

一种 WiFi 多信道聚合的高速同步回传方法

薛青 方旭明*

(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031)

摘要: 为满足疯狂增长的数据业务需求,近年来蜂窝基站的部署越来越趋于小型化和密集化,这就对回传技术性能提出了更高的要求。该文将 WiFi 作为 5G 网络中的一种无线回传技术,提出一种基于 WiFi 多信道聚合的高速同步回传方案。现有 WiFi 协议(如 IEEE 802.11n/ac)采用静态或动态信道绑定技术可将多个具有连续频谱的信道聚合为单一宽信道,从而提高网络容量。但是,静态绑定方式不够灵活,动态绑定方式在密集用户分布下也很难发挥其优势。该文则通过在单一网络节点上配置多射频实现非连续频谱的 WiFi 多信道聚合,其在扩展传输带宽,提升网络性能的同时,也可以有效克服 802.11n/ac 中信道绑定方式的弊端。方案主要包括 3 部分:多节点联合信道扫描、多信道同步收发控制及干扰检测。理论分析和仿真结果表明,所提非连续频谱的 WiFi 多信道聚合方案的回传性能优于 802.11n/ac 中连续频谱聚合方案,且多信道同步传输能有效抑制回传网络中的邻道干扰。最后,由搭建的原型验证系统证明了所提方案的可行性及有效性。

关键词: 5G; 多信道回传; 同步传输; 邻道干扰

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)02-0335-07

DOI: 10.11999/JEIT160375

High-speed Synchronous Backhaul Method with Aggregation of Multiple WiFi Channels

XUE Qing FANG Xuming

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: As the substantial growth of data traffic over the past few years, the deployment of cellular base stations tends to be smaller and denser which puts forward higher requirements for backhaul techniques. In this study, WiFi is taken as a backhaul technique in 5G networks, and then a high-speed synchronous backhaul solution is proposed with aggregation of multiple WiFi channels of which the spectrum is non-continuous. Although IEEE 802.11n/ac can achieve channel aggregation with static/dynamic channel bonding scheme, the spectrum of these channels must be continuous. Moreover, static channel bonding is not flexible enough and dynamic channel bonding rarely has chance to be implemented when devices are deployed densely. The proposed solution can not only extend transmission bandwidth and improve network capacity of 5G backhaul networks, but also overcome defects of channel bonding in 802.11n/ac. Both analytical results and simulations show that the performance of the proposed solution is better than the traditional channel bonding and it can reduce adjacent channel interference among multiple channels in 5G backhaul networks. Meanwhile, the effectiveness and feasibility of the proposed solution are proved by the prototype verification system.

Key words: 5G; Multi-channel backhaul; Synchronous transmission; Adjacent channel interference

1 引言

为了提升数据服务能力,近年来城市内蜂窝基站越来越趋于小型化和密集化部署,这就使得连接

蜂窝基站的回传链路更加密布。虽然有线回传链路(如,铜、光纤等)具有可靠的稳定性,但由于其基础设施的建设及维护需要投入大规模的人力物力及财力,并且有线回传链路的安装会涉及私有房产和土地敷设等问题,若未来 5G 网络中全部回传链路均布设为有线线缆显然是不可取的。在这种背景下,使用无线回传链路来取代部分有线线缆成为一种有效可行的方案。这其中又以成本低廉、易于实现的 WiFi 技术最受青睐^[1]。因此,本文致力于研究如何利用 WiFi 技术实现 5G 网络中的高速无线回传。

收稿日期: 2016-04-19; 改回日期: 2016-08-25; 网络出版: 2016-10-21

*通信作者: 方旭明 xmfang@swjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61471303), 欧盟 FP7 QUICK 项目(PIRSSES-GA-2013-612652)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471303), EU FP7 QUICK Project (PIRSSES-GA-2013-612652)

IEEE 802.11n/ac^[2,3]利用静态/动态信道绑定技术(Channel Bonding, CB)^[4]实现了多个连续 20 MHz 信道的聚合。虽然 CB 可大幅提升传输速率,但其也存在一定的不足:静态 CB 灵活性不够且存在由于部分频段质量不佳而导致系统整体性能下降的问题;动态 CB 虽具灵活性,但在用户密集场景下一般很难找到几个连续的空闲信道。文献[5]对各无线网络中 CB 技术进行了归纳并指出了其存在的缺陷。文献[6]通过将信道划分为更窄的子信道使频谱聚合更具灵活性,但实现复杂度高。为克服连续频谱信道聚合的不足,提高频谱利用率,部分研究者对如何实现非连续频谱信道的聚合进行了探讨,但其中大多数方案的可操作性不强。如文献[7]提出的非连续频谱 CB 方案需对 WiFi 协议中帧结构及 MAC 作一定的修改,不易实现。同时,现有 WiFi 协议中 AP/STA 采用单射频单信道配置,而随着无线用户对 QoS 及 QoE 要求的提高,利用单信道进行回传已越来越难满足这一需求。随着无线射频收发器硬件成本的降低和相关技术的发展,在同一个 AP/STA 上装备多射频利用多信道传输正在逐渐成为可以接受的提高 5G 网络性能的技术选择。目前绝大多数考虑利用多射频多信道的研究均是针对无线 Mesh 网络的^[8-10],而对其在回传网络中的应用研究甚少。

本文第 2 节介绍了 5G WiFi 多信道聚合的高速回传系统架构;第 3 节详细描述了所提高速同步回传方案,包括:多节点联合信道扫描、多信道同步控制及基于系统吞吐量及信道占空比信息的多信道干扰检测;最后,本文所提方案进行了性能仿真并通过搭建的原型验证系统测试了其有效性及可行性。

2 WiFi 多信道回传系统架构

对于 5G 网络中 P2P WiFi 多信道回传系统,假设 AP 与 STA 上均可配置 N 个射频器(如, N 张无线网卡),每个射频器分别工作在 5 GHz 频段的不同 WiFi 信道上,并且两节点不具有移动性。为便于说明,本文将 AP 与 STA 均看作 N 个位于同一位置的虚拟节点(virtual AP/STA, vAP/vSTA)且各 vAP/vSTA 上均只配置有一个射频器,如图 1 所示,其中,各 vAP 与 vSTA 保持一一对应的关系。

由于回传网络中 vAP/vSTA 是集中布置的,若不进行有效的收发控制,当多信道同传时会产生严重的邻道干扰(Adjacent Channel Interference, ACI)^[11,12],致使吞吐率下降。本文通过将同一节点上的多个虚拟节点控制在相同的收发状态来抑制这

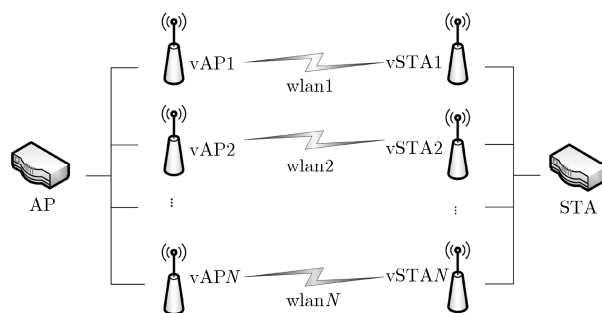


图 1 5G 网络中 WiFi 多信道回传系统架构

种干扰。另外,由于 WiFi 网络采用 CSMA/CA 机制,即只有当节点检测到信道处于空闲时才能发送信息,那么,一个处于发送状态的虚拟节点(如, vAP1)可能会引起同一节点上的另一虚拟节点(如, vAP2)的“假载波侦听”。如当 vAP1-vSTA1 在信道 A 上通信时,可能会有部分能量泄露到 vAP2-vSTA2 所在信道 B 上,导致 vAP2 判定信道 B 处于忙碌状态从而延迟发送,而实际上此时信道 B 是空闲的。本文通过多信道同步传输来避免出现这种情况,以提高频谱的利用率。

3 WiFi 多信道聚合的高速同步回传方案

3.1 多节点联合信道扫描机制

由于 5G 回传网络中 AP 与 STA 所处地理位置不同,其所处电磁环境也不同,那么二者对于同一信道进行扫描的结果可能会有差异。因此,为了能够选择到对 AP 与 STA 都有较好传输性能的回传信道,区别与 WiFi 协议中单节点扫描,本文中信道扫描是由 AP 与 STA 联合实现的,如算法 1 所述。

算法 1 联合信道扫描

(1)判断本次是否为初始化扫描。若是,则执行下一步;若否,则转向步骤(3);

(2)vAP1 与 vSTA1 分别对 5 GHz 频段上所有信道(个数记为 M_{To})进行扫描,并记录信道 m ($1 \leq m \leq M_{To}$) 的扫描数据 $active_time_m^{AP/STA}$, $busy_time_m^{AP/STA}$ 与 $tx_time_m^{AP/STA}$; 转向步骤(4);

(3)vAP1 与 vSTA1 分别扫描除 M_{Ba} 个回传信道以外的其他各信道,并记录信道 m ($1 \leq m \leq M_{To} - M_{Ba}$) 的扫描数据 $active_time_m^{AP/STA}$, $busy_time_m^{AP/STA}$ 与 $tx_time_m^{AP/STA}$;

(4)vAP1 与 vSTA1 分别计算信道 m ($1 \leq m \leq$

$M = \begin{cases} M_{To}, & \text{初始化扫描} \\ M_{To} - M_{Ba}, & \text{其他} \end{cases}$ 的干扰因子:

$$\alpha_m = \frac{busy_time_m^{AP} - tx_time_m^{AP}}{active_time_m^{AP} - tx_time_m^{AP}} \quad (1)$$

$$\beta_m = \frac{\text{busy_time}_m^{\text{STA}} - \text{tx_time}_m^{\text{STA}}}{\text{active_time}_m^{\text{STA}} - \text{tx_time}_m^{\text{STA}}} \quad (2)$$

从而可得 AP 与 STA 各自的信道扫描列表 list A 与 list B;

(5)若步骤(1)中判断为是,则执行下一步;若否,则转向步骤(8);

(6)AP 在 list A 中为 vAP1 选取满足条件 $\min\{\alpha_m\}$ 的信道(若有多个满足该条件,则任选其一);

(7)vSTA1 连接 vAP1 并上传 list B; 转向步骤(9);

(8)STA 通过 vSTA1 以外的虚拟节点(如 vSTA2)上传 list B;

(9)AP 通过函数 $f_m(\eta_1, \eta_2)$ 对 list A 与 list B 作联合处理,即

$$f_m(\eta_1, \eta_2) = \eta_1(\alpha_m + \beta_m) + \eta_2(|\alpha_m - \beta_m|) \quad (3)$$

其中, $0 \leq \eta_1 \leq 1$, $0 \leq \eta_2 \leq 1$ 且 $\eta_1 + \eta_2 = 1$, 可得联合扫描列表 list C;

(10)假设干扰阈值为 θ , 统计 list C 中信道质量良好的信道个数 M_G 。

令 $M_G = 0$;

For $m = 1$ to M **do**

If $f_m(\eta_1, \eta_2) \leq \theta$ **then**

$M_G = M_G + 1$;

End if

End for

(11)将上述 M_G 个信道按干扰因子由小到大排序并记录相应的信道编号 Ch_i^{Num} ($1 \leq i \leq M_G$), 得可用信道列表 list D。

其中, $\text{active_time}_m^{\text{AP/STA}}$, $\text{busy_time}_m^{\text{AP/STA}}$ 与 $\text{tx_time}_m^{\text{AP/STA}}$ 分别表示 AP/STA 扫描信道 m 所得的活跃时间(即观测时间)、处于“忙”状态的时间与发送状态的时间, η_1 和 η_2 为干扰因子计算权重。步骤(9)中干扰因子之和越小,表明该信道综合质量越好;相应地,干扰因子之差越小,表明该信道对回传两端而言的传输性能差异越小。因此, $f_m(\eta_1, \eta_2)$ 的值越小,表明 AP 与 STA 在信道 m 上的回传性能越好。

在 AP 与 STA 完成初始化联合信道扫描得到 list D 后,由 AP 为回传网络进行统一的信道分配:

若 $M_G > N$,为降低 ACI, (1)选取 $f_m(\eta_1, \eta_2)$ 尽量小的信道; (2)所选的多个信道相隔尽量远。

若 $M_G \leq N$,则将此 M_G 个信道作为回传信道。特别地,若 $M_G < N$,可优先为位置相互隔开的 vAP/vSTA 分配信道,这样可从空间维度进一步降低 ACI。

3.2 多信道同步传输机制

3.2.1 ACI 分析 本文将 5G 多信道回传网络中同一 AP/STA 上多个 vAP/vSTA 的收发状态不同的传输称为异态传输,相应地,若收发状态相同则为同态传输,其中 ACI 的影响如图 2 所示。

在各种信道模型中, TGn 信道模型^[13]中的 Model F 适用于大范围(室内、室外)场景,其路径损耗可表示为

$$L(d) = L_{\text{FS}}(d_{\text{BP}}) + 10n \lg(d/d_{\text{BP}}) \quad (4)$$

其中, $L_{\text{FS}}(\cdot)$ 为自由空间损耗, n 为路损指数, d 为传输距离, d_{BP} 是断点距离。

以下行为例,若考虑阴影衰落 L_{Sh} , 则 vSTA n ($1 \leq n \leq M_{\text{Ba}}$) 的接收信号功率为

$$P_{\text{R},n} = P_{\text{T},n} + G_{\text{T},n} - L(d) - L_{\text{Sh}} + G_{\text{R},n} \quad (5)$$

其中, $P_{\text{T},n}$ 为 vAP n 的发射功率, $G_{\text{T},n}$ 与 $G_{\text{R},n}$ 分别表示发送天线增益与接收天线增益。

若不进行有效的多信道收发控制,则 vSTA n 接收到的 ACI 功率为

$$\begin{aligned} P_{\text{ACI},n} &= P_{\text{ACI},n}^{\text{Asyn}} + P_{\text{ACI},n}^{\text{Syn}} \\ &= \sum_{j_1=1, j_1 \neq n}^{N_1} (P_{\text{T},j_1} - P_{\text{ACI-L},j_1} - I_{n,j_1}) \\ &\quad + \sum_{j_2=1, j_2 \neq n}^{N_2} (P_{\text{R},j_2} - P_{\text{ACI-L},j_2} - I_{n,j_2}) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $P_{\text{ACI},n}^{\text{Asyn}}$ 与 $P_{\text{ACI},n}^{\text{Syn}}$ 分别为异态与同态传输 ACI 功率; N_1 与 N_2 分别为相对 wlan 来说异态与同态传输的链路个数, $N_1 + N_2 = M_{\text{Ba}} - 1$; $P_{\text{ACI-L},j_1}$ 与 $P_{\text{ACI-L},j_2}$ 分别为异态与同态传输时的频谱衰减功率; I_{n,j_1} 与 I_{n,j_2} 分别为 vSTA n 与 vSTA j_1 , vSTA j_2 间的天线隔离度,与天线位置及方向有关。

因此, vSTA n 的接收信干噪比 SINR_n 及吞吐量 Th_n 分别为

$$\text{SINR}_n = \frac{P_{\text{R},n}}{P_{\text{N}} + P_{\text{ACI},n}} \quad (7)$$

$$\text{Th}_n = B_n \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_n) \quad (8)$$

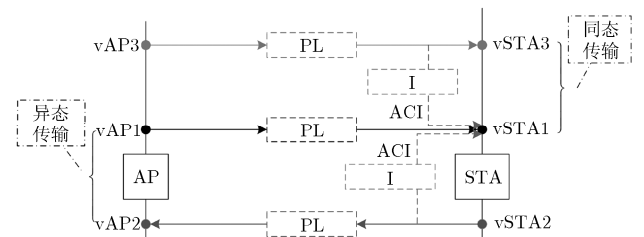


图2 ACI对多信道回传的影响示例

其中, B_n 为信道带宽, P_N 为噪声功率且 $P_N = -174$ dBm/Hz + $10\lg(B_n) + NF$ 。

在 5G 多信道回传网络中, 一般一条链路的发射功率要远大于另一条链路的接收功率, 即 $P_{T,i} > P_{R,j}$, 那么异态传输时的 ACI 势必远大于同态传输时。换言之, 同态传输性能要优于异态传输。

3.2.2 多信道同步控制 本文通过对 5G 多信道回传网络进行同步收发控制来防止同态传输时的“假载波侦听”现象。通过对处于发送状态的各 vAP/vSTA 进行时钟同步校准, 可以很容易实现多信道同步发送; 对于多信道的同步接收问题, 本文从两个方面着手进行了研究, 以下行为例:

(1) 根据不同信道的传输能力来控制多信道数据分流(如图 3(a));

(2) 利用帧聚合^[14]的思想进行多信道数据对齐(如图 3(b))。

信道的传输能力可由其所选 MCS 所对应的 PHY 数据速率(记为 $\text{Rate}_n^{\text{PHY}}$, $1 \leq n \leq M_{\text{Ba}}$)来衡量, 即 wlan i 与 wlan j 的数据分流比例 $\varphi_i : \varphi_j = \text{Rate}_i^{\text{PHY}} : \text{Rate}_j^{\text{PHY}}$ 。在一个同步周期内, 为使各信道发送一个聚合帧的时间相等, 即 $t_i = t_j$ ($1 \leq i, j \leq M_{\text{Ba}}, i \neq j$), 应对回传网络中各信道的帧聚合长度进行控制。首先, 将满足条件 $\max\{\text{Rate}_n^{\text{PHY}}\}$ 的信道作为参考信道, 按其最大聚合能力完成本周期内数据的聚合, 计算其传输时间 t_x ; 然后, 令 $t_n = t_x$ ($n \neq x$), 依次估算其余各回传信道的帧聚合长度。

注意: 一个回传周期内最后的 BACK Req 帧与 BACK 帧(如图 3(b))所携带的信息与 WiFi 协议中相应帧有所区别, 需在原有帧结构的基础上进行扩展或修改。这两个帧携带有本回传周期内数据发送/接收结束的标识位, 也是下一同步回传周期准备开始的标志。

3.3 多信道干扰检测机制

本文通过周期性统计 5G 回传网络中的系统吞

吐量及各工作信道的占空比状态, 评估各信道质量并监测回传网络是否受到外界干扰, 如算法 2 所述。由于 5G 网络中无线数据业务需求巨大, 本文假设各工作信道均为满负载传输。

算法 2 多信道干扰检测

(1) 统计一段时间内总吞吐量 Th, 同时记录各信道的传输状态: active_time $_n$, busy_time $_n$, rx_time $_n$ 与 tx_time $_n$ ($1 \leq n \leq M_{\text{Ba}}$);

(2) 计算各信道占空比:

For $n = 1$ to M_{Ba} **do**

$$\text{BUSY}_n = \frac{\text{busy_time}_n}{\text{active_time}_n}$$

(在监测时间内, 忙时占的百分比) (9)

$$\text{RX}_n = \frac{\text{rx_time}_n}{\text{active_time}_n}$$

(接收状态时间所占百分比) (10)

$$\text{TX}_n = \frac{\text{tx_time}_n}{\text{active_time}_n}$$

(发送状态时间所占百分比) (11)

End for

(3) 记系统吞吐量阈值为 δ , 判断是否受到外界干扰:

If Th < δ **then**

令 $Q = 0$;

For $n = 1$ to M_{Ba} **do**

If $\text{BUSY}_n > p_{\text{by}} \ \&\& \ \text{RX}_n < p_{\text{rx}} \ \&\& \ \text{TX}_n < p_{\text{tx}}$ **then**

$Q = Q + 1$;

$\text{TX}_Q = \text{TX}_n$;

End if

End for

End if

其中, Q 表示判定存在干扰的信道个数, p_{by} , p_{rx} 与 p_{tx} 分别为 BUSY_n , RX_n 与 TX_n 的干扰判断阈值, $0 < p_{\text{by}} < 1$, $0 < p_{\text{rx}} < 1$, $0 < p_{\text{tx}} < 1$;

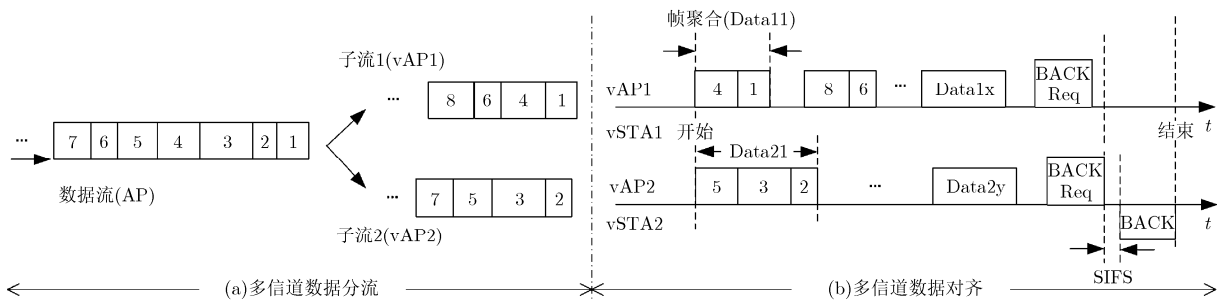


图 3 多信道同步控制示意图

(4)若 $Q = 0$ ，表示无干扰，转向步骤(6)；若 $Q = 1$ ，表示仅有一个信道受到了干扰，令此信道跳频，转向步骤(6)；否则，执行下一步；

(5)令满足条件 $\min_{1 \leq q \leq Q} \{TX_q\}$ 的信道跳频；

(6)本次干扰检测结束。

当判定有多个信道可能受到了干扰时，优先切换对系统增益贡献最小的信道。这样可以避免随机信道跳频或多信道同时跳频对回传系统稳定性的影响，也可以防止产生跳频的“乒乓效应”。

4 5G 多信道同步回传方案性能评估

4.1 性能仿真

本部分对采用异态传输方式与同步方式的 5G 多信道回传性能作了仿真对比分析，以 $M_{Ba} = 2$ 为例，参数如表 1 所示。仿真中假设 $P_{T,i} = P_T$ ， $G_{T,i} = G_T$ ， $G_{R,i} = G_R$ 且 $I_{i,j} = I = 68$ dB (此值为在原型验证系统上获得的经验值)， $1 \leq i, j \leq M_{Ba}$ 。同时，由 IEEE 802.11n/ac 信道频谱掩模(spectral mask)可知，对于两个邻频信道，有 $P_{ACI-L} = 28$ dBm；对于非邻频信道，有 $P_{ACI-L} = \begin{cases} 45 \text{ dBm}, & 802.11n \\ 40 \text{ dBm}, & 802.11ac \end{cases}$ 。

若回传信道为邻频信道，图 4 给出了其在不同传输场景(异态、同步)下的系统吞吐量 Th 随传输距离 d 的变化情况。可知，当 d 一定时，同步传输 Th 要比异态传输高得多。例如，对于主信道编号分别为 36 与 44 的两个 40 MHz 信道，当 $d = 100$ m 时，若为同步传输，则 $Th \approx 400$ Mbps；若为异态传输，则 $Th \approx 100$ Mbps。若回传信道为非邻频信道， Th 随 d 的变化情况如图 5 所示。易知，各曲线变化特

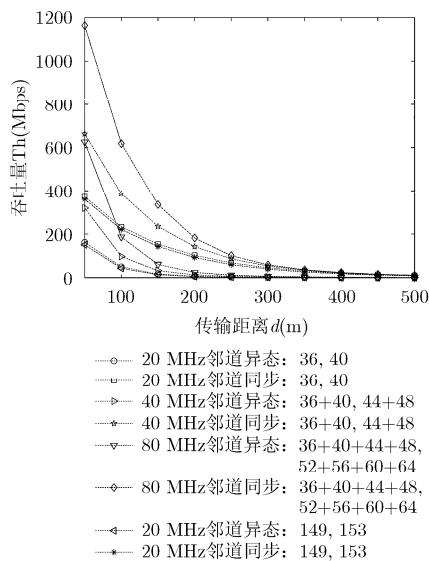


图 4 回传网络吞吐量 Th 随传输距离 d 的变化图(假设 $M_{Ba} = 2$ 且工作在邻频信道上)

参数	取值
P_T	17 dBm
G_T, G_R	3 dBi, 3 dBi
d	<500 m
$L_{FS}(\cdot)$	$20 \lg(f_c) + 20 \lg(d_{BP}) + 32.4$
TGn Model F	$n = 3.5$; $d_{BP} = 30$ m; $L_{Sh} = 6$ dB
f_c	U-NII lower 5.150~5.250 GHz; U-NII upper 5.725~5.850 GHz
B_n	20 MHz/40 MHz/80 MHz
NF	6 dB

征与工作在邻频信道时一致，即多信道同步传输性能要远优于异态传输。

4.2 原型验证系统测试

为了对所提 WiFi 多信道高速回传方案的有效性及其可行性进行验证，我们搭建了原型测试系统并组织了多次外场测试。表 2 给出了外场测试环境及主要设备信息。其中，PC 机作为回传节点，无线网卡看作 vAP/vSTA，定向天线用于收发 vAP-vSTA 的无线信号，笔记本电脑用于模拟外界干扰以测试干扰检测及跳频性能。所提方案在本系统中是通过图 6 所示 5 大功能模块来实现的。

本文针对不同信道带宽(20 MHz 与 40 MHz)从以下几方面进行了外场测试：

- (1)单信道传输性能；
- (2)两邻道异态、同步传输性能；
- (3)多个(≥ 2)非邻道同步传输性能；
- (4)跳频性能。

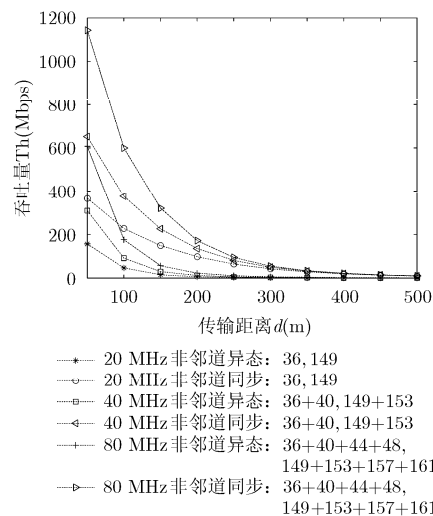


图 5 回传网络吞吐量 Th 随传输距离 d 的变化图(假设 $M_{Ba} = 2$ 且工作在非邻频信道上)

表 2 外场测试环境及设备

测试地点		西南交通大学(犀浦校区)	
测试距离		约 430 m	
		名称	配置
测试设备	PC 机(两台)	带多个 PCI-E 扩展槽	
	IEEE 802.11n 无线网卡(多对)	TP-LINK TL-WDN3800, 支持 5GHz 频段	
	定向天线(多副)	健博通 TDJ-5158GA×2, 增益为 17 dBi	
	笔记本电脑(两台)	支持 5G 网卡	

测试中, 数据传输采用 UDP 协议。表 3 对部分外场测试数据进行了归纳, 表中 40 MHz 带宽的信道编号均为其主信道编号。由测试数据可知:

(1)对于两邻道而言, 同步传输性能要优于异步传输;

(2)以同一信道为基准, 非相邻信道同步传输性能要优于邻道的传输性能;

(3)跳频时间约 20 ms 且系统恢复稳定时间小于 5 s, 当 $M_{Ba} = 2$ 时, 跳频最低速率大于 120 Mbps。

表 3 外场测试数据表

信道带宽 (MHz)	单信道		邻道		非邻道		跳频		
	信道编号	速率 (Mbps)	信道编号	速率 (Mbps)		信道编号	速率 (Mbps)	时间 (s)	速率 (Mbps)
				异步	同步				
20	36	120	36 与 40	130	155	36, 40, 112	220	<5	>120
	149	110				36, 44, 52	325		
40	36	210	36 与 44	255	350	44, 60	390	<5	>160
	149	150				44, 149	350		

参考文献

- [1] TIPMONGKOLSILP O, ZAGHLOUL S, and JUKAN A. The evolution of cellular backhaul technologies: Current issues and future trends[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(1): 97-113. doi: 10.1109/SURV.2011.040610.00039.
- [2] IEEE. IEEE Std 802.11n™-2009 Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications — Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput[S]. New York, IEEE Inc., 2009.
- [3] IEEE. IEEE P802.11ac™/D7.0-2013 Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications — Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz[S]. New York, IEEE Inc., 2013.
- [4] PARK M. IEEE 802.11ac: Dynamic bandwidth channel access[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Kyoto, Japan, 2011: 1-5.
- [5] BUKHARI S H R, REHMANI M H, and SIRAJ S. A survey of channel bonding for wireless networks and guidelines of channel bonding for futuristic cognitive radio sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 924-948. doi: 10.1109/COMST.2015.2504408.
- [6] HUANG P, YANG X, and XIAO L. Dynamic channel bonding: enabling flexible spectrum aggregation[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(12): 3042-3056. doi: 10.1109/TMC.2016.2524573.
- [7] ZHANG W, KWAK K S, WANG H, et al. A practical MAC protocol supporting discontinuous channel bonding[C]. *IEEE*

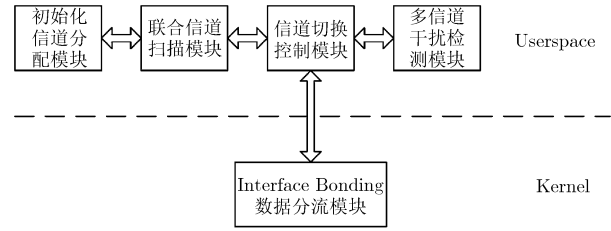


图 6 原型验证系统功能模块信息交互示意图

由于天气(如下雨、刮风)变化、电磁环境变化或定向天线摆放不同等, 导致每次外场测试结果不尽相同, 表 3 中所示为一般测试结果。

5 结束语

本文将 WiFi 技术作为 5G 网络的一种无线回传技术, 实现了多(非连续)信道聚合的高速回传。所提方案通过多节点联合信道扫描算法使所分配信道更适用于回传网络, 通过数据分流及数据对齐方法来控制多信道的同步传输, 从而抑制 ACI, 并通过一种新的链路质量评估指标(即信道占空比)来进行多信道的干扰监测。最后, 仿真结果及外场测试数据表明了所提方案确实具有可行性及有效性。

- International Conference on Consumer Electronics, Las Vegas, NV, USA, 2013: 510–511.
- [8] WU D, YANG S H, BAO L, *et al.* Joint multi-radio multi-channel assignment, scheduling, and routing in wireless mesh networks[J]. *Wireless Networks*, 2014, 20(1): 11–24. doi: 10.1007/s11276-013-0568-y.
- [9] WONG H O and ANG A H. Channel allocation in multi-radio multi-channel wireless mesh networks: A categorized survey[J]. *KSI Transactions on Internet & Information Systems*, 2015, 9(5): 1642–1661. doi: 10.3837/tiis.2015.05.005.
- [10] 张劫, 钟朗, 李广军, 等. 基于节点优先级的无线 Mesh 网络资源分配[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(1): 54–59. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2016.01.008.
- ZHANG Jie, ZHONG Lang, LI Guangjun, *et al.* Node-priority based resource allocation in wireless mesh networks [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, 45(1): 54–59. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2016.01.008.
- [11] NACHTIGALL J, ZUBOW A, and REDLICH J P. The impact of adjacent channel interference in multi-radio systems using IEEE 802.11[C]. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Crete Island, Greece, 2008: 874–881.
- [12] ZUBOW A and SOMBRUTZKI R. Adjacent channel interference in IEEE 802.11n[C]. Wireless Communications and Networking Conference, Shanghai, China, 2012: 1163–1168.
- [13] PERAHIA E and STACEY R. Next Generation Wireless LANs: Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n [M]. New York, Cambridge University Press, 2008: 46.
- [14] CHOSOKABE Y, UWAI T, NAGAO Y, *et al.* A channel adaptive hybrid aggregation scheme for next generation wireless LAN[C]. Wireless Communications and Networking Conference Workshops, New Orleans, LA, USA, 2015: 153–158.
- 薛 青: 女, 1988 年生, 博士生, 研究方向为 5G WLAN 关键技术、毫米波网络无线资源优化等.
- 方旭明: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为轨道交通移动通信系统、无线网络资源管理等.