

# 基于多信道绑定的应急终端协同方法

郑 涛, 蒙祖尧, 张宏科

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 在抗震救灾、抗洪抢险等应急通信专用网络场景下, 需要高可靠、低延时的通信服务性能, 提升信道利用率是一种提高通信服务性能的有效手段. 由于可以将多个连续或者非连续的信道聚合起来, 大幅提高信道利用率, 多信道绑定是面向未来突发应急响应通信网络中的一种潜在解决方案. 本文结合信道绑定思想, 针对应急通信专用网络场景中无中心设备的分布式网络结构特点和信息基础设施的易失性特点, 突破信道组合的传统思路, 提出一种基于多信道绑定的应急终端协同的新方法, 通过多终端相互协同的信道评估、基于任务类型的多信道分配和多信道绑定, 减小由于各个节点时空不同带来的信道状态不确定性, 提升分布式网络中的传输质量和信道利用率. 论文创新性地提出信道状态因子的概念, 通过信道中数据量的大小来量化信道的状态, 在此基础上进行信道评估. 通过软件定义无线电硬件平台与 MATLAB 联合仿真验证所提出方法的正确性, 并搭建两节点收发实验系统, 通过实际测试和实验数据分析证明系统实现的可行性和有效性.

**关键词:** 先进网络; 应急通信; 分布式网络; 多信道绑定; 信道资源管理; 多终端协同; 软件无线电

中图分类号: TN915.01

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)11-2645-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220052

## Emergency Terminals Coordination Method Based on Multi-Channel Bonding

ZHENG Tao, MENG Zu-yao, ZHANG Hong-ke

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In many special network application scenarios of emergency communication, such as disaster rescue and relief after earthquakes, floods, and other emergencies, a low delay and high reliability communication network is required. Improving channel utilization is an effective way to improve the performance of communication services. Since multiple continuous or non-continuous channels can be aggregated to greatly improve channel utilization, multi-channel bonding is a potential solution for future-oriented emergency response in the communication network. Combining the idea of channel bonding, this paper breaks through the traditional idea of channel combination, and proposes a method of multi-channel bonding based on multi-terminal cooperation, which faces the characteristics of the distributed network structure with no centralized device and the volatility of information infrastructure deployed in the emergency communication scenes. Through multi-terminal collaborative channel evaluation, task type-based multi-channel allocation and multi-channel bonding method, the uncertainty of channel state caused by the difference temporal-spatial constraints of each node is reduced, and the transmission quality and channel utilization in distributed networks are improved. The paper innovatively proposes the concept of channel state factor to quantify the state of the channel by the amount of data in the channel, and performs channel evaluation on this basis. A software-defined radio hardware platform with MATLAB software evaluates the correctness of the proposed theory. In addition, a two-node transceiver experimental system proves its feasibility and effectiveness through actual testing and experimental data analysis.

**Key words:** advanced network; emergency communication; distributed network; multi-channel bonding; channel resource management; multi-terminal coordination; software-defined radio

## 1 引言

自 20 世纪 90 年代末第一个无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)标准发布以来,无线网络影响着全球关键业务运营的方方面面,通过无线保真(Wireless Fidelity, Wi-Fi)来提供无线数据服务也变得越来越重要. 根据 Wi-Fi 联盟最近的一项报告,仅 2021 年, Wi-Fi6 设备的出货量就将达到 20 亿台,未来四年预计将达到 416 亿台<sup>[1]</sup>.

然而,在应急通信的专用网络下,需要低时延、高可靠性的通信服务. 同时,异构网络融合、无线环境复杂和信道挤占严重的问题也难以忽略<sup>[2,3]</sup>,现有的 Wi-Fi 网络无法满足其性能要求. 信道绑定技术(channel bonding)可以将多个连续或者非连续的信道聚合起来,大幅度提高传输速率,提高信道利用率,将是下一代 Wi-Fi 标准 IEEE 802.11be 的重点研究方向<sup>[4,5]</sup>,更是应急通信网络中的一种潜在解决方法.

支持多信道操作(multi-channel operation)是 IEEE 802.11 工作组成立以来,第一次深入地涉及 IEEE 802.11 标准的多信道协同与融合<sup>[6,7]</sup>. IEEE 802.11n-2009 标准提出过一种信道组合的概念,将 2 个连续的 20 MHz 信道组合在一起构成 40 MHz 频宽, IEEE 802.11ac 标准将信道组合扩展至 8 个连续的 20 MHz 信道.

在传统的多信道操作中,用户终端的会话可以从一个信道转移到另一个信道,但是,属于每个流量标识(Traffic Identification, TID)的 MAC 服务数据单元(MAC Service Data Units, MSDUs)只能使用单个信道,导致会话传输使用大量 MAC 开销. 在文献[8]中,作者提出基于多个主信道的动态信道绑定方法,使用多个主信道中同时发送属于同一个 TID 的数据帧,提高吞吐量,减少会话的等待时延.

同时,现有的无线局域网体系也仅支持相邻信道的 20/40/80/160 MHz 信道接入和访问<sup>[9]</sup>. 在文献[10]中,作者提出了一种基于概率的信道聚合方法,旨在基于 IEEE 802.11ax 协议进行非连续随机信道接入机制的实现,同时作者也指出,在连续和非连续多信道聚合中,合理的信道评估和信道选择是至关重要的. 在文献[11]中,作者考虑了在更大的带宽范围内使用的非连续信道聚合的信道穿刺技术,实现在同一频段范围内非连续信道的聚合. 但跨频段信道的多信道接入仍是一项巨大的挑战<sup>[12]</sup>.

此外, IEEE 802.11be 也新增了多接入点协同的功能. 随着用户和需求的不断增加,多信道融合在密集复杂的无线网络环境中难以协同,因此需要相邻接入点之间相互配合,如共享资源调度信息和动态的频谱分配<sup>[13]</sup>,以提高无线频谱的资源利用率.

因此,本文结合应急通信专用网络场景中信息基础设施的易失性特点,提出基于多信道绑定的多终端协同新方法,突破信道组合的传统思路,解决一些专用网络场景下时延高、信道利用率低、信道挤占严重等资源占用问题.

## 2 基于多信道绑定的多终端协同

### 2.1 多终端协同的多信道传输系统架构

传统的 Wi-Fi 系统通常由一个接入点和多个终端设备组成,多种终端设备接入到这一个接入点上,通过接入点来统一调度资源以及传输数据,形成一个集中式管理的中心化网络. 但是,应急通信专用网络中,通常是由分布在不同地理位置和实现不同功能的边缘终端设备组成的分布式网络. 因此本文考虑无中心设备的多终端系统架构,图 1 为通过 Wi-Fi 的 Ad-hoc 模式组建的多信道分布式网络架构.

由于网络覆盖中的每一个终端(terminal)的位置是随机变化的,每一个终端所处的电磁环境和信道环境都是实时变化的. 因此对于同一信道进行评估的结果可能会有差异. 就需要对每一个终端可接入的信道都进行动态的实时信道评估.

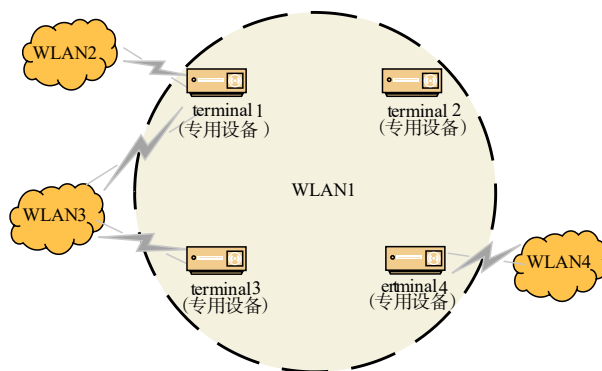


图1 多终端的多信道传输系统架构

同时,每个终端往往承载不同的任务类型,不同的业务对于信道的带宽、吞吐量等都有着不同的需求. 例如,对于大数据量的高清视频实时图传业务,使用 5 GHz 甚至 6 GHz 频段上的信道和吉比特的信道吞吐量才能满足其通信质量需求;而对于语音、文字或者一些控制指令等小数据量的任务,2.4 GHz 的单信道 20 MHz 带宽即可满足其通信需求. 因此,需要对终端不同的任务类型合理分配信道,在满足各种业务质量服务的同时,节约信道资源,减轻设备功耗.

### 2.2 多终端协同的信道评估方法

为了基于信道绑定实现终端协同,需要对每个终端所处的信道环境都有一个较好的性能评估,为此,本文设计了一组信道状态因子对信道环境进行量化,包

括非协同信道状态因子和协同信道状态因子这两个指标. 基于信道状态评估因子,设计了一种新的多终端信道评估方法,区别于 Wi-Fi 协议中单节点扫描,本文中信道评估是由网络中所有终端进行扫描,获取信道各参数联合计算实现的.

非协同信道状态因子在不考虑链路两端信道表现的情况下对信道质量进行量化;协同信道状态因子在考虑链路两端信道的情况下对信道质量进行量化.

为了表示信道因子,首先记  $p^x$  为终端  $x$  在不同频段内(如 2.4 GHz/5 GHz 频段)接收到信道平均数据包个数,即  $x$  在扫描时间内接收到各个信道的数据包总个数除以信道总数,如式(1)所示:

$$p^x = \frac{\sum_{n=1}^N \text{Prx}_n^x}{N} \quad (1)$$

记  $\varphi_n^x$  为信道活跃时间比,即信道活跃时间  $\text{Ta}_n^x$  与信道扫描时间  $\text{Ts}_n^x$  的比值,如式(2)所示:

$$\varphi_n^x = \frac{\text{Ta}_n^x}{\text{Ts}_n^x} \quad (2)$$

则非协同信道状态因子  $\eta_n^x$  由式(3)给出:

$$\eta_n^x = \frac{p^x}{\text{Prx}_n^x \times \varphi_n^x + p^x} \quad (3)$$

考虑到实际传输中有初始化状态和非初始化两种状态,而非初始化状态中,终端占用的信道中不仅有接收数据也有发送数据,因此,对于非初始化状态,非协同信道状态因子分为两种情况进行计算. 对于非占用的信道,非协同信道状态因子计算同式(3);对于占用信道,记任务实际传输时间  $\text{Tax}_i^x$ 、理论传输时间  $\text{Ttx}_i^x$ 、实际发送数据包数量  $\text{Ptx}_i^x$ ,则占用信道的非联合状态因子由式(4)给出:

$$\eta_i^x = \frac{p^x}{\text{Ptx}_i^x \times \varphi_i^x + p^x} \quad (4)$$

其中,  $\varphi_i^x$  为理论传输时间和实际传输时间的比值,即

$$\varphi_i^x = \frac{\text{Ttx}_i^x}{\text{Tax}_i^x} \quad (5)$$

基于非协同信道状态因子,针对每个终端  $x$  可以生成其不同频段的信道评估列表  $\text{table}^x$ .

在非协同信道状态因子计算完毕后,根据信道两端终端的情况,计算协同信道状态因子,即对每一条  $x \rightarrow y$  链路上的  $\text{table}^x$  和  $\text{table}^y$  联合协同处理,即需要将终端  $y$  的信道状态对终端  $x$  的影响也计算在内,即根据式(6)计算得到协同信道状态因子  $\eta_n^{x \rightarrow y}$ :

$$\eta_n^{x \rightarrow y} = \frac{\eta_n^x + \eta_n^y}{2} - \frac{|\eta_n^x - \eta_n^y|}{\eta_n^x + \eta_n^y} \quad (6)$$

进而根据协同信道状态因子  $\eta_n^{x \rightarrow y}$  建立每一条  $x \rightarrow y$  链路的协同信道评估列表  $\text{table}^{x \rightarrow y}$ .

具体的评估过程如算法 1 所示,图 2 给出了评估流程示意图.

**算法 1 多终端协同的信道评估**

```

输入:标志位 flag,信道扫描时间  $\text{Ts}_n^x$ 、信道活跃时间  $\text{Ta}_n^x$ 、信道活跃时间内可以检测到的数据包个数  $\text{Prx}_n^x$ 、任务实际传输时间  $\text{Tax}_i^x$ 、理论传输时间  $\text{Ttx}_i^x$ 、实际发送数据包数量  $\text{Ptx}_i^x$ .
输出:协同信道评估列表  $\text{table}^{x \rightarrow y}$ .
if flag=0 (传输属于初始化阶段){
    根据式(3),利用  $\text{Ts}_n^x$ 、信道活跃时间  $\text{Ta}_n^x$ 、信道活跃时间内可以检测到的数据包个数  $\text{Prx}_n^x$  计算得到  $\eta_n^x$ ,并建立  $\text{table}^x$ ;
}
else (传输属于非初始化阶段){
    对于非占用信道,根据式(3),利用  $\text{Ts}_n^x$ 、信道活跃时间  $\text{Ta}_n^x$ 、信道活跃时间内可以检测到的数据包个数  $\text{Prx}_n^x$  计算得到  $\eta_n^x$ ,并建立  $\text{table}^x$ ;
    对于占用信道,根据式(4),利用  $\text{Ts}_n^x$ 、信道活跃时间  $\text{Ta}_n^x$ 、信道活跃时间内可以检测到的数据包个数  $\text{Prx}_n^x$  计算得到  $\eta_n^x$ ,并建立  $\text{table}^x$ ;
}
根据式(6)计算协同信道状态因子  $\eta_n^{x \rightarrow y}$ ,构建  $\text{table}^{x \rightarrow y}$  并输出;
end
    
```

基于该评估算法,可得到本次的协同信道评估列表  $\text{table}^{x \rightarrow y}$ ,然后再执行下一轮次的计算. 同时,假设信道状态阈值为  $\bar{\eta}$ ,即可筛选出传输质量良好的信道.

图 2 展示了该算法的大致过程,其中,2.4 GHz 和 5 GHz 的信道评估和列表建立均是独立计算的. 信道状态因子表明了该信道负载情况和综合质量,其数值越大,说明信道当前的传输性能越好.

同时,  $\eta_n^{x \rightarrow y}$  也考虑了同一个信道在链路两端的信

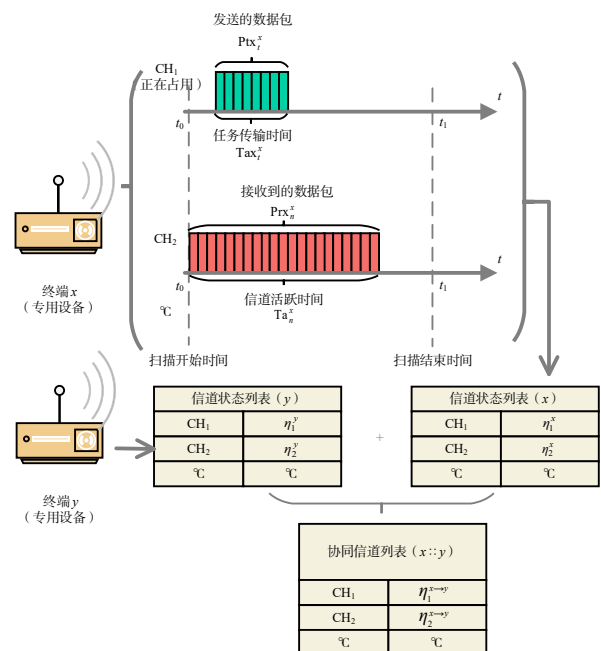


图 2 多终端协同的信道评估算法

道状态情况,若信道  $n$  在终端  $x$  表现较好但是在终端  $y$  干扰很大,也会影响其协同信道状态的情况. 因此,  $\eta_n^{x \rightarrow y}$  的数值越大,则在  $\text{table}^{x \rightarrow y}$  中的优先级越大. 而协同的过程是通过请求和应答的单播帧的方式在公共信道中完成的.

### 2.3 基于任务类型的多信道分配机制

2.4 GHz 和 5 GHz 两个不同的工作频段在信道特征上存在较大的区别:

2.4 GHz 工作频段的频率较低,在空气和障碍物中的衰减较小,因此传播距离相对更远,信号的穿透能力相对更强. 但是 2.4 GHz 的信道频带较窄(每个单独的信道仅 20 MHz),数据率较低. 适合长距离/低速率通信.

5 GHz 工作频段的单信道带宽较大,可以支持更高速率的无线通信业务. 且 5 GHz 频段的无线环境比较干净,干扰较少. 但是 5 GHz 工作频段的频率较高,在空气和障碍物中传播时的衰减较大,覆盖范围比 2.4 GHz 小. 适合短距离/高速率通信.

在接入信道发送数据之前,对任务的数据量大小、优先级等多个方面进行前量化评估,然后根据评估结果和信道特性选择合适的信道进行传输. 例如,应急中大数据量的现场影像等数据通过 5 GHz 频段的信道发送,而小数据量的语音通话、文字图片传输等任务通过 2.4 GHz 频段的信道发送. 相应地,在根据 2.2 节得出的终端协同信道评估列表后,每一个新任务都将会根据其任务类型选择一个传输质量良好的信道 ( $\eta_n^{x \rightarrow y} > \bar{\eta}$ ) 进行传输.

## 3 仿真分析与硬件实验验证

### 3.1 系统架构

为了验证上述终端间协同的信道评估、信道分配和信道绑定机制的有效性,在本文中,我们利用了 MATLAB 的算法仿真和基于软件无线电的硬件实现. 对于多信道绑定的技术实现,本文使用了软件无线电来代替多天线的射频前端,其不仅支持 2.4 GHz/5 GHz 的多频段通信,还支持大带宽的射频收发.

在仿真实验中,我们通过随机函数的形式在不同的信道内随机产生本系统数据包和同频段其他无线系

统的干扰数据包,通过大量的随机和计算观察信道状态因子的变化情况.

在实验验证中,我们通过两台电脑和两台基于软件定义无线电的专用设备搭建了硬件环境,实测多终端的多信道传输系统,如图 3 所示. 同时结合 MATLAB 做联合仿真,证明多终端协同的信道评估机制的理论正确性. 其中,专用设备作为执行多信道传输的网关设备协助电脑进行多任务多信道传输,通过 FPGA 和软件定义无线电技术来实现多信道的绑定和实时切换.

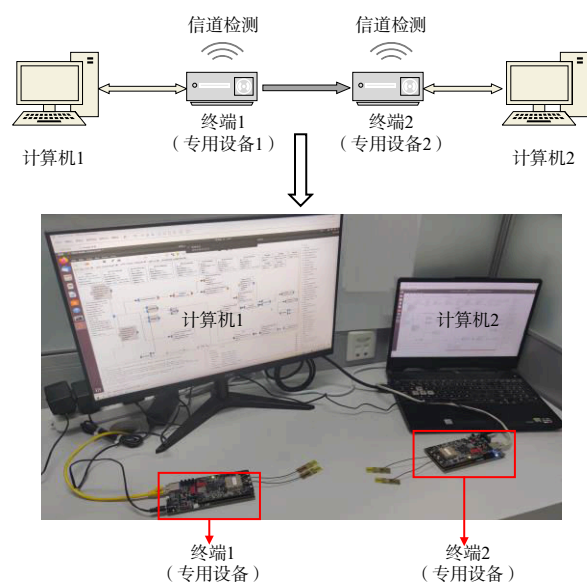


图3 硬件环境对照图

在信道扫描的方式中,我们采用轮询的方式扫描信道,信道扫描时间即  $Ts_n^x$  设置为 15 s,每一轮信道评估的时间周期设置为 10 min. 同时,为了避免对整个无线环境中其他网络信息产生近邻信道干扰,选取了无线接入点常用的几个正交信道进行实验,即:2.4 GHz 频段的 1 号信道、6 号信道和 11 号信道,5 GHz 频段的 44 号信道、48 号信道、52 号信道.

### 3.2 基于 MATLAB 的算法仿真

首先,我们通过 GNU Radio 联合 MATLAB 进行算法有效性仿真两个节点间协同的过程. 我们通过软件无线电平台的实测,得到了上述各个信道在初始情况下的平均每秒数据包个数,如表 2 所示:

表2 各个信道初始平均每秒数据包个数

| 频段      | 信道编号 | 平均每秒数据包个数 | 频段    | 信道编号 | 平均每秒数据包个数 |
|---------|------|-----------|-------|------|-----------|
| 2.4 GHz | CH1  | 42        | 5 GHz | CH44 | 51.2      |
|         | CH6  | 171       |       | CH48 | 27.4      |
|         | CH11 | 82        |       | CH52 | 43.3      |

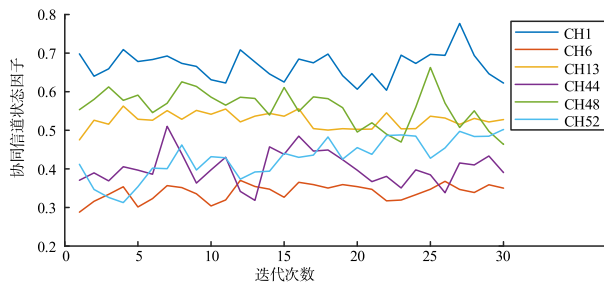
因此,这里我们假设节点在每个信道中可以接收到的数据包个数是随机的,当采样的次数足够大时,根

据大数定律,可以使用满足上述测量平均值的高斯随机过程来近似.

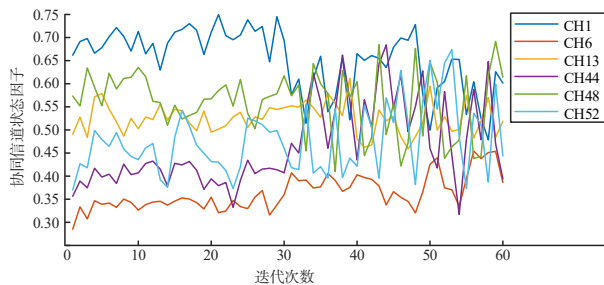
因此,通过 MATLAB 随机函数在两节点的每个信道上生成随机数,代表其分别检测到的数据包个数,同时每隔 15 s,节点会随机选择有或没有新任务产生,如果有,就会通过上述的信道分配方法在信道状态最好的信道中为两节点分别增加一定数量的数据包个数.

如图 4(a)为节点未引入协同的情况下,两个节点在各个信道内检测到的协同信道状态因子变化情况.各个信道的信道状态较为稳定,表明了“信道状态因子”这一概念在本算法中具有一定的稳定性.由于 CH1、CH13 和 CH46 都是可接收到数据包相对最少的信道,因此也拥有更大的信道状态因子,与其他三条信道出现了明显的分层.即原本空闲的信道在之后的每一次检测中都保持数据包较少和活跃度较低的状态,而原本忙碌的信道在之后的每一次检测中都能接收到大量的数据包和较高的活跃时间.因此,我们可以认为这些信道是没有被充分利用的信道.

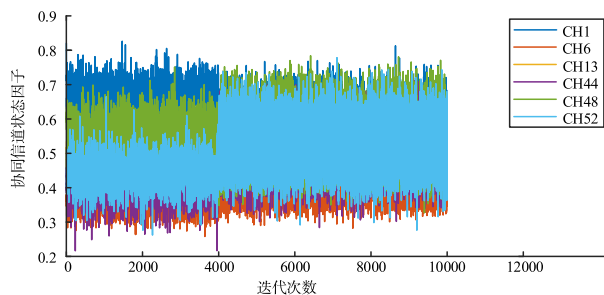
在 30 次无信号传输的迭代后,我们根据信道状态



(a) 不引入协同时各信道协同状态因子变化情况



(b) 协同分配信道后各信道协同状态因子变化情况



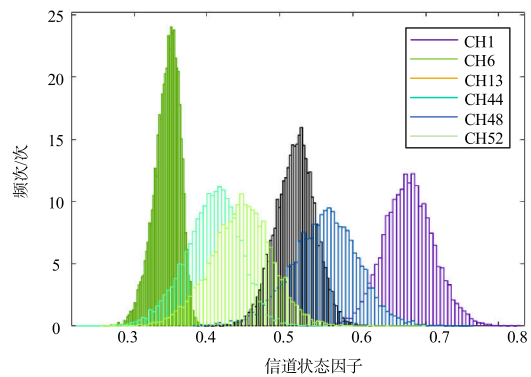
(c) 协同分配信道前后信道状态因子热力图

图 4 协同分配前后各信道协同状态因子变化情况

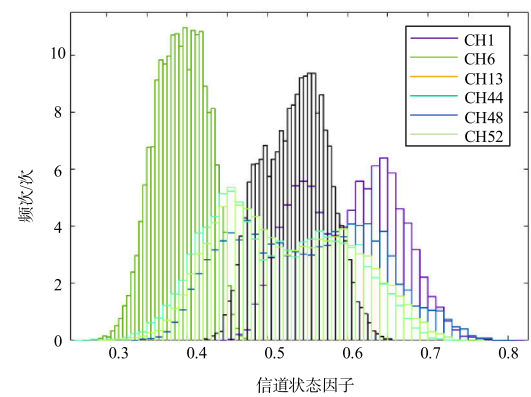
加入随机信号后,观察各条信道的状态因子变化情况,如图 4(b)所示.

在第 30 次更新迭代之后,各个信道状态因子的曲线出现了明显的收敛,除了 CH1 以外,其余信道的信道状态因子均有所上升,同时各条曲线出现交叠情况,说明各条信道都得到了更为充分地利用.当我们逐步增大迭代次数,可以得到一个各个信道的信道状态因子出现频次的热力图和概率分布图,如图 4(c)和图 5 所示.

上述仿真结果表明,在两节点间多次协同后,两节点间链路上的信道状态因子出现了收敛的情况,这说明随着时间的推移或者节点数目的增多,本文以信道状态因子为导向的信道分配方法可以使该条信道充分利用起来,该条信道状态在经过多次算法迭代后呈现均衡和收敛的趋势.



(a) 协同前各信道状态因子概率分布



(b) 协同后各信道状态因子概率分布

图 5 协同分配信道前后信道状态因子概率分布

### 3.3 硬件实现和性能评估

对应于上述的理论仿真,这里我们设计了两节点对端协同的实验环境,通过两节点间多次的信道检测以及根据任务分配信道,来测试信道状态因子的变化

情况和收敛状况. 其中,终端 1 和终端 2 分别为两台专用设备,每台设备各自连接一台电脑. 实验环境为:终端 2 正在执行大任务量的数据传输任务,在数秒后,终端 1 将会有小任务量的数据发送至终端 2,同时终端 1

与终端 2 可以通过一边发送一边检测的方式接收到其所处的复杂环境中的各种数据帧. 如图 6、表 3、表 4 分别为初始化的信道扫描数据和初始化的信道评估列表.

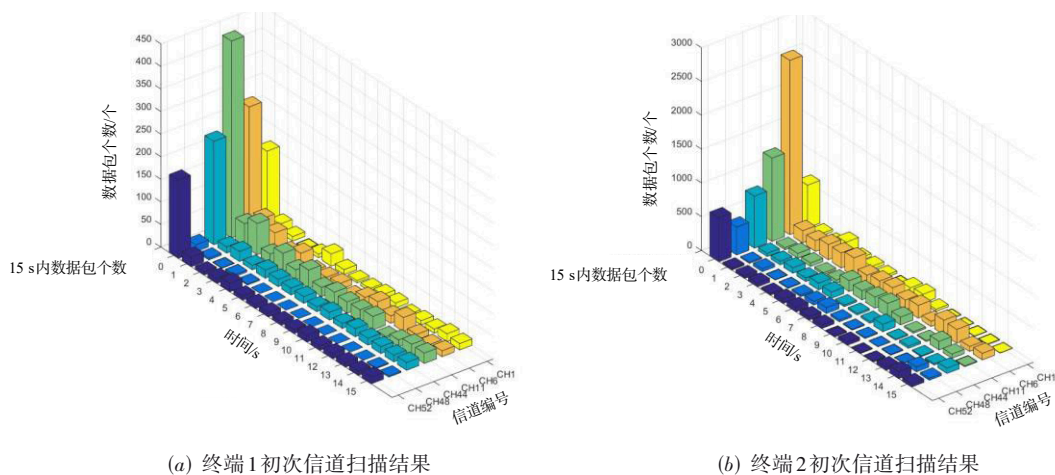


图 6 初次信道扫描结果

表 3 终端 1 和终端 2 的信道评估列表

| 频段      | 信道   | 信道状态因子 $\eta_n^1$ | 信道状态因子 $\eta_n^2$ |
|---------|------|-------------------|-------------------|
| 2.4 GHz | CH1  | 0.64238           | 0.70104           |
|         | CH6  | 0.51413           | 0.36484           |
|         | CH11 | 0.40028           | 0.54567           |
| 5 GHz   | CH44 | 0.37772           | 0.44267           |
|         | CH48 | 0.95862           | 0.59687           |
|         | CH52 | 0.44551           | 0.48413           |

表 4 协同后的信道评估列表

| 频段      | 信道编号 | 协同信道状态因子 $\eta_n^{1 \rightarrow 2}$ |
|---------|------|-------------------------------------|
| 2.4 GHz | CH1  | 0.64988                             |
|         | CH6  | 0.35456                             |
|         | CH11 | 0.39612                             |
| 5 GHz   | CH44 | 0.37060                             |
|         | CH48 | 0.66146                             |
|         | CH52 | 0.44405                             |

通过扫描结果可以发现,在执行多信道分配和绑定之前,各种任务数据量的传输往往仅使用少数几个信道,例如 2.4 GHz 的 6 号信道. 并且普通的终端设备也不具备信道切换的功能,就出现了这种信道占用高度集中的情况.

同时,在初次信道评估的结果中,CH1 和 CH48 拥有最大的信道评估因子,说明其在两个终端中信道状态均表现最好,因此将作为下一次任务传输的主信道,分别执行大数据量的视频传输任务和小数据量的普通

文件传输任务. 而 CH6 与 CH44 信道表现较差,将不作为接下来各个 Ter 传输占用的信道. CH11 与 CH52 则分别作为 2.4 GHz 和 5 GHz 频段上的两个辅助信道,协助进行通信任务.

如图 7 为第二次信道扫描后的结果. 其中 CH48 作为 5 GHz 视频传输任务的主信道,拥有大量的突发数据,对应 CH52 的任务量也大量增加,但是由于其理论数据传输时间和实际数据传输时间存在的影响,因此信道状态因子仍然大于信道状态阈值  $\bar{\eta}$ ,说明第二次的信道评估结果较为理想.

对应地,在第二次信道评估中,各个信道的状态因子如表 5 所示,各个信道的状态有所改善,承载大数据量通信任务的信道有所下降但仍在阈值范围内.

在下一次的信道分配中,本次未完成的视频传输任务仍然通过 CH48 发送,下一个的大数据量任务出现后,将通过 CH44 进行传输,减轻 CH48 的信道负载.

同时,通过将视频任务从 2.4 GHz 频段切换到 5 GHz 频段的多信道绑定进行传输之后,其实际传输速率提升了 1.4 倍.

在下一个 15 s,终端 1 新的传输任务为普通的文件传输任务,因此将选取 2.4 GHz 频段上的 CH1 作为传输信道. 随后我们得到第三次的信道评估列表如表 6 所示.

在第三次信道列表更新后,即出现第二次新任务之后,CH1 的状态因子明显下降,而 CH6 和 CH11 的状态因子都有明显的上升,而 5 GHz 频段上由于没有任务变化,因此呈现稳定的状态.

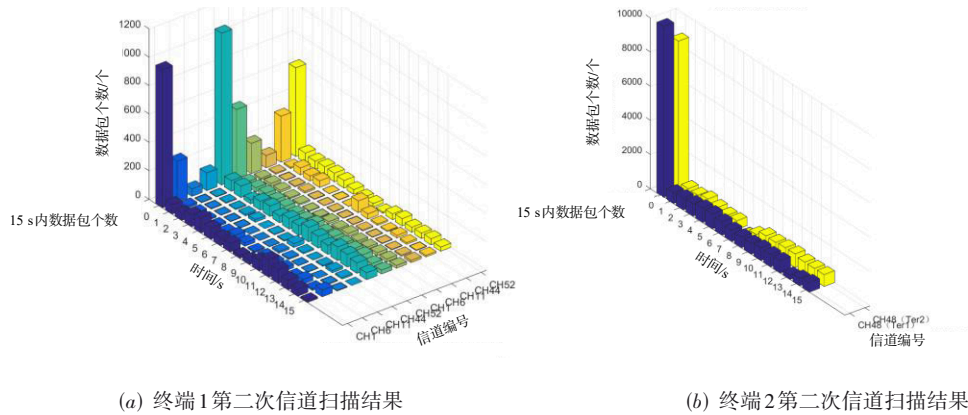


图 7 第二次信道扫描结果

表 5 第二次的协同信道评估列表

| 频段      | 信道编号 | 协同信道状态因子 $\eta_n^{1 \rightarrow 2}$ |
|---------|------|-------------------------------------|
| 2.4 GHz | CH1  | 0.70535                             |
|         | CH6  | 0.38578                             |
|         | CH11 | 0.54648                             |
| 5 GHz   | CH44 | 0.80420                             |
|         | CH48 | 0.40343                             |
|         | CH52 | 0.67270                             |

表 6 第三次的协同信道评估列表

| 频段      | 信道编号 | 协同信道状态因子 $\eta_n^{1 \rightarrow 2}$ |
|---------|------|-------------------------------------|
| 2.4 GHz | CH1  | 0.37240                             |
|         | CH6  | 0.47949                             |
|         | CH11 | 0.63738                             |
| 5 GHz   | CH44 | 0.82145                             |
|         | CH48 | 0.39514                             |
|         | CH52 | 0.66430                             |

### 4 结论

本文提出了一种多终端协同的多信道绑定机制,实现了分布式多终端网络下的基于任务类型的多信道分配和多信道绑定技术.同时,还提出了一种多终端协同的信道评估算法,通过该算法扫描设备终端在复杂无线环境下的多信道占空比与数据包数量进行多信道质量评估.最后,通过实验测试和理论仿真表明了该方案具有可行性和有效性.

#### 参考文献

[1] Alliance Wi-Fi. Wi-Fi Alliance Wi-Fi predictions for 2021 [EB/OL]. (2021-1-11)[2021-11-30]. <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-wi-fi-predictions-for-2021>.

[2] ZHENG T, GIDLUND M, AKERBERG J. Wirarb: A new

MAC protocol for time critical industrial wireless sensor network applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16 (7): 2127-2139.

[3] DEEPAK G C, LADAS A, SAMBO Y A, et al. An overview of post-disaster emergency communication systems in the future networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(6): 132-139.

[4] LOPEZ-PEREZ D, GARCIA-RODRIGUEZ A, GALATI-GIORDANO L, et al. IEEE 802.11be extremely high throughput: the next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11ax[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(9): 113-119.

[5] YANG M, LI B, YAN Z, et al. AP coordination and full-duplex enabled multi-band operation for the next generation WLAN: IEEE 802.11be(EHT)[C]//2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing(WCSP). Xi'an: IEEE, 2019: 1-7.

[6] DENG C, FANG X, HAN X, et al. IEEE 802.11 be Wi-Fi 7: new challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2136-2166.

[7] SHISHIR G, SONIGRA R, SESHADRI N, et al. Hybrid-ARQ protocol for next generation Wi-Fi systems[C]//2021 International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS(COMSNETS). Bangalore: IEEE, 2021: 342-350.

[8] Inc MediaTek. Enhanced multi-band/multi-channel operation [EB/OL]. (2019-5-14)[2021-11-30]. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-0766-00-01be-enhanced-mu-lti-band-multi-channel-operation.pptx>.

[9] WANG W, ZHANG F, ZHANG Q. Managing channel bonding with clear channel assessment in 802.11 networks [C]//2016 IEEE International Conference on Communications(ICC). Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 1-6.

[10] HAN M, CHEN Z, CAI L X, et al. A deep reinforcement

learning based approach for channel aggregation in IEEE 802.11ax[C]//2020 IEEE Global Communications Conference. Taipei: IEEE, 2020: 1-6.

- [11] KIM S, YUN J-H. Wider-bandwidth operation of IEEE 802.11 for extremely high throughput: challenges and solutions for flexible puncturing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 213840-213853.
- [12] 薛青, 方旭明. 一种 WiFi 多信道聚合的高速同步回传方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(02): 335-341.  
XUE Qing, FANG Xuming. High-speed synchronous backhaul method with aggregation of multiple WiFi channels[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(02): 335-341. (in Chinese)
- [13] 刘焕淋, 蒲欣, 陈勇, 等. 室内 VLC-WiFi 异构网络基于动态载波分配的干扰管理策略[J]. 电子学报, 2021, 49(10): 1920-1926.  
LIU Huan-lin, PU Xin, CHEN Yong, et al. Interference management strategy based on dynamic carrier allocation for indoor VLC-WiFi heterogeneous network[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(10): 1920-1926. (in Chinese)
- [14] ZHENG T, MENG Z, GU Q, et al. A preliminary prototype based on biological mimicry for hardware data acquisition[C]//2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation(ETFA). Vasteras, Sweden: IEEE, 2021: 1-4.



**张宏科** 男, 1957年9月出生于山西省大同市, 中国工程院院士. 现为北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 移动专用网络国家工程研究中心主任. 主要研究方向为新一代信息网络理论与关键技术.

E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn

#### 作者简介



**郑涛** 男, 1983年7月出生于北京市. 现为北京交通大学电子信息工程学院副教授、博士生导师. 主要研究方向为新型网络理论、关键技术和应用.

E-mail: zhengtao@bjtu.edu.cn



**蒙祖尧** 男, 1998年11月出生于新疆伊犁. 现为北京交通大学电子信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向为网络通信技术.

E-mail: 20125076@bjtu.edu.cn