

多目标进化遗传算法在 QoS 路由中的研究

杨丹丹, 张岳, 庄雷

YANG Dan-dan, ZHANG Yue, ZHUANG Lei

郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001

Information Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

E-mail: dandan1699@yahoo.com.cn

YANG Dan-dan, ZHANG Yue, ZHUANG Lei. Research of multi-objective evolutionary genetic algorithm on QoS routing. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(24): 102-105.

Abstract: This paper proposes the formula analysis and math model of QoS routing index based on multi-object planning method. Then it presents a QoS routing algorithm based on NSGA-II. In this algorithm, the resource expenditure and load-distributed of network are optimized as object function. It balances load, makes good use of network resource, reduces congestion of network, and increases throughput with minimized network resource. Simulation results demonstrate the feasibility and efficiency of the proposed algorithm.

Key words: QoS routing; Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II); multi-objective evolutionary

摘要: 基于多目标规划问题, 给出了 QoS 路由指标的形式化描述及数学模型。提出了用 NSGA-II 算法来实现 QoS 路由, 并采用网络资源消耗和负载分布为目标函数, 使得算法在消耗网络资源最小的基础上, 使负载均衡分布, 合理利用了网络资源, 降低了网络的拥塞, 提高了网络的吞吐量。通过仿真实验表明该算法是可行的、有效的。

关键词: QoS 路由; 非支配排序遗传算法 II (NSGA-II); 多目标进化

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.24.031 **文章编号:** 1002-8331(2009)24-0102-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

1 引言

随着 Internet 商业化应用的飞速发展, 对网络的服务质量 (Quality of Service, QoS) 提出了更高的要求。研究 QoS 路由问题就是对网络和业务 QoS 路由进行优化, 在尽量减少资源消耗的基础上, 合理分配网络的流量负荷, 达到网络负载平衡, 同时减少阻塞概率, 有利于系统接入更多的业务。如果路由尺度是两个或多个加法性或乘法性 QoS 参数的任意组合, 则这类路由问题属于 NP 完全问题^[1], 用传统的穷举算法不能满意地解决问题, 尤其是当网络规模很大时。

近几年人们多用遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 优化 QoS 路由选择。文献[2]提出了一种基于遗传算法的 QoS 路由算法, 文中选择带宽、时延、丢包率和时延抖动作为选路尺度, 但其编码模式使得算法编码、解码过程复杂, 算法的效率低, 且未对网络资源及负载分布均衡进行优化。文献[3]给出一种网络资源与负载均衡相结合的路由遗传算法, 但是它的适应度函数是把多个 QoS 优化目标加权合并为一个单目标函数加以优化, 这就造成所有的解不仅对权值高度敏感, 而且还要求用户必须非常清楚所求解问题中多个 QoS 优化目标之间的优先权、相

互影响等信息。

多目标进化算法 (Multi-Objective Evolutionary Algorithms, MOEA) 不需要人为定义各目标的权重, 而是由算法运行一次找出所有的非劣解 (Pareto 前沿), 再由决策者进行权衡选择。近些年来, 进化计算界相继提出了不同的多目标遗传算法^[4]。最有代表性的 MOEAs 主要有: Schaffer 提出的 VEGA, Fonseca 和 Fleming 提出的 MOGA, Corne 等提出的 PESA, Zitzler 等提出的 SPEA2, 以及 Deb 提出的 NSGA-II^[5]。NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) 采用简洁明晰的非支配排序机制, 不用共享参数, 采用精英策略, 具有很好的运行效率和较好的收敛性。

基于 NSGA-II 算法, 考虑到时延、带宽、丢包率、链路费用等因素, 进行资源消耗、负载分布、时延等多个目标的优化, 从而得出一组 Pareto 解。

2 网络性能指标的形式化描述

2.1 QoS 路由网络模型

用无向赋权图 $G=(V, E)$ 表示网络模型, V 和 E 分别为图

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) (the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2007CB307102);

河南省教育厅科学研究项目 (the Scientific Research Project of Department of Education of Henan Province, China under Grant No. 2008A520024)。

作者简介: 杨丹丹 (1984-), 硕士研究生, 主要研究方向: 下一代网络路由技术; 张岳 (1962-), 副教授, 主要研究方向: 网络安全及防范技术; 庄雷 (1963-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 计算机网络。

收稿日期: 2008-10-13 **修回日期:** 2008-12-25

$G=(V,E)$ 中的点集和边集,对应网络中的通信节点和通信链路。 $E\subseteq V\times V$ 表示网络中单点投递情况下(源节点,目的节点)的集合。QoS 路由选择即为在无向赋权图 $G=(V,E)$ 中,为特定的 $e\in E$ 找出代价最小,同时满足单点投递服务 QoS 要求的路由。

2.2 QoS 路由指标性质

服务时被要求提供的 QoS,对于给定路径的指标一般可以分为三类:(1)可加性,总 QoS 等于构成这条路径的所有链路 QoS 值的和(如跳数、成本、链路长度、时延等);(2)可乘性,总 QoS 等于构成这条路径的所有链路 QoS 值的积(如误差率、丢包率和链路利用率等);(3)最大最小性,总 QoS 等于构成这条路径的所有链路 QoS 值中的最小者(如流量、带宽等),或总 QoS 等于构成这条路径的所有链路 QoS 值中的最大者(如带宽利用率等)^[4]。

2.3 QoS 路由指标的形式化描述

对于无向图 $G=(V,E),e\in E(V\times V)$,设 s 为源节点, d 为目的节点, n 为网络中的节点数,任一 $p=(s,i,j,\dots,k,d)$ 是一条由源节点 s 到目的节点 d 的路径。定义变量和函数为:

$$\rho_{i,j}=\begin{cases} 1, & \text{链路 } l_{i,j} \text{ 是所选路径 } p \text{ 中的一条链路} \\ 0, & \text{链路 } l_{i,j} \text{ 不是所选路径 } p \text{ 中的一条链路} \end{cases} \quad (1)$$

$$Delay(p)=\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{i,j} \rho_{i,j} \quad (2)$$

$$BandWidth(p)=\min(b_{i,j} \rho_{i,j}) \quad (3)$$

$$Loss(p)=1-\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (1-L_{i,j} \rho_{i,j}) \quad (4)$$

$$Cost(p)=\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{i,j} \rho_{i,j} \quad (5)$$

$$Hop(p)=\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{i,j} \quad (6)$$

其中, $i,j=1,2,\dots,n,d_{i,j},b_{i,j},L_{i,j},c_{i,j}$ 分别是链路 $l_{i,j}$ 上的时延、剩余带宽、丢包率及费用成本。

资源消耗函数:

$$R(p)=\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n BandWidth(p)\times Delay(p)+Cost(p)=Hop(p)\times BandWidth(p)\times Delay(p)+Cost(p) \quad (7)$$

对于一条所选路径,一个业务流占用的网络资源为沿途各链路为该路径预留资源的总和与该业务流占用该路径时间的乘积加上此路径上的费用。数学表示如上所示。

负载分布函数:

负载分布情况可以用接入新的连接后对原有链路可用带宽的影响来衡量。节点 i 到节点 j 间链路利用率 $U_{i,j}$ 、平均链路利用率 \bar{U} 和链路利用率的方差 δ^2 分别为:

$$U_{i,j}=\frac{b_{QoS}}{b_{i,j}} \quad \bar{U}(p)=\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_{i,j} \rho_{i,j}}{Hop(p)} \quad (8)$$

$$\delta^2=\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (U_{i,j}-\bar{U}(p))^2 \rho_{i,j}$$

其中, $i,j=1,2,\dots,n,b_{QoS}$ 为路径上业务要求的带宽。文献[2]认为,路径的可用带宽越大,该路径的安全性就越好。当 b_{QoS} 接近于 $b_{i,j}$,即 $U_{i,j}\rightarrow 1$ 时,说明链路 (i,j) 的可用带宽与业务所要求的带宽接近,那么选择这条链路不安全,而且如果这一链路接纳此连接后,就无法再接纳其他经过该链路的连接请求了。当 b_{QoS}

远远小于 $b_{i,j}$ 时,链路 (i,j) 的可用带宽比较大,这条链路比较安全,接纳新的连接后,剩余带宽比较多,不会影响接纳新的连接请求。路径上链路利用率的方差是定义负载分布的均衡程度。

3 多约束 QoS 路由问题的数学模型

基于以上描述,QoS 路由问题的优化目标就是要选择一条路径,在时延、带宽、丢包率、成本满足业务请求的要求下,使得资源消耗、链路利用率方差最小。即给出业务请求(source, destination, delay, bandwidth, loss, cost),也称为决策向量 X ,它满足下列约束:

$$\begin{cases} delay-Delay(p)>0 \\ bandwidth-BandWidth(p)<0 \\ loss-Loss(p)>0 \\ cost-Cost(p)>0 \end{cases} \quad (9)$$

目标函数为:

$$f(p)=\min(R(p),\delta^2(p),Delay(p),Loss(p)) \quad (10)$$

可见,该问题属于多目标优化问题。这种问题最显著的特点是目标之间的不可公度性和目标产生的矛盾性。所谓目标之间的不可公度性,是指各个目标没有统一的度量标准。如在 QoS 路由的选择目标中,通常希望得到端到端的延迟最小,丢包率最低(或成功率最大),跳数最小,瓶颈带宽最大,所占用的网络资源最少,使用网络的费用最小等。在上述几个目标中,时延及时延抖动是用事件单位(秒或毫秒)度量的,跳数是以节点个数度量,瓶颈带宽用比特/秒度量,所占用的网络资源目前还没有一定的度量标准,使用网络的费用主要用钱来衡量。因此,从物理意义上讲,不能把多个目标简单归并为单个目标,而目标之间的矛盾性使得强调改善某个目标,可能使另一个目标变差。所以在上述多目标优化中,不一定存在所有目标函数共同的极大点,目的就是找到非劣解或 Pareto 最优解。

在多目标进化算法中,对 Pareto 最优解集的构造方法主要有:分层次构造非支配法、庄家法、快速排序方法、擂台赛法等。保持群体多样性的方法主要有利用小生境技术来保持分布度,利用网格(Hyper-grid)来保持布度、信息熵、聚集密度、排挤机制等。NSGA-II 是在 NSGA 的基础上改进得到的一种 MOEA,其最突出的特点是采用了快速非支配排序和排挤机制。保证了 Pareto 最优解的多样性和群体很好的收敛性,算法的计算复杂度为 $O(mN^2)$,其中 m 为优化目标个数, N 为种群大小。

4 运用 NSGA-II 算法优化 QoS 路由

4.1 编解码机制

NSGA-II 算法中的实数或二进制编码都不适合用在路由寻路中,需要改进。文献[3]以 $N_s\times N_n$ 位一维二进制编码作为遗传算法的编码机制。若两节点之间不存在链路对应的基因可以去掉,业务量流入了源节点或流出了目的节点的链路在编码时也不考虑,这样使得基因位减少一些,但还不够简化。

文中同样采用一维二进制编码作为遗传算法的编码机制,但是染色体长度为网络拓扑中的链路数 num 。这里,首先定义一个一维数组,用于存储拓扑图的信息:

$$graph[7\times num]=\{1,i_1,j_1,d_1,b_1,l_1,c_1,2,i_2,j_2,\dots, num,i_{num},j_{num},d_{num},b_{num},l_{num},c_{num}\}$$

在这个数组中,每 7 个为一组,分别记录链路 $l_{i,j}$ 的序号,

节点 i 和 j , 以及该链路的信息即时延、剩余带宽等 4 项, 所以数组长度仅为 $7 \times num$ 。而染色体编码 $gene[num]$ 为 $x_1 x_2 \cdots x_{num} \in \{0, 1\}$, x_k 表示第 k 条链路是否被选中, $x_k=1$ 表示被选中, $x_k=0$ 表示未被选中。

解码时, 只需判断 $gene[i](i=0, 1, 2, \dots, num-1)$ 是否为 1。若 $gene[i]=1$, 从 $graph[i \times 7 + 1]$, $graph[i \times 7 + 2]$ 及以后的 4 个元素中便可得到对应的链路的节点号及链路信息。

可见, 该文使用的编解码机制不仅染色体长度固定、简短, 而且编解码简单易行, 使计算的复杂度减少了很多。

4.2 快速非支配排序

NSGA-II 对第一代算法中非支配排序方法进行了改进: 对于每个个体 i 都设有以下两个参数 n_i 和 S_i , n_i 为在种群中支配个体 i 的解个体的数量, S_i 为被个体 i 所支配的解个体的集合。首先, 找到种群中所有 $n_i=0$ 的个体, 将它们存入当前集合 F_1 , 然后对于当前集合 F_1 中的每个个体 j , 考察它所支配的个体集 S_j , 将集合 S_j 中的每个个体 k 的 n_k 减去 1, 即支配个体 k 的解个体数减 1, 如果 $n_k-1=0$ 则将个体 k 存入另一个集合 H 。最后, 将 F_1 作为第一级非支配个体集合, 并赋予该集合内个体一个相同的非支配序 i_{rank} , 然后继续对 H 作上述分级操作并赋予相应的非支配序, 直到所有的个体都被分级。其计算复杂度为 $O(mN^2)$, m 为目标函数个数, N 为种群大小。

4.3 虚拟适应度

在 NSGA-II 算法中, 个体的适应度包括非支配序 i_{rank} 和个体的虚拟适应度 i_d 。为了保持个体的多样性、防止个体在局部堆积, NSGA-II 算法首次提出了虚拟适应度 (dummy fitness) 的概念。它指目标空间上的每一点与同等级相邻两点之间的局部拥挤距离。例如, 图 1 中目标空间第 i 点的拥挤距离等于它在同一等级相邻的点 $i-1$ 和 $i+1$ 在 f_1 轴和 f_2 轴距离的和, 即由点 $i-1$ 和 $i+1$ 组成的矩形 2 个边长之和。使用这一方法可自动调整小生镜 (niche), 使计算结果在目标空间比较均匀地散布, 具有较好的鲁棒性。

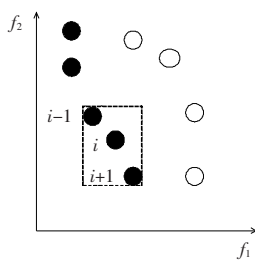


图 1 个体 i 的拥挤度

首先解码染色体, 根据约束函数式(9), 去掉拓扑图中不符合要求的链路, 然后根据多约束 QoS 路由的数学模型式(10) 计算每个个体相应的目标函数, 再根据目标函数值进行非劣分层, 计算每层个体的虚拟适应度。具体虚拟适应度的计算方法可参考文献[5]。其计算复杂度为 $O(mMgN)$ 。

4.4 选择操作

从图 1 中可以看出 i_d 值较小时表示该个体周围比较拥挤。为了维持种群的多样性, 需要一个比较拥挤度的算子以确保算法能够收敛到一个均匀分布的 Pareto 面上。由于经过了排序和虚拟适应度的计算, 群体中每个个体 i 都得到两个属性: 非支配序 i_{rank} 和虚拟适应度 i_d , 则定义偏序关系为 $<_n$, 当满足条件 $i_{rank} < j_{rank}$, 或满足 $i_{rank} = j_{rank}$ 且 $i_d > j_d$ 时, 定义 $i <_n j$ 。也就是说: 如果两个个体的非支配排序不同, 取排序号较小的个体 (分层排序时,

先被分离出来的个体); 如果两个个体在同一级, 取周围较不拥挤的个体。

4.5 精英策略

精英策略即保留父代中的优良个体直接进入子代, 它是遗传算法以概率 1 收敛的必要条件。采用的方法是: (1) 将父代 P_t 和子代 Q_t 全部个体合成为一个统一的种群 $R_t = P_t \cup Q_t$ 并放入进化池中, 种群 R_t 的个体数成为 $2N$; (2) 将种群 R_t 按非支配序分类并计算每一个体局部拥挤距离, 依据等级的高低逐一选取个体, 直至个体总数达到 N ; (3) 以此形成新一轮的父代种群, 其个体数为 N 。在此基础上开始新一轮的选择、交叉和变异, 形成新的子代种群。

算法的流程如图 2 所示。

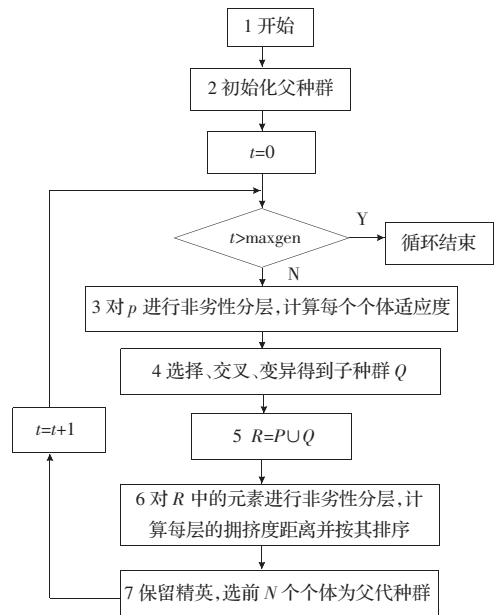


图 2 NSGA-II 算法流程图

5 仿真

对图 3 所示的网络拓扑模型应用该文算法, 在 CPU 为 Pentium IV、512 M RAM、Windows XP 下用 VC++6.0 进行了编程仿真实验。请求路由为 (6, 10, 20, 60, 50%, 20), 即源节点为 6, 目的节点 10, 时延 < 20, 最小带宽 > 60, 丢包率 < 50%, 费用 < 20。编码长度为 17, 而在文献[3]编码长度为 62。群体大小为 200, 进化代数为 30, 交叉率为 0.6, 变异率为 0.03。初始群体随机产生。从表 1 的仿真结果中可以看出, 各种度量之间不存在共同的极值点。

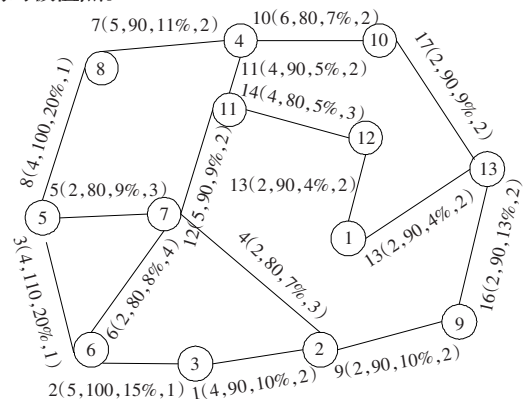


图 3 网络拓扑示意图

表1 路由仿真结果

路径	资源耗费	链路利用方差	时延	丢包率/(%)
6-7-11-4-10	5 450	0.006 944	17	26.03
6-3-2-9-13-10	6 759	0.003 556	15	45.91
6-7-2-9-13-10	4 013	0.008 333	10	39.04

表2 算法比较

算法	路径	资源耗费	链路方差	时延	丢包率/(%)
最小跳数	6-7-11-4-10	5 450	0.006 944	17	26.03
	6-5-8-4-10	6 686	0.022 554	19	57.88
最小时延	6-7-2-9-13-10	4 013	0.008 333	10	39.04

计算每代种群个体的适应度函数,得出其散点图如图4所示。其中X轴代表代数,Y轴代表资源耗费函数值,可以看出算法在前面几代中有多种选择,从第10、11代开始保持三种路径的选择。图5中的实线段表示了资源耗费和链路利用方差这两个目标的 Pareto 最优边界,实线段上的7个点是这两个目标的最优解,是非支配的;虚线区间内的其他点则是非支配的。这与该文多个目标同时优化的结果不同,可见目标函数的选择对最终结果产生了很大的影响,不能只是从单个目标或者多个目标的加权合并来考虑问题,应该注意到 QoS 多个优化目标之间的影响。而且从图4及图5中可以看出该文算法不仅保持了种群的多样性,而且搜索能力强、易收敛。

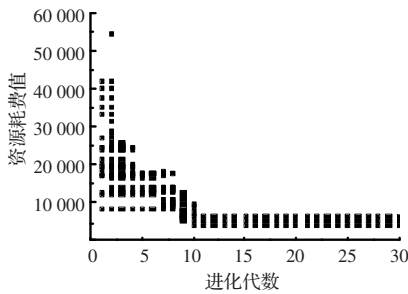


图4 资源耗费散点图

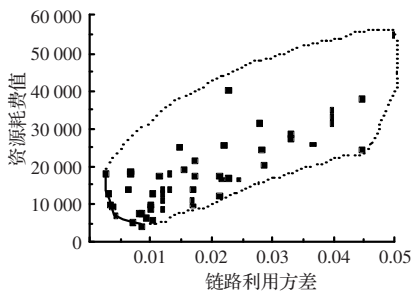


图5 资源耗费和链路方差的 Pareto 图

将该文算法与最小时延算法、最小跳数算法进行比较,由表2可知,对于路径6-5-8-4-10,虽然跳数最小,但是丢包率太高,不符合业务要求,所以该文算法的 Pareto 解集中不予考

虑。如果只是以跳数为目标选中该路径,则很容易造成数据的丢失、延迟。可见该文算法全面考虑了网络资源消费、链路利用率、时延等因素,合理利用了网络资源。

6 结论

对于 QoS 路由问题,建立了一种 QoS 路由的数学模型和综合评价指标。基于该模型和指标,提出了基于 NSGA-II 算法来实现 QoS 路由。该算法主要有以下特点:(1)NSGA-II 算法采用非支配排序机制,提高了算法效率。不用共享参数,提出虚拟适应度和精英策略,保证了种群的多样性,加快了算法的收敛速度;(2)改变了 NSGA-II 的编码机制,使染色体长度固定且简短,省略了复杂的编码和解码过程;(3)采用的综合评价指标,能满足大多数 QoS 要求且使负载均衡分布,合理利用了网络资源,降低了网络拥塞。仿真实验说明了该算法是可行的、有效的。

参考文献:

- [1] Wang Z, Crow C. J. Quality-of-service for routing supporting multi-media applications[J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 1999, 14(7).
- [2] Xian G. F. QoS routing based on genetic algorithm [J]. Computer Communications, 1999, 22(15/16): 1392-1399.
- [3] 金琼,周世纪.基于改进遗传算法的 QoS 路由选择优化[J]. 计算机应用, 2005(2): 256-258.
- [4] Van Mieghem P, KuiPers F. A, Korkmaz T, et al. Quality of service routing[C]//LNCS 2856. [S.l.]: Springer, 2003.
- [5] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [6] 郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 20-55.
- [7] Lee Y, Seok Y. A constrained multipath traffic engineering scheme for MPLS networks[C]//IEEE International Conference on Communications, New York, 2002: 2431-2436.

(上接 93 页)

- [3] Berlekamp E, McEliece R, Tilborg van. On the inherent intractability of certain coding problems[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1978, 24: 384-386.
- [4] McEliece R. A public-key cryptosystem based on algebraic coding theory. DSN Progress Report, 1978: 42-44.
- [5] Kobara K, Imai H. Semantically secure McEliece public-key cryptosystems-conversions for McEliece PKC[C]//LNCS 1992: Proceedings of PKC'01. [S.l.]: Springer-Verlag, 2001: 19-35.
- [6] Niederreiter H. Knapsack cryptosystems and algebraic coding theory[J].

- Problems of Control and Information Theory, 1986, 15(2): 159-166.
- [7] Roman S. Coding theory and information theory[M]//Graduate Texts in Mathematics 134. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [8] Bellare M, Rogaway P. Optimal asymmetric encryption [C]//LNCS 950: Proceedings of EUROCRYPT'94. [S.l.]: Springer-Verlag, 1995: 92-111.
- [9] Nojima R, Imai H, Kobara K, et al. Semantic security for the McEliece cryptosystem without random oracles [J]. Designs, Codes and Cryptography, 2008, 49: 289-305.