

CMMB 系统中的符号与时钟同步方案

游寒旭, 陈咏恩

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092)

摘要: 提出一种基于中国移动多媒体广播(CMMB)系统的符号同步与时钟同步方案, 其中, CMMB 系统是基于正交频分复用(OFDM)实现的。为正确获得 CMMB 系统中 OFDM 符号的起始位置, 并消除采样时钟偏差对系统的影响, 将信标符号与循环前缀相结合, 给出基于 OFDM 的符号同步方案, 包括获取与跟踪 2 个阶段, 以解决系统符号同步问题, 同时利用 OFDM 符号中的离散导频对采样时钟频率偏差进行估计, 取其均方误差作为验证标准, 从而实现系统的时钟同步。仿真结果表明, 该方案有效可行。

关键词: 中国移动多媒体广播; 正交频分复用; 符号同步; 循环前缀; 离散导频; 采样时钟同步

Symbol and Clock Synchronization Scheme in CMMB System

YOU Han-xu, CHEN Yong-en

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

【Abstract】 In this paper, a novel symbol and clock synchronization scheme for Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM)-based China Mobile Multimedia Broadcasting(CMMB) is presented. Based on the fact that CMMB system is sensitive to the symbol and clock synchronization error, this paper gives a solution which uses the beacon of slot and Cycle Prefix(CP) to catch and tracing the window position. Clock error estimate is done with scatter pilot of OFDM symbol. The Root Mean Square Error(RMSE) of sampling time error is calculated as the standard of the scheme performance. Simulation results show the scheme is effective and feasible.

【Key words】 China Mobile Multimedia Broadcasting(CMCC); Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM); symbol synchronization; Cycle Prefix(CP); scatter pilot; sampling clock synchronization

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.04.091

1 概述

中国移动多媒体广播(China Mobile Multimedia Broadcasting, CMMB)标准是由中国国家广播电影电视总局广播科学院提出, 并于 2006 年 11 月 1 日正式实施的中国广播电影电视行业标准。它适用于在 30 MHz~3 000 MHz 的频率范围内, 通过卫星和/或地面无线发射电视、广播、数据信息等多媒体信号的广播系统^[1]。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制技术具有很强的抗多径能力和极高的频谱利用率, 因此被广泛地用于宽带数字通信领域。IEEE 802.11a、数字视频广播标准(DVB)^[2]、数字音频广播标准(DAB)都把 OFDM 作为物理层的传输调制技术。可以预计, 第 4 代移动通信(4G)技术也将以 OFDM 作为主要的调制方式^[3]。

同步技术是 OFDM 系统的关键技术。OFDM 系统对同步误差非常敏感, 微小的码间干扰(ISI)和子载波串扰(ICI)都将影响系统的性能。OFDM 系统的同步主要包括符号同步、时钟同步以及载波同步。符号同步的目的在于确定 OFDM 符号 FFT 窗口起始位置; 时钟同步的目的是使接收端的接收时钟频率与发送端的发送频率保持一致。符号同步与时钟同步本质上都是恶化符号定时同步问题, 恶化了系统的时钟同步性能^[4]。为此, 本文提出一种基于 CMMB 系统的符号同步与时钟同步方案, 并对其进行研究。

2 CMMB 帧结构系统模型

CMMB 物理层信号每 1 秒为 1 帧, 划分为 40 个时隙。每个时隙长度为 25 ms, 包括 1 个信标和 53 个 OFDM 符号, 信标结构包括发射机标识信号(TxID)以及 2 个相同的同步信

号^[1], 如图 1 所示。

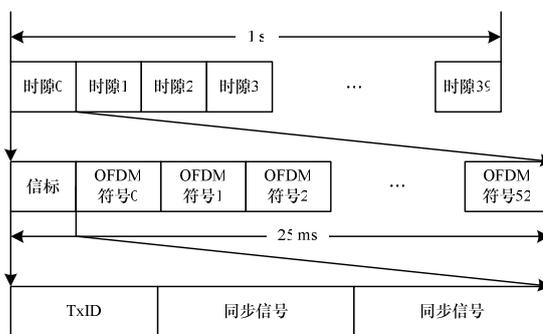


图 1 CMMB 系统的帧与时隙结构

3 同步信号及 OFDM 信号模型

同步信号 $S_b(t)$ 为频带受限的伪随机信号, 表达式如下:

$$S_b(t) = \frac{1}{N_b} \sum_{i=0}^{N_b-1} X_b(i) e^{j2\pi(\Delta f)_b t} \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (1)$$

其中, N_b 为同步信号子载波个数; $X_b(i)$ 为二进制伪随机序列的 BPSK 调制信号; $(\Delta f)_b$ 是同步信号子载波间隔; T_b 是信号持续时间。

OFDM 调制是将有效数据通过编码交织, 然后对其进行 QAM 映射, 插入导频加扰, 再通过 IFFT 映射为 OFDM 符号。其表达式如下:

作者简介: 游寒旭(1987—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 信号与信息处理; 陈咏恩, 教授、博士生导师

收稿日期: 2011-07-05 **E-mail:** gongzihan2010@gmail.com

$$S(t) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s-1} Z(i) e^{j2\pi(\Delta f)_s (t - T_{CP})} \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2)$$

其中, N_s 表示 OFDM 子载波个数; $Z(i)$ 表示 IFFT 输入信号; $(\Delta f)_s$ 表示 OFDM 子载波间隔; T_{CP} 表示 OFDM 符号循环前缀长度; T_s 表示 OFDM 符号长度。

假设基带信号表示为 $u(t)$, 基带信号由信标和 OFDM 符号组成, 则发送端基带信号通过上变频即生成发射信号^[2]; 又假设信号中存在 L 多径信道, 第 l 条路径的增益为 α_l , 时延为 τ_l , 则信道冲激响应为:

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_l \delta(t - \tau_l) \quad (3)$$

则发射机通过信道到达接收机, 再利用相干载波下变频, 则信号可表示为:

$$z(t) = [u(t) e^{j(2\pi f_c t + \phi_1)} \times h(t)] e^{-j(2\pi f_c t + \phi_2)} + \omega(t) = u(t) h(t) e^{j(2\pi \Delta f t + \Delta \phi)} + \omega(t) \quad (4)$$

其中, $\omega(t)$ 为加性高斯白噪声(AWGN)信道噪声; Δf 为载波偏移; $\Delta \phi$ 为相位偏移。

4 同步算法

本文提出的符号同步算法分为符号同步获取和符号同步跟踪 2 个阶段。

在频率选择性信道中, 多径效应使得 OFDM 符号在时间轴上被扩散, 循环前缀(CP)被前一个符号的串扰。因此在整个 CP 内, 只有部分范围适合开窗, 而只要定时位置落在适当的区域内, 则可以避免 ISI。从文献[1]可知, CMMB 符号中插入了离散导频和连续导频, 符号定时引起的相位偏差作用在导频上, 这样在此处由定时引起的相位偏转可以再频域后处理。将接收到的数据在频域内与信道估计作共轭相乘, 可以消除定时偏差引起的相位旋转。

4.1 符号同步获取阶段

符号同步获取阶段也可称为时隙同步阶段。在多径信道下, 信号经过多个信道之后被同时接收, 空间上表现为不同时刻的符号混叠, 造成符号间干扰。利用 CMMB 信标中具有 2 个相同的同步符号的特点, 对信标中的 2 个同步符号作相关运算。同步符号在信道中所受到的干扰是同样的, 这样利用同步符号作相关运算, 保证了符号的开窗位置位于能量最大位置附近, 从而减少了信号的能量损失。由于信标中 2 个同步符号间隔为 $D=2048$ 个采样, 则有:

$$M(d) = \frac{\sum_{l=d}^{d+D} z(l) z^*(l+D)}{\sum_{l=d}^{d+D} |z(l+D)|^2} \quad (5)$$

通常地, $z(l)$ 与 $z(l+D)$ 是相互独立的信号。只有当两者相同时, $M(d)$ 达到最大值。设定判决门限为 TH , 当 $M(d)$ 的值达到或者大于 TH 时, 则可以确定时隙的到来, 从而获取同步位置 $d_{\max} = \max\{M(d)\}$ 。

4.2 符号同步跟踪阶段

获取同步之后, 通常延迟 N 采样之后即为 OFDM 符号。为进一步确定 OFDM 符号的 FFT 窗口起始位置, 本文提出利用 OFDM 的循环前缀的相关性, 实现符号同步跟踪的目的。已知 OFDM 符号前缀是由 OFDM 符号尾部的 $K=512$ 个数据组成, 这里可作 K 点相关运算有:

$$R(m) = \frac{\sum_{l=m}^{d+K} z(l) z^*(l + N_s)}{\sum_{l=m}^{d+K} |z(l + N_s)|^2} \quad (6)$$

其中, N_s 为 OFDM 符号子载波个数。在 OFDM 符号起始位置存在一个 $R(m)$ 的峰值, 即达到跟踪的目的。

实现开窗的 OFDM 符号, 再利用其离散导频实现符号细同步, 从而确定 OFDM 符号精确的起始位置。在 CMMB 系统中, 离散导频根据时隙和物理层带宽的不同而位置不同^[5]。首先对开窗后的 OFDM 符号作“去零”处理, 取得有效子载波数据, 再利用本地离散导频符号与有效数据作相关运算, 调整 OFDM 符号的相位偏转。

$$U(d) = \frac{\sum_{i=0}^{N_{scater}-1} Z(k_i + d) P_s^*(k_i)}{\sum_{i=0}^{N_{scater}-1} |P_s(k_i)|^2} \quad (7)$$

其中, N_{scater} 为离散导频个数; k_i 为离散导频位置; $d \in [-L, L]$, L 为适当的偏移范围。当 $d_{\max} = \max\{U(d)\}$ 时, 即可得精确的 OFDM 符号开窗起始位置。本文算法利用了 OFDM 符号中的离散导频符号, 可利用个数远大于连续导频符号。而且离散导频符号的位置每隔一个 OFDM 符号, 其在符号中的位置是相同的。

本文算法在同步获取阶段采用了时隙的信标作相关运算, 而在同步跟踪阶段采用的是 OFDM 符号中的 CP 序列, 与原始算法相比较, 无需预存本地序列, 节省了存储空间。而跟踪阶段的符号粗细同步利用了数量更多的离散导频, 这使得符号同步更精确有效。

4.3 时钟同步算法

时钟频偏对于符号的影响是缓变的, 本文利用了相邻的导频符号之间的相关性估计时钟频偏^[6-7]。

由离散导频插入的特点可知, 在每相隔一个 OFDM 符号, 插入导频的位置是相同的, 即第 N 位符号与第 $N-2$ 个符号具有相同的离散导频位置。采样时钟的偏移最终体现在符号的相位偏移上, 则有:

$$\zeta_l = \frac{N_s}{2\pi(N_s + N_g) \Delta K} \left[\frac{\arg(\sum_{k_i \in right} \gamma_{l,k_i}) - \arg(\sum_{k_i \in left} \gamma_{l,k_i})}{2} \right] \quad (8)$$

其中, $\gamma_{l,k_i} = Z_{l,k_i}^* Z_{l+2,k_i}$; k_i 为离散导频位置; ΔK 为导频间隔; $left, right$ 分别表示离散导频符号的前半部分和后半部分位置的集合; $\arg()$ 表示相位。

由上式可得时钟频偏估计范围为:

$$\Gamma \in \left[-\frac{N_s}{2(N_s + N_g) \Delta K_{\max}}, \frac{N_s}{2(N_s + N_g) \Delta K_{\max}} \right] \quad (9)$$

其中, ΔK_{\max} 为最大导频间隔。对于 CMMB 系统 8 MHz 模式, $N_s=4096$, $N_g=512$, $\Delta K_{\max}=3066$ 。则时钟频偏估计范围为 $[-0.000145, 0.000145]$, 即 ± 145 ppm; 对于一般情况下收发端的归一化时钟频偏不会超过 10^{-4} (100 ppm), 所以上述算法是有效的。

5 仿真结果

为验证算法的可行性, 将粗符号定时同步和细符号定时同步算法在 AWGN 信道和表 1 所示的典型信道模型下进行计算机系统仿真。只考虑基带数字信号的仿真, 没有考虑 RS 编码、字节交织、LDPC 编码、比特交织等。CMMB 系统有关仿真参数如下: 仿真时隙长度 25 ms; 时隙个数 2; 系统带宽 8 MHz; OFDM 符号持续时间 409.6 μ s, 子载波数 $N_s=4096$; 有效子载波数 $N_v=3076$; OFDM 前缀长度 $N_{CP}=512$; 连续导频个数 82, 离散导频个数 384; 星座图映射 BPSK, 16QAM; 保护间隔 2.4 μ s, 即 24 点。多径信道模型如表 1 所示^[8]。

表1 多径信道模型

信道标号		多径1	多径2	多径3	多径4	多径5	多径6
Brazil-B	延迟/ μ s	0.0	0.3	3.5	4.4	9.5	12.7
	幅度/dB	0.0	-12.0	-4.0	-7.0	-15.0	-22.0
IMT-2000	延迟/ μ s	0.0	0.3	8.9	12.9	17.0	20.0
	幅度/dB	-2.5	0.0	-12.0	-10.0	-25.0	-16.0
GSM-TU	延迟/ μ s	0.0	0.2	0.5	1.6	2.3	5.0
	幅度/dB	-3.0	0.0	-2.0	-6.0	-8.0	-10.0
CT-8	延迟/ μ s	0.0	1.8	2.0	3.6	7.5	31.8
	幅度/dB	-18.0	0.0	-20.0	-20.0	-10.0	0.0
Brazil-E	延迟/ μ s	0.0	1.0	2.0	—	—	—
	幅度/dB	0.0	0.0	0.0	—	—	—

在图2给出了幅度为20 dB时,在Brazil-B多径信道下,符号同步获取与跟踪比较结果。可以看出,本文的符号同步算法能够有效地实现获取和跟踪同步信息。当信号接收机捕获到信号时,即转入同步跟踪阶段。同步获取阶段先于同步跟踪阶段400 μ s左右(2个信标同步信号的时长)。

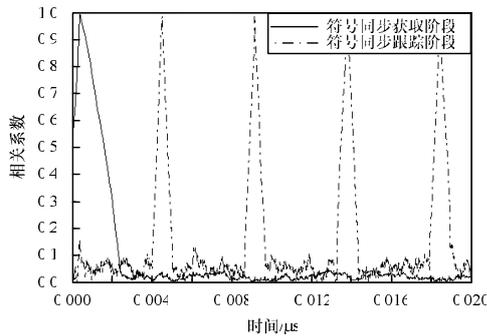


图2 符号同步获取与跟踪比较

图3给出了不同信道下的误码率曲线。可以看出,随着信噪比的增大,误码率规律呈下降趋势,误码率越来越小。其中,在CT-8和Brazil-E信道下,误码率有波动,这是因为这2个信道分别存在2个和3个等强径。其中,CT-8信道的2个等强径间隔318 μ s,符号同步误判比例相对较高,所以,波动比较大。

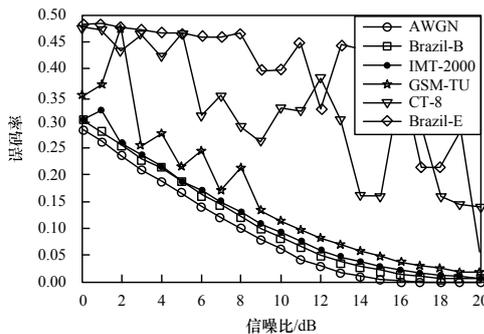


图3 不同信道下的误码率曲线

(上接第277页)

参考文献

[1] 彭德坤, 宋红军, 刘博阳. 基于RM调度的任务抢占次数最多分析[J]. 计算机工程, 2009, 35(8): 263-265.

[2] Wang Yun, Saksena M. Scheduling Fixed-priority Tasks with Preemption Threshold[C]//Proc. of the 16th Int'l Conf. on Real-time Computing Systems and Applications. Hong Kong, China: [s. n.], 1999.

[3] 金宏, 王强, 王宏安, 等. 基于动态抢占阈值的实时调度[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(3): 393-398.

[4] 谭云福, 刘杰, 刘国华. Linux中一种改进的实时调度算法及

下面考察时钟频偏估计有效性。图4为时钟频偏估计方差曲线。可以看出,信噪比越大,时钟频偏的估计就越精确,AWGN信道下的时钟同步估计性能是好于多径信道的。而到信噪比小于0 dB时,时钟频偏估计有失真。多径信道下时钟同步估计性能同时受到信道特性和导频位置的影响。

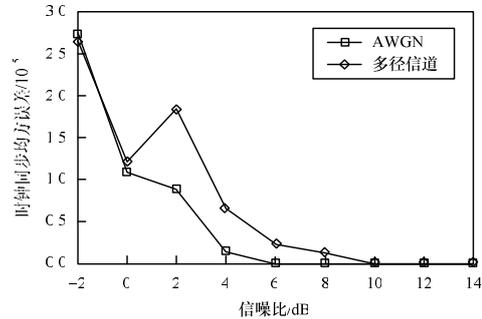


图4 时钟同步估计方差曲线

6 结束语

本文提出在多径衰落信道条件下,对基于CMMB标准的信号符号同步及时钟同步方案。其中,符号同步分为获取和跟踪2个阶段,并利用插入导频符号做进一步符号细同步,同时利用导频符号的相关性特点,估计系统时钟频偏。估计性能与导频位置和数量有关,并受到信道特性的影响。从实验结果看,本文方案性能较优。值得注意的是,为验证算法的准确性,只引入了微小的小数倍载波频偏,所以该方案还可以进一步扩展,从而提高系统稳定性。

参考文献

[1] 国家广播电影电视总局. GY/T 220. 1-2006 移动多媒体广播第1部分: 广播信道帧结构、信道编码和调制[S]. 2005.

[2] 董斌, 王匡, 仇佩亮. OFDM系统在多径衰落信道下的时钟同步[J]. 浙江大学学报, 2005, 39(7): 935-938.

[3] Evans B G, Baughan K. Vision of 4G[J]. Electronics and Communication Engineering Journal, 2000, 12(6): 293-303.

[4] 吴炜, 钱良, 徐友云. OFDM系统采样中补偿算法及其FPGA实现[J]. 电视技术, 2007, 47(4): 32-36.

[5] 陈秀平, 曾晓洋. CMMB接收机同步优化方案[J]. 计算机工程, 2010, 36(21): 95-97.

[6] Stefan A. OFDM Carrier and Sampling Frequency Synchronization and Its Performance on Stationary and Mobile Channels[J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2000, 46(3): 438-441.

[7] Speth A, Fock G. Optimum Receiver Design for OFDM-based Broadband Transmission-Part II: A Case Study[J]. IEEE Trans. on Communications, 2001, 49(4): 571-578.

[8] 刘喆. 基于CMMB系统的帧同步与符号同步技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

编辑 陈文

其应用[J]. 计算机科学, 2008, 35(10): 256-258.

[5] Kim S, Hong S, Kim T H. Integrating Real-time Synchronization Schemes into Preemption Threshold Scheduling[C]//Proc. of the 5th IEEE International Symposium on Object-oriented Real-time Distributed Computing. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2002: 145-154.

[6] 陈旭辉, 于国龙. 云模型优化LSF调度算法的研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(13): 3014-3016.

[7] 金宏, 王宏安, 王强, 等. 改进的最小空闲时间优先调度算法[J]. 软件学报, 2004, 15(8): 1116-1123.

编辑 张正兴

