

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.014

引用格式:田增山,谷杰,王勇.CDMA 系统频偏相偏补偿算法的改进与实现[J].电讯技术,2014,54(1):74-78.[TIAN Zeng-shan, GU Jie, WANG Yong. Improvement and Implementation of Frequency and Phase Compensation Algorithm Based on CDMA System[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(1): 74-78.]

CDMA 系统频偏相偏补偿算法的改进与实现*

田增山,谷 杰**,王 勇

(重庆邮电大学 重庆市移动通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘 要:鉴于 CDMA2000 系统下行同步过程中频偏估计的重要性,针对传统的时频二维联合估计算法存在计算复杂度高且不能快速跟踪频偏状态的缺点,提出了一种基于前向导频信号的频偏校正算法,即提取导频信号作参考,在系统能够容忍的最大频偏范围内对前向信道进行频偏相偏补偿。实验结果表明,该算法在 CDMA2000 高速移动环境下,能够连续快速对频偏相偏进行校正。

关键词:CDMA2000;导频校正;载波频偏;相偏;补偿算法;基带算法

中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)01-0074-05

Improvement and Implementation of Frequency and Phase Compensation Algorithm Based on CDMA System

TIAN Zeng-shan, GU Jie, WANG Yong

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In view of the importance of frequency offset estimation in the downlink synchronization for CDMA2000 system and the disadvantage of the time-frequency two-dimensional traditional joint estimation algorithm's high computational complexity and insensitivity for the tracking frequency offset state, this paper proposes an algorithm of frequency offset correction based on pilot signal, which can achieve frequency offset and phase offset compensation even for the maximum frequency offset. The experimental results show that the algorithm can realize frequency offset correction continuously and rapidly in CDMA2000 high-speed mobile environment.

Key words: CDMA2000; pilot correction; phase offset; frequency offset; compensation algorithm; base-band algorithm

1 引 言

由于 CDMA2000 系统采用了数字化接收机,通常会带来载波频偏。载波频偏主要由两方面原因造成:发射机和接收机的本地振荡器频率存在误差和多普勒频移。对于 CDMA2000 传输系统,其接收机

对于载波频偏十分敏感,因此在数字接收机中采用快速高效算法对频差和相差进行估计补偿从而实现同步是很有必要的。

CDMA2000 系统频偏估计算法主要分为以下 3 类:基于数据辅助的信号相关算法^[1-2]、基于本地序

* 收稿日期:2013-11-06; 修回日期:2013-12-19 Received date:2013-11-06; Revised date:2013-12-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61301126);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2013jcyjA40041);重庆邮电大学博士启动基金(A2012-33);重庆邮电大学青年科学研究项目(A2012-77)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61301126); The Foundation and Cutting-edge Research Plan Item of Chongqing (cstc2013jcyjA40041); Doctor Start-up Foundation of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2012-33); The Youth Science Research Item of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2012-77)

** 通讯作者:304489696@qq.com Corresponding author:304489696@qq.com

列的时频二维联合搜索算法^[3]和基于期望最大化(EM)的迭代优化算法^[4]。

第一类算法在系统初始频偏较大时会导致训练序列的自相关性和互相关性遭到破坏,从而引起算法失效。第二类算法通过利用本地 PN 序列与接收信号互相关特性,对接收信号的功率进行遍历搜索,根据找到功率峰值确定频偏的大小。尽管此类算法有可能应用于高速移动环境,但是需要大量的接收信号进行预估计,而且频率步长大小的选择直接影响算法的估计精度和计算量,对于复杂的 CDMA 蜂窝系统环境难以实用。第三类算法采用循环迭代方法或通过构造相互正交的信号与噪声空间来获得信道的频偏估计,尽管也能够获得良好的频偏估计值,但是同样要付出计算复杂度高的代价,不能应用在系统需要快速跟踪频偏状态的环境。

由于上述原因,本文首先通过相位差分改进了基于数据辅助的频偏校正算法,从而对抗大频偏影响的情况;在时频二维搜索算法的基础上,为了减小系统基带算法复杂度,进而提出了更加简便高效的导频校正算法。导频信道使用全 1 的 walsh 作为专用扩频码,接收机利用导频信道扩频码与其他前向信道扩频码不同的均值特性,得到导频接收信号的近似成分,并从中利用相位角提取方法得到载波频偏估计值,或直接实现对频偏相偏的校正。

2 系统模型

CDMA2000 发送端经过频率调制后,发送端信号 $S(t)$ 可表示为

$$S(t)=S_I(t)\cos(2\pi ft)+S_Q(t)\sin(2\pi ft)\tag{1}$$

式中, S_I 、 S_Q 分别为输入 I、Q 两支路经短码加扰信号, f 为发送端的载波频率。

接收端经数字下变频后^[5],得到 I、Q 两路信号:

$$R_I(t)=S(t)\cos[(2\pi f+\Delta f)t+\varphi]\tag{2}$$

$$R_Q(t)=S(t)\sin[(2\pi f+\Delta f)t+\varphi]\tag{3}$$

式中, Δf 为接收端载波相对于发送端载波频率的偏移, φ 为接收端相对发送端的相位偏移。通过低通滤波器,忽略幅度影响,信号输出可表示为

$$R(t)=[S_I+jS_Q]\exp(j(2\pi\Delta ft+\varphi))\tag{4}$$

由于频率偏移 Δf 和相位偏移 φ 的存在,将对 CDMA2000 基带信号解调的判决产生影响。相位被旋转出检测区域后解调时必然出现错误,使得误码率迅速恶化,甚至导致基带处理时无法正确译码,因此在信道解码前必须进行频偏相偏估计和补偿。

3 相位差分算法改进

3.1 相位差分算法改进

传统的基于数据辅助的频偏校正算法受信道、终端移动环境影响较大,存在很大的偶然性^[6],当频率偏差过大或过小时算法一般难以对频偏进行精确估计和补偿。

相位差分校正算法虽然也是利用数据辅助的思想,但利用了训练序列的相关特性,提取相关序列的同步信号作为差分信号提取辐角值,然后采用多帧数据相位差分求频偏平均进行频偏补偿。

设 M_i 为接收到的训练序列, m_i 为本地参考训练序列,其中, N 为训练序列的长度, $1\leq i\leq N$ 。若只考虑频偏对接收信号的影响,则有

$$M_i=m_i*\exp(j2\pi\Delta fit_c+\Delta\varphi)\tag{5}$$

其中, Δf 为频偏, $\Delta\varphi$ 为初始相位偏移。则

$$M_i*m_i^*=\exp(j2\pi\Delta fit_c+\varphi+\Delta\varphi)\tag{6}$$

其中, m_i^* 表示 m_i 的共轭。可得到

$$\text{angle}(M_i\times m_i^*)=2\pi\Delta fit_c+\varphi+\Delta\varphi\tag{7}$$

其中, $\text{angle}(M_i*m_i^*)$ 表示 $M_i*m_i^*$ 的相角。设

$$\begin{cases} \Delta\Phi_1=\frac{\sum\text{angle}(M_k*m_k^*)}{N/2} \\ \Delta\Phi_2=\frac{\sum\text{angle}(M_{k+N/2}*m_{k+N/2}^*)}{N/2} \end{cases}\tag{8}$$

$$\Delta\Phi=\Delta\Phi_2-\Delta\Phi_1\tag{9}$$

其中, k 取 1 至 $N/2$ 整数, $\Delta\Phi_1$ 、 $\Delta\Phi_2$ 为训练序列前后 $N/2$ 码片的平均相角,那么 $\Delta\Phi$ 即为差分信号前后的相位差。显然, $\Delta\Phi$ 即为频偏 Δf 在时间上积累的结果,即

$$\Delta\Phi=2\pi\Delta fit_c*(N/2)\tag{10}$$

$$\Delta f=\Delta\Phi/T\tag{11}$$

其中, T 为 $N/2$ 码片传输总时间。

3.2 仿真结果及分析

一个短码周期对应 32 768 个传输码片。首先对接收信号进行分组,然后对每组数据做频偏估计,再对同一组内前后两段数据分别去 PN 短码解扰求和取辐角,两者之差即为相差,再根据式 (11) 由相差解得频差。通过硬件平台采集 64 帧单倍采样的 CDMA2000 空中信号进行上述处理,求得平均值即为最终频偏估计值。

图 1 为短码同步后经过 walsh 解扩后的星座图,未进行频偏相偏校正的数据散乱分布于坐标内,相位解调时必然产生误判。

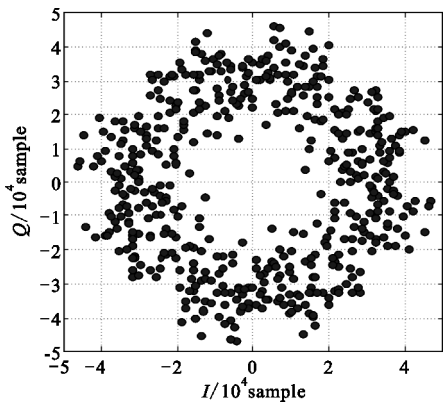


图 1 CDMA2000 采集信号星座图

Fig. 1 Constellation of CDMA2000 signal collected

图 2 为通过相位差分频偏校正后的星座图。由图可知,算法大大减小了频偏对信号产生的影响,尽管受噪声的影响并不能完全聚于一点,但坐标区域内随机分布的数据向 4 个区域集中,校正算法对数据明显起到了频偏修正作用。

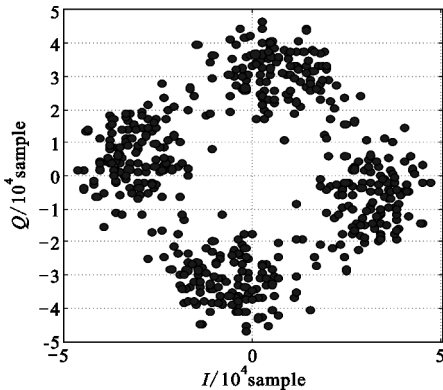


图 2 经过频偏校正后的星座图

Fig. 2 Constellation after frequency offset correction

频偏校正完成后,由于累计频偏导致的相偏依旧存在,还必须进行相偏补偿从而使得集中分布在 4 个区域的信号相位旋转集中在 4 个象限对角线处。图 3 为依次经过频偏、相偏校正之后的星座图,此时的校正信号能够正确进行解调和判决。

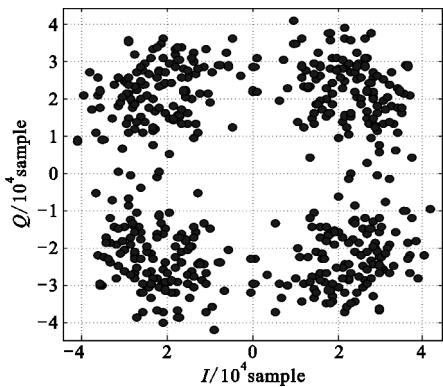


图 3 经过相偏校正后的星座图

Fig. 3 Constellation after frequency offset and phase offset correction

3.3 算法存在问题分析

相位差分校正算法虽然能较准确地估计载波频偏,但是由于使用连续多帧基带数据进行频偏估计值的计算,这种方法需要的原始数据量大,实时性较差,这样也就使得信号处理复杂度大大提高。

综上所述,对于基带传输速率达 1. 2288 Mchip/s 的 CDMA2000 系统而言,在基带平台 DSP 或 FPGA 中执行此算法复杂度较高的过程是很有压力的,所以寻找一种更加高效的校正算法十分必要。

4 基于导频校正的改进算法

4.1 算法改进

图 4 为 CDMA2000 前向信道传输模型。由于 CDMA2000 系统含有的导频信道传输符号全为 0 (映射后全为 1),再用号码为 0 的 walsh 向量进行扩频。接收端提取导频信号与发端原始导频信号进行运算得到频偏、相偏估计值,对其他信道接收信号进行校正。实际上频偏随着时间的积累会表现为相偏,那么对于导频校正算法而言,特定时刻对应采样信号的频偏和相偏都可归为相偏去补偿,即下文涉及的相位偏差既包含了频率偏差也包含了相位偏差。

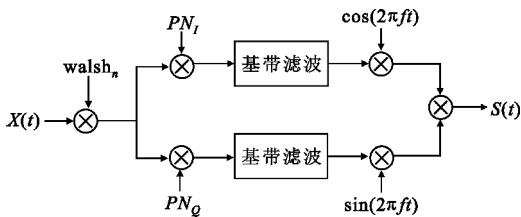


图 4 前向信道传输模型

Fig. 4 Forward channel transmission model

设发送信号为

$$x(n)=p(n)\sum x_m(n)\text{walsh}_m(n)\tag{12}$$

其中, $x_m(n)$ 为信道 m 中所传输的双极性符号, $\text{walsh}_m(n)$ 为信道 m 对应的 walsh 函数, $p(n)$ 为本地 PN 序列。

接收机接收到的信号为

$$y(n)=Ae^{j\varphi(n)}x(n)+v(n)\tag{13}$$

其中, A 为幅度衰减系数, $\varphi(n)$ 为相偏, $v(n)$ 为加性高斯白噪声。接收端进行 PN 解扰并利用其正交特性可得到

$$\begin{aligned}r_1(n)&=y(n)p^*(n)=\\&Ae^{j\varphi(n)}p(n)p^*(n)\sum(x_m(n)\text{walsh}_m(n))+\\&v(n)p^*(n)=\end{aligned}$$

$2Ae^{j\phi(n)} \sum x_m(n) \text{walsh}_m(n) + v(n)p^*(n)$

然后对数据解扩频,导频信道使用号码为 0 的 walsh 正交函数,并且导频信息已知:

$$r_2(n) = r_1(n) \text{walsh}_0(n) =$$
$$(2Ae^{j\phi(n)} \sum x_m(n) \text{walsh}_m(n) +$$
$$v(n)p^*(n)) \text{walsh}_0(n) =$$
$$2Ae^{j\phi(n)} x_0(n) = 2Ae^{j\phi(n)} \quad (14)$$

由于 walsh 函数具有良好的正交特性,可屏蔽其他信道上的信号,同时噪声也被弱化。根据式 (14) 可知 $r_2(n)$ 可作为相位偏差的估值对其他前向信道进行校正。

导频校正算法实现思想:首先对下行信道数据去 walsh 函数解扩频,得到导频信号估计值,即隐含的相偏估计值;然后对导频信号取共轭进行相位偏差补偿,推导如下:

$$s(n) = r_1(n) \text{walsh}_k(n) =$$
$$(2Ae^{j\phi(n)} \sum x_m(n) \text{walsh}_m(n) +$$
$$v(n)p^*(n)) \text{walsh}_k(n) =$$
$$2Ae^{j\phi(n)} x_k(n) \quad (15)$$

$$s(n)r_2^*(n) = (2Ae^{j\phi(n)} x_k(n))(2Ae^{-j\phi(n)}) =$$
$$A_0 x_k(n) \quad (16)$$

其中, $A_0 = 4A^2$ 。

由此可见,相位的偏转得以校正,最后所得值即为第 k 个 walsh 向量所对应下行信道的原始信息,只是在幅值上发生了变化,从而实现了 CDMA2000 下行信道频偏和相偏的补偿。

综上所述,导频校正算法具体实现步骤可归纳为以下 4 步:

- (1) 对接收数据进行去 PN 码的操作,即将接收数据分别乘以对应 PN 码的共轭;
- (2) 使用导频信道号码为 0 的 walsh 函数进行去 walsh 正交处理,将结果作为相位偏差的估计值;
- (3) 对下行信道数据进行去 walsh 函数的处理;
- (4) 使用第 2 步中得到的相位偏差估计值对各个信道的数据进行校正,即乘以该估计值的共轭。

4.2 仿真结果及分析

同样对 3.2 节所述采集的 CDMA2000 实际空中信号进行处理,在 Windows XP 系统中 Matlab R2009b 运行环境下进行仿真。图 5 为经过导频校正之后的前向信道星座图。由星座图可知,复信号集中分布在 4 个象限并关于坐标原点对称,符合 QPSK 相位调制的特征,校正算法取得了比较好的效果。

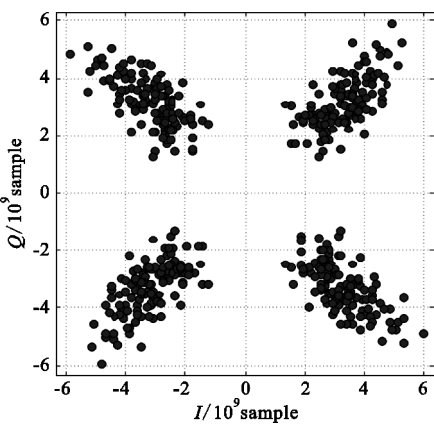


图 5 导频算法校正结果星座图
Fig. 5 Constellation after pilot correction algorithm

根据 CDMA2000 协议,设置最大频偏 1 kHz,使用误差均方值 (MSE) 来评估本文中导频校正算法和相位差分算法的频偏估计性能,两者分别进行 1 000 次独立重复实验。

图 6 为高斯白噪声信道下两种算法在不同信噪比环境下频偏估计性能,仿真结果表明在信噪比较小时两者差别不大;当信噪比大于 0 dB 时,导频校正算法频偏估计性能明显优于相位差分估计算法,而且频偏估计值始终保持较低的错误率,与信噪比变化基本无关。

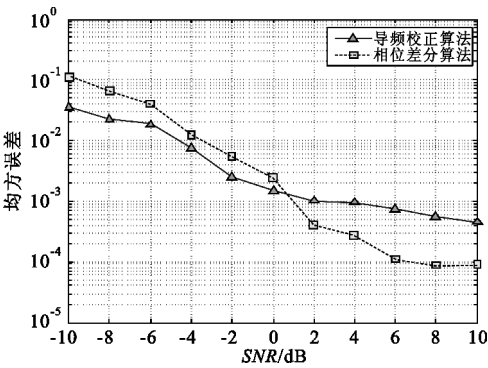


图 6 不同算法频偏估计均方误差
Fig. 6 MSE of frequency offset estimation for different algorithms

表 1 给出了导频校正算法和相位差分估计算法的计算复杂度以及算法在 Matlab R2009b 运行环境下的执行时间,其中 PC 机 CPU 主频为 3.3 GHz。由表 1 可知,导频校正算法在复杂度上远小于后者,原因在于本文提出的算法利用了导频信号信息已知的特性,将频偏和相偏一起整体处理,避免了先校频偏再校相偏的多次复数相乘和相加,同时避免 FFT 运算,极大减小了运算量。

表 1 不同算法复杂度

Table1 Complexity for different algorithms		
算法	复数相乘次数	运行时间/s
导频校正算法	65 664	0.000 097
相位差分算法	8 453 888	0.013 250

导频校正算法对采集的 CDMA2000 信号进行频偏补偿后,经过后续基带算法处理后再进行物理层解码和消息解析,最终通过 CRC 校验,提取到了有效的基站前向信道消息,再次证实了该导频校正算法是切实可行的。

5 结束语

频率同步在 CDMA 系统中有着重要的作用,是进行小区搜索的第一步,对其进行详细研究并进行改进具有很大的现实价值。

本文首先使用相位差分对基于数据辅助的频偏校正算法进行了改进,较好地解决了 CDMA 系统频偏过大或过小导致估计值不精确的问题。在此基础上,针对传统算法以及改进的相位差分算法存在复杂度过高的问题,提出了一种基于导频信号实现频偏校正的高效方法。对导频校正算法和相位差分算法进行了详细比较,先从理论上分析了两种算法的原理,针对算法性能和运算复杂度两方面又进行了实验对比,结果表明导频校正算法性能良好,在 CDMA2000 系统能够容忍的最大频偏范围内能够快速有效地对接收信号进行频偏补偿,并且可最大限度地减少基带算法计算量。最后通过硬件平台采集实际空中信号进行解析,验证了该算法可满足实际应用的要求。

参考文献:

[1] Awoseyila A B, Kasparis C, Evans B G. Improved preamble-aided timing estimation for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2008,12(11):825-827.

[2] 许华, 郑辉, 张冬梅. 基于“数据重用”的常模盲均衡算法分析[J]. 通信学报, 2009(7): 73-77.

XU Hua, ZHENG Hui, ZHANG Dong-mei. Analysis of constant modulus blind equalization algorithms base on "data reuse" [J]. Journal on Communications, 2009 (7): 73-77. (in Chinese)

[3] Xing H, Rinne J. The performance analysis of a two dimensional CDMA system for frequency selective channels [C]//Proceedings of 1998 Global Telecommunications Conference. Sydney, NSW:IEEE,1998:2537-2542.

[4] Chien F T, Kuo C C J. Blind recursive tracking of carrier frequency offset (CFO) vector in MC-CDMA systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007,6(4): 1246-1255.

[5] 郭晓亮, 张有光, 张光山. 二维扩频系统帧同步技术研究及 FPGA 实现[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (7): 2274-2277.

GUO Xiao-liang, ZHANG You-guang, ZHANG Guang-shan. Research and FPGA implementation of frame synchronization technology for two-dimensional spread spectrum system [J]. Computer Engineering and Design, 2011,32(7): 2274-2277. (in Chinese)

[6] Chin W L,Chen S G. A blind synchronizer for OFDM systems based on SINR maximization in multipath fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2009,58(2): 625-635.

作者简介:



田增山(1968—),男,河南人,1999 年于电子科技大学获博士学位,现为教授,主要研究方向为个人通信、卫星导航、无线定位、信号检测与估计;

TIAN Zeng-shan was born in Henan Province, in 1968. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2002. He is now a professor. His research interests include personal communications, satellite navigation, wireless localization and signal detection and estimation.

谷 杰(1990—),男,山东人,硕士研究生,主要研究方向为个人通信、信号检测与估计;

GU Jie was born in Shandong Province, in 1990. He is now a graduate student. His research interests include personal communications,signal detection and estimation.

Email: 304489696@qq.com

王 勇(1991—),男,四川人,硕士研究生,主要研究方向为个人通信、信号检测与估计。

WANG Yong was born in Sichuan Province, in 1991. He is now a graduate student. His research interests include personal communications,signal detection and estimation.