

## 时移短时相关法在 DSSS 码捕获系统中的应用

秦勇 张邦宁 郭道省

(解放军理工大学通信工程学院卫星通信系 南京 210007)

**摘要:** 该文提出了将时移短时相关法应用于直接序列扩频(Direct Sequence Spectrum Spreading, DSSS)码捕获系统中。首先分析了码频频偏对捕获性能的影响,在折中考虑算法复杂度及捕获性能的基础上,提出了应用时移短时相关法进行码频频偏补偿,给出了捕获系统的实现方案;分析并比较了应用时移短时相关法前后捕获系统的检测概率,结果表明,应用时移短时相关法可大大提高捕获系统的检测概率。该文对高动态低信噪比条件下进行码捕获有重要的意义。

**关键词:** 直接序列扩频; 码捕获; 码频频偏; 时移短时相关法

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1942-04

## Application of DSTC to Code Acquisition System of DSSS

Qin Yong Zhang Bang-ning Guo Dao-sheng

(Department of Satellite Communication, Institute of Communications Engineering,  
PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The article provides applying DSTC(Deskewed Short-Time Correlator)to code acquisition system on serious code frequency offset. Firstly, performance of acquisition system affected by code frequency offset is analyzed. Considering complication and performance of algorithm, code frequency offset is compensated by using DSTC. Secondly, specific and realizable solution of code acquisition system is given. Finally, probability of detection of acquisition system before applying DSTC is compared with that after applying DSTC, And it is confirmed that applying DSTC can greatly improve probability of detection, which is important for code acquisition in low signal-to-noise rate.

**Key words:** Direct Sequence Spectrum Spreading (DSSS); Code acquisition; Code frequency offset; Deskewed Short-Time Correlator (DSTC)

### 1 引言

DSSS 技术在中低卫星通信系统、导航及定位系统中的应用日益广泛,但其中面临的关键问题是由于收发双方快速变化的相对运动状态引起的多普勒效应,这会对接收信号造成两种不良影响,分别是较大且时变的载波频偏及码频频偏。图 1 是不考虑噪声时,正常情况(a)及受载波频偏与码频频偏影响(b)时所接收到的基带信号。

由图 1 可见由于受载波频偏及码频频偏的影响,使得接收到的基带信号发生严重畸变,其中接收信号的正余弦调幅

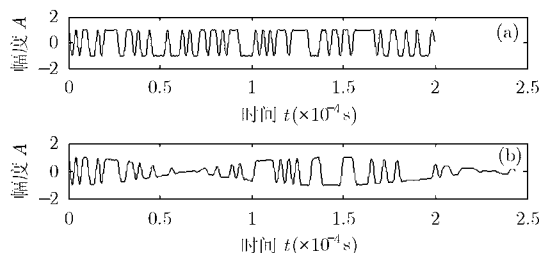


图 1 不同条件下接收到的基带信号

畸变是由于载波频偏造成的,而基带升余弦脉冲宽度的变化则是由于码频频偏造成的。

载波频偏与码频频偏使得 DSSS 信号的码捕获变得较为困难,特别是前者对捕获系统的影响更大,相关方面的文献[1-3]已给出了相应的解决方案,然而关于如何解决码频频偏对捕获系统造成的影响,文献[1-3]并未提到,文献[4]中采用最大似然相关法进行码频频偏补偿,虽然性能是最优的,但是实现复杂度太大,因此本文在研究码频频偏对捕获系统影响的基础上,应用时移短时相关法进行码频频偏补偿,从而降低了实现复杂度,提高了捕获性能。

### 2 码频频偏对码捕获系统的影响

设由于载波频偏与码频频偏的影响,接收信号的表达式为

$$r(t) = \sqrt{2S}d((1+q)t - \tau)c((1+q)t - \tau) \cdot \cos[2\pi(f_c + f_d)t + \phi] + n(t) \quad (1)$$

式(1)中  $S$  表示信号功率,  $\tau$  表示时延,  $q$  表示归一化码频频偏,  $f_c$ ,  $f_d$  分别代表载波频率及载波频偏,  $n(t)$  表示双边功率谱密度为  $N_0/2$  的加性高斯白噪声,其中归一化码频频偏

$$q = f_d/f_i = D/R_c \quad (2)$$

式(2)中  $D$  ,  $R_c$  分别表示码频频偏及码片速率。码频频偏使得接收信号的码片宽度产生压扩效应(companding effect), 若接收端以标称码片速率采样, 假设载波频偏已被消除, 并且开始采样时刻在最佳位置即图张开最大时刻, 文中理论分析及仿真均以此假设为前提。当码频频偏为正值时, 采样时刻将向右边离开, 否则将向左边离开, 下面以码频频偏是正值为例, 分析其对码捕获系统的影响。

图 2 是捕获系统进行并行相关搜索的示意图。由图可见由于码频频偏使得接收信号的码片宽度变窄, 若开始相关时间内在码相位 1 获得最大相关值, 但随着采样时刻向右漂移, 最大相关值会相继发生在码相位 2, 码相位 3。

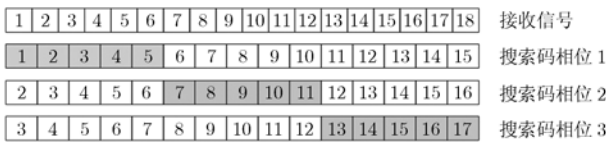


图 2 捕获系统进行并行相关搜索示意图

图 3 是码频频偏影响造成的相关峰漂移的定量仿真分析, 仿真条件为: 码长  $L = 4096$ , 归一化码频频偏  $q = 5 \times 10^{-5}$  (低轨卫星通信条件下的典型值), 不考虑噪声影响。

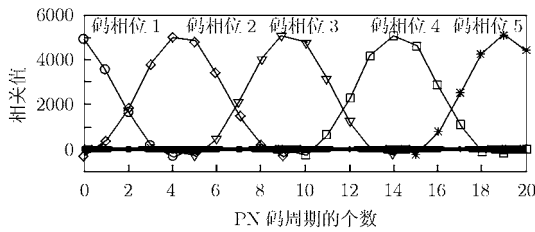


图 3 相关峰随时间的漂移

与上述分析相同, 相关峰会随时间向相继搜索的码相位漂移。若开始采样时刻在最佳位置, 当采样时刻漂移到  $1/2$  的码片宽度时, 相邻搜索相位的相关值相等, 此时得到的同一搜索相位的相关值个数为

$$Q = \text{round}[1/(2qL)] \quad (3)$$

式(3)中“round”表示四舍五入函数, 以上述仿真参数为例, 则得到  $Q = 2$ 。若以  $T$  表示完成码捕获时每个搜索相位所需的相关运算次数, 当接收信号的信噪比 SNR 较大时, 则  $T \leq Q$ , 因此可以不考虑码频频偏的影响, 当直扩信号工作在电磁干扰较严重的环境时, 由于 SNR 很小所以使得  $T \leq Q$ , 其目的是通过多次非相干累加提高捕获系统的检测概率, 因此  $T$  也可以认为是非相干累加次数, 然而高动态环境下, 相关峰漂移使非相干累加只在  $Q$  次累加有效, 使得小 SNR 条件下, 捕获系统的检测概率不能达到要求, 此时考虑码频频偏的影响并予以解决是有必要的, 这一点在  $T$  很大时显得尤为重要。

### 3 时移短时相关法及其应用

应用时移短时相关法解决相关峰漂移问题, 并可大大提

高高动态低 SNR 条件下捕获系统的检测概率。下面首先介绍算法, 然后就算法应用及其对检测概率的改善分别给予研究。

#### 3.1 算法介绍

设本地直扩信号及接收直扩信号的基带形式分别表示为

$$\left. \begin{aligned} r_1(t) &= c(t) \\ r_2(t) &= c((1+q)t - \tau) + n_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

求  $r_1(t)$  ,  $r_2(t)$  相关值的传统方法是最大似然相关法(MLC), 其表达式为:

$$C_M(\beta_i, \alpha_j) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} r_1(t)r_2(t/(1+\alpha_j) + \beta_i)dt \quad (5)$$

式(5)中  $\beta_i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots, I$ ),  $\alpha_j$  ( $j = 1, 2, 3 \dots, n$ ) 分别表示对时延及码频频偏正确补偿要搜索的不确定值。虽然其性能是最优的, 但由于 MLC 对于任一  $\beta_i, \alpha_j$  都必须重新进行相关计算, 所以实现复杂度太大。文献[5]在综合考虑性能与复杂度的前提下, 提出了性能次优, 但实现简单的时移短时相关法 DSTC(Deskewed Short-Time Correlator), 其定义为下:

$$\left. \begin{aligned} C_D(\beta_i, \alpha_j) &= \sum_{k=1}^{N_T} c_k(\beta_i + \alpha_j \gamma_k) \\ c_k(\beta_i) &= \frac{1}{T} \int_{a_k}^{b_k} r_1(t)r_2(t - \beta_i)dt \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中  $b_k = -T/2 + kT/N_T$ ,  $a_k = b_k - T/N_T$ ,  $\gamma_k = (a_k + b_k)/2$ ,  $\beta_i, \alpha_j$  的意义与式(5)相同。时移短时相关法与 MLC 相比而言, 首先计算全部时延不确定值对应的各短时相关值, 然后依据  $\alpha_j$  将所有短时相关值重新组合, 最终得到完整相关值, 所以运算量大大减小。若对  $r_1(t)$  ,  $r_2(t)$  在  $T$  时间内分别采样  $N$  个值, 并将式(5), 式(6)中的积分号改为求和号, 表 1 是 MLC 与时移短时相关法运算量的对比。

表 1 MLC 与时移短时相关法运算量的比较

	加法	乘法
最大似然相关法	$I \times n \times (N - 1)$	$I \times n \times N$
时移短时相关法	$I \times (N/N_T - 1) + I \times n \times (N_T - 1)$	$I \times N/N_T$

一般  $N \gg N_T$ , 因此时移短时相关法所需的运算量比最大似然相关法大大减小。

#### 3.2 算法在码捕获系统的应用

合理地及时移短时相关法应用于码捕获系统, 以提高捕获性能是十分重要的, 下面就码捕获系统重要参数的优化、码捕获系统结构及 DSTC 应用前后相关值的改善三方面分别给予研究。

**3.2.1 码捕获系统几个重要参数的优化** 非相干累加次数  $T$  的优化。  $T$  的选择必须遵循两个原则, 即一方面保证码捕获期间所搜索的载波频偏与码频频偏的值不变, 另一方面保证一定信噪比条件下的捕获系统的检测概率达到要求。若设  $L$  表示 PN 码码长,  $q_{\max}$  表示最大的归一化码频频偏,  $T_c$  表示

码片宽度， $P_{DSTC}$  表示时移短时相关法处理所需时间、 $D$  表示要搜索的码频频偏不确定值的个数， $S$  表示载波频偏的扫描次数，则要求归一化码频频偏从当前搜索值变化到相继搜索值的时间  $t_{chang}$  要大于码捕获系统相关搜索所花时间与 DSTC 处理时间之和，表达为

$$t_{chang} \geq T \times S \times L \times T_c + P_{DSTC} \quad (7)$$

现以低轨卫星通信为例分析  $T$  值的选择，设归一化码频频偏在  $(-5 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-5})$  内变化，最大码频频偏变化率为  $2 \times 10^{-7} / s$  [6]， $L$  为 4096， $T_c$  为  $0.5 \mu s$ ， $T$  为 25， $S$  取 40， $D$  取 50，则  $t_{chang}$  的最小值为 10s，相关搜索所花时间为 2.048s。若码捕获系统采用 Altera 的 Stratix 系列的 FPGA 实现，则乘法器最快可运行在 400MHz 的时钟下 [7]，加法器则更快，此时得到  $P_{DSTC}$  为 0.01s。因此  $P_{DSTC}$  可忽略不计，则非相干累加次数的最大值

$$T_{max} = \left\lfloor \frac{t_{chang}}{SLT_c} \right\rfloor \quad (8)$$

上述条件下  $T_{max}$  为 122。另外当信噪比一定时，为了达到捕获系统所要求的检测概率需要进行多次非相干累加，因此接收信号的信噪比也决定  $T$ ，详情可参考文献 [8]。依据  $E_b / N_0$  为 3dB，虚警概率 0.001 时，检测概率达到 99.9% 所要求的  $T$  为 25，这个值比  $T_{max}$  小的多，因此一般情况下  $T$  由特定信噪比所要求的检测概率决定。

所要搜索的码频频偏不确定值的个数  $D$  的确定。 $D$  一般不宜过小，由于过小的  $D$  使得 DSTC 处理时短时相关值间不能很好地组合，因此导致性能下降； $D$  也不宜过大，当  $D$  太大会增加 DSTC 处理的运算量，且要求更多的存储器，因此一般是在特定信噪比条件下，通过计算机仿真决定合理的  $D$  值。

精确计算 DSTC 处理及最大值检测所花费的时间  $t_T$ 。由于 DSTC 处理及最大值检测会对捕获信号产生延时，会导致获得错误的码相位影响，所以必须通过精确计算将时间  $t_T$  补偿掉。

**3.2.2 码捕获系统的具体结构** 图 4 是捕获系统的结构图，捕获系统工作过程：首先来自码片匹配滤波器的基带采样信号  $I, Q$  两路通过时分复用在  $M$  个分段 PN 码匹配滤波中分别与本地 PN 码进行相关运算，得到串行的同一搜索码相位的  $I, Q$  两路各  $M$  个部分相关值，经过  $M$  路串并变换器，之后对  $M$  个相关值作  $N_F$  点的 FFT 变换，目的是消除载波频偏对捕获性能的影响，为了在低 SNR 条件下成功进行码捕获，需要进行  $T$  次非相干累加即要对  $P$  (一般  $P$  为两倍的 PN 码的码长) 个码搜索相位分别进行  $T$  次搜索，因此将 FFT 处理后的相关值如图 4 存储于存储器 (1) 中，当  $T$  次搜索完成后，便进行 DSTC 处理，从而完成非相干累加，并将 DSTC 处理的结果按图 4 所示存储于存储器 (2) 中，最后进行最大值检测及处理时延的精确计算，并与设置的捕获门限比较，从而完成码捕获。

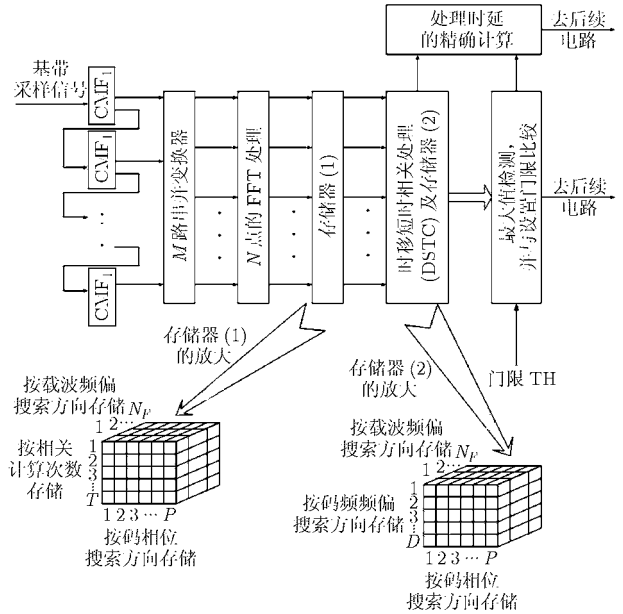


图 4 码捕获系统结构图

**3.2.3 应用 DSTC 前后相关值的比较** 若不考虑载波频偏及噪声对捕获系统的影响，图 5，图 6 分别是匹配滤波与一般非相干累积技术相结合的捕获系统及匹配滤波与 DSTC 技术相结合的捕获系统在码频频偏及码相位二维空间进行搜索时归一化相关值的变化情况。仿真条件：码长  $L = 4096$ ，归一化码频频偏  $q = 5 \times 10^{-5}$ ，非相干累加次数  $T = 100$ 。

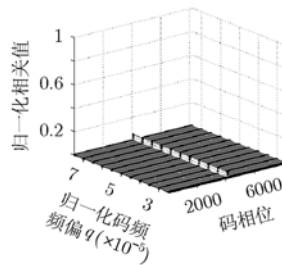


图 5 匹配滤波与一般非相干累积技术相结合

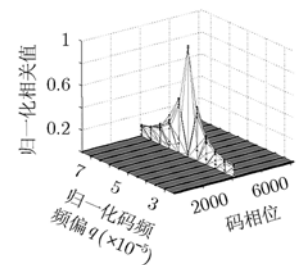


图 6 匹配滤波与 DSTC 技术相结合

由图可见应用 DSTC 后相关值在归一化码频频偏为  $q = 5 \times 10^{-5}$  大大提高，并达到峰值，有利于捕获系统的检测。

**3.3 DSTC 对检测概率的改善**

检测概率是衡量捕获系统性能的一个重要指标，在码频频偏较严重条件下，应用 DSTC 可大大提高捕获系统的检测概率。依据“常虚警概率”门限设置原理，并经过推导得出在只有加性高斯白噪声情况下，相关器输出值  $y$  服从自由度为  $2T$  的  $\chi^2$  分布。若设要求的虚警概率  $P_{false} = C$  (常数)，则捕获系统的检测门限 TH 由概率  $P(y > TH) = C$  确定。在信号及加性高斯白噪声同时存在的条件下，经推理可知相关器输出值  $z$  此时服从自由度为  $2Q$ ，非中心参数为  $\xi$  的非中心  $\chi^2$  分布。则检测概率由  $P_D = P(z > TH)$  确定，其中  $\xi$  为

$$\xi = \frac{1}{L\sigma^2} \sum_{m=1}^T C_m^2 \quad (9)$$

式(9)中  $\sigma^2$  表示噪声功率,  $C_m$  表示 PN 码同步时相应相位每次相关搜索得到的相关值。图 7, 图 8 分别是匹配滤波与一般非相干累积技术相结合的捕获系统及匹配滤波与 DSTC 技术相结合的捕获系统的检测概率随信噪比变化情况, 仿真条件: 码长  $L = 4096$ , 归一化码频频偏  $q = 5 \times 10^{-5}$ , 虚警概率  $P_{\text{false}} = 0.001$ 。

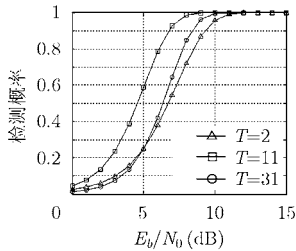


图 7 匹配滤波与一般非相干技术累积相结合的检测概率曲线

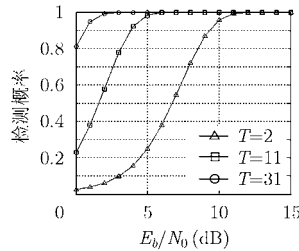


图 8 匹配滤波与 DSTC 技术相结合的检测概率曲线

从图 7 中可以看到  $T = 31$  时的检测概率要低于  $T = 11$  时的检测概率, 其原因是由于在码频频偏影响条件下, 非相干累加只在一定的累加次数内有效, 当累加次数过大后, 非相干累加不再有效, 而且噪声功率还会增大, 因此导致  $T$  过大后, 检测概率反而下降。比较图 7, 图 8 可见应用 DSTC 后, 随着非相干累加次数  $T$  的增大, 检测概率大大提高, 图 8 中  $T = 31$  时的检测概率在  $E_b/N_0$  为 2dB 时已达到 99.9%, 比图 7 中  $T = 31$  时相同检测概率所需的  $E_b/N_0$  减小了约 8dB。因此应用 DSTC 可大大提高码捕获系统在高动态低 SNR 条件下的检测概率。

#### 4 结束语

本文在深入研究码频频偏影响码捕获性能的基础上, 折中考虑算法实现复杂度及性能, 将时移短时相关法应用于捕获系统, 从而大大提高了高动态低信噪比条件下捕获系统的检测概率。进一步的研究工作将综合考虑载波频偏及码频频偏对捕获性能的影响, 对载波频偏消除技术与 DSTC 联合使

用的捕获系统在各种信道(加性高斯白噪声信道、衰落信道等)环境下的性能给出合理仿真与分析。

#### 参考文献

- [1] Sascha M S and Gordon J R P. Code acquisition for LEO satellite mobile communication using a serial-parallel correlator with FFT for Doppler estimation [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2001, 50(6): 1549-1567.
- [2] Persson B and Dodds D E. A segmented matched filter for CDMA code synchronization in systems with Doppler frequency offset[J]. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2001, 32(1): 34-45.
- [3] Candida L S, Sascha M S, and Gordon J R P. A Serial-Parallel FFT Correlator for PN Code Acquisition from LEO Satellites. *IEEE SSSTA*, Sun city, South Africa, 1998: 446-448.
- [4] Cheng U and Hurd W J. Spread-spectrum code acquisition in the presence of Doppler shift and data modulation. *IEEE Trans. on Communications*, 1990, 38(2): 241-250.
- [5] Betz J W. Performance of the Deskewed Short-Time Correlator, in *Coherence and Time Delay Estimation*, Edited by G. Clifford Carter, IEEE Press, 1993: 1551-1554.
- [6] Ali I and Al-Dhahir N. Doppler characterization for LEO satellites[J]. *IEEE Trans. on Communications*. 1998, 46(3): 309-313.
- [7] Stratix Device hand-book[M]. <http://www.altera.com>, 2006, 9: 529-532.
- [8] Iinatti J H J. On the threshold setting principles in code acquisition of DS-SS signals[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 1(18): 62-72.

秦 勇: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为卫星通信。

张邦宁: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为卫星通信、信号处理及抗干扰技术。

郭道省: 男, 1973 年生, 副教授, 博士, 研究方向为卫星通信及通信抗干扰技术。