



Albin Zhang

Wireless Connectivity Solution

## 摘要

本文的目标是指导客户在做蓝牙 RF-PHY 认证和无线电委员会 SRRC 的认证测试中，如何准备被测件以及通过工具进行配置的方法。

本文以 TI 最新一代 CC2340R5 和 SDK7.40 版本为例进行阐述，同样适用于其他的蓝牙产品和 SDK 的版本。讨论的方法适用于 TI 所有支持蓝牙的产品，包括 CC264x、CC265x、CC135x、CC267x、CC23xx 系列产品。

本文也不会具体阐述代码编译及下载流程，这些在 TI 的 [SimpleLink Academy](#) 都可以获得帮助。

## 内容

<b>1 测试前准备</b> .....	2
1.1 下载必要套件和工具.....	2
1.2 测试文件.....	2
1.3 测试工具.....	2
1.4 硬件环境.....	3
<b>2 蓝牙 RF-PHY 测试模式</b> .....	4
2.1 测试规范命令.....	4
2.2 用 Btool 实现测试.....	4
2.3 蓝牙测试仪环回信令测试.....	7
<b>3 SRRC 定频测试</b> .....	9
3.1 SRRC 新规及适配条款.....	9
3.2 用 Btool 实现测试.....	9
3.3 用 SmartRF Studio 实现测试.....	11
<b>4 总结</b> .....	11
<b>5 参考文档</b> .....	11

## 插图清单

图 1-1. LP_EM_CC2340R5 的 UART 配置.....	2
图 1-2. 默认 UART 的接口.....	3
图 2-1. SIG 测试命令.....	4
图 2-2. 非信令连接示意图.....	5
图 2-3. 信令连接示意图.....	7

## 1 测试前准备

Bluetooth SIG RF-PHY 测试及 SRRC 定频测试使用的测试代码是例程 - host\_test\_app，由上位机工具发送 2-wire HCI 指令给芯片实现特殊模式的配置。

### 1.1 下载必要套件和工具

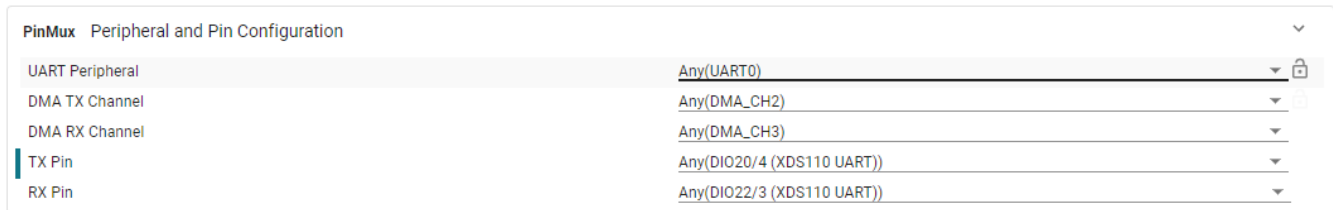
1. 测试用软件工程、二进制文件和发送 HCI 命令的工具 Btool 安装 SDK ( <https://www.ti.com/tool/SIMPLELINK-LOWPOWER-SDK> ) 都可获得. 请在相关器件产品目录下载。
2. 如果没有安装 IDE 软件 CCS ( <https://www.ti.com.cn/tool/cn/CCSTUDIO> )，可以直接用 Uniflash ( <https://www.ti.com.cn/tool/cn/UNIFLASH> ) 下载二进制文件。

### 1.2 测试文件

TI 会针对相应产品的开发板的接口和射频配置会预置编译好的 host\_test\_app.hex 文件。如果按照默认目录安装 SDK 的话，通常存储在如下目录：

C:\ti\simplelink\_lowpower\_f3\_sdk\_7\_40\_00\_64\examples\rtos\LP\_EM\_CC2340R5\ble5stack\hexfiles

TI LP-EM-CC2340R5 开发板的配置如下，也就是说使用了 DIO20 和 DIO22 作为 UART 的接口。



## Wireless MCU IO block

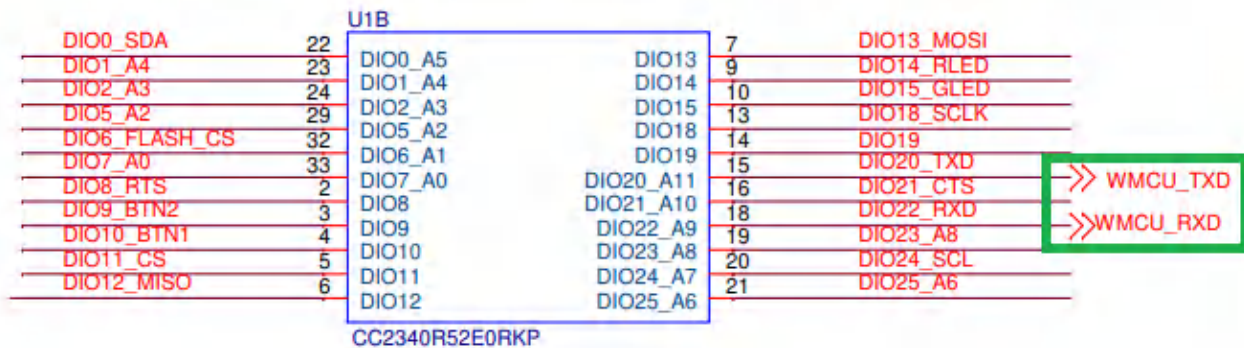


图 1-1. LP\_EM\_CC2340R5 的 UART 配置

如果用户的硬件设计更换了 UART 的映射，则预置的 HEX 文件不可用，需要根据客户化设计对工程文件重新编译。例程如下：

C:\ti\simplelink\_lowpower\_f3\_sdk\_7\_20\_00\_29\examples\rtos\LP\_EM\_CC2340R5\ble5stack\host\_test

### 1.3 测试工具

TI 推荐的工具为 Btool, 可以在相应 SDK 的安装目录下获得。

C:\ti\simplelink\_lowpower\_f3\_sdk\_7\_40\_00\_64\tools\ble5stack\btool

如果用户自行开发或者使用其他的 UART 串口工具，可以复制从 Btool 的 log 中获得 Dump 的字符串下发命令。下面范例为发送一个 SIG 定义的发射测试包。

```
-----
[6] : <Tx> - 11:52:38.383
-Type : 0x01 (Command)
-OpCode : 0x201E (HCI_LE_TransmitterTest)
-Data Length : 0x03 (3) byte(s)
TX Channel : 0x00 (0)
TestData Length: 0x25 (37)
TestData : 02
Dump(TX):
0000:01 1E 20 03 00 25 02 .. ..%.
-----
```

## 1.4 硬件环境

相对于 SmartRF studio 使用 JTAG 不同，本文讨论的测试都是基于 UART 的 HCI 命令格式。所以，客户在设计电路板时，一定要预留 UART 接口的测试点。

TI 最新的仿真器 LP-XDS110ET 除了 JTAG 之外，还附带一个 UART-USB 的转接器，可以利用这个仿真器做 UART-USB 转接至上位机电脑或者蓝牙测试仪器端。这个仿真器还有电平转换电路，如果被测件接口电平和默认不同，也可根据跳线帽进行选择。

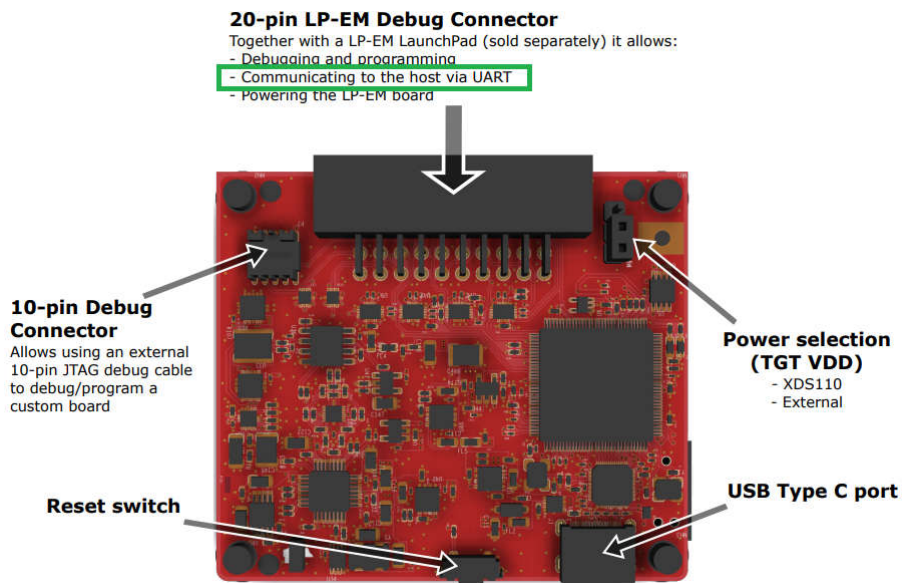
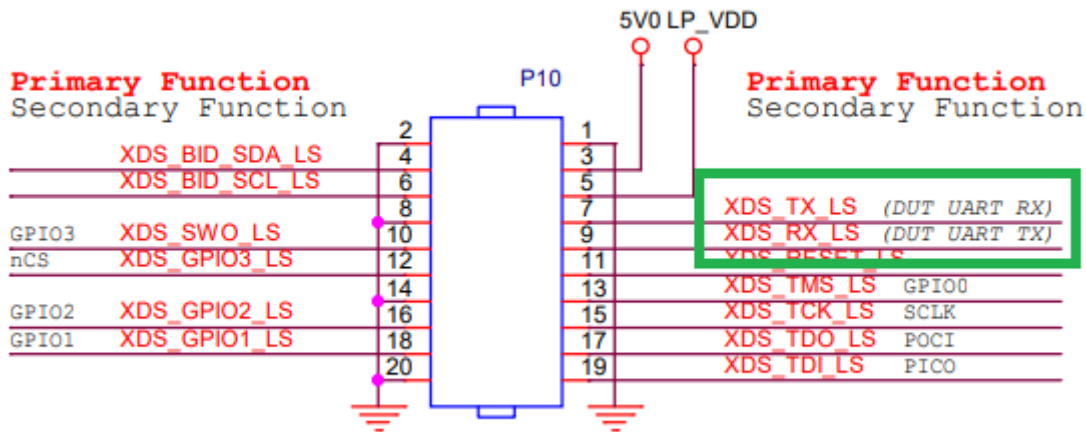


图 1-2. 默认 UART 的接口

## 2 蓝牙 RF-PHY 测试模式

一款产品在上市的时候如果声称支持蓝牙，那么需要通过蓝牙的认证测试。射频性能是和产品硬件相关，所以 RF-PHY 是需要测试实验室进行完整测试的。

### 2.1 测试规范命令

蓝牙的核心规范和测试规范在 SIG 的网站可以下载。

[Specifications | Bluetooth® Technology Website](#)

下面范例以 BT5.4 为例进行说明，下图为 DTM 模式中的 RF 测试的 HCI/2-wire UART 的命令和返回事件。具体的参数定义可以在规范中查阅。本文不做详细描述。

RF Test command / event	HCI command / event	2-wire UART command / event
LE_Transmitter_Test command	HCI_LE_Transmitter_Test command	LE_Transmitter_Test command
LE_Receiver_Test command	HCI_LE_Receiver_Test command	LE_Receiver_Test command
LE_Test_End command	HCI_LE_Test_End command	LE_Test_End command
LE_Status event	HCI_Command_Complete event	LE_Test_Status event
LE_Packet_Report event	HCI_Command_Complete event	LE_Packet_Report event

图 2-1. SIG 测试命令

### 2.2 用 Btool 实现测试

该方法可用于不支持信令模式的仪器和实验室分析问题用。

连接示意图如下图所示：

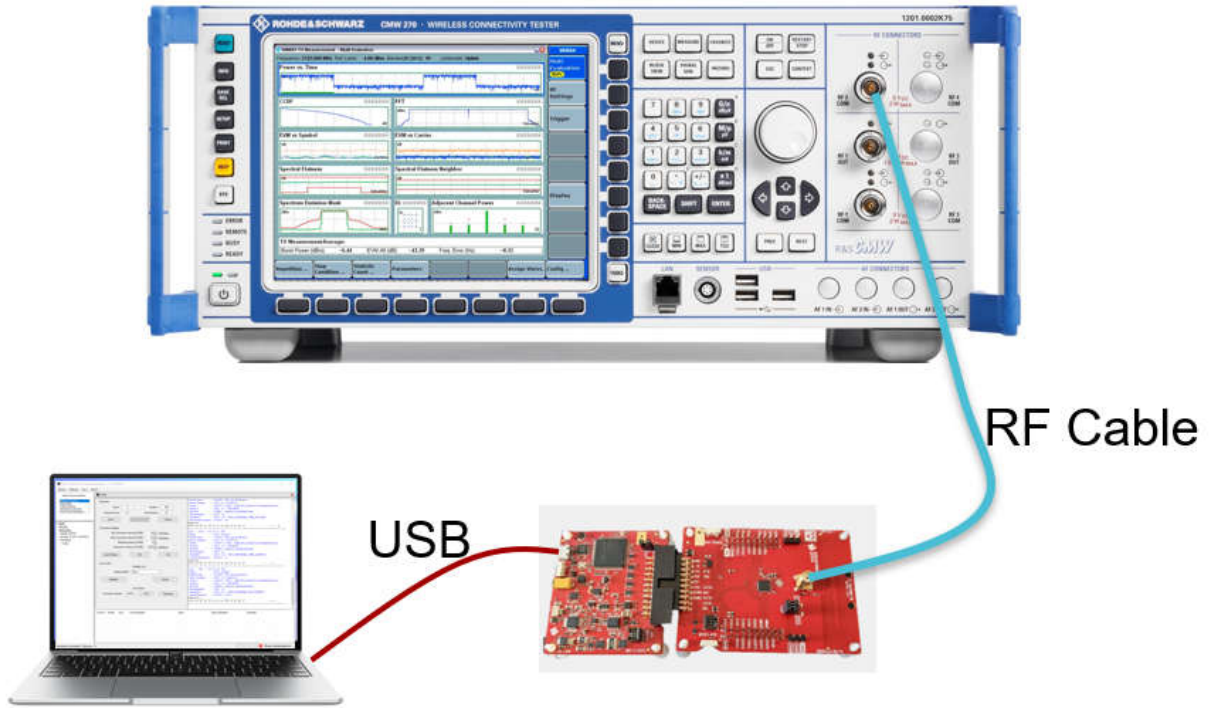
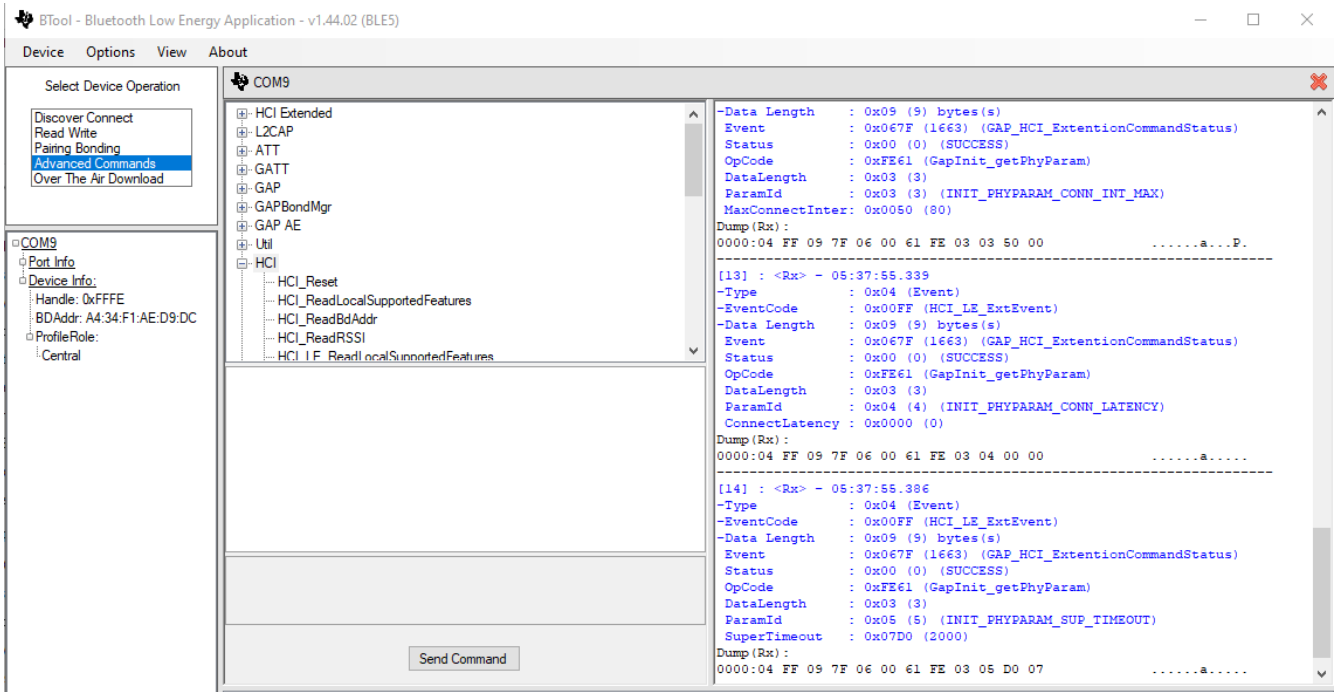


图 2-2. 非信令连接示意图

DTM 模式的测试采用的的蓝牙规范定义的 HCI 的命令组，如下图：



### 2.2.1 发射 HCI\_LE\_Transmitter\_Test

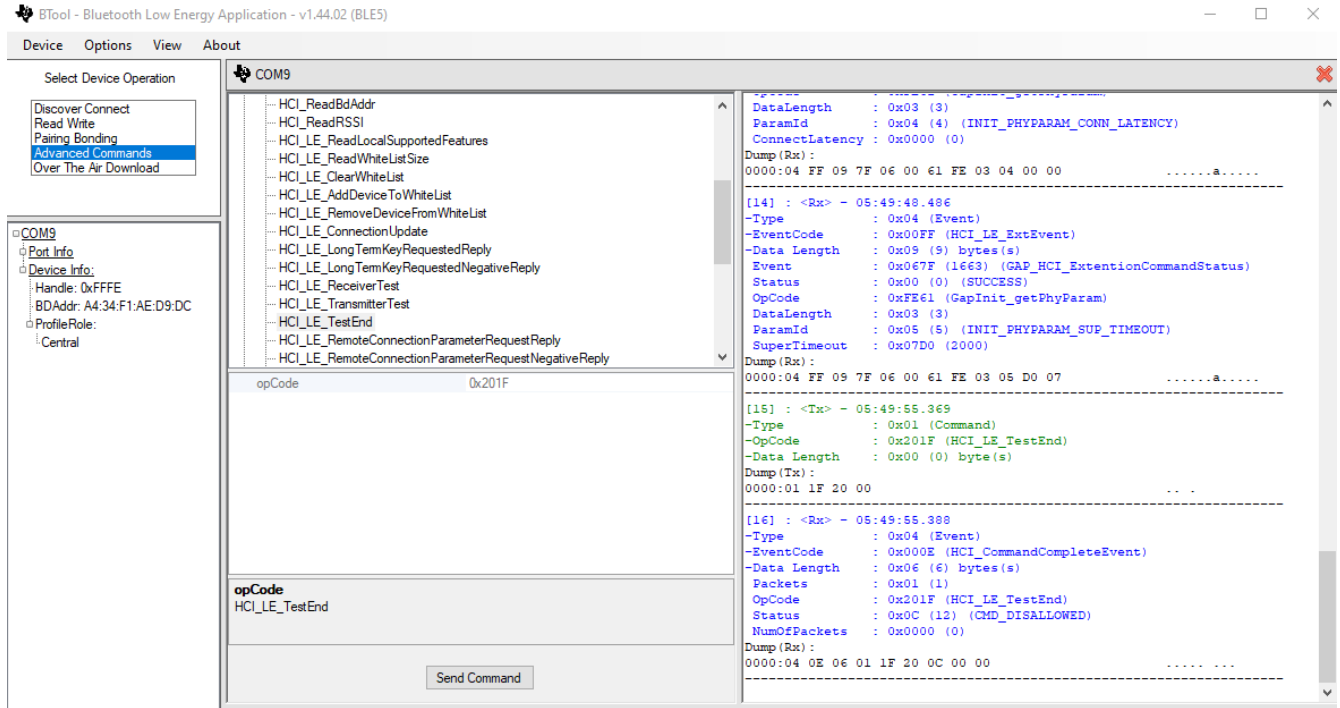
在 BT5 之后，SIG 发布了更多的物理层，包括 1M、2M 和 Coded PHY，与之配套的 opCode 为 0x2034 的命令如下图所示，使用 `HCI_LE_EnhancedTransmitter_Test` 命令。

关于具体的参数需要和仪器端需要测试项目的要求匹配，详情参阅测试规范 [RF-PHY Test Suite](#)。



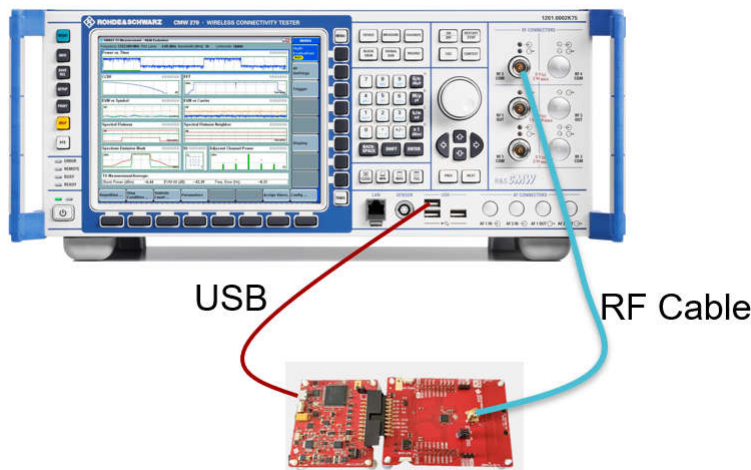
### 2.2.3 结束测试 LE\_Test\_End command

在切换发射、接收参数命令之前，需要执行 opCode 为 0x201F 的 Test End 指令。在接收测试时，该指令的返回值还包括接收到的包的个数 - LE\_Packet\_Report，该返回值结果用于接收 PER 的计算。



### 2.3 蓝牙测试仪环回信令测试

环回信令测试也是在做 BQB 和 OTA 天线测试最常用的测试方法。所有的测试指令同上述两个节描述的，区别就是 HCI 命令由仪器发出，请确保仪器端 COM 口配置和被测件匹配。



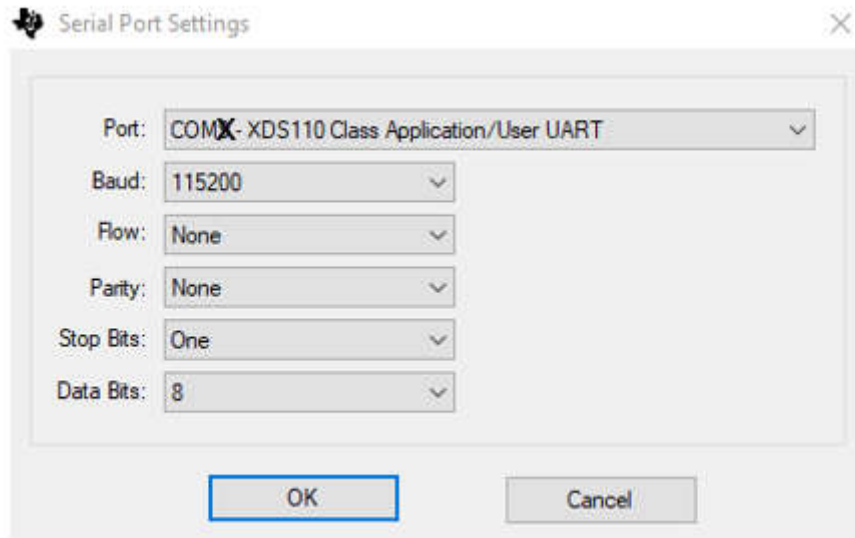


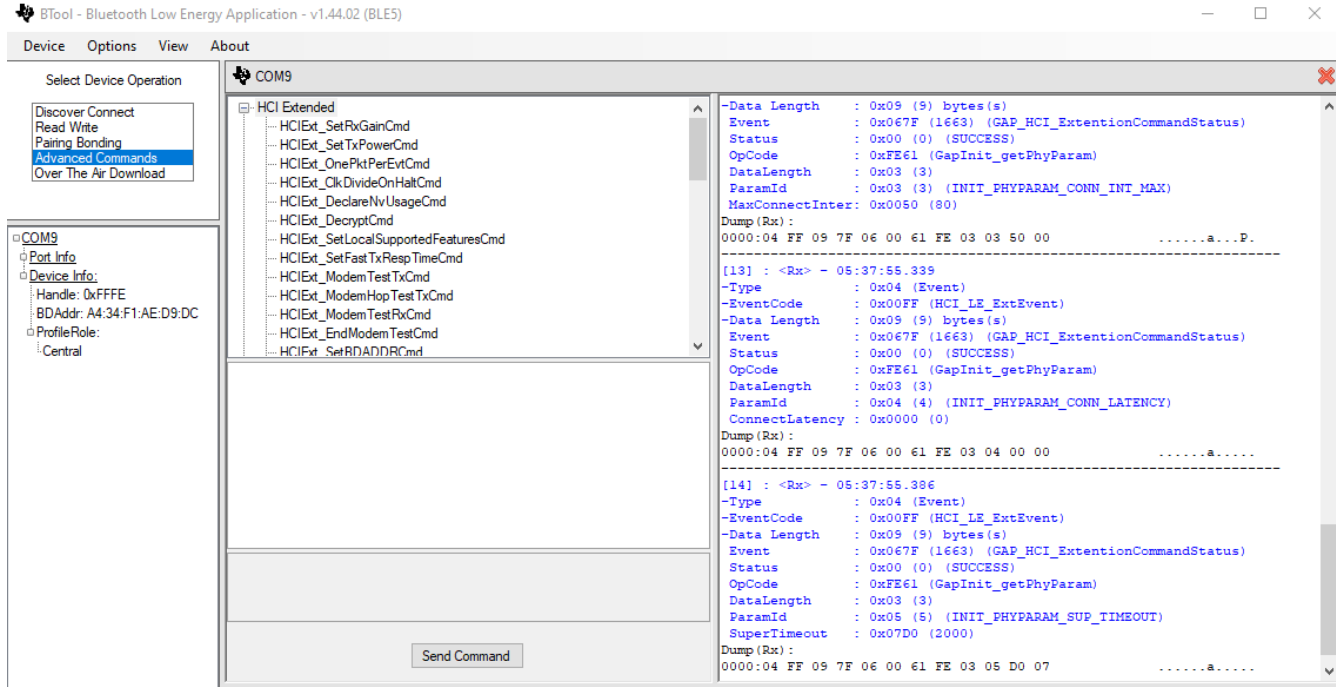
图 2-3. 信令连接示意图

注：图 2-3 只是范例，实际使用中，CMW 需要安装 XDS110 的 driver，一般比较难实现。客户需要使用一个验证仪器端可以支持的 USB-UART 的转接器。

### 3 SRRC 定频测试

本文重点讨论中国无线电委员会的测试件的配置，同样也可适用于其他的认证，如 CE，FCC 等。读者可以根据测试实验室的具体测试要求，根据下述方法进行配置。比较典型的需求如在中低频段定频发射调制信号及非调制信号、接收。

这项测试中，用到的是 extended HCI command 下面的命令组，这些都是 OGF 为 0x3F 的厂家自定义命令。



#### 3.1 SRRC 新规及适配条款

在工信部无线电管理局 SRRC 的最新规范《2400MHz、5100MHz 和 5800MHz 频段无线电发射设备干扰规避技术要求》中增加了对于 2.4GHz 蓝牙设备的退让机制的需求，这一项需要蓝牙设备支持 AFH (Adaptive Frequency Hopping) 自适应跳频的支持。SDK8.30 之前的版本还不支持 AFH。那么，用户可以选择符合第四类设备：基于其他机制的干扰缓解技术要求。这一项是需要满足“等效占用率”应不大于 10%。

$$EU = \left( \frac{P_{e.i.r.p} (mW)}{P_{limit} (mW)} \right) \times DC$$

式中，EU 为等效占用率，DC 为设备占空比，其中  $P_{limit}$  为对应附件 1 中 2400MHz 或 5800MHz 等效全向辐射功率限值要求。

$P_{limit}$  在天线方向增益小于 10dBi 下为 100mW。

对于 10dBm (10mW) e.i.r.p 以下的设备来说（CC2340 系列为 8dBm，CC2642 系列为 5dBm），假设天线最大方向增益为 0dBi，即使占空比为 100%，EU 也是小于 10%的。

在最新的 SDK 版本中（如 SDK9.x 之后），就可以声称基于“监测与避让”机制的设备，无需关注占空比了。

#### 3.2 用 Btool 实现测试

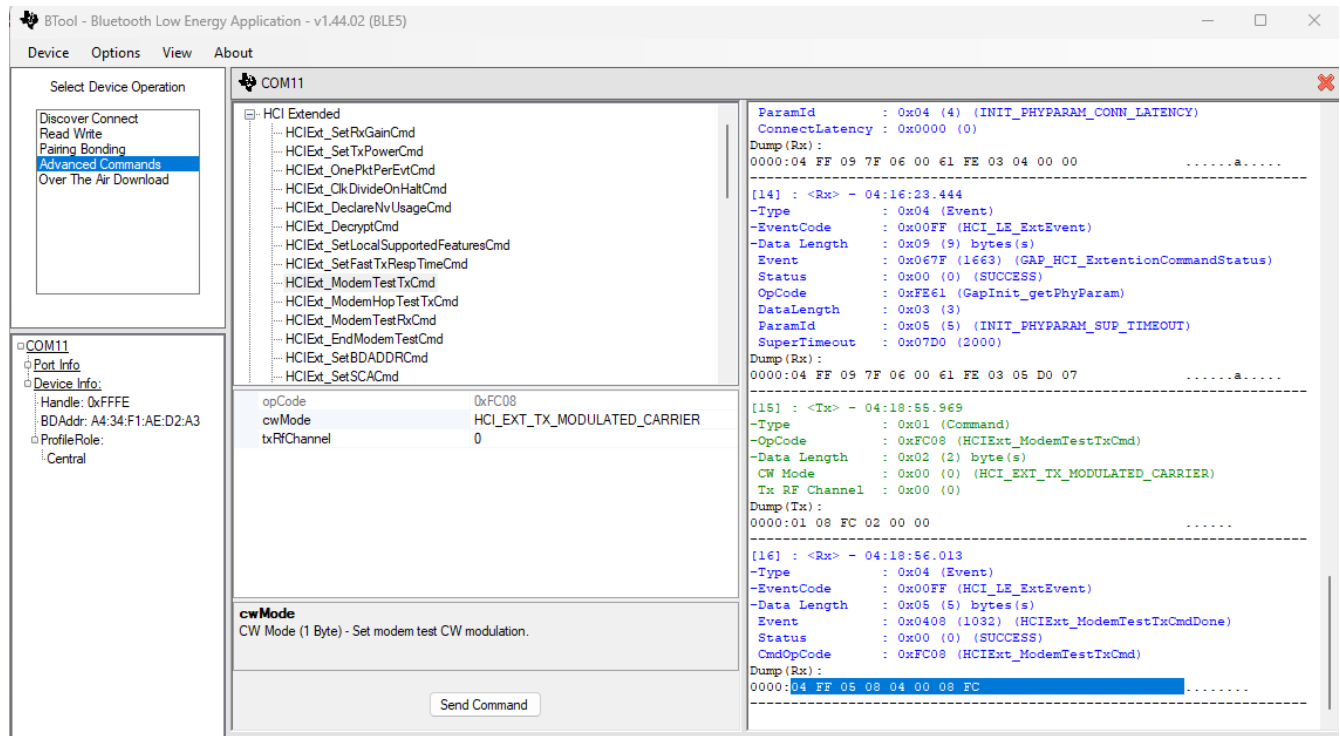
##### 3.2.1 发射 HCIExt\_ModemTestTxCmd

发射测试中使用 HCIExt\_ModemTestTxCmd，其中

cwMode : HCI\_EXT\_TX\_MODULATED\_CARRIER 为调制定频信号。

HCI\_EXT\_TX\_UNMODULATED\_CARRIER 为非调制定频信号，这个也可以用来测试高频晶振的频偏。

txRfChannel：这个参数来配置测试信号的信道。



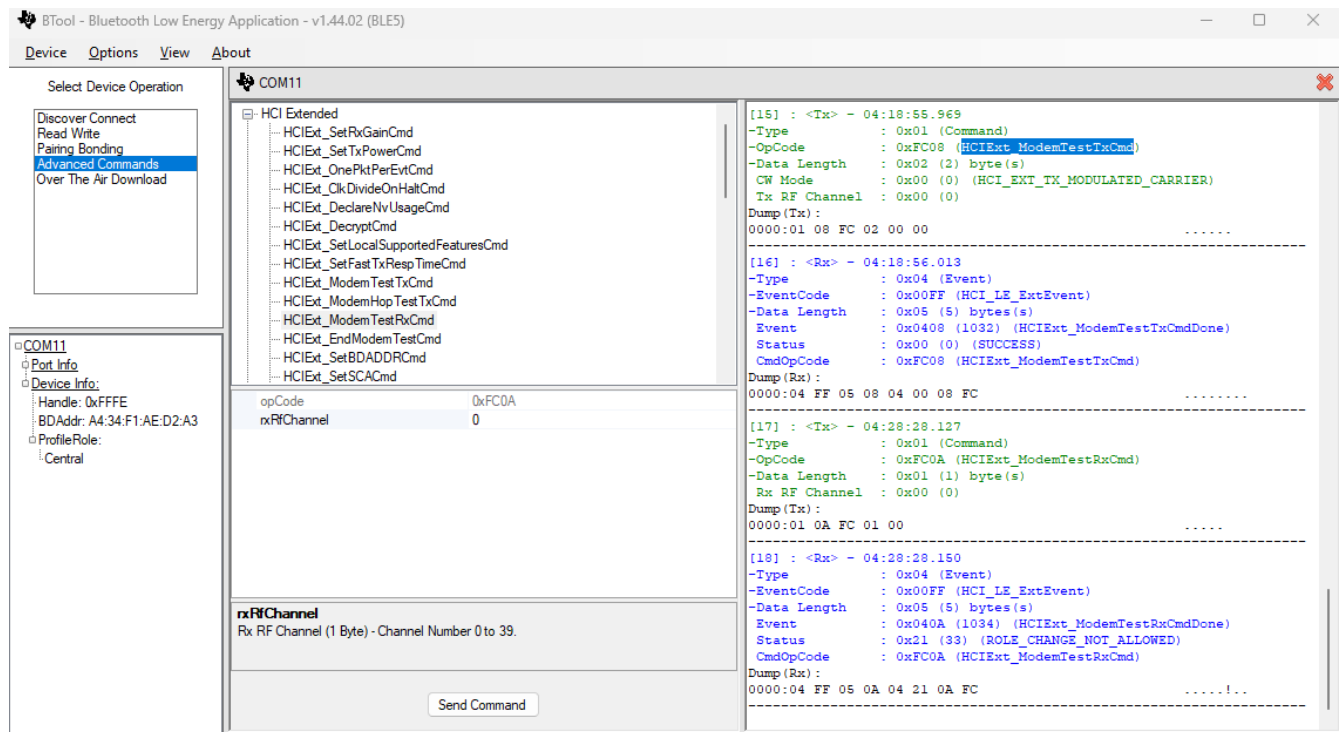
The screenshot shows the BTool interface with the following details:

- Device:** COM11
- Device Info:** Handle: 0xFFFF, BDAddr: A4:34:F1:AE:D2:A3, ProfileRole: Central
- Configuration:**
  - opCode: 0xFC08
  - cwMode: HCI\_EXT\_TX\_UNMODULATED\_CARRIER
  - txRfChannel: 0
- Log Output:**

```
[14] : <Rx> - 04:16:23.444
-Type : 0x04 (Event)
-EventCode : 0x00FF (HCI_LE_ExtEvent)
-Data Length : 0x09 (9) bytes(s)
Event : 0x067F (1663) (GAP_HCI_ExtentionCommandStatus)
Status : 0x00 (0) (SUCCESS)
OpCode : 0xFE61 (GapInit_getPhyParam)
DataLength : 0x03 (3)
ParamId : 0x05 (5) (INIT_PHYPARAM_SUP_TIMEOUT)
SuperTimeout : 0x07D0 (2000)
Dump (Rx):
0000:04 FF 09 7F 06 00 61 FE 03 04 00 00
-----
[15] : <Tx> - 04:18:55.969
-Type : 0x01 (Command)
-OpCode : 0xFC08 (HCIExt_ModemTestTxCmd)
-Data Length : 0x02 (2) byte(s)
CW Mode : 0x00 (0) (HCI_EXT_TX_UNMODULATED_CARRIER)
Tx RF Channel : 0x00 (0)
Dump (Tx):
0000:01 08 FC 02 00 00
-----
[16] : <Rx> - 04:18:56.013
-Type : 0x04 (Event)
-EventCode : 0x00FF (HCI_LE_ExtEvent)
-Data Length : 0x05 (5) bytes(s)
Event : 0x0408 (1032) (HCIExt_ModemTestTxCmdDone)
Status : 0x00 (0) (SUCCESS)
CmdOpCode : 0xFC08 (HCIExt_ModemTestTxCmd)
Dump (Rx):
0000:04 FF 05 08 04 00 08 FC
```

### 3.2.2 接收 HCIExt\_ModemTestRxCmd

HCIExt\_ModemTestRxCmd 可以配置芯片进入接收模式。 txRfChannel 参数来配置测试信号。



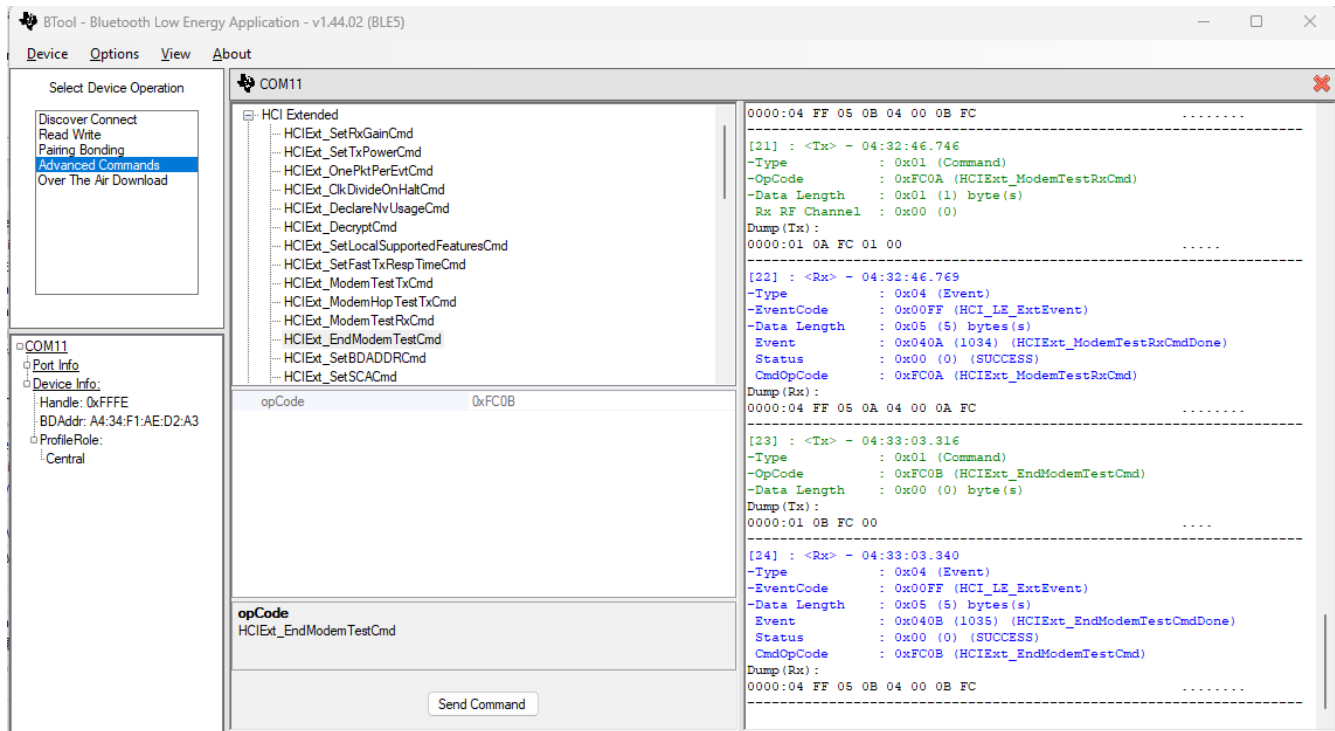
The screenshot shows the BTool interface with the following details:

- Device:** COM11
- Device Info:** Handle: 0xFFFF, BDAddr: A4:34:F1:AE:D2:A3, ProfileRole: Central
- Configuration:**
  - opCode: 0xFC0A
  - rxRfChannel: 0
- Log Output:**

```
[15] : <Tx> - 04:18:55.969
-Type : 0x01 (Command)
-OpCode : 0xFC0A (HCIExt_ModemTestRxCmd)
-Data Length : 0x02 (2) byte(s)
CW Mode : 0x00 (0) (HCI_EXT_TX_UNMODULATED_CARRIER)
Tx RF Channel : 0x00 (0)
Dump (Tx):
0000:01 08 FC 02 00 00
-----
[16] : <Rx> - 04:18:56.013
-Type : 0x04 (Event)
-EventCode : 0x00FF (HCI_LE_ExtEvent)
-Data Length : 0x05 (5) bytes(s)
Event : 0x0408 (1032) (HCIExt_ModemTestRxCmdDone)
Status : 0x00 (0) (SUCCESS)
CmdOpCode : 0xFC0A (HCIExt_ModemTestRxCmd)
Dump (Rx):
0000:04 FF 05 08 04 00 08 FC
-----
[17] : <Tx> - 04:28:28.127
-Type : 0x01 (Command)
-OpCode : 0xFC0A (HCIExt_ModemTestRxCmd)
-Data Length : 0x01 (1) byte(s)
Rx RF Channel : 0x00 (0)
Dump (Tx):
0000:01 0A FC 01 00
-----
[18] : <Rx> - 04:28:28.150
-Type : 0x04 (Event)
-EventCode : 0x00FF (HCI_LE_ExtEvent)
-Data Length : 0x05 (5) bytes(s)
Event : 0x040A (1034) (HCIExt_ModemTestRxCmdDone)
Status : 0x21 (33) (ROLE_CHANGE_NOT_ALLOWED)
CmdOpCode : 0xFC0A (HCIExt_ModemTestRxCmd)
Dump (Rx):
0000:04 FF 05 0A 04 21 0A FC
```

### 3.2.3 测试结束 HCIExt\_EndModemTestCmd

测试结束命令为 HCIExt\_EndModemTestCmd，这条命令使用在切换发射及接收命令参数的时候使用。



### 3.3 用 SmartRF Studio 实现测试

除了使用代码的 DTM/PTM 模式之外，TI 还提供了 SmartRF Studio 工具用于实验室的发射和接收的调试工具，这套工具也可以用于无线电管理中的射频测试。SmartRF Studio 可以直接控制芯片的物理层而无需下载软件。但是，这个工具需要仿真器来支持，所以，在测试当中需要和电脑连接，连接 USB 数据线有可能会变成杂散信号的干扰源。TI 比较推荐用 DTM/PTM 模式来进行无线电认证。

关于 SmartRF studio 和使用手册请参考 <https://www.ti.com/tool/SMARTRFTM-STUDIO>

## 4 总结

本文简明扼要的对测试过程和方法做了介绍，方便读者尽量减少学习射频和软件达到完成认证测试的目标。如果需要了解详细信息，可以参阅 5 参考文档中的相关文档。

## 5 参考文档

1. <https://www.ti.com/tool/SMARTRFTM-STUDIO>
2. [Configuring Bluetooth LE devices for Direct Test Mode](#)
3. [How to Do RF Radio Test With Your Bluetooth Product \(Rev. A\)](#)
4. [How to Certify Your Bluetooth Product \(Rev. K\)](#)
5. <https://www.ti.com/tool/LP-XDS110ET>
6. 《2400MHz、5100MHz 和 5800MHz 频段无线电发射设备干扰规避技术要求》

## 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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月