

## CC2640 在 Beacon 应用中的实现方法

*Daniel Fang/Albin Zhang*
*Wireless connectivity solution*

### 摘要

德州仪器 (TI) CC2640 是一款面向 BLUETOOTH SMART 应用的超低功耗无线 MCU。极低的 RF 收发电流, MCU 运行以及低功耗电流可确保卓越的电池使用寿命。该芯片在蓝牙信标 (BEACON) 市场中得到了广泛的应用。

此应用文档介绍了基本的 BEACON 协议规范, 并详细介绍了 CC2640 对 BEACON 应用的实现方法, 特别对成本、功耗、覆盖面积等关键指标做了深入的分析及优化, 对 CC2640 在 BEACON 的行业应用具有指导意义。

### 目录

<b>1 BLE Beacon 简介</b> .....	<b>2</b>
1.1 Beacon 是什么 .....	2
1.2 BLE 角色 .....	2
1.3 数据包结构 .....	3
1.4 广播及广播间隔 .....	3
<b>2 成本</b> .....	<b>4</b>
2.1 芯片种类的选择 .....	4
2.2 射频前端 .....	4
2.2.1 覆盖范围 .....	5
2.2.2 功耗的影响 .....	6
<b>3 功耗</b> .....	<b>7</b>
3.1 室内光能量收集 .....	7
3.2 RTC 定时管理 .....	7
3.3 电池选择 .....	8
<b>4 软件实现</b> .....	<b>9</b>
参考文档 .....	11

### Figures

图 1. 低功耗蓝牙数据结构 .....	3
图 2. 射频前端的选项 .....	4
图 3. 0dBm 和 5dBm 覆盖面积比较 .....	5
图 4. 0dBm 和 5dBm 在 300mS 间隔广播功耗对比 .....	6
图 5. 室内光能量收集方案框图 .....	7

图 6. RTC 定时管理方案框图.....	8
图 7. AA 电池电压放电曲线.....	9
图 8. 工程属性截图.....	10

## Tables

表 1. 广播包 PDU 类型.....	3
表 2. CC2640 射频前端.....	5

# 1 BLE Beacon 简介

## 1.1 Beacon 是什么

Beacon技术指的是通过使用低功耗蓝牙技术（Bluetooth Low Energy），间隔性定期广播名为“通告帧”（Advertising）的广播帧，实现当接收设备进入该信号覆盖区域时就可以接收到特定信息而带来各种不同场景应用的一种无线技术。

通告帧中含有特定有效负载数据，一套Beacon的部署由一个或多个在一定范围内发射传输他们唯一识别码的Beacon信标设备组成。接收设备上的软件通过Beacon可以实现多种场景应用，比如通知用户、室内地图导航、地下停车场寻车、商家促销广告推送、门票推送等。

## 1.2 BLE 角色

低功耗蓝牙设备根据GAP层定义分为四种角色。

- 广播者（Broadcaster）——不可连接的广播设备，比如温度Sensor，定期广播当前温度值
- 观测者（Observer）——扫描设备，但不发起建立连接，比如显示端，收集上面温度Sensor的值并显示
- 外部设备（Peripheral）——可连接的广播设备，可以在单个链路层连接中作为从机，比如蓝牙手环
- 集中器(Central)——扫描广播设备并初始化发起连接，在单个链路或多链路层作为主机，比如手机

外部设备和广播者都可以实现定期广播Beacon的功能，但外部设备除了具有广播的功能，还可以实现连接，从而可以实现连接修改特征值或者实现OAD空中更新固件的功能。

目前可以实现Beacon功能的TI BLE芯片有CC2543、CC2541、CC2540和CC2640。

CC2543是BLE Beacon的低成本方案，可以实现定期广播并支持空中接口更新固定长度的广播内容，但其并不运行在蓝牙协议栈基础上，而是通过私有协议实现广播和蓝牙一样的广播包，不能建立蓝牙连接，适合于低端Beacon。CC254X是TI上一代低功耗蓝牙芯片，有着非常广泛的应用。CC2640是TI最新一代超低功耗蓝牙芯片，性能和功耗上都有非常大的提升。

### 1.3 数据包结构

根据Bluetooth Core定义，发送数据的包格式如下图1所示。

一个字节前导码Preamble，用于接收机同步和时间预估，对于广播包为0xAA。接着是Access Address，对于广播包，这个值永远是0x8E89BED6，然后是2-39字节的Packet payload，最后是24bit的循环校验码。

Packet payload首先是2字节的header头标识payload的大小和类型，然后是6个字节的MAC地址，最后是0-31字节可用的payload。

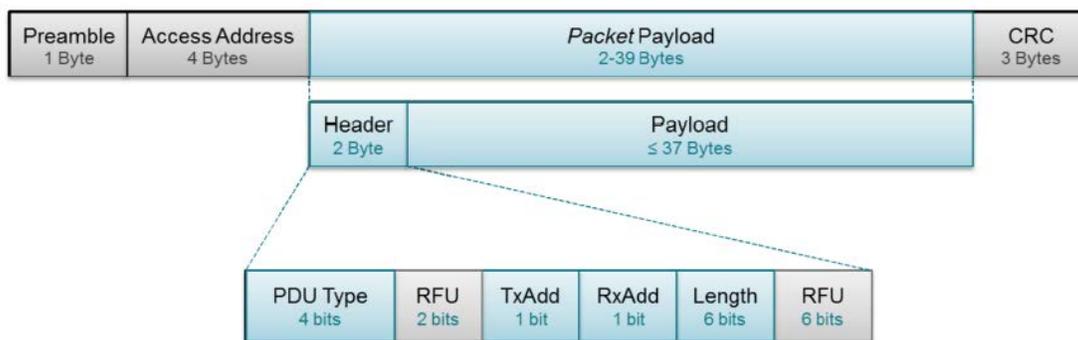


图 1. 低功耗蓝牙数据结构

PDU具有三种类型，如表1。

表 1. 广播包 PDU 类型

PDU 类型	Packet 名称	描述
0000	ADV_IND	可连接的无方向广播事件
0010	ADV_NONCONN_IND	不可连接的无方向广播事件
0110	ADV_SCAN_IND	可扫描的无方向事件

### 1.4 广播及广播间隔

为了节省功耗，低功耗蓝牙大部分处于Sleep状态，只在设定的广播时间，间歇性从Sleep状态唤醒并分别在37、38、39信道进行广播，广播之后再进入Sleep状态，而间歇的时间间隔称为

Overwrite this text with the ZHCA654

广播间隔。对于不可连接的广播，比如Broadcaster，间隔不能小于100mS，对于可连接的广播，比如Peripheral，间隔不能小于20mS。

## 2 成本

对于 Beacon 应用，对成本，功耗和距离会非常敏感，而成本是首要考虑因素。下面我们来分析应该采用什么样的硬件设计。

### 2.1 芯片种类的选择

CC2640有三种封装，4X4，5X5和7X7，外设功能一样，区别在于IO口数量，3个封装分别对应10、15、31个GPIO。芯片成本基本和IO数量成正比。对于Beacon的应用，用户可以根据应用确定IO口数量来选择合适封装，通常4X4封装完全可以满足。

### 2.2 射频前端

如图2和表2所示，CC2640有不同的射频前端选项，分别在性能，尺寸和器件数量上有一些差异。差分电路具有最大的输出功率，同时，外部偏置电路会提供最大的接收机灵敏度。

## RF Frontend options

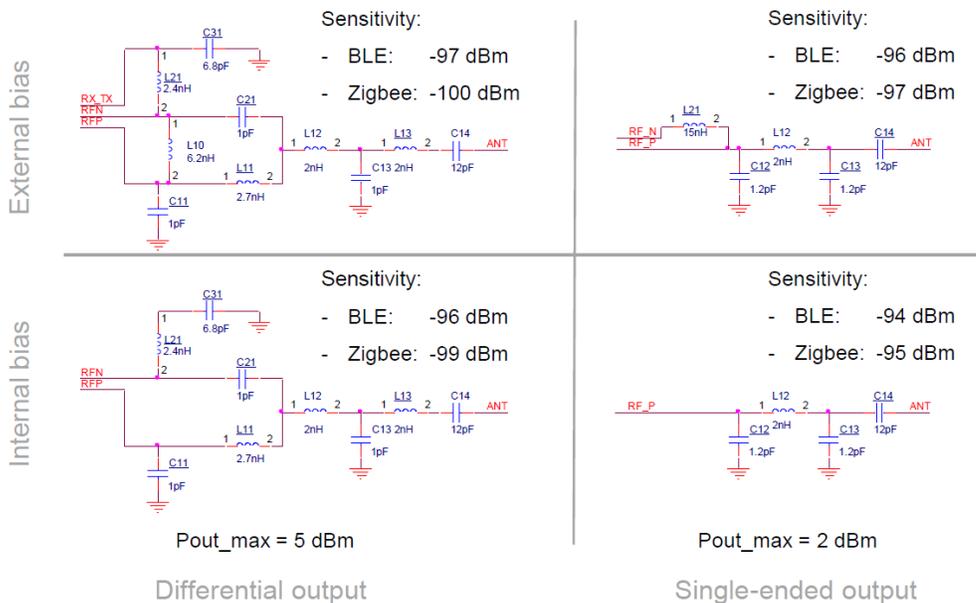


图 2. 射频前端的选项

	差分		单端	
	外部 Bias	内部 Bias	外部 Bias	内部 Bias
Output power	5	5	2	2
BLE Sensitivity	-97	-96	-96	-94
Link Budget	102	101	98	96
电感数量	5	4	2	1
电容数量	5	5	3	3
小计	10	9	5	4

表 2. CC2640 射频前端

对Beacon的应用，到底应该采用哪种射频前端，成本会更有优势，功耗更低？

### 2.2.1 覆盖范围

根据弗雷兹传输方程(friis formula)，在空旷环境中，5dBm广播的距离相对于0dBm来说接近大了一倍，如下面图3。

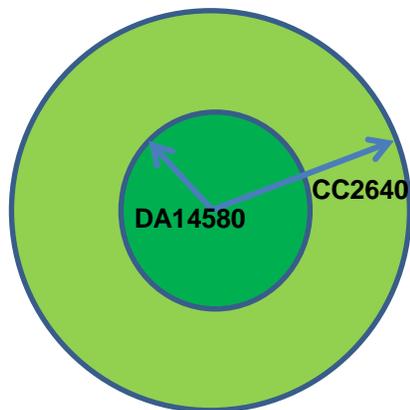


图 3. 0dBm 和 5dBm 覆盖面积比较

因此，5dBm发射功率实际覆盖的面积将会是0dBm的3-4倍。以Beacon室内导航应用为例，这意味着覆盖同样室内面积所需要的Beacon数量，5dBm只有0dBm数量的1/3-1/4，带来最直接的成本节省，而且配套的电池、模具、前期安装、后期维护也同样节省。

总体而言，对于这种应用，采用5dBm的发射功率，成本上会更有优势，建议采用差分+内部Bias的射频前端。

Overwrite this text with the ZHCA654

而如果覆盖范围要求很小，只有很少的独立Beacon点，比如门店优惠券推送，建议可以采用0dBm发送方式，这样单个节点所需要的BOM阻容器件少一点，功耗也可以更低一点。可以采用单端加上内部Bias的射频前端方式。

### 2.2.2 功耗的影响

0dBm和5dBm功耗主要差别在Tx状态时的电流。0dBm发射，单端射频前端，功耗是6.1mA，差分射频前端，功耗是7mA，而5dBm的Tx功耗是9.1mA。

基于CC2650EMK-7ID，300mS广播间隔，如图4，估算出来的平均功耗相差只有4uA。可见，5dBm的发射功率所引起的发射电流变大对于器件的整体平均功耗影响并不大。

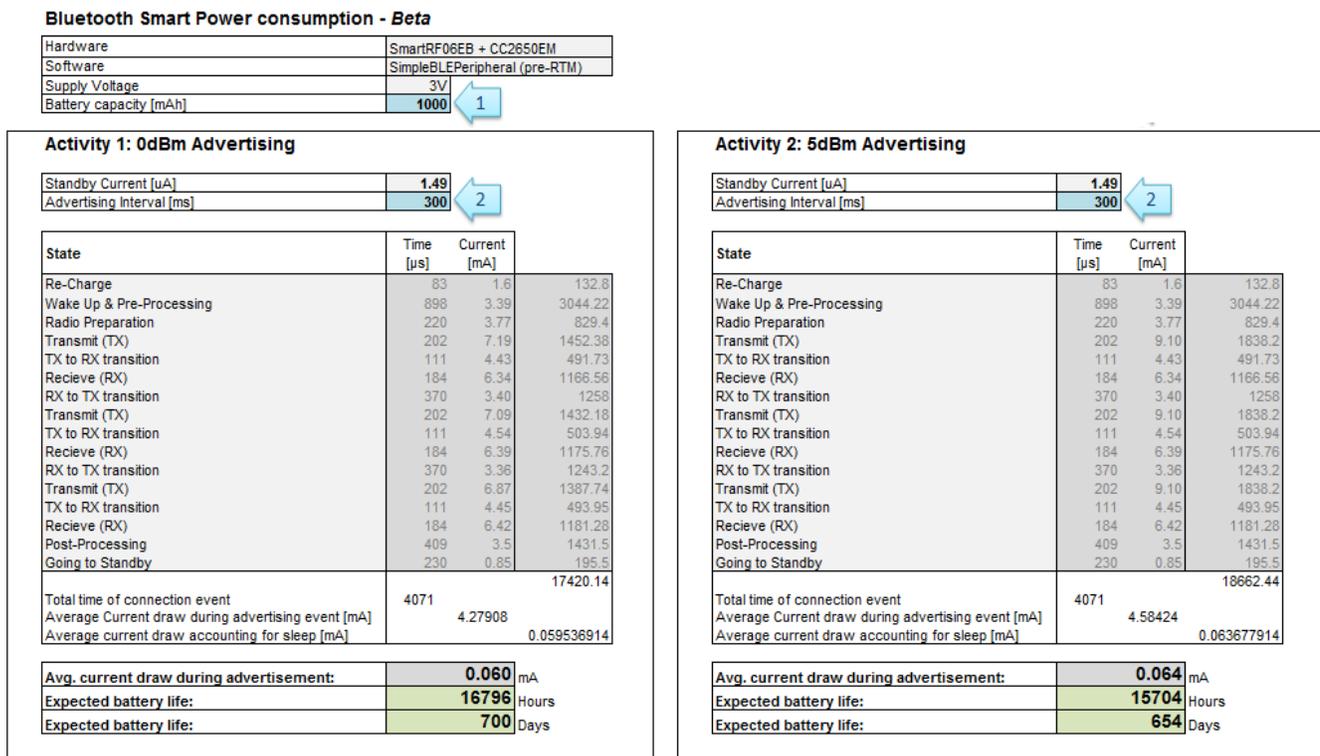


图 4. 0dBm 和 5dBm 在 300mS 间隔广播功耗对比

综合覆盖范围和功耗参数来看，本笔记比较推荐在Beacon的单向广播应用中采用差分+内部Bias的射频前端。

### 3 功耗

硬件上，参考TI三种封装搭配不同射频前端参考设计，按照文档[6]，将实际测试功耗与Power Calculation Tool计算出的功耗值进行对比，对功耗进行优化。

软件上，参考下面第4章节。

从硬件和软件进行优化设计以后，因为芯片本身参数的限制，功耗会到一定瓶颈，这时候我们还可以根据Beacon实际应用从系统角度进行功耗控制。

#### 3.1 室内光能量收集

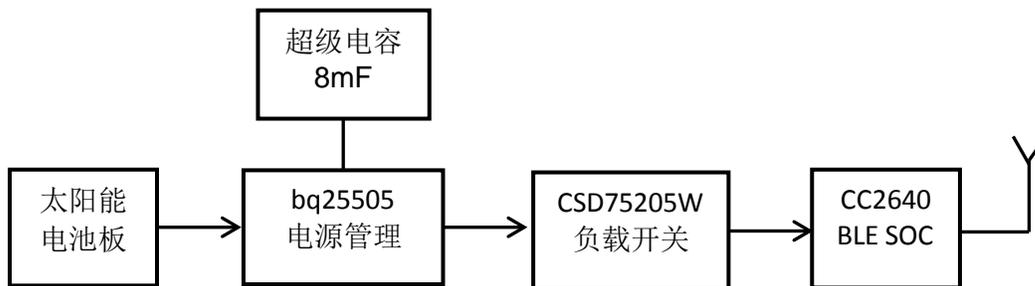


图 5. 室内光能量收集方案框图

该方案实现了无电池束缚，做到真正的能量收集。通过太阳能电池板采集光能量转换为电能量，然后由bq25505对一颗超级电容充电，由超级电容供电给CC2640，来完成间歇性广播和睡眠。详细参考[7]。

#### 3.2 RTC 定时管理

对于有些室内Beacon的方案，比如商场，需要白天有人流量的时候广播，而晚上商场关门之后并不需要Beacon继续工作，这时候我们可以将CC2640关闭，进入低功耗模式来节省功耗。

因此，我们可以通过在外部加一个实时时钟RTC，CC2640在晚上设定的时间后进入低功耗，此时只有外部RTC工作。之后，RTC在早上设定的时间自动产生中断给CC2640，通过GPIO口来唤醒CC2640继续工作。对该RTC的要求是体积小，并且可以产生外部中断自动唤醒CC2640。

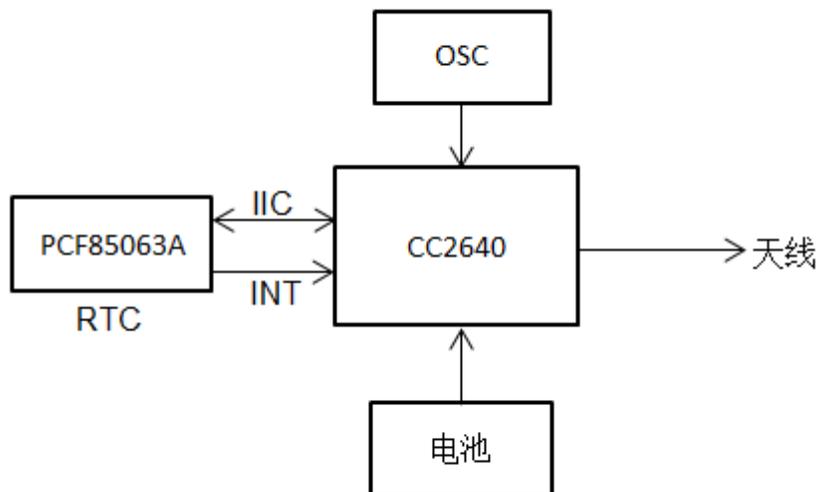


图 6. RTC 定时管理方案框图

以300mS间隔为例，0dBm发送，如果一直广播，平均功耗是60uA。通常商场9:30-22:30为营业时间，13个小时工作的平均功耗是60uA，而加入了RTC定时管理，剩下的11个小时平均功耗可以控制在1uA以下，这样一天下来的平均功耗就不到33uA。

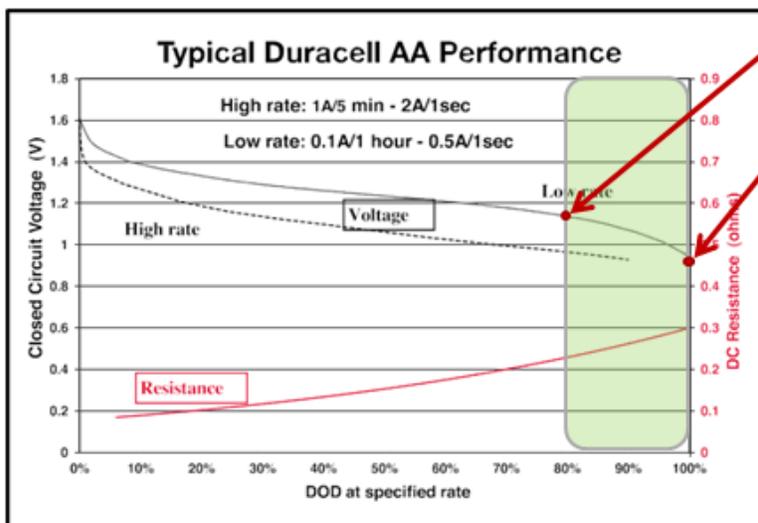
33uA相比60uA，满足同样电池寿命的情况下，电池容量可以设计的更小，从而更节省成本。

### 3.3 电池选择

基于优异的电源管理设计，TI CC2640 系列芯片支持比较宽的电压工作范围：1.8V~3.8V。对于大部分供电方式来说，可以节约掉电源芯片，而实现电池直接供电。

电池的开路电压会随着剩余电量的减少而逐步降低。芯片越低的工作电压，就可以最大程度的实现电池容量的使用。

比如下图是AA电池的放电曲线。当电池达到完全放电的时候，单节AA电池电压基本下降到0.9V。如果应用中采用了两节AA电池的串联供电，那么此时的开路电压为1.8V。所以，CC2640可以使用两节AA电池的100%的电量。



假设最低工作电压为2.35V，那么电池电量只用到了80%。

CC2640 可以让电池完全放电。

图 7. AA 电池电压放电曲线

## 4 软件实现

下面以SimpleBLEPeripheral工程为例，介绍关键参数的软件实现。

- 广播时间间隔

simpleBLEPeripheral.c，默认宏定义设置的160，对应100mS。

```
#define DEFAULT_ADVERTISING_INTERVAL 160
```

为了降低功耗同时广播帧又能被BLE设备及时收到，推荐可以设为300mS广播间隔。

```
#define DEFAULT_ADVERTISING_INTERVAL 1440
```

- 发射功率

比如设置5dBm发送，调用HCL\_EXT\_SetTxPowerCmd(HCL\_EXT\_TX\_POWER\_5\_DBM);  
在SimpleBLEPeripheral\_init()初始化函数中加入。

- 射频前端

比如采用差分前端，内部Dias，在bleUserConfig.h文件下，找到对应的封装宏定义修改

```
#define RF_FE_MODE_AND_BIAS (RF_FE_DIFFERENTIAL |  
RF_FE_INT_BIAS)
```

- 7X7移植到4X4封装

默认例程是基于7X7的封装，需要修改之后才能移植到4X4封装。

编译器下Search路径CC2650EM\_7ID改为CC2650EM\_4XS，参考下面IAR的截图。

注释掉TI\_DRIVERS\_SPI\_DMA\_INCLUDED和TI\_DRIVERS\_LCD\_INCLUDED，4X4封装没有足够的脚支持LCD，注释之后功耗会下降。

管脚配置，在Board.h文件下修改。

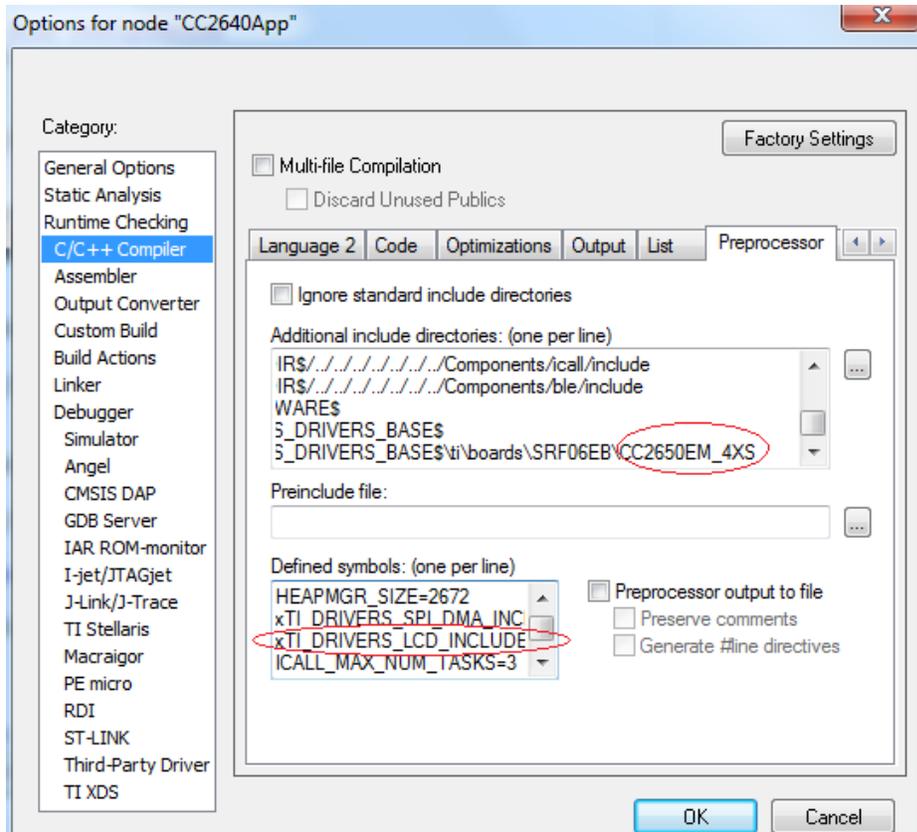


图 8. 工程属性截图

- 低功耗实现  
在编译器下面，右键工程/Options/C/C++ Compiler/Preprocessor/Defined symbols下默认已打开了POWER\_SAVING，打开该宏之后，TI-RTOS会自动进行低功耗管理
- 功耗测试前修改  
在SimpleBLEPeripheral例程上改完对应封装，射频前端以及注释掉LCD和SPI之后，功耗会下降很多。  
但是如果保留了空中升级功能，测试连接情况下的功耗。还需要在SimpleBLEPeripheral.c文件下作下面修改。
  1. 关闭周期性事件。  
SimpleBLEPeripheral\_processStateChangeEvt函数下GAPROLE\_CONNECTED  
`//Util_startClock(&periodicClock);`
  2. 禁掉连接参数更新  
`#define DEFAULT_ENABLE_UPDATE_REQUEST FALSE`
- 发现模式  
默认是不受限制地发现模式，一直广播。  
而受限制地发现模式在没有收到Central设备发来的建立连接请求，则只保持30.72秒的可发现状态，转后转为不可被发现的待机状态。  
`#define DEFAULT_DISCOVERABLE_MODE GAP_ADTYPE_FLAGS_GENERAL`

- 广播包Payload  
SimpleBLEPeripheral.c文件下advertData[ ] 数组，默认7个字节，包含GAP基本服务UUID的数据段0XF0FF及相应广播模式，发现类型等信息。  
而如果开发符合苹果公司的iBeacon包结构，Prefix + UUID + Major + Minor + TX power，需要取得苹果公司MFi认证[9].

## 参考文档

- [1] CC2640 datasheet-SWRS176A
- [2] CC13xx, CC26xx SimpleLink™ Wireless MCU Technical Reference Manual-SWCU117C
- [3] SimpleLink™ Bluetooth® low energy CC2640 wireless MCU Software Developer's Guide-SWRU393A
- [4] Bluetooth® Low Energy Beacons-SWRA475
- [5] CC26xx HW Training  
[http://processors.wiki.ti.com/images/4/45/CC26xx\\_HW\\_training\\_RF\\_Frontends\\_and\\_Antennas.pdf](http://processors.wiki.ti.com/images/4/45/CC26xx_HW_training_RF_Frontends_and_Antennas.pdf)
- [6] Measuring Bluetooth Smart Power Consumption-SWRA478A
- [7] Indoor Light Energy Harvesting Reference Design for Bluetooth Low Energy (BLE) Beacon Subsystem-TIDA-00100
- [8] Power Calculation Tool  
<http://www.ti.com/ble-power-calculator>
- [9] BLE WIKI  
<http://processors.wiki.ti.com/index.php/Category:BluetoothLE>
- [10] Getting Started with iBeacon  
<https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf>

## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a>	通信与电信	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a>	计算机及周边	<a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a>	消费电子	<a href="http://www.ti.com.cn/consumer-apps">www.ti.com.cn/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>	能源	<a href="http://www.ti.com.cn/energy">www.ti.com.cn/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a>	工业应用	<a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a>	医疗电子	<a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a>	安防应用	<a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a>	汽车电子	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a>	视频和影像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>		
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>		
OMAP应用处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/omap">www.ti.com.cn/omap</a>		
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a>	德州仪器在线技术支持社区	<a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated