

基于 CC1310 的 Contiki 6LoWPAN 组网技术应用

Louis Lu

Victor Xu

EP FAE/East China

WCS FAE/China

概述

支持 IPv6 的低功耗无线组网协议 6LoWPAN 自提出后，以 RFC4944 标准为基础，经过 RFC6282 及 RFC6775 的补充优化，其功耗及网络性能方面得到很大优化提高；随着物联网技术和传感技术的发展及物联网市场需求的不断增长，6LoWPAN 技术方案的需求也越来越多。

本文将在介绍 Contiki 6LoWPAN 网络拓扑及 MAC 协议基础上，说明如何在 TI 低功耗无线 MCU SimpleLink™ 系列 CC1310 平台搭建 6LoWPAN 网络及优化系统功耗的方法，延长低功耗设备的使用寿命；

关键词：6LoWPAN, CONTIKI-MAC, CC1310

目录

1	6LoWPAN 简介.....	3
2	6LoWPAN 网络架构及 MAC 层协议简介.....	4
3	6LoWPAN 无线测试网络的搭建.....	6
	3.1 CC1310 资源简介.....	6
	3.2 6LoWPAN 协议栈介绍.....	7
	3.3 Single Hop 的 6LoWPAN 测试网络搭建.....	7
4	6LoWPAN 网络的功耗优化.....	9
	4.1 电流测试平台搭建.....	9
	4.2 功耗优化过程及测试结果.....	9
5	参考资料.....	12

图表

图 1.	6LoWPAN 无线网络拓扑.....	3
图 2.	6LoWPAN 网络模型.....	4
图 3.	数据包的发送与接收.....	5
图 4.	广播包的发送与接收.....	5
图 5.	CC1310 架构及主要参数.....	6
图 6.	6LoWPAN 测试网络示意图.....	7
图 7.	边界网关的启动.....	8
图 8.	浏览器边界网关信息.....	8
图 9.	功耗测试示意图.....	9
图 10.	初始节点功耗.....	9
图 11.	使用 ContikiMAC 的节点功耗.....	10
图 12.	删除数据包定时发送后的节点功耗.....	10
图 13.	优化 ContikiMAC RDC 参数后的节点功耗.....	11

1. 6LoWPAN 简介

6LoWPAN (*IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network*) 是由 IETF 定义的低功耗的无线 Mesh 网络的组网协议，其网络节点具有唯一的 IPv6 地址，且能够通过少量的链接层数据帧 (IEEE802.15.4 格式) 实现 IPv6 数据包的有效传输。典型的 6LoWPAN 网络结构如图 1 所示。

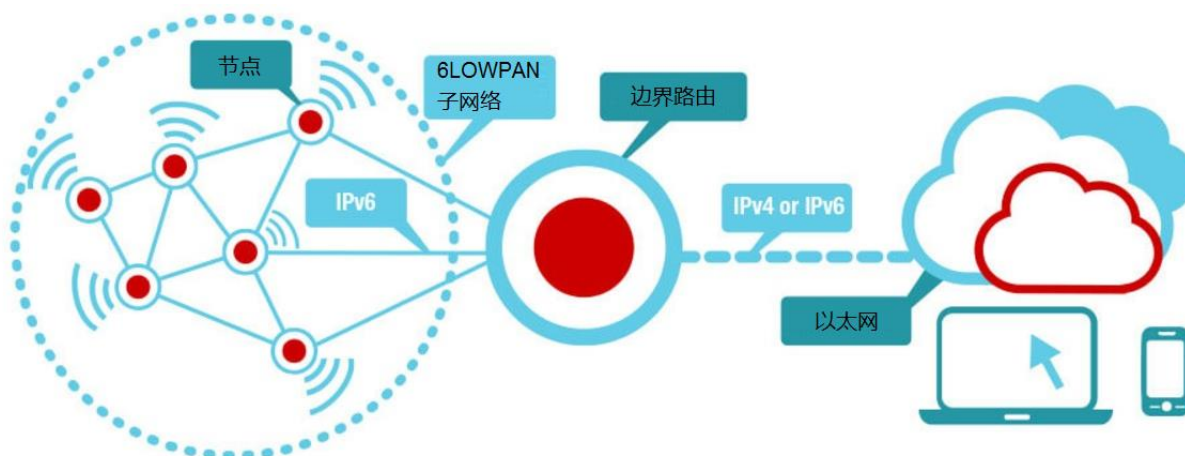


图 1. 6LoWPAN 无线网络拓扑

6LoWPAN 网络主要有以下三个特点，1) 每个节点拥有唯一的 IPV6 地址，所有通信都是基于 IP 的标准协议栈，例如 TCP, UDP, HTTP, COAP, MQTT 等协议栈。在网关上不需要对报文做额外的解析处理，可以直接发送到 IP 网络。使得节点可以方便无缝的连接到英特网；2) 是基于 Mesh 路由的协议，支持一对多和多对一通信，能够实现超过 100 个节点的健壮网络。相对于其他 Mesh 网络，还可以支持带有休眠功能的路由设备；3) 多个物理层标准的支持，在 ISM 频段中可以选择基于 IEEE802.15.4 的 2.4GHz 频段，也可以选择基于 IEEE802.15.4g 的 Sub-1GHz 频段，根据实际应用的需求在频段上可以灵活选择。基于以上 6LoWPAN 网络的特点，在物联网相关设备中得到广泛应用。

德州仪器 (TI) 在 2.4GHz 和 Sub-1GHz 频段上都有相应的 6LoWPAN 的解决方案。本文重点介绍基于 TI Sub-1GHz SOC CC1310 的 6LoWPAN 网络设计。

2. 6LoWPAN 网络架构及 MAC 层协议简介

6LoWPAN 与 WiFi, ZigBee, Bluetooth 等无线协议类似，在数据通信上也符合标准的 OSI 模型。图 2 展示了 IOT 设备中两个符合 OSI 模型的典型协议栈例子，一个是运行 WiFi 协议栈的设备，另外一个运行 6LoWPAN 协议的设备。

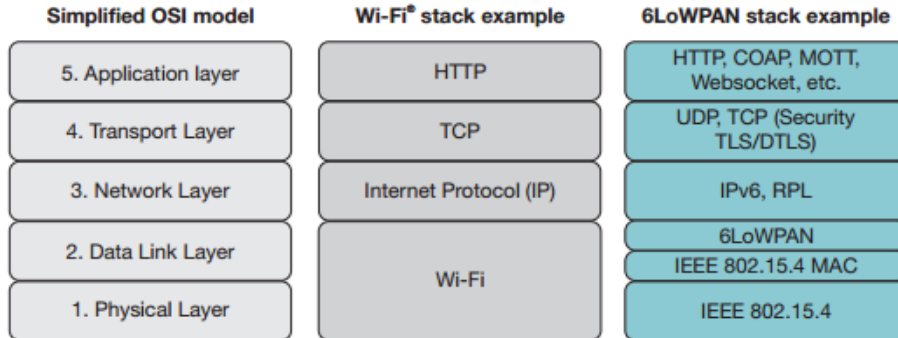


图 2. 6LoWPAN 网络模型

以上 OSI 通信模型中，数据链路层主要为两个直接连接设备提供可靠的链路，并且可以对物理层发送和接收到的数据进行检测和纠错。在 6LoWPAN 协议中，常见的 MAC 层协议有 IEEE802.15.4 中的载波侦听多路访问 / 冲突避免 (CSMA/CA), IEEE802.15.4e 中的基于时隙跳频 (TSCH)。

不同的 6LoWPAN MAC 协议对设备的运行功耗和数据传输可靠性有很大的影响，本文主要介绍基于 CC1310 的 ContikiMAC 协议。

如图 3 所示，CC1310 实现的 ContikiMAC 是一个 RDC (Radio Duty Cycling) 协议，其原理是通过周期性唤醒机制来侦听来自邻居节点的消息包。对于接收器，如果在其唤醒期间检测到了数据包，它将继续保持唤醒状态，直到接收完成，并在成功接收到包后，发送一个链路层确认消息。对于发送端，如果要发送一个数据包，需要周期性地发送该包，直到收到来自接收器的链路层确认消息。

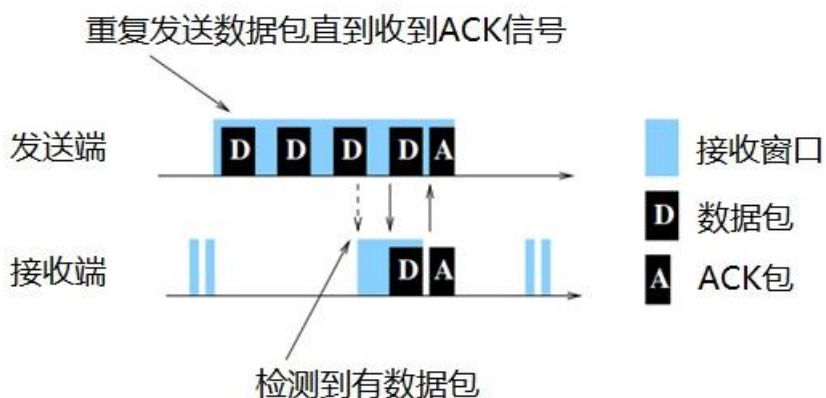


图 3. 数据包的的发送与接收

广播包不会引起链路层确认消息，如图 4 所示。相反，发送端在唤醒期间将重复发送该广播包，以确保所有的邻居节点都能收到广播包。RDC 协议的实现，使得 6LoWPAN 节点能够尽可能让处于休眠状态，并且根据应用需求周期的唤醒进行数据收发，从而实现低功耗网络。

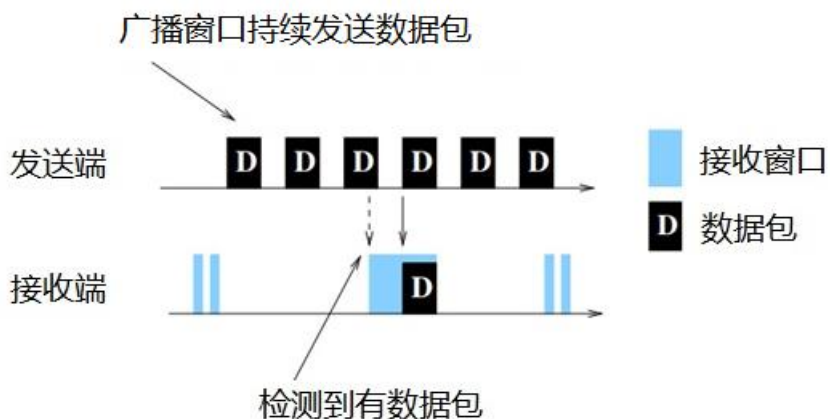


图 4. 广播包的的发送与接收

3. 6LoWPAN 无线测试网络的搭建

本章将基于 TI Sub-1GHz SOC 芯片 CC1310，介绍基于 Contiki 操作系统的 6LoWPAN 协议栈的应用。并针对开发包内例程 IPv6 例程 udp-client，举例如何进行功耗的优化工作。

3.1 CC1310 资源简介

CC13XX/CC26XX 系列芯片是德州仪器针对无线通讯应用而设计的搭载 Sub-1GHz 或 2.4GHz RF 收发器的 MCU。芯片在基于支持多种物理层和 RF 标准的平台上将灵活的超低功耗 RF 收发器和强大的 48MHz Cortex-M3 微控制器相结合，并集成一个 Cortex-M0 作为专用无线控制器来处理 ROM 或 RAM 中存储的底层 RF 控制协议命令，从而同时保持超低功耗和系统的灵活度，而不需要为了实现超低功耗而损失 RF 性能。

CC1310 内置低功耗 Cortex-M3 (51uA/MHz)和可输出 +14dBm 发送功率的低功耗 RF 核，可支持 Sub-1GHz 6LoWPAN 和私有协议。其框图及主要性能如图 5。

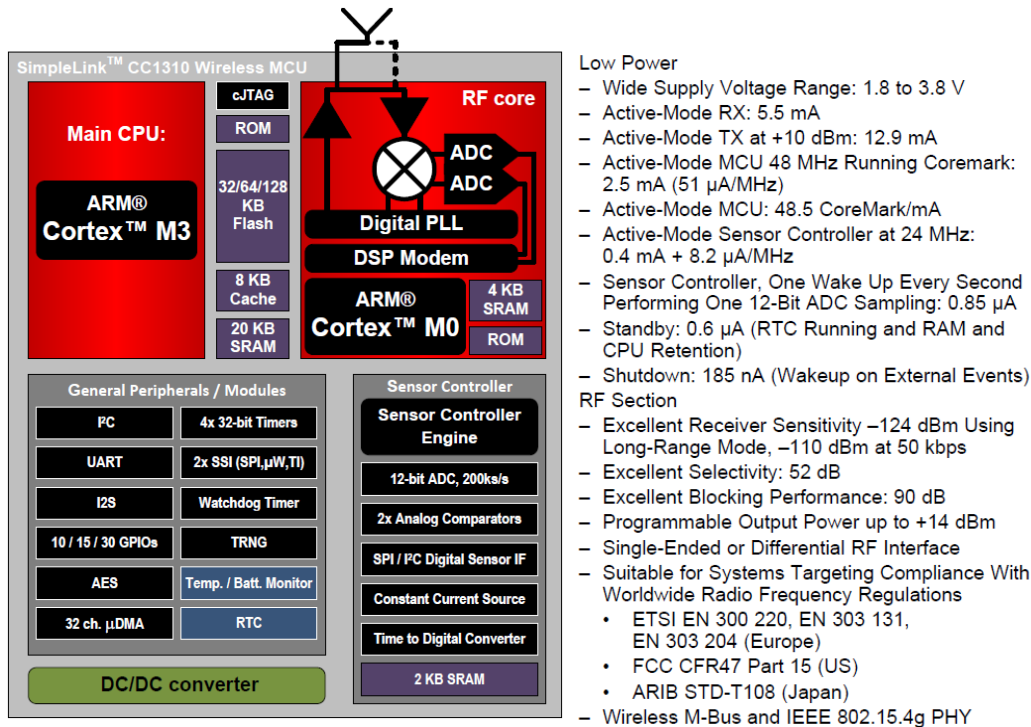


图 5. CC1310 架构及主要参数

3.2 6LoWPAN 协议栈介绍

TI 6LoWPAN 协议栈基于开源操作系统 Contiki，其源代码可从下面 Github 链接获得

<https://github.com/contiki-os/contiki>

下载安装完成后，可在安装目录看到以下重要文件夹

core：Contiki 系统的源代码

cpu：不同平台的主芯片相关 驱动文件

platform：不同开发板相关配置文件

examples：6LoWPAN 应用参考示例代码

6LoWPAN 协议栈的编译需要在 Ubuntu 中进行，关于 Contiki 系统 Ubuntu 虚拟机的搭建，编译环境的设置以及如何对 6LoWPAN 协议栈进行编译下载等工作，可参考 TI 6LoWPAN WIKI 的介绍，链接：<http://processors.wiki.ti.com/index.php/Contiki-6LOWPAN>

3.3 Single Hop 的 6LoWPAN 测试网络搭建

本文将搭建的网络拓扑示意图如图 6 所示，所需要的硬件资源及软件列表如下：

TI CC1310 LaunchPAD: #2

Ubuntu PC: #1

PC 与运行 Slip Radio 的软件构成边界路由(Edge Router)，传感器节点 1 运行 udp_client 固件。

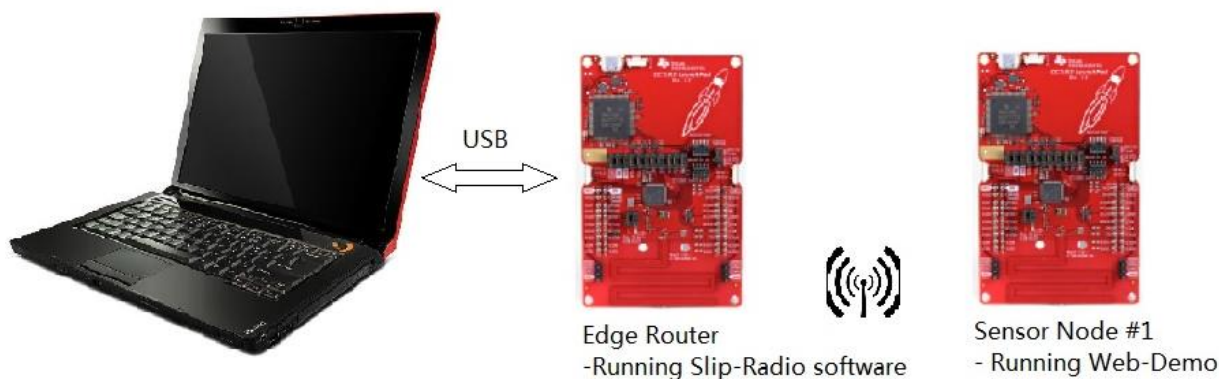


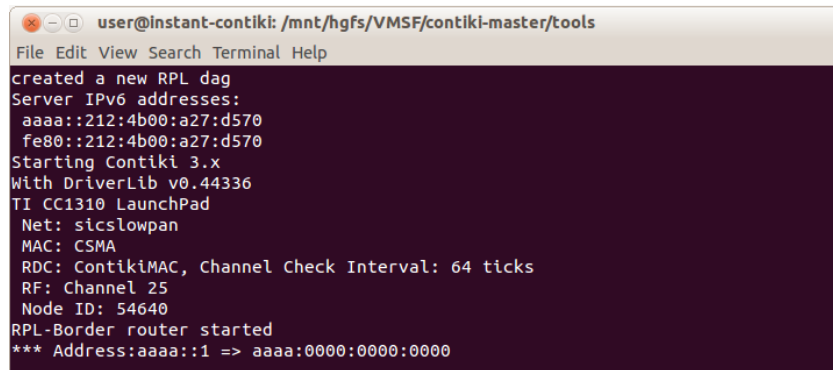
图 6. 6LoWPAN 测试网络示意图

这里，假设已经按照上面的 6LoWPAN WIKI 说明搭建好了 Ubuntu 系统及 6LoWPAN 的协议栈。下面将介绍如何编译并搭建一跳的 6LoWPAN 网络。

软件的编译步骤：

1. 如果需要变更 RF 的工作频段，可修改文件\contiki-master\cpu\cc26xx-cc13xx\rf-core\dot-15-4g.h 中的宏定义 DOT_15_4G_FREQUENCY_BAND_ID；

2. 如果需要变更硬件参数配置，可修改文件夹\contiki-master\platform\srf06-cc26xx 下的对应 board.h 文件
 3. 修改/examples/ipv6/slip-radio/project-conf.h 文件，添加#define
RF_CORE_CONF_CHANNEL 25
 4. 进入目录\contiki-master\examples\ipv6\rpl-border-router，编译边界路由工程
make TARGET=srf06-cc26xx BOARD=launchpad/cc1310
 5. 进入目录\contiki-master\examples\ipv6\rpl-udp，编译终端节点工程
make TARGET=srf06-cc26xx BOARD=launchpad/cc1310
 6. 进入目录\contiki-master\tools，运行边界路由
sudo ./tunslip6 aaaa::1/64 -s /dev/ttyACM0
- 边界路由正常启动后，你可看到如下信息，aaaa::212:4b00:a27:d570 即是边界路由的网络地址



```

user@instant-contiki: /mnt/hgfs/VMSF/contiki-master/tools
File Edit View Search Terminal Help
created a new RPL dag
Server IPv6 addresses:
  aaaa::212:4b00:a27:d570
  fe80::212:4b00:a27:d570
Starting Contiki 3.x
With DriverLib v0.44336
TI CC1310 LaunchPad
Net: sicslowpan
MAC: CSMA
RDC: ContikiMAC, Channel Check Interval: 64 ticks
RF: Channel 25
Node ID: 54640
RPL-Border router started
*** Address:aaaa::1 => aaaa:0000:0000:0000

```

图 7. 边界网关的启动

7. 运行终端节点
8. 打开 Firefox 浏览器，输入路由网址[aaaa::212:4b00:a27:d570]，可以看到，我们的节点已经加入了边界路由。

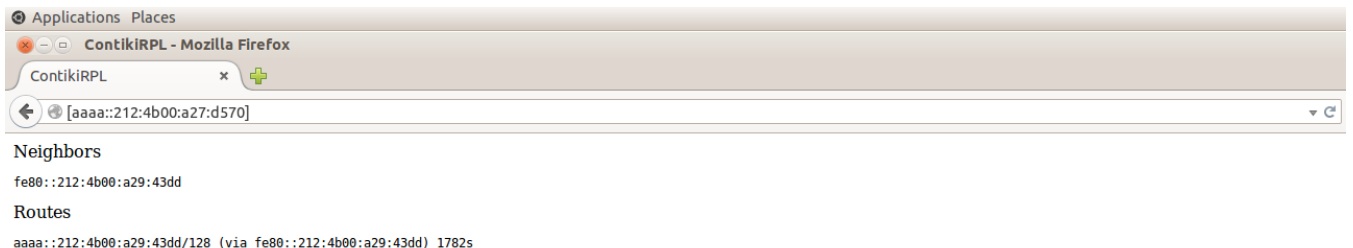


图 8. 浏览器边界网关信息

4. 6LoWPAN 网络的功耗优化

前面提到，6LoWPAN 是针对低功耗的无线 Mesh 网络协议。这里，我们将针对影响功耗的主要参数进行介绍，优化，并给出对应的试验结果。

4.1 电流测试平台搭建

如图所示，通过直流分析仪来给 CC1310 评估板供电（评估板上的跳帽需要全部摘除）。具体的电流测量方法可参考 TI 应用文档 SWRA478 《Measuring Bluetooth smart power consumption》第五章节。

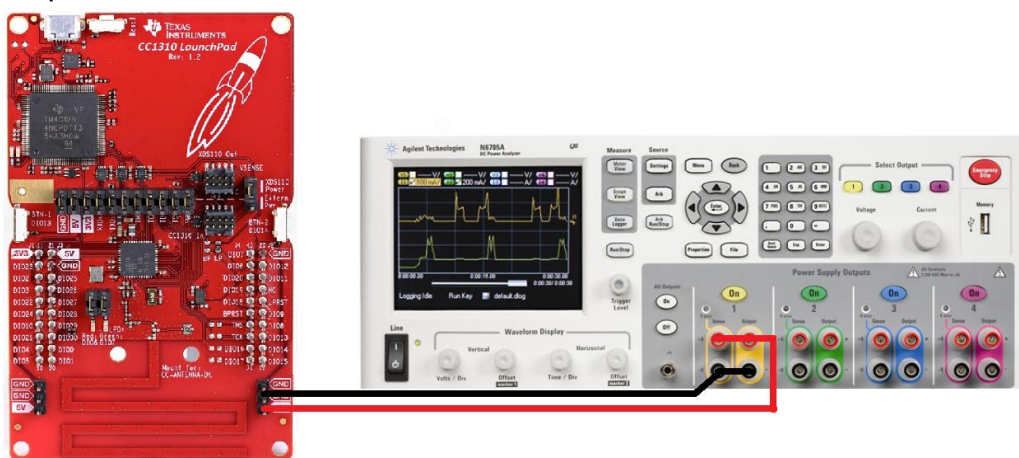


图 9. 功耗测试示意图

4.2 功耗优化过程及测试结果

原 udp_client 的功耗测试如图 10，可以看到，选取范围内的平均电流为 6.79mA。



图 10. 初始节点功耗

究其原因，是因为 udp_client 使用的 MAC 默认为 nullRDC_driver。修改文件加 rpl-udp 中的 project-conf.h 文件中的 MAC 选择，将 #define NETSTACK_CONF_RDC nullRDC_driver

改成 #define NETSTACK_CONF_RDC contikimac_driver

修改后的功耗测试结果如图 11

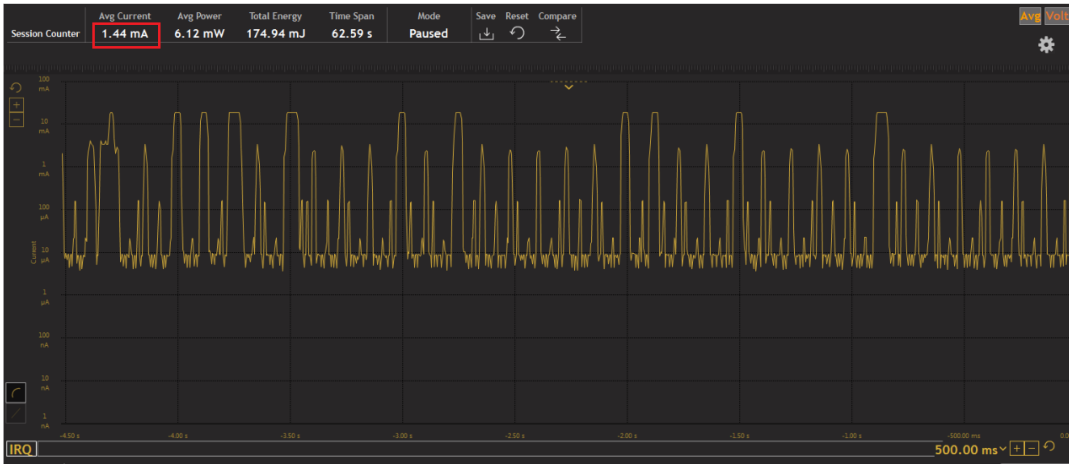


图 11. 使用 ContikiMAC 的节点功耗

可以看到，采用 Contiki-MAC 后，系统地功耗有了显著的下降，从 6.79mA 将到 1.44mA。udp_client 源代码功耗过高的另一个原因是，代码里面使用了一个定时器定时的发送数据。对应的代码在 udp-client.c 文件中：

```
etimer_set(&periodic, SEND_INTERVAL);  
etimer_reset(&periodic);  
ctimer_set(&backoff_timer, SEND_TIME, send_packet, NULL);
```

屏蔽这部分代码，功耗测试结果如图 12，功耗从 1.44mA 降到了 254.06uA

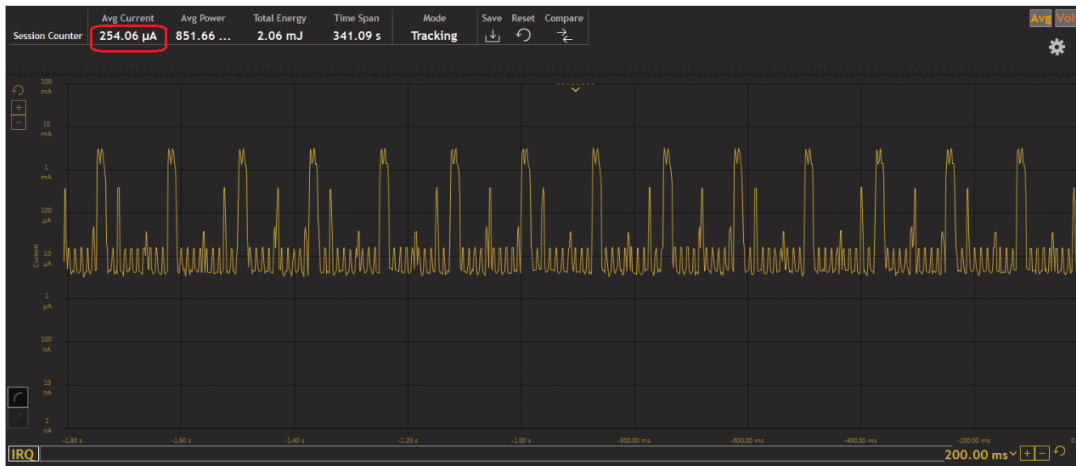


图 12. 删除数据包定时发送后的节点功耗

基于上面的优化，我们已经搭建好了一个基于 Contiki-MAC 和基本功能的节点端软件架构。接下来的优化就得基于系统及 Contiki-MAC 的参数进行，举一个例子：

之前提到过，ContikiMAC 里面的 RDC 协议是周期性唤醒检查是否有数据包的算法。里面有一个参数来定义每秒唤醒进行检测的次数。一般的低功耗系统对于时延要求不高，这里我们将一秒唤醒检测 8 次修改为一秒唤醒检测 2 次。

```
#ifndef NETSTACK_CONF_RDC_CHANNEL_CHECK_RATE
#define NETSTACK_CONF_RDC_CHANNEL_CHECK_RATE 2
```

在 ContikiMAC 进行唤醒检测后，会首先进行 CCA（Clear Channel Assessment），用于检测信道上是否有有效数据，这个默认是检测两次来做判断，这里我们修改为 1。

```
#define CCA_COUNT_MAX 1
```

修改后进行功耗测试，如图 13，可以看到功耗从 254.06uA 降到了 91.10uA。

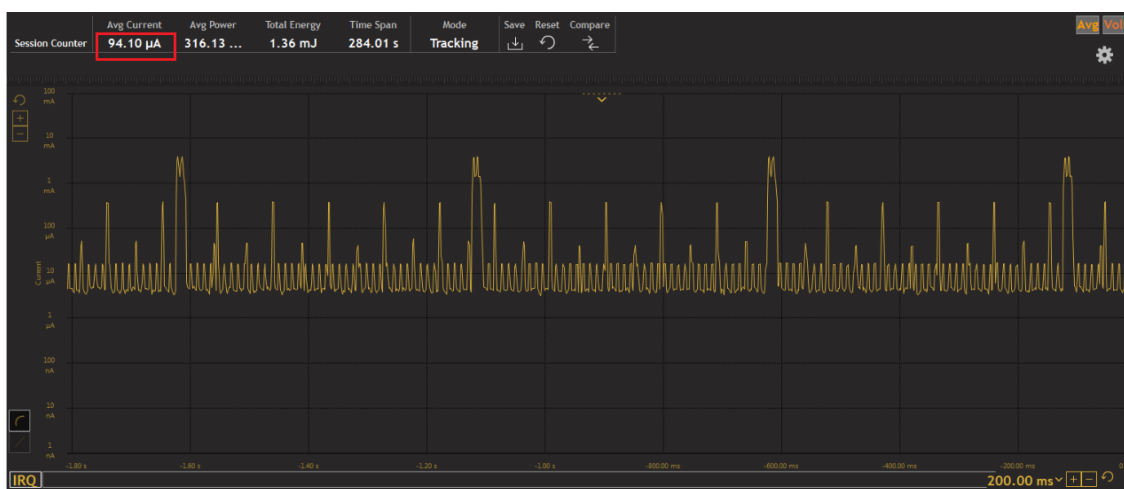


图 13. 优化 ContikiMAC RDC 参数后的节点功耗

如果用户需要更低的功耗，就需要从应用层的角度，可以禁止类似 UART 的外设，或则，通过 Contiki 提供的功耗管理接口入手，手动关闭 CONTIKI-MAC 进入深度睡眠，然后定时唤醒，一个可以参考的工程如 \contiki-master\examples\cc26xx\very-sleepy-demo，可以实现 <19uA 的平均功耗。

5. 参考资料

1. *CC13xx, CC26xx SimpleLink™ Wireless MCU Technical Reference Manual(SWCU117F)*
2. *CC1310 SimpleLink™ Ultra-Low-Power Sub-1 GHz Wireless MCU(SWRS181C)*
3. *6LoWPAN demystified*
4. *The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol*

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。您就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默示的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司