



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118338378 A

(43) 申请公布日 2024.07.12

(21) 申请号 202410623826.7

(22) 申请日 2024.05.20

(71) 申请人 东南大学

地址 211102 江苏省南京市江宁区东南大学路2号

(72) 发明人 陈怡霏 单冯 王文虞

(74) 专利代理机构 南京众联专利代理有限公司

32206

专利代理人 张天哲

(51) Int.Cl.

H04W 40/12 (2009.01)

H04W 40/20 (2009.01)

H04W 40/24 (2009.01)

H04W 84/08 (2009.01)

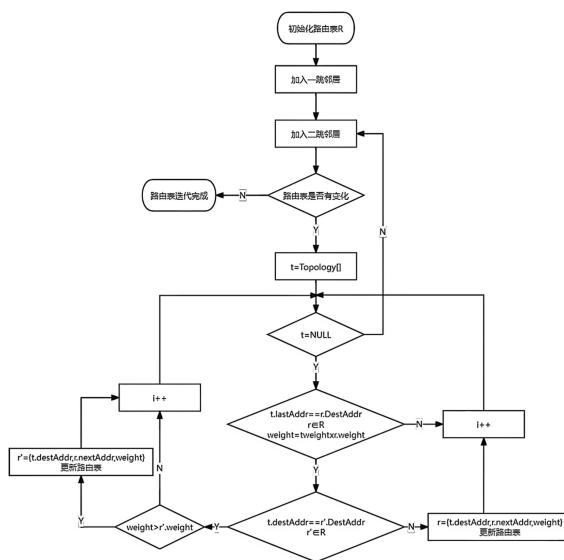
权利要求书4页 说明书12页 附图5页

(54) 发明名称

基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法

(57) 摘要

本发明提供了基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,首先针对多无人机集群组网动态性高的特点通过实验测试无人机通信距离和丢包率的关系,将测试数据进行函数拟合,并将距离信息根据链路质量估计模型映射为链路质量,然后对消息结构进行修改,把信息加入到控制信息中,作为拓扑集和路由表的一个字段weight,最后实现路由算法。本发明根据无人机之间的距离信息及相应的链路接收率建立链路质量估计数学模型来设计和实现路由计算方法,并充分考虑无人机集群系统密集程度高、动态性高的特点来研究和优化路由切换的机制,实现路由表计算从依据过时信息到即时信息这一优化。



1. 基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,其特征在于:首先针对多无人机集群组网动态性高的特性通过实验测试无人机通信距离和丢包率的关系,将测试数据进行函数拟合,进而将距离信息根据链路质量估计模型映射为链路质量,然后对消息结构进行修改,把信息加入到控制信息中,作为拓扑集和路由表的一个字段weight,最后实现路由算法。

2. 根据权利要求1所述的基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,其特征在于:所述链路质量估计模型中,使用UWB作为物理层传输技术,依据超宽带集群测距协议进行测距,并构建距离丢包率数学模型;所述距离丢包率模型基于回归模型,以距离为变量两台无人机以固定频率向对方发送数据包,数据包中包含序列号字段,并且每发一个数据包后会自增;

用T表示两端无人机的收到数据包的序列号集合样本,A和B表示两台无人机;T的具体内容如下表达式所示,其中S_d表示在d距离下的接收序列号集合,测试所用距离值d属于集合D;

$$T = \{S_d | d \in D\}$$

$$S_d = \{Seq_1, Seq_2, Seq_3, \dots, Seq_n\}$$

每个d下的S_d通过固定移动窗口大小window计算丢包率P_i,计算公式如下所示:

$$P_i = 1 - \frac{Seq_{window+i} - Seq_i}{window} \times 100\%$$

假设函数模型为ρ(d, θ),通过样本降低均方误差拟合函数模型并求解θ*,公式如下所示,其中m的大小与样本数量和窗口大小有关,计算出ρ(d, θ*);

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \frac{1}{m} \sum_{i=1, d \in D}^{i=m} (\rho(d, \theta) - P_i(d))^2$$

其中,在计算路由时使用的是数据包的递交率,链路的weight如下公式所示,η表示网络中的一条链接;

$$w_{\eta} = 1 - \rho(d_{\eta}, \theta^*)$$

3. 根据权利要求2所述的基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,其特征在于:对消息结构进行修改中,路由表的计算包含了一跳邻居集、二跳邻居集以及拓扑集,在构造邻居集和拓扑集的过程中对链路度量值进行传输和存储,其中,对协议的控制消息报文进行适应性修改,通过测距消息和TC消息进行信息交换,在网络中共享每条链接的链路度量值,同时对协议的数据集结构进行适应性修改,以此构建存有链路度量信息的二跳邻居集以及拓扑集,以备路由表计算使用。

4. 根据权利要求3所述的基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,其特征在于:在二跳邻居集以及拓扑集中增加链路度量值条目,一跳邻居集中由于当前节点能直接获取与一跳邻居的距离信息,所以不必增加。

5. 根据权利要求4所述的基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,其特征在于:根据超宽带集群测距协议,在IEEE 802.15.4z标准规定的双边双向测距流程中,参与测距的双方首先依次发送Poll、Response以及Final报文用以获取测距时间戳信息,随后通过Report报文将本地测距表中存储的测距时间戳Rp、Tr以及Rf发往对方以协助其填满测距表从而计算距离,并在距离计算成功后将测距表清空;对于微型无人机集群而言,各节点之间

需要持续不断的进行测距以避免发生碰撞,将这种连续测距方式称为流式测距,其中用于建立和维持邻居关系的称为测距消息;其中,需要通过测距消息共享链路度量值,在构造二跳邻居表的过程中,一跳邻居节点向当前节点发送测距消息来告知该一跳邻居节点与对应二跳邻居之间的链路度量值weight_1;在计算二跳邻居集的过程中,当前节点会从测距消息中取出这一weight_1值并且进行运算后存入二跳邻居表,运算过程即将weight_1和从当前节点到该一跳邻居的weight_0进行整合,计算出从当前节点到对应的二跳邻居总的链路度量值。

6.根据权利要求5所述的基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,其特征在于:由于拓扑集中增加了weight字段,当前节点无法直接获得除了与其一跳邻居外其他链路度量值,所以节点向全局广播TC消息来共享链路度量值。

7.根据权利要求1所述的基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,其特征在于:所述路由算法中,提出基于距离的路由计算依靠距离累计相加,定义:

$$\text{weight}(r) = \prod_{\eta \in \gamma} \text{weight}(\eta)$$

其中,r为路由表中的一条路径,η为路径r中的一条链接;

具体步骤如下:

步骤一:初始化路由表

当前节点初始化:

目的地地址DestAddr:当前节点的地址;

下一跳地址nextAddr:当前节点的地址;

链路权重weight:1;

目的:初始化路由表,使当前节点自己可达;

步骤二:添加一跳邻居到路由表

遍历一跳邻居集N:

对于每个邻居n,其信息包含 {nAddr, weight};

路由表更新:

目的地地址DestAddr:当前节点的地址;

下一跳地址nextAddr:邻居n的地址nAddr;

链路权重weight:当前节点到n的距离;

目的:将一跳邻居添加到路由表中,作为下一跳;

步骤三:添加二跳邻居到路由表

遍历二跳邻居集N2:

对于每个二跳邻居n2,其信息包含 {nAddr, n2Addr, weight};

路由表查询:检查路由表中是否存在目的地地址为n2Addr的条目r;

若r不存在:

添加新条目:

目的地地址DestAddr:二跳邻居的地址n2Addr;

下一跳地址nextAddr:对应的一跳邻居nAddr;

链路权重weight:从二跳邻居信息中获取;

将新表项插入路由表；
若r存在：
比较链路权重:r的weight与n2从二跳邻居表中获取的weight
若前者更大：
不作处理
若后者更大：
则更新r：
下一跳地址nextAddr:n2对应的nAddr；
链路权重weight:n2从二跳邻居表中获取的新的链路权重；目的：将二跳邻居添加到路由表中，若已有更优路径则更新；
步骤四：基于拓扑信息更新路由表
遍历拓扑信息集T：
对于每个拓扑信息条目t，其信息包含{lastAddr, destAddr, weight}；
路由表查询：检查路由表中是否存在目的地地址为lastAddr的条目r；
若r不存在：
则说明lastAddr对应的节点不在当前节点的可达集中
跳过，继续查询下一个t；
若r存在：
则说明lastAddr对应的节点在当前节点的可达集中
再次查询路由表：检查是否存在目的地地址为destAddr的条目'r'；
若'r'不存在：
则说明destAddr对应的节点不在当前节点的可达集中
添加新条目：
目的地地址DestAddr:destAddr；
下一跳地址nextAddr:r的nextAddr；
链路权重weight:weight_r × weight_t；
将新表项插入路由表；
若'r'存在：
比较链路权重：将r'所对应的weight与weight_r × weight_t
若前者链路权重更大
则不作处理
若后者链路权重更大
则更新'r'：
目的地地址DestAddr:不变；
下一跳地址nextAddr:r的nextAddr；
链路权重weight:weight_r × weight_t；
目的：利用拓扑信息集更新路由表，确保找到链路权重更大的路径
步骤五：终止条件
设置变化标记：

如果在步骤四中没有任何路由表项发生变化,标记changed=0,跳出循环;

目的:路由表不再变化,表示计算完成;

其中,n为一跳邻居,{nAddr,weight};n2为二跳邻居,{nAddr,n2Addr,weight};N为一跳邻居集合,由n组成;N2为二跳邻居集合,由n2组成;nAddr为当前节点一跳邻居的地址;n2Addr为当前节点二跳邻居的地址;weight为链路权重;t为拓扑信息,

{lastAddr,destAddr,weight};T为拓扑信息集合,由t组成;lastAddr为一个拓扑条目链接的起点;destAddr为一个拓扑条目链接的终点;r为路由表项,{DestAddr,nextAddr,W};R为路由表,由r组成;DestAddr为路由表项的目的地地址;nextAddr为路由表项的下一跳地址;W为当前节点通过最优路径到达路由表项的DestAddr时整个路径的总weight;其中weight_r表示r的链路权重,weight_t表示t的链路权重。

基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,属于物联网和云计算技术领域。

背景技术

[0002] 在无人机集群系统的协作中,通信组网是至关重要的部分,但是基于基础设施的通信架构极大地限制了无人机集群的能力及工作范围,一种有效的解决方案是在无人机之间建立一个称为FANET的adhoc网络。FANET由MANET (Mobile AdHoc Network) 和VANET (Vehicular ad-hoc network) 发展而来,可以看做是MANET和VANET的一种特殊形式。其不同之处在于,相比于经典的MANET和VANET,在FANET中网络的拓扑结构可以变化得更加频繁。因此,设计出合理高效的网络协议路由算法是一个关键的任务。室内微型无人机受到尺寸以及机载资源的限制,无法为每个无人机装配GPS定位设备,所以本文主要研究基于网络拓扑的路由协议。基于拓扑的路由协议可以分为主动式路由协议、反应式路由协议以及混合式路由协议。

[0003] 主动式路由协议是一种发送路由更新包的协议,在每一个路由器上通过路由更新包的收发来维护和构建路由表,主动式路由协议也被称为表驱动的路由协议。在无人机集群系统中,使用主动式路由协议意味着每个无人机都保存有到系统内所有其余无人机的路由信息,并且通过定期交换信息来维护无人机之间的通信链路或更新每个无人机保存的网络拓扑信息,同时计算出最新的路由表。

[0004] 目前国内外的研究现状,Adhoc网络(点对点)中各个节点传输数据的半径受到很大的限制,两个节点在通信的过程中往往需要其他节点进行中转,所以路由是Adhoc网络协议中非常有研究价值的一个模块。同时考虑到室内无人机集群系统高动态、密集程度高的特点,普通的网络路由协议是无法适用的,因此必须设计和实现适应Adhoc网络实际应用环境的路由协议。

[0005] 在Adhoc的网络路由协议中,优化链路状态协议 (Optimized Link State Routing, OLSR) 是一种典型的主动式路由协议。针对无线自组网的需求,OLSR协议在经典链路状态协议的基础上进行了改进和优化,因此命名为优化链路状态路由协议。协议核心之处在于采用多点中继机制,即定义多中继依赖节点集合 (MPRs),适用于规模大、节点密集分布的无线自组网络。RFC362详细描述了最优链路状态路由协议 (OLSR) 的协议基础,仍然保留有很大的可拓展空间。RFC7181描述了OLSRv2的设计,是对OLSR初版的改进。优化之处主要体现在对链路质量的重新定义以及使用上,将基于跳数的路由计算方法改进为基于链路质量的路由计算。为了满足多无人机集群系统中同时存在高速移动和慢速移动的无人机这一场景的需求,MounirBenzaïd等人提出Fast-OLSR的OLSR扩展。这一扩展为速度超过一定阈值的无人机增加信息交换的频率,如果快速移动的无人机只占到整个集群中的一小部分,这一扩展将很大程度上减小集群系统的开销。StefanoRosati等人在OLSRv2定义的链路质量这一基础上对OLSR协议进行了扩展,引入了无人机之间的相对速度这一指标,提出了P-OLSR协

议。无人机可以获取到邻居的坐标(经纬度、高度),随后计算出他们之间的相对速度,在整个网络中共享后每个无人机会根据已有的信息估算出链路质量,并计算出最优的路由表。Song.M等人使用了卡尔曼滤波来为每个无人机估计其邻居的位置,以此来计算出更为稳定和准确的MPR集合,同时为了优化信息收发时排队带来的时延,利用自回归移动平均模型来预测排队时延。也有很多研究通过考虑剩余能量来对OLSR协议进行研究。

[0006] 总而言之,对于无人机集群自组网,目前国内外已经有很多相关研究工作,但仍然存在一些不足之处:(1)很多网络路由协议没有考虑到无人机集群系统高动态、网络拓扑频繁变化的特点,没有解决网络时延大的问题;(2)大多数的工作都只完成到仿真阶段,很少有已经实际部署的无人机自组网路由协议可以直接使用。

发明内容

[0007] 技术问题:充分考虑无人机集群系统密集程度高、动态性高的特点来研究和优化路由切换的机制,实现路由表计算从依据过时信息到即时信息这一优化。

[0008] 技术方案:本发明为解决上述技术问题采用以下技术方案:基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,其特征在于:首先针对多无人机集群组网动态性高的特性通过实验测试无人机通信距离和丢包率的关系,将测试数据进行函数拟合,并将距离信息根据链路质量估计模型映射为链路质量,然后对消息结构进行修改,把信息加入到控制信息中,作为拓扑集和路由表的一个字段weight,最后实现路由算法。

[0009] 作为本发明的进一步改进,所述链路质量估计模型中,使用UWB作为物理层传输技术,依据超宽带集群测距协议进行测距,并构建距离丢包率数学模型;所述距离丢包率模型基于回归模型,以距离为变量两台无人机以固定频率向对方发送数据包,数据包中包含序列号字段,并且每发一个数据包后会自增;用T表示两端无人机的收到数据包的序列号集合样本,A和B表示两台无人机;T的具体内容如下表达式所示,其中S_d表示在d距离下的接收序列号集合,测试所用距离值d属于集合D;

$$[0010] T = \{S_d | d \in D\}$$

$$[0011] S_d = \{Seq_1, Seq_2, Seq_3, \dots, Seq_n\}$$

[0012] 每个d下的S_d通过固定移动窗口大小window计算丢包率P_i,计算公式如下所示:

$$[0013] P_i = 1 - \frac{Seq_{window+i} - Seq_i}{window} \times 100\%$$

[0014] 假设函数模型为ρ(d, θ),通过样本降低均方误差拟合函数模型并求解θ*,公式如下所示,其中m的大小与样本数量和窗口大小有关,计算出ρ(d, θ*);

$$[0015] \theta^* = \arg \min_{\theta} \frac{1}{m} \sum_{i=1, d \in D}^{i=m} (\rho(d, \theta) - P_i(d))^2$$

[0016] 其中,在计算路由时使用的是数据包的递交率,链路的weight如下公式所示,η表示网络中的一条链接;

$$[0017] w_{\eta} = 1 - \rho(d_{\eta}, \theta^*)$$

[0018] 作为本发明的进一步改进,路由表的计算包含了一跳邻居集、二跳邻居集以及拓扑集,在构造邻居集和拓扑集的过程中对链路度量值进行传输和存储,其中,对协议的控制

消息报文进行适应性修改,通过测距消息和TC消息进行信息交换,在网络中共享每条链接的链路度量值,同时对协议的数据集结构进行适应性修改,以此构建存有链路度量信息的二跳邻居集以及拓扑集,以备路由表计算使用。

[0019] 作为本发明的进一步改进,在二跳邻居集以及拓扑集中增加链路度量值条目,一跳邻居集中由于当前节点能直接获取与一跳邻居的距离信息,所以不必增加。

[0020] 作为本发明的进一步改进,根据超宽带集群测距协议,在IEEE802.15.4z标准规定的双边双向测距流程中,参与测距的双方首先依次发送Poll、Response以及Final报文用以获取测距时间戳信息,随后通过Report报文将本地测距表中存储的测距时间戳Rp、Tr以及Rf发往对方以协助其填满测距表从而计算距离,并在距离计算成功后将测距表清空;对于微型无人机集群而言,各节点之间需要持续不断的进行测距以避免发生碰撞,将这种连续测距方式称为流式测距,其中用于建立和维持邻居关系的称为测距消息;其中,需要通过测距消息共享链路度量值,在构造二跳邻居表的过程中,一跳邻居节点向当前节点发送测距消息来告知该一跳邻居节点与对应二跳邻居之间的链路度量值weight_1;在计算二跳邻居集的过程中,当前节点会从测距消息中取出这一weight_1值并且进行运算后存入二跳邻居表,运算过程即将weight_1和从当前节点到该一跳邻居的weight_0进行整合,计算出从当前节点到对应的二跳邻居总的链路度量值。

[0021] 作为本发明的进一步改进,由于拓扑集中增加了weight字段,当前节点无法直接获得除了与其一跳邻居外其他链路度量值,所以节点向全局广播TC消息来共享链路度量值。

[0022] 作为本发明的进一步改进,所述路由算法中,提出基于距离的路由计算依靠距离累计相加,定义:

$$[0023] \quad weight(r) = \prod_{\eta \in \gamma} weight(\eta)$$

[0024] 其中,r为路由表中的一条路径,η为路径r中的一条链接;

[0025] 具体步骤如下:

[0026] 步骤一:初始化路由表

[0027] 当前节点初始化:

[0028] 目的地地址DestAddr:当前节点的地址;

[0029] 下一跳地址nextAddr:当前节点的地址;

[0030] 链路权重weight:1;

[0031] 目的:初始化路由表,使当前节点自己可达。

[0032] 步骤二:添加一跳邻居到路由表

[0033] 遍历一跳邻居集N:

[0034] 对于每个邻居n,其信息包含{nAddr, weight};

[0035] 路由表更新:

[0036] 目的地地址DestAddr:当前节点的地址;

[0037] 下一跳地址nextAddr:邻居n的地址nAddr;

[0038] 链路权重weight:当前节点到n的距离;

[0039] 目的:将一跳邻居添加到路由表中,作为下一跳;

- [0040] 步骤三:添加二跳邻居到路由表
[0041] 遍历二跳邻居集N2:
[0042] 对于每个二跳邻居n2,其信息包含{*nAddr*,*n2Addr*,*weight*};
[0043] 路由表查询:检查路由表中是否存在目的地地址为*n2Addr*的条目r;
[0044] 若r不存在:
[0045] 添加新条目:
[0046] 目的地地址*DestAddr*:二跳邻居的地址*n2Addr*;
[0047] 下一跳地址*nextAddr*:对应的一跳邻居*nAddr*;
[0048] 链路权重*weight*:从二跳邻居信息中获取;
[0049] 将新表项插入路由表;
[0050] 若r存在:
[0051] 比较链路权重:r的*weight*与*n2*从二跳邻居表中获取的*weight*若前者更大:
[0052] 不作处理
[0053] 若后者更大:
[0054] 则更新r:
[0055] 下一跳地址*nextAddr*:*n2*对应的*nAddr*;
[0056] 链路权重*weight*:*n2*从二跳邻居表中获取的新的链路权重;目的:将二跳邻居添加到路由表中,若已有更优路径则更新;
[0057] 步骤四:基于拓扑信息更新路由表
[0058] 遍历拓扑信息集T:
[0059] 对于每个拓扑信息条目t,其信息包含{*lastAddr*,*destAddr*,*weight*};
[0060] 路由表查询:检查路由表中是否存在目的地地址为*lastAddr*的条目r;
[0061] 若r不存在:
[0062] 则说明*lastAddr*对应的节点不在当前节点的可达集中
[0063] 跳过,继续查询下一个t;
[0064] 若r存在:
[0065] 则说明*lastAddr*对应的节点在当前节点的可达集中
[0066] 再次查询路由表:检查是否存在目的地地址为*destAddr*的条目'r';
[0067] 若'r'不存在:
[0068] 则说明*destAddr*对应的节点不在当前节点的可达集中添加新条目:
[0069] 目的地地址*DestAddr*:*destAddr*。
[0070] 下一跳地址*nextAddr*:r的*nextAddr*。
[0071] 链路权重*weight*:*weight_r*×*weight_t*;
[0072] 将新表项插入路由表。
[0073] 若'r'存在:
[0074] 比较链路权重:将r'所对应的*weight*与*weight_r*×*weight_t*
[0075] 若前者链路权重更大
[0076] 则不作处理
[0077] 若后者链路权重更大

- [0078] 则更新' r' :
- [0079] 目的地地址DestAddr:不变;
- [0080] 下一跳地址nextAddr:r的nextAddr;
- [0081] 链路权重weight:weight_r×weight_t;
- [0082] 目的:利用拓扑信息集更新路由表,确保找到链路权重更大的路径
- [0083] 步骤五:终止条件
- [0084] 设置变化标记:
- [0085] 如果在步骤四中没有任何路由表项发生变化,标记changed=0,跳出循环;
- [0086] 目的:路由表不再变化,表示计算完成;
- [0087] 其中,n为一跳邻居,{nAddr, weight};n2为二跳邻居,{nAddr, n2Addr, weight};N为一跳邻居集合,由n组成;N2为二跳邻居集合,由n2组成;nAddr为当前节点一跳邻居的地址;n2Addr为当前节点二跳邻居的地址;weight为链路权重;t为拓扑信息,{lastAddr, destAddr, weight};T为拓扑信息集合,由t组成;lastAddr为一个拓扑条目链接的起点;destAddr为一个拓扑条目链接的终点;r为路由表项,{DestAddr, nextAddr, W};R为路由表,由r组成;DestAddr为路由表项的目的地地址;nextAddr为路由表项的下一跳地址;W为当前节点通过最优路径到达路由表项的DestAddr时整个路径的总weight,其中weight_r表示r的链路权重,weight_t表示t的链路权重。
- [0088] 有益效果:本发明根据无人机之间的距离信息及相应的链路接收率建立链路质量估计数学模型来设计和实现路由计算方法,并充分考虑无人机集群系统密集程度高、动态性高的特点来研究和优化路由切换的机制,化解了网络时延大的问题。

附图说明

- [0089] 图1针对高动态网络改进后拓扑集基本结构图。
- [0090] 图2针对高动态网络改进后路由表基本结构图。
- [0091] 图3传统一对多双边双向测距流程图。
- [0092] 图4基于测距报文广播的多对多集群测距流程图。
- [0093] 图5集群测距结果图。
- [0094] 图6针对高动态网络改进后的测距消息结构图。
- [0095] 图7针对高动态网络改进后的TC消息结构图。
- [0096] 图8路由选择算法流程图。
- [0097] 图9实例场景图。
- [0098] 图10预设场景图。

具体实施方式

- [0099] 下面结合附图和具体实施方式,进一步阐明本发明,应理解下述具体实施方式仅用于说明本发明而不同于限制本发明的范围。
- [0100] 本发明所依据的测距技术基础为:
- [0101] 1、UWB技术
- [0102] 早在无线电技术发展的开端UWB技术(Ultra-WideBand,超宽频无线通信技术)就

已经出现,由于UWB在作为一项通信技术的同时也可以作为雷达使用,该技术在20世纪中到20世纪末期一直被限制在军方使用。直到21世纪初,美国联邦通信委员会才允许UWB技术在公共安全、雷达以及数据通信应用中无需许可证就能使用。FCC将UWB技术定义为:带宽超过500MHz或算术中心频率的20% (以较小者为准) 的无线电技术。与其他常见的无线通信技术不同之处在于,UWB技术能够在较宽的频谱上传输功率极低的信号。一般无线通信技术传输信息的方式是通过正弦载波,同时调整相关参数,而UWB技术是通过占用较大的带宽来传输短脉冲。

[0103] UWB技术的特性:

[0104] 1) 测距精度高;

[0105] 2) 高带宽,UWB使用带宽超过1GHz;

[0106] 3) 高速率,由于频谱较宽所以传输速率高;

[0107] 5) 成本低、易实现;

[0108] 6) 抗干扰能力强;

[0109] 7) 低功耗间歇式的脉冲传输使得平均发射功率很低;

[0110] 8) 安全性、稳定性高,对于通常的无线通信系统来说,UWB信号的功率谱密度接近于白噪声信号,因此不易从噪声中检测到脉冲信号。

[0111] 结合多无人机集群系统的应用场景,UWB技术耗能低,能适应高动态性的需求,高速高带宽的特点适合用来进行无线通信,同时抗干扰能力强的特点能够适应复杂多变的场景需求,并且UWB技术在无线数据通信的同时,还可以进行收发终端之间的高精度测距。由于集群系统设备较多,UWB造价低廉可以大大降低无人机集群系统的部署成本。因此使用UWB作为无人机集群组网的物理层通信技术是非常合适的。

[0112] 2、超宽带集群测距协议

[0113] 本发明基于2022年在CCF A类期刊上新提出的超宽带集群测距协议(Ultra-Wideband Swarm Ranging Protocol),以高效测量出所有邻居的距离。在该协议提出之前,对于超宽带测距的研究主要集中在低动态、低密集的集群环境中,在测距协议设计方面未考虑到高动态、高密集的微型无人机集群特点,测距效率低且资源分配不合理,难以满足微型无人机集群内部相对距离感知需要。最新修订的IEEE 802.15.4z标准虽然着重规范了超宽带技术在集群场景下的多对多测距流程,但其预先为每个测距节点分配时间槽的做法并不高效且缺少相应的时间槽分配策略以合理调度资源。一方面,微型无人机集群的动态性特点使得预先分配的时间槽在面对动态加入与离开测距范围的节点时易造成测距资源的浪费。另一方面,微型无人机集群的密集性特点使得单次测距需要预先分配大量时间槽,致使测距延迟增大。针对上述问题,超宽带集群测距协议基于并发测距思想,充分利用超宽带信号的广播特性设计测距协议以在集群内部实现高效测距,并设计基于时序的动态资源分配策略以保障有限测距资源在集群内部的合理公平分配。

[0114] 集群环境下多节点之间进行双边双向测距的基本流程如下:

[0115] 在图3所示的传统一对多双边双向测距流程中,节点A以单播的形式轮流向节点B与节点C发送测距报文,而鉴于无线信号传输的广播特性,节点A向节点B发送的测距报文A1与A3同样可以被节点C监听到。若将所有测距报文视为广播报文,并在测距流程中移除重复发送的单播报文,则可以得到如图4所示的多对多集群测距流程。

[0116] 在图4中,节点A通过测距报文交互完成与节点B、C之间的测距,同时节点B与节点C之间也通过测距报文广播实现了测距时间戳的收集,如图5所示。若将上述测距场景扩展到集群内N个节点之间的测距,则传统的双边双向测距方式需要各节点依次发送 $2(N-1)$ 次测距报文。而在测距报文容量充足且未发生丢包的理想条件下,参与集群测距的各节点只需广播两次测距报文即可完成测距,相比传统测距方式在降低节点需要发送的测距报文数量的同时提高了测距效率。

[0117] 该协议所研究的基于测距报文广播的集群测距流程中,各节点只需周期性地广播测距报文、记录测距报文的发送与接收时间戳,并将时间戳信息填充至测距表的相应位置中,即可根据以下公式估算彼此之间的相对距离:

$$[0118] \quad ToF = \frac{T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}}$$

[0119] 综上,本发明针对多无人机集群组网动态性高的特点,在考虑如何使用无人机测距获得的距离信息进行路由计算时,提出基于UWB的高动态无人机网络路由选择算法,其特征在于:首先针对多无人机集群组网动态性高的特点通过实验测试无人机通信距离和丢包率的关系,将测试数据进行函数拟合,并将距离信息根据链路质量估计模型映射为链路质量,然后对消息结构进行修改,把信息加入到控制信息中,作为拓扑集(Topology Set)和路由表(RoutingSet)的一个字段weight,拓扑结构图1所示,在计算路由表(图2所示)时使用最后实现路由算法。

[0120] 在本实施例中,链路质量估计模型为:

[0121] OLSR协议中最优路径的衡量指标为最小跳数,这对于移动无线网络是不足以正确计算路由的,在OLSRv2中引入了链路度量值这一概念。OLSRd协议将邻居节点发送的Hello消息接收率作为与该邻居节点之间的链路质量(Link Quality,LQ),称为正向接收率,当前节点发送给该邻居的Hello消息接收率定义为邻居链路质量(Neighbor Link Quality, NLQ),称为反向接收率。协议定义链路度量为ETX(Expected Transmission Count),在TC消息中进行广播,计算公式为:

$$[0122] \quad ETX(R) = \sum_{\eta \in R} ETX(\eta) = \sum_{\eta \in R} \frac{1}{\phi(\eta)\rho(\eta)}$$

[0123] R是网络中两个节点的一条路由,η是其中的一跳。 $\phi(\eta)$ 是正向接收率, $\rho(\eta)$ 是反向接收率。接收率作为一个统计值通过指数加权移动平均数来计算,公式为:

$$[0124] \quad \begin{cases} \phi_l = \alpha h_l + (1 - \alpha) \phi_{l-1}, & 0 \leq \alpha \leq 1 \\ \phi_0 = 0 \end{cases}$$

[0125] 其中

$$[0126] \quad h_l = \begin{cases} 1 & \text{如果收到第 } l \text{ 号的 Hello 消息} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

[0127] 其中 α 是OLSR的参数,命名为链路质量平滑参数,这个参数影响了接收率估计的准确性和响应速度之间的权衡。一方面,对于一个较大的 α ,接收率将是更长时间的平均值,从而产生一个更稳定和可靠的估计。另一方面,对于一个较小的 α ,系统的反应会更快。

[0128] 但是上述方法还是存在一定的滞后性,在高动态的无人机集群任务中不能够及时反映链路状态。因此下文将简要介绍本发明的路由计算方法所依赖的距离丢包率数学模型。

[0129] 本发明使用UWB作为物理层传输技术,依据超宽带集群测距协议进行测距,实际测试的过程中发现使用UWB进行数据传输时距离与丢包率存在关系,因此构建距离丢包率数学模型。本发明所依据的距离丢包率模型基于回归模型,以距离为变量两台无人机以固定频率向对方发送数据包,数据包中包含序列号字段,并且每发一个数据包后会自增。用T表示两端无人机的收到数据包的序列号集合样本,A和B表示两台无人机。T的具体内容如下表达式所示,其中S_d表示在d距离下的接收序列号集合,测试所用距离值d属于集合D。

[0130] $T = \{S_d | d \in D\}$

[0131] $S_d = \{Seq_1, Seq_2, Seq_3, \dots, Seq_n\}$

[0132] 每个d下的S_d通过固定移动窗口大小window计算丢包率P_i,计算公式如下所示。

[0133]
$$P_i = 1 - \frac{Seq_{window+i} - Seq_i}{window} \times 100\%$$

[0134] 假设函数模型为ρ(d, θ),通过样本降低均方误差拟合函数模型并求解θ*,公式如下所示,其中m的大小与样本数量和窗口大小有关,通过此方法可以计算出ρ(d, θ*)。

[0135]
$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \frac{1}{m} \sum_{i=1, d \in D}^{i=m} (\rho(d, \theta) - P_i(d))^2$$

[0136] 本发明在计算路由时使用的是数据包的递交率,所以对于本发明来说链路的weight应该如下公式所示,η表示网络中的一条链接。

[0137] $w_{\eta} = 1 - \rho(d_{\eta}, \theta^*)$

[0138] 在本实施例中,消息结构的适应性修改为:

[0139] 路由表的计算“原料”,包含了一跳邻居集、二跳邻居集以及拓扑集,在原始的OLSR中跳数是默认的,一跳邻居集中所有节点的跳数都为1,同样二跳邻居集中所有节点的跳数都为2,但引入了链路度量值后同一个邻居集中的节点度量值却不一定相同,所以需要在构造邻居集和拓扑集的过程中对链路度量值进行传输和存储,传输意味着需要对协议的控制消息报文进行适应性修改,通过测距消息和TC消息进行信息交换,在网络中共享每条链接的链路度量值,而存储意味着需要对协议的数据集结构进行适应性修改,以此构建存有链路度量信息的二跳邻居集以及拓扑集,以备路由表计算使用。

[0140] (1) 数据集

[0141] 在二跳邻居集以及拓扑集中增加链路度量值条目(拓扑集已经在前文的表1中展示),一跳邻居集中由于当前节点可以直接获取与一跳邻居的距离信息,所以不必增加。

[0142] (2) 测距消息

[0143] 根据前文提到的超宽带集群测距协议,在IEEE 802.15.4z标准规定的双边双向测距流程中,参与测距的双方首先需要依次发送Poll、Response以及Final报文用以获取测距时间戳信息,随后通过Report报文将本地测距表中存储的测距时间戳Rp、Tr以及Rf发往对方以协助其填满测距表从而计算距离,并在距离计算成功后将测距表清空。对于本发明所研究的微型无人机集群而言,各节点之间需要持续不断的进行测距以避免发生碰撞,本发

明将这种连续测距方式称为流式测距,本发明将其中用于建立和维持邻居关系的称为测距消息。

[0144] 之所以需要通过测距消息共享链路度量值,是因为如上文所述需要在二跳邻居表中添加链路度量值条目,然而在构造二跳邻居表的过程中,当前节点无法直接获得其一跳邻居与对应二跳邻居之间链接的链路度量值,所以需要一跳邻居节点向当前节点发送测距消息来告知该一跳邻居节点与对应二跳邻居之间的链路度量值weight_1。在计算二跳邻居集的过程中,当前节点会从测距消息中取出这一weight_1值并且进行运算后存入二跳邻居表,运算过程即将weight_1和从当前节点到该一跳邻居的weight_0进行整合,计算出从当前节点到对应的二跳邻居总的链路度量值。修改后的测距消息结构如图6所示。

[0145] (3) TC消息

[0146] 由于拓扑集中增加了weight字段,当前节点无法直接获得除了与其一跳邻居外其他链路度量值,所以需要节点向全局广播TC消息来共享链路度量值。在构造二跳邻居表时使用测距消息来共享而不是直接使用TC消息来共享是因为,如果二跳邻居节点也是一跳邻居的话,网络中不会生成MPR集合,进而TC消息不会被广播,所以需要用Ranging消息来共享。修改后的TC消息如图7所示。

[0147] 在本实施例中,路由算法设计为:

[0148] 在基于跳数的路由计算中是跳数累计相加,本发明提出的基于距离的路由计算中是距离累计相加,而weight等同于接收率不能直接相加(如果接收率是0表示链路已经断裂,路径已经不存在但还是会计算出路径接收率并参与选择),因此本发明定义:

$$[0149] \text{weight}(r) = \prod_{\eta \in \gamma} \text{weight}(\eta)$$

[0150] 其中r为路由表中的一条路径,η为路径r中的一条链接。

[0151] 如图8所示,具体步骤如下:

[0152] 步骤一:初始化路由表

[0153] • 当前节点初始化:

[0154] 目的地地址(DestAddr):当前节点的地址。

[0155] 下一跳地址(nextAddr):当前节点的地址。

[0156] 链路权重(weight):1。

[0157] 目的:初始化路由表,使当前节点自己可达。

[0158] 步骤二:添加一跳邻居到路由表

[0159] • 遍历一跳邻居集N:

[0160] 对于每个邻居n,其信息包含{nAddr, weight}。

[0161] 路由表更新:

[0162] 目的地地址(DestAddr):当前节点的地址。

[0163] 下一跳地址(nextAddr):邻居n的地址nAddr。

[0164] 链路权重(weight):当前节点到n的距离。

[0165] 目的:将一跳邻居添加到路由表中,作为下一跳。

[0166] 步骤三:添加二跳邻居到路由表

[0167] • 遍历二跳邻居集N2:

- [0168] 对于每个二跳邻居n2,其信息包含{*nAddr*,*n2Addr*,*weight*}。
- [0169] 路由表查询:检查路由表中是否存在目的地地址为*n2Addr*的条目r。
- [0170] 若r不存在:
- [0171] 添加新条目:
- [0172] 目的地地址(*DestAddr*):二跳邻居的地址*n2Addr*。
- [0173] 下一跳地址(*nextAddr*):对应的一跳邻居*nAddr*。
- [0174] 链路权重(*weight*):从二跳邻居信息中获取。
- [0175] 将新表项插入路由表。
- [0176] 若r存在:
- [0177] 比较链路权重:r的*weight*与*n2*从二跳邻居表中获取的*weight*
- [0178] 若前者更大:
- [0179] 不作处理
- [0180] 若后者更大:
- [0181] 则更新r:
- [0182] 下一跳地址(*nextAddr*):*n2*对应的*nAddr*。
- [0183] 链路权重(*weight*):*n2*从二跳邻居表中获取的新的链路权重。目的:将二跳邻居添加到路由表中,若已有更优路径则更新。
- [0184] 步骤四:基于拓扑信息更新路由表
- [0185] • 遍历拓扑信息集T:
- [0186] 对于每个拓扑信息条目t,其信息包含{*lastAddr*,*destAddr*,*weight*}。
- [0187] 路由表查询:检查路由表中是否存在目的地地址为*lastAddr*的条目r。
- [0188] 若r不存在:
- [0189] 则说明*lastAddr*对应的节点不在当前节点的可达集中
- [0190] 跳过,继续查询下一个t。
- [0191] 若r存在:
- [0192] 则说明*lastAddr*对应的节点在当前节点的可达集中
- [0193] 再次查询路由表:检查是否存在目的地地址为*destAddr*的条目'r'。
- [0194] 若'r'不存在:
- [0195] 则说明*destAddr*对应的节点不在当前节点的可达集中添加新条目:
- [0196] 目的地地址(*DestAddr*):*destAddr*。
- [0197] 下一跳地址(*nextAddr*):r的*nextAddr*。
- [0198] 链路权重(*weight*):*weight_r*×*weight_t*。
- [0199] 将新表项插入路由表。
- [0200] 若'r'存在:
- [0201] 比较链路权重:将r'所对应的*weight*与*weight_r*×*weight_t*
- [0202] 若前者链路权重更大
- [0203] 则不作处理
- [0204] 若后者链路权重更大
- [0205] 则更新'r':

- [0206] 目的地地址 (DestAddr) :不变。
- [0207] 下一跳地址 (nextAddr) :r的nextAddr。
- [0208] 链路权重 (weight) :weight_r×weight_t。
- [0209] 目的:利用拓扑信息集更新路由表,确保找到链路权重更大的路径。
- [0210] 步骤五:终止条件
- [0211] • 设置变化标记:
- [0212] 如果在步骤4中没有任何路由表项发生变化,标记changed=0,跳出循环。
- [0213] 目的:路由表不再变化,表示计算完成。
- [0214] 在本实施例中,本发明使用链路权重weight来衡量,到达某个节点的总weight最大,路径就是最优路径。本实例能够展示路由算法相比原始OLSR的改进,可以观察到无人机组网能选择weight更大但跳数也更多的路径进行路由,即排除跳数对于路由选择的影响。
- [0215] 本实例在真机环境下进行,组网内一共设置5架无人机,静止状态下无人机端到端通信距离可达8米左右,也就是说相距8米以内的两台无人机互为邻居,受场地大小限制,本次实验静态阻止一些无人机之间的通信来构造预定的拓扑。由于是静止状态下实验,所以实验weight计算时的参数 $\alpha=1$ 。场景如图9所示,预设拓扑图如图10所示,无人机地址分别从1-5,通过PA连接到无人机,在CrazyFlie客户端查看日志读取路由表,1-5号无人机的路由表如表1所示。

无人机号	<i>DestAddr</i>	<i>nextAddr</i>	<i>weight</i>	无人机号	<i>DestAddr</i>	<i>nextAddr</i>	<i>weight</i>
1	1	1	1	2	2	2	1
	2	2	0.99		1	1	0.99
	5	5	0.99		3	3	0.99
	3	2	0.98		4	3	0.51
	4	2	0.49		5	1	0.99

无人机号	<i>DestAddr</i>	<i>nextAddr</i>	<i>weight</i>	无人机号	<i>DestAddr</i>	<i>nextAddr</i>	<i>weight</i>
3	3	3	1	4	4	4	1
	2	2	0.99		3	3	0.53
	4	4	0.99		5	3	0.51
	1	2	0.98		2	3	0.56
	5	2	0.98		1	3	0.51

无人机号	<i>DestAddr</i>	<i>nextAddr</i>	<i>weight</i>
5	5	5	1
	1	1	0.99
	4	4	0.49
	2	1	0.98
	3	1	0.98

[0217] 表1 1-5号无人机路由表

[0218] 从客户端中读取5台无人机的路由表如表所示,其中DestAddr表示路由目的地, DestAddr表示下一跳节点,weight路径链路权重。假设数据包从1号无人机发往4号无人机,源节点是1号,在1号无人机的路由表中查询,目的节点为4时下一跳为2号,所以1号将数据包发送给2号,同理2号无人机查询路由表后中转到3号,3号最终发给4号接收。数据包的传输路径为1-2-3-4,从1号路由表中可知这条路径的weight值为1.99,一共经过了3跳,相比于只有2跳但weight值为1.48的路径1-5-4,无人机组网显然选择了weight更大的路径。该实例展示了路由算法的正确性,即网络会选择总weight最大路径作为最优的数据传输路径。

TopologySet		
lastAddr	destAddr	weight

图1

RoutingSet		
DestAddr	nextAddr	weight

图2

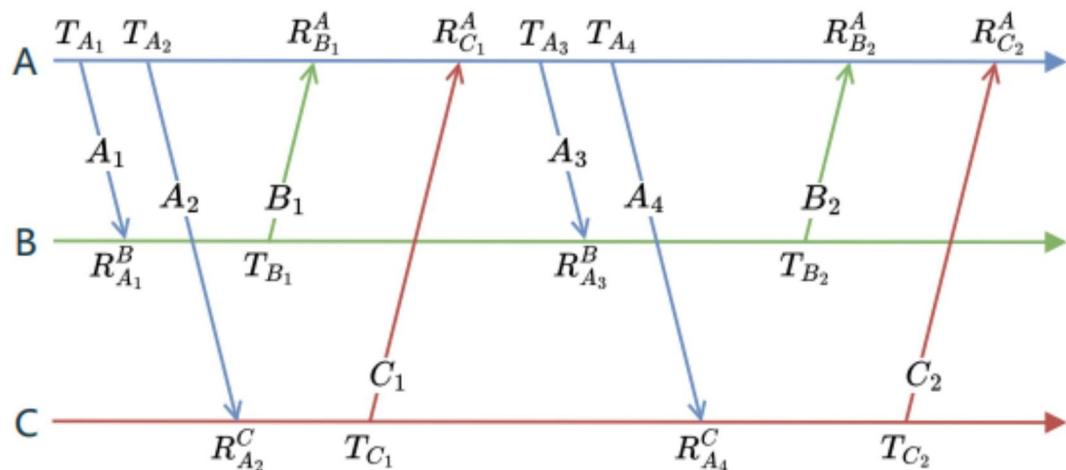


图3

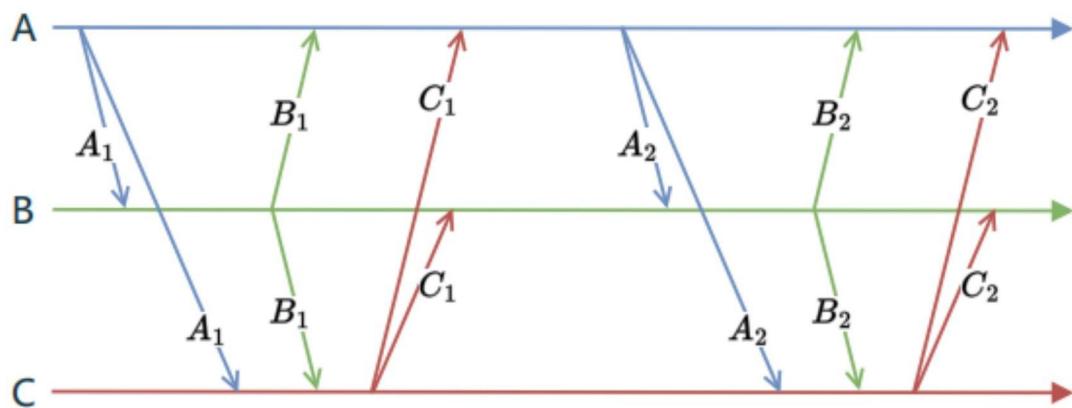


图4

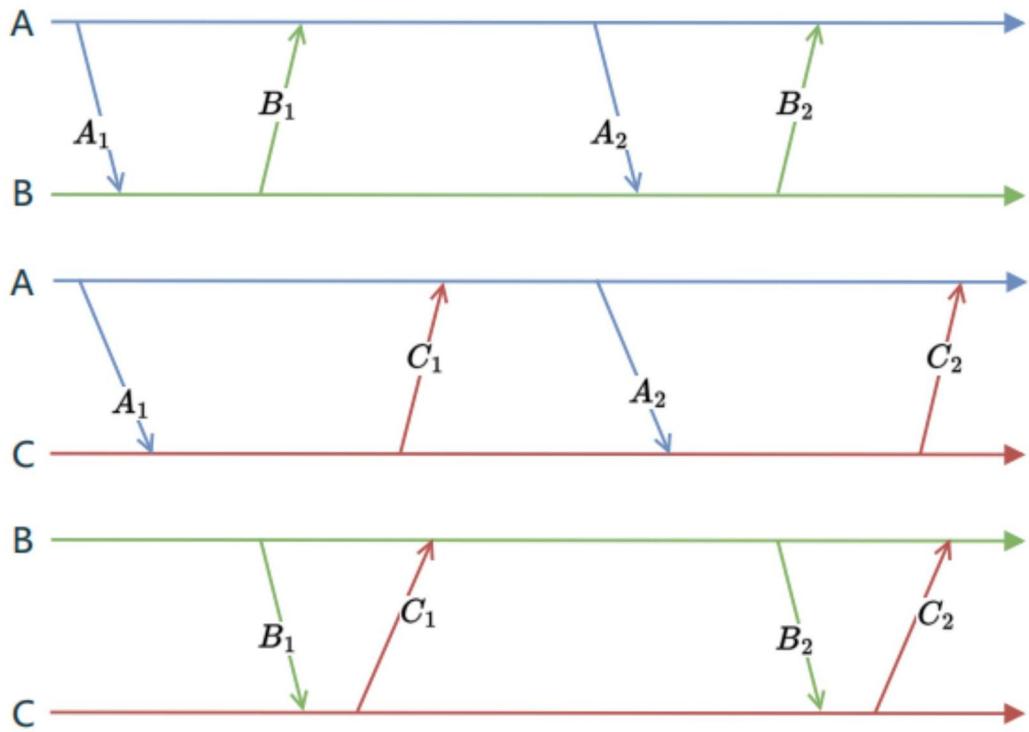


图5

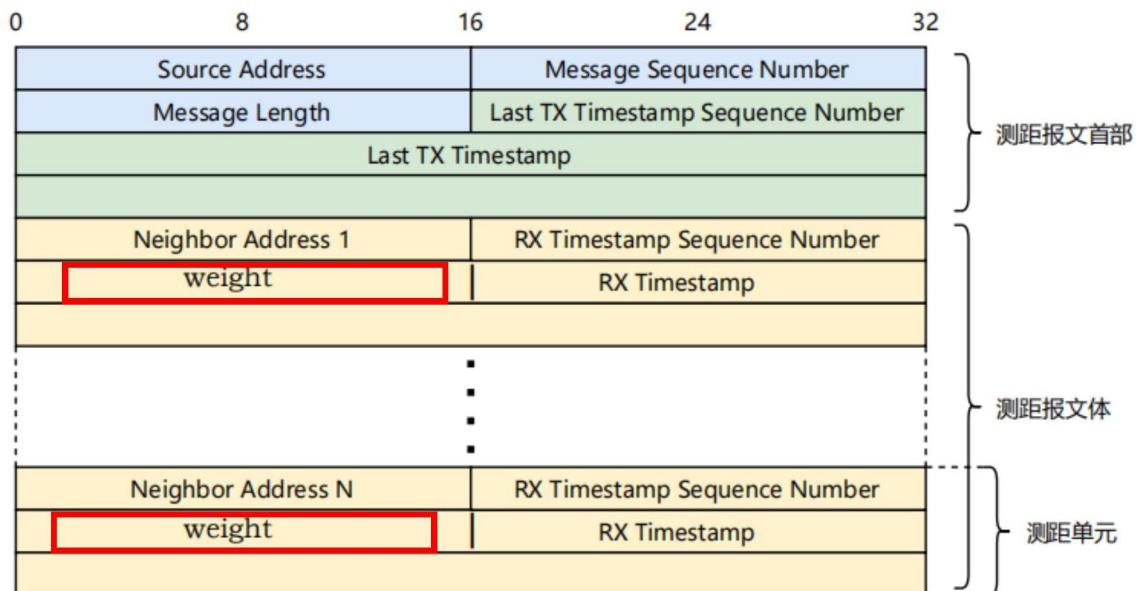


图6

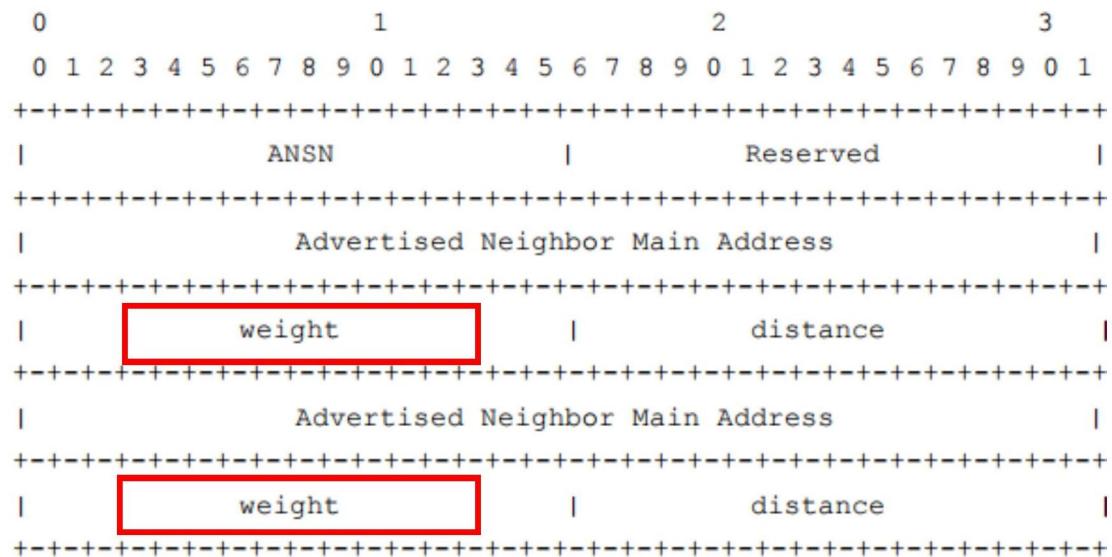


图7

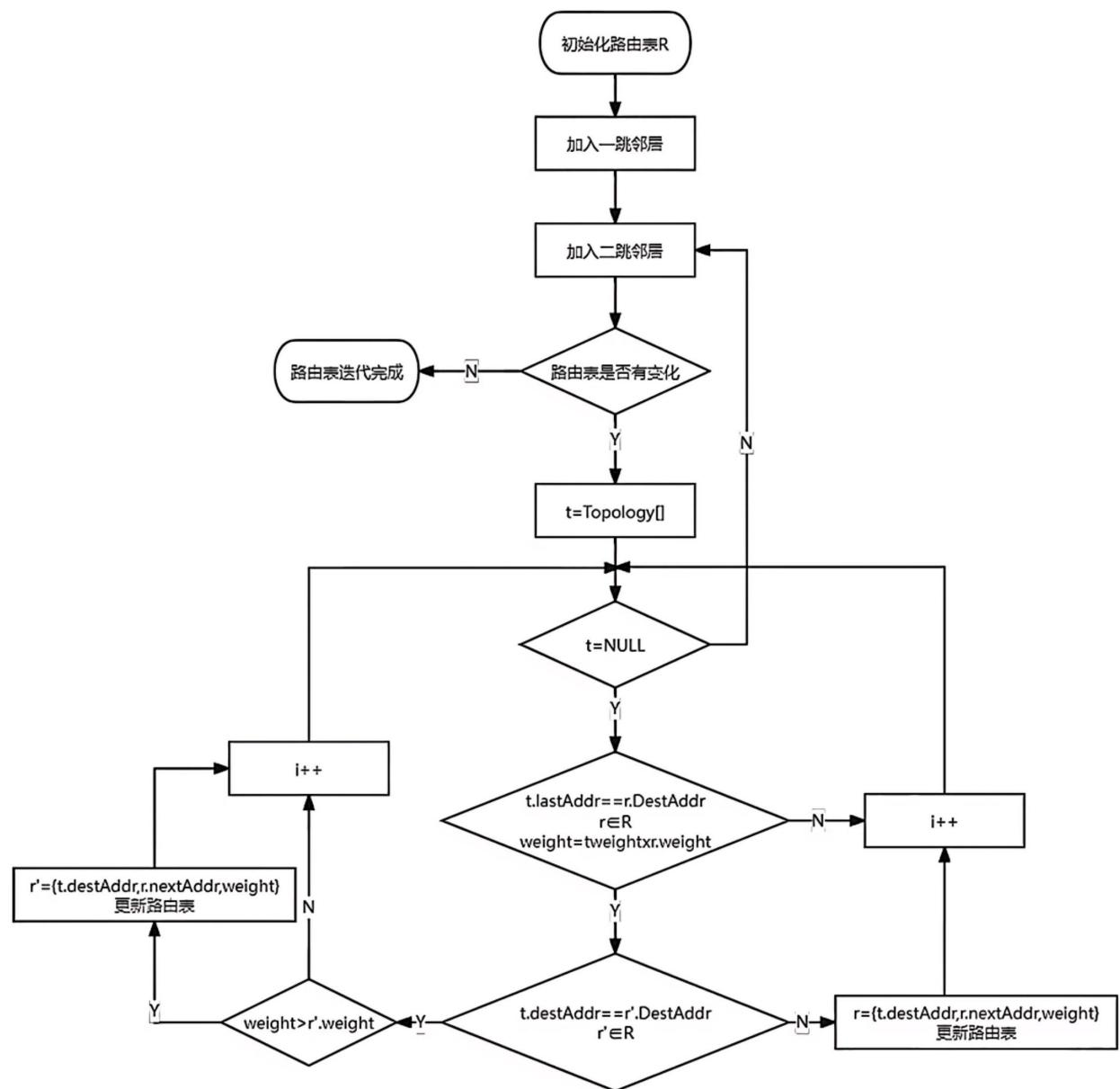


图8

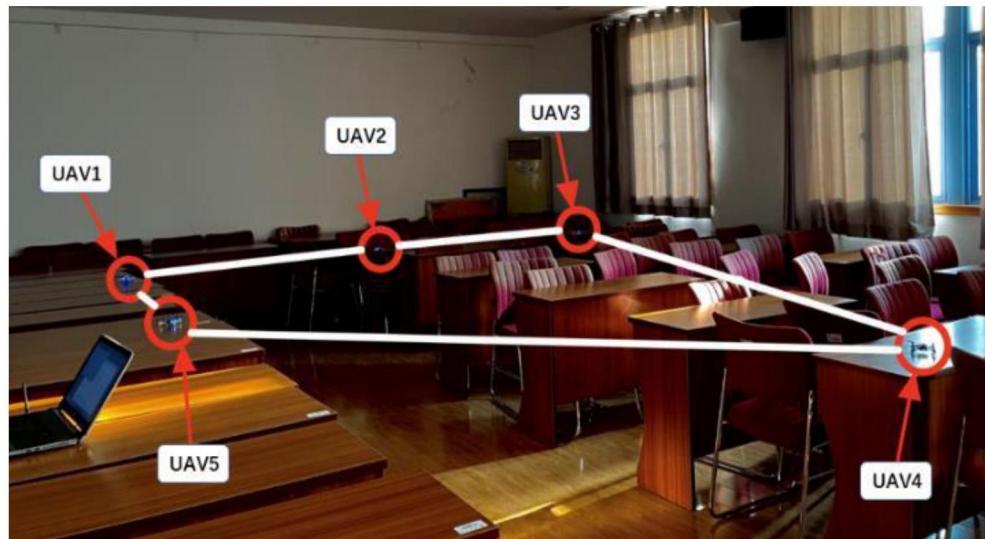


图9

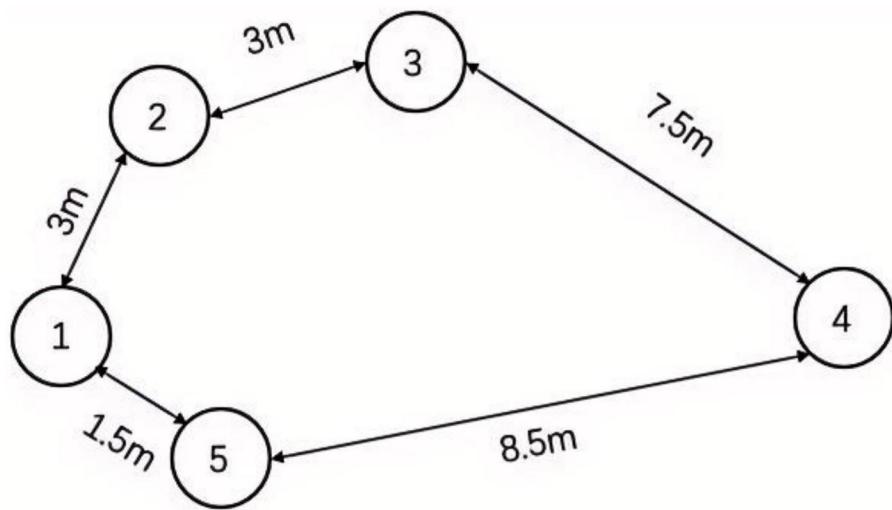


图10