



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110427046 B

(45) 授权公告日 2022.09.30

(21) 申请号 201910679267.0

CN 107168305 A, 2017.09.15

(22) 申请日 2019.07.26

CN 105929848 A, 2016.09.07

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 101937233 A, 2011.01.05

申请公布号 CN 110427046 A

CN 107116549 A, 2017.09.01

(43) 申请公布日 2019.11.08

CN 105574221 A, 2016.05.11

(73) 专利权人 沈阳航空航天大学

CN 107085438 A, 2017.08.22

地址 110136 辽宁省沈阳市沈北新区道义南大街37号

US 2008269944 A1, 2008.10.30

US 2014267805 A1, 2014.09.18

US 2017212529 A1, 2017.07.27

(72) 发明人 林娜 郜峰 赵亮 石峻岭

CN 106950398 A, 2017.07.14

CN 103365295 A, 2013.10.23

(74) 专利代理机构 沈阳维特专利商标事务所

CN 104316978 A, 2015.01.28

(普通合伙) 21229

CN 105717942 A, 2016.06.29

专利代理师 甄玉荃

CN 106357313 A, 2017.01.25

CN 107844129 A, 2018.03.27

(51) Int. Cl.

CN 105225003 A, 2016.01.06

G05D 1/10 (2006.01)

CN 108507567 A, 2018.09.07

(56) 对比文件

WO 2019097256 A1, 2019.05.23

CN 109947136 A, 2019.06.28

US 2016086108 A1, 2016.03.24 (续)

CN 109144102 A, 2019.01.04

CN 108492316 A, 2018.09.04

CN 106658537 A, 2017.05.10

审查员 张琦

权利要求书3页 说明书8页 附图5页

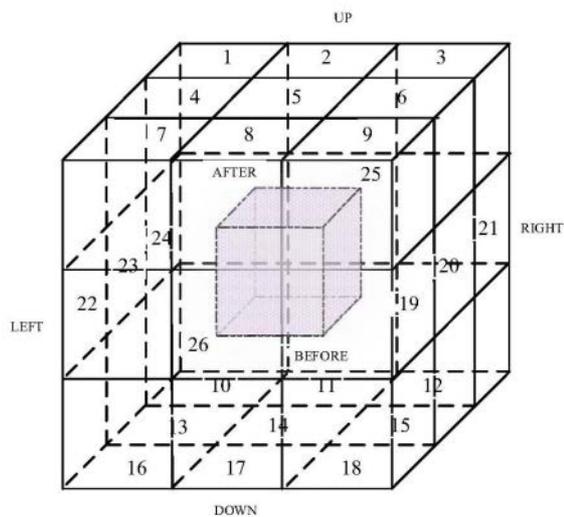
(54) 发明名称

一种三维平滑随机游走无人机群移动模型

(57) 摘要

本发明属于无人机移动模型技术领域,具体涉及一种三维平滑随机游走无人机群移动模型(3DSRW:3D Smooth Random Walk Mobility Model)。该模型主要解决三个问题:三维速度问题、三维边界处理以及航路的平滑。本移动模型中无人机移动速度和方向的三维化解决了无人机群在三维空间中移动的特点;三维边界处理方法解决了无人机到达仿真边界后无人机的继续移动问题;三维轨迹平滑使得无人机以一种更加符合真实无人机机动特性的方式移动。3DSRW模型的建立,以及对三维网络仿真的支持使得原本不真实的二维FANETs仿真环境变得更加真实,为以后FANETs各种网络仿真实验提供了真实可靠的仿真环境。

CN 110427046 B



[接上页]

(56) 对比文件

US 2011079703 A1,2011.04.07

WO 2017215024 A1,2017.12.21

CN 109947132 A,2019.06.28

张国敏等.基于访问密度的 UAV 三维移动模型.《北京邮电大学学报》.2017,第40卷

张国敏等.基于访问密度的 UAV 三维移动模型.《北京邮电大学学报》.2017,第40卷

林娜等.基于双向A\*算法的城市无人机航路规划.《沈阳航空航天大学学报》.2016,(第08期),

潘加亮.空天飞行器多源信息融合自主导航

及系统实现研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技II辑》.2016,(第10期),

Vilanova, Guillermo等.Coupling of discrete random walks and continuous modeling for three-dimensional tumor-induced angiogenesis.《COMPUTATIONAL MECHANICS 》.2014,

Barclay, PL等.Fluid-fluid interfacial mobility from random walks.《JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS》.2017,

陈雯雯.小型四旋翼无人机轨迹规划算法研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技II辑》.2016,(第01期),

1. 一种三维平滑随机游走无人机群移动模型,其特征在于,主要解决三个问题:三维速度问题、三维边界处理以及航路的平滑;

所述移动模型包括如下:三维速度:使用两个随机生成的方向 $\alpha, \beta$ 分别表示在水平和垂直方向的角度,根据这两个角度在空间中唯一确定一个方向,速度随机生成,引入相对速度的概念,在一个三维的仿真区域中,在水平面上假设无人机在一个边长为L的正方形围成的区域中移动,在垂直方向上假设在一个高度差为H的区域中移动,在随机游走的过程中随机生成的速度为V,通过下面公式计算沿着X方向、Y方向以及Z方向的速度:

$$V_x = V \cos(\alpha) \cos(\beta) \quad (1)$$

$$V_y = V \cos(\alpha) \sin(\beta) \quad (2)$$

$$V_z = V \sin(\alpha) \quad (3)$$

其中 $\alpha, \beta$ 分别是在垂直方向和水平方向随机生成的角度,按照上述方法计算得

$$\overline{V_H} = \overline{V_V} \quad (4)$$

$\overline{V_H}, \overline{V_V}$ 分别表示节点在水平和垂直两个方向上的平均速度,根据公式(1), (2), (3)计算得到的速度V在水平和垂直方向的速度相等,在无人机运行稳定之后的网络通信,无人机在运行稳定之后在垂直高度上一般保持稳定的高度,为了仿真无人机运行稳态的状态,在计算沿着Z轴方向的速度时加入一个比例因子 $\lambda$ ,其计算方法如下:

$$\lambda = \frac{H}{L} \quad (5)$$

$$V_z = \lambda V \sin(\alpha) \quad (6)$$

2. 根据权利要求1所述的一种三维平滑随机游走无人机群移动模型,其特征在于,三维边界处理:

在三维的随机游走模型中,把无人机随机移动的仿真区域看成是一个 $3*3*3$ 的27个小正方体构成的大正方体,仿真初始化时无人机所在区域为该大正方体里面的中心小正方体,利用上述的速度 $V_x, V_y, V_z$ 乘游走时间t,得到无人机下一时刻的位置坐标,在三维仿真空间中无人机达到的仿真区域可能是27个区域中的一个,其中26个为初始区域以外的位置,使用反弹的机制对到达边界后的移动方向进行处理,据节点首先达到的仿真边界,总结出6种到达边界后的处理方式,分别为到达仿真区域的上边界,下边界,前边界,后边界,左边界和右边界;依据角度转化关系,可以完成角度的转化,进而完成该模型的边界处理,使得无人机在仿真区域中合理移动;其中所述角度转化关系如表1所示:

表1

到达的边界	垂直角度	水平角度
UP	$\alpha' = 2\pi - \alpha$	$\beta' = \beta$
DOWN	$\alpha' = 2\pi - \alpha$	$\beta' = \beta$
LEFT	$\alpha' = \alpha$	$\beta' = \pi - \beta$
RIGHT	$\alpha' = \alpha$	$\beta' = \pi - \beta$
BEFORE	$\alpha' = \alpha$	$\beta' = 2\pi - \beta$
AFTER	$\alpha' = \alpha$	$\beta' = 2\pi - \beta$

3. 根据权利要求1所述的一种三维平滑随机游走无人机群移动模型,其特征在于,三维轨迹平滑:将生成的折线轨迹采用三阶B样条曲线进行航迹平滑,通过航迹平滑,在原始航迹的基础上,生成符合一定动力学约束的平滑航迹,使得无人机的运动状态连续变化,从而得到更加真实的飞行轨迹,具体的过程如公式(7)(8)(9)(10)所示;

分量形式:

$$\begin{cases} x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \\ z(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 \end{cases} \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{6}(x_0 + 4x_1 + x_2) \\ a_1 = \frac{1}{2}(x_0 - x_2) \\ a_2 = \frac{1}{2}(x_0 - 2x_1 + x_2) \\ a_3 = \frac{1}{6}(x_0 - 3x_1 + 3x_2 - x_3) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} b_0 = \frac{1}{6}(y_0 + 4y_1 + y_2) \\ b_1 = \frac{1}{2}(y_0 - y_2) \\ b_2 = \frac{1}{2}(y_0 - 2y_1 + y_2) \\ b_3 = \frac{1}{6}(y_0 - 3y_1 + 3y_2 - y_3) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} c_0 = \frac{1}{6}(z_0 + 4z_1 + z_2) \\ c_1 = \frac{1}{2}(z_0 - z_2) \\ c_2 = \frac{1}{2}(z_0 - 2z_1 + z_2) \\ c_3 = \frac{1}{6}(z_0 - 3z_1 + 3z_2 - z_3) \end{cases} \quad (10)$$

4. 根据权利要求1所述的一种三维平滑随机游走无人机群移动模型,其特征在于,应用该模型的约束条件为:

- (1) 无人机运行速度方向是三维的;
- (2) 在无人机稳定运行后垂直方向的速度比较小,水平方向的速度远远大于垂直方向的速度;
- (3) 无人机在平稳运行后一般保持在同一个水平面上运行,在垂直方向上的移动距离比较小;
- (4) 无人机飞行轨迹是平滑的,不能产生急停和小转角现象,需满足无人机的机动特性;

在所述模型中假设所有的无人机节点都视为一个质点,不考虑外界环境影响,不考虑无人机之间的碰撞问题,当无人机运行到稳态时,在垂直方向上的高度差假设在100m以内。

## 一种三维平滑随机游走无人机群移动模型

### 技术领域

[0001] 本发明属于无人机移动模型技术领域,具体涉及一种三维平滑随机游走无人机群移动模型。

### 背景技术

[0002] 近年来无人机已经广泛应用于军用和民用。在民用方面,在无人机上配备各种各样的传感器和网络设备来检测、收集特定区域的空中信息,利用无人机航拍可以实现对某一交通路段的监控,进行救援任务,视频拍摄,用于解决快递最后一公里问题的无人机快递近年来也在不断的发展。在军用方面由于无人机的体积较小速度较快,可以携带武器,用于战区侦察,精确打击等作战任务。

[0003] 在众多的对无人机的研究中,无人机协同作战,无人机空地协同作战以及无人机协同物流配送的研究具有重大的应用价值。他们有一个共同的特点:由无人机群联合协同完成任务,无人机之间彼此协作,互不干扰。无人机协同的前提是彼此网络连通,与车联网的网络通信方式相似,无人机之间的网络连接也是一种移动自组织的网络,称之为FANETs。与车联网相比,无人机网络有其不可忽略的特点:

[0004] 1、飞行在三维空间中,这使得其拓扑成为立体结构而不是平面结构;

[0005] 2、飞行速度较快导致其位置坐标和网络拓扑结构变化频繁;

[0006] 3、对于固定翼无人机而言它的速度有一定的限制,在运行的过程中不能发生急停以及突然转角;

[0007] 4、由于无人机飞行在空中,必须要考虑其能源消耗问题,防止它在空中能源不足导致坠机的现象产生;

[0008] 5、无人机需要严格的安全保障,飞行在空中的无人机容易受到物理障碍、通信中断或者人为的拦截的安全威胁。

[0009] 由于无人机的这些属性,无人机通信所用的路由协议有很高的要求,传统的适用于车联网的路由协议不再适用于飞行自组织网络,近年来研究者们也在不断地开发出适用于无人机特点的路由协议,其中基于拓扑的路由协议、基于地理位置的路由协议、三维路由协议以及生物启发式的路由协议在不断的发展,并且在无人机路由中占主导地位。在基于地理位置的路由协议中,利用人工智能对无人机历史移动轨迹的分析产生了一种新型的路由协议——基于位置预测的路由协议。在这种协议中无人机节点根据历史数据能够有效地预测出未来本节点以及其他节点的移动轨迹,在知道全局或者部分的移动轨迹后,可以有效地选择以及更新路由表条目,提高路由的效率,减少丢包和时延。同时这种路由协议要求无人机的轨迹是可预测的,但是在实际的军用飞行环境中,希望无人机的轨迹是不可预测的,因为如果轨迹被预测很可能遭到拦截,丧失无人机的战斗力。同时在一些区域覆盖问题中,应尽可能的让无人机随机的分布在特定的区域,有些学者加入了混沌的策略来实现随机的目的。

[0010] 在真实的环境下进行无人机路由实验消耗巨大,并且难以获得网络性能度量。在

研究FANETs时,学者大多采用仿真的方式进行,例如使用OMNET++,OPNET++,NS-3,MATLAB以及NS-2仿真软件以一种更加真实的方式去模仿无人机的运动,评价路由协议的性能在FANETs路由协议的不断发展中,无人机的移动模型研究也在如火如荼地进行。在最开始对无人机的研究中学者直接使用Ad Hoc移动模型进行实验,例如随机游走移动模型,随机路点移动模型,高斯马尔科夫移动模型等等,这些模型虽然可以进行实验但是不能真实的模仿无人机的移动特性,其中最重要的原因是这些模型均是在二维的环境下进行的仿真,而真实的无人机是飞行在三维空间中。由于移动模型对网络性能有重要影响,使用二维的Ad Hoc移动模型可能会得到错误的仿真结果。

### 发明内容

[0011] 为了解决上述技术问题,本发明的目的在于提供一种三维平滑随机游走无人机群移动模型,三维平滑随机游走模型约束条件为:

[0012] 1、无人机运行速度方向是三维的;

[0013] 2、在无人机稳定运行后垂直方向的速度比较小,水平方向的速度远远大于垂直方向的速度;

[0014] 3、无人机在平稳运行后一般保持在同一个水平面上运行,在垂直方向上的移动距离比较小;

[0015] 4、无人机飞行轨迹是平滑的,不能产生急停和小转角现象,需满足无人机的机动特性。

[0016] 在分析了以上无人机特性之后,所提出的3DSRW模型主要解决三个问题:三维速度问题、三维边界处理以及航路的平滑。在这种模型中,假设所有的无人机节点都视为一个质点,不考虑外界环境例如风和雨的影响,不考虑无人机之间的碰撞问题,当无人机运行到稳态时,在垂直方向上的高度假设在100m以内。

[0017] 三维速度问题

[0018] 在二维的随机游走模型中,在一个游走时间结束之后随机选择一个速度和方向,速度在一个预定义的范围中,方向角在 $[0, 2\pi]$ 之间随机选择,在三维的随机游走模型中使用两个随机生成的方向 $\alpha, \beta$ 分别表示在水平和垂直方向的角度,可以根据这两个角度在空间中唯一的确定一个方向。速度依然是随机生成,如果保持在水平和垂直方向的速度在同一个尺度,无人机节点将会频繁的转弯,上下的移动如图3所示,为了解决这个问题我们引入相对速度的概念,在一个三维的仿真区域中,在水平面上假设无人机在一个边长为L的正方形围成的区域中移动,在垂直方向上假设在一个高度差为H的区域中移动。在随机游走的过程中随机生成的速度为V,原本通过下面公式计算沿着X方向、Y方向以及Z方向的速度。

$$[0019] \quad V_x = V \cos(\alpha) \cos(\beta) \quad (1)$$

$$[0020] \quad V_y = V \cos(\alpha) \sin(\beta) \quad (2)$$

$$[0021] \quad V_z = V \sin(\alpha) \quad (3)$$

[0022] 其中 $\alpha, \beta$ 分别是在垂直方向和水平方向随机生成的角度,按照上述方法计算得

$$[0023] \quad \overline{V_H} = \overline{V_V} \quad (4)$$

[0024]  $\overline{V_H}, \overline{V_V}$ 分别表示节点在水平和垂直方向上的平均速度,这使得无人机节点在垂

直方向频繁的到达边界而发生转弯,如图3所示。因此不能单纯地使用上述方式计算各个方向的速度,在计算沿着Z轴方向的速度时需要加入一个比例因子 $\lambda$ ,其计算方法如下:

$$[0025] \quad \lambda = \frac{H}{L} \quad (5)$$

$$[0026] \quad V_z = \lambda V \sin(\alpha) \quad (6)$$

[0027] 通过这种方式进行三维随机游走,保证了沿着X、Y和Z方向有着相同的概率到达仿真边界,减少了无人机节点频繁到达上下边界后转弯的现象。加入比例因子之后的无人机节点移动如图4所示,无人机节点会较少的因为到达仿真边界而频繁转弯,更符合无人机的真实移动轨迹。

[0028] 三维边界处理问题

[0029] 在二维的随机游走模型中使用简单的反弹机制对边界进行处理,计算的下一次节点的位置可能出现在仿真区域外的8个位置如图2所示。

[0030] 在三维的随机游走模型中,把无人机随机移动的仿真区域看成是一个 $3*3*3$ 的27个小正方体构成的大正方体,仿真初始化时无人机所在区域为该大正方体里面的中心小正方体,利用上述的速度 $V_x, V_y, V_z$ 乘游走时间 $t$ ,得到无人机下一时刻的位置坐标,在三维仿真空间中无人机达到的仿真区域可能是27个区域中的一个,其中26个为初始区域以外的位置,如图7所示。我们沿用二维随机游走模型的边界处理方式使用反弹的机制对边界进行处理,图7为该模型边界处理的示意图,图中虚线所围成的区域为仿真区域,在三维空间中无人机达到的仿真边界可能是上下、左右、前后区域中的一个,使用反弹机制的边界处理就产生了6种角度处理方式,在到达不同的边界后其反射角度的计算方式有所不同,表1列出了当无人机节点到达边界后的折射角计算方式。 $\alpha, \beta$ 分别为在垂直方向和水平方向的入射角, $\alpha', \beta'$ 表示节点到达仿真边界后的反射角。根据26种情况无人机节点首先到达的面,依据上表的角度转化关系,可以完成角度的转化。

[0031] 表1为3DSRW移动模型边界处理角度转化关系

到达的边界	垂直角度	水平角度
UP	$\alpha' = 2\pi - \alpha$	$\beta' = \beta$
DOWN	$\alpha' = 2\pi - \alpha$	$\beta' = \beta$
[0032] LEFT	$\alpha' = \alpha$	$\beta' = \pi - \beta$
RIGHT	$\alpha' = \alpha$	$\beta' = \pi - \beta$
BEFORE	$\alpha' = \alpha$	$\beta' = 2\pi - \beta$
AFTER	$\alpha' = \alpha$	$\beta' = 2\pi - \beta$

[0033] 三维轨迹平滑

[0034] 按照三维随机游走策略生成的轨迹为折线,而真实无人机轨迹不应出现急转弯。为了使移动模型更加符合真实无人机移动轨迹,将生成的轨迹采用三阶B样条曲线进行航

迹平滑。B样条曲线的特性之一为曲线会落在曲线阶数的控制点所形成的凸多边形内。当阶数为2时,任两个相邻最近点所连的多边形为直线,故曲线为控制点所连成的折线;当阶数为3时,任三个相邻的控制点则连成三角形,曲线即落在所有控制点所形成的三角形连接区域中。此外阶数越高,曲线愈显得平直。在本专利中使用三阶B样条曲线作为平滑无人机路径产生的方法。使用下面公式确定三维空间的三阶B样条曲线:

[0035] 分量形式:

$$[0036] \begin{cases} x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \\ y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 \\ z(t) = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 \end{cases} \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (7)$$

[0037] 其中:

$$[0038] \begin{cases} a_0 = \frac{1}{6}(x_0 + 4x_1 + x_2) \\ a_1 = \frac{1}{2}(x_0 - x_2) \\ a_2 = \frac{1}{2}(x_0 - 2x_1 + x_2) \\ a_3 = \frac{1}{6}(x_0 - 3x_1 + 3x_2 - x_3) \end{cases} \quad (8)$$

$$[0039] \begin{cases} b_0 = \frac{1}{6}(y_0 + 4y_1 + y_2) \\ b_1 = \frac{1}{2}(y_0 - y_2) \\ b_2 = \frac{1}{2}(y_0 - 2y_1 + y_2) \\ b_3 = \frac{1}{6}(y_0 - 3y_1 + 3y_2 - y_3) \end{cases} \quad (9)$$

$$[0040] \begin{cases} c_0 = \frac{1}{6}(z_0 + 4z_1 + z_2) \\ c_1 = \frac{1}{2}(z_0 - z_2) \\ c_2 = \frac{1}{2}(z_0 - 2z_1 + z_2) \\ c_3 = \frac{1}{6}(z_0 - 3z_1 + 3z_2 - z_3) \end{cases} \quad (10)$$

[0041] 设有N个离散点 $P_i$  ( $i=1 \dots N$ ) 中的 $P_0, P_1, P_2, P_3$ 为其中的四个点,通过以上计算的方式可以确定一个点 $(x_0, y_0, z_0)$  绘制一条三次样条曲线, $P_1, P_2, P_3, P_4$ 依然按照此方法绘制下一条三次样条曲线,直到最后一个坐标位置。

[0042] 通过航迹平滑,在原始航迹的基础上,生成符合一定动力学约束的平滑航迹,使得无人机的运动状态(角速度、线速度等)连续变化,从而得到更加真实的飞行轨迹,使得后续

的网络路由协议仿真得到更真实的仿真效果,得到更加准确的仿真结果。

[0043] 通过上述三个步骤,所提出的模型在三维空间中产生相对平滑的运动轨迹,如图6所示。图5是在相同速度和游走时间下由二维随机行走模型生成的轨迹。对生成的轨迹进行比较,可以看出,本专利提出的模型克服了二维移动模型中的小转弯角而导致的无人机不稳定的情况,在三维空间中的运动更符合无人机的真实轨迹特点。

[0044] 本发明的有益效果

[0045] 本发明为飞行自组织网络的仿真实验研究提供了一个基础前提,在当前的FANETs研究中学者通常采用传统的车联网的仿真方式进行网络仿真。但是在实际的FANETs环境中,无人机的移动方式有区别于传统车辆网络的特点。这些特点中最主要的也是不可以被忽略的特点是组成FANETs的无人机节点在三维空间中移动,无人机的移动速度比传统的车辆速度快、固定翼无人机在机动性上有特定的限制不能出现悬停以及小转角的情况。这些特点通过本专利所提出的3DSRW移动模型可以很好的进行模拟。

[0046] 通过所提出的三维平滑随机游走移动模型中速度和方向的三维化解决了无人机在三维空间中移动的特点,通过对节点到达边界后的边界处理解决无人机在仿真过程中一直运行在仿真区域的问题,通过三维轨迹平滑使得无人机以一种更加符合真实无人机机动特性的方式移动。在众多的网络仿真工具中我们选择NS2作为仿真平台,其源代码开源,含有大量的网络协议以及结果分析工具,但是对于FANETs仿真又存在无法满足三维轨迹移动的缺点,本专利提供了三维仿真支持。添加了三维节点移动模块,可以很好的支持三维和二维环境下的网络仿真。

[0047] 本发明为FANETs仿真实验提供了可靠的仿真基础,3DSRW模型的建立,以及对三维仿真的支持使得原本不真实的二维环境FANETs仿真变得更加真实。为以后FANETs各种实验提供可靠真实的基础,这些实验可以是FANETs路由协议研究,FANETs通信服务质量和负载均衡的研究。本专利提出的3DSRW模型可以应用于FANETs环境中、水下无人艇三维环境的仿真中、城市环境下存在立交桥且高度差不可忽视的交通路网仿真中等等。本专利的提出为这些三维路由仿真提供了研究基础。

## 附图说明

[0048] 为了便于本领域技术人员理解,下面结合附图对本发明作进一步的说明。

[0049] 图1为二维随机游走移动模型的无人机轨迹图;

[0050] 图2为二维随机游走移动模型的边界处理方法;

[0051] 图3为未加入比例因子产生的无人机三维轨迹图;

[0052] 图4为加入比例因子产生的无人机三维轨迹图;

[0053] 图5是未平滑的三维随机游走模型在二维平面上的投影轨迹;

[0054] 图6是3DSRW移动模型生成的无人机移动轨迹;

[0055] 图7是3DSRW移动模型边界处理架构图;

[0056] 图8是验证二维和三维仿真性能差距原理模型图;

[0057] 图9是二维和三维环境网络仿真性能差距实验结果分析;

[0058] 图10是各种路由协议的网络性能参数实验结果分析。

### 具体实施方式

[0059] 我们在通用网络仿真平台NS2中进行了三维空间中和二维平面上的3DSRW模型仿真实验,并研究分析了该模型下的无人机网络路由协议的性能差异。下面是仿真实验实施过程和实验结果分析。

[0060] 本发明采用网络仿真器NS2进行实验,它是基于真实网络环境开发的离散事件仿真工具,NS2中含有大量的网络仿真模块,包括物理层、网络层、应用层的仿真,支持无线和有线的网络仿真,提供了相应的网络仿真结果分析工具,在网络层开发了大量的无线的仿真协议。同时NS2是一个开源的软件,任何人可以对其源代码进行修改。但是NS2存在着一些问题,对于FANETs而言,其中最大的问题是不支持三维环境下的网络仿真,我们修改NS2中的源代码,使得修改后的NS2支持二维和三维仿真。

[0061] 在NS2仿真场景中,仿真实验参数设置如下表2所示,使用三维平滑随机游走模型产生无人机移动轨迹,仿真区域设置为 $2,000\text{m} \times 2,000\text{m} \times 100\text{m}$ ,在这个环境中仿真节点个数设置在 $[20, 140]$ 之间,节点移动的平均速度在 $[10, 80]\text{m/s}$ 之间,仿真时间设置为 $200\text{s}$ ,对于特定的三维随机游走,设置其游走时间为 $10\text{s}$ 。对于网络仿真参数做以下设置:在MAC层使用802.11p协议,节点通信范围为 $250\text{m}$ ,流量的类型为CBR,每个数据包大小设置为 $512\text{Byte}$ ;参数CBR连接数量代表着在一段时间内无人机节点之间进行数据传输的连接个数。目前已有文献中的多数仿真实验采用固定的连接数进行,这不能反映真实的网络环境。

[0062] 本专利在二维随机游走移动模型的基础上,提出了一种三维平滑随机游走无人机群移动模型3DSRW。对模型进行了分析并通过仿真实验验证了此三维移动模型的可行性、真实性。实验中我们使用AODV,DSR,GPSR,OLSR路由协议在所提出的3DSRW移动模型上进行路由实验验证,同时对比了在二维和三维环境下的路由性能差距,实验结果表明在相同的仿真参数下,在二维环境下所得到的网络性能虚高,并不能真实反映FANETs在三维环境中的网络性能。随后我们对所提出的移动模型进行可行性验证,结果表明所提出的移动模型在FANETs中具有可行性、真实性。该专利为FANETs实验提供了更加真实的仿真实验基础。

[0063] 表2为仿真实验参数设置

	仿真参数	值
	仿真平台	NS2.35
	仿真区域大小	2000m*2000m*100m
	移动模型	3D Smooth Random Walk
	链路类型	Wireless Channel
	无线传播方式	Shadowing
[0064]	媒体访问层协议	802.11 p
	流量类型	Constant Bit Rate (CBR)
	CBR 间隔	0.1s
	路由协议	AODV, DSDV, OLSR, GPSR
	仿真时间	200s
	每个数据包大小	512 Bytes/Packet
	节点速度值	10,20,30,40 (m/sec)
[0065]	仿真节点数量	40

[0066] 在这里没有采用固定的网络连接数,而是使用以下计算方式计算CBR (Constant Bit Rate)连接数量:

$$[0067] \quad \text{CBR number} = \frac{\text{UAV number}}{10} \quad (11)$$

[0068] 在一个仿真场景中无人机节点数越多,相互通信的无人机个数也会越多,一个CBR连接至少由两个节点组成,包括源节点和目的节点,其余节点作为数据包的转发节点。

[0069] 通过脚本实现仿真程序的自动运行,仿真结束可以得到仿真结果,这些结果包括数据包的时延、数据传输率等。为了使得实验结果更加准确,我们设定了多种仿真场景,每种场景进行20次实验,最终结果取其均值。

[0070] 在仿真实验中,评估了本专利所提出的3DSRW移动模型。首先,验证了在真实环境中将FANETs的无人机节点设置在同一水平面上与真实飞行任务不符,无人机应该在三维环境中移动,且在三维空间和二维平面环境中路由协议的性能存在很大的差距。然后应用所提出的3DSRW移动模型对不同三维仿真场景下路由协议的网络性能指标进行了比较分析,以验证模型的可用性。

[0071] (1) 节点移动维度对网络性能的影响

[0072] 在这部分中,我们比较了FANETs中的AODV协议在二维平面仿真环境和三维空间仿真环境中的性能差距。在图8中,假设无人机采用无线传输范围为 $R$ 的全向天线, $D$ 是无人机在空间中的实际位置,而 $D'$ 为无人机 $D$ 在水平面上的投影位置。源节点 $S$ 试图向目标节点 $D$ 发送数据包时,如果无人机节点在同一水平面上飞行,源节点 $S$ 与目标节点 $D'$ 之间的距离为 $L1$ 。由于节点 $D'$ 在 $S$ 节点的通信范围内,源节点和目标节点可以成功地传输数据包。但在实际的三维环境中,源节点 $S$ 与目标节点 $D$ 之间的距离为 $L2$ ,由于 $L2 > R$ ,节点 $D$ 不在节点 $S$ 的通信范围内,导致通信失败。在许多研究工作中,由于忽视了无人机在三维环境中的飞行特性,导致实验结果不能真实反映FANET实际网络性能。

[0073] 维度对性能的影响是很大的,为了验证这一影响,我们分别比较了二维和三维FANETs环境中的AODV协议的网络性能参数。使用所提出的3DSRW移动模型产生三维移动轨迹,通过将三维空间中的无人机轨迹投影到二维平面生成对应的二维轨迹。在指定的仿真区域中,设定一共有40个无人机节点,速度范围为 $[10, 40]$  m/s。对于每个场景,进行实验20次,最终结果取平均值。图9是实验结果,从中可以清楚地看到,三维环境中包传输率、端到端延迟等网络性能的表现都低于二维环境中的网络性能。由此可见,虽然前人在FANETs路由协议的研究取得了一些成果,但大多数验证协议性能的实验都是在二维仿真场景中进行的,导致网络仿真结果不能真实反映三维环境下的网络性能。本专利提出的三维随机游走移动模型能更加真实的仿真FANET网络性能。

[0074] (2) 三维环境下FANETs路由协议性能

[0075] 根据PDR和端到端延迟比较3D FANETs环境中网络路由协议性能,验证模型的可用性。我们比较了不同路由协议在节点数为40的情况下的性能,图10是实验结果。仿真结果表明,AODV协议的端到端延迟高于其他三种协议,导致协议不适用于对实时性要求较高的应用场景,但是AODV协议在数据包传输率和平均吞吐率方面优于其它三种协议。因此AODV协议可以应用在实时性要求不高的应用场景中。GPSR协议包传输率明显低于其他路由协议,但其具有较低的网络延迟,可以适用于实时性要求较高、可以容忍一定丢包率的应用场景。OLSR协议和DSDV协议在3D FANETs环境中的各种网络性能都较低。

[0076] 随着无人机的广泛应用,无人机相关技术的研究也在不断深入。本专利分析了无人机的特点,认为无人机最重要的特点是在三维空间中飞行。为了进一步研究FANETs的路由协议,提出了一种三维平滑随机游走移动模型,该模型可以模拟无人机在三维空间中的运动,支持FANET路由协议的仿真研究。NS2仿真软件不支持三维环境中的仿真,因此我们通过修改其源代码来支持三维仿真。利用所提出的3DSRW模型,在不同的路由协议方案下进行仿真实验。实验表明,不同维度的仿真环境对路由协议的性能有巨大影响,本专利提出的三维无人机移动模型3DSRW比二维仿真环境更加真实地体现出无人机网络的三维移动特性,FANET网络运行性能良好。AODV协议在本专利所提出的3DSRW移动模型下虽然网络延时高于其它三种协议,但其他网络性能指标运行良好。

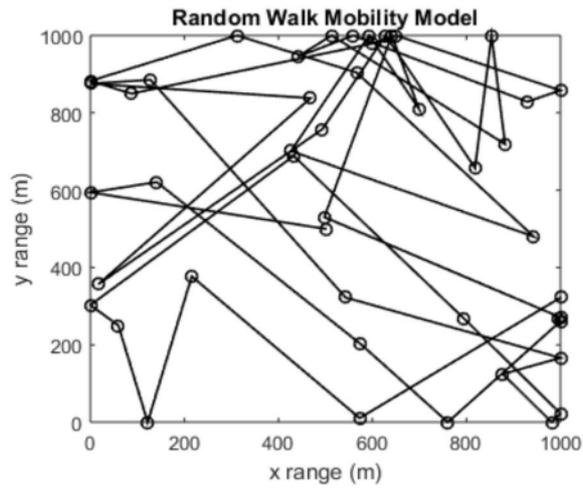


图1

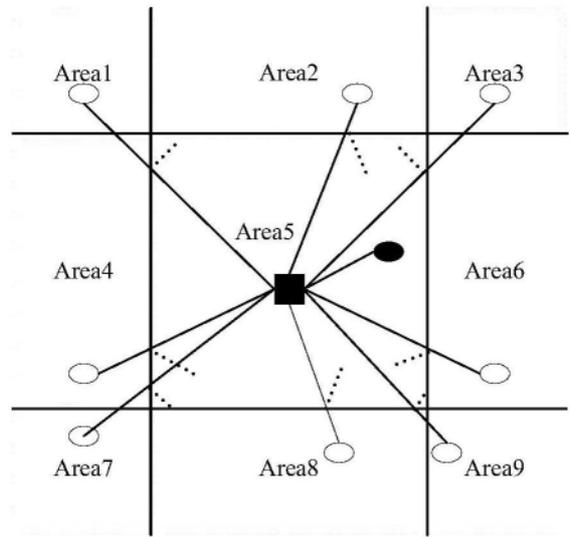


图2

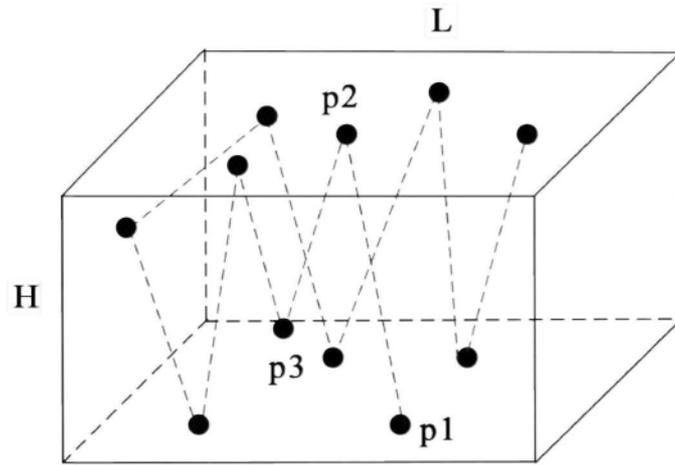


图3

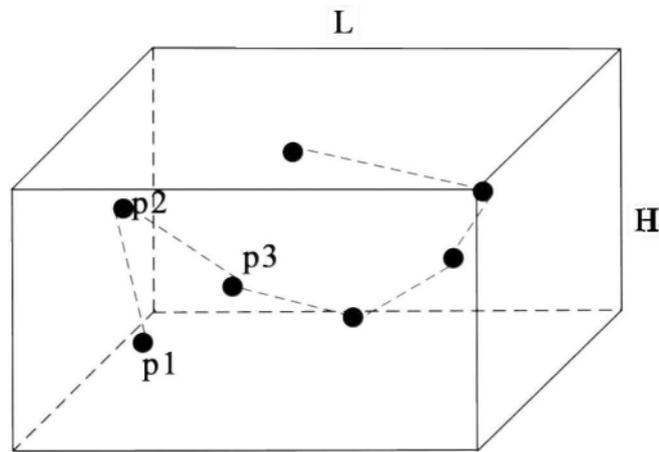


图4

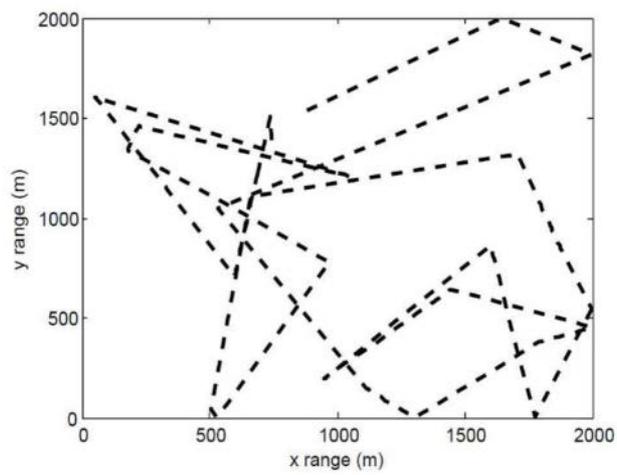


图5

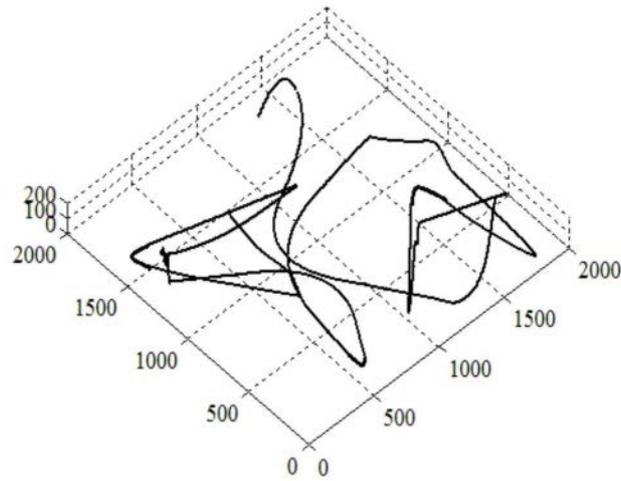


图6

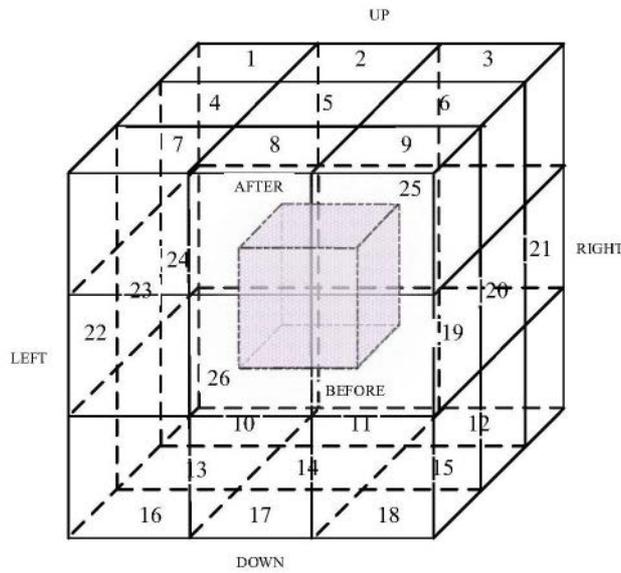


图7

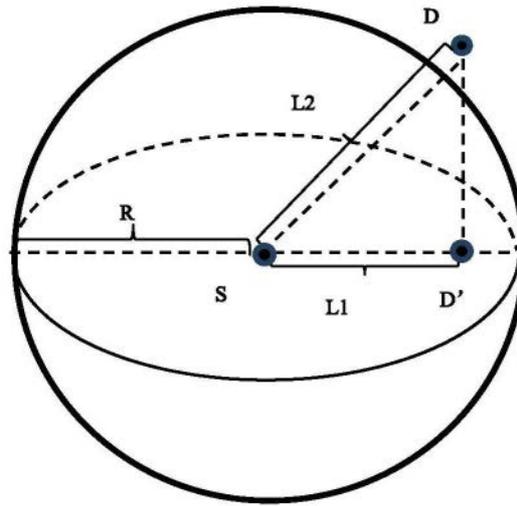


图8

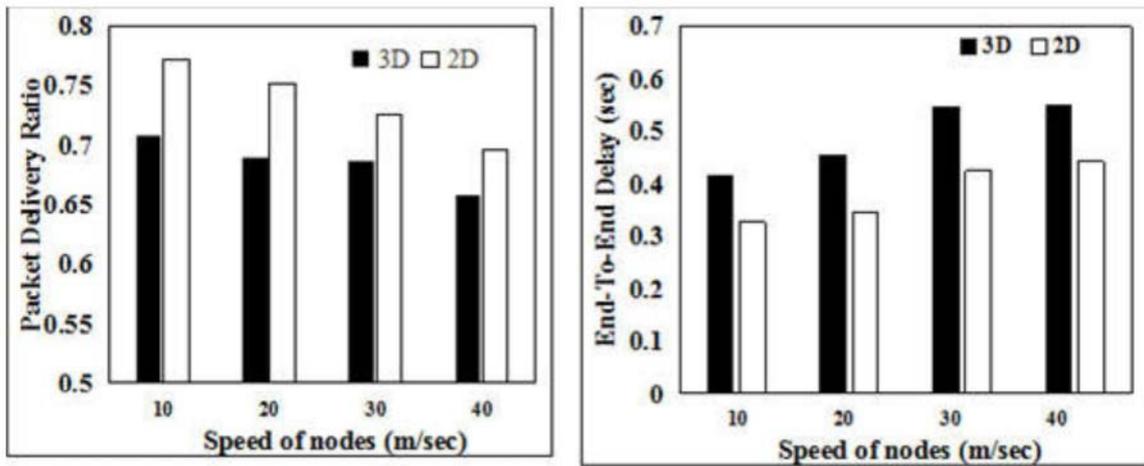


图9

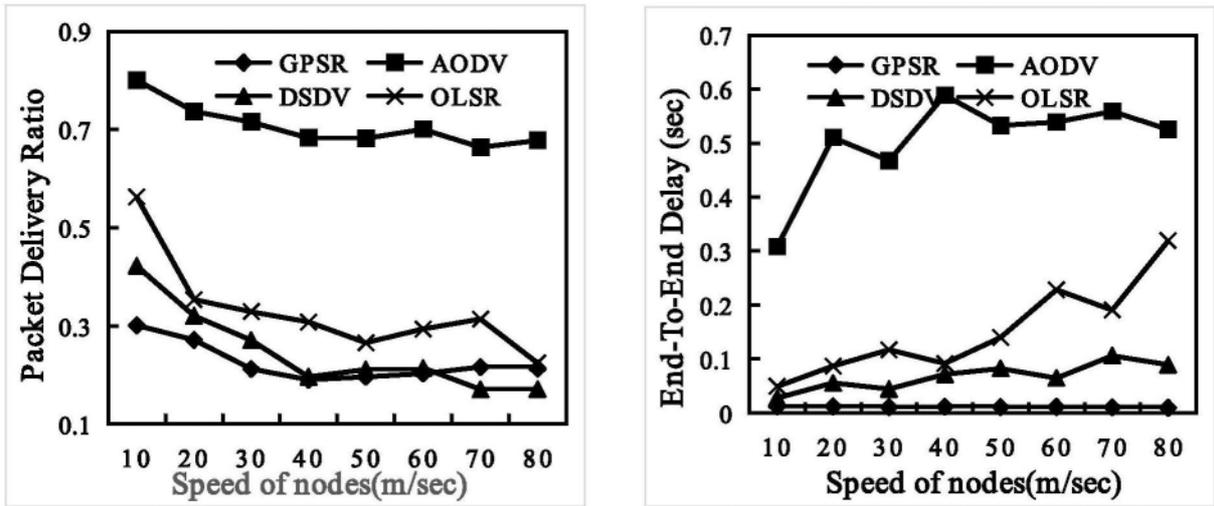


图10