

# IMT-2020(5G)推进组

## 低时延高可靠专题组技术报告

---

技术报告  
Technical Report

---

版权声明 Copyright Notification

---

本文档由IMT-2020(5G)推进组低时延高可靠专题组成员单位起草

---

未经书面许可 禁止打印、复制及通过任何媒体传播

© 2015 IMT-2020推进组版权所有

# 目 录

<b>1. 引言 .....</b>	<b>3</b>
1.1 编写目的 .....	3
1.2 参考文献 .....	3
1.3 缩写词 .....	3
<b>2. 总体技术方案 .....</b>	<b>4</b>
<b>3. 关键技术研究与评估 .....</b>	<b>5</b>
3.1 基于 LTE 蜂窝网络架构的流程优化.....	5
3.1.1 上行无连接数据传输流程.....	5
3.1.2 下行无连接数据传输流程.....	7
3.1.3 小结.....	8
3.2 空口物理层关键技术研究.....	8
3.2.1 短子帧设计.....	8
3.2.2 多元 LDPC 编码 .....	19
3.2.3 新型波形技术和多址技术.....	24
3.2.4 小结.....	24
3.3 空口高层关键技术研究.....	24
3.3.1 基于多连接的空口传输技术.....	24
3.3.2 可配置协议栈.....	27
3.3.3 终端协同传输技术.....	29
3.3.4 免调度传输.....	31
3.3.5 其他传输优化.....	36
3.3.6 小结.....	38
3.4 动态自组织网络 .....	38
3.4.1 设计思路和组织方式.....	38
3.4.2 关键过程设计.....	40
3.4.3 波束赋形的应用.....	45
3.4.4 无线资源分配.....	47
3.4.5 车辆通信网络的分簇技术.....	51
3.4.6 小结.....	55
3.5 分布式 MESH 网络 .....	55
3.5.1 多信道 MAC 机制.....	55
3.5.2 小结.....	56
<b>4. 总结 .....</b>	<b>56</b>

## 1. 引言

### 1.1 编写目的

本报告基于前期需求分析和系统架构梳理,对低时延高可靠关键技术展开深入探讨和研究。为后续 5G 相关技术研究和标准化推动提供基础和技术支撑。

### 1.2 参考文献

- [1] 《低时延高可靠通信场景、需求及性能指标》，IMT-2020 低时延高可靠专题组
- [2] 《低时延高可靠通信系统架构和基本通信过程》，IMT-2020 低时延高可靠专题组
- [3] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15006\_分布式网络研究，CATT
- [4] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15002\_基于 LTE 演进的低时延系统帧结构设计分析 1.0-中国电信
- [5] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15009\_ZTE 提案\_CR\_低时延章节\_IMT-2020\_Tech\_LLHR\_低时延高可靠关键技术研究报告
- [6] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15012\_5G 低频段 LTE-A 演进的方案分析，CMCC
- [7] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15007\_关于空口可靠传输的考虑，CATT
- [8] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15010\_用于低时延高可靠场景的多元 LDPC 码，西电
- [9] 5G 网络技术架构白皮书，IMT-2020，2015 年 5 月
- [10] 5G 无线技术架构白皮书，IMT-2020，2015 年 5 月
- [11] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15022\_IMT-2020(5G)低时延高可靠传输-分布式动态路由提案\_bupt
- [12] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15027\_Wireless Mesh Network 介绍\_同济
- [13] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15029\_用于低时延高可靠场景的多元 LDPC 码\_西电
- [14] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15025\_动态自组织网络无线资源分配方案\_CATT
- [15] IMT-2020\_Tech\_LLHR\_15024\_波束赋形在动态自组织网络中的应用-CATT

### 1.3 缩写词

缩写、术语	解 释
D2D	Device to Device
DSC	Distributed Service Center
EP	End Point
FBMC	Filter Band Multi Carrier
LDPC	Low Density Parity Check Code
MUSA	Multiple User Sharing Access
OTT	One Trip Time
PDMA	Pattern Division Multiple Access
QCI	QoS Class Identifier
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RTT	Round Trip Time

SCMA	Sparce Code Multiple Access
UE	User Equipment
UFMC	Universal Filtered Multi Carrier

## 2. 总体技术方案

根据需求研究，将低时延高可靠应用场景归纳为连续，大数据包业务、间歇，小数据包业务和应急通信。本报告结合现有系统特性和技术基础，并考虑与其他 5G 专题组的差异性，面向接入网开展技术研究。本报告不同的关键技术点分别面向空口 1ms 的极端指标和相对宽松指标下的时延缩减方案，以及空口可靠性增强目标。

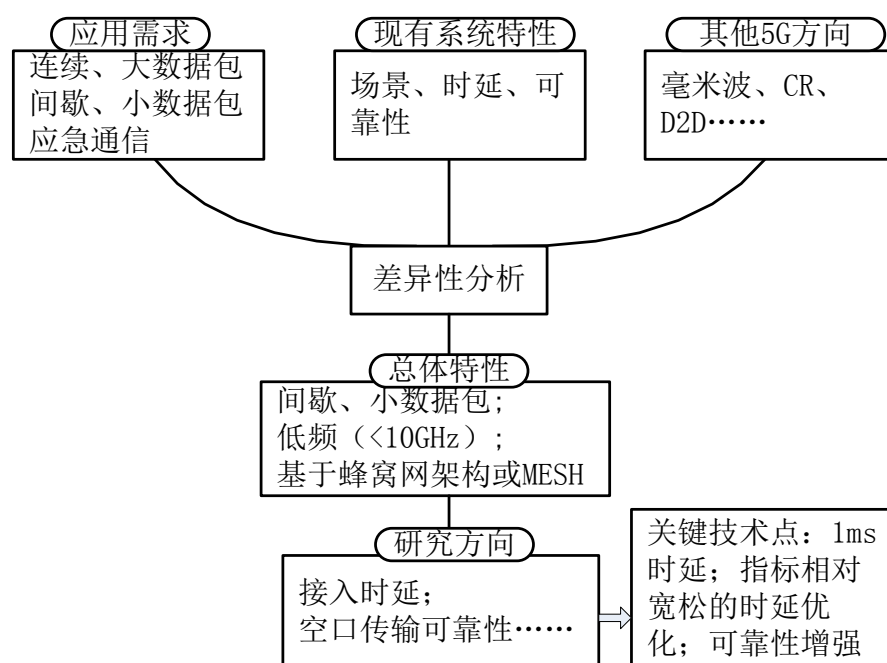


图 2-1 总体研究路线示意图

IMT-2020 定义的 5G 场景和技术挑战如下图。低时延高可靠是移动物联网的一个典型场景，对应低时延高可靠典型场景的技术挑战是极低时延：空口 1ms 和端到端毫秒级时延。

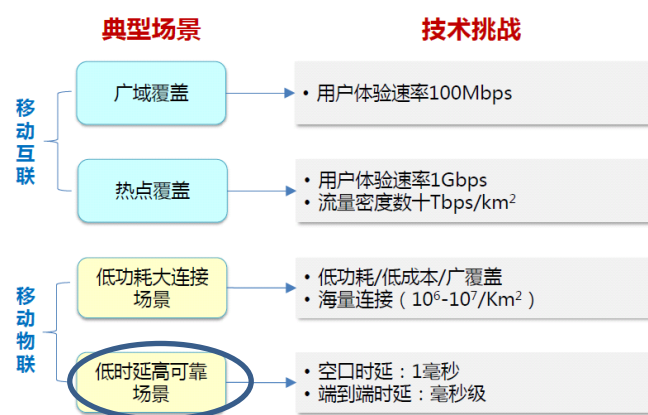


图 2-2 IMT-2020 的 5G 场景和技术挑战

在前期的需求研究中,我们确定低时延高可靠技术解决的不仅仅是移动物联网极端场景的时延可靠性问题,其他场景下也要求时延可靠性性能的提高,以提升 5G 用户体验和 5G 系统整体性能。需求研究中定义的低时延高可靠业务模型如下表。

表 2-1 低时延高可靠业务模型

定义		时延需求	可靠性需求	应用场景示例
连续, 大数据包业务	QCI 1	端到端回程时延 $\leq 10\text{ms}$	99.9%	实时云计算、增强现实、在线游戏
	QCI 2	端到端回程时延 $\leq 10\text{ms}$	99.999%	实时云计算、增强现实、远程医疗
间歇, 小数据包业务	QCI 3	端到端单向时延 $\leq 5\text{ms}$	99.999%	智能交通、智能电网
	QCI 4	端到端单向时延 $\leq 10\text{ms}$	99.999%	实时远程控制
应急通信	QCI 5	紧急模式启动时延 $\leq 10\text{s}$ 会话建立时延 $\leq 1\text{s}$	99.999%	应急通信

### 3. 关键技术研究 with 评估

#### 3.1 基于 LTE 蜂窝网络架构的流程优化

本部分不直接面向空口极低时延 (1ms) 指标,是为了从基本过程上实现时延缩减,从而降低端到端时延。

LTE 系统演进技术将作为未来 5G 关键技术的重要组成部分,因此以现有 LTE 蜂窝网络基本架构为基础,根据 5G 新应用业务特点,通过对流程优化,不但可以满足新业务对低时延和高可靠的通信需求,而且可以降低运营商网络升级的成本,实现平滑演进。

##### 3.1.1 上行无连接数据传输流程

这部分技术方案适用于间歇,小数据包业务模型。

技术方案 1: 基站通过终端关联 ID 路由

基站通过终端关联 ID 路由又称为基站有记忆方案。在这个方案中，基站需要预先为终端分配关联 ID，终端关联 ID 和上行 IP 数据包发送给基站，基站根据关联 ID 索引 UE 上下文，根据上下文确定目标 SGW。对于基站有记忆方案要求基站在上行传输前预先为终端分配关联 ID 并保存终端上下文，因此对于高移动性场景（终端频繁更换服务建站），终端移动到新基站后，新基站需要重新为终端分配关联 ID 并获得终端的上下文。

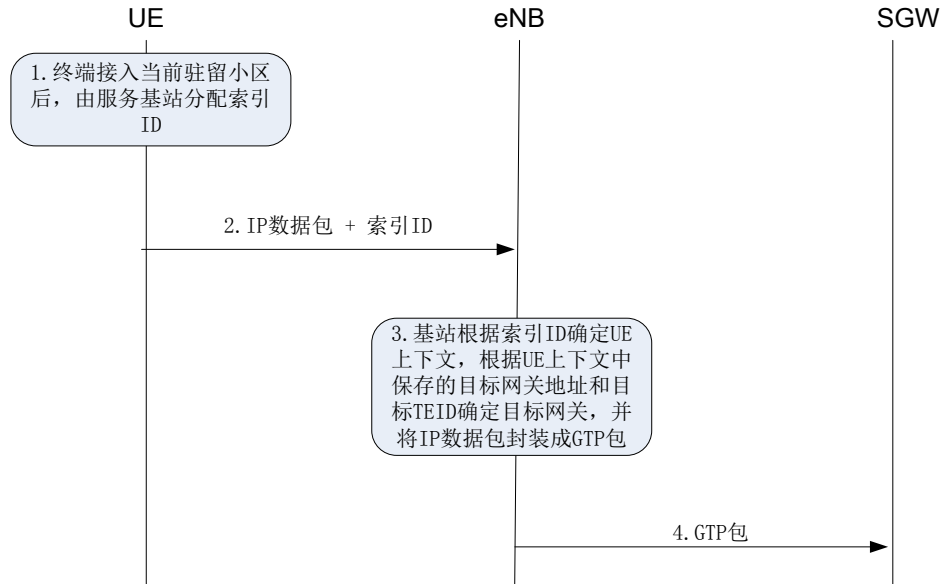


图 3-1 基站通过终端关联 ID 路由

技术方案 2：基站根据数据包目标网关 IP 地址路由

基站根据数据包目标网关 IP 地址路由又称为基站无记忆方案。在这个方案中，网络预先将目标网关的 IP 地址和 TEID 信息通知终端，终端在上行数据包发送过程中将上行数据包发送基站，基站根据数据包携带的目标网关 IP 地址信息确定目标 SGW。在基站无记忆方案中，终端的每次上行传输都是独立路由的，基站不需要预先保存终端的上下文信息，因此即使在终端高移动性场景下（终端频繁更换服务基站），也不会引入额外的信令开销。在上行传输是突发性的情况下，数据量本身就非常小，因此在上行传输中携带 IP 地址和目标 TEID 不会对系统容量方面造成明显影响。

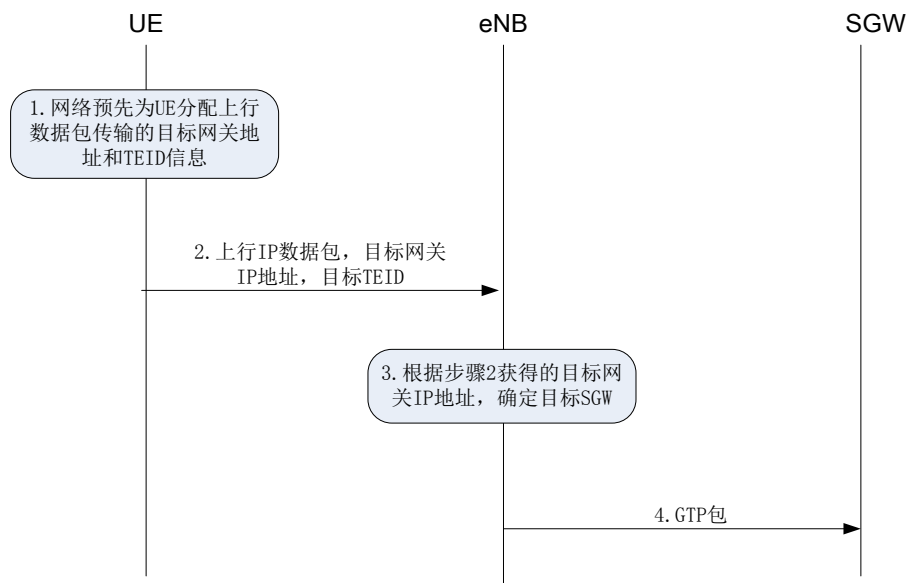


图 3-2 基站根据数据包目标网关 IP 地址路由

### 3.1.2 下行无连接数据传输流程

这部分技术方案适用于间歇，小数据包业务模型。

技术方案 1：基于终端位置区域的下行传输

LTE 系统中针对 IDLE 状态终端的下行数据传输过程较为复杂，因此信令过程本身导致延迟过长的问题。一种改进的思路是，当 IDLE 状态终端的下行突发小包到达后，网关（例如 SGW）将下行数据 Push 到所用终端可能驻留的基站下，基站再通过空口将下行数据包发送给终端，整个过程不需要终端建立 RRC 连接。为了保证下行数据被转发给终端潜在驻留的基站，需要网关维护和保持终端的位置位置信息，例如 MME 可以将终端的 TA（Tracking Area）信息发送给终端的服务网关，从而使网关获得终端的位置信息。

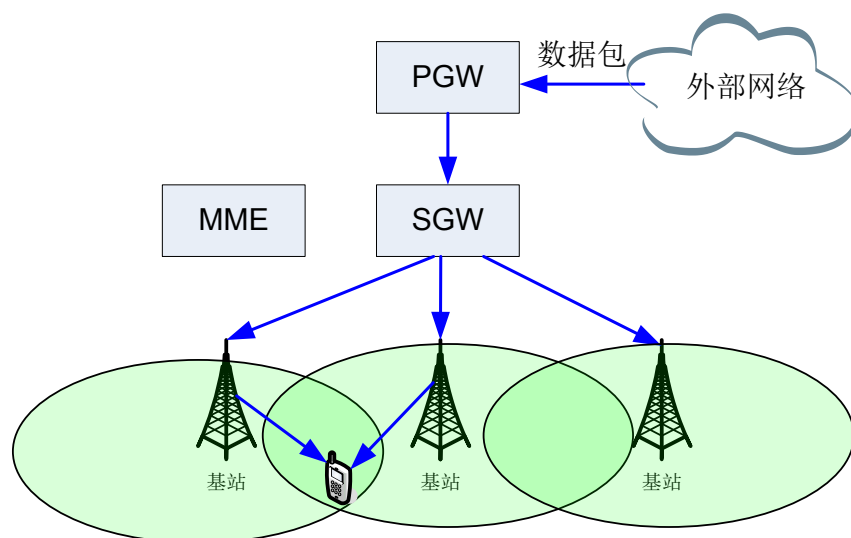


图 3-3 基于终端位置区域的下行传输

3.1.3 小结

基于 LTE 蜂窝网架构的流程优化基于无连接数据传输设计，目的是优化核心网时延，以优化端到端时延。同时，还能起到减少核心网信令，避免大量终端接入带来的信令风暴等问题。

3.2 空口物理层关键技术研究

3.2.1 短子帧设计

3.2.1.1 短子帧参数设计

3.2.1.1.1 最大 TTI 长度

为实现低时延目标，短子帧设计是一个基本方向。下面对空口时延 1ms 指标进行简单分析。

空口时延 1ms 前提条件包括：1) 不考虑调度时延（例如认为系统处于空载，并且发送端已经获得资源）；2) 进行小数据包传输（例如认为不需要对数据包进行分段，重组处理）；3) 信道条件好，传输可靠性高，不需很多次 HARQ 重传。

基于 LTE 物理层设计，一个 TTI 即为一个子帧，帧定时设定为  $0.5 \times \text{TTI}$ ， $\text{RTT} = \text{DeNB-process} + (1.5 \times \text{TTI}) \times 2 + \text{DUE-process}$ 。假设未来设备处理能力大大增强，考虑到短子帧所需处理的数据量较小， $\text{DeNB-process} = \text{DUE-process} = 0.1\text{ms}$ 。

$$\text{DUP [ms]} = \text{DeNB-process} + 1.5 \times \text{TTI} + \text{DUE-process} + n \times \text{RTT} = 0.2 + 1.5 \times \text{TTI} + n \times (0.2 + 3 \times \text{TTI})$$

表 3-1 5G 空口时延评估（FDD）



Step	Description	Value (0% HARQ)	Value (30% HARQ)
0	UE wakeup time	Implementation dependent – Not included	Implementation dependent – Not included
1	UE Processing Delay	0.1 ms	0.1 ms
2	Frame Alignment	TTI/2	TTI/2
3	TTI for UL DATA PACKET (Piggy back scheduling information)	TTI	TTI
4	HARQ Retransmission	0 ms	0.3*RTT
5	eNB Processing Delay (Uu → S1-U)	0.1 ms	0.1 ms
	<b>Total one way delay</b>	<b>0.2+1.5*TTI ms</b>	<b>0.2 + 1.5*TTI + n* ( 0.2+3*TTI ) ms</b>

为达到 1ms 时延指标，如果不重传，**TTI 最大限制为 0.533 ms**；假设 30% HARQ 重传概率，**TTI 最大限制为 0.308ms**。对于 TDD 双工方式，受限于上下行子帧转换时间，帧定时时间有所延长，为达到 1ms 空口时延要求的 TTI 最大长度更小。

因此：在终端和基站的处理时延均降低到 0.1ms 的前提下，TTI 最大限制为 0.308ms，如果设备处理时延更大，TTI 最大长度还需进一步缩减。

### 3.2.1.1.2 低时延 OFDM 帧结构设计参数

短子帧基本设计思路包括：

- 缩短子帧/时隙长度，减少 TTI
- 抵抗时延扩展与多普勒扩展影响，防止 ISI 和 ICI
- 确保开销比例适当，保证频谱效率满足要求
- 满足各场景对用户容量要求，保证数据包传输能力
- 尽可能减少运算复杂度，降低软硬件要求。

为满足低时延业务特性要求，可以对帧、子帧、时隙、符号和符号前缀以及子载波宽度进行综合考虑与全新设计。沿用 LTE 系统 OFDM 设计方式，在低时延帧结构设计上考虑循环前缀、物理信号如同步信号、参考信号等的开销，同时需要考虑不同场景下抵抗时延扩展与多普勒扩展的影响。设计思路主要是：

分析帧结构设计对频谱效率的影响。公式如下，

$$SE = \frac{T_{OFDM}}{T_{OFDM} + T_{CP}} \min\{SE_{\max}, \log_2(1 + \frac{\gamma}{\alpha})\}$$

$T_{CP}$  是循环前缀长度， $T_{OFDM}$  是 OFDM 符号的长度， $SE_{\max}$  是最大可达频谱效率（受限于最高的调制编码方式）， $\gamma$  是信噪比（SNR）， $\alpha$  是由于非理想调制编码所导致的 SNR 损失。总结如下：

- ◆ 给定符号长度条件下，循环前缀 CP 长度越短，CP 开销越小，频谱效率越高，抗符号间串扰 ISI 能力减弱。

- ◆ 给定 CP 长度条件下，符号长度越长，CP 开销越小，频谱效率越高，给定符号数条件下，允许最小 TTI 值变大。

- ◆ 信道时延扩展越大，CP 长度要求越长，CP 开销越大

- ◆ 给定系统带宽和每帧符号个数的前提下，子载波间隔越大，每帧支持的用户数越少

基于上述因素，以 100MHz 带宽 OFDMA 系统为例，分别基于符号长度与 CP 开销、低时延业务数据包传输能力，对帧结构设计进行分析，系统参数条件见下表。

表 3-2 帧结构系统参数条件

系统参数	值（单位）
系统带宽	100MHz
带宽利用率	0.9
时隙长度要求	0.1ms
CP 时长要求	>300ns;（室内，室外短距离 LOS） >4 $\mu$ s（室外）
CP 开销要求	<12%

### 1) 基于符号长度与 CP 开销：

按不同子载波宽度取值，由每子载波宽度 11kHz 至 360kHz，则 100MHz 带宽可包含的子载波个数为 8000~250 个，对应允许的 FFT size 大小为 8192~256，FFT 周期为 90.909~2.778  $\mu$ S。根据时隙长度 0.1ms 的要求，以子载波宽度 360kHz 为例，若每时隙包含符号个数为 32 个，则符号含 CP 长度为  $0.1/32=3.125 \mu$ S，CP 长度为  $0.347 \mu$ S，大于 300ns 的室内场景无线信道时延扩展特性的要求，且 CP 开销为 11.1%，符合 CP 开销小于 12% 的开销要求。若每时隙包含符号个数为 14 个，则符号含 CP 长度为  $0.1/14=7.143 \mu$ S，CP 长度为  $4.365 \mu$ S，大于  $4 \mu$ S 的室外场景无线信道时延扩展特性的要求，但 CP 开销为 61.1%，明显超出 CP 开销小于 12% 的开销要求。

- 对于室内或室外短距离低时延通信，时延扩展较小，允许子载波宽度大于等于 45k，

每时隙符号个数为 4~32;

- 对于室外覆盖场景，时延扩展较大，子载波宽度需不大于 22k，每时隙符号数最多为 2；如果时隙长度放宽至 0.2ms，则每时隙符号数允许不小于 4。

按不同参数配置取值估算结果参见下表。

表 3-3 基于符号长度和 CP 分析

FFT size	FFT duration (μs)	Δfsc (kHz)	Number of SC	Target slot duration (ms)	OFDM symbols per slot	CP duration (μs)	CP overhead (%)
256	2.778	360	250	0.1	32	0.347	11.1
256	2.778	360	250	0.1	14	4.365	61.1
512	5.556	180	500	0.1	16	0.694	11.1
512	5.556	180	500	0.1	10	4.444	44.4
1024	11.111	90	1000	0.1	8	1.389	11.1
1024	11.111	90	1000	0.1	6	5.556	33.3
2048	22.222	45	2000	0.1	4	2.778	11.1
2048	22.222	45	2000	0.1	3	11.111	33.3
2048	22.222	45	2000	0.2	7	6.349	22.2
4096	45.455	22	4000	0.1	2	4.545	9.1
4096	45.455	22	4000	0.2	4	4.545	9.1
8192	90.909	11	8000	0.1	1	9.091	9.1
8192	90.909	11	8000	0.2	2	9.091	9.1

2) 基于低时延业务数据包传输能力

按照智能交通主动安全以及其他低时延业务对数据包大小的需求，取低时延业务数据包平均大小为 100 字节，为保证低时延要求，设计每个时隙满足一次性分配 800bits 的最低要求。按时隙长度 0.1ms 的要求，计算每时隙包含的符号个数，资源块 RB 可能的大小（包含的子载波数）。以 FFT Size 取 256 为例，按前述对符号长度与 CP 开销的分析结果，每时隙符号个数可以取 32 个，则系统带宽内子载波个数为 250 个，取资源块 RB 大小为 50 个子载波，按 70%BPSK 与 30%256QAM 的传输概率计算，可知每时隙每 RB 一次性传输成功的数

据量为 3760bit，大于 800bit 的数据传输要求，如果资源块 RB 大小为 10 个子载波，则每时隙每 RB 一次性传输成功的数据量为 752bit，小于 800bit 的数据传输要求。

假设低时延业务数据包平均大小为 100 字节，为保证低时延要求，设计每个时隙满足一次性分配 800bits 的最低要求。则 100M 带宽支持的每时隙 RB（用户）个数不多于 20 个。

按不同资源块 RB 大小配置计算结果参见下表。

表 3-4 基于低时延业务数据包传输能力的分析

FFT size	Target slot duration (ms)	OFDM symbols per slot	RB size (SCs)	Number of RBs	Minimum allocation per RB per slot (BPSK, R=1/2) (bits)	Maximum allocation per RB per slot (256QAM, R=5/6) (bits)	Average allocation per RB per slot (70%BPSK+30%256QAM) (bits)
256	0.1	32	50	5	800	10667	3760
256	0.1	32	25	10	400	5333	1880
256	0.1	32	10	25	160	2133	752
512	0.1	16	100	5	800	10667	3760
512	0.1	16	50	10	400	5333	1880
512	0.1	16	25	20	200	2667	940
512	0.1	16	20	25	160	2133	752
1024	0.1	8	100	10	400	5333	1880
1024	0.1	8	50	20	200	2667	940
1024	0.1	8	25	40	100	1333	470
2048	0.1	4	200	10	400	5333	1880
2048	0.1	4	100	20	200	2667	940
2048	0.1	4	50	40	100	1333	470
4096	0.1	2	400	10	400	5333	1880
4096	0.1	2	200	20	200	2667	940

4096	0.1	2	100	40	100	1333	470
8192	0.1	1	800	10	400	5333	1880
8192	0.1	1	400	20	200	2667	940
8192	0.1	1	200	40	100	1333	470

### 3) 基于处理复杂度

设 FFT 点数为  $N$ ，每 ms 的 OFDM 符号个数为  $k$ ，则运算复杂度为  $kN\log_2 N$ 。在满足信道时延扩展特性的前提下，增加子载波间隔，减少 FFT 点数，可以降低一定的处理复杂度。

下表为处理复杂度分析。

表 3-5 处理复杂度分析

FFT size	$\Delta f_{sc}$ (kHz)	Target slot duration (ms)	OFDM symbols per slot	OFDM symbols per ms	FFT computation complexity
256	360	0.1	32	320	655360
512	180	0.1	16	160	737280
1024	90	0.1	8	80	819200
2048	45	0.1	4	40	901120
4096	22	0.1	2	20	983040
8192	11	0.1	1	10	1064960

综上，如果采取全新帧结构设计，需要根据系统带宽、无线环境（如室内或室外 NLOS 环境）、应用场景（不同低时延应用）、软硬件处理能力等因素对帧结构参数进行合理设计，总结分析结果如下：

➤ 对于室内或室外短距离场景，建议子载波宽度不小于 45k，每时隙符号个数不大于 32 个，可以支持更小 TTI 及小数据量低时延通信要求。

➤ 对于室外场景，建议子载波宽度不大于 22k，每时隙符号数不大于 2；如果时隙长度放宽至 0.2ms，则每时隙符号数允许不小于 4。

➤ 低采样率可以提供更大的子载波，可支持更小 TTI，减少运算复杂度。高采样率可以提供单位带宽下更多子载波数，支持更高在线用户容量。

➤ FFT 点数增加为提高 FFT 运算复杂度，考虑 5G 时期运算能力可能获得提高，相比其他约束条件，不是最主要的考虑因素。

➤ 综合各场景及 0.1ms 时隙长度要求，基于前述假设条件，在 100M 带宽条件下，OFDMA 帧结构设计以 FFT 取 4096，子载波宽度 22kHz，每时隙 2 个符号的方案相对较合理。

### 3.2.1.2 与 LTE 系统兼容性设计

低时延高可靠系统子帧有两种基本方式：1)采用 LTE 子载波间隔，降低每子帧符号数；  
2)增大子载波间隔，缩小符号长度。

基于采用 LTE 子载波间隔方式，可以进行与 LTE 兼容设计。与 LTE 兼容设计分为 5G 资源与 LTE 资源时分和频分两种方式。

#### 3.2.1.2.1 5G 资源预 LTE 资源时分 (TDM)

LTE 兼容设计是指在一个基站下，既可以 LTE UE 工作，也可以 5G UE 工作。时分模式下，短子帧与 LTE 子帧并存，分时工作。可以在普通子帧间加入低时延子帧，或在普通子帧间加入低时延子帧，低时延子帧通过减少每个时隙的符号个数，缩短时隙长度，减小 TTI。

与 LTE 系统兼容的 5G 短子帧设计方式的大致思路为：

- 在 LTE 帧结构中，设置部分子帧（1ms，以下称为扩展子帧）用于配置 5G 短子帧，一个 LTE 子帧时长内有多个 5G 短子帧；
- 5G 短子帧至少有两级定时同步关系：第一个 5G 短子帧起点与原 LTE 子帧对齐，即 1ms 对齐同步，5G 短子帧之间的同步；
- 如果扩展子帧（1ms）内短子帧排列后，后面的时长不足以容纳一个短子帧，将其作为保护间隔 GP，后续不管是短子帧还是 LTE 子帧排列起点都与下一个原 LTE 子帧对齐；
- 对于 TDD 方式，短子帧的方向可以与原 LTE 子帧一致，但为了保证快速传输，一个 LTE 扩展子帧内的多个短子帧方向可设计为不一样；
- 根据基站和终端处理能力，在短子帧基础上重新定义反馈和重传时延。

以下为示意图。LTE 子帧 2 配置为扩展子帧，用于容纳短子帧，扩展子帧可以为下行子帧也可以为上行子帧。短子帧 0' 起点与原子帧 2 起点对齐；在原 LTE 子帧 2 中有三个短子帧；短子帧 2' 后原 LTE 子帧 2 内的时长设置为保护间隔 GP，用于短子帧和传统 LTE 子帧转换。示例：LTE 子帧占 14 个符号，短子帧占 4 个符号，1ms 有三个短子帧，GP 长度为 2 个符号。

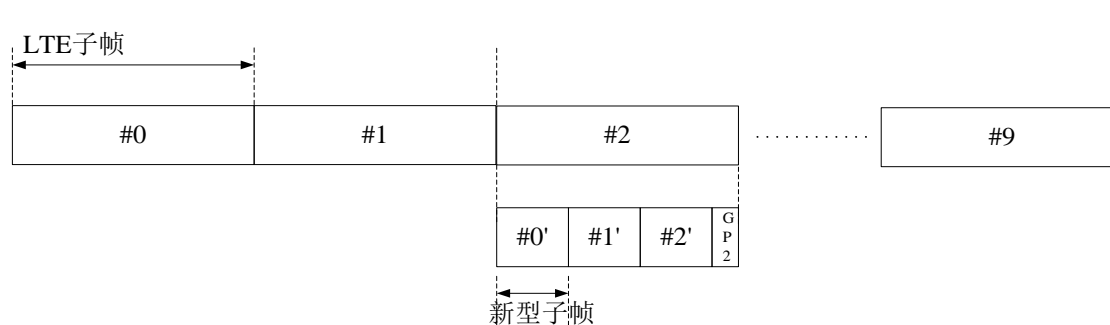


图 3-4 短子帧配置示意图 1（与 LTE 资源时分）

在这种结构下，存在传统 LTE 1ms 子帧以及 5G 短子帧多种子帧长度。传统 LTE UE 只在 LTE 子帧上进行数据调度和传输，针对特定低时延需求终端，即可以在 LTE 子帧上也可以在短子帧上进行数据调度和传输，具有处理多种子帧长度的能力。

此外，为提高资源利用率，适应不同业务数据长度，在短子帧结构下，需要考虑多子帧调度的应用。

该方法的优点是，由于采取时分方式，5G 低时延子帧传输期间，低时延业务可以共享全部带宽，允许支持多个在线用户同时使用低时延业务，增加了用户容量；同时，在普通帧或子帧传输期间，原有的资源块划分方式、参考信号等物理层设计没有变化，因此对原有 LTE 系统的影响相对较小。

该方法的缺点是，时分方式导致系统难以实现完全的实时响应与传输，如果插入低时延子帧的间隔周期较大或插入的低时延子帧数量较少，可能会无法满足空口传输时延 1ms 的要求。此外 HARQ 模式与插入低时延子帧的周期与数量有关，相对复杂；且不同小区间的低时延子帧时分方式可能不同，导致多小区间协作难度增大。

### 3.2.1.2.2 5G 资源预 LTE 资源频分（FDM）

1. 频分方式下，在系统带宽中为低时延子帧分配专门频带，低时延子帧每时隙符号数较少。如下图示例，系统频带内划分为普通子帧子带与低时延子帧子带。为减少硬件的改动，低时延子帧子带内的符号长度与 CP 设定与普通子帧相同，保证普通子帧边界与低时延子帧边界对齐。

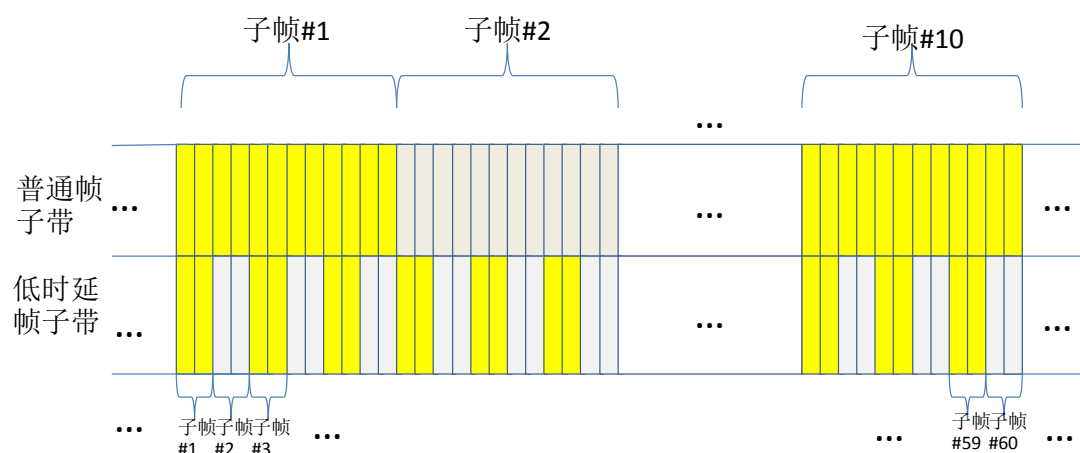


图 3-5 短子帧配置示意图 2（与 LTE 资源频分）

具体在频带划分上可以采取灵活的分配策略，如动态分配或固定分配。考虑简化系统设计与实现的目的，在低时延业务比较集中与固定的场景，如实时数据采集等 M2M 业务场景，可以采取固定划分频带的方法，鉴于超低时延通信一般对通信的可靠性要求较高，相应子带建议位于中心频带，减少系统相邻频带的干扰。

进一步，对于不同时延性能要求业务共存的场景，可以考虑按照子帧长度设计的不同，将子带进一步划分为超低时延子帧子带，低时延子帧子带、普通子帧子带等。如下图示例。

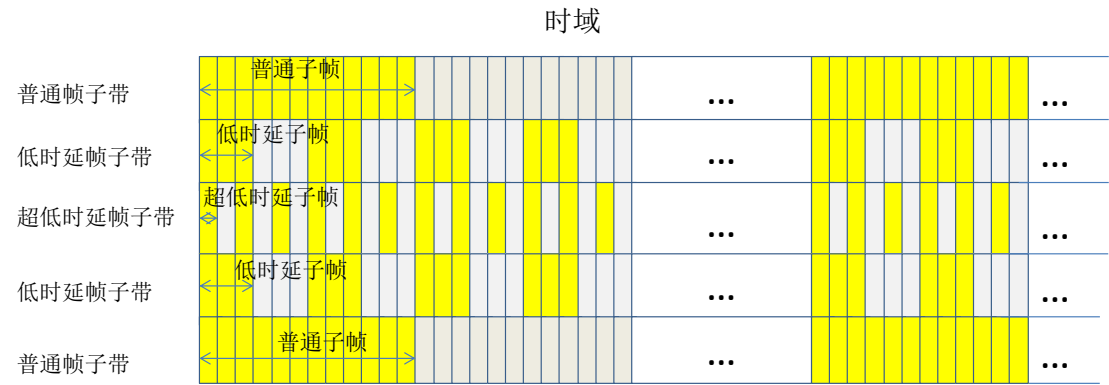


图 3-6 短子帧配置示意图 3（多种长度子帧频分）

为了保证终端能够获知系统低时延物理层配置情况，需要对 LTE 物理信道设计进行优化，其中，因为采取了与原 LTE 系统相同的符号长度、CP 长度设计，同步信号可以基本维持 LTE 原设计不变，位于系统中心频带，时频域位置与序列设计均不变，保证终端在未知带宽条件下获得时隙同步。物理广播信道的编码方式与时频域位置不变，但需要增加帧结构配置信息。例如采取 4bit 信息说明不同时延特性设计的子帧分别占用的带宽与位置。

该方法的优点是，由于采取频分方式，系统允许同时支持低时延通信与常规分组数据业务通信并发，支持完全的实时响应与传输能力，与时分方法相比，该方法下 HARQ 机制可与 LTE 系统现有机制保持一致，且小区间的低时延子帧配置只与划分的频带位置相关，多小区间的协作易于实现。

该方法的缺点是，低时延业务只占用部分带宽，限制了低时延业务速率与并发低时延用户数量；且对于 TDD 系统，除了要支持原有 TDD 帧结构配置，还需要支持普通子帧周期内低时延子帧的上下行切换，系统设计相对比 FDD 复杂，对硬件实现也有一定影响。

此外，频分方式如果用于 FD-LTE，DL/UL 位于不同的频带，对低时延业务，在各自的 DL/UL 频带的资源中传输 DL/UL 数据；可以实时进行上下行低时延数据的传输。如下图所示。



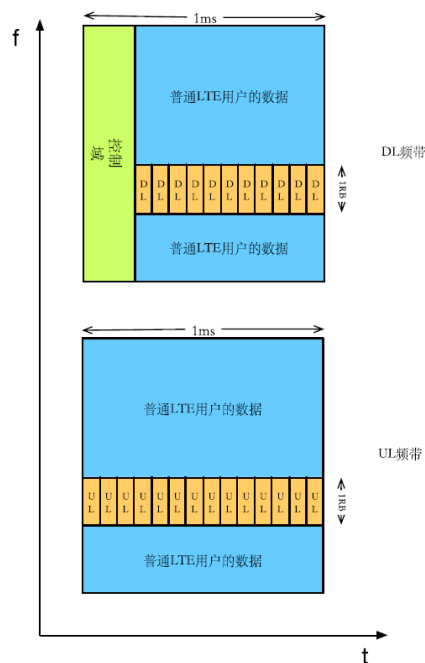


图 3-7 FD-LTE 下 5G 短子帧与 LTE 子帧资源频分方式

而对于 TD-LTE，DL/UL 占用不同子帧，传输不连续，对低时延业务，需要在子帧内进行上下行切换，以快速完成传输。由此带来频带干扰和时隙干扰问题。

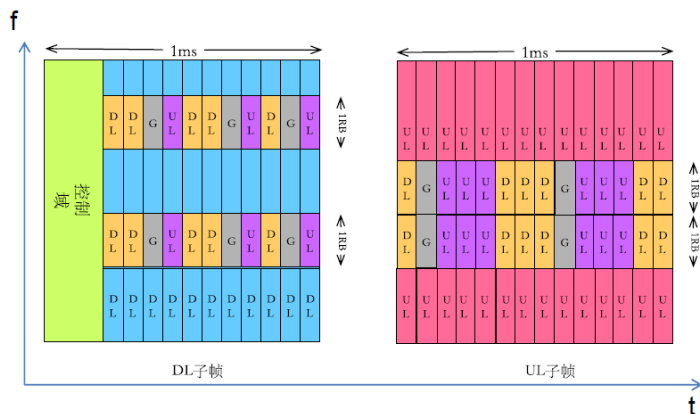


图 3-8 TD-LTE 下 5G 短子帧与 LTE 子帧资源频分方式带来的干扰问题

对此可能的解决方案为：采用载波聚合的方式，利用互补的时隙配比，配成“波聚合的方。在两个载波上，DL/UL 子帧只传输对应传输方向的低时延数据。如下图所示。

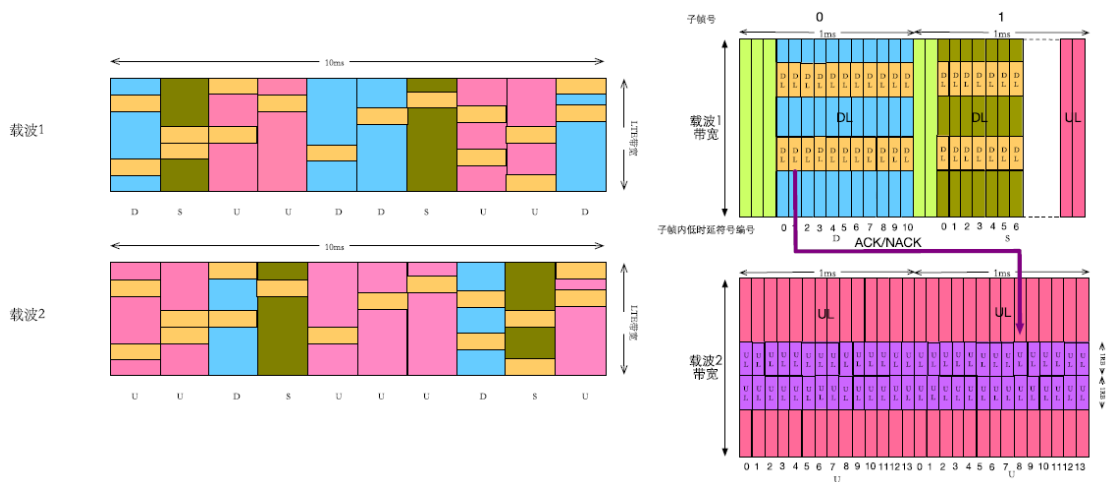


图 3-9 通过载波配对解决频分方式下的干扰问题

5G 短子帧与 LTE 子帧资源时分和频分方法对比分析可知，时分方式性能与不同类型子帧间隔周期  $T$  相关，传输时间间隔为[最小时隙，帧间隔周期  $T$ +HARQ 周期]，可能无法满足特定时刻用户低时延接入与传输需要。对于频分方式，TD-LTE 下，5G 短子帧与 LTE 子帧频分会带来上下行时隙干扰问题。频分方式性能与系统带宽配置及时延指标相关。对于高密度低时延用户分布场景，系统需要为低时延子带分配较多带宽；时延要求越低，帧结构时隙要求越小，需分配的带宽则越大。

假设每小区激活低时延用户数为 2，低时延业务数据包平均大小为 100 字节，按 70%BPSK( $R=1/2$ )+30%256QAM ( $R=5/6$ )传输概率，采取超低时延帧需分配约 10M 带宽，采取低时延帧需分配约 5M 带宽，采取普通帧需分配约 1M 带宽。

总之，时分方案存在可能不能实时传输的问题；频分方案则有带宽受限问题和上下行干扰问题。

### 3.2.1.3 与 LTE 非兼容的设计

传统 LTE 技术中为保证上行或下行方向上载波间相互正交，降低带内泄露（In-band emission），要求同一时隙上的不同子载波必须使用相同的子载波宽度和 CP 长度，并且在上行方向上引入了复杂的同步机制保证上行同步。

未来 5G 空口需要支持子载波跨度可配置，并支持可变子载波宽度情况下的频分复用，为了避免频域复用的物理层资源块（PRB）间干扰问题。可以考虑在 5G 使用新波形技术（例如 FBMC, F-OFDM）实现抑制子载波干扰的目的。使用新波形技术会带来基带处理复杂度，但是可以保证较高的频率效率。

物理层资源块（PRB）使用的子载波宽度，CP 长度和资源块大小可配置，在同一时隙为不同的物理层资源块（PRB）之间在频域预留保护间隔。

下图为由新波形技术引入的灵活帧结构示意图[10]。

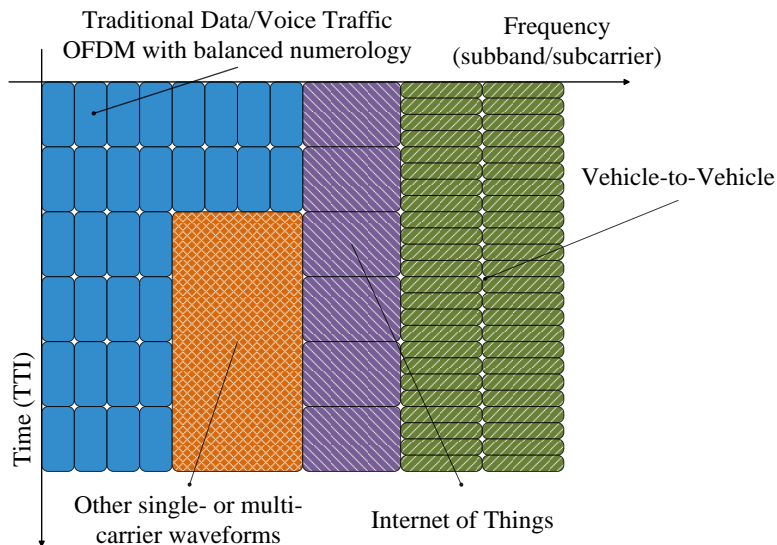


图 3-10 新波形技术引入的多种子帧结构复用

### 3.2.2 多元 LDPC 编码

多元 LDPC 码是一类基于高阶有限域  $GF(q)$  构造的线性分组码，比较于传统的二元 LDPC 码和 Turbo 码，中短码长的多元 LDPC 码能提供更大的编码增益，还具有抗突发错误能力强、易于同高阶调制相结合等优点。我们建议在低时延高可靠场景的间歇小数据包业务模型中采用中短码长的多元 LDPC 码。

采用多元 LDPC 码可以获得更大的编码增益，进而提供更高的传输可靠度。同时，使用多元 LDPC 码可以提高单次传输可靠性，在 HARQ 系统中可以减少重传次数，降低重传时延，进而实现低时延传输。

图 3-11 比较了基于  $GF(256)$  构造的码率为  $1/2$ ，码长为 416 的多元 LDPC 码与相似码长码率 Turbo 码和二元 LDPC 码经过 BPSK 调制后在 AWGN 信道中的性能，还包括了理论分析性能（联合界和有限长性能限）。可以看出多元 LDPC 码优于其它种类的码，并且更加接近理论性能限。

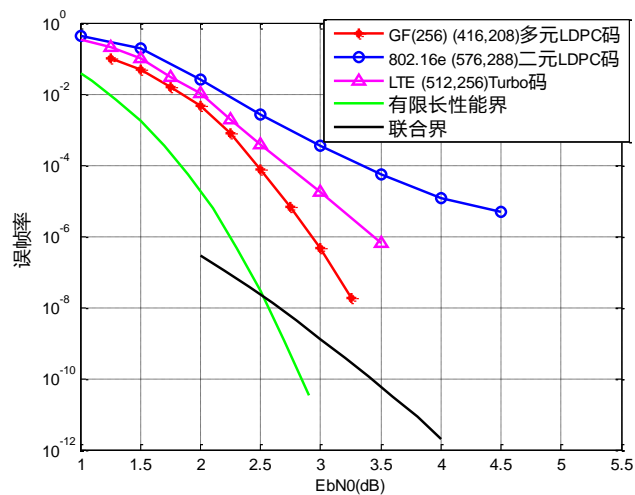


图 3-11 多元 LDPC 码与其它码的性能比较

图 3-12 比较了基于 GF(256)构造的码率为 1/2，码长为 1952 的多元 LDPC 码与相似码长码率的二元 LDPC 码，Turbo 码，Polar 码在 BPSK 调制 AWGN 信道下的性能比较。多元 LDPC 码性能优于二元 LDPC 码、Turbo 码和 Polar 码。

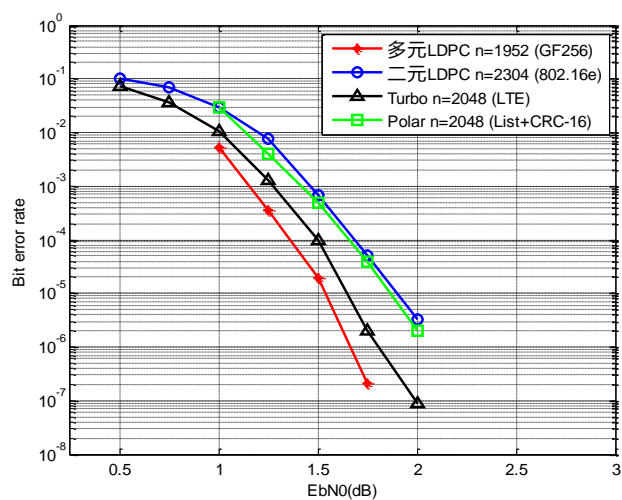


图 3-12 多元 LDPC 码与 Turbo 码，二元 LDPC 码和 Polar 码(List decoding+CRC)性能比较

图 3-13 比较了基于多元 LDPC 码、二元 LDPC 码和 Turbo 码构造的不同编码调制方案（谱效率为 1 至 5bps/Hz）在独立衰落信道下的性能比较。多元 LDPC 码比较于二元 LDPC 码、Turbo 码有 2 至 4dB 的增益。

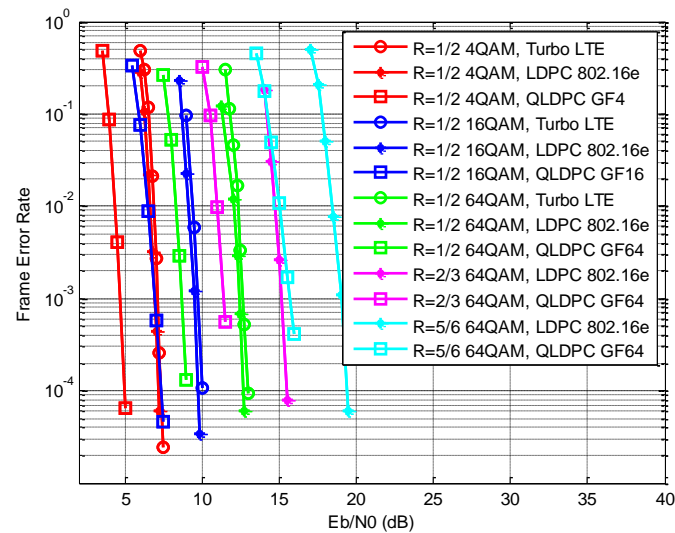


图 3-13 基于多元 LDPC 码，Turbo 码，二元 LDPC 码的编码调制方案在独立衰落信道下的性能比较

图3-14比较了多元LDPC码与二元LDPC码经过OFDM调制,在高移动信道(360km/h)下的性能。多元LDPC码优于二元LDPC码。

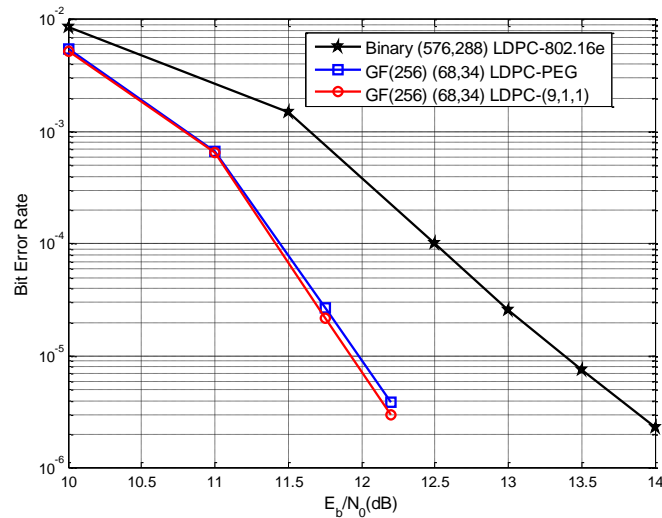


图 3-14 基于多元 LDPC 码和二元 LDPC 码的经过 OFDM 调制后在高移动信道下的

多元 LDPC 码比较与其它的码在性能上有明显的提升,但同时译码复杂度也很高,对于性能最好的快速傅里叶和积译码算法(FFT-SPA),它的译码复杂度大约为  $q \log(q)$  数量级,其中  $q$  为构造多元 LDPC 码时所使基于的有限域。例如对于基于 GF(256)的多元 LDPC 码 ( $q=256$ ),其复杂度比二源码高了 10 的 3 次方数量级。在实际通信系统中,这么高的复杂度是很难容忍的,为此,众多的简化译码算法相继被提出。

使用多元 LDPC 码的和积译码算法进行译码可以得到最好的性能,但同时这种算法的复杂度也是最高的;基于快速傅里叶变换的和积译码算法通过引入快速傅里叶变换,在几乎不损失性能的条件下降低了译码复杂度,但仍然难以实际应用;多元 LDPC 码的扩展最小和算法通过截短消息向量长度来降低复杂度;以上算法都是基于软信息的译码算法,而基于可靠度的多元 LDPC 码译码算法结合了软信息和硬判决算法,极大的降低了复杂度;联合迭代检测-译码算法结合多元 LDPC 码和高阶调制,在降低复杂度同时支撑了高谱效传输。各个译码算法关系和相应降低复杂度方法如下图:

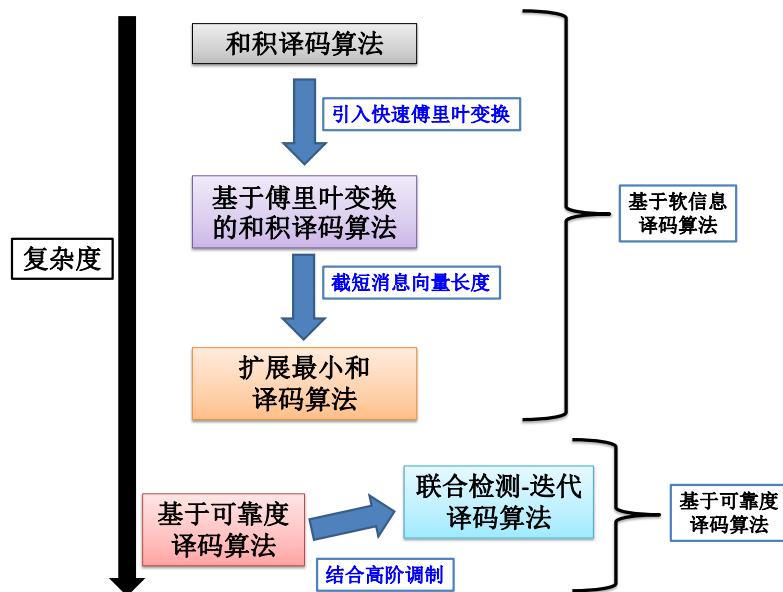


图 3-15 译码算法复杂度关系

当前，多元 LDPC 码的简化译码算法是多元 LDPC 码研究中最主要，也是最重要的内容。简单而言，简化译码算法是对复杂度和性能进行折中，已有一些可以具体硬件实现的简化译码，同时性能还优于二元 LDPC 码。

图 3-16 是多元 LDPC 码使用基于快速傅里叶变换的和积译码算法（FFT-SPA）和扩展最小和算法（D-EMS）时与二元 LDPC 码在 64QAM 调制和瑞利衰落信道下的性能比较。通过以下的仿真比较可以看出,D-EMS 简化算法比较与 FFT-SPA 算法仅仅有略微的性能损失，但比较与二元 LDPC 码仍有较大的性能增益。

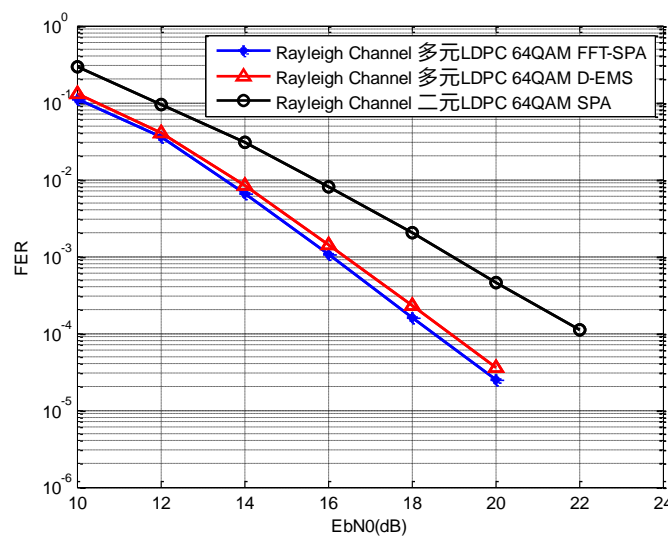


图 3-16 基于 GF(64)构造的多元 LDPC 码采用不同译码算法时结合 64-QAM 调制在衰落信道下性能

### 3.2.3 新型波形技术和多址技术

这部分只简单说明新型波形技术和多址技术对低时延高可靠的影响，具体的波形技术和多址技术在对应的专项研究中体现。

#### 1. 新型波形技术：

短子帧设计部分提到，CP 开销是短子帧设计的主要问题。无 CP 或多个符号共享 CP 的新波形是可能的解决方案。新型波形技术基于优化滤波器设计的 Filtered OFDM、FBMC 和 UFMC 等新波形。这类新波形技术具有更低的带外泄露，可进一步提升频谱使用效率，同时也可以支持帧结构、双工等其他基础模块实现灵活可配。由于不同波形的带外泄漏、资源开销和峰均比等参数各不相同，可以根据不同的场景及业务需求，选择适合的波形技术，同时有可能存在多种波形共存的情况。

#### 2. 新型多址技术

同步和调度流程是引入空口数据传输时延的主要来源。可通过新型多址技术实现免调度传输。如 SCMA、PDMA、MUSA 等技术。新型多址技术通过多用户的叠加传输，不仅可以提升用户连接数，还可以有效提高系统频谱效率，避免了资源分配流程，实现上行数据包调度“零”等待时间。

### 3.2.4 小结

空口物理层技术是实现低时延目标的根本解决方案。其中短子帧设计是基础。通过新型波形技术、多址技术，以及新型编码技术的引入，除了进一步提高可靠性，降低干扰外，还为短子帧设计提供了更大的空间。

## 3.3 空口高层关键技术研究

### 3.3.1 基于多连接的空口传输技术

#### 1. 设计思路

下图为用户终端保持多连接的示意图。终端保持多个无线连接，通常用于提高用户吞吐量或供用户选择更为经济的无线传输通道。但从另一个角度来讲，这也意味着终端具有更多



的频率资源和空间资源。为实现在极低时延下的极高可靠性，一种可供考虑的方案是由与终端保持连接的多条无线传输通道同时为终端提供业务数据传输，提供空间和频率上的冗余传输。举例来说，如果有两条无线链路同时为终端提供数据传输，每条链路的传输可靠性为  $10^{-3}$ ，时延为 5ms，如果在这两条无线链路上为终端传输相同的业务数据，在 5ms 内，业务数据传输可靠性可以达到  $10^{-6}$ 。

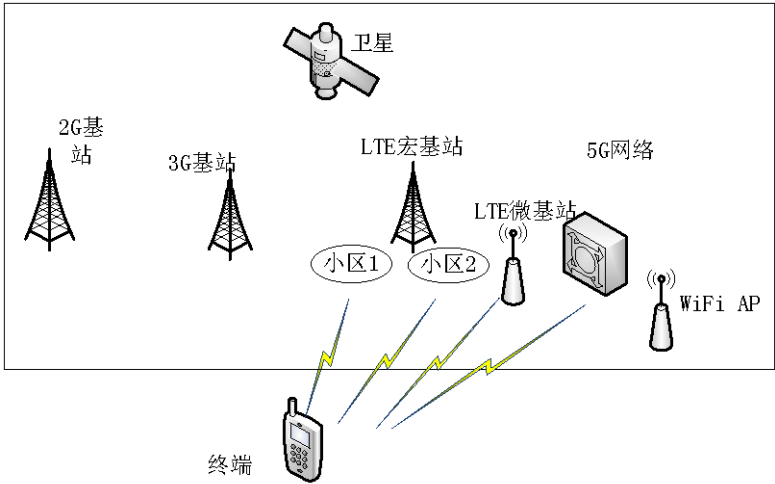


图 3-17 多空口连接示意图

2. 技术方案

基于多连接的空口传输技术可以利用空间分集、频率分集和多 RAT 分集。

➤ 频率分集（Frequency Diversity）

频率分集基本原理是利用不同频段的非相关性，在多个频段对同一个 TB（Transmission Block）进行传输。例如，现有 LTE 载波聚合（CA）技术已支持终端在多个频段进行同时数据传输。但是由于目前载波聚合技术仅用于提高传输峰值速率性能，因此载波聚合技术仅用于在不同载波上进行不同 TB（Transmission Block）进行传输。

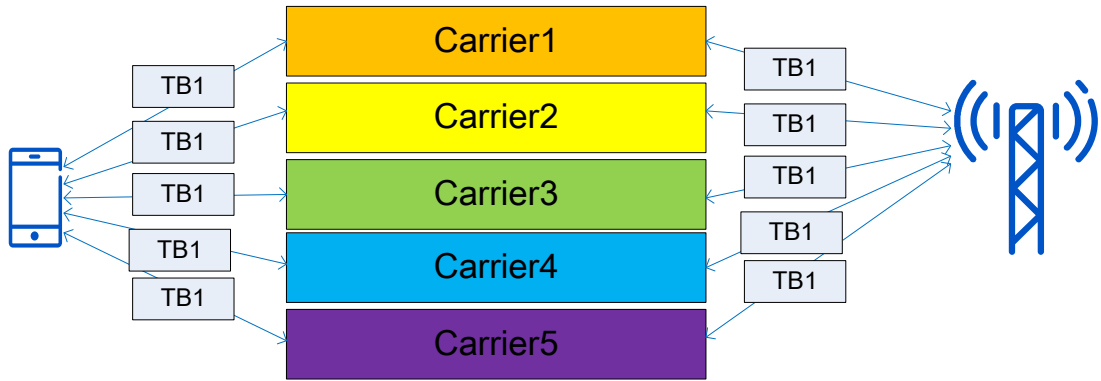


图 3-18 频率分集的应用

假设单载波上单次传输的可靠性可以达到 90%，为了实现在极短时延（例如空口时延低于 1ms）空口传输可靠性达到 99.999%的目标，需要发送端通过并行方式同时在多个载波（Carrier）上同时发送相同的 TB 块，并且接受端尝试从多个子载波进行数据接收。

除了载波聚合下的应用，对于频率带宽资源比较丰富（例如在毫米波段，未来单载波带宽很可能超过 100M），带宽较大使得子载波间正交性很强的情况，可以考虑直接在大带宽的单个载波上同时传输相同数据包的多个传输块。

表 3-6 频率分集分析

	Pros	Cons
频率分集	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 可实现极短延下极高可靠性</li> <li>- 对网络部署要求低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 在频域上对无线传输资源浪费严重</li> <li>- 硬件要求高（要求发送端和接收端能够同时在多个载波上进行收发）</li> <li>- 要求发端支持极高的峰值发射功率</li> </ul>

➤ 空间分集（Spatial Diversity）

空间分集基本原理是利用空间信道的非相关性提高空口传输可靠性，从而实现在发送端仅进行一次空口发送的情况下，接收端通过多个相互独立的空间信道对同一个 TB（Transmission Block）进行接收的效果。其中，接收端可以对从空口接收到的信号进行独立解码，也可以将从空口接收到的信号采样回传给基带池（Baseband Pool）进行联合解码。

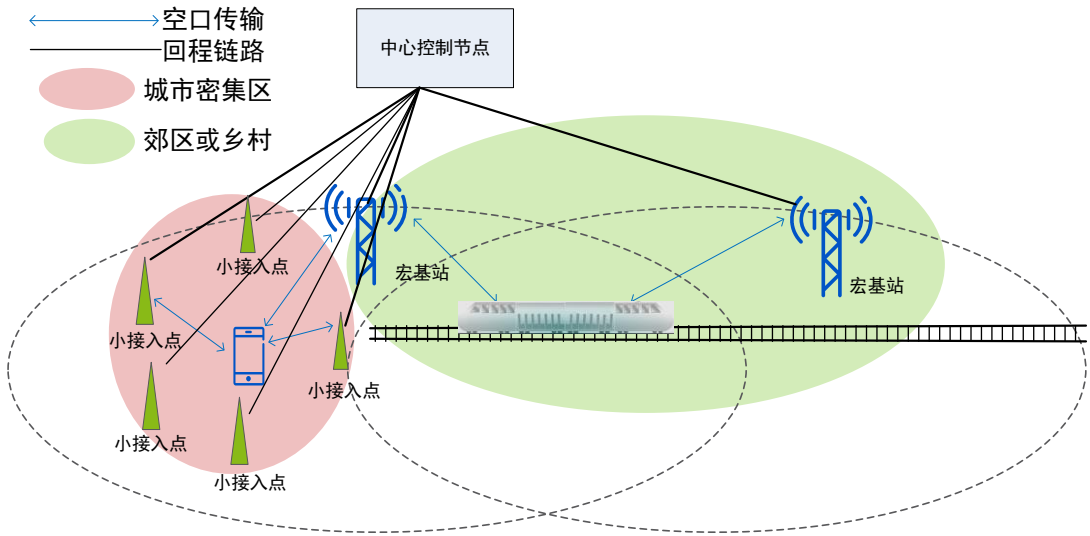


图 3-19 空间分集的应用

利用空间分集增益的典型部署场景如图所示，一方面，未来城市密集区域小小区（Small Cell）大量密集部署情况下，利用终端天线到周围多个小接入点天线间信道的非相关性提高数据传输可靠性。另一方面，在郊区或农村区域很可能仅有负责覆盖的宏接入点信号覆盖，在这种情况下可以通过扩大宏小区重叠覆盖区域，保证终端在宏小区中心以外区域至少可与两个宏接入点通信（例如，通过扩大宏小区交叠区域提高铁路通信系统切换成功概率的方案被应用与 GSM-R 和 LTE-R 系统中）。

表 3-7 空间分集分析

	Pros	Cons
空间分集	<ul style="list-style-type: none"><li>- 可实现极短时延下极高可靠性</li><li>- 无线资源利用率高</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- 对接入点组网和网络规划有强制性要求</li><li>- 要求接入网架构支持空间分集技术</li></ul>

➤ 多 RAT 分集（Multi-RAT Diversity）

通常不同 RAT 的接入点很可能被部署在相互独立的地理区域，或者即使部署在同一区域，不同 RAT 使用的频率资源基本上不相关，，因此多 RAT 分集能够同时带来空间分集增益和频率分集增益。但是采用多 RAT 分集也会带来一些问题，由于现有 WiFi 接入方式主要工作在 ISM 频段，因此存在干扰不可控的问题。此外，对于多系统共享频谱资源场景，有可能需要多系统将通过时分的方式对频谱资源进行共享，因此对于极短时延（例如空口时延低于 1ms）要求情况下，无线资源在时域上使用的硬性规定，也会对多 RAT 分集增益造成影响。

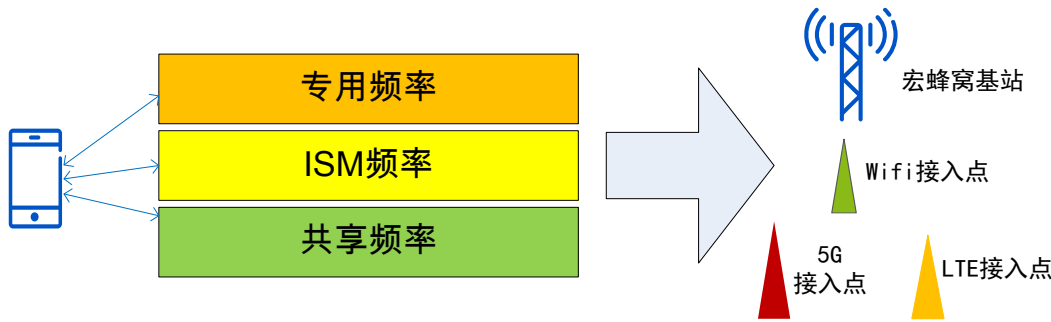


图 3-20 多 RAT 分集的应用

3.3.2 可配置协议栈

设备处理时延涉及到设备设计和生产工艺以及材料等多方面因素，我们只从协议相关角

度进行考虑。从协议相关角度，设备处理时延直接相关的是空口协议栈设计和处理流程。低时延高可靠场景具有特殊性，针对特定场景，有特定的业务和数据量需求，可以进行针对性设计。

因此，空口数据组织时可以采用可配置协议栈，根据业务类型、数据包大小、终端类型、应用场景等因素，对上下行数据传输配置协议层结构和/或协议层功能。

LTE 系统用户面数据流基本过程如下。空口用户面层 2 包括 PDCP、RLC、MAC 层，通过层 2 处理后的数据包到达物理层，通过物理层（层 1）编码调制等处理成为空口发送的比特流。PDCP 层具有头压缩和加密功能；RLC 层具有分段和级联功能；MAC 层具有承载复用功能；物理层对 MAC PDU 添加 CRC 和物理层调制编码处理，形成传输块在空口发送。

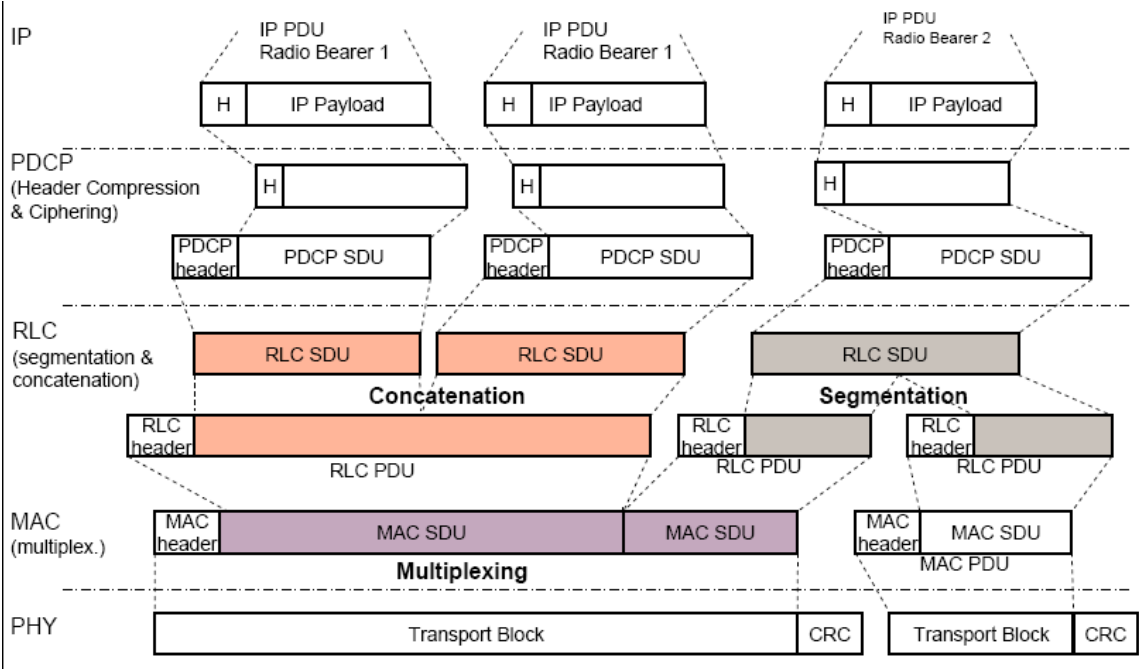


图 3-21 LTE 用户面数据基本过程

LTE 的层 2 协议栈设计具有通用性和完备性，但对于特定的数据传输，如信令传输、小数据传输则不够优化。以车联网为例，车联网中传递的大多是小数据包，每辆车传递可以很多小数据包，每个数据包大小为 1~100byte。如果采用 LTE 协议栈，各协议层所添加的头大小与有效信息相比，开销过大。此外，多层协议栈处理不利于降低处理时延。

可配置协议栈可以有两种处理方式：

1. 根据需要从 PDCP、RLC、MAC 层选取层 2 子层

LTE 协议有透传模式，透传模式下数据在各个层 2 子层都透传，直接递交物理层。不适用于低时延高可靠场景的数据传输需求。

可配置协议栈可以是沿用 LTE PDCP、RLC、MAC 层分类方式和各层功能，根据业务类型、数据包大小、终端类型、应用场景等因素，对上下行数据传输配置所需的协议层和空口数据组织功能（如加密、头压缩、分段、级联、不同业务承载复用等）。例如不需 RLC 层功能，数据直接从 PDCP 层处理后递交 MAC 层，也不需要提交 RLC 头等处理。

## 2. 只有一个层 2 子层，按照功能配置

可配置协议栈配置也可以是空口协议栈所支持功能的配置，根据配置的功能组织数据传输。即按照功能配置，根据功能需要组织空口数据分组单元 PDU 结构，添加数据头。例如对特定终端只支持一种业务传输，且是小数据包，空口数据组织和传输可配置为支持数据包级联，则在 PDU 组织的时候，只需要将多个数据包级联和添加一层协议层头即可。

### 3.3.3 终端协同传输技术

传统蜂窝通信系统由于受到功率、干扰、带宽和部署结构的限制，将不能满足日益增长的业务需求，尤其是在频谱效率和网络覆盖上，边缘地区用户和热点地区用户都面临着“盲服务”的问题。协作通信与传统点对点通信不同，利用无线传输的广播特性，允许无线网络中不同的用户或节点分享资源，通过分布式传输/处理而获得协作，这里的分布式传输就是指用户不仅自身传输，而且还有作为中继的协作用户或节点。在无线通信网络中，协作通信是一种可获得高可靠性增益和通信容量增益的通信范式，它实现了一种对抗严重衰落效应的新形式的空间分，以获得高传输速率和传输可靠性、增加网络覆盖等。

传统的通信网络传送数据的方式是存储转发，即除了数据的发送节点和接收节点以外的节点只负责路由，而不对数据内容做任何处理，中间节点扮演着转发器的角色。网络编码是一种融合了路由和编码的信息交换技术，它的核心思想是在网络中的各个节点上对各条信道上收到的信息进行线性或者非线性的处理，然后转发给下游节点，中间节点扮演着编码器或信号处理器的角色。基于网络编码的协作通信机制可以大幅提高带宽利用以及增大蜂窝网络覆盖率达到提高通信可靠性的目的。

考虑一个包含有  $M$  个信源和  $K$  个中继的协作通信网络。假设第  $k$  个中继使用编码系数  $\alpha_{k,m}$  对第  $m$  个信源消息  $I_{S_m}$  进行编码，其编码后的码字为  $I_{R_k} = \sum_{m=1}^M \alpha_{k,m} I_{S_m}$ ，式中加和在高维有限域进行。由此，信源和中继的消息可以用下式表示

$$\begin{bmatrix} I_{S_1} \\ \vdots \\ I_{S_M} \\ I_{R_1} \\ \vdots \\ I_{R_K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \cdots & \alpha_{1,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{K,1} & \alpha_{K,2} & \cdots & \alpha_{K,M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S_1} \\ \vdots \\ I_{S_M} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{G}$

选择编码系数 $\alpha_{k,m}$ 使得由转移矩阵 $G$ 中任意 $M$ 行组成的矩阵为非奇异矩阵（即满秩），信宿可由其从任意 $M$ 个节点收到的消息恢复出全部信源消息，此时系统获得最大的分集增益。此有限域网络编码（finite-field network coding, FFNC）方式与信道编码系统中的极大距离可分码（maximum distance separable (MDS) code）构筑思想相同，因此也可称为 MDS-FFNC。

此处使用数值分析协作传输的性能，考虑包含 4 个信源、2 个中继和 2 个信宿的协同传输通信场景，信道模型使用瑞利信道，此处不考虑路径损耗的情况。仿真中规定四个信源相互独立，若任意一个信宿不能成功解码任意一个信源信息则视为通信失败。在此系统中，有三种传输模式可以选择：

1) 无用户协作的直接通信：信源消息不经中继直接发送给信宿，此模式使用 4 个资源发送 4 个独立信源信息，信道利用率高，但系统的分集增益小，易受无线信道衰落及干扰影响，传输可靠性（解码错误率）随信噪比增加的改善较为缓慢。

2) 基于重复编码（Repetition-Coded）的协作通信：中继解码后不进行网络编码操作，而是使用与信源相同的信道编码将信源消息独立转发给信宿。此模式能够给系统带来分集增益 3，极大改善通信可靠性。但它需要 12 个资源完成 4 个信源消息的传输（每个中继需要 4 个资源转发所有信源消息），信道利用率低。

3) 基于 MDS-FFNC 的协作通信：中继解码后以 MDS-FFNC 将信源信息编码，再转发给信宿。此模式使用 6 个资源完成 4 个信源信息的传输（每个中继用 1 个资源转发网络编码后的信源消息），并能够充分利用 2 个中继获得分集增益 3，因此在信道利用率和传输可靠性方面同时具有优势。

图 3-23 所示为上述三种传输模式的中断概率（outage probability）仿真。为保证比较的公平性，仿真中假设三种模式中每个信源的平均传输速率相等，为 1/4 BPCU (bit per channel use)，即模式 1 中每个信源消息含 1 比特信息，模式 2 中每个信源消息含 3 比特信息，模式 3 中每个信源消息含 3/2 比特信息。由图可见，低信噪比下，由于模式 1 中每个链路的传输速率最低，其解码错误率也最低。随着信噪比的增加，分集增益带来的通信质量提升更显著，此时通过终端协作获得的通信性能迅速高于无协作的情况。而相同信噪比条件下，使用网络编码将优于不使用网络编码的系统。可以证明，随着网络节点数的增加，网络编码的优势将更加显著。

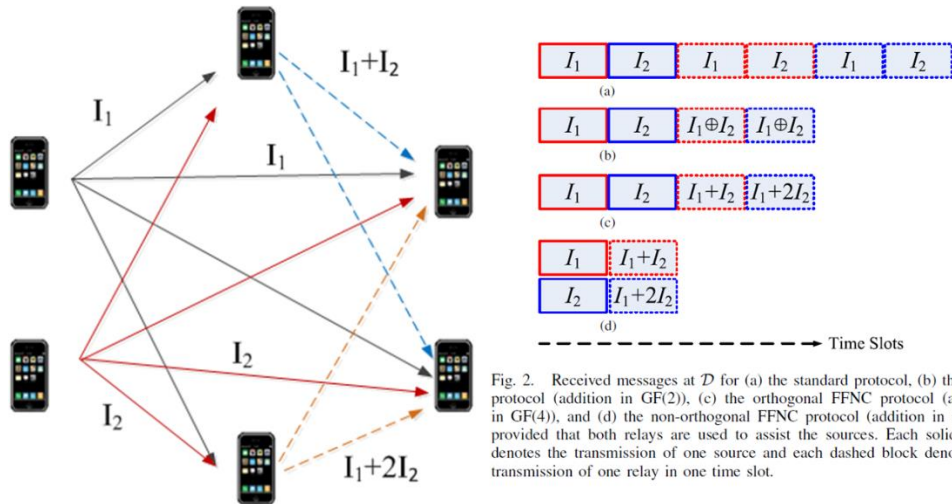


图 3-22 终端协同传输示意图

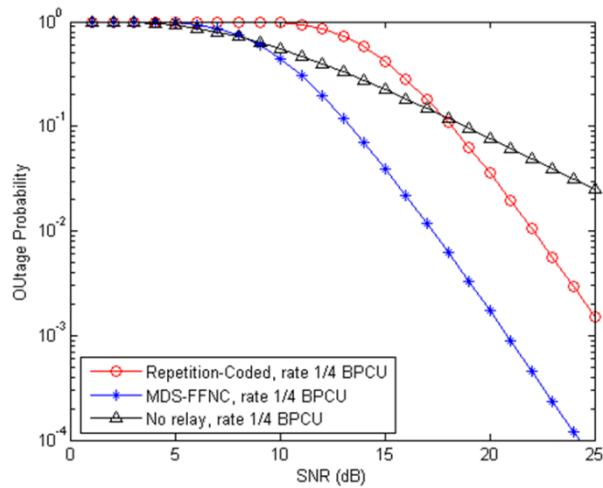


图 3-23 中断概率比较（4 信源/4 中继/2 信宿网络）

### 3.3.4 免调度传输

#### 3.3.4.1 基于 LTE 的调度方案设计

LTE 系统的数据传输是基于调度方式传输的，即 UE 发送数据所使用的资源是基站为终端分配好的专用资源，并且是经过了基站终端间的资源请求和调度过程。对于低时延通信，除了基于调度方式以外，一种比较有时延优势的数据传输方式为免调度传输。

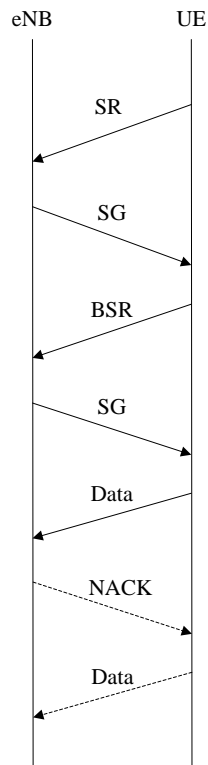


图 3-24 LTE SR-SG 调度方式

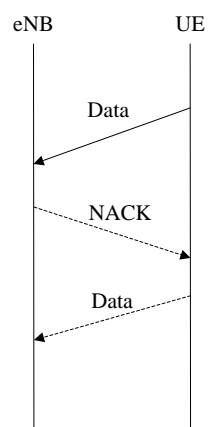


图 3-25 免调度传输方式

免调度传输首要解决的是上行传输资源问题。基于上行传输资源的使用方式，分为 eNB 预分配资源和基于竞争的上行传输两种方式。

#### 1) 预分配资源

基站为 UE 预分配资源，UE 发送数据的资源属于 UE 专用，不存在竞争和冲突问题，传输时延最短。但由于资源不共享，易造成整体通信网络效率较低，同时不适合大量终端存在的场景。

#### 2) 基于竞争的上行传输



基于竞争的上行传输方式下，发送数据的上行资源多个 UE 共享。基于竞争的上行传输可进一步分为：

➤ 竞争解决后发起传输

UE 在发送数据前进行类似 WiFi 系统的 LBT，竞争成功后才应用竞争成功的资源发送数据，该方式在终端数量不多的室内场景能够获得较短的时延，在终端数量较多时效率不高。

➤ 竞争的上行传输

上行数据资源属于多个 UE 共享，UE 发送数据时直接使用上述资源全部或者部分，不考虑和其它 UE 的冲突问题。该方式适合终端数量较多且业务随机的场景，但是在冲突概率较高时会使得系统效率低下。

为了进一步解决冲突问题，可以分别从发送端和接收端进行考虑，从发送端可以考虑选择采用某些随机化算法来降低冲突概率或者选择采用分层调制减轻冲突问题；从接收端可以考虑冲突检测调整资源分配或通过高级接收机接收存在冲突的不同 UE 的数据。

一种可能的随机化算法：利用 hash 算法降低发射端获取资源冲突概率。设共有  $V$  个资源，其索引分别为  $0,1,2...(V-1)$ ；每个终端最多有  $K$  次机会来参与竞争资源，则，对于某个终端，其第  $k$  次获得的资源索引应为  $R_k$ ， $R_k$  通过下述方式确定：

$$R_k = kM + \left\lfloor \frac{MX_k}{D} \right\rfloor$$

$$\text{其中, } M = \left\lfloor \frac{V}{K} \right\rfloor, X_k = (AX_{k-1} + C) \bmod D, X_{-1} = I$$

其中， $C$  是一个常数， $D$  为一个远大于  $V$  的正整数； $A$  是一个与  $D$  互素的正整数， $I$  则是网络分配的一个终端专用的参数，如  $C-RNTI$  等。

#### 3.3.4.2 基于新型波形技术和多址技术的免调度传输

新型多址技术的引入为免调度传输提供了天然的空间。新型多址技术通过多用户的叠加传输，不仅可以提升用户连接数，还可以有效提高系统频谱效率，避免了资源分配流程，实现上行数据包调度“零”等待时间。

本文通过 PDMA 技术对免调度传输进行探讨。其他新型多址技术可以采用类似方式。

PDMA 作为一种非正交多址技术，采用具有不等分集度的 PDMA 图样进行用户之间的

分割。PDMA 系统中资源可扩展为频率、时间、空间以及 PDMA 图样，四者可独立或者联合使用。PDMA 图样矩阵中的不同的图样有不同的分集度，从而会带来不同的检测可靠性。PDMA 图样矩阵中的图样在用户间合理分配，可以充分利用 PDMA 图样矩阵不等分集度的特点，实现与用户信道条件的灵活匹配。

基于 PDMA 的上行免调度传输的基本研究内容包括以下几个方面。

1. PDMA 基本传输单元

对于 PDMA 系统，设计其 PDMA 基本传输单元可以从时间、频率、码字组、码字、导频考虑。下图为一种设计图样。

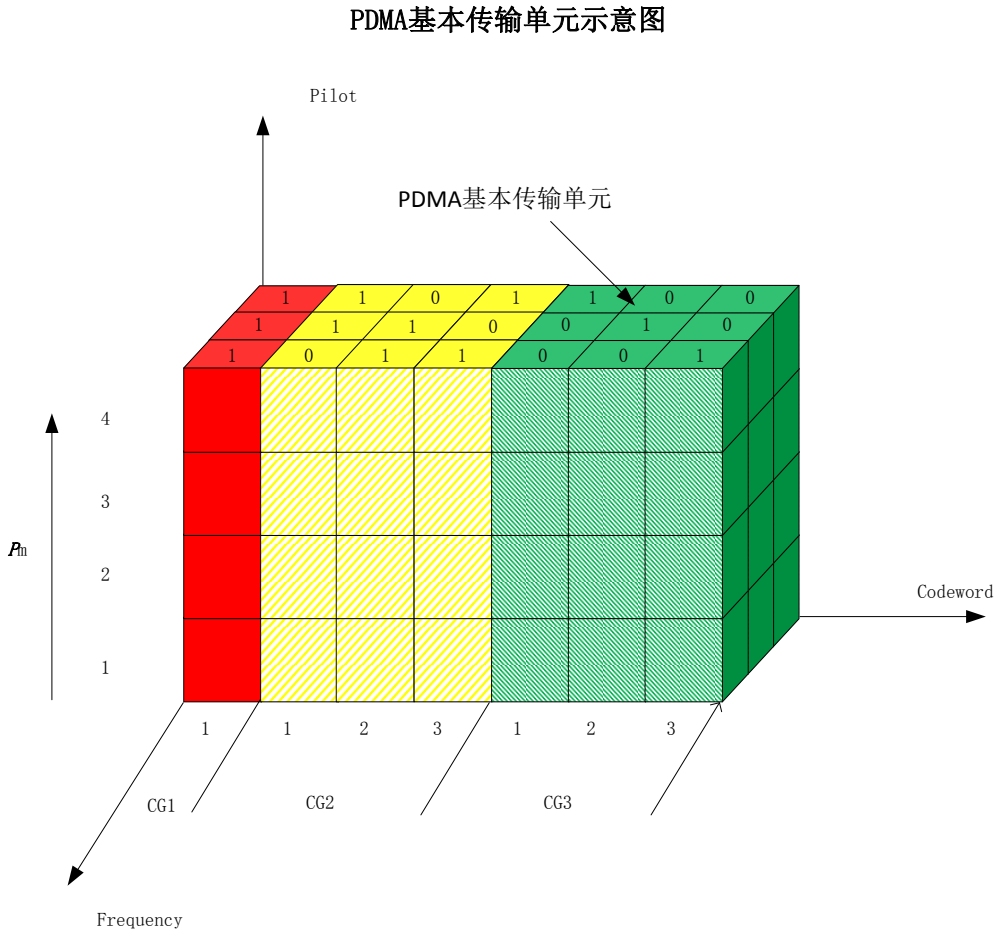


图 3-26 PDMA 图样示意图

对于 PDMA 基本传输单元的划分可从下列角度考虑：

- 1) 时频域采用与 4G LTE 相同的划分规则，也可以设计新的规则；

2) PDMA 码域首先根据一定的准则选取合适的 PDMA 码本矩阵, 再根据 PDMA 码本矩阵的不等分集度特点, 可将具有相等分集度的 PDMA 码字分别分组并编号, 之后再将各分组内的码字进行编号; 之所以按照分集度分组, 主要考虑基站下的终端用户分布不同, 且终端用户到基站的上行信道条件也不同, 因此可以将处于相同信道条件的终端用户分在同一分集度的码字组内, 示意图如下所示:

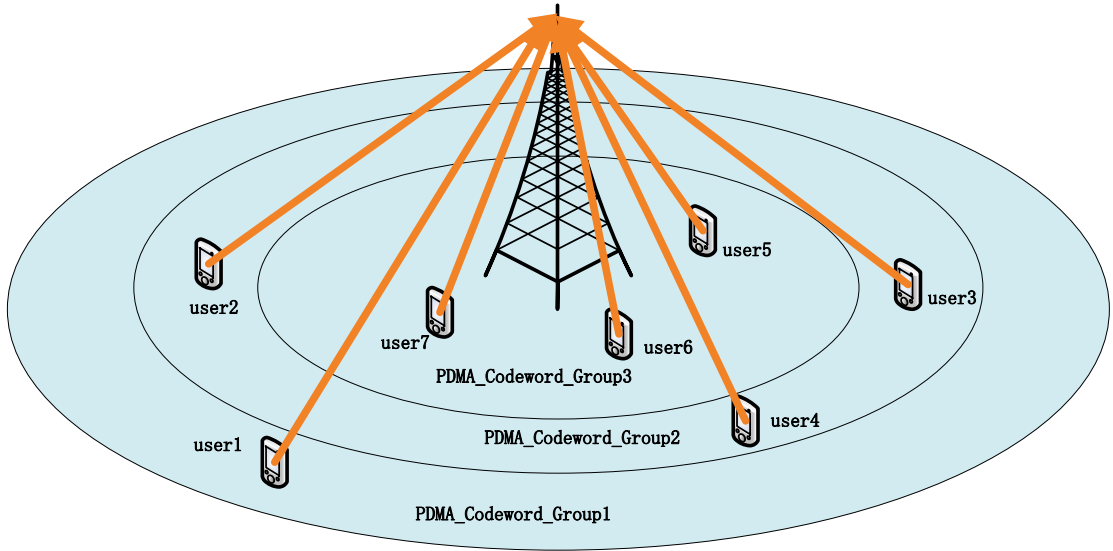


图 3-27 用户分组示意图

- 3) 每一 PDMA 传输基本单元均分配唯一导频资源。
2. 终端用户到 PDMA 传输基本单元映射规则
- 对于终端用户到 PDMA 传输基本单元的映射有两种方案。
- 方案一

在用户终端接入时, 基站已为用户终端分配好相应的资源。即用户终端与一定数量 PDMA 传输基本单元绑定, 在用户有数据要发送时, 即用已分配好的资源发送。

  - 方案二

在用户终端接入时, 基站未将资源分配给用户。用户根据自己特有的用户特征 (如物理 ID) 按照一定规则映射到相应 PDMA 传输基本单元块, 如终端用户物理 ID 与所有 PDMA 传输基本单元数取模等。

3. 接入控制策略

接入控制策略需要解决时频资源比例在调度与免调度之间如何分配,时频资源是否复用;以及是否考虑 HARQ 机制来保证高可靠性的问题。

下面利用 PDMA 的 3x7 矩阵具体阐述上述内容。

对于 PDMA 3x7 矩阵,

$$\mathbf{B}_{PDMA,3 \times 7} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{C_3^3=1}$

$\underbrace{\hspace{2.5cm}}_{C_3^2=3}$

$\underbrace{\hspace{2.5cm}}_{C_3^1=3}$

其具有 3 种不同分集度的码字,可以将码域分为 3 个码字组,每个码字组内的码字个数分别为:  $C_3^3=1$   $C_3^2=3$   $C_3^1=3$ 。可为每一码字分配一定数量的导频资源。这样,按照不等分集度的特点,对于不同的终端用户可以依据基站的远近按照一定原则进行等圆线分配(如根据 RSRP 或 SNR 进行用户分类)。对于 3x7 矩阵,可分配为 3 类用户,对应于相应的码字组。组编号可以半静态通知给终端用户,也可以按照固定的原则映射给终端用户。

### 3.3.5 其他传输优化

#### 3.3.5.1 基于随机接入方式的上行传输

基站(eNB)为上行数据包传输预留专用 Preamble Pool 并通过系统广播信息在小区内广播,终端进行上行小数据传输时从专用 Preamble Pool 选择 Preamble,基站接收到 Preamble 后,根据 Preamble 所属的 Preamble Pool,并按照预先设定的 Grant Size 为上行传输分配 Grant,终端收到上行 Grant 分配后,按照 Grant 指示将上行用户面数据发送给基站,并携带“随机数”用于冲突解决,基站正确收到上行数据包后,向终端发送冲突解决随机数(即终端随上行数据携带的随机数),终端通过比较基站发送消息中携带的“随机数”判断上行数据传输是否成功。

表 3-8 preamble pool 定义

	Preamble index	Grant size
Preamble Pool1	Preamble index :1~ 10	500 bits
Preamble Pool2	Preamble index :10~ 20	1000 bits

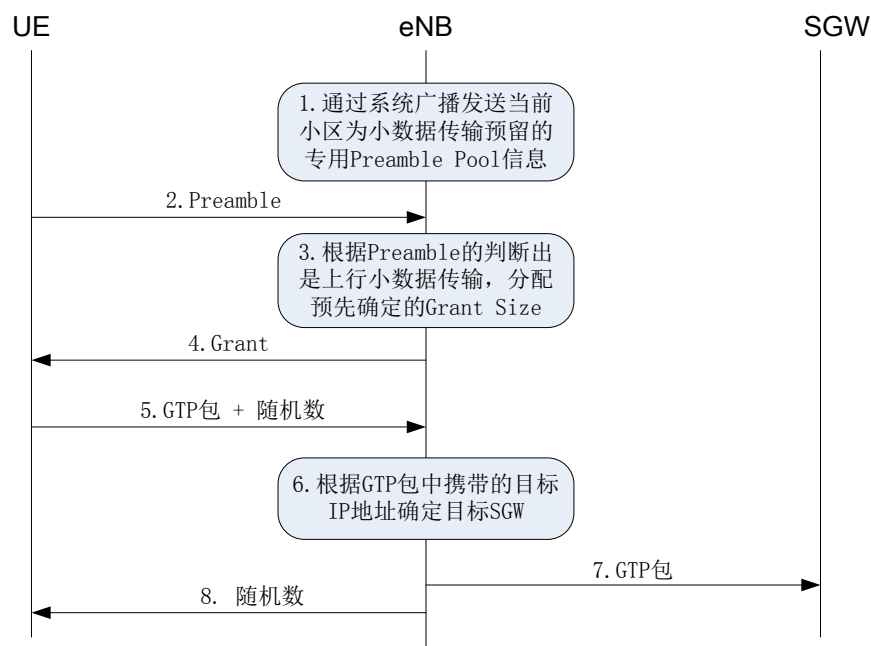


图 3-28 基于随机接入方式的上行传输

### 3.3.5.2 基于随机接入方式的下行传输

在空口随机接入方式中，下行数据到达基站后，基站通过寻呼信道对终端进行寻呼，并通过寻呼消息携带随机接入配置。终端收到寻呼消息后，使用寻呼消息中携带的随机接入配置发起随机接入过程，基站在随机接入过程中将下行数据包发送给终端。在该方案下，下行数据仅在终端驻留小区的空口进行下行传输，因此不会造成系统资源方面的浪费。此外由于专用 Preamble 尽在下行传输期间内被分配给终端，在下行传输完成后将被释放，因此对系统内 Preamble 的资源利用方面也不会造成明显影响。

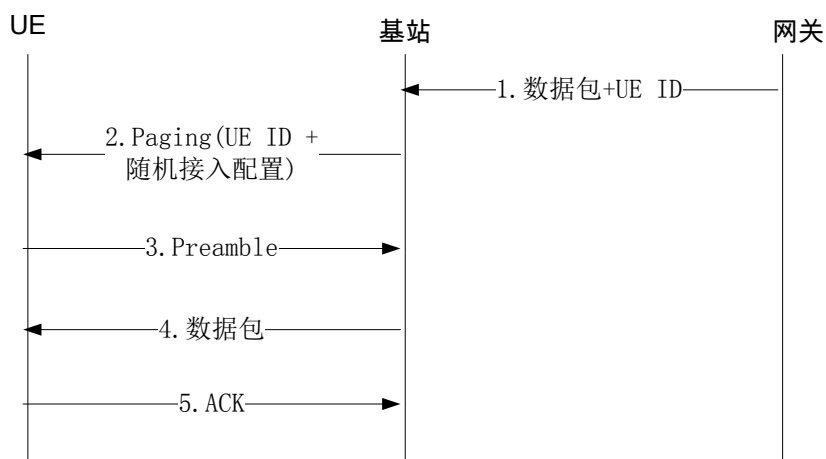


图 3-29 基于随机接入方式的下行传输

### 3.3.5.3 基于广播方式的下行传输

在空口广播方式中，下行数据到达基站后，基站直接通过广播信道或寻呼信道，将下行

数据包连同 UE ID 在空口直接进行发送。终端尝试从广播信道或寻呼信道对下行数据包传输进行接收。由于该方案在空口数据传输上采用了广播方式，因此在高移动性场景下（终端做大范围移动），并且下行数据包较大的情况下会对系统广播信道或寻呼信道造成较大的负担。因此本方案和适合终端低移动性，突发数据包尺寸较小的场景。

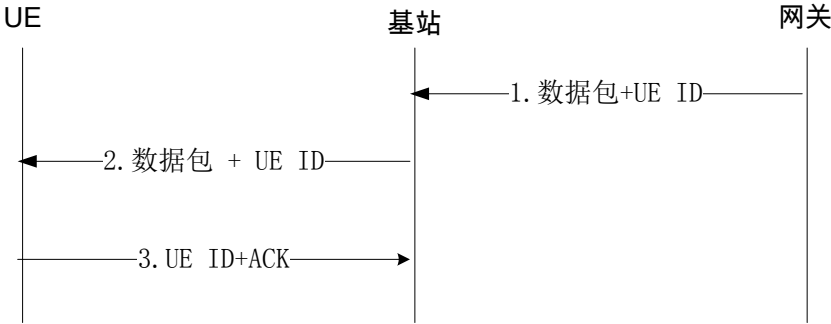


图 3-30 基于广播的下行传输

3.3.6 小结

低时延高可靠基于蜂窝网的空口高层技术可以分为多连接传输技术、可配置协议栈、终端协同技术、免调度传输几个大类。

- 多连接传输技术的直接效果是提高传输可靠性，从而降低重传概率并达到降低传输时延的效果，多连接传输技术与网络架构、核心网协议及具体的空口接入层协议密切相关，根据不同的网络层协议和空口协议，有许多需要拓展研究，具体细节分析设计的内容。
- 可配置协议栈的目的是最小化空口处理时延，与具体空口传输技术相关，是个相对独立的空口设计方向，后续需要设计具体的协议栈及信令、传输机制。
- 终端协同技术与网络编码技术密切相关，同时也可以与多连接传输技术相结合。
- 免调度传输是 3GPP 时延缩减项目的主要研究方向，随着 5G 引入新型多址技术，免调度传输更加高效可行。

3.4 动态自组织网络

3.4.1 设计思路和组织方式

严格低时延高可靠的场景，要求网络侧时延几乎可以忽略，且主要针对区域性部署的机器类终端。而在传统蜂窝网络设计中，功能和物理设备是强绑定关系，采用集中式的控制与数据路将不可能避免的造成时延瓶颈。针对这两个特点，动态自组织网络（MESH 网络）相比传统蜂窝网具有明显优势。

动态自组织网络与集中控制网络相对应，具有本地管理、本地控制、数据和传输功能本地化的特点。可以最小化网络侧时延，以达到将网络时延降低到最小的目的避免数据往返路

由，排队等待等问题。

为了适应新业务场景和优化新业务实现，如不同机器类终端的有效协同和传输，动态自组织网络的基本设计思路包括：

- 1) 控制本地化：引入本地控制功能，如设置本地控制中心。对用户、数据以及传输实现快速反应和有效控制。
- 2) 数据本地化：数据本地化的目的是最快获取有效数据，减少数据路由带来的时延开销。
- 3) 传输本地化：传输本地化是指数据传输不经过远程核心网等网络实体，只经由本地节点实现，具体方式包括如 D2D、本地接入点转发等。传输本地化是实现空口时延最小化的直接方式。
- 4) 其他技术思路：控制和转发分离、控制面和用户面分离。控制和转发分离、控制面和用户面分离是其他技术需求中也涉及到的技术思路，在低时延高可靠中的作用是优化控制和传输路径，实现可靠控制和有效传输。
- 5) 与蜂窝网的关系：5G 是针对多样化场景的综合性解决方案，针对不同的场景需求，5G 系统采用整体性设计。针对不同需求，如低时延高可靠，则引入整体架构下的特定设计。因此，面向低时延高可靠需求的动态自组织网络是基于蜂窝网控制或至少是使用蜂窝网资源的受控网络。

基于上述设计思路，针对低时延高可靠的动态自组织网络的大致组织方式如下图。这种网络组织方式具有组网灵活、动态可配置的特点。

图中有三个场景下的组织方式示例，为区别于传统终端 UE，此处将机器类终端称为 EP (End Point)，本地控制中心称为 DSC (Distributed Service Center)。动态自组织网络可以与蜂窝网基站、核心网连接，由蜂窝网全权控制，也可以由本地控制中心控制，动态自组织网络内的通信方式可以是基于蜂窝网的数据传输、基于“簇管理”的簇内传输，或终端间直接通信。

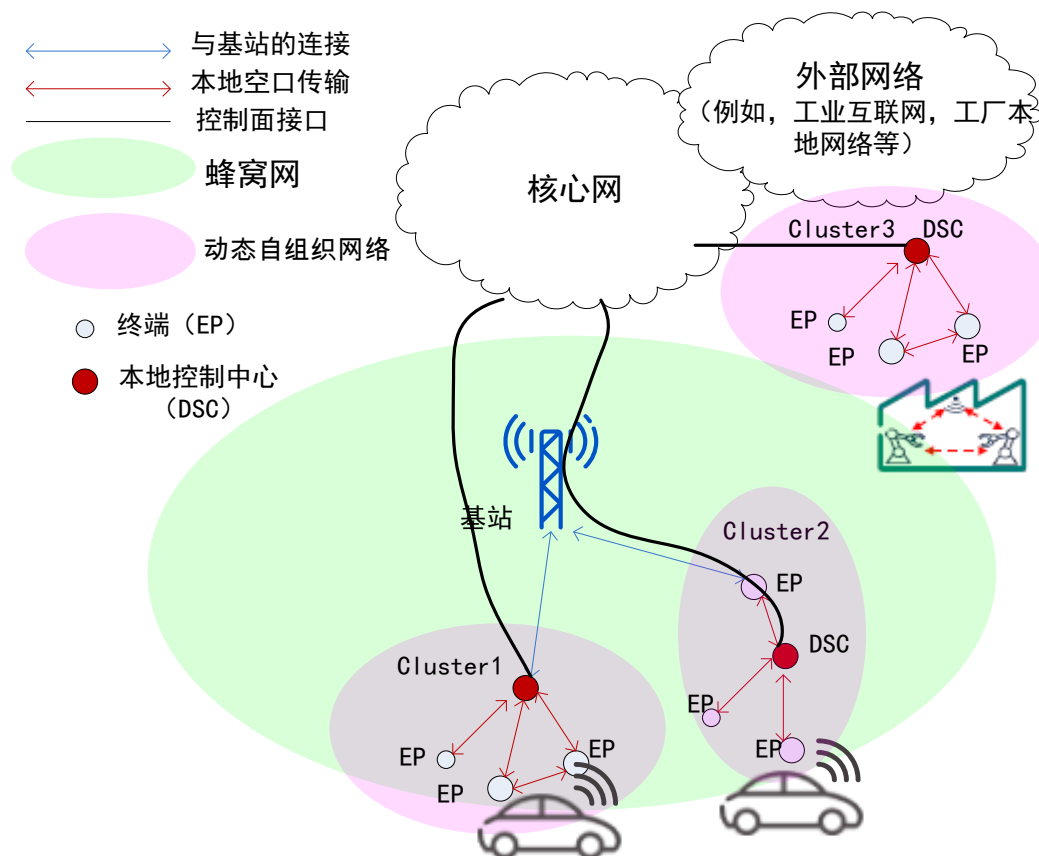


图 3-31 动态自组织网络组织方式

动态自组织网络具有如下特点：

- 基于蜂窝网控制/使用蜂窝资源
- 具有区域性自主性：包括控制、管理和传输功能
- 区域内灵活自组织、自我管理
- 动态网络：网络功能和角色、网络拓扑的动态配置（如控制中心功能位置的灵活化等）

### 3.4.2 关键过程设计

#### 3.4.2.1 终端管理过程

动态自组织网络下的终端 EP 数量一般说来很大，且具有可成簇管理及区域内通信的特点，如点到点通信或与区域服务器通信。如果沿用蜂窝网的终端管理过程，随着机器类终端数量增加，会加大核心网的负担并且容易引起信令风暴的问题。

从终端管理的角度，动态自组织网络中的终端类型可以分为两类：

- 一类终端 (Type1 Terminal)：终端对于核心网不可见，核心网对簇内终端动态组成的组进行群组管理。
- 二类终端 (Type2 Terminal)：终端对于核心网可见，核心网可对单个终端进行管理。



### 1. 第一类终端管理

针对第一类终端，核心网对终端的管理通过本地控制中心 DSC 实现。DSC 功能实体确定获得核心网授权，对簇中的 EP 进行管理。具体的终端管理过程可以包括终端附着/去附着过程、终端状态更新过程、终端业务激活/去激活过程等。以下以终端附着过程为例进行说明。

终端附着过程示意图如下。对于附着过程，由于终端对核心网不可见，核心网预先不保存终端的签约信息，因此对终端的接入控制和鉴权功能由 DSC 功能实体负责管理。

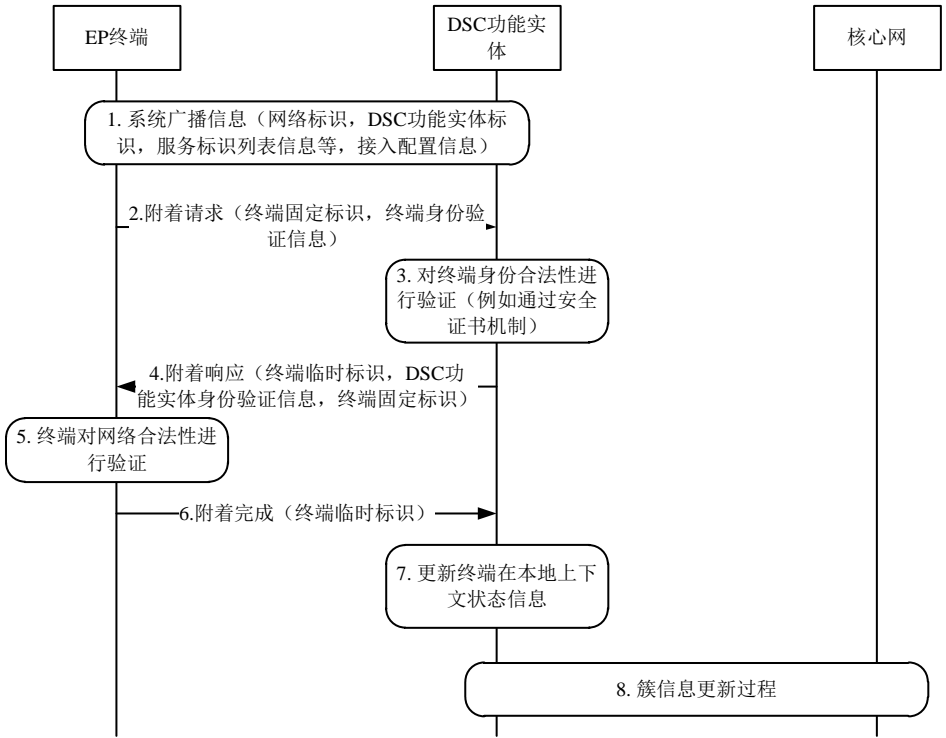


图 3-32 终端附着过程（第一类终端）

步骤 1：DSC 功能实体通过广播方式发送系统广播信息，其中可携带网络标识、DSC 功能实体标识、DSC 功能实体支持业务列表信息以及终端发起接入过程所需配置信息等。

步骤 2：终端根据广播消息，依据自身设备类型，以及需要接入的网络类型进行网络选择过程，并在完成网络选择后根据从系统广播消息中获得的接入配置信息，发起网络接入过程。在网络接入过程中，终端向 DSC 功能实体发送附着请求消息，其中携带终端的固定标识信息以及终端身份验证信息等。

步骤 3：DSC 功能实体根据从终端收到的终端身份验证信息和终端的固定标识信息，对终端身份合法性进行验证。

步骤 4：终端身份通过合法性验证后，DSC 功能实体向终端发送附着响应消息，其中携带 DSC 功能实体为终端分配的临时标识和 DSC 功能实体身份验证信息，还可以携带终端固定标识信息辅助终端对该消息进行下行接收。

步骤 5：终端根据收到的 DSC 功能实体身份验证信息，对接入的 DSC 功能实体合法性进

行验证。

步骤 6: 终端对 DSC 功能实体合法性验证完成后, 向 DSC 功能实体发送附着完成消息, 还可以同时携带终端临时标识帮助 DSC 功能实体确定终端信息。

步骤 7: DSC 收到附着完成消息后, 根据终端临时标识索引终端在本地建立的上下文, 并更新终端状态为成功附着。

步骤 8: DSC 对当前接入的终端数量信息进行更新, 并将接入终端数量信息通过簇(组)信息更新过程发送给核心网。

2. 第二类终端管理

针对第二类终端, 核心网对终端进行管理控制, 终端通过 DSC 转发相关消息信息。仍以终端附着过程为例说明。

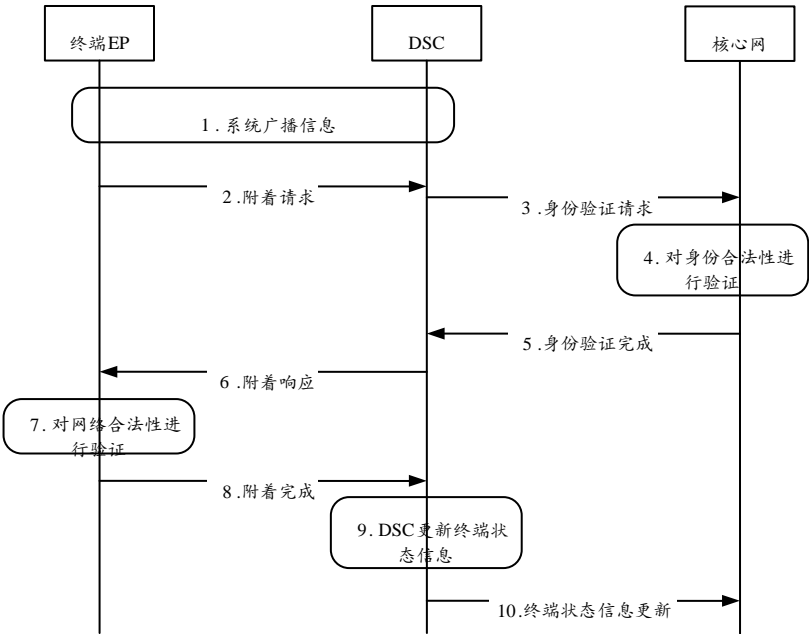


图 3-33 终端附着过程（第二类终端）

步骤 1: DSC 通过广播方式发送系统广播信息, 其中可携带网络标识、DSC 标识、DSC 支持服务列表信息, 以及终端发起接入过程所需配置信息等。

步骤 2: 根据广播消息携带的网络标识、DSC 标识, 以及 DSC 支持服务列表信息, 终端可以依据自身设备类型, 以及欲接入的网络类型进行网络选择过程, 并在完成网络选择后根据从系统广播消息中获得的接入配置信息, 发起网络接入过程。在网络接入过程中, 终端向 DSC 发送附着请求消息, 其中携带终端的固定标识信息, 以及终端身份验证信息。

步骤 3: DSC 向核心网发送身份验证请求, 其中携带终端的固定标识, 以及终端身份验证信息。

步骤 4: 核心网根据从 DSC 收到的终端固定标识, 以及终端身份验证信息, 以及原先保存的终端签约信息, 对终端进行身份验证。终端身份信息通过验证后, 保存终端的在网状态信息, 此外还将保存终端的服务 DSC 信息。

步骤 5: 核心网完成对终端身份验证后, 向 DSC 发送身份验证完成, 可携带终端固定标识, 以及核心网验证信息, 以及针对终端的安全上下文信息, 还可以携带终端签约服务列表。

步骤 6: DSC 为终端分配终端临时标识, 并为终端建立上下文, 并保存终端固定标识信息, 终端临时标识信息, 终端的安全上下文信息, 终端签约服务列表。DSC 向终端发送附着响应消息, 其中携带终端临时标识信息, 终端固定标识信息, 以及核心网验证信息。

步骤 7: 根据收到的核心网验证信息, 并结合终端预先保存的安全上下文, 终端对网络合法性进行验证。终端保存从终端临时身份标识信息。

步骤 8: 完成对网络合法性验证后, 终端向 DSC 发送附着完成消息, 其中可携带终端临时标识信息。

步骤 9: DSC 对本地保存的终端状态信息进行更新。

步骤 10: DSC 向核心网发送终端状态信息, 其中包含终端固定标识信息, 以及终端在网状态信息。核心网 (例如签约中心) 保存终端在网状态信息。

### 3.4.2.2 DSC 管理过程

DSC 是动态自组织网络的分布式管理中心, 在大量机器类终端存在的工业自动化等场景下, 起着本地枢纽作用, 对于降低大量机器类型终端接入网络后对核心网的负担及可能引起的信令风暴具有重大作用。DSC 不同于普通终端, 对 DSC 的管理包括 DSC 注册和功能开启、与核心网建立连接、DSC 间建立连接等。下面以 DSC 网络注册和功能开启为例进行说明。

授权设备 (AD) 是承载 DSC 功能的物理实体, 授权设备 AD 可以是终端类型 EP 充当, 也可以由 “Small\_Base\_Station\_like” 的 EP 类型终端充当, 当然也可以由服务器类型的专用设备充当。在授权设备启动后, 授权设备首先发起向网络的注册, 在这一过程中网络对授权设备的身份进行验证, 并由 DSC 管理功能对授权设备进行配置后, 授权设备 AD 可以作为 DSC 功能实体开始工作。

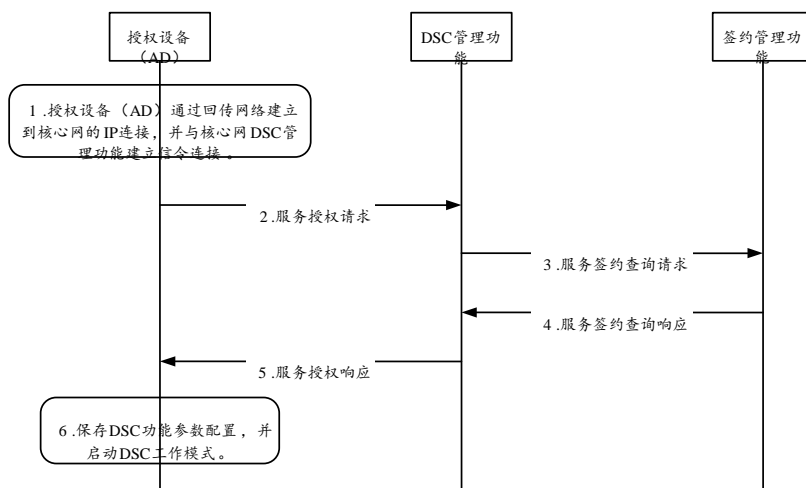


图 3-34 DSC 网络注册和功能开启

步骤 1: 授权设备 (AD) 通过回传网络建立到核心网的 IP 连接, 并与核心网 DSC 管理功能建立信令连接。

步骤 2: AD 向 DSC 管理功能发送服务授权请求, 其中携带授权设备的设备 ID, 以及授权设备的身份验证信息。

步骤 3: DSC 管理功能向签约管理功能发送服务查询请求, 其中携带授权设备 ID, 身份验证信息, 以及服务类型 DSC 指示。

步骤 4: 根据预先保存的签约信息和设备 ID, 签约管理功能查询该设备是否签约了 DSC 功能, 如果该设备签约的 DSC 功能授权仍有效, 签约管理功能向 DSC 管理功能发送服务签约查询响应, 其中携带设备标识和 DSC 功能开启指示。

步骤 5: DSC 管理功能通过服务授权响应消息将 DSC 功能参数配置和 DSC 开启指示发送给授权设备。其中 DSC 功能参数配置包括网络标识, 簇标识, 服务标识等信息, 同时包含核心网 NSC 标识或核心网 NSC 地址信息, 用于后续 DSC 建立到 NSC 的 Me1 接口。

步骤 6: AD 保存 DSC 功能参数配置, 并启动 DSC 工作模式。

### 3.4.2.3 其他过程

除 DSC 和终端的基本管理功能外, 根据第一类终端和第二类终端的划分, 还可以对动态自组织网络进行 QoS 管理、计费管理等。

基于这些基本过程, 动态自组织网络根据其可用频段、终端类型限制等, 可用由运营商部署和管理, 也可用根据需要由企业用户部署。

### 3.4.3 波束赋形的应用

#### 3.4.3.1 动态自组织网络的干扰问题

动态自组织网络具有多种传输方式：

- 集中式传输。例如分布式服务中心（或簇头）与末端节点间的信令传输，如果分布式服务中心还具有数据汇聚功能，其与末端节点间还有数据传输。
- 点到点传输。例如下图中 EP0 和 EP2 可能通过一跳直接进行点到点数据传输。
- 多跳传输。例如下图中 EP0 到 EP2 的传输可能经过 EP0 -> EP1 和 EP1 -> EP2 两跳。

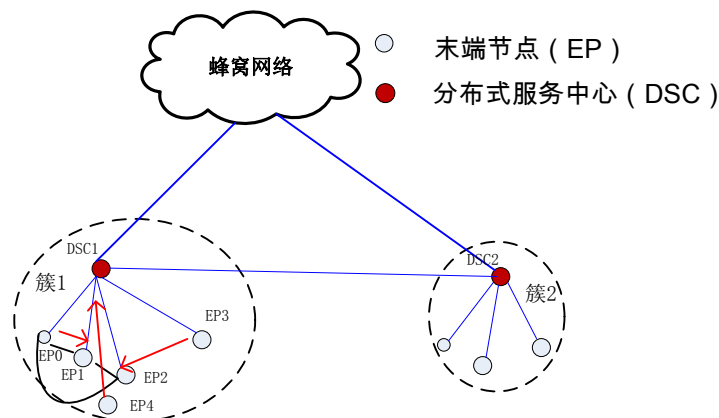


图 3-35 动态自组织网络信令和数据传输路径示意图

由此可见，动态自组织网络的传输路径多样化，以上图为例，一种可能同时存在的传输路径为：EP0 向 EP1 发送数据；EP3 向 EP2 发送数据；EP4 向 DSC1 发送数据。分布式系统的数据传输一般采用全向方式，甚至专门采用泛洪方式向所有邻近终端发送，发送端邻近的接收节点都能接收到发送端传输的信号，对于其他终端或网络节点，该发送端发送的信号可能对其实际需要接收的信号造成干扰，尤其多对收发端间的传输会造成传输信号之间的相互干扰。即使采用 OFDM 传输方式，不同路径上采用不同的子载波资源，但由于分布式的特性，不同收发端对（“收发端对”指一对收发节点）间的传输不是完全同步的，子载波间很难做到完全正交，不同物理频率资源间也存在干扰。干扰和容量受限是分布式系统的最大问题。

#### 3.4.3.2 波束赋形的应用

在动态自组织网络中引入波束赋形，节点间通过定向波束发送和接收数据，可以提高传输可靠性，降低对网络中其他节点的干扰。波束赋形对于传输可靠性的提高，针对工厂车间等终端移动速度较慢甚至静止的场景尤其有效。

以下为示意图，通过定向波束传输，EP0 向 EP1 发送数据，EP4 向 DSC1 发送数据。通过波束赋形传输，两条传输通道间干扰大大降低，甚至这两条传输通道可能进行资源复用。

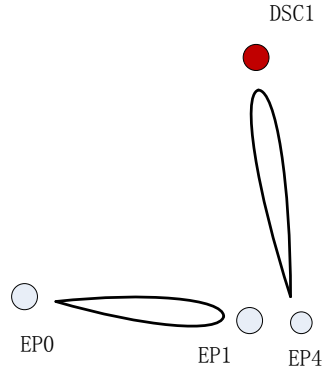


图 3-36 波束赋形传输示意图

波束赋形算法主要有 DOA、EBB，分别依据波达角和由信道估计获取的特征向量，计算得到波束赋形矩阵的加权矢量。在实际应用中，可根据场景和可获取的信息，具体确定采用何种波束赋形算法。

动态自组织网络具有集中和分布相结合的特点，波束方向的确定方式可以有集中式和分布式两种。

#### 1. 集中式：

集中式赋形波束的确定由控制节点主导。控制节点是管理多个分布式节点的集中节点，可以为一个簇的簇头，如 DSC 节点。由控制节点集中控制簇内波束赋形参数的好处在于可以充分考虑可能的传输干扰，以及根据波束赋形情况进行合理的资源分配和复用。

具体方法有：

##### 1) 根据位置信息确定赋形波束

控制节点维护簇内节点的位置信息，确定簇内节点的具体位置和相邻关系。对于需要进行点对点通信的节点对，由控制节点通知其相关波束赋形参数信息。

举例来说，以理想波束赋形为例：EP1 向 EP2 发送数据，控制节点确知两个末端节点的位置后，计算出 EP1 到 EP2 信号的主径（或最大径）到达角度，直接根据这个角度进行波束赋形，具体为取波束加权矢量为天线阵列方向矢量的共轭，即

$$\begin{aligned}
 W^{(k)} &= (a^{(1)})^* = (a_1^{(1)} \dots a_{Ka}^{(1)})^{*T} \\
 &= \left( e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta} \dots e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \cos(\theta - \frac{2\pi(Ka-1)}{Ka})} \right)^{*T}
 \end{aligned}
 \quad (\text{公式一})$$

其中 Ka 为发送端天线数目，(1) 中的 1 代表主径（或最大径）， $\theta$  表示欲发送的 k 用户的主径（或最大径）到达角度。

具体的加权矢量值可以由控制节点计算或末端节点根据控制节点通知的位置信息等自行计算。

## 2) 根据信道状况确定赋形波束

控制节点维护簇内节点间的信道状况信息,具体可采用例如末端节点测量上报并利用信道互易性的方式。对于需要进行点到点通信的节点对,由控制节点通知其相关波束赋形参数信息。

举例来说,以 EBB(Eigenvalue Based Beamforming)算法(即特征向量法)为例:控制节点根据簇内节点信道状况表,在末端节点对需要进行点到点传输的时候,通过对空间相关矩阵进行特征值的分解来得到权矢量。实现方法就是找到权矢量  $\mathbf{W}^{(k)}$  使得  $r$  最大。根据不同准则(如最大功率准则、最大信噪比准则、最大信干比准则等), $r$  有不同的计算方式。

$$r(\mathbf{W}^{(k)}) = \frac{\mathbf{W}^{(k)H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W}^{(k)}}{\mathbf{W}^{(k)H} \mathbf{W}^{(k)}} \quad (\text{最大功率准则}), \quad (\text{公式二})$$

其中  $\mathbf{R}_{xx}$  为接收信号空间相干矩阵,具体由信道响应计算获取。

$$r(\mathbf{W}^{(k)}) = \frac{\mathbf{W}^{(k)H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W}^{(k)}}{\mathbf{W}^{(k)H} \mathbf{R}_I \mathbf{W}^{(k)}} \quad (\text{最大信干比准则}), \quad (\text{公式三})$$

其中  $\mathbf{R}_{xx}$  为接收信号空间相干矩阵,  $\mathbf{R}_I$  为干扰矩阵,由控制节点根据信道状况表中相邻需要同时进行传输的其他末端节点信道状况拟合而成。

## 2. 分布式

分布式方法指末端节点对之间进行赋形波束评估并进行波束赋形的方法,不通过集中节点控制。分布式方法的优点在于反应快速,信令开销少。

以末端节点 EP1 和末端节点 EP2 之间点到点通信为例进行说明。

如果 EP1、EP2 可以确知双方的地理位置从而可以计算出所需的传输信号方向,可以采用理想 DOA 方法根据所需赋形波束角度计算赋形波束加权矢量。

如果 EP1、EP2 不能准确掌握双方相对位置,则可以采用信道测量方式进行赋形波束确定:EP1 测量 EP2 参考信号,获取信道响应,构造接收信号相干矩阵  $\mathbf{R}_{xx}$ ,或根据需要测量噪声、干扰等,构造需要的噪声、干扰相干矩阵。根据公式二、公式三或与之对应其他准则得到的  $r$  公式,计算使得  $r$  最大的权矢量  $\mathbf{W}^{(k)}$ 。

### 3.4.4 无线资源分配

不同的无线资源分配方案对支持各种传输特性有不同的影响。在无线资源分配与传输方案方面,主要有两类设计思想,分别是:

- 基于调度的无线资源分配与传输,例如动态调度和资源预分配。
- 免调度的无线资源分配与传输,例如基于抢占的资源分配。

基于调度的无线资源分配方案的好处是可以有效避免传输冲突和传输干扰问题,缺点是

会引入比较复杂的信令交互过程,为保证信令的实时性与可靠性需要设计比较复杂的空口帧结构。基于抢占的媒质接入与传输的优点在于不需要设计复杂的信令交互过程,因此空口帧结构设计方面复杂度可以大大降低,缺点在于基于抢占式的媒质接入方式,不能完全避免碰撞和干扰问题,尤其是在系统负载较高的情况下,基于抢占的媒质接入与传输方案会导致系统端到端延迟和传输可靠性方面的明显下降。

下面探讨如何在动态自组织网络中使用基于调度的无线资源分配与传输方案,以及在使用基于调度的无线资源分配方案在支持潜在传输特性情况下可能面临的问题。

3.4.4.1 基本原理

基于调度的传输方案与现有蜂窝上下行传输以及蜂窝 D2D 传输的设计思想非常类似,即在一个由簇头管理的“簇区域 (Cluster Area)”内任何节点间在进行实际数据传输前,首先要获得“无线资源分配”,簇头在无线资源管理方面的主要作用是协调“簇区域”不同“通信对”传输使用的无线资源从而消除碰撞,以及簇内干扰问题。

在当前传输时刻,如果“传输 1 “和”“传输 2”使用频域重叠的无线资源,则在接收端可能发生严重的干扰问题,因此采用基于调度的无线资源分配方案可以有效避免可能出现的干扰问题。

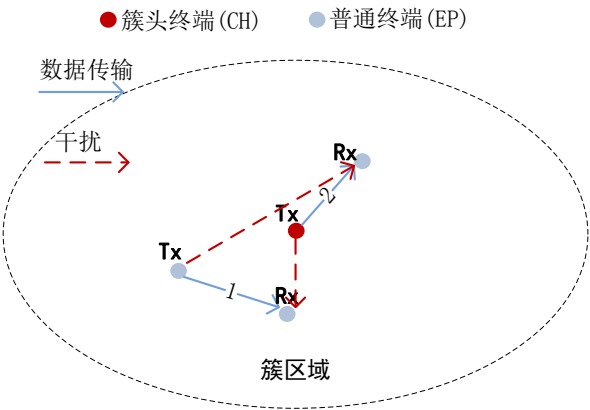


图 3-37 传输干扰问题示例

在当前传输时刻,如果“传输 1 “和”“传输 2”使用频域重叠的无线资源,则在接收端可能发生“碰撞”问题,从而导致接收端对“传输 1 “和”“传输 2” 的接收都失败的问题,采用基于调度的无线资源分配方案可以避免出现“碰撞”问题。

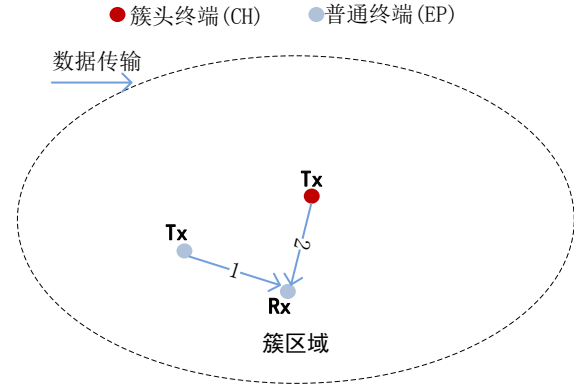




图 3-38 传输碰撞问题示例

#### 3.4.4.2 单跳数据传输

在单跳情况下，系统支持普通终端间直接传输，以及普通终端与簇头之间的数据传输。簇头节点负责对整个簇区域进行无线资源分配，当单跳传输的情况下，又可以细分成三种场景分别是

- 1) EP 发送，EP 接收
- 2) EP 发送，CH 接收
- 3) CH 发送，EP 接收

用于动态调度可以同时周期性业务和突发性业务场景下使用，所以这里首先对基于动态调度情况下的传输过程进行介绍。为简化流程设计，对于上述前两种场景拟采用一致的信令流程，从而降低协议设计的复杂性，下面以 EP 发送，EP 接收为例进行说明。

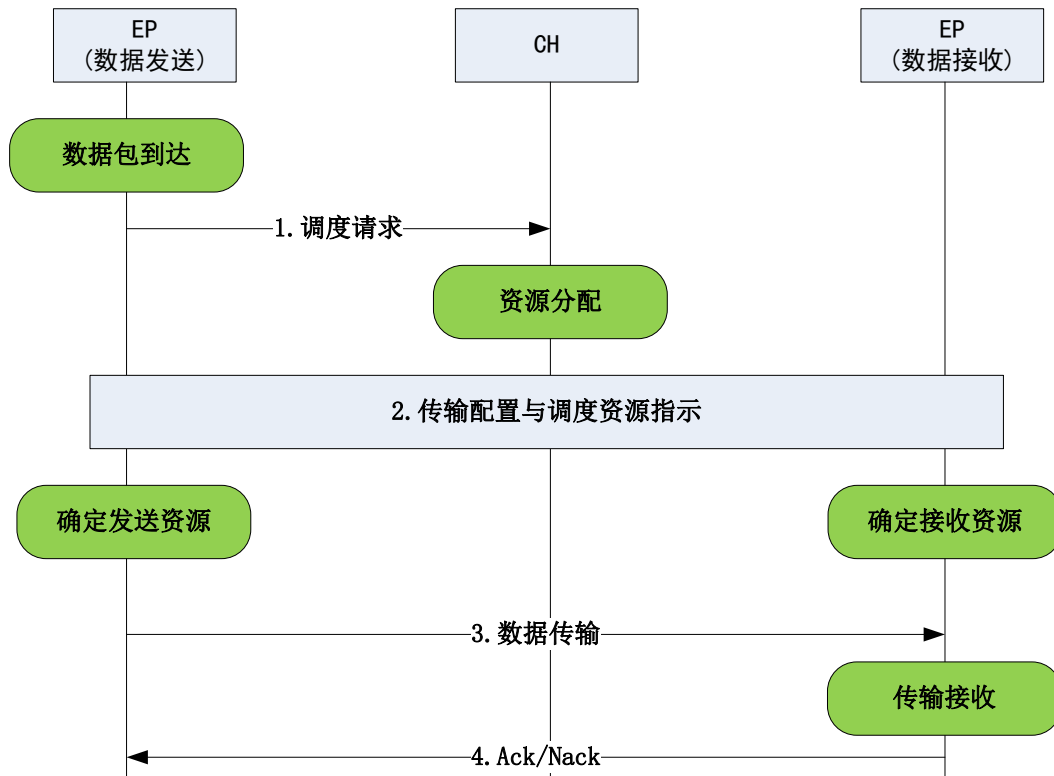


图 3-39 EP 到 EP 数据传输过程

数据包到达后，数据发送端 EP 首先向 CH 发送调度请求，请求为发送端数据传输分配无线资源。CH 正确接收到数据发送端 EP 的调度请求后，CH 为数据发送端 EP 分为无线传输资源。CH 将传输配置与调度指示信息在整个簇区域内进行发送，发送端 EP 根据该信息确定自身使用的发送资源，数据接收 EP 根据该信息确定数据接收资源。数据发送端 EP 使用被分配的无线资源进行数据包的传输，数据接收端 EP 尝试在接收资源进行传输接收。如果数据接收 EP 成功接收数据，则数据接收 EP 向数据发送 EP 发送 Ack 反馈。

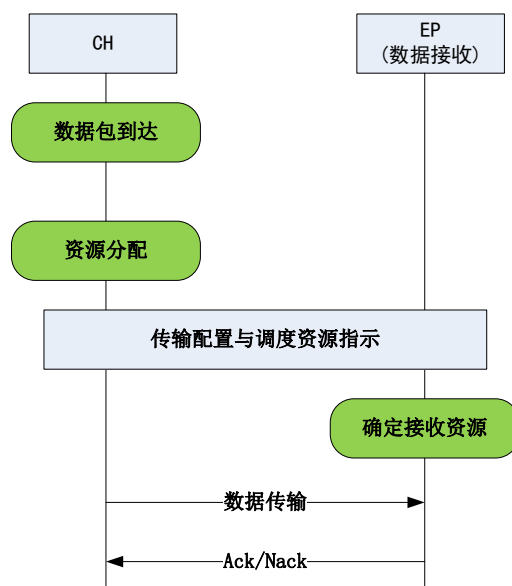


图 3-40 CH 到 EP 数据传输过程

问题分析：

在信令开销方面，与免调度无线资源分配相比，由于调度方案引入了负责进行无线资源分配的中心式节点 CH，因此会显著的增加 CH 和 EP 链路上的信令负载，具体信令负载对整个系统的影响一方面与系统平均数据包大小有关(平局数据包越小信令占用无线资源比例越高)。此外信令占用资源量还与信令消息大小，以及调度信息具体内容有关，因此在信令设计方面要尽可能的精简。

在时延方面，对于基于调度的传输方案（在 EP 到 EP 以及 EP 到 CH 的情况下），空口总传输时延包括信令交互过程引入的时延部分，因此为保证极低的时延要求，需要设计紧凑而灵活的空口帧结构，避免由于空口帧结构的不灵活，例如固定 TTI 长度，传输方向，并行传输方面引入限制从而导致的等待时延的问题。

### 3.4.4.3 多跳数据传输

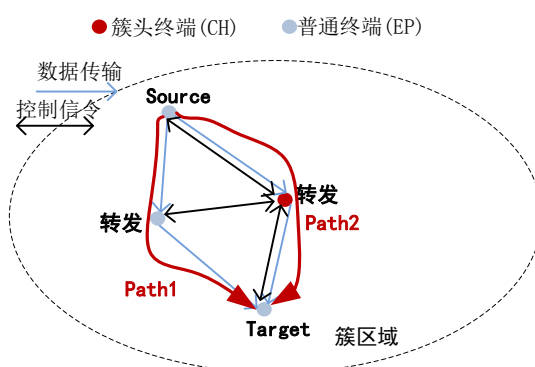


图 3-41 簇区域内多跳传输

对于簇内多跳传输，每一跳（One-Hop）采用的与单跳情况下相同的数据传输过程，其中普通终端（EP）和簇头终端（CH）都可以为其他普通终端（EP）提供数据转发服务。对于从源节点（Source）到目标节点（Target）的数据传输可以并行使用多条传输路径（Path）

进行数据传输，从而提高数据传输的可靠性。

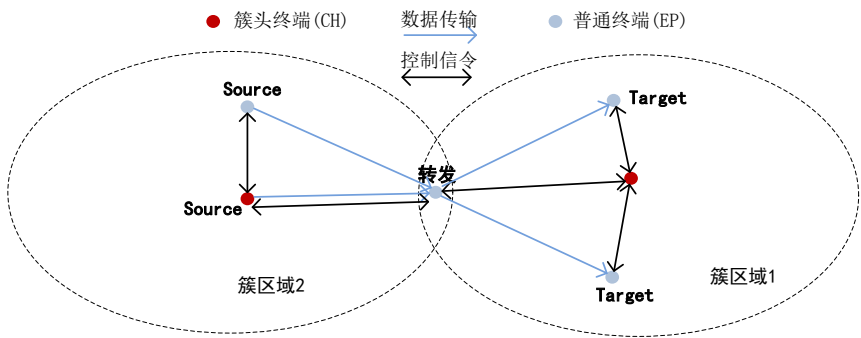


图 3-42 跨簇区域多跳传输

对于跨簇区域的多跳传输需要一个设备节点为不同的簇间提供用户面数据转发功能(例如上图中由一个 EP 终端为跨簇通信提供数据转发服务)。控制面方面，如果有普通终端 EP 节点提供跨簇数据转发服务的情况，普通终端 EP 建立需要与簇区域 1 和簇区域 2 的簇头分别建立控制面连接。对于多跳传输情况下，簇区域 1 和簇区域 2 内的单跳传输过程可与前面单跳数据传输过程保持一致。

### 3.4.5 车辆通信网络的分簇技术

在车联网场景中，车辆沿着道路高速移动，车辆的运动有一定的规律性。由于道路、交通规则等条件的限制，在某些特定时间段，某些车辆自然的形成簇。对于自然形成簇的车辆，按照分簇进行管理，有很多好处。第一，对于时延要求极高的某些安全类信息传输，由簇头对车辆之间的数据传输进行无线资源管理，可以在一定程度上降低基于抢占方式的接入时延，保证时延指标；第二，在车辆形成簇的时候，车辆一般比较密集，由簇头对簇内车辆之间的通信进行一定程度的控制，可以在保证低传输时延的同时保障数据链路的通信质量。第三，无线资源可以在簇间复用，并对同信道之间的干扰进行控制，从而提高无线频谱效率。

#### 3.4.5.1 关键技术问题

##### 1) 网络组织与管理

##### A. 簇的创建

相对于智能工厂场景中节点移动很小的情况，车辆的高速移动性使簇结构不稳定，如何创建簇面临比较大的挑战。簇的创建有下面几种方式：

- a) 车辆之间不断交互位置信息，在一定的簇头生成算法下，自组织的创建簇；
- b) 由蜂窝基站参与创建簇。

在蜂窝基站参与的簇创建过程中，蜂窝基站在一定的时间尺度上参与簇的形成和变化。对于以 120 公里时速高速行驶的车辆，每秒移动 30 米，对于相向高速行驶的车辆，每秒相对移动约 60 米。由于车辆通信距离一般可以达到 300 米，在车辆上报位置信息的基础上，蜂窝基站可以在秒的量级上对车辆簇的创建和变化进行一定程度的干预，以降低自组织形成簇的复杂度。

## B. 簇内可用的无线资源

簇内车辆要进行短距离无线通信，需要使用一定的无线资源。无线资源的使用主要有以下几种情况：

a) 簇内车辆竞争使用系统可用的无线资源。这种方式有利于无线资源的动态有效利用，但是在车辆较多的情况下将面临较严重的碰撞问题，不能满足某些安全类应用的低时延要求。

b) 蜂窝基站分配某段无线资源给簇头，由簇头对簇内车辆的无线资源使用进行管理。这种方式的好处是可以获得较好的时延和可靠性能，并且在相邻的不同簇之间可以实现无线资源空分复用，簇间的干扰也易于控制。簇内车辆之间的通信或者簇内车辆与非本簇车辆的通信由簇头分配或者协调无线资源。

簇头所需的无线资源，可以静态的分配，也可以动态的分配。在智能工厂场景下，节点移动极小，静态分配簇内可用的无线资源是一种非常简单的方式。在车辆网络中，由于簇的大小在不同时间不同路段随时可变，所以动态的为每个簇分配无线资源是一种较优的选择。

## C. 簇的覆盖

由于车辆在道路上的不断运行，车辆在不同道路的不同路段，有的分布较为密集，有的分布较为稀疏。是否把所有的车辆都归为某个簇，是一个需要考虑的问题。有下面几种方案可以考虑。

a) 所有的车辆都划分到某个簇，实现簇对车辆的无缝覆盖。这种方式可以参考 Ad hoc 网络中的某些分簇方法，并且簇的管理不需要基站的参与。但是由于车辆的高速移动特性，簇的结构不稳定，车辆之间将必须交互大量的控制信令，以管理簇内车辆的变化、切换簇头、协调簇之间的同频干扰等。

b) 车辆较为密集区域的车辆划分为簇，车辆稀疏区域的车辆不划分到某个簇，而是直接与蜂窝基站通信，由蜂窝基站对其进行管理。这种方式的好处是基站参与一部分簇的管理，可以大大降低簇头所要担负的职能，降低对簇头的性能要求。另一方面，由于车辆稀疏，车辆之间的距离较大，可以承受一定的信息传输时延。

## D. 簇头的作用

如果网络采用分布式的同步方式，簇头可以作为同步源独立工作；如果采用蜂窝基站协助的方式，簇头与蜂窝基站进行同步，并作为簇内车辆的同步源。簇头从蜂窝基站获取本地网络基本配置，管理簇内终端的通信行为。在采用竞争接入无线信道的方式下，相邻的簇之间可能会发生严重的同频干扰，簇头需要对簇之间的干扰进行协调。在簇头掌握部分无线资源的情况下，簇头可以在一定程度上控制簇内车辆之间的通信，避免资源抢占导致的碰撞问题。

#### E. 簇头的选择

在 Ad hoc 方式下，车辆之间可以经过协商，选择簇头，并且随着车辆的运行，不断的重复协商过程，在协商过程中确定是否需要改变簇头。

在基站参与簇管理的方案下，基站可以协助簇头的指定，其好处是可以大大降低车辆之间对簇的维护和簇头切换所需交互的信令量。

#### 2) 同步方式

在完全不需要基站参与的动态 MESH 网络中，簇头之间的同步是一个比较大的挑战。簇头之间通过多跳的方式，要求普通车辆终端参与同步过程。

与智能工厂场景中可能存在的众多机器臂、传感器终端相比，车辆的数量在一定的区域内是有限的，并且在车辆上配置蜂窝网络接口是未来的趋势，所以在车辆网络中，使用宏站作为同步源是一个相对经济的选择，这样可以大大降低分布式同步过程所需的网络开销。

#### 3) 数据路由

对于车辆之间的一跳直接通信，通过竞争或者在簇头控制下建立数据连接，数据直接在车辆之间建立的数据信道上交互。

如果簇内车辆要向网络中的服务器节点发送或者接收数据，则由簇头负责与蜂窝基站交互，在蜂窝基站的控制下建立与服务器的数据连接；或者由簇内车辆直接接入蜂窝基站，建立与服务器的数据连接。

对于车辆信息向较远范围车辆的传输（超出一跳可到范围），一般的对时延需求比相邻车辆之间的直接通信的时延要求低，在实际场景中，有两种方式可供选择。

a) 多跳传输。多跳传输对于传输距离超出车辆一跳传输范围不是太远（两跳或者三跳可达），并且时延要求较高的信息传输具有一定的优势；但是对于传播范围要求很远，信息需要经过很多跳才能到达的情况，劣势比较明显，原因在于多跳传输的时延和可靠性都不可控。

b) 基站协助寻找目标车辆，并下发信息。这种传输方式，一般的对于时延需求不是非常高的信息传输，例如，前方施工、道路积水等信息的传输是足够的，也以满足传输的可靠性能，并且可以是广播发布、多播发布或者是单播传输，相对于多跳传输方式具有更优的性能。

### 3.4.5.2 备选分簇技术方案

#### 1) 簇的创建

道路上车辆稀疏的时候，车辆直接向蜂窝基站申请无线传输资源，在车辆间直接交互信息。随着车辆密度增加，有些车辆距离较近，并且由于道路条件限制，在较长的一段时间内，将保持较近的距离。如果某些特殊车辆，如公共交通车辆，判断一跳内车辆较多，适合创建簇，则向蜂窝基站发出请求。蜂窝基站判断负荷状况，如果接受请求，则向该车辆分配一定的无线资源。该车辆在周期性的信标信息中，标示自己为簇头，一跳邻居车辆收到信息之后，如果有无线传输需求，则不再向蜂窝基站，而直接向簇头请求无线资源。

为了使无线资源在簇之间共享，蜂窝基站在创建簇的时候，可以判断各个簇的空间距离，以保证各个簇在空间上隔离，无线资源在簇之间可以空间复用，这样做的好处是在很大程度上规避了同频干扰。不能加入某个簇的车辆仍然向蜂窝基站申请无线资源，簇对车辆的覆盖是不连续的。

#### 2) 簇头所能掌握的无线资源

簇头按照簇内车辆的多少向蜂窝基站申请无线资源，即，随着车辆数目的变化动态申请更多的无线资源或者交回部分无线资源。蜂窝基站发现本小区的数据信道拥塞的时候，也可以主动向簇头收回部分无线资源。

#### 3) 分簇架构下车辆直接通信的无线资源分配思路

车辆直接通信包括车辆之间的点对点通信和一对多的直接通信。通信双方可能属于同一个簇，也可能不属于同一个簇。在分簇架构下，簇头可以把簇内的无线资源划分为数据信道、控制信道、发现信道和广播信道。

a) 在控制信道上直接调度簇内需要点对点或者点对多点通信的车辆，为其分配数据信道；

b) 在广播信道上，簇内车辆按照调度，使用广播信道发送周期性广播的位置等信息；

c) 对于不属于当前簇但是与当前簇的边界车辆为一跳邻居的车辆，为使其可监听当前簇边缘车辆的发现信息和周期性位置广播信息，由边缘车辆向其转发当前簇发现信道和广播信道分配情况；

d) 簇头从蜂窝基站获取簇边界车辆的不属于当前簇的邻居车辆的广播信道，通知边界车辆在该信道上监听其位置广播；

e) 不属于任一簇的车辆直接接入蜂窝基站，由其分配无线资源。

#### 4) 簇的管理

车辆在运行过程中监听邻居车辆和蜂窝基站的信号，如果一跳邻居车辆有簇头，则向簇头申请加入该簇。对于簇内成员车辆，如果随着车辆运行，簇头信号强度低于一定门限或者不再出现在一跳邻居中，则从该簇退出，向蜂窝基站请求直接接入。

当簇内车辆减少，小于一定门限的时候，簇头解散整个簇，蜂窝基站回收所分配的无线资源。

本文只对车辆运动场景下的分簇架构和分簇架构下无线连接建立思路进行了初步讨论，具体的流程和细节需要在今后进一步研究。

### 3.4.6 小结

动态自组织网络结合蜂窝网和 MESH 网络，具有集中管理和分布式组织、传输相结合的特点。动态自组织网络面临的最大问题是干扰和资源分配，波束赋形和集中调度可以部分解决这两个问题，但仍需进一步设计具体传输方式和信令过程等。动态自组织网络即可用于节点间相对静止的工业自动化场景，也可用于移动性较高的车联网场景，在不同的场景下，都需要考虑簇管理、传输资源分配、同步问题等。

动态自组织网络涉及的内容很多，后续需进一步研究。

## 3.5 分布式 MESH 网络

### 3.5.1 多信道 MAC 机制

MESH 结构网络的具有无中心、自组织、多跳路由、动态拓扑、无线信道带宽有限、节点能量受限等特点。这种独特的组网方式使 MAC 协议设计成为主要技术难点之一。MAC 协议是分组数据包在信道上发送和接收的直接控制者，在数据流的操作上是实现对上层传输来的数据包进行打包分片，按照格式进行封装，并且根据一定的调度算法，分发数据包，最终以 MAC 数据包的格式发送到物理层，并由物理层传送到对端，实现通信。它的优劣直接影响到极为有限的无线资源的使用效率，对无线网络的性能起着决定性的作用。MAC 协议处于协议栈的较底层，对网络吞吐量、时延、功耗等性能有直接影响，对于移动环境下拓扑

频繁变化的网络来讲尤为重要。

采用多信道的 MAC 机制，通过协调节点在多个信道上同时进行通信，可以获得更高的网络吞吐量和更低的网络时延。在多信道环境下，MAC 协议设计的两个关键问题是：（1）信道协调机制：是指节点以何种机制协调网络终端在不同的信道进行通信；（2）信道分配策略：是指为了提高信道利用率，对信道进行合理而有效的分配。现有的多信道 MAC 协议由于缺乏灵活的信道协调机制和有效的分配策略，因而不能完全适用于复杂的网络环境。所以考虑到 5G 系统中特殊的应用场景，多信道 MAC 协议的研究中还有很多问题值得探讨（例如，将 TDMA 与 CSMA 混合的接入机制，同时利用 TDMA 和 CSMA 的优势）。

### 3.5.2 小结

分布式 MESH 网络是传统的 MESH 网络，其主要问题是路由机制、资源分配、干扰避免等。在低时延高可靠场景中，分布式 MESH 网络特别适合非授权频段、快速布网，节点间直接传输的场景。

## 4. 总结

低时延高可靠既是 5G 四大场景之一，也是适应新场景、业务需求的 5G 技术体系。特别是在特定时延、可靠性要求下，必须有其独立解决方案。

低时延高可靠针对 eMBB 场景的关键技术方案主要包括：

- 物理层
  - 短子帧设计；
  - 新型编码技术，如多元 LDPC 编码技术；
  - 新型波形和多址技术的应用。
- 空口高层
  - 多连接空口传输技术；
  - 可配置协议栈；
  - 终端协同传输技术；
  - 免调度传输。

针对 eMBB 的低时延高可靠技术方案也可应用于 U-MTC 场景。但 U-MTC 有其独特应用场景和指标要求。如 1ms 时延的苛刻时延要求就来自于 U-MTC 场景。针对其独特要求，除了上述技术方案外，针对 U-MTC 场景，重点探讨了：



- 动态自组织网络，结合蜂窝网与 MESH 网络，可用于如工业自动化场景和车联网场景；
- 分布式 MESH 网络。

后续低时延高可靠工作内容包括对上述技术方向的深入、仿真验证，以及新技术方向的开拓。

## 5. 主要贡献单位

序号	贡献单位	贡献人
1	电信科学技术研究院	谌丽、焦斌
2	中国电信股份有限公司	陆晓东
3	中国移动通信有限公司	韩璐
4	中兴通讯股份有限公司	赵亚军
5	西安电子科技大学	白宝明、徐恒舟、穆锡金
6	同济大学	王超
7	北京邮电大学	赵慧
8	华为技术有限公司	熊新、于峰，于光炜