星闪FISA多域接入:建模与性能分析

詹文[1]，李志恒[2]，郑海娜[3]，吴斌[4]，陈翔[5]
（1. 中山大学电子与通信工程学院，广东 深圳 518107；2. 香港科技大学电子与计算机工程系，香港特别行政区 999077；3. 华为技术有限公司中央研究院短距无线技术实验室，深圳 518000；4. 北方工业大学集成电路学院，北京 100144；5. 中山大学电子与信息工程学院，广东 广州 510006）

摘 要：星闪（NearLink）同步低时延宽带（Synchronous Low-latency Broadband，SLB）模式采用快速干扰侦听与规避（Fast Interference Sensing and Avoidance，FISA）机制实现多域信道接入，然而现有相关研究多聚焦于系统仿真与工程性能测试，尚未建立解析性能分析模型。本文建立了 FISA 信道竞争的马尔可夫更新过程模型，推导了信道利用率关于归一化检测强度的闭式表达式。分析表明，最优检测强度仅由碰撞开销比唯一决定，最优检测周期与 G 节点数量呈线性关系，最大信道利用率在信道占用时长趋于无穷时收敛于 1。在此基础上从信道利用率和接入时延两个维度将 FISA 与 WiFi 进行对比，揭示了两者极限信道利用率均可趋于 1，但 FISA 仅需增大信道占用时长即可逼近极限。在接入时延方面，WiFi 平均接入时延随竞争节点数线性快速上升，而 FISA 平均接入时延随 G 节点数线性平缓增长，随着网络规模扩大，FISA 的时延优势愈发显著。星闪 SLB 的性能优势凸显了其在工业确定性通信、高密度短距组网领域的广阔应用潜能。

关键词：星闪；快速干扰侦听与规避；信道利用率；接入时延；马尔可夫更新过程
doi：10.11959/j.issn.2096−3750.WLW26101

Multi-domain access of NearLink FISA: Modeling and performance analysis

ZHAN Wen[1], LI Zhiheng[2], ZHENG Haina[3], WU Bin, CHEN Xiang
1. School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China
2. Department of Electronic and Computer Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China
3. Short-Range Wireless Technology Laboratory, Central Research Institute, Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518000, China

Abstract: The Synchronous Low-latency Broadband (SLB) mode of NearLink adopts the Fast Interference Sensing and Avoidance (FISA) mechanism to realize multi-domain channel access. However, existing relevant studies mostly focus on system simulation and engineering performance testing, without establishing an analytical performance analysis model. This paper constructs a Markov renewal process model for FISA channel competition and derives a closed-form expression of channel utilization with respect to normalized detection intensity. The analysis indicates that the optimal detection intensity is uniquely determined by the collision overhead ratio, the optimal detection period has a linear correlation with the number of G-nodes, and the maximum channel utilization converges to 1 when the channel occupation duration tends to infinity. On this basis, FISA was compared with WiFi from two dimensions including channel utilization and access delay, revealing that both can achieve a limit channel utilization approaching 1, yet FISA can approach the limit merely by extending the channel occupation duration. In terms of access delay, the average access delay of WiFi rises ex- ponentially with the number of competing nodes, while that of FISA increases linearly with the number of G-nodes. The prominent performance advantages of NearLink SLB demonstrate its broad application potential in industrial deterministic communication and high-density short-range networking scenarios.

Key words: NearLink, fast interference sensing and avoidance, channel utilization, access delay, Markov renewal process

收稿日期：XXXX−XX−XX；修回日期：XXXX−XX−XX

0 引言

生成式人工智能与具身智能的快速发展正重塑短距无线通信的需求格局。在工业数字孪生、高密度智能仓储和人形机器人协同等新兴场景中，边缘服务器与控制器需要在十米级距离内实时同步多模态传感数据与控制指令流，对端到端平均时延提出亚毫秒级要求，峰值吞吐量达数Gbps量级[1]。与传统消费级短距通信以尽力而为传输为核心目标不同，新兴应用同时要求高时延确定性和大规模并发接入能力[2]。短距无线通信正面临从连通性驱动向确定性驱动的转变，而其中底层介质接入机制的设计是决定系统性能上限的核心环节。

短距无线通信通常工作在2.4GHz和5GHz等非授权工业科学医疗(Industrial Scientific Medical, ISM)频段上，多条无线链路在同一频段同时运行，导致不同通信域之间存在复杂的同频干扰。与蜂窝网络通过基站集中协调管理干扰不同，短距通信场景普遍由低成本、低功耗的独立系统平台构成，缺乏统一的干扰协调机制。在这种分布式、干扰随机出现的环境中，短距无线通信系统的接入控制层需要恰当的管控信道竞争强度，减少信道冲突带来的资源损耗，同时在快速感知到信道占用状态后，灵活地选取空闲载波规避干扰，以此提升频谱使用效率。

作为当前部署最广泛的短距无线通信技术，WiFi采用载波侦听多路访问/冲突避免(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)机制作为介质接入控制方案。在CSMA/CA机制下，各节点独立侦听信道状态，当信道持续空闲达到分布式帧间间隔(Distributed Inter-Frame Space, DIFS)后，从竞争窗口随机选取退避计数器递减至零后发起传输。若多个节点同时传输导致碰撞，各节点采用二进制指数退避(Binary Exponential Backoff, BEB)策略将竞争窗口加倍并重新选取退避计数器，直至成功或达到最大重传次数[3]。

围绕CSMA/CA的理论建模和性能分析已积累丰富的理论成果。经典的Bianchi模型通过二维马尔可夫链刻画退避窗口与退避阶数的联合演化，推导饱和吞吐量的闭式表达[3]，并在[4-6]等一系列扩展工作中，引入相位型分布、闭合排队网络和多优先级服务区分，以实现对例如突发到底等情况更准确的建模。[7]则以节点队首(Head-of-Line, HOL)报文的竞争行为

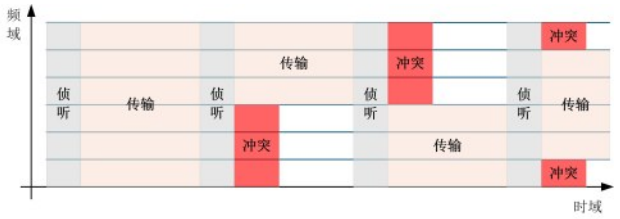


图1　星闪FISA多目标信道快速干扰测量与灵活载波选择

为建模对象，建立涵盖吞吐量、时延和稳定性的统一分析框架，揭示了最优退避参数配置方案。经典的理论分析成果已经表明在饱和条件下，WiFi退避参数的优化是达到归一化最大吞吐量的必要前提，且该上界仅由成功传输时长与碰撞时长的比值决定，与物理层速率和退避参数的具体取值无关。在时延方面，BEB机制的指数增长特性使得接入时延在高并发场景下呈幂律分布，且在大规模接入场景存在明显的公平性问题[3,7-8]。

除了利用退避机制实现干扰管控外，WiFi网络也持续演进以实现对载波的灵活使用。例如信道绑定将相邻窄信道合并以提升速率[9]。IEEE 802.11ax引入正交频分多址将信道划分为资源单元(Resource Unit, RU)支持多用户并行传输，IEEE 802.11be进一步支持多资源单元(Multiple Resource Unit, MRU)、前导码打孔及基于重叠基本服务集(Overlapping Basic Service Set, OBSS)包检测(OBSS_PD)的空间复用[10-11]。多链路操作(Multi-Link Operation, MLO)允许设备在多频段同时建立链路[12]。然而上述技术的载波感知均遵循单信道时分框架。在OFDMA机制下，接入点(Access Point, AP)须先通过CSMA/CA竞争获取整条信道，再划分RU分配给各站点，AP和站点均仅具备整条信道的聚合忙闲判断能力[13]。前导码打孔仅能基于预定义图样处理静态干扰[10]，MLO每条链路仍独立执行CSMA/CA竞争[12]，OBSS_PD空间复用增益则高度依赖干扰范围特性[14-15]。无论是理论分析还是工程实测的结果，均表明上述技术的引入对WiFi性能的提升确切存在，但增益有限[12-14,16-20]。

已有的研究已经揭示了WiFi在竞争控制与载波灵活方面的结构性瓶颈。与此同时，其他主流短距无线通信技术同样存在明显局限。蓝牙采用自适应跳频机制规避干扰，但其主从轮询式接入难以支

撑大规模并发，吞吐量亦无法满足高速数据传输需求。Zigbee基于IEEE 802.15.4标准，在低功耗传感场景中应用广泛，但其物理层速率有限，且沿用CSMA/CA退避机制，在高密度部署下性能急剧退化。超宽带技术虽具备纳秒级时间分辨率和高精度定位能力，但通信吞吐量和有效传输距离均十分有限。由此可见，现有短距无线通信技术均难以同时满足新兴工业应用对高吞吐、低时延确定性和大规模并发接入的综合性需求，亟需一种全新的短距无线通信技术体系。

在确定性传输方面，工业场景对时延的确定性与可靠性提出了远高于尽力而为传输的要求。以太网时间敏感网络通过时间同步与流量整形等机制为工业控制提供端到端确定性时延保障[21]，但其标准体系最初针对有线以太网设计，面向短距无线接入层的确定性机制扩展仍处于发展阶段。在工业无线接入方面，IEEE 802.15.4 TSCH机制通过时分多址与信道跳频技术为工业物联网提供了高可靠通信基础，相关研究围绕自适应信道跳频、网络关联时间建模与多网络共存分析等方向展开[22]-[24]；然而，上述工作均以集中式时隙编排与全局同步为前提，其解析模型聚焦于时隙分配与跳频策略优化，而非多节点分布式竞争下的信道利用率极限性能分析。

为弥合传统短距通信技术的不足，星闪联盟发布了新一代短距无线通信标准，即星闪(NearLink)[21]。星闪的同步低时延宽带(Synchronous Low-latency Broadband, SLB)模式采用集中式管理节点(G节点)与终端节点(T节点)的主从调度架构[26]，G节点作为通信域内的控制与调度中心负责资源管理，T节点严格服从G节点的调度指令进行数据收发。在竞争控制维度，该架构将传统WiFi中所有节点分布式竞争信道的模式，转变为G节点群体之间竞争信道、G节点域内集中调度T节点的两级结构，有效竞争节点数被大幅压缩。

在载波灵活使用维度，星闪SLB引入了快速干扰侦听与规避(Fast Interference Sensing and Avoidance, FISA)机制作为信道接入的基础技术。如图1所示，FISA采用周期性并行多载波感知方式，G节点在每个感知时隙内同时扫描全部可用正交载波的忙闲状态，从空闲载波中均匀随机选择发起传输。与WiFi的OFDMA机制不同，FISA的并行感知本身就是信道接入机制，无需先通过CSMA/CA竞争获取整条信道；G节点获取的是每个载波独立的忙闲状态，可直接从空闲载波中选择传输，实现了对全部可用载波的实时并行感知与灵活选择。此外，FISA无主载波限制，任一载波获得信道机会即可传输，且G节点可集中管理整域内多节点快速切频，从根本上提升了频谱资源的利用效率和干扰规避能力。

然而，与WiFi丰富的理论分析体系形成鲜明对比，关于星闪FISA机制的理论研究目前仍处于起步阶段。现有工作主要集中于系统级仿真评估和

工程性能测试[27-29]，均未从理论层面建立信道竞争的解析模型，无法回答极限性能边界和最优参数配置等基础理论问题[30-31]。另外，FISA的集中调度与并行多载波感知架构与WiFi存在根本性差异，使得现有WiFi理论模型无法直接迁移到星闪SLB。具体而言，在竞争架构上，WiFi采用全分布式竞争，所有STA与AP均独立侦听信道、自主退避并发起传输，竞争主体数量与网络总节点数成正比；而FISA采用G节点集中竞争、T节点服从调度的两级架构，竞争主体仅为G节点群体，T节点不参与信道竞争，竞争规模被大幅压缩，这与WiFi的分布式竞争逻辑存在本质不同。在感知与接入方式上，WiFi基于单信道的时分载波侦听，节点仅在当前信道空闲时才能发起传输，感知维度为一维；而FISA在每个检测周期内并行感知全部可用正交载波的忙闲状态，并从中灵活选择空闲载波发起传输，感知维度为二维时频资源选择。上述架构差异导致WiFi理论模型中以节点退避行为为核心的状态空间、以竞争窗口与退避阶数为关键变量的建模框架，在FISA中缺乏对应机制，无法通过参数替换得到等效刻画。因此，须针对FISA的集中调度与并行多载波感知特征建立全新的分析模型。。

为此，基于马尔可夫更新过程理论，本文建立星闪FISA接入机制的模型与性能分析框架，并与WiFi进行定量对比。本文的主要贡献体现在以下两个方面：

建立了面向星闪FISA多域信道竞争的三态马尔可夫更新过程模型，将信道的状态演化抽象为空闲态、成功态与碰撞态的交替过程。在泊松检测到达和独立均匀载波选择假设下，推导出信道利用率关于网络规模、信道数量、信道占用量上限、检

测周期和碰撞开销比等系统参数的闭式表达式。进一步证明最优检测强度仅由碰撞开销比唯一决定，揭示了最优检测周期与G节点数量的线性关系以及最大信道利用率趋于1的渐近极限。

从信道利用率和接入时延两个维度定量刻画了FISA与WiFi的性能差异。在信道利用率维度，证明了二者在各自极限条件下均可趋近于1，但FISA仅需增大信道占用时长即可逼近极限，而WiFi需要联合优化多个退避参数。在接入时延维度，揭示了FISA随G节点数线性增长而WiFi随竞争节点数呈指数级上升的本质差异。

本文后续结构如下。第1节建立系统模型与性能指标定义，第2节建立Markov更新过程分析框架并推导最优参数配置，第3节将FISA与WiFi在信道利用率和接入时延两个维度进行系统对比，第4节总结全文。

1　系统模型

1.1　网络拓扑与资源结构

考虑由M个通信域构成的星闪SLB网络。每个通信域包含一个管理节点（G节点），记为$G_m, m = 1,2,\cdots,M$，和J个终端（T节点），记为$T_{m,j}, j = 1,2,\cdots,J$。所有通信域共享$N$个相互正交的信道。每个G节点负责本域内的资源调度与信道竞争，T节点仅在G节点调度下进行数据传输。本文聚焦SLB极限信道利用率分析，因此考虑饱和流量模型，即任一T节点和G节点总是有数据报文需要传输。

根据星闪SLB标准[25]-[26]，物理层采用120kHz子载波间隔，基本时间单位$T_s = 1/30.72\text{MHz} \approx 0.0326\mu\text{s}$。一个无线帧包含14个CP-OFDM符号，总时长约$T_{\text{slot}} = 125\mu\text{s}$，定义为本文所考虑系统场景的基本时隙长度。一个OFDM符号时长约$T_{\text{minislot}} = 8.9\mu\text{s}$。本文将一个OFDM符号定义为一个mini-slot，其归一化时长为$a = 8.9/125 \approx 1/14$时隙。

系统可用资源由时域和频域共同构成的二维网格定义。一个时频资源单元由(t,j)标识，其中$t = 0,1,2,\cdots$为时隙序号，$j = 1,2,\cdots,N$为信道序号。时频资源占用状态由二元组$(\chi_m(t), \mathcal{W}_m(t))$刻画，其中$\chi_m(t) \in \{0,1\}$为信道占用指示变量，$\chi_m(t) = 1$表示信道处于占用态，反之表示非占用态；$\mathcal{W}_m(t) \subseteq \{1,2,\cdots,N\}$为$G_m$在该时隙占用的载波集合，$|\mathcal{W}_m(t)|$为占用的信道数量。

每个G节点在每次成功接入时最多占用$W \in \{1,2,\cdots,N\}$个信道。由于实际可用的信道数量受制于网络竞争情况，G节点实际占用的信道数目满足

$$|\mathcal{W}_m(t)| = \min\{W, |\mathcal{A}_m(t)|\} \tag{1}$$

其中$\mathcal{A}_m(t)$为时隙t时，G_m可用的空闲信道集合。式(1)表明当空闲信道充足时，G_m占用W个信道；当空闲信道不足W个时，G_m退而使用全部可用信道。定义最大资源需求比

$$\rho = \frac{W}{N}, \tag{2}$$

表示单个G节点在最优条件下会占用的最大带宽比例。

1.2　星闪FISA信道接入机制

在星闪FISA机制中，各G节点独立且周期性地对时频二维资源的干扰状态进行感知。假设在一个mini-slot内，G节点完成对全部N个信道的忙闲并行检测，随后基于检测结果，决定是否发起传输以及在哪个信道上发起传输。若某信道在一个mini-slot中恰好被一个G节点占用，则该G节点信道占用成功；若信道被两个或以上G节点同时选中，则发生碰撞，所有涉及的传输均失败，G节点检测到冲突后停止传输。碰撞检测与恢复所需的时间为T_{coll}。定义碰撞开销比

$$x = \frac{T_{\text{coll}}}{T_{\text{minislot}}}, \tag{3}$$

即x表示一次碰撞的持续多个mini-slot。由于一个mini-slot等效a个时隙，碰撞的时域长度为xa个时隙。信道占用失败的G节点在下一个检测周期重新开始检测并参与信道竞争。

令$T_{\text{sensing}}^{(m)}$，$m = 1,2,\cdots,M$表示G节点m的检测周期。在通用实际部署场景中，不同G节点可配置互不相同的检测周期。为简化理论推导，本文考虑同构网络假设，即$T_{\text{sensing}}^{(1)} = \cdots = T_{\text{sensing}}^{(M)} = T_{\text{sensing}}$。尽管全网G节点的检测周期时长一致，但各节点检测起始相位相互独立。

基于信道冲突模型，信道仅存在被占用/空闲两种状态。信道j在时隙t若存在任意G节点占用传输则判定为忙碌，无任何节点占用则判定为空闲。记信道j时隙t空闲标识为二元状态，由此得到G_m在时隙t的可用信道集合：

$$\mathcal{A}_m(t)=\{\ j:\text{信道}j\text{在时隙}t\text{处于未被占用状态}\ \}. \tag{4}$$

当$K_{\mathrm{ra}}=k$个G节点同时检测信道时，它们各自独立地、同时地从空闲信道中均匀随机选择信道发起传输。由于各G节点的初始相位随机错开，不同G节点的检测事件在时间轴上近似均匀分布。记在一个mini-slot内发起检测的G节点数为K_{ra}，当M较大且单节点检测概率较小时，K_{ra}近似服从泊松分布$P(K_{\mathrm{ra}}=k)=\dfrac{\lambda^k}{k!}e^{-\lambda},\quad k=0,1,2,\cdots$,其中

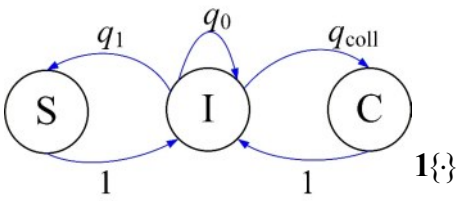
$$\lambda=\frac{aM}{T_{\mathrm{sensing}}}, \tag{5}$$

为每个mini-slot的聚合检测到达率。

另一方面，由于各G节点的载波选择行为相互独立且无中心协调，即便空闲信道充足满足$|\mathcal{A}_m(t)|=N$且$kW\leqslant N$，仍可能出现多个G节点选中同一载波的冲突场景。按式(1)的选道规则，当n条信道空闲时，每个G节点从中均匀随机选取$\min\{W,n\}$条发起传输，单条空闲信道被某一G节点选中的概率为$\varphi(n)=\min\{W,n\}/n$。当k个G节点同时发起接入竞争时，任意单条空闲信道仅被一个G节点选中的概率为

$$p_1(k;n)=k\varphi(n)(1-\varphi(n))^{k-1}, \tag{6}$$

图 1 嵌入式马尔科夫链状态转移图



其中为指示函数。上述时间平均极限等价于对G节点随机检测时序、随机信道选择求取平稳分布下的统计期望，即

$$\eta_{\mathrm{eff}}=\frac{1}{N}\mathbb{E}\left[\sum_{m=1}^{M}\sum_{j\in\mathcal{W}_m(t)}\mathbf{1}\left\{j\notin\bigcup_{k\neq m}\mathcal{W}_k(t)\right\}\right], \tag{7}$$

其中期望$\mathbb{E}[\cdot]$对所有G节点的随机检测时序和随机信道选择取平均。式(7)是对所有M个G节点占用的全部信道求和，仅计入那些未被任何其他G节点同时占用的信道，即成功接入的信道，再除以总信道数N。显然，信道利用率η_{eff}与信道检测周期T_{sensing}，信道占用时长限制T_{MCOT}以及信道占用量上限W等系统参数密切相关。在下一个章节中，我们将推导η_{eff}并研究其优化方案。

该事件对应一次无碰撞的成功接入。特别地，全部N条信道空闲时$\varphi(N)=W/N=\rho$，即式(2)的最大资源需求比；一般情形下有$\rho\leqslant\varphi(N)\leqslant 1$。当$k$个G节点同时发起接入竞争时，系统成功占用的信道期望数量为$np_1(k;n)$。若两条及以上G节点同时选中同一信道，则触发碰撞，所有相关传输全部失效，竞争失败的G节点等待下一轮检测周期重新参与竞争。成功抢占信道的G节点遵循星闪SLB标准完成数据传输，信道连续占用时长上限为T_{MCOT}个时隙；一旦超出该时限，G节点释放信道资源，重新进入信道检测竞争流程。

1.3 性能指标

本文聚焦信道利用率η_{eff}，定义为时域长度趋于无穷时，系统长期稳态下单位时隙内成功传输的时频资源单元占全部可用时频资源单元的时间平均比例。根据碰撞模型，一个时频资源单元(t,j)在时隙t被成功利用当且仅当恰好有一个G节点在该时隙占用信道j。因此信道利用率由长期时间平均的极限给出

$$\eta_{\mathrm{eff}}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{TN}\sum_{t=0}^{T-1}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j\in\mathcal{W}_m(t)}\mathbf{1}\left\{j\notin\bigcup_{k\neq m}\mathcal{W}_k(t)\right\}$$

2 基于Markov更新过程的信道利用率分析

为了定量分析FISA机制下的信道利用效率，本节将单个信道的状态演变建模为离散时间Markov更新过程。假设不同信道的衰落情况一致，且所有G节点无差别地竞争全部信道，因此单个信道被成功利用的概率等于系统整体信道利用率η_{eff}。

2.1 基于Markov更新过程的信道竞争模型

定义离散时间Markov更新过程$(\mathbf{X},\mathbf{V})=\{(X_j,V_j),j=0,1,\cdots\}$，刻画任一信道的状态演变，其中$X_j\in\{I,S,C\}$表示第$j$次转移时信道所处的状态，$V_j$为第$j$次转移发生的时刻。图2给出了嵌入式马尔可夫链$\{X_j\}$的状态转移图。$\{X_j\}$的状态可划分为以下三类：

空闲态I：信道上无G节点发起传输；

成功态S：恰好一个G节点占用该信道，传输成功；

碰撞态C：两个及以上G节点同时占用该信道，传输失败。

记q_0为信道维持空闲的概率，q_1为信道跳转至成功传输态的概率，q_{coll}为信道跳转至碰撞态的概率。如图2所示，一个处于状态I的信道在下一个mini-slot中可能以概率q_0继续保持空闲，或以概率q_1进入状态S，或以概率q_{coll}进入状态C，具体取决于该mini-slot内的G节点检测与信道选择结果。一旦进入状态S或C，信道将在传输或碰撞恢复完成后返回状态I。本文所建Markov更新过程刻画的是信道占用状态的交替，与经典Bianchi二维马尔可夫链刻画节点退避行为存在本质区别。。

由于空闲信道数随负载随机变化，条件于被跟踪信道处于空闲态，其余N-1条信道中空闲的条数服从二项分布，即$n = 1 + \text{Binomial}(N - 1,\tilde{\pi}_I)$，其中$\tilde{\pi}_I$为单条信道的稳态空闲时间占比。对$n$取期望，结合每个mini-slot内发起检测的G节点数服从参数为λ的泊松分布假设，即得从状态I出发的一步无条件转移概率为

$$\begin{cases} q_0 = \mathbb{E}_n\left[e^{-\lambda\varphi(n)}\right], \\ q_1 = \mathbb{E}_n\left[\lambda\varphi(n)e^{-\lambda\varphi(n)}\right], \\ q_{\text{coll}} = 1 - q_0 - q_1. \end{cases} \tag{8}$$

相邻两次Markov更新之间的时间间隔$V_{j+1} - V_j$称为状态X_j的停留时间，仅取决于状态X_j本身。结合第1节的时间定义，各状态的停留时隙长度为

$$\tau_I = a, \qquad \tau_S = T_{\text{MCOT}}, \qquad \tau_C = xa, \tag{9}$$

其中τ_I对应一个mini-slot的时长，τ_S为G节点成功占用信道的最大时长，τ_C为碰撞检测与恢复所需时长。Markov更新过程(X,V)的极限状态概率$\tilde{\pi}_k$，即状态k在长期运行中所占的时间比例

$$\tilde{\pi}_k = \frac{\pi_k\tau_k}{\sum\limits_{j\in\{I,S,C\}}\pi_j\tau_j}. \tag{10}$$

联立上式，通过数值求解，既可以得到极限状态概率分布。

为简化分析且得到显式表达，本文采用$\varphi(n) \approx \rho$的近似假设，即运用最大资源需求比近似单条空闲信道被某一G节点选中的概率。从理论分析的角度，该近似在两类情形下成立。其一是W=N，此时对任意$1 \leqslant n \leqslant N$有$\min\{W,n\} = n$，$\varphi(n) \equiv 1 = \rho$。其二是当$\lambda\rho$较小时，由式(8)与式(10)知$q_1$与$q_{\text{coll}}$均趋于零，$\tilde{\pi}_I$趋于1，此时$\varphi(n)$趋于$\rho$。后续的仿真结果可以验证在该近似假设下，理论分析结果与仿真结果依然匹配。 因此，后文的分析均在该近似下展开。需要在此特别提到的是，在该近似下，状态转移概率可以简化为

$q_0 = e^{-\lambda\rho}, q_1 = \lambda\rho e^{-\lambda\rho}, q_{\text{coll}} = 1 - (1 + \lambda\rho)e^{-\lambda\rho}$.**2.2 信道利用率**

基于上述Markov更新过程对单信道竞争行为的建模分析，可推导得到下述引理。其中稳态下信道处于成功传输态的长期时间占比$\tilde{\pi}_S$即为本文核心性能指标信道利用率η_{eff}，下面的引理给出信道利用率的闭式表达式。

引理 2.1. **在饱和流量、泊松检测到达和独立均匀信道选择假设下，星闪FISA机制下的信道利用率为**

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\gamma e^{-\gamma}\dfrac{T_{\text{MCOT}}}{a}}{1 + \gamma e^{-\gamma}\dfrac{T_{\text{MCOT}}}{a} + \left(1 - (1 + \gamma)e^{-\gamma}\right)\cdot x} \tag{11}$$

其中$\gamma \triangleq \lambda\rho$表示归一化检测强度。

证明. 结合(8)-(10)推导$\tilde{\pi}_S$即可得证。 □

上述引理中归一化检测强度γ的物理含义是每个mini-slot内，平均有多少G节点发起检测后选择了某一个特定信道。结合(2)和(5)可见，γ是关于最大资源需求比ρ，G节点数量M和信道检测周期的T_{sensing}等系统参数的重要中间变量。

γ越大意味着对该信道的检测竞争越激烈，反之则表示信道竞争比较平缓。因此，存在一个最优的γ^*使η_{eff}最大化。基于引理2.1推导的效率表达式，下述定理分析信道利用率的最大值及对应的最优检测强度。

定理 2.1. **星闪FISA机制下，如果归一化竞争强度满足**

$$(1 - \gamma^*)(1 + x) = xe^{-\gamma^*}, \tag{12}$$

则信道利用率达到最大值

$$\eta^*_{\text{eff,FISA}} = \frac{\dfrac{T_{\text{MCOT}}}{a}(1 - \gamma^*)}{\dfrac{T_{\text{MCOT}}}{a}(1 - \gamma^*) + \gamma^* x}. \tag{13}$$

证明.推导过程见附录A。 □

从图3中，我们可以看到信道利用率η_{eff}随竞争强度γ的变化情况。可见当$\gamma \to 0$时，效率η_{eff}趋

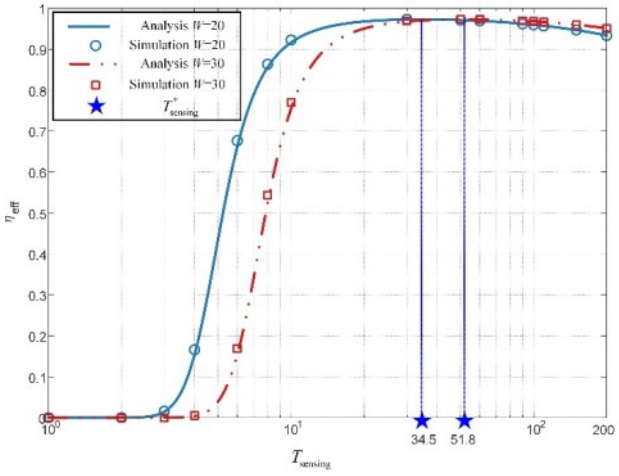


图 1 信道利用率 随检测周期 的变化，M = 50，N=30，x = 0.1

于零，对应无检测即无传输的物理极限。随着γ增大，效率迅速上升至峰值，γ^*由式(12)确定。γ继续增大超过γ^*后，频繁碰撞导致效率缓慢下降。为了提升信道的最优利用率或者更快的随γ增大而提升信道利用率，如图 3 所示，系统可以设置更高的信道占用时长T_{MCOT}，让一旦获得信道利用权的G节点可以更长的占用信道。

基于引理 2.1 和定理 2.1, 下述推论进一步给出了系统参数的最优配置方案。

推论 2.1. **基于引理 2.1 和定理 2.1，使得系统达到最大信道利用率的检测周期为**

$$T^*_{\mathrm{sensing}} = \frac{aM\rho}{\gamma^*}. \tag{14}$$

γ^*由式(12)确定。

推论 2.1 所揭示的γ^*与最优检测周期T^*_{sensing}之间的关系，表明当网络规模M增大时，T^*_{sensing}须等比例增大以维持归一化检测强度γ^*不变。该关系揭示了网络规模越大，每个G节点的检测频率应降低，从而将同时竞争同一信道的节点数控制在最优水平，避免碰撞加剧带来的效率损失。

为验证上述理论分析的正确性，图 4 展示了信道利用率η_{eff}随检测周期T_{sensing}变化的仿真结果与解析曲线。仿真场景与前一章节的系统场景一致，故不再赘述。每个仿真结果数据点独立运行10^4个更新周期以确保统计收敛。从图 4，我们可以看到类似图 3，η_{eff}随检测周期T_{sensing}先增后减，并在T^*_{sensing}处取得最大值。在$T_{\mathrm{sensing}} \geqslant 15$时，信道被成功占用后持续$T_{\mathrm{MCOT}}$个 mini-slot，空闲信道数小于$W$，故$\min\{W,n\} = n$恒成立，G~节点每次检测都取走全部空闲信道，$\eta_{\mathrm{eff}}$与$W$无关，两条曲线几近重合。在$T_{\mathrm{sensing}}$较小时，检测过频导致大量碰撞、信道长期空置，空闲信道数超过W，W显著影响信道利用率η_{eff}。此时，W\$的作用是限制单次取走的信道条数，从而稀释单条信道上的竞争强度，较小的W反而缓解并发碰撞.如果T_{sensing}过小，恰好只有一个G节点检测的mini-slot几乎不再出现，仿真中信道利用率因而几乎为零。。我们明显看到曲线右侧，较为平稳，这表明在检测周期T_{sensing}设置偏大，即使超过T^*_{sensing}时，系统也可以获得相对较高的信道利用率。因此综合而言，星闪FISA系统应选取尽可能大的信道占用数W，并将检测周期设定于略高于T^*_{sensing}的区域，从而在维持高信道利用率的同时获得较好的鲁棒性。

为定量刻画解析模型与仿真结果之间的一致性，本文进一步对图4中理论值与仿真值进行了误差统计。对每个检测周期取值，独立运行5次仿真并取平均，同时计算95%置信区间。在W=20与W=30两种配置下，理论值与仿真值之间的平均绝对误差小于0.01，最大绝对误差小于0.02；在信道利用率显著非零的工作区间$\eta_{\mathrm{eff}} > 0.2$内，相对误差均低于5%。上述定量结果表明，本文解析模型与仿真结果吻合，验证了马尔可夫更新过程建模的准确性

3　星闪FISA与WiFi

作为短距通信技术的典型代表，WiFi已经得到了广泛的应用。在本小节，从信道传输效率的角度，我们将FISA与WiFi进行比较与分析，讨论两种短距通信技术在极限性能和参数优化方法上的差异。为作区分，令$\eta_{\mathrm{eff,FISA}}$和$\eta_{\mathrm{eff,WiFi}}$分别表示星闪

FISA与WiFi的场景下，网络的信道利用率。

WiFi与星闪在域内调度机制上存在本质区别。星闪采用集中式调度，即G节点成功占用载波后，T节点在对应信道上，通过随机接入机制与G节点建立控制面集中调度渠道，随后G节点集中式调度本域T节点进行数据传输。WiFi采用基于带冲突避免的信道侦听多路访问（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance，CSMA/CA）的分布式竞争，即每个节点（Station, STA）会运用信道监听机制，检测信道空闲情况，随后独立决策信道竞争行为，以传输数据给接入点（Access Point，AP）。STA在发生冲突或者传输失败事件后，采用二进制指数退避(Binary Exponential Backoff, BEB)机制，以缓解信道拥塞。具体来讲，若第i次传输失败，节点将从集合$\{0,\cdots,B_i-1\}$中随机选取一个退避计数值，其中退避窗口满足$B_i=B\cdot 2^i, i=0,\cdots,K$，式中$B$为初始退避窗口长度，$K$代表最大退避阶数。节点在每一个空闲时隙对退避计数器做减1操作，当计数器归零后发起传输请求。

星闪FISA与WiFi在信道竞争的参与主体上存在根本差异。在星闪FISA中，仅G节点参与信道竞争，T节点不参与竞争。而在WiFi中，所有STA和AP均独立参与信道竞争。因此，在网络规模相同的情况下，WiFi网络的信道竞争强度明显强于星闪FISA。为使两种机制的分析具有可比性，从实际参与信道竞争的角度，本文以G节点的数量M与WiFi的STA数量n对齐进行比较。

3.1 信道利用率

在WiFi中，信道传输效率与退避参数密切相关。记τ_T和τ_F分别为报文在成功传输状态和碰撞状态的平均停留时长。例如在单AP和单信道情况下，当$K\to+\infty$时，WiFi网络信道利用率[7]

$$\eta_{\text{eff,WiFi}}=\frac{\tau_T}{(\tau_T-\tau_F)+\dfrac{(1+\tau_F)\mathcal{W}_0\left(\dfrac{2n}{B}e^{4n/B}\right)-\dfrac{2n\tau_F}{B}}{\dfrac{8n^2}{B^2}-\dfrac{2n}{B}\mathcal{W}_0\left(\dfrac{2n}{B}e^{4n/B}\right)}},\tag{15}$$

式中n为网络节点数量，$\mathcal{W}_0(\cdot)$表示Lambert W函数的主支。可见，选择恰当的退避参数对最优化$\eta_{\text{eff,WiFi}}^{K=\infty}$至关重要，这也使得退避参数优化成为WiFi网络研究的核心问题之一。给定τ_T和τ_F，WiFi网络可达的最大信道利用率为[7]

$$\eta^*_{\text{eff,WiFi}}=\frac{-W_0\left(-\dfrac{1}{e(1+\frac{\tau_F}{\tau_T})}\right)}{\dfrac{\tau_F}{\tau_T}-(1-\dfrac{\tau_F}{\tau_T})W_0\left(-\dfrac{1}{e(1+\frac{\tau_F}{\tau_T})}\right)}.\tag{16}$$

结合式(16)与定理2.1, 在单信道场景下，可得下述推论。

推论 3.1. **饱和流量假设下，星闪FISA与WiFi的极限信道利用率在各自极限条件下趋于1，即**

$$\lim_{\frac{T_{\text{MCOT}}}{a}\to\infty}\eta^*_{\text{eff,FISA}}=1,\quad \lim_{\frac{\tau_F}{\tau_T}\to 0}\eta^*_{\text{eff,WiFi}}=1.\tag{17}$$

证明. 推导过程见附录B。□

推论3.1表明尽管在信道调度机制上不同，但是星闪FISA与WiFi可以达到的最大信道传输效率均是1。二者极限性能的一致性，本质上反映信道监听类接入机制共有的理论上限。也就是，当信道感知、碰撞恢复的时间开销均可忽略时，信道资源可被持续用于有效数据传输，传输效率的理论极限为1。星闪FISA需要满足的条件是$\frac{T_{\text{MCOT}}}{a}\to+\infty$，即单次信道占用的时间$T_{\text{MCOT}}$足够长，远大于信道感知带来的时间消耗。另一方面，WiFi达成理论最高效率的条件是$\frac{\tau_F}{\tau_T}\to 0$，即碰撞检测与冲突恢复造成的信道时间损耗相对于有效数据传输时长可忽略不计。

从工程的角度，星闪FISA要实现理论极限效率相对简单，只需要增加信道占用时长T_{MCOT}。然而，WiFi网络的报文成功传输状态时长τ_T和碰撞状态时长τ_F却受限于物理层约束。WiFi时隙长度的典型值为9μs[7]。在802.11a/g RTS/CTS下，$\tau_T=192$时隙，$\tau_F=9$时隙，可得$\eta^*_{\text{eff,WiFi}}\approx 0.983$；在802.11 Basic Access模式下，$\tau_T=180$时隙，$\tau_F=175$时隙，可得$\eta^*_{\text{eff,WiFi}}\approx 0.241$。因此，从极限性能的角度，星闪FISA更容易实现且可以获得更佳的性能。

3.2 接入时延

本小节聚焦对比星闪FISA和WiFi的接入时延，即一个报文从成为队列头（Head-of-Line, HOL）到成功传输的时长。为统一比较基准，本节所有时间参数均以微秒（μs）为单位。星闪FISA侧，$T_{\text{slot}}=125\mu$s，$a\cdot T_{\text{slot}}\approx 8.9\mu$s；WiFi侧，1时隙$=9\mu s$，$\tau_T$和$\tau_F$以时隙为单位。

由于集中式调度特征，星闪FISA中G节点的HOL数据包的传输过程可以分为三个阶段：第一，等待检测周期。第二，单次传输尝试，在检测mini-slot中感知所有载波并从空闲载波中均匀随机选择一个发起传输，传输持续T_{MCOT}，成功概率$1-P_c$，碰撞率P_c，碰撞恢复耗时$T_{\mathrm{coll}}=xa$。第三，碰撞重试，需等待下一个检测周期。由于本文考虑极限性能对比，因此假设在信道占用成功后，所考虑的HOL报文被第一时间调度传输[①]，无调度等待时延以及G-T节点链路建立时延。下述引理给出了平均接入时延的表达式。

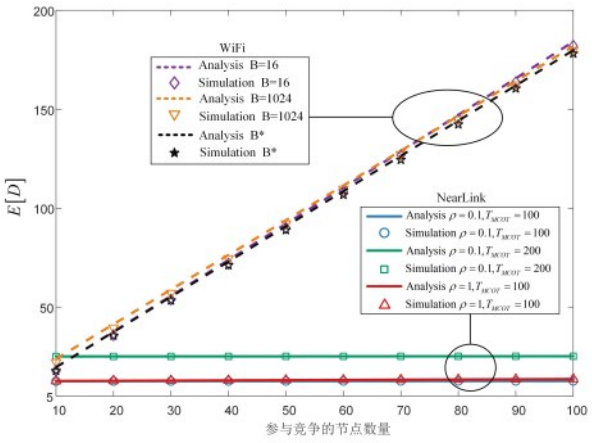


图 1　接入时延随竞争节点数变化曲线

引理 3.1. **在饱和流量、同构固定周期检测与独立均匀载波选择假设下，星闪FISA机制中G节点的HOL数据包平均接入时延为**

$$\mathbb{E}[D_{\mathrm{FISA}}]=\frac{T_{\mathrm{sensing}}}{2}+\frac{P_c}{1-P_c}T_{\mathrm{sensing}}+a+T_{\mathrm{MCOT}} \tag{18}$$

其中$P_c=1-e^{-\gamma}$为给定G节点已发起传输时遭遇碰撞的条件概率，γ为归一化检测强度。

证明. 推导过程见附录C。 □

对于WiFi，记B为初始退避窗口，K为最大退避阶数，则成功传输概率p由以下固定点方程确定[7]

$$\ln p+\frac{2n}{1+\dfrac{pB(1-(2-2p)^K)}{2p-1}+B(2-2p)^K}=0, \tag{19}$$

其中n为竞争节点数。给定p后，信道空闲概率为

$$\alpha=\frac{1}{1+\tau_F-\tau_F p-(\tau_T-\tau_F)p\ln p}, \tag{20}$$

平均HOL接入时延为[7]

$$\mathbb{E}[D_{\mathrm{WiFi}}]=\tau_T+\frac{1-p}{p}\tau_F+\frac{1}{\alpha}\left(\frac{1}{2p}+\frac{B}{2}S_K\right), \tag{21}$$

其中

$$S_K=\frac{1}{2p-1}\left[1-\frac{1-p}{p}(2-2p)^K\right]. \tag{22}$$

图5展示了星闪FISA和WiFi接入时延随竞争节点数变化的曲线，直观揭示了两种机制的本质差异。在仿真和分析中，WiFi的场景与[7]一致，采用IEEE 802.11标准的二进制指数退避机制，初始退避窗口分别取$B=16$和$B=1024$，最大退避阶数$K=6$且采用RTS/CTS机制。除此之外，基于(19)-(22)的推导理论分析，通过穷举搜索法，获得使得时延最低的最优初始退避窗口配置B^*。星闪FISA的最大资源需求比$\rho\in\{0.1,1\}$，信道占用时长$T_{\mathrm{MCOT}}\in\{100,200\}$。

回顾式(3)、定理2.1和引理3.1可知，给定G节点规模后，最优检测强度γ^*确定，冲突概率P_c也随之确定，FISA接入时延$\mathbb{E}[D_{\mathrm{FISA}}]$中唯一与网络规模有关的变量为$T_{\mathrm{sensing}}/2=aM\rho/(2\gamma^*)$。其随$M$线性增长。因此，FISA的三条曲线几乎平直，随节点数增加的幅度极小，在大规模组网中依然可预测可控制。三条曲线的垂直偏移由ρ与T_{MCOT}参数组合的差异所致。ρ控制检测周期T_{sensing}的长短，T_{MCOT}直接决定传输阶段时长，且T_{MCOT}在其中起主导作用。从图5可见，T_{MCOT}从100增加到200后，FISA的平均时延明显增加。

与此同时，较大的T_{MCOT}在推高时延的同时也如定理2.1所示提升了信道利用率，反映了时延与效率之间的权衡关系。WiFi的时延随竞争节点数

①调度等待时延构成一个与检测周期和调度粒度相关的偏移，且偏移程度与调度算法密切相关

近似线性增长，其增长率主要由τ_T和τ_F决定。原因在于饱和流量下信道由节点分时占用，一个报文从成为队首到成功发送，前面始终排着其余节点的报文，平均等待时间因而正比于节点数。B^*相对固定窗口B=16和B=1024的时延性能改善有限，说明在饱和流量到达场景下，调整初始退避窗口难以带来实质改善。然而无论B=16、B=1024或是最优的退避窗口设置B^*，在网络规模较大的情况下，星闪网络时延性能显著优于WiFi。

4 结论

本文基于马尔可夫更新过程理论，建立了星闪SLB中FISA机制的多域信道竞争解析模型。通过将信道的状态演化抽象为三态马尔可夫更新过程，推导了信道利用率关于归一化检测强度的闭式表达式，证明了最优检测强度仅由碰撞开销比决定，最优检测周期与G节点数量呈线性关系，最大信道利用率在信道占用时长趋于无穷时收敛于1。在此基础上，从信道利用率和接入时延两个维度将FISA与WiFi进行了系统性定量对比。结果表明，两者极限信道利用率均可趋于1，但FISA达成极限的工程路径更为简洁；在接入时延方面，FISA随G节点数线性增长而WiFi呈指数级上升，揭示了两种机制在竞争架构上的本质差异。

本文的分析基于饱和流量和理想信道假设。实际部署环境中，业务负载往往具有突发性和时变性，将模型扩展至非饱和流量条件以揭示负载强度对系统性能的影响，是值得进一步探索的方向。此外，多径衰落和阴影效应会导致接收信号功率随机波动，影响碰撞检测的准确性和传输成功率，将信道衰落特性纳入模型框架也是完善理论分析的下一步延伸。在真实星闪硬件平台上开展接入时延与碰撞概率的系统实测，并与本文理论模型进行定量对比以验证模型在实际协议栈下的预测精度，是后续工作值得深入探索的方向。

A 定理2.1的证明

令$\eta_{\text{eff}} = A/(A+B)$，其中$A = S\gamma e^{-\gamma}$，$B = 1 + x(1 - e^{-\gamma}(1+\gamma))$，$S = T_{\text{MCOT}}/a$。对$\gamma$求导并令分子为零得$A'B = AB'$，其中$A' = Se^{-\gamma}(1-\gamma)$，$B' = x\gamma e^{-\gamma}$。代入并消去$Se^{-\gamma}$可得

$$(1-\gamma)[1 + x(1 - e^{-\gamma}(1+\gamma))] = x\gamma^2 e^{-\gamma}. \quad \text{(A.1)}$$

展开左边得$(1-\gamma)(1+x) - x(1-\gamma)(1+\gamma)e^{-\gamma} = x\gamma^2 e^{-\gamma}$，移项合并$e^{-\gamma}$项，利用$(1-\gamma)(1+\gamma) + \gamma^2 = 1$可得

$(1-\gamma)(1+x) = xe^{-\gamma}$即式(12)。在最优解$\gamma^*$处，代入$e^{-\gamma^*} = (1-\gamma^*)(1+x)/x$可得$B^* = \gamma^{*2}(1+x)$，$A^* = S\gamma^* \cdot (1-\gamma^*)(1+x)/x$，代入$\eta_{\text{eff}} = A/(A+B)$即得式(13)。

B 推论3.1的证明

记$S = T_{MCOT}/a$，对式(13)做代数变形可得$\eta^*_{\text{eff,FISA}} = 1 - \gamma^* x/\left[S(1-\gamma^*) + \gamma^* x\right]$，其中$\gamma^*$仅由碰撞开销比$x$确定，与$S$无关，当$S \to \infty$时分式项趋于0，直接得到极限结果。

为规避符号混淆，定义WiFi碰撞时长与传输时长比值$\xi = \tau_F/\tau_T$，代入式(16)，令$a_0 = -1/[e(1+\xi)]$，当$\xi \to 0$时$a_0 \to -1/e$。Lambert W主支在分支点$z = -1/e$处的标准渐近展开为$W_0(z) = -1 + \sqrt{2(1+ez)} + O\left((1+ez)^{3/2}\right)$，代入$z = a_0$化简得$1 + ea_0 = \xi/(1+\xi)$，进一步推导出$W_0\left(-1/\left[e(1+\xi)\right]\right) = -1 + \sqrt{2\xi} + O\left(\xi^{3/2}\right)$。将该展开式分别代入分子、分母完整化简，最终得到

$$\eta^*_{\text{eff, WiFi}} = \frac{1 - \sqrt{2\xi} + O\left(\xi^{3/2}\right)}{1 - \sqrt{2\xi} + O\left(\xi^{3/2}\right)}, \quad \text{(A.2)}$$

当$\xi \to 0$时分子分母同趋于1，极限为1。

C 引理3.1的证明

HOL数据包在检测周期$(0, T_{\text{sensing}})$内均匀随机到达，初始等待相位满足$W_0 \sim U[0, T_{\text{sensing}})$，因此初始等待的期望为$\mathbb{E}[W_0] = \frac{T_{\text{sensing}}}{2}$. 从第一个检测边界起，G节点每周期发起一次传输尝试，每次碰撞后等待至下一检测边界重试。给定标记G节点已在某检测mini-slot中选择某一载波发起传输，碰撞发生的充要条件为至少一个其他G节点也选择了同一载波。由式(8)的泊松检测模型，各G节点的检测时序与信道选择相互独立，因此其他G节点中选择该载波的数量服从均值为γ的泊松分布。故单次传输尝试的条件碰撞概率为$P_c = 1 - e^{-\gamma}$. 各次尝试的碰撞概率相互独立，记成功传输前的碰撞次数为Z，则Z服从几何分布$P(Z=k) = P_c^k(1-P_c)$，$k \geqslant 0$, 其期望为$\mathbb{E}[Z] = \frac{P_c}{1-P_c}$。

总接入时延由三部分组成：初始等待相位、Z次碰撞的完整周期等待、最后一次成功传输的检测

时长与传输时长，即 $D = W_0 + Z \cdot T_{\text{sensing}} + a + T_{\text{MCOT}}$。其中每次碰撞周期 T_{sensing} 已包含感知时间 a、碰撞检测与恢复时间 xa 以及等待下一检测边界的空闲时间。对两边取期望，代入上述结果化简可得(18)。

参考文献：

[1] 王聪聪,周一青,石晶林,朱慧玲,王江舟.具身智能体域无线通信：现状、挑战及架构设计 [J].通信学报,2025,46(12):31-43.

[2] 千金花,曾国松,蔡廷晓,赵向阳.无线短距连接技术发展趋势与其在智能化时代应用分析[J].信息技术与标准化,2026,(4):82-86.

[3] G. Bianchi, ``Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 18, no. 3, pp. 535--547, Mar. 2000.

[4] C. H. Foh, M. Zukerman, and J. W. Tantra, ``A Markovian framework for performance evaluation of IEEE 802.11," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 6, no. 4, pp. 1276--1285, Apr. 2007.

[5] J. Choi, J. Yoo and C. Kim, ``A novel performance analysis model for an IEEE 802.11 wireless LAN," IEEE Commun. Lett., vol. 10, no. 5, pp. 385--387, May 2006.

[6] B. Li, R. Battiti, and Y. Fang, ``Achieving optimal performance by using the IEEE 802.11 MAC protocol with service differentiation enhancements," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 56, no. 3, pp. 1374--1387, May 2007.

[7] L. Dai and X. Sun, ``A unified analysis of IEEE 802.11 DCF networks: Stability, throughput, and delay," IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 12, no. 8, pp. 1558--1572, Aug. 2013.

[8] X. Sun and L. Dai, ``Backoff Design for IEEE 802.11 DCF Networks: Fundamental Tradeoff and Design Criterion," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 23, no. 1, pp. 300-316, Feb. 2015.

[9] L. Lanante, Roy Jr. and , ``Analysis and optimization of channel bonding in dense IEEE 802.11 WLANs," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 20, no. 3, pp. 2150--2160, Mar. 2021.

[10] IEEE Computer Society, ``IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange Between Systems--Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements--Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications--Amendment 2: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT)," IEEE Std 802.11be-2024, 2024.

[11] C. Deng, X. Fang, X. Han, X. Wang, L. Yan, R. He, Y. Long, and Y. Guo, ``IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 22, no. 4, pp. 2136, Fourth Quarter 2020.

[12] J. Zhang, Q. Tan, Y. Gao, X. Sun, and W. Zhan, ``WiFi 7 with different multi-link channel access schemes: Modeling, fairness and optimization," IEEE Trans. Commun., vol. 72, no. 10, pp. 6225--6236, Oct. 2024.

[13] D. Magrin, S. Avallone, S. Roy, and M. Zorzi, ``Performance evaluation of 802.11ax OFDMA through theoretical analysis and simulations," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 22, no. 8, pp. 5069--5081, Aug. 2023.

[14] L. Lanante, Roy Jr. and , ``Performance analysis of the IEEE 802.11ax OBSS_PD-based spatial reuse," IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 30, no. 2, pp. 616--628, Apr. 2022.

[15] H. Kim and J. So, ``Improving spatial reuse of wireless LAN uplink using BSS color and proximity information," Appl. Sci., vol. 11, no. 22, 11074, Nov. 2021.

[16] S. Barrachina-Muoz, B. Bellalta, and E. W. Knightly, ``Wi-Fi channel bonding: An all-channel system and experimental study from urban hotspots to a sold-out stadium," IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 29, no. 5, pp. 2101--2114, Oct. 2021.

[17] 胡智文,李宇灏,詹文等.基于贝叶斯估计的FTTR网络OBSS/PD阈值动态优化方法 [J].通信学报,2025,46(Z1):110-120

[18] M. Carrascosa-Zamacois, G. Geraci, L. Galati-Giordano, A. Jonsson, and B. Bellalta, ``Understanding multi-link operation in Wi-Fi 7: Performance, anomalies, and solutions," in Proc. IEEE PIMRC, 2023, pp. 1--6.

[19] N. Korolev, I. Levitsky, and E. Khorov, ``Analytical model of multi-link operation in saturated heterogeneous Wi-Fi 7 networks," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 11, no. 12, pp. 2546--2549, Dec. 2022.

[20] W. Lin, X. Sun, W. Zhan, and Y. Jiang, ``Multi-link operation in heterogeneous Wi-Fi 7 networks: Modeling and throughput optimization," in Proc. IEEE WCNC, 2025, pp. 1--6.

[21] K. Zanbouri, M. Noor-A-Rahim, J. John, C. J. Sreenan, H. V. Poor, and D. Pesch, ``A comprehensive survey of wireless time-sensitive networking (TSN): Architecture, technologies, applications, and open issues," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 27, no. 4, pp. 2129--2155, Aug. 2025.

[22] N. Taheri Javan, M. Sabaei, and V. Hakami, ``Adaptive channel hopping for IEEE 802.15.4 TSCH-based networks: A dynamic Bernoulli bandit approach," IEEE Sensors J., vol. 21, no. 20, pp. 23667--23678, Oct. 2021.

[23] C. M. Garcia Algora, E. Ortiz Guerra, S. Montejo-Sanchez, E. M. Garcia Fernandez, and K. Steenhaut, ``A theoretical association time model for IEEE 802.15.4 TSCH networks," IEEE Commun. Lett., vol. 25, no. 2, pp. 656--659, Feb. 2021.

[24] F. Veisi, M. Nabi, and H. Saidi, ``Coexistence analysis of multiple asynchronous IEEE 802.15.4 TSCH-based networks," IEEE Access, vol. 8, pp. 150573--150585, 2020.

[25] 星闪联盟, ``星闪无线通信系统 接入层 同步低时延宽带空口SLB 技术要求和测试方法," T/XS 10001-2025, 2025.

[26] 星闪联盟, ``星闪无线通信系统 架构," T/XS 00001-2025, 2025.

[27] Z. Yu, Z. Xie, Q. Yu, K. Wang, H. Fang, and W. Li, ``NearLink: Emerging short range wireless standard with ultra-low latency and ultra-high reliability," in Proc. IEEE PIMRC, 2025, pp.1--6.

[28] M. Gao, L. Wan, R. Shen, Y. Gao, J. Wang, Y. Li, and B. Vucetic,

``SparkLink: A short-range wireless communication protocol with ultra-low latency and ultra-high reliability," The Innovation, vol. 4, no. 2, 100386, 2023.

[29] 宋思达, 万蕾, 马莎, 高磊, 余健, 新一代无线短距通信干扰规避技术研究 [J], 数字通信世界, 2025, (12): 1--4.

[30] 沙惟怡, 刘玲, 周一青, 时宁哲, 曹梦华, 吕文俊, 纺织工业星闪密集组网协同优化研究与仿真分析 [J], 南京邮电大学学报(自然科学版), 2026.

[31] 张明远, 万蕾, 宋思达, 星闪同步FISA使能共享频谱高效利用研究 [J], 信息技术与标准化, 2026, (4): 82--86.