



南京大學

NANJING UNIVERSITY

新兴通信技术

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/>



新兴通信技术

- 低功耗广域网
- 毫米波通信
- 声音通信
- 可见光通信
- 跨协议通信



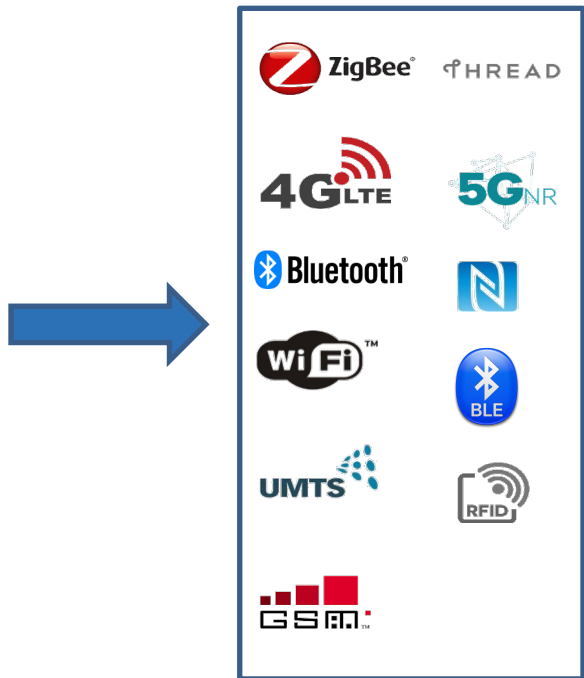


低功耗广域网的发展

物联网发展提出不同类型的应用需求



催生出多样化通信协议

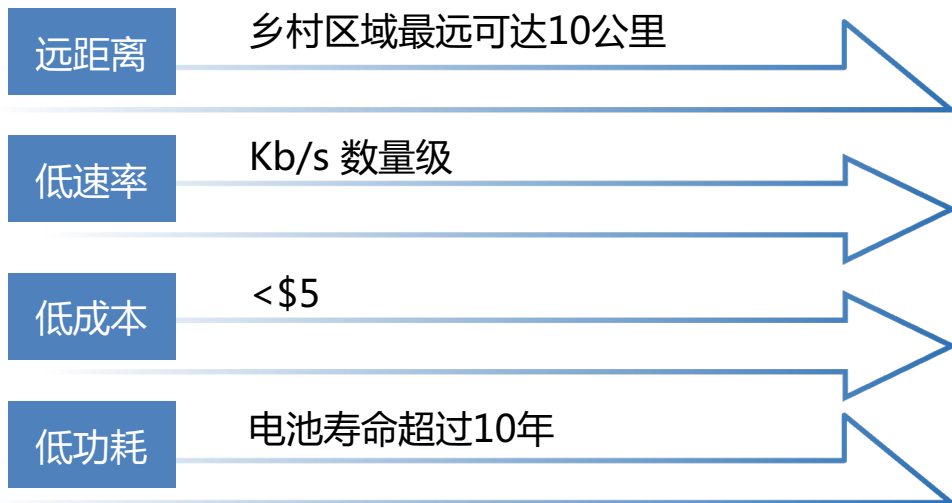




低功耗广域网的发展

传统网络技术或不支持远距离通信、或消耗终端大量能量，为满足物联网连接需求，一批**远距离、低功耗、低带宽**的协议大量涌现。

对于这类远距离、低功耗、低带宽的协议，我们统一称之为**低功耗广域网 (Low Power Wide Area Network)** 技术。



技术特点





低功耗广域网

不同的网络技术分别对应不同的应用场景与需求



Wi-Fi

注重网络带宽，通信距离近，能耗高，更适合家庭上网环境以及多媒体娱乐环境



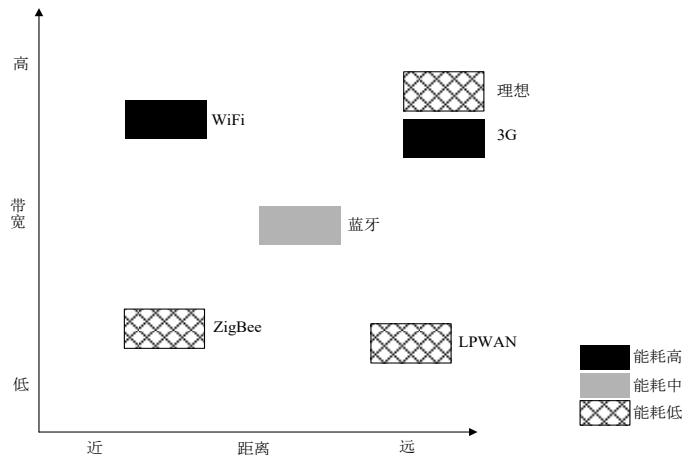
ZigBee

网络宽较小，通信距离近，但协议灵活、能耗低



蓝牙

带宽和能耗都介于Wi-Fi与ZigBee之间



3G为代表的蜂窝技术

网络带宽大、距离远、能耗高



低功耗广域网

低功耗广域网特征

- 数据速率：**带宽较小**，适合数据速率要求低的应用
- 传输距离：**传输距离较远**，适合数据分布在各家各户的应用
- 通信能耗：一般部署规模大且采用电池供电，为了保证长期工作且避免频繁更换电池，设备的通信能耗应尽可能低。

低功耗广域网典型应用

植被监测



智能水表



环境治理





低功耗广域网

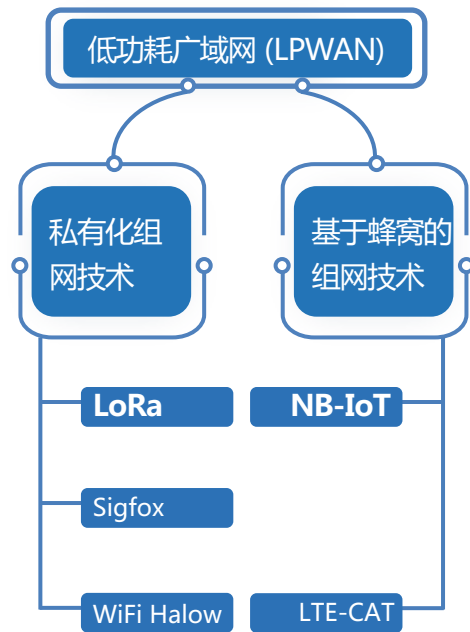
低功耗广域网技术分类

私有化组网技术：以LoRa 为代表

- 高灵敏物理层调制技术
- 低占空比通信模式
- 工作在免费频段ISM
- 允许用户通过自行部署网关构建私有化网络系统

基于蜂窝的组网技术：以NB-IoT为代表

- 由电信运营商和设备商主导
- 基于既有的3G、4G长距离通信系统
- 简化协议架构、降低占空比，压缩终端能耗





LoRa协议

2013年Semtech公司发布了SX127x系列芯片，LoRa协议自此登上了无线通信的历史舞台

2016年，荷兰电信运营公司KPN宣布，荷兰已经成为世界上第一个推出全国性LoRa物联网应用网络的国家

包括中兴在内的多家相关企业加入LoRa联盟，进一步推动LoRa协议、芯片和应用平台的发展





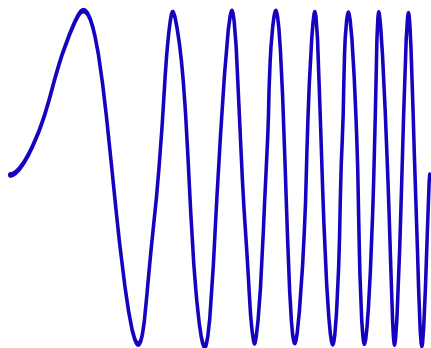
LoRa为什么能远距离

使用线性扩频CSS，频率充满整个带宽

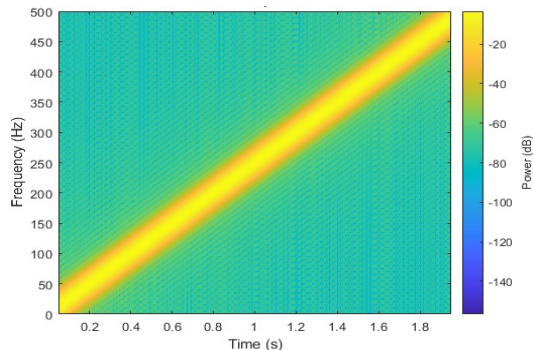
抗干扰极强，对多径和多普勒效应的抵抗也更强

接收灵敏度高达 -148 dBm

以偏小的数据速率（0.3-50kbps）换取更高的通讯距离（市内3km，郊区15km）



Chirp 时域波形



Chirp频域波形

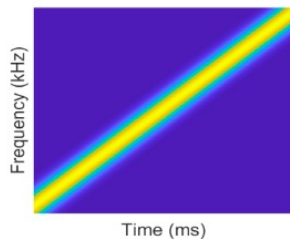




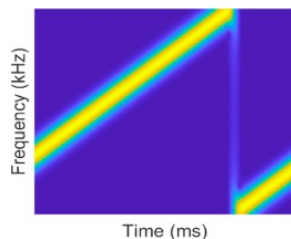
LoRa为什么能远距离

LoRa物理层信号调制策略

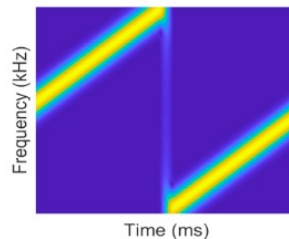
- 在**频域循环频移chirp**进行数据的编码，不同的起始频率代表不同的数据
- 如图，在带宽B内四等分标定四个起始频率，我们可以得到4种类型的符号，分别表示00, 01, 10, 11



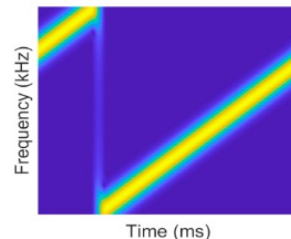
(a)



(b)



(c)



(d)

- 在接收端，只需要将这个**起始频率**计算出来，就可以计算出每一个chirp对应的比特数据



LoRa为什么能远距离

LoRa物理层信号调制策略

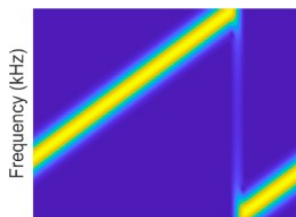
- LoRa规定了一个扩频因子SF，其定义为：

$$2^{SF} = T \times B$$

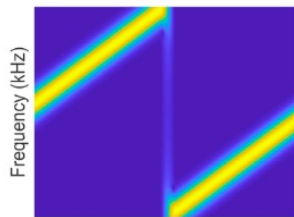
- 给定带宽B，SF越大chirp长度T越长，通讯距越远。一般来说每一个chirp可能的起始频率数目是 2^{SF}



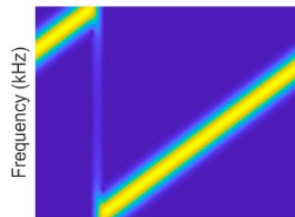
(a)



(b)



(c)



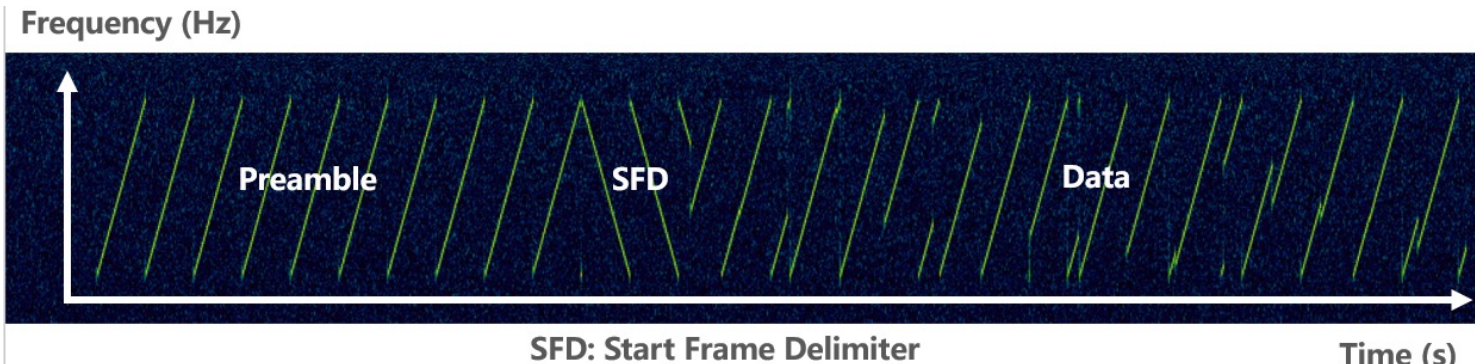
(d)



LoRa物理层信号调制

LoRa数据包结构

- 前导码 (Preamble) : 前导码包含6~65535个标准upchirp和两个标识网络号的其他chirp符号
- SFD (Start Frame Delimiter) : 2.25个标准downchirp, 作为SFD标识数据段的开始
- 数据部分 (Data) : 数据段包含着若干编码了数据的数据 chirp





LoRa协议的三种工作模式

Class A: 双向终端设备模式

- 节点只能在有数据上传时下载数据。可以减少大量能量开销

Class B: 有接收时隙的双向终端设备模式

- 节点可以在固定的时隙内下载数据

Class C: 最大化接收时隙的终端设备模式

- 节点有几乎连续的接收时隙

思考：三种工作模式各自优缺点是什么？





LoRa与ZigBee对比

协议	ZigBee	LoRa
芯片	CC2420 (TI)	SX127x (SemTech)
发射功率	0dBm (1mW)	20dBm (100mW)
传输距离	100 ~ 300m	最高3km
调制方式	DSSS	CSS
带宽	250kbps	0.3 ~ 22kbps
单个包长	128字节	256字节
MAC协议	无特定MAC协议，可实现ZigBee不同模式	LoRaWAN三种不同模式
接收敏感度	+3dB高于噪声平面	19.5dB低于噪声平面



NB-IoT协议

NB-IoT支持蜂窝连接

- NB-IoT相比GSM
 - 覆盖能力提升20~30dB
 - 支持每平方千米10万台设备连接
 - 终端电池寿命长达5~10年
 - 芯片成本低至1美元

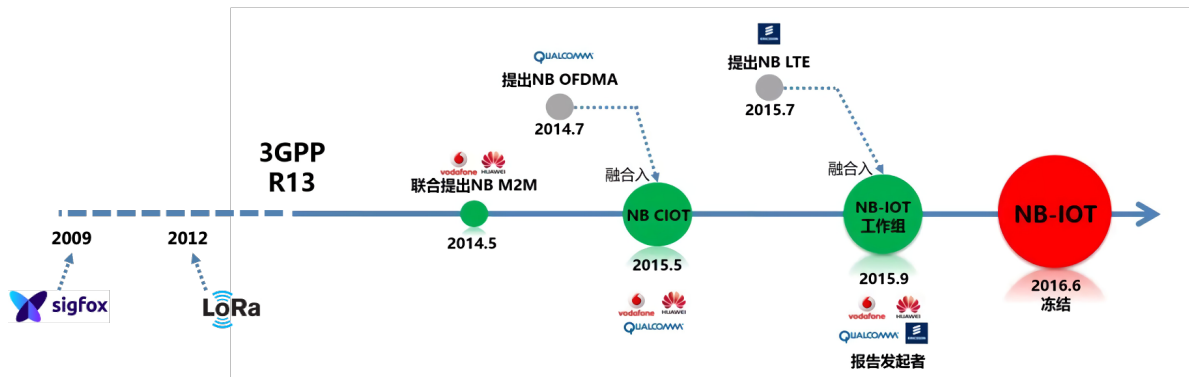


NB-IoT极大地延伸了蜂窝网络的应用边界，适应了物联网时代的连接需求



NB-IoT协议

- 最初以沃达丰和华为提出的NB M2M为基础。
- 在高通加入后，发展为NB-CIoT。
- 随后，NB-CIoT与爱立信的NB LTE合并，最终形成了NB-IoT



技术融合：继承融合多项技术与标准 —— NB M2M、NB OFDMA、NB CIoT、NB LTE

关键时间节点：2016年冻结核心协议标准（3GPP R13），第一批芯片同年年底投入商用

资本助推：设备商、运营商和芯片厂商大力推动，加速部署，后来居上



NB-IoT部署模式

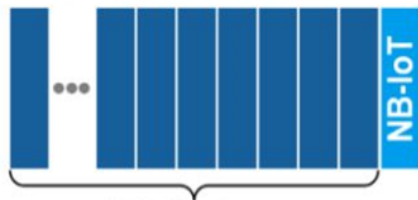
基于LTE基站，通过协议栈升级使其支持与NB-IoT节点互相传输

- 与LTE设备使用频段部分重合——三种部署模式：
- **带内部署**：在LTE频段内，使用空闲的LTE资源块
- **保护带部署**：LTE频段边缘设置有保护频段，在该保护频段内分配NB-IoT资源块
- **独立部署**：在LTE暂未使用的注册频段中为NB-IoT分配资源块



LTE Carrier

带内部署



LTE Carrier

保护带部署



GSM Carriers

独立部署

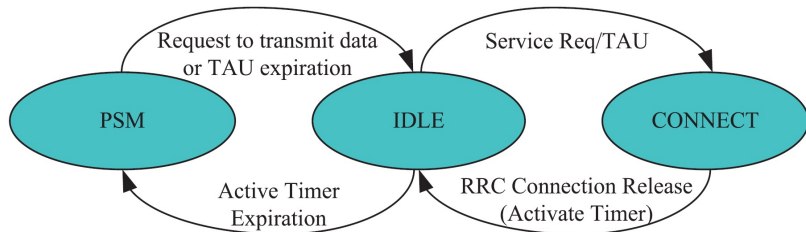




NB-IoT工作模式

沿用传统LTE休眠模式

- 当用户无数据传输或活动定时器超时，终端从CONNECT（连接态）切换到IDLE（空闲态）
- 终端在IDLE态时，射频模块不完全关闭，仍与MME保持连接进行移动支持



NB-IoT新增PSM (power saving mode) 模式

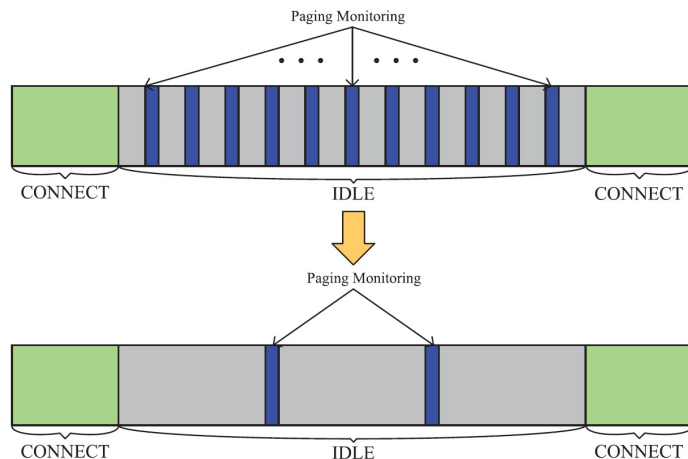
- 节点关闭所有射频模块，PSM模式下核心网无法与节点建立通信连接
- PSM期间，来自核心网的下行消息缓存在eNodeB，直至节点主动从PSM切换到IDLE然后到连接态
- PSM模式最长可持续310小时



NB-IoT工作模式

DRX (LTE中使用)

- 非持续接收：IDLE模式下使用，需要终端周期性地与核心网连接进行网络激活
- UE在预先调度好的时间片中接收指令或数据：需要终端与核心网精准同步



eDRX (NB-IoT中使用)

- IDLE模式下使用，在DRX基础上，延长节点两次接收窗口的间隔
- 最长窗口间隔从2.56s (DRX) 延长到2.92h (eDRX)



NB-IoT协议优缺点

NB-IoT和LoRa的技术指标区别不大

NB-IoT技术能够与现有的移动通信基站相结合，**易部署**于现有的无线基站上

NB-IoT目前得到了一级**运营商（如沃达丰）**以及**设备制造商（如华为）**的支持。这对于NB-IoT技术的推广和应用将起到至关重要的作用

目前市场上**仍未有公开商用的NB-IoT芯片**，其具体性能和在应用中可能存在的问题尚不可知



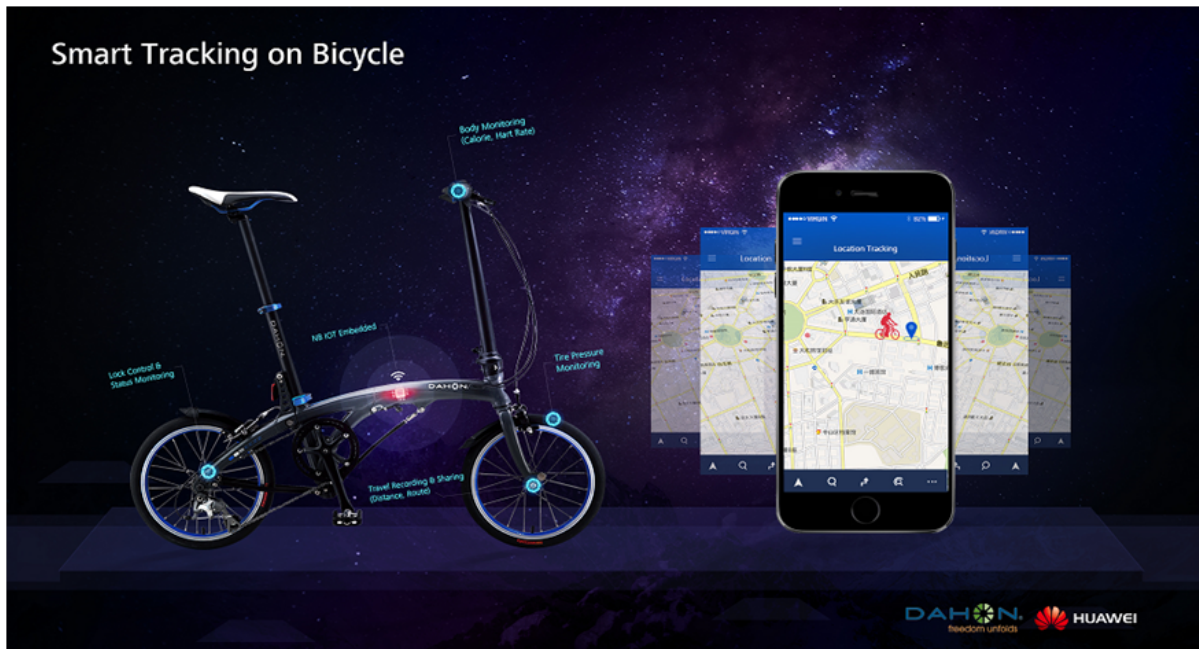
NB-IoT的应用



华为联合产业合作伙伴Firefly，为其提供NB-IOT技术支持，打造一款智能拉杆箱。该拉杆箱将具备智能追踪，超距告警，电子锁控制，电池监控等基于NB-IOT技术的应用



NB-IoT的应用



华为将联合自行车领域的合作伙伴，推出基于NB-IOT技术的智能自行车。该自行车将具备位置定位的防盗功能，以及其他的信息上报和跟踪功能



低功耗广域网（扩展介绍）

➤ 低功耗广域网传输

□ 高并发通信、弱信号解码、自适应参数

➤ 无源低功耗广域网

➤ 低功耗广域网定位与感知





高并发通信研究动机

研究者提出Bitflux指标：描述单位面积内应用运行所需的网络吞吐率

Application	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT	LTE-M	2G GPRS
Zebranet [63]	●	●	●	●	●
Trash can monitoring [4]	●	●	●	●	●
Hospital clinic [6]	○	●	●	●	●
Volcano monitoring [61]	○	●	○	●	●
CitySee [30, 64]	○	○	○	●	●
Electric metering [12, 39]	○	○	○	●	●
Habitat monitoring [29]	○	○	○	●	●
H1N1 [22]		○	○	○	●
IMT-2020 [18, 19]			○	○	●
MacroScope [52]			○	○	●
GreenOrbs [33, 64]			○	○	●

● 可以满足

○ 部分满足

无法满足

结论：现有LoRa技术无法完全满足大规模物联网系统连接需求
 提升网络容量、满足系统更高吞吐率需求是LoRa实际应用的必由之路



并发通信的发展

无线网络中，解决数据包冲突方法

冲突避免

通过调度算法避免多个节点在同一时刻占用同一信道，例如Wi-Fi中的CSMA

冲突消除

在冲突发生后，根据信号的时域或频域特征，对冲突的数据包信号进行分离和恢复



LoRa使用冲突避免方法挑战

- 信号传输距离远、网络覆盖规模大，节点很难做到可靠的信道状态监听
- 信道监听加大节点的能量消耗，缩短工作寿命



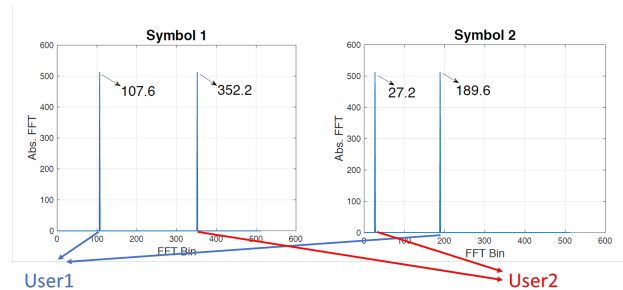
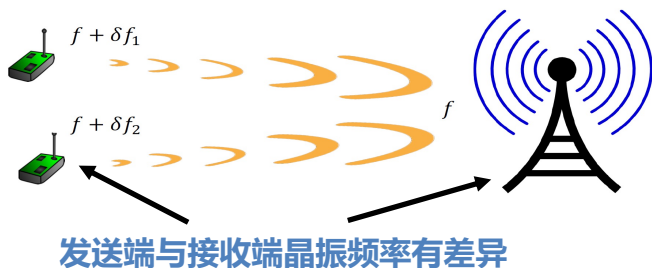
LoRa冲突消除：Choir

方法

利用不同硬件的频率偏移特征来分离冲突数据包

冲突解码原理

- 在接收端，来自不同节点的数据包信号具有不同的频率偏移
- 根据该频率偏移将不同LoRa编码符号对应到不同的发送节点



Choir方法原理图





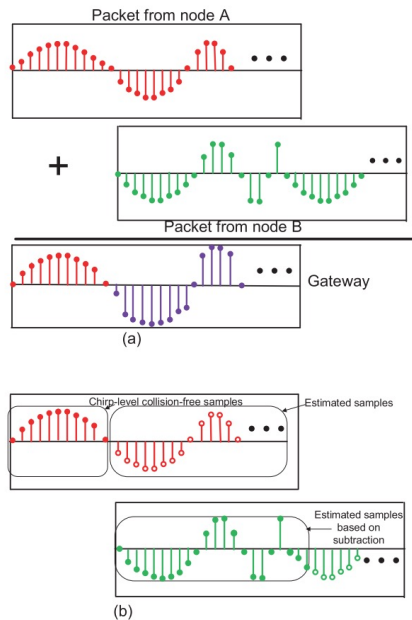
LoRa冲突消除：mLoRa

方法

利用信号时域到达时间差消除冲突

冲突解码原理

- 多个数据包先后抵达网关发生冲突，接收信号起始部分无冲突且可被正常提取
- 利用无冲突信号，提取冲突信号中一个正确的符号内容，构造出该符号并将其从冲突信号中消去
- 从剩余信号中得到新的一段非冲突的信号，重复上述操作，直至所有冲突数据包分离



mLoRa方法原理图





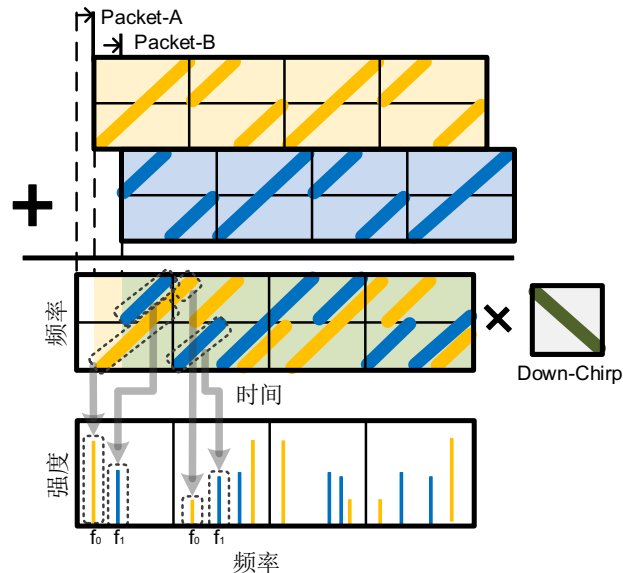
LoRa冲突消除：CoLoRa

方法

利用信号时频域特征实现低信噪比信号冲突消除

冲突解码原理

- 使用错位接收窗口，将每一编码符号切割并变换为两段频率相同的傅里叶波峰，结合波峰高度信息对不同数据包的符号进行聚类、分离和并发解码
- 基于频域波峰特征分析，将冲突数据包的时间偏移转化为显著的频域波峰差异，并发解码并保持较高的噪声容忍能力



CoLoRa方法原理图





LoRa冲突消除：NScale

方法

基于信号在时间窗口内分布差异分离冲突

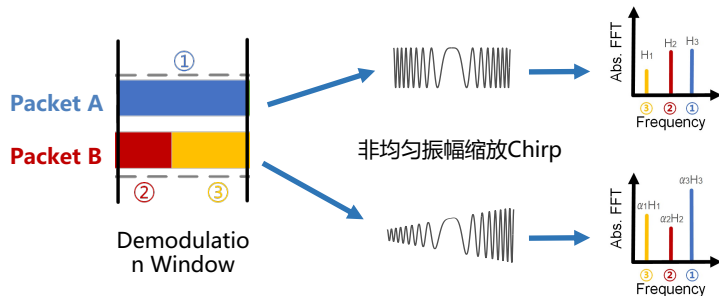
冲突解码原理

在时域上，不同数据包的Chirp在同一接收窗口内具有不同的时间分布特征

接收窗口中不同位置的Chirp信号的振幅缩放的幅度不同

非均匀缩放将Chirp的时间分布转化为波峰高度缩放值 α_i

- 具有相同缩放因子的峰值属于同一数据包
- 将数据包之间微小的时域差异转化为稳定的频域特征



NScale方法原理图





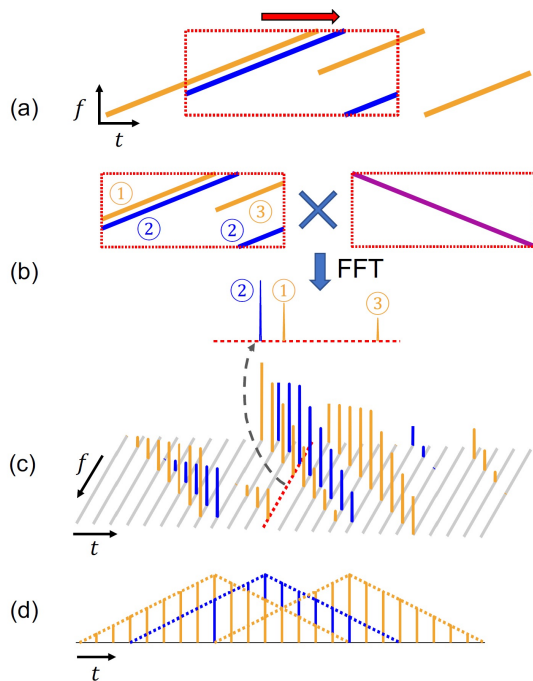
LoRa冲突消除：Pyramid

方法

实时实现冲突解码的流式算法

冲突解码原理

- 利用不同数据包到达接收端的时间和信号强度差异，核心是以更细的时间粒度对LoRa信号进行标准解码操作
- 使用一组滑动窗口对接收信号进行解调，在每个信号处理窗口中测量并记录所有的能量波峰，基于波峰高度变化特征实现冲突分离



Pyramid方法原理图





低功耗广域网（扩展介绍）

➤ 低功耗广域网传输

□ 高并发通信、弱信号解码、自适应参数

➤ 无源低功耗广域网

➤ 低功耗广域网定位与感知

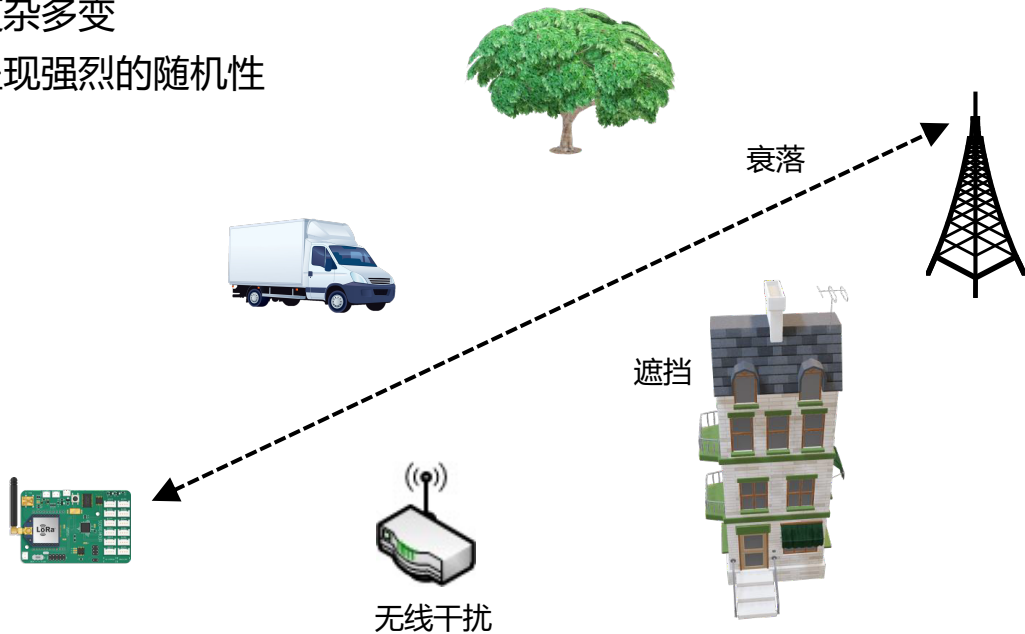




研究动机

不可靠连接

- 远距离链路严重衰落
- 环境条件复杂多变
- 节点连接呈现强烈的随机性





研究动机

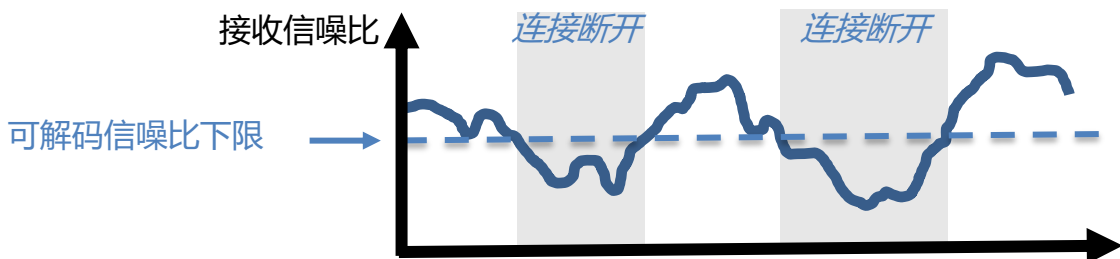
不可靠连接导致链路故障**难预测、难诊断**

链路质量剧烈波动、无法预测

接收信噪比低于可解码阈值时节点失联

对失联节点无法诊断其状态

- 链路断开
- 程序错误
- 硬件错误
- 电池耗尽
- ...





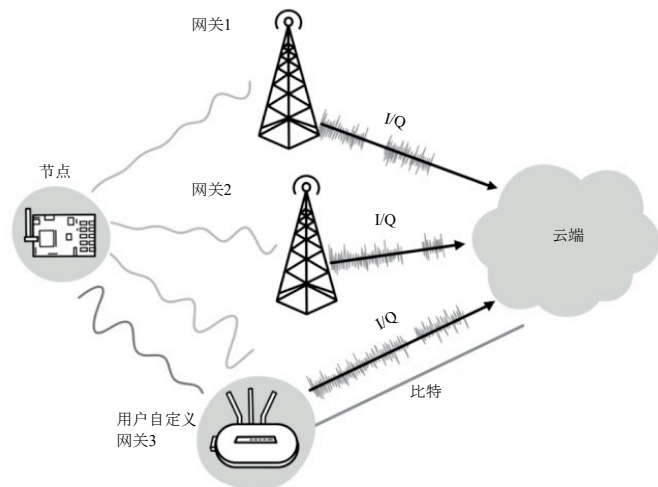
LoRa弱信号解码：Charm

方法

协调多个网关同时工作，实现对微弱LoRa信号解码，拓展网络覆盖能力

弱信号解码原理

- LoRa在实际部署中使用多网关以实现大范围覆盖，不同网关的覆盖范围通常存在互相重叠的情况，因此同一个节点可能同时处于多个网关的覆盖范围内
- 使用云服务器将多个网关收集到的信号进行叠加后，在云端可以实现信号增强从而成功解码出信号中包含的数据



Charm方法原理图





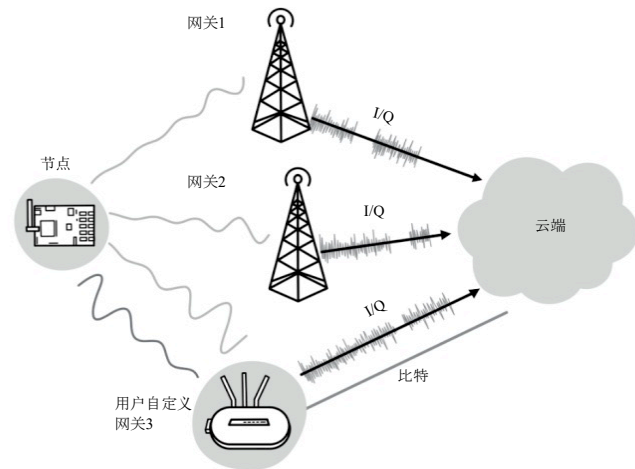
LoRa弱信号解码：Charm

方法

协调多个网关同时工作，实现对微弱LoRa信号解码，拓展网络覆盖能力

弱信号解码原理

- LoRa在实际部署中使用多网关以实现大范围覆盖，不同网关的覆盖范围通常存在互相重叠的情况，因此同一个节点可能同时处于多个网关的覆盖范围内
- 使用云服务器将多个网关收集到的信号进行叠加后，在云端可以实现信号增强从而成功解码出信号中包含的数据



基于云端协同的弱信号解码方法需要借助地理位置相近的多个网关互相配合，在网关稀疏部署的野外网络中将不再适用



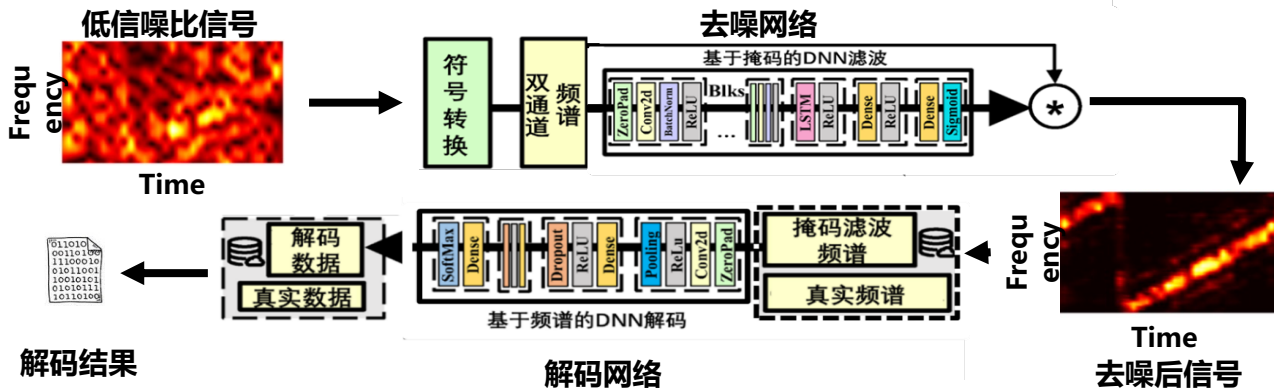
LoRa弱信号解码：NELoRa

方法

使用深度神经网络对LoRa解码方法进行优化，实现以单个LoRa网关为接收端的弱信号解码

弱信号解码原理

- 针对低功耗广域网信号特点，设计去噪网络，降低噪声信号
- 进一步通过时频域特征学习，设计解码网络，解码弱信号



NELoRa方法原理图



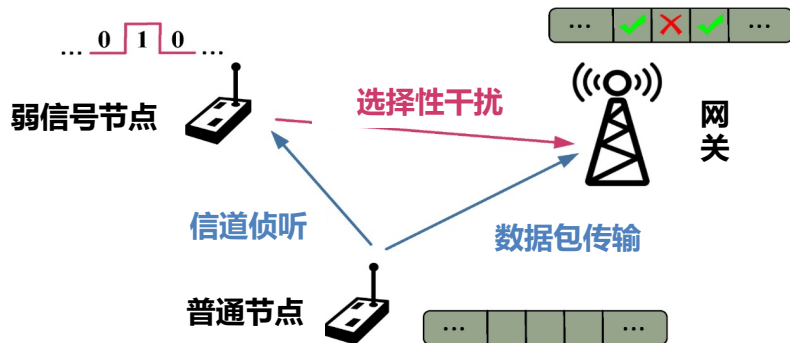
LoRa弱信号解码：Falcon

方法

提出一种可靠LoRa应急链路的传输方法

弱信号解码原理

- 普通节点向信道中发送数据包，作为参考信号
- 弱信号节点侦听信道，当检测到信道中有数据包传输时，切换至主动干扰模式，通过选择性干扰信道中的数据包向网关传送数据
- 网关解码数据包并根据干扰结果解析弱信号节点的传输内容





低功耗广域网（扩展介绍）

➤ 低功耗广域网传输

□ 高并发通信、弱信号解码、自适应参数

➤ 无源低功耗广域网

➤ 低功耗广域网定位与感知





研究动机

- LoRa传输距离远，应用环境复杂，需要针对不同的应用需求和部署环境，选择合适的LoRa传输参数
- 常用的传输参数，如扩频因子、带宽、中心频率等，直接影响LoRa传输的效率和可靠性





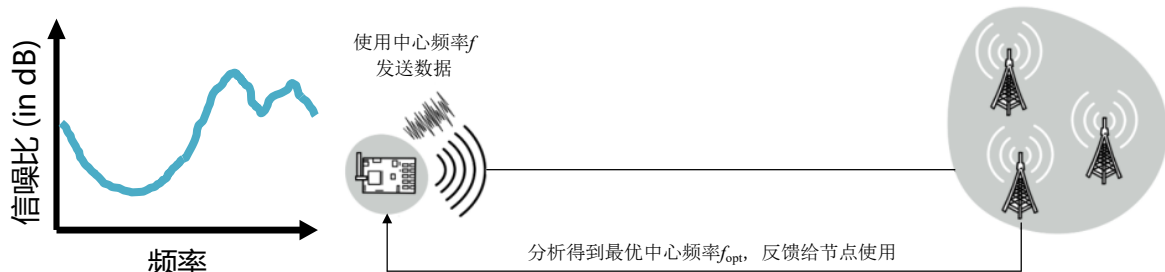
LoRa自适应参数：Chime

方法

借助空间异构性，从多网关接收、分析、还原信号多径特征，并最终实现选择最优传输频率

自适应参数原理

- 不同频率LoRa信号存在波长差异，信号通过多径信道到达接收端后，在某些频率处叠加增强，而在另一些频率处干涉相消，因此导致不同频率的信号质量差别明显
- 节点发起一次上行传输，网关完成对节点信号传播特征的测量，并根据测量结果为节点选择最合适的通信信道



Chime方法原理图





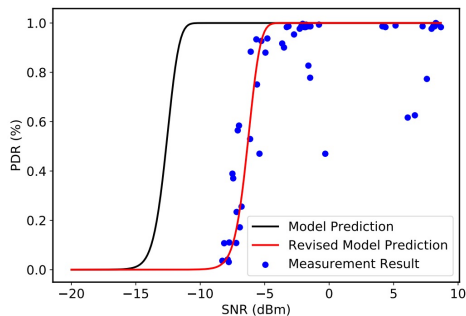
LoRa自适应参数：DyLoRa

方法

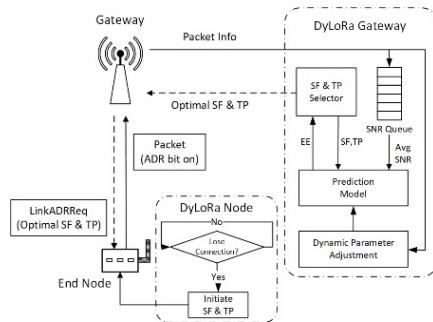
根据链路质量对节点的传输参数进行动态调整

自适应参数原理

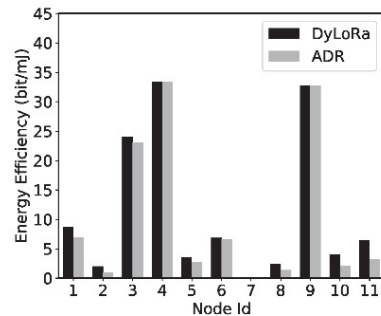
- 建立不同链路状态下的信道容量和能耗估计模型
- 基于误码率和信噪比关系的快速链路状态估计
- 根据信道容量和能耗估计结果，计算能耗最优的信道参数



信道容量估计



能耗优化协议架构



能耗性能表现对比



低功耗广域网（扩展介绍）

➤ 低功耗广域网传输

□ 高并发通信、弱信号解码、自适应参数

➤ 无源低功耗广域网

➤ 低功耗广域网定位与感知





研究背景

无源通信：不依赖于电源进行通信的一种新型通信方式

主要实现形式：Backscatter（反向散射技术）

Backscatter技术两大难题

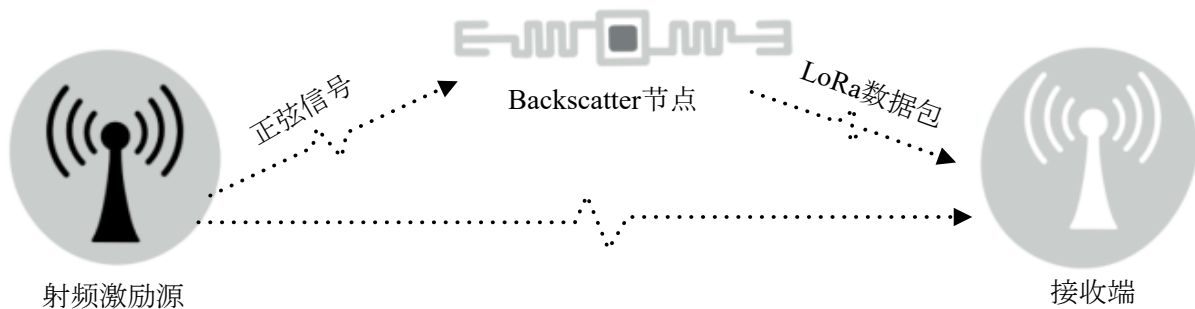
- 通信距离受限，往往只有几十米
- 允许的并发数量有限，通常不超过10个



远距离无源低功耗广域网

LoRa Backscatter设计思想

实现了一种可将正弦激励信号反射为LoRa调频信号的标签，使用Backscatter标签反射接收信号，实现更远的散射通信距离



LoRa Backscatter方法原理图

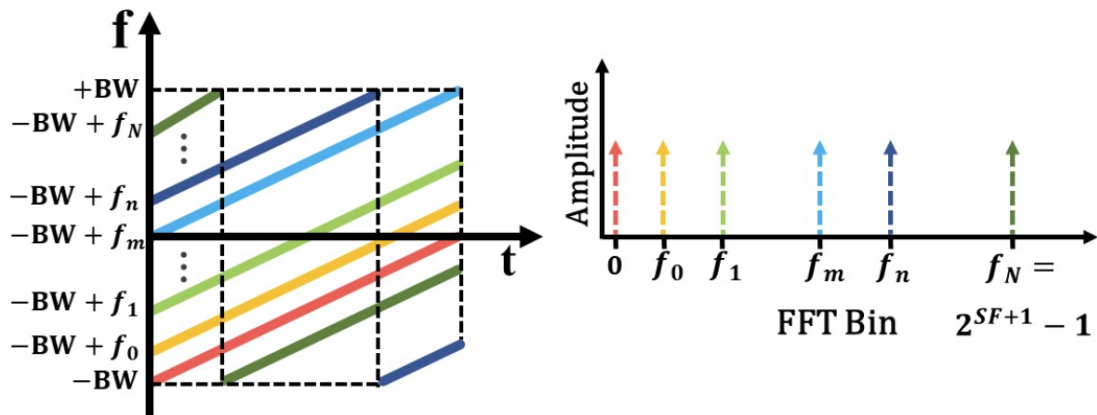




高并发无源低功耗广域网

NetScatter设计思想

为不同反射标签分配不同的频谱搬移频率，支持数百个标签同时向接收端传输信息，提升频谱利用效率



NetScatter方法原理图

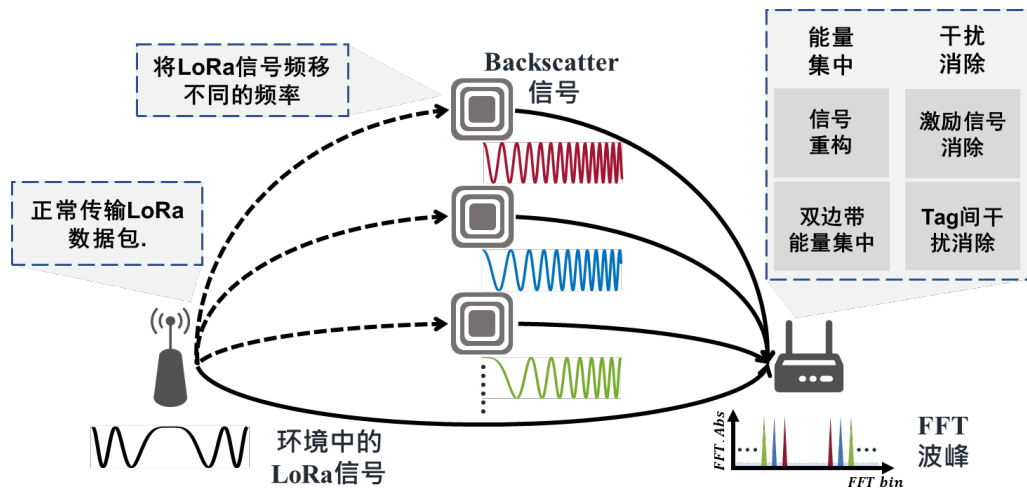




泛在信号无源低功耗广域网

P²LoRa设计思想

利用环境中已有的LoRa信号，简化节点与标签的操作，利用网关较强的性能支持远距离的并行传输



P²LoRa方法原理图





低功耗广域网（扩展介绍）

➤ 低功耗广域网传输

□高并发通信、弱信号解码、自适应参数

➤ 无源低功耗广域网

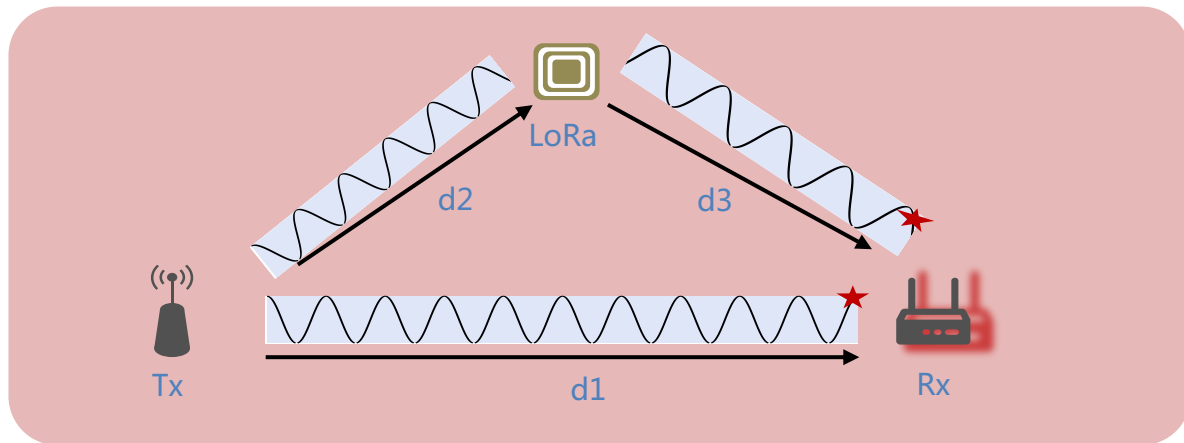
➤ 低功耗广域网定位与感知





研究背景

物联网应用对定位的要求越来越多，尤其是资产跟踪等应用。LoRa芯片制造商Semtech在最新的LoRa芯片SX1280系列中推出测距功能



LoRa无源节点定位示意图



TDoA定位

定位原理

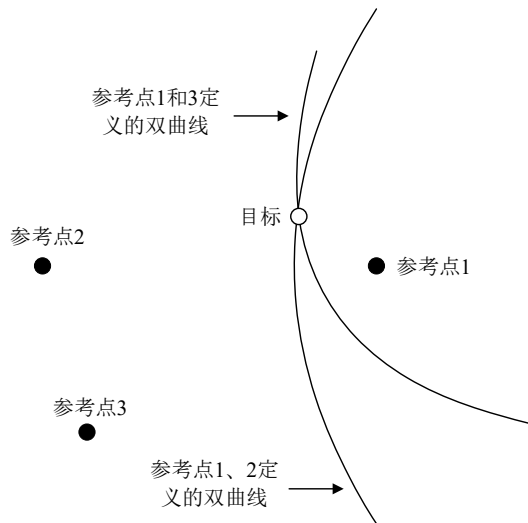
- 假设网关位置已知，不同的网关接受同一个节点的信号并标记收包时间戳，将数据包内容和时间戳发送给云端服务器
- 云端运行地理位置统计程序，根据各网关的时间戳差异计算节点到不同网关的距离差
- 结合多个网关距离差以及网关自身的坐标，计算出节点的坐标位置

核心挑战

- 需要在数据包到达时刻准确地获取时间戳
- 需要各网关之间保持严格的时间同步

定位精度

- 在10个网关协同配合时，定位精度为200m



TDOA方法原理图



信号指纹定位

定位原理

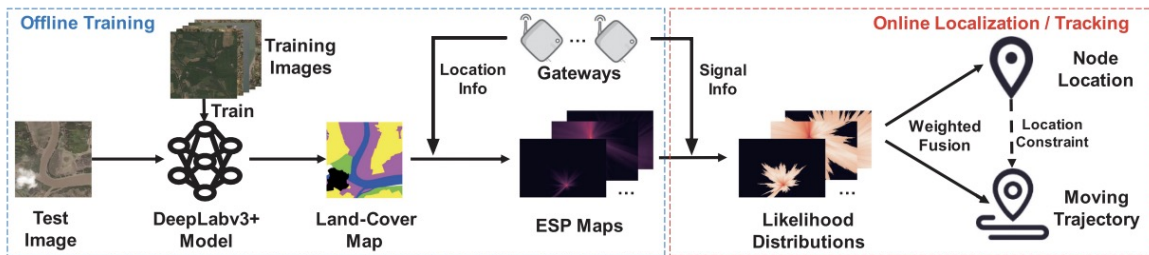
- 接收端根据信号强度大致判断节点到网关的距离
- 联合多个网关的信号强度能够形成某一位置的特定指纹
- 在接收端建立指纹数据库，收到信号后通过查找数据库进行定位

核心挑战

- 需要在千米级别的范围内采集指纹并建立一个完备的指纹数据库

现有方法

- SateLoc提出利用卫星来辅助获取指纹数据库



SateLoc方法框架图

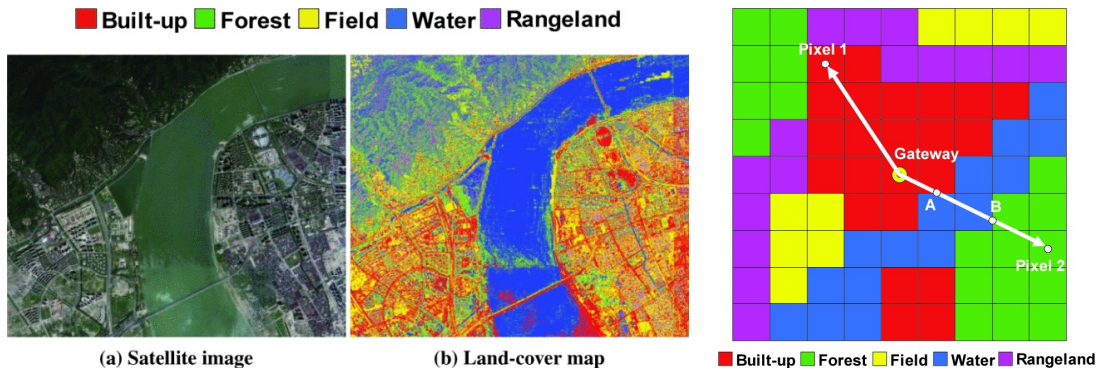


信号指纹定位

SateLoc原理

通过卫星数据获得一个地区的地形地貌分布，用网格将地图切分为一个个小格子，将每个小格子里的地形认为是一种单纯的地形，如树林或楼宇

以一个格子为起点出发，画一条连接到网关的线，计算这条线穿过了多少种地形并分别计算它们的影响，得到网关收到的起始格子的信号强度指纹



SateLoc方法原理图





新兴通信技术

- 低功耗广域网
- **毫米波通信**
- 声音通信
- 可见光通信
- 跨协议通信





毫米波通信的兴起

什么是毫米波？



毫米波指的是**频率在30 ~ 300GHz频段内的无线信号**（相应的波长为1 ~ 10mm）。

无线接入技术的蓬勃发展造成了2.4GHz和5GHz频段的拥挤，为了缓解频谱资源的紧张，人们的目光开始转向更高频率的频段，其中最具代表性的就是毫米波频段。

此外，半导体工业的发展推动毫米波频段，尤其是60GHz频段的射频收发器的成本大大降低，使大规模应用毫米波频段成为可能。

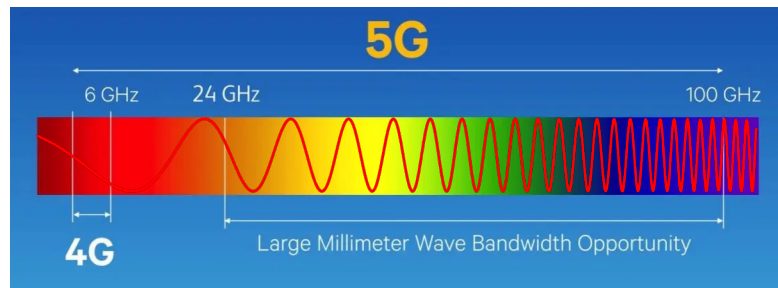


毫米波通信的优点

丰富的频谱资源

中国将59 ~ 64GHz划分为ISM频段，美国、日本分别将57 ~ 64GHz、59.4 ~ 62.9GHz划分为ISM频段，而欧洲更是划分了高达9GHz (57 ~ 66GHz) 的ISM频段。

目前主要使用的802.11n技术，其有效带宽约为660MHz，远远少于60GHz毫米波无线通信技术。



高传输速率

IEEE 802.11ad技术可以支持高达8Gbps数据传输速率。

波长短

60GHz信号的波长为毫米级别，其元器件的尺寸很小，便于集成化，同时易于实现波束成型。





毫米波通信的优点

高方向性

- 60GHz通信采用波束成形（Beamforming）技术，将99.9%的波束集中在4.7度范围内
- 同时传输的信号在空间中重叠度小，不易产生干扰

安全性

- 毫米波在传播过程中的能量衰减远高于低频信号，在短距离通信的安全性能和抗干扰性能上存在优势
- 可将信号限制在有限区域内，物理隔离信号传播、保障安全性

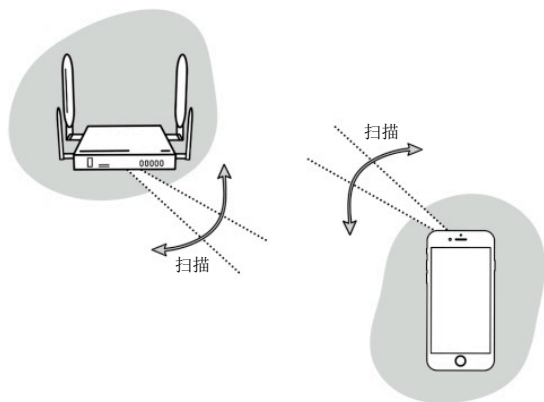




挑战：波束成形与波束对齐

为了抵御毫米波信号传播过程中的强度衰减及信号干扰，毫米波通信使用**波束成形 (Beamforming)** 技术将信号的能量聚集到一个比较窄的方向上，形成一个非常窄且能量非常集中的波束。

由于该技术形成的波束很窄，因此发射器和接收器之间要进行**波束对齐 (Beam Alignment)** 之后才能进行通信。



波束对齐示意图





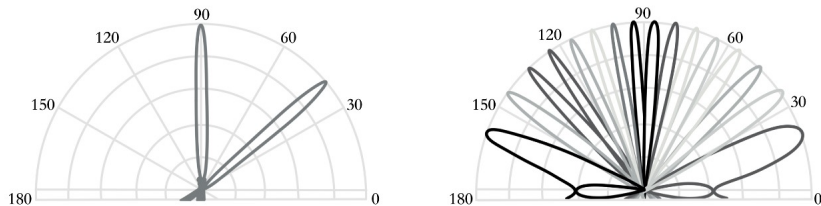
挑战：波束成形与波束对齐

当前用于波束对齐的方案需要发射器和接收器扫描整个空间，直至两者找到最佳对齐角度，整个过程会造成极大的时间开销。

Agile-Link提出了一种快速波束对齐的方法

通过移相器来创建多重波束，可以同时检测空间中的多个方向。

使用了随机多次检测，令其检测方向能够覆盖到整个空间，最后通过多数投票的方法选出信号最强的方向。

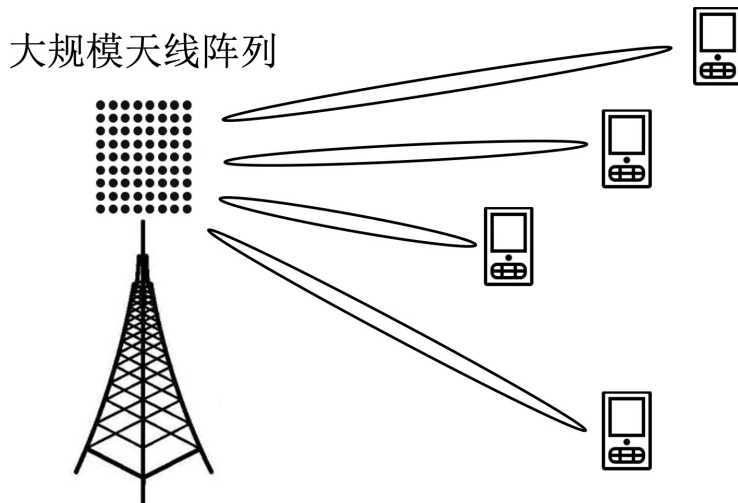


多重波束与随机化检测



挑战：空分多址技术

空分多址是指通过利用毫米波通信的高度定向性，通过使用不同的空间波束能够对来自不同方向的用户进行隔离，从而实现在空间域中对不同用户进行多路复用



空分多址示意图

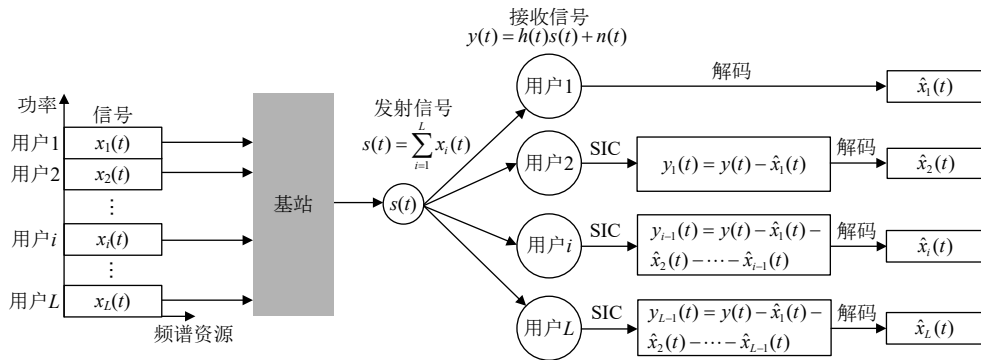


挑战：空分多址技术

挑战：当用户数量大于基站的射频链路数量时，如何为多个用户提供服务

解决思路：对处于同一个波束覆盖的一小片区域内的用户，使用**非正交多址**技术来提供服务

- 非正交多址在发射端不会对频谱资源进行分割，每个用户可以占用所有的时频资源，提高资源利用效率
- 在接收端，通过使用串行干扰消除等技术来实现对每个用户所需信息的解码



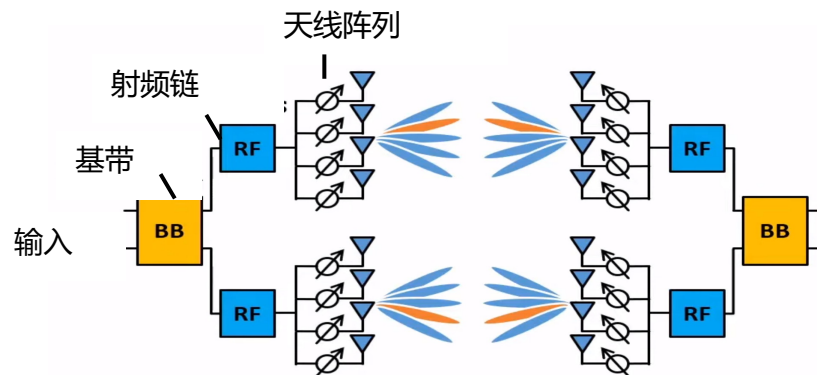


挑战：大规模MIMO

由于天线尺寸较小，毫米波通信基站可以支持上百个天线的天线阵列，能够实现**大规模输入输出 (Massive MIMO)** 技术，同时向更多用户发送数据，极大提高通信速率

挑战：获取准确的信道状态信息CSI

解决思路：利用深度学习来对大规模MIMO系统进行信道估计，将要估计的多天线信道矩阵看作二维图像，并使用图像处理中用于图像恢复的去噪卷积神经网络来对信道参数进行学习和估计





毫米波通信研究方向

毫米波天线设计

更高增益，更低成本的天线。

预编码技术

对发送的信号进行预先编码，使其在MIMO通信中与多用户更好地匹配。

标准化与大规模部署

为毫米波通信制定更完善的标准以及进行实际场景中的大规模部署。

毫米波感知

使用毫米波通信设备来实现物体的感知、成像、定位、追踪等功能。





新兴通信技术

- 低功耗广域网
- 毫米波通信
- **声音通信**
- 可见光通信
- 跨协议通信





声音通信

起源



1877

留声机和录音机诞生于世



1914

无线电台成功通信



如今

物联网中无数设备用扬声器和麦克风进行通信





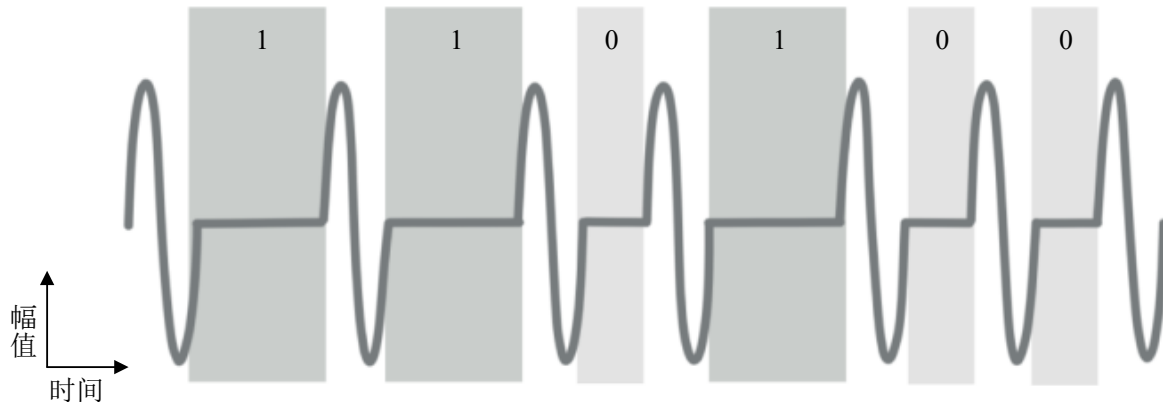
编码方式

脉冲间隔编码PIM

使用相邻脉冲之间的间隔长度来编码信息的方式

设置不同的间隔长度代表不同的数据。如长度为 T 的间隔代表“1”，长度为 $T/2$ 的间隔代表“0”

间隔分得越细，编码能力越强。但解码难度越高



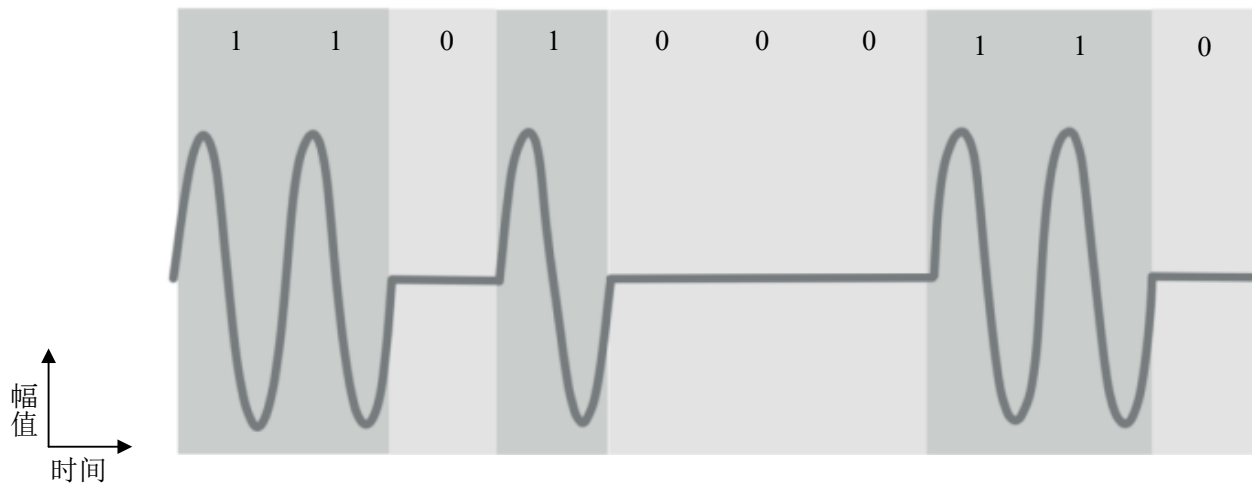


编码方式

幅移键控编码ASK

使用**不同强度**的信号代表不同的数据

开关键控使用振幅为0和振幅为1的信号分别代表“0”和“1”



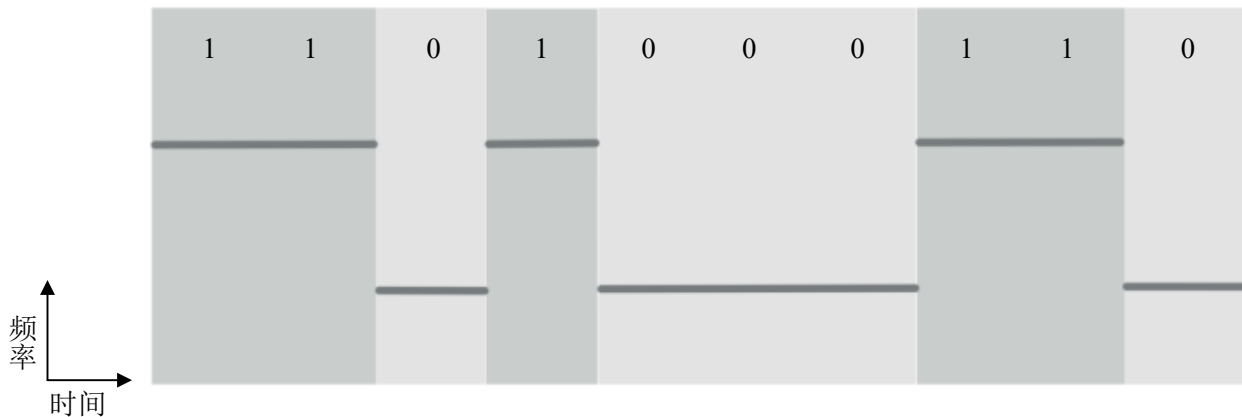


编码方式

频移键控编码FSK

利用不同的信号频率代表不同的数据

如下图用两种不同的频率分别代表“0”和“1”



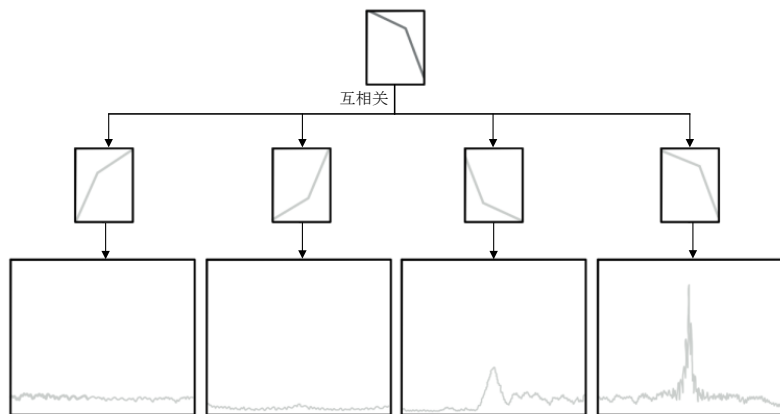
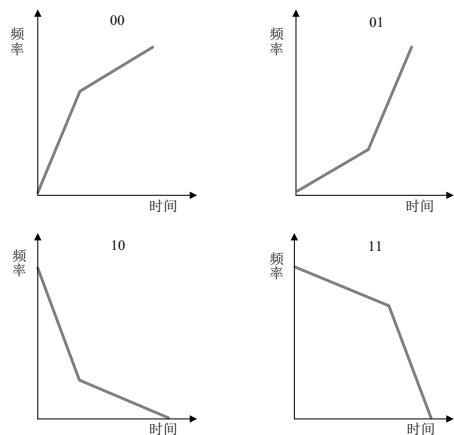


编码方式

基于扫频信号的声音通信

用4种**不同走势**的扫频信号代表00, 01, 10, 11

通过互相关的方式来判断收到的是哪一种扫频信号





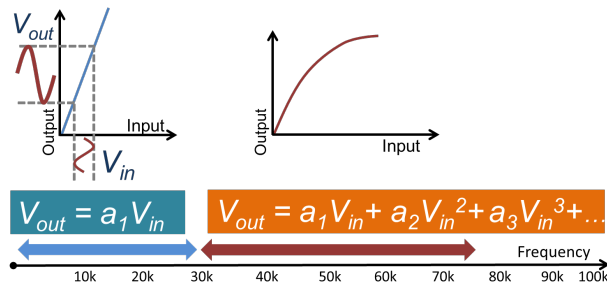
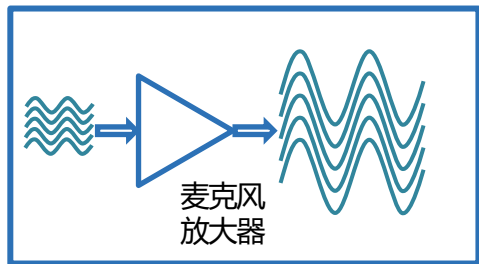
非线性效应

BackDoor

- 多数声音通信使用**18~24kHz**的超声信号。这些频段虽然对成年人影响不大，但对婴儿和宠物有较大干扰。
- 为减少干扰，BackDoor利用麦克风放大器的**非线性效应**实现了用**40~50kHz**超声信号向普通的麦克风传输信息，即：

$$V_{out} = a_1 V_{in} + a_2 V_{in}^2 + a_3 V_{in}^3 + a_4 V_{in}^4 + \dots$$

式中， V_{in} 为接收信号和 V_{out} 为记录下来的信号





非线性效应

BackDoor

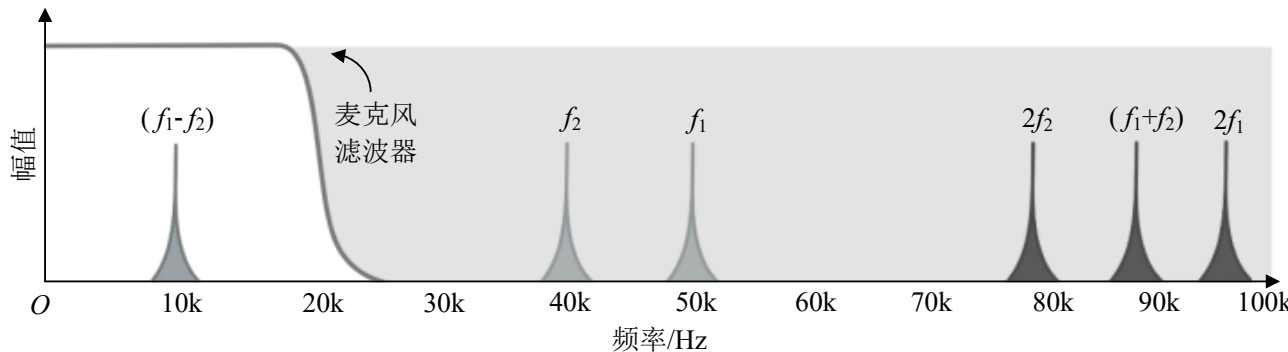
- 当输入信号是两个单一频率的信号时，即：

$$V_{in} = \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t)$$

- 输出信号的二次项则满足下面的公式，即：

$$\begin{aligned} V_{in}^2 &= (\sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t))^2 \\ &= \cos(4\pi f_1 t) + \cos(4\pi f_2 t) + \cos(2\pi(f_1 + f_2)t) + \cos(2\pi(f_1 - f_2)t) \end{aligned}$$

- 用低通滤波器滤掉高频信号后，得到频率为 $f_1 - f_2$ 的信号





新兴通信技术

- 低功耗广域网
- 毫米波通信
- 声音通信
- **可见光通信**
- 跨协议通信





可见光通信

什么是可见光通信？

可见光通信VLC指的是利用可见光频段（波长为400~700nm）来编码通信内容的光学无线通信系统。



常见形式

- 用LED光源或者显示屏等发光设备作为信号的发送端。
- 用光电二极管或相机等光信号接收设备作为信号接收端。
- 可通过开关键控来编码信息，即发光设备的“亮”和“暗”各代表一种数据状态。

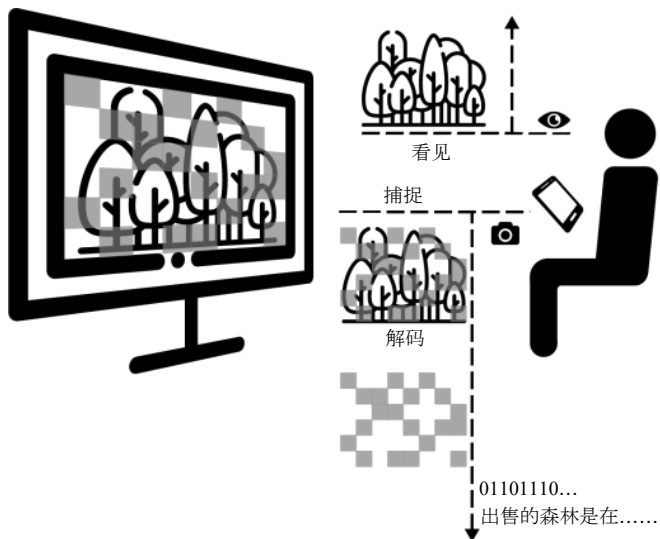




显示屏-相机通信

原理

- 人眼的低频特性**无法捕捉显示屏上以高频率闪烁**的信号
- 显示屏以120Hz以上的刷新率持续输出不同亮度的可见光，作为可见光通信的发送端

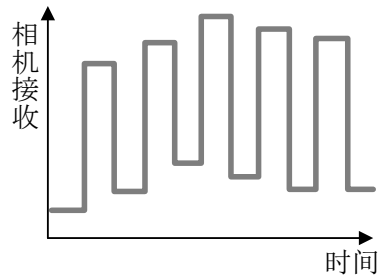
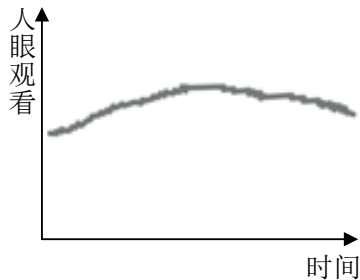
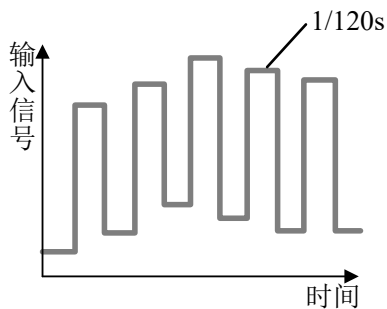




显示屏-相机通信

原理

- 假设显示屏上互补像素对（相邻两帧同一位置的像素点）的平均亮度为 V
- 显示屏将互补像素对的亮度设置为 $(V+V, V-V)$ 或 $(V-V, V+V)$ 两种不同的方式来编码“1”或“0”，从而达到发送数据的目的
- 画面的平均亮度没变，**人眼只能感知到平均亮度**。但相机较高的捕捉频率可以解码信息





显示屏-相机通信

最新进展



- ChromaCode：提出在均匀颜色空间对亮度进行改变，大大提升了用户观感体验。将有效数据传输率提升到120Kb/s，可以支持图片等传输形式
- AirCode：利用视觉里程计技术准确定位并追踪显示屏边框，降低误码率，将有效数据传输率提升到1Mb/s以上，使“视频中传视频”的场景成为可能





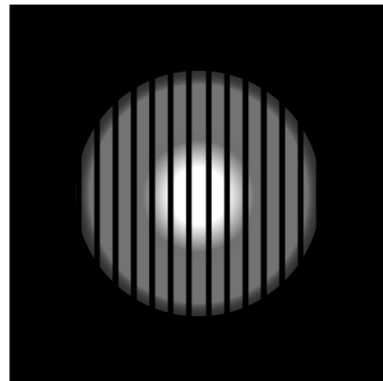
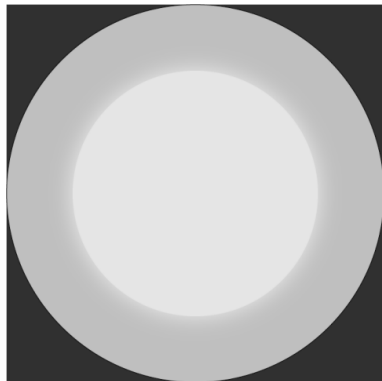
LED可见光通信

LED

利用LED灯快速的明暗变化来传输数据，在接收端使用光电二极管感知光强的变化。

由于相机的卷帘快门机制，照片中获得的是亮暗条纹相间分布的光源图像。

条纹代表不同时刻的明暗信息。宽度代表状态持续时间。接收端可以此解码。





新兴通信技术

- 低功耗广域网
- 毫米波通信
- 声音通信
- 可见光通信
- **跨协议通信**

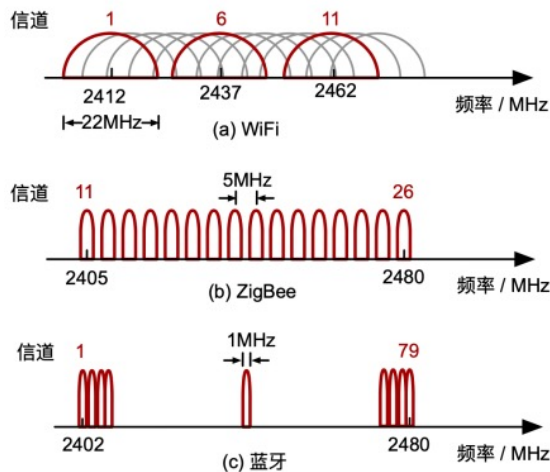
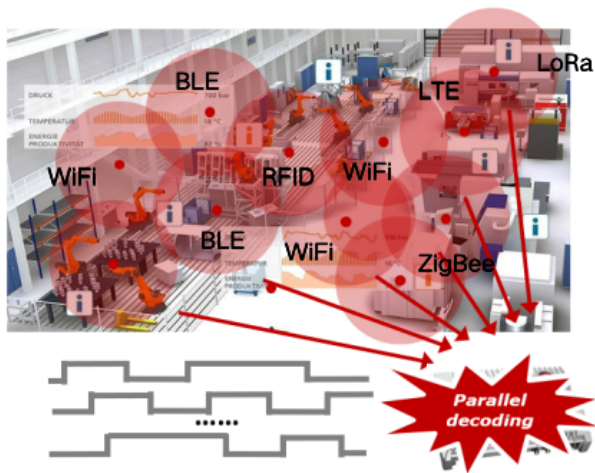




无线共存

无线共存问题

- 无线信道在共享频段上普遍重叠，导致信道竞争和信号冲突
- 不同的无线技术之间主动进行数据传输和融合协调是解决共存问题的突破口

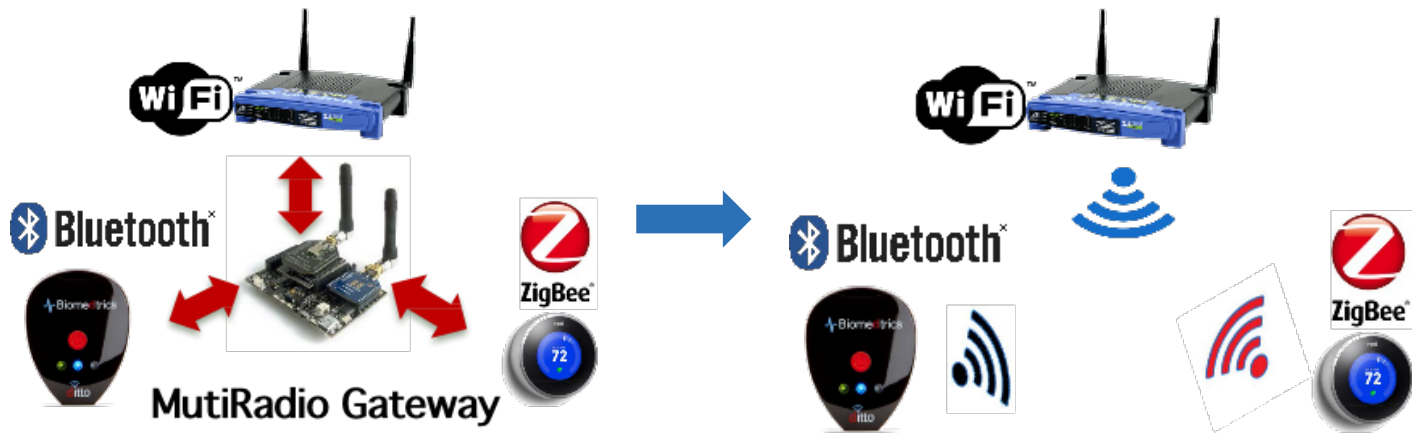




跨协议通信

什么是跨协议通信

- 两个采用不同通信协议的无线设备（如WiFi和ZigBee）之间实现直接的数据传输和信息交换
- 应用在家居、工业、医疗等方面，实现更好的网络控制、干扰管理、交互操作和异构融合





技术挑战



Modulation: QAM, OFDM
Rate: ~54Mbps (802.11g)
Distance: 300m
Tx: 26dBm
Sensitivity: -80dBm



Without translator



Key Innovation
Signal Emulation
 @
Wi-Fi Sender



Modulation: OQPSK, DSSS
Rate: ~250Kbps
Distance: 100m
Tx: 0dBm
Sensitivity: -97dBm

信息屏障

异质网元共存的“信息屏障”，不同无线技术的物理层采用不同的通信协议标准，这些标准是不兼容的

互相不认识

媒介缺失

异构网络协同的“媒介缺失”，不同无线技术的的编码调制方式不同，相应的解调解码方式也不同

说话听不懂

管理失衡

共享信道资源的“管理失衡”，不同无线技术的带宽、速率、接收灵敏度、抗噪声干扰、抢占信道的能力是不同的

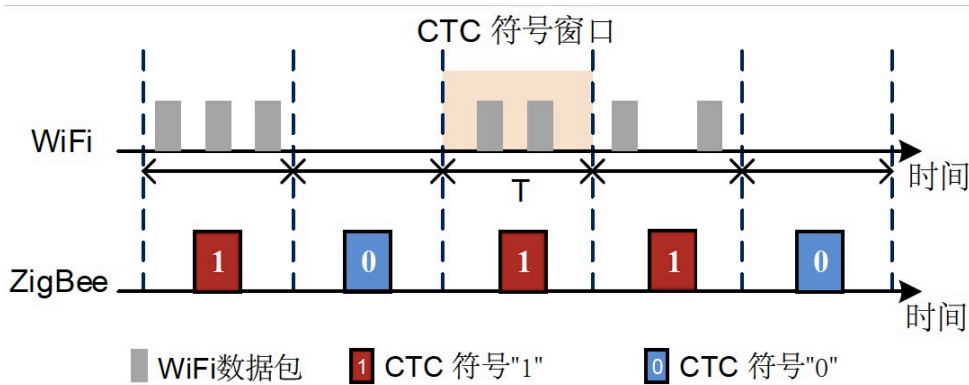
能力非对称



数据包级别的跨协议通信技术

数据包级别的跨协议通信

- 挖掘侧信道，利用数据包级别的特征实现异质设备之间的数据传输
- 特征类型：数据包的发送能量、长度信息、发送间隔、发送顺序
- 侧信道类型：接收信号强度（RSS）、信道状态信息（CSI）



基于发送能量能量的数据包级别跨协议通信技术

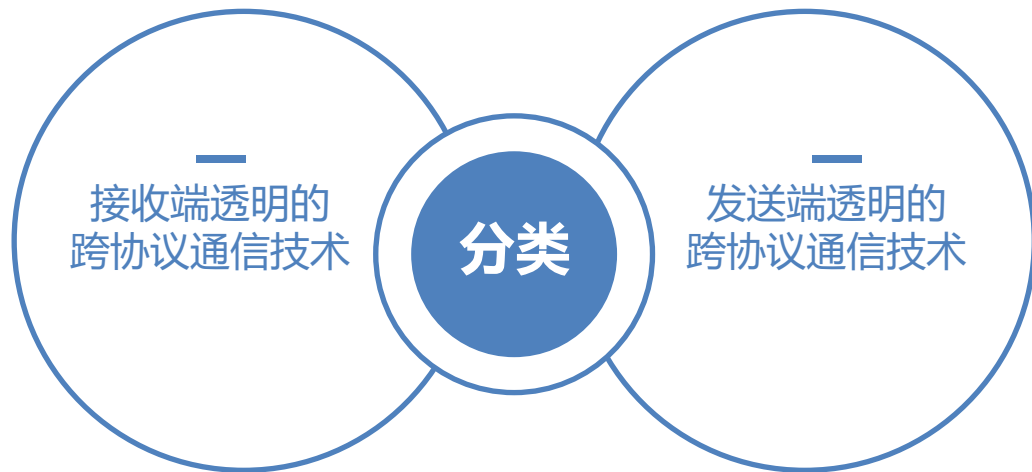


物理层级别的跨协议通信技术

物理层级别的跨协议通信

发现不同调制解调技术间的潜在兼容性，实现物理层的信息传输。

提高跨协议通信的传输效率，实现Mb/s级别的数据率。





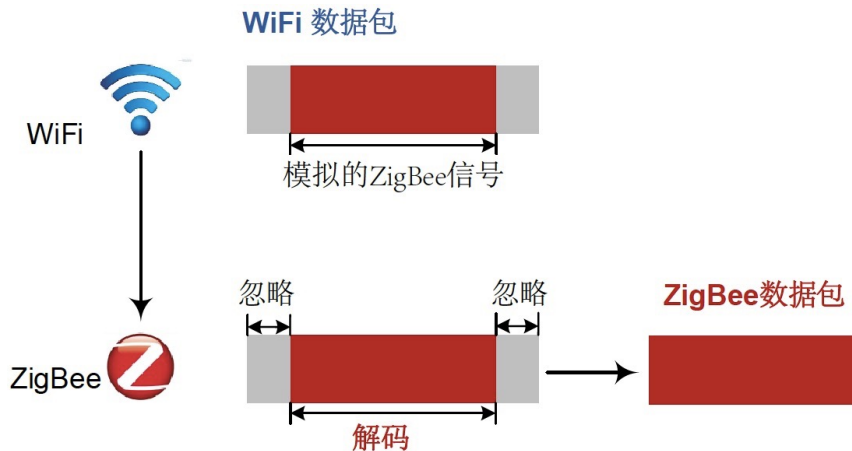
物理层级别的跨协议通信技术

接收端透明的跨协议通信技术

发送端通过改变数据包的内容来模拟接收信号的波形或相偏序列

接收端不需要任何修改就可以直接解码其他异构无线信号

从高端无线设备（如Wi-Fi）到低端无线设备（如ZigBee）的跨协议通信链路



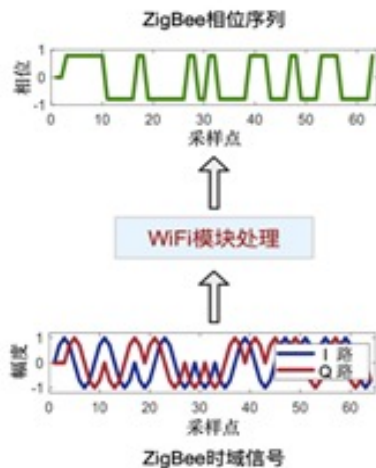
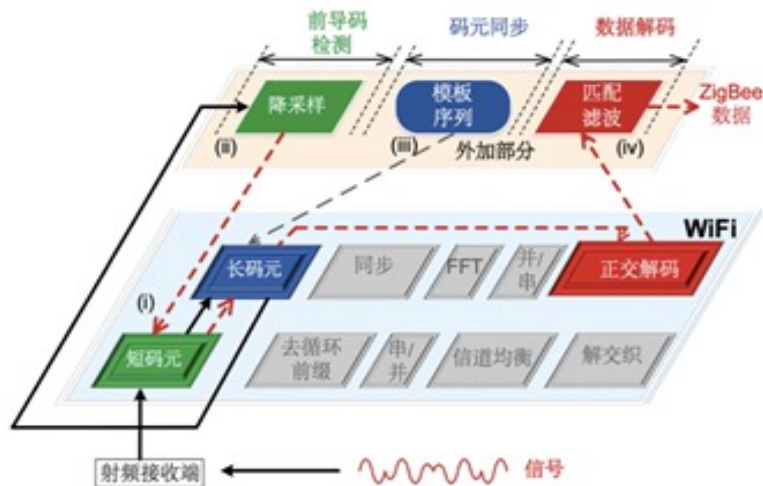


物理层级别的跨协议通信技术

发送端透明的跨协议通信技术

核心思想是交叉映射

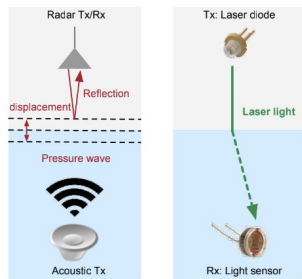
通过发送端信号和接收端解码出的信号之间的映射关系，实现跨协议信息的传输和解码



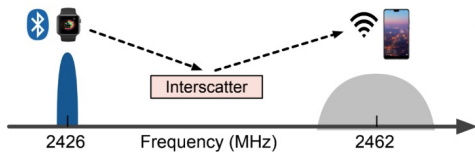


未来展望

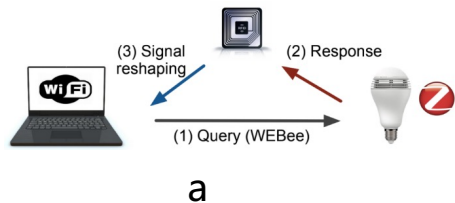
跨介质的通信传输



跨频率的通信传输



跨网络的通信传输



C

b

a





课程实验——截止日期：11月11日晚23:59

- 提交方式：<https://selearning.nju.edu.cn/>（教学支持系统）

教学支持系统

课程

- 2024 Fall
 - 本科生一年级
 - 本科生二年级
 - 本科生三年级
 - 本科生四年级
 - 研究生一年级
 - 智能软件与工程学院

物联网应用软件开发-智软院

教师: 殷亚凤

实验

实验一: 定位算法

实验二: 智能家电控制

实验二：智能家电控制

请根据10月28日的实验课程内容提交：

—实验报告（实验内容、网络拓扑截图、智能设备控制截图）
—代码

请将上述内容打包提交，其中实验报告4-6页。

- 命名：学号+姓名+实验*。
- 提交：文件打包，提交ZIP压缩文件。



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