

低信噪比下 SMCC+ 系统精确大频偏估计方案¹

罗仁泽* 王汝言** 朱维乐* 蒋涛***

*(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

** (重庆邮电学院通信与信息工程学院 重庆 400065)

*** (四川师范大学电子工程学院 成都 610068)

摘要: 该文基于由电子科技大学提出的作为中国地面数字多媒体电视广播传输标准候选方案之一的 SMCC+ 系统和 OFDM 系统, 提出了一种在低信噪比下利用特殊构造的短 PN 序列进行快速精确的大范围频率同步的方法. 经仿真证明, 信噪比在 -20 dB 范围以上时, 该法在 AWGN, 单抽头瑞利衰落信道和等值双径瑞利衰落信道环境纠正大范围频偏的性能比 Tufvesson 等人 (1999) 同类常规算法性能更优. 从理论上而言, 该算法可以估计 $1/2$ 带宽范围内的频率偏移. 显然, 该算法优于常规同类算法.

关键词: SMCC+ 系统, 频率同步, 低信噪比

中图分类号: TN93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)10-1575-05

Fast and Precise Scheme of Frequency Offset Estimation with Large Range for SMCC+ System with Lower SNR

Luo Ren-ze* Wang Ru-yan** Zhu Wei-le* Jiang Tao***

*(The College of Electron. Eng., UES of China, Chengdu 610054, China)

** (The College of Communication and Info. Eng.,

Chongqing Univ. of Posts and Telecomm., Chongqing 400065, China)

*** (Electronic Engineering Department, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

Abstract This paper proposed a fast, simple, robust and precise scheme of frequency offset estimation within a great range with lower SNR in the context of the Synchronized Multi-Carrier CDMA plus (SMCC+) system, which is one of the candidate standard of digital terrestrial multimedia/TV broadcasting transmission in China, and COFDM systems based on short Pseudo Noise sequence (PN-sequence) reconstructed by a special method. Computer simulation results show the proposed technique get better properties than the conventional synchronization techniques in AWGN, one- and two-tap Rayleigh fading channels even with lower SNR over -20 dB. In addition, the estimation range of frequency offset could be widened to half bandwidth. Obviously, the proposed scheme is much better than the conventional frequency synchronization method.

Key words SMCC+ system, Frequency synchronization, Large range, Lower SNR

1 引言

在数字移动通信系统和现存的 8-VSB^[1]、COFDM^[2]、(BST)-OFDM^[2,3] 三大数字广播电视系统中, 快速、可靠的时间、频率同步技术是其关键。

常规的频率同步算法分为两类: 盲方法和非盲方法. 盲方法如 Liu 的 MUSIC 方法^[4,5]、Tureli 的 ESPRIT 方法^[6], 这些都是基于子空间方法, 具有超分辨率性能, 但其运算量太大。

¹ 2003-07-10 收到, 2004-03-15 改回

非盲方法一般都采用已知信号的重复数据或者数据中特有的数据结构获得同步信号, 时间同步由同步信号通过阈值检测方法来获得, 频率同步也由该同步信号随之而得. 通过比较相邻符号相位和相同数据符号在 FFT 后获得频率同步的方法^[7], 该方法同步速度慢, 并且对时间同步的精度要求非常高; 利用循环前缀获得同步的方法^[8,9], 虽然没有带宽损失, 但时间同步不佳, 频率同步范围很小; 利用重复的训练序列获得同步的方法, 如: Schmidl 和 Cox 提出的利用两个符号进行同步的方法^[10] 时间同步性能不佳, Tufevesson 提出的利用 PN 序列进行同步方法^[11] 时间同步和频率同步性能较好, 但频率同步性能仍可改进.

本文介绍的一种快速、精确的大范围频偏估计同步方案正是对 Tufevesson 算法的一种改进, 改进后频率同步性能优于原算法和前面介绍的其他常规算法. 在该方案中, 首先短 PN 序列由多个 m 序列构造后并经过处理而成, 然后短 PN 序列产生同步信号, 最后由同步信号获得频率偏移信息. 该方案经仿真验证, 并与常规基于 PN 序列同步对比, 具有以下优点:

(1) 常规的同步方法多局限于信噪比较高的情况下, 而对低信噪比下的同步技术研究至今未见报道, 本文在此方面进行了探讨; 经仿真证明: 当信噪比在 -20 dB 以上时, 在 AWGN、单抽头和双抽头瑞利衰落信道中, 该法不仅能实现理想的大范围的频率校正, 而且性能均优于常规同类算法^[4-11], 且一些频偏估计的 MSE 甚至可达到 10^{-6} 或 10^{-7} . 理论分析认为该法可纠正的最大频偏为 $1/2$ 带宽;

(2) 本算法在 FFT 之前的时域实现, 与在 FFT 之后频域实现的同步相比, 所需同步时间更短, 且算法计算量小、简单、可靠.

本文由以下几部分组成: 在第 2 节介绍了 SMCC+ 系统的帧结构和基本的接收机结构. 第 3 节介绍了我们提出的新算法. 仿真结果在第 4 节. 最后, 在第 5 节给出结论.

2 系统描述

同步的多载波 CDMA(简称 SMCC+) 系统是由电子科技大学提出的, 主要是为了克服现有数字地面广播电视 (DTTB) 标准中存在的不足. 在该系统中采用了短 PN 序列与长 PN 序列相结合的多载波体制, 提出了并行时域同步技术, 固定波形短随机码逐符号时 / 频导引技术, 整秒授时精密系统同步技术, 固定波形短 PN 序列逐符号频域跟踪信道估计算法, 相位噪声的逐符号探测技术, 时 / 频相关处理的低峰平比技术, 时 / 频相关的多载波信道编码, OFDM 时 / 频处理和空 / 时宏分集 MIMO 矢量传输融合技术, 多传输质量 (Multi-QoS) 分级的信道与信源编码技术, 连续时域导频技术等.

由于篇幅原因, 本文仅讨论 SMCC+ 系统的大范围频率偏移估计技术. 该方法与现存的国际三大地面数字电视广播传输标准中的同步技术迥然不同. 与 COFDM 等系统相比, SMCC+ 系统使用了时域插入短 PN 序列和长 PN 序列来进行时间同步和频率同步.

SMCC+ 系统的发射机和接收机简图如图 1 所示. 信号帧是 SMCC+ 下链接信道的基本单元, 长 PN 序列和短 PN 序列与信息符号的配置如图 2 所示, 每秒帧分为 36 个符号帧, 每个符号帧持续 $1/36$ s. 每个符号帧内含 59 个信息符号和 59 个短 PN 序列, 其中, 最后一个信息符号为长 PN 序列, 用作下一个符号帧的定位、导引和信道均衡的主要参考符号. 长 PN 序列信息符号中, 除带有标准的短 PN 序列引导头外, 还在头、尾处带有两个短 PN 序列. 短 PN 序列起到时间同步、频率同步、时间保护间隔去除 ISI 和自适应均衡的作用.

在接收端, 以 N_p 点为基准进行傅氏变换后首先在频域进行相噪检测 / 抑制, 再经频域均衡校正消去符号间干扰和信道失真. 在频域均衡基本完善的条件下, 以 N_z 点为基准进行逆傅氏变换至时域, 恢复所传输的信息子符号和短 PN 序列. 其中最重要的是再根据恢复的有失真短 PN 序列与其期望值的差异, 自适应地提取逐符号跟踪校正, 完成固定波形短 PN 序列时 / 频自适应处理跟踪. SMCC+ 系统确保了对帧同步符号之间的快衰落达 $0.2\sim 0.5$ dB/ms 的信道 CPI 自适应跟踪.

本同步算法的主要部件是一个相关器和一个乘法器, 如图 3 所示. 首先, 接收到的信号序列与已知 PN 序列做滑动相关, 其次将相关器输出与其共扼值一起进入乘法器, 最后累加, 获得同步信号.

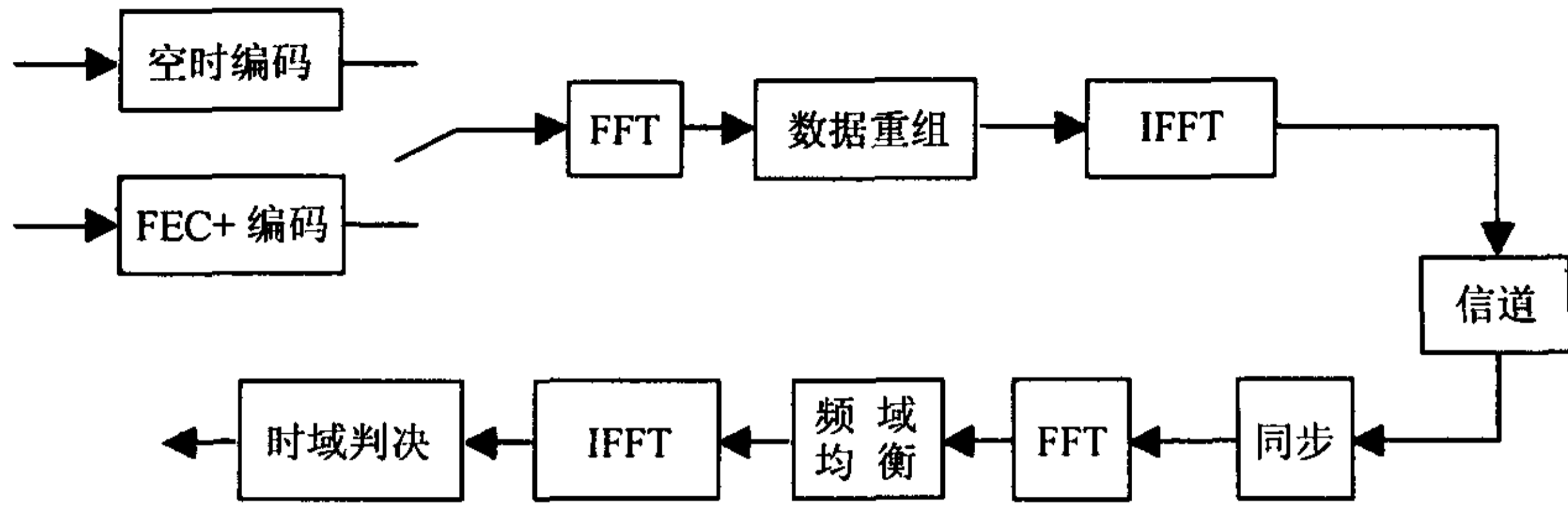


图 1 SMCC+ 系统简化框图

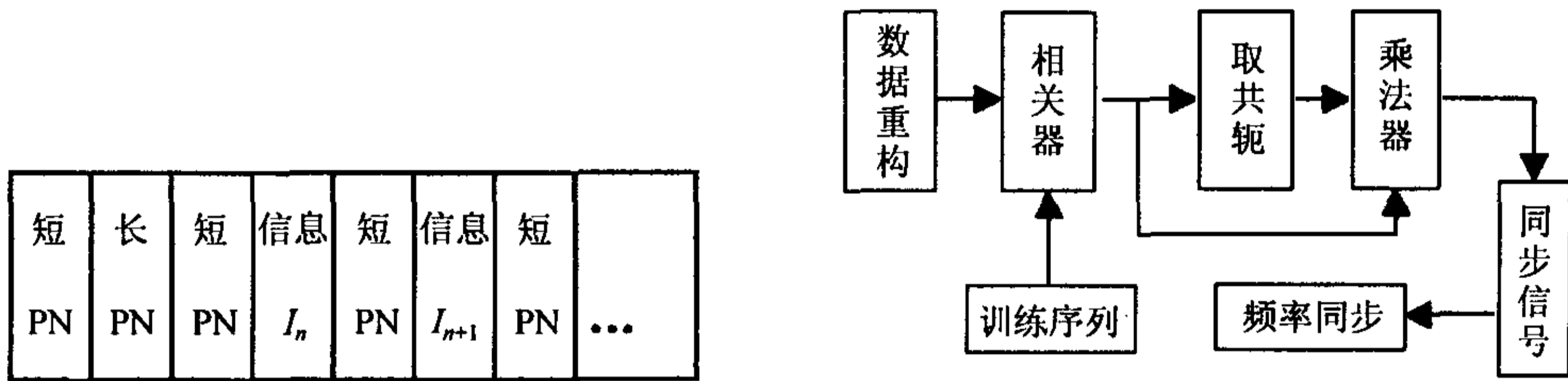


图 2 长 PN, 短 PN 和信息符号配置示意图

图 3 本文建议的同步算法框图

3 同步算法

本节介绍我们提出的在低信噪比下的短 PN 序列快速、精确的大范围频率偏移估计算法, 并进行性能分析。

采用伪随机序列设计出长度为 N_{pn} 的长 PN 序列 $PNL[k]$ 和长度为 N_{pnd} 的短 PN 序列 $P[k]$, 同时对短 PN 序列进行处理得到序列 $PN[k]$, 其长度不变, 然后将长 PN 序列、短 PN 序列以及信号一起发射出去。值得注意的是: 此处在对短 PN 序列的设计上与 Tefevesson 算法^[11]是不同的, 同时也与长 PN 序列的构造方法不同。

在接收端, 假定 a 为接收到的 PN 序列相对已知 PN 序列的滑动点数, 其中 a 为整数, 则接收信号为

$$r[k] = \sigma_s PN[k] \exp(j(2\pi\epsilon k/N_c + \theta')) + n[k] \tag{1}$$

利用构造短 PN 序列的 m 序列 $m[k]$ 的优良自相关性, 可获得解调信号:

$$m^*[k - a]r[k] = \sigma_s m^*[k - a]PN[k] \exp(j(2\pi\epsilon k/N_c + \theta')) + n[k] \tag{2}$$

其中 σ_s^2 为发射信号的功率, N_c 为 OFDM 系统的 FFT 数目, $n[k]$ 为方差等于 σ_n^2 的白高斯噪声, $m[k]$ 是已知的 PN 序列, $\epsilon = \Delta f \cdot T_s$ 表示被估计的由于信道间隔归一化的频偏, $m^*[\cdot]$ 表示序列 $m[\cdot]$ 的共轭。

由此, 同步信号由下式获得

$$\text{Cor}[k, a] = \sum_{l=0}^{L-1} \left[\left(\sum_{n=0}^{R-1} m^*[k - n - lR - a]r[k - n - lR] \right) \cdot \left(\sum_{n=0}^{R-1} m^*[k - n - (l+1)R - a]r[k - n - (l+1)R] \right)^* \right] \tag{3}$$

式中 R 为相关长度, L 由构造短 PN 序列时情况而定.

在获得同步信号基础上, 时间同步通过阈值相关检测获得, 随后求得频率偏移估计:

$$\hat{\epsilon} = -\arg(\text{Cor}'[k, 0]) \cdot N_c / (2\pi R) \quad (4)$$

式 (4) 能处理 $|\epsilon| < N_c / (2R)$ 的频率偏移. 式中 $\text{Cor}'[k, a]$ 为归一化的同步信号.

参照文献 [11] 可知, 频偏估计的方差为

$$\text{Var}(\hat{\epsilon}) = N_c^2 / (4\pi^2 R^3 L) \cdot \left(\frac{1}{L} \cdot \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2 \sin^2 c(\epsilon R / N_c)} + \frac{1}{2R} \left(\frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2 \sin^2 c(\epsilon R / N_c)} \right)^2 \right) \quad (5)$$

与 Tufveson^[11] 的算法比较, 分析可知: 产生频偏估计的方差降低的根本原因在于短 PN 序列的构造.

4 计算机仿真及性能分析

本节介绍通过计算机仿真来评估本同步算法性能. 本文采用 Simulink 系统仿真, 信道模型使用 Jakes 瑞利多径信道模型^[12].

(1) 考虑同步时间 由于在时域实现时间同步和频率同步, 与在频域实现同步相比, 当然所需时间更短; 同时该算法简单、计算量小、无反馈环路、易实现, 故该同步算法属于快速算法, 具有实现容易、同步时间短的特点.

(2) 考虑频率同步算法的性能 图 4 为本文建议算法与 Tefeveesson 算法^[11] 的频偏估计性能比较. 图 4(a), 4(b), 4(c) 分别是不同信噪比下的 AWGN, 单径瑞利信道和双径瑞利信道中频偏为 -1.9 时的频率偏移估计 MSE 图, 其纵坐标轴为 MSE 值的以 10 为底的对数. 仿真主要参数为: 子载波数为 512, 短 PN 长度为 511. 由图可知: 在 AWGN 信道中当信噪比为 -5 dB 以上时, 本文建议算法频偏估计 MSE 就达到 10^{-6} 数量级, 在 15 dB 以上时甚至达到 10^{-7} 数量级; 在单径瑞利衰落信道, 当信噪比在 -5 dB 以上时, 本文算法频率估计 MSE 可达到 10^{-6} 数量级; 而常规算法^[5-11] 在 AWGN 和单径瑞利衰落信道频偏估计 MSE 最佳就是 10^{-5} 数量级, 对于使用保护间隔进行大范围的频偏估计的常规算法^[8,9] 性能更低. 在双径瑞利衰落信道中, 本文建议算法与常规算法频偏估计性能虽达不到 10 倍的差异, 但均优于常规算法性能.

(3) 关于频偏估计范围 由于本算法属于差分相关类型的同步算法, 差分相关距离的选择对频率偏移的估计性能有很大影响. 差分距离越小, 则频偏估计的范围就越大^[12]. 在本文算

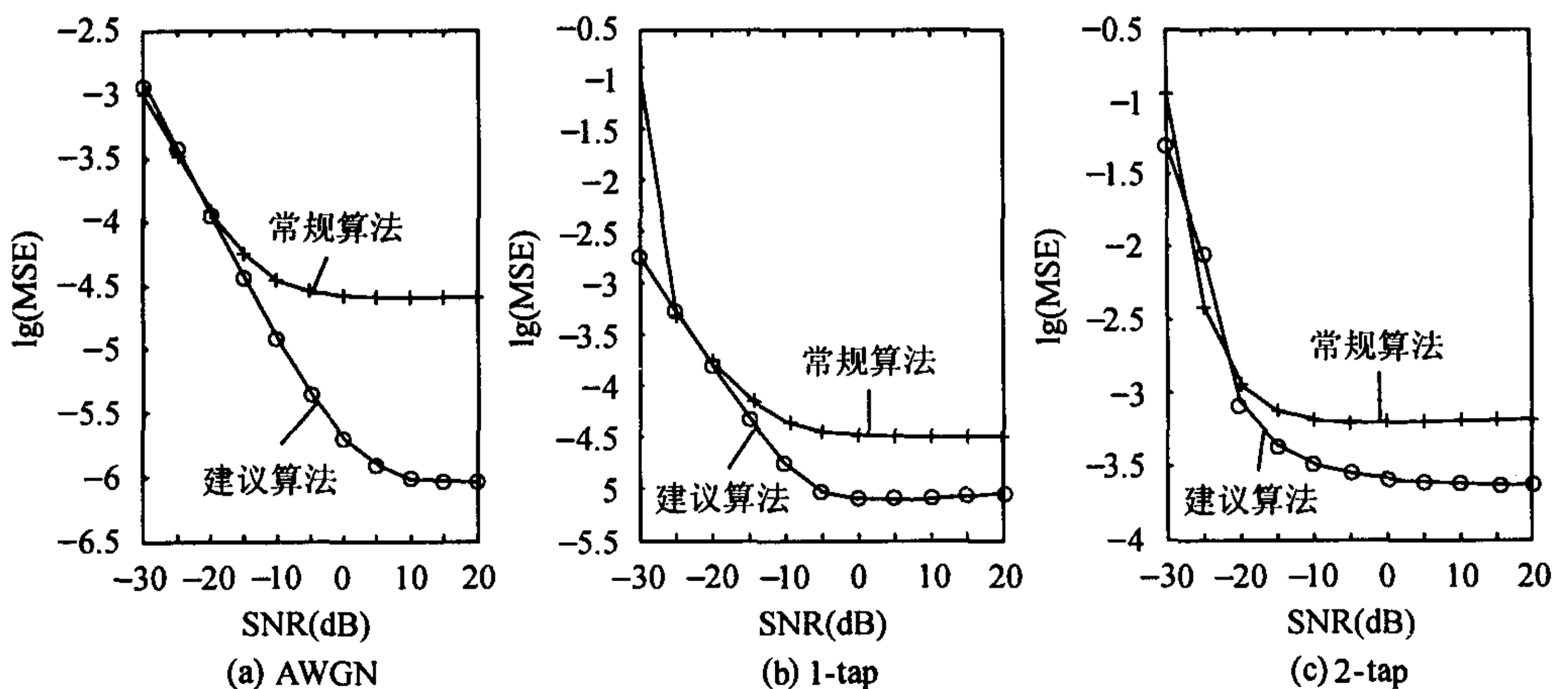


图 4 不同信噪比下各种信道对应频偏估计性能

法中如果短 PN 序列由多个 m 序列按照码片重复构造而成, 此时差分相关距离达到理论上的最小值, 故可将系统的频率偏移估计范围达到最大, 即 $1/2$ 带宽。这对于实际应用很有意义。

最后, 关于低信噪比的范围。经仿真证明 (图 4), 在信噪比为 -20 dB 以上的范围内, 该算法均能实现性能优越的频率同步, 故堪称为低信噪比下的精确的频偏估计算法。

5 结论

本文提供了一种在低信噪比下仍能实现快速精确的大范围频率偏移估计的时域频率同步新方法, 该法适用于 SMCC+ 和 COFDM 系统。该法中由于对短 PN 序列的数据重构, 从而使本文算法具有比常规算法更好的对大范围频偏估计的性能。从理论而言, 本算法可实现 $1/2$ 带宽范围内的频偏校正。显然, 该算法性能明显优于常规同步算法。

参 考 文 献

- [1] ATSC. ATSC digital television standard. ATSC Standard A/53, September 16, 1995.
- [2] ETS 300 744. Digital broadcasting systems for television, sounding services; framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, ETSI Draft EN 300 744 V1.1.1(1999-1).
- [3] ITU-R WP 11A/59. Channel coding, frame structure and modulation scheme for terrestrial integrated service digital broadcasting (ISDB-T), ITU-R WP 11A/59-E, May 17, 1999.
- [4] Tureli U, Kivanc D, Liu H. Experimental and analytical studies on a high resolution OFDM carrier frequency estimator. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2001, 50(2): 629-643.
- [5] Chen Biao. Maximum likelihood estimation of OFDM carrier frequency offset. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, 9(4): 123-126.
- [6] Tureli U, Liu Hui, Zoltowski M D. OFDM blind carrier estimation: ESPRIT. *IEEE Trans. on Commun.*, 2000, COM-48(9): 1459-1461.
- [7] Moosez P H. Technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction. *IEEE Trans. on Commun.*, 1994, COM-42(10): 253-257.
- [8] V. de Beek, J. J Sandell M, et al.. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 45(7): 1800-1805.
- [9] Meng-Han Hsieh, Che-Ho. A low-complexity frame synchronization and frequency offset compensation for OFDM systems over fading channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 1999, COM-48(5): 1596-1609.
- [10] Schmidl M, et al.. Robust frequency and timing synchronization for OFDM. *IEEE Trans. on Commun.*, 1997, COM-45(12): 1613-1621.
- [11] Tufvesson F, et al.. Time and frequency synchronization for OFDM using PN-sequence preambles. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 1999, VTC, Amsterdam, The Netherlands, 1999: 2203-2207.
- [12] Proakis G. *Wireless Communications Principles and Practice*. New York: Prentice Hall Inc., 1996, Chapter 4.

罗仁泽: 男, 1973 年生, 工程师, 博士生, 主要研究方向为: 通信信号处理、数字视频和神经网络等。

王汝言: 男, 1968 年生, 副教授, 博士生, 主要研究方向为: 多媒体通信及信号处理。

朱维乐: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 长期致力于 HDTV、数字通信、数字视频等方向的研究。

蒋 涛: 男, 1973 年生, 讲师, 博士生, 主要研究方向为: 通信信号处理。