Open Journal of Transportation Technologies 交通技术, 2024, 13(5), 275-282
Published Online September 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ojtt
https://doi.org/10.12677/ojtt.2024.135031

Hans汉斯

高速公路空中交通传感器布设优化研究

王　纳[1,2]，郭亚娟[1,2*]，张萌萌[1,2]

[1]山东交通学院，交通与物流工程学院，山东　济南
[2]山东省智慧交通重点实验室(筹)，山东　济南

收稿日期：2024年7月8日；录用日期：2024年8月27日；发布日期：2024年9月5日

摘　要

为提高交通感知网络的监测效率和高速公路突发事件下的应急救援效率，将无人机空中传感器作为道路交通流检测设备，通过合理布设规划空中传感器布设位置实时道路交通流监测状态。融合事故数据和流量数据，基于信息熵理论构建路段候选点重要度模型，进而量化高速公路路段的巡检优先级。在此基础上，以最大化覆盖重要路段为目标，以传感器布设原则和预算上限为约束，构建了空中传感器布设优化模型，并通过对比分析不同预算上限的空中传感器布设方案以及视频传感器布设方案，验证了模型的有效性。结果表明：相较于视频传感器布设方案，空中传感器布设能够有效降低传感器布设成本、提高监测范围的空间覆盖率。

关键词

智能交通，高速公路，空中交通传感器，传感器布设优化

Research on Optimization of Highway Aerial Traffic Sensor Deployment

Na Wang[1,2], Yajuan Guo[1,2*], Mengmeng Zhang[1,2]

[1]School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong
[2]Shandong Key Laboratory of Smart Transportation (Preparation), Jinan Shandong

Received: Jul. 8th, 2024; accepted: Aug. 27th, 2024; published: Sep. 5th, 2024

Abstract

To improve the monitoring efficiency of the traffic perception network and the emergency rescue efficiency under highway emergencies, the UAV aerial sensor was used as the road traffic flow detection equipment, and the real-time road traffic flow monitoring status was planned through a reasonable

*通讯作者。

文章引用: 王纳, 郭亚娟, 张萌萌. 高速公路空中交通传感器布设优化研究[J]. 交通技术, 2024, 13(5): 275-282.
DOI: 10.12677/ojtt.2024.135031

layout planning of the aerial sensors' laying position. Accident and traffic data are fused, and the importance model of candidate points of road sections is constructed based on the information entropy theory. Then, the inspection priority of highway sections is quantified. On this basis, to maximize the coverage of important road sections, an aerial sensor deployment optimization model is constructed based on the constraint of sensor deployment principle and budget upper limit, and the effectiveness of the model is verified by comparing and analyzing the aerial sensor deployment scheme and video sensor deployment scheme with different budget upper limits. The results show that compared with the video sensor deployment scheme, the aerial sensor deployment can effectively reduce the sensor deployment cost and improve the spatial coverage of the monitoring range.

Keywords

Intelligent Transportation, Highways, Aerial Traffic Sensors, Sensor Deployment Optimization

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加速和交通需求的不断增长，高速公路对于现代交通出行发挥着重要作用，然而高速公路交通事故、道路拥堵等突发事件频发，严重阻碍交通出行，甚至造成更大范围的交通瘫痪。无人机作为近年来快速发展的空中传感设备，以其灵活性强、响应效率高等优势，在交通监测领域展现出巨大的应用潜力，能够以更广阔的视角对高速公路交通事件进行快速监测和精准定位，有效弥补地面传感器的监测盲区。因此，如何通过交通传感器的合理布设，高效、快速地检测交通事件，提升高速公路应急救援效率、保障道路的畅通安全具有十分重要的意义。

当前道路交通流检测多数是借助地面传感器网络(如环形线圈、视频传感器等)采集交通数据，一些学者针对传统地面传感器的布设规划展开了系列研究。Owais 等[1]综合考虑了道路信息和 OD 对覆盖数据，构建了多目标优化的传感器布设模型，基于贪婪启发式算法来求解 Pareto 最优解。Fu 等[2]通过最小化 OD 需求估计的不确定性，以成本预算、传感器数量等为约束条件，建立了多类型交通传感器布设模型。王仲等[3]和 Salari 等[4]研究了故障情况下的交通传感器布设问题，实现了传感器故障情况下路网整体交通流状态的有效检测。另一些学者针对无人机的选址布设展开了大量研究。Chauhan 等[5]以需求最大覆盖为目标，提出了无人机的最大覆盖设施位置问题，考虑了无人机能耗和航程约束，建立了无人机设施选址整数规划模型。由于无人机飞行路程有限，Hong 等[6]提出了借助加油站或充电站扩大无人机的覆盖范围，构建了一种用于无人机配送服务规划的限程充电站覆盖模型。陈刚等[7]以投资预算、规模效益、网络时效性为约束条件，构建了最小化总里程的无人机配送中心选址模型。任新惠等[8]在考虑无人机及全自动机场性能的基础上，以取货时间最短为目标，建立了即时配送下的机场选址模型。国内外学者集中于地面传感器的布设规划和无人机配送服务设施选址研究，然而地面传感器网络虽然能够提供较为精准的交通数据，但其应急响应速度较慢和覆盖范围有限，当前较少考虑将无人机作为空中传感器进行道路交通流监测，解决无人机设施选址规划问题，弥补地面传感器的监测盲区。

本文聚焦于高速公路空中异构交通传感器布设优化研究，基于信息熵理论构建路段重要度模型，进而量化高速公路路段的巡检需求，在此基础上以最大化覆盖重要路段为目标，以传感器成本和性能为约

束，构建空中异构传感器布设优化模型，旨在科学、合理地布设空中传感器，充分发挥无人机监测的优势，提升高速公路交通流的检测范围和突发事件下的应急救援效率。

2. 高速公路路段候选点重要度分析

面对复杂多变的交通环境和潜在的突发事件风险，如何精准识别对整体交通网络影响重大的路段，成为道路巡检的关键所在。为此，基于信息熵理论构建路段候选点重要度模型，量化路段候选点巡检的重要性，从而科学、合理地确定巡检优先级，快速响应突发事件下的应急救援需求。

基于信息熵理论的路段候选点重要度模型构建

信息熵反映系统的混乱程度，可用于衡量信息的不确定性和复杂性[9]。融合路段的交通流量、事故发生频率等交通数据，并结合信息熵理论构建路段候选点重要度模型，识别交通流的关键瓶颈或事故高发区段，为传感器的布设优化和合理分配提供科学的依据。

1) 指标归一化：

$$\lambda_{nq} = \frac{r_{nq} - \min r_q}{\max r_q - \min r_q} \tag{1}$$

式中，r_{nq}、λ_{nq}表示路段节点 n 对应指标 q 的原始值和归一化后的值，r_q表示指标 q 在统计区间 n 内的取值。

2) 指标信息熵计算：

$$s_q = \sum_{q=1}^{n} -\lambda_{nq} \log_a^{\lambda_{nq}} \tag{2}$$

式中，s_q指标 q 的信息熵，a 为路段节点重要度指标的数量。

3) 指标权重计算：

$$\omega_q = \frac{1 - s_q}{\sum_{q=1}^{a}\left(1 - s_q\right)} \tag{3}$$

式中，ω_q 表示指标 q 的权重。

4) 路段候选点重要度计算：

$$Q_n = \sum_{q=1}^{a} -\omega_q \lambda_{nq} \log_a^{\lambda_{nq}} \tag{4}$$

式中，Q_n 表示路段候选点 n 的重要度。

3. 空中交通传感器布设优化模型

为满足高速公路交通路段监测需求，提高突发事件下的应急救援效率，本文在考虑路段重要度、无人机性能、传感器布设成本等因素的基础上，进行空中交通传感器的布设优化，确定最优传感器布设方案。

3.1. 问题描述及模型假设

本文对高速公路事故高发以及大流量路段进行传感器的选址布设，解决如何从高速公路候选点中，选择目标最优并且满足约束条件的候选点作为传感器的布设点位，确定最优传感器布设方案。高速公路

交通传感器有两种类型，一类是固定传感器，一类是移动传感器，考虑到事件的应急救援效率因素，选择视频传感器与无人机传感器在事故高发以及大流量路段进行布设规划。

3.2. 模型构建

本文在考虑路段重要度、无人机性能、传感器布设原则等因素的基础上，以最大化覆盖重要路段为目标，以传感器布设原则和预算上限为约束[7]，构建空中传感器布设优化模型。

1) 目标函数：

$$\max F = \sum_{u\in U}\sum_{n\in N} Q_n * x_{un} \tag{5}$$

式中，Q_n 表示第 n 个候选点的重要度，U 为无人机集合，$u \in U$，N 为无人机候选点集合。

2) 约束条件：

1) 0-1 整数约束：

$$x_{un} \in \{0,1\} \tag{6}$$

$x_{un}=1$ 表示将第 u 架无人机布设在候选点 n 上，$x_{un}=0$ 表示第 u 架无人机布设未布设在候选点 n 上。

2) 覆盖约束：传感器在其覆盖范围内提供巡检服务。

$$\sum_{n\in N} x_{un} * d_{un} \le R_u, \forall u \in U \tag{7}$$

式中，d_u 为无人机 u 与 n 之间的距离，R_u 为无人机 u 的覆盖范围。

3) 布设原则约束：对于同一个候选点至多布设一台传感器。

$$\sum_{u\in U} x_{un} \le 1, \forall n \in N \tag{8}$$

4) 预算约束：交通传感器的布设成本不超过预算总额 C。

$$\sum_{u\in U}\sum_{n\in N} \frac{c_u + cm_u * l_u * x_{un}}{l_u * n_u} \le C \tag{9}$$

式中，c_u 表示无人机 u 的购置成本，cm_u 表示无人机 u 的维修成本，l_u 为无人机 u 的使用年限，n_u 为无人机 u 的覆盖的路段数量。

4. 实例验证

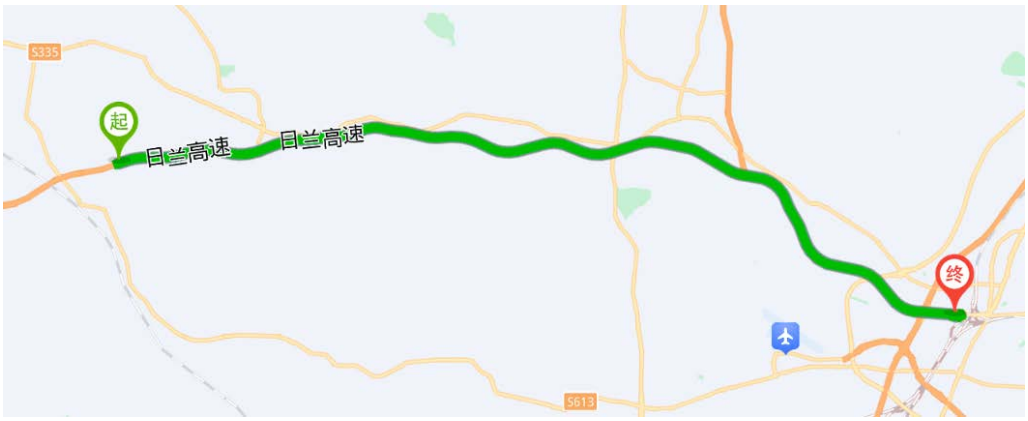

Figure 1. Experimental road section
图 1. 实验路段

为验证模型的可行性和有效性，选取山东省日兰高速 G1511 部分路段进行实例分析，全长 50 千米，见图 1。对实验路段按 1 km 进行等距划分，划分得到 50 条路段，基于 GIS 软件进行地图匹配分析，得到 2018~2022 年春运期间每条路段的事故以及流量数据，基于此分析路段候选点的重要度，进而以最大化覆盖重要路段为目标进行空中传感器的布设优化。

4.1. 基于信息熵理论的路段候选点重要度分析

高速公路路段事故数据包括事故次数、事故发生时间、经纬度坐标等，路段交通流量数据包括门架 ID、路段流量数据、经纬度坐标等信息，基于 GIS 将事故数据与流量数据匹配到相应路段，得到路段基本信息，如表 1 所示。

Table 1. Basic information about road sections
表 1. 路段基本信息

路段节点编号	经度	纬度	事故数(次)	交通流量(pcu/h/ln)
1	119.4468	35.4107	6	15201.563
2	119.4365	35.41035	1	15201.563
3	119.4262	35.41055	4	15201.563
4	119.416	35.41111	9	15201.563
5	119.4057	35.41166	6	15201.563
6	119.3958	35.41401	21	15201.563
7	119.3878	35.42045	7	15201.563
8	119.3804	35.42756	9	15201.563
9	119.3711	35.43166	1	15201.563
10	119.361	35.43354	2	15201.563
11	119.351	35.43576	3	15201.563
12	119.3424	35.44133	2	15201.563
13	119.3375	35.45026	13	15201.563
14	119.332	35.45894	17	15201.563
15	119.327	35.46786	1	15201.563
16	119.3192	35.4744	1	15201.563
17	119.3093	35.47675	3	12888.225
18	119.2991	35.47821	4	10574.887
19	119.2897	35.48226	4	10574.887
20	119.2804	35.48679	3	10574.887
…	…	…	…	…

基于信息熵理论计算事故以及流量的信息熵，进而得出相应的指标权重，最终基于重要度模型得出路段候选点的重要度，计算结果如表 2 所示。表 2 中重要度越大，表示路段事故频发、交通流量大，该条路段具有较大的巡检需求。

Table 2. Information entropy of road section nodes
表 2. 路段节点信息熵

路段候选点编号	事故熵权系数	流量熵权系数	重要度	路段候选点编号	事故熵权系数	流量熵权系数	重要度
1	0.0152	0.3142	0.3293	26	0.0036	0.0077	0.0114
2	0	0.3142	0.3142	27	0.0014	0.0077	0.0091
3	0.0066	0.3142	0.3208	28	0.0209	0.0077	0.0286
4	0.0367	0.3142	0.3508	29	0	0.0077	0.0077
5	0.0152	0.3142	0.3293	30	0.0036	0.0077	0.0114
6	0	0.3142	0.3142	31	0.0014	0.0077	0.0091
7	0.0209	0.3142	0.3351	32	0	0.0077	0.0077
8	0.0367	0.3142	0.3508	33	0	0.0077	0.0077
9	0	0.3142	0.3142	34	0	0.0077	0.0077
10	0.0014	0.3142	0.3156	35	0.0014	0.0077	0.0091
11	0.0036	0.3142	0.3178	36	0	0.0077	0.0077
12	0.0014	0.3142	0.3156	37	0	0.0077	0.0077
13	0.0987	0.3142	0.4129	38	0	0.0077	0.0077
14	0.3012	0.3142	0.6154	39	0.0367	0.0077	0.0444
15	0	0.3142	0.3142	40	0	0.0077	0.0077
16	0	0.3142	0.3142	41	0.0014	0.0077	0.0091
17	0.0036	0.1132	0.1168	42	0	0.0077	0.0077
18	0.0066	0.0181	0.0247	43	0.0104	0.0077	0.0182
19	0.0066	0.0181	0.0247	44	0.0066	0.0077	0.0144
20	0.0036	0.0181	0.0217	45	0.0066	0.0077	0.0144
21	0	0.0181	0.0181	46	0.0152	0.0077	0.0229
22	0.0066	0.0181	0.0247	47	0.0473	0.0077	0.0551
23	0	0.0181	0.0181	48	0.0209	0.0077	0.0286
24	0	0.0181	0.0181	49	0.0367	0.0077	0.0444
25	0.0014	0.0077	0.0091	50	0.0066	0.0077	0.0144

4.2. 空中交通传感器布设优化方案确定

本文构建的空中传感器布设优化模型为 0-1 整数规划问题，可基于 lingo 商业软件编程，采用分支定界法进行模型求解，空中交通传感器的相关参数如表 3 所示，生成交通传感器布设方案。

Table 3. Related parameters of different types of traffic sensors
表 3. 不同类型交通传感器的相关参数

交通传感器类型	最大覆盖范围/km	购置成本/万元	维修成本/万元	使用年限/年
无人机	7	10	1	3
视频传感器	0.5	4	0.5	10

Table 4. Comparative analysis of traffic sensor deployment schemes under different budget constraints
表 4. 不同预算约束下交通传感器布设方案对比分析

传感器布设预算上限/万元	目标函数值	覆盖候选点数量/个	布设数量/台	传感器布设成本/(万元/年)
10	4.7433	14	2	8.67
20	6.1122	28	4	17.33
30	6.1770	42	6	26.00

由表 4 可知，传感器布设方案对应的目标函数值随传感器布设预算上限的增加而逐渐增大，当预算上限由 20 万元增加至 30 万元时，目标函数值增速放缓，究其原因在于，由于预算限制无人机优先覆盖重要度较大的路段候选点，当无人机覆盖重要度较小的候选点对于目标函数值的增加效果并非明显。除此之外，随着传感器布设预算上限的增加，无人机能够有效覆盖的路段候选点增加，传感器的布设成本随之增大，当传感器布设预算上限为 30 万元时，能够布设 6 架无人机，此时候选点的覆盖率为 84%。

Table 5. Comparative analysis of traffic sensor deployment schemes under different types
表 5. 不同类型交通传感器布设方案对比分析

交通传感器类型	目标函数值	覆盖候选点数量/个	布设数量/台	传感器布设成本/(万元/年)
无人机	6.3620	50	8	34.67
视频传感器	6.0036	25	50	45

由表 5 可知，在传感器布设预算上限为 45 万元的情况下，视频传感器仅能覆盖到 25 个候选点，对应的目标函数值为 6.0036，优先覆盖重要度较大的路段候选点，而无人机传感器布设成本为 34.67 万元/年，布设方案目标函数值为 6.3620，相较于视频传感器，其传感器布设成本降低 29.8%、候选点的覆盖率提高 60%，能够以更低的成本有效覆盖到所有的候选点。

5. 结语

本文基于信息熵理论构建路段候选点重要度模型，确定路段巡检优先级，在此基础上以最大化覆盖重要路段为目标，以传感器布设原则和预算上限为约束，构建了空中传感器布设优化模型，并对比分析了不同传感器类型以及不同布设成本约束下的传感器布设方案，得出如下结论：

1) 当传感器布设预算约束较强时，空中传感器优先布设在重要路段，以提高整体的目标函数值，实现低成本下尽可能多地覆盖重要路段；当传感器布设预算相对充足时，空中传感器的布设呈现边际效用递减的现象，即布设更多的传感器对于目标函数值的提升效果并非显著。

2) 相较于视频传感器，空中传感器覆盖面更广，能够连续监测多个路段，其传感器的布设成本能够有效降低 29.8%、候选点覆盖率提高 60%。因此，空中传感器能够以更低的成本有效监测高速公路重要路段，弥补地面传感器的监测盲区，提高交通感知网络监测范围的空间覆盖率和应急救援响应效率。

然而，本研究仍存在一定的局限性，实例分析验证了模型的可行性和有效性，商业 lingo 软件对于小规模的问题求解速度较快，但对于大规模问题的求解效率较低，模型求解算法有待进一步改进；本模型仅针对单一类型空中传感器的布设研究，未来可结合空中传感器与地面传感器的优势，探究空地交通传感器的组合布设优化方法。

基金项目

国家自然科学基金——基于视觉特性的危险品车辆驾驶人驾驶安全性辨识(52102412)；山东省自然科

学基金项目——城市交通路网瓶颈区域动态激活判定机理及快速疏导控制方法研究(ZR2021QF110)；山东省自然科学基金项目——智能网联车辆混行环境下的城市交通泛控制研究(ZR2021MF019)；山东省交通运输科技计划项目，智慧高速 RSU 设备布设优化及运输风险协同控制方法研究(2022B99)；山东省科技型中小企业创新能力提升工程，智慧隧道一体化安全监管平台关键技术研究及应用(2022TSGC2096)；山东高速集团 2022 年度科技项目——空地一体智慧高速综合立体运营服务平台关键技术研发及示范应用(SDGS-2023-0281)；山东省工业和信息化厅技术创新项目——空地一体智慧高速综合立体运营服务平台关键技术研发及示范应用(202350100829)；山东省交通运输科技计划项目——空地一体智慧高速综合立体运营服务平台关键技术研发及示范应用(2023B74)；济南市“新高校 20 条”资助项目——基于车路云协同感知的交通系统智能化控制关键技术研究(202333040)。

参考文献

[1] Owais, M., Moussa, G.S. and Hussain, K.F. (2019) Sensor Location Model for O/D Estimation: Multi-Criteria Meta-Heuristics Approach. *Operations Research Perspectives*, **6**, Article ID: 100100. https://doi.org/10.1016/j.orp.2019.100100

[2] Fu, H., Lam, W.H.K., Shao, H., Kattan, L. and Salari, M. (2022) Optimization of Multi-Type Traffic Sensor Locations for Estimation of Multi-Period Origin-Destination Demands with Covariance Effects. *Transportation Research Part E*: *Logistics and Transportation Review*, **157**, Article ID: 102555. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102555

[3] 王仲, 钟树伟, 徐洪峰. 考虑故障因素的高速公路交通检测器布设[J]. 公路交通科技, 2022, 39(11): 158-164.

[4] Salari, M., Kattan, L., Lam, W.H.K., Lo, H.P. and Esfeh, M.A. (2019) Optimization of Traffic Sensor Location for Complete Link Flow Observability in Traffic Network Considering Sensor Failure. *Transportation Research Part B*: *Methodological*, **121**, 216-251. https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.004

[5] Chauhan, D., Unnikrishnan, A. and Figliozzi, M. (2019) Maximum Coverage Capacitated Facility Location Problem with Range Constrained Drones. *Transportation Research Part C*: *Emerging Technologies*, **99**, 1-18. https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.12.001

[6] Hong, I., Kuby, M. and Murray, A.T. (2018) A Range-Restricted Recharging Station Coverage Model for Drone Delivery Service Planning. *Transportation Research Part C*: *Emerging Technologies*, **90**, 198-212. https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.017

[7] 陈刚, 付江月. 军民融合背景下无人机配送中心选址问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(8): 226-231, 237.

[8] 任新惠, 王柳. 即时配送下无人机全自动机场分区选址模型[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(10): 266-272.

[9] 李立, 平振东, 徐志刚, 等. 高速公路行车风险路侧感知系统的设备优化布设[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(6): 1137-1146.