

# 测向

## nWP-036

白皮书

v1.1

内容

修订历史。	三
1引言..	4
2测向概述。 .	5
2.1 到达角和出发角方法。	5
2.2 通过采样相位和切换天线确定AoA/AoD。	8
2.3 恒定音调扩展。	9
2.4 相位样本J和Q分量。	9
3 IQ采样配置。 .	11
3.1 样品偏移。	12
3.2 第一个 IQ 样本。	13
3.3 频率偏移。	十三
3.4 样本缓冲区配置。	14
4天线切换配置。 .	15
5示例配置...	16
5.1 设置发射器。 .	16
5.2 接收器配置。	16
5.2.1 设置接收器。	16
5.2.2 为 AoA 接收器设置天线切换。	17
5.2.3 为 AoA 接收器设置 IQ 采样。	17
词汇表。	18
首字母缩略词和缩写。	19
法律声明。	20



# 修订历史

日期	版本	描述
2020 年 8 月	1.1	更新了到达角和出发角方法,第页 5
2020 年 8 月	1.0	首次发布

# 1简介

本白皮书介绍了如何配置和启用蓝牙®测向功能 nRF52 和 nRF53 系列设备。

它面向开发人员和系统集成商,重点介绍到达角 (AoA)实现,提供有关如何获取 IQ 样本的说明。但是,您可以使用本白皮书中的主要原理来创建出发角 (AoD)系统。

本白皮书中的配置仅描述了测向系统的一部分。此配置需要堆栈和应用软件才能兼容蓝牙并可认证。

注意：Nordic Semiconductor SoftDevices 不能与 Direction Finding 系统一起使用。

## 2 测向概述

蓝牙测向是蓝牙核心规范的一项主要功能。它旨在增强定位服务,此前该服务仅使用基于信号强度的技术和接收信号强度指示 (RSSI)。

蓝牙测向为实时定位系统 (RTLS) 提供了一种全新且经过改进的用例,可用于各种场景中的资产跟踪,从物流和仓储到医院和工厂中的贵重资产安全。它还在基于邻近度的场景中为消费者意识和上下文信息带来了额外的用户体验。

蓝牙测向可以检测二维或三维位置,具体取决于其实现的复杂性。

有关蓝牙测向的更多信息,请参阅蓝牙核心的以下部分规格:

- 使用低功耗蓝牙测向 – 第 1 卷,A 部分,第 8 章 · 天线切换 – 第 6 卷,A 部分,第 5 章
- 恒定音调扩展和 IQ 采样 – 第 6 卷,B 部分,第 2.5 章

### 2.1 到达角和出发角方法

蓝牙测向基于AoA和AoD 两个关键概念。它利用天线在接收(AoA)或发送(AoD)射频信号时发生的角度相移。

通过使用通信链路两侧的天线阵列,可以确定相移数据,并据此计算出位置。

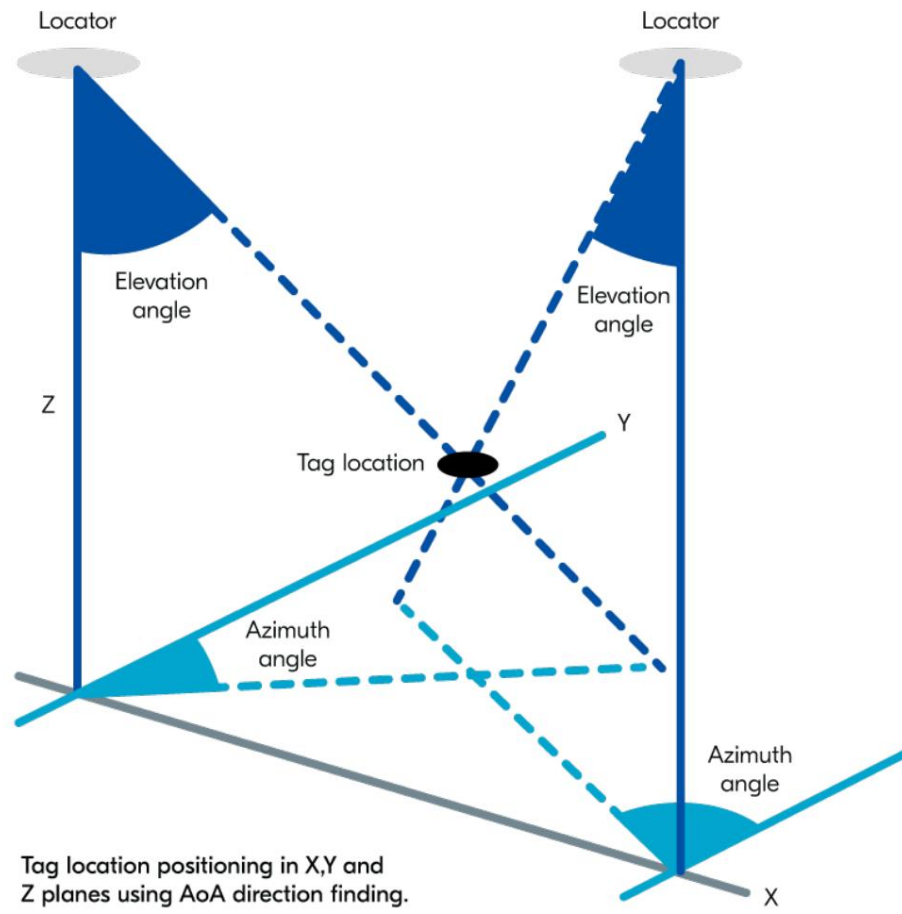


图 1:标签位置

AoA系统的特点是接收端有天线阵列,因此通过测量传入信号的相移,接收端可以确定传入信号的方向。

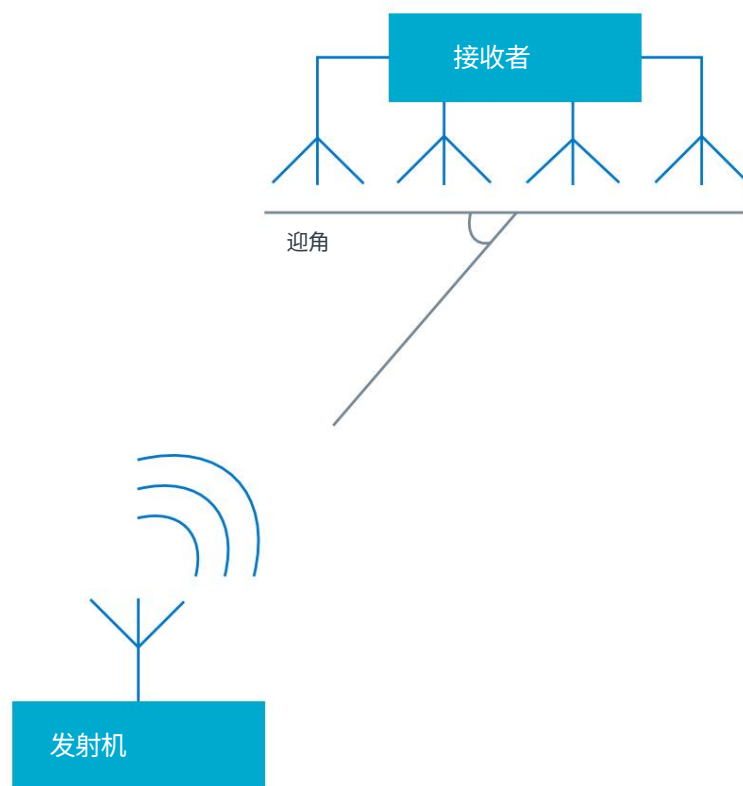


图 2:AoA 方法

顾名思义，AoD使用天线阵列将发射信号引导至给定角度。

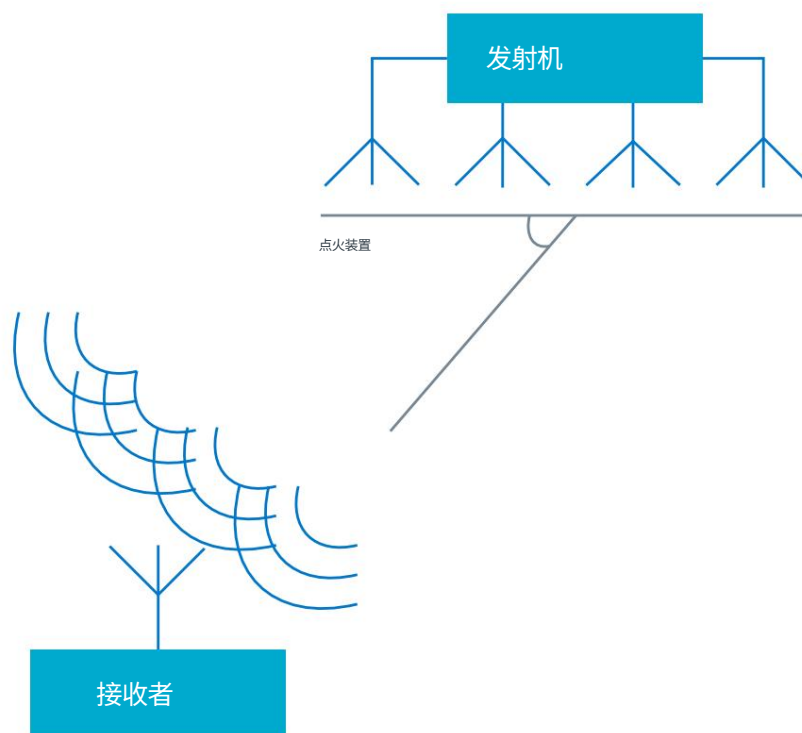


图 3:AoD 方法

AoA中的发射器和AoD中的接收器不需要天线阵列,但无线电仍然必须能够附加或采样恒定音调扩展 (CTE),如第 9 页的[恒定音调扩展](#)中所述。

## 2.2 通过采样相位和切换天线确定AoA/AoD

低功耗蓝牙设备发射的信号频率约为 2440 MHz,具体取决于给定传输时的信道,波长约为 12 厘米。

空的

通常,蓝牙 LE 设备的放置距离比这更远,这意味着信号从发射器传播到接收器时会经历多个波周期。通过测量不同天线接收到的信号的相位差, AoA接收器可以确定接收信号的方向。这可以通过简单的三角法来实现,相位差会导致信号传播时间的差异,从而导致传播距离的差异。

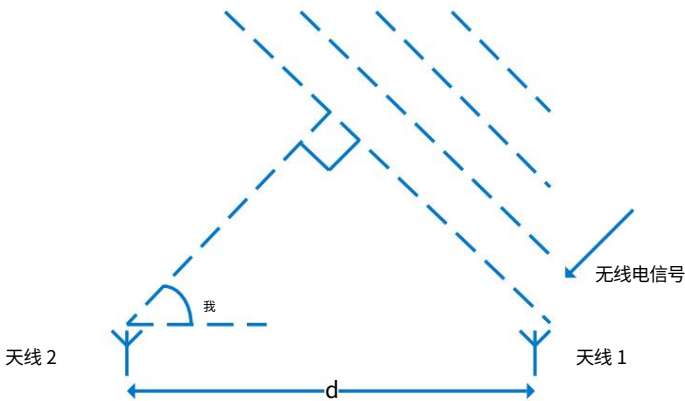


图 4:测量迎角

可以使用以下公式计算该角度。

$$\theta = \arccos\left(\frac{\psi\lambda}{2\pi d}\right)$$

多变的	描述
我	CTE 信号的波长。
p	天线之间的相位差。
d	天线之间的距离。

表 1:迎角方程变量

同样的原理也适用于AoD系统。唯一的区别是发射器在切换天线的同时调整相位,从而在所需方向上产生建设性干扰,在其他方向上产生破坏性干扰。



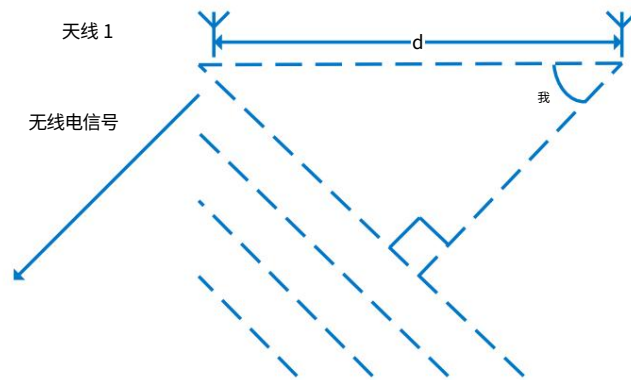


图 5:测量 AoD

## 2.3 恒定音调延伸

为了实现AoA和AoD,蓝牙测向使用CTE。

CTE附加在数据包中,位于CRC之后,显示为偏移未调制载波或未白化的调制1序列。由于蓝牙LE使用高斯频移键控(GFSK)调制,因此频率会在整个数据包中不断变化,以区分发送的不同符号或1和0。如果频率不稳定,接收器将无法估计信号的相位。

CTE的确切频率还取决于给定时间传输的信道。由于CTE偏移比信道中心频率高250 kHz,因此必须考虑到这一点才能计算出正确的传输距离差。

## 2.4 相位样本、I 和 Q 分量

蓝牙测向使用IQ采样(一种同相和正交采样技术)来测量传入信号的相位。

在IQ采样中,接收器将输入信号与0度和90度偏移的本地振荡器(LO)混合。这会产生两个正交函数,称为同相(I)和正交(Q)分量。

这些分量在下图中绘制为轴,其中主信号的幅度和相位可以计算为由I和Q分量组成的矢量的幅度和角度。

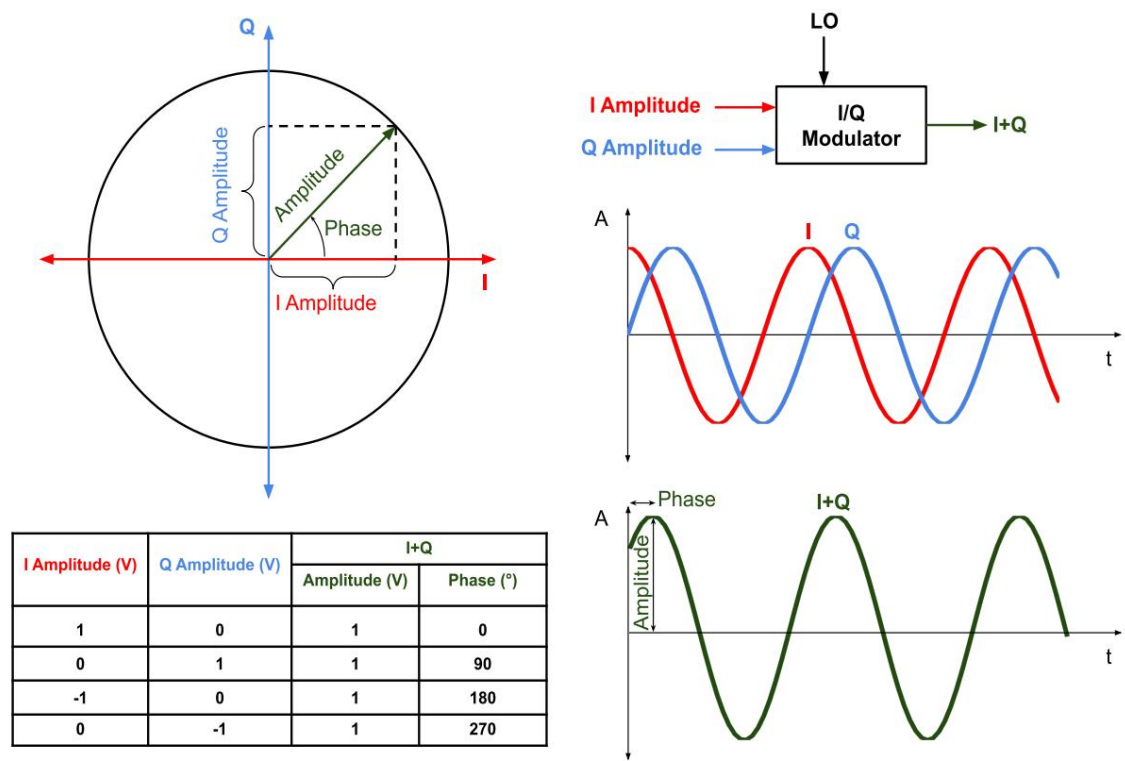


图 6:IQ 相量图1

因此,可以通过测量 I 和 Q 分量的幅度来估计信号的相位。这也是相位样本可以表示为 I 和 Q 值或相位和幅度的原因,具体取决于给定用例的偏好。

<sup>1</sup> IQ 相量图通过Vigneshdm1990已获得CC BY-SA许可

### 3 IQ采样配置

AoA方法使用发射器和接收器,其中接收器将天线切换到确定发射器的方向。

这是通过发送器向数据包添加CTE来实现的,这会导致数据包的指定部分具有固定且恒定的频率。了解这一点后,接收器可以对波形 IQ 分量进行采样并确定波形的相位。对多个天线执行此操作后,接收器可以计算发射器信号来自哪个角度。

根据[蓝牙核心规范](#),数据包的 CTE包含4 μs 的保护期、参考周期为 8 μs,以及一些天线样本。特别是第 6 卷 B 部分第 2.5.4 节蓝牙核心规范规定:

当接收到包含 AoA 恒定音调扩展的数据包时,接收器应执行天线按照主机配置的速率和切换模式进行切换。在这两种情况下,接收机应在参考周期内每微秒采集一次 IQ 样本,并在每个采样槽 (因此将有 8 个参考 IQ 采样、1 至 37 个 IQ 采样 (2 μs 槽)和 2 至 74 个 IQ 1 μs 时隙的样本,即总共 9 到 82 个样本) 。

下图说明了这一点。



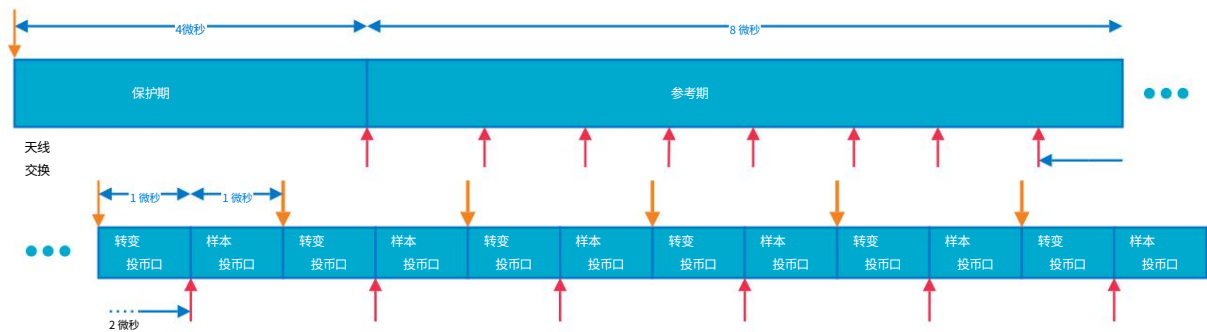
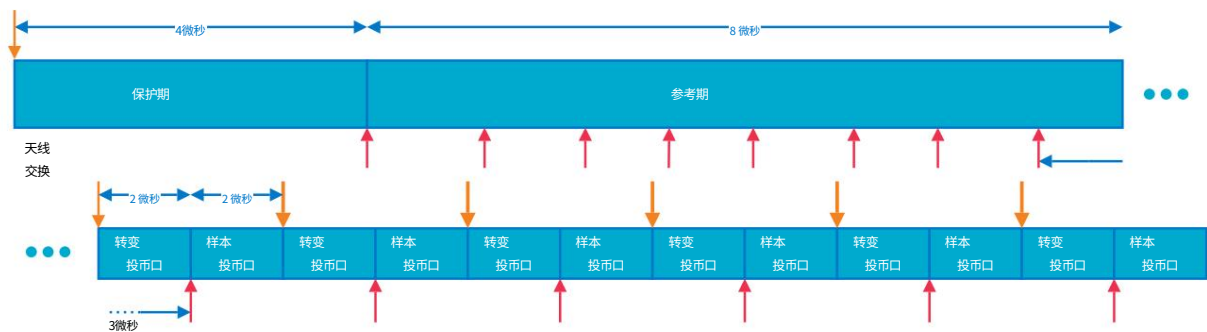
图 7:CTE 结构

保护期和参考期的持续时间是固定的,不能改变。参考周期内采集的样本数由 8 μs/TSAMPLESPACINGREF 决定。然而,可以使用下表中的设置来更改采样槽和切换槽的持续时间。

场地	1 μs 样本的值 插槽	2 μs 样本的值 插槽	描述
样本间距参考	1 微秒	1 微秒	间隔 参考样本 时期
样品间距	2 微秒	4微秒	间隔 切换中的样本 时期
开关间距	2 微秒	4微秒	每间隔 天线 在切换中发生改变 状态

表 2:采样和切换时隙持续时间设置

下图说明了1 μs 和 2 μs 时隙的AoA配置。

图 8:1  $\mu\text{s}$  时隙的 AoA 配置图 9:2  $\mu\text{s}$  时隙的 AoA 配置

### 3.1 样品偏移

TSAMPLEOFFSET 是一个有符号数,表示采样时刻的相对偏移。

TSAMPLEOFFSET 配置在天线切换后何时进行采样。必须

在启动无线电之前配置。应选择该值,以便信号通过接收器

在天线切换之后,到 A/D 转换器的链路在采样发生之前就已经稳定下来。这个延迟

由于滤波器设置不同,1 Mbps 和 2 Mbps 数据速率的延迟时间会有所不同。它还可能取决于外部组件。建议使用以下值:

物理层 (Mbps)	时隙持续时间 ( $\mu\text{s}$ )	样品偏移量
1	1	1
1	2	15
2	1	6
2	2	20

1Mbps,1  $\mu\text{s}$  的设置使得采样恰好发生在下一次天线切换之前。信号严重多径的干扰可能尚未稳定,并会影响 IQ 样本的质量。这种限制源于 1 Mbps 模式下滤波器的带宽。

TSAMPLEOFFSET 的理想值可以通过高速率采样和目视检查切换带来的影响。

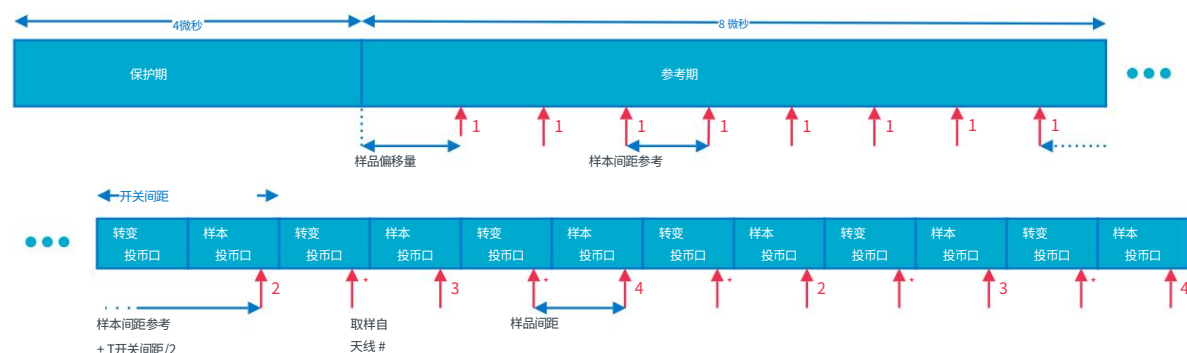


图 10:影响开关和采样的参数

## 3.2 第一个 IQ 样本

硬件始终将第一个 IQ 样本与第一个样本槽对齐。

参考周期的第一个样本与第一个样本的第一个样本之间的持续时间  
 时隙与  $TSAMPLESPACINGREF$  无关。然而,结果是,  
 参考周期内的最后一个样本和第一个样本槽中的第一个样本并不独立于  
 $TSAMPLESPACINGREF$ 。下图说明了此行为。

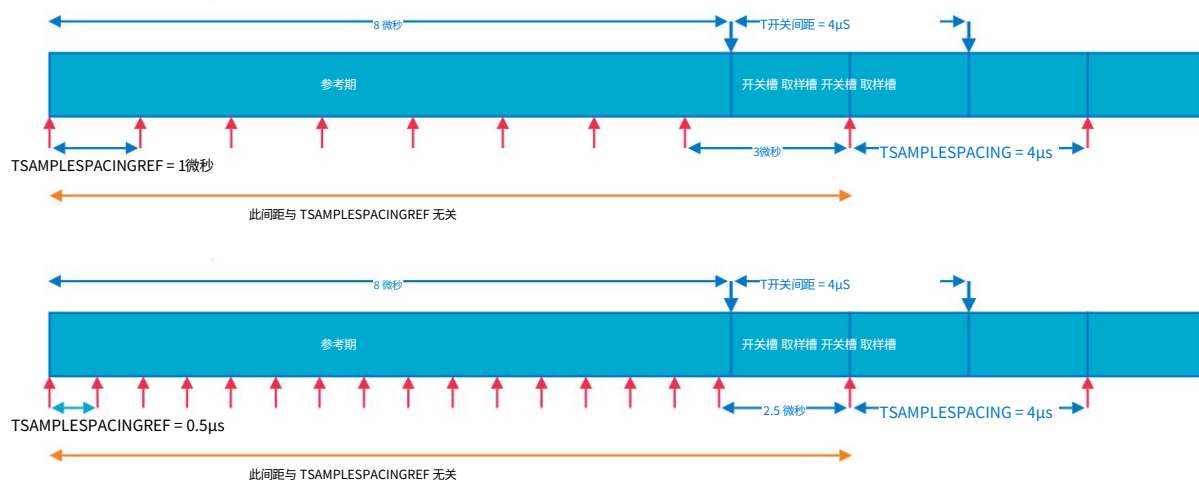


图 11:第一个采样槽

## 3.3 频率偏移

CTE是一个未调制的载波,由未白化的调制1组成,接收器在其中采样  
 在 1 Mbps 模式下,波形偏移距通道中心 250 kHz,在 2 Mbps 模式下,样本数为  
 波形偏移距通道中心 500 kHz。

然而,发射机和接收机之间通常存在频率偏移。该频率偏移  
 可以根据参考周期内的 IQ 样本计算得出,并通过软件对所有 IQ 进行补偿  
 样品。

频率偏移估计可以通过切换回参考天线来改进  
 稍后切换插槽。

### 3.4 样本缓冲区配置

RADIO 使用 DMA 将 CTE 期间记录的 IQ 样本写入 RAM。

或者,可以使用 DFECTRL1.SAMPLETYPE 字段记录样本的幅度和相位。样本将写入 DFEPACKET.PTR 指定的 RAM 位置。要传输的最大样本数由 DFEPACKET.MAXCNT 指定,传输的样本数在 DFEPACKET.AMOUNT 中给出。

MAXCNT 定义为字数,必须根据 CTE 的长度和采样间隔确定。可按如下方式计算:

$$\text{MAXCNT} = 2 * (8 / \text{TSAMPLESPACINGREF} + (8 * \text{NUMBEROF8US} - 12) / \text{TSAMPLESPACING})$$

对于 TSAMPLESPACINGREF 和 TSAMPLESPACING 的典型值,可以简化为:

		样品间距	
		2 微秒	4 微秒
样本间距参考	0.5 微秒	20 + 8*8US 数量 26 + 4*8US 数量	
	1 微秒	4 + 8*8US 数量 10 + 4*8US 数量	

表 3:典型样本缓冲区大小

# 4天线切换配置

配置天线切换需要以下参数。

环境	描述
开关间距	此设置是每次改变天线之间的间隔切换状态。
开关偏移	此设置允许您微调切换瞬间（例如,如果外部天线开关切换延迟较长）。
DFEGPIO[n] (n=0..7)	此设置配置切换天线时使用的 GPIO,由 SWITCHPATTERN 设置。
开关模式	写入将 GPIO 配置添加到要使用的切换模式中。 每个配置包含 8 位,每个 GPIO 一个,其中位 0 表示 DFEGPIO[0],位 1 表示 DFEGPIO[1],依此类推。生成一个开关模式 通过连续将多个配置写入 SWITCHPATTERN。第一个配置用于数据包的数据部分,第二个配置是在保护和参考周期中使用,并且每个后续配置都是在下一个切换槽的开始处应用。

表 4:天线切换设置

通用输入/输出 (GPIO)必须配置为GPIO外设中的输出（例如除了 DFEGPIO 寄存器外,无线电还控制 DIRSET 寄存器。无线电仅在其已启用,因此为了避免这些GPIO不受控制地切换,建议将配置 1 设置为这些GPIO的默认输出（例如,使用GPIO外设中的 OUT 寄存器）。

当达到最后一个开关模式并且 IQ 采样继续时,开关模式将循环回到第一个 SWITCH 槽中使用的天线。下图显示了五个天线方向图,已加载。

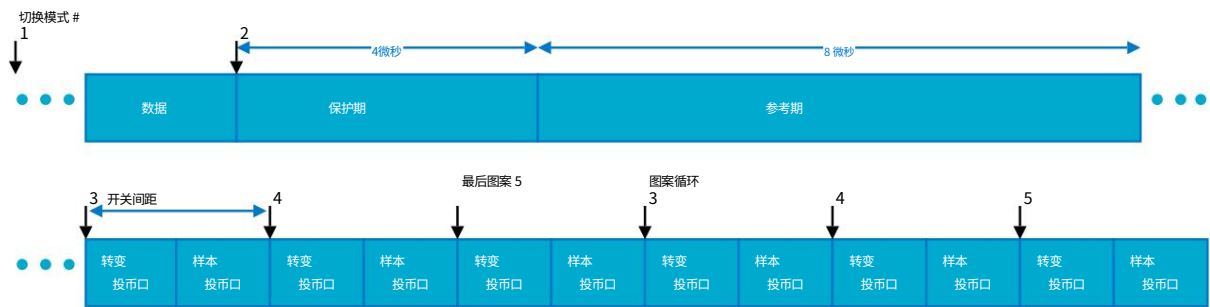


图 12:天线切换

# 5 示例配置

本节介绍了示例AoA系统的实现。

本系统包括以下配置：

- nRF52811 采用 48 引脚 QFN
- 接收器上有 4 根天线,配有 SP4T 射频开关
- 广告信道协议数据单元 (PDU)
- CTE 内联模式
- 输出缓冲区设置为 0x20004000 ·

0x1C 缓冲区大小 (28 个字)

以下步骤仅涵盖测向配置,不包括一般 PHY 设置。但是,您可以将此配置添加到现有的非 SoftDevice 系统中。

## 5.1 设置发射器

配置CTE来设置AoA发射器。

- 1.输入DFEMODE.DFEOPMODE=3设置AoA模式。
- 2.输入DFECTRL.NUMBEROF8US=3将CTE的长度设置为 24  $\mu$ s。
- 3.输入DFECTRL.DFEINEXTENSION=1 (默认)以在 CRC 后添加CTE。
- 4.将TX数据写入RAM。  
该帧应与广告信道PDU所需的格式相匹配 (CP 位设置和 CTEInfo=0x18)。
- 5.如果SHORTS.READY\_START寄存器使能,则输入TASKS\_TXEN=1来启动发送器。

## 5.2 接收机配置

接收器启动之前必须完成几个配置过程。

### 5.2.1 设置接收器

接收器在启动之前必须进行配置。

- 1.输入DFEMODE.DFEOPMODE=3设置AoA模式。
- 2.输入CTEINLINECONF.CTEINLINECTRLLEN=1启用CTE内联模式。
- 3.输入CTEINLINECONF.CTEINFOINS1=0,因为广告信道PDU在S0中有CP。
- 4.根据预期格式输入以下内容设置 S0 配置和掩码  
命令：

- a) CTEINLINECONF.S0CONF=0x07 b)  
CTEINLINECONF.S0MASK=0x0F

注意:数据通道 PDU 使用以下配置：

- CTEINLINECONF-CTEINFOINS1=1
- CTEINLINECONF.S0CONF=0x20
- CTEINLINECONF.S0MASK=0x20



## 5.2.2 设置 AoA 接收器的天线切换

配置GPIO切换以进行天线切换。

1. 输入DFECTR1.TSWITCHSPACING=2（默认值）以配置每 2  $\mu$ s 一次天线切换。

2. 通过输入以下参数来设置控制连接到天线开关的GPIO的开关模式：

下列的：

```
SWITCHPATTERN=0x1
SWITCHPATTERN=0x1
SWITCHPATTERN=0x2
SWITCHPATTERN=0x4
SWITCHPATTERN=0x8
```

此步骤对同一寄存器执行五次写入：

- 天线 1 (数据)=0001 · 天线 1
- (保护/参考)=0001
- 天线 2=0010
- 天线 3=0100
- 天线 4=1000

3. 配置四个GPIO（例如QFN48封装上的第37至40个引脚,P0.25-P0.28）：

```
PSEL.DFEGPIO[0]=0x19
PSEL.DFEGPIO[1]=0x1A
PSEL.DFEGPIO[2]=0x1B
PSEL.DFEGPIO[3]=0x1C
```

4. 输入DFECTR2.TSWITCHOFFSET=0将开关偏移设置为零。

5. 输入DIRSET=0x1E00000将四个GPIO配置为GPIO外设中的输出。

6. 输入OUT=0x0200000,将开关模式1设置为四天线切换的默认输出GPIO。

## 5.2.3 为 AoA 接收器设置 IQ 采样

完成以下步骤来配置AoA接收器以进行 IQ 采样。

1. 输入DFECTR1.SAMPLETYPE=0（默认）将样本类型设置为IQ格式。

2. 输入DFEPACKET.PTR=0x20004000将DMA指针配置为RAM。

3. 输入DFEPACKET.MAXCNT=0x1C配置保留缓冲区的大小。

4. 输入DFECTR1.TSAMPLESPACINGREF=3（默认值），将采样间隔设置为 1  $\mu$ s。

参考期。

5. 输入DFECTR1.TSAMPLEOFFSET=3将样本偏移设置为 1。

注：1 是基于射频测试的推荐值。

6. 输入CTEINLINECONF.CTEINLINERXMODE1US=2（默认），将采样间隔设置为 2  $\mu$ s。

具有CTE内联模式的样本槽。

7. 如果SHORTS.READY\_START寄存器使能,则输入TASKS\_RXEN=1来启动接收器。

## 词汇表

### 到达角 (AoA)

使用天线阵列传输的传播射频波入射到另一天线的相对方向。

### 出发角 (AoD)

使用天线阵列发射的射频波与入射到另一天线的相对方向。

### 恒定音调扩展 (CTE)

具有一系列不断调制的未白化的 1 的场。

### 通用输入/输出 (GPIO)

可用作输入、输出或两者的数字信号引脚。它是未承诺的,可由用户在运行时控制。

### 协议数据单元 (PDU)

信息以单个单元的形式在计算机网络的等实体之间传输,包含控制和地址信息或数据。PDU 模式是发送和接收 SMS 消息的两种方式之一。

# 首字母缩略词和缩写

本文档中使用这些首字母缩略词和缩写。

迎角

到达角

点火装置

离去角

恒定音调扩展

恒定音调扩展

协议数据单元

协议数据单元

通用输入/输出

通用输入/输出

## 法律声明

使用此文档即表示您同意我们的使用条款和条件。Nordic Semiconductor 可能会随时更改这些条款和条件,恕不另行通知。

## 责任免责声明

Nordic Semiconductor ASA 保留对产品进行更改的权利,无需另行通知即可提高可靠性、功能或设计。Nordic Semiconductor ASA 不承担因应用或使用本文所述任何产品或电路而产生的任何责任。

Nordic Semiconductor ASA 不对此类信息的准确性或完整性做出任何明示或暗示的陈述或保证,并且对使用此类信息的后果不承担任何责任。如果 Nordic Semiconductor 的文档中存在任何差异、含糊或冲突,则以产品规格为准。

Nordic Semiconductor ASA 保留对本文档进行更正、增强和其他更改的权利,恕不另行通知。

## 生命支持应用

Nordic Semiconductor 产品不适用于生命支持设备、装置或系统,这些产品的故障可能会造成人身伤害。

Nordic Semiconductor ASA 客户使用或销售这些产品用于此类应用时,需自行承担风险,并同意对由于此类不当使用或销售而造成的任何损失,向 Nordic Semiconductor ASA 进行全额赔偿。

## RoHS 和 REACH 声明

完整的危险物质报告、材料成分报告和最新版本的 Nordic REACH 声明可在我们的网站 [www.nordicsemi.com](http://www.nordicsemi.com) 上找到。

## 商标

本文档中出现的所有商标、服务标志、商品名称、产品名称和徽标均属于其各自所有者的财产。

## 版权声明

© 2024 Nordic Semiconductor ASA。保留所有权利。未经版权所有者事先书面许可,禁止全部或部分复制。

