

Product Overview

TI Wi-SUN® FAN 堆栈 - 软件概述



摘要

TI Wi-SUN® 软件概述介绍了德州仪器 (TI) 基于 TI Wi-SUN® FAN 1.0 实施的总体 Wi-SUN® FAN 软件内容和支持生态系统。本文档简要概述了 Wi-SUN® FAN 软件的特性和功能，但未介绍具体细节。有关 API 和实现细节的更多信息，请参阅 [Wi-SUN® 开发人员指南](#)和 [SIMPLELINK-LOWPOWER-F2-SDK](#)。

内容

1 首字母缩写词.....	2
2 概述.....	2
3 参考示例.....	3
4 射频协议 - Wi-SUN® PHY.....	5
5 软件方框图.....	5
6 网络拓扑及特性.....	5
7 安全性.....	7
7.1 证书管理.....	8
7.2 密钥交换过程.....	8
8 性能和测试数据.....	8
8.1 延迟测试.....	9
8.2 加入时间测试.....	9
8.3 OAD 测试.....	9
9 开箱即用体验.....	9
10 培训.....	10
11 工具.....	10
11.1 Code Composer Studio™ IDE.....	10
11.2 SysConfig.....	10
11.3 数据包监听器.....	10
11.4 TI Wi-SUN® FAN Spinel.....	10
11.5 TI wfantund - 用户空间网络接口驱动程序.....	10
12 已知局限性.....	11

商标

LaunchPad™, and SimpleLink™ Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

Wi-SUN® is a registered trademark of Wi-SUN Alliance.

Microsoft® and Windows® are registered trademarks of Microsoft Corporation.

Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds.

macOS® is a registered trademark of Apple Inc..

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 首字母缩写词

本产品概述使用以下首字母缩写词：

- BR - 边界路由器
- CA - 证书颁发机构
- CLI - 命令行界面
- CoAP - 受限应用协议
- FAN - 现场局域网
- GTK - 组瞬态密钥
- IETF - 互联网工程任务组
- IPv6 - 互联网协议版本 6
- NWP - 网络处理器
- OAD - 无线下载
- PKI - 公钥基础设施
- PMK - 成对主密钥
- PTK - 成对瞬态密钥
- RFC - 请求注解
- RN - 路由器节点 (也称为嵌入式路由器)
- RTOS - 实时操作系统
- UDP - 用户数据报协议

2 概述

Wi-SUN® 是基于标准的具有跳频功能的网状网络。Wi-SUN® 联盟 (wi-sun.org) 拥有来自 46 个国家/地区的 300 多个成员，在全球部署了 1 亿多台设备。Wi-SUN® 支持 IPv6 协议组和基于标准的多层安全性。该标准支持多种数据速率和频带，可满足全球不同的监管要求。应用包括智能电网和智能城市应用，且经认证的产品支持多供应商互操作性。

德州仪器 (TI) 的 Wi-SUN® FAN 1.0 基于在符合 Wi-SUN® 标准的 TI 15.4 Stack 之上集成的开源 IETF RFC 组件。提供的网络接口作为 TI Wi-SUN FAN Spinel 客户端接口或 TI wfantund Linux 网络接口。客户通常使用 UDP 作为传输层在 IPv6 之上开发应用。

TI 的 Wi-SUN® FAN v1.0.0 设计针对较小的存储器占用空间进行了优化，以适应嵌入式器件，此外还针对低功耗操作进行了优化。软件栈的集成和测试是在已标记的、经过认证的版本中完成的。

表 1. 软件概述

元件	版本
TI Wi-SUN® FAN	1.0
经销商	作为库代码包含在用于 CC13x2 和 CC13x4 器件的 SDK8.30 中
IDE 支持	适用于 Microsoft® Windows® 10、Linux® 和 macOS® 的 CCS v 12.8 或 CCS 1.5
编译器支持	TI Clang 3.2.2 LTS
RTOS 支持	TI-RTOS、Free RTOS
支持的器件	边界路由器：CC1312R7、CC1352P7、CC1314R10、CC1354R10、CC1354P10 路由器节点：CC1312R、CC1312PSIP、CC1352R、CC1352P、CC1312R7、CC1352P7、CC1314R10、CC1354R10、CC1354P10
推荐的开发套件	边界路由器：个人计算机 (PC) 主机 + CC1352P7 LaunchPad™ 开发套件或 CC1354P10 LaunchPad™ 路由器节点：CC1352P LaunchPad™ 或 CC1354P10 LaunchPad™

TI 已通过 Wi-SUN® 联盟认证了多个 FAN 配置文件，可在 CC13x2x 以及 CC13x4x10 器件上使用。由于器件内部存储器的限制，并非每个器件都支持 FAN 配置文件。表 2 列出了 Wi-SUN® FAN 配置文件及相应证书和可与相应器件结合使用的 PHY 的证书。

表 2. 适用于 FAN 配置文件和 PHY 的 Wi-SUN® 认证

Wi-SUN® 证书	FAN 配置文件	相应的 PHY
WSA0272	适用于 CC13x2R 或 CC13x2P 的 FAN 配置文件 (路由器)	WSA0260 WSA0262 (800MHz)
WSA0273	适用于 CC13x2R7 或 CC13x2P7 的 FAN 配置文件 (路由器)	WSA0261 WSA0263 (800MHz)
WSA0278	适用于 CC13x2R7 或 CC13x2P7 的 FAN 配置文件 (边界路由器)	WSA0261 WSA0263 (800MHz)
WSA0313	适用于 CC13x4R10 或 CC13x4P10 的 FAN 配置文件 (路由器)	WSA0311 WSA0312
WSA0314	适用于 CC13x4R10 或 CC13x4P10 的 FAN 配置文件 (边界路由器)	WSA0311 WSA0312

3 参考示例

SimpleLink™ SDK 包含许多有关 Wi-SUN® FAN 中不同角色的示例。并非每个角色和示例都适用于每个器件。这是由于某些角色对存储器有一定的要求。因此，具有较小存储器的器件无法用作边界路由器角色。表 3 和表 4 中提供了示例列表和相应的支持器件。

表 3. SDK 中包含的代码示例

应用	用法
ti-wisunfan-pyspinel	从 Linux 或 Microsoft® Windows® 10 PC 控制 NWP 的 Python 接口模块。 TI GitHub 上的公开内容
ti-wisunfantund	从作为网络接口的 Linux 控制 NWP 的 Linux 网络接口。 TI GitHub 上的公开内容
ns_br ns_br_src*	NWP 配置中的边界路由器，使用 TI 定义的 API (基于 SPINEL 接口层) 和 UART 进行控制。
ns_node ns_node_src*	NWP 配置中的路由器节点，使用 TI 定义的 API (基于 SPINEL 接口层) 和 UART 进行控制。
ns_coap_node ns_coap_node_src*	具有 CoAP 服务器的嵌入式路由器节点示例。
ns_coap_oad_offchip ns_coap_oad_offchip_src*	具有片外无线下载功能和 CoAP 服务器的嵌入式路由器节点示例。
ns_coap_oad_onchip ns_coap_oad_onchip_src*	具有片上无线下载功能和 CoAP 服务器的嵌入式路由器节点示例。
* src 示例包括 nanostack 源代码	

表 4. 在选定 TI 器件上运行的参考示例的内容使用情况

SDK 示例	占用的闪存 [kB]	占用的 RAM [kB]	支持的器件
ns_br	367	122	CC1312R7、 CC1352P7、 CC1352R7、 CC1354P10、 CC1354R10
ns_node	310	64	CC1312R、 CC1312PSIP、 CC1352R、 CC1352P、 CC1352P7、 CC1352R7、 CC1354P10、 CC1354R10
ns_coap_node、ns_coap_oad_offchip	310	60	CC1312R7、 CC1352P7、 CC1352R7、 CC1354P10、 CC1354R10
ns_coap_oad_onchip	310	61	CC1354P10、 CC1354R10

对于片上 OAD，闪存被分成 2 个应用槽，每个槽为 344kB。

存储器占用空间基于使用 TIRTOS7 和 TICLANG 编译器。使用 FreeRTOS 或其他编译器时，占用空间可能会有所不同。请参阅 [TI.com 上的无线 MCU 概述](#) 中每个器件的存储器大小摘要

4 射频协议 - Wi-SUN® PHY

Wi-SUN® 支持多种频率和数据速率，可实现全球覆盖并满足不同的应用需求。北美使用的主要频段为 902MHz 至 928MHz，欧洲为 863MHz 至 876MHz，日本为 920MHz 至 928MHz。Wi-SUN® 联盟成员可获取更多详情和有关频率计划和频道的信息。

表 5. Wi-SUN® PHY 和 TI 支持概述

符号速率 (ksymbol/s)	调制指数	Wi-SUN® 模式	频段	监管合规目标
50	0.5	#1a	EU	EN300 220
	1.0	#1b	NA、BZ、JP	FCC 15.247
100	0.5	#2a	EU	EN300 220 FCC 15.247
	1.0	#2b	NA、BZ、JP	ARIB STD-108
150	0.5	#3	EU、NA、BZ、JP	FCC 15.247 ARIB STD-T108
200	0.5	#4a	NA、BZ	FCC15.247
	1.0	#4b	JP	ARIB STD-T108
300	0.5	#5	NA、BZ、JP	FCC15.247 ARIB STD-T108

5 软件方框图

表 6. 软件层和 TI 实现概述

层	Wi-SUN® FAN	TI 路由器和边界路由器
NWP	未定义	基于开源 SPINEL 接口。
安全性	EAP-TLS、802.11i、802.1X	基于开源组件。
传输层	UDP	
网络层	IPv6	
	ICMPv6	
	RPL	
	6LoWPAN	
数据链路层	跳频 MAC	基于 TI 15.4 Stack。
PHY 层	IEEE 802.15.4g	基于 TI 15.4 Stack。

Wi-SUN® FAN 协议最多定义到传输层，TI 堆栈支持传输层使用 UDP。

6 网络拓扑及特性

德州仪器 (TI) 的 Wi-SUN® FAN 1.0 支持以下设备类型和设计：

- 边界路由器
 - 基于网络处理器 (NWP) 模式下的 TI CC13x2x7 系列 (704KB) 和 CC13x4x10 系列 (1MB) 存储器器件，需要主机处理器来提供回程连接
 - 支持通过 TI 定义的 NWP 接口 (基于 SPINEL 接口层) 进行 UART 通信
- NWP 模式下的路由器节点
 - TI CC13x2xx 系列 (352KB)、CC13x2x7 系列 (704KB) 和 CC13x4x10 系列 (1MB) 器件均支持
 - 支持通过 TI 定义的 NWP 接口 (基于 SPINEL 接口层) 进行 UART 通信
- 嵌入式路由器节点
 - 基于 TI CC13x2x7 系列 (704KB) 和 CC13x4x10 系列 (1MB) 存储器器件

- 提供基于 CoAP 应用的示例实施
- 无下载 (OAD) 功能，具有用于 CC13x2x7 系列的片外存储器 (704KB) 和用于 CC13x4x10 系列的片上存储器 (1MB)

网络可以由 Wi-SUN® FAN 中的各类上述设备和角色组成。显示所有角色的一种可能的网络架构如图 1 所示。

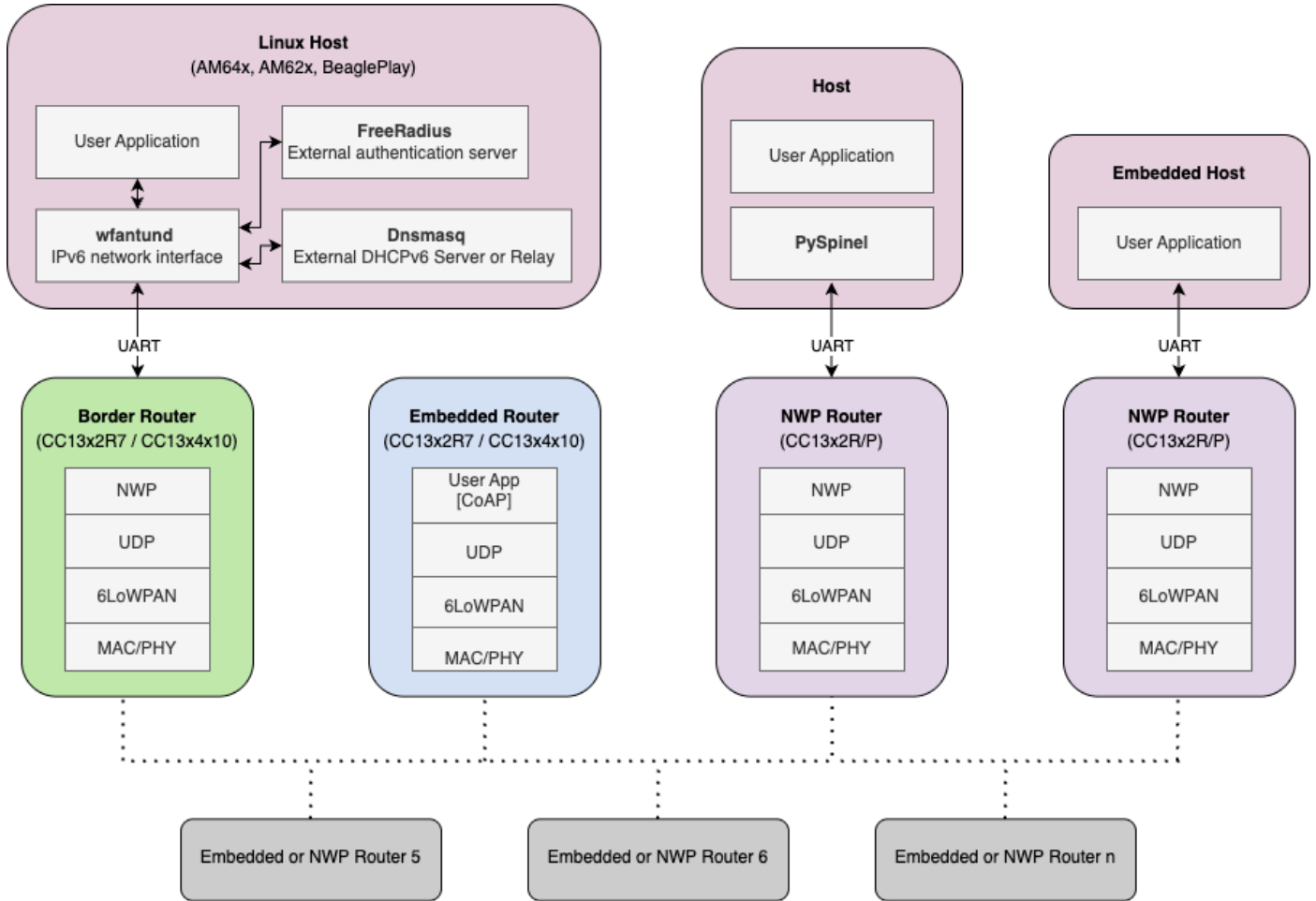


图 1. 具有边界路由器、使用 NWP 实施的路由器和嵌入式路由器的可用网络架构

与边界路由器关联的网络称为 PAN。可以通过 WAN 回程连接多个 PAN，以扩展网络覆盖范围。此回程不是 Wi-SUN® FAN 规范的组成部分。

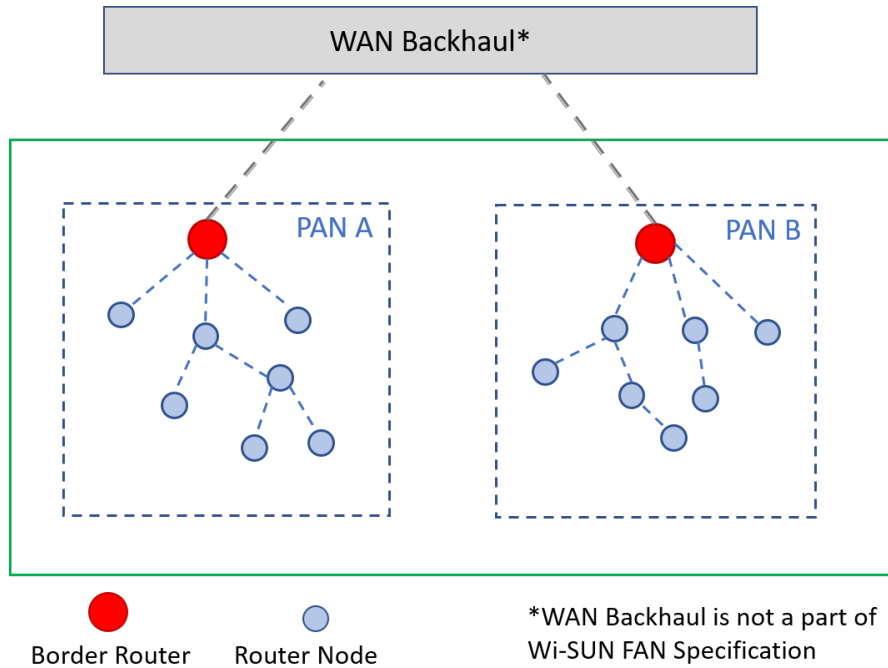


图 2. 由两个 PAN 组成的 Wi-SUN® 网络拓扑

Wi-SUN® FAN 1.0 标准支持多达 24 跳。除了应用用例详细信息之外，网络规模还受边界路由器 RAM 的限制。对于具有 144KB RAM 的器件，TI 建议每个边界路由器使用多达约 100 个节点。多个边界路由器可用来扩展网络，如该图所示。具有更大存储器的 TI 器件可以支持更大的网络。

7 安全性

德州仪器 (TI) 的 Wi-SUN® FAN v1.0.0 设计支持基于 IEEE 802.1x 规范的出色网络安全性：

表 7. TI Wi-SUN® FAN v1.0.0 中的信息安全机制

类别	信息安全机制
Wi-SUN® FAN 1.0 安全规范	IEEE 802.11i 关键 WAN 管理
	用于身份验证和加密的 IEEE 802.1x
	AES-128 加密
	基于 ECC 的密钥交换和签名验证
	适用于安全协议的真随机数生成
	IEEE802.1AR 定义的 X.509 证书

图 3 总结了密钥交换机制的关键方面：

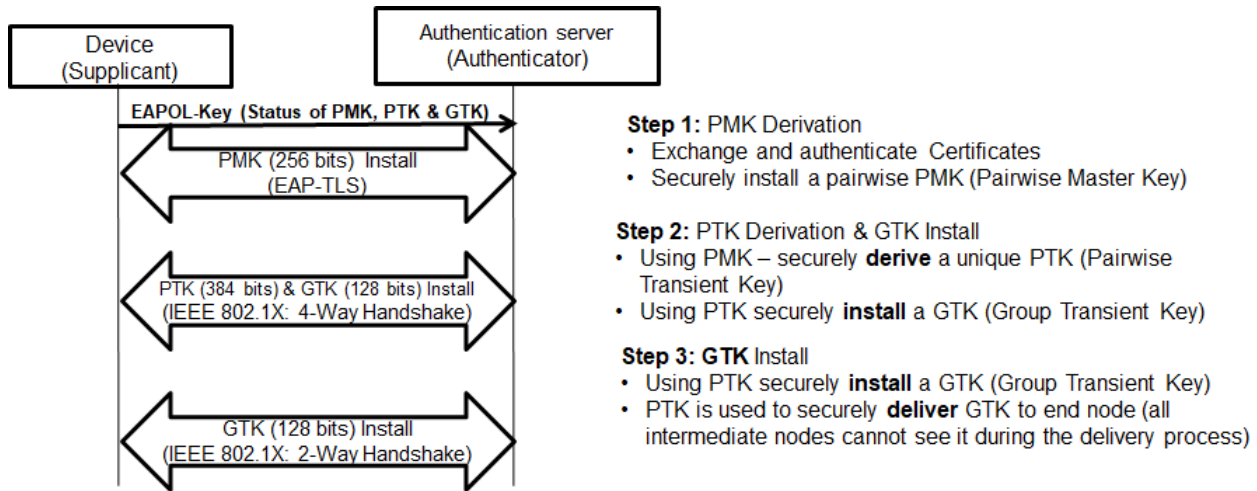


图 3. Wi-SUN® 中的安全密钥交换机制

7.1 证书管理

TI 建议为每个器件获取唯一的证书。客户可以使用自己的 PKI 基础设施，也可以与 Global Sign (Wi-SUN® 联盟合作伙伴 - wi-sun.org/cyber-security-certificates) 合作。

7.2 密钥交换过程

以下列表概述了安全密钥交换过程：

- 在设备和边界路由器之间建立唯一的成对主密钥 (PMK) 和成对瞬态密钥 (PTK)
- PTK 用于将 GTK (组瞬态密钥) 安全地安装到各个设备
- 设备使用 GTK 来加密使用 IEEE 802.15.4 中定义的 AES-128 CCM* 的 MAC 有效载荷数据包
- 网络管理定义不同密钥的寿命并执行密钥管理
- PMK、PTK 和 GTK 的寿命通常按降序排列 (默认值：分别为 4、2 和 1 个月)

此堆栈版本支持默认测试证书 (编译成代码以供现场试用)。

8 性能和测试数据

此性能测试使用 5 跳网络拓扑的 100 节点网状网络运行。

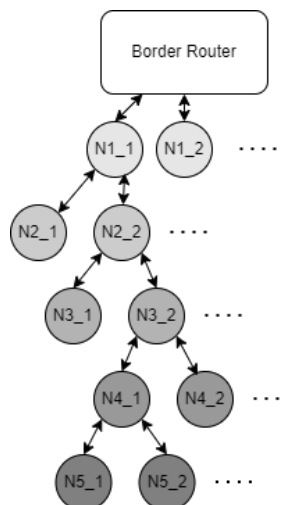


图 4. 100 节点网状网络测试的网络拓扑

8.1 延迟测试

边界路由器定期逐个 *ping* 每个设备。Ping 数据包大小为 50 字节；Ping 间隔为 2 秒，Ping 响应超时时间为 30 秒。测试运行 24 小时。

表 8.100 节点网状网络测试数据

测试参数	第 1 跳	第 2 跳	第 3 跳	第 4 跳	第 5 跳
端到端延迟 [ms]	265	353	477	645	773
平均数据包错误率 (PER) [%]	0.00046	0.0017	0.0029	0.0029	0.0091

8.2 加入时间测试

平均加入延迟通过采用 5 跳架构的 100 节点网络测试得出，如 [图 4](#) 所示。每跳包含不同数量的路由器节点。[表 9](#) 列出了每跳的平均加入延迟。此延迟定义为从给设备加电到一跳中 100% 的节点加入网络所需的平均时间。

具有 2-3 个节点的开箱即用网络在加电后几分钟内即可加入。确切的加入时间取决于网络配置文件、多个时序因素和所需的数据速率。这些设置在 *SysConfig* 中配置。

表 9.100 节点网状网络：每跳加入延迟

跳	每跳路由器数量	平均加入延迟 (分钟)
第 1 跳	34	3
第 2 跳	16	6
第 3 跳	17	7
第 4 跳	17	8
第 5 跳	16	10

8.3 OAD 测试

OAD 测试是使用不同块大小和 50kbps PHY 以 352256 字节的映像大小进行的。结果因数据传输到目的地所需的跳数而异。OAD 经测试最大跳数为 2。应考虑在基本无噪声的环境中获取这些值。高流量会导致重复的数据包，从而增加总下载持续时间。

表 10. Wi-SUN® OAD 性能

跳数	块大小 (B)	下载持续时间 (分钟)
1	128	08:30
1	512	03:31
1	1024	03:01
2	128	15:56
2	1024	04:34

9 开箱即用体验

此堆栈版本旨在用于 Wi-SUN® 网络的初始开发。此版本提供以下开箱即用体验：

- 使用 PC 通过 CC1352x7 或 CC1354x10 系列器件与 NWP 边界路由器通信来设置边界路由器 (提供了参考设计)
- 将路由器注释 (即使在 NWP 模型中) 编译为自包含解决方案，该解决方案可在通电时加入网络并响应 IPv6 ping
- 在不构建客户应用的情况下，通过 ping 单个设备来执行现场测试
- 在单独的主机上构建客户应用，并使用 UART 通过 NWP 接口与路由器进行通信
- 通过基于 CC13x2x7 和 CC13x4x10 系列器件的嵌入式路由器节点示例，在路由器设备上托管一台简单的 CoAP 服务器
- 参考 Python 脚本，它们提供了与开箱即用 CoAP 服务器资源进行交互的示例

- wfantund 主机应用将边界路由器和/或路由器节点集成为 Linux 的原生 IPv6 接口，具有用于边界路由器和主机的单独 IPv6 地址
- 使用嵌入式路由器节点示例作为参考，通过 Wi-SUN® 堆栈开发单芯片定制应用

首先前往 [CC1352P7 产品文件夹](#)。

10 培训

TI 在 SimpleLink™ Academy 中提供了有关 Wi-SUN® FAN 实施的培训材料，包括使用 CC13x2R7 和 CC13x4R10 LaunchPad 的实践示例。这些示例分为三个部分：

1. **Wi-SUN® FAN 的基础知识**：本培训指导用户如何使用一个与运行 PySpinel CLI 的主机 PC 相连的边界路由器，创建简单的 Wi-SUN® FAN 来控制网络。其中介绍了用于启动网络和 ping 连接节点的基本串行命令。
2. **无线下载**：本培训介绍了使用 Wi-SUN® 的 OAD 概念、保存多个映像所需的存储器布局以及如何设置 OAD 环境和执行下载。
3. **CoAP 消息传递**：本培训旨在介绍用于在 BR 和 RN 之间传输 CoAP 消息的完全嵌入式路由器节点。其中提供了可确认和不可确认的 CoAP 消息的示例。同时介绍了一个有关电动汽车充电器应用向 BR 发送状态信息的示例。

可通过上面的链接或 [dev.ti.com](#) 找到这些培训内容。

11 工具

11.1 Code Composer Studio™ IDE

2023 年 10 月的最新版本为 v12.8.0 或 v1.5。指向 Code Composer Studio™ 的链接：[www.ti.com/tool/CCSTUDIO](#)。

11.2 SysConfig

SysConfig 实用程序是一款软件工具，它提供一个图形用户界面来配置 TI 器件的引脚、外设、无线电、子系统和其他元件。结果采用 C 头文件和代码文件的形式输出，可导入软件开发套件 (SDK) 或用于配置定制软件。

11.3 数据包监听器

2025 年 4 月的最新版本为 v1.11.0。指向数据包监听器 2 的链接：[下载链接](#)

- 支持的 Wi-SUN® 模式：#1a、#1b、#2a、#2b、#3、#4a 和 #4b
- 数据包监听器仅为单通道，但可使用多个电路板来监听多个通道

11.4 TI Wi-SUN® FAN Spinel

TI Wi-SUN® FAN Spinel CLI 通过命令行界面公开了在 Wi-SUN® FAN 网络处理器 (NWP) 上运行的配置和管理 API。该工具主要适用于控制 TI Wi-SUN® FAN NWP 实例的手动实验，而不适用于扩展到 TI Wi-SUN® FAN NWP 器件的生产级驱动程序软件。有关如何使用 TI Wi-SUN® FAN NWP 接口的详细指南，请参阅：[NWP 接口指南](#)。

此工具有助于实现以下目的：

1. 作为对在 TI SimpleLink™ 器件上运行的 TI Wi-SUN® FAN NWP 进行自动测试和现场试验的途径。
2. 作为 TI Wi-SUN® FAN 堆栈的 NWP 版本的简单调试工具。

TI GitHub 上的公开内容

11.5 TI wfantund - 用户空间网络接口驱动程序

wfantund 为所连接的在 NWP 模式下运行的 TI Wi-SUN® FAN 边界路由器提供了一个原生 IPv6 网络接口。存储库 ([TI GitHub 上的公开内容](#)) 提供了在 Linux 主机上运行的软件，该主机通过 UART 连接 Wi-SUN® FAN NWP。wfantund 还提供了使用 Webapp 以图形方式可视化网络拓扑的可能性，如图 5 所示。此 webapp 也是 wfantund GitHub 存储库的一部分。

wfantund 的特性包括：

支持主机到嵌入式器件、主机到主机以及多播 IPv6 通信

- 为 NCP 提供本机 IPv6 接口，并为主机和 NCP 提供独立的 IPv6 地址配置选项

支持外部身份验证和/或 DHCPv6 服务器

- 将主机配置为通过 wfantund 路由身份验证和 DHCP 流量 (FreeRADIUS 和 Dnsmasq 示例)。

可用于测试网络性能

- 支持 iperf 带宽测量，以通过 wfantund 创建的 TUN 接口计算网络吞吐量
- 支持 Ping 延迟测试

Web 应用程序

- 显示具有 IPv6 地址和昵称的所有设备
- 对新固件执行无线下载
- 可视化网络架构和链路质量
- 向所有路由器节点发送 COAP 命令以切换 LED
- 对设备执行 Ping 操作

为 TI AM64x 平台以及 BeaglePlay 板提供了参考交叉编译支持。

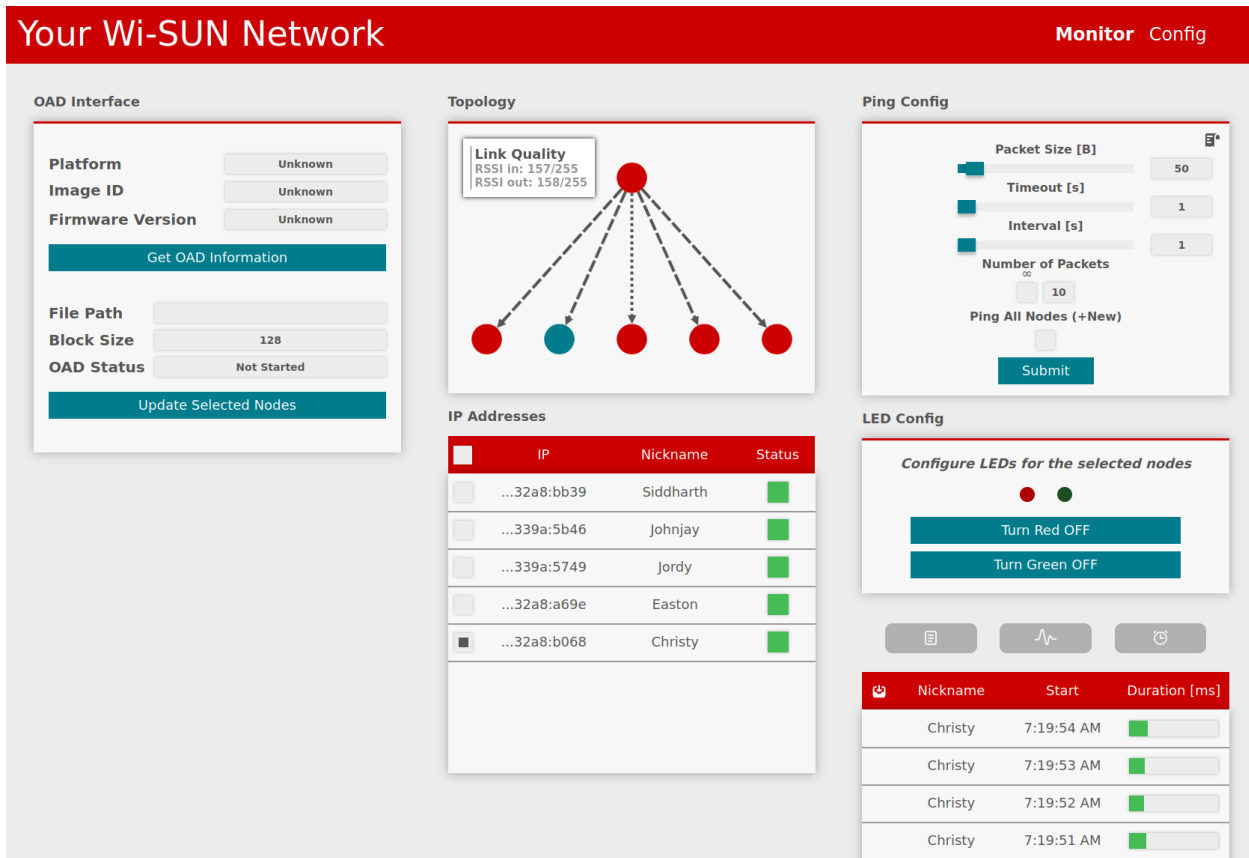


图 5. wfantund Webapp 中的 FAN 可视化

12 已知局限性

该版本已使用 100 个节点的网络进行测试。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司