ 或 0.5 Hz/s 时,128 点 FFT 都使得输出信噪比最高;当 $\dot{f}_d=1$ Hz/s 时,64 点 FFT 使得输出信噪比最高。当接收机静止时,由卫星运动造成的平均多普勒变化率为 0.54 Hz/s,因此,本文仿真实验采用 128 点 FFT。

1.2 确定频率调整门限

根据式(3),当 $|F(k)|$ 的峰值对应的输出信噪比很低时, $|F(k)|$ 的峰值服从瑞利分布;当 $|F(k)|$ 的峰值对应的输出信噪比较高时, $|F(k)|$ 的峰值服从莱斯分布。

瑞利分布的累积概率密度函数为:

$$F_R(r)=\int_0^r\frac{u}{\sigma_m^2}e^{-u^2/2\sigma_m^2}du=1-e^{-r^2/2\sigma_m^2} \tag{5}$$

式中, σ_m^2 表示 $F(k)$ 实部和虚部的方差。

由式(5)可得到虚警率的计算公式为:

$$P_{f_a} = e^{-r^2/2\sigma_m^2}$$

(6)

由式(6)得到判决门限为:

$$r = \sqrt{-2\sigma_m^2 \ln(P_{f_a})}$$

(7)

莱斯分布的累积概率密度函数可用广义马库姆函数表示为:

$$F_R(r) = 1 - Q_1\left(\frac{s}{\sigma_m}, \frac{r}{\sigma_m}\right)$$

(8)

式中, $s = \sqrt{m_1^2 + m_2^2}$, m_1 和 m_2 分别表示 $F(k)$ 实部与虚部的均值。

式(7)和式(8)联立,可得到该虚警率下相应的发现概率,可表示为:

$$P_d = Q_1\left(\frac{s}{\sigma_m}, \frac{r}{\sigma_m}\right) = Q_1\left(\sqrt{\text{SNR}_{\text{out}}}, \sqrt{-2\ln(P_{f_a})}\right)$$

(9)

图 3 为虚警率 $P_{f_a}=0.01$ 时,不同的输出信噪比对应的发现概率。从图 3 可以看出,当输出信噪比超过 10 dB 时,发现概率可超过 60%。

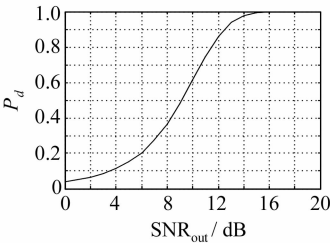


图 3 虚警率 $P_{f_a}=0.01$ 时,不同的输出信噪比对应的发现概率

Fig. 3 Detection Probability of Different SNR_{out} when P_{f_a} is 0.01

根据表 1,对于-163 dBm 的 GPS 信号,若 $f_d=0.5$ Hz/s,128 点 FFT 后,其 $|F(k)|$ 峰值输出的信噪比为 10.96 dB,对应的发现概率超过 70%。本文实验中将式(7)作为门限, $|F(k)|$ 峰值超越门限,则进行频率更新,否则频率不更新。

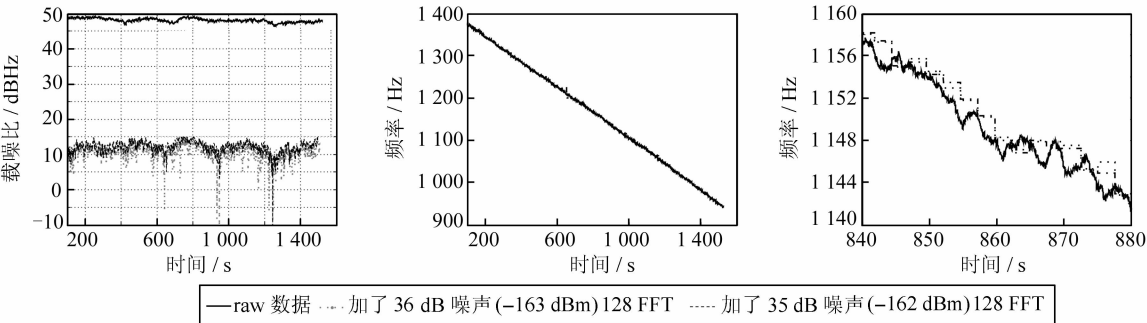


图 4 对弱 GPS 信号跟踪得到的载噪比和频率输出结果

Fig. 4 CN0 Curve and Frequency Curve with the FFT Tracking Algorithm for Weak GPS Signal

表 1 输入信号功率为-163 dBm 时,不同多普勒变化率
和不同 FFT 点数下 SNR_{out} 的结果/dB

Tab. 1 SNR_{out} Results Under the Condition of Different
the Rate-of-Change of Doppler and FFT Point when the
Received Signal Power Level is -163 dBm/dB

$f_d/\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1}$	FFT 点数					
	16 点	32 点	64 点	128 点	256 点	512 点
0	6	9	12	15	18	21
0.3	6	8.94	11.07	14.06	10.36	7.38
0.5	5.99	8.84	9.34	10.96	7.76	5.22
1	5.96	8.35	10.90	8.27	5.34	2.04
5	4.99	7.96	4.36	1.01	-1.92	-4.90

2 仿真结果与分析

实验数据为采集的 GPS 数据,2 bit 量化,采样率为 5.555 MHz,中频为 4.309 MHz。GPS 天线置于屋顶,采集的数据载噪比较强,其中第 4 号卫星的载噪比约为 47 dBHz。通过在该数据上分别加 36 dB 和 35 dB 的噪声,得到实验用的极弱 GPS 信号,信号功率分别等效为-163 dBm 和-162 dBm。图 4(a)的纵轴表示载噪比,横轴表示跟踪时间,实线、点划线,虚线分别表示对未加噪声的 GPS 信号、加了 35 dB 噪声(等效-162 dBm)的 GPS 信号和加了 36 dB 噪声(等效-163 dBm)的 GPS 信号中的第 4 号卫星跟踪所得到的载噪比。

图 4(b)为相应的对未加噪声的信号和分别加了 36 dB 以及 35 dB 噪声的信号频率跟踪结果。可以看出,-163 dBm 和-162 dBm 的信号都能长时间稳定地跟踪,跟踪时间都超过了 1 400 s,而且其频率跟踪与未加噪声的信号频率跟踪一致。图 4(c)为图 4(b)的局部放大,可以发现,对于 128 点的 FFT,载波频率的更新周期为 $128 \text{ ms} \times 20 = 2.56 \text{ s}$,载波呈阶梯状更新。即每 2.56 s 计算一次 128 点 FFT,既减小了处理器的负担,又有利于减小 GPS 接收机的功耗。

3 结 语

本文分析了传统 Costas 环路不适于弱信号跟踪的原因,提出了一种基于 FFT 结构的超高灵敏度 GPS 信号跟踪算法,并分析了该算法的性能,能够保证当接收机处于静止时,跟踪灵敏度达到−163 dBm。从表 1 可以看出,随着 f_d 取值的减小,输出信噪比在增加,因此,如果引入合适的多普勒补偿,本文算法将达到更高的跟踪灵敏度。这方面的实验与测试正在进行和完善中。

参 考 文 献

[1] Federal Communications Commission. Enhanced 911-Wireless Services[OL]. <http://www.fcc.gov/911/enhanced/>, 2005

[2] Psiaki M L. Block Acquisition of Weak GPS Signals in a Software Receiver[C]. ION GPS 2001, Salt Lake City, UT, 2001

[3] Elders-Boll H, Dettmar U. Efficient Differentially Coherent Code/Doppler Acquisition of Weak GPS Signals[C]. ISSSTA2004, Sydney, Australia, 2004

[4] Ba Xiaohui, Yang Ying, Li Jinhai, et al. Differentially Coherent Acquisition Algorithm for Indoor GPS

[C]. International Conference of Wireless Multimedia and Network (ICWMMN2006), Hangzhou, China, 2006

[5] Chuang Mingyu, Feng Kaiten. Adaptive GPS Acquisition Technique in Weak Signal Environment [J]. IEEE, 2006, 6:2 612-2616

[6] Razavi A, Gebre-Egziabher D, Akos D M. Carrier Loop Architectures for Tracking Weak GPS Signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(2):697-710

[7] Söderholm S, Jokitalo T, Kaisti K, et al. Smart Positioning with Fastrax's Software GPS Receiver Solution[C]. ION GNSS 2008, Savannah, USA, 2008

[8] Tsui J B Y. Fundamentals of Global Positioning System Receivers A Software Approach[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000

[9] Kaplan E D, Hegarty C. Understanding GPS: Principles and Applications [M]. 2nd ed. Norwood, MA: Artech House Publishers, 2005

第一作者简介:巴晓辉,助理研究员,现主要从事 GNSS 接收机基带芯片设计。
E-mail:baxiaohui@163.com

A Novel Algorithm for Ultra High-Sensitivity GPS Tracking

BA Xiaohui¹ LIU Haiyang¹ CHEN Pei¹ CHEN Jie¹

(1 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, 3 West Beitucheng Road, Chaoyang District, Beijing 100029, China)

Abstract: Why the traditional carrier loop is unsuitable for weak GPS signal tracking is discussed and a novel tracking scheme based on fast fourier transform (FFT) technique is proposed. The relations between the point numbers of FFT and the rate-of-change of Doppler frequency are analyzed. The average rate-of-change of Doppler frequency is 0.54 Hz/s for static receiver and 128-point FFT can offer the maximum signal-to-noise rate (SNR) gain under this condition. A threshold based on Neyman-Pearson (NP) rules is presented in order to avoid the errors of the carrier loop in this paper. The local carrier frequency should be adjusted only if the peak value of FFT is more than the threshold. Experimental results of the static GPS receiver show that our proposed method can track GPS signals using 128-point FFT when the power level is 163 dBm. Moreover, the sensitivity of the proposed scheme can be further improved if the rate-of-change of Doppler is compensated.

Key words: GPS receiver; FFT; high-sensitivity

About the first author: BA Xiaohui, assistant researcher, majors in the baseband chip design for GNSS receiver.
E-mail: baxiaohui@163.com