

文章编号: 2095-4980(2013)01-0101-04

码多普勒对扩频码捕获性能的影响

贾彬彬, 常青, 李育龙

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 为了评价高动态场景中码多普勒对捕获的影响, 定量分析码多普勒对相关峰值的影响具有指导意义。引入一种有效的求解码相关结果的方法——图解法, 采用此方法推导了当存在码多普勒时码相关结果, 详细推导了当码搜索步进不连续时码多普勒对相关峰的影响。通过 Matlab 仿真了码搜索步进为连续和不连续时码多普勒对相关峰值的影响, 证明前述推导是正确的。计算结果表明, 当码搜索步进为二分之一码片, 相关时间内码多普勒引起的码误差超过四分之一码片时将对相关峰值造成影响。

关键词: 码多普勒; 捕获; 扩频; 高动态

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

Influence of code Doppler on spread spectrum code acquisition performance

JIA Bin-bin, CHANG Qing, LI Yu-long

(School of Electronic and Information Engineering, BEIHANG University, Beijing 100191, China)

Abstract: It shows a guiding significance to make quantitative analysis about the influence of code Doppler on correlation peak in order to evaluate the influence of code Doppler on acquisition in high dynamic scene. A graphic method is introduced, which is a kind of effective way to calculate code correlation. Correlation results are derived by this method when code Doppler exists. The influence of code Doppler on correlation peak is derived in detail when code step is discontinuous. The influence of code Doppler on correlation peak is simulated by Matlab both when the code step is continuous and discontinuous, therefore, previous derivations are verified. The calculation results show that correlation peak will be weakened under the condition that code error caused by code Doppler is above 1/4 chip during the correlation time at the code step of 1/2 chip.

Key words: code Doppler; acquisition; spread spectrum; high dynamic

当使用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)进行定位时, 对于静止接收机, 卫星与接收机的相对速度最大约为 925.9 m/s^[1], 此时动态相对较小, 一般只考虑载波多普勒的影响; 但当卫星导航接收机应用于高速飞行器(如导弹)上, 接收机处于高动态环境中^[2-3], 码多普勒的影响就必须考虑。相关文献研究指出, 码多普勒会引起相关峰值随着时间而漂移^[4], 针对 GPS L1 C/A 码, 当用户最大速度为 900 m/s 时, 经过 161 ms 后由于码多普勒的影响, 累积的码误差就会超过 1 个伪码宽度, 即使再增加积分时间, 也不会再有积分增益^[5], 在单次检测过程中, 要求接收信号与本地伪码的码相位最大漂移量小于 0.25 chip^[6]。当前文献仅指出了码多普勒的影响, 均未定量分析码多普勒对捕获过程中相关峰值的影响。本文在码相关运算理论的基础上, 首先定量计算了码多普勒对相关峰值的影响, 然后分析了码搜索步进对相关峰造成的损失, 最后通过 Matlab 仿真验证了理论计算结果。

1 码多普勒对相关峰的影响

仅考虑 C/A 码, 设接收到的 C/A 码为 $C(t-\tau)$, 本地复现的 C/A 码为 $C(t-\hat{\tau})$, 则二者的相关函数 $R(\Delta\tau)$ 为^[7]:

$$R(\Delta\tau) = \int_0^{N T_c} C(t-\tau)C(t-\hat{\tau})dt \quad (1)$$

收稿日期: 2012-04-01; 修回日期: 2012-06-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2007AA12Z336,2009AA12Z313)

式中： T_c 为 1 个码片宽度； N 为相关时间内码片个数； $\Delta\tau = |\tau - \hat{\tau}|$ 为码相位估计误差， τ 为接收到 C/A 码码相位， $\hat{\tau}$ 为本地码估计码相位；式中暂未考虑码多普勒的影响。

归一化自相关函数可以近似表示为：

$$R(\Delta\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta\tau}{T_c}, & \Delta\tau \leq 1 \text{ chip} \\ 0, & \Delta\tau > 1 \text{ chip} \end{cases} \quad (2)$$

相关计算可以用图 1 形象地表示^[8]。为了表示方便，在图 1 中，仅使用 10 个码片来示意，并且图中正电平 1 代表 0，负电平 -1 代表 1，这也是计算相关的前提。图中， $C(t)$ 为本地复现 C/A 码， $C'(t)$ 为接收信号中包含的 C/A 码， $C(t)C'(t)$ 为二者的乘积。归一化自相关结果 $R(\Delta\tau)$ 可以理解为在图中所示每个码片对应的阴影区间内的积分加上区间外的积分的平均值。阴影区间表示本地 C/A 码与接收 C/A 码对准的部分，有 $C(t-\tau)C(t-\hat{\tau})=1$ ；对于阴影区间之外的其他部分，在假定 $C(t)$ 为真正的随机二进制码的情况下，则 $C(t-\tau)C(t-\hat{\tau})$ 取值 ± 1 是随机的，对积分结果的贡献近似为零。因此可以得到 $R(\Delta\tau)$ 的值：

$$R(\Delta\tau) = \frac{N(T_c - \Delta\tau)}{NT_c} = 1 - \frac{\Delta\tau}{T_c} \quad (3)$$

式中隐含 $\Delta\tau \leq 1 \text{ chip}$ 。

由此可知，按图 1 所计算的相关结果与式(2)相同。此计算结果并不仅仅适用于以上情况，它也适用于存在码多普勒时的相关计算。当存在码多普勒时，假设码多普勒恒定不变，相关积分近似计算可表示为图 2。

由图 2 可见，各个阴影区间不再恒定，而是随着时间的漂移逐渐变窄；但是，实际上此时阴影区间面积总和并非是最大的。易知，当相关时间中间时刻码边沿对准时，阴影区间面积总和为最大，见图 3。

可很明显的看出阴影部分较图 2 变大。设由于码多普勒引起码片宽度变窄 ΔT_c ，可计算此时的 $R(\Delta\tau)$ ：

$$R(\Delta\tau) = \frac{2}{NT_c} \cdot \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} (T_c - n \cdot \Delta T_c) = \frac{2}{NT_c} \left(\frac{NT_c}{2} - \Delta T_c \cdot \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} n \right) = \frac{2}{NT_c} \left[\frac{NT_c}{2} - \Delta T_c \cdot \frac{\frac{N}{2}(\frac{N}{2} + 1)}{2} \right] = 1 - \frac{\Delta T_c}{T_c} \cdot \frac{N+2}{4} \quad (4)$$

假设在相关时间内码误差为 n 码片，即 $\Delta T_c = \frac{n \cdot T_c}{N}$ ，而且一般来讲 N 很大，即 $\frac{1}{N} \approx 0$ ，可得：

$$R(\Delta\tau) = 1 - \frac{n \cdot T_c}{NT_c} \cdot \frac{N+2}{4} \approx 1 - \frac{n}{4} \quad (5)$$

相关时间内码误差的计算方法可以参考文献[5]。

2 码相位搜索步进对相关峰的影响

在以上分析过程中，都是按照连续信号处理理论进行推导的，码搜索步进可以无限小；但在实际中，计算过程都是数字信号处理，码搜索步进并不是连续的，而通常是以半码片为步进进行搜索的。

图 4 中，若码片搜索步进为 ΔT_{bin} ，则码估计误差 T_{err}

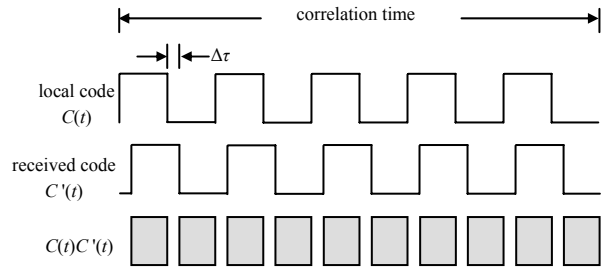


Fig.1 Correlation approximate calculation schematic
图 1 相关近似计算示意图

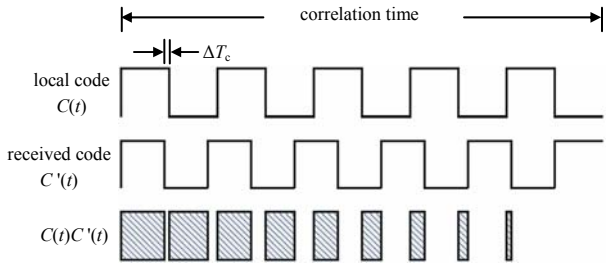


Fig.2 Correlation approximate calculation schematic with code Doppler
图 2 存在码多普勒时相关积分近似计算示意图

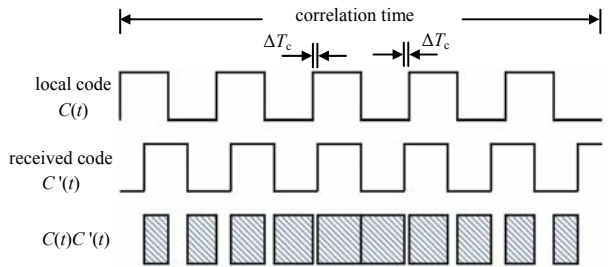


Fig.3 Correlation calculation schematic when code edges align at middle of correlation time
图 3 码边沿在相关时间中间时刻对齐相关计算示意图

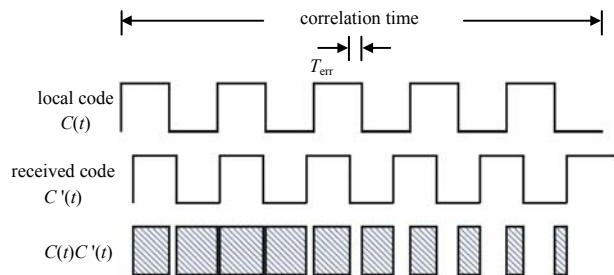


Fig.4 Correlation approximate calculation schematic when code step is discontinuous
图 4 码步进不连续时相关积分近似计算示意图

最大为 $\Delta T_{\text{bin}}/2$, 即 $T_{\text{err}} \in \left[0, \frac{\Delta T_{\text{bin}}}{2}\right]$ 。从图中可以看出, 右半部分的阴影逐渐变小, 而左半部分的阴影先变大然后又变小, 下面对其进行详细推导。

首先计算左半部分。左半部分可分为 3 个阶段: 第 1 阶段是增加阶段, 第 2 阶段为临界, 而第 3 阶段为减小阶段, 各阶段阴影和表达式如下:

第 1 阶段阴影和 P_1 :

$$P_1 = \sum_{i=0}^{j-1} (T_c - T_{\text{err}} + i \cdot \Delta T_c) \quad (6)$$

式中: j 为第 1 阶段包含的阴影个数, 满足 $T_c - T_{\text{err}} + j \cdot \Delta T_c < T_c - \Delta T_c$ 和 $T_c - T_{\text{err}} + (j+1) \cdot \Delta T_c \geq T_c - \Delta T_c$ 这 2 个约束条件; i 为索引号。

第 2 阶段阴影和 P_2 :

$$P_2 = T_c - \Delta T_c \quad (7)$$

第 3 阶段阴影和 P_3 :

$$P_3 = \sum_{i=0}^{k-1} (T_{\text{temp}} - i \cdot \Delta T_c) \quad (8)$$

式中: $T_{\text{temp}} = T_c - \Delta T_c - [(j+2) \cdot \Delta T_c - T_{\text{err}}]$; k 为第 3 阶段包含的阴影个数, $k = \frac{N}{2} - j - 1$ 。

联合以上 3 式可得左侧归一化的相关值 $R_{\text{left}}(\Delta\tau)$ 为:

$$R_{\text{left}}(\Delta\tau) = \frac{2}{NT_c} \cdot (P_1 + P_2 + P_3) \quad (9)$$

右半部分相对简单, 易得其归一化的相关值 $R_{\text{right}}(\Delta\tau)$ 为:

$$R_{\text{right}}(\Delta\tau) = \frac{2}{NT_c} \cdot \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} (T_c - i \cdot \Delta T_c) - \frac{T_{\text{err}}}{T_c} \quad (10)$$

因此, 归一化的相关值 $R(\Delta\tau)$ 为:

$$R(\Delta\tau) = \frac{1}{2} [R_{\text{left}}(\Delta\tau) + R_{\text{right}}(\Delta\tau)] \quad (11)$$

注意, 图 4 为码搜索步进不连续时的一般情况, 不能将式(7)的 P_2 移至在相关时间的中心, 因为那将等价于图 3 中的情况。

3 仿真验证

本文以码速率 $R_c=10.23$ MHz 的 GPS 1 号星 L5 频点 I 支路 C/A 码为例, 在 Matlab 中进行仿真, 对文中前述理论进行验证。仿真中, 相关结果意义如下: 设参加相关计算的数据点个数为 N_{point} , 当本地码与接收码完全相同时的相关结果为 N_{point} , 归一化为 1; 若错开半个码片, 则相关结果为 $N_{\text{point}}/2$, 归一化为 0.5。由于本方法的计算结果是有无码多普勒的相对归一化值, 当存在噪声时, 此比例不变, 因此仿真中与信噪比无关。本仿真相关时间长度均取为 1 ms, 码起始沿随机取 $(-0.5, 0.5)$ 区间中的值, 用来模拟接收码与本地码的随机相位关系。表 1 和表 2 中, ChipErr 表示由于码多普勒存在, 在相关时间内的码误差, 单位为码片; Real Peak 为 Matlab 仿真所得峰值, 针对每 1 个 ChipErr, 采用 200 次仿真结果的平均值; Theoretical Peak 为理论计算峰值。

首先仿真码片搜索步进为连续情况。取采样率 $f_s=163.84$ MHz,

则码步进为 $\Delta T_{\text{bin}} = \frac{R_c}{f_s} \approx \frac{1}{16}$ chip, 为模拟连续情况, 仅仿真在 1 ms

相关时间内错开码片数 ChipErr 近似为码步进整数倍的情况。表 1 中, Theoretical Peak 按照式(5)计算而得。由表可见, 仿真结果

表 1 码片搜索步进连续仿真结果

Table1 Simulation results when code step is continuous

ChipErr(chip)	Real Peak	Theoretical Peak
1.00	0.748 510 7	0.750 0
0.50	0.874 182 1	0.875 0
0.25	0.937 341 3	0.937 5
0	1.000 000 0	1.000 0

表 2 码片搜索步进不连续仿真结果

Table2 Simulation results when code step is discontinuous

ChipErr(chip)	Real Peak	Theoretical Peak
1.00	0.733 586 9	0.734 3
0.50	0.837 385 7	0.843 7
0.25	0.865 445 5	0.875 0
0	0.876 349 1	0.875 0

与理论计算相符。

然后, 仿真由于码片搜索步进不连续对相关峰的影响。取采样率 $f_s=20.48$ MHz, 则可得码片搜索步进 $\Delta T_{\text{bin}}=0.499$ chip, 近似为 0.5 码片。

由于码起始沿为随机值, 因此前 3 个 Theoretical Peak 为按文中第 2 部分取 $T_{\text{err}}=0.125$ chip 计算的理论值; 而当 ChipErr=0 时, 即无码多普勒时, 则理论值为当 $\Delta\tau=0.25 T_c$ 按式(2)计算出的值。由表 2 可看出, 仿真结果与理论计算相符, 并且可知, 当相关时间内错开四分之一码片时, 其相关峰值基本是不受影响的。其实可进一步得出更一般的结论: 当相关时间内由于码多普勒产生的码误差小于二分之一码搜索步进时, 相关结果不受影响。

表 3 列出了当码速率为 10.23 MHz 时, 对于不同相对速度产生的码多普勒值及产生 1 码片码误差的时间。由表 3 可见, 对于 10.23 MHz 的码, 当相对速度为 4 000 m/s 时, 相关时间超过 7.3 ms 将产生 1 个码片误差, 并且由前述计算此时的峰值平均为最大峰值的 73.43%; 如果要保证获得 87.5% 的相关峰值, 即相关时间内码误差须小于四分之一码片, 则必须进行码多普勒补偿。

表 3 相对速度、码多普勒和 1 码片误差产生时间关系

Table 3 Relationship among relative velocity, code Doppler and 1 code error time

velocity/(m·s ⁻¹)	code Doppler/Hz	t/ms
2 000	68.2	14.7
4 000	136.4	7.3
6 000	204.6	4.9
8 000	273.8	3.7

4 结论

本文首先引入了一种能够计算码相关结果的图解法, 然后定量计算了当码存在多普勒时对相关峰值造成的影响, 并且推导因码搜索步进不连续对相关峰值造成的损失, 通过 Matlab 仿真证明推导结果是正确的。本文引入的图解法原理简单, 计算方便, 并且首次定量分析了码多普勒的影响, 对于高动态扩频码捕获有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (XIE Gang. Principles of GPS and Receiver Design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [2] 张博,杨春,解楠,等. GPS C/A 码平均相关捕获算法的 FPGA 设计[J]. 信息与电子工程, 2009,7(1):1-3. (ZHANG Bo, YANG Chun,XIE Nan,et al. FPGA Design of Averaging Correlation for GPS C/A Code Acquisition[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(1):1-3.)
- [3] 申光,李仰志,谷文飞. 高动态条件下伪随机码捕获的旁瓣虚警分析[J]. 信息与电子工程, 2011,9(6):708-712. (SHEN Guang,LI Yangzhi,GU Wenfei. Side-lobes false alarm of acquisition of PN code under high dynamics[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(6):708-712.)
- [4] 秦勇,张邦宁,郭道省. 时移短时相关法在 DSSS 码捕获系统中的应用[J]. 电子与信息学报, 2007,29(8):1942-1945. (QIN Yong,ZHANG Bangning,GUO Daosheng. Application of DSTC to Code Acquisition System of DSSS[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007,29(8):1942-1945.)
- [5] 马永奎,张一,张中兆,等. 改进的高动态高灵敏 GPS 信号捕获算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009,31(2):265-269. (MA Yongkui,ZHANG Yi,ZHANG Zhongzhao,et al. Modified method of high dynamic & high sensitivity GPS signal acquisition[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009,31(2):265-269.)
- [6] 曾俊. 双系统兼容卫星导航接收机捕获模块的设计实现[D]. 北京:北京航空航天大学, 2008. (ZENG Jun. The realization of dual system satellite navigation receiver acquisition module[D]. Beijing:BEIHANG University, 2008.)
- [7] 董绪荣,唐斌,蒋德. 卫星导航软件接收机原理与设计[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (DONG Xurong,TANG Bin,JIANG De. Principles & Design of Satellite Navigation Software Receiver[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)
- [8] 寇艳红. GNSS 软件接收机与信号模拟器系统研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2006. (KOU Yanhong. The Study on GNSS Software Receiver and Signal Simulator System[D]. Beijing:BEIHANG University, 2006.)

作者简介:



贾彬彬(1988-), 男, 河北省保定市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航、嵌入式系统. email:jiabinbin1988@163.com.

常青(1962-), 男, 天津市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信、卫星导航。

李育龙(1988-), 男, 吉林省四平市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航。