

基于多用户 MIMO-OFDM 系统的动态有限反馈与量化算法^{*})

梁学俊 朱光喜 曹 汐

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要 多用户 MIMO-OFDM 系统中的信道质量信息(CQI)反馈与量化算法是实现自适应资源分配的关键技术。本文利用概率论与随机过程的知识推导了反馈信息与用户服务质量(QoS)如误码率、传输速率和中断概率要求之间的数学关系,并以系统误码率要求为约束条件,给出使系统整体传输速率最大化的量化门限。仿真结果表明,本文提出的动态有限反馈与量化算法根据系统用户数及 QoS 要求动态调整反馈信息与量化门限,既可有效降低系统的反馈开销,还能显著提高系统的频谱效率,并且实时运算复杂度低,是一种实际可行的方案。

关键词 多输入多输出,正交频分复用,有限反馈,量化门限

Dynamic Limited Feedback and Quantization Algorithm Based on Multiuser MIMO-OFDM System

LIANG Xue-Jun ZHU Guang-Xi CAO Xi

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074)

Abstract Channel quality information(CQI) feedback and quantization algorithm is a core technique of adaptive resource allocation in multiuser MIMO-OFDM system. Using the theory of probability and random processes, the mathematic relationship of the feedback information and user's quality of service(QoS) such as bit errors ratio, transmission rate, outage probability is discussed in this paper. Then, the optimal quantization thresholds are provided in order to maximize the average transmission rate of the system based on the predefined average bit errors ratio. Simulation results show that the proposed dynamic limited feedback and quantization algorithm can not only save the feedback cost, but also improve the spectrum efficiency, and the complication of real time operation is well situated. It is a feasible scheme.

Keywords MIMO, OFDM, Limited feedback, Quantization thresholds

1 引言

MIMO-OFDM(Multiple input multiple output orthogonal frequency division multiplexing)技术被公认为是未来宽带无线通信系统的物理层解决方案。在此框架下的自适应资源分配算法可利用多用户分集和信道衰落特性,提高系统整体性能^[1]。然而,实现自适应资源分配的前提是基站端需要获取用户信道质量信息(CQI)即信噪比信息。各用户要将其 CQI 反馈至基站(对 FDD 而言),在多天线以及多载波的系统架构下,若每个用户都将其所有的 CQI 予以反馈,系统开销将是极为庞大的。文[2]利用了相邻子载波信道的相关性,将邻近的子载波组成一个簇或子带,取簇内子载波的信道增益均值作为簇的 CQI 反馈给基站。文[3]用户端对 CQI 进行筛选,只反馈有限个最好的 CQI 及相应的信道标识,即最优反馈算法。

上述方法虽有效地减少了反馈信息量,却未考虑是否能满足用户端服务质量(QoS)的要求。各用户的 QoS 如误码率、传输速率和中断概率等要求会根据其服务类型而有所不同,用户端的反馈信息量也应该与这些指标相关联。无论用户如何反馈,都必须对 CQI 进行量化,否则无法在反馈信道上传输。CQI 量化主要是量化门限设置的问题。本文针对多用户 MIMO-OFDM 系统,推导用户端反馈信息与 QoS 要求

的关系,并以最大化系统的频谱效率为目标,给出计算最优量化门限的表达式。

2 系统模型

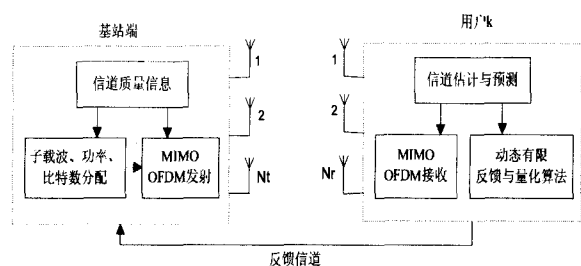


图 1 MIMO-OFDM 系统结构框图

考虑 K 个用户 FDD MIMO-OFDM 系统,并且用户是均匀分布在小区中,这样各个用户所经历的信道看作是相互独立的,基站端有 N_t 个发射天线,每个用户端有 N_r 个接收天线,多天线传输采用空时分组码。系统带宽为 W ,子载波数为 N ,系统架构如图 1 所示,用户端估计和预测得到所有子载波的 CQI 后,根据系统用户数及其 QoS 要求,确定应反馈的最优 CQI 数及量化门限。量化后的信息由反馈信道传输给基站。基站端利用反馈信息完成子载波、功率和比特数分配。

^{*})基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2003AA12331005);国家自然科学基金资助项目(60496315)。梁学俊 博士研究生,主要研究方向为 MIMO-OFDM 系统自适应传输及信道反馈;朱光喜 教授,博士生导师,研究方向为无线宽带通信、多媒体技术。

信道模型采用频率选择性 Rayleigh 衰落, 定义 $h_{k,i}^n$ 表示用户 k 在子载波 n 上从传输天线 i 到接收天线 j 的信道响应系数, σ^2 表示高斯白噪声方差。

3 算法描述

3.1 满足用户 QoS 要求的反馈 CQI 数

假设基站端子载波分配采用比例公平分配算法, 子载波由信噪比相对最好的用户使用。迭代注水是最优的功率分配算法, 但由于其运算量较大, 且在信噪比适中或较大时, 获得增益并不明显而难以得到实际应用^[4]。本文采用平均功率分配算法。设子载波功率为 P , 研究对象为用户 k , 误码率要求为 BER_0 , 传输速率要求为 R_0 , 中断概率要求为 ϵ_0 。基站端为用户 k 分配的子载波集表示为 $U_k = \{n_1, n_2, \dots, n_L\}$, L 为用户 k 应反馈的最小 CQI 数, 即用户 k 至少要反馈 L 个最优的 CQI。设定系统采用方形 M-QAM 调制, 其误比特率上界近似公式为^[5]:

$$BER(b, \gamma) \approx 0.2 \exp[-1.5\gamma/2^b - 1] \quad (1)$$

b 为不同调制方式下对应的比特数。暂不考虑 b 的整数要求, 可得用户 k 在子载波 n ($n \in U_k$) 的传输速率 $r_{k,n}$ 为:

$$r_{k,n} = \frac{W}{N} \log_2(1 + \gamma_{k,n}) \quad (2)$$

其中 $\gamma_{k,n} = \frac{-1.5}{\ln(5BER_0)} \tilde{\gamma}_{k,n}$, $\tilde{\gamma}_{k,n} = \frac{P}{\sigma^2 W N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=0}^{N_i} |h_{k,i}^{j,n}|^2$ 。由公式(2)可得, 用户 k 总的传输速率 r_k 为:

$$r_k = \sum_{n \in U_k} r_{k,n} \quad (3)$$

无线信道的时变衰落特性导致传输速率 r_k 为一随机变量, 从统计意义上满足中断概率 $Pr(r_k < R_0)$ 小于 ϵ_0 , 即可保证用户 k 的 QoS 要求。采用空时分组码的系统子载波信噪比瞬时值概率密度函数服从伽马分布^[6](各用户概率密度函数相同, 故省略用户下标):

$$P(\gamma) = \frac{(N_i/\bar{\gamma}_k)^{N_i N_r}}{\Gamma(N_i N_r)} \gamma^{N_i N_r - 1} \exp\left(-\frac{N_i}{\bar{\gamma}_k} \gamma\right) \quad (4)$$

式中 $\Gamma(a) = \int_0^\infty t^{a-1} e^{-t} dt$ 为伽马函数, $\bar{\gamma}_k = E(\gamma_{k,n})$ 为用户 k 的平均信噪比。子载波信噪比瞬时值分布函数表达式为:

$$F(\gamma) = \int_{-\infty}^{\gamma} P(t) dt = 1 - \Gamma(N_i N_r, \frac{N_i \gamma}{\bar{\gamma}_k}) / \Gamma(N_i N_r) \quad (5)$$

式中 $\Gamma(a, x) = \int_x^\infty t^{a-1} e^{-t} dt$ 为不完全伽马函数。根据子载波分配策略, 用户 k 在子载波 n 上应具有最大瞬间相对信噪比, 数学表达式为 $k = \max_{1 \leq q < K} (\alpha_{q,n} = \gamma_{q,n} / \bar{\gamma}_q)$ 。设用户 k 在子载波 n 上反馈的信噪比为 $\gamma_{k,n} = y$, 子载波 n 分配给用户 k 使用的条件概率为:

$$Pr(\bar{\gamma}_k \max_{q \neq k} \alpha_{q,n} \leq y | \gamma_{k,n} = y) = F^{K-1}(y) \quad (6)$$

子载波 n 最终的信噪比概率密度函数为:

$$P_m(y) = Pr(\bar{\gamma}_k \max_{q \neq k} \alpha_{q,n} \leq y | \gamma_{k,n} = y) P(y) = F^{K-1}(y) P(y) \quad (7)$$

根据式(2)和(7), $r_{k,n}$ 的概率密度函数 $\delta_n(r)$ 表达式为:

$$\delta_n(r) = F^{K-1}(2^{\frac{N}{W}} - 1) P(2^{\frac{N}{W}} - 1) \left(\frac{N}{W} 2^{\frac{N}{W}} (\ln 2)\right) \quad (8)$$

$r_{k,n}$ 的均值和方差分别为:

$$\begin{aligned} \mu_n &= \int_0^{+\infty} r \delta_n(r) dr \\ \sigma_n^2 &= \int_0^{+\infty} r^2 \delta_n(r) dr - \mu_n^2 \end{aligned} \quad (9)$$

用户 k 的传输速率 r_k 根据中心极限定律近似为高斯分布, 它的均值和方差为 $L\mu_n$ 和 $L\sigma_n^2$, 概率密度函数 $f_k(r)$ 为:

$$f_k(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi L\sigma_n^2}} \exp\left(-\frac{(r - L\mu_n)^2}{2L\sigma_n^2}\right) \quad (10)$$

引入马库姆函数 $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{t^2}{2}) dt$, 用户 k 的中断概率表示为:

$$\Phi_k(L) = \int_0^{R_0} f_k(r) dr = 1 - Q\left(\frac{R_0 - L\mu_n}{\sqrt{L\sigma_n^2}}\right) \quad (11)$$

则用户 k 反馈的 CQI 数 L 为 $\min_{1 \leq l < L} (\Phi_k(l) \leq \epsilon_0)$ 。

3.2 最大化系统频谱效率的量化门限

CQI 的量化问题是与比特数分配方式、系统中的用户数、信道增益的概率分布等相关联的。考虑 b 的整数要求, 假设基站端调制可选模式为 $M = \{M_0, M_1, \dots, M_{J-1}\}$, M_j 表示星座图尺寸, M_0 表示不分配比特。量化码本定义为 $T = \{t_0, t_1, \dots, t_{J-1}\}$, t_j 由 $\text{ceil}(\log_2 J)$ 个比特表示, $\text{ceil}(x)$ 表示大于 x 的最小整数。量化规则为: 确定量化门限 $S = \{S_0, S_1, \dots, S_J\}$, $S_0 = 0, S_J = \infty$ 。当信噪比在 $[S_j, S_{j+1}]$ 范围内时, 反馈码字 t_j 。系统平均传输速率从统计意义上定义为单个调制方式传输速率与其概率乘积之和, 是以量化门限 S 为自变量的函数:

$$\bar{R}(s) = \sum_{j=0}^{J-1} W b_j \int_{S_j}^{S_{j+1}} P_{\gamma_n}(\gamma) d\gamma \quad (12)$$

同样系统平均误码率定义为单个调制方式平均误码之和与平均传输速率的比值:

$$\overline{BER}(s) = \frac{1}{\bar{R}(s)} \sum_{j=0}^{J-1} W b_j \int_{S_j}^{S_{j+1}} BER(b_j, \gamma) P_{\gamma_n}(\gamma) d\gamma \quad (13)$$

传统的量化门限利用式(1)直接计算, 而最优的量化门限 S^{opt} 应该在满足平均误码率要求下使系统传输速率最大化, 这是典型的有约束条件下的最优化问题。利用拉格朗日乘子法, 定义中间变量

$$E(s) = \bar{R}(s) \overline{BER}(s) = \sum_{j=0}^{J-1} W b_j \int_{S_j}^{S_{j+1}} BER(b_j, \gamma) P_{\gamma_n}(\gamma) d\gamma \quad (14)$$

构造代价函数:

$$H(s) = \bar{R}(s) + \lambda(E(s) - \bar{R}(s) \overline{BER}_0) = (1 - \lambda \overline{BER}_0) \bar{R}(s) + \lambda E(s) \quad (15)$$

式中 \overline{BER}_0 为系统平均误码率要求, λ 为拉格朗日因子。最优的量化门限 S^{opt} 应满足:

$$\frac{\partial H(s)}{\partial s_j} = (1 - \lambda \overline{BER}_0) \frac{\partial \bar{R}_n(s)}{\partial s_j} + \lambda \frac{\partial E(s)}{\partial s_j} = 0, \quad j = 1, \dots, J-1 \quad (16)$$

利用 Leibnitz 微分规则, 将式(12)和(14)求导后代入(16), 经过化简得:

$$\frac{1 - \lambda \overline{BER}_0}{\lambda} = \frac{b_{j-1} BER(b_{j-1}, s_j) - b_j BER(b_j, s_j)}{b_j - b_{j-1}}, \quad j = 1, \dots, J-1 \quad (17)$$

由式(17)可直接得到:

$$BER(b_1, s_1) = \frac{b_j BER(b_j, s_j) - b_{j-1} BER(b_{j-1}, s_j)}{b_j - b_{j-1}} \quad (18)$$

从式(18)看出, 最优的量化门限 S^{opt} 完全由 S_1 决定。利用仿真在符合实际的信噪比范围内遍历搜索, 便可确定既满足平均误码率要求, 又使系统平均传输速率最大化的 S_1 值, 然后根据式(18)计算其余 S_j 便找到了最优的量化门限 S^{opt} 。

4 仿真结果

4.1 仿真模型

仿真系统带宽 W 为 20MHz, 子载波数 N 为 512, 基站天线数 N_t 为 2, 用户天线数 N_r 为 1, 采用 Alamouti 编码, 用户 k 的 QoS 要求包括, 传输速率要求 $R_0 = 500\text{kbps}$, 误码率要求 $BER_0 = 10^{-4}$, 中断概率要求 $\epsilon_0 = 0.01$, 可选方形 M-QAM 调制方式为 $M = \{1, 4, 16, 64, 256\}$, 与之对应的量化码本定义为 $T = \{000, 001, 010, 011, 100\}$, 系统平均误码率要求为 10^{-3} , 信道模型采用四径 Rayleigh 衰落信道。本文仿真过程未考虑信道估计和信道反馈延迟所带来的误差, 而是假定反馈到基站端的 CQI 完全正确。

4.2 仿真结果与分析

图 2 给出了不同用户数下, 平均信噪比为 10dB 时 CQI 反馈数 L 与中断概率的关系曲线。从图中可以看出, 随着基站同时服务用户数的增加, 保证用户 QoS 要求的 L 值也随之增大。在中断概率要求 $\epsilon_0 = 0.01$ 下, 用户数为 20 时要反馈 106 个 CQI, 用户数为 40 时则要反馈 190 个 CQI。这是因为式(7)表示的子载波信噪比概率密度函数中隐含了用户竞争的因素, 用户数越大, 竞争越激烈, 在相同的反馈信息下, 用户获得子载波分配的可能性越小, 所以必须增加反馈信息量来维持 QoS。

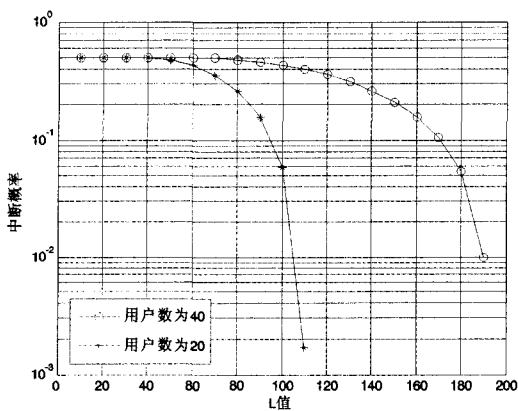


图 2 L 值与中断概率的关系

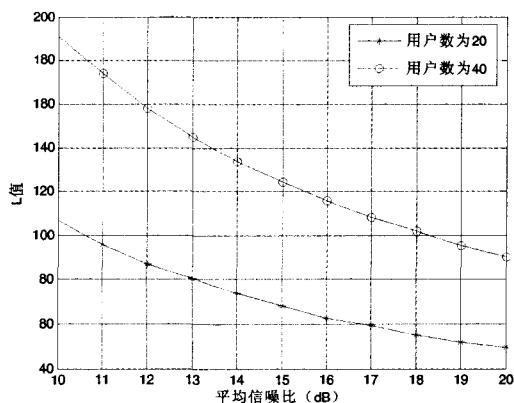


图 3 L 值与平均信噪比的关系

图 3 给出了不同用户数下, 满足中断概率时子载波反馈数 L 与平均信噪比的关系曲线。如图所示, 较好的平均信噪比可以大幅地减小用户 CQI 反馈数 L , 尤其在用户数较多的环境下。当平均信噪比从 10dB 增加到 15dB 时, 用户数为 40 的系统反馈可以减少大约 70 个 CQI, 而用户数为 20 的系统只减少

30 个左右的 CQI。由图 2 和图 3 得出的结论似乎与传统意义上的多用户分集增益正好相反, 后者认为用户数越多, 各个用户只需反馈越少的 CQI 便可使系统运行在最佳状态。两者的区别在于, 传统的多用户分集以基站端为研究对象设计反馈策略使资源得到充分利用, 而本文从用户端出发, 以保证用户 QoS 为前提设计反馈算法, 因此更具实际意义。

图 4 所示为不同用户反馈数下, 系统平均误码率与量化门限 S_1 值的关系。从图 4 可以看出, 当用户数为 20、40 时, 满足误码率要求的最优 S_1 值分别为 8.7dB、8.5dB, 最优 S_1 值随用户数的增加略有下降, 因此系统要根据基站同时服务的用户数动态地调整量化门限。根据公式(18)算出用户数为 20、40 时, 最优的量化门限分别为 $S_{20} = \{0, 8.7, 16.4, 23.1, 29.4, 8\}$ 、 $S_{40} = \{0, 8.5, 15.3, 22.9, 29.2, 8\}$ 。

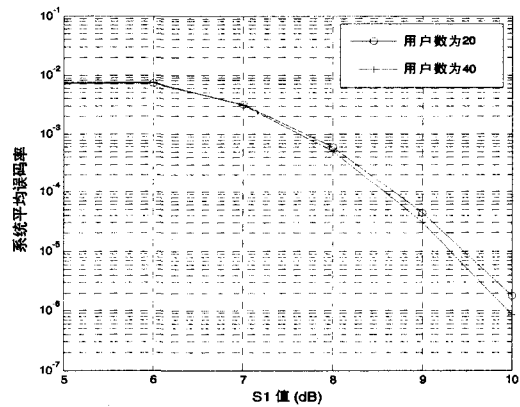


图 4 S_1 值与系统平均误码率的关系

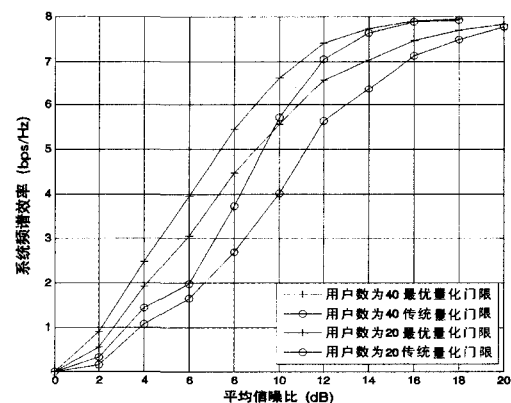


图 5 不同量化门限下的系统频谱效率

图 5 所示为传统量化门限与最优化门限下系统的频谱效率。用户数为 20 的系统中, 在平均信噪比较低时, 最优化门限对频谱效率的提高相当明显, 平均信噪比 8dB 处增益达到 1.8bps/Hz。随着平均信噪比增大, 频谱效率的提高会逐渐减小, 这表明最优的量化门限非常适用于平均信噪比较差的环境, 如小区边缘用户。另外在平均信噪比为 0~10dB 范围内, 用户反馈数为 20, 采用最优化门限的系统频谱效率甚至要大于用户数为 40、采用传统量化门限的系统。此时, 最优化门限增益大过了多用户分集增益。

结论 本文从统计学的角度推导了有限反馈量与用户 QoS 要求之间的关系, 为降低系统反馈开销提供了理论指导, 并以系统误码率为约束条件, 给出使系统整体传输速率最大化的量化门限。仿真结果表明, 根据系统用户数及 QoS 要求

(下转第 134 页)

文实验把这两种方法与本方法作比较,从 D1 语料库中识别出有情感倾向的短语,其中,识别出的短语包括褒义和贬义短语,中性短语属于未识别出情感倾向的短语不包括在内。传统的文本分类方法需要事先标注好一些短语作为学习样本,然后使用 SVM 方法构造一个两类分类器对测试集中的短语进行分类。AG 方法可以很好地描述诸如“很幸福”和“不是很幸福”之类短语的情感识别,但是它只能识别短语内部各词之间的“修饰/被修饰”关系,对其他的处理能力较弱。本文在其基础上从词法分析的角度分析短语内部结构,取得较好的效果。从表 3 可以看出,基于 AG 的方法对多中心词的短语识别能力较差,传统分类方法介于两者之间,但是传统分类方法需要人工标注训练样本,针对不同主题构造不同的分类器,通用型较差,而本文的方法从短语的两要素出发,利用 HowNet 对短语中的各个词语义的准确定位,然后基于词法分析对其中各个词之间的关系进行分析,能够较准确地进行倾向分类。

表 3 三种方法对 D1 语料库中短语的分类实验比较

语料库 D1	传统方法	AG 方法	本文方法
一个中心词	88.3%	86.2%	93.5%
多个中心词	89.1%	38.6%	95.7%
平均值	88.7%	62.4%	94.6%

4.2 基于短语识别的文档倾向分类

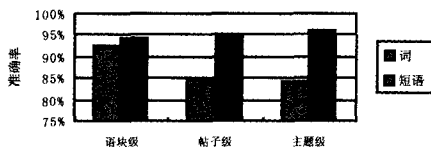


图 1 使用词和短语进行文档倾向分类比较

文档情感分类主要有两种方法:一种是基于文档中的各个词的同现频率进行褒贬倾向的文档分类;另一种是把所有词分成两类,然后统计文档中两类词的总数进行分类。为了更好地比较本文短语倾向识别方法的优劣性,采用第二种方法对语料库中的文档进行情感倾向分类。现 D2 语料库中包含 50 个主题,9000 多帖,有 947 万字,经过 ICTCLAS 分词获得 617 万多个词块,从中提取实词(包括 n, v, a, d, ad, vd, vn 等),其中有情感倾向的词为 185,126 频次,短语 101,634 频次,采用本文的方法分别获取词和短语的倾向性,根据词和短语的褒贬性获得各帖的褒贬倾向性,然后针对同一主题统计褒贬帖数将主题进行分类,图 1 为使用词和短语对 D2 语

料库中的主题进行情感倾向分类的准确率比较。

从图 1 可以看出,在语块级的倾向分类实验中,基于词的比基于短语的分类准确率略低,因为两个实验均基于语块本身的语义进行比较,没有考虑上下文环境对该语块的影响以及语块对文档主题的影响,所以各个语块的准确率都较高且差距不大;但在帖子级和主题级,这种状况就有所改变,基于词的和基于短语的分类准确率差距加大,主要原因是短语相对于词来说,语义粒度变大,对主题体现的能力更强,准确率更高。

结论 大部分的倾向识别的工作主要集中在词汇级或文档级,但诸如问答系统、摘要提取、挖掘产品评论等都需要句子级或者短语级的倾向分析,而这些方面的研究却较少。本文从语言学角度出发,首先分析词典中对词汇语义定义的特点,采用“情感倾向定义”权重优先的计算方法获得短语中各词的语义倾向度,然后分析短语中各词组合方式的特点,提出中心词概念来对各词的倾向性进行计算来识别短语的倾向性和倾向强度。实验表明,本文的方法对短语的倾向分类识别效果较好,可为更大粒度的文本倾向识别打好基础,具有一定的实用价值。但是文档倾向性还受文档结构等诸多因素影响,还需要通过中心句中心段的识别来提高文档级的分类精度,有待进一步更深入细致的研究。

参考文献

- Wiebe J, Wilson T, Bell M. Identifying collocations for recognizing opinions[A]. In: Proc. ACL-01 Workshop on Collocation: Computational Extraction, Analysis and Exploitation[C], 2001
- Riloff E, Wiebe J, Wilson T. Learning Subjective Nouns using Extraction Pattern Bootstrapping[A]. In: Conf. on Natural Language Learning (CoNLL)[C], 2003. 25~32
- Turney P, Littman M. Measuring praise and criticism: Inference of semantic orientation from association[J]. ACM Transactions on Information Systems, 2003, 21(4): 315~346
- Wilson T, Wiebe J, Hwa R. Just how mad are you? Finding strong and weak opinion clauses[A]. In: Proceedings of 21st Conference of the American Association for Artificial Intelligence (AAAI-04)[C]. US, 2004
- Hatzivassiloglou V, McKeown K R. Predicting the semantic orientation of adjectives[A]. In: Proceedings of the 35th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL-97)[C], 1997. 174~181
- Whitelaw C, Garg N, Argamon S. Using Appraisal Groups for Sentiment Analysis[A]. In: Proceedings of the 14th ACM international conference on Information and knowledge management [C], Bernen, Germany, 2005. 625~631
- Takamura H, Inui T, Okumura M. Latent Variable Models for Semantic Orientations of Phrases[A]. In: Proc. of the 11th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics (EACL-2006)[C], 2006

(上接第 108 页)

动态调整反馈信息与量化门限,既可节省系统的反馈开销,同时也能提高系统的频谱效率,所有的反馈与量化参数都可做离线计算,并以表的形式存储在用户端以供查询,降低了实时运算的复杂度,使该算法更具实用性。

参考文献

- Shen Zukang, Andrews J G. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2726~2737
- Cimini L J, Daneshrad B, Sollenberger N R. Clustered OFDM with transmitter diversity and coding. IEEE GLOBECOM, 1996,

703~707

- Svedman P, Wilson S K. A simplified opportunistic feedback and scheduling scheme for OFDM. IEEE VTC, 2004. 1878~1882
- Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation. IEEE J Select Areas Commun, 1999, 17(6): 1747~1758
- Goldsmith A J, Chua S. Vairable rate variable power MQAM for fading channels. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(10): 1218~1230
- Liu Qingwen, Zhou Shengli, Giannakis G B. Cross-Layer Scheduling With Prescribed QoS Guarantees in Adaptive Wireless Networks. IEEE journal on selected areas in communications, 2005, 23(5): 1056~1066