多载波 CDMA 系统中联合检测译码方法研究

张忠培,王 艺,周世东
(清华大学微波与数字通信国家重点实验室,北京 100084)

摘 要: 为了提高多载波 CDMA(MC-CDMA)系统的抗干扰能力与系统容量,提出了一种将信道参数检测与纠错码译码联合运算进行的方法,得到了一种反馈级联结构. 在分析 MC-CDMA 系统接收性能时,通常假设信道参数能精确估计,但对于时变信道在实现上是困难的;根据本文提出的级联结构,先用导频符号进行信道参数估计,再用导频符号的译码信息作为导频符号进行信道参数的进一步优化,构成一种联合检测译码结构,能有效地降低导频符号数量,并提高了信道参数估计精度. 通过仿真,与传统的方法进行了性能比较,联合检测译码方案能获得较大系统增益,是一种优化方案.

关键词: 多载波码分多址; Turbo 码; 联合检测; 最小均方误差 (MMSE)
中图分类号: TN 911.22 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112 (2002) 07-0978-03

Study of Joint Detection and Decoding in Multi-Carrier CDMA

ZHANG Zhong-pei, WANG Yi, ZHOU Shi-dong
(State Key Lab on Microwave & Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To suppress the interference and improve capacity of multi-carrier CDMA (MC-CDMA), a new method of joint detection and decoding is proposed in this paper. Also, a new feedback concatenate structure is obtained. Current researches on the performance of the MC-CDMA detectors made the assumption that the multiplicative complex channel coefficients are perfectly known in the receiver, which is impractical in the engineering. In this paper, channel is firstly estimated with the aid of pilot symbol. It is then optimized by feedback decoding data. With the scheme, channel can be estimated precisely without long pilot symbols. Simulation results show that the performance of joint detection and decoding is much better than traditional concatenated structure. Thus, our proposed scheme is an optimal detection method.

Key words: MC-CDMA; Turbo code; joint detection; MMSE

1 引言

在未来无线通信中,为提供高速数据业务与提高通信服务质量,各种新的通信传输体制已被提出,其中多载波码分多址(MC-CDMA)系统是被广泛研究的体制之一[1]. 它的基本思想是将有效的带宽划分成大量的窄带子载波,在频域扩展每一数据符号并同时传输该数据符号的所有扩频码片(Chip),不同子载波之间保持正交,所有符号码片形成一个多载波块并在时域上是重迭的,这样能传输高速数据信息,并能较好的降低符号间干扰(ISI). 在每一子信道近似平坦衰落,通过频率分集克服频率选择衰落信道干扰,通过插入保护间隔而具有抗多径干扰的能力,因此,它成为新一代无线通信系统的候选方案.

在研究 MC-CDMA 检测器的性能时,假设频率选择信道的多个复参数是精确已知的[2,3],但工程实现上是不可能的,信道估计误差对 MC-CDMA 检测器性能的影响引起了广泛的研究兴趣. 文[4]提出了时域和频域的导频符号辅助信道估计方法,文[5]用 Kalman 滤波器和假设已知状态空间的方法进行直接信道估计而提出的门限正交恢复组合(TORC)检测器及其性能,文献[6]对自适应 MMSE 检测器在快速瑞利衰落信道下的性能进行了分析. 但在已有的信道估计方法中,需要大量的导频符号或训练序列,降低了系统传输效率. 另一种途径是通过信道编码对检测器由于信道估计不准带来的性能损失进行补偿[7],由于它采用了内外两次编码的级联结构,同样具有较低的传输效率. 信道编码是通信系统中采用的克服干扰的有效方法,特别是结合信道比特交织的信道编码能有效地抑制信道衰落、信道噪声等干扰引起的传输性能下降. 而现有的信道检测与信道编码是分别进行处理的,若将二者进行有效的组合将大大提高系统性能. 基于这种情况,我们提出了联合检测译码方案[8],采用导频符号对信道参数估计的方法,首先利用接收的导频符号数据对信道参数进行估计,再将接收导频符号经译码后的数据进行编码,并返回检测器对信道参数进一步优化. 这样可有效地降低导频符号的数量,提高系统对信道参数估计精确度,提高了系统的传输效率和传输可靠性.

2 MC-CDMA 发送系统与信道模型

MC-CDMA 等效低通传输信号 $S(t)$ 如图 1 所示,图中 N 为子载波数, C_m 为用户 m 的扩频码, C 的长度小于等于子载波数 N,为了高的频谱效率,子载波的频率间隔为 $1/T_b$. 插入保护间隔是为了提高系统抗多径干扰的能力,在接收端接收

收稿日期:2001-03-28;修回日期:2001-12-01
基金项目:国家自然科学基金(N0. 69831030)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

时删除,它对系统的传输效率有一定降低,但对接收端信道的检测估计计算没有影响,因此,本文不作分析. 发送信号 $S(t)$ 的表达式为:

$$S(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{NT_b}} \sum_{m=0}^{M-1} a_m[k] \sum_{i=0}^{N-1} C_m[i] e^{(j2\pi/T_b)t} PT_b(t - kT_b) \quad (kT_b \le t < kT_b + T_b) \tag{1}$$

式中: $a_m[k]$ 为用户 m 的双极性二进制输入数据符号, E_b、T_b 系统的比特能量与比特时隙, $PT_b(t) = 1(0 \le t < T_b)$ 为成形脉冲.

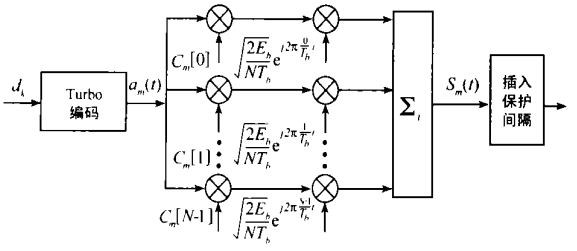

图 1　MC-CDMA 系统用户 m 的传输框图

对于抽头延迟线型(TDL)信道模型,基带等效脉冲响应为[3]:

$$h_m(t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_{m,l} \delta(t - \frac{l}{w}) \tag{2}$$

其中, $h_{m,l}$ 为第 m 个用户的第 l 信道复参数, L 为可能的路径总数, w 为传输信号带宽,并假设可能的路径数据小于子载波数 N. 复信道参数 $h_{m,l} = x_{m,l} + jy_{m,l}$ 是零均值均匀分布复高斯变量,方差为 σ^2, $x_{m,l}$ 的 $y_{m,l}$ 是相互独立,也可将 $h_{m,l}$ 表示为: $h_{m,l} = \alpha_{m,l} e^{j\theta_{m,l}}$, $a_{m,l}$、$\theta_{m,l}$ 是信道参数 h 的幅度及相位分布参数,相应径的时间延迟对信道的影响已包含在相位因子中. 在多载波系统中,当适当选择子载波数时,使多径的时延扩展及多径区分不再明显,接收信号可近似看成各多径信号的迭加,在实际系统中,传输信号经 DLC 信道后的接收信号 $r(t)$ 为:

$$r(t) = s(t) * h_m(t) + z(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{NT_b}} \sum_{m=0}^{M-1} a_m[k] \sum_{i=0}^{N-1} C_m[i] \cdot \alpha_{m,i} e^{j\theta_{m,i}} e^{j2\pi(i/T_b)t} PT_b(t - kT_b) + z(t) \tag{3}$$

3　联合检测接收方案及检测算法

MC-CDMA 系统的接收器结构如图 2 所示,接收数据经傅立叶(DFT)变换、解扩后经检测器检测,Turbo 码译码得到用户 m 的传输数据,同时,译码后的数据经 Turbo 码编码器编码后

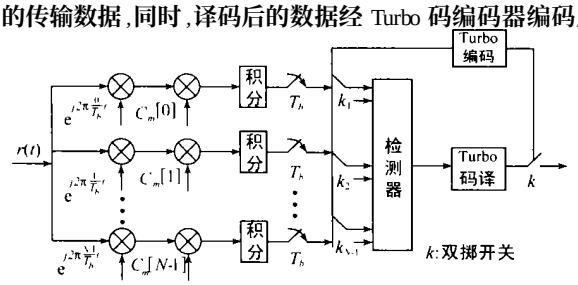

图 2　联合检测译码结构

返回检测器,检测器根据译码后的数据重新进行检测估计,通过此过程的返回迭代而提高信道估计精度与数据可靠性. 对周期 T_b 积分、按 T_b 采样是为了去掉变量 t 经判决还原出数字信号. 设判决前的变量为 v(v 为所有用户信号的迭加),通过解扩分解出指定用户数据,对用户 0, v_0 的表达式为:

$$v_0 = \sum_{i=0}^{N-1} r(t) e^{-j2\pi \frac{i}{T_b} t} C_0[i] \tag{4}$$

MC-CDMA 常用的检测方法有信道盲检测和利用导频符号辅助检测两种,盲检测算法计算量大、参数估计精度低,导频辅助检测算法是一种常用并容易实现的方法. 参数估计计算时的优化算法是最小均方误差方法(MMSE),在具体估计计算时,又有针对每一用户的检测估计和对每一载波的检测估计两种,若载波数较大时,针对用户方式的矩阵计算量较大,可用针对每一载波的估计方式. 每用户检测的 MMSE 算法,最优判据是找到矩阵 $w_0(k)$,它满足:

$$w_0(k) = \arg\min_{w(n)} \{ \| a(k) - w(k) r(k) \|^2 \} \tag{5}$$

其中, $a(k)$ 为已知导频数据, w 为迭代过程中的信道参数值, k 代表迭代中某一时刻, w_0 为优化参数,称 $J(k) = \| a(k) - w(k) r(k) \|^2$ 为代价函数.

数据估计矢量由下面的计算得到:

$$\hat{a}(k) = \mathrm{sgn}[\mathrm{Re}\{ w_0(k) r(k) \}] \tag{6}$$

式(6)的求解利用正交原理可得到如下形式:

$$w_0(k) = R_{ar}(k) R_{rr}^{-1}(k) \tag{7}$$

其中: $R_{ar}(k) = \{ a(k) r^H(k) \}$, $R_{rr}(k) = \{ r(k) r^H(k) \}$. 基于每一子载波进行 MMSE 的算法,最优判据是找出矩阵 $w_0(k) = \mathrm{diag}\{ w_{0,1}(k) \quad \cdots \quad w_{0,N}(k) \}$,它满足 $w_{0,i}[k] = \arg\min_{w_i(k)} | [Ca(k)]_i - w_i(k)[r(k)]_i |^2$, C 为 M 个用户的扩频码矩阵,其大小为 $M * N$, N 为每用户的扩频码长度,数据矢量的检测由: $\hat{a}(k) = \mathrm{sgn}[\mathrm{Re}\{ C^T W_0(k) r(k) \}]$ 得到.

在本文的接收结构中,为了利用 Turbo 码的译码信息,采用自适应信道估计方式,在发送端发送导频信号,采用每用户的自适应 MMSE 方式,其计算方法有 LMS 和 RLS 两种.

LMS 算法:

$$w(n+1) = w(n) + u[a[n] - w(n) r(n)] r^H(n) \tag{8}$$

RLS 算法:

$$w(n+1) = w(n) + [a[n] - w(n) r(n)] k^H(n) \tag{9}$$

其中: $k(n) = \frac{P(n) r(n)}{\lambda + r^H(n) P(n) r(n)}$; $P(n+1) = \lambda^{-1}(I - k(n) \cdot r^H(n) P(n))$; λ 为遗忘因子; μ 为迭代步长.

检测算法数据估计过程:

(1) 数据帧结构:由于本文方案引入了 Turbo 码作为信道差错控制编码,数据的传输以帧为单位,其导频方案为:在每一帧数据起始位插入导频符号. 由于 Turbo 码具有优异的编译码性能,插入的导频符号数可以较少以提高系统传输效率;又由于每帧都有导频符号,能对信道实时精确估计.

(2) 在接收端收到数据信息 r,由于式(4)对其傅立叶变换及解扩以后,送入检测器,并保存 r 的值,根据其导频符号对权重系数 w 进行训练,采用 LMS 方式进行计算;由式(8)计

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

算得到 w 的值.

(3) 导频符号计算完成后,对接收的导频数据位按式(6)进行估计判决,得到的数据送 Turbo 码译码器译码,译码完成后,再经 Turbo 编码后重新送入检测器,再利用式(8)对信道参数进行递推计算.

(4) 利用反馈数据对检测器进行训练时,按式(5)右边部分计算其代价函数,按式(8)递推计算 w 值. 为了避免序列中误码传递,在计算 w 值的过程中,保留使代价函数 J 递减的 w 值,删除代价函数递增的 w 值,使得到的 w 值是最优的.

(5) 利用优化的信道参数,对接收数据 r 进行判决、译码,得到信源数据.

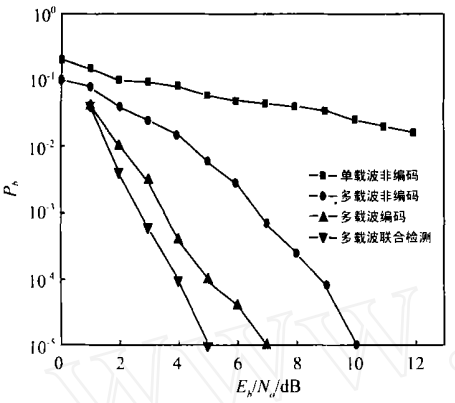

图 3 单用户下的性能比较

4 仿真及结论

为了验证本文所提方案,按图 1、2 所示框图建立仿真系统,所用 Turbo 码多项式为 [111,101],交织采用 S 随机交织,扩频码为 Gold 码,码长 31,每帧导频为 20bit,帧长 384bit,子载波数为 31. 在仿真中,假设每一子载波的衰落是相互独立的,在同一帧内幅度与相位衰落是不变的,同时,所有子载波迭加以后再迭加复高斯噪声,该信道为本文所述信道模型,在仿真中未插入保护间隔. 对于单用户,分别将未编码情况下的单载波、多载波、Turbo 码串行级联、联合检测四种条件下分别进行仿真,结果如图 3 所示. 从图 3 可看出,由于 MC-CDMA 系统采用了多载波方式,能取得较大的频率分集增益,极大降低了

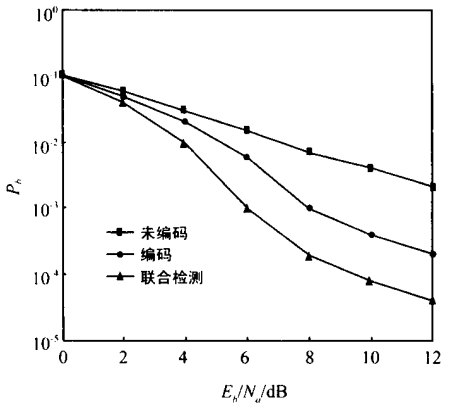

图 4 多用户下的性能比较

系统误码率,当采用了信道差错控制方案以后,又能提高系统增益,在误码率为 10^{-5} 时,提高增益近 3dB,采用联合检测译码后,进一步提高增益近 2dB. 在图 4 中,对于用户数为 10 的情况下的未编码、串行级联、联合检测三种条件进行仿真,在多用户情况下,联合检测同样能取得较好的编码增益,在误码率为 10^{-4} 时,提高增益近 4dB. 由于多用户干扰较强,通过联合检测能较好的克服多址干扰(MAI).

通过仿真,验证了本文所提出联合检测译码方案的可行性,并且在没有增加导频符号量的情况下,能较大地提高系统增益,降低系统误码率. 同时,本方案所反馈的是 Turbo 码译码后的判决后的信息,如用软判决信息进行反馈能进一步提高系统增益,但这部分内容有待于进一步研究.

参考文献:

[1] Yee N, Linnartz J P. Multi-carrier CDMA in indoor wireless radio networks [A]. In Proc. PIMRC '93 [C]. Yokohama: PIMRC, 1993. 109 - 113.

[2] Aalo V A. Perormance of maximal-rate diversity systems in a correlated nakagami-fading environment [J]. IEEE Trans. Comm. 1995, 43(8): 2360 - 2369.

[3] Junhyun P, Jooeung K, Sooyong C. Performance of MC-CDMA systems in non-independent Rayleigh fading [A]. ICC '99 [C]. USA: ICC, 1999. 506 - 510.

[4] Kaiser S and Hoeher P. Performance of multi-carrier CDMA with channel estimation in two dimensions [A]. In IEEE Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '97) [C]. Helsinki: PIMRC, 1997.

[5] Kalofonos D N, Stojanovic M, Proakis J G. Analysis of the impact of channel estimation errors on the performance of a MC-CDMA system in a rayleigh fading channel [A]. GLOBECOM '97 [C]. Phoenix: GLOBECOM, 1997. 213 - 217.

[6] Kalofonos D N, Stojanovic M., Proakis J G. On the performance of adaptive MMSE detectors for a MC-CDMA system in fast fading rayleigh channels [A]. The ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile radio communications [C]. USA: IEEE, 1998.

[7] Kalofonos D N, Kurtas E and Proakis J G. Perormance of multi-code CDMA systems with concatenated coding and iterative decoding in multipath rayleigh fading channels [A]. VTC '99 [C]. USA: VTC, 1999. 2566 - 2570.

[8] Zhang Zhongpei, Wang yi and Zhou sidong. Joint MMSE detection and decoding for MC-CDMA [A]. IEEE EIT Conference [C]. USA: IEEE, 2001.

作者简介:

张忠培 男,1967 年 9 月生于重庆,1993 年在四川师范大学获硕士学位,2000 年在西南交通大学获博士学位,现为清华大学微波与数字通信重点实验室博士后,主要研究兴趣:信道差控制编码,WCDMA,多载波及 OFDM 未来无线通信传输体制研究.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net