

AN1137: *Bluetooth*® 网状网络性能



本应用指南详细介绍了测试 Bluetooth 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 Bluetooth 网状网络在性能和行为方面与其他网状网络的不同。使用能够运行 Bluetooth Mesh 和专有协议的 Silicon Labs Bluetooth Mesh 软件和 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) 办公室中的无线测试网络。
- 评估了无线条件和环境。
- 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。

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。此前已针对 Zigbee 和 Thread 网络提出了这种测试，作为基本的 15.4 网状网络技术。提出这些是因为，即使两个系统使用 IEEE 802.15.4 定义的相同的底层物理层，性能也会有所不同。随着 Bluetooth 网状网络的出现，Bluetooth 网状网络与这些 15.4 网状网络的预期性能差异相关问题也会很常见。讨论测试和性能差异之前，我们需要回顾这些网络的基础技术，以便更好地理解它们的性能差异。

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。

Bluetooth 低功耗使用的是 BT 4.x 规范，33 字节数据包和 1 Mbps 的底层数据速率。Bluetooth Mesh 数据包大小如下图所示，产生一个 12 或 16 字节的有效荷载。对于 12 字节以上的有效荷载，有一个分段和重组的过程。

Bluetooth Mesh 有更高的数据速率，但数据包有效荷载较小；因此，它需要更多的数据包才能发送相同数量的数据。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。Bluetooth Mesh 专门设计了网状配置文件（应用层）以减少数据包有效荷载，尽量将其装到单个数据包。

	1		1	3	2	2	12 or 16	4 or 8
≧	Network ID	TTL	TTL	Sequence Number	Source Address	Dest Address	Packet Payload	NWK MIC

Figure 1.1. Bluetooth Mesh 数据包格式

1.2 网络路由差异

Bluetooth Mesh 使用托管的泛洪技术中继消息代替路由。这意味着 Bluetooth Mesh 不是构建、维护和使用定义的路由来发送消息，而是使用以下两条简单规则中继消息：

1. 每条消息都有一个独立的序号。
2. 中继跟踪最近看到的序列号，不中继它们之前看到或转发过的消息。

这些消息还有一个生存时间计数器 (TTL)，每次消息被中继时，计数器都会减一，直到它达到一个值，表示它不应再被中继。

因为网络级未使用确认，所以 Bluetooth Mesh 中继可配置为多次重复相同的消息，从而因空中接口数据包丢失而实现更高的可靠性。通常这个值设置为 3，因此每个中继对同一消息重复三次。另外，使用了可配置的重复延迟来优化延迟和网络性能。重复之间的最小延迟称为重传间隔 = (中继重传间隔步长 + 1) * 10ms + 0-10ms 随机延迟，通常为每跳 15 毫秒。

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 审查其他基准

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 发表过对比网络性能的此类论文。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。

在 Ericsson 于 2017 年 7 月 22 日编写白皮书“Bluetooth 网状网络”中，Ericsson 指出 Bluetooth Mesh 在低流量和中继部署稀疏的条件下表现令人满意。但是，此论文是根据模拟而非实际网络测试得出的，所以目前还不清楚结果能否用于现实世界。有关更多信息，请参阅 Ericsson 白皮书中的结果：
<https://www.ericsson.com/en/publications/white-papers/bluetooth-mesh-networking>

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：

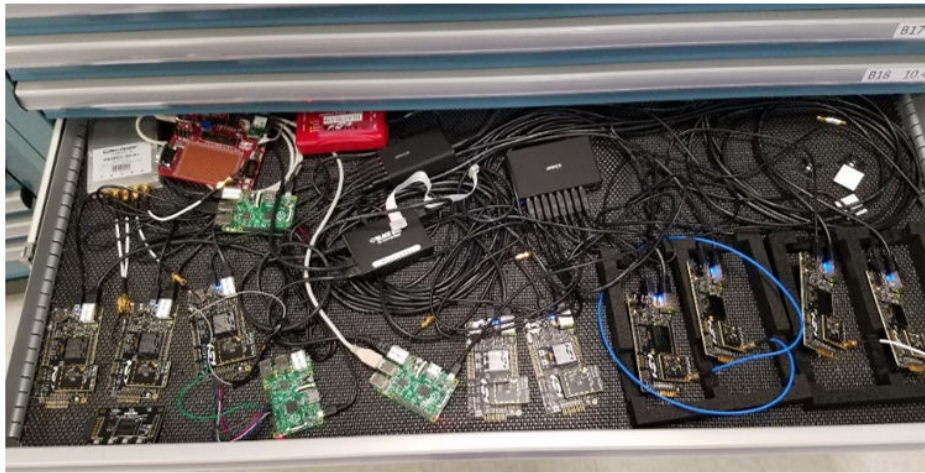


Figure 3.1. 抽屉中带分线器和同轴电缆连接的有线 RF 设备

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

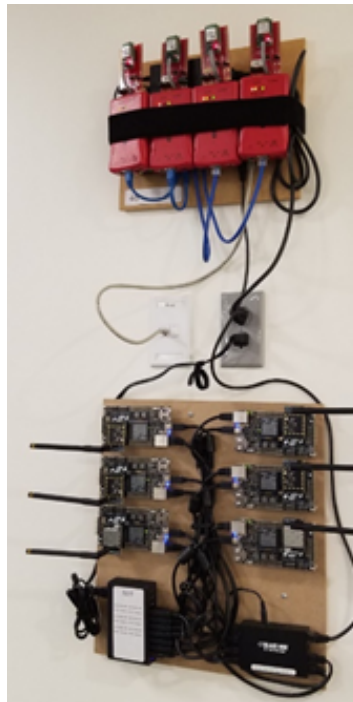
Silicon Labs R&D 设施包含一个带电梯井的中央核心，其他服务在大楼西端并有开放式平面图，办公室和会议室位于东端。整个设施占地约 120 英尺乘 200 英尺。下图显示了设施布局。较深的线代表坚硬的墙壁，其他所有部分都使用立方体分隔。



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



Four EM35x Devices using PoE

Six EFR32MG (Mighty Gecko) Devices

Multi-band support to allow testing both
2.4 GHz (PCB antenna) and proprietary sub-GHz
protocols (external antenna)

USB power and Ethernet connectivity

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
- EFR32™ Mighty Gecko 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。

3.3 典型测试网络

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节点的连接和强度。

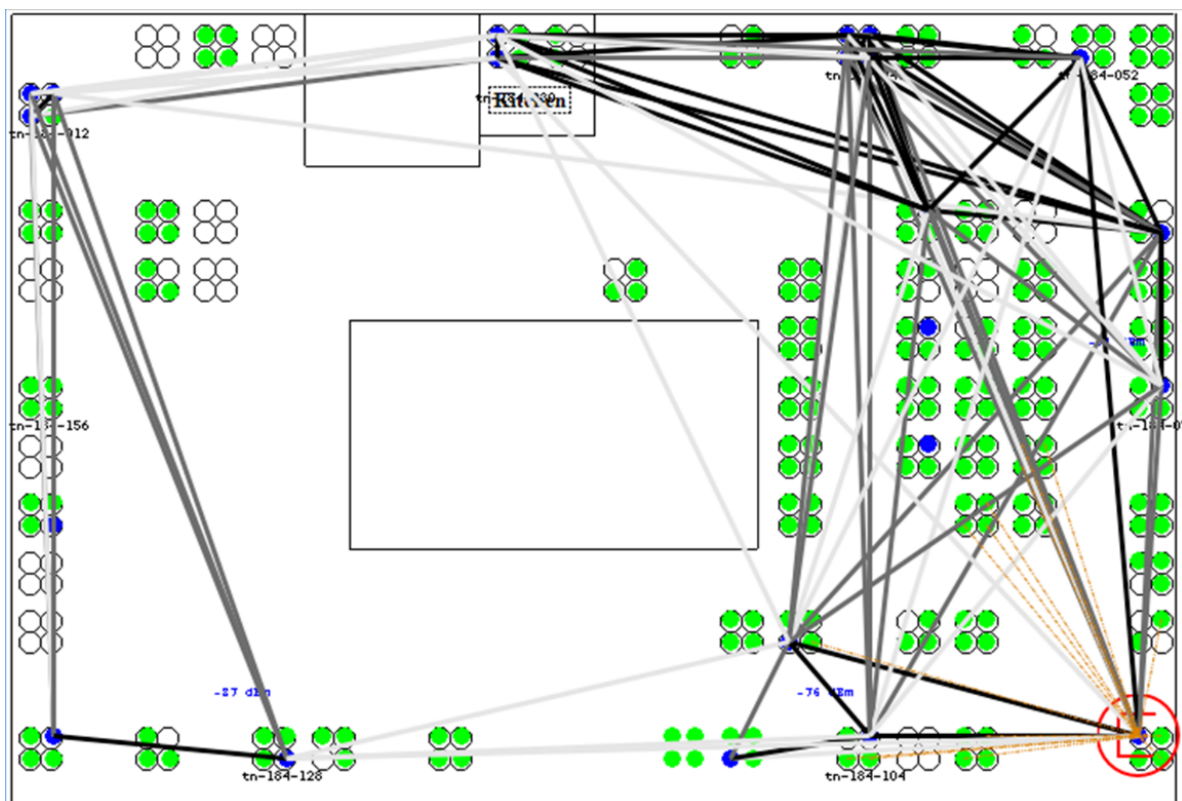


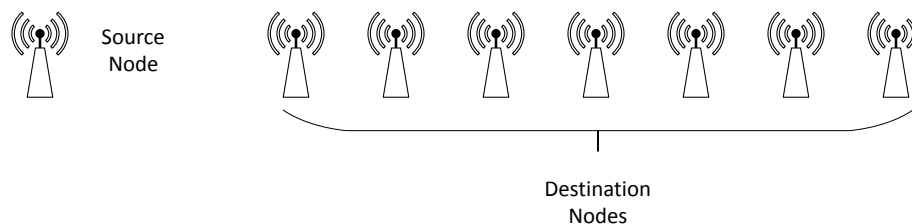
Figure 3.6. 测试过程中的典型网络

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荷载下的跳频。

正常配置是测试 6 个跳频。测试是使用一个源节点和一系列中继节点完成的，以便更改跳频数量。



该测试是使用以下配置完成的：

1. 测试应用已配置为使用三 (3) 个网络级重复
 - 所使用的网络级重复间隔为 10 ms。
2. 测试应用已配置为使用三 (3) 中继重复
 - 所使用的中继重复间隔为 10 ms。
3. 发送的带确认的应用消息
4. 对于延迟测试，数据包有效荷载从 8 字节到 128 字节
5. 测试使用安全设置
6. 从 1 到 6 跳
7. 测量往返延迟（源到目的地到源），以毫秒为单位

在传输层使用 Bluetooth Mesh 时，我们只能发送 11 个字节或更小有效荷载的未分段数据包。高于 11 字节的结果使用分段消息。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 Bluetooth Mesh 多跳延迟

以下图表中显示的时间是测量的往返时间。请注意，未分段的消息只能用于较小的载荷，而分段的消息已测试到 128 字节的有效载荷。这些差异导致图形的格式不同。

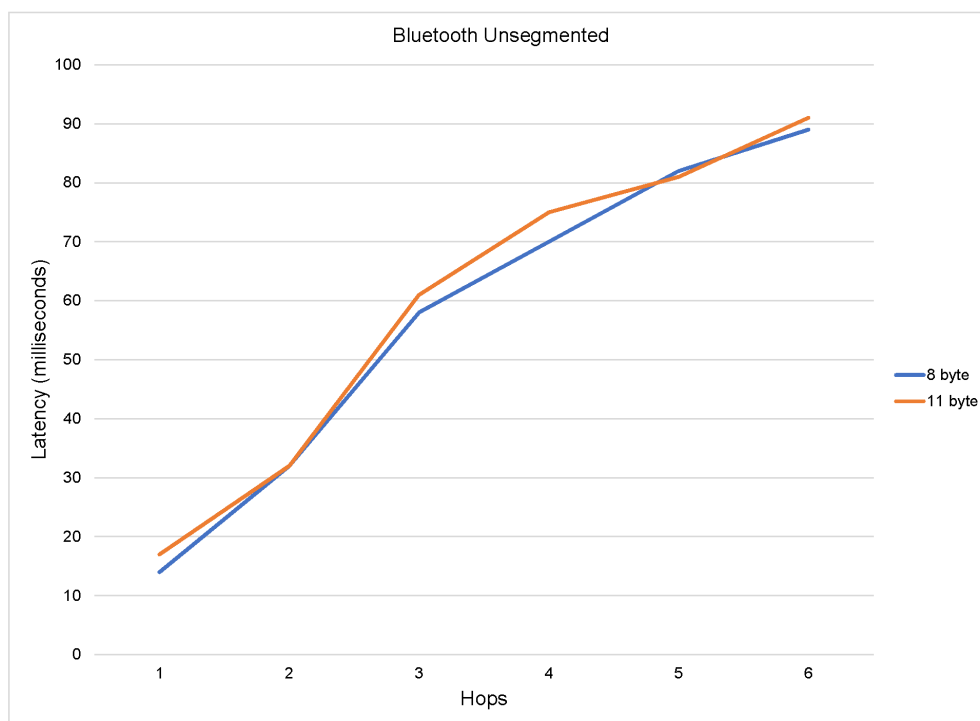


Figure 4.1. Bluetooth 未分段

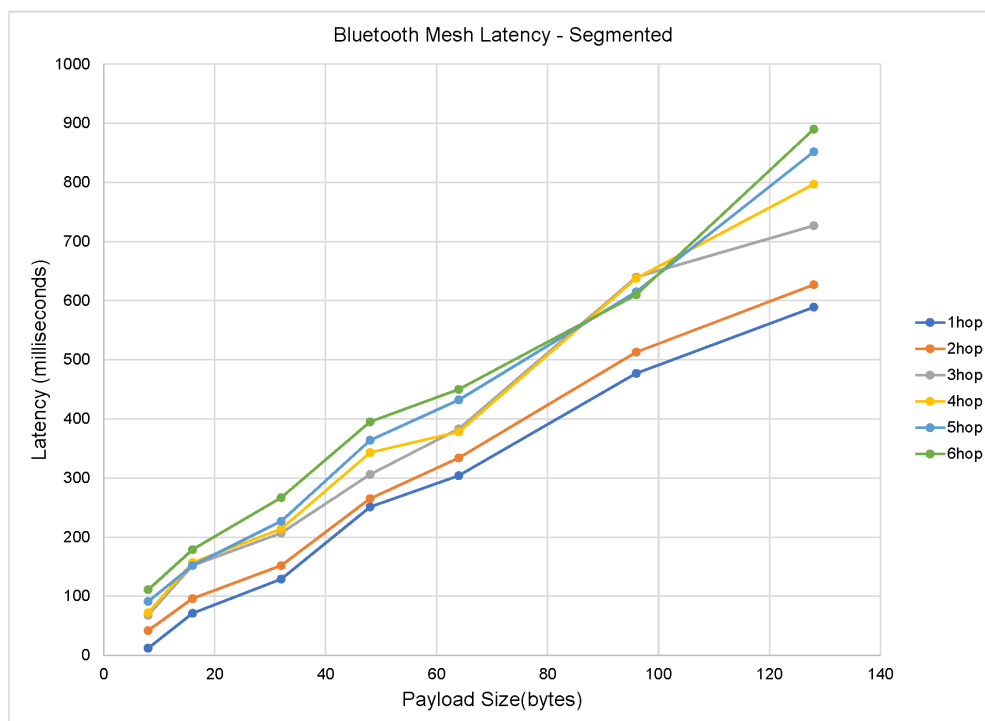


Figure 4.2. Bluetooth Mesh 延迟 - 分段

4.1.2 小有效载荷对比

Bluetooth Mesh 中的分段和未分段消息之间存在一些差异。下图显示了可以运行两种消息类型的小有效载荷情况下的差异。

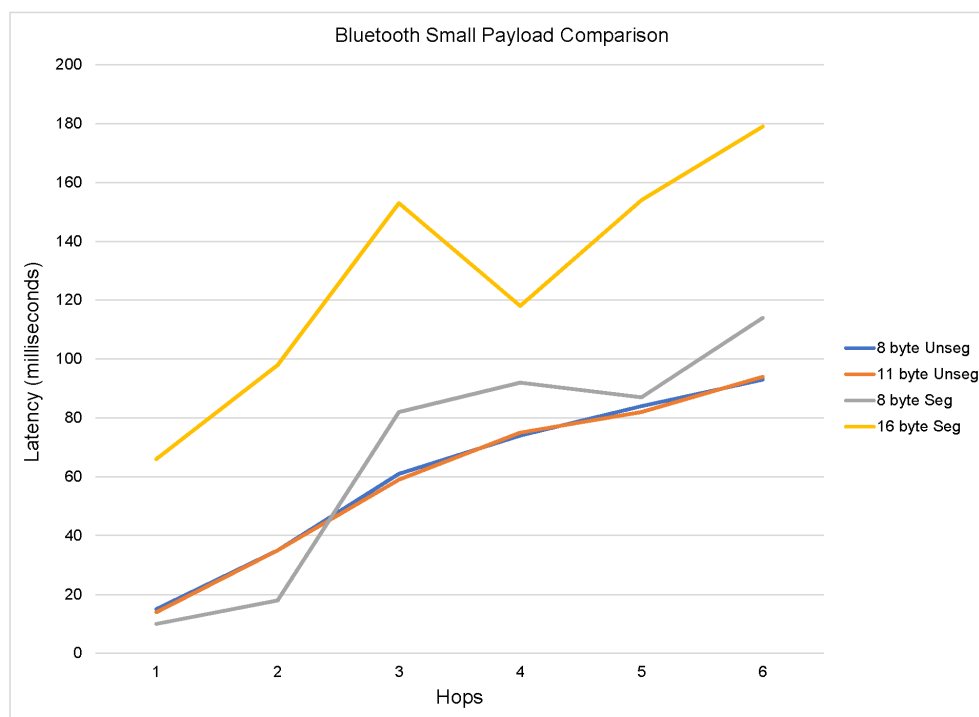


Figure 4.3. Bluetooth 小有效载荷对比

在这个多跳延迟测试中有多个值得注意的地方。

- 对于小有效载荷，未分段和分段消息之间没有很大差异。
- 为了使 6 跳内的往返延迟低于 200 毫秒，必须将有效载荷保持在 16 字节或更少。

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 +/- 10% 范围内的具体设备数量都是可接受的。

这些网络均配置为供电设备，除非有特定的低功耗设备测试。

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 个数据包，但也可可靠性测试使用更多的数据包。

4.2.1 Bluetooth Mesh 大型网络测试结果

因为 Bluetooth Mesh 是泛洪网格，所以网络规模增加后可能会有延迟和可扩展性方面的问题。下图显示了各种网络规模中的多个数据包有效荷载的延迟情况。注意 8 字节有效荷载可装到一个数据包中，但所有其他有效荷载都需要多个数据包。

下图中的值表示单向延迟时间。

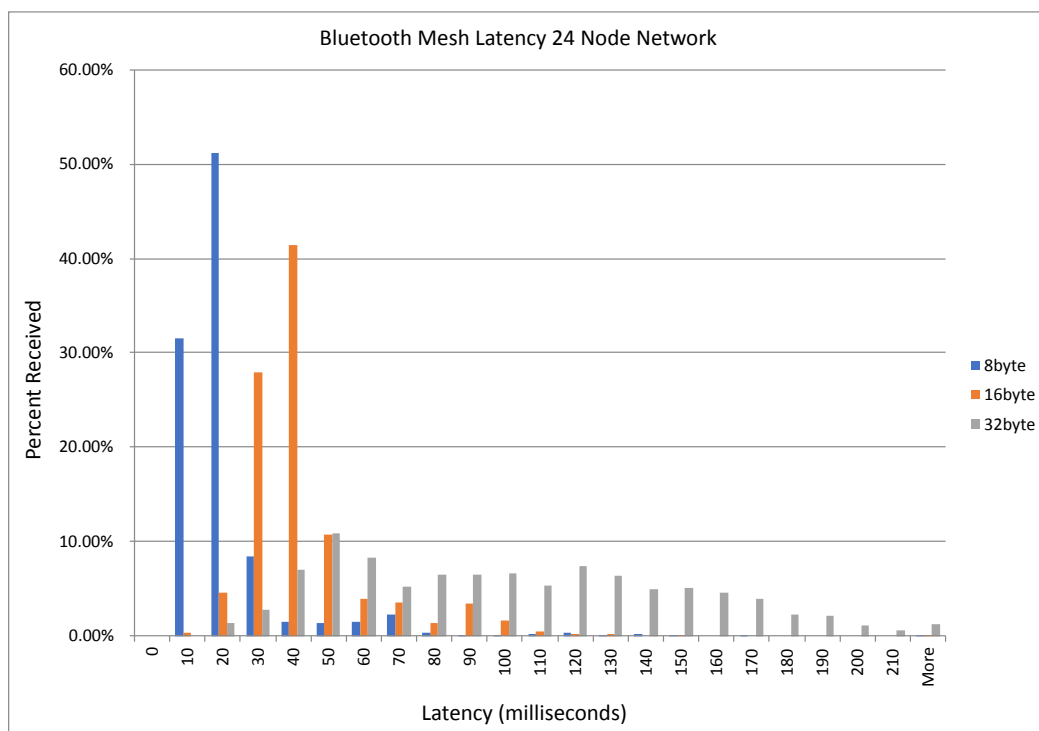


Figure 4.4. Bluetooth Mesh 延迟 24 节点网络

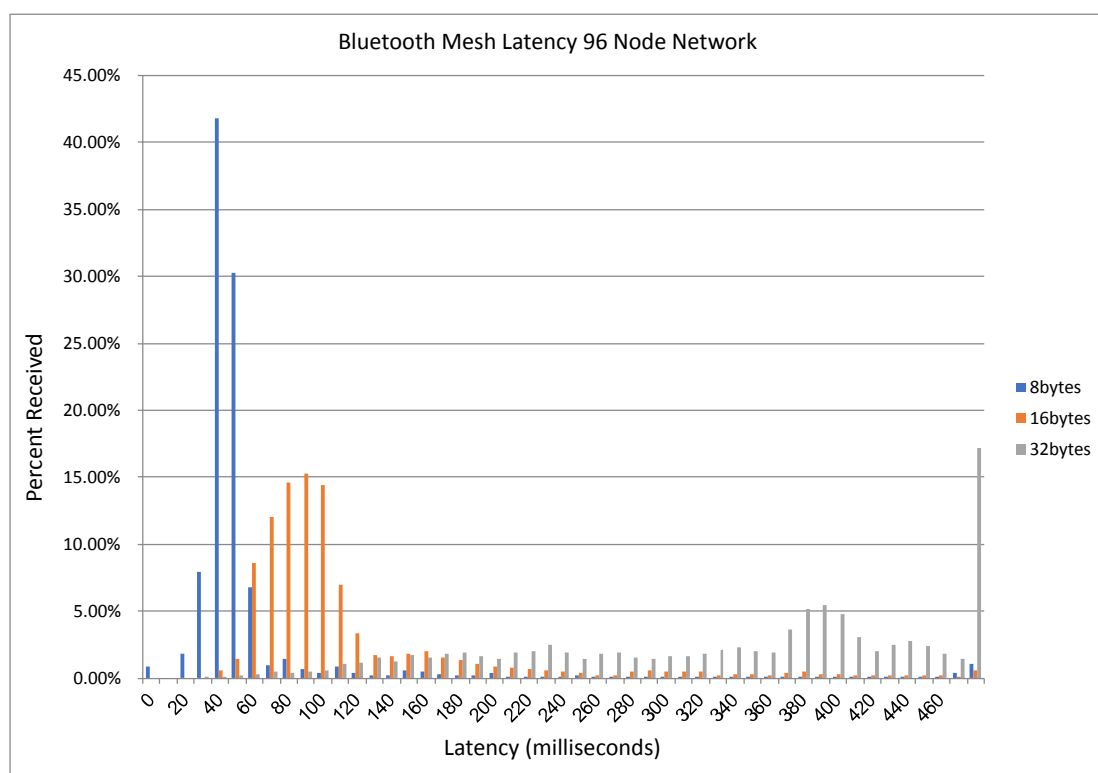


Figure 4.5. Bluetooth Mesh 延迟 96 节点网络

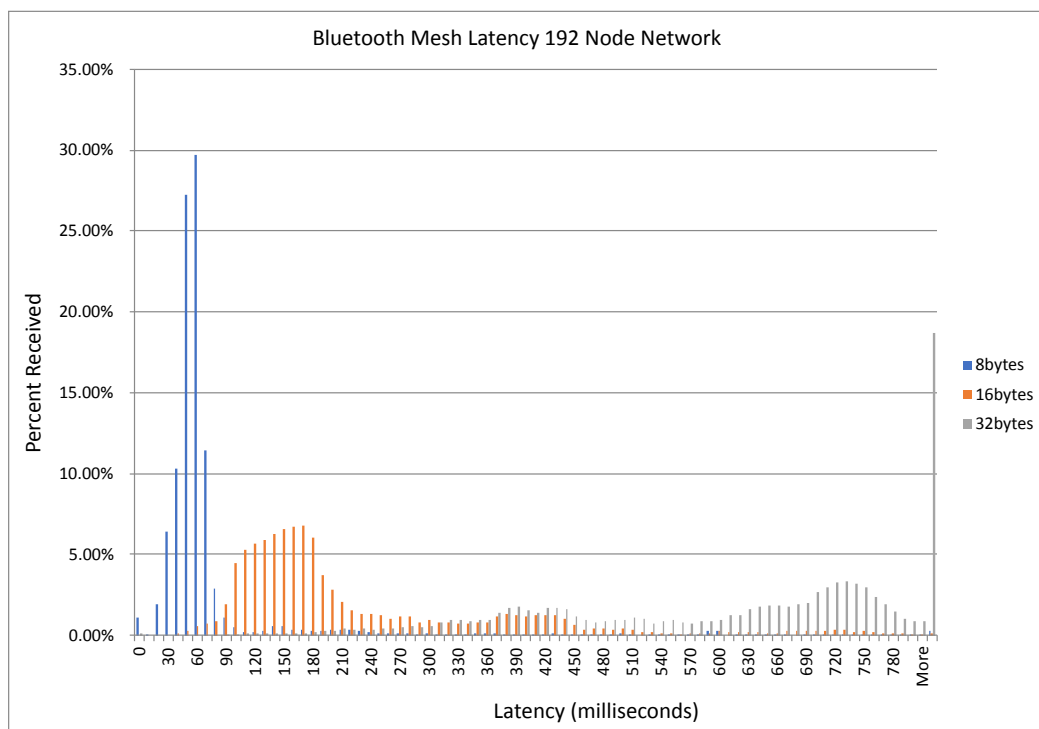


Figure 4.6. Bluetooth Mesh 延迟 192 节点网络

这些测试显示了一些有趣的内容：

- 随着网络规模的增加，即使是 8 字节包的平均延迟也会增加。对于 8 字节数据包，即使通过 192 节点的网络，延迟通常也很低，但部分要接收的消息的尾部确实较长。
- 随着网络规模的增加，延迟会增加并且扩散。随着网络规模的增加，我们增加了延迟等级，以更好地显示数据。
- 将数据包有效荷载从 8 个增加到 16 个到 32 个字节时，延迟增加了很多并且扩散。

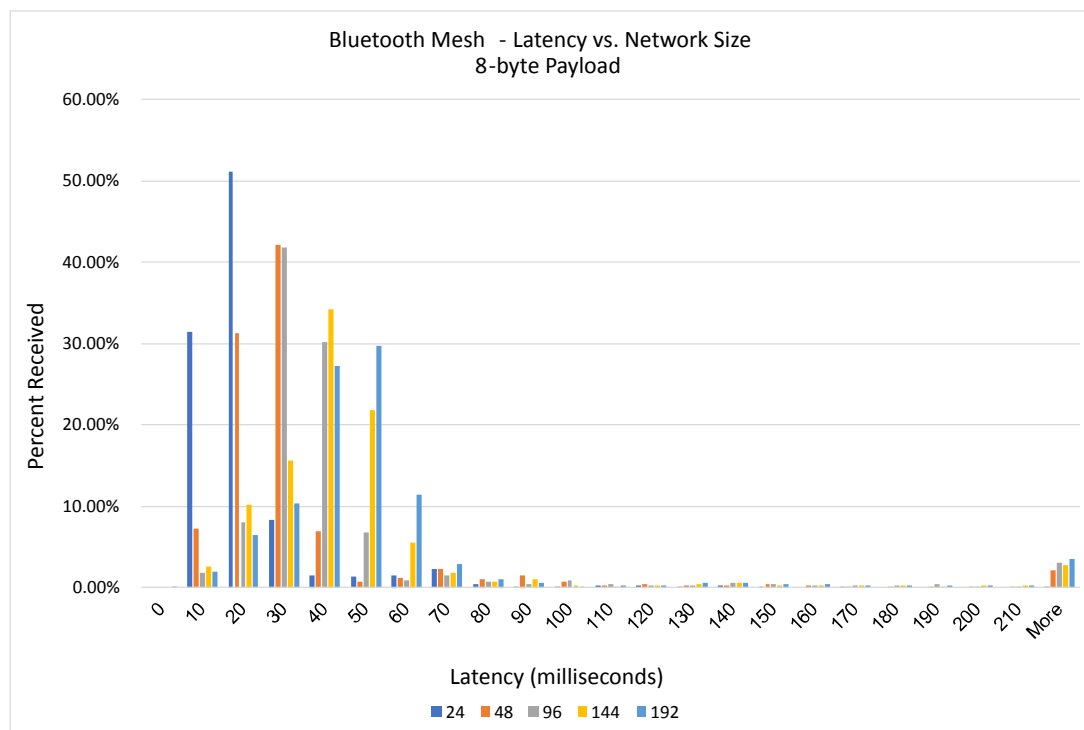


Figure 4.7. Bluetooth Mesh - 延迟相对网络大小，8 字节有效荷载

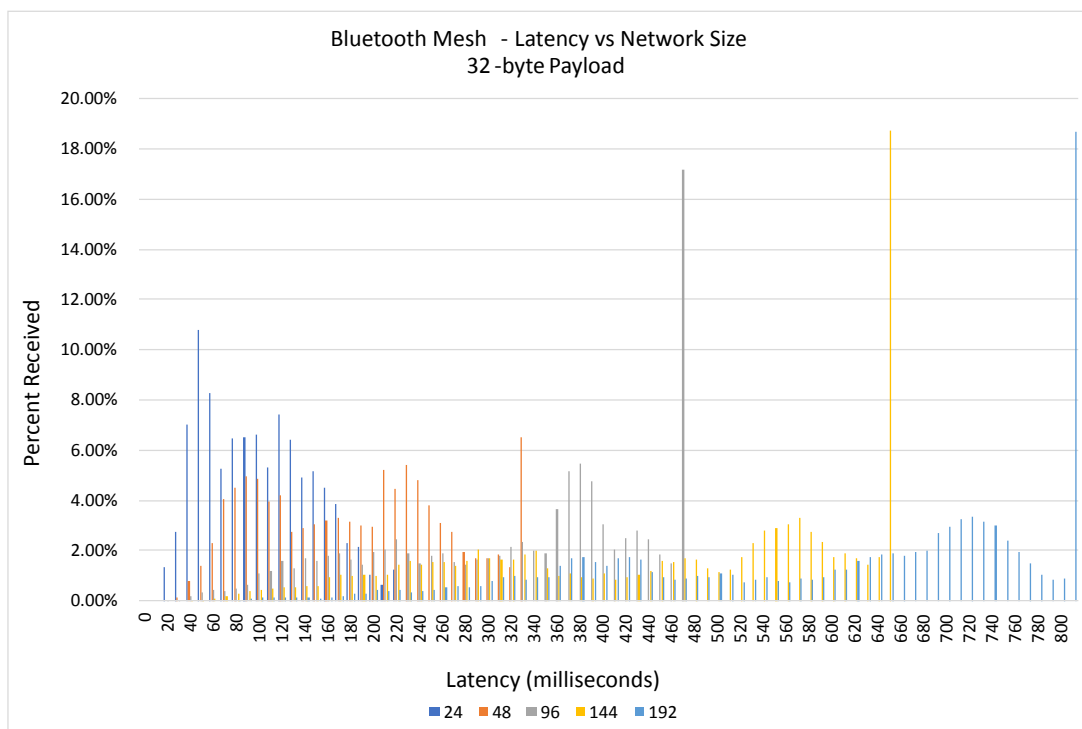


Figure 4.8. Bluetooth Mesh - 延迟相对网络大小，32 字节有效荷载

上图显示，对于 8 字节有效荷载，随着网络规模的增加，延迟也会增加和扩散。但是，这种增加比使用 32 字节有效荷载时小得多。

为了更好地评估网络规模和中继数量的影响，使用了一个 240 节点的网络，并使所有或者 6 分之 1 的设备作为中继。这个测试是用 8 字节有效荷载完成的，以便将其保存在单个数据包中。结果如下：

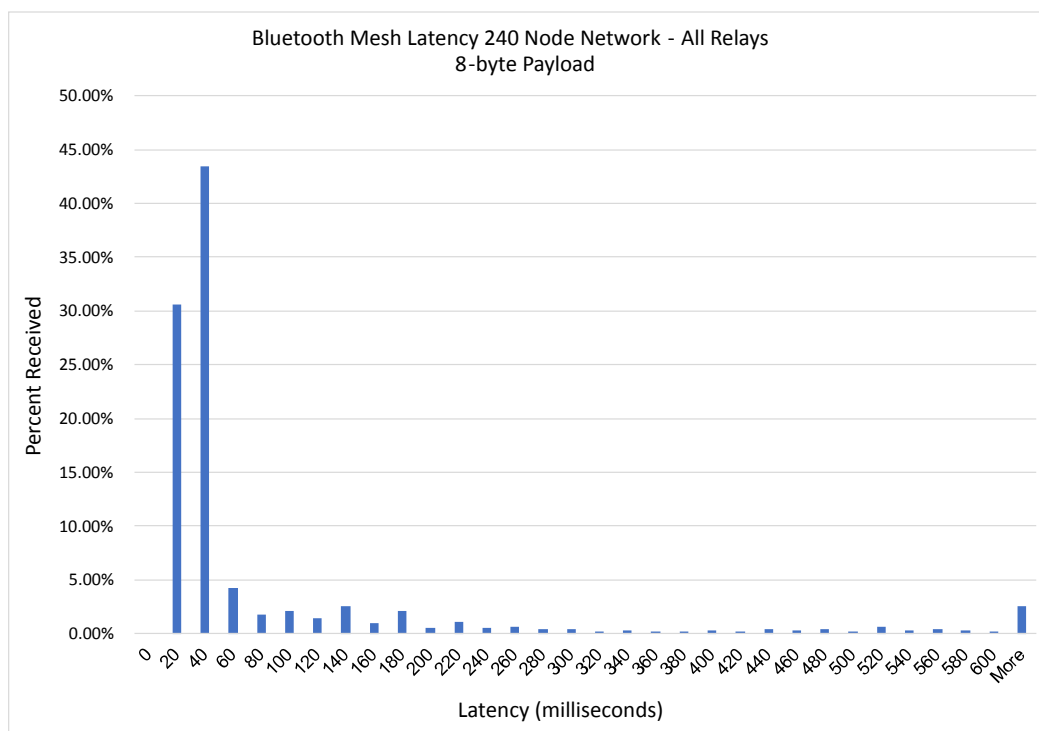


Figure 4.9. Bluetooth Mesh 延迟 240 节点网络 - 全部中继，8 字节有效荷载

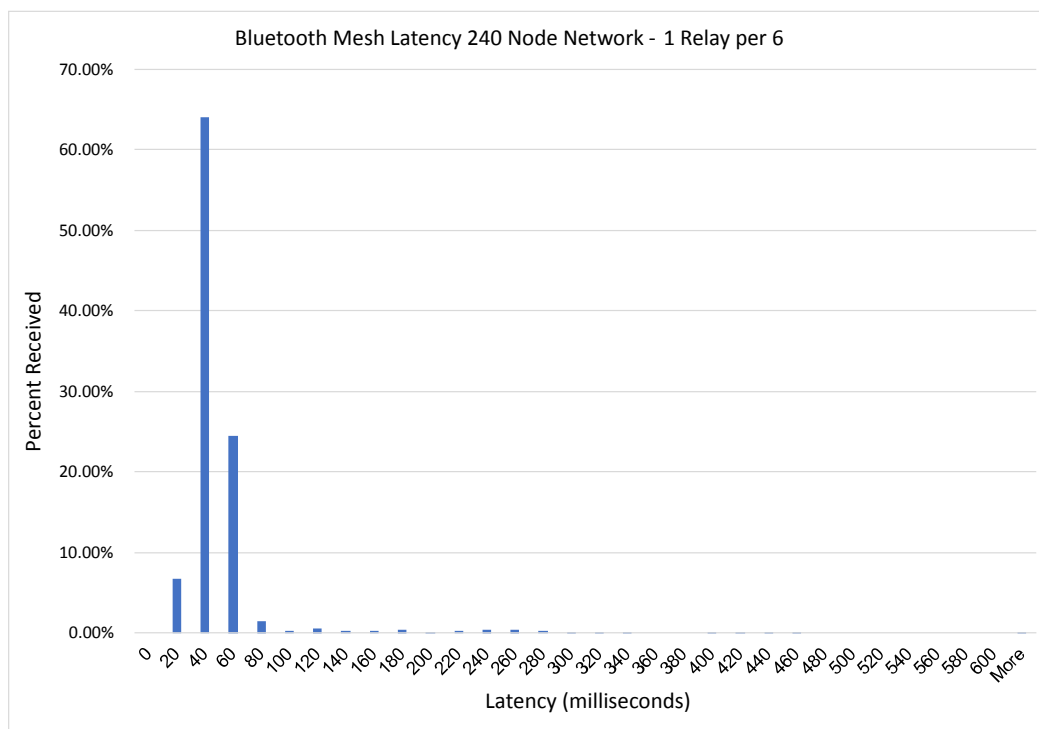


Figure 4.10. Bluetooth Mesh 延迟 240 节点网络 - 每 6 个 1 个中继

这些结果显示了与 [2.1 审查其他基准](#) 部分中 Ericsson 模拟相似的影响。减少中继数量可减少网络拥塞并减少整体延迟以及到达时间的扩散。请注意，在所有设备作为中继的测试中，200 毫秒后收到 10.21% 的消息，而当中继减少到 6 个设备中的 1 个时，200 毫秒后只收到 1.44% 的消息。

5. 摘要

将有效荷载包含在单个数据包中时，Bluetooth Mesh 性能测试的延迟表现出色。吞吐量结果显示，如果有效荷载小于 16 字节，延迟可在 6 跳内维持在 200 毫秒以下。

对于较大的网络，随着网络中节点数量的增加或数据包有效荷载的增加，延迟也会增加。相比有效荷载大小，网络规模对延迟的影响较小，后者可能导致延迟大幅增加。对于大型网络，减少网络中的中继数量可以提供更好的结果。

运行这些结果时这些网络的可靠性大于 99%。

为了在 Bluetooth Mesh 应用中获得低延迟和高可靠性：

- 应用有效荷载应适合一个数据包。
- 需要多播消息的应用不应该使用分段消息。
- 网络规模和跳频数量增加后，中继选择成为网络性能的关键。

5.1 后续测试注意事项

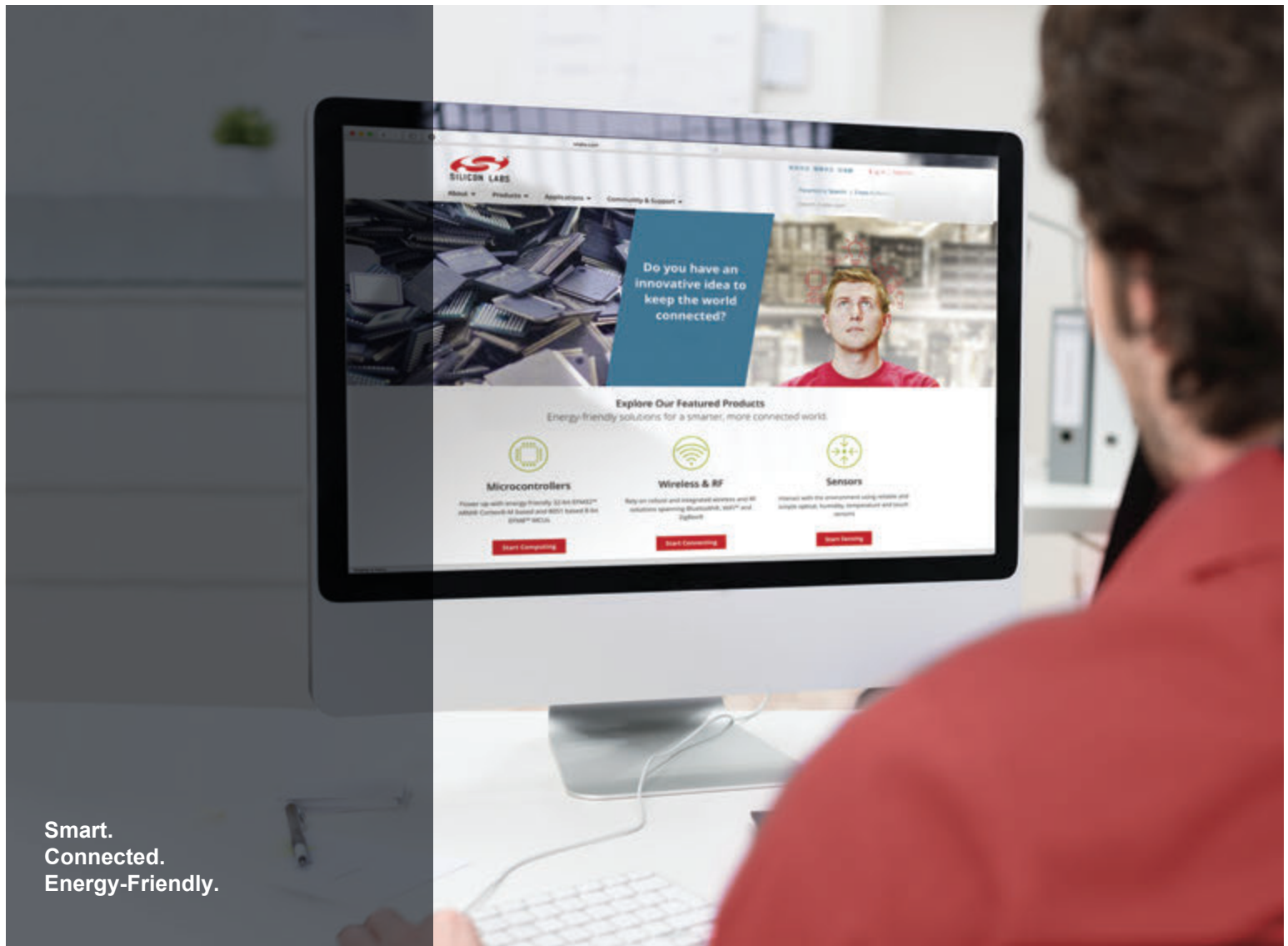
本应用指南中描述的测试需要进行后续测试，以进一步定义设备行为和网络运行。为后续测试记录了以下具体项目：

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 Bluetooth 网状网络的信息。有关 Zigbee 和 Thread 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：

- [AN1138: Zigbee 网状网络性能](#)
- [AN1141: Thread 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 and limitation to product information, specifications, and descriptions herein, and does not give warranties as to the accuracy or completeness of the included information. Silicon Labs shall have no liability for the consequences of use of the information supplied herein. This document does not imply or express copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits. The products are not designed or authorized to be used within any Life Support System 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.

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®, ISOmodem®, Micrium, Precision32®, ProSLIC®, Simplicity Studio®, SiPHY®, Telegesis, the Telegesis Logo®, USBXpress®, Zentri, 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. 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>