

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2017.00017

## 基于无人机辅助的 V2I 无线传输系统性能优化

郭芳, 张玉艳, 赵龙, 郑侃, 王文博

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

**摘要:** 在应急通信中, 无人机的应用越来越广泛, 提出了一种无人机辅助的 V2I (vehicle to infrastructure) 车载通信技术。由于通信距离、地形遮挡等原因, 地面的车辆与基站可能无法实现直接通信, 此时无人机可被用作通信中继。在通信过程中, 为了满足地面车辆通信的公平性需求, 基于地面移动车辆的位置坐标, 选定一个小于相干时间的时间间隔, 计算车辆在每个时间间隔的传输速率, 并将最大化最小传输速率作为优化目标。为解决此问题, 提出将整个通信过程离散化, 先计算在每个时间间隔范围内使最小传输速率最大化的无人机飞行轨迹, 从而得到整个通信过程的无人机飞行路径。仿真表明, 通过对无人机进行路径规划, 车辆的信息传输速率明显优于无人机位置固定情况下的传输速率。

**关键词:** 无人机中继; V2I; 路径规划; 传输速率

中图分类号: TN914

文献标识码: A

## Performance optimization for UAV-enabled V2I communications system

GUO Fang, ZHANG Yu-yan, ZHAO Long, ZHENG Kan, WANG Wen-bo

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In the emergency communication, UAVs (unmanned aerial vehicle) are used more and more widely, and a V2I (vehicle to infrastructure) vehicle communication technology based on UAV was proposed. Because of the communication distance and the shelter of the terrain, the ground vehicle and the base station may not connect directly. At this time, the UAV can be used as communication relay. In the process of communication, in order to meet the fairness of ground vehicle communication, a time interval less than the coherence time was selected based on the coordinates of moving ground vehicles, the transmission rate between vehicles in each time interval are calculated to maximize the minimum transmission rate as the optimization goal. In order to solve this problem, the entire communication process was dispersed. First, UAV flight trajectory to maximize the minimum transmission rate at each time interval within the range of the UAV flight path was calculated to get the whole communication process trajectory. Simulation results show that through the path planning of UAV, the information transmission rate of the vehicle is obviously better than the transmission rate under the fixed position of UAV.

**Key words:** UAV-based relay, V2I, trajectory optimization, transmission rate

### 1 引言

目前, 无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 因其移动性强、方便部署等特点, 在越来越多的领域有了广泛的应用, 如通信、农业、实时监控、灾

区重建等<sup>[1]</sup>。其中, 无人机在无线通信领域中的应用受到了很大的关注, 尤其是在缺少地面基础通信设施覆盖的区域, 以及由于自然灾害导致地面基础通信设施损毁从而影响正常通信的地区。对于车联网, 其旨在使交通更安全、更高效, V2I 是车联网

收稿日期: 2017-04-30; 修回日期: 2017-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61601044); 北京邮电大学青年科研创新计划专项基金资助项目 (No.2016RCGD10); 诺基亚车联网基金资助项目

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61601044), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2016RCGD10), The Nokia Vehicular Project

中重要的组成部分。V2I 通信允许车辆在行驶的过程中与路边基础设施进行数据交换,从而获得所处区域乃至整个地区的交通信息,在信息总体整合的基础上对每个终端提供相应的驾驶指导和预警服务,所以 V2I 在支持业务的种类方面具有很大的优势, V2I 通信也一直是智能交通的重点研究领域<sup>[2]</sup>。目前, V2I 通信主要应用于实时的信息服务、车辆的运行监控、电子收费的管理等,其通信特点是距离较短、高速移动<sup>[3]</sup>。但是,随着全球车辆保有量的不断升高和车联网产业的不断壮大,接入车联网的车辆规模将不断扩大,车联网需要采集、传输、处理的数据量将以指数级增长,这就要求在 V2I 通信中,保证最基本的信息传输速率<sup>[4]</sup>。在实际的通信场景中,地面的移动车辆可能无法与基站直接通信,此时利用无人机方便部署、经济效用较高等特点,将无人机用于通信中继,便可为地面的移动车辆提供可靠的无线连接服务<sup>[5]</sup>。

本文描述了一个应用无人机作为通信中继的 V2I 系统。在某些地区,由于发生地震等自然灾害或高山等地形遮挡,使通信基站和远处的车辆无法直接通信。此时,无人机便可起到通信中继的作用。为了满足地面车辆通信的公平性,通过实时计算无人机与地面多个移动车辆之间的传输速率,找到最小的信息传输速率,并通过适当调整无人机的飞行路径使最小传输速率达到最大值,从而使地面的移动车辆达到最优的通信速率。最后,通过仿真得出结论,证明通过优化无人机中继的飞行路径对提高 V2I 无线传输系统的信息传输速率是有效的<sup>[6]</sup>。

## 2 无人机辅助的 V2I 无线传输系统

### 2.1 场景描述

本文描述的 V2I 无线传输系统场景如图 1 所示,由 3 部分组成,即远处的通信基站、地面移动车辆和无人机。其中,无人机作为系统中的通信中继,辅助基站与地面移动车辆进行多播通信,且无人机的飞行路径是可控的。在整个通信过程中,基站先与无人机进行通信,将信息传递给无人机中继,然后无人机通过不同的频带,将从基站接收到的信息多播给地面的移动车辆用户。假设无人机将飞行高度固定为  $H$ ,并且无人机具有一个消息缓冲区,可以存储从基站接收到的信息<sup>[7]</sup>。此外,为了方便起见,假设基站和无人机以及无人机和地面移动车辆均处在视距范围内,并且在整个通信过程

中,通信系统的多普勒效应也被完全补偿。

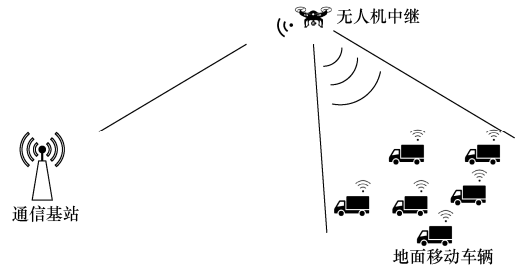


图 1 无人机辅助的 V2I 无线传输系统

根据图 1 所示的通信场景建立如图 2 所示的三维坐标系。将基站的位置  $S$  设为坐标系的原点,地面运动的车辆分布在一个矩形区域,此矩形的中心点为  $D$ ,  $S$  与  $D$  的连线为三维直角坐标系的  $x$  轴,在水平面上垂直于  $x$  轴作坐标系的  $y$  轴,  $z$  轴则为与水平地面垂直的方向。基站  $S$  与用户所在矩形区域中心点  $D$  之间距离为  $L$ ,即  $D$  的坐标为  $(L,0,0)$ 。此时,假设无人机飞行在固定高度  $H$  上,飞行时间为  $T$ ,那么在  $t$  时刻,飞行的无人机在三维坐标系中的位置坐标为  $(x(t),y(t),H),0 \leq t \leq T$ 。已知无人机飞行时的最大速度为  $V$ ,故有

$$\sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \leq V, 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

其中,  $\dot{x}(t)$  和  $\dot{y}(t)$  分别为  $x(t)$  和  $y(t)$  关于时间  $t$  的导数。在整个通信过程中,可将无人机飞行过程离散化,选定一个小于相干时间的时间间隔  $\delta$ ,在每个  $\delta$  中计算无人机的飞行路径,那么整个通信时间  $T$  可表示为  $T = N\delta$ 。在每一个时刻无人机在平面  $z = H$  中的坐标为  $\{x[n],y[n]\}_{n=1}^N$ 。无人机在第  $n$  个通信时隙中,其三维坐标为  $(x[n],y[n],H)$ ,在第  $n+1$  个时隙中坐标为  $(x[n+1],y[n+1],H)$ 。那么,在相邻时隙内,无人机飞行的距离为

$$d = \sqrt{(x[n+1] - x[n])^2 + (y[n+1] - y[n])^2} \quad (2)$$

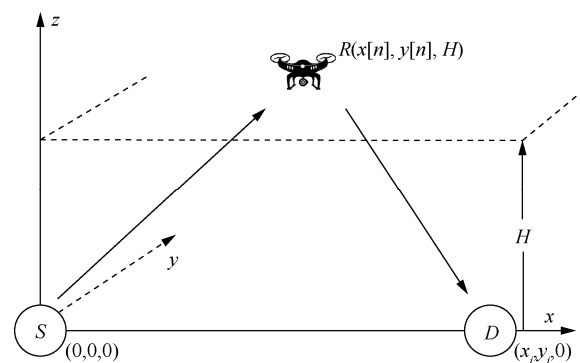


图 2 无人机辅助的 V2I 无线传输系统三维坐标系

此外,假设无人机飞行的起始位置坐标和最终位置坐标分别为 $(x[0],y[0],H)$ 和 $(x[F],y[F],H)$ 。

对于地面移动车辆,每辆车的起始位置和最终位置坐标为 $(x_i[0],y_i[0],0)$ 和 $(x_i[F],y_i[F],0)$ ,在每个通信时隙中,每辆移动车辆的位置坐标为 $(x_i[n],y_i[n],0),i=1,2,\dots,M,n=1,2,\dots,N-1$ ,其中, $M$ 为地面车辆的总数。

## 2.2 通信模型

### 2.2.1 信道模型

无人机辅助的无线通信系统在第 $n$ 个通信时隙中,信息从基站 $S$ 到无人机中继 $R$ 的路损<sup>[2]</sup>为

$$\beta_{sr}[n] = \phi d_{sr}^{-2}[n] \quad (3)$$

其中, $\phi$ 是单位距离( $d_0=1\text{m}$ )的信道功率, $d_{sr}[n]$ 为基站 $S$ 到无人机中继 $R$ 的距离,且距离 $d_{sr}[n] = \sqrt{H^2 + x^2[n] + y^2[n]}$ 。在这个过程中信息传输的小尺度衰落为 $h[n]$ <sup>[3]</sup>,则基站 $S$ 到无人机中继 $R$ 的信道模型为

$$g_{sr}[n] = \beta_{sr}^{-1} h_{sr}[n] \quad (4)$$

同理,在第 $n$ 个通信时隙中,信息从无人机中继 $R$ 到地面移动车辆用户的路损为

$$\beta_{i,rd}[n] = \phi d_{i,rd}^{-2}[n] \quad (5)$$

从无人机中继 $R$ 到地面移动车辆用户的信道模型<sup>[8]</sup>为

$$g_{i,rd}[n] = \beta_{i,rd}^{-1} h_{i,rd}[n] \quad (6)$$

其中, $d_{i,rd}[n]$ 为无人机 $R$ 到地面车辆的距离,即

$$d_{i,rd}[n] = \sqrt{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2}$$

### 2.2.2 信号传输建模

无人机辅助的无线通信系统中,在第 $n$ 个通信时隙内,从基站 $S$ 到无人机中继 $R$ 之间传输的信号模型<sup>[8]</sup>为

$$y[n] = g_{sr}[n]x_{sr}[n] + \omega[n] \quad (7)$$

其中, $x_{sr}[n]$ 是从基站 $S$ 到无人机中继 $R$ 之间传输的信息, $g_{sr}[n]$ 为信道, $\omega[n] \sim C(0, \sigma^2)$ 为传输过程中的噪声。因此,在第 $n$ 个传输时隙从基站 $S$ 到无人机中继 $R$ 的信息传输速率<sup>[9]</sup>为

$$R_s[n] = \text{lb} \left( 1 + \frac{P_s |g_{sr}[n]|^2}{\sigma_{sr}^2} \right) \quad (8)$$

其中, $P_s$ 为基站 $S$ 的发射功率。

同理,在第 $n$ 个通信时隙中,从无人机中继 $R$ 到地面区域 $D$ 中的移动车辆之间传输的信号模型为

$$y[n] = g_{i,rd}[n]x_{i,rd}[n] + \tilde{\omega}[n] \quad (9)$$

在第 $n$ 个传输时隙,无人机中继 $R$ 到区域 $D$ 中第 $i$ 个用户的信息传输速率为

$$R_{i,r}[n] = \text{lb} \left( 1 + \frac{P_r |g_{i,rd}[n]|^2}{\sigma_{i,rd}^2} \right) \quad (10)$$

其中, $P_r$ 为第 $n$ 个通信时隙,无人机中继 $R$ 在第 $i$ 个频带的发射功率<sup>[10]</sup>。

已知在每个通信时隙中,中继 $R$ 只能转发已经从基站 $S$ 接收到的信息,并且信息从基站 $S$ 传输到无人机 $R$ 以及从无人机 $R$ 传输到区域 $D$ 中用户的传输延时恰好都为一个时隙长度,故在信息传递过程中,需要满足以下约束<sup>[2]</sup>。

$$\begin{aligned} R_{i,r}[1] &= R_s[N] = 0, i=1, \dots, m, \\ \sum_{i=1}^m \left( \sum_{n=2}^N R_{i,r}[n] \right) &\leq \sum_{n=1}^{N-1} R_s[n] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)表示在第一个通信时隙中,从无人机 $R$ 到区域 $D$ 中的任一移动车辆用户均无信息传输,在最后一个通信时隙中,从基站 $S$ 到无人机 $R$ 无信息传输。

### 2.3 无人机路径优化的问题建模

在整个通信过程中,在任意一个通信时隙 $n$ 内,目标区域 $D$ 中的 $M$ 个地面移动车辆用户,都可以通过计算得到 $M$ 个信息传输速率,即 $\{R_{1,r}[n], R_{2,r}[n], \dots, R_{M,r}[n]\}$ 。为了保证每一个车辆都能达到理想的信息吞吐量,以每个时刻的 $M$ 个地面移动车辆的传输速率中的最小传输速率 $R_{r,\min}[n] = \min\{R_{1,r}[n], R_{2,r}[n], \dots, R_{M,r}[n]\}$ 作为优化目标,通过计算得到无人机在每个时隙的最优坐标 $(x[n], y[n], H), n=1, \dots, N$ ,最后形成整个通信过程中无人机最优的飞行路径,以及最大化最小传输速率<sup>[11]</sup>。

在整个通信过程中,假设无人机飞行的最大速度为 $V$ ,地面移动车辆的运动的最大速度为 $V_i$ 。根据前述约束条件,无人机飞行路径优化问题为

$$\max_{\{x[n], y[n]\}} \min_{i \in \{1, 2, \dots, M\}} R_{i,r}[n] \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^M \left( \sum_{n=2}^N R_{i,r}[n] \right) \leq \sum_{n=1}^{N-1} R_s[n], n=2, \dots, N, i=1, \dots, M \quad (13)$$

$$(x[1]-x[0])^2 + (y[1]-y[0])^2 \leq V^2 \quad (14)$$

$$(x[n+1]-x[n])^2 + (y[n+1]-y[n])^2 \leq V^2, \\ n=1, \dots, N-1 \quad (15)$$

$$(x[F]-x[N])^2 + (y[F]-y[N])^2 \leq V^2 \quad (16)$$

$$(x_i[1]-x_i[0])^2 + (y_i[1]-y_i[0])^2 \leq V_1^2, i=1, \dots, M \quad (17)$$

$$(x_i[n+1]-x_i[n])^2 + (y_i[n+1]-y_i[n])^2 \leq V_1^2, \\ n=1, \dots, N-1; i=1, \dots, M \quad (18)$$

$$(x_i[F]-x_i[N])^2 + (y_i[F]-y_i[N])^2 \leq V_1^2 \quad (19)$$

其中，式(13)为信息传输过程中信息传输速率的约束，式(14)~式(16)表示无人机在飞行过程中最大飞行速度为  $V$ ，式(17)~式(19)表示地面移动车辆在通信过程中最大的运动速度为  $V_1$ 。 $(x_i[n], y_i[n], 0)$  表示在每个通信时隙，系统通过地面移动车辆的 GPS 系统实时接收其在每个时隙的位置坐标。

### 3 无人机路径优化问题求解

为了求解无人机路径优化的问题，可将连续的通信过程离散化。首先求解在每个通信时隙中无人机飞行的路径，在此基础上，得到整个通信过程中的无人机飞行路径。

#### 3.1 单时隙中无人机的路径规划

无人机路径规划的整个问题可以分解为  $n$  个子时隙求解，在任一通信时隙中，有以下定理。

**定理 1** 在每个通信时隙中，无人机在  $z = H$  平面上的飞行轨迹为直线

$$\frac{x-x[n-1]}{y-y[n-1]} = \frac{x_i[n]-x[n-1]}{y_i[n]-y[n-1]} \quad (20)$$

其中， $(x[n-1], y[n-1])$  为无人机在第  $n-1$  个通信时隙结束时的坐标值。 $x_i[n]$ 、 $y_i[n]$  分别为在第  $n$  个通信时隙开始时，通过计算所得的无人机中继  $R$  与目标区域  $D$  中移动车辆的传输速率最小的车辆用户的横坐标值和纵坐标值，即

$$i = \arg \min_j \{R_{j,r}[n]\} \\ R_{j,r}[n] = \text{lb} \left( 1 + \frac{p_r \gamma_0}{H^2 + (x[n]-x_i[n])^2 + (y[n]-y_i[n])^2} \right) \quad (21)$$

**证明** 由上节可知，目标函数为

$$R_{i,r}[n] = \text{lb} \left( 1 + \frac{p_r |g_{i,rd}[n]|^2}{\sigma_{i,rd}^2} \right) \\ = \text{lb} \left( 1 + \frac{\frac{p_r \phi |h_{i,rd}[n]|^2}{H^2 + (x[n]-x_i[n])^2 + (y[n]-y_i[n])^2}}{\sigma_{i,rd}^2} \right) \\ = \text{lb} \left( 1 + \frac{p_r \phi |h_{i,rd}[n]|^2}{(H^2 + (x[n]-x_i[n])^2 + (y[n]-y_i[n])^2) \sigma_{i,rd}^2} \right) \\ = \text{lb} \left( 1 + \frac{p_r \gamma_0}{H^2 + (x[n]-x_i[n])^2 + (y[n]-y_i[n])^2} \right)$$

其中， $\gamma_0 = \frac{\phi |h_{i,rd}[n]|^2}{\sigma_{i,rd}^2}$ 。由上式可知，在每个通信时隙中，目标函数  $R_{i,r}[n]$  是关于无人机横纵坐标值  $x[n], y[n]$  的函数。求此函数的极大值，首先需对函数求关于  $x[n]$ 、 $y[n]$  的一阶偏导。

1) 对函数  $R_{i,r}(x[n], y[n])$  求关于横坐标  $x[n]$  的一阶偏导

$$\frac{\partial R_{i,r}[n]}{\partial x[n]} = -\frac{2}{\ln(2)} \cdot \frac{1}{\frac{H^2 + (x[n]-x_i[n])^2 + (y[n]-y_i[n])^2}{x[n]-x_i[n]} + p_r \gamma_0}$$

对  $R_{i,r}(x[n], y[n])$  求关于纵坐标  $y[n]$  的一阶偏导

$$\frac{\partial R_{i,r}[n]}{\partial y[n]} = -\frac{2}{\ln(2)} \cdot \frac{1}{\frac{H^2 + (x[n]-x_i[n])^2 + (y[n]-y_i[n])^2}{y[n]-y_i[n]} + p_r \gamma_0}$$

为了求得函数的驻点，需令

$$\begin{cases} \frac{\partial R_{i,r}[n]}{\partial x[n]} = 0 \\ \frac{\partial R_{i,r}[n]}{\partial y[n]} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

此时求解式 (22), 可得函数  $R_{i,r}(x[n],y[n])$  的驻点为

$$\begin{cases} x[n] = x_i[n] \\ y[n] = y_i[n] \end{cases}$$

2) 在求得函数  $R_{i,r}(x[n],y[n])$  的驻点以后, 需判断此驻点是否是函数的极值点, 进而判断此极值点是极大值点还是极小值点。此时就需要对函数  $R_{i,r}(x[n],y[n])$  分别求关于  $x[n]$ 、 $y[n]$  的二阶偏导, 以及关于  $x[n]$ 、 $y[n]$  的混合偏导。

对  $R_{i,r}(x[n],y[n])$  求关于横坐标  $x[n]$  的二阶偏导

$$R_{xx} = \frac{\partial^2 R_{i,r}[n]}{\partial x[n]^2} = \frac{-2}{\ln(2)} \cdot \frac{1}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2 + p_r[n]\gamma_0} \cdot \left[ 2 - \frac{4(x[n] - x_i[n])^2}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2 + p_r[n]\gamma_0} - \frac{4(x[n] - x_i[n])^2}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2} \right] \quad (23)$$

对  $R_{i,r}(x[n],y[n])$  求关于纵坐标  $y[n]$  的二阶偏导

$$R_{yy} = \frac{\partial^2 R_{i,r}[n]}{\partial y[n]^2} = \frac{-2}{\ln 2} \cdot \frac{1}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2 + p_r[n]\gamma_0} \cdot \left[ 2 - \frac{4(y[n] - y_i[n])^2}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2 + p_r[n]\gamma_0} - \frac{4(y[n] - y_i[n])^2}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2} \right] \quad (24)$$

对  $R_{i,r}(x[n],y[n])$  求横纵坐标  $x[n]$ 、 $y[n]$  的混合二阶偏导

$$R_{xy} = \frac{\partial^2 R_{i,r}[n]}{\partial x[n]\partial y[n]} = \frac{2}{\ln(2)}$$

$$\frac{4(x - x_i[n])(y - y_i[n])}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2 + p_r[n]\gamma_0} \cdot \frac{1}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2} \cdot \left[ \frac{1}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2 + p_r[n]\gamma_0} + \frac{1}{H^2 + (x[n] - x_i[n])^2 + (y[n] - y_i[n])^2} \right] \quad (25)$$

3) 将 2) 中求得的驻点  $(x_i[n], y_i[n])$  分别代入式 (23) ~ 式 (25) 中, 可得

$$\begin{cases} A = R_{xx}(x_i[n], y_i[n]) \\ B = R_{xy}(x_i[n], y_i[n]) \\ C = R_{yy}(x_i[n], y_i[n]) \end{cases}$$

$A$ 、 $B$ 、 $C$  之间的关系有以下几种情况。

若  $AC - B^2 > 0$ , 则驻点  $(x_i[n], y_i[n])$  不是函数  $R_{i,r}(x[n], y[n])$  的极值点, 且此函数没有极值点。

若  $AC - B^2 = 0$ , 则驻点  $(x_i[n], y_i[n])$  可能是函数  $R_{i,r}(x[n], y[n])$  的极值点也可能不是极值点, 即无法判断此函数是否有极值点。

若  $A < 0$  且  $AC - B^2 > 0$ , 则驻点  $(x_i[n], y_i[n])$  是函数  $R_{i,r}(x[n], y[n])$  的极值点, 且为极大值点。

若  $A > 0$  且  $AC - B^2 > 0$ , 则驻点  $(x_i[n], y_i[n])$  是函数  $R_{i,r}(x[n], y[n])$  的极值点, 且为极小值点。

通过计算  $A$ 、 $B$ 、 $C$  得到  $A < 0$  且  $AC - B^2 > 0$ , 可知所求得的驻点是函数  $R_{i,r}(x[n], y[n])$  的极值点, 且为极大值点。

综上, 可判断在整个通信过程中, 在每个子时隙内都可求得无人机的飞行路径为直线

$$\frac{x - x[n-1]}{y - y[n-1]} = \frac{x_i[n] - x[n-1]}{y_i[n] - y[n-1]}$$

在每个时隙内按照此路径飞行, 即可使地面移动用户的最小传输速率最大化。

### 3.2 整个通信过程无人机的路径规划

在已知无人机在每个通信时隙的飞行路径的基础上, 对于整个通信过程, 无人机的路径规划有以下几步。

1) 对无人机辅助的车联网无线通信系统进行初始化, 给定地面移动车辆即用户的总数  $M$ , 初始

化每个地面移动车辆用户的起始位置坐标，即  $(x_i[0], y_i[0], 0), i=1, 2, \dots, M$ ，并假设无人机的初始位置坐标为  $(x[0], y[0], H)$ ，其位于坐标原点  $S$ （即远处基站的位置）与地面移动用户所在区域  $D$  中心点的连线的正上方上的某一点。

2) 在第一个通信时隙中，式(17)的约束条件下，让区域  $D$  中的移动用户开始运动，并在时隙结束时，上报各个移动车辆用户的位置坐标，计算此时基站  $S$  到无人机  $R$  的传输速率  $R_s[1]$ 。且在第一个通信时隙中，由于信息传输速率的时延，使无人机和地面移动用户之间的传输速率为 0，即  $R_{i,r}[1]=0, i=1, 2, \dots, M$ ，此时让无人机以最大速度  $V$  向目标区域  $D$  的中心点方向飞。在第一个通信时隙结束时，更新无人机中继  $R$  的坐标，得到无人机在第一个时隙结束时的坐标  $(x[1], y[1], H)$ 。

3) 在第二个通信时隙中，使  $D$  区域中的用户在式(18)的约束条件下运动，在时隙结束时，上报各个移动车辆用户的坐标，并计算  $R_s[2]$ ， $R_{i,r}[2], i=1, 2, \dots, M$ ，在  $M$  个无人机中继到地面移动车辆用户的信息传输速率中找到最小的传输速率  $R_{r,\min}[2]=\min\{R_{1,r}[2], R_{2,r}[2], \dots, R_{M,r}[2]\}$ ，并得到与之对应的车辆的坐标值为  $(x_i[2], y_i[2], 0)$ 。此时由定理可知，在第二个通信时隙中，无人机在  $z=H$  平面上的飞行的轨迹为直线

$$\frac{x[2]-x[1]}{y[2]-y[1]} = \frac{x_i[2]-x[1]}{y_i[2]-y[1]}$$

此时在式(13)和式(15)的约束条件下求得第二个时隙时无人机坐标的最优解  $(x[2], y[2], H)$ ，更新无人机的坐标，得到无人机在第二个时隙结束时的坐标  $(x[2], y[2], H)$ 。

4) 在第  $n$  个时隙时，区域  $D$  中的地面移动车辆依然在式(18)的约束条件下运动，在此时隙结束时，通过地面移动车辆的 GPS 系统上报各通信用户的实时坐标，计算此时  $M$  个用户与无人机中继的信息传输速率： $R_{i,r}[n], i=1, \dots, M$ 。此时重复步骤 3) 中计算传输速率的过程，在  $M$  个无人机中继到地面移动车辆用户的信息传输速率中找到最小的传输速率，得到与之对应的车辆的坐标值为  $(x_k[n], y_k[n], 0)$ 。由定理 1 可知，在第  $n$  个通信时隙中，无人机在  $z=H$  平面上的飞行的轨迹为直线

$$\frac{x-x[n-1]}{y-y[n-1]} = \frac{x_k[n]-x[n-1]}{y_k[n]-y[n-1]}$$

在式(13)和式(15)的约束条件下求得第二个时隙时无人机坐标的最优解  $(x[n], y[n], H)$ ，更新无人机的坐标，得到无人机在第二个时隙结束时的坐标  $(x[n], y[n], H)$ 。

5) 重复步骤 4)，直到达到系统的通信时间  $T$ ，或无人机与地面移动的车辆的传输速率大于基站到无人机的传输速率，此后无人机便可在在此位置附近盘旋并与地面移动车辆进行通信。

## 4 仿真结果与分析

为了验证本文提出的方法的合理性，本文将通过仿真来进行分析，说明对无人机飞行路径的合理规划，有助于提高无人机与地面移动车辆的信息传输速率。

### 4.1 参数设置

在仿真实验中，地面移动车辆的分布区域  $D$  是一个边长为 1 000 m 的矩形，基站  $S$  和目标区域  $D$  的中心点之间的距离为  $L=3\ 000$  m。在整个通信系统中，每个通信链路载波的频率为 5 GHz，带宽为 20 MHz，单位距离 ( $d_0=1$  m) 对应的信道噪声比 (CNR) 即  $\frac{\phi}{\sigma^2}=80$  dB。对于无人机来说，其最大的飞行速度  $V=50$  m/s，且无人机的飞行高度固定为  $H=100$  m，此高度适用于一般的山区和乡镇。初始无人机通信中继的位置坐标为： $(x[0], y[0], H)=(100, 0, 100)$ 。此外，已知基站  $S$  到无人机中继  $R$  的传输功率  $P_s$  以及无人机中继  $R$  到  $D$  区域中移动车辆用户的传输功率  $P_r$ ，且  $P_s=P_r=10$  dBm。

### 4.2 无人机飞行路径

如图 3 所示，地面移动车辆运动区域  $D$  为长宽均为 2 000 m 的正方形，此矩形的中心点坐标为  $(3\ 000, 0, 0)$ ，目标用户数目即地面移动车辆为 20 辆，运动车辆最大的移动速度为 120 km/h，车辆在每个时隙都会更新自己的位置并通过 GPS 系统将位置坐标实时上报。图 3 中实线即为通过计算得到的无人机飞行路径。在相应的传输速率和无人机飞行速度限制的条件下，为了使从无人机中继  $R$  到区域  $D$  中  $M$  个地面运动车辆传输速率的最小值最大化，在每个时刻对无人机飞行位置进行优化，从而形成整个通信过程中无人机飞行的最优路径。无人机按照此轨迹飞行，可以有效地提高无线通信系统的通信质量。

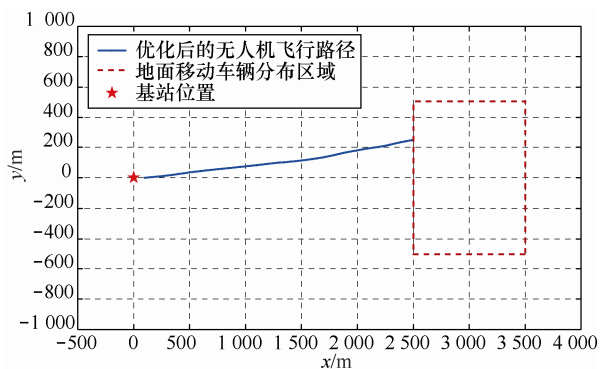


图3 无人机飞行路径

### 4.3 传输速率

在整个通信过程中，基站与无人机之间的传输速率  $R_s$  的统计值，以及无人机中继和地面一定车辆之间传输速率  $R_r$  的统计值如图4所示。从图中可知，随着无人机的运动， $R_s$  的增量逐渐减小， $R_r$  的增量逐渐增大。

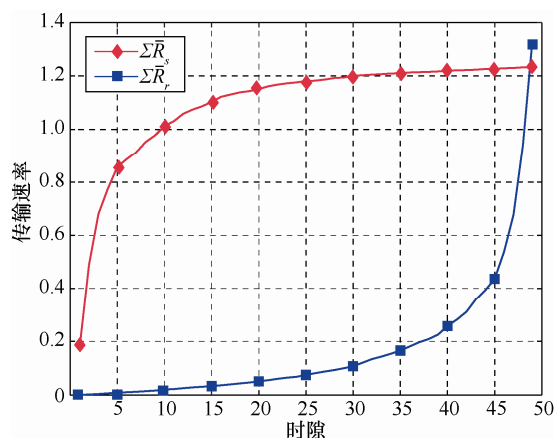


图4 通信过程中传输速率的变化

为了证明通过本文的优化方法所得到的无人机飞行轨迹，对于提高系统的通信质量是有效的，本文分别给出了无人机中继按照优化路径飞行和无人机中继位置固定时，无人机中继  $R$  与地面移动车辆的传输速率对比。如图5所示，对于无人机中继位置固定的无线通信系统，其他条件均不变，唯一不同的就是在此情况下，无人机中继的位置是固定的，本文假设无人机中继  $R$  固定在  $(\frac{L}{2}, 0, H)$  处，在系统中的坐标为  $(1500, 0, 100)$ 。图5中画出了无人机中继  $R$  按照优化路径运动时，中继  $R$  到  $D$  区地面移动车辆的最小信息传输速率的统计值，以及当无人机位置固定时对应的无人机中继  $R$  到  $D$  区地面移动车辆的最小信息传输速率的统计值。从图中可明显地看到，无人机按照优化后的路径运动时，无人机中继  $R$  到用户区域  $D$

中的移动车辆的传输速率相比于通信中继固定的无线通信系统有了明显的改善。说明通过本文的方法，对无人机路径进行规划对于提高无人机与地面移动用户之间的通信质量是有效的。

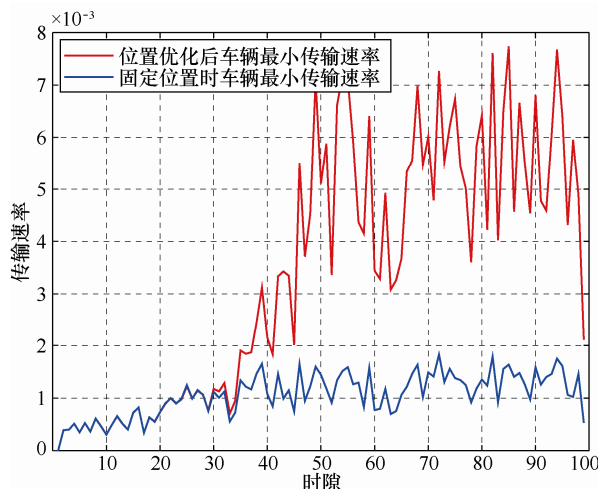


图5 位置优化无人机、固定位置无人机传输速率对比

## 5 结束语

本文研究了基于无人机的通信中继在无线通信系统中的应用。通过最大化无人机中继和地面移动车辆用户之间的最小传输速率，得到无人机中继在通信过程中最优的飞行路径。并且通过仿真证明，本文提出的路径规划有效提高了无人机中继与地面移动车辆之间的信息传输速率，从而保证了在通信系统中，地面移动车辆能够获得更好的通信服务。但是，本文仅讨论了将单个无人机应用于无线通信系统中的情形，而在实际的通信场景中，单个无人机提供的通信服务，往往不能满足多个地面移动车辆以及其他通信用户的信息传输需求。所以，运用多无人机协作担当通信中继，通过优化多无人机的飞行路径来提高用户的通信质量的相关工作，仍然具有很大研究价值<sup>[12]</sup>。

### 参考文献:

- [1] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communication Magazine, 2016, 54: 36-42.
- [2] ZHENG K, ZHENG Q, CHATZIMISIOS P, et al. Heterogeneous vehicular networking: a survey on architecture, challenges, and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2377-2396.
- [3] ZHENG K, ZHENG Q, YANG H J, et al. Reliable and efficient autonomous driving: the need for heterogeneous vehicular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 53: 72-79.
- [4] 任开明, 李纪舟, 刘玲艳, 等. 车联网通信技术发展现状及趋势研

究[J].通信技术, 2015,48(5):32-37.

REN K M, LI J Z, LIU L Y, et al. Development status and tendency of IoV communication technology[J]. Communication Technology, 2015, 48(5): 32-37.

- [5] 孙小红.车联网的关键技术及应用研究[J]. 通信技术, 2013, 46(4): 47-50.  
SUN X H. Key technology and its application of IoV[J]. Communication Technology, 2013, 46(4): 47-50.
- [6] CHOI D H, JUNG B H, SUNG D K. Low-complexity maneuvering control of a UAV-based relay without location information of mobile ground nodes[C]//ISCC 2014. Funchal, Portugal, 2014: 1-6.
- [7] JIN Y, ZHANG Y D, CHALISE B K. Joint optimization of relay position and power allocation in cooperative broadcast wireless networks[C]// ICASSP 2012. Kyoto, Japan, 2012: 2493-2496.
- [8] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64: 4893-4996.
- [9] LAV G, RAJ J, GABOR V. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18: 1123-1152.
- [10] 朱秋明, 周胜奎, 霍帅珂, 等. 无人机中继平台覆盖区域统计模型[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 223-229.  
ZHU Q M, ZHOU S K, HUO S K, et al. A statistical area coverage model for unmanned aerial vehicles as relay platforms[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 223-229.
- [11] ZHENG K, LIU F, LEI L, et al. Stochastic performance analysis of a wireless finite-state Markov channel[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 782-793.
- [12] ZHENG K, LIU F, LEI L, et al. Stochastic performance analysis of a wireless finite-state Markov channel[J]. IEEE Communication Society, 2013, 12: 1536.

#### 作者简介:



郭芳 (1989-), 女, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为信息与通信工程。



张玉艳 (1964-), 女, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为车联网、无线通信网络。



赵龙 (1985-), 男, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为无线通信网络。



郑侃 (1974-), 男, 北京邮电大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为 5G、车联网、数据分析等。



王文博 (1965-), 男, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线移动通信。