

采用低密度校验码的多天线 OFDMA 系统

高敬伯 周曼丽

(华中科技大学电信系 武汉 430074)

摘要 在本文中针对频率选择性衰落信道提出了一种采用低密度校验(LDPC)码的多天线(MIMO)正交频分多址(OFDMA)系统。在这一多用户/多速率系统中,首先通过OFDMA消除用户之间的干扰,从而将多用户环境转化为单用户环境;然后通过联合MIMO软解调与LDPC码解码的Turbo迭代算法,消除发射天线之间的干扰并改善系统的性能。仿真结果表明,该方案可以有效地消除多用户干扰和发射天线之间的干扰,在通过利用空分复用以提高频谱效率的同时,也获得了由LDPC码提供的编码增益。由于该方案对于星座图没有任何限制,因此可以通过采用高效的调制方式进一步提高频谱效率。

关键词 低密度校验码,多天线,正交频分多址

LDPC-Coded MIMO OFDMA for Frequency-Selective Fading Channels

GAO Jing-Bo ZHOU Man-Li

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A new multiuser/multirate transmission scheme for wide-band wireless mobile system is proposed in this paper. This scheme is LDPC coded MIMO OFDMA system to cope with frequency-selective multipath channel for multiuser communications. The two main principles of the proposed scheme are as follows: first, relying on OFDMA to eliminate multiuser interference and to convert multiuser environments to single-user ones; secondly, using joint LDPC decoding and MIMO soft-demodulating to eliminate interferences among transmit antennas and to improve performance. Simulation results show that the proposed system can effectively eliminate multiuser and multi-antenna interference, and is capable to increase spectral efficiency through multiplexing and to improve performance through LDPC coding. Furthermore, there are no restrictions on signal constellations in the proposed scheme, and thus spectral efficiency can be further increased by exploiting efficient modulation techniques like QAM, APSK.

Keywords Low-density parity-check codes, Multi-input multi-output, Orthogonal frequency division multiplex access

1 前言

可以预见到,在后三代(Beyond 3rd Generation, B3G)蜂窝无线移动通信系统中,必须能够在频率选择性衰落信道下提供很高的数据传输速率,并且要同时支持多个用户同时进行通信。与蜂窝移动通信系统的上行链路相比,下行链路尤其被认为是影响进一步提高数据传输速率和稳定性的瓶颈。为此,在本文中,提出了采用低密度校验码(Low-Density Parity-Code, LDPC)的多天线(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiplex Access, OFDMA)系统用于蜂窝移动通信系统的下行链路的传输。

从信息论可以知道,当同时在发射端和接收端采用多副天线时,可以提高信道的容量和无线传输的可靠性。获得性能改善的原因是由于在发射端和接收端通过安装多副天线而获得的空间自由度。依据不同的设计目标,在理论界已经提出了不同的MIMO方案。例如,BLAST(Bell Laboratories LAYered Space-Time)系统的设计目标是为了通过空分复用提高传输速率,而正交空时分组码则充分地利用发射分集以改善系统性能。实际上,不论采用何种MIMO系统,都需要提供强纠错能力(大的编码增益)的纠错码用以克服信道的衰落、传输符号间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)以及噪声,从而使得传输速率接近于MIMO信道的容量。而LDPC码被证明有着优异的纠错性能^[1]。另外,LDPC码的构造通常是基于随机的方法,从而可以构造出几乎任何码率的LDPC码。因此在本文

中,选择LDPC码作为本文所提出系统的纠错码。

在多用户/多速率通信系统中,由于多用户干扰(Multi-User Interference, MUI)的存在,使得多用户MIMO系统面临着更多的挑战。假设一个支持 M 个用户的多用户系统,每个用户均安装了 N_r 副发射天线,那么系统中的干扰源将从单用户系统中的 $(M-1)$ 个增加到多用户系统中的 $(M-1)N_r$ 个。近几年的研究表明,将MIMO技术与OFDMA相结合是一种很有竞争力的宽带无线多用户方案。主要是因为:OFDM将宽带的频率选择性衰落信道转化为一系列平行的窄带并且相互正交的平坦衰落子信道,因此在MIMO OFDM传输系统中,可以在每一个子载波上应用MIMO传输策略。此时,OFDM符号在每个子载波上均经历平坦衰落,从而形成了一种有效的宽带无线传输方案。其次,OFDMA通过子载波在不同用户间的分配,将多用户环境转化为单用户环境,从而有效地消除了MUI。

目前,迭代信号处理的思想已经被广泛地应用到了通信系统中的各个环节当中,例如:信道估计、均衡以及多用户检测。在通信领域中,这种迭代处理算法通常被称为Turbo算法。在文[2,3]中研究了Turbo多用户检测,接收机通过在不断在信道解码与多用户检测之间交换码字比特或者调制符号的软信息(soft information)以改善系统的性能。在文[4,5]中,Turbo算法被应用到在MIMO系统中联合解调和解码,从而使得系统性能接近于最大似然(Maximum Likelihood, ML)接收机的性能。

本文提出了采用LDPC码的MIMO OFDMA系统。在

该系统中,首先通过 OFDMA 消除用户之间的干扰,从而将多用户环境转化为单用户环境;然后通过联合 MIMO 软解调与 LDPC 码解码的 Turbo 迭代算法,消除发射天线之间的干扰并改善系统的性能。本文可分为 4 个部分,第 1 部分简要地介绍有关背景知识;在第 2 部分详细地介绍了系统模型以及描述了消除 MUI 和发射天线干扰的算法;在文中的第 3 部分,给出了本文所提出系统的仿真结果;最后总结全文。

2 算法描述

2.1 系统模型

本文所提出的采用 LDPC 码的 MIMO OFDMA 系统的原理框图如图 1 所示,为了简便,在图中只给出了一个用户的原理图。假设系统同时支持 M 个用户,总共有 Q 个子载波,发射端有 N_t 副发射天线,而每一个用户在接收端均配有 N_r 副接收天线,并且每一个用户的信号均经历频率选择性衰落。在发射端,用户 m 首先将长度为 k 的信息比特向量 b_m 传送到码率为 $r=k/n$ 的 LDPC 码编码器中,然后将码字比特向量 c 调制成为长度为 $n/\log_2 |\Omega|$ 的数据块,其中, Ω 为调制符号

星座图,而 $|\Omega|$ 为星座图的阶数。假设 Q_m 为分配给用户 m 的子载波的数量,从而可以得出传输这些调制符号所需要的 OFDM 传输次数 $\bar{n}=(n/\log_2 |\Omega|)/(N_t Q_m)$ 。假设 $X_{m,p}=[x_{m,p}(1), \dots, x_{m,p}(N_t)]^T$ 为用户 m 在第 p 个 OFDM 符号所传输的 $N_t \times Q_m$ 数据块。为了能够在接收端消除 MUI,将在每一个发射天线的符号向量 $x_{m,p}(i)$ 乘以用户 m 的维数为 $Q \times Q_m$ 的用户扩展矩阵 C_m ,从而得到长度为 Q 的符号向量 $u_{m,p}(i)=C_m x_{m,p}(i)$,在这里, i 为发射天线。对于每一个符号向量 $u_{m,p}(i)$ 添加长度为 L 的循环前缀以消除由于 L 阶 FIR 信道 $\{\bar{h}_{m,ij}(l)\}_{l=0}^{L-1}$ 所造成的数据块之间的干扰 (Inter-Block Interference, IBI),从而得到长度为 $J=Q+L$ 的符号向量 $v_{m,p}(i)$ 。添加循环前缀的操作可以通过符号向量 $u_{m,p}(i)$ 乘以矩阵 $T_{cp}=\begin{bmatrix} O_{L \times (Q-L)} & I_{L \times L} \\ I_{Q \times Q} & \end{bmatrix}$ 完成^[6],即 $v_{m,p}(i)=T_{cp} u_{m,p}(i)$ 。由于用户 m 从发射天线 i 到接收天线 j 所经历的信道为 L 阶 FIR 信道 $\{\bar{h}_{m,ij}(l)\}_{l=0}^{L-1}$,则信道对于发射符号向量 $v_{m,p}(i)$ 的作用可以通过如下 $J \times J$ 维 Toeplitz 矩阵 $\bar{H}_{m,ij}$ 描述。

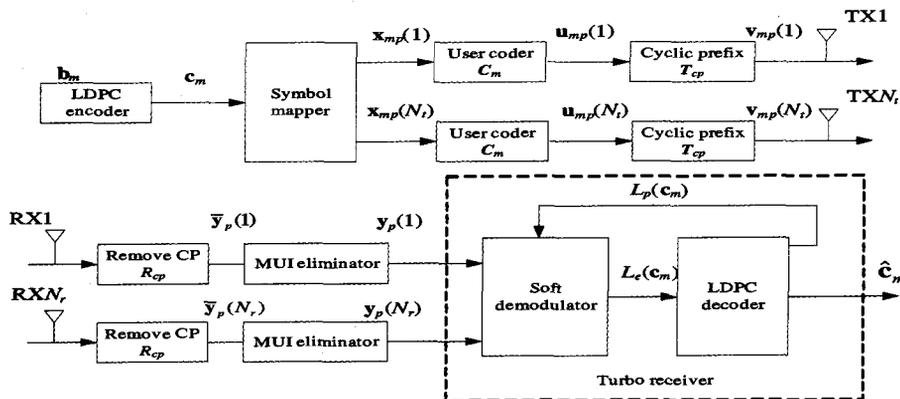


图 1 采用 LDPC 码的 MIMO OFDMA 系统原理图

$$\bar{H}_{m,ij} = \begin{bmatrix} \bar{h}_{m,ij}(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \bar{h}_{m,ij}(1) & \bar{h}_{m,ij}(0) & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{h}_{m,ij}(L) & \bar{h}_{m,ij}(L-1) & \bar{h}_{m,ij}(0) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \bar{h}_{m,ij}(L) & \bar{h}_{m,ij}(0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

在接收端,我们首先分别处理每一个接收天线所接收到的信号。对于接收滤波所产生的采样信号乘以矩阵 $R_{cp}=[O_{Q \times L} \quad I_Q]$,从而消除在发射端添加的循环前缀^[6]。令 $H_{m,ij}=R_{cp} \bar{H}_{m,ij} T_{cp}$,那么可以得到在接收天线 j 信号为:

$$\bar{y}_p(j) = \bar{x}_{m,p}(j) + \sum_{\mu=1, \mu \neq m}^M \bar{x}_{\mu,p}(j) + R_{cp} w_p(j) \quad (2)$$

其中, $w_p(j)$ 为加性高斯白噪声向量。对于用户 m 而言, $\bar{x}_{m,p}(j) = \sum_{i=1}^{N_t} H_{m,ij} C_m X_{m,p}(i)$ 为该用户的数据在接收天线 j 上所获得的分量,而 $\sum_{\mu=1, \mu \neq m}^M \bar{x}_{\mu,p}(j)$ 为其它用户的干扰信号。

2.2 利用用户扩展分离码消除 MUI

对于信号 $\bar{y}_p(j)$,尽管已经通过循环前缀消除了 IBI,但是仍然存在 MUI。因此接下来利用用户扩展码 C_m 和用户分离码 G_m 来消除 MUI^[6,7]。假设有 $Q \times Q$ 维矩阵 $F \triangleq Q^{-1/2} \exp\{(-j 2\pi(k-1)(q-1)/Q)\} (1 \leq k, q \leq Q)$, $N \times Q_m$ 维矩阵 $\Phi_m = I_p(\cdot, I_m)$ 是由 $Q \times Q$ 维单位矩阵的 I_m 列所构成,其中 I_m 为分配给用户 m 的子载波的编号,则用户扩展码和用户分离码分别为^[7]:

$$C_m = F^H \Phi_m \quad G_m = \Phi_m^T F \quad m=1, \dots, M \quad (3)$$

将信号 $\bar{y}_p(j)$ 乘以用户 m 的用户分离码 G_m 用以消除其他用户的干扰,从而得到用户 m 在第 j 个接收天线和第 p 个 OFDM 符号的接收信号:

$$y_{m,p}(j) = \sum_{i=1}^{N_t} D_{m,i} x_{m,p}(i) + z_{m,p}(j) \quad (4)$$

其中,噪声 $z_{m,p}(j) = G_m R_{cp} w_p(j)$ 仍然为加性高斯白噪声, $D_{m,i}$ 为 $Q_m \times Q_m$ 维对角矩阵,对角元素 $D_{m,ij}$ 为对于用户 m 在发射天线 i 与接收天线 j 之间的复频率响应。在这里,由于在发射端和接收端分别采用了添加、删除循环前缀和乘以用户扩展、分离码,使得在接收信号 $y_{m,p}(j)$ 中完全消除了 IBI 和 MUI。

2.3 采用 Turbo 原理优化系统的性能

当将所需要用户 m 的信号从接收信号中分离出来后,我们采用串行级联的 Turbo 接收结构^[4,5]以联合 MIMO 解调和 LDPC 解码,从而优化系统的性能,如图 1 所示。Turbo 接收机可以分为两个组成部分:软输入软输出 (soft-input soft-

output) MIMO 软解调器和采用置信传播 (belief propagation) 算法的 LDPC 码解码器。LDPC 码字比特的外信息 (extrinsic information) 在解调器和解码器之间来回不断地传递以完成迭代运算。在解调和解码迭代运算过程中,存在着两种不同的迭代循环:外循环和内循环。外循环是指在解调器与解码器之间的迭代循环,而内循环是指在 LDPC 解码器内,由于采用消息传递的解码算法使得解码器为了完成解码操作所需要的循环。下面,我们采用 Turbo 原理来还原出用户的信息比特。

由于在本文中假设接收端可以准确地获得信道信息,由 OFDM 系统的传输特性可知,在每一个子载波上传输的信号之间互相解耦,即不存在不同子载波上传输信号之间相互干扰。因此对于每一个用户来说,对于每一个子载波所接收到的 OFDM 调制符号可以分别独立地进行解调。为了便于以下的公式推导,我们重写公式(4)从而得到对于子载波 q , OFDM 符号 p , 用户 m , 接收信号 $y_{m,p}(q)$ 为:

$$y_{m,p}(q) = D_{m,p}(q)x_{m,p}(q) + z_{m,p}(q) \quad (5)$$

其中, $x_{m,p}(q) \in \Omega^{N_t}$, $y_{m,p}(q) \in \Omega^{N_r}$ 分别为在发射端和接收端的调制信号, $N_r \times N_t$ 维矩阵 $D_{m,p}(q)$ 是系统在发射端和接收端的复频率响应, $z_{m,p}(q)$ 为加性高斯白噪声, 并且 $E[Z^H Z] = \sigma^2 I_{N_r}$ 。

在下文的描述中,为了简便但不失一般性,我们省略了参数 m, p, q 。首先,根据 LDPC 码的码字比特向量 c 的先验信息 (priori information) $L_p(c)$ 和接收到的调制符号向量 y , MIMO 解调器计算出所有发射符号的软判决信息,进而得到码字比特向量 c 的外信息 (extrinsic information) $L_e(c)$ 。接下来,将外信息 $L_e(c)$ 传递给 LDPC 码解码器采用消息传递算法进行解码运算。当 LDPC 码解码器迭代循环完成时,将解码器输出的内循环解码运算所得到的码字比特的外信息作为 $L_p(c)$ 传递给 MIMO 软解调器从而进行下一次外循环。当 Turbo 接收器开始第一次外迭代循环时, $L_p(c) = 0$ 。目前,采用基于最大后验概率 (Maximum A Posteriori, MAP) 的算法^[4, 5] 计算发射符号的软判决信息有着太高的运算复杂度,其运算复杂度随发射天线数的增加而指数增长,因此本文采用次优的软判决算法^[4, 5]。首先根据接收信号和相应码字比特向外信息计算出发射符号的估计值^[4]:

$$\hat{x}_j = \sum_{a \in \Omega} a \cdot P(x_j = a) = \sum_{a \in \Omega} a \prod_{l=1}^{\log_2 |\Omega|} [1 + \exp(-\{a\}_l \cdot L_p(c_{l,j}))]^{-1} \quad (6)$$

式中, $c_{l,j}$ 为调制符号 x_j 中的第 l 个比特。令 $\hat{x}_j = [\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_{j-1}, 0, \hat{x}_{j+1}, \dots, \hat{x}_{N_t-1}]^T$, 因此对于每一个发射符号采用如下运算消除发射天线之间的干扰^[4]:

$$\hat{y}_j = y - D\hat{x}_j \quad (7)$$

然后,将 \hat{y}_j 通过线性最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 滤波器进一步消除残余的干扰^[4], 即:

$$z_j = w_j^H \hat{y}_j \quad (8)$$

其中, 滤波器参数 $w_j \in C^{N_r}$ 的选择使得发射符号和滤波器接收符号之间均方误差最小,

$$w_j = \arg \min_{w \in C^{N_r}} E\{|x_j - w^H \hat{y}_j|^2\} = \sigma(D\Delta_j D^H + \sigma^2 I)^{-1} D e \quad (9)$$

其中,

$$\Delta_j = \text{cov}\{x_j - \hat{x}_j\} = \text{diag}\{1 - |\hat{x}_1|^2, \dots, 1 - |\hat{x}_{j-1}|^2, 1, 1 - |\hat{x}_{j+1}|^2, \dots, 1 - |\hat{x}_{N_t}|^2\} \quad (10)$$

e 为长度为 N_t 的向量, 其中 $e_j = 1$, 其它元素均为零。最后, 从 MMSE 滤波器的输出计算出 LDPC 码字比特的外信息, 传递给解码器进行解码操作。

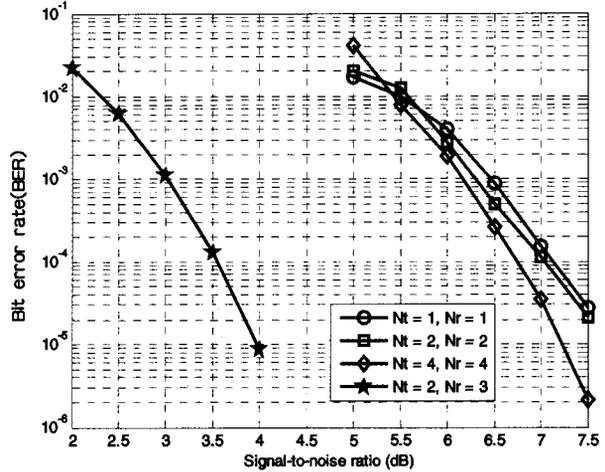


图2 采用 LDPC 码的 MIMO OFDMA 系统的仿真曲线

在本文中,采用消息传递算法^[1] 作为 LDPC 码的解码算法。在消息传递算法的每一次迭代循环(内循环)当中,变量节点首先根据从软解调获得的变量节点的先验信息和从相邻接的校验节点发送的信息,计算出这一信息比特的外信息。然后,变量节点将计算得到的外信息分别传送给与其相邻接的校验节点。接下来,校验节点再根据这些信息分别计算出发送给与其相邻接变量节点所对应的信息比特的外信息,并将它们传送给变量节点。这时,变量节点依据得到的外信息做出码字比特的硬判决。如果这时 LDPC 码的所有校验方程都得到了满足,则整个 Turbo 接收过程成功结束,否则,继续进行这一变量节点和校验节点的更新过程,并不断做出硬判决直到内迭代次数达到预先设定的上限 l_m 。此时,在变量节点计算所得到的外信息传递给 MIMO 软解调器从而开始下一次外迭代循环。在这里,对于校验节点的信息有两种处理方法,一种是将在校验节点的信息保存下来以备下一次内迭代循环开始时使用,而另外一种则是简单地将校验节点的信息丢弃,在下次内迭代循环中重新计算校验节点信息。仿真结果表明^[5],前一种方法至少可以取得与后一种方法相同的性能,并且有更快的收敛速度。如果此时外循环次数也达到了预先设定的上限 l_{out} ,则整个 turbo 迭代接收过程宣布失败。

3 仿真运算结果

在这一部分采用 Monte Carlo 仿真算法来分析本文所提出的采用 LDPC 码的 MIMO OFDMA 系统的性能。在仿真运算中,假设在发射、接收天线之间的信道为 GSM 05.05 推荐标准的 Rayleigh 频率选择性衰落信道^[8]。在这一信道模型中,最大时延为 $5\mu s$ (相当于 $L=10$)。系统共有 256 个子载波,分配给 8 个用户。在这些用户中,有两个高速用户分别获得 64 个子载波,两个中速用户分别获得 32 个子载波和四个低速用户分别获得 16 个子载波。LDPC 码(1024×2048)为列重为 3,行重为 6 的规则码。调制方式为正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)。

我们分别仿真了在不同发射、接收天线数目条件下系统的性能,给出了误码率与信噪比的曲线如图 2 所示。从图中可以看出,当发射、接收天线数相同并分别为 $1 \times 1, 2 \times 2, 4 \times$

4时,系统的性能依次略微地提高。这说明,采用 Turbo 原理可以有效地消除发射天线之间的干扰。与此同时,频谱效率或者传输速率也随着天线数目的增加而线性地增加,从而清楚地说明了多天线带来的好处。另外,在图中还给出了发射、接收天线为 2×3 时系统的性能,与 2×2 的系统相比,在误码率为 10⁻⁵ 量级时,2×3 系统的性能提高了约 3.5 dB,从而说明了增加接收天线以获得额外接收分集的好处。

结论 在本文中,针对频率选择性衰落信道提出了一种采用 LDPC 码的 MIMO OFDMA 多用户/多速率系统,并对该系统的性能进行了分析。在该系统中,首先,通过设置用户扩展码和用户分离码,有效地消除了用户之间的干扰。然后,通过联合 MIMO 软解调和 LDPC 码解码的 Turbo 迭代算法,消除了发射天线之间的干扰,在通过利用空分复用以提高频谱效率的同时,也获得了由 LDPC 码提供的编码增益。在文中,仿真了在不同发射、接收天线数情况下系统的性能。仿真结果表明,OFDMA 可以有效地消除多用户干扰,而 Turbo 接收机同时有效地消除发射天线之间的干扰。由于该系统对于星座图没有任何限制,具有良好的性能和高的频谱利用率和数据传输速率,因此为下一代 B3G 高速、多用户蜂窝移动通信系统的下行链路提供了一个良好的选择。

参考文献

- MacKay D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999, 45: 399~432
- Poor K V. Turbo multiuser detection: An overview. presented at ISSSTA, Parsippany, NJ, USA, 2000
- Xiaodong W, Poor H V. Iterative (turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA. *IEEE Transactions on Communications*, July 1999, 47: 1046~1061
- Lu B, Guosen Y, Xiaodong W. Performance analysis and design optimization of LDPC-coded MIMO OFDM systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Feb. 2004, 52: 348~361
- Hou J, Siegel P H, Milstein L B. Design of multi-input multi-output systems based on low-density parity-check codes. *IEEE Transactions on Communications*, Apr. 2004, 53: 601~611
- Stamoulis A, Liu Z, Giannakis B. Space-time block-coded OFDMA with linear precoding for multirate services. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Jan. 2002, 50: 119~129
- Zhonglin C, Guangxi Z, Wei C, Qiang N. Differential space-time block-coded OFDMA for frequency-selective fading channels. presented at 14th PIMRC, Beijing, China, 2003
- Institute E T S. European Digital Cellular Telecommunication System (Phase 2): Radio Transmission and Reception, GSM 05.05, ver. 4.6.0. Sophia Antipolis Cedex, France, July 1993

(上接第 27 页)

延抖动和代价随迭代次数变化的曲线。图(b)为基本蚁群算法的相关量统计,表 1 为基本蚁群算法与本文算法的路由结果路径特性参数隶属度比较。

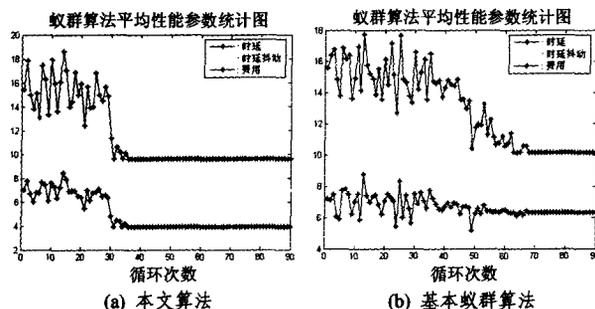


图 3 算法特性参数统计曲线

表 1 算法特性参数比较

路由结果	指标隶属度					路径	综合评价
	时延	时延抖动	费用	丢包率	带宽		
本文算法 5->6->7->8	0.52	0.61	0.611	0.998	0.07	0.241	
基本蚁群算法 5->4->9->8	0.493	0.37	0.54	0.998	0.08	0.220	

为进一步说明本文算法的有效性,设另有业务路由请求如表 2 所示。

表 2 业务路由请求

业务	源点	目标点	QoS 约束	指标权重
2	2	5	D=20, DJ=10, C=18,	(0.14, 0.09,
			BW=11, PL=0.001	0.03, 0.7, 0.04) ^T
3	3	8	D=20, DJ=10, C=16,	(0.14, 0.09,
			BW=10, PL=0.001	0.03, 0.7, 0.04) ^T

对表 2 所示业务,两种算法的路由结果如表 3 所示。

表 3 路由结果

业务	算法类型	结果路径	综合评判值	收敛迭代次数/次
2	本文算法	2->3->4->5	0.210	38
	基本蚁群算法	2->3->4->5	0.210	66
3	本文算法	3->2->9->8	0.246	34
	基本蚁群算法	3->2->9->8	0.246	59

从上述统计结果可见,针对业务 1 路由请求两种算法产生了不同的结果路径,利用本文算法得到的路径 5->6->7->8 是相对于基本蚁群算法所得路径 5->4->8->9 的更优解;而且本文算法的迭代收敛次数为 36 次,明显低于基本蚁群算法的 68 次。对业务 2 和业务 3 路由请求,虽然两种算法得到了相同的路由结果,但是本文的收敛迭代次数明显少于基本蚁群算法。

结论 本文建立了多约束 QoS 路由模型,通过引入模糊评判归一化 QoS 指标,消除了指标间的屏蔽现象,实现了多指标约束的综合优化路由;同时提出了再励学习蚁群算法对问题进行求解,在算法信息素更新阶段通过奖励优秀蚂蚁,惩罚较差蚂蚁,抑制了算法过早收敛,提高了算法的寻优能力和收敛速度。实验证明,利用本文算法能有效、快速地实现多约束 QoS 路由。

参考文献

- 段海滨. 蚁群算法原理及其在应用. 北京: 科学出版社, 2005
- 李士勇. 蚁群算法及其在应用. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004
- 桂志波, 冀鑫泉. 一种基于蚁群系统原理的 QoS 单播路由算法. *信号处理*, 2005, 19(5): 432~435
- 王开宇. 基于蚁群算法的通信网络 QoS 路由方法. *燕山大学学报*, 2005, 29(4): 312~314
- 冉敏. 一种基于蚁群系统的多约束 QoS 路由算法. *计算机工程与应用*, 2005, 41(7): 142~144
- 崔逸学, 林闯. 基于多目标遗传算法的多播服务质量路由优化. *计算机研究与发展*, 2004, 7(41): 1145~1150
- 付振勇, 张根度. 基于非精确状态的蚂蚁网络在 QoS 路由选择中的应用. *计算机工程*, 2004, 14(30): 88~90
- Dorigo M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transaction for Evolutionary Computation*, 1997(1): 53~56
- Schoonderwoerd R, Hoolland O, Bruten J. Ant-based Load Balancing in Telecommunications Networks. *Adaptive Behavior*, 1996, 5(2): 169~207