

# 深圳大学考试答题纸

(以论文、报告等形式考核专用)

二〇\_\_23\_\_~二〇\_\_24\_\_ 学年度第\_\_一\_\_学期

课程编号	1501990037	课程名称	智能网络与计算	主讲教师	车越岭	评分	
学 号	2022150168	姓 名	吴嘉楷	专业年级	2022 级计算机科学与技术(创新班)		

教师评语:

题目:      Device-Free Sensing in OFDM Cellular Network

# 《智能网络与计算》期末大报告

2024-2025 学年第一学期

论文题目：\_\_\_\_\_ OFDM 蜂窝网络中的无设备传感 \_\_\_\_\_

英文题目：\_\_\_\_\_ Device-Free Sensing in OFDM Cellular Network \_\_\_\_\_

姓 名：\_\_\_\_\_ 吴嘉楷 \_\_\_\_\_

学 号：\_\_\_\_\_ 2022150168 \_\_\_\_\_

演讲时间：\_\_\_\_\_ 2024 年 12 月 11 日 \_\_\_\_\_

撰写报告时间：\_\_\_\_\_ 2024 年 12 月 14 日 \_\_\_\_\_

## 填写说明：

1. 严格按照模板提供的一级大标题撰写报告，根据需要可自行添加二级、三级小标题。不要更改报告格式、字体等，确保报告格式的统一性。
2. 每个人独立完成、提交一份论文阅读报告。**同一小组提交的报告不可雷同！**
3. 大报告需要就论文中的关键技术、创新点、主要设计与优化、论文不足及潜在改进方向或研究方向，以及本人的对该研究论文思考等方面进行阐述。
4. **报告需同时提交电子版和纸质版。电子版提交时请转化成 PDF 格式**，并以“**期末大报告-姓名.pdf**”命名，在 BB 上提交。**纸质版交到计算机大楼 715 助教李健。**
5. 模板中灰色斜体字为说明，最终提交版本中需要删除。
6. **电子版报告提交截止时间为 2024 年 12 月 30 日中午 12 时，逾期提交的零分。**纸质版请于 **2024 年 12 月 31 日前**提交。请尽快准备并提交。

## 摘 要

本文提出了一种用于正交频分复用 (OFDM) 蜂窝网络中无设备感知的新型两阶段框架, 用于定位无法向基站传输/接收参考信号的被动目标, 以实现集成感知和通信 (ISAC)。在第一阶段, 基站利用 OFDM 信道估计技术估计被动目标的距离, 无需依赖任何基站-目标信道模型。在第二阶段, 基站通过前传链路共享距离信息, 基于不同基站到目标的距离进行目标定位, 类似于基于到达时间 (ToA) 的定位方法。

作者还证明了数据关联问题 (即虚假目标检测) 在理想的完美距离估计情况下并非根本性限制, 并提出了一种有效的算法来处理实际的不完美距离估计情况。数值结果表明, 所提出的两阶段框架可以实现被动目标的高精度定位, 且定位精度随系统带宽的增加而提高。

该研究团队由来自香港理工大学和中山大学深圳研究院的专家组成, 在无线通信、信号处理和优化等领域有丰富的研究经验。他们的工作为未来 6G 网络中的集成感知和通信功能提供了重要的技术支撑。

## 1. 研究背景及意义

### 1.1 研究背景与动机

这篇论文研究的是在正交频分复用 (OFDM) 蜂窝网络中实现集成感知与通信 (ISAC), 即通过利用无线信号进行目标检测和定位。

近年来集成感知和通信 (ISAC) 技术受到广泛关注, 因为它可以为许多应用场景带来显著的好处, 如智能交通系统可利用 ISAC 技术感知环境并在车辆间传播感知数据, 以提高交通效率和安全性。此外, ISAC 技术在未来通信系统中也扮演着关键角色, 例如可利用毫米波系统中的感知信息来设计高效的波束选择和对准。

尽管 ISAC 技术前景广阔, 如何在实际系统中同时实现感知和通信功能仍是一个亟待解决的问题。因此, 本论文致力于研究先进的信号处理技术, 利用蜂窝网络中基站发送的通信信号进行目标定位。通过现有的通信基础设施和技术, 将蜂窝网络转变为一个大型传感网络, 可以降低系统的成本和复杂度, 从而为未来的 5G 及 6G 网络用户提供网络化定位功能。

### 1.2 研究意义

这篇论文提出了一种新的方法, 在现有的通信基础设施和技术的基础上, 通过已有的蜂窝网络, 实现了实时的目标检测和定位, 从而降低了系统的成本和复杂度。

同时, 该研究它提出了一种新颖的无设备传感两阶段框架来进行目标检测和

定位，并证明了在这种框架下不会出现“幽灵目标”的问题。这对于解决实际中的数据关联问题具有重要意义，同时也为后续的研究提供了新的思路 and 方向。这种新型的 ISAC 系统可以应用于智能家居、智慧城市等领域，具有广泛的应用前景。

## 2. 国内外研究现状

### 2.1 已有工作概述

#### 2.1.1 雷达信号与通信信号的 ISAC

核心任务是在雷达信号中嵌入额外的信息，包括通信数据或其他类型的信息，专注于雷达信号的信息共享和协作。

挑战在于保持高阶随机数据符号的自相关性，以避免降低感知性能。在嵌入信息的过程中，需要保持雷达信号中高阶随机数据符号的自相关性。自相关性是指信号与其自身在不同时间延迟下的相似度。保持这种自相关性对于雷达信号的性能至关重要。最终目标是确保嵌入信息的过程不会降低雷达的感知性能，即雷达对目标的检测和跟踪能力。

#### 2.1.2 基于设备的 ISAC

通过无线参考信号交换来估计目标位置，如时间到达(ToA)和角度到达(AoA)定位方法。这两种方法结合使用，可以提高定位的准确性和可靠性。在室内环境中，由于建筑物和其他障碍物的存在，传统的 GPS 定位可能不准确或不可用，因此 ISAC 技术特别有用。通过无线信号的交换和处理，ISAC 能够在室内环境中提供精确的定位服务。

但是，基于设备的 ISAC 技术仍存在一些不足之处：首先，它依赖于目标设备能够与基站交换参考信号，这对于无法与基站通信的被动目标来说是不可行的。其次，即使对于有通信能力的目标，基于时间差或角度差的定位方法也存在一定的局限性，难以达到与雷达系统相当的定位精度。因此，针对无设备的目标，需要探索新的基于通信信号的感知技术，以实现更加通用和精准的定位功能。

#### 2.1.3 无设备的 ISAC

无设备感知的核心思想是定位无法与基站通信的目标（即被动目标）。当前的设备无关感知方法通常依赖于信道反射模型，该模型用于描述无线信号在传播过程中遇到障碍物后发生反射、折射和散射等现象。对于无法主动传输或接收通信信号的被动目标，这些方法需要利用反射的通信信号来估计目标的位置。

然而，这些方法往往难以适应复杂且动态的无线环境，例如多障碍物、信号的多径效应以及物体的移动等问题。相比于传统的基于通信信号的设备感知方法（例如基于 ToA 或 AoA 的定位技术），无设备感知的研究相对较少，其技术挑战更为显著。因此，需要进一步的研究和改进这些方法，以更好地适应复杂的无线

环境。

#### 2.1.4 模型依赖的方法

一些研究工作提出,通过模型假设(例如基站 BS-目标-基站 BS 的反射模型),利用基站之间的信号反射提取目标的位置信息。

现有方法大多假设反射信道模型是准确的,然而现实中无线环境复杂多变,这种假设往往不成立。在实际环境中,由于模型匹配误差(即实际环境与模型假设之间的差异会导致模型预测结果与实际情况不完全一致),可能会引发较大的定位偏差。这种偏差使得目标的实际位置与模型预测的位置之间存在显著差距,因此需要采取有效的校正措施或更鲁棒的算法,以提高定位的准确性和可靠性。

#### 2.1.5 多模态传感和通信的 ISAC

除了传统的雷达和通信信号,研究者还在探索集成更多传感模式的方法,尝试将视觉和声学传感器等多种传感器类型整合到系统中,以实现更全面的环境感知。近期,有学者提出了一种多模态传感框架,该框架通过融合多种传感器采集的数据,显著提升了自动驾驶车辆对环境的感知能力,使其能够更准确地理解周围发生的情况并快速作出响应。未来,这种多模态传感技术有望在其他领域(如智能制造和机器人技术)中发挥重要作用。

### 2.2 已有工作的不足

#### (1) 模型依赖性强:

现有方法通常假设反射信道模型是准确的,然而,复杂多变的实际无线环境往往与这一假设不符,导致模型预测结果与现实存在较大偏差。

#### (2) 缺乏对幽灵目标的系统性分析:

以往的研究通常未能充分解决数据关联问题,这可能导致“幽灵目标”(ghost targets)的出现,即错误地检测到不存在的目标。此外,这些研究大多仅在特定条件下讨论幽灵目标的成因和影响,缺乏全面的理论保障。

#### (3) 对带宽要求高:

许多研究未明确分析 OFDM 信号带宽对定位精度的影响,因而未能充分利用系统带宽来提升定位性能。而本论文通过系统性分析揭示了较高带宽在显著提升定位精度方面的重要作用,为优化带宽利用提供了新的思路。

#### (4) 设备依赖性强:

现有方法往往依赖目标设备能够与基站交换无线参考信号,并通过如时间到达 (ToA) 和角度到达 (AoA) 等定位方法估计目标位置。然而,这种方法对无法与基站通信的被动目标(如无设备目标)来说是不可行的,因而限制了其适用范围。

## 2.3 已有工作与本工作的不同点

### （1）模型无关设计：

与依赖信道模型的传统方法相比，本文设计了一种**模型无关**的距离估计方法，通过成熟的 **OFDM 信道估计** 技术提取**反射延迟** 信息。这种方法在实际环境中表现出更强的鲁棒性，能够适应多种复杂的信道环境。

### （2）两阶段感知框架：

本文提出了一个新颖的**两阶段感知框架**。第一阶段是**距离估计**，利用 OFDM 信号的**反射延迟值** 计算目标距离，并指出在 5G 及更高带宽条件下可以实现高精度的距离估计。第二阶段是**位置估计**，基于来自不同基站的距离信息，通过**联合** 多个基站的距离数据，提出了一种**基于最大似然的算法**来解决数据关联问题，从而精确估计目标的位置。

### （3）幽灵目标的概率分析：

本文通过理论分析证明，在理想条件下，幽灵目标的出现概率可以忽略不计；即使在实际场景中，也可通过优化算法显著降低幽灵目标的风险。尤其是当基站数量超过目标数量的**两倍**时，幽灵目标的出现概率几乎为零，进一步增强了系统的可靠性。

### （4）数据关联问题：

本文深入研究了数据关联问题，重点探讨了如何将估计的距离值与正确的目标**匹配**，这在无设备感知（DFS）中是一个关键挑战。此外，文章分析了多种数据关联算法的适用性，为实际系统的设计提供了重要参考。

## 3. 研究内容

本文主要研究如何在**正交频分复用（OFDM）蜂窝网络**中实现**无设备感知**的**目标定位**。这项技术通过利用目标反射信号的**时延**来完成目标的定位和检测，无需目标向基站传输任何信号，从而突破了传统定位技术的设备依赖性。

为了克服因多个路径引起的多普勒效应而导致的信号干扰，作者提出了一种**两阶段感知框架**：

第一阶段，基站利用 OFDM 信道估计技术估计目标到基站的**距离**；第二阶段，基站通过前传链路共享距离信息，根据目标与多个基站的距离数据，采用类似基于到达时间（ToA）的定位方法，提出了一种基于**最大似然估计（ML）**的数据关联与位置估计算法，精确估计目标的**位置**。

该方法不依赖目标-基站 BS 信道模型，能够有效定位无法与基站通信的被动目标，弥补了基于设备的定位技术的局限性。此外，作者针对无设备感知定位可能面临的“**幽灵目标**”问题展开了深入分析，提出了优化解决方案。在理想条件下（无距离估计误差），幽灵目标的检测概率可以忽略不计；在实际场景中，通过优化数据关联算法，可以大幅减少虚假目标的出现概率。

最后，文章通过数值实验展示了所提出两阶段框架的性能，表明该方法在被动目标定位中具有极高的精度，且定位精度**随着系统带宽的增加而显著提升**。这一创新的设备无感知定位方法，不仅为蜂窝网络提供了新功能——网络化定位，还为未来 5G 和 6G 网络中的集成感知通信系统（ISAC）的发展提供了重要的技术支撑。

### 3.1 主要挑战及创新点

#### 3.1.1 目标问题

本文关注的是在 OFDM 蜂窝网络中实现无设备感知（Device-Free Sensing）的问题，即如何通过利用目标**反射**信号来实现目标的定位和检测，而无需任何目标传输信号给基站。

其核心目标是利用**蜂窝通信信号**，定位无通信能力的**被动目标**，并且，通过复用现有通信系统的射频信号，同时实现**通信和目标定位**。

问题关键点包括：

##### （1）无设备感知定位问题：

文章提出了一个新颖的**两阶段感知框架**，用于定位无法主动传输或接收参考信号的被动目标。

##### （2）模型无关的范围估计问题：

本文设计了一种不依赖于任何 BS-目标信道模型的模型自由范围估计方法，利用 OFDM 信道估计技术来确定所有双向 BS-目标-BS 路径的延迟值。

##### （3）幽灵目标问题：

文章提出了在理想情况下（完美范围估计）和实际不完美范围估计情况下的解决方案，以减少幽灵目标出现的概率，并提出了一个**基于最大似然估计**的算法来联合解决数据关联和目标定位问题。

#### 3.1.2 主要挑战

##### （1）信道模型复杂性：

被动目标的感知依赖反射信道模型，而实际环境中的信道非常复杂且动态，传统方法对信道模型的依赖导致鲁棒性不足。

##### （2）通信与感知的性能平衡：

在集成通信与感知的系统中，通信信号的优化目标（如高容量）通常与感知目标（如高定位精度）存在冲突，需要在两者间取得平衡。

##### （3）数据关联问题：

在无设备感知中，所有目标反射相同的信号到 BS，被动目标无法主动传递唯一标识信息，导致多个目标的反射信号在基站端难以分配和匹配，增加了定位的复杂性，可能导致检测到幽灵目标，严重影响定位精度。

(4) 有限带宽对距离估计的影响:

通信信号的带宽决定了距离估计的分辨率,有限的带宽限制了信号携带的信息量,可能导致较大的定位误差。

### 3.1.3 创新点

(1) 提出模型无关的两阶段感知框架:

本论文创新性地提出了一种模型无关的两阶段感知框架,用于目标定位。第一阶段是**目标距离估计**,提出基于 OFDM 信号的距离估计方法,通过**信号反射延迟**推导目标与基站的距离,同时摆脱了对复杂信道模型的依赖,使方法在动态信道环境中更具鲁棒性。第二阶段是**目标位置估计**,利用多个基站的距离信息,通过**最大似然估计算法**实现目标的定位,重点解决了数据关联问题,确保每个目标距离值**匹配**正确的目标。

(2) 模型自由的范围估计方法:

提出了一种不依赖任何基站-目标信道模型的模型自由范围估计方法。这种方法提高了在不同信道环境中的实用性和鲁棒性,特别适用于复杂且动态的无线环境。

(3) 幽灵目标的系统性分析:

论文**首次**对幽灵目标问题进行了**系统性研究**。在理想条件下(无限带宽、无误差),证明当基站数量满足  $M \geq 2K+1$  (其中  $K$  为目标数量)时,幽灵目标不存在。在实际条件下(有限带宽、有误差),分析了幽灵目标的出现概率,并提出了一种基于最大似然估计的优化算法,显著降低了虚假目标的风险。

(4) 性能依赖带宽的定量分析:

本文详细分析了 OFDM 信号的带宽对距离估计精度的影响,表明带宽越大,定位误差发生概率越低,为未来的 6G 通信感知系统提供了设计依据。

(5) 综合利用现有通信网络实现感知功能:

本论文提出的方法**无需额外硬件支持**,直接利用**现有蜂窝网络的通信信号**实现**感知功能**。这种通信感知一体化(**ISAC**)设计显著降低了额外部署成本,为未来 6G 蜂窝网络感知功能的实现提供了重要的技术支撑和参考。

## 3.2 技术路线及实现

### 3.2.1 第一阶段目标距离估计方法

OFDM 信号具有天然的多径特性。当信号经过**被动目标**反射并返回基站接收天线时,反射信号可以被视为一个**多径信道**,其中每条反射路径都对应一个独特的**延迟值**。基站通过成熟的 OFDM 信道估计技术提取这些反射路径的**非零延迟项**,并将延迟值 **1 转换**为距离,从而计算目标与基站之间的距离。这一过程完全摆脱了对复杂基站-目标-基站反射信道模型的依赖,而是利用 OFDM 信道估计技术**直接**提取延迟信息,从而有效避免了由于模型匹配误差引起的定位偏差。



其背后原理是：

### (1) OFDM 信号的多径特性

OFDM 信号天然适合处理多径环境，其高频谱分辨率使得能够准确分离信号的反射路径。OFDM 的信号模型为： $y_m = \sum_{u=1}^M H_{u,m} x_u + z_m$ ，其中  $H_{u,m}$  是第  $u$  个基站的信道响应矩阵， $z_m$  是接收噪声。

### (2) 距离估计精度与带宽的关系

距离估计的分辨率与信号带宽成正比。具体而言，延迟值与距离的关系为： $d = \frac{lc_0}{2N\Delta f}$ ，其中  $l$  是延迟值， $c_0$  为光速， $N\Delta f$  为 OFDM 的信号带宽。随着带宽增加，距离估计精度将显著提升。

## 3.2.2 第二阶段目标位置估计方法

由于被动目标无法主动发送标识信号，多个基站的距离信息需要通过数据关联的方式匹配到具体目标。基站通过前传链路共享各自在阶段 I 中估计的目标距离集合  $D_m$ ，然后汇总到中央处理单元，并采用联合定位和数据匹配算法解决这一问题。

由于被动目标没有主动传输信号的能力，所有目标反射的信号是相同的，这导致基站无法直接将每个距离与特定目标关联。为了解决数据关联问题，论文提出了利用几何方法，基于最大似然（ML）的优化算法，寻找全局最优解以匹配每个距离值和目标。这一过程通过最小化实际距离与估计距离的误差完成，并结合

误差范围对虚假目标的风险进行抑制：
$$\min_{x_k, y_k} \sum_{m=1}^M \left( d_{m,k} - \sqrt{(a_m - x_k)^2 + (b_m - y_k)^2} \right)^2$$
。

其背后原理是：

### (1) 三角几何定位：

通过多个基站的距离交汇点来确定目标位置，这是传统三角定位方法的扩展。由于被动目标无法主动发送任何标识信息，因此需要依赖数据关联算法解决多目标混叠问题，以确保每个目标与其对应的距离信息准确匹配。

### (2) 最大似然估计（ML）：

最大似然估计的核心思想是：在所有可能的参数值中，选择一个能够最大化观测数据出现概率（即似然函数）的参数值作为估计结果。在位置估计中，最大似然方法通过最小化距离误差来优化目标位置的估计精度，尤其在多基站联合定位中表现出显著优势。

### (3) 数据关联与误差分析：

文章通过结合统计学原理和最大似然估计方法，对距离集合的几何特性及误差范围进行深入分析，从而限制错误关联的可能性，优化数据匹配过程。这种改进不仅显著提高了数据关联的准确性，还有效降低了由于误差传播引起的定位偏差，为多目标定位问题提供了可靠的解决方案。

### 3.2.3 数据关联和目标定位算法

首先，目标定位建立在**几何三角定位**的基础之上。每个目标的位置由其到多个基站的距离确定。在二维空间中，一个目标与三个基站的距离信息即可确定其位置，但由于被动目标的反射信号**没有唯一性**，基站无法直接知道某个距离值来自哪个目标，这引入了数据关联问题。为了处理这一问题，论文将**数据关联**作为一个优化变量，与目标位置一起求解。

本论文使用**最大似然估计**方法，将数据关联和目标定位建模为**联合优化**问题。具体来说，目标是**最小化基于距离估计值和几何模型计算的误差**。在此基础上，论文构造了一个目标函数，以最大化每个估计值的似然概率。该目标函数可表示为：

为：
$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \frac{(D_m(g_{m,k}) - \sqrt{(a_m - x_k)^2 + (b_m - y_k)^2})^2}{\sigma_{m,k}^2}$$
。其中， $g_{m,k}$  是数据关联变量，表示基站  $m$  的距离集合  $D_m$  中的某个值与目标  $k$  的匹配关系。

为了求解这一优化问题，论文采用了一种两步式方法。首先，对每个目标，利用**几何关系**和**最小二乘法**，通过假设不同的数据关联方案，分别计算对应的目标位置，并记录这些方案的误差值。其次，从所有可能的关联方案中，选择使目标函数值**最小**的方案作为最终解。在这个过程中，论文通过引入一些**几何约束条件**（例如三角不等式）来排除明显不合理的关联方案，从而减少计算复杂度。

其背后的原理是：

基于**最大似然估计**的本质：假设系统中的噪声为高斯分布，则最优解应使估计值与真实值之间的误差**最小化**。与此同时，该算法通过**联合优化**数据关联变量和目标位置变量，将传统的单独解决数据关联和定位问题的方法整合为一个统一框架。这种方法不仅提高了解的全局一致性，还显著降低了幽灵目标出现的概率。

## 3.3 相关技术介绍

### 3.3.1 蜂窝网络技术（OFDM）

**正交频分复用（OFDM）**是一种成熟的多载波调制技术，被广泛应用于现代蜂窝通信系统（如 5G）。其核心原理是将数据**分割**为多个**并行的低速数据流**，并分别调制到一组**正交子载波**上进行传输。每个子载波以较低的数据速率传递信号，从而提高了系统的频谱利用率和抗干扰能力。这种设计能够有效应对**多径衰落**和频率选择性信道的影响，使得通信系统在复杂环境中具备更强的鲁棒性。

作为 5G 网络的关键技术之一，OFDM 不仅支持高速数据传输，还为多用户接入提供了高效的解决方案。展望未来，它在 6G 网络中的应用潜力也备受期待，特别是在超高带宽和大规模多输入多输出场景中，其性能优势将进一步凸显，为新一代通信系统的全面升级奠定基础。

### 3.3.2 信道估计技术

**信道估计**是无线通信中的关键技术，用于提取信道的**特征参数**（如增益和延

迟)，以优化信号传输性能。通信系统中，发送端和接收端之间的信道常常受到多种因素的影响，例如多径传播、阴影效应和频率选择性衰落等。这些影响会导致信号的衰减和失真，因此准确估计信道特性至关重要。

信道估计的核心目标是通过**估计信道的特性参数**，为发送端提供必要的信息，使其能够对发射信号进行调整，从而提高传输质量、减少误差并增强通信的可靠性。在正交频分复用（OFDM）系统中，借助导频信号可以高效估计信道响应，并实现对动态信道条件的适应。

本论文通过信道估计技术识别目标反射路径中的**非零延迟值**。这些延迟值对应于基站到目标的传播时间，进而转换为距离信息。

### 3.3.3 几何定位技术

几何定位是通过已知的距离信息，利用几何原理推导目标位置的技术，传统方法包括基于到达时间（ToA）、到达角度（AoA）或接收信号强度（RSS）的定位。

论文基于三角定位原理，通过多个基站的距离信息推导目标位置。目标与基站的几何关系满足公式： $\sqrt{(a_m - x_k)^2 + (b_m - y_k)^2} = d_{m,k}$ 。其中  $(x_k, y_k)$  是目标位置， $(a_m, b_m)$  是基站位置。

### 3.3.4 数据关联技术

数据关联是从多传感器数据中识别、分析和匹配目标的技术，广泛应用于雷达、视觉追踪和无线感知领域。这种技术可以帮助我们理解数据之间的关系，发现数据中的模式和趋势，以及从大量复杂的数据中提取有价值的信息。

在设备无关感知中，所有被动目标反射的信号相同，基站接收到的距离信息无法直接与目标匹配。本论文就是通过数据关联技术解决了这一问题。

### 3.3.5 最大似然估计

最大似然估计是一种经典的统计方法，通过最大化观测数据的概率来推导未知参数。这种方法的核心思想是：在所有可能的参数值中，选择一个参数值，使得给定这些参数时，观测到当前样本数据的概率（似然函数）最大。

具体来说，假设我们有一个随机变量  $X$  和一个参数向量  $\theta$ ，我们想要估计  $\theta$  的值。最大似然估计通过最大化似然函数  $L(\theta | x)$  来找到  $\theta$  的最佳估计值，其中  $L(\theta | x)$  是在参数  $\theta$  下观测到数据  $x$  的概率。

论文将数据关联和目标定位建模为一个联合优化问题，目标是最小化距离估计值和真实值之间的误差：

$$\underset{\mathcal{X}, \mathcal{G}}{\text{minimize}} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \frac{(\mathcal{D}_m(g_{m,k}) - \sqrt{(a_m - x_k)^2 + (b_m - y_k)^2})^2}{\sigma_{m,k}^2}。$$

### 3.3.6 无设备感知定位

这是一种无需依赖特定设备或用户持有的设备即可实现定位的技术。无设备感知技术允许系统在目标**无需携带任何设备**的情况下获取其位置信息。该技术通常利用环境中已有的信号（如 Wi-Fi 信号、蓝牙信号和蜂窝网络信号），通过分析这些信号的特性来推断目标的位置。

与传统定位技术相比，无设备感知技术（DFS, Device-Free Sensing）的显著优势在于无需目标用户携带额外设备或安装特定应用程序。它充分利用现有的基础设施即可提供定位服务，因而具有较高的可行性和成本效益。这种技术已在室内导航、紧急救援、资产管理等领域展现了广泛的应用潜力。

这项技术在本论文中被用来定位无法主动传输或接收信号的被动目标，通过分析目标**反射**的 OFDM 信号来实现定位。

### 3.3.7 压缩感知技术

**压缩感知**是一种基于**信号稀疏性**的信号处理理论，能够在有限测量数据的情况下重建稀疏信号。该理论指出，如果一个信号在某个域（如时间域或频率域）是稀疏的，或者可以通过变换表示为稀疏形式，则该信号可以以远低于奈奎斯特采样率的采样率进行采样，并仍然能够被准确重建。

压缩感知的核心思想是利用信号的**稀疏特性**，通过优化算法从少量测量数据中**恢复**出原始信号。由于这种方法显著降低了数据采集、存储和传输所需的数据量，同时保持了信号的完整性，因此在实践中具有很高的效率。压缩感知已在多个领域得到了广泛应用，包括医学成像、无线通信、图像和视频压缩等。

在本文中，信道延迟估计被建模为稀疏信号恢复问题，作者通过压缩感知技术提取目标的**反射路径**。

### 3.3.8 频率复用与干扰抑制

“**频率复用**”是指在无线通信中，通过将可用的频谱划分为**多个频道**，使得不同的通信链路可以在相同的物理空间内同时使用不同的频率进行通信，从而提高频谱的**使用效率**。这样做的目的是为了**共享**同一频谱资源，而不会互相干扰。

“**干扰抑制**”则是指采取措施减少或消除信号在传输过程中受到的干扰。干扰可能来自于其他通信设备、自然环境或人为因素。干扰抑制技术包括使用滤波器、天线设计、信号处理算法等方法来识别和消除干扰，以保证通信信号的质量和可靠性。

它们共同作用于提高通信系统的容量和性能，确保信号的有效传输。在本论文中，不同基站分配不同的子载波集合，减少了多基站间的干扰，并且，基站通过这些互补的频率分配方案独立估计目标的反射路径延迟，确保距离估计的准确性。

## 4. 性能评估

本文提出的方法在理论和实践层面均展现了优异性能，尤其在**定位精度、系统带宽利用率以及对幽灵目标的有效抑制**方面表现突出。通过数值仿真和理论分析对其性能进行了全面评估，结果表明，该方法能够在设备无关的感知场景中实现高精度目标定位，并表现出良好的适应性与稳定性。这一方法的高鲁棒性和高效性，不仅为复杂动态环境下的目标定位提供了解决方案，也为未来 6G 网络中感知与通信的深度融合奠定了技术基础，展现出广阔的应用前景。

具体而言，显示出以下特点：

### （1）高精度的目标定位：

首先是距离估计精度高，作者利用 OFDM 信号的高频谱分辨率，该方法在 100 MHz 的带宽下，距离估计误差小于 0.75 米；在更高带宽（400 MHz）下，误差进一步降低至 **0.1875 米**。

其次是目标定位精度高，通过联合多个基站的距离信息，**定位误差随着基站数量的增加显著降低**，能够满足 6G 蜂窝网络中高精度定位的需求。

论文通过数值结果表明，所提出的两阶段框架能够实现对被动目标的高精度定位，并且**随着系统带宽的增加**，定位精度进一步提高。

### （2）低幽灵目标出现概率：

论文通过理论分析表明，当基站数量  $M \geq 2K+1$ （K 为目标数量）时，虚假目标完全不存在。

在实际场景（如有限带宽或距离估计存在误差）中，通过优化数据关联算法，幽灵目标的检测概率显著降低，尤其在典型的 5G 蜂窝网络条件下（4 个基站、2 个目标），**幽灵目标概率极低**。

### （3）高鲁棒性和抗干扰能力：

论文还考虑了在实际应用中可能存在的不完美范围估计情况，提出的两阶段框架能够高效处理来自多个基站（BS）的信号，即使在存在多径效应的情况下，也能准确估计目标位置。它基于**模型无关**的距离估计技术，摆脱了对复杂信道模型的依赖，展现出在复杂多路径传播和动态无线环境中的**稳定性和适应性**。

此外，通过引入**分数频率复用**技术，有效抑制了多基站之间的信号干扰，进一步提升了定位的可靠性和精度，为多目标定位场景提供了更强的鲁棒性。

### （4）低计算复杂度：

通过引入**几何约束**（如三角不等式），有效缩小了数据关联方案的搜索空间，大幅降低计算复杂度的同时，确保了定位精度的可靠性。

此外，这种方法在多目标场景下表现出优异的适应性，为复杂环境中的高效目标定位提供了技术支持。

## 5. 未来工作及展望

### 5.1 不足点

#### (1) 对基站数量的高依赖性:

理论分析表明,为了完全避免幽灵目标,基站数量需要满足  $M \geq 2K+1$  (其中  $K$  是目标数量)。在实际部署中,增加基站数量会显著增加网络的部署成本,尤其在目标数量较多的场景下,这一要求可能不现实。

#### (2) 有限带宽对性能的影响:

距离估计精度直接受到 OFDM 信号带宽的限制,论文中提到带宽增加可以显著提升定位精度,但实际中的带宽资源通常有限(例如在拥挤的 5G 频段)。在低带宽条件下,距离估计误差会显著增加,从而影响整体定位精度。

#### (3) 动态环境的适应性:

在动态环境中(例如移动目标或快速变化的无线信道),信号反射路径的变化可能导致距离估计和数据关联的不稳定。论文假设目标和环境在一定时间内是静态的,未充分考虑动态场景下的性能和实时性。

#### (4) 噪声和干扰的建模假设:

论文假设距离估计误差服从高斯分布,这在一定程度上简化了分析。然而,在实际复杂的无线环境中,干扰和非高斯噪声(如设备间干扰、环境反射)可能显著影响感知精度。

#### (5) 计算复杂度与实时性:

数据关联与定位算法虽然引入了几何约束以减少计算复杂度,但对于目标数量  $K$  较大时,仍需要搜索大量可能的关联组合(复杂度为  $(K!)^{M-1}$ )。在大规模目标感知场景下,计算复杂度可能成为瓶颈,影响实时性。

#### (6) 缺乏三维空间的扩展:

本论文主要讨论二维空间中的目标定位,对于实际场景(如无人机、智能交通系统)中需要三维定位的需求,论文的方法未作深入分析和验证。三维定位可能引入更多的复杂性,例如基站高度差异对距离估计的影响。

### 5.2 改进方向

#### (1) 基站部署优化:

在实际中,通过优化基站的部署位置,可以减少基站数量的需求,同时提升感知系统的性能。例如,可以利用几何优化方法部署基站,使虚假目标的概率最小化,或提高目标检测的覆盖范围。

#### (2) 宽带与窄带结合的多层次信号处理:

在有限带宽的条件下,可以考虑结合宽带和窄带信号,通过宽带信号提供高

精度的距离估计，窄带信号用于辅助数据关联。这种多层次信号处理可以在不显著增加带宽占用的情况下提升性能。

### (3) 动态环境下的鲁棒算法：

引入动态跟踪算法（如卡尔曼滤波或粒子滤波）以适应目标的移动性和信道的快速变化。通过利用时间相关性，实时更新目标的距离和位置估计，提升动态场景下的鲁棒性。

### (4) 对干扰和非高斯噪声的建模与处理：

在模型中考虑更加复杂的干扰和噪声条件，例如多路径反射引起的相位偏移、强非高斯噪声等。同时，可以引入噪声鲁棒优化算法，例如基于稀疏表示或贝叶斯推断的方法，提高感知系统的抗干扰能力。

### (5) 实时性优化：

数据关联和目标定位过程可以通过启发式算法或分布式计算框架加速，例如使用遗传算法或蚁群算法进行快速的关联搜索，或者将计算任务分配到边缘设备上实现实时处理。

### (6) 三维定位扩展：

在三维场景中扩展该方法，利用基站的高度信息进行三维几何定位，同时考虑三维环境中的复杂多路径效应和遮挡问题。这对于无人机、智能车辆和室内定位等应用尤为重要。

## 6. 论文阅读心得

### 6.1 心得体会

《Device-Free Sensing in OFDM Cellular Network》提出了一种在 OFDM 蜂窝网络中实现无设备感知（Device-Free Sensing）的新型两阶段感知框架。该框架旨在通过利用目标反射的通信信号来定位无法主动传输或接收信号的被动目标，这对于智能交通系统、未来 6G 网络中的集成感知通信系统（ISAC）等领域具有重要意义。

论文的主要贡献在于提出了一种模型无关的两阶段感知框架，这一框架不仅提高了定位的精度和鲁棒性，还避免了对复杂信道模型的依赖。通过理论分析和数值实验，论文展示了所提方法在不同系统带宽下的高精度定位能力，以及对幽灵目标的有效抑制。这些特点使得该研究在实际应用中具有很高的价值，尤其是在需要高精度定位而目标无法主动配合的场景中。

通过阅读这篇论文，我深刻体会到在无线通信领域中，如何运用创新技术应对实际问题。尤其是在面对复杂多变的无线环境时，设计出既鲁棒又高效的算法成为未来研究的重要方向。此外，论文对幽灵目标问题的系统性分析和解决方案，为我处理类似问题提供了新的思路。

## 6.2 阅读难点

在阅读这篇论文的过程中，我不仅需要理解技术细节，还要深入思考论文提出的创新点及其潜在应用。

以下是我在阅读过程中遇到的一些主要难点：

### (1) 理解多径效应：

多径效应是指在无线通信中，信号从发射源到接收器之间可能经过**多个路径**传播的现象。这种效应通常发生在城市环境、室内环境或其他有**障碍物**的环境中。当无线电波遇到建筑物、树木、山丘等障碍物时，它们会被**反射、折射或散射**，从而产生多个信号路径。这些信号路径到达接收器的时间、相位和强度可能各不相同，导致接收到的信号出现叠加、抵消或干扰，从而影响信号的质量和通信的性能。

### (2) 数据关联问题：

论文中的数据关联问题主要是如何将基站接收到的信号准确地与对应目标**匹配**。该问题在无设备感知场景中尤为复杂，因为所有目标的反射信号往往是相同的。因此，作者设计了一个基于**最大似然估计**的算法来解决这一问题，思路十分复杂，难以理解。

### (3) 理解幽灵目标：

幽灵目标是由于**信号处理错误**而**错误识别**出的目标。理解论文中提出的理论分析和算法如何识别并抑制幽灵目标的出现是一个难点，这涉及到对算法性能和系统鲁棒性的深入理解。

### (4) 系统模型和数学公式：

论文中的系统模型和众多数学公式需要仔细分析和理解。对于我这样没有数学专业背景的读者而言，理解这些复杂的数学模型和公式往往需要投入额外的时间和精力。

### (5) 理解算法原理：

在论文提出的无设备感知框架的第二阶段，作者提出了两种算法。一种是用于检验幽灵目标是否存在的算法，另一种是基于最大似然估计的算法。这些算法的原理涉及数学公式、计算机思维和算法设计等多个方面的知识，使得理解过程相对困难。



## 7. 附录

本篇论文的整体思维框架如下：

