

# 控制与诱导的协调中路网拥堵状态识别方法<sup>①</sup>

刘建美<sup>1,2</sup>, 马寿峰<sup>1</sup>, 贺正冰<sup>1</sup>, 贾 宁<sup>1</sup>

(1. 天津大学系统工程研究所, 天津 300072 2 济宁学院数学系, 济宁 272000)

**摘要:** 首先从微观层面上利用谱系聚类法对路口路段的拥堵程度进行分类, 在此基础上利用基于节点删除的综合测度法对路口的重要程度进行判别, 确定了相应的容量. 然后从宏观层面上提出了判断整个路网拥堵程度的状态参量——最大流, 并构造了节点和边都有容量约束的多源多汇最大流算法——改进的割集矩阵算法, 最后利用算例验证了方法的可行性和有效性.

**关键词:** 谱系聚类; 综合测度法; 最大流; 改进的割集矩阵法

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2010)11-0035-05

## 0 引 言

交通拥堵是由于交通需求与供给之间的不平衡给城市道路带来的不良后果, 而协调好控制与诱导系统的关系是缓解拥堵的一个非常有效的手段. 至今, 已有不少学者专家从多个角度对控制与诱导的协调方法进行了研究<sup>[1-5]</sup>, 而本文着力于将控制与诱导置于一个同等重要的地位, 从而构造一种更为实际有效的协调方法. 另外本文主要是介绍了整个协调流程的前期工作, 主要包括路口路段拥堵程度和重要性的判断、相应的容量确定方法以及最大流的计算等.

如何更快更准确地对拥堵状态进行判别是近几年来研究的新领域. 通常的拥堵判别方法是根据路口或路段的某些参数值进行判别, 如路口延误时间、路段上滞留的车辆长度等, 而本文着力于从宏观上对路网给出一个量化的指标——最大流, 首先根据路口和路段的某些常用参数利用谱系聚类法对其进行分类, 然后提出了基于路口和路段类型的网络最大流这个宏观标量, 可以作为判别路网的拥堵程度的一个参数. 关于最大流的计算问题已经有了很多的方法<sup>[6-12]</sup>, 而文中所涉及的是多源多汇最大流问题, 文献[10]中给出

了基于路径的算法, 是将多源多汇最大流问题转化成一个线性规划模型然后进行求解, 但是此方法需要枚举所有 OD 对 (出发地与目的地) 间的所有路径, 而枚举路径本身就是一项比较繁琐的工作; 文献[11]和[12]中的算法都是对于单源单汇而言, 为此本文给出了一种改进的割集矩阵算法, 既可以求解多源多汇最大流, 又避免了路径枚举的工作, 并验证了算法的有效性和实用性.

## 1 路口、路段拥堵程度的判别

通过在线的实时监测系统可以得到关于路口路段的大量参数信息, 如何能够从中选取有代表性的数据用来对路口路段的拥堵情况进行判断是一个非常关键的问题. 本文利用谱系聚类法对路口路段的拥堵程度进行分类. 谱系聚类法的思想是先将各个样品看作一类, 然后将距离最短的两类合并为一类, 依次重复, 最终合为一大类, 然后根据实际问题的背景及需要确定分类数量. 本文的离线试验是为以后的协调做准备, 考虑到控制和诱导周期的长度假设每 5 min 进行一次统计和判别. 路口和路段所选取的代表参数如下

① 收稿日期: 2009-10-15; 修订日期: 2010-09-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70671073); 国家高技术研究发展计划资助项目 (2006AA11Z210).

作者简介: 刘建美 (1982—), 女, 山东潍坊人, 博士. Email: liujianmei1982@yahoo.com.cn.

1) 路口状态提取参数:  $(y_1, y_2, y_3, y_4)$ , 其中  $y_j$  为方向  $j = 1, 2, 3, 4$  的绿灯放行次数, 绿灯放行次数是指一个周期内形成的排队车辆全部通过路口需要的绿灯次数, 由于只统计 5 min

内的交通流情况, 故其论域范围均为  $\{1, 2, 3\}$ , 假设每个路口各个方向的参数按从小到大的顺利排列, 则可以得到所有的枚举情况如表 1 所示。

表 1 路口参数枚举表

Table 1 The enumeration table of intersection's parameters

1	(1, 1, 1, 1)	6	(1, 1, 3, 3)	11	(2, 2, 2, 2)
2	(1, 1, 1, 2)	7	(1, 2, 2, 2)	12	(2, 2, 2, 3)
3	(1, 1, 1, 3)	8	(1, 2, 2, 3)	13	(2, 2, 3, 3)
4	(1, 1, 2, 2)	9	(1, 2, 3, 3)	14	(2, 3, 3, 3)
5	(1, 1, 2, 3)	10	(1, 3, 3, 3)	15	(3, 3, 3, 3)

然后利用统计学中的谱系聚类法可以将其分为 3 类, 分类结果如图 1 所示, 即 1、2、3、4 为 1 类拥堵, 5、6、7、8、11 为 2 类拥堵, 剩余的为 3 类拥堵。

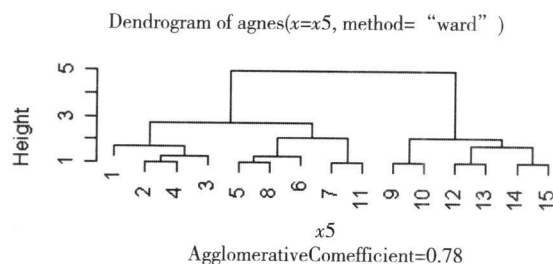


图 1 基于路口参数的分类结果图

Fig. 1 The classification based on the intersection's parameters

2) 路段状态提取参数:  $v$  (车流平均速度), 显然它是一个连续变化的参量, 不可能枚举所有的值, 此处按其大小大致分为 3 类 (km/h)

$$\frac{v < 20}{1} \quad \frac{20 \leq v}{2} \quad \frac{v > 60}{3}$$

## 2 路口重要性判别及其路口和路段容量的确定

### 2.1 路口重要性判别——综合测度法

有些路口的类型相同, 但是由于它们所处的位置不同因此重要程度也不同, 比如处于主干道交叉的路口的重要性要比周边次干道上的路口更大一些, 为此需要对路口的重要程度进行判别。关于节点重要性的判别主要有社会网络法<sup>[13-14]</sup>和综合测度法<sup>[15]</sup>, 此处利用后者进行

判断。处理方法是将路口的类型当作其权重, 利用基于节点删除的综合测度法 (CM) 来对路口的重要程度进行判断。CM 法是针对节点赋权网络进行计算, 此方法利用节点直接分割集和节点间接分割集定义了点权直接损失函数和点权间接损失函数, 将两者相加得到点权综合损失函数, 然后利用每个节点的综合损失函数值的大小来判断节点的重要程度。[15] 中的综合测度法是针对无向网络图来计算的, 而本文中的路网是一个有向图, 为此在具体的算法上做相应的改变。

直接损失函数和间接损失函数的定义如下

$$\text{直接损失: } DLOS = \sum_{(i,k) \in \Phi(k)} \gamma(i,k) \beta(i,k);$$

$$\text{间接损失: } ILOS = \sum_{(i,j) \in \Psi(k)} \gamma(i,j) \beta(i,j)$$

其中  $\gamma, \beta$  分别表示两点间的权值交易衰减系数 (两节点间的距离倒数) 和损失函数 (两节点的权重之差的绝对值),  $\Phi(k), \Psi(k)$  分别为节点  $k$  的直接分割集和间接分割集。如在路网 (图 2) 中节点  $v_6$  的分割集为

$$\begin{aligned} \Phi(v_6) &= \{(v_1, v_6), (v_2, v_6), (v_3, v_6), (v_6, v_7), (v_6, v_8), (v_6, v_{10}), (v_6, v_{11}), (v_6, v_{12})\}, \\ \Psi(v_6) &= \{(v_2, v_{10}), (v_5, v_7), (v_5, v_8)\} \end{aligned}$$

其它节点的分割集也可以类似地给出, 然后按照式直接损失和间接损失的公式就可以求出节点  $i$  的重要性  $c_i$ 。图 3 为路口类型为  $[1, 2, 2, 3, 3, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1]$  和全为 1 类时对应的重要程度图像, 从图中可以看到类型相同的节点其重要程度并不一定相同。

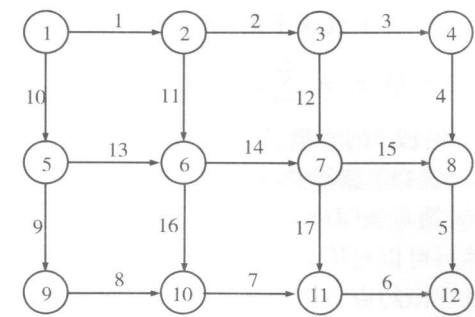


图 2 仿真路网  
Fig. 2 Simulation road network

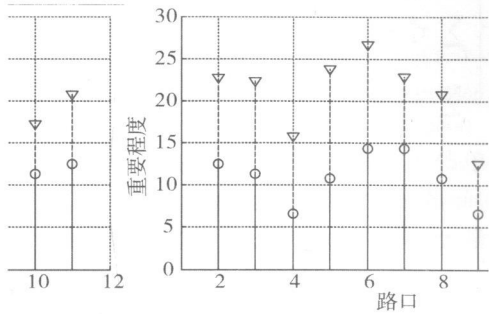


图 3 路口重要性图像  
Fig. 3 Intersections' importance

2 2 路段和路口容量的确定

关于路段容量的确定, 参考有关交通书籍给出, 为简化起见, 按路段类型大致给出其容量大小如表 2 所示

表 2 路段类型与容量(通行能力)对应表

Table 2 Capacity corresponding to the link type

路段类型	1	2	3
对应速度	$v < 20$	$20 \leq v \leq 60$	$v > 60$
通行能力	850	1090	600

关于路口容量的确定是通过路口转弯率和其重要程度决定, 假设路口  $i$  的重要程度量化值为  $c_i$ . 令  $c = \max_{1 \leq i \leq 12} \{c_i\}$ , 路段  $k$  的转弯率为  $(p_k, q_k)$ , 其中  $p_k, q_k$  分别为直行和右转的转弯率,  $C_k$  为路段  $k$  的容量,  $A_i$  为与路口  $i$  相连的进口路段集, 那么与路口  $i$  等价的两条路段(直行和右转)的容量分别为  $\frac{c_i}{c} \sum_{k \in A_i} p_k C_k, \frac{c_i}{c} \sum_{k \in A_i} q_k C_k$

3 基于路口路段类型的多源多汇的路网最大流算法

交通路网作为一个特殊的网络, 存在多个 OD

对, 因此对应的是节点和边都有容量约束的多源多汇最大流问题. 关于此问题的处理方法是 将路口容量转化到相应的等价路段后再进行求解, 等价路段如图 4 中深色路段所示, 其容量大小由 2 2 中的方法确定, 这样就转化成了仅边有容量约束的多源多汇最大流问题, 然后利用下面改进的割集矩阵算法进行求解.

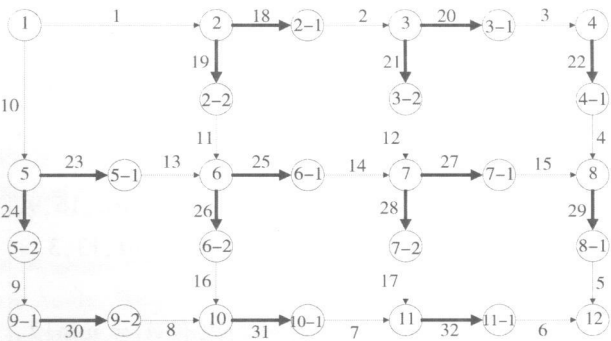


图 4 等价路网  
Fig. 4 Equivalent road network

3 1 改进的割集矩阵算法 —— 多源多汇最大流  
多源多汇最大流是指所有源汇对间能够传输的流量和的最大值, 改进算法是基于原始的割集矩阵算法, 将原路网抽象成几个分路网, 分别求解最大流, 最后再将其合并转化成线性规划问题求解. 此处考虑下面的简单路网如图 5 所示

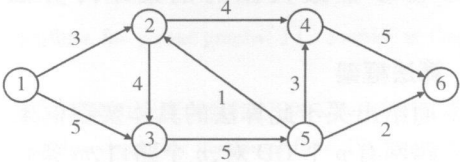


图 5 试验路网  
Fig. 5 Experiment road network

图 5 中每个弧上的数字代表弧的容量, 假设有两个 OD 对: 1-6 和 2-5, 则这两个 OD 对共用的路段为 (2, 3) 和 (3, 5), 设  $x_{ij}$  为弧  $(i, j)$  上的流量,  $u_{ij}$  为弧  $(i, j)$  上的容量,  $x_{ij}^k$  为弧  $(i, j)$  上隶属于第  $k$  个 OD 对的流量, 则  $x_{23}^1 + x_{23}^2 \leq u_{23}, x_{35}^1 + x_{35}^2 \leq u_{35}$ . 针对这两个 OD 对, 可以给出对应的两个流量守恒约束方程组

OD 对 2-5 流量守恒约束

$$\begin{cases} x_{23}^2 = 1 \\ x_{23}^2 - x_{35}^2 = 0 \\ x_{35}^2 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

OD 对 1-6 流量守恒约束

$$\begin{cases} x_{12} + x_{13} = 1 \\ x_{12} + x_{52} - x_{23} - x_{24} = 0 \\ x_{13} + x_{23} - x_{35} = 0 \\ x_{24} + x_{54} - x_{46} = 0 \\ x_{35} - x_{52} - x_{54} - x_{56} = 0 \\ x_{46} + x_{56} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

利用原始的割集矩阵算法, 可以得到 1-7 间的 16 个割集容量为

$$\{8, 7, 11, 12 + u_{23}^1, 9, 5 + u_{35}^1, 16, 9, 8 + u_{35}^1, 14 + u_{23}^1, 10 + u_{23}^1, 4 + u_{35}^1, 14, 13, 3 + u_{35}^1, 9 + u_{23}^1\},$$

令

$$A = \min\{8, 7, 11, 12 + u_{23}^1, 9, 5 + u_{35}^1, 16, 9, 8 + u_{35}^1, 14 + u_{23}^1, 10 + u_{23}^1, 4 + u_{35}^1, 14, 13, 3 + u_{35}^1, 9 + u_{23}^1\},$$

由图中所给的弧的容量约束有  $A = \min\{7, 3 + u_{35}^1\}$ ; 同样得到 2-5 间的 2 个割集容量为  $(4 - u_{23}^1, 5 - u_{35}^1)$ , 令  $B = \min\{4 - u_{23}^1, 5 - u_{35}^1\}$ , 则这两个 OD 对间的最大流为  $\max(A + B)$ , s.t.  $\{0 \leq u_{23}^1 \leq 4, 0 \leq u_{35}^1 \leq 5\}$ , 然后分情况讨论可得此线性规划问题的最优解即最大流为 8 而利用基于路径的最大流算法将其看作一个线性规划时所得到的最大流也为 8 由此说明了本文所构造的针对多源多汇最大流的割集矩阵算法的准确性。

### 3.2 算法框架

下面给出关于此算法的具体实现框架: 假设所研究路网有  $p$  个 OD 对,  $n$  个路口,  $m$  条路段, 并给出以下符号说明

$x_i^k$ : 路段  $i$  上隶属于第  $k$  个 OD 对的流量;  $x_i$ : 路段  $i$  上的流量,  $x_i = \sum_{k=1}^p x_i^k$ ;

$C_i$ : 路段  $i$  的容量,  $i = 1, \dots, m$ ;  $A_j(B_j)$ : 节点  $j$  的出口(进口)路段集,  $j = 1, \dots, n$ ;

$M_k$ : 第  $k$  个 OD 对的中间节点集合,  $k = 1, \dots, p$

然后可以对第  $k$  个 OD 对  $(O_k, D_k)$  建立下面的流量守恒约束方程组

$$\begin{cases} \sum_{i \in A_{O_k}} x_i^k = 1 \\ \sum_{i \in A_j} x_i^k - \sum_{i \in B_j} x_i^k = 0 \quad \forall j \in M_k \\ \sum_{i \in B_{D_k}} x_i^k = 1 \end{cases} \quad (3)$$

利用单源单汇的割集矩阵算法可以得到第  $k$  个 OD 对间的最大流假设为  $f_k(C_1^k, \dots, C_n^k)$ , 那么多源多汇最大流就可以由下面的规划问题得出

$$\begin{aligned} \max & \sum_{k=1}^p f_k(C_1^k, \dots, C_n^k) \\ \text{s.t.} & \sum_{k=1}^p C_{ki} \leq C_i \text{ 且 } C_i^k \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4)$$

## 4 算例结果

由第 1.2 节中所介绍的方法可以得到各个路口和路段在各种拥堵状况下的最大容量, 然后利用上文给出的改进的割集矩阵算法来进行最大流的求解。假设仿真路网中有 3 个 OD 对 1-12, 2-11 和 2-11, 表 3 为利用改进的割集矩阵算法所求得 10 种情况下的最大流结果。

表 3 最大流结果

Table 3 The maximum flow results

路段类型	路口类型	路网最大流
(1, 3, 2, 1, 3, 1, 2, 3, 3, 2, 3, 1, 1, 1, 3, 1, 3)	(3, 1, 2, 1, 2, 3, 2, 2, 1, 2, 1, 1)	488 005 1
(2, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 1, 3, 3, 3, 2, 3, 2, 1)	(3, 1, 3, 1, 2, 2, 1, 3, 1, 2, 1, 1)	772 987 3
(2, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 1, 3, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2)	(1, 2, 3, 3, 1, 1, 3, 1, 3, 3, 2, 3)	715 520 8
(2, 3, 1, 3, 1, 2, 1, 3, 1, 3, 1, 2, 2, 1, 3, 2, 2)	(2, 2, 2, 1, 2, 1, 3, 1, 2, 1, 2, 1)	690 483 7
(2, 3, 3, 3, 3, 2, 2, 1, 1, 3, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 3)	(3, 2, 1, 2, 1, 3, 2, 3, 1, 2, 3, 3)	684 382 8
(1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 1, 2)	(1, 3, 1, 2, 1, 3, 3, 1, 1, 3, 2, 2)	503 325 6
(2, 1, 3, 1, 3, 3, 1, 2, 1, 3, 3, 1, 2, 3, 2, 3, 1)	(1, 3, 3, 1, 3, 1, 3, 3, 2, 1, 2, 2)	704 450 9
(3, 1, 1, 3, 3, 3, 1, 1, 3, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 2, 1)	(2, 2, 1, 2, 2, 3, 1, 3, 1, 1, 3)	812 513 8
(3, 2, 3, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 3, 3, 3, 3, 2, 2)	(1, 3, 1, 1, 3, 3, 2, 2, 3, 3, 3, 2)	728 669 5
(3, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2, 3, 3, 1, 3, 3, 2)	(3, 2, 2, 3, 1, 2, 1, 3, 2, 3, 1, 1)	934 966 6

## 5 结束语

本文就控制与诱导的协调中的几个问题进行了研究, 包括路口路段拥堵类型的判定、重要程度的判定及容量的确定、多源多汇最大流

的割集矩阵算法, 得到了较好的计算结果, 并且避免了最大流求解时路径枚举的工作. 有了关于最大流的有效算法, 因此就可以考虑将其作为判断路网拥堵程度的一个指标, 进而作为后续的协调工作中协调边界确定的一个状态参量.

## 参考文献:

- [1] H Yang, S Yagar. Traffic assignment and signal control in saturated road networks[J]. Transportation Research Part A, 1995, 29(2): 125–139
- [2] Satapathy G, Adler J et al. Cooperative Traffic Management and Route Guidance: A Multi-agent Approach[R]. NSF/DOT Partnership for Exploratory Research on Information and Communication systems for Surface Transportation. Final Report to NSE, 2002
- [3] Machemehl R B, Kockelman K M. Robustness Approach to the Integrated Network Design Problem, Signal Optimization and Dynamic Traffic Assignment Problem. The University of Texas at Austin, 2006
- [4] Gartner N H, Ahmalk M. Combined model for signal control and route choice in urban traffic networks[J]. Transportation Research Record, 1996, 27–35
- [5] 马寿峰, 李艳君, 贺国光. 城市交通控制与诱导协调模式的系统分析[J]. 管理科学学报, 2003, 6(3): 71–78  
Ma Shoufeng, Li Yanjun, He Guoguang. System analysis for coordination modes between urban traffic control and vehicle route guidance[J]. Journal of Management Sciences in China, 2003, 6(3): 71–78 (in Chinese)
- [6] Goldberg A V, Tarjan R E. A new approach to the maximum flow problem[J]. Journal of the ACM, 1988, 35(4): 921–940
- [7] Goldberg A V, Rao S. Beyond the flow decomposition barrier[J]. Journal of the ACM, 1998, 45(5): 783–797
- [8] Johnson D B. Parallel algorithms for minimum cuts and maximum flows in planar networks[J]. Journal of ACM, 1987, 34(4): 950–967
- [9] Klein P, Rao S B, Rauch H, Zenger M, et al. Faster shortest path algorithms for planar graphs[J]. Journal of Computer and System Sciences, 1997, 55(3): 3–23
- [10] 王华, 孟祥旭, 马军. 基于路径的多源多汇最大流问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, 28: 117–120  
Wang Hua, Meng Xiangxu, Ma Jun. Research on path-based solution to multi-commodity maximum-flow[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 28: 117–120 (in Chinese)
- [11] 党耀国, 刘思峰, 方志耕. 网络最大流的割集矩阵算法[J]. 系统工程理论与实践, 2003, (9): 125–128  
Dang Yaoguo, Liu Sifeng, Fang Zhigeng. Algorithm of cutting-set matrix on the maximum flows of network[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2003, (9): 125–128 (in Chinese)
- [12] 库向阳, 罗晓霞. 点和边有容量约束的网络最大流新算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(1): 143–145  
She Xiangyang, Luo Xiaoxia. New algorithm for maximum flow algorithm in network with both node and edge capacity confined[J]. Computer Applications, 2008, 28(1): 143–145 (in Chinese)
- [13] Altmann M. Reinterpreting network measures from models of disease transmission[J]. Social Networks, 1993, 15(3): 1–17
- [14] Poulin R, Boily M C, Masse B R. Dynamical systems to define centrality in social networks[J]. Social Networks, 2000, 22(10): 187–220
- [15] 安世虎, 聂培尧, 贺国光. 节点赋权网络中节点重要性的综合测度法[J]. 管理科学学报, 2006, 9(6): 37–42  
An Shihu, Nie Peiyao, He Guoguang. Comprehensive importance measurement for nodes within a node weighted network[J]. Journal of Management Sciences in China, 2006, 9(6): 37–42 (in Chinese)

## Recognition method for congestion state of road network about coordination of traffic control and guidance

LIU Jian-mei<sup>1,2</sup>, MA Shou-feng<sup>1</sup>, HE Zheng-bing<sup>1</sup>, JIA Ning<sup>1</sup>

1. Institute of Systems Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Department of Mathematics, Jining College, Jining 272000, China

**Abstract** The paper first classifies the congestion levels of intersections and links into 3 classes using a hierarchical clustering method, which can not only distinguish the importance of various intersections but can be helpful in planning their capacities. Then it formulates a state parameter, named maximum flow, which may contribute in estimating the congestion level of network as a whole. Finally, the modified cutting-set matrix algorithm, namely multiple-input multiple-output maximum flow method, is designed and the feasibility is proved by experimental results.

**Key words** hierarchical clustering method; comprehensive measurement method; maximum flow; improved cutting-set matrix method

---

(上接第 34页)

that people like waiting and searching in the process of sequential decision when encountering the circumstance of successive appearance of candidate and non-candidate. At the same time, we discuss the difference between “hot hand” and “gamblers’ s fallacy”, and make a comparison of appearance situation to the heuristic cognitive biases.

**Key words** dynamic decision; sequence characteristics; noise information; search number