

基于信道估计的 SC-FDMA 自适应传输方案

张子杰¹, 彭 端², 张 欣¹, 刘高星¹

(1. 广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510006;

2. 广东工业大学 实验教学部, 广东 广州 510006)

摘 要: 由于 SC-FDMA 的峰均功率比(PAPR)比 OFDMA 低, 因而被应用于 3GPP LTE 上行链路。论文分析了 SC-FDMA 传输系统的数学模型, 介绍了基于导频的 SC-FDMA 系统最小二乘(LS)和线性最小均方误差(LMMSE)信道估计算法。在比较该系统集中式和分布式两种子载波映射方式在高低速不同移动环境下传输性能的基础上, 提出了一种基于信道估计的 SC-FDMA 系统自适应传输方案。经仿真证实该方案比单纯采用一种子载波映射的方法性能更加优越, 在相同的误码率情况下, 能够节省大概 3dB 左右的信噪比。

关键词: SC-FDMA; 信道估计; 自适应; 子载波映射

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2012)03-0035-04

An Adaptive Transmission Scheme of SC-FDMA Based on Channel Estimation

ZHANG Zi-jie¹, PENG Duan², ZHANG Xin¹, LIU Gao-xing¹

(1. Information Engineering College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Experimental Center, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: SC-FDMA is used in uplink of 3GPP LTE because its PAPR is lower than OFDMA. It analyses the mathematical model of SC-FDMA transmission system, and introduces the Least-Square (LS) and Linear Minimum Mean-Square Error (LMMSE) channel estimation algorithm based on pilot with SC-FDMA system. Moreover, based on a comparison of the transmission performance between two subcarrier mapping methods of this system in different mobile environment, an adaptive transmission scheme based on channel estimation of SC-FDMA system is proposed. The simulation results show that the scheme's performance is better than the method which uses a single subcarrier mapping. In the same BER situation, the proposed scheme can save about 3dB SNR.

Key words: SC-FDMA; channel estimation; self-adaptation; subcarrier mapping

0 引 言

由于移动终端的发射功率受限, 高的 PAPR 会带来功率放大器效率降低等不利因素^[1]。因此在 3GPP 提出的长期演进(LTE)项目中的上行链路采用 PAPR 更低的 SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) 技术^[2], 即单载波频分多址技术, 该技术融合了传统的频分多址技术和单载波传输方案, 并且能够动态地分布带宽。单载波信号可以通过频域和时域两种方式产生, 频域方案称为 DFT-S-OFDM (DFT Spread OFDM), 而时域分布式方案称为 IFDMA (Interleaved Frequency Division Multiple Access)。

为了提高通信性能而在接收机进行的均衡、检测等信息处理都需要用到信道估计中得到的信道传输系数, 这些信道传输系数的估计精度决定了接收机的性能。在 SC-FDMA 传输系统中, 常用的信道估计算法是基于导频的 LS 和 LMMSE 算法^[3-5], 现有的信道估计算法大多都是对此两种算法进行的改进^[6-10]。文献[6]提出了一种基于迭代最小二乘估计(RLS)技术的算法; Gillian Huang 等人提出了一种近似线性最小均方误差估计(A-LMMSE)算法^[7]; 文献[8]提出了利用交换最小二乘(ALS)算法进行辅助信道估计的算法。

文中在分析 SC-FDMA 系统基于导频的 LS、LMMSE 信道估计算法的基础上, 比较了该系统两种子载波映射方式在高低速不同移动环境下的传输性能, 提出了一种基于信道估计的 SC-FDMA 系统自适应传输方案, 并给出了仿真结果。仿真结果证明该方案能够提高系统的通信性能。

收稿日期: 2011-08-01; 修回日期: 2011-11-05

基金项目: 广州市应用基础研究项目(2006J1-C0331); 广东工业大学博士基金项目(073016)

作者简介: 张子杰(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为宽带移动通信系统; 彭 端, 教授, 研究方向为宽带移动通信系统。

1 SC-FDMA 传输系统数学模型

SC-FDMA 系统结构框图如图 1 所示,首先将比特数据流进行调制,调制方法有 BPSK、QPSK、16QAM 和 64QAM 等。假设经过调制的发送信号为 x ,其中 $x = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$,其中 $(\cdot)^T$ 表示矩阵或向量的转置; $x_i (1 \leq i \leq M)$ 表示第 i 个信号。 x 经过 M 点 DFT 之后有:

$$X = F_M \cdot x \quad (1)$$

其中 F_M 为 DFT 矩阵。

$$F_M = \begin{bmatrix} W_M^{00} & \dots & W_M^{0(M-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_M^{(M-1)0} & \dots & W_M^{(M-1)(M-1)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$W_M^{mk} = \frac{1}{\sqrt{M}} \exp(-j2\pi mk/M) \quad (3)$$

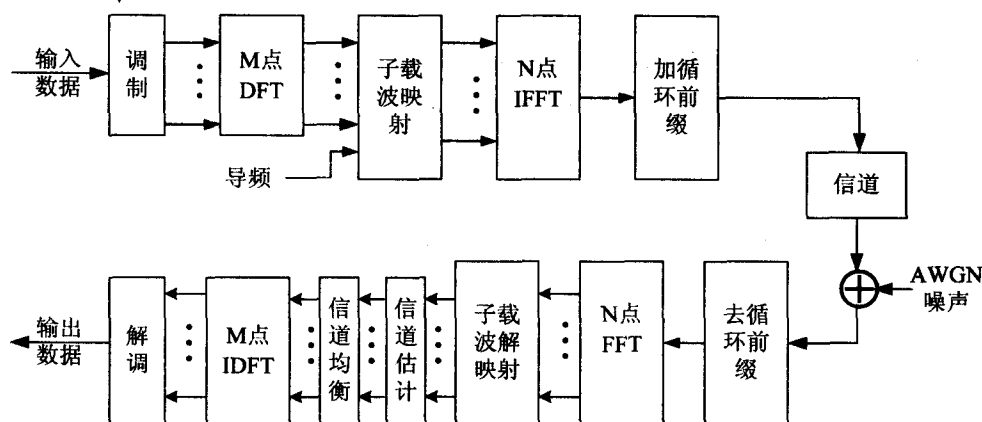


图 1 SC-FDMA 结构框图

经过 DFT 变换的信号通过插入导频用于信道估计,导频结构有块状、梳状、菱形导频等。图 2 所示为 PUSCH(物理上行共享信道)一个子载波的导频分布,其导频信号采用 Zadoff-Chu(ZC)序列^[11-13],长度为 N_{zc} 的 ZC 序列 a_q 可由下式产生:

$$a_q(n) = \begin{cases} \exp(-j2\pi q \frac{n^2/2 + kn}{N_{zc}}) & N_{zc} \text{ 为偶数} \\ \exp(-j2\pi q \frac{n(n+1)/2 + kn}{N_{zc}}) & N_{zc} \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $q \in \{1, \dots, N_{zc} - 1\}$ 是 ZC 序列的根指数, $n = 0, 1, \dots, N_{zc} - 1$, k 可以是任何整数,为简单起见在 LTE 中令 $k = 0$ ^[14]。

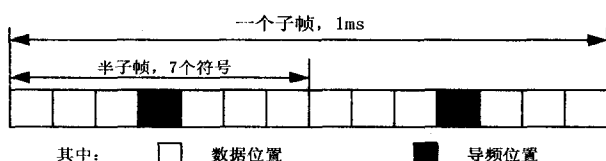


图 2 PUSCH 导频分布

插入导频之后的信号为: $\tilde{X} = [\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_M]^T$ 。 \tilde{X} 经过子载波映射得到:

$$\tilde{X} = A \cdot X \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & & 0_{\nu \times M} & & \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & 0_{\nu \times M} & & \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ & & 0_{(N-(\nu+1)M) \times M} & & \end{bmatrix}_{N \times M} \quad (6)$$

其中, $\nu \in \{0, 1, \dots, \lceil N/M \rceil\}$ 且 $N > M$, $\lceil \cdot \rceil$ 表示小于等于括号内数值的最大整数。当 $\nu = 0$ 时,子载波映射方式叫集中式映射;当 $\nu > 0$ 时叫分布式映射。

经过子载波映射的信号再进行 N 点 IFFT,如下

$$\tilde{x} = F_N^H \cdot \tilde{X} \quad (7)$$

其中, F_N^H 是 IDFT 矩阵, $(\cdot)^H$ 表示矩阵或向量的共轭转置。

为了消除由多径信道带来的符号间串扰(ISI),传输信号进行加循环前缀操作。如下:

$$s = C \cdot \tilde{x} \quad (8)$$

其中 C 为循环

前缀叠加因子:

$$C = \begin{bmatrix} 0_{L \times (N-L)} & I_L \\ I_N & \end{bmatrix}_{(N+L) \times N} \quad (9)$$

L 为 CP 长度。

上述操作之后,信号将进行发送。

2 SC-FDMA 传输系统信道估计算法

SC-FDMA 传输系统常用的信道估计算法有 LS 和 LMMSE 算法^[3,4],下面将简单介绍这两种信道估计算法。

2.1 LS 估计算法

由最小二乘(Least Square, LS)准则可知其代价函数为:

$$\begin{aligned} \Delta_{LS} &= (Y_p - \hat{Y}_p)^H (Y_p - \hat{Y}_p) \\ &= (Y_p - X_p \hat{H}_p)^H (Y_p - X_p \hat{H}_p) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 Y_p 、 \hat{Y}_p 、 X_p 、 \hat{H}_p 分别为导频位置的接收信号、经过信道估计后得到的输出信号、发送信号和信道响应估计值。

为使代价函数 Δ_{LS} 达到最小值,可对其进行求导,

且令:

$$\frac{\partial \Delta_{LS}}{\partial \mathbf{H}_p} = 0 \quad (11)$$

$$\Rightarrow \mathbf{H}_{p,LS} = \mathbf{X}_p^{-1} \mathbf{Y}_p$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{Y_p(0)}{X_p(0)} & \frac{Y_p(1)}{X_p(1)} & \dots & \frac{Y_p(N_p-1)}{X_p(N_p-1)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于 LS 算法简单,计算量小,应用比较广泛。但是其未考虑到噪声和子载波间干扰(ICI)的影响,所以其估计精度受限。

2.2 LMMSE 估计算法

为了抑制高斯白噪声和 ICI 的影响,可以采用最小均方误差 (Minimum Mean-Square Error, MMSE) 准则。假设 $\mathbf{H}_p, \hat{\mathbf{H}}_p$ 为导频处信道响应真实值和估计值。其代价函数为:

$$\Delta_{MMSE} = E\{|\varepsilon|^2\} = E\{|\mathbf{H}_p - \hat{\mathbf{H}}_p|^2\}$$

$$= E\{|\mathbf{H}_p - \hat{\mathbf{H}}_p| |\mathbf{H}_p - \hat{\mathbf{H}}_p|^H\} \quad (13)$$

其中 $E(\cdot)$ 表示均值。为使 Δ_{LMMSE} 达到最小值,通过推导可以得到:

$$\mathbf{H}_{p,MMSE} = \mathbf{R}_{H_p Y_p} \mathbf{R}_{Y_p Y_p}^{-1} \mathbf{Y}_p \quad (14)$$

其中 $\mathbf{H}_{p,LS}$ 为式(12)所求,且:

$$\mathbf{R}_{H_p Y_p} = E[\mathbf{H}_p \mathbf{Y}_p^H] = \mathbf{R}_{H_p H_p} \mathbf{X}_p^H \quad (15)$$

$$\mathbf{R}_{Y_p Y_p} = E[\mathbf{Y}_p \mathbf{Y}_p^H] = \mathbf{X}_p \mathbf{R}_{H_p H_p} \mathbf{X}_p^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (16)$$

把式(15)、(16)代入式(14)可得:

$$\mathbf{H}_{p,MMSE} = \mathbf{R}_{H_p H_p} \mathbf{X}_p^H (\mathbf{X}_p \mathbf{R}_{H_p H_p} \mathbf{X}_p^H + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{Y}_p$$

$$= \mathbf{R}_{H_p H_p} [\mathbf{R}_{H_p H_p} + (\mathbf{X}_p \mathbf{X}_p^H)^{-1} \sigma^2]^{-1} \mathbf{H}_{p,LS} \quad (17)$$

其中 σ^2 表示噪声的方差; $\mathbf{R}_{H_p H_p} = E[\mathbf{H}_p \mathbf{H}_p^H]$ 称为信道的自相关矩阵。

由于 MMSE 准则考虑了噪声和 ICI 的影响,所以其估计精度得到很大地提高。但是其计算复杂度也很高,计算量很大。为了计算简单起见,用 $E[(\mathbf{X}_p \mathbf{X}_p^H)^{-1}]$ 代替 $(\mathbf{X}_p \mathbf{X}_p^H)^{-1}$,即用各子信道的平均功率代替每一帧的瞬时功率,这就是 LMMSE 算法。所以有:

$$\mathbf{H}_{p,LMMSE} = \mathbf{R}_{H_p H_p} [\mathbf{R}_{H_p H_p} + \frac{\beta}{\text{SNR}} \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{H}_{p,LS} \quad (18)$$

其中 $\beta = E|\mathbf{X}_p(n)|^2 E|1/\mathbf{X}_p(n)|^2$ 是一个依赖于调制方式的常数,当调制方式为 QPSK 时, $\beta = 1$; 当调制方式为 16QAM 时, $\beta = 17/9$; $\text{SNR} = E|\mathbf{X}_p(n)|^2 / \sigma^2$ 为平均信噪比。

得到导频处的信道响应之后可以通过线性插值、高斯插值等方法得到完整的信道响应参数。信道参数地确定能够让接收机通过均衡等处理来提高接收性能。

下面将介绍基于信道估计的 SC-FDMA 传输系统自适应传输方案。

3 SC-FDMA 传输系统自适应传输方案

SC-FDMA 传输系统的子载波映射方式有两种:集中式和分布式。分布式子载波映射的优点是能够提供更多的频率分集,因此其能够提高系统通信性能,但是其缺点是对频偏和多普勒频移现象更加敏感^[15]。考虑到在上行传输过程中,频偏和多普勒频移现象不可避免,国内外大多数学者研究 SC-FDMA 系统采用集中式子载波映射方式。

而文中根据移动终端不同的移动速度采用不同的子载波映射方式,提出一种自适应传输方案,原理如图 3 所示。

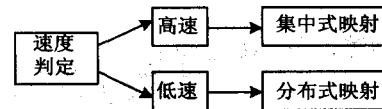


图3 自适应子载波映射

即在数据传输时,首先判断用户端的移动速度。如果用户端移动环境为高速情况,则采用集中式子载波映射方式;如果用户端移动环境为低速情况,则采用分布式子载波映射方式。用数学表达式表示则要求式(6)中的 ν 满足下式:

$$\nu \begin{cases} = 0 & \text{高速情况} \\ > 0 & \text{低速情况} \end{cases} \quad (19)$$

在接收端进行子载波解映射时也是根据用户终端不同的移动速度采用相应不同地解映射方式。

4 仿真结果与分析

为了验证该自适应传输方案的性能,进行了计算机进行仿真。仿真平台参数如表 1 所示。信道采用的是文献[2]中的 ETU 信道。

表 1 仿真参数

参数	数值
采样频率, f_s	7.68 MHz
载波频率, f_c	2 GHz
FFT 长度	512
DFT 长度	144
CP 长度	64
调制方式	QPSK & 16QAM
信道	ETU
移动速度	5 & 120 km/h
信道估计算法	LS & LMMSE

图 4、图 5 分别为用户移动速度等于 5 km/h 和 120 km/h 时利用两种子载波映射方式传输信号未经信道编码的误码率性能,采用的信道估计算法有 LS 和 LMMSE 算法,调制方式有 QPSK 和 16QAM。

由图4可知当SNR在20~35dB范围内时,基于两种信道估计算法下,采用分布式子载波映射进行传输的方案在相同的BER性能情况下均比集中式映射要节省3dB左右的信噪比。因此,在低速移动的情况下,采用分布式映射的性能要比采用集中式要好。由图5可知当SNR在20~35dB范围内时,采用集中式映射的传输方案在相同的BER性能情况下比采用分布式映射节省3dB左右的信噪比。因此,在高速移动的情况下,采用集中式映射进行传输的性能要比采用分布式要好。

由此可见,在低速情况下采用分布式子载波映射而在高速情况下采用集中式子载波映射的自适应传输方案是可行的,它能够同时提高低速和高速两种情形下的通信性能。

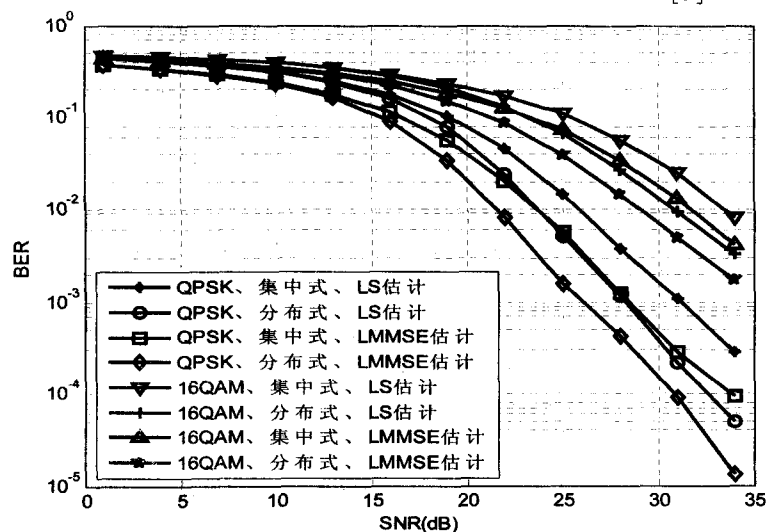


图4 $v=5\text{km/h}$ 时 ETU 信道的 BER 性能

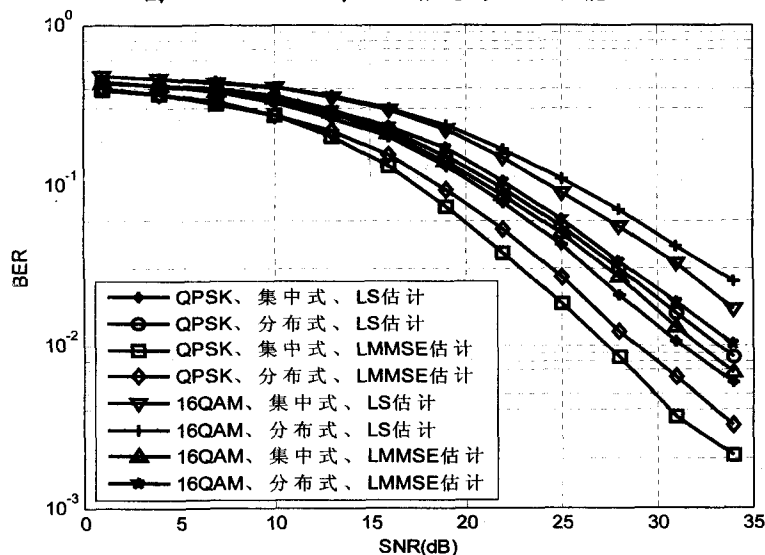


图5 $v=120\text{km/h}$ 时 ETU 信道的 BER 性能

系统采用两种子载波映射进行传输时的不同 BER 性能,提出了一种在低速情况下采用分布式子载波映射而在高速情况下采用集中式子载波映射的 SC-FDMA 系统自适应传输方案。

通过仿真证实了该方案能够同时提高低速和高速情况下的通信性能。

参考文献:

- [1] 沈嘉,索士强. 3GPP 长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [2] 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channel and Modulation (Release 9)[S]. 2010.
- [3] Rana M M. Channel estimation techniques and LTE terminal implementation challenges[C]//International Conference on Computer and Information Technology. [s.l.]: [s.n.], 2010: 545-549.
- [4] 梁琳,李小文. LTE 上行信道估计的算法与性能分析[J]. 广东通信技术,2010,30(3):29-31.
- [5] 郭强,谢丽丽,钱治军. LTE 上行信道估计算法研究[J]. 电子元器件应用,2010,12(5):75-78.
- [6] Rana M M, Kouzan A Z. Channel estimation scheme for 3.9G wireless communication systems using RLS algorithm[C]//IEEE International Conference on Advanced Information Management and Service. [s.l.]: [s.n.], 2010:494-497.
- [7] Huang G, Nix A, Armour S. DFT-Based Channel Estimation and Noise Variance Estimation Techniques for Single-Carrier FDMA[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. [s.l.]: [s.n.], 2010:1-5.
- [8] da Silva I L J, de Almeida A L F, Cavalcanti F R P, et al. Improved Data-Aided Channel Estimation in LTE PUCCH Using a Tensor Modeling Approach[C]//IEEE International Conference on Communications. [s.l.]: [s.n.], 2010:1-5.
- [9] 张鹏,郑建宏. LTE 中一种改进的 LMM-SE 迭代滤波信道估计算法[J]. 广东通信技术,2009,29(7):31-33.
- [10] 李小文,潘迪. 基于 DSP 的 LTE-TDD 上行信道估计实现[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2010,22(1):14-18.
- [11] Ng J C L, Letaief K B, Murch R D. Complex optimal sequences

5 结束语

文中通过比较高低速不同移动环境下 SC-FDMA

在 5 到 10 的区间上随机取值,其可用性在 85% 至 95% 的区间上随机取值,且每组做 100 次取平均值。有图 2 可以看出,在不同的组合服务规模下,量子免疫进化算法的执行不会显著增加 HTN 算法的执行时间。实验 2 说明应用了量子免疫遗传算法后提高组合服务可用性的程度。其中表 3 给出了实验结果数据,从中可以看出,在不同的服务需求规模下,量子免疫进化算法可以有效得提高其可用性,且由于可用性的计算是累乘性的,因此随着服务需求规模的增加,岂可用度呈衰减关系,且规模越大,相应增加可用性的成本越高。

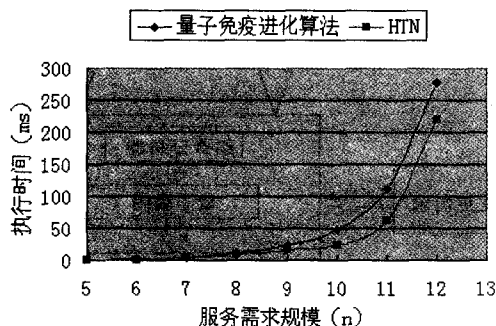


图 2 量子免疫进化算法与 HTN 算法比较

表 3 量子免疫进化算法效果

服务需求规模(n)	HTN		量子免疫进化算法	
	花费(m)	可用性(%)	花费(m)	可用性(%)
5	35.3	63.1	48.7	72.4
6	42.4	60.9	58.5	71.2
7	47.7	60.8	68.3	70.3
8	52.8	57.7	78.7	68.5
9	58.1	56.4	88.4	67.1
10	63.8	53.3	99.2	64.3
11	69.5	49.8	110.6	59.9
12	75.9	43.2	121.5	53.6

6 结束语

文中针对现有的对 Web 服务演化的需求,结合人工免疫系统理论和量子理论,提出了基于免疫量子进化算法的服务演化系统,根据仿真实验,得出文中提出

的方法具有较好的可用性,很好的映证了提出的基于量子免疫进化算法的服务演化系统的优势。未来的工作将集中于服务替换的研究,算法的改进以及与云模型的结合应用^[11,12],以期提出更为优化解决方案和工程应用。

参考文献:

- [1] Wang Shuying, Capretz M A M. A Dependency Impact Analysis Model for Web Services Evolution[C]//2009 IEEE International Conference on Web Service. [s. l.]:[s. n.], 2009.
- [2] 苏日娜,王 宇. 基于免疫量子进化算法的负载均衡策略[J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 154-156.
- [3] Zhang Mingwei, Zhang Bin, Liu Ying. Web Service Composition Based on QoS Rules[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2010, 25(6): 1143-1156.
- [4] 钱 洁, 郑建国, 张超群, 等. 量子进化算法研究现状综述[J]. 控制与决策, 2011, 26(3): 321-326.
- [5] Abdesslem L, Soham M, Mohamed B. Multiple sequence alignment by quantum genetic algorithm[C]//Proc IPDPS. [s. l.]:[s. n.], 2006: 360-367.
- [6] 周志芳, 孙力娟, 郭剑锐, 等. 并行量子遗传算法在 QoS 组播路由中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(8): 185-187.
- [7] 周 娟, 李蜀瑜. 一种基于服务质量的语义 Web 服务发现框架[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2): 127-130.
- [8] Hayashi H, Cho K, Ohsuga A. A New HTN Planning Framework for Agents in Dynamic Environments[C]//Computational Logic in Multi-Agent Systems Lecture Notes in Computer Science. [s. l.]:[s. n.], 2005: 55-56.
- [9] 杨胜文, 史美林. 一种支持 QoS 约束的 Web 服务发现模型[J]. 计算机学报, 2005, 28(4): 589-594.
- [10] 陈嵩祥, 柴啸龙, 胡桂武. HTN 规划及其复杂度分析[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(16): 37-41.
- [11] 李贞双, 李争艳. 基于云模型的量子免疫优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(21): 123-125.
- [12] 骆 琴, 张永胜, 聂学武, 等. 一种基于语义 Web 服务的匹配算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2): 136-139.

(上接第 38 页)

with constant magnitude for fast channel estimation initialization[J]. IEEE Trans on Commun, 1998, 46(3): 305-308.

- [12] Popovic B M. Generalized chirp-like polyphase sequences with optimum correlation properties[J]. IEEE Trans on Inf Theory, 1992, 38(4): 1406-1409.

- [13] 李 剑, 陈发堂. LTE 中上行链路参考信号研究[J]. 电子

测试, 2010, 1(5): 35-38.

- [14] Sesia S. LTE-UMTS 长期演进理论与实践[M]. 马 霓, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [15] 胡宏林, 徐 景. 3GPP LTE 无线链路关键技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.