

# 基于网络编码的无人机数据链技术研究

于强强, 茹乐, 于云龙, 方 莹

(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 为了提高无人机数据链网络的传输性能, 针对其具有的高动态、多中继和大容量等显著特点, 提出了对流链路网络编码策略; 通过分析多无人机协同执行任务时形成的网络拓扑结构, 利用网络仿真平台 NS2 建立了高动态多跳移动自组网模型, 分别改变模型中节点的移动速度、跳数和数据包大小, 观察其对网络吞吐率的影响; 仿真结果表明, 对流链路网络编码策略能够有效地改善仿真模型的传输性能, 很好地应用在无人机数据链网络中。

**关键词:** 无人机数据链; 对流网络编码; 移动自组网; 网络吞吐率

## Research on Network Coding for UAV Data-link Technology

Yu Qiangqiang, Ru Le, Yu Yunlong, Fang Kun

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force University of Engineering, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to improve transmission performance of the UAV data-link, which have some obvious characteristics like highly dynamic, multiple hops and large capacity and so on, proposed convection link network coding. By analyzing the network topology formed by multi-UAV cooperative mission, using NS2 network simulation platform to build a highly dynamic multi-hop MANET model, the moving speed of the node, hops and packet size were changed, to observe its impact on network throughput. Simulation results show that convection link network coding strategy can effectively improve the transmission performance of the simulation model, and well applied in the UAV data-link network.

**Keywords:** UAV data-link; convection link network coding; MANET; network throughput

## 0 引言

随着当代科学技术的快速发展, 无人机在性能和功能上都很大的提升, 这使得无人机在军用和民用领域的应用都更加广泛。当代军用无人机可以执行的任务, 从传统的充当靶机、充当诱饵、校正炮火和侦察战场等逐渐发展到电磁干扰、通信中继以及空中打击等任务<sup>[1]</sup>。在日常的民用领域, 无人机被用来航拍、绘制地图、检查电力线等。与常见的有线网络以及慢移动、低动态的无线网络不同, 无人机数据链网络具有大空间、高动态和多中继等显著特点, 并且要求低延时、稳定和可靠的数据传输, 以保证对无人机实现远距离的测控和信息传输需要。

20 世纪 50 年代, 信息论创始人香农提出, 通信网络中端到端能够到达的最大信息流取决于该网络当前的最小割。之前的通信网络一直采用“存储转发”这种传统路由的方式进行信息传输, 实践证明该方式很难达到最大流最小割的理论上限。2000 年, Ahlswede 等学者提出了网络编码的基本概念, 表明在单信源向多信宿发送数据的有向网络中, 如果中继节点具有编码能力且信宿节点具有译码能力, 那么该网络可以达到最大流最小割的理论上限, 从而实现了网络资源的高效利用<sup>[2]</sup>。随着网络编码相关概念和编码技术的不断更新, 使其在无人机数据链网络中的应用成为了可能。

## 1 高动态多跳移动自组网络模型

多无人机组成编队在执行不同任务时, 往往组成不同的网络拓扑模型<sup>[3]</sup>。常见的模型包括同向高速多节点移动模型、同

心环形高速多节点移动模型和异心环形高速多节点移动模型。

### 1.1 同向高速多节点移动模型

从同一无人机地面站出发的多架无人机, 在任务执行的出发和返回阶段, 所有的无人机飞行方向一致, 形成如图 1 所示的同向高速多节点移动模型。

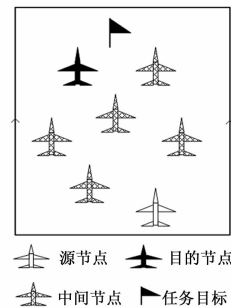


图 1 同向高速多节点移动模型

该模型模拟的任务可以简要描述如下: 1) 某无人机地面站收到对某个移动目标的跟踪、侦察和打击的任务, 现派出多架不同功能的无人机协同执行此任务; 2) 在无人机出发阶段, 每当任务目标的位置等信息发生变化时, 无人机地面控制站会收到来自侦察卫星传回的更新数据, 后处理成数据包再发送给原节点无人机; 3) 原节点无人机根据数据包中目的节点无人机的拓扑位置信息, 向具有网络编码功能中间节点无人机进行广播; (4) 目的节点无人机对收到的数据包进行检测, 其中检测为正确的数据包再进行解码处理, 进而获得任务目标的最新信息。

### 1.2 同心环形高速多节点移动模型

当多架无人机对某一固定位置的目标执行不同需求的侦察任务时, 形成如图 2 所示的同心环形高速多节点移动模型, 任务信息的传播过程与同向高速多节点移动模型类似。

收稿日期: 2015-04-08; 修回日期: 2015-06-02。

作者简介: 于强强(1991-), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事信号与信息处理方向的研究。

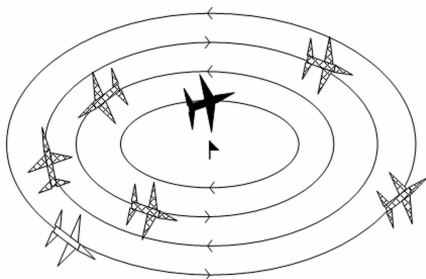


图 2 同心环形高速多节点移动模型

无人机在该网络拓扑模型中的移动遵循以下规则：1) 所有无人机围绕任务目标做近似圆周运动，假定源节点无人机在最外环，目的节点无人机在最内环；2) 同环上的无人机以固定的角速度围绕任务目标进行移动；3) 相邻圆环上的无人机做圆周运动的方向相反；4) 数据包在相邻圆环进行传播时，相邻的无人机具有较高的优先性。

### 1.3 异心环形高速多节点移动模型

当多架无人机对多个固定任务目标执行侦察任务时，会形成如图 3 所示的异心环形高速多节点移动模型。任务信息的传播过程和无人机在该网络拓扑模型中的移动规则，与前两种类似。

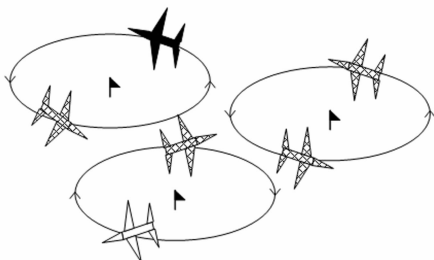


图 3 异心多环高速多节点移动模型

## 2 对流链路网络编码

### 2.1 网路编码的基本原理

网络编码的基本思想是通过中继节点对收到的数据组进行编码，利用其计算能力来优化网络结构、提高网络吞吐量以及提升传输安全等<sup>[4]</sup>。提高网络吞吐量是我们在无人机链路网络中引入网络编码的主要原因。可以利用经典的最大流最小割定理和蝴蝶网络<sup>[5]</sup>，来说明网络编码如何将网络吞吐量提高到理论最大流。

假设一个通信网络用图  $G = (V, E, R)$  来描述，其中  $V$  是网络节点的集合， $E$  是网络中有向链路的集合， $R$  是表示链路容量的函数，即链路  $E_{ij}$  的容量用非负实数  $R_{ij}$  来表示。当网络中的每一条链路  $E_{ij}$  都对应一个非负实数  $f_{ij}$  时，称该网络中存在流  $flow$ 。假设该流在网络中的源节点和目的节点分别用  $s, t$  表示，若每条链路对应的非负实数  $f_{ij}$  都满足以下两个约束条件，则称该网络存在可行流  $flow(s, t)$ 。

$$\text{容量限制: } 0 \leq f_{ij} \leq R_{ij} \quad \forall (i, j) \in E \quad (1)$$

$$\text{流量守恒: } \sum_k f_{ki} = \sum_j f_{ij} \quad \forall (i, j) \in E \quad (2)$$

网络  $G$  中从  $s$  到  $t$  可行流的理论流量为

$$flow(s, t) = \sum_{(s, d) \in E} f_{sd} = \sum_{(j, t) \in E} f_{jt} \quad (3)$$

所以，对于网络  $G$  中从  $s$  到  $t$  的最大可行流  $\max flow(s, t)$  是指，在同时满足以上两个约束条件的前提下，对各条链路进

行赋值，使可行流达到最大。

另假设节点集合  $U \subset V$ ，且满足源节点  $s \in U$ ，目的节点  $t \notin U$ ，那么该链路子集  $E_U$  定义为关于  $s, t$  的一个割，且  $E_U$  中所有链路容量的和用  $Cut(s, t)$  表示，即

$$Cut(s, t) = \sum_{(i, j) \in E_U} R_{ij} \quad (4)$$

最大流最小割定理是指，对于一个通信网络  $G$ ，从源节点  $s$  到目的节点  $t$  的最大可行流与其割的容量相等，即

$$\max flow(s, t) = \min Cut(s, t) \quad (5)$$

如图 4 所示的蝴蝶网络，为了证明方便假设各个链路容量是 1。若从源节点  $S$  发送 2 比特信息  $x_1$  和  $x_2$  到目的节点  $T_1$  和  $T_2$  上，根据公式 (5) 可知从源节点到两个目的节点的最大可行流为  $\max flow(s, T_1) = \max flow(s, T_2) = 2$ ，所以从源节点到目的节点集合  $\{T_1, T_2\}$  的最大可行流  $\max flow(s, \{T_1, T_2\}) = \min_{T \in \{T_1, T_2\}} (flow(s, T)) = 2$ ，即蝴蝶网络能达到的最大吞吐量为 2。

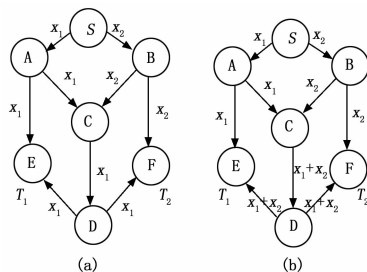


图 4 蝴蝶网络

图 4 (a) 的中间节点仅具有存储转发的能力，假设中间节点  $C$  同时收到  $x_1$  和  $x_2$  时，只能转发其中的一个比特信息，而将另一个比特信息暂存。那么目的节点在单位时间内只能获得 1 比特的信息，即此时的网络能够实现的最大流仅为 1 比特，无法达到理论最大流。

图 (b) 的中间节点是基于网络编码的存储转发方式，中间节点  $C$  能够对收到的两个信息进行编码，例如图中的模 2 运算，并将编码后的比特信息  $x_1 + x_2$  转发出去。那么目的节点  $T_1$  根据收到的  $x_1$  和  $x_1 + x_2$  可轻松获得  $x_1$  和  $x_2$  两比特信息，目的节点  $T_2$  同样如此。此时的网络实际最大流为 2 比特，达到了蝴蝶网络的理论最大流。

### 2.2 COPE 机会网络编码

与常见的慢移动、低动态无线网络不同，无人机链路网络具有大空间、高动态、强干扰等特点。网络编码的引入在提高网络吞吐量的同时，也带来很多不必要的冗余，增加了传输时延，不利于无人机链路信息的实时发布。COPE<sup>[6]</sup> 机会网络编码，采用单跳无线网络的结构，并设定网络编码只在相邻节点之间进行，从而简化了网络编、译码算法的复杂度，使网络编码应用在无人机链路网络成为了可能。COPE 机会网络编码的关键技术包括：

(1) 机会侦听：对无线信道上传输的各种数据分组进行侦听存储，用于后续的编译码数据处理。所以，机会侦听技术是对无线信道具有的开放性加以利用，来更加合理的对数据进行选择性的编译码。

(2) 机会编码：关键在于将之前侦听存储与刚收到的数据分组，进行异或运算的编码，然后将编码完成的数据包一次性发射给相邻节点。另外，允许编码的中继节点需要根据相邻节点下一刻具有译码能力，来选择性地进行编码，这要求该中继

节点能够全面、及时地获取周边中继节点现保存数据分组信息。

(3) 邻居状态学习: COPE 机会网络编码提供两种常用的邻居状态学习方法。一种方法是根据网络中的路由状况来假设相邻中继节点可能存储的数据分组, 这种方法不需要在相邻节点之间传输除了有用信息之外的确认信息, 从而避免了带宽资源的浪费。但是该方法无法保证目的节点对数据分组的准确译码, 不太可靠。另一种方法相对可靠, 采用相邻节点通告分组信息的方式, 保证每个中继节点都了解周边节点存储的数据分组情况。但是该方法在启用机会侦听技术的情况下会占用大量的带宽资源。

### 2.3 对流链路网络编码

COPE 机会网络编码基于单跳, 即机会侦听、编译码和邻居状态学习都在直接相邻的中继节点之间进行。通过对其关键技术分析, 可以发现该编码方法往往会带来可靠性降低或带宽资源浪费的后果, 因此对该方法改进是十分有必要的。根据无人机链路具有高动态、低延迟和大数据量等特点, 结合 COPE 机会网络编码带来的优势和使用限制, 提出对流链路网络编码 CLNC (convection link network coding)。其编译码原则:

1) 网络编、译码只在邻居节点进行: 无人机链路网络对延迟的要求高, 基于多跳的机会网络编码虽然能提高网络吞吐量, 但也增加了网络延迟, 无法满足核心的指标。因此依然使用单跳机会网络编码, 即只在邻居节点进行编码;

2) 网络编、译码只在数据对流的条件下进行: 在交叉拓扑的网络中, 要求中继节点能够接收除它之外的所有节点广播的数据, 这在无人机链路网络中很难实现, 即使能够实现, 也是对通信链路不合理的使用。以具有 4 个中继节点的交叉拓扑为例, 最大监听路径  $L_{MAX}$  最少是中继传输路径  $L_R$  的  $\sqrt{2}$  倍, 对于 n 各节点利用同一中继进行网络编码, 最大监听路径  $L_{MAX}$  与中继传输路径  $L_R$  的关系<sup>[7]</sup>为

$$\sqrt{2 - 2\cos(\pi - \frac{2\pi}{n})} \cdot L_R \leq L_{MAX} \leq 2 \quad (6)$$

这是对无线发射功率的浪费, 对于能量有限的节点, 应避免这种情况的发生。另外, 数据发生对流的情况时, 节点无需进行机会侦听, 只需存储少量已获取的数据, 这样减少了中继节点的缓存并节约了能源;

3) 使用异或对数据进行编码, 不使用其他线性编码: 使用异或运算, 可以边接收数据边译码, 无需等待目的节点接收完整的数据包再进行译码, 可减少系统的延迟时间, 另外异或运算相对简单也节约能源;

4) 尽量对数据长度接近的数据进行编码: 当编码数据的长度不一致时, 对短数据包进行补零, 然后进行异或运算。如果长度差距太大, 补零太多会影响编码增益。当然, 这是在缓冲区中待发送配对成功的基础上的编码原则, 如果只有一对数据, 那将不考虑长度, 如果没有配对成功, 将不考虑编码;

5) 不是中继节点不进行编码: 出于省电考虑, 译码在所有节点进行, 编码只在中继节点进行, 不在边缘节点进行。

### 3 仿真与结果分析

限于篇幅, 仅利用网络仿真平台 NS2 建立最基本的同向高速多节点模型, 关键的参数设置见表 1。

由于无人机链路网络具有高动态、多跳和大容量这 3 个显著特点, 所以分别改变链路网络中节点的移动速度、跳数和数据包大小, 分别观察在采用 COPE 和 CLNC 两种编码策略情况下, 网络吞吐率的变化。

表 1 仿真参数设置

参数	设置
仿真平台	NS2
移动模型	同向高速
节点个数	20
跳数	1~5
数据包大小	300~700 Bytes
移动速度	20~40
节点分布范围	500×500m <sup>2</sup>
传输速率	1MB/s
传输成功率	0.8
链路时延	10 ms
仿真时间	100 s

#### 3.1 移动速度对网络吞吐率的影响

信道中传输的数据包大小设置为 500 Bytes, 观察的中继跳数设置为 3, 改变节点的移动速度, 得到仿真结果如图 5 所示。由结果可知, 当移动速度逐渐增大时, 两种编码策略下的网络吞吐率都呈下降趋势。相比之下 CLNC 编码策略下的网络吞吐率下降趋势较平缓, 说明该编码策略更加适用高动态的无人机链路网络。

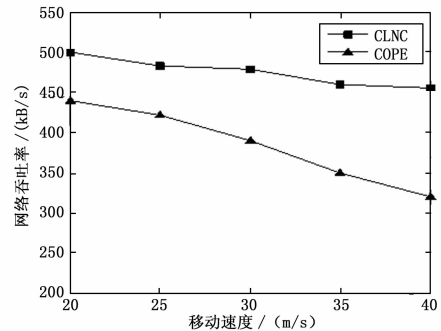


图 5 移动速度对网络吞吐率的影响

#### 3.2 跳数对网络吞吐率的影响

移动模型中节点的移动速度设置为 30 m/s, 数据包设置为 500 Bytes, 改变需要观察的中继跳数, 得到仿真结果如图 6 所示。由结果可知, 在单跳情况下, CLNC 编码策略实际上就是 COPE 编码策略。在多跳情况下, 随着观察的跳数逐渐增大, CLNC 编码策略下的网络吞吐率出现下降但是幅度较小, 而 COPE 编码策略下的网络吞吐率呈快速下降的趋势, 说明在具有多跳性质的无人机链路网络中 CLNC 编码策略更有优势。

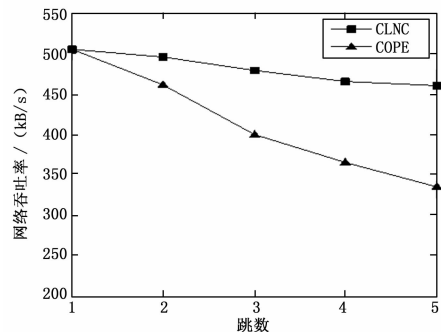


图 6 跳数对网络吞吐率的影响

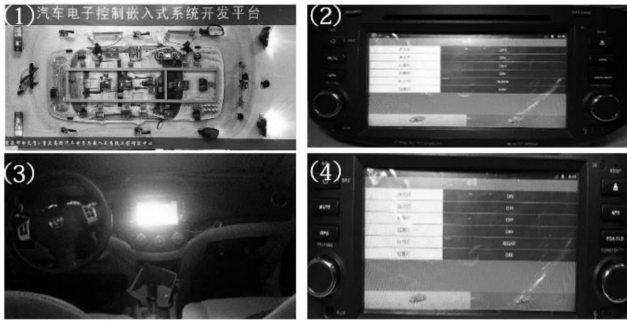


图5 实例验证

终端与车身 CAN 网络的分离, 最终达到一次开发、处处可用的目的。

进一步的研究工作, 首先开发除 CAN 外其他车联网所需的网络数据交互组件。其次, 车载终端中间件中的组件只能进行本地间通信, 还需实现不同终端间的组件通信, 共同实现更智能, 更复杂的应用功能。最后, 通信组件是与具体的网络协议相关的, 手工开发效率低且容易出错。需要开发相应的配置工具, 通过配置来自动生成通信组件。

#### 4 结束语

本文利用中间件技术使车联网应用组件化, 其中 CAN 通信组件屏蔽了不同车身 CAN 数据协议差异, 应用组件实现通用功能实体化, 并利用消息总线实现组件的集成。提高了车载

智能终端应用开发效率, 解决了通用性问题。此外还为应用开发者提供了相应的开发接口, 降低了车联网应用的开发难度。

#### 参考文献:

- [1] 黄作维, 周 明. GPS/GPRS 支持下的嵌入式车载终端的实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2205-2208.
- [2] 夏 峰, 陆珂伟, 陈启军. Telematics 系统研究与车载终端设计 [J]. 微机处理, 2009, 20 (4): 79-81.
- [3] NGTP 2.0 Compendium Version 1.0 [Z]. The NGTP Group. October, 2010.
- [4] Manasseh C, Sengupta R. Middleware to enhance mobile communications for road safety and traffic mobility applications [J]. IET intelligent transport systems, 2010, 4 (1): 24-36.
- [5] 杜 旭, 张 翔, 徐 晶. 嵌入式网络通信中间件的设计与实现 [J]. 计算机工程与科学, 2007, 29 (9): 23-25.
- [6] Ravichandran T, Rothenberger M A. Software reuse strategies and component markets [J]. Communications of the ACM, 2003, 46 (8): 109-114.
- [7] 赵花蕊, 周改会, 周 兵. 多现场总线融合的实时中间件的设计与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31 (2): 324-326.
- [8] 李雅博, 张俊智, 卢青春. 混合动力电动汽车车上 CAN 网络设计实时性分析 [J]. 汽车工程, 2005, 27 (1): 16-19.
- [9] Tindell K, Burns A, Wellings A J. Calculating controller area network (CAN) message response times [J]. Control Engineering Practice, 1995, 3 (8): 1163-1169.

(上接第 2565 页)

#### 3.3 数据包大小对网络吞吐率的影响

移动模型中节点的移动速度设置为 30 m/s, 观察的中继跳数设置为 3, 改变信道传输的数据包大小, 得到仿真结果如图 7 所示。由结果可知, 当信道中传输同样大小的数据包时,

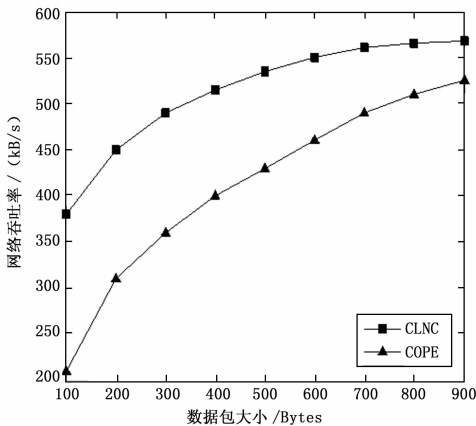


图7 数据包大小对网络吞吐率的影响

CLNC 编码策略下的网络吞吐率要比 COPE 编码策略下高。随着数据包的逐渐增大, CLNC 编码策略下的网络吞吐率更快的趋于稳定。又因为在实际的无人机链路网络中, 传输太大的数据包会造成严重时延, 所以在传输较大的数据包时网络吞吐率更快的稳定更有意义。所以, CLNC 编码策略能更好地应用在无人机链路网络。

#### 4 结论

本文首先根据无人机数据链网络具有的高动态、多中继和

大容量等特点, 结合任务执行时无人机编队组成的不同网络拓扑结构, 抽象出 3 种常见的无人机高动态多跳移动自组网模型。其次在 COPE 机会网络编码策略的基础上进行改进, 提出 CLNC 编码策略。最后利用网络仿真平台 NS2 建立同向高速多节点模型, 分别改变模型中节点的移动速度、跳数和数据包大小, 观察在采用 COPE 和 CLNC 两种编码策略下网络吞吐率的变化。仿真结果表明, CLNC 编码策略能够更好的应用在无人机链路网络。

#### 参考文献:

- [1] 刘 铭, 孙 轶. 国外军用无人机技术的发展分析 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30 (9): 22-27.
- [2] Ahlswede R, Ning C L, Yeung S - Y R, et al. Network information flow [J]. Information Theory, 2000, 46 (4): 1204-1216.
- [3] 徐新爱. 无人机海量飞行数据快速检索方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 4181-4183.
- [4] Li S, Yeung - Y R, et al. Linear network coding [J]. Information Theory, 2003, 49 (2): 371-381.
- [5] Le J, Lui J S, Chiu D M. DCAR: Distributed Coding - Aware Routing in Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9 (4): 596-608.
- [6] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the Air: Practical Wireless Network Coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16 (3).
- [7] Medard H T, Koetter M, Karger R, et al. A Random Linear Network Coding Approach to Multicast [J]. Information Theory, 2006, 52 (10).