

星闪技术调研报告

胡世成

Shicheng Hu

<https://shichehu.github.io/blog.html>

2023年10月

<https://shichetu.s1thub.io/b10>

目 录

第 1 章 星闪介绍	1
1.1 诞生背景	1
1.2 发展现状	1
1.3 应用场景	2
1.4 星闪联盟简介	2
第 2 章 星闪系统	5
2.1 星闪接入层	5
2.2 基础服务层	6
2.3 基础应用层	6
2.4 设备实现形式	6
2.5 星闪网络结构	7
第 3 章 星闪接入层关键技术	9
3.1 SLB 和 SLE 关键性能指标	9
3.2 关键技术分析	10
3.2.1 抗干扰编解码	11
3.2.2 调制编码方案精细化调度	11
3.2.3 多波形传输	12
3.2.4 多输入多输出空间复用	13
3.2.5 OFDMA 多用户并发	13
3.2.6 低时延超短帧	13
3.2.7 链路透传机制	14
3.2.8 HARQ 差错控制	15
3.2.9 多域协同组网	15
第 4 章 星闪技术挑战	16
4.1 无线短距通信技术横向对比	16
4.2 星闪技术挑战	18
4.2.1 频段兼容性问题	18
4.2.2 技术累积优势	19
4.2.3 通信模块兼容性	19
4.2.4 通信模块融合前景	19
4.2.5 适用 SLB 的场景	19
4.2.6 星闪技术发展的重要价值	19

图目录

图 1-1	星闪应用场景	2
图 1-2	星闪联盟组织架构	3
图 1-3	星闪联盟成员单位	4
图 2-1	星闪技术系统架构	5
图 2-2	星闪技术设备实现方式	7
图 2-3	星闪网络结构	7
图 3-1	2022 年华为开发者大会	10
图 3-2	SLB 20MHz 带宽的 OFDM 系统	13

表目录

表 1-1	星闪技术标准	1
表 1-2	星闪 2.0 标准研究内容和进展	2
表 3-1	SLB 和 SLE 的 KPI	9
表 3-2	SLB 的 MCS 表格	11
表 3-3	传输模式和帧格式间对应关系	14
表 3-4	传输模式特性	14
表 3-4	LMSC 部分工作组	16
表 4-1	无线短距通信技术 KPI 对比	17
表 4-2	SLB 和 Wi-Fi 工作频段对比	18

第1章 星闪介绍

1.1 诞生背景

星闪（SparkLink）是一种适用于无线局域网（Wireless Local Access Network, WLAN）的新型短距无线通信技术。无线短距通信技术是指有效通信距离为几十米范围的无线通信技术，通常的无线短距通信技术有 Wi-Fi、蓝牙等。

星闪联盟是推动星闪技术标准化的关键组织。星闪联盟官网上星闪的定义为：随着智能汽车、智能终端、智能家居和智能制造等产业的快速发展，各应用领域出现越来越多的无线化诉求和趋势。现有的无线短距通信技术在时延、可靠性、同步精度、安全性等方面已无法满足新兴场景的演进需求。星闪联盟在此背景下成立，针对行业需求痛点提出新一代无线短距通信技术，简称为星闪（SparkLink）。

星闪出现时间晚，起步快。星闪标准制定参考了现有无线局域网通信技术和蜂窝网技术。取长补短，融合创新，星闪重点突出时延、可靠性、同步精度和安全性方面的性能要求，或能成为无线局域网技术的重要组成部分。

1.2 发展现状

星闪技术标准制定和发布依托星闪联盟。2022年9月22日，星闪联盟首次发布了星闪10项团体标准，是为V1.0.0版本，主要包含系统架构、基础接入层、基础服务层、网络安全、测试方法的相关标准，总结如表1-1。

表 1-1 星闪技术标准

标准名称	类别
星闪无线通信系统 架构	系统架构
星闪无线通信系统媒体接入层标识分配机制	基础接入层
星闪无线通信系统 低功耗技术要求和测试方法	基础接入层
星闪无线通信系统 基础服务层 设备发现与服务管理	基础服务层
星闪无线通信系统 基础服务层 传输与控制	基础服务层
星闪无线通信系统 基础服务层 服务质量管理	基础服务层
星闪无线通信系统 基础服务层 多域协调与管理	基础服务层
星闪无线通信系统 集成服务层 5G 蜂窝网融合	基础服务层
星闪无线通信系统 网络安全 通用要求	网络安全
星闪无线通信系统 测试 星闪基础接入层技术（SLB）设备要求和测试方法	测试
星闪无线通信系统 测试规范 接入层设备安全要求和一致性测试	测试

同时，星闪主要引用行业标准《无线短距通信 车载空口技术要求和测试方法》为基础接入层技术，其内容为 SLB 的技术要求。

考虑到 V1.0.0 版本中制定的标准主要集中在基础接入层和基础服务层，尚未对基础应用层有详尽要求。在 2022 年 4 月，星闪联盟启动了星闪 2.0 版本的标准化工作。

在 V2.0.0 版本，星闪联盟将标准化工作主要分为两个阶段。第一阶段针对星闪关键应用功能，原计划于 2022 年底发布，第二阶段标准原计划于 2023 年发布。但实际标准化工作目前尚在第一阶段，第二阶段工作尚无具体期限。截止目前，星闪 2.0 版本讨论的标准内容和进展部分总结如表 1-2。在 V2.0.0 版本中，

可以注意到星闪将继续完善 SLE 技术，并将引入定位技术要求。星闪一方面更新迭代，提升技术深度，另一方面探索新的应用场景，扩展技术广度。

表 1-2 星闪 2.0 标准研究内容和进展

标准名称	类别	完成度
星闪无线通信系统 测试 星闪基础接入层技术（SLE）设备要求和测试方法	测试	50%
星闪无线通信系统 定位技术要求和测试方法	基础接入层	80%
星闪无线通信系统 高精度感知技术要求和测试方法	基础接入层	50%
星闪无线通信系统 基础服务层增强（5G 融合，IP 增强）	基础服务层	70%
星闪无线通信系统 基础应用层 音视频原子能力	基础应用层	70%
星闪无线通信系统 基础应用层 低时延地复杂度高清音视频编解码	基础应用层	10%
星闪无线通信系统 基础应用层 人机交互设备	基础应用层	10%
星闪无线通信系统 分布式自组织网络	网络架构	50%

1.3 应用场景

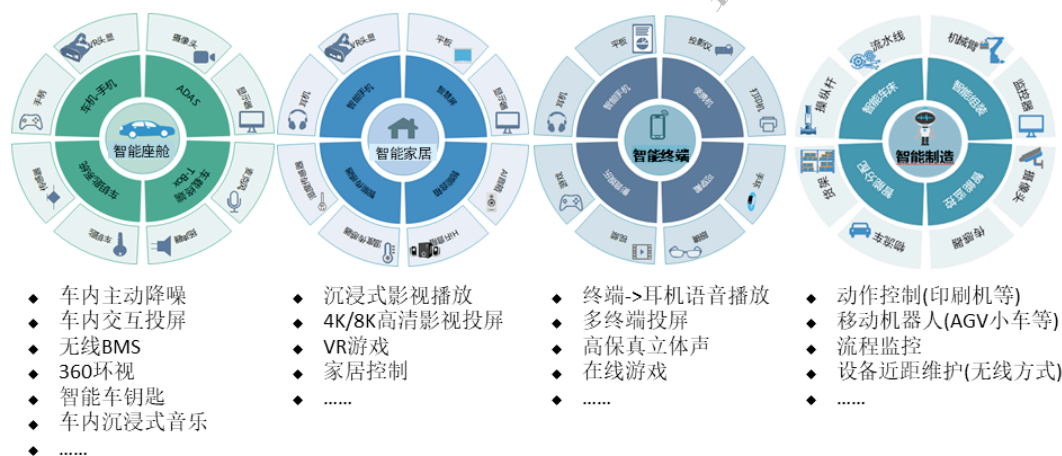


图 1-1 星闪应用场景

星闪面向无线局域网，主要的应用场景是智能汽车、智能终端、智能家居和智能制造。其中，杭研业务关联最大的是智能终端、智能家居。也可以注意到，这些场景同时也是其他无线通信技术的潜在应用场景，如 NB-IoT 适用于智能制造、Wi-Fi 适用于智能家居、智能终端、智能制造，蓝牙也长期在智能家居和智能终端。在众多技术竞争中，星闪何以取代已有成熟技术依然任重道远。这也是本文欲分析的重点。

1.4 星闪联盟简介

星闪联盟是有中国信息通信研究院牵头成立的国内技术标准化组织，成立于 2020 年 9 月 22 日，是致力于推动星闪技术创新和发展的全球化的产业联盟，承载了智能汽车、智能家居、智能终端和智能制造等快速发展的新场景应用。星闪联盟的会员单位超过 300 家，涵盖芯片、模组、设备、解决方案、测试认证、运营和安全服务等全产业链上下游。图 1-2 中给出了星闪联盟的组织架构，图 1-3 中给出了星闪联盟的成员。中国移动在其中担任的是副理事长的角色。

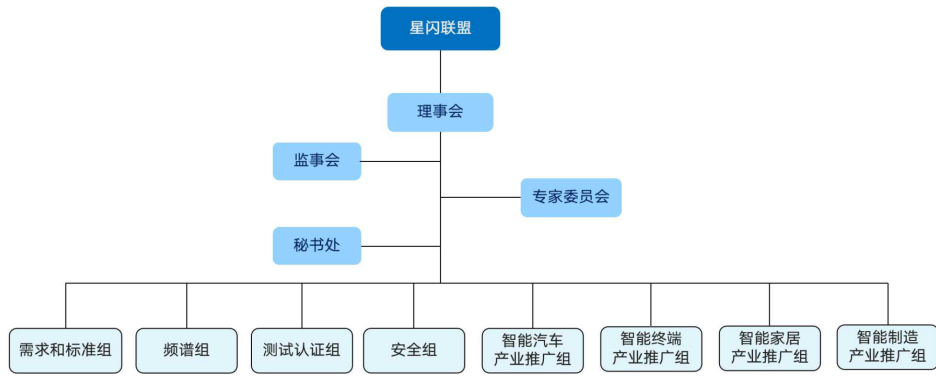


图 1-2 星闪联盟组织架构

<https://shichetu.github.io/b10>



图 1-3 星闪联盟成员单位

第 2 章 星闪系统

首先，我们从系统架构的角度认识星闪，在第 3 章就关键技术展开，分析星闪技术的优劣。星闪技术系统架构可以分为三个层级，分别是星闪接入层、基础服务层和基础应用层，系统架构如图 2-1 所示。每层由不同功能模块构成，通过网络接口，可以实现不同模块的调度。该系统架构可以同计算机五层协议体系结构的层级相对应，比如：星闪接入层对应物理层(Physical Layer, PHY)和媒体接入控制层(Medium Access Control, MAC)，基础服务层对应网络层(Internet Layer, IP)和传输层，基础应用层则对应应用层。整体系统架构已有《星闪无线通信系统 架构》团体标准 V1.0.0 版本发布，讲解星闪技术的体系架构、主要功能和各协议层内容。接下来将分别介绍各层。

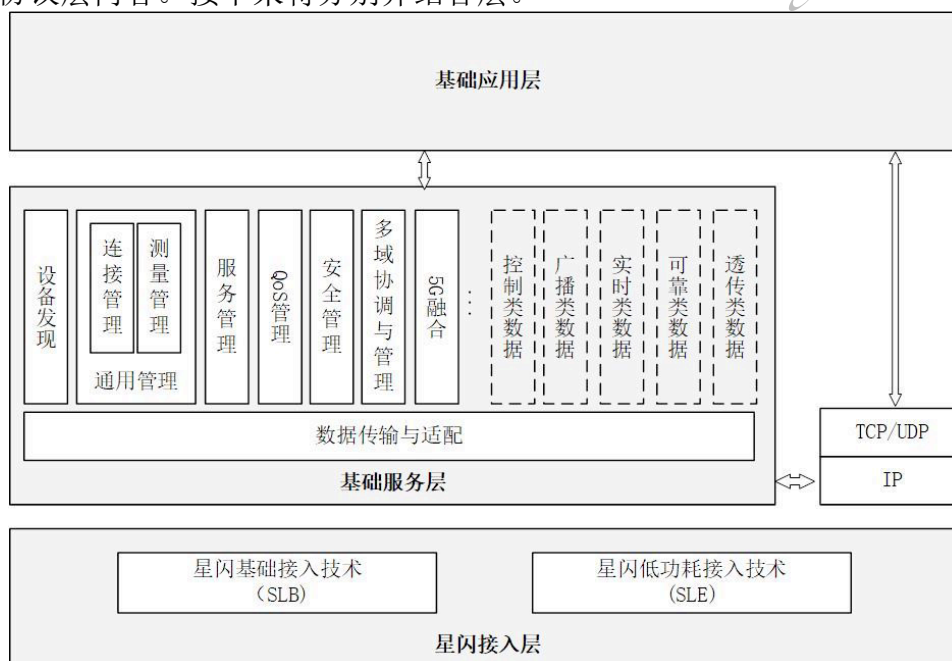


图 2-1 星闪技术系统架构

2.1 星闪接入层

星闪接入层也称为星闪底层，面向空口和基础服务层。目前，星闪接入层提供两种无线通信接口，分别为星闪基础接入技术(Sparklink Basic, SLB)和星闪低功耗接入技术(Sparklink Energy, SLE)。在 V2.0.0 版本的讨论中，星闪接入层还将新增定位技术(Sparklink Positioning, SLP)的通信接口。

SLB 和 SLE 也被称之为根技术。所有星闪上层功能的实现必须依赖星闪底层技术的功能，使得分析星闪接入层技术称为研究星闪技术的关键。在第 3 章和第 4 章的讨论也是围绕星闪接入层技术。

SLB 和 SLE 支持不同物理层和链路层功能要求，面向不同的应用场景，使得星闪设备实现更为自由，我们将在 2.4 和 2.5 说明由此带来的星闪设备的实现形式和网络结构的变化。

在目前，星闪接入层发布有《星闪无线通信系统 测试 星闪基础接入技术（SLB）设备要求和测试方法》、《星闪无线通信系统 测试 星闪基础接入技术（SLB）设备安全要求和测试方法》、《星闪无线通信系统 低功耗技术要求和测试方法》团体标准的 V1.0.0 版本。

在之后的讨论中，我们将同时分析 SLB 技术和 SLE 技术，但侧重于 SLB 技术。未来新增的 SLP 技术将应用于感知、定位和自组网，但由于还未有相关资料公开，暂不纳入讨论。

2.2 基础服务层

基础服务层和基础应用层是星闪上层。基础服务层面向接入层和基础应用层，可以调用星闪接入层物理层和链路层功能，并对提供基础应用层提供一系列基础功能，实现对接入层的管理和对基层应用层的支持。

基础服务层提供的基础功能包括：设备发现、通用管理、服务管理、服务质量(Quality of Service, QoS)管理和安全管理。基础服务层还提供扩展功能包括：多域协调与管理 and 5G 融合功能。

目前，基础服务层已有《星闪无线通信系统媒体接入层标识分配机制》、《星闪无线通信系统 基础服务层 设备发现与服务管理》、《星闪无线通信系统 基础服务层 传输与控制》、《星闪无线通信系统 基础服务层 服务质量管理》、《星闪无线通信系统 基础服务层 多域协调与管理》、《星闪无线通信系统 基础服务层 5G 蜂窝网络融合》、《星闪无线通信系统 网络安全 通用要求》团体标准的 V1.0.0 版本。

2.3 基础应用层

基础应用层属于星闪上层，面向基础服务层。星闪应用层由多个应用程序构成，每个应用程序支持同时调用多个基础服务层功能，实现端到端数据传输。

目前还未对基础应用层有具体的功能说明，也没有相关团体标准发布。

2.4 设备实现形式

在星闪系统架构中，星闪接入层作为根技术有两个无线通信接口，分别为：SLB 和 SLE。在应用场景上，SLB 和 SLE 存在显著差异。

SLB 采用超短帧、多点同步、双向认证、快速 干扰协调、双向认证加密、跨层调度优化等多项技术，用于支持具有低时延、高可靠、精同步、高并发 和高安全等传输需求的业务场景。SLE 采用 Polar 信道编码提升传输可靠性，减少重传节省功耗，同时支持最大 4MHz 传输带宽、最大 8PSK 调制，支持 1 对多可靠组播，支持 4KHz 短时延交互等特性，在尽可能保证传输效率的同时，充分考虑了节能因素，用于承载具有低功耗诉求的业务场景。

SLE 和 SLB 支持的物理层和链路层功能不同，在电路设计和实现成本上也存在显著差异。

SLB 支持多输出多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)、正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)、正交频分复用多址 (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA)、时间同步和混合重传 (Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ) 等技术。而 SLE 则采用扩频跳频通信, GFSK 调制波形和重传合并等技术。在实现上, SLB 实现对射频器件要求严格, 成本高, 而 SLE 实现更为简单, 成本较低。

为满足不同场景需求, 星闪设备的可能实现方式如图 2-2 所示。

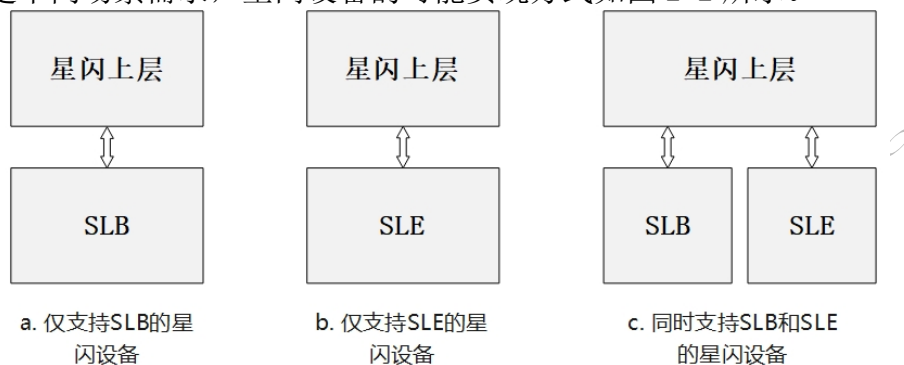


图 2-2 星闪技术设备实现方式

2.5 星闪网络结构

为了有效管理网络, 星闪在网络中根据星闪接入层的不同角色, 将设备分为 G (Grant) 节点和 T (Terminal) 节点。每个 G 节点可以管理一定数量的 T 节点, G 节点以及与其连接的 T 节点共同组成一个通信域。G 节点通常由性能更为强大的节点充当, 可参考 3.1 给出的性能指标。星闪网络的结构如图 2-3 所示。

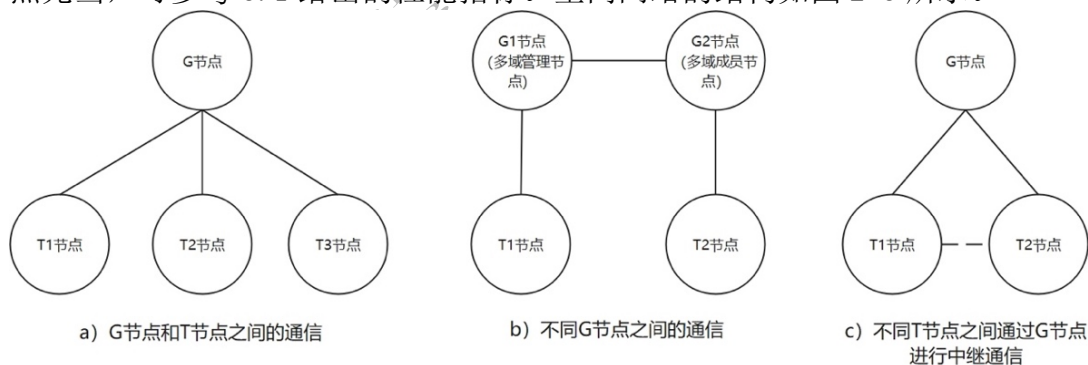


图 2-3 星闪网络结构

从图 2-3 可知, T 节点只能同 G 节点通信, G 节点可以和 T 节点或者 G 节点通信。G 节点之间的通信, 可选支持多域协调与管理功能, 以实现对更大网络的管理。

已知星闪基础服务层提供两种扩展服务: 多域协调与管理 和 5G 融合功能。多域协调与管理功能是指多个通信域之间的资源调度, 类似于 Wi-Fi 中的多 AP 组。5G 融合功能可以实现 WLAN 和 5G 核心网的融合, 满足蜂窝网覆盖盲区的传输需求。同 5G 融合的难点是 5G 蜂窝网接入需要运营商授权。星闪 5G 融合技术标准中接入 5G 网络的方式是在星闪网络 (由 G 节点、T 节点构成) 中设置可信节点接入 5G 网络。星闪技术主要采用两种方式接入 5G 网络。

-
- T 节点、G 节点和非 3GPP 接入网关相连，通过非 3GPP 接入网关接入 5G 网络。
 - T 节点只同 G 节点通信，G 节点作为可信节点同 5G 接入网通信。
 - 还有一种是前两种方式的混合形式，标准中还未定义清楚。

<https://shichetu.situb.io/b10>

第3章 星闪接入层关键技术

由第2章的星闪系统介绍可知,星闪接入层技术是星闪的根技术,它决定了星闪的基本功能和实现形式,也是区别于其他无线短距通信技术的关键。因此,对星闪关键技术的分析是以星闪接入层技术分析为关键。本章将介绍SLB和SLE的物理层和媒体接入控制层关键技术,并分析其关键性能指标(Key Performance Indicator, KPI)。

SLB的优点是低时延、高可靠、精同步、高并发和高安全。SLB面向车载主动降噪、无线投屏、工业机械运动控制等场景。SLE的优点是低成本、低时延和低功耗。SLE面向耳机无损音频传输、无线电池管理系统、工业数据采集等场景。

SLB的技术内容主要由《无线短距通信 车载空口技术要求和测试方法》(YD/T 4007-2022)、《星闪无线通信系统 测试 星闪基础接入技术(SLB)设备要求和测试方法》(T/XS 50001-2022)、《星闪无线通信系统 测试 星闪基础接入技术(SLB)设备安全要求和测试方法》(T/XS 50002-2022)规定。SLE的技术内容主要由《星闪无线通信系统 低功耗技术要求和测试方法》(T/XS 10002-2022)规定。由于关于星闪技术的讨论还不是太多,本文SLE和SLB的部分描述参考星闪联盟《星闪无线短距通信技术(Sparklink 1.0)产业化推进白皮书》。

3.1 SLB和SLE关键性能指标

无线通信技术的KPI通常作为评估和对比不同技术的客观标准,SLB和SLE作为不同的星闪根技术,KPI有显著差异。表3-1中对比了SLB和SLE的KPI值,旨在说明SLB和SLE何以适用于不同的业务场景。

表3-1 SLB和SLE的KPI

KPI	SLE	SLB
传输速率 (Mbps)	12	G节点: 900, SC 20MHz T节点:450, SC 20MHz
多用户	256	4096
高并发	10	80/ms
安全性	双向认证	双向认证
射频功耗	BT x 0.4	Mode 1: 14~20 dBm Mode 2: 20~23 dBm Mode 3: 23 dBm
覆盖范围(m)	200	----
时延(us)	250	20.88
可靠性	----	>99.999%
信道编码	RS Code/Polar Code	RS Code/Polar Code

		最高 0.92 码率
调制方式	Single Carrier (SC); 8PFSK	SC 20MHz/OFDM 子载波间隔 480kHz; 1024QAM
带宽 (MHz)	1、2、4	20、40、80、...320
频段	2.4 GHz、5GHz	5 GHz
空间流	----	G 节点:8; T 节点:4

*标红字体是根据华为开发者大会的报告推测的，见图 3-1。



图 3-1 2022 年华为开发者大会

根据目前的研究资料，可以推测星闪 SLB 对标的是传统 Wi-Fi 技术，而星闪 SLE 对标的是传统蓝牙技术，未来将新增的形式 SLP 对标的是 UWB 技术。

蓝牙技术通常分为两类，一类是经典蓝牙 (Bluetooth Classic, BT)，另一类是低功耗蓝牙 (Bluetooth Low Energy, BLE)。BT 常指代蓝牙 2.1 版本，采用 1MHz 带宽，支持 1.8~2.1Mbps 速率。在蓝牙 4.0 之后的版本中引入了 BLE 技术，适用于有低功耗要求的物联网场景。BLE 支持 Mesh 组网和最高 2Mbps 的传输速率。BT 中的增强速率 (Enhanced Data Rate, EDR) 模式在蓝牙 5.0 的版本中支持最高 48Mbps 的传输速率。根据图 3-1，可以合理推测，华为开发者大会对比的是发布于 2010 年的蓝牙 4.0 版本的 BLE 技术。SLE 可以实现 6 倍于 BLE 的传输速率。从利于 Nearlink¹ 的角度而言，这也是合理的。

我们还可以注意到，图 3-1 中在抗干扰、覆盖距离和最大连接数等 KPI，星闪技术相比传统无线通信技术都有显著提升，我们在下一节中将分析原因。

3.2 关键技术分析

星闪接入层技术融合众多无线通信技术，如蓝牙、Wi-Fi、蜂窝网的优点。比如：星闪采用了 5G 蜂窝网中的信道编码技术提升抗干扰能力，星闪采用蓝牙的单载波调制 (Single Carrier, SC) 技术降低射频功耗等。我们将分析支持 SLB KPI 的关键技术。根据星闪联盟公布的资料，SLB 的关键技术总结如下：

¹ Nearlink 是华为公司采用星闪技术的实现版本

3.2.1 抗干扰编解码

SLB 和 SLE 支持 Reed-solomon (RS) 码和 Polar 码作为信道编码,有效提升抗干扰能力。RS 码是基于伽罗华域的前向纠错 (Forward Error Correction, FEC) 码, 利于对抗连续传输错误; Polar 码是华为在 5G 蜂窝网中提倡的信道编码, 可以逼近香农极限, 利于对抗随机传输错误。RS 码用于 WiMAX、卫星通信。Wi-Fi 中采用的是 LDPC 码。LDPC 和 Polar 都是逼近香农极限的信道编码, LDPC 更适用于长码, Polar 适用于短码。Polar 码的缺点是在解码时只能采用串行解码, 解码时间长, 且只适用于短码。而蓝牙直到 5.2 版本才引入卷积码作为 FEC 码, 之前未采用前向纠错。

3.2.2 调制编码方案精细化调度

SLB 采用 Polar 编码时, 支持最高 32 阶的调制编码方案 (Modulation Coding Scheme, MCS) 调度, 相邻 MCS 之间 SNR 差异稳定在 1dB 左右, 有利于实现用户移动时数据吞吐量变化平滑、稳定。SLB 还支持最高码率 0.92。SLB 的 MCS 表格见表 3-1。对比其他无线技术, 在 Wi-Fi 6 中最高码率是 0.83, 5G 最高码率是 0.925, 可见 SLB 的频谱效率非常高。但设置较多的 MCS 阶数和高码率也有优缺点。码率高的优点是数据的有效传输速率高, 缺点是解码误码率性能不易得到保障。通常而言, 只有当端到端距离非常近、信道稳定、没有干扰的情况才会采用高码率。MCS 阶数高也有利弊, 目前 Wi-Fi 6 MCS 只有 12 阶, Wi-Fi 7 MCS 有 14 阶, 5G MCS 有 32 阶, 但 28~31 阶为保留阶数。MCS 高, QoS 调控要求也越高, 在实现上有困难。

从表 3-1 中还可以注意到, SLB 支持最高 1024QAM 调制, 支持更高的吞吐量, 但也导致更为严重的同步误差的影响。在 5G New Radio (NR)、Wi-Fi 6 中也支持最高 1024QAM 调制。在《星闪无线通信系统 测试 星闪基础接入技术 (SLB) 设备安全要求和测试方法》团体标准 V1.0.0 版本中, 只要求 G 节点和 T 节点支持 64QAM 调制, 未对更高阶调制有要求, 也说明了目前标准制定的要求可能过高。

SLE 支持 12 阶的 MCS 调度, 调制方式采用 B/Q/8-PSK。经典蓝牙采用 GFSK, 在 EDR 模式中支持 8DPSK, 蓝牙中没有 MCS 的概念, 但是有类似的模式概念, 蓝牙有三种模式, 分别为基本速率 (Basic Rate, BR)、增强速率 (Enhanced Data Rate, EDR)、低功耗 (Low Energy)。其中 EDR 和 LE 根据带宽是 1M、2M 还是 3M 可以进一步划分。

表 3-2 SLB 的 MCS 表格

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	16 QAM	461	1.8008
MCS11	16 QAM	532	2.0781
MCS12	16 QAM	615	2.4023
MCS13	16 QAM	700	2.7344
MCS14	16 QAM	779	3.0430
MCS15	16 QAM	853	3.3320
MCS16	16 QAM	907	3.5430
MCS17	64 QAM	655	3.8379
MCS18	64 QAM	719	4.2129
MCS19	64 QAM	783	4.5879
MCS20	64 QAM	838	4.9102
MCS21	64 QAM	896	5.2500
MCS22	64 QAM	939	5.5020
MCS23	256 QAM	732	5.7188
MCS24	256 QAM	791	6.1797
MCS25	256 QAM	845	6.6016
MCS26	256 QAM	896	7.0000
MCS27	256 QAM	937	7.3203
MCS28	1024 QAM	768	7.5000
MCS29	1024 QAM	812	7.9297
MCS30	1024 QAM	856	8.3594
MCS31	1024 QAM	945	9.2285

3.2.3 多波形传输

SLB 支持单载波和 OFDM 传输波形，SLE 只支持单载波传输波形。SLE 采用扩频跳频通信，载波带宽可为 1/2/4MHz，支持 GFSK，B/Q/8PSK 调制。SLB 采用单载波通信时，载波带宽为 20MHz。SLB 采用 OFDM 传输波形时，支持 20/40/80/160/320MHz 的带宽，支持最高 1024QAM 调制。图 3-2 给出了 20MHz 的 OFDM 系统子载波配置方案，其中有 38 个子载波为数据子载波，中间的载波为直流子载波(Direct Current Tone, DC Tone)，用于确定中心频率位置，结合左右保护带减少频谱泄漏的影响。采用 OFDM 传输波形可以提升抗多径信道衰落的能力和提升系统频谱效率。SLB 在 OFDM 系统支持最高 1024 QAM 调制，并可通过载波聚合提升系统带宽，提升系统的传输容量。类似 5G NR，SLB 也支持最大子载波间隔 480kHz。采用大子载波间隔可以增强抗多普勒频移、相位噪声的影响，提升同步性能。支持 1024QAM 调制提升系统最大传输速率，缺点是抗多径信道衰落能力减弱和系统 EVM 要求提高，对系统设计提出更高要求。

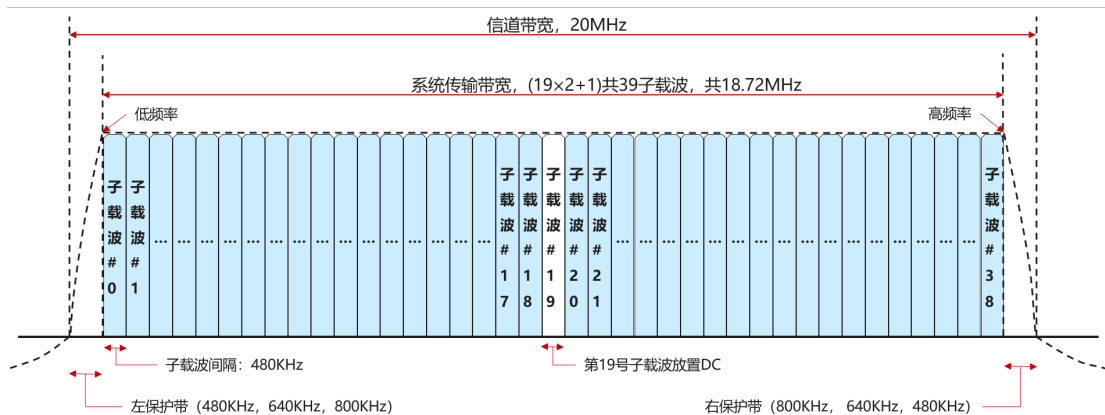


图 3-2 SLB 20MHz 带宽的 OFDM 系统

3.2.4 多输入多输出空间复用

SLB 在 G 节点支持最多 8x8 的空间流，在 T 节点支持最多 4x4 的空间流。对比 Wi-Fi 6 支持 8x8 的最大空间流数，MIMO 技术可以提升传输速率和定位精度。MIMO 技术的采用同样也会增加射频器件成本。尚不清楚 SLB 是否支持 MU-MIMO 以及 SLE 是否会采用 MIMO。

3.2.5 OFDMA 多用户并发

最大连接数是指链路层相关协议字段规定的设备连接数量上限，多用户并发数是指设备允许的同时通信设备数量。多用户并发数反映通信协议对多用户性能的支持，同时，配合时分复用，网络中的可有效通信的设备也能增加，但不超过最大连接数。

SLB 支持 MIMO 和 OFDMA 多址技术，支持最多 4096 个用户接入 (G 节点和 4096 个 T 节点连接)。Wi-Fi 6 支持最多 2007 个用户接入，Wi-Fi 7 将支持 4096 个用户接入。同 Wi-Fi 类似，SLB 采用竞争信道随机接入方式，由于信道资源受限，并发用户数远小于最大连接数。

在多用户并发能力上，SLB 支持最多每毫秒 80 个用户并发，这同 SLB 采用 MIMO、OFDMA 还有超短帧技术有关。Wi-Fi 6 在 160MHz 频宽下支持最多每毫秒 592 个用户并发，这与多用户 MIMO 和 OFDMA 技术有关，但无法利用超短帧的时分复用功能。

多用户并发能力并非 SLE 的优势。SLE 支持最大连接数为 256，经典蓝牙是 8 个，而 BLE 最大连接数是 2^{24} 。

在多用户并发方面，SLE 支持最多 10 个用户并发，蓝牙支持最多 3~7 个用户并发。原因是 SLE 和蓝牙都是采用点对点的通信方式，且传输时间的最小单位（即时隙）较长，蓝牙的时隙为 625us，而 SLE 的时隙为 125us，即使采用时分复用，也难以有效服务多个用户。

3.2.6 低时延超短帧

星闪接入层在帧结构设计方面也有一定特色。星闪接入层设计了物理层的超帧和无线帧结构，提出了超短帧。星闪接入层在媒体接入控制层设计了链路透传机制。这两种机制结合是星闪低时延特性的关键。

SLB 在物理层采用了超帧和无线帧，其中超帧持续时间 1ms，1 个超帧包含 48 个无线帧，每个无线帧持续时间就是 20.833us。在《星闪无线通信系统 测试星闪基础接入技术（SLB）设备要求和测试方法》中提到由于 SLB 支持两种调度单位配置，超低时延数据传输支持最短的 1 个无线帧传输（20.833us）；大包/高数据流数据传输支持最小 6 个无线帧传输（125us）。所以 SLB 传输的最小时延就是 20.833us。

SLB 的物理帧设计方式同 5G 类似，5G 是以帧为最小调度单元。帧持续时间是 10ms，1 个帧有 10 个子帧，1 个字帧可以根据子载波间隔分为多个时隙。

但 SLB 帧设计也存在缺点。SLB 传输短帧时，尤其是超短帧，由于缺少了前导码和尾部校验信息，容易导致关键控制信息丢失，从而增加传输失败几率，反而降低了数据传输速率。

SLE 数据发送的单位是无线帧，包含前导信号部分、同步信号部分、物理层控制信息部分和可能有的数据部分。SLE 无超短帧概念。

3.2.7 链路透传机制

SLB 在媒体接入控制层支持数据链路层透传传输机制，适用于时延敏感场景，通常用于透传模式，如表 3-3 所示。我们把一般的无线帧称之为基础帧，关于其他传输模式功能的说明见表 3-4。在链路透传模式中，数据从 TCP/IP 层到 MAC 层不需要在每一层增加包头，提升传输速率和减小处理时延。在链路透传模式中，发送端的数据传输与适配功能单元不对数据进行任何缓存、封包、流控等处理，直接将数据传入星闪底层。

这个技术和无线帧结合可以实现低延迟。难点是难以保证传输质量。暂未发现其他无线通信技术采用透传机制。

SLE 未采用链路透传机制。

表 3-3 传输模式和帧格式间对应关系

传输模式	可支持帧格式
基础模式	数据传输：基础帧
透传模式	数据传输：透传帧
流模式	数据传输：单向分片帧、单向聚合帧 传输通道测量：测量请求帧
可靠模式	数据传输：单向分片帧、单向聚合帧、双向分片帧、双向聚合帧及应答帧 传输通道测量：测量请求帧单独使用，或测量请求帧与测量应答帧联合使用。

表 3-4 传输模式特性

传输模式	主要特性	典型应用
基础模式	默认的传输模式。发送端不对数据进行重传，数据包的发送无超时丢弃丢弃。接收端不对接收数据进行反馈确认。	用于基础服务层的控制
透传模式	适用于时延敏感业务，在传输过程中发送端的数据传输与适配功能单元不对数据进行任何缓存、封包、流控等处理，直接将数据传入星闪底层。	主动降噪业务
流模式	适用于具有实时性需求的流业务，采用单向传输。	音频流

	发送端的数据传输与适配功能单元对数据进行超时丢弃操作。接收端不对接收数据进行反馈确认。	
可靠模式	适用于具有高可靠性需求的业务。发送端支持数据重传，接收端支持数据接收后的反馈确认。	FTP 业务

3.2.8 HARQ 差错控制

SLB 采用混合自动重传请求 (Hybrid Automation Repeat reQuest, HARQ)。HARQ 是结合 FEC 和 ARQ 机制的差错控制算法。HARQ 应用于 (Long Term Evolution, LTE) 和 5G NR, Wi-Fi 8 未来也可能采用 HARQ 技术。技术实现较为成熟。

SLE 支持 FEC 功能, 并通过合并重传的方式减少重传次数。SLE 未采用 HARQ。

3.2.9 多域协同组网

SLB 结合多域协调与管理功能实现多个 G 节点之间通信资源的协同和干扰消除。有点类似于 Wi-Fi 8 的多 AP 协同。分为管理模式和非管理模式, 管理模式就类似 AC+AP 的模式, 有一个 G 节点作为管理节点, 管其他 G 节点; 非管理模式就类似胖 AP 模式, 没有管理节点, G 节点地位一致。强制支持非管理模式, 可选支持管理模式。关于具体的组网, 星闪还没有相关的规范。

第 4 章 星闪技术挑战

4.1 无线短距通信技术横向对比

电气与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)是全球最大的非营利性专业技术学会,总部位于美国纽约。IEEE 致力于太空、计算机、通信、电子、电气、消费类电子产品等领域的开发和研究,主要业务包括:论文及书籍出版、教育、制定和维护标准、会议举办。

众所周知,蜂窝网标准是由第三代合作伙伴计划(The 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)制定,而 Wi-Fi、以太网等标准是由 IEEE 802 标准委员会制定的。IEEE 于 1980 年 2 月成立了 IEEE 802 标准委员会,又称之为局域网(Local Area Network, LAN)/城域网(Metropolitan Area Network, MAN)标准委员会(LAN/MAN Standard Committee, LMSC),致力于研究局域网和城域网的物理层和数据链路层协议。目前 IEEE 802 标准委员会包括有 20 多个工作组,其中就包含了众多知名的无线短距通信技术的标准制定,如蓝牙、Zigbee、UWB 等,部分 IEEE 802 标准分委会总结如表 4-1。

表 4-1 LMSC 部分工作组

工作组	任务
802.1	802 LAN/WAN 架构、802 LAN、WAN 和其他广域网之间的网络互通、安全、整体网络管理、高层协议设计
802.3	以太网标准开发
802.4	令牌总线网
802.5	令牌环网
802.6	城域网
802.7	宽带技术咨询组
802.8	光纤技术咨询组
802.9	综合声音数据 LAN
802.10	网络安全技术咨询组,定义网络互操作性的认证和加密方法
802.11	无线局域网(Wireless LAN, WLAN)
802.12	使用需求优先的网络接入(Demand Priority Network Access)方法的 LAN
802.14	采用线缆调制解调器(Cable Modem)的交互式电视
802.15	无线个人网(Wireless Personal Network, WPAN)
802.15.1	蓝牙
802.15.3a	超宽带(Ultra-Wideband, UWB)
802.15.4	Zigbee
802.16	无线城域网(Wireless MAN, WMAN)
802.18	宽带无线局域网咨询组
802.19	多重虚拟 LAN 共存技术咨询组

相较星闪出现时间较晚,现有的无线短距通信技术大多提出于 2000 年左右,经过了多次技术迭代,分别在不同场景中取得极高的行业认可度。这些技术的标

准化通常由 IEEE 802 下辖工作组完成,并由其他产业联盟商业化。比如: IEEE 802.11 工作组制定的 WLAN 标准,由 Wi-Fi 联盟完成商业化; IEEE 802.15.1 制定的蓝牙技术由蓝牙联盟(Bluetooth Special Interest Group, Bluetooth SIG)完成商业化,目前蓝牙联盟负责蓝牙制定。星闪在最初制定时就参考了现有无线短距通信技术和蜂窝网技术,目的是打造更适用于新兴场景的无线短距通信技术。星闪的应用场景同这些技术的应用场景重叠,存在不可避免的竞争,比如:在进行音频传输时是选择 SLE 还是选择 BT,在进行定位时是选择 UWB 还是选择 SLP 等等。

表 4-2 中横向对比了星闪接入层技术和主流无线短距通信技术,主要为经典蓝牙、蓝牙低功耗、Zigbee、UWB 和 Wi-Fi6/7。

从表 4-2 的对比可知,SLB 在带宽、频段、射频功率、多用户、空口技术、调制方式、覆盖范围、信道编码能力、多用户并发数等方面同 Wi-Fi 类似。但在吞吐量的要求上,SLB 性能是弱于成熟的 Wi-Fi 6/7 技术的。在传输时延方面,SLB 采用超短帧和链路透传机制,在时延敏感场景可以实现更低时延。相比于 Wi-Fi 采用异步方式,SLB 的高定时精度更适用于时延敏感场景。

SLE 在吞吐量、带宽、空口技术、功耗、同步精度等 KPI 同蓝牙类似,通过采用更宽的带宽、更高调制阶数,SLE 可实现 6 倍于 BR 的吞吐量。同时 SLE 在协议字段设置最多 256 个设备接入,并采用纠错能力更强的极化码,提升信噪比,使得有效覆盖范围比 BLE 大一倍。SLE 还支持在 5G 频段的通信,可用信道更多,而蓝牙只支持在 2.4GHz 频段通信。在功耗方面,由于采用极化码,SLE 相比蓝牙获得额外 7dB SNR 增益,所以功耗更低。

表 4-2 无线短距通信技术 KPI 对比

KPI	SLE	SLB	BR/BLE	Zigbee	UWB	Wi-Fi6/7
吞吐量 (Mbps)	12	G 节点: 900, SC 20MHz T 节点: 450, SC 20MHz	1.8~ 2.1/48	0.25	110	9.6k/30k
带宽 (MHz)	1/2/4	20/40/80/160/3 20	1/2	0.3/0.6/2	480	160/320
频段	10 2.4/5 GHz	2.4/5 GHz	2.4GHz	868MHz 欧洲 915MHz 美 国、澳大利亚 2.4 GHz	3.1~ 10.6GHz	2.4/5/6GHz
射频功耗 (dBm)	0~4	Mode 1: 14~20 Mode 2: 20~23 Mode 3: 23	0~10	-25~0	-41.3/M Hz	23
多用户	256	4096	7	65000	8	2007/4096
空口技术	扩频跳 频	MIMO-OFDM OFDMA	扩频跳 频	直接序列扩 频	DS-UWB, MB-OFDM	MU-MIMO, OFD MA

		G 节点: 8x8 T 节点: 4x4				8x8
调制	8PSK	1024 QAM	GFSK	0-QPSK	BPM-BPS K	1024/4096 QAM
覆盖范围 (m)	200	300	10/100	100	10	300
定位精度 (m)	N/A	N/A	5	3	0.1	1.5
同步精度	us 级	<1us	us 级	--	--	异步
组网	多域协 调	多域协调	Star, Mesh	Star, Mesh, Tree	P2P	Star, Mesh
信道编码	RS 码/ 极化码	RS 码/极化码	N/A	N/A	N/A	LDPC 码
传输时延	250us	20.88us	0.5~ 2.5ms	十几 ms	1ms	10ms
多用户并 发数	10	80/ms	3~7	--	N/A	74
连接可靠 性	--	99.999%	--	--	--	99.99999%

*0dBm = 1mW, 10dBm = 10mW, 20dBm = 100mW

4.2 星闪技术挑战

4.2.1 频段兼容性问题

SLB 射频功率要求同 Wi-Fi 一致，最高达到 (23 ± 2) dBm，功耗并没有降低。在海思的 PPT 中提到星闪待机功耗相比于 Wi-Fi 降低了 70%，经过分析功耗降低是采用了特殊的唤醒机制。

SLB 工作频段在 5GHz，同 Wi-Fi 5G 频段完全重叠。在现有的室内场景下，需要考虑技术兼容问题。SLB 的工作频段如下：

表 4-3 SLB 和 Wi-Fi 工作频段对比

频段	双工方式
5150~5350MHz (200MHz) SLE 也用	Time Division Duplex (TDD)
5470~5725MHz (255MHz) 暂未开放	TDD
5725~5825MHz (100MHz) SLE 也用	TDD

Wi-Fi 5GHz 非授权频段是 5180~5825MHz。Wi-Fi 的正常工作也会收到 SLB 的影响，这对当前的 Wi-Fi 业务影响较大。SLE 也存在类似的问题，SLE 等价于系统中增加了新的蓝牙设备，SLE 需要设计新的调频方案，避免干扰 WLAN 中的其他通信技术。基于这一点，SLB 当前通过的行业标准也是针对车载场景，在家庭场景的应用可能受限。

4.2.2 技术累积优势

不同技术都有其相符合的场景，星闪技术应着眼于相符的场景的应用，而非同其他技术竞争。星闪技术中融合了众多短距无线通信技术的最新成果。一方面，这些新技术的应用使得星闪技术不必走其他技术的老路，从一开始就取得很不错的性能。还应当看到，这些新技术的采用在带来成本的同时并未在 Wi-Fi 和蓝牙的优势领域内取得优势，反而差距还很大。比如，2021 年的蓝牙 5.1 版本已经达到 48Mbps 的通信速率，300m 的覆盖范围，AoA 定位 (0.5m) 和 IoT 组网能力也获得了提升，领先于 SLE 技术。

4.2.3 通信模块兼容性

星闪接入层设计了 SLE、SLB、SLP 无线通信接口，分别对标蓝牙、Wi-Fi、UWB 技术。在技术的应用场景是高度一致，比如：SLB 用于高质量视频通信、VR、XR 等大带宽场景，同时追求高吞吐量、高稳定性和多设备连接等；SLE 用于无损音频和低功耗场景和蓝牙的 EDR 和 BLE 模式一致。在关键技术采用上，星闪接入层技术同蓝牙、Wi-Fi、UWB 等有部分差异，但相似性极高，可以认为是部分改进的版本。考虑到其他无线通信技术也在不断演进，弥补现有技术的缺陷，使得星闪的实际吸引力大打折扣。比如 Wi-Fi 7/8 未来将支持设备高密度部署、高吞吐量、低时延。同时配备多种相似功能的通信模块在经济成本上不合算。

4.2.4 通信模块融合前景

根据第 2 章的讨论可知，星闪设备实现需要选择合适的星闪接入层模块，也无法在单个模块上实现多种接入层功能。各模块采取的是分别演进策略，在技术无法完全互通（如 MIMO 技术、OFDMA）。如果采用同时在一个设备上搭载 SLE 和 SLB 模块，却只能使用其中一个，系统成本又太高。接入层通信模块融合可以解决现有无线通信技术互通性差的问题。如果能实现模块融合，星闪技术应用前沿会更广泛。

4.2.5 适用 SLB 的场景

SLE 已在星闪鼠标、牙刷等产品上得到实现，相比蓝牙技术确实有一定优势。

SLB 的应用场景最适合车载系统，原因是在车载场景中没有 Wi-Fi 信号的干扰，而且考虑到同 SLE 技术结合，可以同时适配 SLE 和 SLB，实现较为可靠且多样化的业务需求。

4.2.6 星闪技术发展的重要价值

SLB 技术是完全国产化的无线通信协议。在国际竞争激烈的条件下，推广星闪技术对国家安全、国家竞争力至关重要。



<https://shichetu.situb.10/b10>