



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113325403 B

(45) 授权公告日 2024.01.12

(21) 申请号 202110583572.7

H04W 4/02 (2018.01)

(22) 申请日 2021.05.27

H04W 4/06 (2009.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

H04W 4/30 (2018.01)

申请公布号 CN 113325403 A

H04W 4/70 (2018.01)

(43) 申请公布日 2021.08.31

## (56) 对比文件

CN 102711052 A, 2012.10.03

(73) 专利权人 东南大学

CN 102970058 A, 2013.03.13

地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼2  
号

CN 112672289 A, 2021.04.16

(72) 发明人 单冯 曾嘉鑫 李增保 陈乃婷  
罗军舟 吴巍炜

US 2001013057 A1, 2001.08.09

(74) 专利代理机构 南京众联专利代理有限公司  
32206

WO 2012138148 A2, 2012.10.11

专利代理人 薛雨妍

WO 2016083745 A1, 2016.06.02

(51) Int.Cl.

Ziyao Huang 等. CoUAS: A Cooperative  
UAV Fleet Control and Monitoring  
Platform.《2019 IEEE Globecom Workshops  
(GC Wkshps)》.2020, 第1-6页.

G01S 11/02 (2010.01)

审查员 何强

权利要求书3页 说明书7页 附图2页

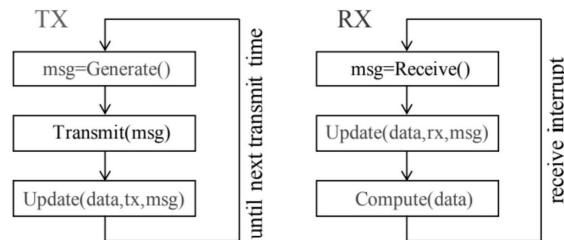
## (54) 发明名称

无人系统集群中基于超宽频技术的集群测  
距方法

## (57) 摘要

本发明公开了无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法，本发明逻辑上主要包括五个部分，分别是网络协议框架设计、测距消息生成和测距信息更新、高动态集群自适应改进、测距消息丢失与测距周期不匹配处理、高密集集群自适应改进。本发明首先设计了简洁的协议框架，使得测距的每一边只需要周期的发送测距消息而不是收到消息后立刻回复消息。然后设计了测距消息的数据包的报文结构，同时根据测距消息数据包设计了测距信息的更新方法、距离计算方法。随后，根据更新后的测距消息中的数据，将测距过程设计为根据速度和距离自适应。最终实现了同时支持无线测距和数据传输而在密集且动态的集群中应用超宽频技术的方法。

CN 113325403 B



1. 无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法,其特征在于:

包括以下步骤:

步骤1:设计简单的网络协议框架,使得通信的每一边周期地发送测距消息而不是收到消息后立刻回复消息;

步骤2:针对步骤1中的测距消息和协议框架,设计了测距消息数据包的报文结构、测距消息生成和测距信息更新方法;

步骤3:针对步骤2每条测距消息的测距间隔,设计了测距间隔P根据速度和距离自适应,为快速移动的高动态的无人系统集群设置测距消息传输间隔;

步骤4:根据对使用不同测距间隔带来的测距消息丢失与测距周期不匹配问题的分析,总结出四种消息交换的不平衡的情况,分别是:

情况(1)接收方接收的测距消息大于发送方发送的测距消息;

情况(2)发送方发送的一条测距消息丢失;

情况(3)发送方发送测距消息多于其接收测距消息;

情况(4)接收方发送的一条测距消息丢失;

针对情况(1)、(2),下一轮发送方发送的数据包缺失部分时间戳,解决办法是直接丢弃发送方保存的前一轮接收方发送过来的时间戳;针对情况(3),解决办法是每当消息被发送时及时更新或覆写测距表中的发送时间戳即可;针对情况(4),解决办法是丢弃前一轮相应的时间戳;

步骤5:将测距消息的报文结构、测距消息生成方法、测距消息更新方法、距离计算方法加以改进,使其能够推广运用到大规模高密集集群中,具体步骤如下:

步骤501:改进的测距表报文结构;相比步骤1中的数据表新增三个参数,A和Y最新的测距间隔、对Y的下次期望传输时间和邻居Y测距消息的过期时间;

步骤502:重新设计测距表更新方法;每当根据测距表被计算出来的收发双方之间数据包的传播时延ToF被更新后,根据已有计算公式更新测距表中的测距间隔P;

步骤503:发送出一条对邻居Y的测距消息时,下一次期望传输时间被更新;收到一条来自邻居Y的测距消息时,过期时间就会进行更新;

步骤504:随着测距表被改进和适当地维护,设计根据所有测距表中的下次期望传输时间和过期时间生成一条测距消息;根据它们的下次期望传输时间按照时间顺序进行排序,并选取m个最紧急的邻居,其中m为测距消息所能携带的最多时间戳个数;将这m个邻居的接收时间戳装载进测距消息中并随测距消息发送;之后,这m个下次传输时间将根据其各自的测距间隔由测距表更新方法进行更新;在下一个下次传输时间到达时重复这一过程并生成下一条测距消息。

2. 权利要求1所述的无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法,其特征在于:所述步骤1包括如下设计:

(1)设计收发双方的协议框架如下:

a)发送方协议框架:

步骤1011:发送方生成测距消息;

步骤1012:发送方广播步骤1011中生成的测距消息;

步骤1013:更新当前设备测距消息;

b) 接收方协议框架:

步骤1021:接收方收到一条测距消息,执行步骤1022;

步骤1022:更新当前测距表的测距数据;

步骤1023:根据更新后的测距数据计算收发双方之间数据包的传播时延ToF;

(2) 定义测距消息 $X_i$ 是由机器人或设备X的第i次广播消息,可表示为:

$Message X_i = (X_i, T_{X_{i-1}}, RxM, v)$ , 其中的参数分别表示 $X_i$ 是消息标识符,表示消息发送者和序列号;  $T_{X_{i-1}}$ 是 $X_{i-1}$ 的发送时间戳,在此 $X_{i-1}$ 即上一条发送的消息;  $RxM$ 是接收时间戳和对应消息标识符的集合;  $v$ 是 $X_i$ 的当前速度。

3. 权利要求1所述的无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法,其特征在于:所述步骤2首先设计了测距消息生成方法,根据步骤1协议框架下收发双方的测距消息的交互,设计了一种可以存储最近7个时间戳的测距报文结构;同时根据所设计的测距消息报文结构,设计了测距信息更新方法及收发双方之间数据包的传播时延ToF计算方法;

(3) 针对步骤2中的测距消息,其生成方法步骤如下:

步骤2011:清空接收时间戳和对应消息标识符的集合;

步骤2012:对于自上次发送后收到的每个消息,执行步骤2013; 步骤2013:合并当前接收时间戳和对应消息标识符的集合,直到完成对所有测距消息的接收;

步骤2014:返回产生的测距消息数据包;

(4) 针对步骤2中的测距消息,设计了其具体的更新方法,步骤如下;

步骤2021:如果当前设备正在发送测距消息,执行步骤2022,否则执行步骤2023;

步骤2022:当前设备维护的每一张测距表,更新其相应时间戳; 步骤2023:当前设备接收到测距消息,并且测距消息来自于邻居设备Y,执行步骤2024;

步骤2024:更新当前设备A所维护的设备Y的测距表中相应的时间戳;

(5) 针对步骤2024中的更新后的测距表,设计了两个设备间的距离计算方法,步骤如下:

步骤2031:如果当前设备A维护的关于邻居设备Y的测距表完整,执行步骤2032;否则,返回空值;

步骤2032:根据公式,使用完整测距表中的相应的时间戳计算收发双方之间数据包的传播时延ToF;

步骤2033:重置步骤2024中的测距表;

步骤2034:返回步骤2032中计算出的收发双方之间数据包的传播时延ToF。

4. 权利要求1所述的无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法,其特征在于:步骤3根据所述步骤2中的测距消息,将测距过程设计为根据速度和距离自适应;根据步骤1所述的协议框架和测距消息,步骤3在理论上分析了高速度长测距间隔情景下测距间隔P根据速度和距离的自适应;通过分析得出结论:距离越近,测距间隔越短;同时,速度越快,测距间隔也越短。

5. 权利要求1所述的无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法,其特征在于:测距表更新方法:

步骤401:如果设备A接收到来自邻居Y的测距消息,执行步骤402;

步骤402：如果设备A维护的上一轮设备A发送测距消息中的到达时间戳还未随邻居Y的测距消息被接收到，执行步骤403，否则执行步骤404；

步骤403：更新并清空相关时间戳；

步骤404：如果设备A的发送发测距消息与接收到的设备Y的测距消息序列号不匹配，更新相关的时间戳，以便进行下一轮测距计算。

## 无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及无人系统集群中基于超宽频技术研究领域,特别涉及基于无人机等新兴技术,具体涉及无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法。

### 背景技术

[0002] 随着电子制造业的快速发展,越来越多的空中机器人、地面机器人、可穿戴设备与便携式设备可以在市面上被买到。机器人与设备正逐渐变得更加小型、更加轻型、价格更加低廉,因而也变得广受欢迎。这使得将数十至上千台此类机器设备组合成一个集群并令其通过彼此协作完成复杂任务成为了可能。相比于单个全功能的大型机器人,一个小型机器人与设备集群具有多种优势,包括容错性更好、在部署规模和数量上更灵活、部署速度更快。

[0003] 机器人与设备集群的三个重要特点:数量大、机动性高、距离近。首先,根据任务的复杂性,数十至上千个机器人与设备将会被部署以协作。其次,微型无人系统、轮式机器人、行走机器人以及可由人类携带的可穿戴设备与便携式设备都可以按照要求快速移动。再者,由于这些机器人与设备尺寸较小,它们可以在较近的距离内协作以完成复杂任务。总之,机器人与设备集群在不久的将来的应用应当是动态且密集的。一个成功的动态且密集的集群应用需要有低延迟通信与实时定位。在没有外部基础设施支持的情况下,预先形成自组网络和集群内相对定位至关重要。

### 发明内容

[0004] 为解决上述问题,本发明的目的是为无人系统和设备组成的动态且密集的集群设计一种具有简单高效、自适应性强、健壮性、可扩展性、兼容性等优点的基于超宽频技术的集群测距方法,该协议简化现有协议的复杂数据包及协议框架,设计了测距消息的更新方法,大大提高了消息数据包在集群中的传输效率。

[0005] 技术方案:为实现上述目的,本发明采用的技术方案为:无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤1:设计简单的网络协议框架,使得通信的每一边周期地发送测距消息而不是收到消息后立刻回复消息。

[0007] 步骤2:针对步骤1中的测距消息和协议框架,设计了测距消息数据包的报文结构、测距消息生成和测距信息更新方法。

[0008] 步骤3:针对步骤2每条测距消息的测距间隔,设计了测距间隔P根据速度和距离自适应,为快速移动的高动态的设置合适的测距消息传输间隔。

[0009] 步骤4:针对步骤3中使用不同测距间隔带来的测距消息丢失与测距周期不匹配问题,对于不同的情况给出了相应的解决办法。

[0010] 步骤5:将基于超宽频技术的集群测距方法推广到大规模高密集集群,针对测距消息的报文结构、测距消息生成方法、测距消息更新方法、距离计算方法作出了进一步的改

进。

- [0011] 本发明进一步改进在于：所述步骤1包括如下设计：
- [0012] (1) 设计收发双方的协议框架如下：
- [0013] a) 发送方协议框架：
- [0014] 步骤1011.发送方生成测距消息；
- [0015] 步骤1012.发送方广播步骤1011中生成的测距消息；
- [0016] 步骤1013.更新当前设备测距消息；
- [0017] (b) 接收方协议框架：
- [0018] 步骤1021.接收方收到一条测距消息，执行步骤1022；
- [0019] 步骤1022.更新当前测距表的测距数据；
- [0020] 步骤1023.根据更新后的测距数据计算收发双方之间数据包的传播时延ToF；
- [0021] (2) 定义测距消息 $X_i$ 是由机器人或设备X的第i次广播消息，可表示为：

Message  $X_i = (X_i, T_{X_{i-1}}, RxM, v)$ ，其中的参数含义如下： $X_i$ 是消息标识符，表示消息发送者和序列号； $T_{X_{i-1}}$ 是 $X_{i-1}$ 的发送时间戳，在此 $X_{i-1}$ 即上一条发送的消息；RxM是接收时间戳和对应消息标识符的集合，例如 $RxM = \{(A_2, R_{A_2}), (B_2, R_{B_2})\}$ ；v是 $X_i$ 的当前速度。

- [0022] 本发明进一步改进在于：
- [0023] 所述步骤2首先设计了测距消息生成方法，根据步骤1协议框架下收发双方的测距消息的交互，设计了一种可以存储最近7个时间戳的测距报文结构。同时根据所设计的测距消息报文结构，设计了测距信息更新方法及收发双方之间数据包的传播时延ToF计算方法。
- [0024] 针对步骤2中的测距消息，其生成方法步骤如下：
- [0025] 步骤2011：清空接收时间戳和对应消息标识符的集合；
- [0026] 步骤2012：对于自上次发送后收到的每个消息，执行步骤2013；
- [0027] 步骤2013：合并当前接收时间戳和对应消息标识符的集合，直到完成对所有测距消息的接收；
- [0028] 步骤2014：返回产生的测距消息数据包；
- [0029] 针对步骤2中的测距消息，设计了其具体的更新方法，步骤如下：
- [0030] 步骤2021：如果当前设备正在发送测距消息，执行步骤2022，否则执行步骤2023；
- [0031] 步骤2022：当前设备维护的每一张测距表，更新 $T_f$ 时间戳；
- [0032] 步骤2023：当前设备接收到测距消息，并且测距消息来自于邻居设备Y，执行步骤2024；
- [0033] 步骤2024：更新当前设备A所维护的设备Y的测距表中 $T_f, R_f, R_e$ ；
- [0034] 针对步骤2024中的更新后的测距表，设计了两个设备间的距离计算方法，步骤如下：
- [0035] 步骤2031：如果当前设备A维护的关于邻居设备Y的测距表完整，执行步骤2032；否则，返回空值；
- [0036] 步骤2032：根据公式，使用完整测距表中的相应的时间戳计算收发双方之间数据包的传播时延ToF；

- [0037] 步骤2033:重置步骤2024中的测距表；
- [0038] 步骤2034:返回步骤2032中计算出的收发双方之间数据包的传播时延ToF。
- [0039] 本发明进一步改进在于：
- [0040] 所述步骤3根据所述步骤2中的测距消息，将测距过程设计为根据速度和距离自适应。根据步骤1所述的协议框架和测距消息，步骤3在理论上分析了高速度长测距间隔情景下测距间隔P根据速度和距离的自适应。通过分析得出结论：距离越近，测距间隔越短；同时，速度越快，测距间隔也越短。
- [0041] 本发明进一步改进在于：
- [0042] 所述步骤4中根据对使用不同测距间隔带来的测距消息丢失与测距周期不匹配问题的分析，总结出四种消息交换的不平衡的情况，分别是：
- [0043] 情况(1)接收方接收的测距消息大于发送方发送的测距消息；
- [0044] 情况(2)发送方发送的一条测距消息丢失；
- [0045] 情况(3)发送方发送测距消息多于其接收测距消息；
- [0046] 情况(4)接收方发送的一条测距消息丢失。
- [0047] 针对情况(1)、(2)，下一轮发送方发送的数据包缺失部分时间戳，解决办法是直接丢弃发送方保存的前一轮接收方发送过来的时间戳。
- [0048] 针对情况(3)，解决办法是每当消息被发送时及时更新或覆写测距表中的发送时间戳即可。
- [0049] 针对情况(4)，解决办法是丢弃前一轮相应的时间戳。总结上述解决方法为如下测距表更新方法：
- [0050] 步骤401：如果设备A接收到来自邻居Y的测距消息，执行步骤402；
- [0051] 步骤402：如果设备A维护的上一轮设备A发送测距消息中的到达时间戳还未随邻居Y的测距消息被接收到，执行步骤403，否则执行步骤404；
- [0052] 步骤403：更新并清空相关时间戳；
- [0053] 步骤404：如果设备A的发送发测距消息与接收到的设备Y的测距消息序列号不匹配，更新相关的时间戳，以便进行下一轮测距计算；
- [0054] 步骤5将测距消息的报文结构、测距消息生成方法、测距消息更新方法、距离计算方法加以改进，使其能够推广运用到大规模高密集集群中。
- [0055] 具体步骤如下：
- [0056] 步骤501：改进的测距表报文结构。相比步骤1中的数据表新增三个参数，A和Y最新的测距间隔、对Y的下次期望传输时间和邻居Y测距消息的过期时间。
- [0057] 步骤502：重新设计测距表更新方法。每当根据测距表被计算出来的收发双方之间数据包的传播时延ToF被更新后，根据已有计算公式更新测距表中的测距间隔P；
- [0058] 步骤503：发送出一条对邻居Y的测距消息时，下一次期望传输时间被更新；收到一条来自邻居Y的测距消息时，过期时间就会进行更新；
- [0059] 步骤504：随着测距表被改进和适当地维护，设计根据所有测距表中的下次期望传输时间和过期时间生成一条测距消息。根据它们的下次期望传输时间按照时间顺序进行排序，并选取m(测距消息所能携带的最多时间戳个数)个最紧急的邻居。将这m个邻居的接收时间戳装载进测距消息中并随测距消息发送。之后，这m个下次传输时间将根据其各自的测

距间隔由测距表更新方法进行更新。在下一个下次传输时间到达时重复这一过程并生成下一条测距消息。

[0060] 本发明相比现有技术,具有以下有益效果:

[0061] 1、本发明是首个为了同时支持无线测距和数据传输而在密集且动态的集群中应用超宽频技术的方法。

[0062] 2、设计了一种简单而高效的基于超宽频技术的集群测距方法。其中涉及到的消息类型仅一种且容易实现,并且该设计利用了无线测距信息的广播性质,因此在集群中效率更高。

[0063] 3、设计了一种自适应的且健壮的超宽频测距协议。协议采用了一种轮换方案以应对将在单一测距信息里携带过多邻居信息的情况,且协议与诸如OLSR协议的高层网络协议相兼容。

## 附图说明

[0064] 图1是本发明设计的基于超宽频技术的集群测距协议主框架;

[0065] 图2是本发明参考的双边双向测距(DS-TWR)协议测距消息通信过程;

[0066] 图3是本发明设计的测距消息报文结构;

[0067] 图4是本发明理论分析高速度长测距间隔的情景;

[0068] 图5是本发明针对大规模集群改进后的测距消息报文结构。

## 具体实施方式

[0069] 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用于限制本发明的范围。需要说明的是,下面描述中使用的词语“前”、“后”、“左”、“右”、“上”和“下”指的是附图中的方向,词语“内”和“外”分别指的是朝向或远离特定部件几何中心的方向。

[0070] 无人系统集群中基于超宽频技术的集群测距方法,包括以下步骤:

[0071] 1、网络协议框架设计:

[0072] 步骤1.根据设计的网络协议框架,将集群测距协议主框架分为两个部分,如图1所示,分别为发送(TX)相关部分和接收(RX)相关部分。

[0073] 1)根据测距消息的相关参数,收发双方的协议框架如下:

[0074] a)发送方协议框架:

[0075] 步骤1011.发送方(TX):程序Generate()生成测距消息msg,

[0076] 步骤1012.发送方(TX)将步骤101中产生的测距消息msg被程序Transmit()广播出去;

[0077] 步骤1013.调用Update()来更新测距数据;

[0078] b)接收方协议框架:

[0079] 步骤1021.接收方(RX)收到一条测距消息,执行步骤1022;

[0080] 步骤1022.调用Update()来接收测距消息msg,更新测距数据;

[0081] 步骤1023.调用Compute()根据更新后的测距数据计算收发双方之间数据包的传播时延ToF;

[0082] 2) 定义测距消息 $X_i$ 是由机器人或设备X的第*i*次广播消息,可表示为:

*Message*  $X_i = (X_i, T_{X_{i-1}}, RxM, v)$ ,其中 $X_i$ 是消息标识符,表示消息发送者和序列号; $T_{X_{i-1}}$ 是 $X_{i-1}$ 的发送时间戳,在此 $X_{i-1}$ 即上一条发送的消息;RxM是接收时间戳和对应消息标识符的集合,例如 $RxM = \{(A_2, R_{A_2}), (B_2, R_{B_2})\}$ ;v是 $X_i$ 的当前速度。

[0083] 2、测距消息生成和测距信息更新:

[0084] 步骤2.首先设计了测距消息生成方法,根据步骤1协议框架下收发双方的测距消息的交互,设计了一种可以存储最近7个时间戳的测距报文结构,如图2所示。同时根据所设计的测距消息报文结构,设计了测距信息更新方法及收发双方之间数据包的传播时延ToF计算方法。根据对时间戳的分析及双边双向测距协议中收发双方之间数据包的传播时延ToF计算,如图3所示,收发双方之间数据包的传播时延ToF计算公式如下:

$$[0085] a_d = R_r - T_p, b_p = T_r - R_p, b_d = R_f - T_r, a_p = T_f - R_r \quad (1)$$

$$t_p$$

$$[0086] = \frac{a_d b_d - a_p b_p}{a_d + b_d + a_p + b_p} \quad (2)$$

[0087] 1) 针对设计好的测距消息报文结构,设计了其测距消息的生成方法,

[0088] 步骤如下:

[0089] 步骤2011.清空接收时间戳和对应消息标识符的集合RxM;

[0090] 步骤2012.对于自上次发送后收到的每个消息 $Y_i$ ,执行步骤2013;

[0091] 步骤2013.合并当前接收时间戳和对应消息标识符的集合: $RxM \cup (Y_j, R_{Y_j})$ ,直到完成对所有测距消息的接收;

[0092] 步骤2014.返回产生的测距消息数据包*Message*( $A_i, T_{A_{i-1}}, RxM, v$ );

[0093] 2) 针对步骤2中的测距消息,设计了其具体的更新方法,步骤如下:

[0094] 步骤2021.如果当前设备正在发送测距消息,执行步骤2022,否则执行步骤2023;

[0095] 步骤2022.对于当前设备维护的每一张测距表,更新Tf时间戳;

[0096] 步骤2023.当前设备接收到测距消息,并且测距消息来自于邻居设备Y,执行步骤2024;

[0097] 步骤2024.更新当前设备A所维护的设备Y的测距表中 $T_f, R_f, R_e$ ;

[0098] 3) 针对步骤2024中的更新后的测距表,设计了两个设备间的距离计算方法,步骤如下:

[0099] 步骤2031.如果当前设备A维护的关于邻居设备Y的测距表完整,执行步骤2032;否则,返回 $\emptyset$ ;

[0100] 步骤2032.根据步骤1中的公式(2),使用完整测距表中的相应的时间戳计算收发双方之间数据包的传播时延ToF;

[0101] 步骤2033.重置步骤2024中的测距表: $R_p \leftarrow R_f, T_p \leftarrow T_f, R_r \leftarrow R_e$ ;

$T_r \leftarrow \emptyset, R_f \leftarrow \emptyset, T_f \leftarrow \emptyset, R_e \leftarrow \emptyset$

[0102] 步骤2034.返回步骤2032中计算出的收发双方之间数据包的传播时延ToF;

[0103] 3、高动态集群自适应改进：

[0104] 步骤3. 将测距过程设计为根据速度和距离自适应。根据步骤1所述的协议框架和测距消息, 步骤3在理论上分析了高速度长测距间隔情景下测距间隔P根据速度和距离的自适应, 如图4所示, 根据理论分析过程:

[0105] 理论上收发双方之间数据包的传播时延ToF可由如下公式计算得到:

$$\begin{aligned} t_p^{computed} &= \frac{a_d \times b_d - a_p \times b_p}{a_d + b_d + a_p + b_p} \\ [0106] \quad &= t_{p2} + \frac{t_{p2} t_\Delta (\beta - \alpha) + (\beta a_p - \alpha b_p) t_\Delta - \alpha \beta t_\Delta^2}{4t_{p2} + 2a_p + 2b_p + t_\Delta (\beta - \alpha)} \approx t_{p2} \end{aligned} \quad (3)$$

[0107] 接收时间被一个传输周期分成 $\beta:\alpha$ 比值, 其中 $\alpha+\beta=1$ 。

[0108] 实际协议实施过程中, 可由如下公式计算得到实际收发双方之间数据包的传播时延ToF:

$$[0109] t_p^{actual} = t_{p4} = t_{p2} - t_\Delta = t_p^{computed} - \frac{vP}{c} \quad (4)$$

[0110] 在协议具体实施过程中, 将误差约束为:

$$[0111] \frac{|t_p^{actual} - t_p^{computed}|}{t_p^{actual}} \leq e_0$$

[0112] 通过误差约束公式和关系式 $vP=t_\Delta c$ , 得到:

$$[0113] P \leq \frac{e_0 d_2}{\frac{1-e_0}{v}} \quad (5)$$

[0114] 根据给定的速度v和计算距离d2作为决定测距间隔P的参考。通过理论分析, 可从不等式中看到, 距离越近, 测距间隔越短; 同时, 速度越快, 测距间隔也越短。

[0115] 4、测距消息丢失与测距周期不匹配处理:

[0116] 步骤4. 根据对使用不同测距间隔带来的测距消息丢失与测距周期不匹配问题的分析, 总结出四种消息交换的不平衡的情况, 分别是: (1) 接收方接收的测距消息大于发送方发送的测距消息; (2) 发送方发送的一条测距消息丢失; (3) 发送方发送测距消息多于其接收测距消息; (4) 接收方发送的一条测距消息丢失。针对情况(1)、(2), 下一轮发送方发送的数据包缺失部分时间戳, 解决办法是直接丢弃发送方保存的前一轮接收方发送过来的时间戳。针对情况(3), 解决办法是每当消息被发送时及时更新或覆写测距表中的发送时间戳即可。针对情况(4), 解决办法是丢弃前一轮相应的时间戳。总结上述解决方法为如下测距表更新方法:

[0117] 步骤401. 如果设备A接收到来自邻居Y的测距消息msg, 执行步骤402;

[0118] 步骤402. 如果设备A维护table(AY) 中的 $R_f$ 为 $\emptyset$ , 执行步骤403, 否则执行步骤404;

[0119] 步骤403. 清空设备A的table(AY) 中的相关参数:  $T_r \leftarrow \emptyset$ ,  $T_f \leftarrow \emptyset$ ,  $R_e \leftarrow \emptyset$ , 同时更新相关参数: $R_r \leftarrow R_e$ ;

[0120] 步骤404.如果发送测距消息与接收的测距消息序列号不匹配: $\text{index}(T_r) \neq \text{index}(R_r)$ ,更新相关时间戳: $R_p \leftarrow R_f, T_p \leftarrow T_f, R_r \leftarrow R_e$ ,并清空相关时间戳:

$$T_r \leftarrow \emptyset, R_f \leftarrow \emptyset, T_f \leftarrow \emptyset, R_e \leftarrow \emptyset;$$

[0121] 5、高密集集群自适应改进:

[0122] 步骤5.将测距消息的报文结构、测距消息生成方法、测距消息更新方法、距离计算方法加以改进,使其能够推广运用到大规模高密集集群中。具体步骤如下:

[0123] 1)改进的测距表报文结构,相比步骤1中的数据表新增三个参数: $P, t_n$ 和 $t_s$ ,分别表示A和Y最新的测距间隔、对Y的下次期望传输时间和邻居Y的过期时间,如图5所示。

[0124] 2)重新设计测距表更新方法:每当根据测距表被计算出来的收发双方之间数据包的传播时延ToF被更新后,根据公式(2)更新测距表中的测距间隔P;

[0125] 3)发送出一条对邻居Y的测距消息时,下一次期望传输时间 $t_n$ 被更新;收到一条来自邻居Y的测距消息时,过期时间 $t_s$ 就会进行更新。具体实现步骤如下:

[0126] 步骤5011.如果设备A发送了测距消息;

[0127] 步骤5012.对于msg中携带有接收时间戳的每个Y,执行步骤5013;

[0128] 步骤5013.更新 $t_n$ 为: $t_n \leftarrow t_{current} + P$ ;

[0129] 步骤5014.如果设备A接收到来自邻居Y的测距消息,执行步骤5015;

[0130] 步骤5015.更新 $t_n$ 为: $t_n \leftarrow t_{current} + T_{expiration}$ ;

[0131] 4)随着测距表被改进和适当地维护,设计根据所有测距表中的下次期望传输时间 $t_n$ 和过期时间 $t_s$ 生成一条测距消息。根据它们的下次期望传输时间 $t_n$ 按照时间顺序进行排序,并选取m(测距消息所能携带的最多时间戳个数)个最紧急的邻居。将这m个邻居的接收时间戳装载进测距消息中并发送。之后,这m个下次传输时间将根据其各自的测距间隔由测距表更新方法进行更新。在下一个下次传输时间到达时重复这一过程并生成下一条测距消息。具体实现步骤如下:

[0132] 步骤5021.对于A维护的每一张邻居测距表table(AY),执行步骤502;

[0133] 步骤5022.如果当前时间大于过期时间 $t_s$ ,删除该测距表table(AY);

[0134] 步骤5023.根据 $t_n$ 对所有表进行升序排序;

[0135] 步骤5024.清空收时间戳和对应消息标识符的集合:RxM;

[0136] 步骤5025.对于A维护的前m个邻居Y的测距表,执行步骤506;

[0137] 步骤5026.接收来自邻居Y的时间戳:RxM  $\leftarrow$  RxM  $\cup$  (Y, RY);

[0138] 步骤5027.返回生成的测距消息;

[0139] 通过以上步骤,就可以获得无人系统中基于超宽频技术的集群测距方法。至此,就完成了对大规模无人系统中基于超宽频技术的集群测距方法的设计,为大规模集群测距提供了一种新的方法。

[0140] 本发明方案所公开的技术手段不仅限于上述实施方式所公开的技术手段,还包括由以上技术特征任意组合所组成的技术方案。

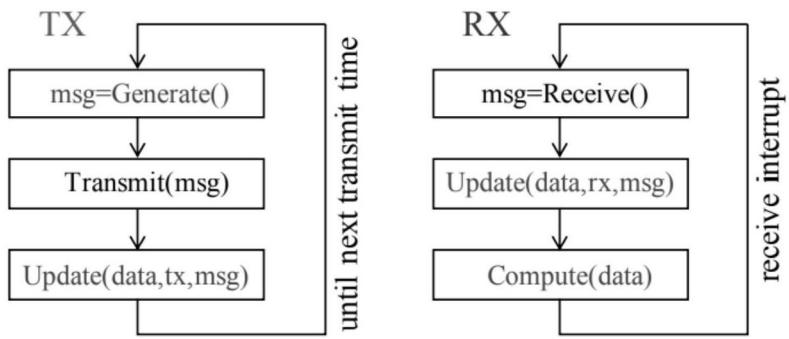


图1

|          |                     |                     |                 |                 |
|----------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| $Y$ side | $R_p = R_{A_{i-1}}$ | $T_r = T_{Y_{j-1}}$ | $R_f = R_{A_i}$ |                 |
| $A$ side | $T_p = T_{A_{i-1}}$ | $R_r = R_{Y_{j-1}}$ | $T_f = T_{A_i}$ | $R_e = R_{Y_j}$ |

图2

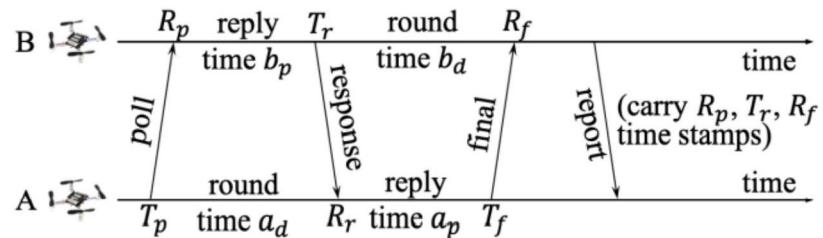


图3

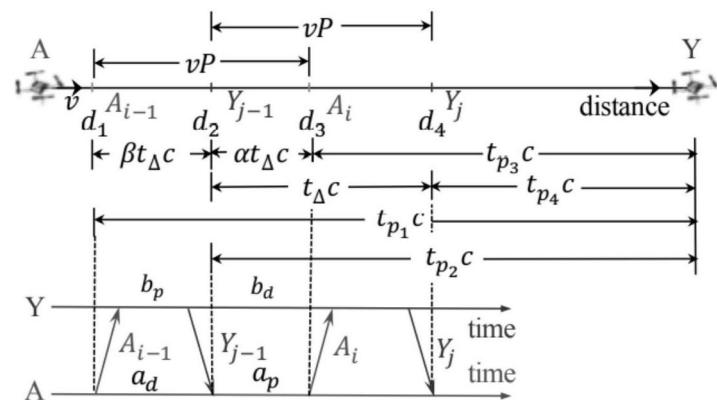


图4

|               |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Y</i> side | $R_p$ | $T_r$ | $R_f$ | $P$   | $t_n$ |
| <i>A</i> side | $T_p$ | $R_r$ | $T_f$ | $R_e$ | $t_s$ |

图5