

OFDM 系统中基于响应相关性 LDPC 译码研究

方承志, 巩雪艳, 刘 洁
(南京邮电大学, 江苏 南京 210003)

摘 要: 目前研究表明 LDPC (Low Density Parity-Check) 是信道编码中纠错能力最强的码之一。由于其简单的译码器结构, 被广泛应用在很多领域。但是之前的研究都没有考虑 OFDM 系统的时频二维特性, 尤其是频带内子信道之间的响应相关性。为了提高 LDPC 码的译码质量, 经过公式推导及理论分析, 针对 PSK 类型信号, 先是从理论上研究了系统频域响应相关性的特点, 使用了“跨越”的概念和统计策略的思想。基于以上方法, 提出两种新的 LDPC 译码算法: 改进的 BF 译码算法和基于相关性的 BP 译码算法。仿真结果表明, 在考虑相关性条件后, LDPC 译码质量得到了改善。

关键词: OFDM; 响应相关性; LDPC 译码; BP 译码; BF 译码

中图分类号: TN914.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2016)08-0075-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2016.08.016

Research on LDPC Decoding Based on Response Correlation in OFDM System

FANG Cheng-zhi, GONG Xue-yan, LIU Jie

(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: With its strong performance and simple decoding structure, LDPC has been widely used in many fields. However, nearly all the application ignores the time-frequency features in OFDM system, especially the response correlation in sub-channel. In order to improve the quality of LDPC decoding, aiming at the signal of PSK, through formula deduction and theory analysis, it focuses on the characteristics of the system frequency response and introduces the concept of “crossing” in this paper. On the basis of it, two new LDPC decoding algorithm are presented, including the improved BF decoding algorithm and the correlation-based BP decoding algorithm. The simulation shows that the quality of LDPC decoding is improved.

Key words: OFDM; response correlation; LDPC decoding; BP decoding; BF decoding

0 引言

OFDM 是一种高效的多载波调制技术, 突出特点就是频谱利用率高^[1-2]。LDPC 码作为一种校验矩阵十分稀疏的线性分组码, 具有逼近香农限的性能、译码方法简单方便等优点^[2-3]。为了适应下一代无线通信的高速、高性能特点, LDPC-COFDM 系统是目前通信领域的研究热点, 国内外学者对它进行了大量的研究^[2-5]。但是这些研究都是在简单的整个 OFDM 系统频带内进行, 而没有考虑到 OFDM 系统本身的时频二维特性, 尤其是频带内子信道之间的响应相关性能够给系统性能的提升带来的影响^[1]。因此, 文中在分析了 OFDM 系统中各个时刻和各个子载波响应间紧密相关性的基础上, 提出了改进的基于 OFDM 系统响应

相关性的 LDPC 码 BF 和 BP 译码算法^[6-9]。

1 OFDM 系统相关性分析

1.1 OFDM 系统模型

假设 $X_{n,k}$ 为编码后的发送信号, $N_{n,k}$ 为均值为 0、方差为 σ^2 的复高斯噪声, $Y_{n,k}$ 为接收信号, $H(n,k)$ 为信道响应, 则接收到的 OFDM 信号在频域内可表示为^[1,10-12]:

$$Y_{n,k} = H(n,k)X_{n,k} + N_{n,k} \quad (1)$$

$H(n,k)$ 随着 n 或 k 的变化而变化, 但是当 n 变为 $n+1$, 或 k 变为 $k+1$ 时, $H(n,k)$ 之间的变化并不是独立的, 总会有一些相关性, 而译码时若能利用这些相关性, 译码就会更加准确, 能够提高 LDPC-COFDM 系统

收稿日期: 2015-09-21

修回日期: 2015-12-29

网络出版时间: 2016-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61106021); 南京邮电大学校自然科学基金(NY211059)

作者简介: 方承志(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为嵌入式系统和信号处理、模式识别; 巩雪艳(1990-), 女, 硕士, 研究方向为信号处理。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160801.0842.006.html>

的性能。

为了便于研究,对于时频二维频率响应 $H(n, k)$ 的估计方法,往往是先假设将 n 或 k 中的一个变量固定下来后,估计一维的 $H(i)$ 的特性。对于 $H(i)$ 之间的相关性,已经进行了大量的研究。由文献[10]可知,定义归一化多普勒频移 $f_d = f_{\text{Dmax}} T_s$ (f_{Dmax} 为最大多普勒频移, T_s 为 OFDM 的符号周期)。当 f_d 较小时,尽管 $H(n, k)$ 随 n 或 k 的变化而变化,但 $H(n, k+1)$ 与其临近点之间是紧密相关的。由文献[7]可知,如果 $H(i)$ 位于频率方向,即 k 下标,那么 $H(n, k+1)$ 总是和 $H(n, k)$ 近似。而在实际的 OFDM 系统中,相较于子载波的带宽, f_{Dmax} 很小,通常在 100 Hz 左右,相应的 f_d 值也很小,也就是 $H(n, k)$ 在时间方向上 (n 下标) 变化缓慢。

1.2 响应相关性

根据文献[11-12],定义两个相邻接收信号的比值,对应发送信号比值,用两者的差异来衡量分析相关性^[11]:

定义 $d_i = \left| \frac{y_{i+1}}{y_i} - \frac{x_{i+1}}{x_i} \right|$, 其中, x_i 为发送信号; y_i 为

接收信号。由公式推导得:

$$d_{i,n,1} = \frac{-n_i}{H(i)}, d_{i,n,2} = \frac{n_{i+1}}{H(i)} = \frac{n_{i+1}}{H(i+1)} \cdot \frac{H(i+1)}{H(i)} \approx \frac{n_{i+1}}{H(i+1)}, d_{i,n} = |d_{i,n,1}| + |d_{i,n,2}|$$

即: y_{i+1}/y_i 偏离 x_{i+1}/x_i 的量,记 $|d_i|$ 和 $|d_{i,n}|$ 的分布函数分别为 $F_{d_i}(r)$ 和 $F_{d_{i,n}}(r)$ 。把随机变量 d_i 和 $d_{i,n}$ 大于给定值 r 的概率记为 $Q_{d_i}(r)$ 和 $Q_{d_{i,n}}(r)$ 。其中, $Q_{d_i}(r)$ 是 y_{i+1}/y_i 偏离 x_{i+1}/x_i 的概率。由文献[8]可知, d_i 必小于等于 $d_{i,n}$, 进而有 $F_{d_i}(r) \geq F_{d_{i,n}}(r)$, 故 $Q_{d_i}(r) \leq Q_{d_{i,n}}(r)$ 。

为了更进一步地验证 d_i 和 $d_{i,n}$ 之间的变化关系,在不同的 SNR(18 dB 和 30 dB) 条件下,对时变瑞利信道下的 QPSK 信号进行仿真。OFDM 系统带宽值为 1 MHz,子载波数为 32,差错率 $P_s = 0.01$ 。 $F_{d_i}(r)$ 的仿真曲线和 $F_{d_{i,n}}(r)$ 的理论曲线如图 1 所示。

从仿真结果可以看出, $F_{d_{i,n}}(r)$ 为 $F_{d_i}(r)$ 提供了十分紧凑的下界, d_i 取较大值的概率很小,即:在噪声的影响下, y_{i+1}/y_i 会稍稍偏离 x_{i+1}/x_i , 但 y_{i+1}/y_i 远离 x_{i+1}/x_i 的概率会很小。另外, $Q_{d_i}(r)$ 总是小于等于 $Q_{d_{i,n}}(r)$ 。基于此,下文引入统计策略,这是改进译码算法的理论基础。

要想把频域相关性应用到算法性能的改进中,必须首先引入“跨越(crossing)”。 $d_i = \left| \frac{y_{i+1}}{y_i} - \frac{x_{i+1}}{x_i} \right|$ ($i = 1, 2, \dots, N-1$), 并给定 d_e 的值。判断 d_i , d_e 的大小,如

果 $d_i > d_e$, 称发生跨越,即译码出错。现记跨越即译码出错发生的概率为 $P_e = Q_{d_i}(d_e)$ 。假设发送信号 x_i 相互独立,则至少发生 D_M 次跨越的概率为 P_M 。由文献[6]可计算出在不同信噪比条件下满足 $P_M \leq P_s$ 所需要的 d_e 和 D_M 值,而 D_M 的值取决于数据帧的长度。这一计算在接收信号前就可以完成,故并不会给系统增加额外的运算复杂度^[13]。

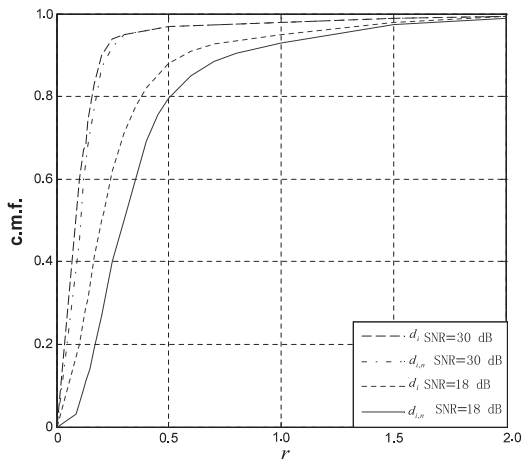


图1 $F_{d_i}(r)$ 的仿真曲线和 $F_{d_{i,n}}(r)$ 的理论曲线

2 LDPC 译码算法

2.1 基于相关性的位翻转译码算法

译码之前,在系统平均信噪比条件下,计算出小于给定的差错率 P_s (文中定为 10^{-2}) 所允许译码出错的次数 D_M ,进一步得出 d_e 的值。将每个待翻转的比特与其前后比特做比较,计算出各自的 d_i 值,如果两个 d_i 值都较大(即大于 d_e),也就是说若连续发生两次跨越,则说明该比特的译码出错了,对这个比特进行翻转。由此,改进的译码算法的操作与 BF 译码算法相类似,即:在每次的迭代中翻转不可靠的比特,判断不可靠的比特时,不仅统计相应的校验方程中未通过校验的个数,还对未通过的个数最大的比特与其前后相邻比特进行计算,得出相应的 d_i 值再进行判断,对不满足条件的进行比特翻转,保证所有的比特都满足校验方程^[1]。

从计算复杂度来分析,与传统的 BF 译码算法相比,该算法只是增加了 d_i 值的计算。但增加这略微的计算量,换来了算法收敛速度的加快和翻转译码算法性能的提高。改进的位翻转算法译码流程图如图 2 所示。

2.2 基于相关性的 BP 译码算法

LDPC 码译码算法是并行的,译码的平均迭代次数是衡量译码复杂度的重要参数之一。在 BP 译码的迭代过程中,软信息不断在校验节点和变量节点之间来回传递和积累^[12],最后收敛到正确的译码结果。

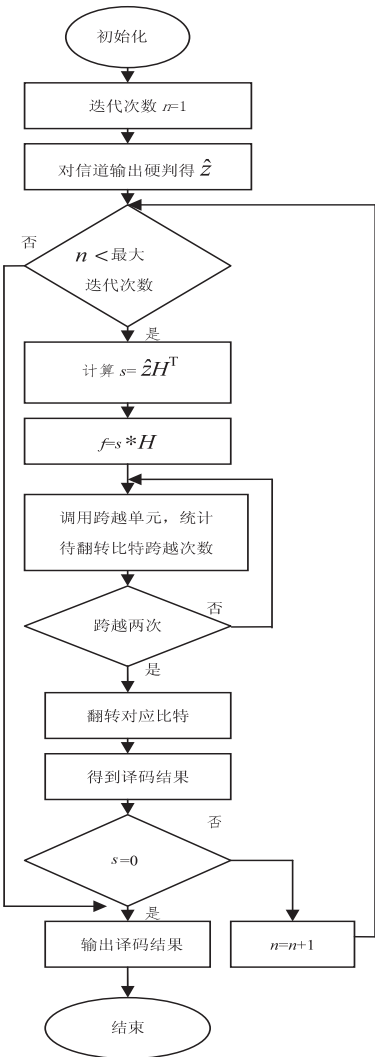


图 2 改进后的 BF 算法流程图

为了保证码字正确译出,迭代次数一般设置的比较大。BP 译码算法中每个码字的迭代次数都为先前所设定的最大迭代译码数。设想如果能够在最大迭代次数之前就判断出码字的译码情况,即:是处于渐趋收敛于正确的译码结果还是处在不停的振荡状态,从而决定是继续迭代还是提前终止迭代译码,这将大大降低系统的无用功率和传输时延。如果能提前检测到那些不能被正确译出的比特,强行将它们进行翻转,就有可能正确译码。如何判断一个码字中还有哪些比特是错误的,这就要结合文中提到的统计策略。在当前系统的平均信噪比下,计算出满足小于所设定的差错率 P_s (文中设为 10^{-2}) 下所允许出错的次数 D_M ,进一步计算出 d_e 的值,对经过若干次迭代译码的结果进入跨越次数统计单元进行统计处理。如果出现多个较大的 d_i ,说明没有进行充分译码,还需要继续进行迭代处理。改进后的算法流程如图 3 所示。

3 仿 真

LDPC 码和 OFDM 系统都存在很多的参数设置,

而文中物理层仿真参数的设定依据典型电视系统,子载波的调制方式采用 BPSK。

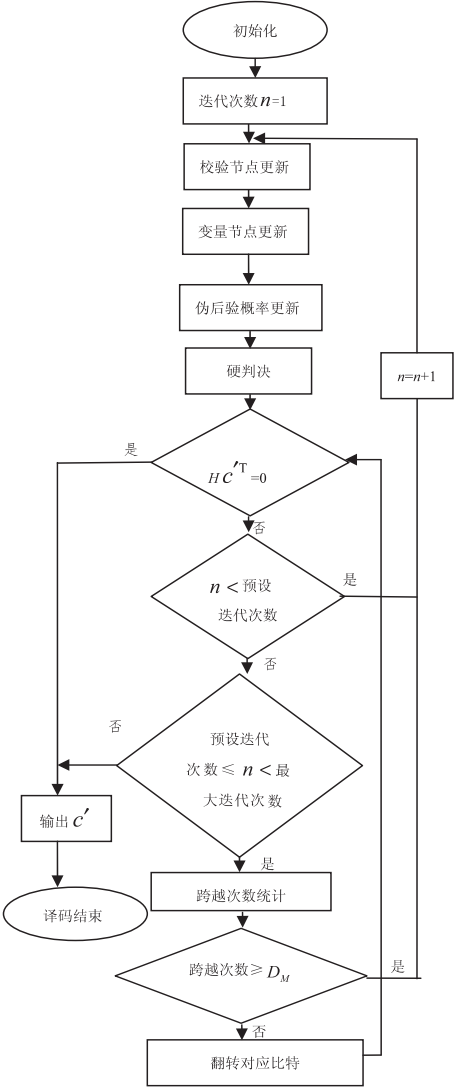


图 3 改进后的 BP 算法流程图

3.1 对改进的 BF 译码算法的仿真

传统 BF 算法和改进 BF 算法的误码率性能对比如图 4 所示。所选用的码型是 LDPC 码(576,3,6),最大迭代次数为 15 次。

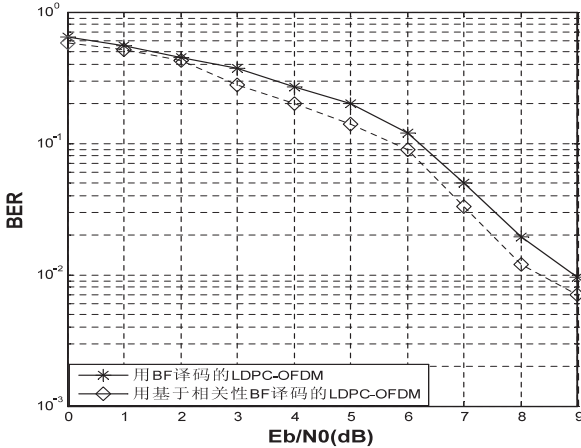


图 4 改进 BF 译码算法和传统 BF 译码算法对比

由图可以看出,两种算法系统的误码率性能总的来看都不是很理想。当信噪比为 9 时,其误码率在 10^{-2} 数量级左右。但改进的 BP 译码算法的性能要优于传统的位翻转译码算法。当信噪比小于 8 dB 时,传统位翻转译码算法的误码率一直都大于 10^{-2} 数量级;当信噪比等于 9 dB 时,误码率刚达到 10^{-2} 数量级。

3.2 对改进的 BP 译码算法的仿真

图 5 是分别采用传统 BP 译码算法和基于相关性 BP 译码算法的 LDPC-COFDM 系统的仿真结果。参数如下:码率为 1/2、迭代次数为 15 次、码长为 576。

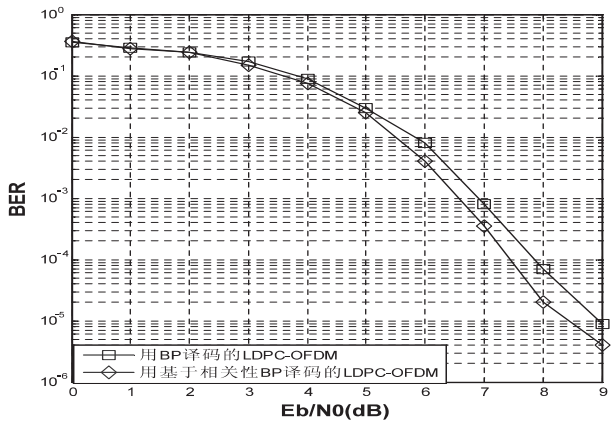


图 5 改进 BP 算法与传统 BP 算法对比

由图可以看出,改进的 BP 译码算法对系统性能确实有所改进。图中设置的预设迭代次数为 10,即当迭代次数大于 10 时,就会进入跨越统计单元。统计当前信噪比下系统的误码率,来判决是否继续迭代译码。当统计得到的误码率小于差错率 P_s (取为 10^{-2}) 时,就不再进行迭代译码,而是强制翻转译码中的错误比特,因此改进算法中预设迭代次数的设置至关重要。如果过小,则会在译码不充分的情况下调用跨越次数统计单元,节省的计算量很有限,效果不明显;如果过大,就会和原始算法差别不大,降低改进效果^[1]。改变图 5 中基于相关性 BP 译码算法中的预设迭代次数,得到译码时间上的比较,如表 1 所示。

表 1 预设迭代次数对改进 BP 算法译码时间的影响

算法方案	译码时间/s
传统 BP 译码算法	402.317 558
基于相关性 BP 译码算法(预设迭代次数为 10)	367.946 201
基于相关性 BP 译码算法(预设迭代次数为 5)	385.427 935

由表中数据得出,传统 BP 译码算法译码的时间最长,预设迭代次数为 10 的改进 BP 算法比预设迭代次数为 5 的改进 BP 算法用时要少。这个实验结果与理论分析结果一致,因此,要根据不同情况综合考虑和设置预设迭代次数。当信噪比较小时,由于码字要迭代多次才能正确译码,故预设迭代次数就要设置大一些;当信噪比较大时,码字迭代较少次数就能正确译

出,迭代次数相对小一些。

4 结束语

文中推导分析了 OFDM 系统中相邻子信道间的频域响应相关性,并在此基础上,根据“跨越”概念和统计策略,提出了改进的 BP 译码算法和 BP 译码算法。使用 Matlab 语言对改进算法进行仿真,绘制出误码率和信噪比关系曲线。对比分析后可以得出结论,相关性条件的引入可以减小 LDPC 码的译码时延,提高译码效率。

参考文献:

[1] 刘 洁. 多载波系统中基于响应相关性的低密度校验码研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.

[2] Dai Linglong, Wang Zhaocheng, Yang Zhixing. Spectrally efficient time-frequency training OFDM for mobile large-scale MIMO systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2): 251-263.

[3] Futaki H, Ohtsuki T. Low-Density Parity-Check (LDPC) coded OFDM systems[C]//Proc of vehicular technology conference. [s. l.]: IEEE, 2001: 82-86.

[4] Futaki H, Ohtsuki T. Low-Density Parity-Check (LDPC) coded OFDM systems with M-PSK[C]//Proc of vehicular technology conference. [s. l.]: IEEE, 2002: 1035-1039.

[5] Poor H V, Wang Xiaodong. Wireless Communication systems: advanced techniques for signal reception[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2009.

[6] 陈 艳. LDPC 码及其在 OFDM 系统中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.

[7] 屈 兰. LDPC 译码算法的研究及其在 OFDM 系统中的应用[D]. 重庆:重庆邮电大学,2007.

[8] 贺鹤云. LDPC 码基础与应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2009.

[9] 侯 宁, 曲 桦. 基于改进型 LLR BP 算法的 LDPC 译码研究[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2009, 31(11): 119-124.

[10] Chang Mingxian. A new derivation of least-squares-fitting principle for OFDM channel estimation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(4): 726-731.

[11] 方承志, 都思丹, 倪梁方. 基于半定松弛方法的时变 OFDM 系统盲信道估计[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1801-1805.

[12] Tao Cui, Tellambura C. Joint data detection and channel estimation for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(4): 670-679.

[13] Necker M C, Stuber G L. Totally blind channel estimation for OFDM on fast varying mobile radio channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2004, 19(5): 1514-1525.