

## TI 蓝牙产品 BQB RF-PHY 测试及 SRRC 定频测试的配置方法

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。

### 目录

|       |                                   |    |
|-------|-----------------------------------|----|
| 1     | 测试前准备 .....                       | 3  |
| 1.1   | 下载必要套件和工具 .....                   | 3  |
| 1.2   | 测试文件 .....                        | 3  |
| 1.3   | 测试工具 .....                        | 3  |
| 1.4   | 硬件环境 .....                        | 4  |
| 2     | 蓝牙 RF-PHY 测试模式 .....              | 5  |
| 2.1   | 测试规范命令 .....                      | 5  |
| 2.2   | 用 Btool 实现测试 .....                | 5  |
| 2.2.1 | 发射 HCI_LE_Transmitter_Test .....  | 6  |
| 2.2.2 | 接收 HCI_LE_Receiver_Test .....     | 7  |
| 2.2.3 | 结束测试 LE_Test_End command .....    | 8  |
| 2.3   | 蓝牙测试仪环回信令测试 .....                 | 8  |
| 3     | SRRC 定频测试 .....                   | 9  |
| 3.1   | SRRC 新规及适配条款 .....                | 9  |
| 3.2   | 用 Btool 实现测试 .....                | 10 |
| 3.2.1 | 发射 HCIExt_ModemTestTxCmd .....    | 10 |
| 3.2.2 | 接收 HCIExt_ModemTestRxCmd .....    | 11 |
| 3.2.3 | 测试结束 HCIExt_EndModemTestCmd ..... | 11 |
| 3.3   | 用 SmartRF Studio 实现测试 .....       | 12 |
| 4     | 总结                                | 12 |
| 5     | 参考文档 .....                        | 12 |

### Figures

|     |                                |   |
|-----|--------------------------------|---|
| 图 1 | LP_EM_CC2340R5 的 UART 配置 ..... | 3 |
| 图 2 | 默认 UART 的接口 .....              | 4 |
| 图 3 | 非信令连接示意图 .....                 | 6 |
| 图 4 | 信令连接示意图 .....                  | 9 |

---

**Tables**

表 1 SIG 测试命令 .....5

## 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

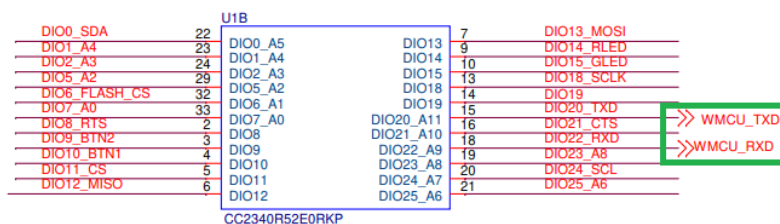


图 1 LP\_EM\_CC2340R5 的 UART 配置

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。

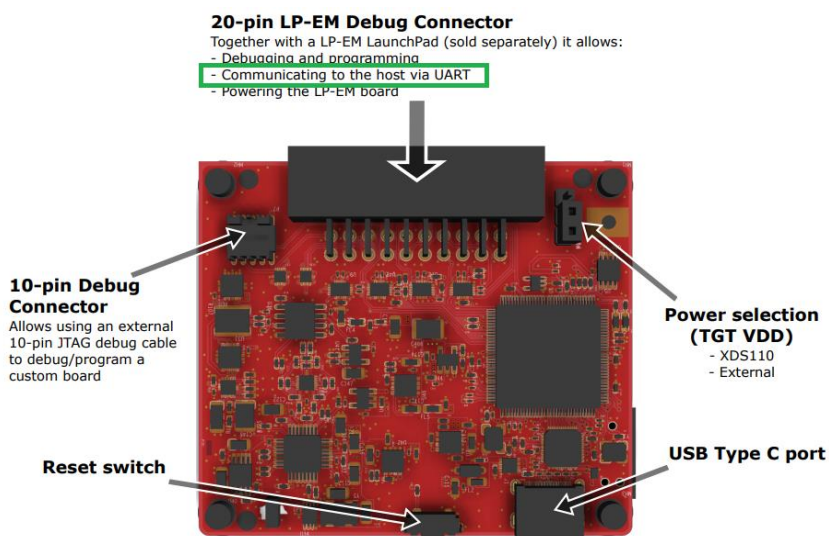
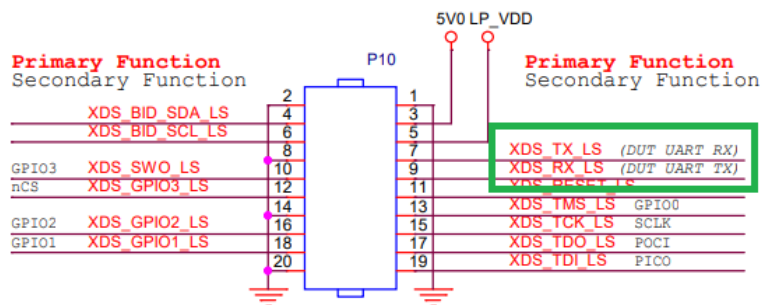


图 2 默认 UART 的接口

## 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 是需要在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      |

表 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：

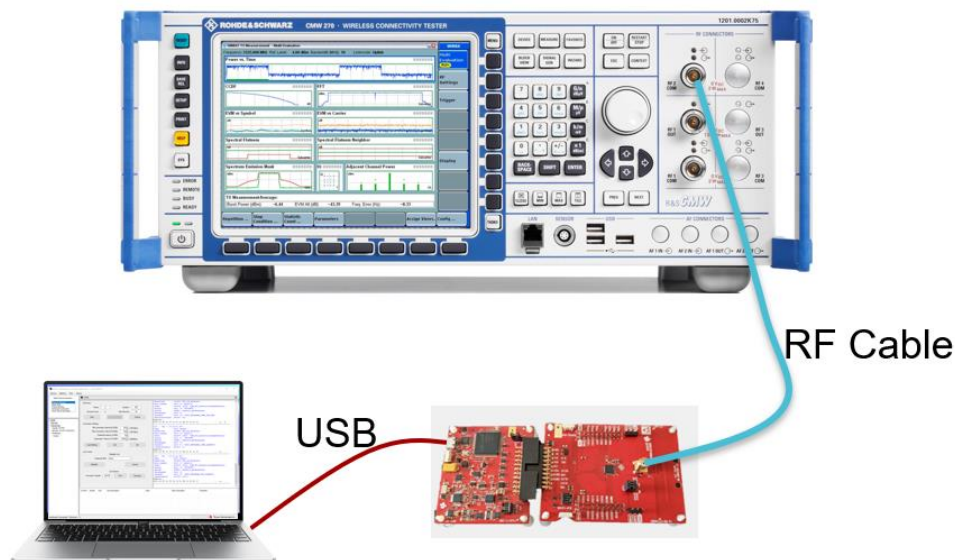
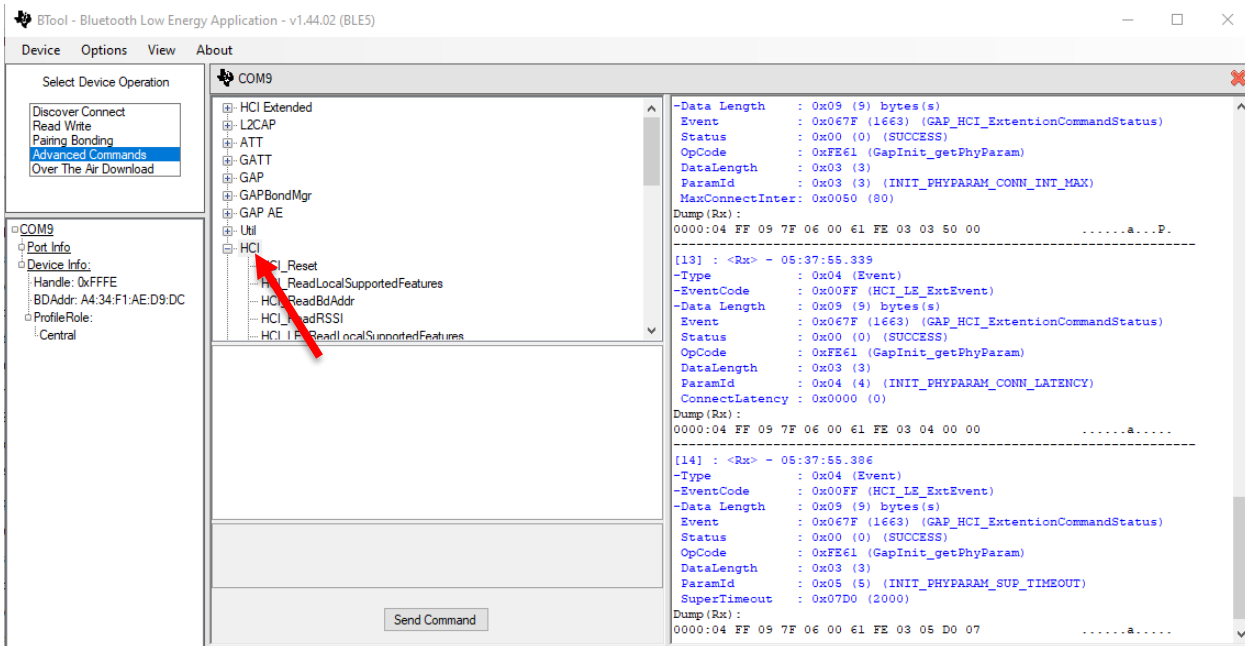


图 3 非信令连接示意图

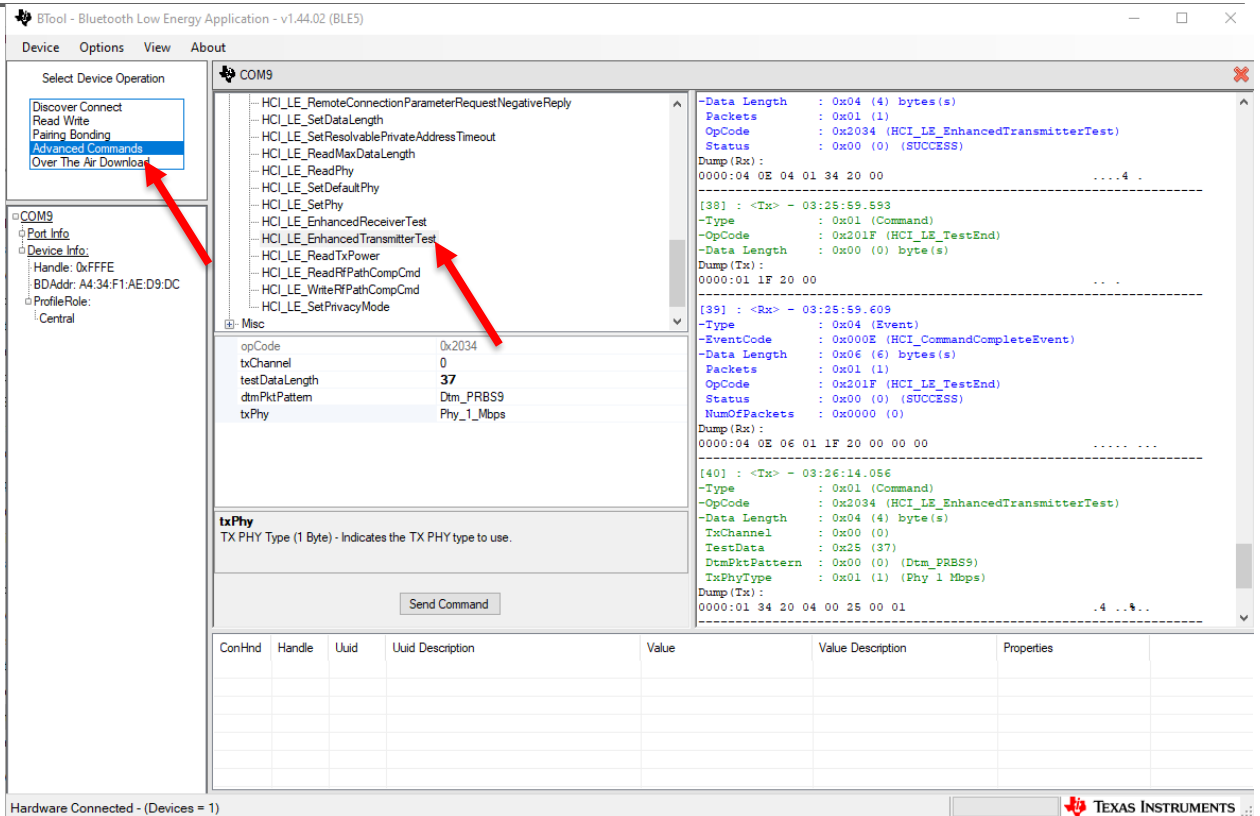
DTM 模式的测试采用的的蓝牙规范定义的 HCI 的命令组，如下图：



### 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](#)。



The screenshot shows the BTTool interface with the following details:

- Select Device Operation:** Advanced Commands is selected.
- COM9 Device Info:** Handle: 0xFFFE, BDAAddr: A4:34:F1:AE:D9:DC, ProfileRole: Central.
- Misc Parameters:**
  - opCode: 0x2034
  - txChannel: 0
  - testDataLength: 37
  - dtmPktPattern: Dtm\_PRBS9
  - txPhy: Phy\_1\_Mbps
- txPhy:** TX PHY Type (1 Byte) - Indicates the TX PHY type to use.
- Send Command:** Button to execute the command.
- Log Output:**

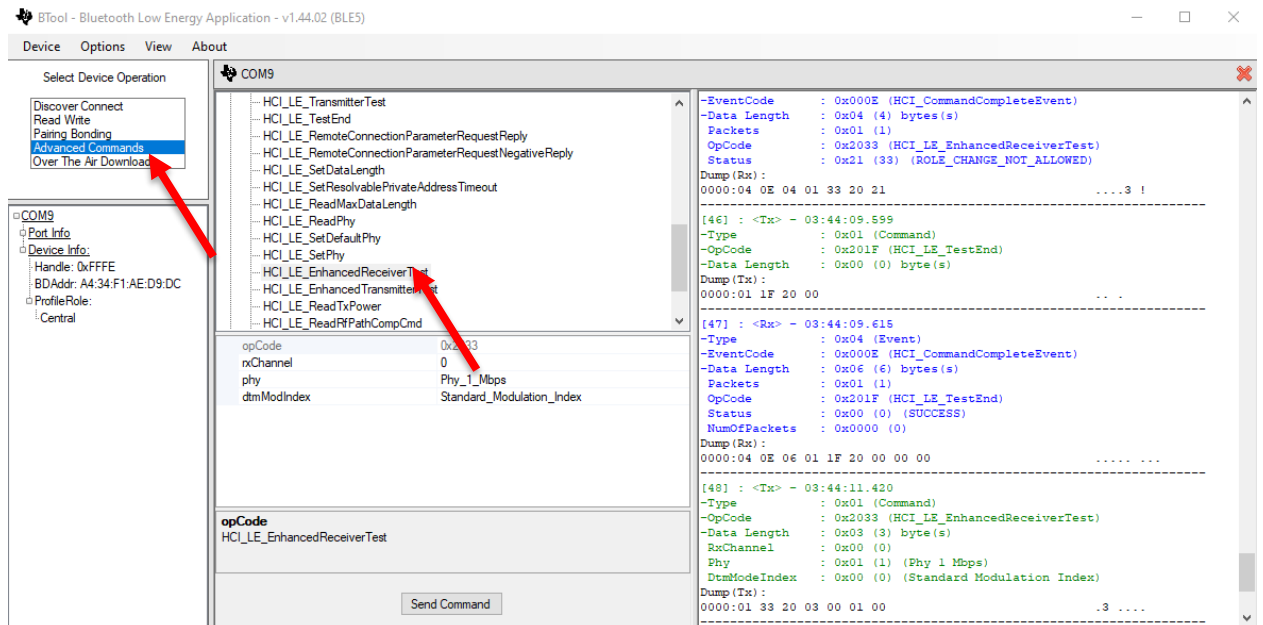
```

[38] : <Tx> - 03:25:59.593
-Type : 0x01 (Command)
-OpCode : 0x201F (HCI_LE_TestEnd)
-Data Length : 0x00 (0) byte(s)
Dump (Tx):
0000:01 1F 20 00
-----
[39] : <Rx> - 03:25:59.609
-Type : 0x04 (Event)
-EventCode : 0x000E (HCI_CommandCompleteEvent)
-Data Length : 0x06 (6) bytes(s)
Packets : 0x01 (1)
OpCode : 0x201F (HCI_LE_TestEnd)
Status : 0x00 (0) (SUCCESS)
NumOfPackets : 0x0000 (0)
Dump (Rx):
0000:04 0E 04 01 1F 20 00 00 00
-----
[40] : <Tx> - 03:26:14.056
-Type : 0x01 (Command)
-Data Length : 0x2034 (HCI_LE_EnhancedTransmitterTest)
TxChannel : 0x00 (0)
TestData : 0x25 (37)
DtmPktPattern : 0x00 (0) (Dtm_PRBS9)
TxPhyType : 0x01 (1) (Phy 1 Mbps)
Dump (Tx):
0000:01 34 20 04 00 25 00 01
-----

```

## 2.2.2 接收 HCI\_LE\_Receiver\_Test

接收命令如下图所示，opCode 为 0x2033，通常在手动测试灵敏度时使用。



The screenshot shows the BTTool interface with the following details:

- Select Device Operation:** Advanced Commands is selected.
- COM9 Device Info:** Handle: 0xFFFE, BDAAddr: A4:34:F1:AE:D9:DC, ProfileRole: Central.
- Misc Parameters:**
  - opCode: 0x2033
  - rxChannel: 0
  - phy: Phy\_1\_Mbps
  - dtmModIndex: Standard\_Modulation\_Index
- opCode:** HCI\_LE\_EnhancedReceiverTest
- Send Command:** Button to execute the command.
- Log Output:**

```

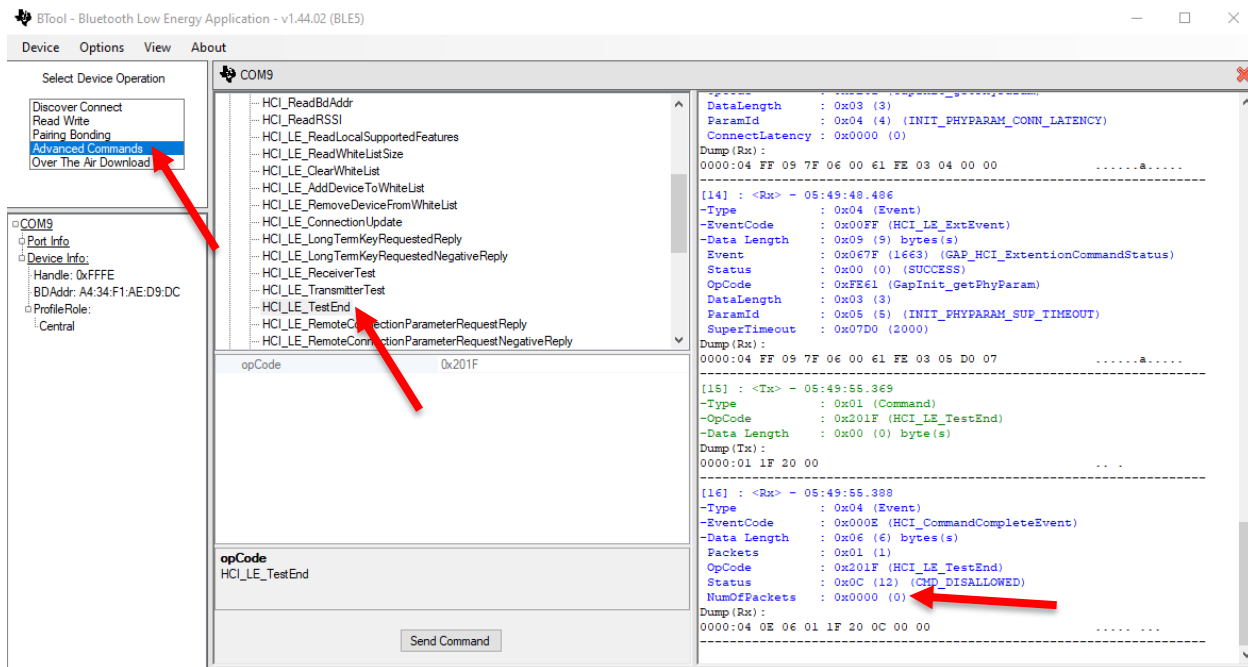
[46] : <Tx> - 03:44:09.599
-Type : 0x01 (Command)
-OpCode : 0x201F (HCI_LE_TestEnd)
-Data Length : 0x00 (0) byte(s)
Dump (Tx):
0000:01 1F 20 00
-----
[47] : <Rx> - 03:44:09.615
-Type : 0x04 (Event)
-EventCode : 0x000E (HCI_CommandCompleteEvent)
-Data Length : 0x04 (4) bytes(s)
Packets : 0x01 (1)
OpCode : 0x2033 (HCI_LE_EnhancedReceiverTest)
Status : 0x21 (33) (ROLE_CHANGE_NOT_ALLOWED)
Dump (Rx):
0000:04 0E 04 01 33 20 21
-----
[48] : <Tx> - 03:44:11.420
-Type : 0x01 (Command)
-OpCode : 0x2033 (HCI_LE_EnhancedReceiverTest)
-Data Length : 0x03 (3) byte(s)
RxChannel : 0x00 (0)
Phy : 0x01 (1) (Phy 1 Mbps)
DtmModIndex : 0x00 (0) (Standard Modulation Index)
Dump (Tx):
0000:01 33 20 03 00 01 00
-----

```



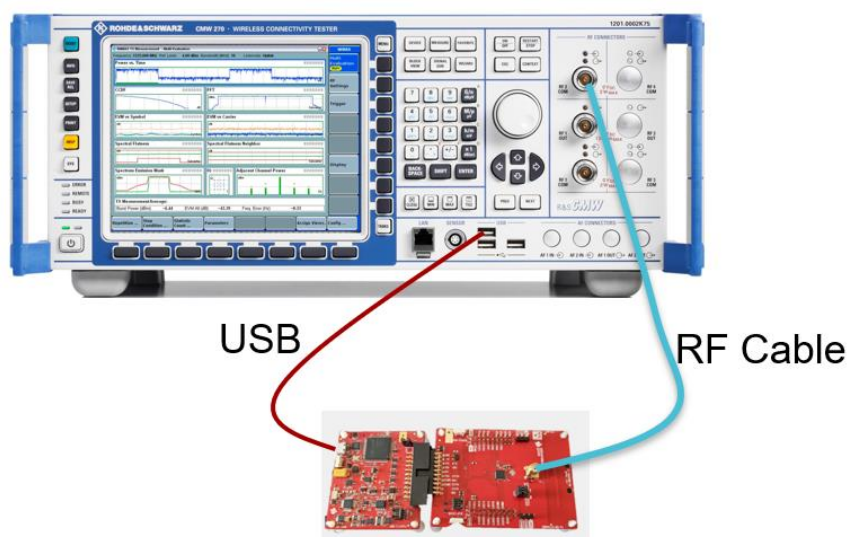
## 2.2.3 结束测试 LE\_Test\_End command

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连个章节描述的，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。





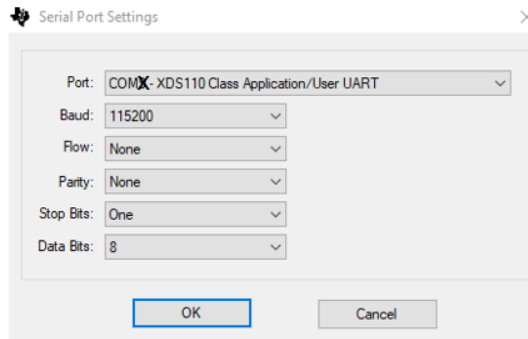
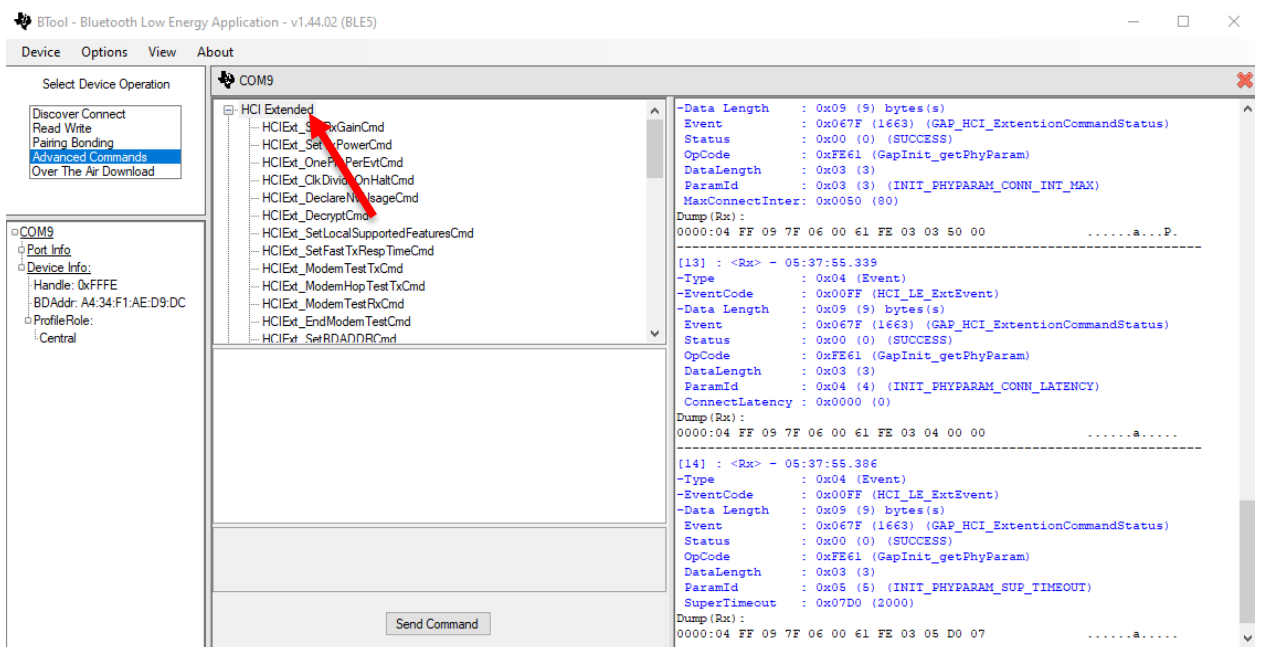


图 4 信令连接示意图

### 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高中低频段定频发射调制信号及非调试信号、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。目前 SDK7.40 版本还不支持 AFH，后续 SDK 会支持。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。

对于 20dBm (100mW) 的设备来说，需要根据蓝牙的使用情况，调整等效占空比来满足。或者未来 SDK 支持了 AFH，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

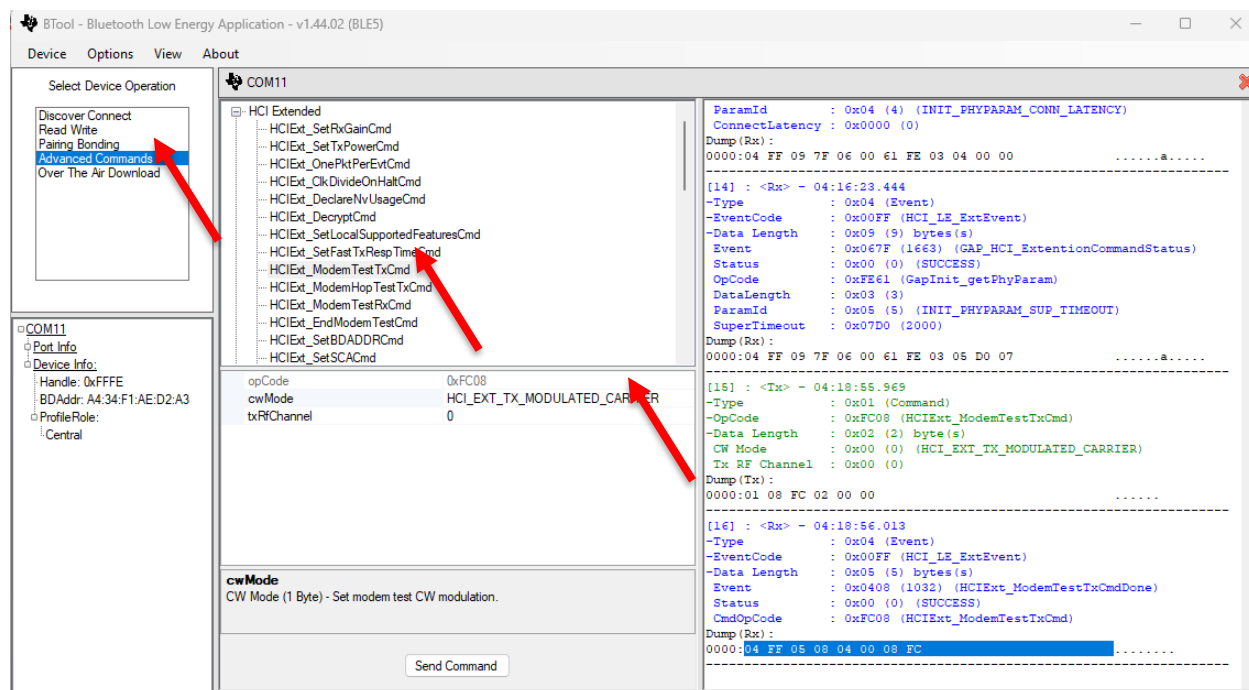
### 3.2.1 发射 HCIExt\_ModemTestTxCmd

发射测试中使用 [HCIExt\\_ModemTestTxCmd](#)，其中

`cwMode`: `HCI_EXT_TX_MODULATED_CARRIER` 为调制定频信号。

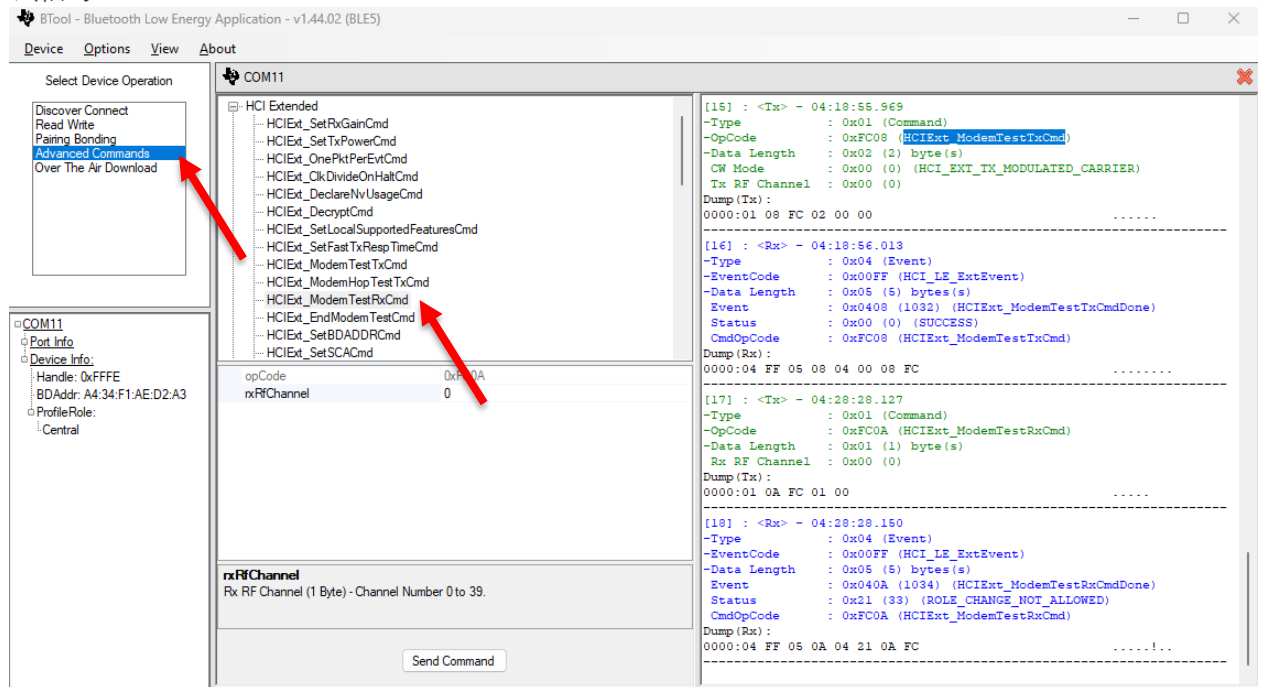
`HCI_EXT_TX_UNMODULATED_CARRIER` 为非调制定频信号，这个也可以用来测试高频晶振的频偏。

`txRfChannel`: 这个参数来配置测试信号的信道。



### 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。

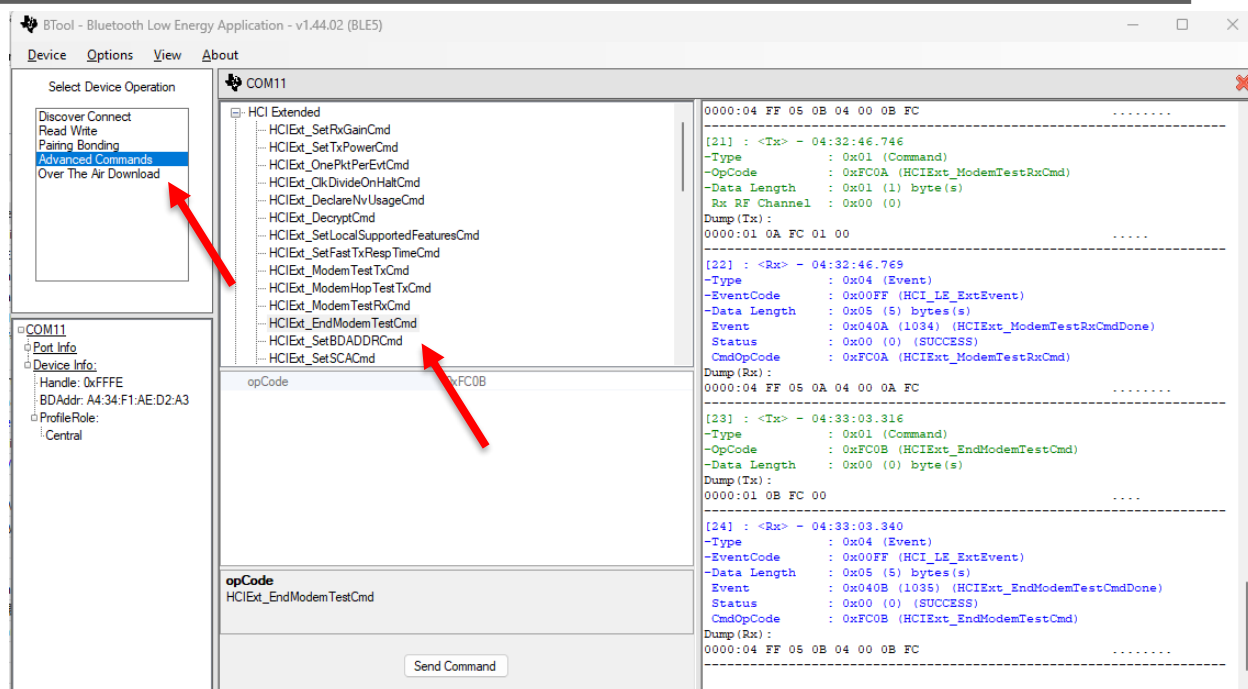


The screenshot shows the BTTool interface for a Bluetooth Low Energy (BLE) application. On the left, the 'Select Device Operation' menu has 'Advanced Commands' selected. In the center, the 'HCI Extended' list includes 'HCIExt\_ModemTestRxCmd', which is highlighted with a red arrow. Below this list, the 'rxRfChannel' parameter is set to 0. On the right, the log window shows the following sequence of events:

```
[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_MODULATED_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
-----
[17] : <Tx> - 04:28:29.127
-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> - 04:28:29.150
-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》](#)

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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  
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司