



SparkLink

TR/XS 00001-2021

星闪1.0空口技术性能评估报告

星 闪 联 盟 发布

目 录

缩略语清单:	7
1 引言.....	8
2 星闪1.0空口技术介绍.....	9
2.1 星闪1.0空口系统架构.....	9
2.1.1 网络架构	9
2.1.2 协议栈架构.....	9
2.2 星闪1.0空口物理层基础特性.....	11
2.2.1 传输波形	11
2.2.2 信道和子载波设计	11
2.2.3 超帧结构和无线帧结构.....	11
2.2.4 系统工作参数	12
3 星闪1.0空口系统关键技术	13
3.1 同步和接入.....	13
3.1.1 系统同步	13
3.1.2 系统接入和高并发传输.....	13
3.2 资源分配	14
3.2.1 频率域资源分配.....	14
3.2.2 时间域资源分配.....	15
3.3 信道编码和调制	16
3.3.1 第一类数据传输信道编码.....	16
3.3.2 第二类数据传输信道编码.....	16
3.3.3 物理层HARQ.....	17
3.4 多域协同	18
3.4.1 多域同步	18
3.4.2 多域资源协调	19
3.5 低功耗设计.....	20
3.6 信息安全	20
3.6.1 信息安全特性	20
3.6.2 信息安全机制	20
3.6.2.1 认证凭证配置	20
3.6.2.2 认证和信息安全参数协商.....	21
3.6.2.3 空口通信信息安全保护.....	21
4 星闪1.0空口系统性能评估	21
4.1 超低时延第一类数据传输性能.....	21
4.2 第二类数据传输性能	22
4.3 高可靠传输.....	23
4.3.1 混合自动重传请求.....	23
4.3.1.1 CC和IR重传性能比较.....	23

4.3.1.2	ARQ重传、HARQ重传吞吐量对比	24
4.3.1.3	HARQ反馈时延	24
4.3.1.4	HARQ性能小结	24
4.3.2	抗频率选择性衰落	24
4.3.2.1	频率选择性调度	24
4.3.2.2	性能评估	25
4.4	性能评估总结	25
5	总结&展望	26

图目录

图 1-1 星闪技术应用场景.....	8
图 2-1 星闪系统通信域组成示意图.....	9
图 2-2 星闪系统协议栈架构.....	10
图 2-3 星闪系统协数据封装过程.....	10
图 2-4 星闪系统跨层透传机制.....	10
图 2-5 星闪系统子载波划分(20MHz载波).....	11
图 2-6 星闪系统超帧结构.....	12
图 3-1 高并发关键技术.....	14
图 3-2 星闪系统精细调度粒度和业务智能调度.....	14
图 3-3 分散调度原理示意图.....	15
图 3-4 数据包发送示意图.....	15
图 3-5 数据包调度单位（周期）示意图.....	16
图 3-6 混合自动重传请求方案示意图.....	18
图 3-7 多节点时频同步过程示意图.....	19
图 3-8 多域资源协调示意图.....	20
图 3-9 用户口令到PSK转换.....	21
图 4-1 AWGN信道下Polar和RS性能比较(信息bit数: 16bits).....	22
图 4-2 大包/高流量数据传输MCS性能(AWGN信道, 理想信道估计, N=1024bits MCS0~31).....	23
图 4-3 CC/IR重传性能对比.....	23
图 4-4 车内信道频域衰落特征.....	25
图 4-5 离散子载波调度相比连续子载波调度性能增益.....	25

表目录

表 2-1 基于常规循环前缀配置的无线帧配比.....	12
表 2-2 基于扩展循环前缀配置的无线帧配比.....	12
表 2-3 星闪系统主要工作参数.....	13
表 3-1 超低时延数据信息传输调制编码方式表格.....	16
表 3-2 大包/高流量信息传输调制编码方式.....	16
表 4-1 HARQ相对ARQ吞吐量增益.....	24
表 4-2 星闪1.0空口技术性能总结.....	25

星闪1.0空口技术性能评估报告

关键词： 星闪技术 低时延 高可靠 精同步 高并发 高安全

摘要： 数字化社会的飞速发展，进一步加快了信息在人、物、环境之间的循环流转，让连接变得更加无可或缺。作为信息传播的最后一环，无线短距通信技术在社会生活的方方面面发挥着巨大的作用，每年有超过百亿的新增无线短距连接设备投入市场，加速催生了海量的新应用和价值场景。随着应用发展，新兴业务的出现对现有无线短距通信技术在低时延、高可靠、精同步、高并发和信息安全等方面提出新的需求。行业和社会亟需更加匹配业务需求和发展趋势的无线短距通信技术。基于该背景，产业界合作伙伴联合进行研究、标准化和开发，设计了新一代无线短距通信空口技术标准CCSA TC10《无线短距通信 车载空口技术要求和测试方法》，并组建了产业推广联盟——星闪联盟(Sparklink)，旨在推动包括该空口技术在内的新无线短距通信技术在智能汽车、智能家居、智能终端和智能制造等场景的应用，并进一步推动新无线短距通信技术的持续演进。本报告作为行业第一份关于星闪1.0空口技术的性能评估报告，从应用场景需求入手给出星闪系统的设计目标，然后对星闪系统的系统架构、基本参数和关键技术进行了介绍，并初步评估了其关键技术的链路性能，对结果进行了分析。最后，从技术演进和发展的角度，对于星闪技术未来的发展路线和演进方向给出建议。

缩略语清单:

缩略语	英文全名	中文解释
AMC	Adaptive Modulation and Coding	自适应编码调制
ARQ	Automatic Repeat Request	自动重传请求
BCH	Broadcasting Channel	广播信道
BLER	Block Error Rate	块差错概率
CB	Code Block	码块, 指编码时输入大小
CBG	Code Block Group	码块组, 多个编码块形成的一组
CC-HARQ	Chase-Combining HARQ	Chase合并混合自动重传请求
CDC	Cockpit Domain Controller	座舱域控制器
CRC	Cyclic Redundancy Chec	循环冗余校验
CSCH	Control Signaling Channel	控制信道
FEC	Forward Error Correction	前向纠错码
G/G-Node	Grant Node	管理节点
HARQ	Hybrid ARQ	混合自动重传请求
IR-HARQ	Incremental Redundancy HARQ	增加冗余的混合自动重传请求
ICI	Inter sub-Carrier Interference	子载波间干扰
ISI	Intersymbol Interference	符号间干扰
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制和编码方案
PAS	Phase Adjustment Signal	相位调整信号
QoS	Quality of Service	服务质量
RE	Resource Element	资源元素
SG	Special G symbol	特殊G符号
ST	Special T symbol	特殊T符号
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
SPS	semi-persistent scheduling	半静态调度
SCL	Successive Cancellation List	连续删除列表
T/T-Node	Terminal Node	终端节点
TDD	Time Division Duplexing	时分双工
TB	Tranmission Block	传输块
TBS	Tranmission Block Size	传输块大小

1 引言

这是一个万物互联的时代。截至2020年，全球约有270亿台设备联网，据Statista预测，到2025年，这一数字将增长到750亿。通过连接，智能设备正变得越来越智能，并逐渐对人们的工作、生活、娱乐等带来深刻影响。作为打通端到端连接的关键一环，最后几十米的无线短距通信链路发挥着重要作用。据统计，每年有超过百亿的无线短距连接设备投入市场，这些连接与现有的应用结合、发展，逐步催生出更多更新的应用场景，逐步覆盖到智能汽车、智能家居、智能终端和智能制造等各个领域。

新业务的发展催生了新的应用场景，也对于承载这些应用的通信技术提出了新的要求。部分新应用和对应的业务需求如下所示。

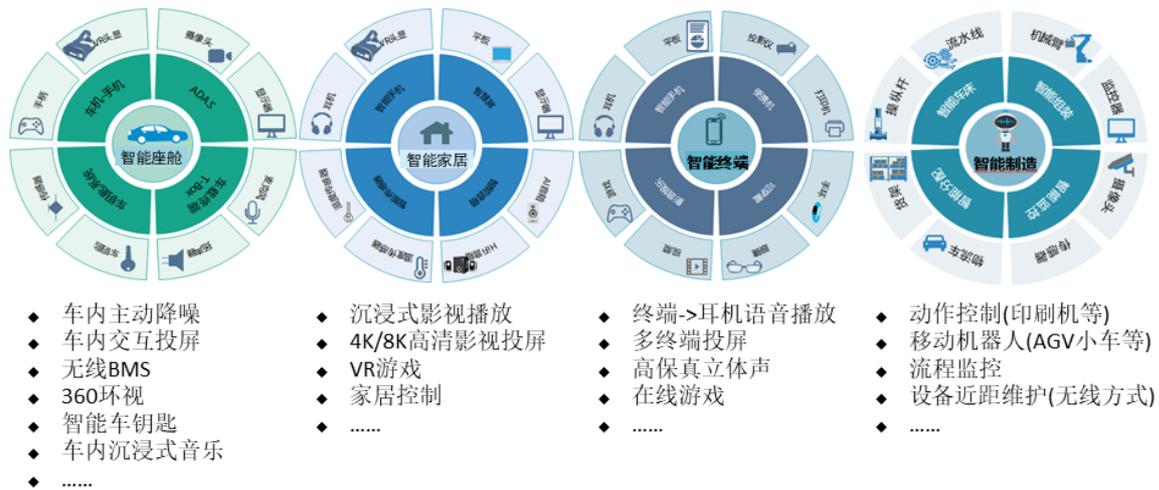


图 1-1 星闪技术应用场景

上述不同应用场景对无线短距通信技术的性能和功能要求不同，如：

- 智能汽车领域：
 - 车载主动降噪业务为了实现车内静谧效果，主动对消车辆行驶中的发动机噪声、路噪和风噪，要求单向通信时延不大于20 μ s量级，可靠性达到有线传输水平，并且要求多传感器的采样同步精度小于1 μ s，支持数十路音频信号并行传输；
 - 车载交互类投屏以及流媒体后视镜等业务为了实现端到端20~30ms的时延要求，需要单向通信时延2~4ms；
 - 车载电池管理系统(Battery Management System-BMS)系统要求多个传感器能够同时进行采样，同步精度达到 μ s级别，并且支持200路以上信号并发传输；
 - 要求端到端安全防护，包括认证、加密和完整性保护，以及跨域安全隔离等。
- 智能终端领域：
 - 交互类游戏场景为确保端到端时延小于20ms，要求空口时延<5ms；
 - 电竞级游戏操控设备要求高刷新率和低时延，单向传输时延要求小于500 μ s，并且要实现鼠标操控与音画的实时同步；
 - 电竞级无线耳机要支持无损音频播放，单声道支持至少48kHz采样和24比特量化位宽。
- 智能家居领域：
 - 4K/8K高清影视投屏通信传输时延<2ms，速率要求大于10Gbps；

- 无线HiFi级家庭影院，要求立体声播放支持 μs 级高精度时间同步，并且可靠性达到有线传输水平。
- 智能制造领域：
 - 闭环运动控制场景涉及到流水线传感器和触动器的配合工作，单向时延要求小于 $500\mu\text{s}$ ，可靠性要求在99.9999%和99.99999%左右；
 - 要求端到端信息安全防护，包括认证、加密、完整性保护等。

上述典型场景中， $20\mu\text{s}$ 级低时延、99.9999%以上超高可靠性、微秒级别同步、上百路业务并发，以及端到端信息安全防护等业务要求，对现有无线短距通信系统带来极大挑战。为了应对上述技术挑战并更好地解决行业中识别的痛点问题，星闪技术应运而生，其设计目标是针对上述低时延、高可靠、高精度同步、多并发和信息安全要求进行系统设计，满足各类典型无线应用场景的需求。

本报告对星闪1.0采用的CCSA TC10《无线短距通信 车载空口技术要求和测试方法》规定的空口技术，进行技术分析和评估，包括系统架构、基本参数、关键技术和性能，分析该技术对典型应用场景需求的匹配度，并对该技术未来发展演进给出建议。

2 星闪1.0空口技术介绍

2.1 星闪1.0空口系统架构

2.1.1 网络架构

系统内节点区分为管理节点(G节点)和被管理节点(T节点)。在具体的应用场景中，单个G节点管理一定数量的T节点，G节点与这些T节点连接共同完成特定的通信功能。单个G节点以及与其连接的T节点共同组成一个通信域。

以智能汽车场景为例(如下图所示)，座舱域控制器CDC可以作为G节点，各类车载设备(例如麦克风、扬声器等)作为T节点，共同完成座舱娱乐功能。此时，CDC与车载设备组成了一个通信域，当手机与CDC连接时，手机也可以作为该通信域内的T节点。

部分场景下可能存在多个通信域：在智能汽车环境下，手机也可以作为G节点连接可穿戴设备，此时手机与可穿戴设备组成了另外一个通信域。智能家居场景，电视与下挂音频设备组成一个通信域，手机与耳机组成另外一个通信域，两个通信域之间可以通过高级/一般通信域进行区分，由高级通信域进行资源协调，实现多域之间的协调共存。

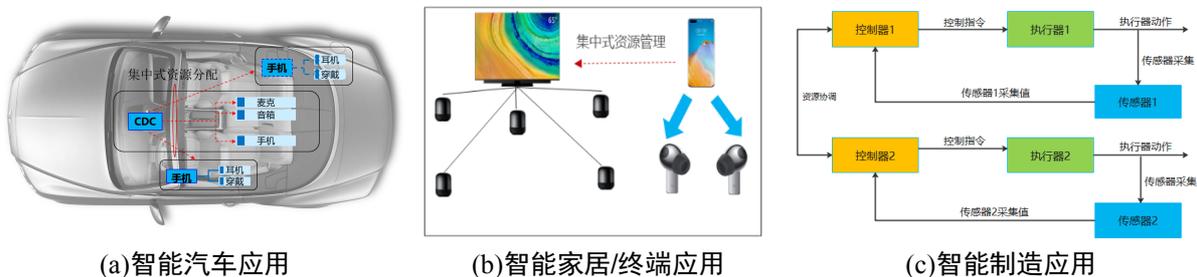


图 2-1 星闪系统通信域组成示意图

2.1.2 协议栈架构

星闪系统协议栈分为应用层(OSI 5~7层)、网络与传输层(OSI 3~4层)和接入层(OSI 1~2层)，如图 2-2所示；

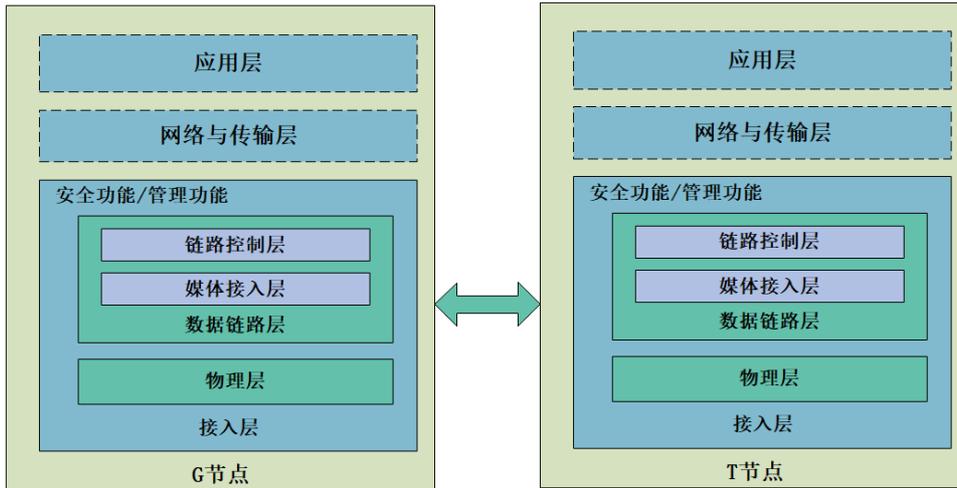


图 2-2 星闪系统协议栈架构

其中本报告所涉及的空口技术方面包括：

- 数据链路层保障数据的可靠传输，数据链路层包含链路控制层和媒体接入层。链路控制层主要实现传输模式控制、加解密等功能；媒体接入层主要实现资源调度、数据封装，控制传输格式以满足不同业务的QoS需求。
- 物理层实现比特流传输功能。

接入层还实现信息安全和管理工作，分别用于保障协议栈安全和对通信进行必要的管理。

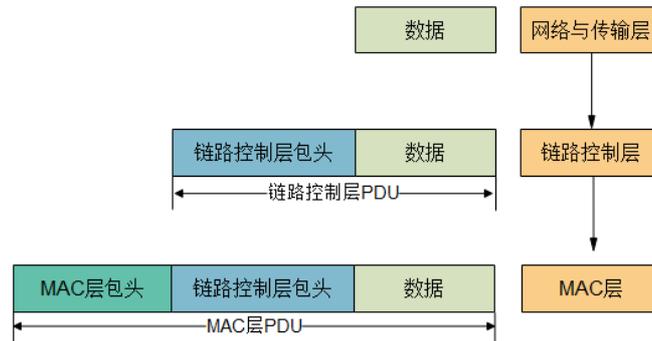


图 2-3 星闪系统协数据封装过程

如图 2-3所示，数据封装过程中，在数据发送端，数据逐层添加包头；在数据接收端，按照相反顺序解包数据。

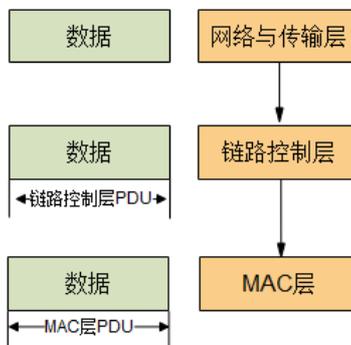


图 2-4 星闪系统跨层透传机制

如图 2-4所示，针对超低时延周期性小包数据传输(比如主动降噪业务中的音频传输)，星闪系统支持跨层透传机制。该机制可以在连接建立时确定好相应的业务参数及相应的传输通道，无需在每

个协议层增加相应的包头。这种机制即可降低包头带来的开销，提高传输效率，也可降低每层的处理时间，达到超低时延传输的目的。

2.2 星闪1.0空口物理层基础特性

2.2.1 传输波形

系统采用CP-OFDM波形传输，物理层时间度量为基本时间单位 T_s 的倍数， T_s 定义为 $T_s=1/f_s$ ， $f_s=30.72\text{MHz}$ ，子载波间隔 $\Delta f=480\text{kHz}$ 。

CP-OFDM符号在时域上包含循环前缀部分和有效数据，有效数据部分长度为 $64T_s$ ，循环前缀长度包含两类：

$$T_{CP} = \begin{cases} 5 \times T_s, & \text{常规循环前缀} \\ 14 \times T_s, & \text{扩展循环前缀} \end{cases}$$

CP-OFDM符号的时间长度(包含循环前缀)：

$$T_{Symb} = \begin{cases} 69 \times T_s, & \text{常规循环前缀} \\ 78 \times T_s, & \text{扩展循环前缀} \end{cases}$$

2.2.2 信道和子载波设计

星闪系统载波带宽最小为 20MHz ，向上支持 $40/60/80/100/160/320\text{MHz}$ 规格的载波带宽，分别由连续多个 20MHz 的载波聚合方式组成。 20MHz 载波由连续39个子载波组成，子载波间隔 480kHz ，按照对应频率从低到高的顺序依次编号为 $\#0, \#1, \dots, \#38$ ，其中 $\#19$ 子载波为直流子载波，不承载信息。在一个 20MHz 工作带宽中，最低频率和最高频率各预留部分资源不放置可用子载波。

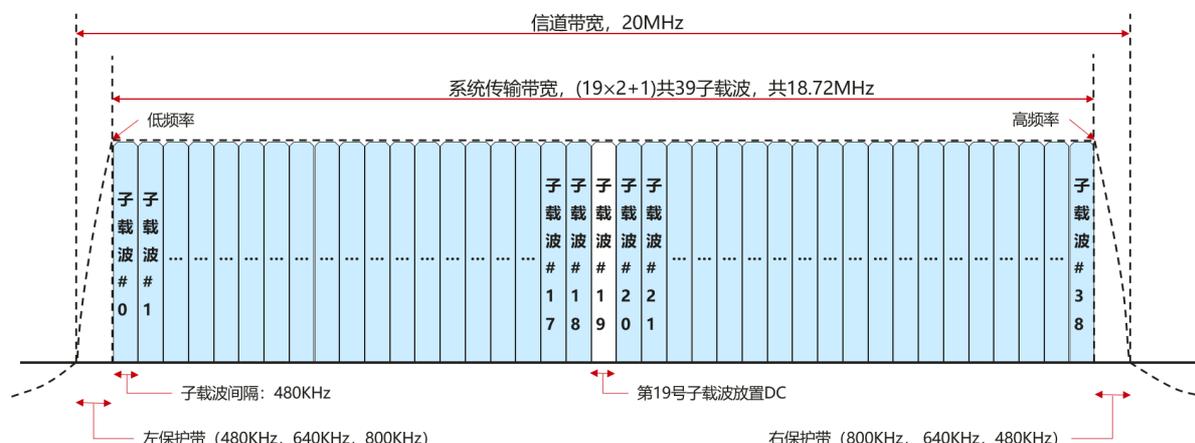


图 2-5 星闪系统子载波划分(20MHz载波)

2.2.3 超帧结构和无线帧结构

星闪系统采用TDD方式，超帧格式如下图 2-6所示，每超帧包含48个无线帧，每超帧持续时间为 1ms ，每个无线帧的持续时间为 $20.833\mu\text{s}$ 。其中G符号代表G节点向T节点发送(G链路)的符号，T节点代表T节点向G节点发送(T链路)的符号，SG/ST分别代表G/T符号中可用于开销符号的符号资源，每个无线帧的开销符号资源可灵活配置为0、1或2个符号，GAP是G链路符号和T链路符号的切换间隔。



图 2-6 星闪系统超帧结构

采用常规循环前缀时，无线帧支持14种G符号T符号配比；采用扩展循环前缀时，无线帧支持12种G符号T符号配比。灵活的G/T符号配比可以满足不同应用场景下不同链路方向业务速率的要求。

表 2-1 基于常规循环前缀配置的无线帧配比

无线帧配比	符号配置							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	G	T	T	T	T	T	T	T
1	G	G	T	T	T	T	T	T
2	G	G	G	T	T	T	T	T
3	G	G	G	G	T	T	T	T
4	G	G	G	G	G	T	T	T
5	G	G	G	G	G	G	T	T
6	G	G	G	G	G	G	G	T
7	T	G	G	G	G	G	G	G
8	T	T	G	G	G	G	G	G
9	T	T	T	G	G	G	G	G
10	T	T	T	T	G	G	G	G
11	T	T	T	T	T	G	G	G
12	T	T	T	T	T	T	G	G
13	T	T	T	T	T	T	T	G

表 2-2 基于扩展循环前缀配置的无线帧配比

无线帧配比	符号配置						
	0	1	2	3	4	5	6
0	G	T	T	T	T	T	T
1	G	G	T	T	T	T	T
2	G	G	G	T	T	T	T
3	G	G	G	G	T	T	T
4	G	G	G	G	G	T	T
5	G	G	G	G	G	G	T
6	T	G	G	G	G	G	G
7	T	T	G	G	G	G	G
8	T	T	T	G	G	G	G
9	T	T	T	T	G	G	G
10	T	T	T	T	T	G	G
11	T	T	T	T	T	T	G

2.2.4 系统工作参数

星闪系统主要工作参数如下表 2-3所示。实际应用中，不同应用场景可根据性能/成本功耗等要求进行合理的参数配置。

表 2-3 星闪系统主要工作参数

参数	规格
工作带宽	20/40/60/80/100/160/320MHz
多址方式	OFDMA
双工方式	TDD
无线帧配比	常规CP: 14个 扩展CP: 12个
空间复用数据流数	G节点支持最大8流传输 T节点支持最大4流传输
调制方式	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM/1024QAM
信道编码	Polar/RS
物理帧长度	20.833μs
重传方式	物理层HARQ, 链路层ARQ

3 星闪1.0空口系统关键技术

3.1 同步和接入

3.1.1 系统同步

星闪系统配置两种同步信号，FTS(第一训练信号)和STS(第二训练信号)，放置在相邻的两个无线帧中，并以超帧为周期循环发送。星闪系统选择ZC序列作为同步序列，ZC序列相较于m序列，自相关峰值更高，互相关值更低，抗频偏性能更好，有利于提高同步成功概率。

FTS序列定义：

$$d_{FTS}(n) = \begin{cases} \exp\left(-j\frac{\pi un(n+1)}{41}\right), n = 0, 1, \dots, 18 \\ 0, n = 19 \\ \exp\left(-j\frac{\pi un(n+1)}{41}\right), n = 20, 21, \dots, 38 \end{cases}$$

其中，对于高级通信域 $u = 1$ ，对于一般通信域 $u = 40$ 。

STS序列定义：

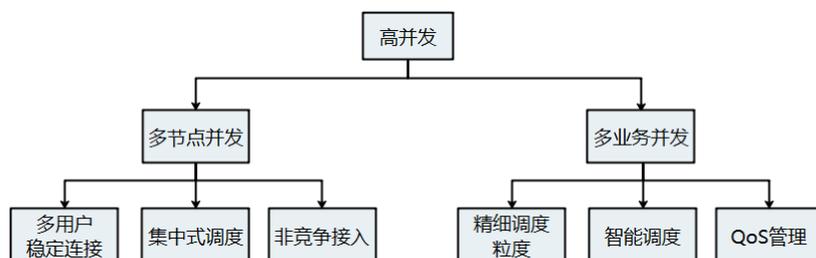
$$d_{STS}(n) = \begin{cases} \exp\left(-j\frac{\pi u \frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} + 1\right)}{21}\right), n = 0, 2, \dots, 38 \\ 0, n = 1, 3, \dots, 37 \end{cases}$$

其中， $u = 1, 2, \dots, 20$ 为通信域同步标识。STS序列在映射到子载波时增加3dB功率。

3.1.2 系统接入和高并发传输

星闪系统高并发传输主要包含多节点并发和多业务并发。如图 3-1所示，其中多节点并发是指单个G节点可以同时支持与多个T节点的连接，支持单个G节点同时为多个T节点提供服务。多业务

并发是指对于单个T节点，支持单个T节点上同时存在多种不同类型的业务，以便为用户提供丰富的业务体验。



为了支持高并发，主要技术点如下：

- 大量用户稳定连接：星闪系统中，用于标识T节点的物理层标识(ID)长度为12比特，理论上单个G节点可最多支持 $2^{12}=4096$ 个T节点。
- 接入控制方式：星闪系统采用集中式调度，避免了大量节点分布式资源抢占带来的链路冲突，提高了系统吞吐量。星闪系统也支持非竞争接入方式，即可支持大量T节点在相互正交的资源上同时发起群接入，可实现毫秒量级接入，可满足“上电即工作”的场景下的服务需求。
- 基于业务特征的智能调度：星闪系统允许T节点进行必要的业务特征信息上报，辅助G节点进行智能调度。如图 3-2所示，对于主动降噪业务，G节点支持T节点上报采样率和量化位宽；对于半静态调度业务，T节点可以向G节点报告半静态调度周期和数据包大小，便于G节点进行灵活调度。在调度上，星闪系统支持逻辑信道优先级机制，按照逻辑信道优先级进行数据封装。同时，系统又允许适当约束不同优先级业务的数据封装量，兼顾不同业务调度的公平性。

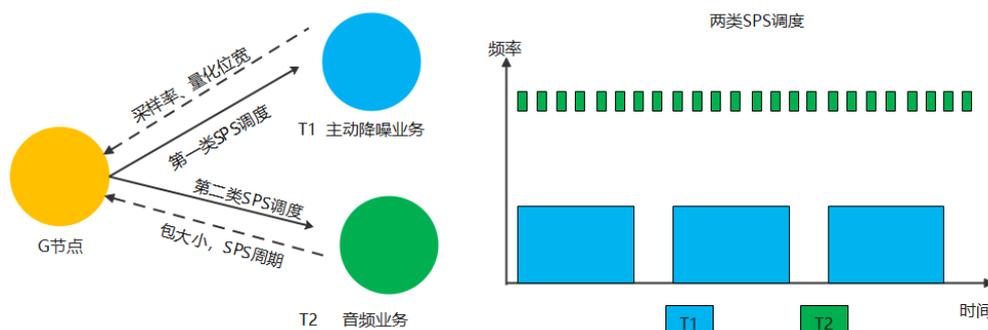


图 3-2 星闪系统精细调度粒度和业务智能调度

3.2 资源分配

3.2.1 频率域资源分配

星闪系统支持超低时延数据信息传输，也即第一类数据传输，和大包/高流量信息，也即第二类数据传输。

第一类数据传输支持极低时延要求的业务。该类数据传输在不支持重传的情况下需保证极高的传输可靠性。针对该类传输，星闪系统支持最小1个子载波的调度粒度，G节点可根据各用户在不同子载波上的信道衰落情况(相同子载波，不同用户对应的频域衰落系数不同)，调度不同的子载波进行数据传输，最大程度实现最优子载波组合调度，提升各用户以及系统性能。如下图 3-3中，以单个用户为例，可以调度信道条件最优的子载波传输数据。

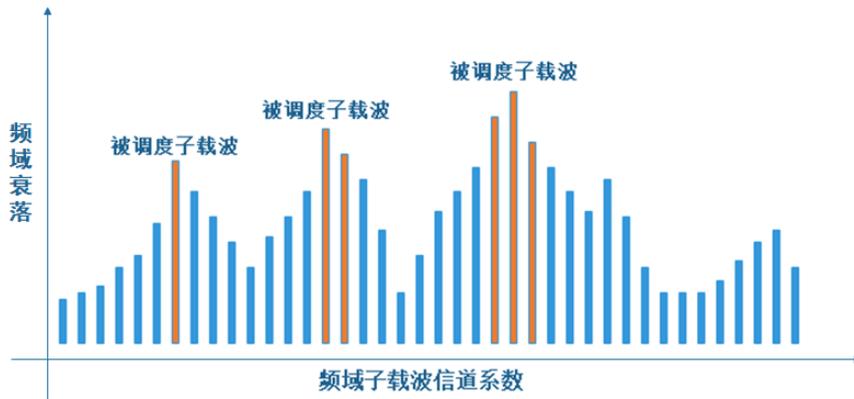


图 3-3 分散调度原理示意图

对于第二类数据传输，星闪系统支持4或3个子载波为一组的调度粒度，在获得足够频率域调度增益的同时，减小信令指示的开销。

对于系统开销信号，比如T链路ACK反馈信号，T节点接入信息，星闪系统支持频率资源梳齿发送，信息传输使用的频率资源分布在一个载波的整个带宽内，确保信息传输的频率分集最大化。

3.2.2 时间域资源分配

以 $20.833\mu\text{s}$ 的无线帧为调度单位，星闪系统支持灵活的时间域资源分配，可以满足不同应用场景对时延的需求。星闪系统的时间域资源分配主要采用以下关键技术：

- 短无线帧：每无线帧长度为 $20.833\mu\text{s}$ ，由于在无线帧内可同时配置G链路和T链路传输，物理层单向传输时延可不大于 $20.833\mu\text{s}$ 。下图 3-4以G链路为例示意性分析了采用半静态调度情况下的两类场景：场景1 (case 1),每个无线帧的第4个符号用于数据传输，如果数据包在第1个符号数据准备完成，由于最近可用于发送的资源在第4个符号，则数据包仅需要等待3个符号即可发送，传输时延小于 $20.833\mu\text{s}$ ；场景2 (case 2)，假设数据包在当前无线帧的第3个符号之后准备完成，则数据包在下一个无线帧的第4个符号进行发送，数据包的最长传输时延也仅为 $20.833\mu\text{s}$ 。

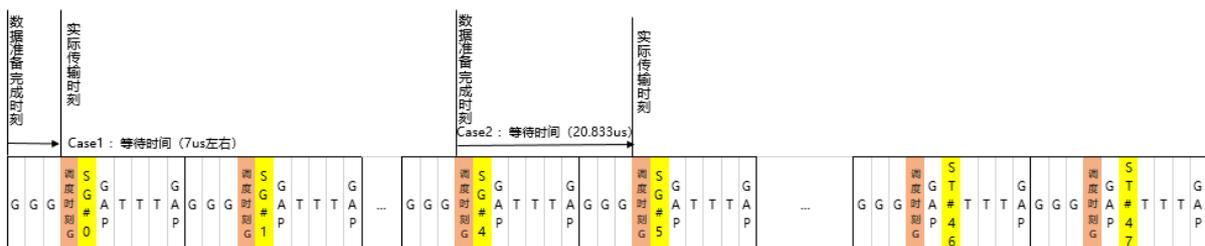


图 3-4 数据包发送示意图

- 系统开销信号资源均匀分布：如图 3-4所示，星闪系统开销信号(如同步信号，广播信息，控制信息，接入信息，物理层ACK反馈信息等)的资源分散到多个无线帧中传输，从而确保了每个无线帧都有资源传输G链路数据包和T链路数据包。
- 超短灵活调度周期：星闪系统支持两类调度单位(周期)配置，超低时延数据传输支持最短调度周期为无线帧时长($20.833\mu\text{s}$)，每个无线帧至少包含一次G链路和T链路的传输机会，最小传输时延为一个无线帧时长($20.833\mu\text{s}$)；大包/高流量数据传输支持最小单位6个无线帧的调度周期($125\mu\text{s}$)。如图3-5所示

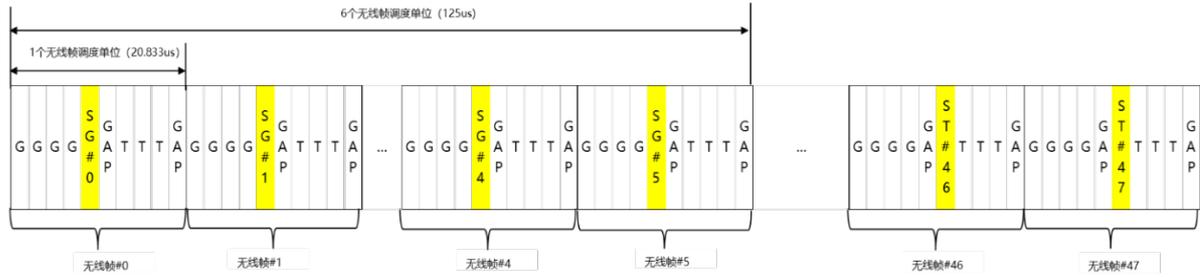


图 3-5 数据包调度单位（周期）示意图

3.3 信道编码和调制

3.3.1 第一类数据传输信道编码

Polar码是基于信道极化理论构造的一种信道编码，是经过理论分析论证可以达到香农极限的信道编码，可以较好的对抗随机错误。RS码是一种线性分组码，是基于伽罗华域构建的多进制信道编码，每个符号可包含多个比特，抗突发干扰性能好，可以较好的对抗连续错误。星闪系统使用Polar码或RS码传输超低时延的小包业务(如车载主动降噪)，确保系统可以在不同应用场景下实现高可靠传输，具体编码调制组合如表 3-1所示。

表 3-1 超低时延数据信息传输调制编码方式表格

信息比特	编码块长度(包含8比特CRC)	信道编码方案	调制方式
16比特	24比特	RS(15,11)截短(10,6) 或Polar	QPSK
			16QAM
			64QAM
			256QAM
			1024QAM
24比特	32比特	RS(15,11)截短(12,8) 或Polar	QPSK
			16QAM
			64QAM
			256QAM
			1024QAM
32比特	40比特	RS(15,11)截短(14,10) 或Polar	QPSK
			16QAM
			64QAM
			256QAM
			1024QAM

3.3.2 第二类数据传输信道编码

针对大包/高流量的第二类数据传输，星闪系统采用高性能Polar编码，支持32阶MCS调度，相邻MCS间的SNR差距基本保持一致，大约1.0dB左右，有利于MCS与信道特征更加匹配，吞吐量性能更加平滑、稳定，如表 3-2所示。

表 3-2 大包/高流量信息传输调制编码方式

MCS Index	modulation	code rate x 1024 (母码1024)	Efficiency
MCS0	QPSK	148	0.2891
MCS1	QPSK	189	0.3691
MCS2	QPSK	239	0.4668
MCS3	QPSK	297	0.5801
MCS4	QPSK	369	0.7207
MCS5	QPSK	452	0.8828
MCS6	QPSK	542	1.0586
MCS7	QPSK	637	1.2441
MCS8	QPSK	730	1.4258
MCS9	QPSK	820	1.6016
MCS10	16QAM	461	1.8008
MCS11	16QAM	532	2.0781
MCS12	16QAM	615	2.4023
MCS13	16QAM	700	2.7344
MCS14	16QAM	779	3.0430
MCS15	16QAM	853	3.3320
MCS16	16QAM	907	3.5430
MCS17	64QAM	655	3.8379
MCS18	64QAM	719	4.2129
MCS19	64QAM	783	4.5879
MCS20	64QAM	838	4.9102
MCS21	64QAM	896	5.2500
MCS22	64QAM	939	5.5020
MCS23	256QAM	732	5.7188
MCS24	256QAM	791	6.1797
MCS25	256QAM	845	6.6016
MCS26	256QAM	896	7.0000
MCS27	256QAM	937	7.3203
MCS28	1024QAM	768	7.5000
MCS29	1024QAM	812	7.9297
MCS30	1024QAM	856	8.3594
MCS31	1024QAM	945	9.2285

3.3.3 物理层 HARQ

混合自动重传请求(HARQ, Hybrid ARQ), 是一种FEC和ARQ相结合的技术, 目的是增加链路的传输可靠性。传统ARQ, 当接收端检测到接收的信息中有错误时, 接收的错误包信息直接丢弃, 并请求发送端重传相应的数据包。与ARQ相比, HARQ对ARQ进行了相应的增强, 即接收的错误包信息并不丢弃, 而是与重传包信息进行合并, 提高接收可靠性。

星闪系统采用基于Polar码的异步HARQ技术, 支持最大4个HARQ进程, 支持CC-HARQ方案和IR-HARQ方案。CC-HARQ方案的收益来源于接收端多次软信息合并, 提升接收端信息的等效SNR, 降低错误概率。IR-HARQ方案, 根据Polar码的特点, 重传时扩展母码长度或者发送第一次传输时没有发送的编码比特, 在获取能量增益的基础上进一步获取编码增益。

星闪系统支持3种重传方案: 基于传输块(TB)的重传、基于编码块组(CBG)的重传和基于CBG的初传重传混合传输。

TB重传是指, 当1个TB里有任何1个编码块(CB)出错, 则重传整个TB的数据。重传时, CB分段

数C与第一次传输时分段数相同，但是每个CB的信道比特数与第一次可能不同。

CBG重传对每个CB来说，实现过程与TB重传一样。与TB重传不同的是：CBG重传，只重传CB出错所在的CBG。

CBG混合重传是指每次传输，既有上一个TB重传的CBG，也有新TB初传的CBG。分段数C是与该次传输关联的最近的上一次TB初传时包含的码块分段的数量相同。所有初传CBG组成一个新的传输块(TB)。

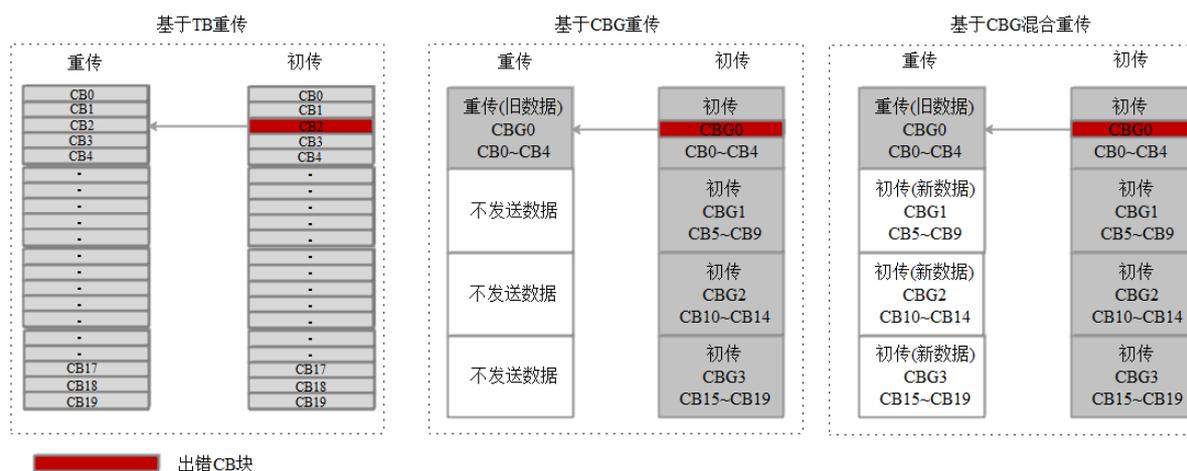


图 3-6 混合自动重传请求方案示意图

3.4 多域协同

3.4.1 多域同步

星闪系统通过多G节点间时间/频率同步降低多域间的干扰。星闪系统采用OFDM波形，存在多个通信域的场景下，即使不同的通信域使用不同的频点，如果频率差不是子载波间隔SCS=480KHz的整数倍或者定时差异超过CP，则会造成子载波间的干扰。特别的，在干扰来自多个通信域的情况，以及干扰源比信号源距离接收设备近得多的情况，G节点之间的时频不对齐引入的干扰会显著降低接收信干噪比。多G节点间时/频同步可以显著降低多域间的干扰，提升多域共存时的频谱效率。

星闪系统需要考虑多个通信域处于相同物理空间的情况。在密集部署场景中，干扰源到接收机的路径损耗甚至可能明显小于信号源到接收机的路径损耗。以两个使用相邻载波的通信域为例，考虑两个域G节点发射功率相同，来自其它域的干扰源到接收机的路径损耗比信号源到接收机的路径损耗例如小20dB。当两个域同步时，频率同步误差例如为100Hz，则干扰源泄露到本载波的功率相对于干扰源的功率小于-74dB，接收信干比高于54 dB (74-20)，干扰可以忽略。当两个域异步时，一般只能依靠滤波器抑制邻频干扰，干扰源泄露到本载波的功率相对于干扰源的功率约20dB，接收信干比约0dB(20-20)。不难看出，多G节点间时/频同步可以显著降低通信域之间的干扰，特别是位于相邻载波的通信域之间的干扰。

多域多G节点间时/频同步可通过G节点发送多G节点同步信息和G节点侦听行为完成。下图以5个G节点为例，开机顺序为G1、G5、G4、G2、G3，展示了5个域实现时频同步的过程。

- 首先，G1和G5节点开机时都不被任何同步集合覆盖，因此分别建立了红色同步集合和蓝色同步集合。
- 然后，随着G2节点和G4节点的开机，红色同步集合和蓝色同步集合节点数量都逐步增多，

覆盖范围也逐步扩大到都能覆盖G3节点。

- 接下来，G3节点开机时侦听到红色同步集合和蓝色同步集合且两个同步集合都有两个节点，G3与G4节点的距离更近，所以蓝色同步集合对G3的覆盖更强，G3加入了蓝色同步集合。
- 最后，G2节点和G1节点依次由红色同步集合转移到节点数更多的蓝色同步集合，最终所有节点都在蓝色同步集合中，同步完成。

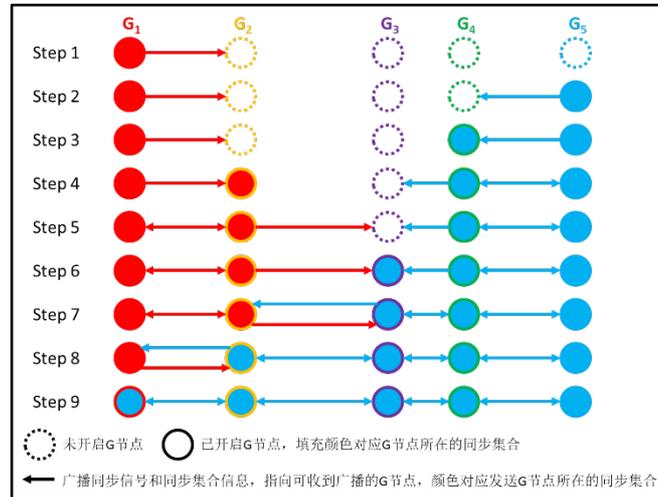


图 3-7 多节点时频同步过程示意图

3.4.2 多域资源协调

星闪系统支持高级通信域的G节点通过广播为其它通信域分配资源池，以实现多域资源协调。不同通信域的资源池可以使用不同的载波，在相同载波上的不同通信域的资源池可以使用不同的符号。在每个包含高级通信域的载波上，高级通信域的G节点通过系统消息指示不同的通信域使用时域正交的资源池，避免不同通信域的通信链路使用相同的资源。

下图给出了在相同载波上的两个通信域时分使用资源的一个示例。

通信域的资源池中：

- 用于数据传输的资源(图中的G符号和T符号)以符号为粒度分配，以无线帧为周期重复；
- 用于系统开销传输的资源(图中的S符号)以开销符号粒度分配，以超帧为周期重复。

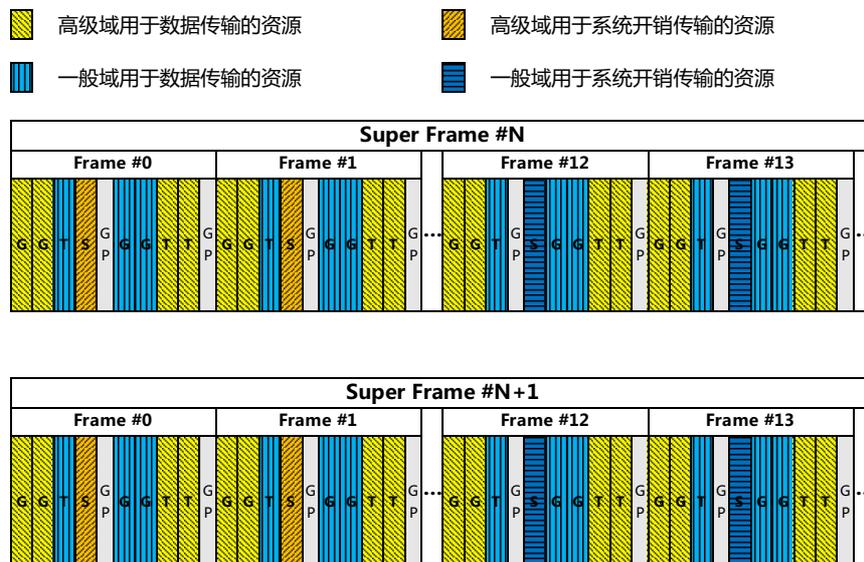


图 3-8 多域资源协调示意图

不同通信域资源池时分，通信域的G节点在自己所在通信域的资源池中发送同步信号和传输业务数据，则该G节点可以在其它通信域的资源池中接收对应其它域的同步信号实现域间同步跟踪，并且不影响所在通信域的业务传输。

3.5 低功耗设计

星闪系统中，G节点可以根据数据的传输特性，通过配置非连续传输(DRX)节省T节点的功耗。T节点工作在DRX状态时，可以根据G节点的配置的接收周期以及每个周期内的持续接收时间，有选择性的在被配置的无线帧/超帧上接听数据，节省T节点功耗。

G节点在通过高层信令配置T节点非连续传输(DRX)的基础上，还可以通过G链路控制信息动态指示T节点跳过当前的非连续传输周期，进一步节省T节点功耗。

3.6 信息安全

以汽车应用为例，短距无线通信是汽车网络信息安全系统重要的一层。基于纵深防御的思想，在最为接近外部环境的车载接入设备层部署丰富的防护措施，有利于尽早地降低信息安全威胁。

3.6.1 信息安全特性

星闪系统信息安全在极简和高安全方向做了增强设计，具有以下信息安全特性：

信息安全特性	说明
信令数量极简	信息安全机制融入到关联流程中，信令数量极简： <ul style="list-style-type: none"> • 无信息安全上下文场景5条信令； • 有信息安全上下文场景3条信令。
高强度凭证	认证凭证配置机制提供了高强度的认证凭证，口令复杂度要求标准化。
强认证鉴权	强制的双向身份认证机制提供了强认证鉴权的信息安全能力，未认证的设备被禁止接入。
双密码算法	<ul style="list-style-type: none"> • 密码算法支持128bit密码算法ZUC和AES； • 密钥架构中所有对称密钥长度为256bit； • 双密码算法在汽车长生命周期内提供双保险，避免一破通破。
加密、完保独立开关	<ul style="list-style-type: none"> • 算法协商机制支持加密和完整性保护算法的协商，方便后续引入新的算法； • 根据业务场景需求，加密和完整性保护可独立开启或关闭。

3.6.2 信息安全机制

星闪系统信息安全定义了设备间安全通信所需的信息安全特征，如认证凭证配置、双向认证、信息安全上下文协商和更新、传输数据信息安全保护、隐私保护等，提供了强认证鉴权和高信息安全的传输安全保护。

3.6.2.1 认证凭证配置

认证凭证配置用于在G节点和T节点之间配置相同的256比特共享密钥PSK。星闪系统支持三种配置方案：用户在G节点和T节点上输入相同的口令(口令须满足复杂度要求)。口令通过密码算法转

换为256比特共享密钥PSK。

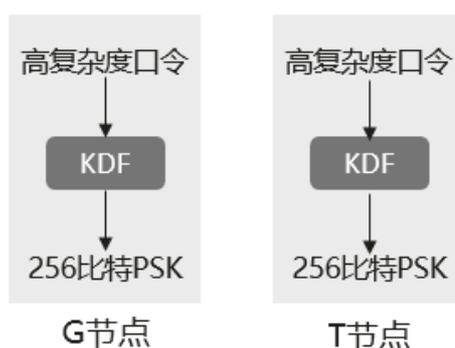


图 3-9 用户口令到PSK转换

3.6.2.2 认证和信息安全参数协商

认证凭证配置完成之后，G节点和T节点在无安全上下文场景下建立关联时应基于配置的认证凭证(256比特密钥PSK)执行双向身份认证。

G节点和T节点在双向身份认证的同时协商信息安全参数，如协商加密算法、完整性保护算法、加密密钥和完整性保护密钥。加密算法和完整性保护算法的协商基于双方的信息安全能力协商出优先级最高的算法。加密密钥和完整性保护密钥从密钥协商算法(SM2、ECDH)得到的主密钥推演而来。

星闪系统支持隐私保护机制，G节点和T节点建立关联之后，G节点给T节点分配临时ID。T节点在下次关联时使用该临时ID作为T节点身份。

3.6.2.3 空口通信信息安全保护

认证和信息安全参数协商完成之后，G节点和T节点基于协商的信息安全参数(密码算法、密钥等)对空口通信进行信息安全保护。密码算法应支持128bit密码算法ZUC和AES。密钥架构中所有对称密钥长度为256bit。

星闪系统支持密钥更新机制，密钥有效期到期或新鲜性参数重复之前，G节点触发密钥更新流程更新G节点和T节点之间密钥，防止密钥使用时间过长。

4 星闪1.0空口系统性能评估

4.1 超低时延第一类数据传输性能

在AWGN信道下，使用QPSK~1024QAM调制时，Polar码和RS码的传输性能如图 4-1所示，相同码率的Polar码较RS码性能好5~9dB @BLER=10⁻⁵。

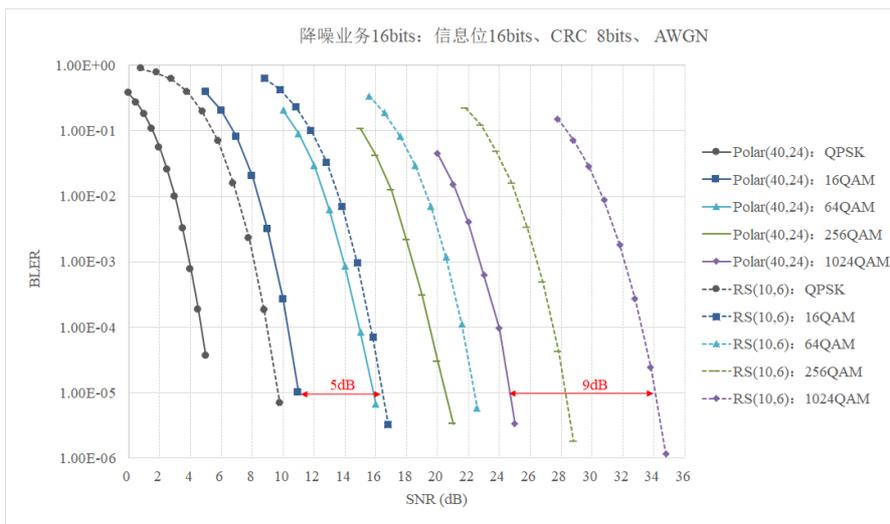


图 4-1 AWGN信道下Polar和RS性能比较(信息bit数: 16bits)

Polar码采用软比特信息进行译码(简称软判决译码); RS码采用判决之后的0、1比特进行译码(简称硬判决译码), 理论上, 相同码率的软判决译码比硬判决译码性能更好。另外, 星闪系统采用了CRC与Polar级联的编码架构, 译码器可采用高性能SCL译码, CRC可协助SCL译码器选择最优路径, 还可改善Polar码的码谱, 提升译码性能。

对于QPSK~256QAM调制方式, 在单个传输符号被突发干扰的场景下, RS优于Polar码约5.0~8.0dB@BLER=10⁻⁵; 1024QAM调制下, RS比Polar抗突发能力差(超出设定RS码纠错能力)。RS码是基于伽罗华域的多进制信道编码, 每个伽罗华域符号包含多个比特, 因此有较好的抗突发能力, 可对抗连续误码。

针对超低时延数据业务, 在随机干扰场景和突发干扰场景下, Polar码和RS码各有优势, 可根据实际应用场景进行选择/配置。

对于第一类数据传输, 采用24比特信息长度, 1024QAM调制时, 每路信息需使用7个资源元素, 常规循环前缀无线帧结构可以支持35路传输。

4.2 第二类数据传输性能

如图 4-2所示, 第二类数据传输相邻MCS间的SNR差距基本保持一致, 大约1.0dB左右, 有利于MCS与信道特征更加匹配, 吞吐量性能更加平滑、稳定。

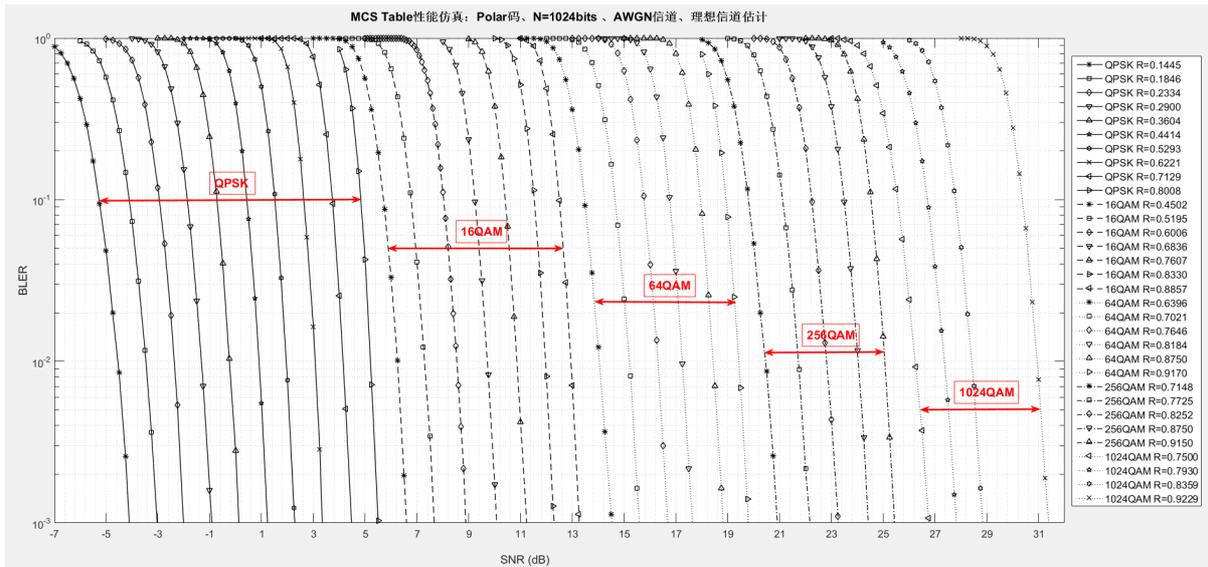


图 4-2 大包/高流量数据传输MCS性能(AWGN信道, 理想信道估计, N=1024bits MCS0~31)

对第二类数据传输, 星闪系统支持的最低SNR工作点为-5.0dB。在AWGN道下, 信噪比SNR=-5.0dB, 可实现初传BLER<0.1; SNR=31dB可实现1024QAM, 码率R=0.9229, 初传BLER<0.1。

第二类数据传输, 可支持125μs调度粒度, 每符号最大复用10个T节点数据, 每个超帧(1ms)可支持80路数据传输。

4.3 高可靠传输

4.3.1 混合自动重传请求

4.3.1.1 CC和IR重传性能比较

下面举例说明CC与IR重传性能的比较: Polar(1503,1720), R=7/8, 最多重传4次, 每次传输的信道比特长度均为1720。TB重传/CBG重传链路性能一致, 与非重传相比, 收益约8.0dB@BLER=10⁻², IR-HARQ相对于CC-HARQ, 大约有2.0dB@BLER=10⁻²的增益。通常情况下码率越高, IR-HARQ相对于CC-HARQ的增益越大, 码率越低增益越小。

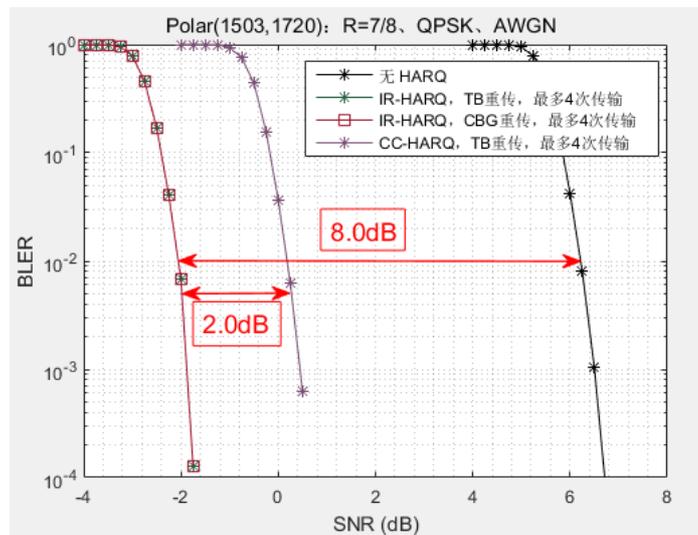


图 4-3 CC/IR重传性能对比

4.3.1.2 ARQ重传、HARQ重传吞吐量对比

采用HARQ重传可提高系统传输效率/吞吐量。当编码块初传BLER为10%时，HARQ相对于ARQ的吞吐量最大增益如下表所示。

表 4-1 HARQ相对ARQ吞吐量增益

TB包含CB数量	TB重传	CBG混合传输
4	13%	38%
8	48%	110%

4.3.1.3 HARQ反馈时延

星闪系统支持1ms时延ACK反馈、2ms时延重传合并，即提高传输可靠性，又可满足低时延应用需求。

4.3.1.4 HARQ性能小结

TB和CBG重传，根据重传次数、重传的信道比特数、码率等不同场景，可获得不同的性能收益，在高码率(如R=7/8)情况下，工作点为BLER=10⁻²时，IR-HARQ相比CC-HARQ可得到2.0dB以上的性能收益。CC-HARQ实现复杂度低于IR-HARQ，具体应用中，可根据实际性能/复杂度要求进行方案选择。

星闪系统采用HARQ技术，当CB个数在4-8之间时，相比数据链路层ARQ重传可以获得13%-110%的系统吞吐量增益。

4.3.2 抗频率选择性衰落

4.3.2.1 频率选择性调度

无线传输过程中，信号经过多个路径到达接收侧，多路径信号叠加会造成不同子载波对应的信道衰落系数不一致，即频率选择性衰落。例如以车载信道模型的频域衰落特性为例，图 4-4是轿车(10ns扩展时延)、客车(35ns扩展时延)在64个子载波(子载波宽度480kHz)上的频域衰落特性，可看出各个子载波间信道系数差异性很大，即频率选择性衰落，35ns扩展时延场景频率选择性更强。

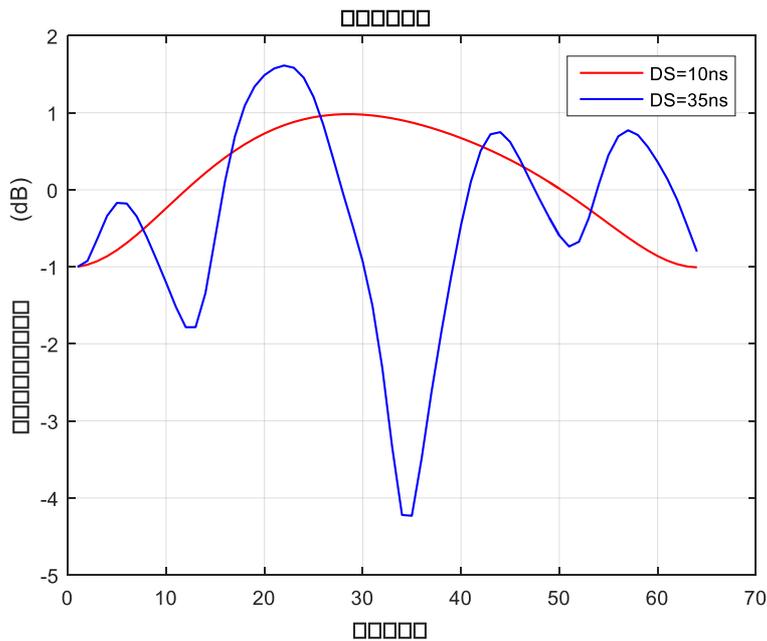


图 4-4 车内信道频域衰落特征

4.3.2.2 性能评估

以典型时延扩展35ns的无线传输场景为例，离散子载波分散调度较子载波随机连续调度的性能增益结果如下：

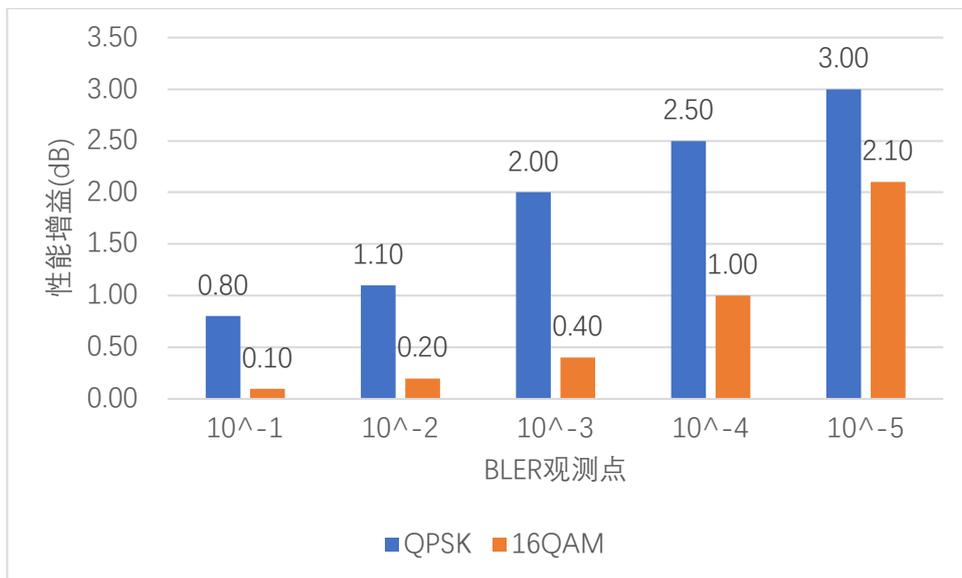


图 4-5 离散子载波调度相比连续子载波调度性能增益

在多径扩展时延35ns时，离散子载波调度性能优于连续子载波调度，并且BLER越低，收益越大。

4.4 性能评估总结

星闪1.0空口技术性能总结如下表 4-2所示。

表 4-2 星闪1.0空口技术性能总结

项目	性能
峰值速率	20MHz单载波G链路峰值920Mbps(8x8MIMO) 20MHz单载波T链路峰值460Mbps(4x4MIMO)
时延	单向传输时延小于20 μ s
高可靠	块传输正确率大于99.999%
抗干扰	RS信道编码和Polar信道编码，支持CBG混合重传，最小工作信噪比-5dB
同步	同步精度小于1 μ s
多业务并发	单载波35路实时音频流并发 1ms内80路数据传输并发

5 总结&展望

综上所述，星闪系统通过定义超短时隙帧结构和超短无线帧调度周期(20.833 μ s)，可以满足主动降噪、工业制造场景中的超低时延应用；高性能信道编码、物理层HARQ重传和离散单载波调度等技术可实现高可靠传输，满足99.999%以上级别的高可靠应用需求，实现对于末端有线连接的替代；多域协同技术提高网络间资源效率、降低网络间干扰；极简和高安全信息特性设计，满足车载等高安全应用需求。本报告对空口的关键技术典型的场景下的性能进行了评估，对于更多应用、更多场景、不同工作信道条件下的性能评估联盟后续会进一步展开。

业务的发展是无止境的，也必将推动技术向前发展。以星闪1.0系统为开端，未来星闪系统将在更高效率、更低功耗、更大带宽、更多天线等技术方向做持续演进，并支持测距、组网更多功能，推出具备更高速率、更低的成本、更低的功耗、更远的覆盖能力的演进系统，并持续发布2.0版本等，更好的支持各类场景应用，在无线短距应用领域发挥更大的作用。