

文章编号: 2095-4980(2016)06-0878-07

一种基于 CDMA2000 1x EVDO 微弱信号的捕获算法

赵 敏¹, 杨 涛¹, 胡 波^{1,2}

(1.复旦大学 电子工程系, 上海 200433; 2.电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘 要: 针对弱信号条件下的 CDMA2000 1x EVDO 手机上行信号, 提出一种基于短时相关快速傅里叶变换(FFT)运算和差分相干相结合的联合捕获算法。首先采用短时相关和 FFT 运算精确估计出信号的多普勒频偏值; 在此基础上利用差分相干提升信号的相关峰。通过设置自适应判决门限和相干长度获得较好的捕获概率; 同时对所提算法和相干累积算法的捕获灵敏度和计算复杂度进行了对比。最后, 结合实测数据验证了算法有效性, 实验表明本文算法在保证低于相干累积算法复杂度的情况下, 提高捕获灵敏度约 1.5 dB。

关键词: 差分相干累积; 快速傅里叶变换(FFT); 短时相关; 弱信号捕获

中图分类号: TN965.5

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0878

A code acquisition algorithm for weak CDMA2000 1x EVDO signal

ZHAO Min¹, YANG Tao¹, HU Bo^{1,2}

(1.Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2.Key Laboratory of EMW Information(MoE), Shanghai 200433, China)

Abstract: Aiming at acquiring accurately the CDMA2000 1x EVDO(Evolution-Data Optimized) uplink spread code under weak signal conditions, a joint acquisition algorithm based on short time correlation Fast Fourier Transform(FFT) and differential coherent accumulation is proposed. Firstly, the short time correlation and FFT algorithm is adopted to estimate the Doppler frequency offset accurately; the correlation peak is obtained by differential coherent accumulation of demodulated signal based on the frequency offset estimated value. Then by setting the adaptive decision threshold and accumulation length, the higher probabilities of detection are obtained; the acquisition sensitivity and computation complexity of the proposed algorithm are compared with that of the coherent accumulation algorithm. Finally, based on the measured data, simulation is performed and the results show that the acquisition sensitivity of the proposed algorithm is improved by about 1.5 dB than that of the coherent accumulation algorithm, and the computation complexity is lowered.

Keywords: differential coherent accumulation; Fast Fourier Transform(FFT); short time correlation; weak signal acquisition

非合作定位问题中, 上行导频信号的准确捕获是其中的一个研究热点。由于在城市、隧道、森林峡谷等复杂环境下导频扩频信号的接收强度比开放接收条件下的强度要低得多, 扩频信号严重衰减可达 10 dB~30 dB, 信号功率远低于一般接收机的接收灵敏度要求。故接收机无法有效捕获和跟踪到移动台的信号, 这将大大限制非合作定位的应用领域。为实现微弱信号下伪码的有效捕获, 通常采用相干累积和非相干累积以获取高处理增益。由于相干累积受基带数据跳变的影响, 其相干长度受到限制。而非相干累积则由于在计算相关值的同时, 对噪声也进行了平方运算, 从而引入了平方损耗, 且其随信噪比的降低而增加, 从而影响微弱信号捕获性能的进一步提高。文献[1-2]采用差分相干累积实现弱 GPS 信号捕获, 得到了满意的效果。文献[3]证明该算法有助于平方损耗的缓解和捕获灵敏度的提高。基于上述分析, 有必要对差分相干算法在 EVDO 信号捕获方面进行研究, 以确定其在弱信号捕获的可行性。

收稿日期: 2015-11-09; 修回日期: 2015-12-15

基金项目: 总参预先研究基金资助项目(2013005)

本文针对 CDMA2000 1x EVDO 上行导频信号, 提出一种基于短时相关 FFT 运算和差分相干相结合的联合捕获算法, 给出了新算法在 EVDO 体系下的应用描述, 并同时指出其相对于传统差分相干算法的改进之处, 最后结合实测数据对算法进行了测试, 验证了其在工程应用上的可行性。

1 信号模型及算法原理

1.1 EVDO 信号模型

为实现非合作定位功能, 侦测站首先需要从空中截获移动台的发射信号, 为简化分析, 暂不考虑多径影响, 且将干扰信号视作加性白噪声^[4], 则接收信号为:

$$r(t) = \sqrt{\frac{2E_c}{T_c}} D_{nl}(t - \tau_0) p\left(\frac{t - \tau_0 - nT_c}{T_c}\right) \cos(2\pi(f_c + \Delta f)t + \psi) + \sqrt{\frac{2E_c}{T_c}} D_{nQ}(t - \tau_0) p\left(\frac{t - \tau_0 - nT_c}{T_c}\right) \sin(2\pi(f_c + \Delta f)t + \psi) + n(t) \quad (1)$$

式中: E_c 为接收信号的码片能量; τ_0 为移动台到监测站多径中直达径的码片延迟; Δf 为载波频偏; ψ 为载波相位; $n(t)$ 为带通加性高斯白噪声, 其双边功率谱密度为 $N_0/2$ (W/Hz); $p(t)$ 为基带成形滤波器的冲击响应; $D_{nl}(t)$ 与 $D_{nQ}(t)$ 为复扰码后同相通道和正交通道数据, 其表达式为:

$$\begin{cases} D_{nl}(t) = d_{nl}(t)PN_{nl}(t) - d_{nQ}(t)PN_{nQ}(t) \\ D_{nQ}(t) = d_{nl}(t)PN_{nQ}(t) + d_{nQ}(t)PN_{nl}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $d_{nl}(t)$ 与 $d_{nQ}(t)$ 为第 n 个码片持续时间内 I/Q 信道数据, $PN_{nl}(t)$ 与 $PN_{nQ}(t)$ 为第 n 个码片时隙内 I/Q 信道的 PN 码符号, 取值为 ± 1 。根据 I/Q 信道的数据构成, $d_{nl}(t)$ 与 $d_{nQ}(t)$ 可表示为:

$$\begin{cases} d_{nl}(t) = \sum_i d_{nl,i}(t)w_{nl,i}(t)g_{1,i} \\ d_{nQ}(t) = \sum_j d_{nQ,j}(t)w_{nQ,j}(t)g_{Q,j} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $d_{nl,i}(t)$ 与 $w_{nl,i}(t)$ 分别表示 I 信道数据中第 i 个子信道在第 n 个码片持续时间内的数据和 Walsh 码, 取值均为 ± 1 ; $g_{1,i}$ 为 I 信道数据中第 i 个子信道相对于导频信道的增益; 类似可得到 $d_{nQ}(t)$ 构成式中 $d_{nQ,j}(t)$ 、 $w_{nQ,j}(t)$ 及 $g_{Q,j}$ 的具体含义与取值。

上式中, τ_0 和 Δf 即为待估计的码偏和频偏。侦测站对 τ_0 的测量相当于参数估计问题。为获得高精度的码偏和频偏估计值, 处理流程包括 2 个步骤: 捕获和跟踪。前者完成侦测站本地码序列与接收信号中码序列的初始同步; 后者在此基础上, 利用早-迟 DLL 跟踪环路实现对 τ_0 和 Δf 的高精度测量。

1.2 基于 FFT 运算的捕获算法

扩频信号捕获实质上是一个伪码相位和载波频率的二维搜索过程, 由于扩频码具有周期性, 可以通过快速傅里叶变换(FFT)并行计算出各码相位相关值^[5-8], 从而实现扩频码的并行捕获。其基本原理是将时域的循环相关转化为频域的 FFT-对应点相乘-IFFT。假设接收信号为 $r(t)$, 本地伪码为 $PN(i)$, 相关长度为 l , 利用时域卷积等价于频域相乘原理, 时域相关值表示为:

$$R(m) = \sum_{i=1}^l r(i)PN^*(i+m) = r(i) \otimes PN^*(-i) = \text{IFFT}(\text{FFT}(r(k)) * \text{FFT}(PN^*(-k))) \quad (4)$$

由于 FFT 方法可以大幅度减少计算量, 等效于并行捕获算法, 因此本文算法将借用该算法实施。针对 EVDO 体系的 FFT 捕获流程如图 1 所示。

基于 FFT 运算的捕获算法, 其本质是一种相关计算, 只是将其搬移到频域进行。由于针对导频进行捕获, 对应的 Walsh 码为全 1, 根据正交性, 即可滤去其他子信道信号, 得到如下检测统计量:

$$Z = Z_1^2 + Z_2^2 \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} Z_1 = \sqrt{\frac{2E_c}{T_c}} d_{nl,0} R(\Delta\tau) \left(\cos\psi \frac{\sin(2\pi\Delta f N_c T_c)}{2\pi\Delta f} + \sin\psi \frac{(\cos(2\pi\Delta f T_c N_c) - 1)}{2\pi\Delta f} \right) + N_1 \\ Z_2 = \sqrt{\frac{2E_c}{T_c}} d_{nl,0} R(\Delta\tau) \left(\cos\psi \frac{1 - \cos(2\pi\Delta f N_c T_c)}{2\pi\Delta f} + \sin\psi \frac{\sin(2\pi\Delta f T_c N_c)}{2\pi\Delta f} \right) + N_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: N_c 为积分码偏数量; $d_{nl,0}$ 为导频数据, 在 EVDO 中为全 1; $\Delta\tau = \tau_0 - \hat{\tau}_0$, $\hat{\tau}_0$ 为 τ_0 的估计值; $R(\Delta\tau)$ 为扩频码的自相关函数; N_1 和 N_2 为噪声与本地扩频码的相关值。

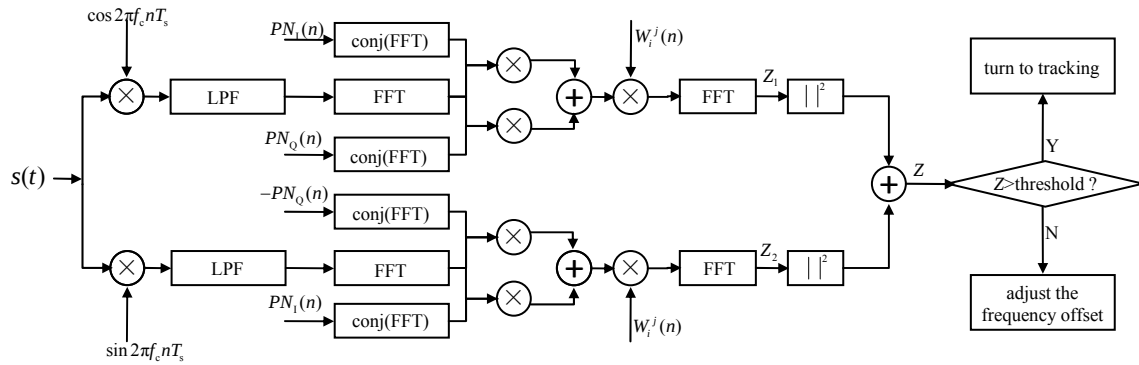


Fig.1 FFT acquisition algorithm based on CDMA2000 1x EVDO uplink signal

图 1 基于 FFT 运算的 CDMA2000 1x EVDO 上行链路捕获流程

1.3 基于短时相关和 FFT 运算的捕获算法

对于实际的侦测站, 由于缺少接收信号的载波频率信息, 故无法完成载波同步进而实施码偏估计。若只采用上述 FFT 运算对实测信号进行捕获, 必须以步进方式搜索频偏, 但大的步进值所引入的频率差会使得相关峰具有严重的衰减, 尤其是对微弱信号, 一旦频率估计不准确, 几乎不会出现明显相关峰。

为了准确估计载波频率, 工程上采用基于短时相关和 FFT 相结合的快速捕获算法^[7-9], 如图 2 所示。将信号通过下变频之后, 依次送入 P 个 X 级的部分匹配滤波器组。 PX 个滤波器的抽头系数为本地的未经移位的伪码序列 $PN_1(n)$ 和 $PN_0(n)$ 。滤波器完成 P 点 FFT 补偿运算之后, 比较 P 个 FFT 输出模值, 找出最大值并与预设门限比较, 从而判决同步是否成功。

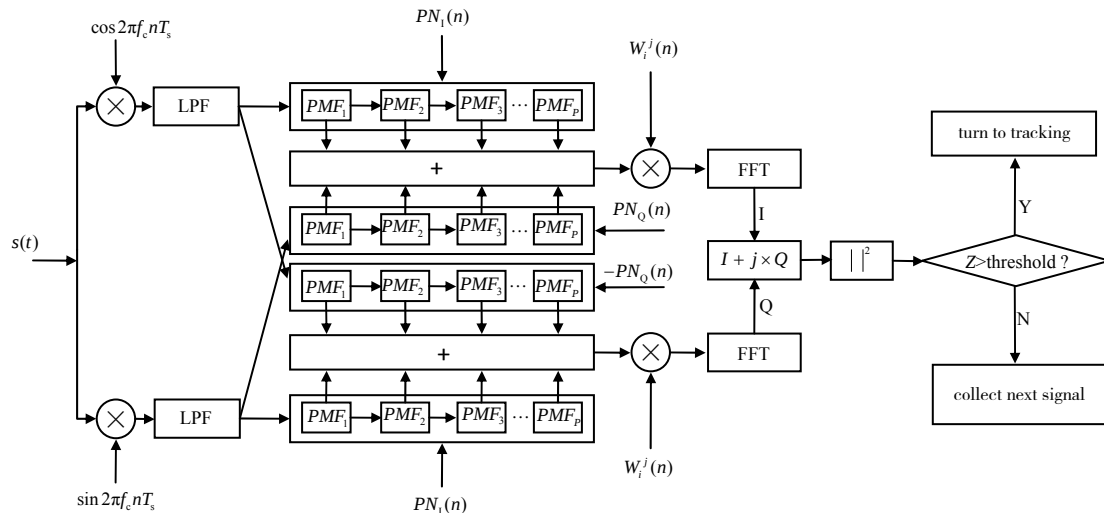


Fig.2 Short time correlation FFT acquisition algorithm based on CDMA2000 1x EVDO uplink signal

图 2 基于短时相关 FFT 运算的 CDMA2000 1x EVDO 上行链路捕获流程

合理控制参数可以非常精确地计算出频偏值: EVDO 信号的伪码速率为 $R_c = 1.2288 \times 10^6$ chip/s, 码片长度 $M = 32768$, 滤波器个数 $P = 1024$, 每一段部分滤波器长度为 $X = M/P = 32$, 分段相关后做 32768 点 FFT, 则单个频点的搜索精确度为:

$$\Delta f = \frac{1}{N \times X} \times R_c = 1.171875 \text{ Hz} \quad (7)$$

该算法相对于 FFT 算法的优势在于在降低 FFT 运算点数的同时, 完成码偏/频偏的二维并行搜索, 实现完全并行, 同时频偏的搜索精确度可以精确到 1 Hz 左右, 非常适合高动态环境下的捕获。但是针对微弱信号的捕获, 该算法无法提升相关峰值, 因此必须使用长时间累积相关算法以获得较高的处理增益。

1.4 差分相干累积原理

传统长时间累积方法采用相干累积和非相干累积算法进行微弱信号捕获, 由于非相干会带来平方损耗, 故现在研究较多的是差分相干累积捕获算法。

差分相干累积的基本原理是将当前相关积分周期内的相关值与前一相关值的复共轭相乘后得到差分相关值，然后再对差分相关值进行累加。累积方式可分为相干累积和非相干累积 2 种。

采用差分非相干累积时，若设第 k 个相关值为 Y_k ，则 M 个差分相关值进行非相干累积的结果为：

$$Z = \sum_{k=2}^M |I_{k-1}^* I_k + Q_{k-1}^* Q_k| \quad (8)$$

式中 $*$ 表示复共轭运算。由上式可知，由于差分是对前后 2 个时间段的相关值进行乘积运算，因此对残余的多普勒频差和偏移不敏感，能够适应高动态条件下的捕获。但非相干方式采用先取绝对值再累加的方式，引入的平方损耗对噪声进行了放大，故处理增益有所下降。

为提升微弱信号的处理增益，采用差分相干累积，如图 3 所示。 M 个差分相关值进行相干累积的结果为：

$$Z = \sum_{k=2}^M [I_{k-1}^* I_k + Q_{k-1}^* Q_k] \quad (9)$$

相对于非相干累积，该算法避免了平方损耗对噪声的放大，故有助于提升整体信噪比。

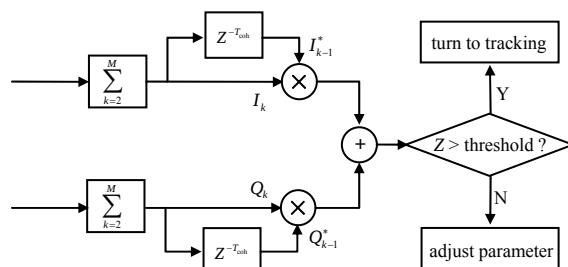


Fig.3 Acquisition algorithm based on differential coherent accumulation

图 3 基于差分相干的捕获流程

2 联合捕获算法

2.1 算法阐述

本文中首次将短时相关 FFT 运算与差分相干累积算法相结合，设计出针对 CDMA2000 1x EVDO 微弱信号的捕获策略，实现捕获的原理如图 4 所示。表 1 给出整个捕获策略描述。

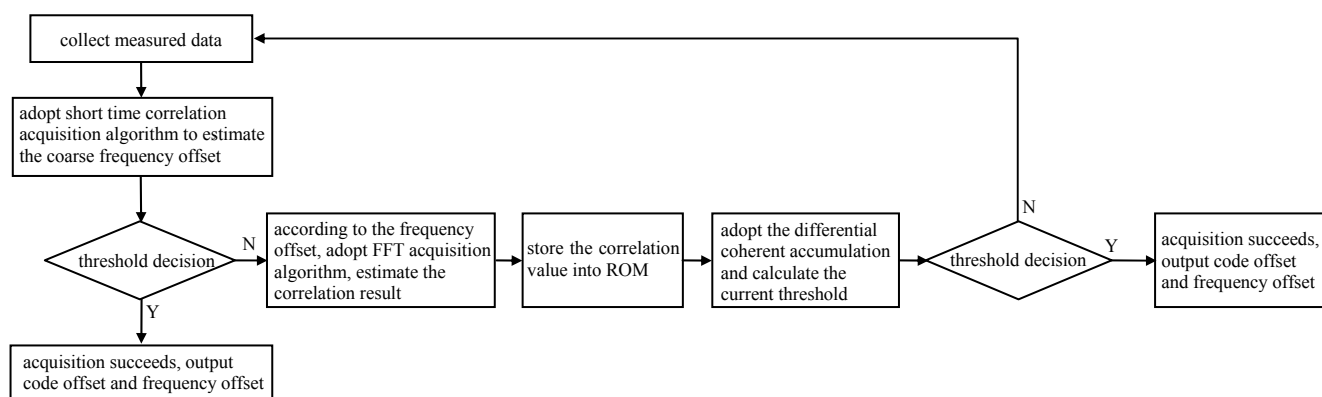


Fig.4 Acquisition algorithm based on short time correlation FFT and differential coherent accumulation

图 4 基于短时相关 FFT 运算和差分相干累积的联合捕获算法

表 1 联合捕获算法步骤

Table1 Procedure of joint acquisition algorithm

procedure of joint acquisition algorithm
Input: Maximum differential coherent length- m
Measured EVDO data collected by monitoring station from 200 m away - $s(t)$
Local spread code(length: 32 768 chips), divided into two parts: I and Q
Start:
for $l=1,2,\dots,m$ do
Step1: Collects the complete cycle measured data, adopts the short time correlation acquisition algorithm (Fig.2), and calculates the current threshold Th_2 according to the formula (10).
Step2: Makes threshold decision. If the correlation value is larger than Th_2 , then acquisition succeeds, outputs the frequency offset and code offset; otherwise retains the frequency offset estimated value and turns to step3.
Step3: Adopts FFT acquisition algorithm(Fig.1) to calculate the correlation value based on the frequency offset estimated value from step2, estimates the correlation result.
Step4: Stores the correlation result into the ROM, and adopts the differential coherent accumulation(Fig.3), and calculate the current threshold Th_2 according to the formula (10).
Step5: Makes threshold decision. If the accumulation correlation value is larger than Th_2 , then acquisition succeeds, outputs the frequency offset and code offset; otherwise turns to next circulation.
end for
Output: Doppler frequency offset and code offset.

2.2 算法分析及门限值设定

捕获的关键是对弱信号进行快速且精确的参数估计。因此,对于截获的一段信号,首先采用工程上短时相关和 FFT 运算进行计算,考虑到目标移动台的实时运动特性,其信噪比并非固定不变。如果截获信号较为恶劣,则短时相关算法失效,此时记录频偏值,送入 FFT 运算,进行差分相干累积,借此提升峰均比。由于算法只针对单个频偏值进行差分运算,而传统的相干算法需要对每个频偏值做长时相关,因此计算复杂度较传统算法有所下降。同时,为了最大限度减少平均捕获时间,本捕获方案没有采用固定不变的差分相干累积时间,而是先采用较短的差分相干累积时间,如未能成功捕获则增加下一段的测试数据以延长相干长度直至达到最大累积时间为止。

在门限值选择方面,传统的算法通常基于恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)设定门限值,并且结合使用 Tong 检测,以保证系统要求的捕获概率,该门限取决于系统虚警概率与捕获累加次数,与接收信号的功率无关,不能随接收信号功率变化而变化。由于实测信号信噪比的波动性,本文采用一种自适应门限设置,判决门限会随着累加时间、接收信号功率、系统误捕率的变化而自适应变化。采用相关能量值的最大峰值作为判决变量。由式(9)得到差分相干的累计值 Z ,则门限值设成相关值的均值与其标准差的倍数之和,即

$$Th = \text{avg}(Z) + \lambda \text{std}(Z) \quad (10)$$

式中 λ 是比例因子,根据不同的信噪比环境手动设定 λ 的数值。

3 仿真分析

为验证本文提出的捕获策略的有效性,采用实测 CDMA2000 1x EVDO 微弱信号进行捕获、分析,并与传统算法进行运算量比较。数据来源为 EVDO 手机离采集设备近 200 m 的发射信号,目标手机的 UATI 码为 04126BFF,信号采样率为 30.720 MHz,码片速率为 1.228 8 Mchip/s,下变频至中频的载波频率为 5.89 MHz,本地参考扰码序列长度 32 768 码片,每次采集一个完整码片周期信号进行捕获处理,数据持续时间 26.6 ms。

首先采用传统 FFT 捕获算法对微弱信号进行捕获。接收信号的信噪比在 -20 dB 左右,每个码片做 5 倍降采样,即 1 个码片移位 5 次,一共有 163 840 个码相位。通过连续对截获的 4 帧完整周期的数据进行捕获实验,图 5 显示各组数据在多普勒频偏对准之后的相关结果。实测信号的真实码偏位于第 142 298 个相关点处,由图中可看出只有图 5(a)与真实的码相位相符,其余 3 幅都出现了伪峰,甚至被噪声所淹没。同时发现图 5(a)即使能正确捕获,但是峰均比不高。可见针对微弱信号,传统的捕获算法不具备较好的捕获灵敏度。

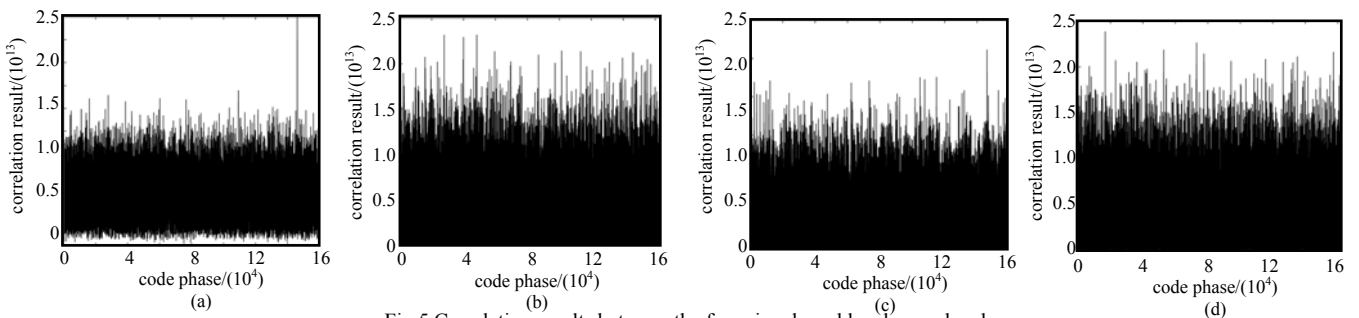


Fig.5 Correlation results between the four signals and local spread code
图 5 4 组信号与本地扩频码信号相关结果

为了直观了解差分相干累积的捕获性能,分别采用相干累积、差分相干累积算法对上述的 4 组数据进行长时间累积。图 6 给出了 2 种累积结果,为了便于比较,分别对相关幅值进行归一化。其中图 6(a)采用传统的相干累积算法,图 6(b)采用差分相干累积算法。可以看到在采用差分相干累积之后,相关峰有明显提升,而采用普通非相干累积算法依然保留了较大的基底噪声,峰值不突出,同时也出现了伪峰。

图 7 对上述 2 种累积算法进行性能对比。采用实测侦测站距离手机 100 m 的接收数据,通过 Matlab 的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise,

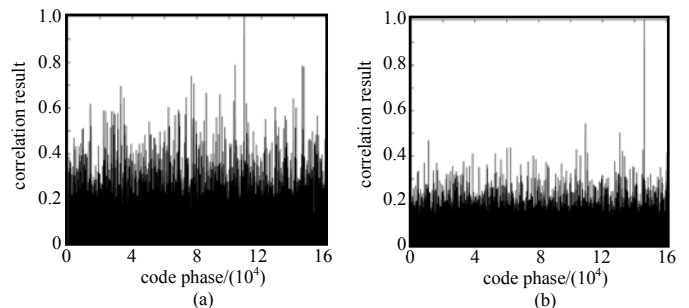


Fig.6 Correlation results by long time accumulation between signals and local spread code
图 6 多组数据与本地扩频码长时累加的相关结果

AWGN)加噪生成不同信噪比的测试数据。将本文算法与短时相关 FFT 算法、相干累积算法进行对比。其中差分非相干和相干累积的累积长度设为 3, 相干累积算法的多普勒频偏搜索步长设为 5 Hz, 短时相关的 FFT 频点精确度设为 1.17 Hz。进行 500 次捕获实验。从图 7(a)可以看到, 采用本文算法在保证相同检测概率下, 比相干累积算法约有 1.5 dB 捕获灵敏度提升, 比短时相关 FFT 算法约有 2.7 dB 灵敏度提升。而在虚警概率方面, 本文算法在相同信噪比下具有最低的虚警概率, 比短时相关 FFT 算法有 50% 的下降。

表 2 比较了本文捕获算法和相干累积算法的运算量, 其中设定最大累积长度为 3, 相干累积算法的频偏搜索步进为 1.15 Hz, 其余参数与图 7 设置一致。最后在计算机上运行捕获程序, 配置 CPU 为 i5-4590, 内存为 4 GB, 得出实测时间。可以看出本文算法比相干累积算法的计算复杂度有一定程度下降。

表 2 算法捕获时间和计算复杂度对比

Algorithm	complex multiplication	complex addition	run time/s
coherent accumulation algorithm	8.364×10^{11}	5.505×10^{11}	13.06
proposed algorithm	4.482×10^{11}	6.249×10^{11}	10.03

4 结论

基于微弱 CDMA2000 1x EVDO 信号的上行数据捕获, 本文提出了一种基于短时相关 FFT 运算和差分相干相结合的联合捕获算法, 利用短时相关获得较为精确的多普勒频偏值, 在此频偏值基础上引入差分相干进行多段长周期累积。该算法提升了微弱信号的相关峰, 较之传统的相干累积算法, 本文算法在不增加计算复杂度的情况下, 捕获灵敏度提升约 1.5 dB。并结合实测信号验证了该算法的有效性, 具有较好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 李新山, 郭伟, 谢先斌. 一种高动态、弱信号 GPS 比特同步方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2521–2525. (LI Xinshan, GUO Wei, XIE Xianbin. A GPS bit synchronization method for high-dynamic and weak signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(10): 2521–2525.)
- [2] LI X S, GUO W. Efficient differential coherent accumulation algorithm for weak GPS signal bit synchronization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(7): 1046–1050.
- [3] SHIN O, LEE K B. Differentially coherent combining for double-dwell code acquisition in DS-CDMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(7): 1046–1050.
- [4] LEE M. CDMA 系统工程手册[M]. 许希斌, 译. 北京: 人民邮电出版社, 1997. (LEE M. CDMA Systems Engineering Handbook[M]. Translated by XU Xibin. Beijing: Posts and Telecom Press, 1997.)
- [5] LECLERE J, BOTTERON C, FARINE P. Improving the performance of the FFT-based parallel code-phase search acquisition of GNSS signals by decomposition of the circular correlation[C]// ION(Institute of Navigation) GNSS(Global Navigation Satellite System) 2012. Nashville, TN, USA: ION, 2012: 1406–1416.
- [6] SOUDAN M, GEIGER B C. On the averaging correlation for satellite acquisition in software defined radio receivers[C]// ION GNSS 2010. Portland, OR, USA: ION, 2010: 3284–3289.
- [7] SASCHA M S, IAIN S, STEPHEN M. An FFT-based approach for fast acquisition in spread spectrum communication systems[J]. Wireless Personal Communications, 2000, 13(1): 27–55.
- [8] 蒋伟, 乐天. 基于插值的多普勒频偏和频率斜升联合估计算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 166–171. (JIANG Wei, LE Tian. Joint estimation of Doppler frequency shift and Doppler frequency rate based on interpolation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 166–171.)
- [9] The Third Generation Partnership Project 2 (3GPP2). Upper layer(layer 3) signaling standard for cdma2000 spread spectrum systems: 3GPP2 C.S0005–D[S]. 3GPP2, 2004.

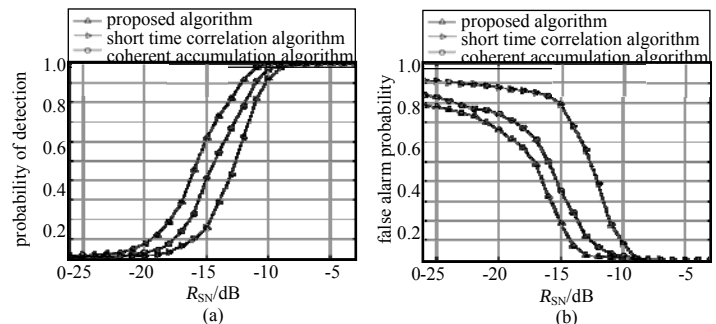


Fig.7 Comparison of capture performance for EVDO upstream signal

图 7 EVDO 上行信道导频捕获检测性能对比

作者简介:



赵 敏(1990-), 男, 浙江省温州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为扩频通信.email:sanduan168@126.com.

杨 涛(1970-), 男, 陕西省汉中市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线通信理论与信号处理.

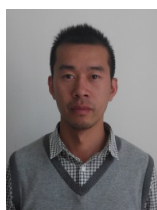
胡 波(1968-), 男, 江苏省常州市人, 博士, 教授, 主要研究方向为数字信号处理、数字通信.

(上接第 877 页)

参考文献:

- [1] CADAMBE V R, JAFAR S A. Interference alignment and spatial degrees of freedom for the K user interference channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3425–3441.
- [2] GOMADAM K, CADAMBE V R, JAFAR S A. Approaching the capacity of wireless networks through distributed interference alignment[J]. IEEE GLOBECOM, 2008: 1–6.
- [3] 刘晓菲, 艾渤, 宋华, 等. 基于分布式干扰对齐的自适应选择机制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(1): 64–70. (LIU Xiaofei, AI Bo, SONG Hua, et al. Adaptive selection mechanism based on distributed interference alignment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(1): 64–70.)
- [4] BAZZI S, DIETL G, UTSCHICK W. Interference alignment via minimizing projector distances of interfering subspaces[C]// IEEE 2012 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. [S.l.]: IEEE, 2012.
- [5] YANG J, SONG R, DONG H. Interference alignment scheme for downlink multi-carrier MIMO cellular systems[J]. Journal of Computational Information Systems, 2014, 10(3): 1053–1064.
- [6] 王勤民, 张忠培, 常青美, 等. 干扰信道中一种权值可调的迭代算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2850–2854. (WANG Qinmin, ZHANG Zhongpei, CHANG Qingmei, et al. An iterative algorithm with adjustable weight for interference channel[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(12): 2850–2854.)
- [7] CHEN Liang, XIE Peizhong. A weighted optimization interference alignment algorithm in the MIMO interference channel[J]. Journal of Computational Information Systems, 2015, 11(4): 1187–1194.
- [8] WANG Yuan, ZHANG Zhongpei. Three-cell MIMO interfering broadcast channels based serial iterative interference alignment algorithm[J]. ICIC Express Letters, Part B: Applications, 2014, 5(4): 1133–1139.
- [9] FENG S, YOU X H, MAO W, et al. Hybrid interference alignment and power allocation for multi-user interference MIMO channels[J]. Science China(Information Sciences), 2013, 56(4): 1–9.
- [10] PATCHARAMANEPAKORN P, DOUFEXI A, ARMOUR S. Equivalent expressions and performance analysis of SLNR precoding schemes: a generalisation to multi-antenna receivers[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(6): 1196–1199.
- [11] 孙垂强, 葛建华, 朱斌, 等. 匹配加权信号泄漏噪声比多用户预编码迭代算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(4): 70–75. (SUN Chuiqiang, GE Jianhua, ZHU Bin, et al. Multiuser iterative precoding algorithm based on matching weighted Signal-to-Leakage-and-Noise Ratio[J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(4): 70–75.)

作者简介:



代龙震(1990-), 男, 湖北省十堰市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星与移动通信.email:dlz_dai@163.com.

崔维嘉(1976-), 男, 辽宁省丹东市人, 副教授, 主要研究方向为卫星与移动通信.

王大鸣(1971-), 男, 辽宁省大连市人, 教授, 主要研究方向为卫星与移动通信.