计算封装内无线网络的多信道介质访问控制协议

Bernat Oll´e*、Pau Talarn*、Albert Cabellos-Aparicio*、Filip Lemic†、Eduard Alarc´on* 和 Sergi Abadal*
*加泰罗尼亚纳米网络中心（N3Cat），加泰罗尼亚理工大学，08034 巴塞罗那，西班牙
†人工智能驱动系统实验室，i2Cat基金会，08034 巴塞罗那，西班牙

arXiv:2301.11471v1 [cs.ET] 27 Jan 2023

摘要——**芯片级无线通信凭借低时延、固有的广播特性以及能够绕过引脚限制，成为传统有线方案的一种有趣补充。然而，随着当前趋势推动处理器架构朝着大规模、高带宽需求的方向发展，无线芯片级网络亟需尽可能多地利用并共享信道。在此背景下，本文通过探索芯片级网络多信道介质访问控制（MAC）协议的设计空间，研究信道共享问题。本文提出并评估了适用于随机接入和令牌传递的不同信道分配策略，并在真实流量模式下进行了测试。结果表明，即使多信道带来了改进，这两种协议仍保有各自固有的优缺点。**

一、引言

在系统级封装（SiP）中实现高效的芯片级集成网络，是此类计算系统实现高性能的先决条件。目前，大多数系统都采用封装内网络（NiP），由一组片上路由器以及芯片内／芯片间有线链路构成 [1], [2]。然而，近期的规模缩放 [3], [4], 、专用化 [5], [6],和解体趋势 [7], [8] 正加大互连所承受的压力，以至于可能需要采用新的通信范式 [9], [10]。

在新兴的替代方案中，芯片级无线通信是一种很有前景的选择 [11]–[14]。这种通信范式利用调制电磁波进行数据传输，并以芯片封装作为通信介质（图 1）。由此形成的封装内无线链路 具有低时延、天然的广播能力和全局可重构性。

由于通信介质是共享的，封装内无线通信需要介质访问控制（MAC）协议，以避免或管理造成资源浪费的碰撞。在这种情况下，MAC协议通常简化为各种变体复用、随机接入或令牌传递 [15]–[21]。尽管近期研究表明，计算封装可以支持少量频率 [22], [23] 和空间信道 [24], [25], ，但 MAC 协议如何从中受益仍不清楚。这是因为，要实现真正可扩展的频率/空间复用技术，需要的信道不止少数几个 [15], ；更重要的是，随机接入和令牌传递的多信道变体尚未得到探索。

本研究由欧盟委员会通过 H2020 项目 WiPLASH（GA 863337）和 HE 项目 grantWINC（GA 101042080）资助。

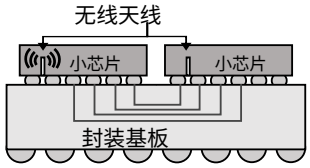

图1. 无线芯片间通信链路的示意图。

本文旨在弥合这一空白，重点研究芯片级场景中两种最具代表性的协议类型——随机接入和令牌传递——的多信道版本。具体而言，主要贡献如下。我们首先在第 II 节介绍如何利用少量信道扩展随机接入和令牌传递。随后，在第 III 节中，我们使用通常用于模拟多处理器工作负载的流量模型 [26]评估这些协议变体。这项分析揭示了信道分配对协议性能的影响，相关内容总结于第 IV 节，并在第 V 节中作结。

II. 多信道MAC协议

本文介绍三种用于随机接入和令牌传递的不同信道分配策略。作为基准，我们采用用于随机接入的BRS [18] 和用于令牌传递的基准方案[20] 。这里介绍的策略并非经证明的最优方案，但它们简单（符合芯片级场景的资源限制），并且代表了可采用的潜在技术。

*A. BRS*的分配方法

在BRS [18],等随机接入协议中，节点竞争信道接入；如果信道繁忙或发生碰撞，则退避。假设有 N 个节点，我们研究了三种利用 N_c 个信道降低碰撞概率的方法，即：

AS1： 信道逐个随机分配给节点。当节点有数据包要发送时，便为其分配一个随机信道。如果该信道繁忙或发生碰撞，节点就随机退避，并在下一次尝试时选择一个随机信道。

AS2： 每个信道按照均匀分布静态分配给$\frac{N}{N_c}$ 节点，也就是说，假设所有节点具有相同的负载（见图 2 左图）。尽管这对于空间不平衡流量而言并非最优，但可作为基准。

AS3： 根据一种能够平衡各信道负载的分布，将信道分配给数量可变的节点（见图 2 右侧）。为此，节点按预期归一化负载排序，

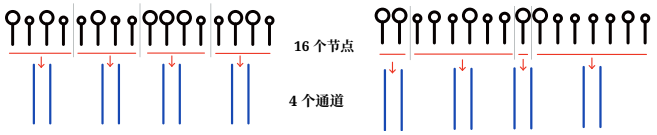

图 2. 假设有 16 个节点和 4 个信道时，BRS 的分配技术 AS2（左）和 AS3（右）的图示。

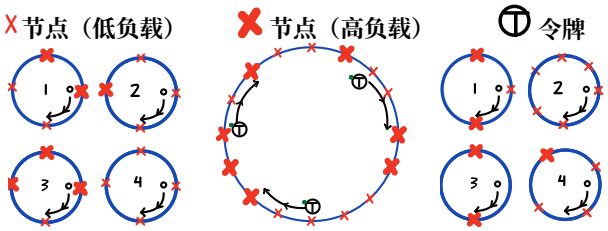

图 3. 假设有 16 个节点和 4 个信道时，令牌传递采用的不同分配技术的图示。

然后按照贪心算法的顺序依次分配到各个信道。

B. 令牌传递分配方法

在令牌传递中， [27], 通常所有 N 节点都会经过排序，组成一个虚拟环，令牌沿着该环按顺序传递。在采用 N_c 信道的版本中，每个信道都可以有一个令牌。此时的设计决策在于环的数量，以及组成每个环的节点。例如：**AS1:** 我们假设环的数量与信道数量相同，并将节点均匀分配到各个环中。换言之，我们将 $\frac{N}{N_c}$ 个节点分配到每个环中，而不考虑其预期负载。**AS2:** 我们假设只有一个虚拟环，多个令牌在其中循环传递。在这种情况下，令牌可以越过其他令牌：当节点 i 在传输期间持有令牌多个周期时，抵达 i-1的空闲令牌可以跳到 i+1。**AS3:** 此策略与AS1类似，但节点会根据其预期负载分配到各个环中。这可能会形成大小不同的环，但各环的预期总负载相近。

III. 性能评估

体系结构和应用参数汇总于表 I。我们在修改版 Multi2Sim 中将 BRS 和令牌传递的单信道基准协议及多信道版本实现为有限状态机。该版本可对无线链路进行建模，并支持碰撞检测 [28]。我们使用合成流量对这些协议进行压力测试，该流量模拟了不均匀注入分布（通过 σ 参数）和突发性时间行为（通过赫斯特指数 H） [26]。各项参数的默认值分别为 $N = 64$ 个节点、 $N_c = 4$个信道、 $H = 0.5$ 和 $\sigma = 1$。仿真精确到周期。

在所有情况下，我们都会比较不同选项的数据包延迟（以周期为单位）和吞吐量（以数据包/周期为单位）。鉴于协议策略和流量类型数量众多，我们不绘制经典的延迟—吞吐量曲线，而是使用汇总延迟和吞吐量统计数据的箱线图。在图中，X 轴显示所研究的参数。图中有两个 Y 轴：左侧轴表示延迟，对应箱线图的数值；

表 I 仿真协议和应用的特性

应用	合成流量，H=0 .5–0.85, σ=0 .05–100
系统	N=64–512 个核心，每个核心配备一根天线，1 GHz时钟
网络	80位数据包（前导码：20 位）， N_c=1–4 个通道
Link	BRS [18], 令牌传递
物理层	通断键控，20 Gb/s

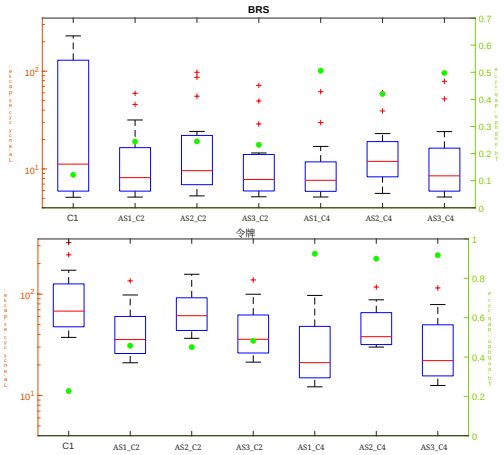

图 4. 随着信道数量增加（ $C1$ 至 $C4$）以及采用不同分配方案时，多信道 BRS（上）和令牌传递（下）的性能。

右侧轴表示吞吐量，对应表示饱和吞吐量的单值标记。由于在单个信道中传输一个数据包需要 4 个周期，因此最大吞吐量为 0.25 数据包/周期/信道。

A. 信道数量

这里，我们讨论图 4 所示的 BRS 和令牌传递在信道数量不断增加时的结果。

时延。总体而言，就时延而言，BRS 的稳定性不如令牌传递，因为其取值范围更大，离群点也更多。不过，BRS 的零负载延迟远低于令牌传递，因为在 BRS 中，当信道检测为空闲时，协议允许节点立即开始传输。这也可以解释为什么无论这里评估的参数（分配方式、信道数量）如何，最小时延都相当接近。然而，使用多个信道时，最坏情况下的时延显然会有所改善，因为高负载被分散到多个信道上。另一方面，在令牌传递中，节点必须等到获得令牌后才能开始传输。因此，当节点数量较多时， $N = 64$ 在这种情况下，系统会长时间保持空闲。

吞吐量。 令牌传递的结果表明，无论采用何种分配方法，随着信道数量增加，饱和吞吐量都会相当稳定地提升。这可能是因为默认使用非突发、非热点流量来评估可扩展性。另一方面，BRS 的结果表现出与令牌传递不同的行为。首先，BRS 无法达到令牌传递那样高的饱和吞吐量。主要原因是信道竞争和多次碰撞会导致信道浪费，进而降低吞吐量。此外，就饱和吞吐量而言，BRS 比令牌传递更不稳定，因为它取决于

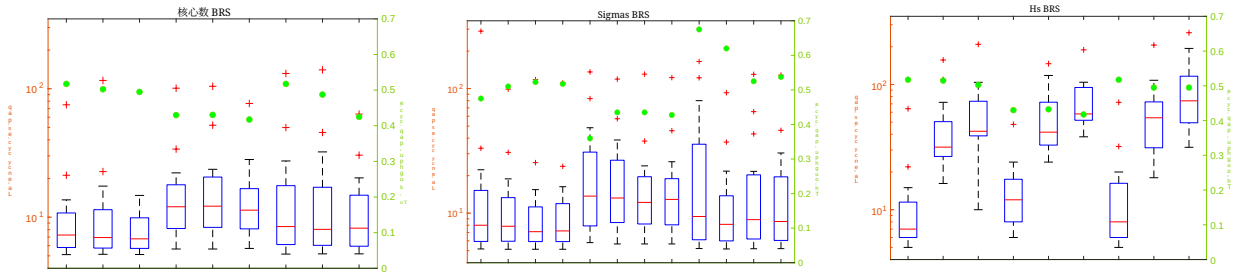

图5。随着节点数量增加时多信道 BRS 协议的性能， N=64–512（左图）； 不同空间集中度， σ=0.1–100（中图）； 不同时间突发性， H=0.5–0.85（右图）； 以及不同分配技术。

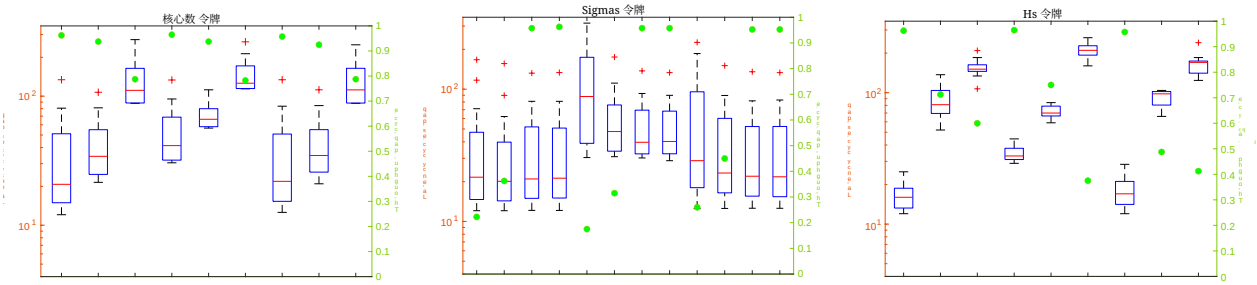

图6。随着节点数量增加时多信道令牌传递协议的性能， N=64–512（左图）； 不同空间集中度，σ=0.1–100（中图）； 不同时间突发性， H=0.5–0.85（右图）； 以及不同分配技术。

高负载下的碰撞百分比。因此，不同分配方式所实现的饱和吞吐量之间的差异会随着信道数量的增加而扩大。

B. 节点数量

接下来，我们讨论节点数量增加时 BRS 和令牌传递的性能，其中 $N_c = 4$。结果如图5和图6左侧的图表所示。

时延。 由于 BRS 能够在信道空闲时传输，因此其时延远低于令牌传递。时延值的范围因节点数量和分配方式而异，但总体上相近，因为最终相同的聚合负载会分布到更多节点上。信道静态分配（AS2）的表现不如其他方案。另一方面，从令牌传递的图表可以清楚地看出，节点越多，时延就越高，这是令牌周转时间增加所致。事实上，在所有情况下，低负载时的时延都与节点数量成正比。不同系统规模下的时延值范围相近。

吞吐量。一般而言，节点数量较少时，饱和吞吐量略高。在我们的协议中，节点越多，节点总数就越大，因此对于 BRS，即使负载相同，发生碰撞的可能性也越高；而在令牌传递中，等待时间也越长（或者说所有节点都处于积压状态的概率越低）。无论如何，BRS 似乎更能适应节点数量的变化，因为其吞吐量下降较为缓和；AS3 则是例外，这可能是因为节点数量如此之多时，负载均衡算法无法有效地对节点进行分类。最后，在令牌传递中，三种信道分配在所有情况下的吞吐量都非常接近，而在 BRS 中，AS1（将信道随机分配给单个数据包）的表现更好。

C. 热点流量

接下来，我们讨论图5和图6中间图表所示的结果，这些结果展示了空间注入分布不均对性能的影响。我们提醒读者，σ 的低值/高值分别表示流量呈热点分布/均匀分布 [26]。

时延。 在 BRS 中，流量的热点行为似乎不会对不同分配方法的性能产生太大影响。分布中的离群值、第三四分位数和最大值似乎会受到流量热点特性的轻微影响。总体而言，BRS 能够适应此类变化，实际上还可能受益于争用可用信道的节点数量较少。不过，结果显示，当流量集中在少数节点周围时，性能略有变差的趋势，这可能是因为负载较高的节点会达到较大的退避值。在 AS3 中，通过主动将高负载节点放置在不同信道上，可以避免这种情况。同样，在令牌传递中，流量集中在特定节点集合周围会影响时延，这主要是因为不同的分配方法能够迅速向需要令牌的节点提供令牌，即使这些节点在环中相隔较远。$\sigma = 0.05$ 这一极端情况清楚地体现了这一点。同样，流量的热点程度越高，离群值似乎也越大。我们还观察到，AS2 在低负载下无法提供良好的性能，而流量热点程度很高时，这一问题会更加严重。

吞吐量。BRS 的不同实现方式，其吞吐量不会因流量类型而有显著变化

流量的空间分布，但 AS3 除外：流量集中在少数节点周围似乎会对吞吐量产生积极影响。一个可能的原因是，最活跃的节点分布在不同信道上，从而将竞争降至最低。其他分配方法则不会出现这种情况。令牌传递中的情况有所不同：流量的热点行为会改变不同分配方法的吞吐量，其中 AS3 受到的影响稍小。这是因为，如果负载集中在少数节点周围，那么在这些节点之间传递令牌时，大量空中传输时间都会被浪费。

D. 突发流量

最后，我们展示了流量突发性逐渐增强时的时延和吞吐量结果。对于 BRS 和令牌传递，结果分别显示在图5和图6右侧的图中。流量的时间注入模式通过赫斯特指数 [26]，建模，数值越高表示行为越具突发性，即较长的突发之后会出现更长的静默期。

时延。在 BRS 中可以看出，H 的值越高，平均时延就越高，而且越难以预测。这是因为当 H 为 0.5 时，数据包按照随机泊松过程注入，从而最大限度地降低了发生碰撞的概率。然而，当考虑突发性逐渐增强的流量时，数据包在同一周期内注入（且节点尝试传输）的概率会增加。突发性会放大这一效应，因为级联碰撞会导致退避时间呈指数级增长。这会影响所有负载下的系统。另一方面，令牌传递在处理突发流量时也会受到影响，导致时延非常高，尤其是在 H 值较高时。其时延比 BRS 的情况稍稳定，主要是因为该协议不会通过指数退避来响应突发流量，而是通过线性令牌传递来应对。不过，其时延仍远高于 BRS，因此不适用于节点数量较多的情况。

吞吐量。一方面，可以验证，在 BRS 中，无论赫斯特指数取值如何，饱和吞吐量在所有分配方案中都相当稳定。一个可能的原因是退避机制的行为；突发流量会导致大量碰撞，从而即使在低负载下也会增加时延，但该协议

即使负载以突发形式到达，也可能收敛到一个较大的退避值，从而能够适应该负载。换言之，退避机制会将突发流量分散到一段时间内，直到所有节点都处于积压状态。另一方面，可以看出，在令牌传递的情况下，随着 H 数量增加，饱和吞吐量似乎会显著下降，最终达到的吞吐量与 BRS 相当。这种现象的一个潜在原因是缺乏能够应对突发流量的自适应机制；即使突发流量导致某个节点生成多个数据包，令牌仍必须继续在环中传递，从而产生无线信道保持静默的间隙。当流量的突发性较低时，此类事件发生的概率也较低。

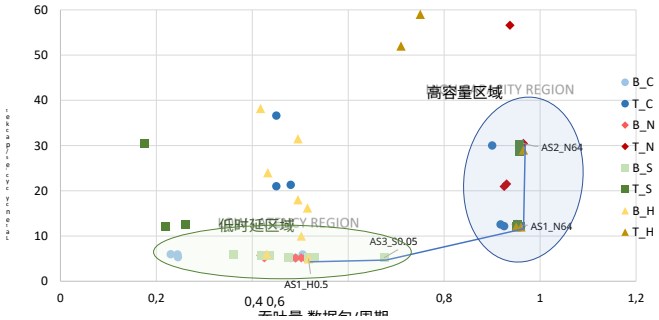

图 7. 所有协议、分配方法和流量条件下的时延与吞吐量结果汇总。 B 和 T 分别表示 BRS（随机接入）和令牌传递； C 和 N 表示信道数和节点数； S 和 H 则表示不同的时空注入分布。例如， B C 符号表示 BRS 在不同信道数下所有分配方法的时延-吞吐量结果。图中还给出了两个理想的设计空间和帕累托前沿。

IV. 讨论

图 7 绘出了所有对比协议及分配方案的性能，其中横轴表示零负载延迟，纵轴表示在给定信道数量和分配方法时特定协议的饱和吞吐量。

总体而言，就零负载延迟而言，BRS 优于令牌，因为信道空闲时它能够立即传输。因此，我们看到大多数 BRS 数据点都位于低时延区域。在分配技术中，AS1 的结果与 AS3 相近，而且可能更受青睐，因为它无需预先了解每个节点的负载即可分配信道。缺点是，其吞吐量最多只有令牌传递的一半。

另一方面，在高容量区域中，令牌传递可以达到较高的吞吐量水平，接近无线网络的最大总带宽。然而，尽管增加信道数量会显著降低时延，令牌传递的最佳时延仍比 BRS 的数值高出几个周期。最后，我们观察到，很难总体上提供良好的信道分配：AS3 需要预先了解流量分布，AS1 在热点流量方面表现不佳，而 AS2 的时延较高。

V. 结论

本文探讨了将随机接入和令牌传递MAC协议扩展到多个信道、以适用于无线芯片级网络的若干技术。总的来说，增加信道数量可以缓解这两类协议面临的问题：提高随机接入的吞吐量，并将令牌传递的时延降至几十个周期。此外，随机接入对热点流量和突发流量的适应能力更强，也更易扩展至大规模芯片级网络。然而，令牌传递能够实现更高的吞吐量，这使得协议选择（及其分配）变得极具挑战性。因此，我们看到了一种与单信道协议类似的趋势：理想情况下，应开发一种多信道协议，能够无缝兼得这两种方案的优点。未来的工作将对此进行探索。

参考文献

[1] R. Marculescu、U. Ogras、L.-S. Peh、N. Enright Jerger 和 Y. Hoskote，“片上网络设计中的突出研究问题：系统、微体系结构与电路视角”，IEEE集成电路与系统计算机辅助设计汇刊，第28卷，第21期，2009年，第1–3页。[2] D. Bertozzi、G. Dimitrakopoulos、J. Flich 和 S. Sonntag，“片上通信不断演进的格局”，嵌入式系统设计自动化，第19卷，第1期，第59–76页，2015年。[3] S. Salahuddin、K. Ni 和 S. Datta，“电子学的超大规模扩展时代”，《自然·电子学》，第1卷，第8期，第442–450页，2018年。[4] C. Mayr、S. Hoeppner 和 S. Furber，“Spinnaker 2：用于脑模拟和机器学习的千万核处理器系统”，arXiv预印本 arXiv:1911.02385，2019年。[5] T. Krishna、H. Kwon、A. Parashar、M. Pellauer 和 A. Samajdar，“深度学习加速器中的数据编排”，《计算机体系结构综合讲座》，第15卷，第3期，第1–164页，2020年。[6] T. Wang、F. Feng、S. Xiang、Q. Li 和 J. Xia，“面向异构小芯片的应用定义片上网络：实现视角”，载于2022年IEEE高性能计算机体系结构国际研讨会（HPCA），第1198–1210页，IEEE，2022年。[7] A. Kannan、N. E. Jerger 和 G. H. Loh，“利用中介层技术拆分并重新整合多核处理器”，《IEEE Micro》，第36卷，第3期，第84–93页，2016年。[8] S. Naffziger、N. Beck、T. Burd、K. Lepak、G. H. Loh、M. Subramony 和 S. White，“AMD EPYC与Ryzen处理器系列的小芯片技术与设计先驱：工业产品”，载于2021年ACM/IEEE第48届年度国际计算机体系结构研讨会（ISCA），第57–70页，IEEE，2021年。[9] A. Karkar、T. Mak、K.-F. Tong 和 A. Yakovlev，“面向众核中高效多播和广播的片上新兴互连综述”，《IEEE电路与系统杂志》，第16卷，第72期，2016年，第1–58页。[10] A. Ganguly、S. Abadal、I. Thakkar、N. E. Jerger、M. Riedel、M. Babaie、R. Balasubramonian、A. Sebastian、S. Pasricha 和 B. Taskin，“ 面向 DNA 、量子、存内和光计算的互连：专题讨论会见解 ”，《IEEE Micro》，第42卷，第3期，第40–49页，2022年。[11] D. W. Matolak、A. Kodi、S. Kaya、D. Ditomaso、S. Laha 和 W. Rayess，“无线片上网络：体系结构、无线信道与器件”，《IEEE无线通信》，第19卷，第5期，第58–65页，2012年。[12] S. Laha、S. Kaya、D. W. Matolak、W. Rayess、D. DiTomaso 和 A. Kodi，“超低功耗无线链路的新前沿：片上网络与芯片间互连”，IEEE集成电路与系统计算机辅助设计汇刊，第34卷，第198期，2014年，第2–186页。[13] S. Abadal、R. Guirado、H. Taghvaee、A. Jain、E. P. de Santana、P. H. Bol´ívar、M. Saeed、R. Negra、Z. Wang、K.-T. Wang 等，“面向大规模异构多芯片处理器的石墨烯无线灵活互连”，《IEEE无线通信》，2022年。[14] R. S. Narde、J. Venkataraman、A. Ganguly 和 I. Puchades，“基于片上网络的多芯片系统中毫米波互连的芯片内与芯片间传输”，《IEEE Access》，第7卷，第112200–112215页，2019年。[15] D. DiTomaso、A. Kodi、D. Matolak、S. Kaya、S. Laha 和 W. Rayess，“A-WiNoC：面向芯片多处理器的自适应无线片上网络架构”，第26卷，第12期，第3289–3302页，2015年。[16] N. Mansoor 和 A. Ganguly，“采用动态介质访问机制的可重构无线片上网络”，载于第9届片上网络国际研讨会论文集，第1–8页，2015年。[17] K. Duraisamy、R. G. Kim 和 P. P. Pande，“采用分布式MAC协议提升无线片上网络的性能”，载于ISQED ’15论文集，第406–11页，2015年。[18] A. Mestres、S. Abadal、J. Torrellas、E. Alarc´on 和 A. Cabellos-Aparicio，“无线片上网络中的可靠广播通信MAC协议”，载于NoCArc ’16论文集，第21–26页，2016年。[19] S. Jog、Z. Liu、A. Franques、V. Fernando、S. Abadal、J. Torrellas 和 H. Hassanieh，“一统天下的协议：采用深度强化学习的无线片上网络”，载于第18届USENIX网络系统设计与实现研讨会（NSDI 21），第973–989页，2021年。[20] A. Franques、S. Abadal、H. Hassanieh 和 J. Torrellas，“Fuzzy-Token：面向无线互连众核的自适应MAC协议”，载于欧洲设计、自动化与测试会议（DATE），2021年。[21] Y. Ouyang、C. Sun、B. Jia、Q. Wang 和 H. Liang，《为无线片上网络设计基于优先级的动态媒体访问控制机制》，*Microelectronics Journal*，第 116 卷，页码 105218，2021年。[22] W. Rayess、D. W. Matolak、S. Kaya 和 A. K. Kodi，《用于无线片上网络的天线与信道特性》，*Wireless Personal Communications*，第 95 卷，第 4 期，页码 5039–5056，2017年。[23] X. Timoneda、A. Cabellos-Aparicio、D. Manessis、E. Alarc´on 和 S. Abadal，《计算封装内芯片级无线通信的信道表征》，载于*2018*年 第十二届 *IEEE/ACM* 国际片上网络研讨会（*NOCS*），页码 1–8，IEEE，2018年。[24] P. Baniya、A. Bisognin、K. L. Melde 和 C. Luxey，《芯片间切换波束 60 GHz 圆形贴片平面天线阵列与方向图考量》，*IEEE* 天线与传播汇刊，第 66 卷，第 4 期，页码 1776–1787，2018年。[25] F. Rodr´ıguez-Gal´an、E. P. de Santana、P. H. Bol´ıvar、S. Abadal 和 E. Alarc´on，《迈向计算封装内无线网络的空间复用》，载于第九届 *ACM* 纳米级计算与通信国际会议论文集，页码 1 6，2022 – 。[26] V. Soteriou、H. Wang 和 L. Peh，《片上互连网络的统计流量模型》，载于第十四届 *IEEE* 建模、分析与仿真国际研讨会，页码 104–116，IEEE，2006年。[27] G. Holland、N. Vaidya 和 P. Bahl，《用于多跳无线网络的速率自适应 MAC 协议》，载于第七届移动计算与网络年度国际会议，页码 236– 251，2001年。[28] R. Ubal、P. Mistry、D. Schaa、H. Ave 和 D. Kaeli，《Multi2Sim：CPU-GPU 计算仿真框架》，载于*PACT’12* 论文集，2012年。