

大 Doppler 频移条件下基于导频信号的扩频码捕获

吴团锋 朱爱民

(通信工程学院全军卫星通信重点实验室 210007 南京)

摘要: 分析了 Doppler 频移对传统扩频码捕获算法的影响, 提出了在发送导频信号期间, 利用自适应谱线增强器 (ALE) 对部分匹配滤波输出进行处理以估计 Doppler 频移值, 经过频偏校正后, 采用传统全匹配捕获算法进行扩频码捕获判决的新方法。仿真结果表明, 这种方法可以有效地消除大 Doppler 频移的影响, 迅速完成扩频码的捕获。

关键词: 扩频码, 大 Doppler 频移, 部分匹配滤波器, 自适应谱线增强器

中图分类号: TN914.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)06-0861-04

Spread-Spectrum Code Acquisition Based on Pilot Symbols in the Presence of Large Doppler Shift

Wu Tuan-feng Zhu Ai-min

(Army Key Laboratory on Satellite Communications, ICE, Nanjing 210007, China)

Abstract The influence of Doppler shifts on traditional acquisition algorithms is analyzed. A new method for spread-spectrum code acquisition of pilot symbols in the presence of large Doppler shifts is proposed, in which the outputs of partial matched filters are delivered to an Adaptive Line Enhancer (ALE) directly and an estimated frequency is produced. After frequency offset compensation, spread-spectrum code acquisition is performed by traditional spread-spectrum code acquisition algorithm. Simulation results show that the new method eliminates the influence of large Doppler shifts effectively, with fast acquisition time.

Key words Spread-spectrum code, Large Doppler shift, Partial matched filter, Adaptive Line Enhancer (ALE)

1 引言

扩频码的捕获过程完成扩频码的粗同步, 将收、发两端扩频码的相位差限制在一个码片内, 它是扩频码同步的基础, 也是扩频信号正确检测的基础, 如扩频信号的解扩、载波同步、定时同步、RAKE 接收与多径合并、信道估计等。对于低轨道(LEO)卫星和工作于 Ka 等高频段静止轨道(GEO)卫星的扩频链路而言, 由于卫星或者终端的移动, 使得接收信号的载波 Doppler 频移可达几百千赫, 因此, 大 Doppler 频移环境下实现扩频码的快速捕获是影响卫星扩频系统性能的关键。

为了在大 Doppler 频移时能够捕获扩频码, 一般的做法是进行频域扫描: 将 Doppler 频移范围划分为若干个小小区间, 对每个小小区间先进行频偏补偿, 再进行扩频码捕获。这种方式不仅需要前端频率合成器的配合, 而且随着频域扫描范围的增加, 将使平均捕获时间成倍增加^[1]。差分相关扩频码捕

获算法可以消除传统相关器中 Doppler 频移引起的正负抵消现象, 因而能够在在大 Doppler 频移条件下正确地捕获扩频码^[2], 但是同样因为差分运算的存在, 其检测概率是比较低的。文献[3]中给出的基于 FFT 的扩频码捕获算法能够在搜索扩频码相位的同时完成 Doppler 频移的搜索, 因此可以快速地捕获扩频码。本文分析了 Doppler 频移对传统扩频码捕获算法的影响, 提出了在发送导频信号期间, 利用自适应谱线增强器(ALE)对部分匹配滤波输出进行处理以估计 Doppler 频移值, 经过频偏校正后, 采用传统全匹配捕获算法进行扩频码捕获判决的新方法。该方法避免了对 Doppler 频移在频域的扫描过程, 可以有效地消除大 Doppler 频移的影响, 迅速完成扩频码的捕获。

本文安排如下: 第 2 节讨论 Doppler 频移对传统扩频码捕获算法的影响; 第 3 节给出本文算法的系统结构和算法流程; 第 4 节给出本文算法、传统捕获算法和基于 FFT 的扩频码捕获算法的计算机仿真结果, 以验证算法的有效性; 最后是本文的结论。

2 Doppler 频移的影响

近年来,随着 LSI 技术的快速进步,利用数字匹配滤波器(DMF)对直接序列扩频信号进行相关解扩已经在 CDMA 移动通信系统、卫星扩频通信系统等诸多领域里获得广泛应用。DMF 具有捕获速度快、设计方便以及可编程能力强的特点,但当扩频码较长时,DMF 需要的硬件资源是非常巨大的。为了减少对硬件资源的需求,可将长度为 M 的 DMF 分为 P 个长度为 X 的部分匹配滤波器(PDMF), $P=(M/X)$ 。采用一个长度为 X 的 PDMF,通过时间上的复用来产生 P 个 PDMF 的输出值 $y_1^m, y_Q^m (m=0, \dots, P-1)$ 并存储起来,对 P 个部分输出值进行相干累加就得到了全匹配 DMF 的输出结果。

设经过码片匹配滤波后的接收信号为

$$r(t) = \sqrt{2s}g(t)C(t)\cos[2\pi(f_c + \Delta f)t + \theta + \varphi] + n(t) \quad (1)$$

式中 s, f_c, θ 分别是载波的功率、频率和初相,不失一般性,在下面的分析中假设 $\theta=0$; $g(t)$ 是经码片匹配滤波后的基带升余弦脉冲; $c(t)$ 是扩频码; Δf 为收、发两端的 Doppler 频移(包括收、发两端振荡源的频率漂移); φ 是载波瞬时相位(相对 BPSK, $\varphi = 0, \pi$); $n(t)$ 是单边功率谱密度为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声。

接收信号下变频后变为基带信号,并在每个码片的中央抽样 1 个点,假设 $g(t)$ 样值幅度为 1 时,则在 $t=0$ 时刻利用 PDMF 实现 DMF 时的正交、同相输出表达式为

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \sum_{m=0}^{P-1} y_1^m \\ &= \sqrt{sT_c} \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{k=1}^X C_{K+mX+k} C_{K+mX+k} \cos(2\pi\Delta f(mX+k)T_c + \varphi) \\ &\quad + \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{k=1}^X C_{K+mX+k} n_1(mX+k) \\ y_Q &= \sum_{m=0}^{P-1} y_Q^m \\ &= \sqrt{sT_c} \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{k=1}^X C_{K+mX+k} C_{K+mX+k} \sin(2\pi\Delta f(mX+k)T_c + \varphi) \\ &\quad + \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{k=1}^X C_{K+mX+k} n_Q(mX+k) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 X 表示 PDMF 的延迟抽头数, P 表示 PDMF 的个数; T_c 为码片周期; K 是 $t=0$ 时刻接收扩频码的相位偏移; n_1, n_Q 是相互独立的基带高斯噪声,且均值为 0,方差为 $T_c N_0/2$ 。

将接收扩频码与本地扩频码对齐的假定标示为 H_1 ; 反之,标示为 H_0 , 则对于 H_1 假定,式(2)变为

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \sum_{m=0}^{P-1} y_1^m \\ &= \sqrt{sT_c} \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{k=1}^X \cos(2\pi\Delta f(mX+k)T_c + \varphi) \\ &\quad + \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{k=1}^X C_{K+mX+k} n_1(mX+k) \\ y_Q &= \sum_{m=0}^{P-1} y_Q^m \\ &= \sqrt{sT_c} \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{k=1}^X \sin(2\pi\Delta f(mX+k)T_c + \varphi) \\ &\quad + \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{k=1}^X C_{K+mX+k} n_Q(mX+k) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

忽略噪声项,由式(3)可得到表达式:

$$Z_m = \sqrt{(y_1^m)^2 + (y_Q^m)^2} = \sqrt{sT_c} \left| \frac{\sin(\pi\Delta f X T_c)}{\sin(\pi\Delta f T_c)} \right| \quad (4)$$

传统的扩频码捕获算法都是基于扩频码全匹配输出幅值 $Z = \sqrt{y_1^2 + y_Q^2}$ 检测的,即式(4)中的 $X=M$,可以发现传统的扩频码捕获算法具有明显的频偏敏感性,其衰减程度决定于 Doppler 频移与信息速率的相对比值($T_b=MT_c$ 为信息比特周期, $R_b=1/T_b$ 为信息速率)。当 Doppler 频移较小时,全匹配输出幅值的降低减小了捕获概率,延长了捕获时间;当 Doppler 频移较大时,尤其当 Doppler 频移接近整数倍的信息速率时,全匹配输出幅值大大降低,甚至为 0,此时很难正确捕获。

3 系统结构及算法流程

由式(4)可以发现与全匹配输出幅值 Z 相比,部分匹配输出幅值 Z_m 受 Doppler 频移影响引起的衰减较小,如果选择恰当的 P ,并且对 PDMF 的输出 $y_1^m + jy_Q^m$ 直接进行处理,而不进行累加操作,就可以避免 Z 为 0 的情形出现,从而避免对 Doppler 频移在频域的搜索过程。在发送导频信号期间,信息比特全为“1”,即式(3)中的 $\varphi = 0$,此时 PDMF 的输出序列 y_1^m, y_Q^m 为一复正弦信号(其频率等于 Doppler 频移值)的实部和虚部,因为 PDMF 的处理增益仅为 DMF 的 $1/P$,可以考虑采用 ALE 估计 Doppler 频移^[4],利用该估计值对接收到的 $r(t)$ 进行频偏补偿,再采用传统捕获算法来完成扩频码的捕获。本文算法的系统结构如图 1 所示,算法的流程详述如下:

(1) 转换开关置于 A 处,利用 ALE 对 PDMF 输出的复序列 $y_1^m + jy_Q^m$ 进行处理,当 ALE 的系数收敛后,根据频率函数 F 得到 Doppler 频移的估计值 $\Delta f'$,CPU 利用该估计值对接收到的直扩信号进行频偏校正。

(2) 转换开关置于 B 处, 对经过频偏校正的直扩信号进行解扩处理, 将部分匹配输出进行累加并取模得到 $Z = \sqrt{y_1^2 + y_0^2}$, N 个 Z 累加得到判决变量 Y 。若一共采集 C 次, 其中有 D 次判决变量 Y 大于预定门限 Th , 即 $Y > Th$, 表明扩频码捕获完成; 否则, 跳至第(1)步继续进行捕获操作。

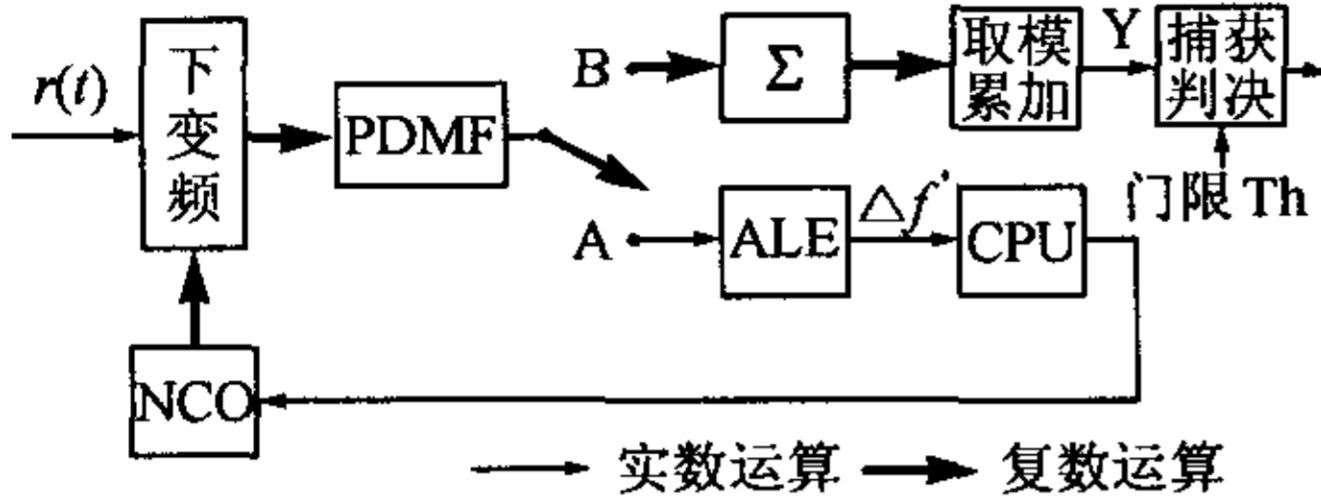


图 1 扩频码捕获算法框图

ALE 的自适应算法采用数值稳定性好、收敛速度快的可变步长 LMS 算法^[5], 文献[5]中给出的是实数形式, 这里我们采用复数形式:

$$\left. \begin{aligned} e(n) &= d(n) - W^H(n)U(n) \\ p(n) &= (1 - \beta)p(n-1) + \beta|e(n)e(n-1)| \\ u(n+1) &= (1 - \alpha)u(n) + \gamma p^2(n) \\ W(n+1) &= W(n) + u(n)U(n)e^*(n) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 $d(n)$ 为第 n 时刻的 PDMF 输出 $y_1^m + jy_0^m$; $W(n) = [w(1), w(2), \dots, w(L)]^T$ 是 L 阶 ALE 在第 n 时刻的抽头系数矢量; $U(n) = [d(n-1), d(n-2), \dots, d(n-L)]^T$ 是 ALE 在第 n 时刻的输入信号矢量; $u(n)$ 是 ALE 在第 n 时刻的步长, $u(n) \in [u_{\min}, u_{\max}]$; $(\cdot)^H$ 表示求共轭转置, $(\cdot)^T$ 表示求转置, $(\cdot)^*$ 表示求共轭。

当自适应算法收敛后, 可得到频率函数 $F(\Delta f)$:

$$F(\Delta f) = \frac{1}{\left| 1 - \sum_{k=1}^L w_k e^{-j2\pi\Delta f k} \right|^2}, \quad -\frac{P}{2T_b} \leq \Delta f \leq \frac{P}{2T_b} \quad (6)$$

选取变量 $\max(F)$ 对应的 $\Delta f'$ 为 Doppler 频移的估计值。

4 仿真结果与分析

因为定量分析 ALE 的频偏估计性能是比较困难的, 而 ALE 是本文算法的核心, 所以我们通过计算机仿真给出本文算法的性能曲线, 同时还对传统全匹配捕获算法以及基于 FFT 的捕获算法进行了仿真, 在不同 Doppler 频移的情况下, 比较这 3 种扩频码捕获算法的检测概率和平均捕获时间, 以得到本文算法进行扩频码捕获时对消除 Doppler 频移影响的作用。

设扩频因子 M 为 64, 信道为 AWGN 信道, 本文算法中选取部分相关参数 $P=8$, 可变步长 LMS 算法中参数选择如下: $u_{\min}=2^{-12}$, $u_{\max}=2^{-4}$, 步长初值 $u=2^{-6}$, $\alpha=2^{-6}$, $\beta=2^{-7}$,

$\gamma=2^{-18}$, ALE 阶数 $L=3$, 其他参数 $N=8, C=4, D=3$ 。传统捕获算法以及基于 FFT 的捕获算法中设置参数 $N=16, C=4, D=3$ 。为了仿真平均捕获时间, 将 3 种算法作一次判决的时间长度定为 16, 因为 ALE 的系数收敛需要一定的时间, 假设其为 8, 因此本文方法选取累加 Z 的个数 $N=8$, 而传统捕获算法以及基于 FFT 的捕获算法没有系数收敛过程, 故 $N=16$ 。

图 2 给出了无噪声时不同扩频码捕获算法的归一化判决变量与 Doppler 频移的关系, 可以发现传统全匹配捕获算法受 Doppler 频移影响较大, 随着 Doppler 频移的增大, 判决变量迅速衰减, 甚至为 0; 基于 FFT 的捕获算法受 Doppler 频移影响较小, 而本文算法不受 Doppler 频移影响, 其容许的 Doppler 频移范围可达 $\left[-\frac{P}{2T_b}, \frac{P}{2T_b}\right]$ 。

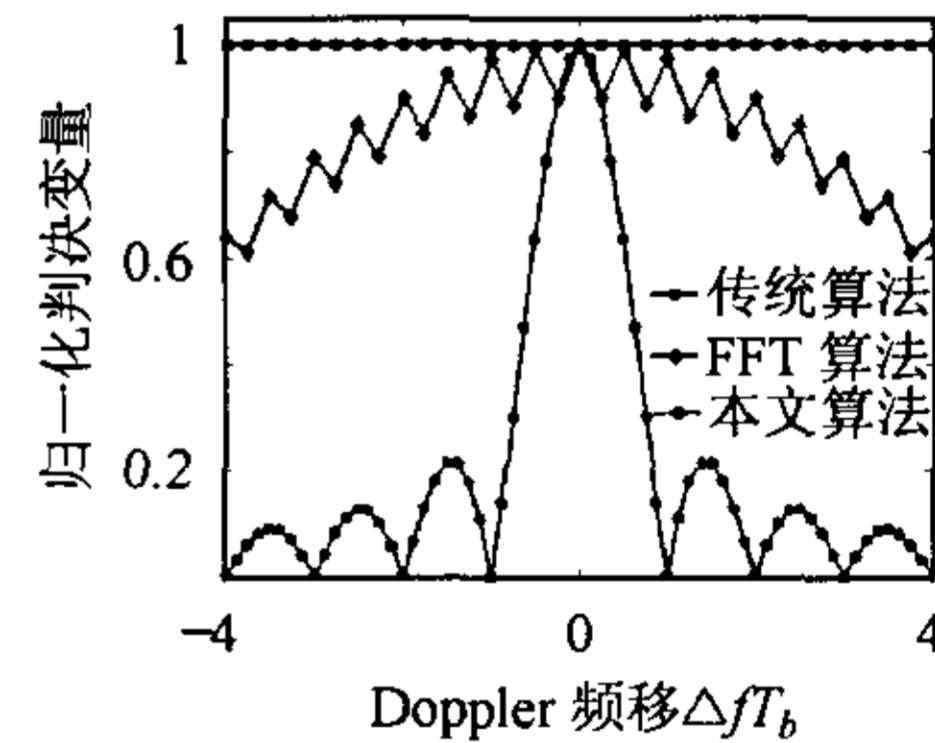


图 2 归一化判决变量与 Doppler 频移的关系

图 3 给出不同 Doppler 频移条件下, 3 种扩频码捕获算法的漏检概率。图 4 给出了相应的平均捕获时间。仿真时扩频码相位采用串行搜索方案。需要注意的是, 这里依据恒定虚警概率法则选定各算法中的门限值, 使得 3 种算法的虚警概率 $P_{fa}=10^{-3}$ 。图 3 和图 4 中没有给出 $\Delta fT_b=3.8$ 时传统扩频码捕获算法的性能曲线, 是因为此时的捕获概率远小于 10^{-4} , 可以认为在此条件下传统扩频码捕获算法已经不能正常工作。

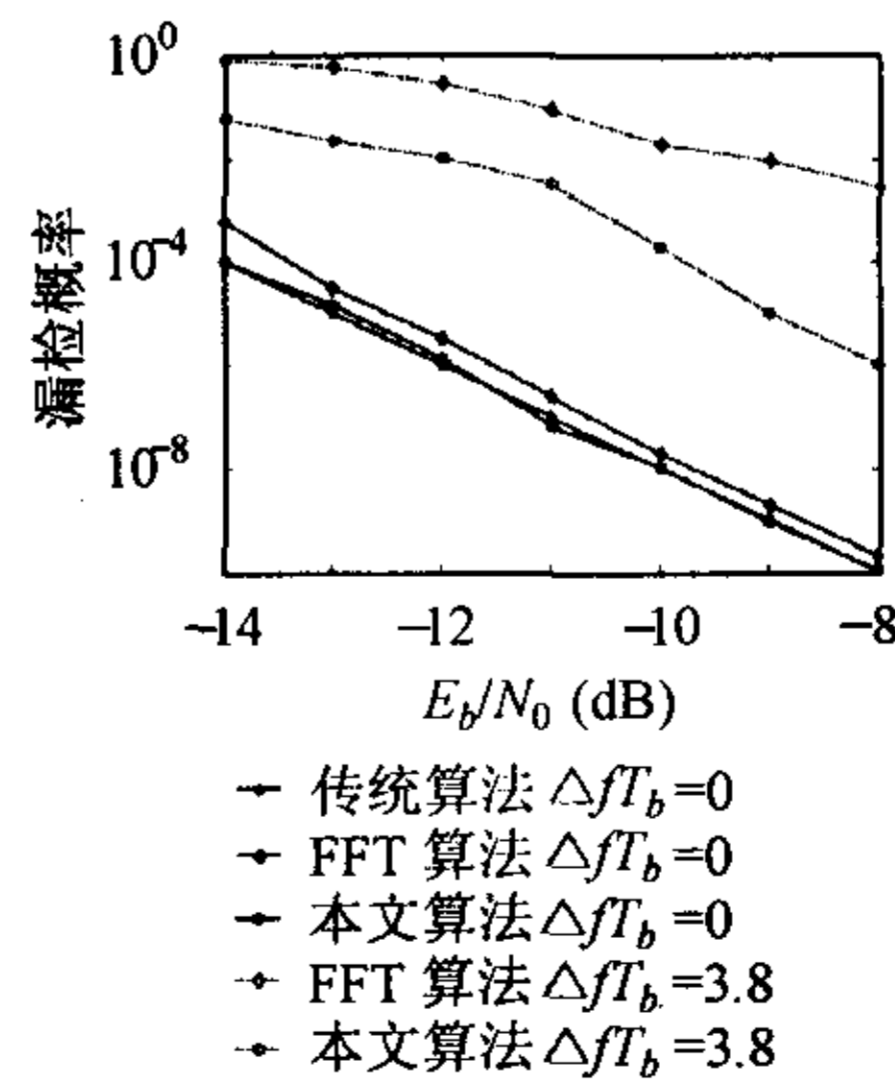


图 3 不同 ΔfT_b 时 3 种扩频码捕获算法的漏检概率

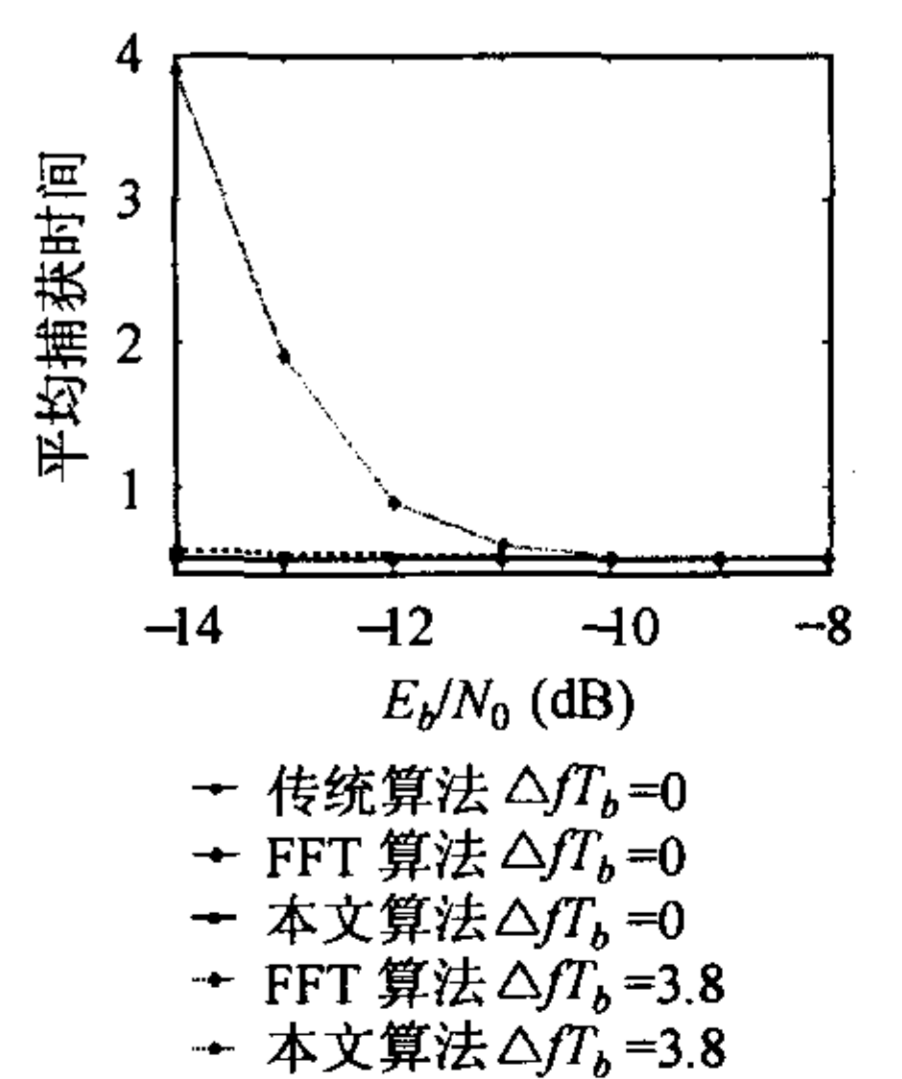


图 4 不同 ΔfT_b 时 3 种扩频码捕获算法的平均捕获时间

由图 3, 图 4 的仿真结果可以看出, 在 $\Delta fT_b=0$ 时, 本文算法的性能曲线与传统捕获算法的性能曲线基本重合, 基于

FFT的扩频码捕获算法的性能与前两者的性能非常接近;但在 $\Delta f T_b=3.8$ 时,很明显的,本文算法的性能要远优于基于FFT的扩频码捕获算法的性能,而传统全匹配扩频码捕获算法此时已经不能正常工作。另外,在相同的码片信噪比 E_c/N_0 条件下,随着Doppler频移值的变大,本文算法的捕获性能有所下降,这是因为对某个确定的部分相关器长度 X 而言,Doppler频移值越大,引起的相关能量损失也就越大,同时ALE给出的Doppler频移的估计值与真实值之间的误差变大,从而使得算法的捕获性能有所下降。

5 结束语

当Doppler频移大到能与符号速率相比拟时,Doppler频移就会严重影响传统全匹配扩频码捕获算法的性能,甚至造成无法捕获,然而采用本文算法能很好的消除Doppler频移对扩频码捕获性能的影响,避免了对Doppler频移在频域的扫描过程,可以迅速的完成扩频码相位的捕获。另外,仿真结果还表明,本文算法的性能优于基于FFT的扩频码捕获算法的性能。

参考文献

- [1] Povey G J R, Talvitie J. Doppler compensation and code acquisition techniques for LEO satellite mobile radio communications. IEE Fifth International conference on Satellite systems for Mobile Communications and Navigation, London, 13-15th May, 1996: 16 - 19.
- [2] Iinatti J, Pouttu A. Differentially coherent code acquisition in Doppler. IEEE Vehicular Technology Conference, Amsterdam, 1999, 10: 703 - 706.
- [3] Grant P M, Spangerberg S M, Scott I, et al. Doppler estimation for fast acquisition in spread spectrum communication systems. Proc. IEEE ISSSTA, Sun City, 1998(1): 542 - 560.
- [4] Kay S M, Marple S L. Spectrum analysis—a modern perspective. Proc. IEEE, 1981, 69(11): 1380 - 1419.
- [5] Aboulnasr T, Mayyas K. A robust variable step-size LMS-type algorithm: analysis and simulation. IEEE Trans. on Signal Processing, 1997, 45(3): 631 - 639.

吴团锋: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为卫星移动通信、扩频通信

朱爱民: 男, 1974年生, 博士生, 研究方向为调制与解调.