



AN1141: Thread 网状网络性能

本应用指南详细介绍了测试 Thread 网状网络性能的方法。随着当今无线市场上可用的网状网络数量不断增加，设计人员必须了解这些网络的使用情况及其预期性能。选择网络或设备时，设计人员需要了解网络的性能和行为特征，如电池寿命、网络吞吐量和延迟，以及网络规模对可扩展性和可靠性的影响。

本应用指南介绍了 Thread 网状网络在性能和行为方面与其他网状网络的差异。使用能够运行 Thread Mesh 和专有协议的 Silicon Labs Thread Mesh 软件堆栈和 Silicon Labs Wireless Gecko SoC 平台进行了测试。测试环境是一个商业办公大楼，范围内有 Wi-Fi 和 Zigbee 网络。在走廊、会议室、办公室和开放区域部署了无线测试集群。定义了执行基准测试的方法，以便其他人可以运行相同的测试。这些结果主要用于为设计实践和原则以及预期的现场性能结果提供指导。

有关其他技术的其他性能基准测试信息，请参阅 <http://www.silabs.com/mesh-performance>。

内容要点

- 说明了 Silicon Labs 研发 (R&D) 中的无线测试网络。
- 评估了无线条件 and 环境。
- 介绍了网状网络性能，包括吞吐量、延迟和大型网络可扩展性。

本文提供的信息以 Thread 的 SLThread 实施为依据。SLThread 已于 2019 年 12 月“终止服务”。Silicon Labs 将通过实施更受欢迎的 OpenThread 替换 SLThread。我们预计，OpenThread 的结果将非常接近 SLThread 结果。

1. 介绍和背景

在开发人员会议和行业白皮书中，Silicon Labs 提供了嵌入式网状网络的性能测试结果。系统设计人员可以使用吞吐量、延迟和安全影响等基本性能数据来定义预期行为。测试是通过我们的各种网状网络技术完成的 - Zigbee、Thread 和 Bluetooth，每种都单独做了介绍。本应用指南介绍了 Thread 网络的性能。

1.1 基础物理层和数据包结构

网络性能取决于有效荷载的大小，这是因为数据包开销中不包含应用的使用。

Thread 使用 IEEE 802.15.4 2006，127 字节数据包和 250 kbps 的基础数据速率。Thread 数据包格式如下图所示，产生一个 63 字节的有效荷载。对于 63 字节以上的有效荷载，Thread 堆栈碎片使用 6lowpan。我们的性能数据取决于有效荷载大小，因为这是构建应用时需要考虑的设计参数。

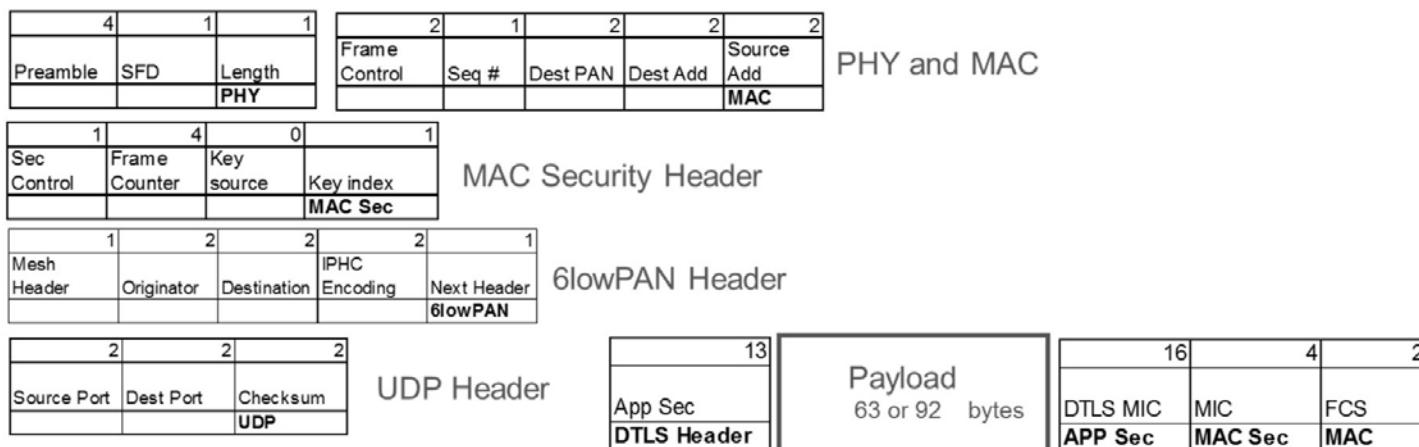


Figure 1.1. Thread 数据包格式

1.2 网络路由差异

Thread 支持下一跳路由和泛洪。作为正常网络维护的一部分，Thread 维护到所有路由器的下一跳路由，而不是由设备根据路由发现执行泛洪。Thread 还最大限度地减少了活动路由器的数量，从而可以解决大型网络的扩展问题。之前，多播泛洪被认为是嵌入式 802.15.4 网络的限制，因为存在大量路由器的情况下的泛洪限制了多播流量的频率和可靠性。注意 Thread 网络管理活动路由器的数量和间距，因此不需要用户干预或管理。

网络将较大的消息分成较小的消息，以适应特定的 PHY 限制。对于 Thread，分段是在 6lowpan 层完成的，方向为源到目的地（不是单个跳频）。

对于这些网络中的单播转发，只要设备准备好发送，就会转发该消息。对于多播转发，通常有关于如何转发消息的网络要求。Thread 设备使用 RFC 7731 MPL 转发。对于这种方法，涓流计时器设置为 64 毫秒，所以设备在重新传输之前会回退一个最高为此值的随机数。

Note: 此性能数据适用于 Silicon Labs 实现这些网状网络堆栈。正如为此测试提供的测试网络和基础设施所显示的那样，未使用其他堆栈或系统执行测试。

2. 目标和方法

本应用指南定义了一系列用于评估网状网络性能、可扩展性和可靠性的测试。描述了测试条件和基础设施，以及消息延迟和可靠性。该测试是通过测试网络中的实际无线设备进行的，而不是模拟。

此测试主要为了提供不同网格技术之间的对比，以更好地理解并推荐其用途。不同的网络 and 系统设计对设备和网络有不同的要求。因此，没有一个网络能够满足所有的网络要求。但是，我们要对比的三种网状网络技术都是针对家庭和商业建筑中用于安防监控的低功耗和电池供电网状网络。

通常，分析网络性能数据时，我们会考虑可以对网络进行哪些改进以提高性能。因为目前关于大型网络的网状网络性能的公开数据有限，所以很难就可能的改进或变化进行行业讨论。例如，在商业建筑中，人们担心：

- 其他网络流量，因为可能有许多子网互相干扰。
- 正常建筑 Wi-Fi 基础设施的 Wi-Fi 干扰，因为这些技术通常在 2.4 GHz ISM 频段中运行。
- 网络吞吐量和延迟以及大型网络多播延迟和可靠性，这是因为多播常被用于密集办公环境中的照明控制，并且系统用户预期照明控制会有响应性。

Note: 这里的测试结果仅限于在正常运行条件下比较系统性能，或者在特定测试中指出的压力下进行比较。本应用指南不提供系统干扰或其他此类影响的解决方案，这可参考其他已公布的结果。不过，测试是在我们的 Silicon Labs R&D 设施进行的，其 RF 范围内有超过 100 个 Wi-Fi 接入点。该设施还有一个 300 节点的 Zigbee 照明网络，该网络不属于本测试的一部分，而是用于普通照明控制。

2.1 其他性能测试回顾

没有用于评估和报告大型网络可靠性、可扩展性或延迟的具体、已定义方法。过去，Silicon Labs 发表了许多论文，根据网络测试对比网络性能。测试主要关注设备行为以及对电池寿命、网络吞吐量和延迟的影响。大规模多播测试还需要从大型分布式网络中采集准确的时间和可靠性信息。所有测试均使用能够运行 Zigbee、Thread、Bluetooth Mesh、和专有 RF 协议的 Silicon Labs Wireless Gecko SoC 平台执行，以避免测试中设备本身造成的差异。先前公布的结果有收发器、网络协处理器和片上系统设计之间的差异。这些设备全部使用片上系统设计。

关于性能的其他论文包括由瑞典皇家理工学院软件和计算机系 Dapeng Lan 发布的关于 IP 网络性能的硕士毕业论文“无线楼宇自动化系统的 Thread 网状网络实验研究”。本文按照下表测试单播和多播性能：

测试	数据包	新增载荷	结果
Unicast burst off load 0	在先前测试 500 毫秒后，边界路由器发送 CoAP 请求。CoAP get 有 10 个字节的有效载荷，CoAP ack 有 20 个字节的有效载荷。	否	平均往返 1 跳 28.98 毫秒 2 跳 49.42 3 跳 74.64 4 跳 94.22 5 跳 120.88 6 跳 150.37
Unicast burst load 0.2	同上	每个设备每隔 5 秒向随机设备发送 CoAP 请求	平均往返 1 跳 29.06 毫秒 2 跳 54.87 3 跳 88.25 4 跳 95.69 5 跳 117.78 6 跳 139.27
Unicast burst on load 0	在先前测试后，边界路由器即时发送 CoAP 请求。	否	平均往返 1 跳 34.29 毫秒 2 跳 62.38 3 跳 81.61 4 跳 112.99 5 跳 127.87 6 跳 142.65
Unicast burst load 0.2	同上	每个设备每隔 5 秒向随机设备发送 CoAP 请求	平均往返 1 跳 32.89 毫秒 2 跳 58.75 3 跳 88.50 4 跳 108.00 5 跳 119.52 6 跳 139.81
多播可靠性	每隔 2 秒从边界路由器发送多播，然后检查被网络中的多少个节点接收到。CoAP get 和 10 字节有效载荷。		已发送 1358 个数据包 1341 个已接收 98.75% 可靠
多播延迟	每隔 2 秒从边界路由器发送多播，并计算完全覆盖网络所需的时间		平均完成时间 92.62 毫秒 最大时间 184 毫秒

单播测试使用 23 个节点的网络，由一台设备作为边界路由器。多播测试使用 38 个节点的网络，由一台设备作为边界路由器。对于 Thread，18 个作为路由器，剩余的是终端设备。

提供这些数据是因为任何此类网络测试都有比较意义。请注意，硬件和软件的不同配置会有不同的性能；这种类型的性能没有行业标准。

3. 测试网络和条件

为了最大限度地减少差异，设备测试也可以在固定拓扑结构中执行，其中 RF 路径通过分路器和衰减器连接在一起，以确保拓扑结构不会随时间和测试而发生变化。此方法在 7 跳测试中用以保证网络拓扑。MAC 过滤也可用于实现网络拓扑。

下面是一个典型的有线测试配置：



Figure 3.1. 抽屉中带分线器和同轴电缆连接的有线 RF 设备

大型网络测试最好在露天环境中进行，其中设备行为取决于现有的和变化的 RF 条件。Silicon Labs R&D 设施即被用于此露天测试。

3.1 设施和测试网络条件

Silicon Labs R&D 设施包含一个带电梯井的中央核心，其他服务在大楼西端并有开放式平面图，办公室和会议室位于东端。整个设施占地约 120 英尺乘 200 英尺。下图显示了设施布局。较深的线代表坚硬的墙壁，其他所有部分都使用立方体分隔。



Figure 3.2. 用于无线测试的 Silicon Labs 设施布局

测试设备安装在设施周围的不同位置。这些设备都有以太网反向信道连接，以允许：

- 固件更新
- 命令行接口
- 脚本处理
- 定时分析
- 数据包采集
- 能量测量

下图中的测试集群包括：

- 六个 EFR32MGxx 设备
- 支持多波段，可同时测试 2.4 GHz（PCB 天线）和专有的 1 GHz 以下协议（外部天线）
- USB 电源和以太网连接



Figure 3.3. 典型测试集群

测试集群分布在整个设施中，包括高低位置、开放区域以及封闭的会议室和办公室。



Figure 3.4. Silicon Labs R&D 设施中的测试集群

该测试网络会定期添加或移除设备，但在进行此测试时，它包含以下设备：

- EM35xx 设备
- EFR32MGxx 设备

这个网络代表了网络和软件质量保证团队用于露天测试的设备。所有设备均由中央测试服务器和基础设施控制，可进行脚本式的回归测试或由工程师手动测试。

3.2 设施中的无线条件

Silicon Labs R&D 设施中有完整的 Zigbee 照明控制系统，包括运动和照明传感器和开关。这不是测试网络的一部分，而是作为正常的楼宇控制系统使用，与执行的所有测试无关。

另外 Silicon Labs R&D 设施位于市中心，除了我们现有的 Wi-Fi 基础设施外，该设施的 RF 范围内还有 100 多个 Wi-Fi 接入点。下面的图表是正常工作日 Wi-Fi 扫描的快照。这被认为是正常的 Wi-Fi 背景流量。

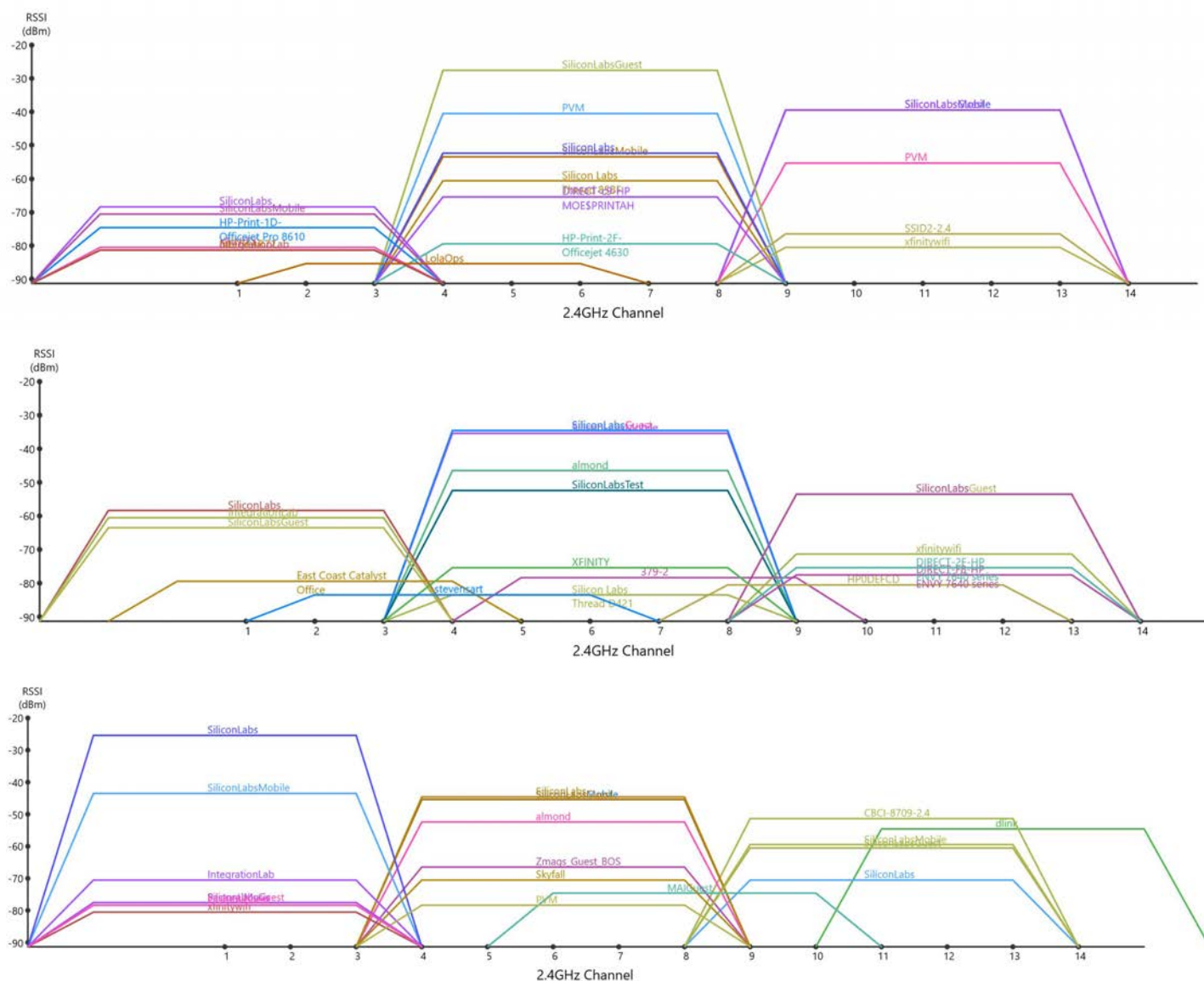


Figure 3.5. 正常工作日的 Wi-Fi 扫描

这些 Wi-Fi 扫描分别发生在东南角办公室、主会议室的西侧和北侧。这些位置显示 RF 范围内有 62、104 和 83 个 Wi-Fi 接入点。

在测试网络中，可以选择给定的测试并用于给定的一组设备。建立网络并加入设备后，使用以太网反向信道将命令发送到设备。下面显示了测试过程中的典型网络。黑色和灰色线条显示路由器的连接和强度。

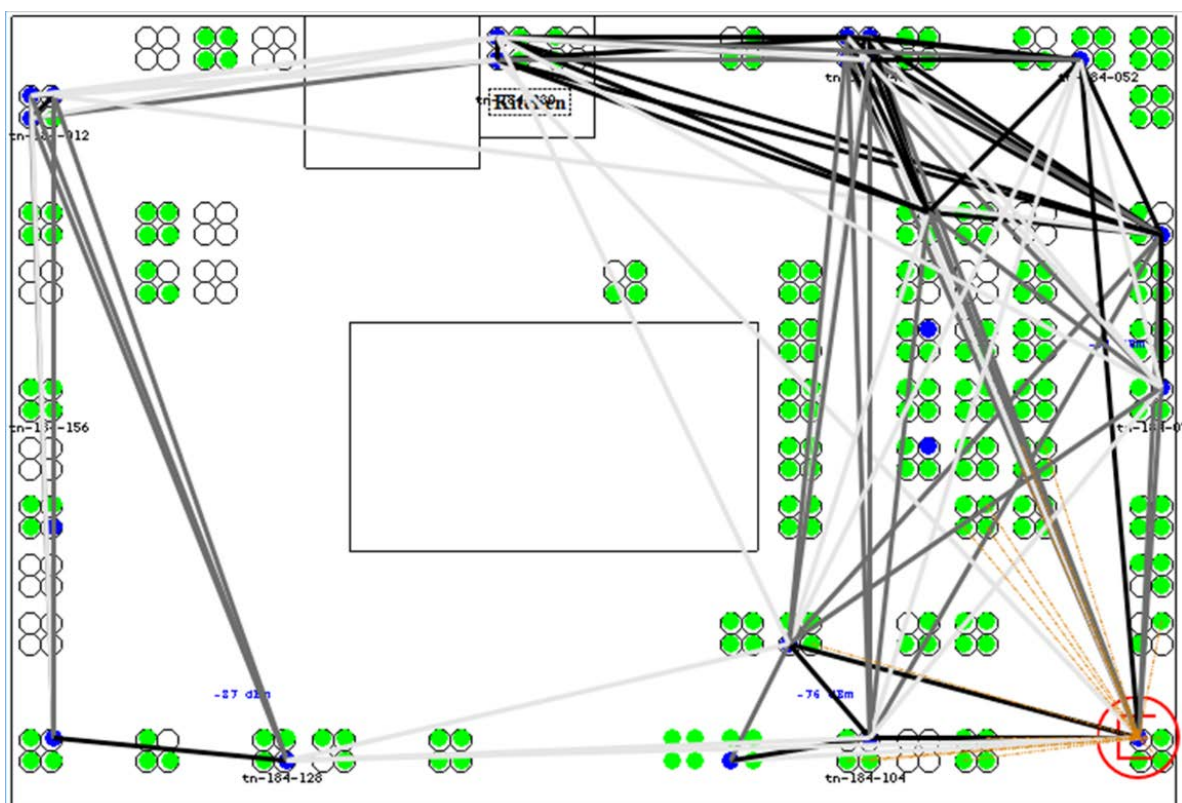


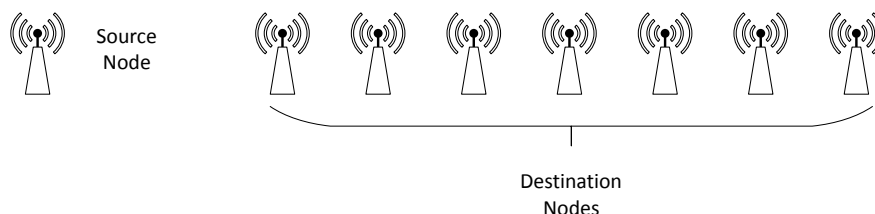
Figure 3.6. 测试过程中的典型网络

4. 测试和结果

4.1 吞吐量和延迟

在受控网络（有线配置）中测试了吞吐量和延迟，以测试各种数据包有效负载下的跳频。

正常配置是测试 7 个跳频。测试是使用一个源节点和一系列目标节点完成的，以便更改跳频数量。



该测试是使用以下配置完成的：

1. 带确认的 CoAP 可确认类型消息传递
2. 对于延迟测试，数据包有效负载从 10 字节到 300 字节，以 10 字节为增量
3. 从 1 到 7 跳，使用领导节点作为源
4. 飞行中使用 1 个包
5. 在给定确认时间的情况下尽可能快地发送
6. 测量往返延迟（源到目的地到源），以毫秒为单位

对于各个网状网络，当我们如上所述增加有效负载大小时，数据包分段行为不同。使用较大的数据包大小取决于应用层，但我们在此提供比较数据，以说明发生分段时的相对性能。

4.1.1 Thread 多跳延迟

测量了 Thread 时间，测量方式为给定有效负载大小的 CoAP 消息的往返时间。

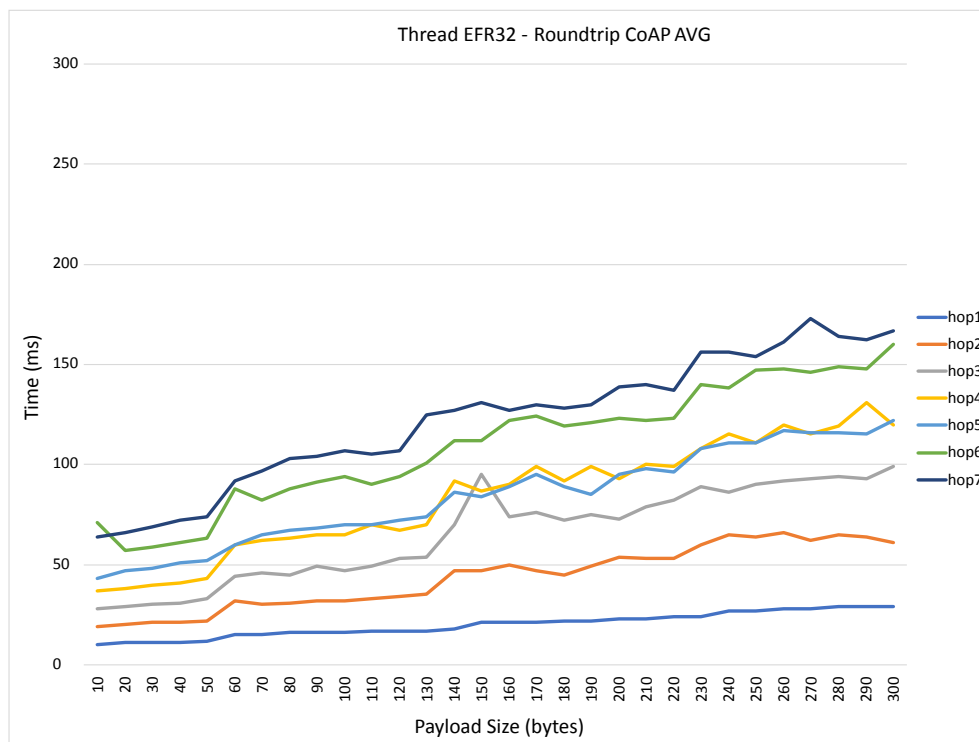


Figure 4.1. Thread EFR32 - 往返 CoAp AVG

在这个多跳延迟测试中有多个值得注意的地方。

- 对于高达 300 字节的 1 跳有效负载，Thread 保持了 50 毫秒的往返延迟，这非常好。
- 即使到 300 字节有效负载的 7 跳，EFR32 的往返延迟时间也不到 200 毫秒。
- 对于有效负载在一个数据包（50-60 字节）内的大多数应用来说，Thread 可在 7 跳内维持小于 100 毫秒的往返延迟。

4.2 网络测试与网络大小

在较不可控的条件下验证堆叠性能需要露天测试。这些网络是在正常的 Silicon Labs 办公空间中配置的，有正常的 Wi-Fi 干扰、其他网络运行和楼宇控制系统。未尝试使用任何措施隔离这些网络的 RF 条件。

每个堆栈要测试的网络包括：

- 小型网络：24 个设备
- 中型网络：1 - 48 个设备
- 中型网络：2 - 96 个设备
- 大型网络：1 - 144 个设备
- 大型网络：2 - 192 个设备

Note: 对于其中的任何测试，对于给定的一组测试，测试网络目标 $\pm 10\%$ 范围内的具体设备数量都是可接受的。这个大型网络中的测试是在设备的 SoC 模式下完成的。

这些网络均配置为供电设备，除非有特定的休眠端测试。

对于其中的每个网络，测试都将验证一系列流量条件下的可靠性和延迟。测试主要使用 100 条消息，但也执行了 10000 条消息的可靠性测试。测试中使用相同的设备，以保持测试间的拓扑和密度相似。实际的无线条件会有所不同，这在这些测试中是无法控制的。

4.2.1 Thread 大型网络测试结果

Thread 测试是使用最新版本的 Silicon Labs Thread 堆栈完成的。

下面的图形显示了 Thread 网络多播的行为。Thread 网络的路由器数量限制为 32 或更少，而随着网络的增长或条件的变化，作为活动路由器的设备是可能发生变化的。作为非活动路由器的设备称为路由器合格终端设备 (REED)，它们作为“永远开启”子设备。初始设备发送广播，这会被 RF 范围内所有路由器、以及以该初始设备为父节点的任何 REED 设备听到。Thread 规范要求 REED 与单个主父节点同步，同时与至少三个其他父节点同步以提高多播可靠性。

设备中继多播之前，Thread 设备使用 32-64 毫秒的多播退避。

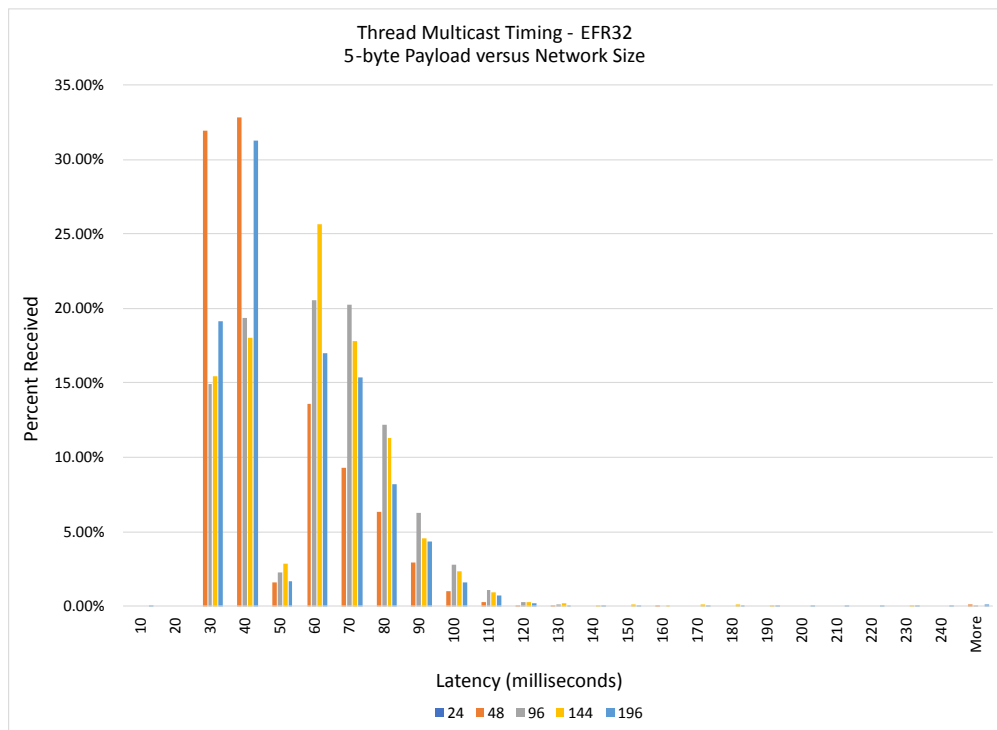


Figure 4.2. Thread 多播时间 - EFR32 5 字节有效荷载与网络大小

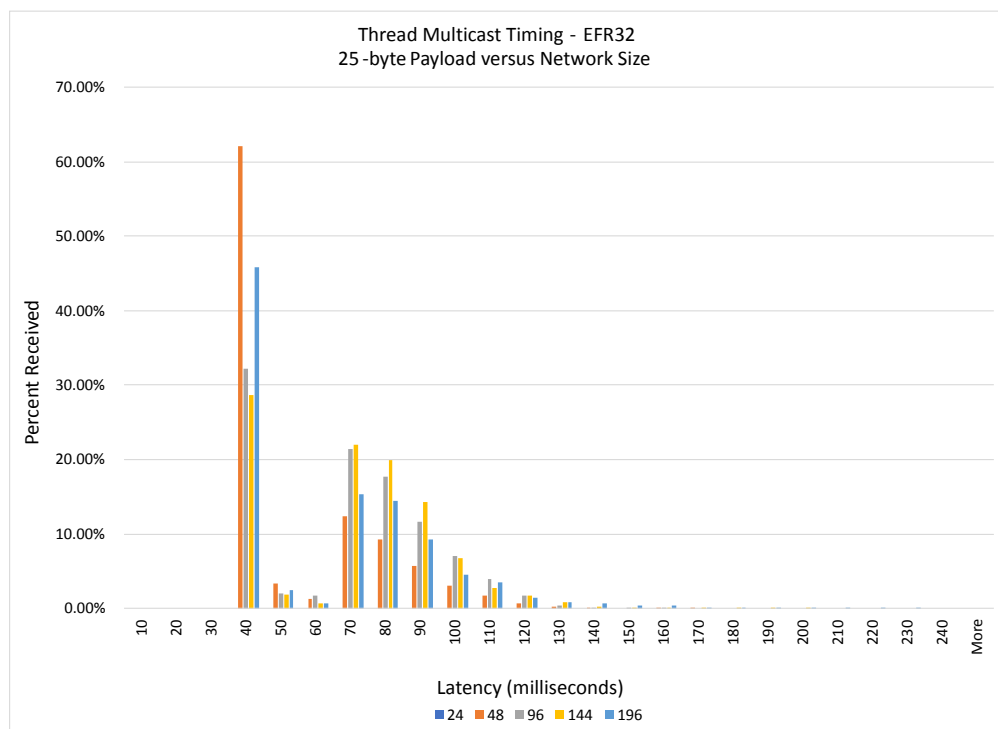


Figure 4.3. Thread 多播时间 - EFR32 25 字节有效荷载与网络大小

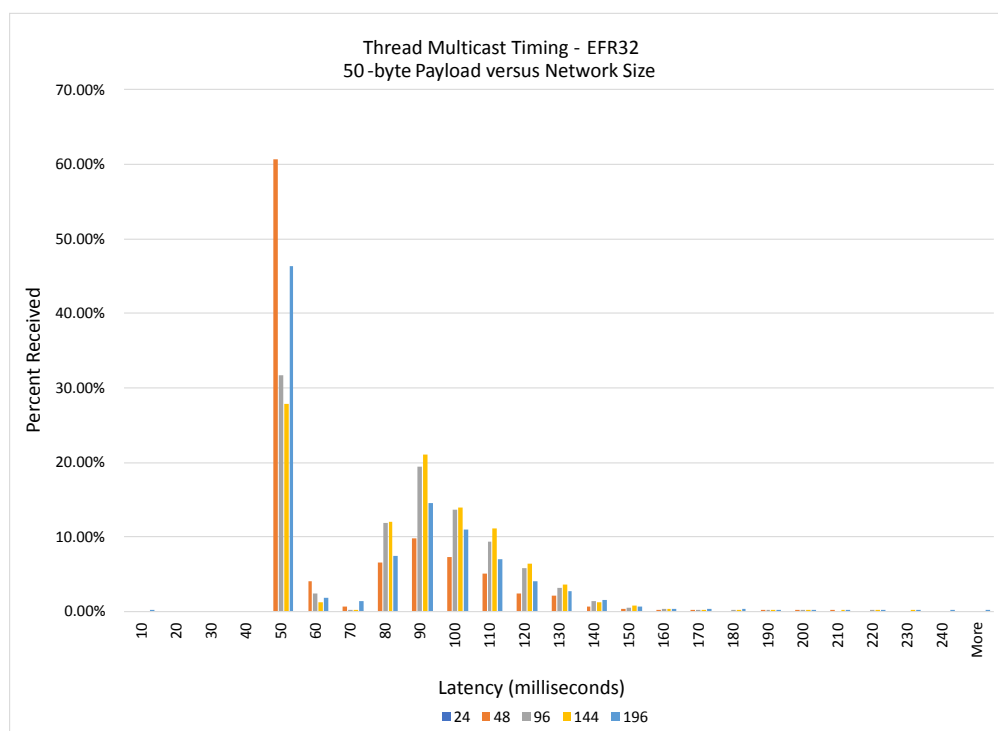


Figure 4.4. Thread 多播时间 - EFR32 50 字节有效荷载与网络大小

这些结果中值得注意的地方：

- 我们看到 Thread 网络行为对于各种网络大小都非常一致，并且延迟随数据包大小的增加而增加。
- Thread 延迟不会随着网络大小的增加而变大。这是预料中的，这是因为路由器较少，所以网络拥塞较少。
- 在多播性能方面，Thread 一般比 Zigbee 略快，特别是在网络大小增加后。
- 这些测试都显示 100% 的可靠性，但下面的较大规模测试显示了网络可靠性。
- 我们以 3 秒为间隔进行测试，以与上述 Zigbee 结果一致。Thread 上较短的时间间隔未表现出不同的性能，因此我们运行了下面讨论的可靠性扩展测试，以 0.5 秒的广播间隔显示这些结果。

5. 摘要

Thread 表现出优异的可靠性且延迟低于通常人类与设备互动所需的 200 毫秒时间。即使在多播、大型网络条件下，Thread 网络也能每隔 0.5 秒处理流量并保持延迟和可靠性。因为网络层有灵活的路由器配置，所以即使网络规模扩大，Thread 的网络行为也几乎没有变化。这是预料中的，因为该设备是更新的架构、以更高的时钟速度运行，并有更多的 RAM 用于数据包处理。随着数据包有效荷载的增加，网络中的延迟也会增加，但这在测试 5、25 和 50 字节的有效荷载时影响较小。

5.1 后续测试注意事项

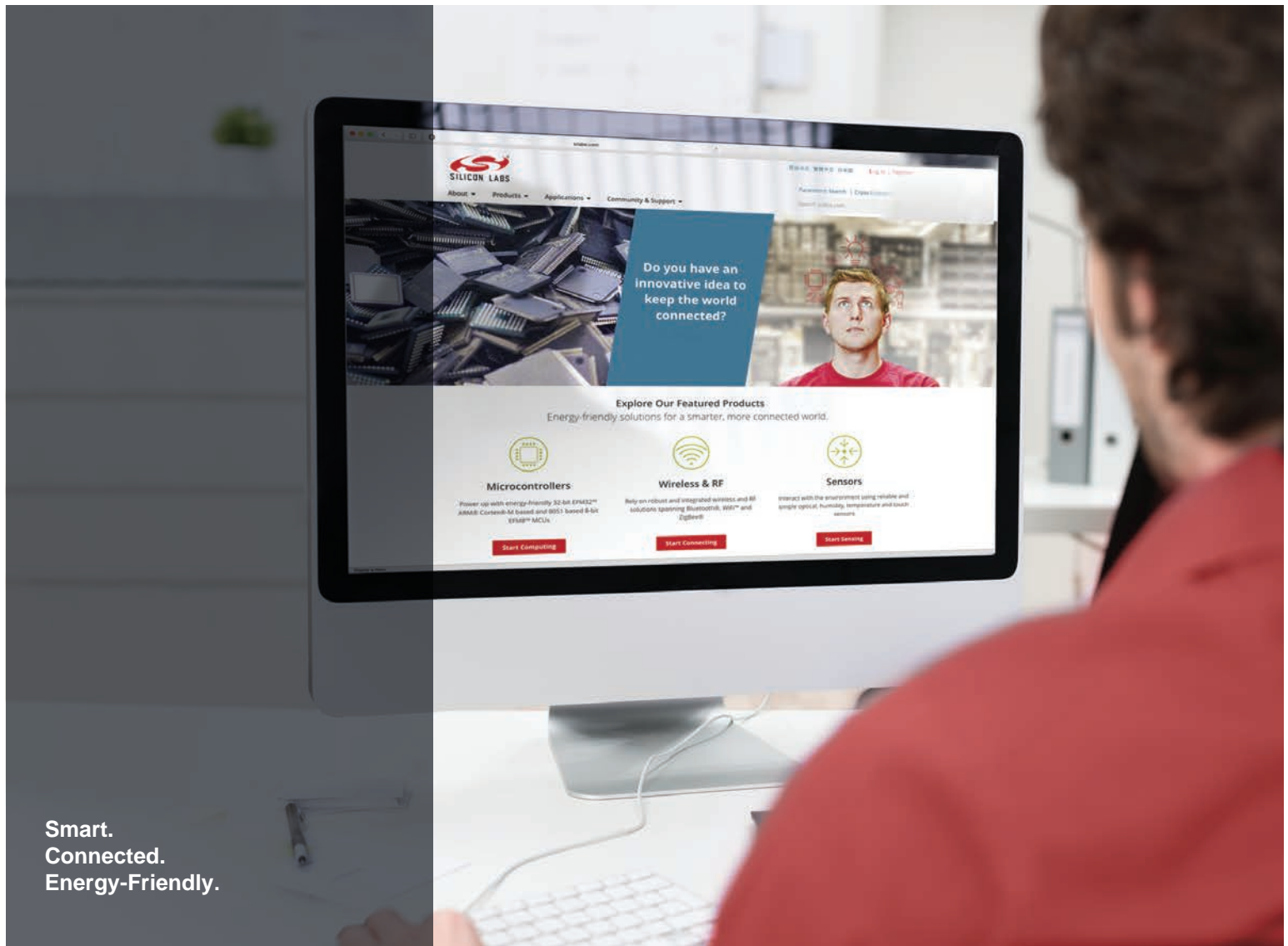
本应用指南中描述的测试需要进行后续测试，以进一步定义设备行为和网络运行。为后续测试记录了以下具体项目：

1. 这些测试中可以添加故障测试以评估恢复时间和对可靠性的影响，方法是将节点从网络中删除。
2. 测试应使用在片上系统和网络协处理器 (NCP) 模式下运行的不同设备类型执行。先前的测试发现这些运行模式之间的一些差异，因此应进一步表征。

5.2 相关文献

本应用指南提供了有关 Thread 网状网络的信息。有关 Bluetooth 和 Zigbee 网状网络的信息以及所有三种技术的比较，请参阅以下应用说明：

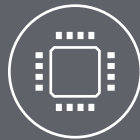
- [AN1137: Bluetooth 网络性能](#)
- [AN1138: Zigbee 网状网络性能](#)
- [AN1142: 网状网络性能对比](#)



Smart.
Connected.
Energy-Friendly.



Products
www.silabs.com/products



Quality
www.silabs.com/quality



Support and Community
community.silabs.com

Disclaimer

Silicon Labs intends to provide customers with the latest, accurate, and in-depth documentation of all peripherals and modules available for system and software implementers using or intending to use the Silicon Labs products. Characterization data, available modules and peripherals, memory sizes and memory addresses refer to each specific device, and "Typical" parameters provided can and do vary in different applications. Application examples described herein are for illustrative purposes only. Silicon Labs reserves the right to make changes without further notice to the product information, specifications, and descriptions herein, and does not give warranties as to the accuracy or completeness of the included information. Without prior notification, Silicon Labs may update product firmware during the manufacturing process for security or reliability reasons. Such changes will not alter the specifications or the performance of the product. Silicon Labs shall have no liability for the consequences of use of the information supplied in this document. This document does not imply or expressly grant any license to design or fabricate any integrated circuits. The products are not designed or authorized to be used within any FDA Class III devices, applications for which FDA premarket approval is required, or Life Support Systems without the specific written consent of Silicon Labs. A "Life Support System" is any product or system intended to support or sustain life and/or health, which, if it fails, can be reasonably expected to result in significant personal injury or death. Silicon Labs products are not designed or authorized for military applications. Silicon Labs products shall under no circumstances be used in weapons of mass destruction including (but not limited to) nuclear, biological or chemical weapons, or missiles capable of delivering such weapons. Silicon Labs disclaims all express and implied warranties and shall not be responsible or liable for any injuries or damages related to use of a Silicon Labs product in such unauthorized applications.

Trademark Information

Silicon Laboratories Inc.®, Silicon Laboratories®, Silicon Labs®, SiLabs® and the Silicon Labs logo®, Bluegiga®, Bluegiga Logo®, ClockBuilder®, CMEMS®, DSPLL®, EFM®, EFM32®, EFR®, Ember®, Energy Micro, Energy Micro logo and combinations thereof, "the world's most energy friendly microcontrollers", Ember®, EZLink®, EZRadio®, EZRadioPRO®, Gecko®, Gecko OS, Gecko OS Studio, ISOModem®, Precision32®, ProSLIC®, Simplicity Studio®, SiPHY®, Telegesis, the Telegesis Logo®, USBXpress®, Zentri, the Zentri logo and Zentri DMS, Z-Wave®, and others are trademarks or registered trademarks of Silicon Labs. ARM, CORTEX, Cortex-M3 and THUMB are trademarks or registered trademarks of ARM Holdings. Keil is a registered trademark of ARM Limited. Wi-Fi is a registered trademark of the Wi-Fi Alliance. All other products or brand names mentioned herein are trademarks of their respective holders.



Silicon Laboratories Inc.
400 West Cesar Chavez
Austin, TX 78701
USA

<http://www.silabs.com>