



南京大學

NANJING UNIVERSITY

定位技术

殷亚凤

智能软件与工程学院

苏州校区南雍楼东区225

yafeng@nju.edu.cn , <https://yafengnju.github.io/>



为什么需要定位

基于位置的服务

地图与导航

百度地图

搜索周边服务信息

大众点评

基于位置的社交网络

微信

位置信息与我们的生活息息相关





位置信息

位置信息不是单纯的“位置”

所在的地理位置
(空间坐标)

因地制宜

提供所在地附近的
服务

处在该位置的时间
(时间坐标)

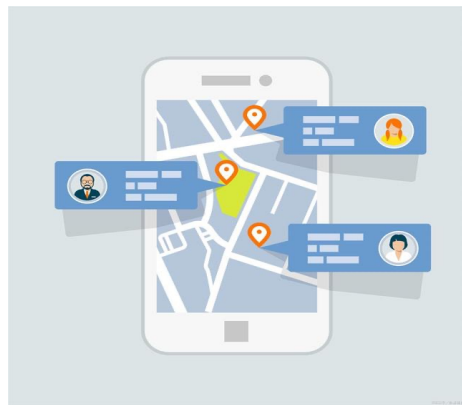
见机行事

提供时效性更佳的
服务

处在该位置的对象
(身份信息)

因人而异

提供个性化的定制
服务





定位技术

- **定位方法**
- 可定位性
- 室外定位系统
- 室内定位系统
- 物联网定位技术的挑战和前景





定位方法

定位的关键

有一个或多个已知坐标的参考点

测量待定物体与已知参考点的空间关系

两个步骤

测量物理量

→ 根据物理量确定目标位置

常见定位方法

基于距离（时间）的定位

(Time of Arrival, ToA)

基于距离（时间）差的定位

(Time Difference of Arrival, TDoA)

基于信号特征的定位

(Received Signal Strength, RSS)

基于到达角的定位

(angle of arrival , AoA)





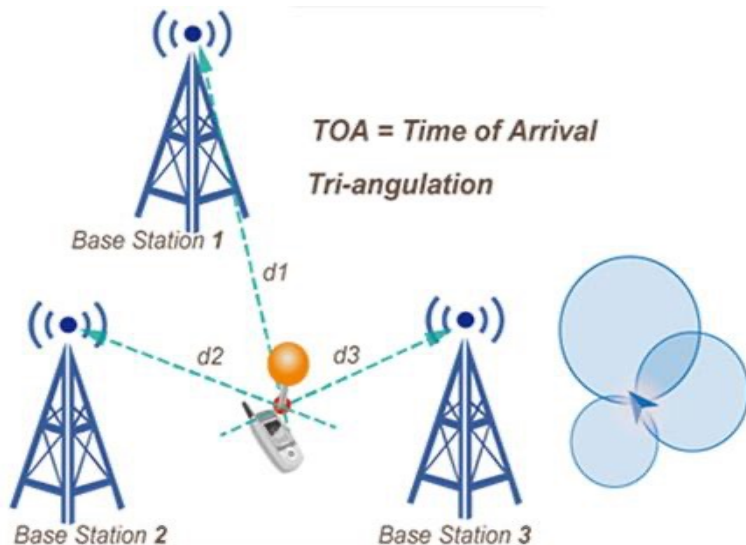
基于距离的定位 (ToA)

距离测量方法

- 距离 $d = \text{波速}v * \text{传播时间}\Delta t$
- 传播时间 $\Delta t = \text{收到时刻}t - \text{发出时刻}t_0$

问题

- 接收端如何得知 t_0 ?





基于距离的定位 (ToA)

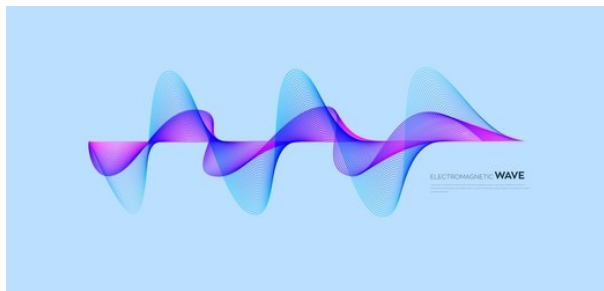
方法1：利用波速差

发送端同时发送一道电磁波和声波接收端记录

- 电磁波到达时刻 t_r
- 声波到达时刻 t_s

$$\text{距离 } d = \frac{v_r v_s (t_s - t_r)}{v_r - v_s}$$

由于 v_r 远大于 v_s , 上式可简化为 $d = v_s (t_s - t_r)$





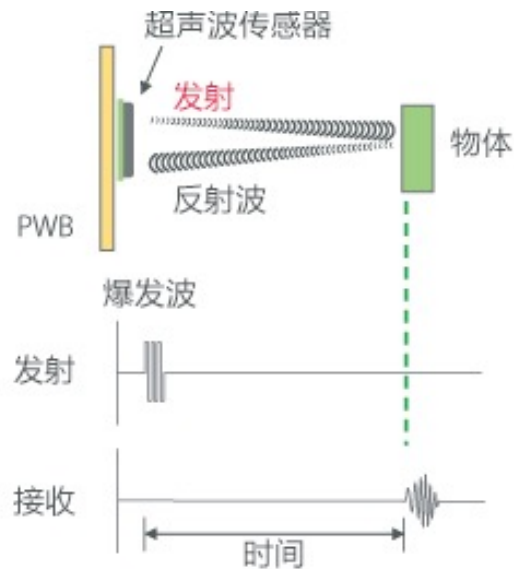
基于距离的定位 (ToA)

方法2：测量波的往返时间

- 发送端于时刻 t_0 发送波
- 接收端收到波后，等待时间 Δt 后返回同样的波
- 发送端记录收到回复的时间 t

距
离

$$d = \frac{v(t - t_0 - \Delta t)}{2}$$

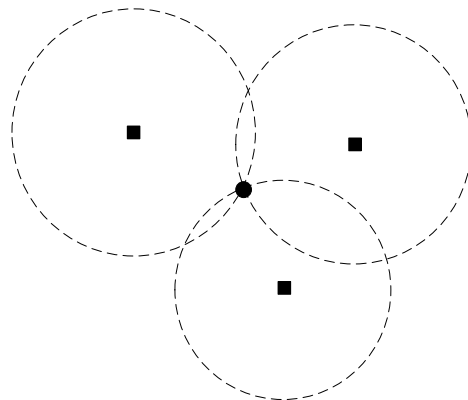
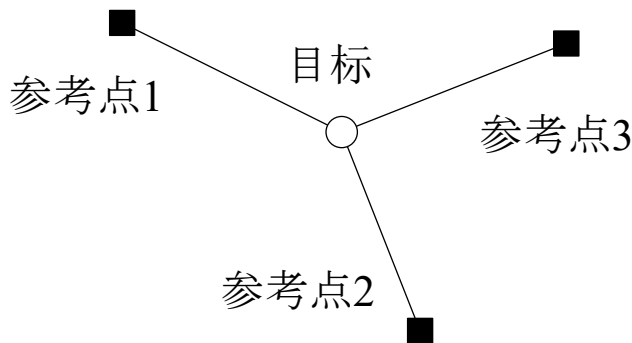




基于距离的定位 (ToA)

位置计算方法：多边测量 (也称多点测量)

- 平面上定位，取三个参考点
- 以每个参考点为圆心，到该参考点的距离为半径画圆，目标必在圆上
- 平面上三个圆交于一点
- 实际中取用超过三个参考点，用最小二乘法减少误差





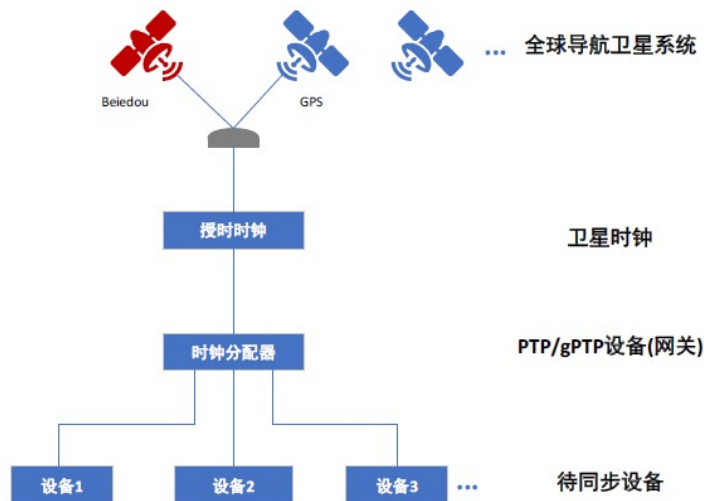
基于距离差的定位 (TDoA)

ToA的局限

需要参考点和测量目标时钟同步

TDoA

- 不需要参考点和测量目标时钟同步
- 参考点之间仍然需要时钟同步



时钟同步原理图



基于距离差的定位 (TDoA)

距离差测距方法

测量目标广播信号

参考点 i, j 分别记录信号接收到的时刻 t_i, t_j

测量目标到 i, j 的距离差 $\Delta d_{ij} = v(t_i - t_j)$

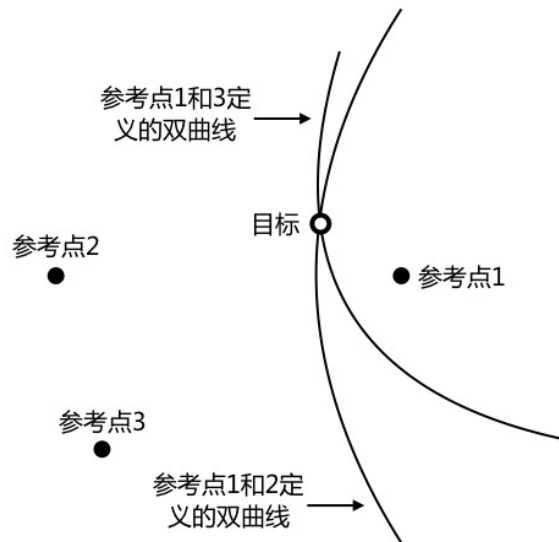
位置计算方法

至少两组数据联立方程求解

实际采用多组数据最小二乘法求解

每次测量结果

- 参考点坐标 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$
- 到参考点的距离 Δd_{ij}
- 构建方程：
$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} = \Delta d_{ij}$$





基于信号强度测距的定位

ToA和TDoA都需要接收端特殊装置

基于信号强度测距的定位直接利用无线通信的射频信号定位，
不需要额外设备

原理：信号强度随传播距离衰减

$$P_r(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_t G_t G_r$$

问题：理想公式实际难以应用



基于信号特征的定位

解决方法

- 将信号强度特征看做“指纹”
- 预先布置N个参考节点
- 测出信号强度，得到N维向量
- 事先测出每个位置的特征向量“指纹”
- 将目标测出的特征向量和数据库比对
- 找出最相似指纹对应的位置

缺点

不能应对动态变化



WiFi信号强度



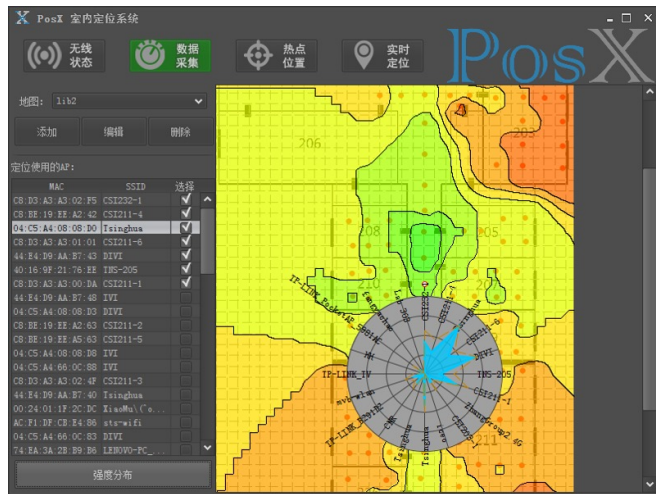


基于信号特征的定位

右图以雷达图的形式呈现了空间中某个位置上的RSS特征向量

在这个位置上可以扫描到一系列Wi-Fi AP，强弱不一

定位时根据当前位置的无线信号指纹，在数据库中寻找最相似的





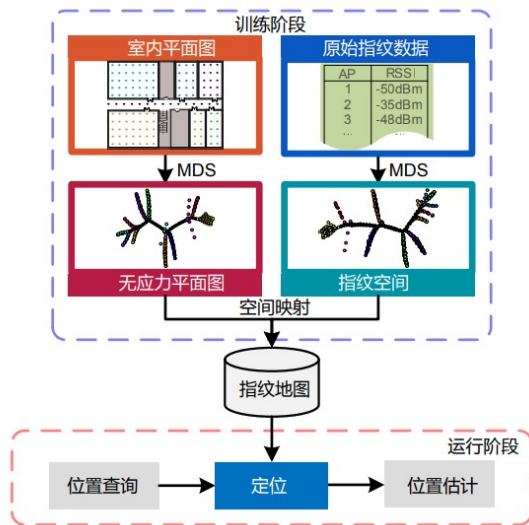
基于信号特征的定位

LANDMARC：基于信号特征的动态定位方法

- 布置RFID标签作为参考标志
- 记录RSS信号强度特征向量
- 比对特征向量进行确定位置

LiFS：基于群智感知的非现场勘测定位

- 关联RSS数据形成高维指纹空间
- 楼层平面图变换为无应力平面图
- 进行空间映射和指纹匹配
- 无需用户主动参与



LiFS系统结构图



基于到达角的定位 (AoA)

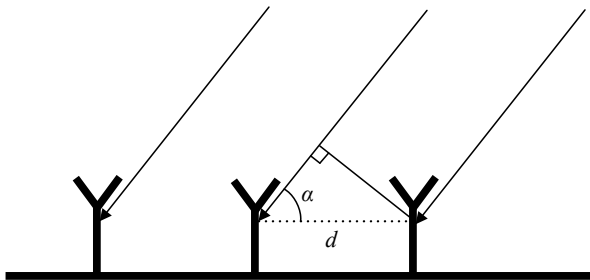
通过接收信号计算出信号到达的角度，基于多个接收者的多个到达角度计算出目标的位置

在一个天线阵列上排布了多个规则放置的天线

基于在不同天线上收到的信号，能够实际测量出 Δt

计算出到达角 α ，即目标到达天线的角度 $\Delta t = \frac{d \cos \alpha}{c}$

在有多个天线阵列时，多个角度的交点就是目标的位置





定位技术

- 定位方法
- **可定位性**
- 室外定位系统
- 室内定位系统
- 物联网定位技术的挑战和前景



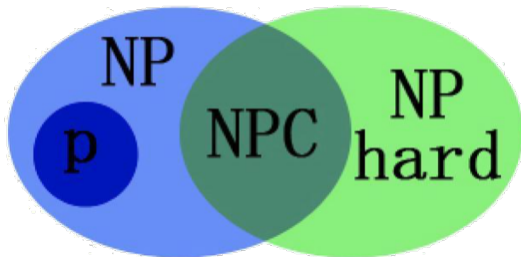


可定位性问题

网络可定位即网络中所有节点可定位

如何判断某个节点是否可以被定位?

当一个网络中仅有少量已知位置的信标点，推算其他节点的位置是 NP-hard



可定位性问题也是网络管理和操作的重要基础

- 网络拓扑结构管理、网络节点部署、移动迁移管理、电源事务调度和路由转发机制都与可定位性紧密相关

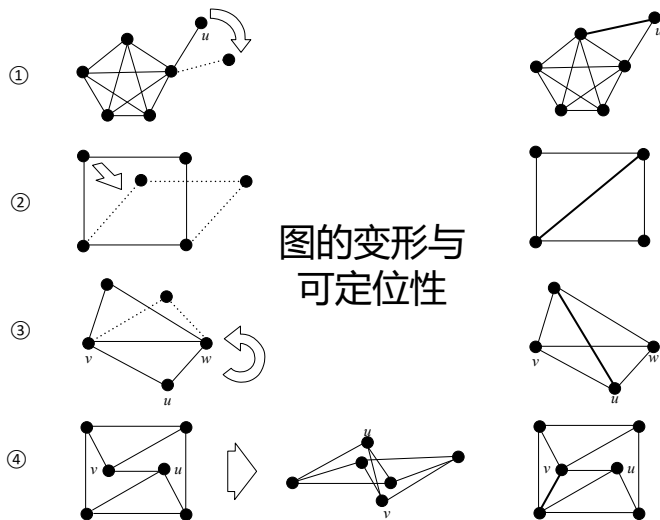
可定位性问题是定位的重要基础



网络可定位性

判断一个网络是不是可定位就是判断对应的图 G 是不是存在满足距离约束和 l 的唯一实现

一个网络可以被唯一定位的充要条件是：该网络所对应的距离图是全局刚性的，且该网络至少包含三个已知位置的节点





节点可定位性

节点可定位性问题具有更大的适用范围和可操作性

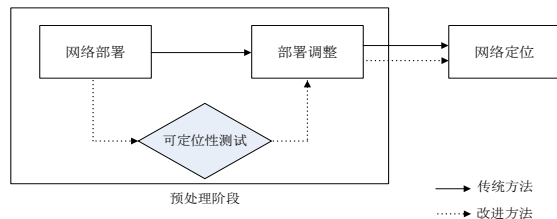
给定网络配置，如何判断某个节点是否可定位？

网络中有多少节点是可定位的？如何找出这些节点？

必要条件：如果一个节点是可定位的，那么它至少能够通过三条不相交的路径与三个已知位置节点相连接

充分条件：找到网络距离图的全局刚性子图并引入隐藏边

用节点可定位性改进过的方法分为两个阶段：数据预处理阶段和定位计算阶段



可定位性测试
协助网络部署





定位技术

- 定位方法
- 可定位性
- **室外定位系统**
- 室内定位系统
- 物联网定位技术的挑战和前景





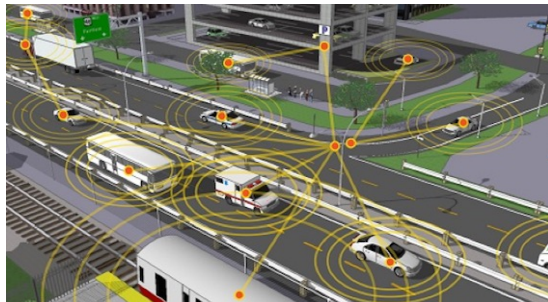
现存主流定位系统

室外定位系统

卫星定位

- GPS
- 北斗卫星导航系统

蜂窝基站定位



室内定位系统

RFID 定位

声音信号定位

可见光信号定位





卫星定位

各国的卫星定位系统

- 美国：GPS (global positioning system)
- 俄罗斯：GLONASS
- 欧盟：伽利略 (Galileo satellite navigation system)
- 中国：北斗 (BeiDou navigation satellite system , BDS)

GPS是目前世界上最常用的卫星定位系统





起源与发展

美国国防部开始GPS计划

1973

1983

里根承诺将来对民间开放使用

1989

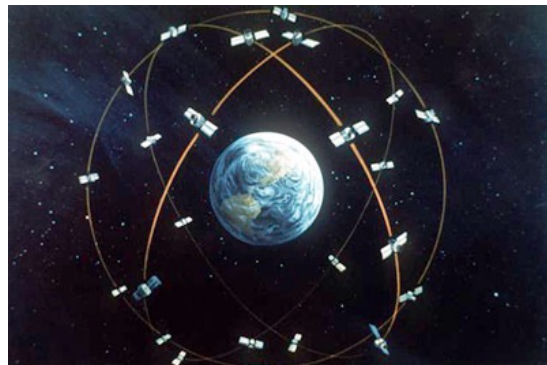
正式开始发射GPS工作卫星

1994

卫星组网完成，投入使用

2000

克林顿下令取消军用/民用定位精度的差别





GPS：系统结构

宇宙空间部分

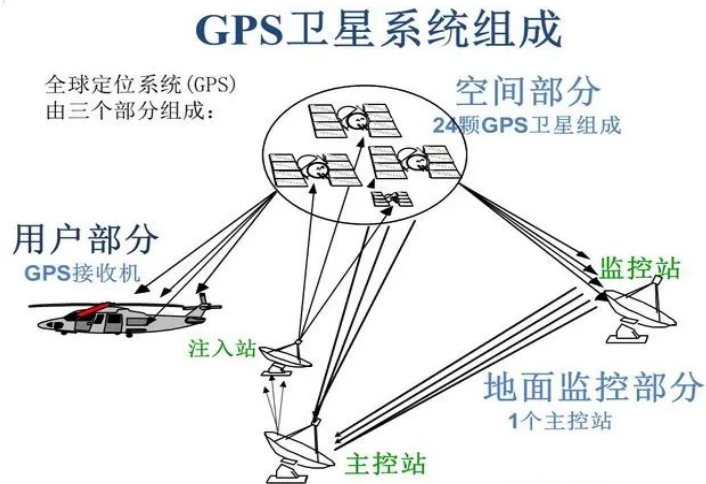
- 24颗工作卫星

地面监控部分（全部在美国境内）

- 1个主控中心（另有1个备用）
- 4个专用地面天线
- 6个专用监视站

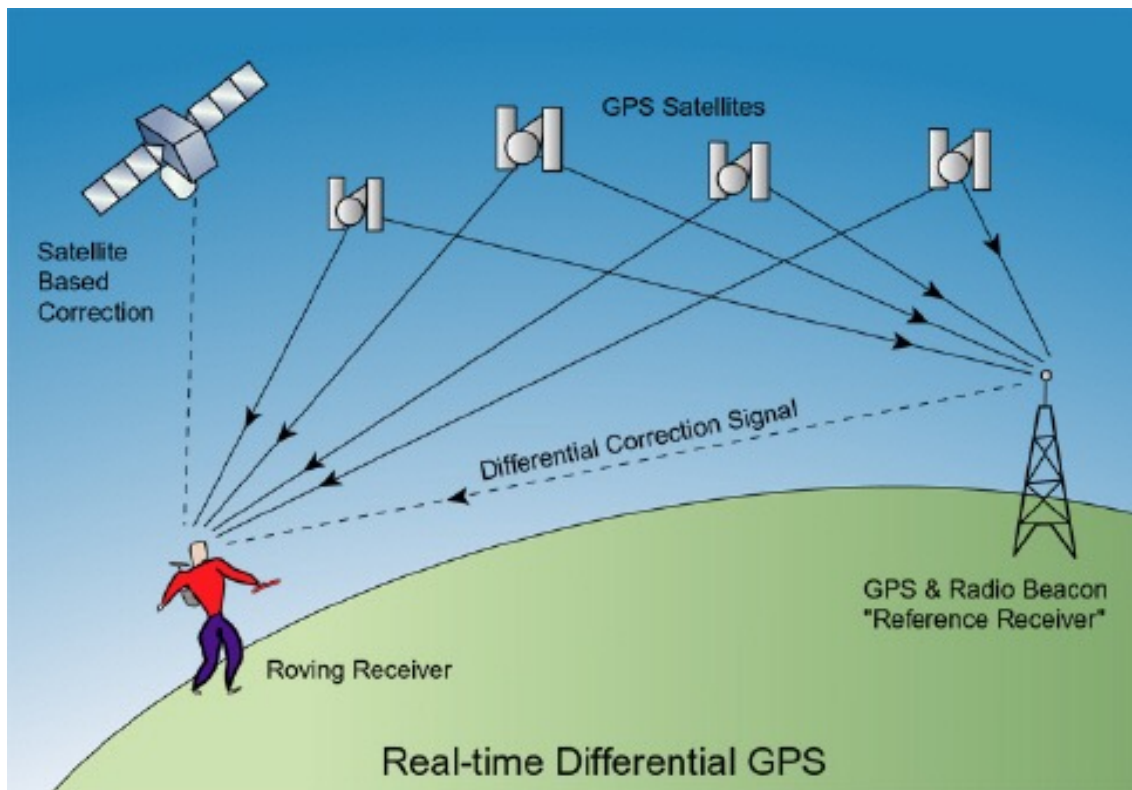
用户设备部分

- GPS接收机（一个和卫星通信的专用天线、用于位置计算的处理器以及一个高精度的时钟）





GPS : 定位原理





GPS：主要优缺点

优点

- 精度高
- 全球覆盖，可用于险恶环境

缺点

- 启动时间长
(初次定位需搜索几分钟)
- 室内信号差
(电磁遮蔽的效应)
- 需要GPS接收机





A-GPS (Assisted GPS)

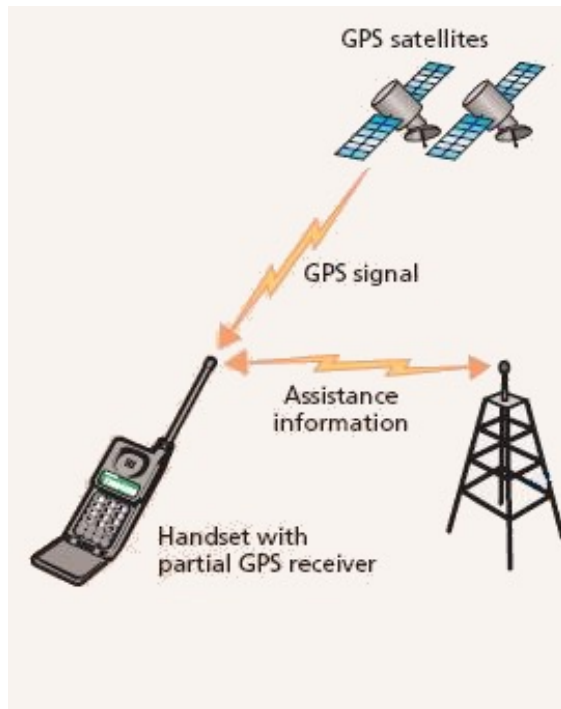
GPS定位和蜂窝基站定位的结合体

利用基站定位确定大致范围

连接网络查询当前位置可见卫星

大大缩短搜索卫星的时间（几秒）

当前手机基本都采用A-GPS





GPS典型应用：汽车导航

最初仅提供位置和周边地图

第二代汽车导航系统可根据目的地自动计算“最短”路线

互联网时代，汽车导航可从交管部门取得路况咨询，优化路线，找出“最快”路线

物联网时代，感知更透彻

- 综合道路状况等各种因素找出最佳路线
- 由“以路为本”转变到“以人为本”





北斗卫星导航系统

空间部分： 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星

地面部分： 主控站、注入站和监测站等 40 多个地面站

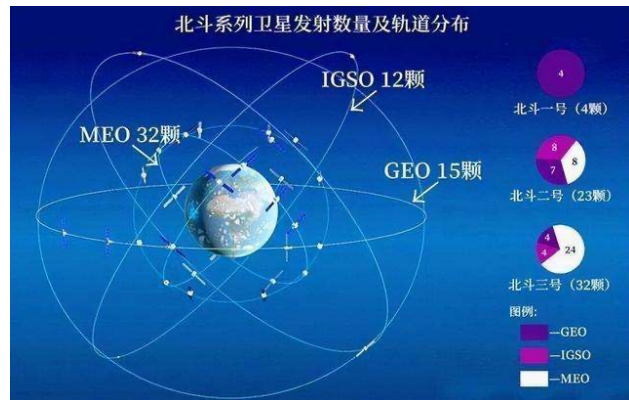
用户部分： 成千上万的北斗用户及其他兼容的终端

北斗比GPS 多出 11 颗卫星

北斗 1 号： 双星有源定位试验系统

北斗 2 号： 亚太区域无源导航系统

北斗 3 号： 覆盖全球的无源卫星导航系统





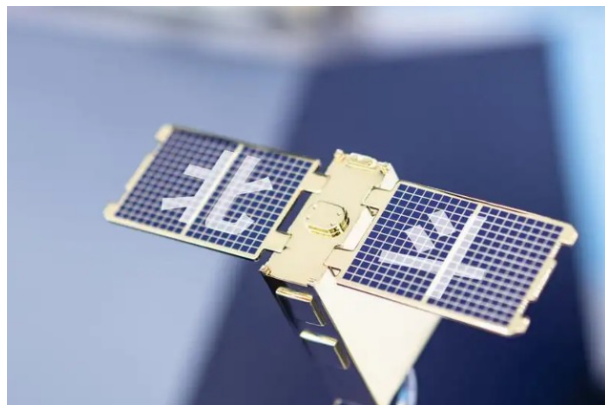
独门绝技

星间链路技术：将卫星与卫星、卫星与地面站均有
机联系起来，极大提升了安全性和定位精度

提供有源和无源两种定位服务：而 GPS 只提供
无源。有源定位能实现地面快速定位，容易指挥调度

短报文功能：卫星定位终端和卫星或北斗地面服务站
之间能够通过卫星进行双向信息传输，GPS 只能单向

已有 120 多个国家和地区使用





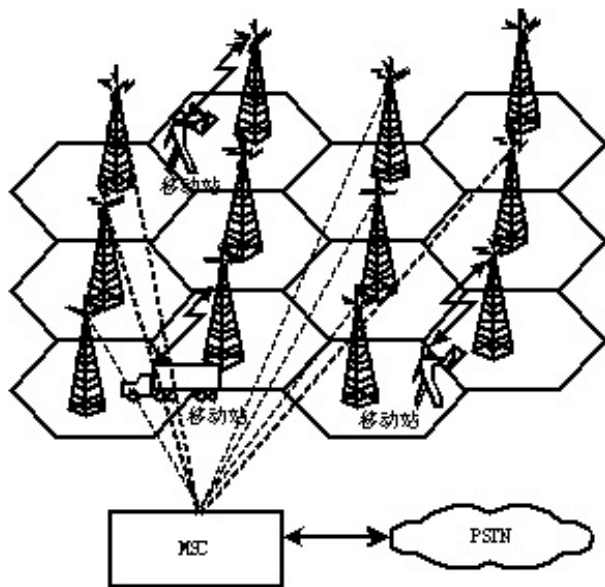
蜂窝基站定位

GSM蜂窝网络

- 通讯区域被分割成蜂窝小区
- 每个小区对应一个通讯基站
- 通讯设备连接小区对应基站进行通讯

利用**基站位置已知**的条件

- 对通讯设备进行定位

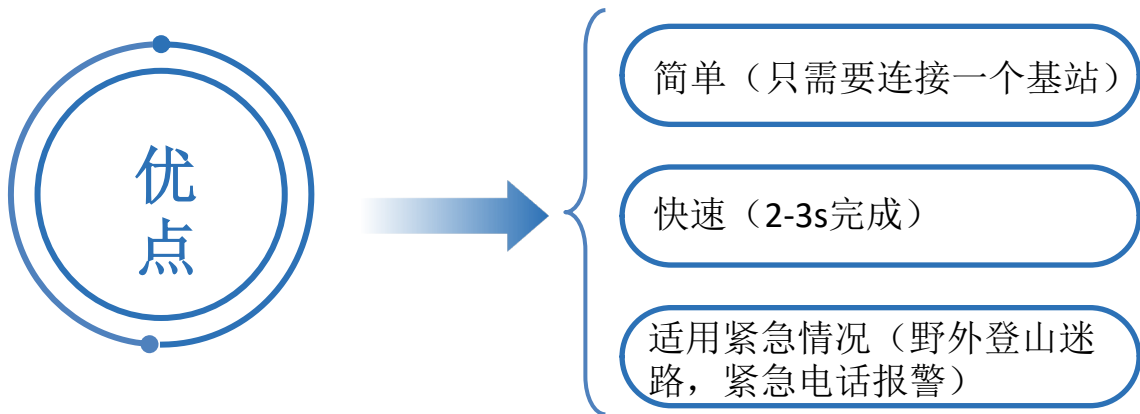




单基站定位法

COO定位 (Cell of Origin)

- 将移动设备所属基站的位置视为移动设备的位置
- 精度直接取决于基站覆盖的范围
- 基站分布疏松地区，一个基站覆盖范围半径可达数公里，误差巨大





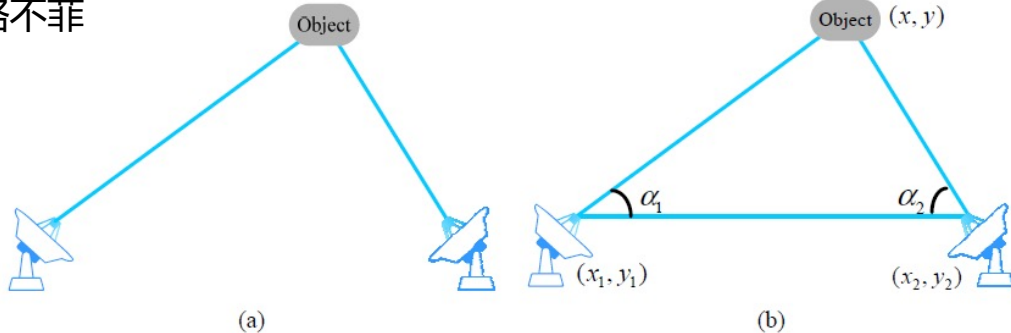
多基站定位法

ToA/TDoA定位法

- 测量无线信号传播时间，用信号到达不同基站的时间差来建立方程组求解位置，通过时间差抵消时钟不同步带来的误差
- 需要三个基站才能定位，稀疏地区可能只能收到两个基站的信号，不适用

AoA定位法

- 测量无线信号传播方向
- 需要两个基站即可
- 天线阵列价格不菲





蜂窝基站定位：主要优缺点

优点

- 不需要GPS接收机，可通讯即可定位
- 启动速度快
- 信号穿透能力强，室内亦可接收到

缺点

- 定位精度相对较低
- 基站需要有专门硬件，造价昂贵





典型应用：紧急电话定位

美国E-911系统

- 拨打报警电话时，根据基站定位出手机位置，自动接到最近警局
- 综合了各种定位技术，包括ToA，TDoA，AoA，RSS，A-GPS
- 使用时尝试各种定位方法，择优而用





定位技术

- 定位方法
- 可定位性
- 室外定位系统
- **室内定位系统**
- 物联网定位技术的挑战和前景





室内定位系统

GPS、北斗以及蜂窝定位等系统在空旷的室外场景下定位表现非常好

由于建筑物的遮挡，这些定位系统在室内无法获得足够的信号强度，因而无法提供精准的室内定位服务

用于室内的物联网定位典型技术

- RFID定位
- 声音信号定位
- 可见光信号定位





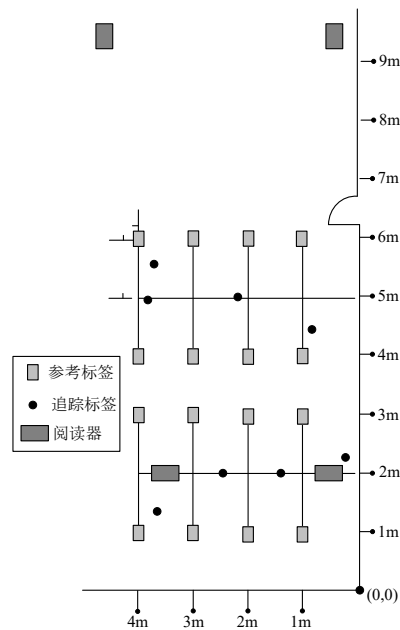
RFID 定位 : RSS

定位背景 :

- RFID通过标签反射的无线电信号实现对识别读写
- 无须建立机械或者光学接触
- 越来越多的物体上部署

定位原理

- 接收信号强度 RSS 随着距离的增加而衰减
- LANDMARC最早的非测距无线定位系统
- 网络信号强度分布与环境高度相关
- 提出在线定位模式，误差在1m左右



LANDMARC
场景示意图



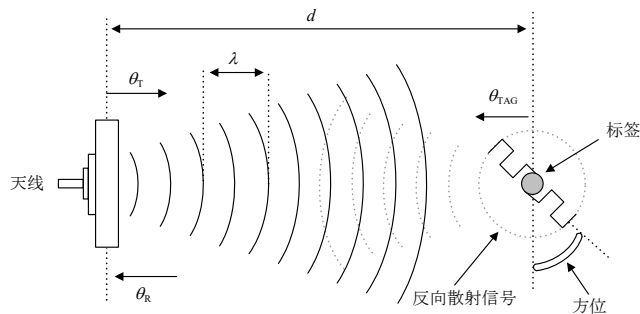


RFID 定位：相位

信号从阅读器发送，经过标签反射，又被阅读器接收

相位值与信号传播的距离 d 有关，
信号每传播一个波长 λ 的距离，
相位变化 2π

最终相位值受到阅读器信号发射器、
接收器电路的物理特性与标签自身的
反射特性的影响



$$\theta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \times 2d + \theta_r + \theta_r + \theta_{TAG} \right) \bmod 2\pi$$

相位多样性

基于相位的定位模型



RFID 差分增强全息图

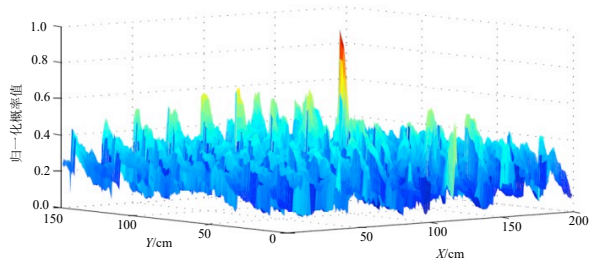
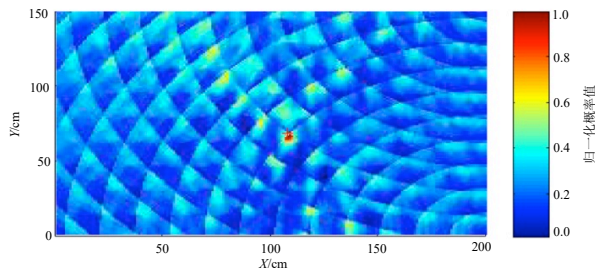
差分增强全息图 (DAH) 精度达到毫米级，
精度最高

细粒度划分环境空间

采集目标标签的相位值

构造空间全息图

寻找概率最大的位置

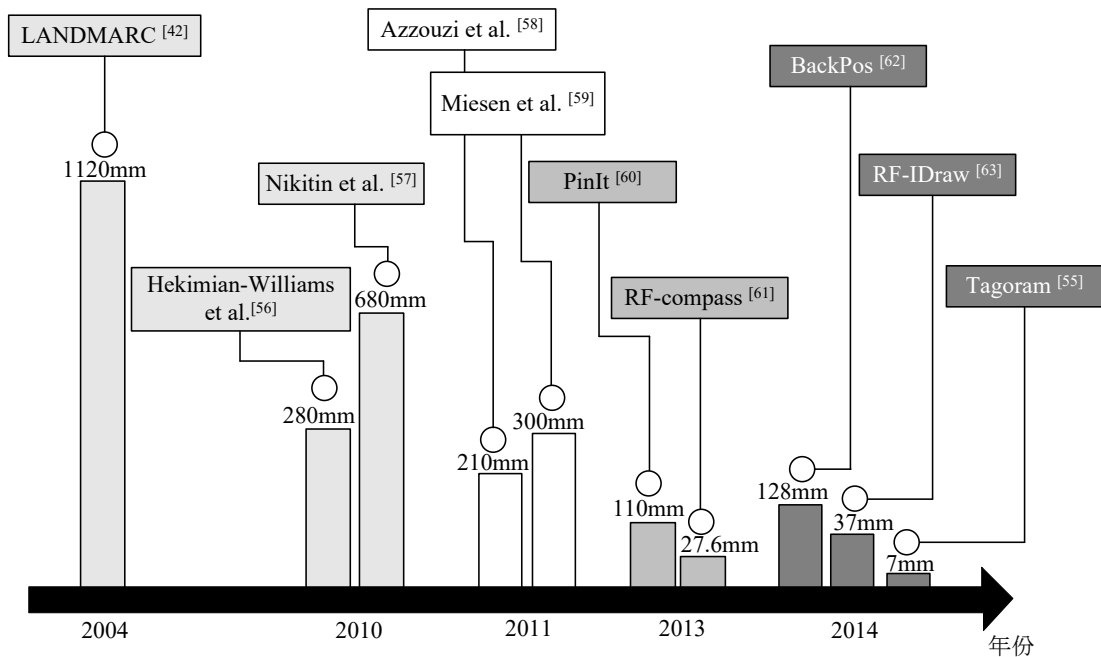


差分增强全息图





RFID 差分增强全息图



RFID 定位精度演进



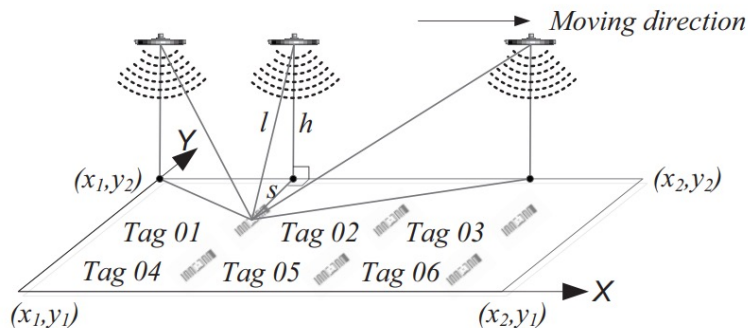
发展趋势：高灵敏度、非入侵、多模态

从绝对定位到相对定位

- 在一些应用中如图书馆书籍排序管理、仓库货物管理等，人们更关注一组标签之间的相对顺序，而无须知道它们的绝对位置

STPP提出一种基于相位值的标签排序算法

- 标签的相位值会随着距离变化先增大后减小
- 通过相位曲线峰值出现的先后顺序推断相对位置关系
- 可以在图书馆中实现智能图书排序



STPP算法示意图



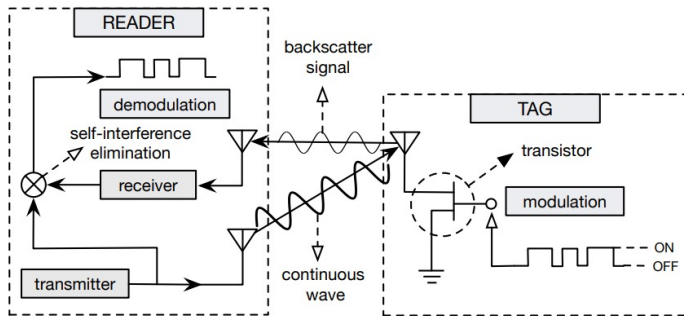
发展趋势：高灵敏度、非入侵、多模态

从设备绑定到非绑定

- 为了提升便利性和用户友好性，利用环境中原本的无线信号实现非接触式、被动式的感知

Tadar将定位范围延伸到隔墙定位移动物体

- 在墙外部署一组标签形成天线阵列
- 分离和提取物体运动造成的信道变化
- 结合隐马尔可夫模型实现轨迹追踪
- 在隔墙条件下实现精确追踪



Tadar算法示意图



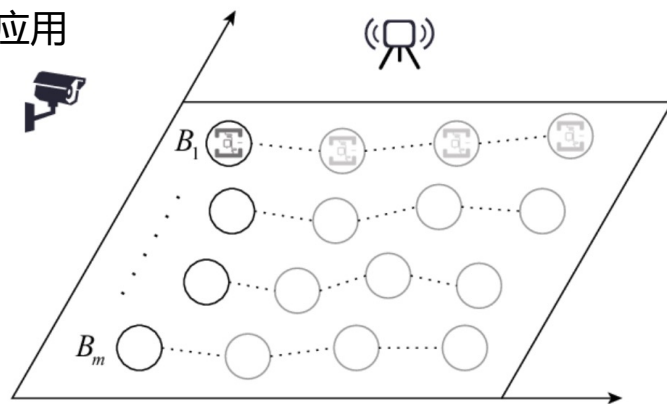
发展趋势：高灵敏度、非入侵、多模态

从单模态到交叉融合

- 将RFID与移动机器人、无人机、计算机视觉、SLAM等融合
- 不同模态数据优势互补，提取更加丰富的特征
- 提升定位精度和鲁棒性，拓展更多的智能化、自动化应用

TagVision将计算机视觉技术结合到RFID系统上

- RFID采集相位，视觉进行细粒度检测和追踪
- 融合数据计算匹配度来衡量其携带目标标签的可能性
- 硬件开销小，追踪精度高



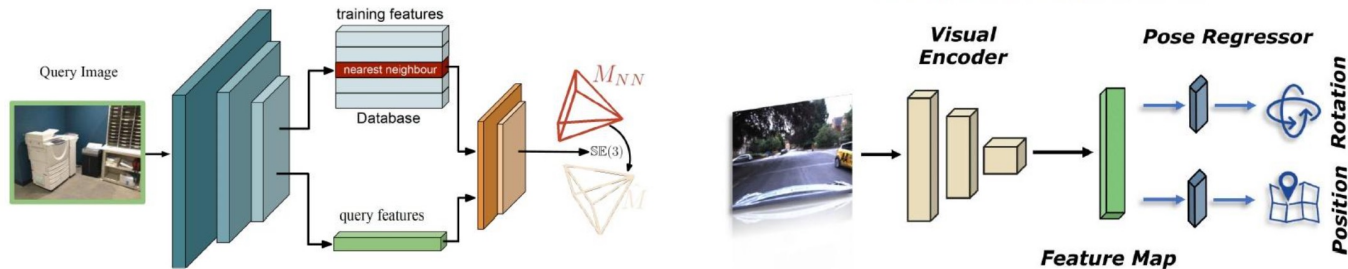
TagVision算法模型图



发展趋势：高灵敏度、非入侵、多模态

从基础模型到高级算法

- 早期主要使用基础的感知模型
- 后来机器学习方法提高性能
- 近年来，以卷积神经网络为代表的深度学习技术弥补传统方法的弊端，提高了定位系统的精度和鲁棒性
- 但需要大量被标记的数据并具有不可解释性等



深度学习定位模型示意图



发展趋势：高灵敏度、非入侵、多模态

从商用设备到专用设备

- RFID商用设备在带宽、稳定性，精度和鲁棒性方面存在问题
- 通用软件无线电外设（universal software radio peripheral，USRP）等专用设备可以获得更高分辨率的信息，从而提取更稳定的无线信号特征，实现更加普适性的高精度定位
- 专用设备的研究也有利于RFID通信协议的改进与开发，从根本上提升RFID系统的性能，但部署与开发成本高，难以普及



RFID



USRP



声音信号定位

智能设备普遍配有扬声器和麦克风，可以发送和接收声波信号

声音信号的传播速度远远低于电磁波信号，估算信号飞行时间（time of flight, ToF）更准确

声音信号的采样频率也更低。一般手机为48kHz，处理开销更小，时延更低，更适合算力有限的物联网设备





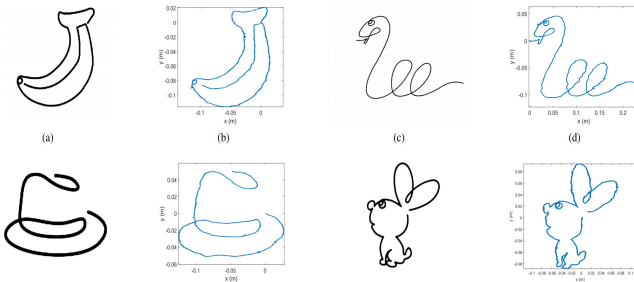
声音定位类型

基于设备的定位 (device-based)

- 定位目标本身发出声音或者接收声音
- 对发声设备或声音接收设备的空间位置进行估计

与设备无关的定位 (device-free)

- 定位目标本身不发出或者接收声音
- 借助人或物体对声音信号的反射估计反射物的位置
- 反射物如手掌，手指，心脏等



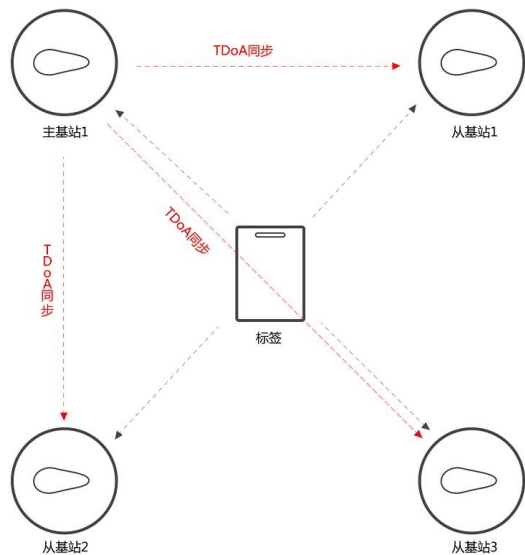
基于声音相位的目标追踪技术



声音定位技术 (TDoA)

基于到达时间差 (TDoA)

- 需要用到 4 个声源
- 定位误差控制在几十厘米范围内
- 通过计算 TDoA 解决发送端和接收端时钟不同步问题



TDoA算法示意图

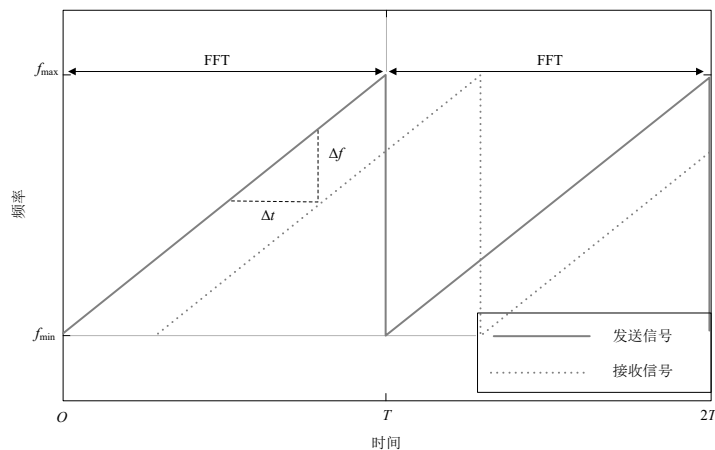




声音定位技术 (FMCW)

基于调频连续波 (FMCW)

- 可以将对 ToF 的测量转换为对信号频率差异的测量
- 通过持续测量声音设备到多个已知位置设备的距离变化量，可以实现对声音设备位置的追踪
- 当设置多个 FMCW 发送和接收设备时，即可实现对反射物体的定位，即与设备无关的定位



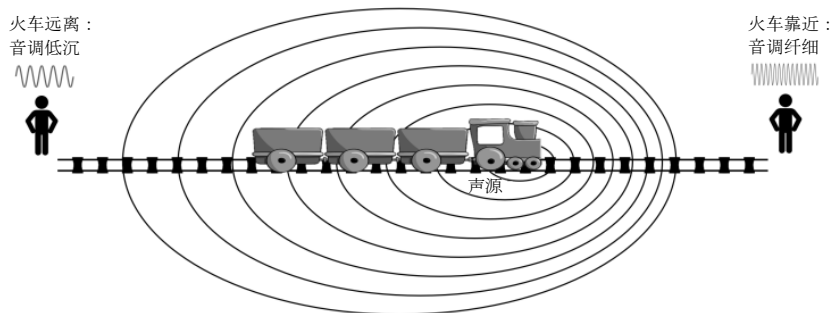
FMCW 信号图



声音定位技术（多普勒）

基于多普勒效应

- 当波源与观察者存在相对运动时，观察者接收到的波的频率与波源发出的频率不同，且跟相对速度有关
- 利用短时傅里叶变换，分别对原始发送的信号和接收信号进行频谱分析，即可计算出频率的变化
- A.A.Mouse在位置固定的设备上播放声音信号，通过移动设备接收声音并测量频率变化情况，实现运动轨迹的追踪



多普勒效应
远离声源频率减小
靠近声源频率增加

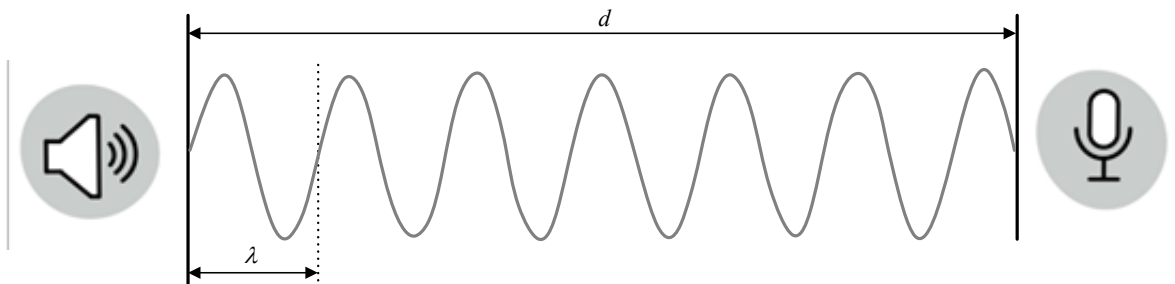




声音定位技术（相位偏移）

基于相位偏移

- 声音信号的相位特征也与传播路径长度密切相关
- 接收端收到的信号与声源处的发送信号之间相位差为 $\text{Phase} = 2\pi \frac{d}{\lambda}$
- 通过持续测量信号相位，计算相邻两次测量之间的相位变化，可以计算出相邻两次测量时接收端与声源之间距离的变化量
- Vernier结合游标卡尺的原理，计算得到精准的相位变化信息，在移动设备上实现了毫米级别的实时设备追踪



接收信号与声源信号间存在相位差





声音定位优缺点

优点

- 只需要扬声器和麦克风等简单硬件
- 对设备计算能力要求不高

缺点

- 声音信号在空气中的衰减严重
- 覆盖范围非常有限（如 2 ~ 3m）
- 与设备无关的定位方法基于反射信号，强度衰减更大，其有效工作范围更小。





可见光信号定位

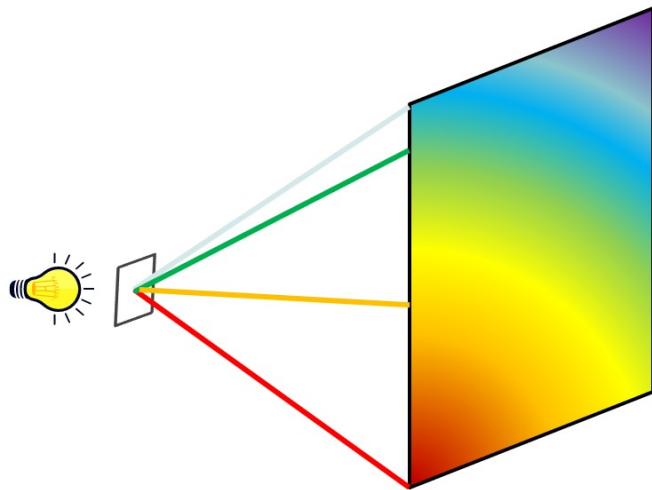
物联网设备可以对可见光进行控制，
如控制 LED

使可见光信号特征与空间位置信息
产生对应关系

光强传感器、光电二极管或相机等
采集特征

分析光信号中携带的信息来推断接
收端位置或朝向

从而实现定位、追踪和姿态感知



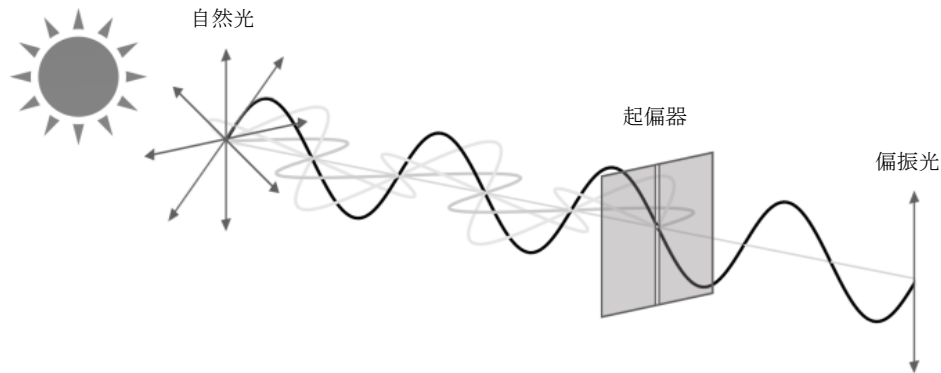


光的偏振

1801 年托马斯·杨进行了著名的杨氏双缝实验

光的偏振 (polarization) 是光的横波重要性质

自然光在通过作为起偏器的偏振片后，只剩下了特定振动方向的光线。穿过起偏器的光的震动只沿着单独的一个方向，这种光被称为“偏振光”



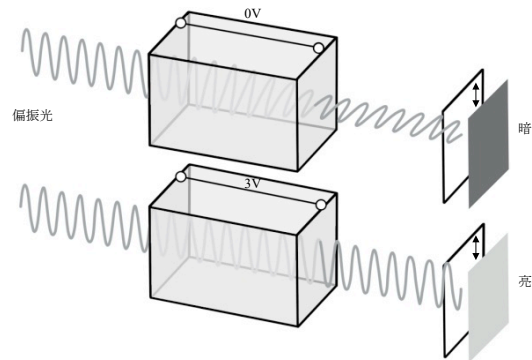


液晶显示器与偏振方向

液晶显示器 (liquid crystal display , LCD) 是常见的用于改变光线偏振方向的器件

改变电压就可以控制发射光线的偏振方向

在接收端的光强传感器前加上一层偏振片，根据穿过偏振片的光线强度来判断偏振方向



LCD 对偏振光的扭转效果
及使用偏振片检测光线偏振方向



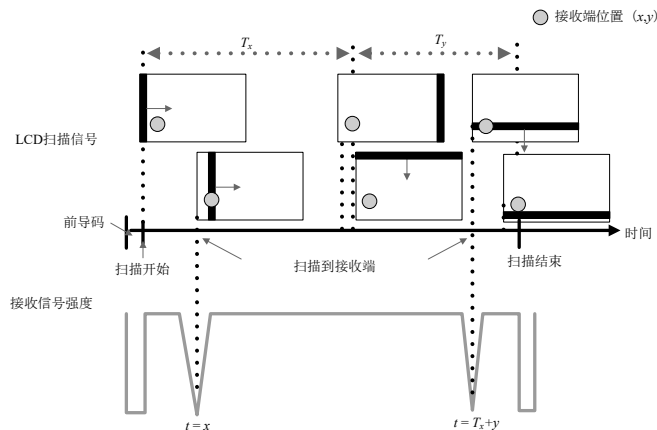
CELLI偏振光扫描定位原理

CELLI先水平条带扫描，再竖直扫描

控制条带上的偏振光与接收端透振方向垂直

当条带扫描经过接收端时会检测到光线强度降低

接收端根据两次条带扫过的时间来计算自身所在的位置

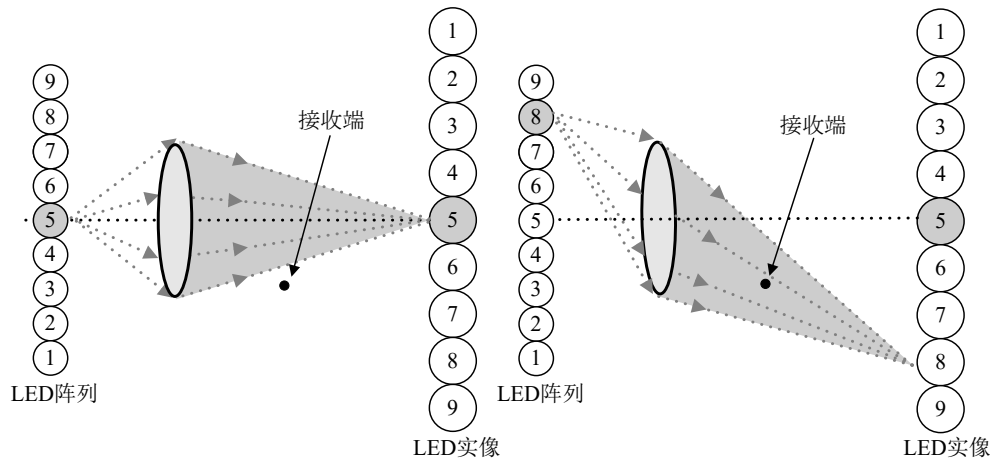


CELLI 使用偏振光扫描定位的原理



可见光空间特征定位

SmartLight 通过使用一个闪烁的 LED 阵列和一个凸透镜向空间中投射带有闪烁频率信息的可见光信号，实现利用可见光空间特征对接收端的定位



SmartLight 定位原理示意图

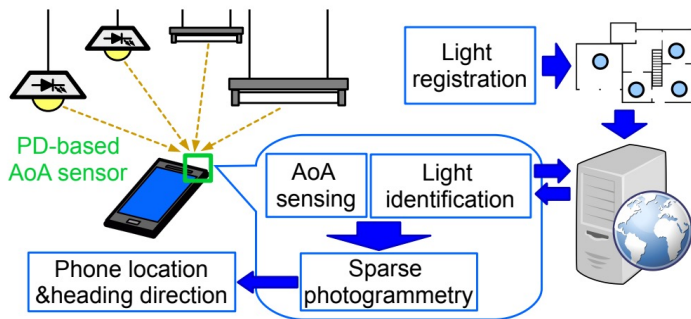


可见光空间特征定位

Pulsar 借助 LED 灯和荧光灯等光源自身固有的闪烁频率特征来识别光源身份的方法

利用光电二极管接收光源信号并测量光源频率，基于频率信息识别光源身份

借助光线入射方向和光电二极管采集到的光强之间的关系，反推出光线的到达角。基于 AoA 对接收端定位



Pulsar定位系统架构图

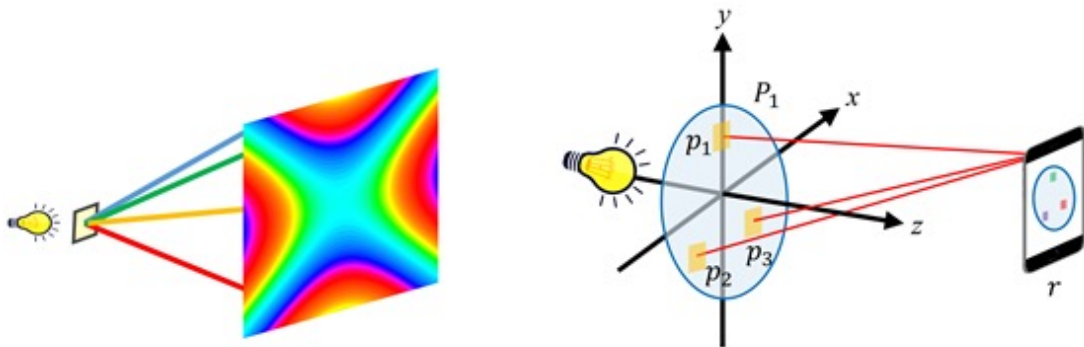


基于可见光空间分布特征

RainbowLight 实现在单个光源下对移动设备的三维定位

在单个光源前部署多个显色偏振膜片

用相机捕捉到的多个显色偏振膜片的颜色信息得到相机到各个膜片的观察角度



RainbowLight显色与方向的对应关系和系统示意图

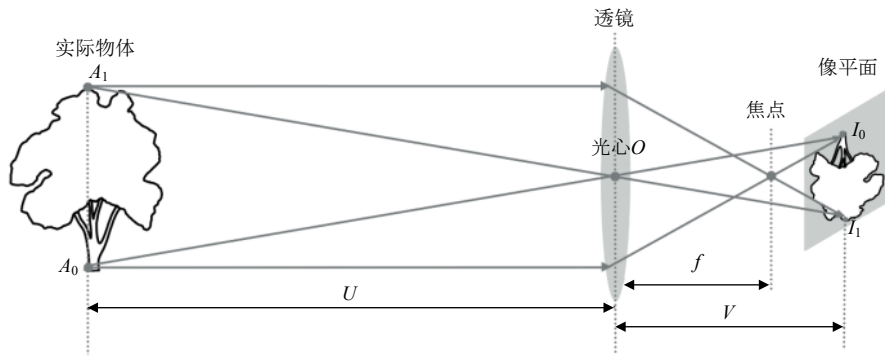


基于相机成像几何关系

光沿直线传播：物点、相机光心和像点位于同一直线上

当已知参数的相机拍摄到多个已知空间位置的物点，利用几何关系约束可以得到相机位置

借助用于 SLAM 的视觉标签，计算得到相机与标签之间的相对位置，可以反推出标签在空间中的位置



相机成像模型



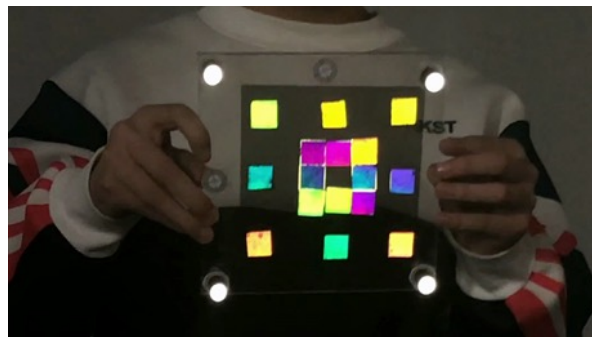


可见光定位应用示例

Luxpose和PIXEL为每个光源编码身份ID，在相机同时拍到3个以上光源时，计算出光源在照片中的像素位置，得到相机的位置和朝向

LiTell和iLAMP提出利用光源自身的闪烁频率或发光模式特征来对区分，降低改造电路的部署成本

LiTag结合显色偏振膜片、反光材料制作出不需要供电的纯被动式光学标签，结合RainbowLight中的显色偏振定位原理以及相机成像中的投影变换关系，实现无须相机参数的可见光定位系统



LiTag可见光定位偏振片效果图



可见光定位优缺点

优点

- 光源在环境中普遍存在
- 接收装置也很常见
- 不受多径和无线信号的干扰
- 天然地携带方向信息
- 低成本、易获取

缺点

- 容易被遮挡而无法工作
- 精度一般在十几厘米





定位技术

- 定位方法
- 可定位性
- 室外定位系统
- 室内定位系统
- **物联网定位技术的挑战和前景**



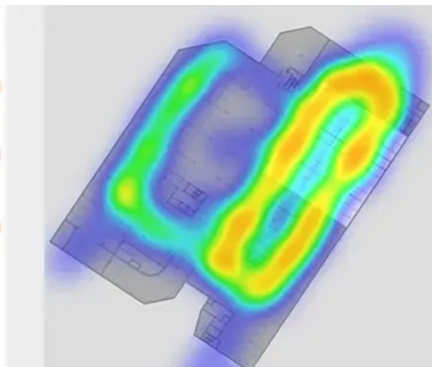


物联网定位技术的现状

随着物联网的兴起，传统的室外定位方式已无法满足物联网场景下的定位需求

基于 RFID 、 声音信号、 光信号等的新型定位方式的出现为物联网环境中的定位问题提供了新的解决思路

其他尝试如利用地磁信号的特征实现室内定位、 利用震动传感器定位走动中的人体等



地磁定效果图



物联网定位技术的挑战

应用场景要求严格

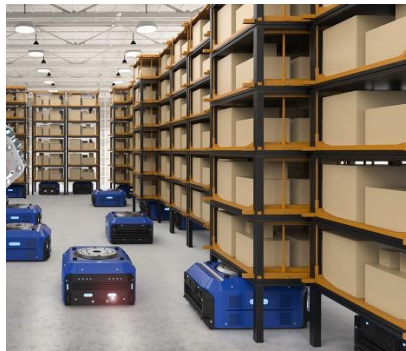
定位范围相对有限

设备与已知位置的锚点距离增加

环境多变影响效果

环境的动态性造成的多径效应

多目标场景难以处理





物联网定位技术的前景

如何提高



定位的范围实现全场
景覆盖

如何提高



定位方法的鲁棒性以
适应高度动态的环境

如何实现



高精度的大量目标定
位

“基于位置的服务”正向我们展现出广阔的市场前景



更大的挑战也意味着更大的机遇



南京大學
NANJING UNIVERSITY



提问

Q & A

殷亚凤

智能软件与工程学院

苏州校区南雍楼东区225

yafeng@nju.edu.cn , <https://yafengnju.github.io/>



南京大學
NANJING UNIVERSITY