



UG103.18:蓝牙®测向基础知识

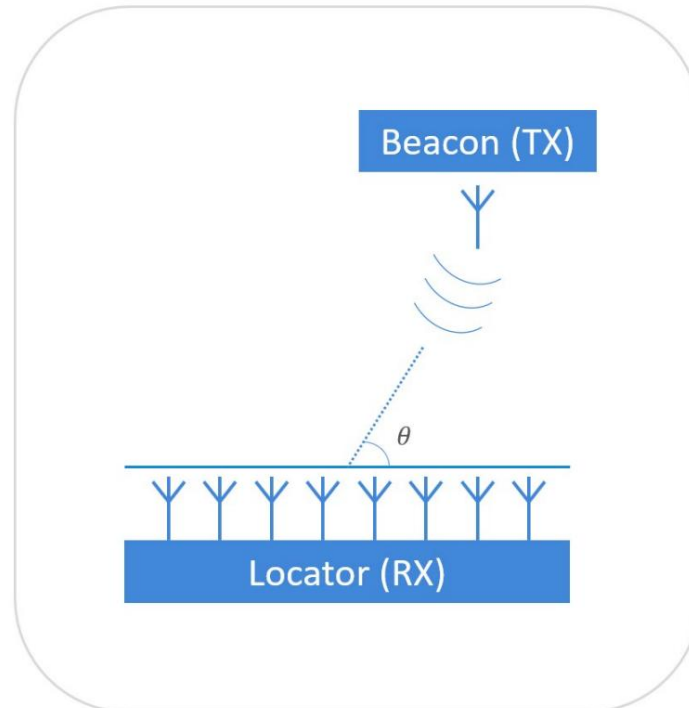


蓝牙到达角 (AoA) 和出发角 (AoD) 是建立室内定位标准化框架的新技术。有了这些技术,定位的根本问题就归结为解决射频信号的到达角和出发角。本文档

解释这些技术的基础知识,并提供估计到达角背后的理论。

关键点

- 到达角
- 离去角
- 测向算法
- 蓝牙支持



1 简介

定位技术有许多有用的应用,其中一个例子就是在世界各地广泛使用的 GPS。不幸的是,GPS 在室内效果不佳,因此确实需要更好的室内定位技术。目标是使用外部跟踪系统跟踪单个物体的位置 (或方向),或让设备在室内环境中跟踪自己的位置。这种定位系统可用于跟踪仓库中的资产或购物中心中的人员,或者人们可以使用它来找到自己的方向。计算资产位置有两种常规方法:三边测量和三角测量。

三边测量法是指从多个固定位置定位器确定资产的距离,并通过找到满足所有距离测量的点来确定位置。距离可以通过接收信号强度指示器 (RSSI) 来确定

例如,RSSI 测量或飞行时间测量。遗憾的是,RSSI 测量可能非常不准确,而飞行时间测量需要高度准确的时间测量。

三角测量是指确定固定位置定位器看到资产的角度 (或资产看到固定位置定位器的角度)。然后通过视线的交点确定资产的位置。这种方法可以提供比使用 RSSI 测量的三边测量更准确的位置,并且所需的硬件比飞行时间测量更便宜。但是,它需要一个天线阵列和一种可以确定传入信号方向 (角度)的方法。

本文档介绍了测向背后的理论,即估计到达角和离开角的一般问题。它还讨论了蓝牙 5.1 如何支持测向实现。

2 测向方法

测向有两种方法。一种方法是资产（需要定位）发送信号，然后定位器接收该信号。

然后，定位器能够确定资产的相对方向。这称为到达角（AoA）计算。在另一种方法中，资产（待定位）接收某些信标发送的信号。在这种情况下，资产能够确定其相对于信标的相对方向。这称为出发角（AoD）计算。

例如，当需要在大型仓库中查找资产时，可以使用第一种方法。如果资产

希望在不让其他人知道其位置的情况下定位自己。例如，购物者希望使用智能手机和一些信标的信号来确定自己在大型购物中心中的位置。该人肯定不想发送信号让其他人知道他们在哪里。

2.1 到达角（AoA）

测向的复杂理论可以简化为以下事实：如果多个接收天线彼此相邻放置，则单个发射器发射的无线电波将以不同的相位到达不同的天线。根据此相位差，

可以计算出无线电波的来源方向。由于角度是相对于接收器确定的，因此这种用例称为到达角估计。

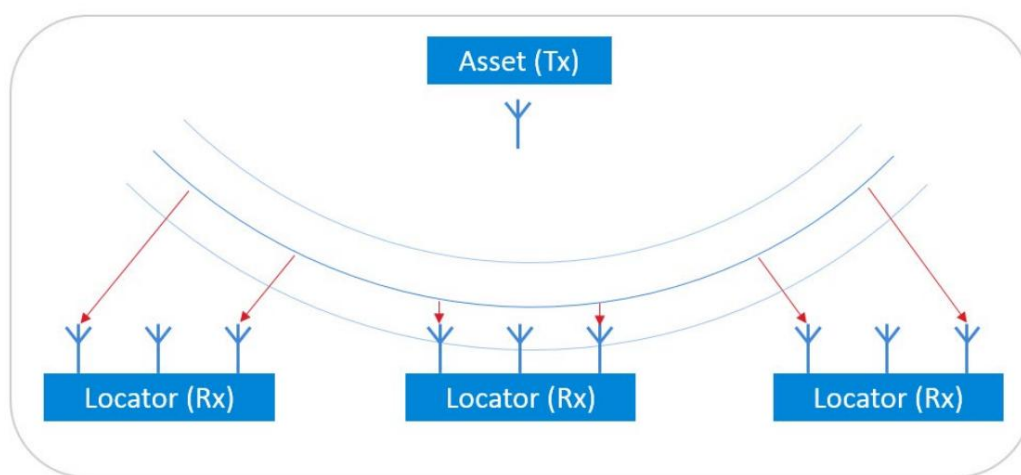


图 2-1. 确定到达角

假设输入信号在测量过程中频率不变（即未经调制），且接收天线之间的距离短于波长的一半，则相位差明确地决定了入射角。

在此方法中：

- 资产在特定时间内传输未调制的窄带信号。
- 定位器在多个天线上对接收信号进行采样。

实际上，接收器必须具有多个 ADC 通道或使用 RF 开关从每个单独的通道进行采样。这些样本被称为“IQ 样本”，因为“同相”和“正交相位”读数的样本对是从同一输入信号中获取的。这些样本在采样时具有 90 度的相位差。当该对被视为复值时，每个复值都包含相位和幅度信息，并且可以作为到达角估计算法的输入。

无线电波以光速传播，即 300,000 公里/秒。在 2.4GHz 左右的频率下，相应的波长约为 0.125 米。大多数估计算法中，两个相邻天线之间的最大距离为半波长。许多算法都需要这样做，否则就会出现类似于混叠的效果。理论上没有最小距离限制，但实际上最小尺寸受阵列的机械尺寸以及天线元件之间的相互耦合等因素的限制。

2.2 出发角 (AoD)

该设置也可以反转。如果多个天线发射具有相同初始相位的波,则单个天线可以测量不同入射波的相位差,并且可以计算出相对于发射天线阵列的自身方向。由于角度现在是相对于发射器确定的,因此这种用例称为出发角估计。

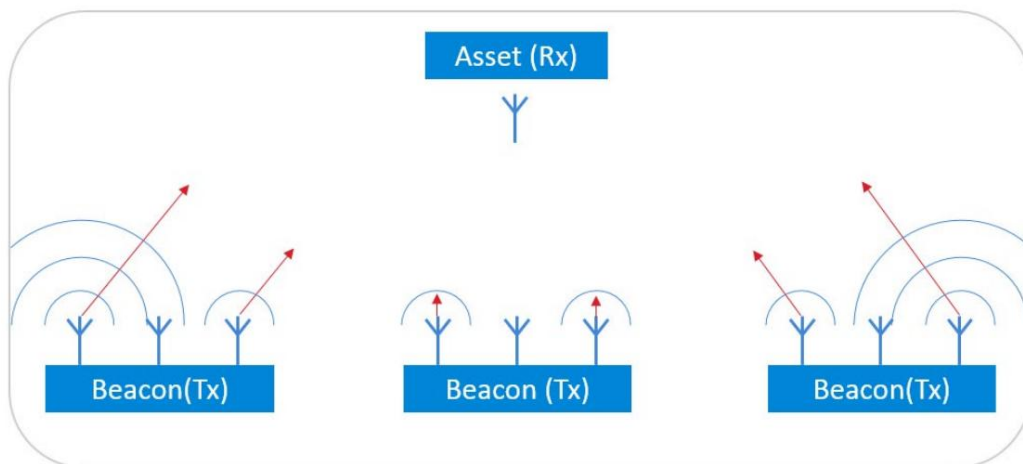


图 2-2. 确定出发角

请注意,发射器 (信标)必须在每个天线上以相同的频率发射,因为这是角度计算的先决条件。这也意味着天线不能同时发射,因为它们的信号会干扰。为了解决这个问题,发射端设备必须按顺序在发射天线之间切换,接收端必须知道天线阵列配置和切换顺序。

在此方法中:

- Beacon 使用时分方式在多个天线上发射未调制的信号,也就是说,每次只有一个天线发射。
- 资产 (例如智能手机)使用相同的时间划分对多个天线的信号进行采样。

从应用的角度来看,这两种方法明显不同。在 AoD 中,接收设备能够使用来自多个信标的角度及其位置 (通过三角测量)计算其在空间中的位置。在 AoA 中,接收设备跟踪单个物体的到达角。但是,由于这两种方法可以以不同的方式组合,因此这些方法不会限制在应用层面可以做什么。在蓝牙 AoA 和 AoD 中,相关控制数据都是通过传统数据通道发送的。通常,这些技术可以实现几度的角度精度和大约 0.5 米的定位精度,但这些数字高度依赖于定位系统的实施。

3 测向理论

角度估计 (测向)方法和天线阵列对于定位系统正常工作至关重要。测向理论的历史可以追溯到 100 多年前,当时首次尝试解决这个问题是使用定向天线和纯模拟系统。在随后的几年里,测试方法转向了数字世界,但基本原理仍然相似。这些测向方法已经用于许多应用,例如医疗设备、安全和军事设备。本节讨论了一些典型天线阵列和估计算法的基础知识。本文中的测向

指估计到达角和离开角的一般问题。

3.1 天线阵列

用于测向的天线阵列通常分为几类。这里讨论的最常见天线阵列是均匀线性阵列 (ULA)、均匀矩形阵列 (URA) 和均匀圆形阵列 (UCA)。线性阵列是一维阵列,这意味着阵列中的所有天线都位于一条线上,而矩形和圆形阵列是二维 (2D) 阵列,这意味着天线分布在两个维度上 (在一个平面上)。

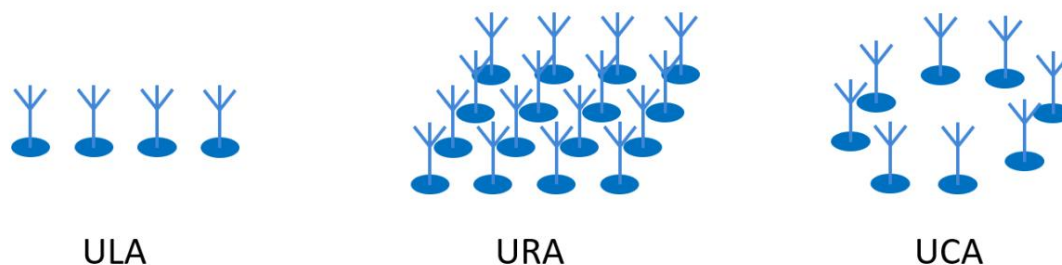


图 3-1. 不同类型的天线阵列

通过使用一维天线阵列,可以可靠地测量方位角 (假设被跟踪的设备在同一平面上持续移动)。此外,由于对称性原因,方位角测量被限制在 180 度宽的角度范围内。使用二维阵列,可以可靠地测量 3D 半空间中的方位角 (θ) 和仰角 (ϕ),如下图所示。如果将阵列扩展为全 3D 阵列 (天线分布在所有三个笛卡尔坐标上),则可以测量整个 3D 空间。

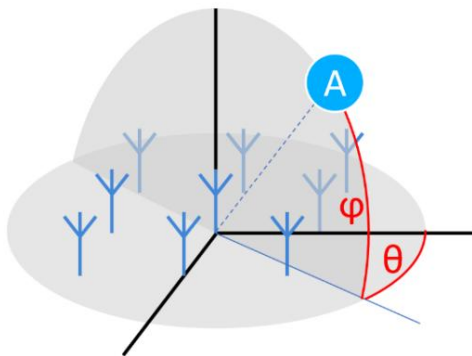


图 3-2. 使用 2D 天线阵列确定方位角和仰角

设计用于测向的天线阵列并非易事。当天线被放置在阵列中时,它们会开始影响彼此的响应,这称为互耦。另一个考虑因素是,在大多数情况下,发射端的极化无法控制。这给设计人员带来了额外的挑战。在物联网应用中,通常希望设备体积小,甚至能在非常高的频段工作。估计算法通常需要阵列具有某些属性。例如,称为 ESPRIT 的估计算法基于数学假设,即阵列分为两个相同的子阵列 (参见 Z.

Chen, G. Gokeda, Y. Yu, 《到达方向估计简介》,Artech House,2010 年)。

3.2 角度估计算法

考虑根据输入 IQ 数据估计到达角的数学/算法问题。问题定义本身很简单：估计到达接收阵列的发射（窄带）信号到达角。虽然问题陈述听起来很简单，并且可以找到一个简单的解决方案，但在现实生活中有效的此问题的稳健解决方案并不容易，并且可能需要硬件提供强大的处理能力。本节介绍了简单的解决方案，然后概述了两种不同的、更稳健的解决此问题的方法。第一种方法是基础的，称为经典波束形成器。第二种是更先进的技术，称为多信号分类 (MUSIC)。有关这些估计算法的更深入研究，请参阅 H. Krim、M. Viberg 的“阵列信号处理的二十年”，IEEE 信号处理杂志，1996 年 7 月，第 67-94 页，以及 Y.-M. Chen，“论相干信号二维到达方向估计的空间平滑”，IEEE 信号处理学报，第 45 卷，第 7 期，1997 年 7 月。

3.2.1 简单解决方案

假设使用两个接收天线。如果传入信号以斜入射角击中这些天线，则会导致相位差(ψ)，因为波前以光速(c) 传播，需要更多时间才能到达另一根天线。由于 2.4GHz 的波长约为λ=0.125m，因此该相移可以转换为波前与另一根天线之间的距离：

$$\Delta = \frac{c}{2}$$

如果接收器距离发射器足够远（至少 3-4 个波长），则波前被认为是平面的。在这种情况下，可以使用三角函数根据该距离(Δ)轻松确定入射角：

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\Delta}{d} \right)$$

其中d是天线之间的距离。

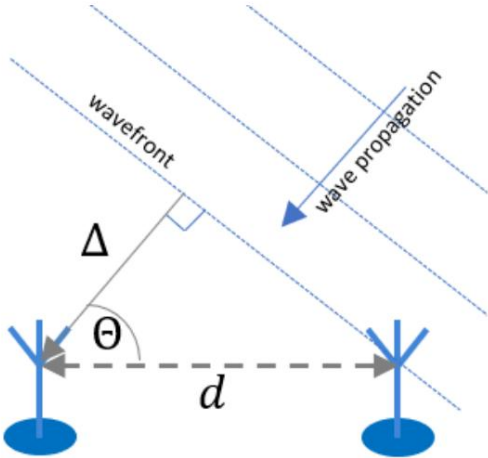


图 3-3. 计算入射角

3.2.2 经典波束形成器

从均匀线性阵列的数学模型开始。给出了每个天线的 IQ 样本数据向量。每个天线都会看到相移（可以为 0）加上一些噪声，因此可以将其写为时间函数：

$$x(t) = a(\theta)s(t) + n(t), \quad (1)$$

其中是通过空中发送的信号，是天线阵列的方向矢量：

$$a(\theta) = [1, e^{j2\pi d \sin(\theta)/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(m-1)d \sin(\theta)/\lambda}]^T, \quad (2)$$

其中，是相邻天线之间的距离；是信号的波长；是天线阵列中的元件数量，代表到达角。导向矢量 (2) 描述了由于与发射机的距离不同，每个天线上的信号如何发生相移。使用 (1)，可以通过以下公式计算所谓的样本协方差矩阵 R_{xx} 的近似值：

$$R_{xx} \approx \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t)x^H(t), \quad (3)$$

其中 H 代表矩阵的 Hermitian 转置。

经典波束形成器的理念是根据角度最大化输出功率，类似于机械雷达的工作原理。

如果功率最大化，则结果为下一个公式：

$$P(\theta) = \frac{a^H(\theta)R_{xx}a(\theta)}{a^H(\theta)a(\theta)} \quad (4)$$

要找到到达角，请循环遍历到达角并找到峰值最大功率。产生最大功率的角度对应于到达角。

3.2.3 MUSIC（多信号分类）

其中一种估计算法是所谓的子空间估计器，该类别中一种流行的算法称为 MUSIC（多信号分类）。该算法的思想是对协方差矩阵 R_{xx} 执行特征分解：

$$R_{xx} = V\Lambda V^{-1}, \quad (5)$$

其中 Λ 是包含特征值并包含 R_{xx} 相应特征向量的对角矩阵。

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)VV^H a(\theta)} \quad (6)$$

与经典波束形成器一样,可以通过循环遍历所需的值并找到最大峰值的位置来找到到达角(参数)。

在理想情况下,MUSIC 在良好的 SNR 环境中具有出色的分辨率,并且非常准确。另一方面,当输入信号高度相关时,尤其是在室内环境中,其性能不是很好。多径效应会扭曲伪频谱,导致其在错误的位置出现最大值。下图比较了理想情况下(上图)和具有大量反射的真实环境中(下图)的伪频谱。

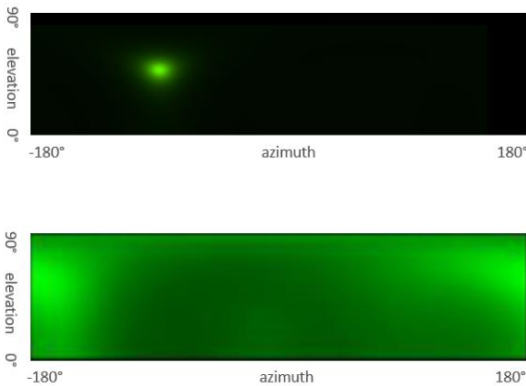


图 3-4 理想情况下和真实环境下的伪谱

3.3 空间平滑

空间平滑是一种解决相干信号存在时多径传播引起的问题的方法。可以证明,通过使用原始协方差矩阵的子阵列计算平均协方差矩阵,可以“去相关”信号协方差矩阵。对于二维阵列,这可以写成以下形式:

$$\overline{R} = \frac{1}{M_s N_s} \sum_{m=1}^{M_s} \sum_{n=1}^{N_s} R_{mn}, \tag{7}$$

其中 M_s 和 N_s 分别是 x 和 y 方向上的子阵列数量,代表 $(,)$ 个子阵列协方差矩阵。此公式的示例证明和更多信息可在 Y.-M. Chen 的“关于二维相干信号到达方向估计的空间平滑”中找到,IEEE 信号处理学报,第 45 卷,第 7 期,1997 年 7 月。

3.4 挑战

如前所述,在理想环境中计算角度估计值是不够的。还必须在具有严重多径效应的环境中计算它们,在这些环境中,信号高度相关或相干。相干信号是指延迟的信号,是某个其他信号的缩放版本。例如,当无线电波从墙壁反射时,就可能出现这种情况。其他挑战包括信号极化。在大多数情况下,移动设备的极化无法控制,因此系统必须考虑到这一点。

此外,信号噪声、时钟抖动和信号传播延迟也会给问题增加变量。根据系统规模,嵌入式系统对 RAM 和 CPU 的要求可能很高。许多有效的角度估计算法需要 CPU 提供大量的处理能力。

适当的角度估计算法必须考虑所有这些问题,并应用先进的技术将其不利影响降至最低。

4 位置查找

如果不知道资产的准确距离,或者资产被限制在 2D 平面内移动,一个天线阵列可以提供资产的方向,但不能提供其位置。要确定资产的精确位置,必须使用多个天线阵列。通过使用多个天线阵列,可以使用三角测量确定资产的位置。资产可以在测向算法确定的方向所绘制的线的交点处找到。三角测量也可以用三边测量法来补充。在方向估计中添加 RSSI 测量可以进一步增强位置估计。

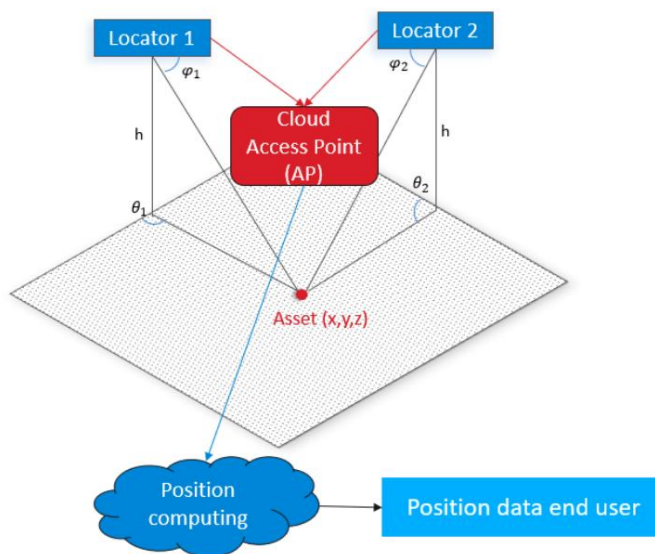
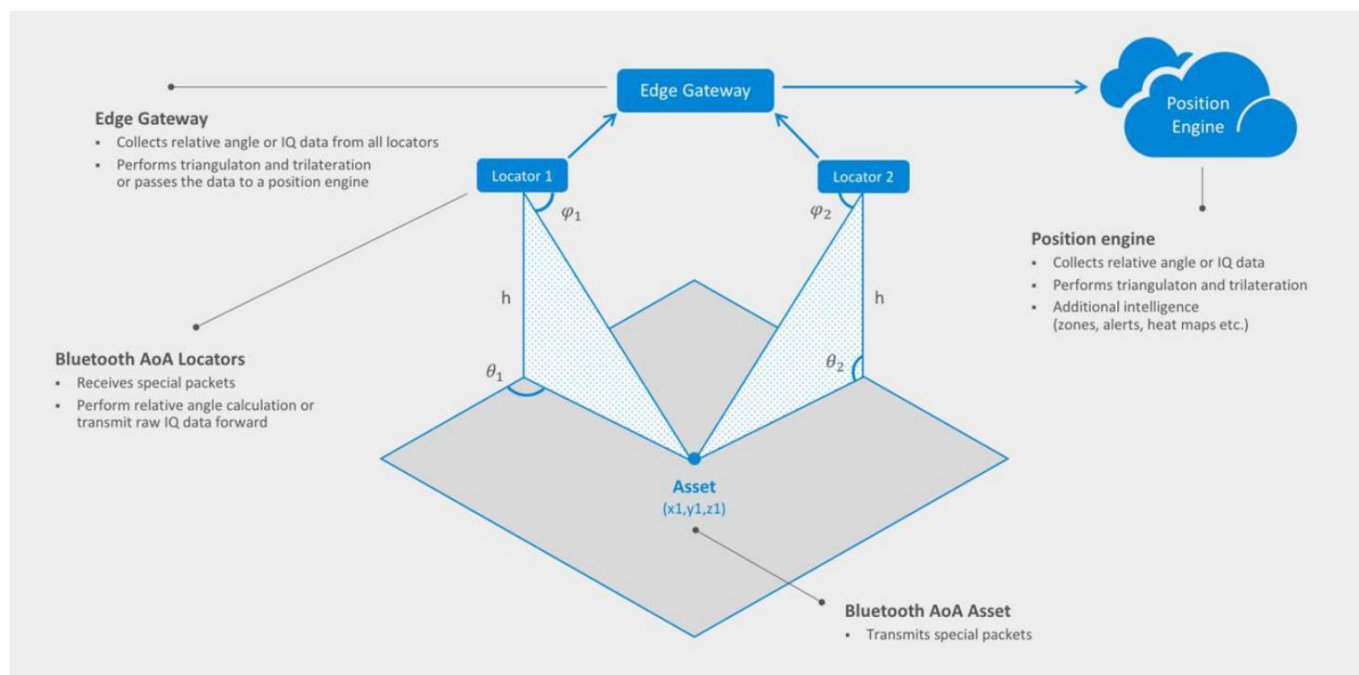


图 4-1. 使用多个天线阵列进行资产定位

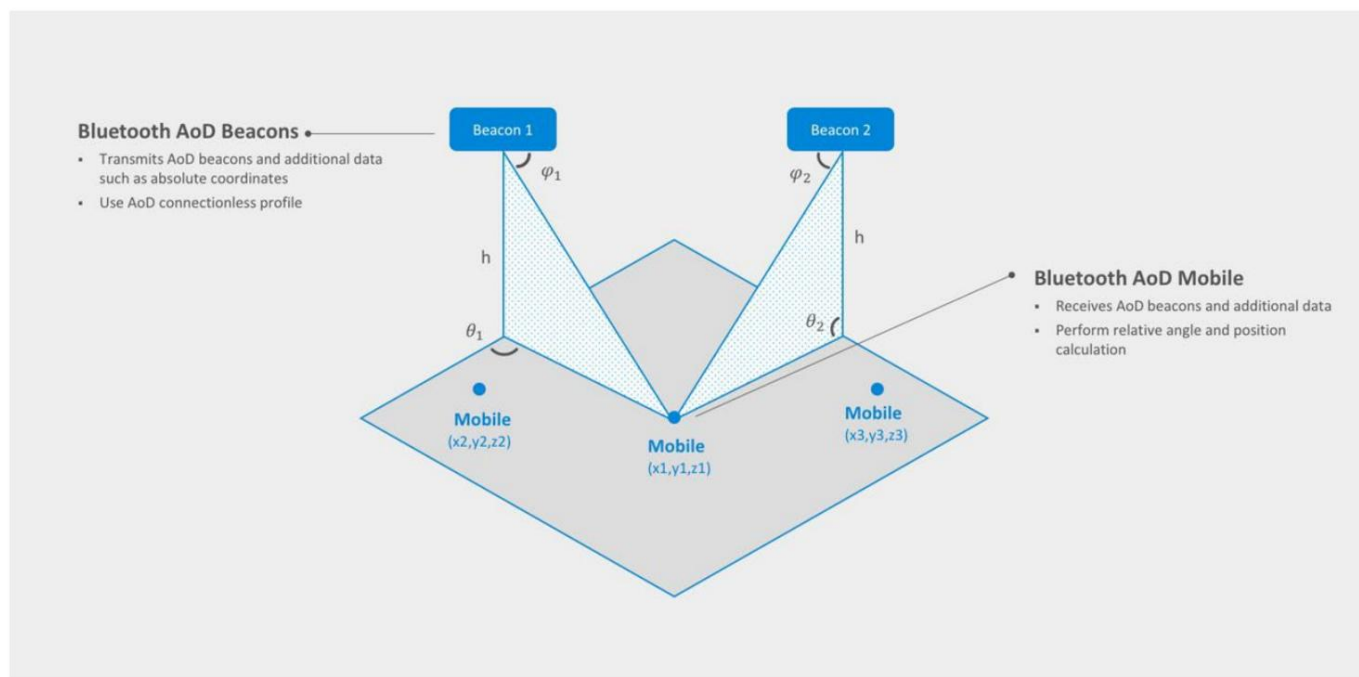
在到达角估计的情况下,发射资产的方向在每个定位器上确定。如果定位器的位置已知,并且资产相对于每个定位器的方向已知,那么就可以确定资产的位置。

但是,要做到这一点,首先必须将方向信息从每个定位器收集到进行位置估计的中央设备,如下图所示。



4.1.1 使用 AoD 进行定位

在出发角估计的情况下,发射信标的方向在资产上确定。如果资产知道信标的位置,它可以立即根据所有估计的角度计算出其位置,而不需要中央位置估计器设备,如下图所示。



5 蓝牙补充支持测向

为了能够根据相位差找到传入信号的方向,发射器必须发射未调制的信号。不建议在测试环境之外长时间发射 CW (连续波)信号,因为它的频谱非常尖锐,可能会对 在 2.4 GHz 频率范围内工作的其他设备造成严重干扰。因此,必须使用短 CW,并且发射器和接收器必须同步,以便它们都知道何时发送 CW 信号。

此外,在 AoD 方法中,接收器必须知道发射器端发生天线切换的确切时间。

可以找到许多解决方案来克服这个问题,事实上,市场上已经有许多使用测向算法的室内定位解决方案。然而,它们都没有基于众所周知的标准。相比之下,蓝牙标准应用广泛,它本质上解决了同步问题:蓝牙数据包的发送时间非常严格,对等设备在每次接收时都会重新同步其时钟。

蓝牙 5.1 引入了一种新方法,可以请求和发送短 CW 信号作为普通包的扩展。此扩展称为恒定音调扩展 (CTE),在请求时在包的 CRC 之后发送。



CTE 既可以通过连接发送,也可以通过定期广告发送,这有助于扩展系统。CTE 还具有通过蓝牙包传递的参数,例如 CTE 类型 (AoA/AoD)、持续时间和切换时隙持续时间。

有关基于蓝牙的测向的更详细描述,请参阅蓝牙 SIG 文档<https://www.bluetooth.com/blue-tooth-resources/bluetooth-direction-finding/>

简约工作室

一键访问 MCU 和无线

工具、文档、软件、源代码库等。适用于
Windows、Mac 和 Linux!



物联网产品组合
www.silabs.com/loT



软件/硬件
www.silabs.com/simplicity



质量
www.silabs.com/quality



支持与社区
www.silabs.com/community

免责声明

Silicon Labs 旨在为客户提供所有外设和模块的最新、准确和详尽的文档,供使用或打算使用 Silicon Labs 产品的系统和软件实施者使用。特性数据、可用模块和外设、内存大小和内存地址指的是每个特定设备,所提供的“典型”参数在不同应用中可能会有所不同。本文所述的应用示例仅供说明之用。Silicon Labs 保留对本文中的产品信息、规格和描述进行更改的权利,恕不另行通知,并且不对所含信息的准确性或完整性提供任何保证。出于安全性或可靠性原因, Silicon Labs 可能会在制造过程中更新产品固件,而无需事先通知。此类更改不会改变产品的规格或性能。Silicon Labs 对使用本文档中提供的信息造成的后果不承担任何责任。本文档不暗示或明确授予设计或制造任何集成电路的任何许可。未经 Silicon Labs 书面同意,本产品未设计或授权用于任何 FDA III 类设备、需要 FDA 上市前批准的应用或生命支持系统。“生命支持系统”是指任何旨在支持或维持生命和/或健康的产品或系统,如果发生故障,可合理预期会导致严重的人身伤害或死亡。Silicon Labs 产品未设计或授权用于军事应用。Silicon Labs 产品在任何情况下均不得用于大规模毁灭性武器,包括(但不限于)核武器、生物武器或化学武器,或能够运载此类武器的导弹。Silicon Labs 放弃所有明示和暗示的保证,并且对于在未经授权的应用中使用 Silicon Labs 产品造成的任何伤害或损害不承担任何责任。

注意:本内容可能包含现已过时的冒犯性术语。Silicon Labs 正在尽可能用包容性语言替换这些术语。有关更多信息,请访问www.silabs.com/about-us/inclusive-lexicon-project

商标信息

Silicon Laboratories Inc.®、Silicon Laboratories®、Silicon Labs®、SiLabs®和 Silicon Labs 徽标®、Bluegiga®、Bluegiga 徽标®、EFM®、EFM32®、EFR、Ember®、Energy Micro、Energy Micro 徽标及其组合、“全球最节能的微控制器”、Redpine Signals®、WiSeConnect、n-Link、ThreadArch®、EZLink®、EZRadio®、EZRadioPRO®、Gecko®、Gecko OS、Gecko OS Studio、Precision32®、Simplicity Studio®、Telegesis、Telegesis 徽标®、USBXpress®、Zentri、Zentri 徽标和 Zentri DMS、Z-Wave®等是 Silicon Labs 的商标或注册商标。ARM、CORTEX、Cortex-M3 和 THUMB 是 ARM Holdings 的商标或注册商标。Keil 是 ARM Limited 的注册商标。Wi-Fi 是 Wi-Fi Alliance 的注册商标。本文提及的所有其他产品或品牌名称均为其各自所有者的商标。



关于硅谷实验室公司
西塞萨尔查韦斯 400 号
德克萨斯州奥斯汀 78701
鹿

公司:silabs