

IMT-2020(5G)推进组 频谱共享专题组技术报告

技术报告
Technical Report

版权声明 Copyright Notification

本文档由IMT-2020(5G)推进组频谱共享专题组成员单位起草

未经许可 禁止打印、复制及通过任何媒体传播

© 2015 IMT-2020推进组版权所有

目 录

1.引言.....	3
2.总体方案.....	3
2.1 多运营商频谱共享.....	3
2.1.1 集中式方案	3
2.1.2 分布式方案	6
2.2 运营商内频谱共享.....	8
2.2.1 原频谱使用系统改造成本大.....	8
2.2.2 原频谱使用系统改造成本小.....	9
3.关键技术研究与评估.....	10
3.1 高层技术.....	10
3.1.1 不同系统架构的频谱共享策略.....	10
3.1.2 关键技术和问题	10
3.2 物理层技术.....	35
3.2.1 关键技术	35
3.3 数据库技术.....	41
3.3.1 非 IMT 频段数据库	41
3.3.2 IMT 频段数据库	43
3.4 干扰处理技术.....	45
3.4.1 干扰的定义	45
3.4.2 干扰场景	45
3.4.3 干扰管理技术	49
3.5 射频技术.....	76
3.5.1 射频挑战和候选方案	76
3.5.2 研究进展	77
3.5.3 RF 设计	78
4. 总结.....	79
5. 缩写词.....	81
6. 参考文献.....	82

1. 引言

本报告是在《频谱共享需求分析和应用场景报告》的基础上，基于频谱共享技术的重点应用场景，给出总体方案，并对关键技术展开深入研究与评估，具体关键技术包括：高层技术、物理层技术、干扰处理技术、射频技术等。

本报告作为频谱共享专题组的 2 份报告之一，为技术组的后续工作方向决策与方案制定提供参考，为 5G 的技术推进和标准化奠定理论基础。

2. 总体方案

本章基于频谱共享技术的重点应用场景，给出总体技术方案，主要包括系统的架构、接口、功能模块、工作流程等。为下一章的各功能单元的关键技术设计提供基础。

2.1 多运营商频谱共享

2.1.1 集中式方案

2.1.1.1 架构与接口

在集中式方案中，需要增加高级管理节点，位于网络架构各频谱共享者之上，实现频谱的需求管理、频谱池维护管理、干扰处理、频谱分配决策、频谱回收等。

在多个运营商采用同等级频谱共享方式时（co-primary sharing），该共享方式的可能共享方案包括共享频谱池和租赁等。为了尽量降低运营商间相互干扰，有效部署站点并提升频谱实际使用效率，考虑设置频谱高级管理节点，该节点统一管理分配运营商共享的频谱资源，运营商的 OAM 与高级管理节点进行连接与信息交互，运营商站点的中心频点能够灵活更改，实现频谱的动态使用。

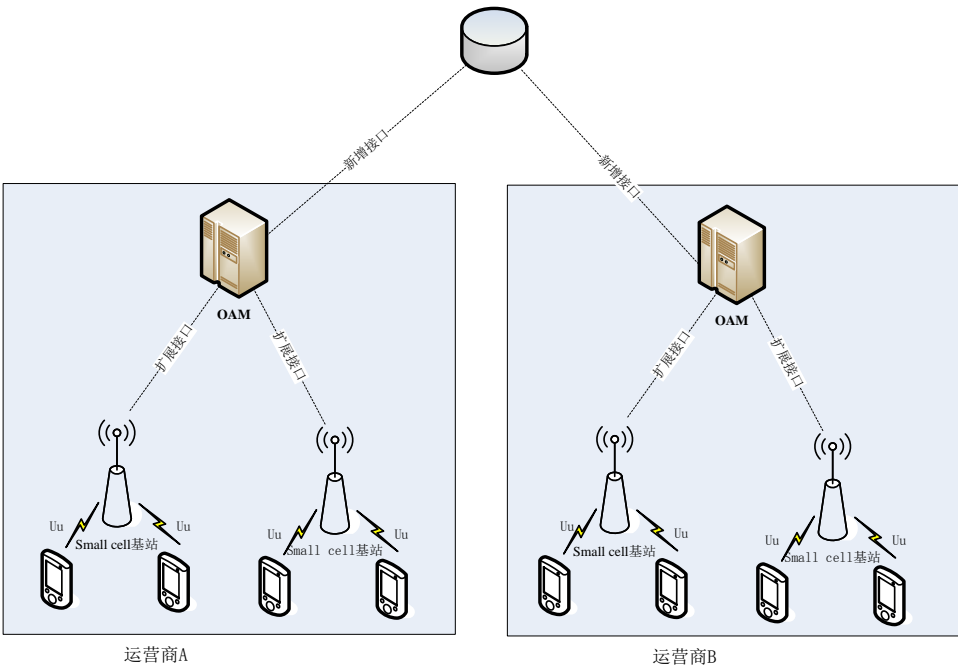


图 2-1 频谱共享集中式架构示意图

在上述架构中与现有 IMT 接口的差异在于:高级管理节点和运营商 OAM 间新增接口,运营商 OAM 与基站之间扩展接口。

在各网络节点中,主要功能如下:

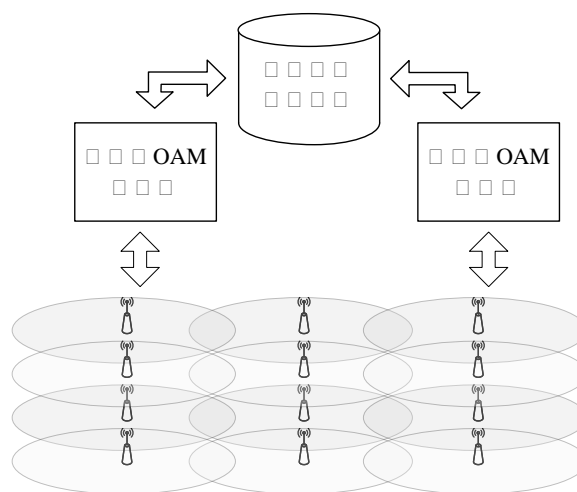
- 新增的高级管理节点:维护管理频谱池的使用状况,获取运营商的频谱需求申请,频谱的分配决策,分配结果的通知等。
- 运营商 OAM:汇总各基站的需求和其它测量参数等上报,接收来自高级管理节点的频谱分配结果,在基站间进行资源分配等。
- 运营商基站:频谱需求统计与上报,接收频谱分配结果,根据更新后的频谱资源进行重配置等。

对于其它频谱共享场景,集中式架构与上图基本相似,只是需要根据各自场景的网络节点设置情况,替换图中相应位置的节点。

2.1.1.2 工作流程

对于上述多运营商频谱共享的场景,根据高级管理节点的频谱分配是针对每个基站的还是针对运营商全部基站的大段频谱,可以区分为两个 case 及各自的工作流程,如下的工作流程对于室内外场景和不同站型,都是通用的。具体如下:

- 高级管理节点能够管控运营商级别的频谱资源,不参与管理每个运营商内的站点频率分配。



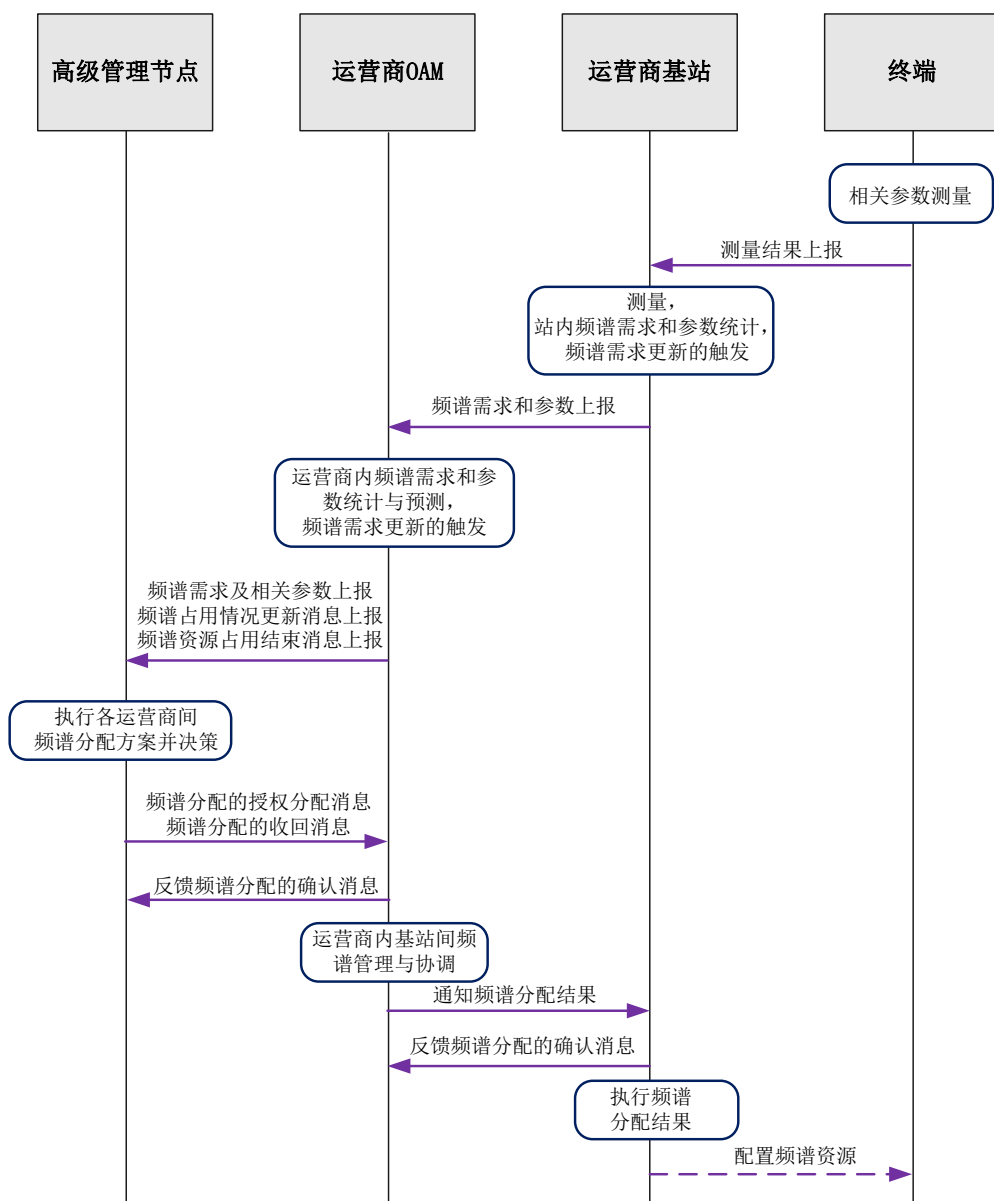
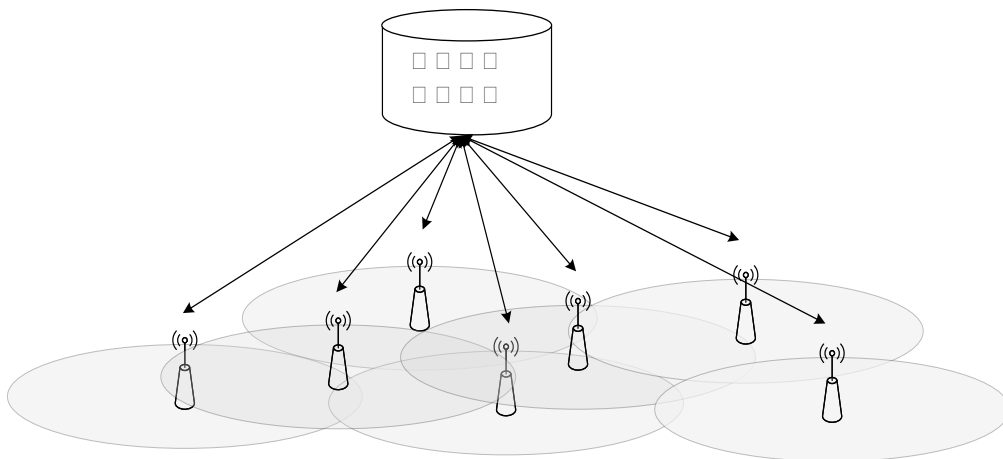


图 2 - 2 管控到运营商级别的集中式频谱共享工作流程

- 高级管理节点能够管控到运营商的每个站点级别的频谱资源。



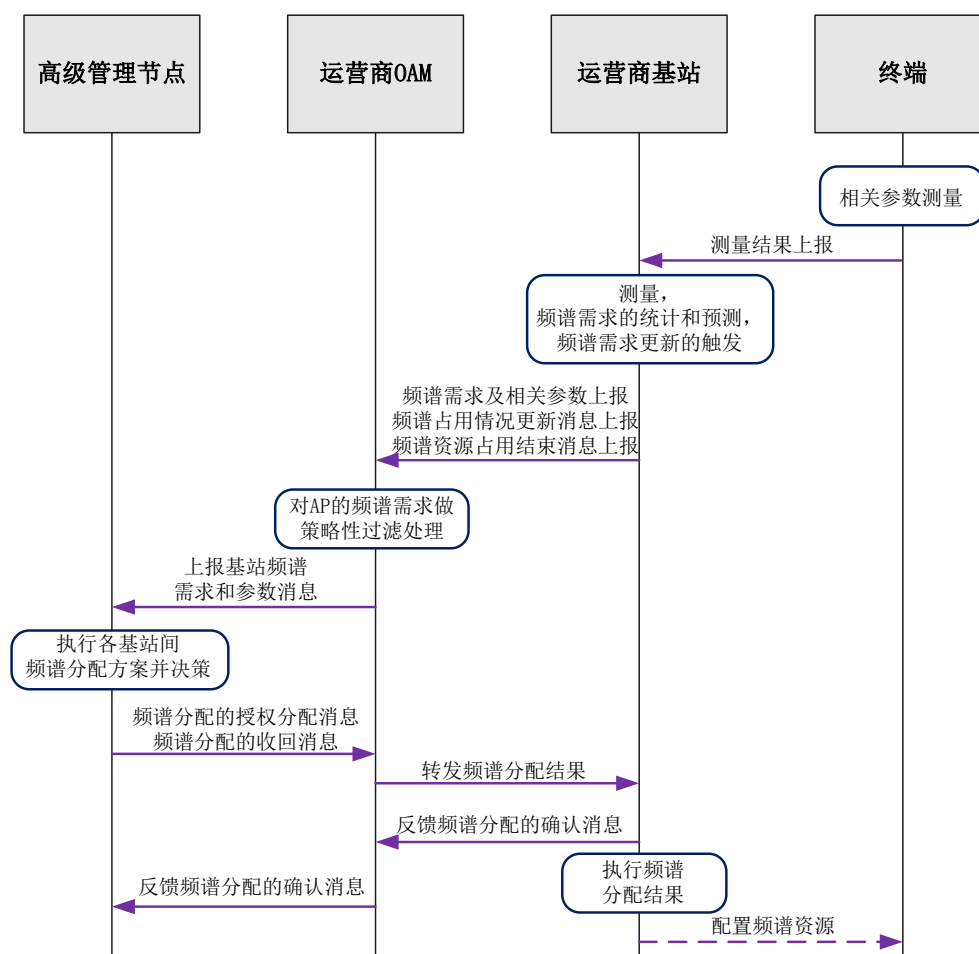


图 2-3 管控到站点级别的集中式频谱共享工作流程

2.1.2 分布式方案

2.1.2.1 架构与接口

与集中式架构不同，在分布式架构中不设置新增的高层管理节点，而是在频谱共享者之间进行信息交互，包括：频谱请求、频谱占用情况、负载情况、信号特性等消息，实现竞争或协商的频谱共享。

不同运营商的业务需求在时间、空间和频率上分布不均匀、QoS 需求多样化且差异较大，同优先级频谱共享允许多运营商的小小区根据特定的规则以相同的优先级共享频谱，使各运营商更加高效、灵活、动态地接入频谱，从而解决传统频谱规划不能较好地匹配频谱资源和业务分布的问题。集中式跨运营商频谱共享架构下运营商之间不能直接进行通信，而必须要通过第三方的频谱管理高级节点来进行信息采集和处理，在未来的通信架构中，随着运营商对频谱共享的程度加深，不排除运营商之间存在通信接口的可能性，这里将分布式跨运营商频谱共享架构作为另外一种选项。下图是多运营商频谱共享的分布式系统架构，为简便起见，以两个运营商即运营商 A（OP_A）和运营商 B（OP_B）为例进行说明。每个运营商配置一个频谱控制器（Spectrum controller, SC）实体，该实体可以单独是一个独立的物理实体，也可以是集成在其他物理实体中的一个功能模块，如 OAM。在运营商的频谱控制器之间定义一个通信接口，多运营商可以通过该接口来交互信息，并对频谱共享规则进行协商，从而达到公平、有效地共享频谱资源的目的。

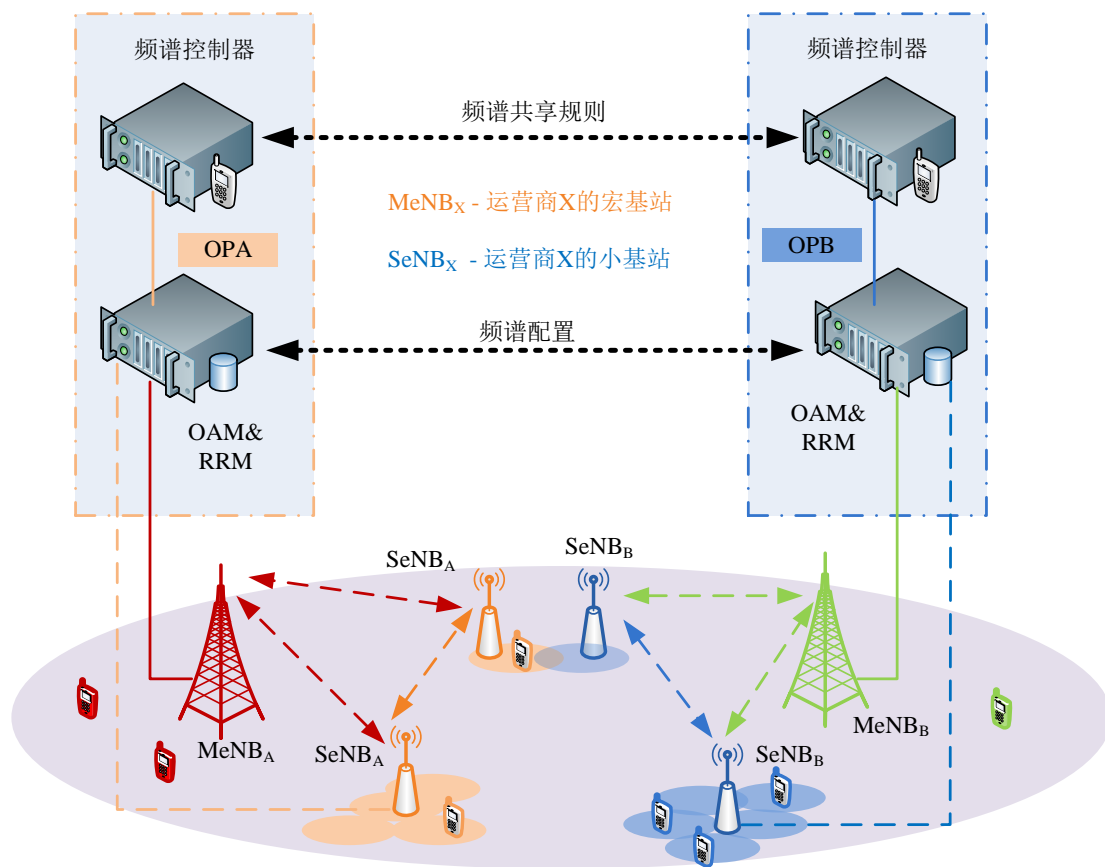


图 2 - 4 频谱共享分布式架构示意图

2.1.2.2 工作流程

针对分布式多运营商频谱共享架构，运营商之间可以通过跨运营商共享接口来交互信息，但是由于运营商之间的竞争关系，不会也不愿意交互较为细节的敏感信息。因此，可以在运营商之间传递一些模糊信息，该模糊信息是通过各运营商的频谱控制器对所辖的所有基站信息进行统计得到的。相应的工作流程如下图所示。

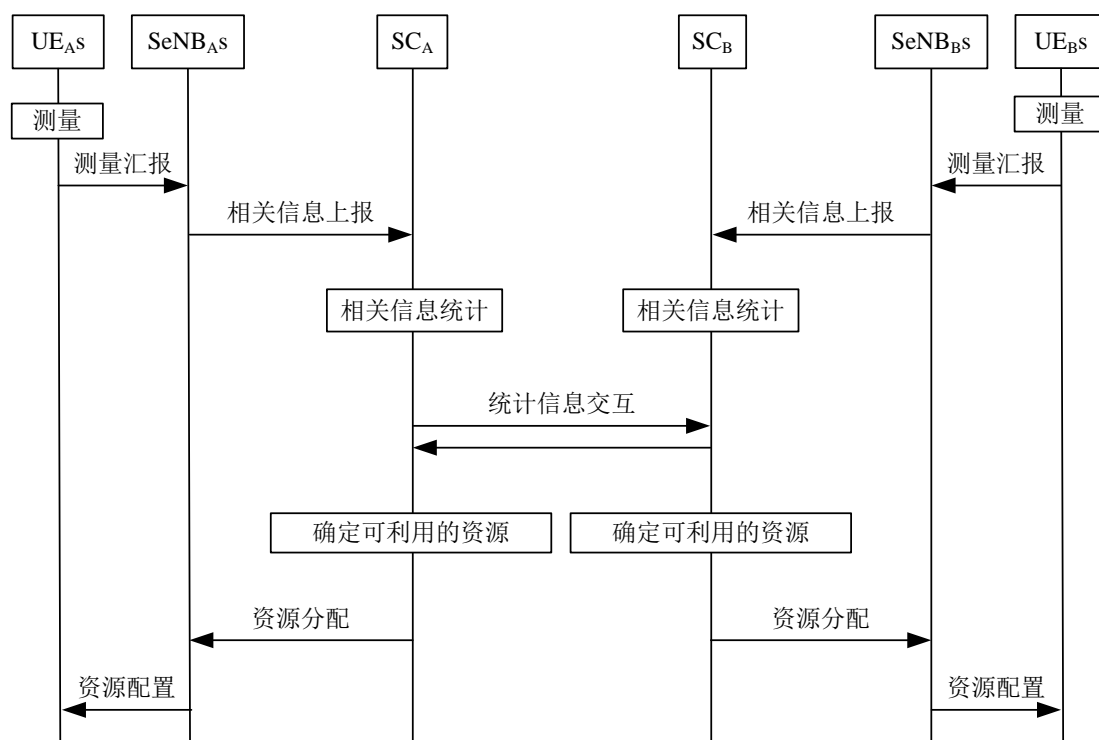


图 2 - 5 分布式多运营商频谱共享工作流程

具体的工作流程步骤如下：

- (1) 终端对服务基站的相关信息进行测量；
- (2) 终端将相关信息以测量汇报的方式发送给服务基站；
- (3) 各基站将搜集到的相关信息上报给频谱控制器，其中相关信息可能包含业务负载、资源配置、频谱需求等；
- (4) 频谱控制器根据搜集到的各基站的相关信息进行统计，得到本运营商的频谱需求信息；
- (5) 不同运营商的频谱控制器交互统计信息；
- (6) 各运营商的频谱控制器根据其他运营商的统计信息来计算可用的资源，如频谱、功率等；
- (7) 频谱控制器给所辖的基站分配资源；
- (8) 基站给用户进行资源配置。

2.2 运营商内频谱共享

从总体来说，运营商内频谱共享方案需要综合考虑技术可行性、改造成本、共享效率与性能、运维难度等多种因素。同时，由于运营商内部多系统大多采用共站方式建设，网络拓扑具有较大相似性，且无须严格考虑网间隐私屏蔽等问题，因此为运营商内频谱共享方案设计提供了良好的网络基础。

2.2.1 原频谱使用系统改造成本大

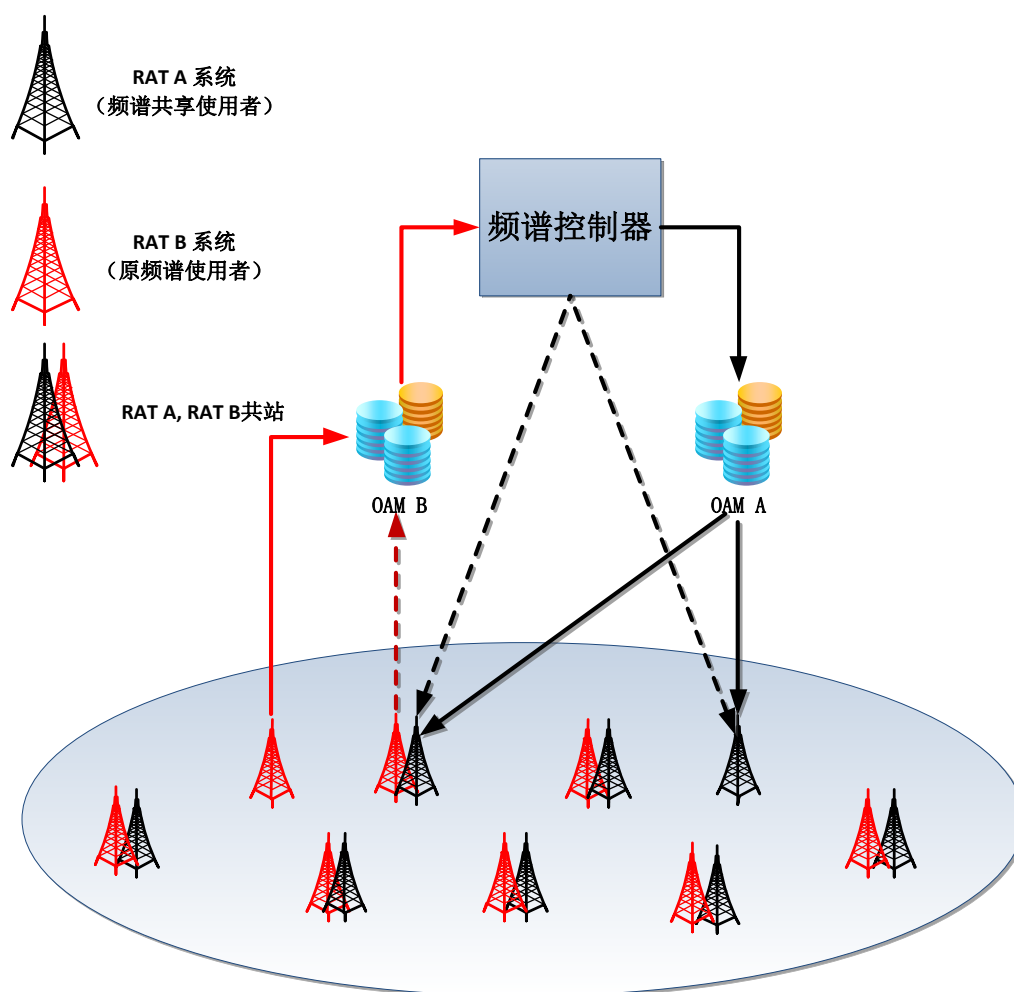


图 2-6 运营商内 RAT 间的频谱共享

- Intra-OP 频谱共享技术方案（1）

RAT B → RAT B 系统 OAM → 频谱控制器 → RAT A 系统 OAM → RAT A

RAT B 通过 RAT B OAM 系统收集并上报频谱使用情况，并接受频谱控制器协调，规范 RAT B 频谱使用（RAT B 改动小）。

频谱控制器通过 RAT A OAM 进行 RAT A 频谱管理协同（频谱共享效率低，RAT A 改动较小）。

- Intra-OP 频谱共享技术方案（2）

RAT B → RAT B 系统 OAM → 频谱控制器 → RAT A

RAT B 通过 RAT B OAM 系统收集并上报频谱使用情况，并接受频谱控制器协调，规范 RAT B 频谱使用（RAT B 改动小）。

频谱控制器直接下发 RAT A 基站相关频谱共享指令信息（效率高，需要对 RAT A BS 进行增强）。

2.2.2 原频谱使用系统改造成本小

- Intra-OP 频谱共享技术方案（3）

RAT A 与 RAT B 共站场景可以直接通过频谱控制器管理和协调共享频谱，流程为：

RAT B → 控制器 → RAT A

对比上述的运营商内共享方案，优缺点如下表：

技术方案	优点	缺点
技术方案 1	对 RAT B 和 RAT A 改动小	共享效率较低
技术方案 2	RAT B 改动小，效率高	需要对 RAT-A 基站进行增强
技术方案 3	共享效率最高	对 RAT B 和 RAT A 改动大

3. 关键技术与评估

3.1 高层技术

高层技术主要包括在 MAC 层和 RRM 层等物理层以上的动态频谱共享管理与分配。动态频谱共享导致了频谱资源的动态变化和多优先级网络共存，使得无线通信系统的传输和管理面临新的技术挑战。频谱感知、频谱管理、业务 QoS 保障等是频谱资源共享无线通信研究领域竞相突破的核心关键技术。

3.1.1 不同系统架构的频谱共享策略

频谱共享策略的设计是依托于不同的系统架构，主要包括集中式、分布式、混合式架构。

- 对于集中式架构，需要设立高级管理者，各共享系统接入该管理者，通过新定义的接口交互当前频谱使用状况信息、各共享系统对频谱的需求信息、频谱授权配置决策结果信息等。在该架构下，需要定义高级管理者在频谱分配和共享中的功能，设计频谱分配和共享功能的承载实体，据此明确新增的高层节点与各共享系统间接口负责承载的消息，制定共享频段的频谱分配方案和干扰处理方案。
- 对于分布式架构，不需要设立高级管理者，各共享系统间新增接口，交互各共享系统对频谱的需求信息、各共享系统实际的频谱占用情况和发射参数信息、频谱退让的相关信息等。在该架构下，设计新增的各共享系统间接口负责承载的消息，制定共享频段的频谱的竞争和协作共享方案，以及干扰处理方案。
- 对于混合式架构，需要结合上面两种架构下的结果，从网络结构、功能单元、接口和消息承载等方面，进行联合设计，并据此设计综合性能更加优化的频谱共享分配方案。

3.1.2 关键技术和问题

3.1.2.1 频谱感知

频谱感知是发现可用频谱资源的基本技术手段，是实现动态频谱共享的核心关键技术之一。

频谱感知的目标是检测频谱机会和授权用户(即主用户)的信号，当频谱机会被检测到，非授权用户就可使用这段暂时空闲的频谱。介于非授权用户的低优先级，非授权用户必须及时检测到授权用户的出现来避免对授权用户的干扰，在检测到授权用户到达后及时进行频谱

切换或减小传输功率。

3.1.2.2 动态频谱共享管理与分配

为了在保护频谱授权用户不受有害干扰的同时，充分利用动态变化的频谱资源，动态频谱共享无线通信系统需要兼顾网络架构和频谱特性，采用新型的资源管理技术。

另外由于空闲频谱资源有限，共享频谱用户之间需要竞争使用这些资源，且不同用户的优先级、QoS 要求都不一样，所以网络需要在保证优先级高的用户先得到服务的同时也要保证频谱资源不会被某些用户独占，即网络需要公平而有效地管理空闲频谱资源。因此，空闲频谱分配的主要目的就是根据用户的优先级、QoS 等要求，公平而有效地分配一定数量的频谱资源，使得网络性能得到改善或逼近于最优状态。

3.1.2.2.1 频谱管理

频谱管理是在检测到的频谱空洞差异性大且分布离散的情况下,为不同用户更合理地分配最佳的频谱,从而尽可能多地提升频谱利用率。频谱分析是频谱管理的一个重要阶段,根据授权用户占用情况、路径损耗及干扰等参数分析频谱机会。频谱管理的另一个重要阶段是频谱判断,非授权用户利用频谱分析的结果为自己选择最佳工作频段。

3.1.2.2.1.1 同一热点区域的多运营商小站混合部署频谱共享

本节针对在同一热点区域的多运营商小站混合部署场景，给出集中式架构的总体方案设计，供后续的重点场景论证与关键技术研究。系统架构示意图如下，即执行频谱管理的高级节点设备具有能直接管控多运营商小站的频谱分配能力，这样能够做到精细化准确化，更好地做到干扰管理，满足该热点区域用户对网络接入的需求。

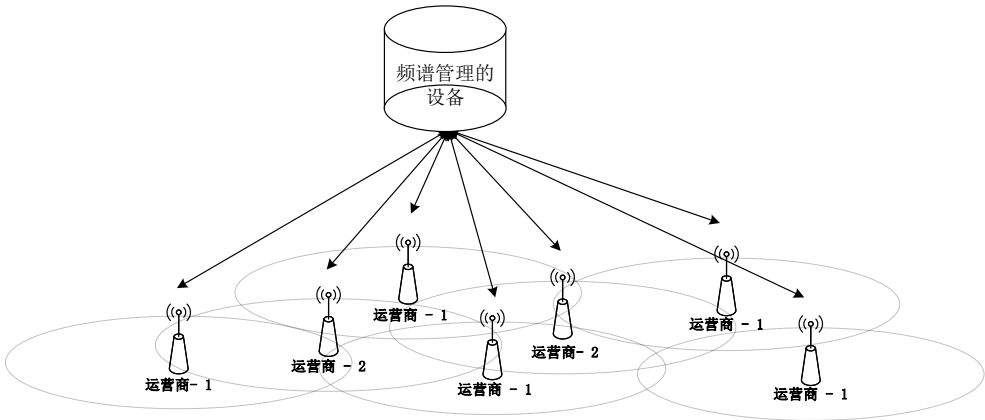


图 3-1 同一热点区域的多运营商小站混合部署场景

从频谱管理和分配功能来看，可制定如下的信息参数输入与输出。

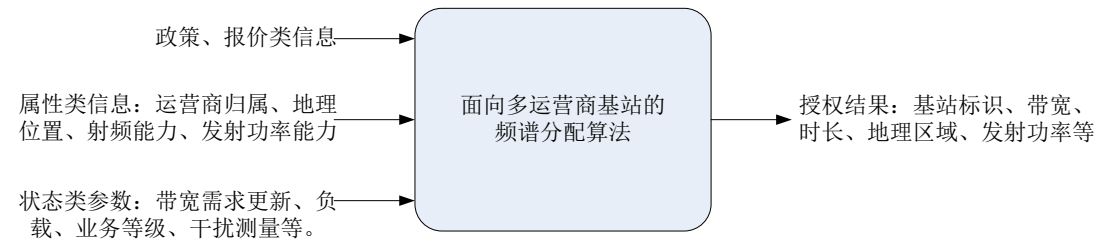


图 3-2 信息参数的输入输出

- 1) 当有基站提出初始接入网络请求、或基站提出改变工作带宽请求、或高级管理节点认为基站的带宽增减和开关等导致需要更新邻区关系表时、到达固定的周期时，启动基站的测量上报。
- 2) 基站之间的检测，获取邻近小区的相关信息(运营商归属、干扰强度、工作频点等)，将检测结果、自身能力(射频能力)、频谱带宽需求(可根据当前业务占用资源进行估算)、负载情况、业务等级等信息，经由运营商的网管设备上报给高级管理节点。
- 3) 高级管理节点为各运营商基站分配共享频谱资源，具体步骤为

- a) 确定基站的可能工作带宽，即：{满足基站上报需求的带宽，次最优带宽，……}
- b) 确定置信度因子、报价因子、公平性因子。通过这些因子调整 a) 中的工作带宽，得到实际待分配的可能工作带宽值。

置信度因子根据为该基站分配频谱的真实使用状况信息获得，例如，该因子=上一次基站的实际流量/上报负载，

公平性因子根据该基站分配频谱的历史信息，例如，该因子=历史上若干次实际分配的带宽平均值/历史上若干次带宽需求的平均值，

报价因子根据该基站所属运营商对实际带宽占用情况的费用信息，例如，该因子=对带宽需求的总报价/总的带宽需求。

- c) 确定频谱池中可用总资源中的不可选频谱。其中不可选频谱主要根据运营商间不同步所需的保护带、与同覆盖或邻区共存所需的隔离带宽等来获得。
- d) 建立邻区干扰关系，并确定各基站的频谱使用优先级。

在建立邻区干扰关系时，可根据基站测量上报的干扰强度值来确定每个基站与邻区的关系，例如邻区关系、不同运营商基站间的同覆盖关系。

在确定各基站的频谱使用优先级时，在频谱池可用资源中划分频谱单元(可根据基站的工作带宽为粒度)，统计基站在每个频谱单元上测量出其它基站的总干扰。依据干扰由小至大，确定出对基站来说频谱单元的优先级由高至低。

其中，统计每个频谱单元干扰时，需要根据邻区关系表，当该频谱单元上存在同覆盖小区时，将该频谱单元设置为干扰无穷大。当该频谱单元上均为邻区关系时，统计来自这些邻区的干扰。

- e) 根据 c) 在频谱池的可用资源中，以 a) 和 b) 确定的实际待分配工作带宽值作为窗口，进行滑动选择。如找不到满足基站上报需求的带宽对应的频谱时，则以次最优带宽对应的窗口大小去滑动选择，依此类推。如选择出多个可用频谱，则按 d) 将优先级最高的总干扰最小的频谱分配给基站。

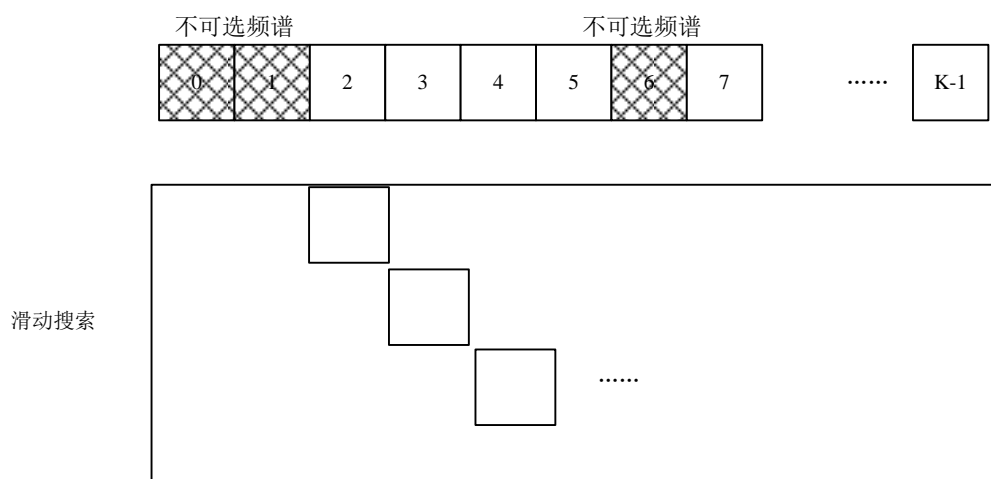


图 3 - 3 滑动搜索可用频谱示意图

- 4) 高级管理节点将频谱分配结果经由运营商的网管设备通知给各基站, 各基站依照分配结果配置小区资源。

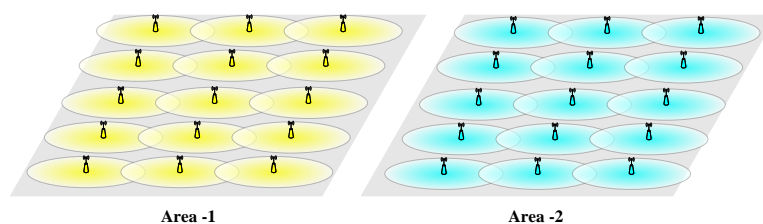
3.1.2.2.1.2 不同覆盖地理区域时多运营商站点级别的频谱共享

上节是对于多运营商间频谱共享场景提出了针对覆盖同一热点区域的频谱共享和分配方案, 并且是基于集中式管理架构。本节针对多运营商覆盖不同地理位置区域的情况, 仍然基于集中式系统架构, 设计了相应的频谱共享方案。

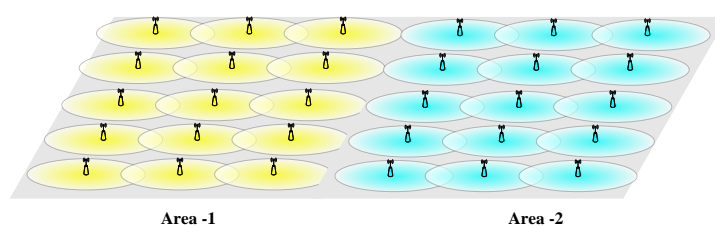
本节方案设计所依托的工作假设为: 多运营商间通过新增的高级管理节点, 形成集中式架构, 并且高级管理节点能够管控到每个运营商的基站级别的频谱资源。

与多运营商覆盖相同热点区域不同, 对于多个运营商的基站间共享频谱资源覆盖不同的地理区域, 根据各种覆盖情况区分以下几种示意图:

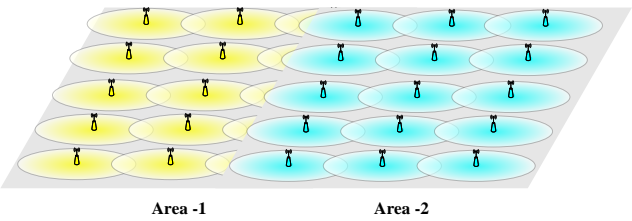
- 运营商间的覆盖区域间隔很远



- 运营商间的覆盖区域邻近



- 运营商间的覆盖区域有部分重叠



- 当运营商间是宏站和小站的覆盖关系时，则上述 3 个图将变换为下图的示意：

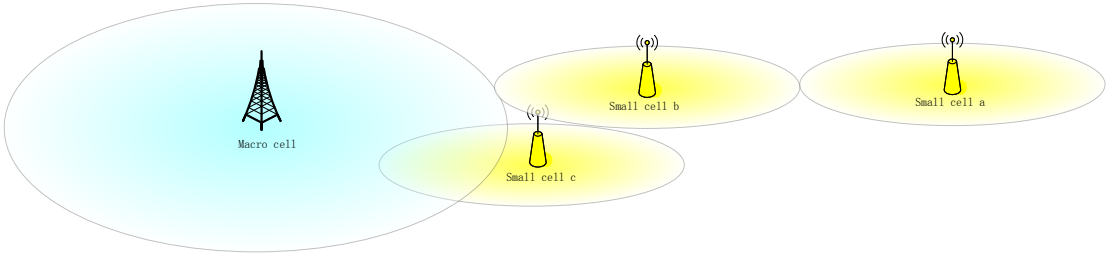


图 3-4 不同覆盖地理区域的多运营商站点频谱共享场景

- (1) 高级管理节点确定划分基站类别所需的预设条件。设置第一距离和第二距离。距离值满足：

- a) 满足站点间距离大于等于第一距离的两个基站，即通常远大于两个站点覆盖半径之和，使用相同工作频率，此时基站间的相互干扰的功率密度约等于噪声。



图 3-5 站点间距离大于等于第一距离的两个基站

- b) 满足站点间距离小于第一距离、且大于等于第二距离的两个基站，即通常略大于两个站点覆盖半径之和，使用邻近频率工作，此时来自一个基站发射信号泄露到另一个基站工作频带内，形成干扰，该干扰的功率密度约等于噪声。

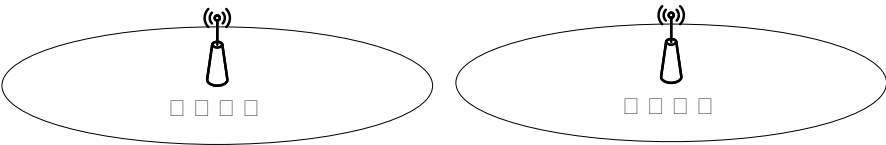


图 3-6 站点间距离小于第一距离、且大于等于第二距离的两个基站

- c) 满足站点间距离小于第二距离的两个基站，即通常小于等于两个站点覆盖半径之和，使用较远频率工作，使得基站间的泄露干扰功率密度约等于噪声。

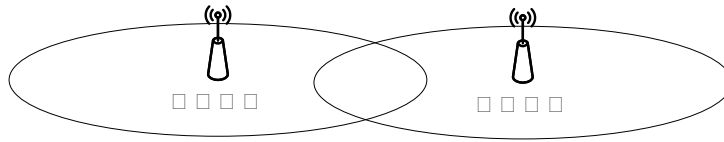


图 3-7 站点间距离小于第二距离的两个基站

- (2) 高级管理节点预先存储或者根据上报的各运营商站点位置信息，依据预设条件，将运营商的基站分为 3 类。其中：
- A 类基站：符合上述条件 a)，基站间相互间隔远，可认为满足同频覆盖条件。
 - B 类基站：符合上述条件 b)，基站间地理位置相邻，根据相互间地理隔离情况，可考虑进行邻频共存。
 - C 类基站：符合上述条件 c)，基站位于部分重叠的区域，这里包含了近似同覆盖和邻近覆盖。
- (3) 高级管理节点接收运营商基站的频谱需求信息，并确定多运营商的基站间关系
- 各基站上报自身地理位置，以及频谱带宽需求、自身射频能力等信息。
 - 高级管理节点统计并分析全部基站位置(包括已部署基站和提出频谱需求的基站)，划分 A、B、C 三类基站。
- (4) 高级管理节点对各类基站确定可用频谱范围
- 对 A 类基站，所有频谱均可用
 - 对 B 类基站，统计每个 B 类基站与周边 B 类基站的地理隔离距离，然后确定每个 B 类基站在最小地理隔离距离（周边多个 B 类基站与该基站的距离是不同的，选择最小的距离，则对应最大的频谱隔离）情况下所对应的频率隔离度，那么满足频谱隔离度的频谱即为可用频谱。需要注意的是，因为周边 B 类基站可能包括宏站和小站，虽然宏站与当前站的地理隔离较远，但宏站的发射功率大，因此也可能需要较大的频谱隔离。所以，对周边站要区分宏站和小站来处理。
 - 对 C 类基站，高级管理节点接收 C 类基站的邻区干扰测量上报，统计在每个频谱基准单元上的总干扰情况，然后为 C 类基站选择总干扰较小的频谱作为可用频谱。频谱基准单元可以等于 C 类基站的射频带宽能力。
- (5) 高级管理节点对各运营商的基站进行频谱分配
- 对每个运营商的层面，综合其三类基站的可用频谱。高级管理节点为每个运营商的基站分配频谱结果，该结果中可以包含与其它运营商相同或邻近的频谱，这取决于该运营商中包含的基站类别。
 - 为每个运营商中的每个待分配的基站分配频谱时，首要满足基站类别所对应的可用频谱范围，其中各类基站的可用频谱范围是 A 类>B 类>C 类。那么，
 - 先为全部待分配的基站分配频谱资源 C。
 - 再为 A 类基站和 B 类基站分配频谱资源 (B-C)。

■ 最后为 A 类基站分配频谱资源 (A-B)。

以上的具体分配方式都可以根据各基站上报的邻区干扰测量结果,在可用频谱资源上以基站上报的带宽需求为单位,统计各单位长度的频谱上干扰强度,并为每个基站选择具有最小干扰强度的满足带宽需求的可用频谱。

如果无法满足,则高级管理节点降低基站上报需求的带宽,例如该基站射频能力可以支持{B1, B2, B3},且 $B1 > B2 > B3$,本次上报需求 B1 无法满足,高级管理节点将按照 B2 为该基站再次选择空闲频谱,当最终所有射频能力所支持的带宽都无法满足时,则拒绝基站的请求。

● 将频谱分配结果以信令消息发送给运营商各基站。

下面对上述方案进行距离说明。

对于上报需求的运营商基站,划分出了三类基站的集合: A 类基站、B 类基站、C 类基站。比如,下图中,设 macro cell 站点归属运营商 1, small cell 站点归属运营商 2。以 marco cell 站点为参考,且设 macro cell 站点与 small cell a 的间距满足大于等于第一距离(步骤(1) a)),macro cell 站点与 small cell b 的间距满足小于第一距离、且大于等于第二距离(步骤(1) b)), macro cell 站点与 small cell c 的间距满足小于第二距离(步骤(1) c))。

那么此时,可以得到的基站类别划分结果为:在以 marco cell 站点为参考时, small cell a 为 A 类基站, small cell b 为 B 类基站, small cell c 为 C 类基站。

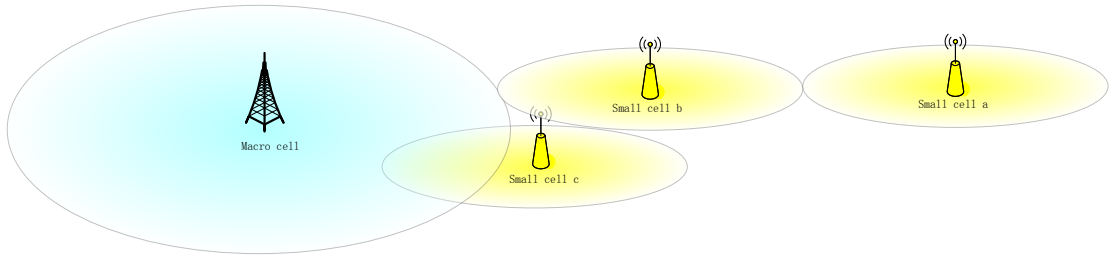


图 3-8 两个运营商的宏站和小站位置示意图

再设各站点上报的频谱带宽需求为: marco cell 站点为 M_a Hz, small cell a 为 S_a Hz, small cell b 为 S_b Hz, small cell c 为 S_c Hz。且总可用带宽资源 B Hz 满足上述各站点带宽需求。

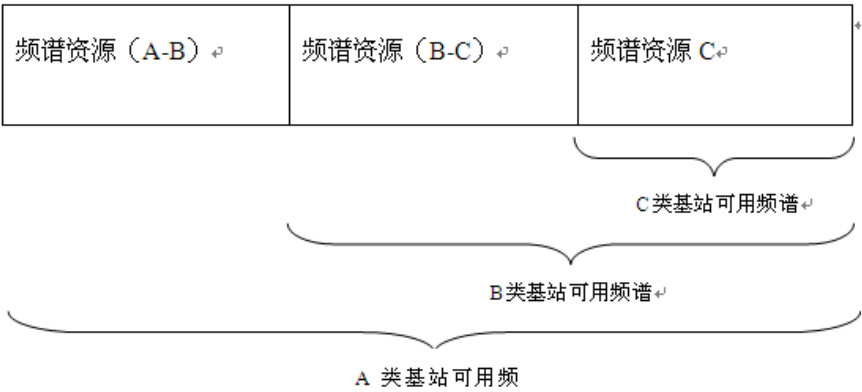


图 3-9 不同类别基站的可用高频谱选择

在总可用带宽 B 中，由 C 类站点 small cell c 进行邻区干扰测量，在可用资源 B Hz 内以 S_c Hz 为单位，统计各单位带宽长度的频谱上干扰强度，选择具有最小干扰强度的带宽 S_c Hz，并将这个带宽作为频谱资源 C ，分配给 small cell c 。

再由 B 类站点 small cell b 进行邻区干扰测量，在可用资源 B Hz 内除掉 S_c Hz 之外的频谱上，以 $(S_b - S_c)$ Hz 为单位，统计各单位带宽长度的频谱上干扰强度，选择具有最小干扰强度的带宽 $(S_b - S_c)$ Hz，将这个带宽作为频谱资源 $(B - C)$ ，连同频谱资源 C 一同分配给 B 类站点 small cell b 。

最后，由于 A 类站点之间可以同频工作，因此在可用带宽内除掉频谱资源 $(B - C)$ 和频谱资源 C 之外的剩余部分 $(B - S_b)$ Hz 上，不需测量，任意为 small cell a 选择带宽为 $(S_a - S_b)$ Hz，作为频谱资源 $(A - B)$ ，连同频谱资源 $(B - C)$ 和频谱资源 C 一同分配给 A 类站点 small cell a 。

经过上述分配，实现了频谱资源的最优化利用，即各个 small cell 站点间最大程度复用频谱资源，同时在同一运营商内可以通过同频组网避免各站点间的干扰。另外，还能满足与另一运营商站点 macro cell 之间的共存。

3.1.2.2.1.3 不同覆盖地理区域时多运营商级别的频谱共享

本节仍是针对多运营商覆盖不同地理位置区域的情况，基于集中式系统架构，设计了另外一种频谱共享方案，假设前提是高级管理节点只能够管控到运营商级别的频谱资源。

本节中的方案设计所依托的工作假设为：多运营商间通过新增的高级管理节点，形成集中式架构，并且高级管理节点能够管控到每个运营商级别的频谱资源，不能直接管控基站。各网络节点连接示意图如下：

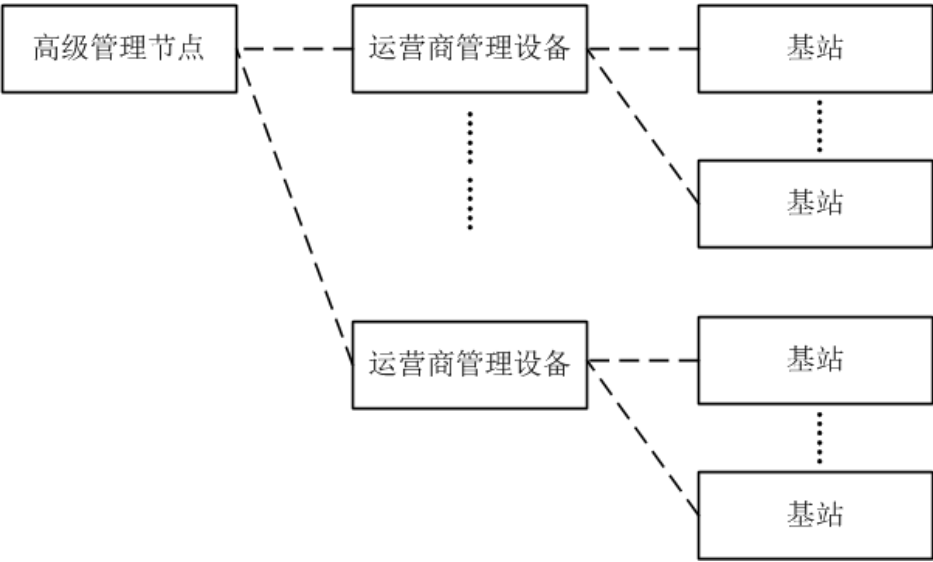


图 3 - 10 多运营商级别的集中式频谱共享网络节点连接示意图

- (1) 各运营商向高级管理节点上报覆盖区域信息、频谱带宽需求信息、自身射频能力等级等。其中，
 - 覆盖区域信息可以是地理位置坐标集合，该集合中包含了运营商连续覆盖区域内所有基站中最边缘的站点位置。

例如下图的连续覆盖区域，运营商上报的覆盖区域信息包括边缘站点 1、2、3、4、5、8、9、12、13、14、15、16 的地理位置信息，而覆盖区域中间站点位置信息不强制要求上报。

站点 1	站点 2	站点 3	站点 4
站点 5	站点 6	站点 7	站点 8
站点 9	站点 10	站点 11	站点 12
站点 13	站点 14	站点 15	站点 16

图 3 - 11 运营商站点的地理位置分布示意图

- (2) 高级管理节点根据预设距离值和 (1) 中上报的信息，确定运营商覆盖区域间的位置关系。其中，
- 确定运营商覆盖区域的位置关系，计算运营商 A 的每个边缘站点与运营商 B 的每个边缘站点间的距离，当最大距离小于等于预设距离值时，执行步骤(3)；当最小距离大于预设距离值时，执行步骤 (4)；当最大距离>预设距离值>最小距离时，执行步骤 (5)。如下图示意。

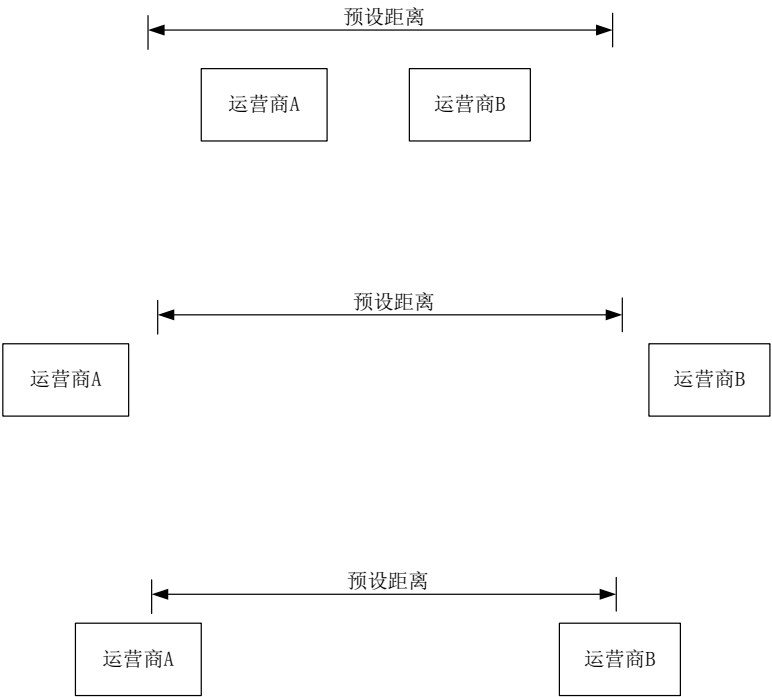


图 3 - 12 运营商覆盖区域相对位置关系示意图

- (3) 高级管理节点对这类运营商分配不同的频谱资源，称为异频部分频谱。其中，异频部分频谱即为运营商分配的频谱资源之间无重叠。
- 当运营商上报的总带宽需求不超过异频部分频谱可用总带宽时，则为每个运营商分配满足其频谱带宽需求的频谱资源。

- 当运营商上报的总带宽需求大于异频部分频谱可用总带宽时，则按各运营商上报需求带宽所占总带宽需求的比例为运营商分配压缩后的频谱资源。如运营商 A 和运营商 B 的总需求大于异频部分频谱可用总带宽，即 $\text{bandA} + \text{bandB} > \text{Band}$ ，则为运营商 A 分配的频谱带宽为 $\text{Band} * \text{bandA} / (\text{bandA} + \text{bandB})$ ，为运营商 B 分配的频谱带宽为 $\text{Band} * \text{bandB} / (\text{bandA} + \text{bandB})$ 。
- (4) 高级管理节点对这类运营商分配相同的频谱资源，称为同频部分频谱。其中，同频部分频谱即为运营商分配的频谱资源可完全重叠。
- 当运营商上报的带宽需求中最大值不超过同频部分频谱可用总带宽时，则为每个运营商分配满足其频谱带宽需求的频谱资源。如：运营商 A 和运营商 B 的带宽需求分别为 bandA 和 bandB ，且 $\text{bandA} < \text{bandB}$ ，则从同频部分频谱可用总带宽中选取带宽为 bandB 的资源，分配给这两个运营商，其中运营商 A 被分配的频谱位于运营商 B 被分配的频谱资源之内。
 - 当有运营商上报的带宽需求大于同频部分频谱可用总带宽时，则为这些运营商分配的带宽就为同频部分频谱可用总带宽。如：同频部分频谱可用总带宽为 Band ，运营商 A 和运营商 B 的带宽需求分别为 bandA 和 bandB ，且 $\text{bandA} < \text{Band} < \text{bandB}$ ，则为运营商 A 分配的频谱带宽为 bandA ，为运营商 B 分配的频谱带宽为 Band 。
- (5) 高级管理节点对这类运营商的覆盖范围划分对应不同频谱资源的区域，不同频谱资源包含同频部分频谱和异频部分频谱。再根据不同区域内各运营商站点集合的频谱需求，执行类似 (3) (4) 的操作，分配异频部分频谱和同频部分频谱。

具体为：

- 高级管理节点根据步骤 (1) 运营商覆盖区域边缘站点位置，可以得知运营商覆盖区域的地理范围。选择运营商 A 的站点 a 和运营商 B 的站点 b，使得站点 a 和站点 b 的距离是最大的，设该距离为 D 。
- 在运营商 A 中，确定距离站点 a 的距离（最远距离 $D - \text{预设距离}$ ）/2 的区域 E1 内站点集合 A1，其余区域 E2 内站点集合为 A2。
- 在运营商 B 中，确定距离站点 b 的距离（最远距离 $D - \text{预设距离}$ ）/2 的区域 F1 内站点集合 B1，其余区域 F2 内站点集合为 B2。
- 高级管理节点将上述所得区域信息通知各运营商，运营商上报不同区域内站点集合的频谱带宽需求。
- 高级管理节点对上述每个区域的站点集合分配频谱资源，具体的：先对区域 E2 的站点集合 A2 和区域 F2 的站点集合 B2，执行类似步骤 (3) 的操作，分配异频部分频谱。再对区域 E1 的站点集合 A1 和区域 F1 的站点集合 B1 进行分配，由于这些区域内的站点距离很远，所以不但可以分配同频部分频谱，也可以分配异频部分频谱。那么，对每个运营商这些区域内的站点集合的总带宽需求，先减去异频部分频谱带宽，然后再对差值所对应的剩余带宽需求执行类似步骤 (4) 的操作，分配同频部分频谱。

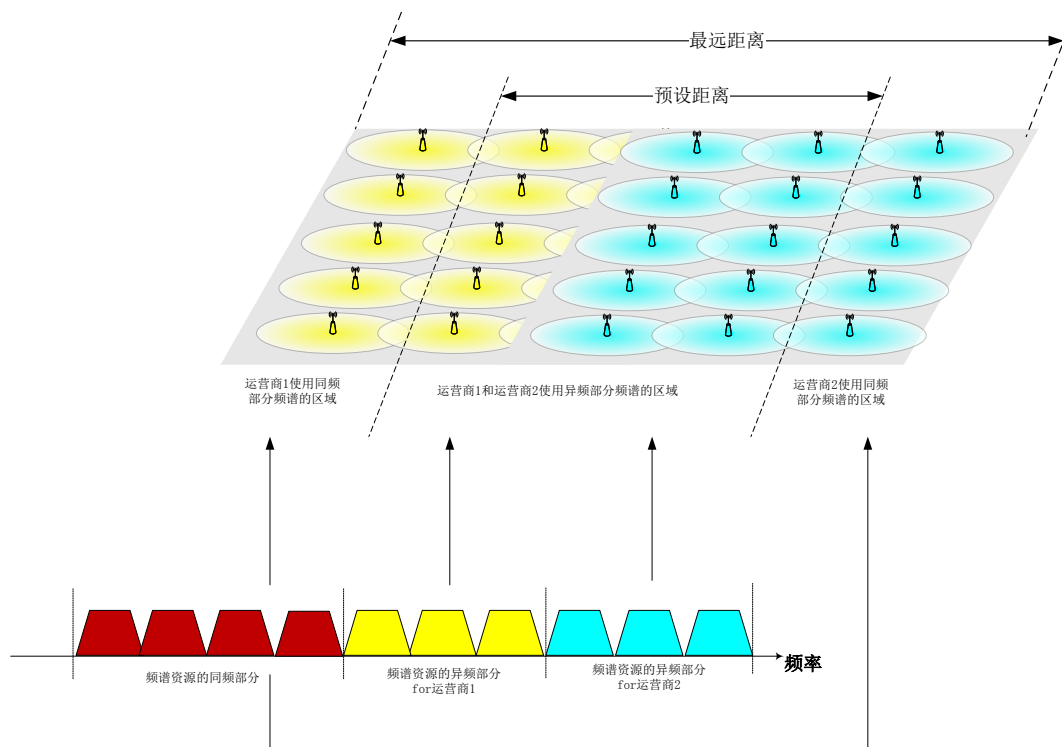


图 3 - 13 基于覆盖区域位置关系的运营商频谱分配

3.1.2.2.1.4 多运营商集中式架构的频谱分配机制

前面给出了多运营商间频谱共享的集中式系统架构与接口设计,并区分了高级管理节点管控能力的不同情况。本节针对多运营商频谱共享的场景,结合了报价、预期性能、公平性等因素,给出集中式架构的分配机制。

在集中式架构中,频谱管理节点是新增的,现今的网络并不存在该节点。该节点连接多个运营商网管和\或基站,接收运营商的频谱申请,管理可用频谱资源池,实现频谱资源的有效分配。

运营商网管和基站,与现有的网络相似,但各节点中需要新增能够支持频谱共享分配的功能单元,以支持该分配机制中的各项能力。

- 1) 频谱管理节点统计当前可用频谱资源,建立频谱资源池,资源池中的频谱可能是非连续的零散的未被使用的。设资源池的频谱总带宽为 $Band_{pool}$ 。
- 2) 设当前各运营商所使用的频谱中心频点为 $f_{n,now}$, 带宽为 $Band_{n,now}$, $n=1, \dots, N$, 其中 N 是运营商的数量。这里,运营商的带宽之间可能存在同频的载波,但此时同频小区的部署是满足一定的隔离度要求的,例如同频小区的地理位置距离满足一定要求,或者传播损耗(包括自由空间传播、室内建筑物的穿透等)满足一定要求。
- 3) 频谱管理节点在各运营商使用所分配频谱资源期间,进行频谱实际使用情况的抽样监控,即周期性或者不定期的下发监督消息,该消息是为了频谱管理节点从运营商的网管和\或基站处获取当前负载、资源占用率、接入网络的用户数等。监督消息

经由频谱管理节点和运营商的网管和\或基站间的接口进行传输。

- 4) 运营商的网管和\或基站接收到 3) 中的监督消息后, 上报自身当前 buffer 业务量、资源占用率、接入用户数等。
- 5) 当有运营商根据网络负荷变化或者固定的变更周期, 而需要更改频谱带宽, 以匹配最新的负载情况时, 运营商向频谱管理节点上报如下信息:

- 频谱申请需求 $Band_{n,new}$, 该需求值可以根据统计系统 buffer 的当前业务量、系统平均资源利用率等估算得到所需频谱带宽。

- 频谱资源的使用报价 $price_{n,new}$, 该报价值是对每个频谱基准单位的报价, 例如每 Hz。

- 6) 频谱管理节点接收到运营商上报信息后, 为各运营商基站分配共享频谱资源
 - f) 如果频谱池中的空闲频谱足够满足所有上报的带宽需求总和, 则依次分配满足各运营商需求的带宽。
 - g) 如果频谱池中的空闲频谱不能满足所有上报的带宽需求总和, 则

- 估算运营商在所申请带宽上的预期性能 T_n , 如预期吞吐量、预期频谱使用效率等。再结合运营商的频谱报价, 确定各运营商的性价函数因子。虽然虚假上报可以短期获得较多频谱, 但却要付出更多的价格代价。性价函数因子可定义为

$$TP_n = f(T_n, price_{n,new}) = T_n \times price_{n,new}$$

其中:

- ◆ 预期吞吐量是基站通过终端对各频点的信道测量上报, 利用现有的调度算法预测将要被调度传输的终端, 并将这些终端上报的在所申请空闲频段上的信道质量映射为可用的最大的调制和编码等级, 进而根据调制和编码等级计算预期的数据速率, 将所申请空闲频段上所有预测要被调度终端的数据速率求和, 作为预期吞吐量。此时需要运营商将预期吞吐量上报给频谱管理节点。

- ◆ 或者, 预期吞吐量利用下式来估算:

$$\text{前一段时间内的平均数据速率} \times \frac{\text{当前所申请的带宽}}{\text{前一段时间内的平均工作带宽}}$$

- ◆ 预期频谱使用效率可以使用前一段时间内平均资源占用率来代替。

- 确定各运营商的频谱分配公平性因子 $Occup_n$, 是运营商的频谱资源占用情况统计值, 该值越大, 表示运营商曾被分配的频谱资源满足其需求的概率越高, 或者表示运营商对频谱基准单位的占用时间越长, 频谱被闲置的

概率越低。

$$\text{例如: } Occup_n = \frac{\sum (\text{前若干次每次实际分配的带宽} \div \text{前若干次每次的带宽需求})}{\text{所选取的总次数}}$$

$$\text{或者 } O_n = \frac{\sum (\text{前若干次每次占用所分配频谱的时长} \div \text{前若干次每次的分配带宽})}{\text{所选取的总次数}},$$

- 频谱管理节点根据步骤 3) 4) 所获得的抽样监控结果，确定各运营商的修正因子 Be_n ，是在运营商上报的带宽需求基础上进行调整和修正，依据是前若干次的分配带宽与系统的实际性能。同时，也能表征运营商的频率申请可信度。当运营商虚假上报获得了较多的频谱时，不但付出更多的价格代价，同时如果实际性能（如吞吐量、频谱使用效率等）与预期相差较多，那么这些都将影响下一次的分配。

根据前一次频谱分配和当前频谱分配期间的每次监督消息所获得的每个运营商上报的自身当前 buffer 业务量的传输速率（传输完成某数据包除以所用的时间）、资源占用率、接入用户数等，计算修正因子。

$$Be_n = \frac{\sum \left(\frac{\text{每次buffer业务量的传输速率}}{Band_{n,now}} \right)}{\frac{\text{两次频谱分配期间总抽样次数}}{\text{预期吞吐量}}}$$

$$\text{或者, } Be_n = \frac{\sum (\text{每次的PRB资源占用率})}{\frac{\text{两次频谱分配期间总抽样次数}}{\text{预期频谱使用效率}}}$$

- 基于当前申请带宽，结合修正因子和性价函数因子、公平性因子的加权，计算在总的可用频谱池内，为每个运营商的频谱分配结果

$$Band_{pool} \times \frac{Band_{n,new} \times \frac{TP_n \times Be_n}{Occup_n}}{\sum_{i=1}^N \left(Band_{i,new} \times \frac{TP_i \times Be_i}{Occup_i} \right)} = Band_{pool} \times \frac{Band_{n,new} \times \frac{T_n \times price_{n,new} \times Be_n}{Occup_n}}{\sum_{i=1}^N \left(Band_{i,new} \times \frac{T_i \times price_{i,new} \times Be_i}{Occup_i} \right)}$$

- 7) 频谱管理节点将步骤 6) 中的频谱分配结果，通知给每个运营商。运营商在收到频谱分配结果后，按照新的中心频点和带宽，进行资源调度也业务传输。
- 8) 后续重复前面的频谱管理、抽样监督、需求上报、频谱分配的过程。

3.1.2.2.1.5 多运营商频谱共享性能评估

本节根据前面的利用位置管理和邻区干扰测量频谱共享方案，进行简单的性能评估。

对于运营商间频谱共享的初步仿真，采用室内小小区密集组网场景，假设在 3-6GHz 频

段，选择 180MHz 连续带宽，用于多运营商共享。评估场景的拓扑为 3GPP TR36.814 的室内热点 6 层建筑 dual stripe 场景，业务模型为 burst 业务，包大小 8Mbytes，包到达率 0.5-2.5。所对比的频谱分配方案为独占式和共享式，其中独占是 3 个运营商各独占使用 60MHz 带宽，共享是 3 个运营商共享全部 180MHz 频谱，且用户选择签约运营商基站接入。

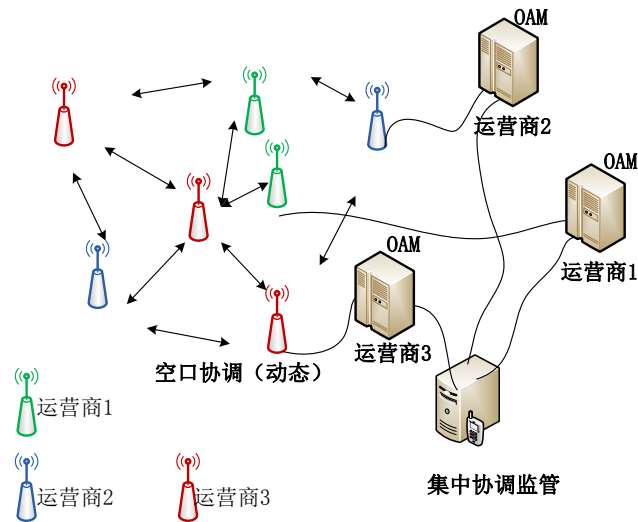


图 3 - 14 评估场景拓扑示意图

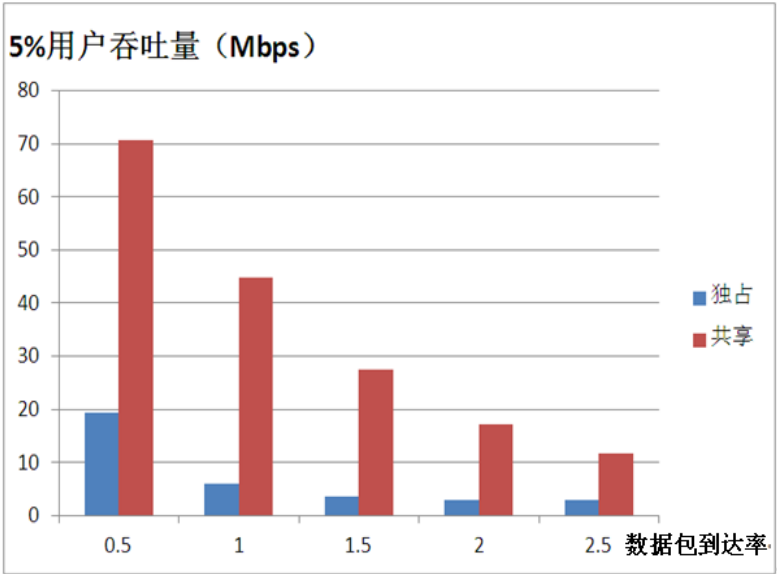


图 3 - 15 性能仿真结果

从仿真结果来看，共享使用相对独占使用，满足 QoS 的系统容量成倍提升。共享后的吞吐量远大于每个运营商独占频谱的吞吐量之和。尤其对于边缘用户，大大增加了用户的可接入频谱，体验速率提升 3-8 倍。共享使用 180MHz 带宽，边缘用户体验速率在负载 90% 时仍然能够达到 12Mbps。

3.1.2.2.2 频谱切换

由于授权用户的频谱占用情况随时随地都可能变化,为了保证授权系统的通信质量,非授权用户在检测到授权用户信号的到来后需要立即退出信道,并重新寻找可用的空闲频谱来继续通信,即频谱切换。频谱切换过程中要尽可能地减少因为切换而造成的非授权用户通信中断,频谱切换策略的好坏直接影响着非授权用户的 QoS。

在认知无线网络中,我们把用户分为两组,主用户 (PU) 和次级用户 (SU)。任何时候,主用户都享有使用信道的优先权,次级用户只有在没有主用户使用信道的时候才能够使用信道。由于主用户的出现将直接影响次级用户的性能,比如说传输率和掉包率。次级用户与传统的无线通信网络中的普通用户是不同的,所以次级用户的容量和性能将对整个认知无线电系统有着很重要的影响。

3.1.2.2.2.1 预测概率的频谱切换方案

针对有限的主用户和次级用户,通过计算预测概率,得出一种方式来帮助次级用户选择一个好的信道来继续他的服务,该方案能够降低切换次数,提高整个认知无线电系统的容量和性能。

1) 系统模型:

我们假设,认知无线网络有有限个信道提供给主用户和有限的次级用户(假设次级用户数量多于主用户)等待通过信道来完成他们的服务。一个次级用户只有在信道空闲时才能使用信道并且不能保留,次级用户正使用信道时,主用户来了,将导致正使用信道的次级用户需要在切换到另一个空闲的信道还是放弃当前的服务当中做个选择。在我们的系统模型中,总共有 N 个信道,每一个信道有它的主用户,也就是说在系统中有 N 个主用户。与此同时,有 M 个次级用户等待信道空闲。每一个信道的到达速率为 λ_p ,且每一个信道的到达率都不一样。我们定义每个次级用户的触发率为 $\lambda_{trigger}$,它控制所有次级用户触发,以控制每次需要并发的次级用户数目。主用户和次级用户的服务时间分别以 μ_p 和 μ_s 按负指数分布。我们定义常数 K 作为数据速率,每次服务传输总数据量的大小就是服务时间乘以 K 。定义切换时延为 Δt ,作为一个常数值用来简化具体的过程。在我们理想模型中,每一个信道有相同的固定的信噪比,所以我们需要用香农公式来算出次级用户的容量。

在我们的模型中,在没有次级用户时,信道最初一个个被分成 ON 和 OFF 两种状态。ON 状态是指主用户存在,OFF 状态是指信道空闲等待次级用户接入,信道模型如下图:

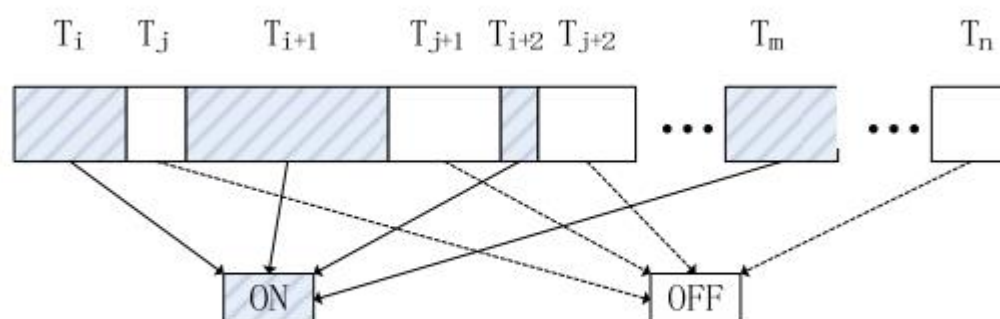


Fig. 1. Channel ON/OFF state model

图 3 - 16 信道 ON/OFF 状态模型

2) 信道访问算法分析

作为次级用户，当选择另外一个信道传输时，它要做决定选择哪一个信道。这有两种方法判定选择哪一个信道，一种简单的方法叫做随机访问机制，另外一个相对复杂，几个参数一起用来分析和计算，我们定义为概率预测访问机制。随机访问机制是指在传输时次级用户在空闲信道中做一个随机的选择，概率预测访问机制则是指次级用户在本身和信道环境因素下做一个决定。下面，我们将分别介绍。

A. 随机接入机制

在随机访问机制中，次级用户随机的接入一个空闲信道，遵循的基本原则是主用户优于他们接入信道。当主用户返回次级用户正在用的信道，次级用户必须随机地切换到另外一个空闲信道以给主用户空出空间。如果没有可用的信道接入，次级用户不得不掉话，并且新来的请求接入的次级用户也将被拒绝。正在请求接入的次级用户只能接入另外一个空闲信道，这种机制如下图所示：

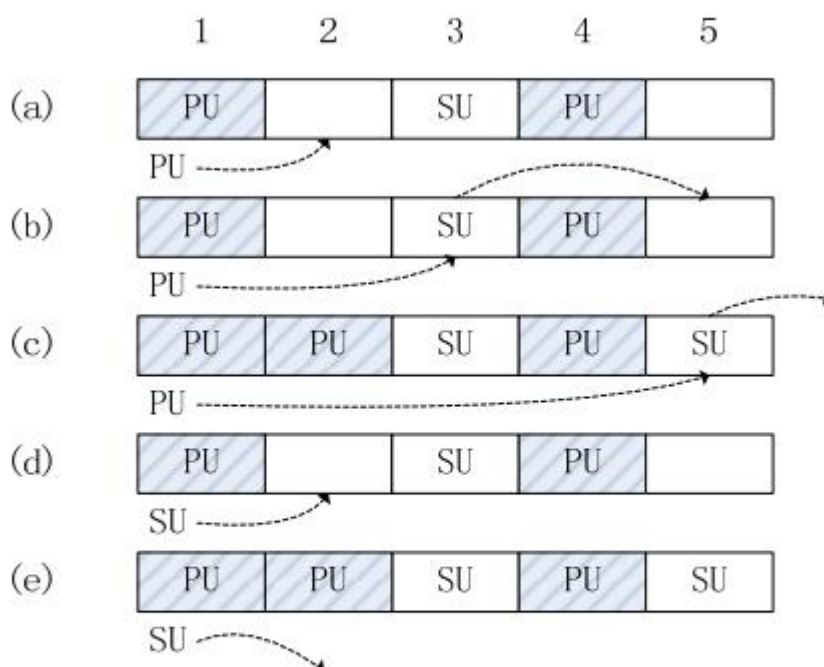


Fig. 2. Random access mechanism model

图 3 - 17 随机接入机制模型

B. 概率预测的访问机制

在概率预测的访问机制中，当主用户返回信道时，次级用户基于条件概率来选择另外一个空闲信道。所有进入的次级用户都用同样的方式准备接入信道。假设这总共有 N 个信道，意思是有 N 个主用户，同时还有 M 个次级用户准备接入。他们当中的一些在同一时刻基于触发概率 λ_{trigger} 触发。在一个时刻，系统中可以利用的空闲信道为 n ，触发接入的次级用户为 m ，假设一个正在进行的的服务的服务质量保障比其他的重要，意思就是说与拒绝一个服务或有接入延时相比，传输服务质量的突然下降将是用户更难以接受的。所以，在所有的 m 个次

级用户中，正在传输的用户优于正在接入的用户，所以，接入的次级用户只有在存在空闲信道与此同时没有正在传输的次级用户正在传输时才能接入信道。在我们的模型中，我们定义 x 和 y 作为次级用户和主用户的整个服务，分别以参数 μ_p 和 μ_s 负指数分布。我们定义 t_s 作为次级用户的实际传输时间， t_p 作为上一个主用户离开后的先前的空闲时间。次级用户总的服务时间大于 t_s 的概率为：

$$P(x > t_s) = \int_{t_s}^{\infty} \mu_s e^{-\mu_s x} dx = e^{-\mu_s t_s}$$

因此，信道总的空闲时间大于 t_p 的概率为：

$$P(y > t_p) = \int_{t_p}^{\infty} \lambda_p e^{-\lambda_p y} dy = e^{-\lambda_p t_p}$$

在我们的模型中，所有的信道有相同的固定的信噪比，意思是一个信道的容量与另一个信道的容量是相同的，所以我们相信服务数据速率是相同的。所以服务的时间仅仅取决于原始的信道和次级用户的参数。一个次级用户接入信道但不换成另一个信道等于剩余空闲信道的条件大于次要信道的基础是次要信道的总共时间和信道总的空闲时间分别大于次要信道已经过去的时间和已经闲置的时间。因此，我们定义 P_{ij} 作为第 j 个次要信道要访问第 i 个信道的非切换概率。 P_{ij} 越大，次级用户越拥有好的信道条件切换，意思就是说经过这一次传输有一个较大的概率不换到另外一个信道并且引起少的切换延时以至于可以平衡整个认知无线电系统的吞吐量。 P_{ij} 的定义如下：

$$\begin{aligned} P_{ij} &= P(x - t_s < y - t_p \mid x > t_s, y > t_p) \\ &= \frac{P(x - t_s < y - t_p, x > t_s, y > t_p)}{P(x - t_s)P(y - t_p)} \\ &= \frac{\iint \mu_{s_j} \lambda_{p_i} e^{-\mu_{s_j} x - \lambda_{p_i} y} d\sigma}{e^{-\mu_{s_j} t_s - \lambda_{p_i} t_p}} \\ &= \frac{\mu_{s_j}}{\mu_{s_j} + \lambda_{p_i}} \end{aligned}$$

通过 P_{ij} 的结果可知，判断哪一个次级用户转换到哪一个信道与次要信道过去的服务时间和过去的空闲时间没有关系，仅仅取决于两个参数，信道到达率和次级用户的服务率。如果每一个次级用户和每一个信道有不一样的服务参数，预测概率将不一样，它将帮助转移态的次级用户们找出最好的接入信道，也将帮助次级用户更好的完成服务和平衡稀少的频谱效率得到一个较高的系统容量。

3) 仿真结果

在我们的仿真实例中有五个信道，每一个信道我们分别定义一个主用户。同时在系统中我们也定义 10 个次级用户等待接入信道来完成他们的在信道上的服务。信道的到达率为 λ_p 并且各不相同。在次级用户中准备接入信道完成他们服务的数量取决于一个概率数 λ_{trigger} ， λ_{trigger} 控制在一个时间触发的具体数字，所以系统不会有几个次级用户触发也不会产生太多次级用户在同一时刻触发而导致系统过载。主用户和次级用户的服务时间分别以 μ_p 和 μ_s 按负指数分布。每一个都不同尽管在相似的 λ_p 下。我们随机定义三个参数值，从 0.01 到

0.1，做一个小小的区别以使两个机制能够更好地工作。仿真时间单位为 10ms 为一个时隙，并且整个仿真时间设置为 10^4 个时隙，重复 10 次来排除因为随机服务可能影响最终结果的可能性。为了简化，我们定义信道容量为次级用户的数据速率。最后，我们将计算切换次数，也将计算系统吞吐率来判断两种机制的性能。通过比较，我们将指出我们的预测概率机制是否优于或者不能跟原先的随机接入机制相比较。仿真参数由下表给出：

TABLE I. SIMULATION PARAMETERS

M: Number of channel	5
N: Number of SU	10
λ_P (5)	0.05,0.04,0.08,0.01,0.1
μ_P (5)	0.15,0.01,0.08,0.07,0.1
μ_S (10)	0.01,0.02,0.03,0.04,0.05, 0.06,0.07,0.08,0.09,0.1
SNR	15 dB
$\lambda_{trigger}$	0.01
K : data size per second	50×10^6
Δt : transition delay	5 ms
B: bandwidth	10 MHz
Simulation time	10^4 slots
Simulation repetition	10

通过仿真我们可以得到上述 3 个值（接入次数，完成次数和切换次数）以及两种机制下整个系统的吞吐量。系统的吞吐量将直接表明认知网络的性能。我们定义切换率为两种机制的比较值，其定义为切换次数除以完成次数，这意味着每一个次级用户的平均切换时间占完成服务的比例。如下式表示：

$$P_{TransitionRate} = \frac{N_{TransitionTimes}}{N_{FinishedServiceTimes}}$$

两种机制的切换率和系统吞吐量的具体仿真数据和比较值如下所示：

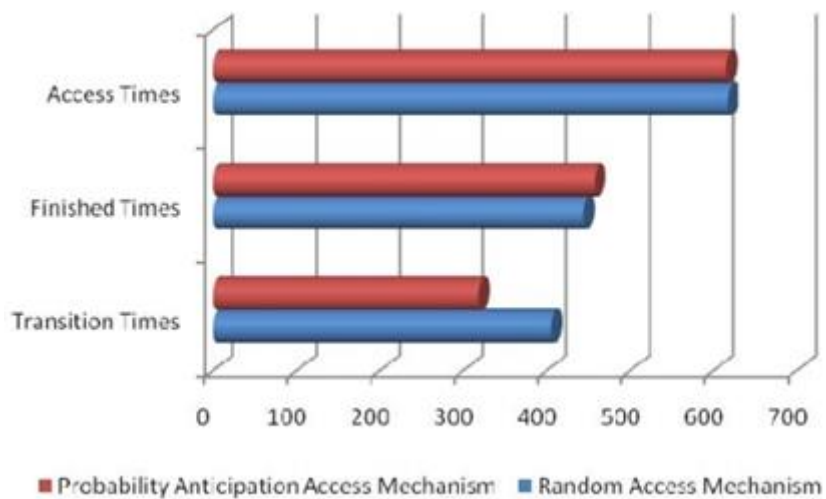


图 3 - 18 两个接入机制的时间

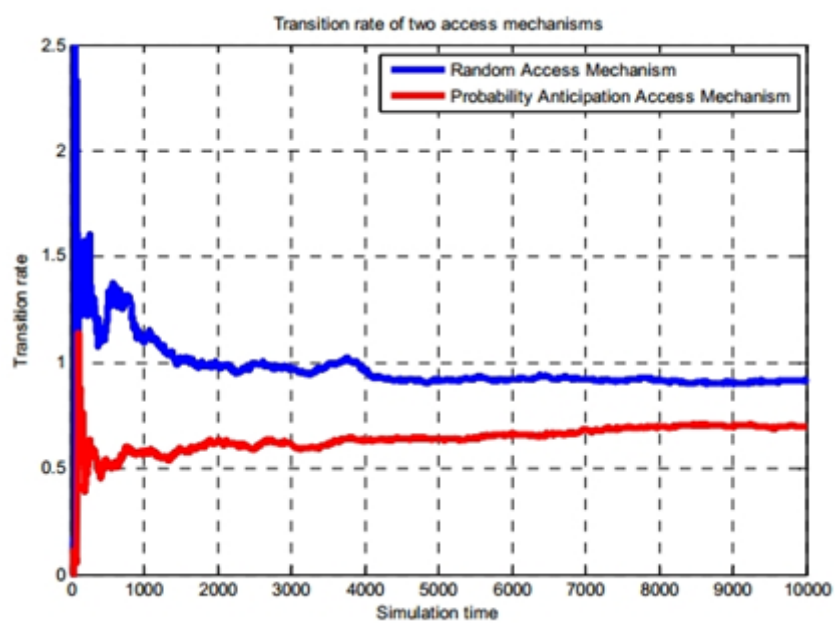


图 3 - 19 两个机制的切换率比较

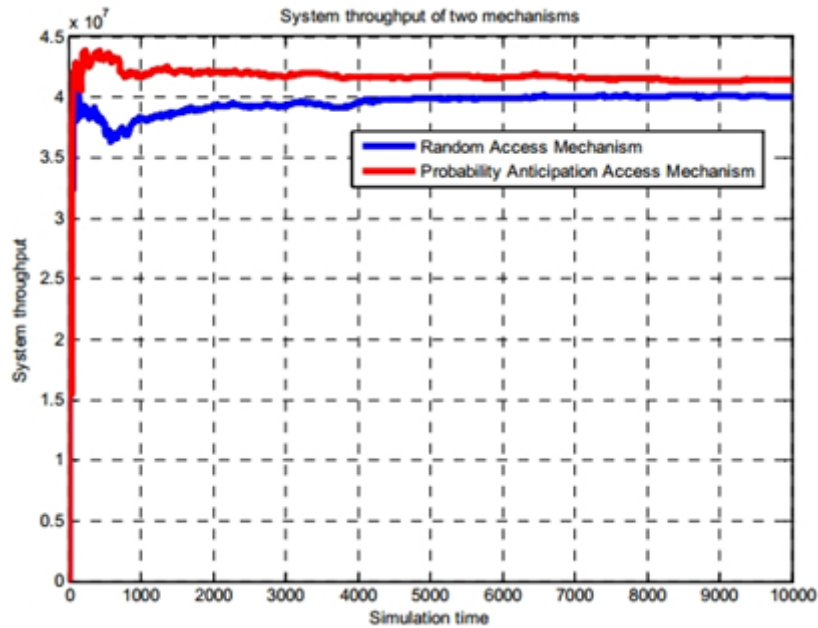


图 3 - 20 两个接入机制的吞吐量比较

我们发现两种机制的接入次数与完成次数非常的相近，但是切换次数相差很多。从图中我们可以清楚地得出预测概率访问机制的切换率远远低于随机访问机制。尽管模拟一开始两种机制的切换率都是不稳定的，但是最终两个切换率都趋于稳定，由此可以得出我们提出的新机制在减少切换率方面效果是明显的。我们的机制之所以能够更好地工作，是因为把信道和次级用户的特征结合起来，以至于当次级用户决定切换时对整个系统有个基本的概况，这样能帮助他们有更好的切换选择，意味着预测概率接入机制在降低切换次数上是很有用的。我们还可以看出预测概率接入机制与随机接入机制相比较能够有更高的系统的吞吐量。由于我们的接入机制能够很大程度上降低切换次数，因此可以节约很多切换时延。切换的时延越短，次级用户完成服务所获得系统吞吐量越高。因此，仿真结果显示我们的预测概率机制能够取得更好的性能。

4) 结论

对于有限的主用户和次级用户，我们通过计算预测概率，得出一种方式来帮助次级用户选择一个好的信道来继续他的服务，该方案能够降低切换次数，提高整个认知无线电系统的容量和性能。

3.1.2.2.2 基于综合代价的频谱切换方案

不将频谱切换概率作为唯一的判断标准，因为它不是描述整个系统的性能所追求的东西。吞吐量和服务承载能力二者都应该是我们的目标。为此，引入了另一个属性，并计算了多种因素对系统的贡献。将他们联合计算来获得判决矩阵，以找到次级用户和主用户的最佳匹配。通过综合代价来判断能够避免狭隘的考虑，这将改善认知无线网络的性能。

1) 系统模型

我们认为，认知无线网络具有有限的信道(CH)，无限的主用户(PU)和次级用户(SU)接入来完成他们的服务。在我们的模型中，每个信道都有自己的主用户，以它到达和离开信

道来决定信道的忙碌和闲置。我们将信道忙碌时称为 ON 状态,将信道空闲时称为 OFF 状态,这就是基本的 ON-OFF 模型,如下图所示。ON 状态和 OFF 状态的持续时间为参数为 λ_p 和 μ_p 的负指数分布。每个次级用户的触发概率 $\lambda_{trigger}$ 决定了每个次级用户触发的数量。次级用户的平均服务时间为参数 $1/\mu_s$ 的负指数分布。当主用户到达时,次级用户必须无条件离开该信道等待频谱切换或者只能放弃其服务。一旦次级用户经历一次切换,就会增加一次它的传输延迟,这是一种损失。如果次级用户成功切换到另一个信道,它将与该信道香农容量的传输速率相匹配。如果没有空闲信道,所有等待接入信道的次级用户将被拒绝,这就是所谓的“服务丢包”。

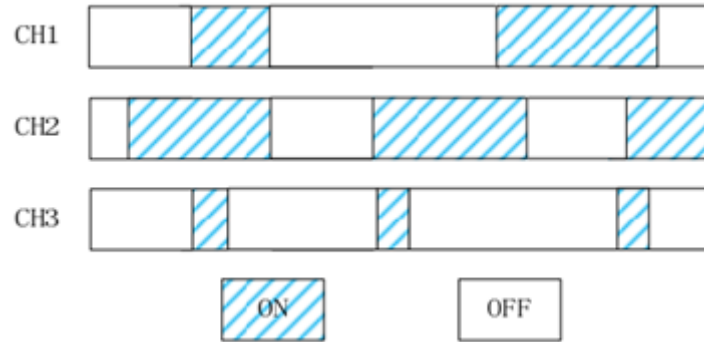


图 3 - 21 信道 ON/OFF 状态模型

2) 综合代价信道选择方案

对于有接入信道需求的次级用户而言,他们必须做出一个决定,选择哪一个信道能获得最佳的效果。然而,由于最好的信道已经被之前的次级用户所占用,最好的次级用户无法选择其最佳信道,所以我们使用矩阵来联合判断。假设有 M 个次级用户和 N 个信道,矩阵的大小就是 $M \times N$ 。我们可以很简单地从中看出最佳匹配,以充分利用每一个信道并为每一个次级用户提供最好的服务。

A. 频谱切换次数最小化

因为次级用户经历了切换时延,我们希望尽量减少频谱切换的次数。我们假定当次级用户 i 希望与信道 j 匹配时,信道 j 已经在时间 y_j 处于 OFF 状态并且次级用户 i 已经发送了 x_i 的时间。为了避免更多次的频谱切换,为信道 j 剩余的 OFF 状态的持续时间必须比次级用户 i 完成其服务所需要的传输时间长。这一情况的概率可以被描述为:

$$PH_{ij} = P(X_i - x_i < Y_j - y_j \mid X_i > x_i, Y_j > y_j)$$

一旦我们可以得到次级用户 i 的服务时间和信道 j 的 OFF 状态相关的负指数分布的参数 μ_{si} 和 λ_{pj} , 我们可以通过文献介绍的方法计算出 PH_{ij} , 它的计算公式如下。

$$\begin{aligned}
PH_{ij} &= P(X_i - x_i < Y_j - y_j \mid X_i > x_i, Y_j > y_j) \\
&= \frac{P(X_i - x_i < Y_j - y_j, X_i > x_i, Y_j > y_j)}{P(X_i > x_i)P(Y_j > y_j)} \\
&= \frac{\iint \mu_S^i \lambda_P^j e^{-\mu_S^i x - \lambda_P^j y} d\sigma}{e^{-\mu_S^i x_i - \lambda_P^j y_j}} \\
&= \frac{\mu_S^i}{\mu_S^i + \lambda_P^j}
\end{aligned}$$

PH_{ij}输出的值越大，频谱切换的概率就越小。所以在所有匹配的输出中，我们选择最大的那一个。那么所选次级用户在所选信道上经历频谱切换的概率将最低。

B. 服务传输时间最小化

每条信道都有不同的属性，如信噪比、带宽等，这也导致信道传输容量的差异。基于通过传输信道的香农容量来传输数据的原则，我们希望选择一个具有高信噪比和高带宽的信道，以提高系统的传输能力。我们假定当次级用户 i 希望与信道 j 匹配时，次级用户 i 仍有长度为 M_i 的数据等待被发送，而信道 j 的信噪比和带宽分别为 SNR_j 和 B_j。那么该信道的容量为：

$$C_j = B_j \log_2(1 + SNR_j)$$

我们就可以获得剩余的传输时间为：

$$t_{ij} = \frac{M_i}{C_j}$$

剩余的时间越短，传输速率就越高，次级用户 i 就会更快地离开该信道为其他次级用户让路。所以在所有匹配的输出中，我们选择最少的那一个。然而，我们更愿意让上式跟下式保持一致的形式。

$$T_{ij} = \frac{1}{t_{ij}}$$

C. 综合选择

对于每一个具有访问信道需求的次级用户 i 和在那个时刻处于空闲状态的信道 j 而言，我们将计算出上文提到的两个属性，并将他们分别记录在矩阵 PH 和 T_{Left} 的 i 行和 j 列。

要合并两个属性，我们应该用归一化方法，将两个矩阵处理为无量纲模型。以 PH 为例，我们首先获得 PH 中每个元素的平方和，然后让每个元素除以他们的平方根。处理后的元素为

$$PH'_{ij} = \frac{PH_{ij}}{\sqrt{\sum_i \sum_j PH_{ij}^2}}$$

同样的，处理后的 T_{Left} 中的元素为

$$T'_{Left} = \frac{T_{ij}}{\sqrt{\sum_i \sum_j T_{ij}^2}}$$

最终，我们设定权重参数获得判断矩阵：

$$S = \alpha PH' + \beta T'_{Left}$$

α 和 β 的配置取决于我们的焦点是在减少切换的概率还是减少传输的时间。为简单起见，我们将 α 和 β 设置均设置为 0.5。综合代价是 S 的最大值的一组次级用户和信道将是我们的首选。次级用户将被允许访问信道来完成其切换。然后该组将被删除，剩余的次级用户和信道将重复这个方案，直到没有剩余的次级用户或信道。

3) 仿真结果

在我们的仿真中有 10 个信道，即 10PUs。为了实现更明显的输出效果，我们设置一个较大的数值 20 个次级用户等待访问信道。每个信道开关状态的负指数分布的参数分别为 λ_p 和 μ_p ，并且每一组都是不同的。每一个次级用户的到达受控于它自己的触发率 $\lambda_{Trigger}$ ，他们之间也各不相同。每个次级用户的数据长度取决于它自己的参数 λ_s 。所有这三个参数都是在一定范围内随机获取，以获得一个更好的仿真结果。信道的信噪比在 1 到 20dB 之间随机设定，在整个仿真过程中不发生变化。为简单起见，每个信道的带宽设定为相同的 10MHz。每次切换为次级用户的传输时间增加 5ms 的延时。我们的模拟中的最小时隙为 1ms。总仿真时长为 104ms，足以得到一个稳定的结果。仿真参数见下表。

Parameters	Value
M: Number of Channel	10
N: Number of SU	20
λ_p (1/sec)	150 20 80 70 100 50 90 40 60 20
μ_p (1/sec)	50 40 80 10 100 70 40 100 10 50
$\lambda_{trigger}$ (1/sec)	5 10 20 2.5 4 5 6 7.5 45 0.5 0.1 4.5 7.5 35 50 4 5.5 11.5 3.7 4.9
μ_s (10^{-6} /sec)	0.010 0.025 0.005 0.045 0.065 0.0005 0.0075 0.0125 0.0045 0.0550 0.1250 0.0035 0.0100 0.0085 0.0110 0.0450 0.0045 0.0500 0.0150 0.0100
Simulation Time (msec)	10000
Slot Time (msec)	1
SNR of Channel (dB)	8.226 18.09 18.42 8.153 5.942 13.23 13.08 2.966 7.261 2.100
Bandwidth (MHz)	10
Time Delay (msec)	5

在每个时隙，频谱切换，服务和掉包服务的数目都会被计数，每个服务的平均传输速率将被计算并记录。我们定义了两个参数来表征系统的性能，一是频谱切换的平均值，它反映

的是切换的概率，如下所示：

$$P_{handoff} = \frac{N_{handoff}}{N_{service}}$$

另一个是传输速率的平均值，即传输数据长度除以传输总时长，如下所示：

$$C_{Average} = \frac{L_{Transmitted}}{N_{TotalTransmission}}$$

综合代价方案及随机接入方案之间的切换和平均传输速率平均数的分别比较如下图。

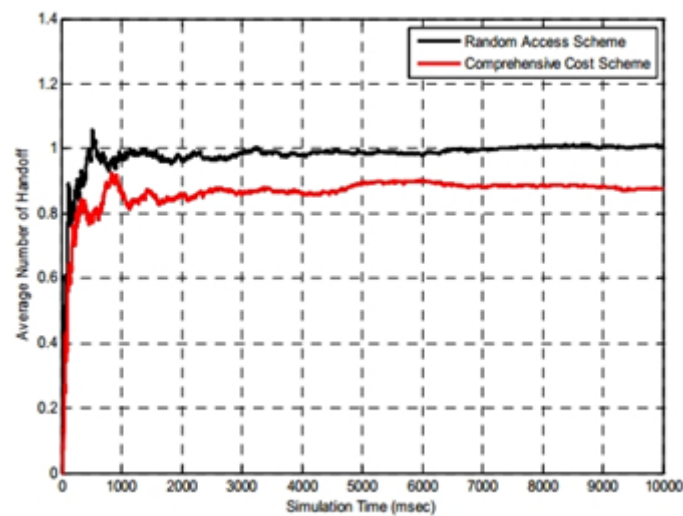


图 3 - 22 平均切换次数比较

我们发现综合代价方案的越区切换的平均次数比随机接入方案低得多，它确保低的延迟时间和短的总传输时间，因为我们的方案结合了次级用户和信道的特点来选择次级用户的信道以便减少频谱越区切换的概率。

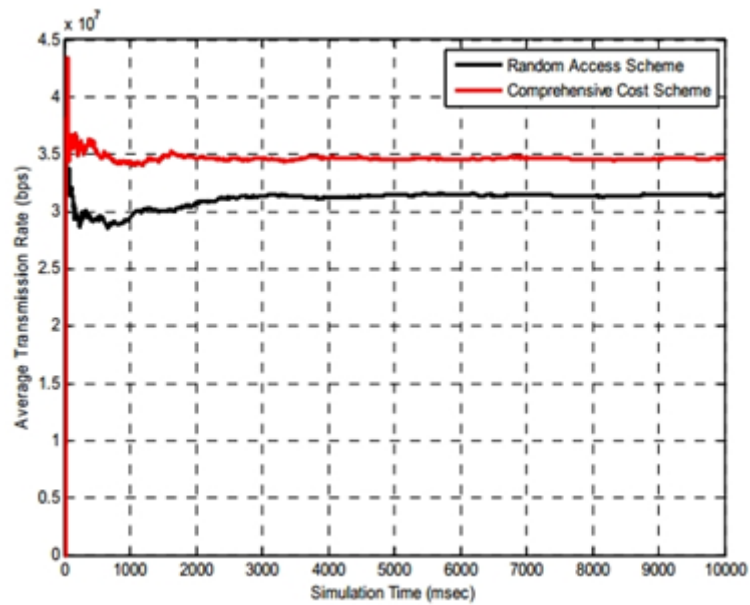


图 3 - 23 平均切换率比较

我们可以看到，我们的方案与随机接入方案相比，在影响系统的吞吐能力和系统性能方面的平均传输速率上，要好得多。因为我们采取多种因素加以考虑，其中包括切换概率和一个信道的过渡时间，使我们可以减少切换延迟并提高传输速率，最终使系统性能有更大改进。

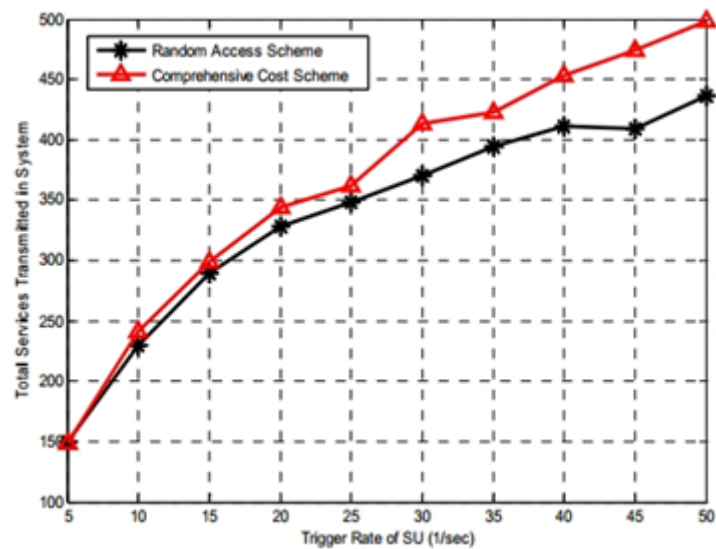


图 3 - 24 业务承载能力比较

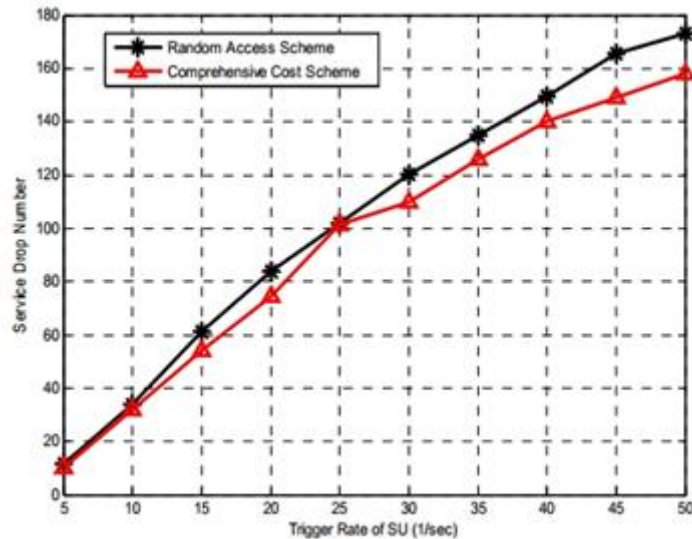


图 3 - 25 服务掉包率比较

我们分别得出，综合代价方案也会带来业务承载能力的提高。该服务承载能力使用我们的方案的比使用随机接入方案好得多。随着 SU 的触发率的增加，效果会更明显。类似地，还有在服务掉包率上的改善。随着延迟的减少和传输速率的增加，总的传输时间将缩短，使得服务将完成更快，使得该信道是空的，允许更多的次级用户访问并且很少发生碰撞。

4) 结论

我们研究了经典的频谱切换方案，并提出了一种新的方法来选择适合次级用户的信道。我们考虑了多重因素，并分析了其对系统性能的影响。结合这些因素，我们使用了综合代价矩阵来选择次级用户和信道的最佳组合。结果显示，我们的方案无论是切换速率和吞吐能力都有所提高。随着次级用户的触发率的增加，系统的业务承载能力的提高也会越来越显著。

3.1.2.3 接入控制

动态频谱接入最主要的任务是寻找可用的频谱机会来满足用户的需求。动态频谱接入有两个部分：选择要检测的信道，以及根据检测结果做出接入信道选择决策。接入控制的功能是确定频谱共享用户是否可以接入网络及采用何种策略接入，是实现优化频谱分配的基本前提。

3.2 物理层技术

3.2.1 关键技术

以提高频谱共享的灵活性和提升频谱效率为目的，需要针对授权频段和非授权频段的授权使用和非授权使用分别确定需求和进行增强性设计。

针对频谱共享的不同方式：主要为半静态或动态，在负责协调和共享管理的网络节点做决策时分别需要物理层提供什么样的测量结果，也是需要考虑的。

增强性设计至少包括对应场景和频谱共享方案中的导频设计、信道（包括 PRACH、MIB/SIB、UL/DL 控制信道（公共的和 UE-specific 的）、UL/DL 数据信道）设计、测量及反馈设计、资源分配等以及这些设计对应的 UE 行为需要怎样的改变。需要针对上下行分别进行分析和设计。这些物理层设计还会对 MAC 层、RRC 层和核心网等产生影响。

3.2.1.1 多址方式

3.2.1.1.1 通过插入扩展消除载波抑制旁瓣的 CR-OFDM 系统

3.2.1.1.1.1 简介

随着无线通讯技术的发展,无线频谱正成为稀缺资源。然而,根据频谱政策任务组(SPT)的报告指出许可用户的频谱利用率非常低。认知无线电(CR)是一种充分利用这稀缺资源的频谱的有效方法。称为SU的认知无线电用户或次级用户将检测频谱占用情况,找到授权用户或为主用户(PU)暂时空白或未使用频谱。基于OFDM的CR系统将整个频谱分成彼此之间存在很小且相等的时间间隔许多较小的频带。因此,CR-OFDM的次级用户(SUs)可以利用主用户(PUs)未使用的频谱会更有效。但是,OFDM信号的大量的带外旁瓣功率可能潜在带来对PU的严重干扰。因此,次级用户的旁瓣必须被充分地抑制。一些技术已经被提出来抑制OFDM符号的旁瓣。通过设置保护带,关闭次级用户频带的两端的某些子载波以保护PU的传输是常用方法。然而,这种方法会导致频谱资源浪费。窗口化所发送的信号在时域相乘在频域的整形滤波器信号可显著增加复杂性。与整形滤波器相乘的信号相当于在时域的卷积,这导致OFDM符号之间的干扰。此外,子载波进行加权(SW)和加性信号(AS)也是有用的方法,以减少旁瓣功率,而SW不能在OFDM系统中应用QAM。因为QAM的解调是信号的振幅,可能受未知的加权因素的影响。

有文献提出几个所谓的消除载波(CC)被插入在OFDM频谱的左右两侧。这些特殊的子载波不用于数据传输,而是用于执行复杂的加权因子,以抵消发送信号的旁瓣。

正如上文所述,消除载波只是在次级用户带的两端的极少量的载波,它们的频点与OFDM系统有相同的间隔。我们发现它们有一个缺点,无论在数量和精度都不能使旁瓣足够最小化。基于上述考虑,我们提出了一种新的方法,就是所谓的扩展消除载波(ECC),以充分抑制旁瓣。

扩展消除载波是那些拥有比OFDM系统子载波的更紧密的间隔子载波。然后会有大量的消除子载波,并且它们可以改变自己的权重因子,以更精确地减少旁瓣,从而产生更好的抑制效果。

因为较小的间隔,在文献中提到CC方法无法计算干扰。ECC的加权因子应转变为在时域上添加的信号。

3.2.1.1.1.2 扩展消除载波的原理

正如上面提到的,ECC的信号将被变换到时域形式,因为CR-OFDM系统在频域中没有接近的频率点。因此,我们不能使用在文献中提到的方式,以获取每个子载波的频谱的叠加。详细过程示于下图:

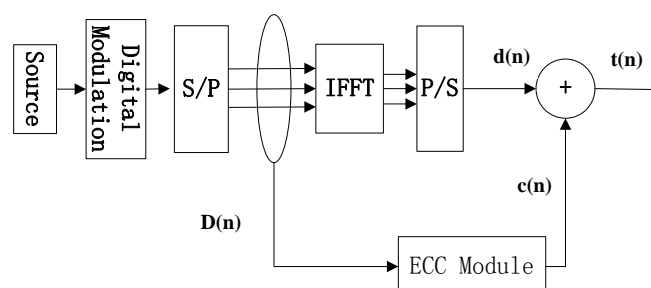


图 3 - 26 ECC 的信号变换

二进制数据将被生成并通过数字调制方案，例如 QPSK，8PSK，16QAM 调制，以产生一个字符串的复数据 $D(n)$ 。通过 S / P 转换，串行数据将被转换成 N 路并行数据，其中 N 是傅里叶变换的长度。然后 ECC 模块将使用每个集合的 N 个点称为一个 OFDM 码元来计算的 ECC 的加权因子的最佳值。

最优 ECC 的权重因子计算是按照尽量减少 SU 的旁瓣功率，而不造成严重的传输性能下降的目标。然后加权因子将用于产生时域抵消信号 $c(n)$ 。IFFT 变换将 $D(n)$ 变为 N 个长度的时域信号，然后通过 P / S 转换成串行数据 $d(n)$ 。所以最终发送数据的 $t(n)$ 是原始发送信号 $d(n)$ 和消除信号 $c(n)$ 的总和， $t(n)$ 的旁瓣功率谱密度是理想的足够低，以保护 PU 的频谱。

3. 2. 1. 1. 1. 3 发送功率约束下的最优扩展消除载波

基于在文献中提到的消除载波，扩展消除载波原理如下图所示。ECC 的只是作用于数据载波的两端，不占 PU 的频带。

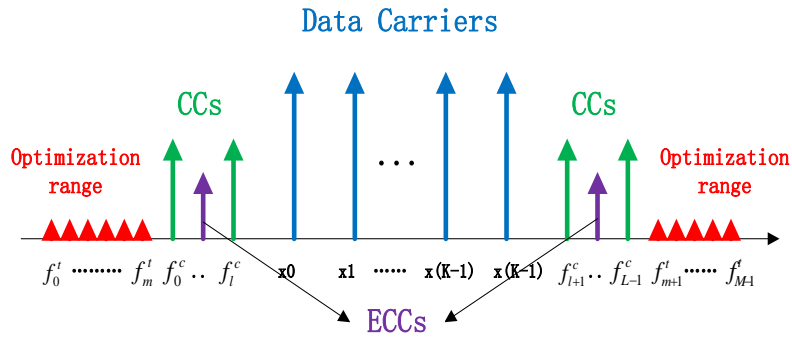


图 3 - 27 扩展消除载波原理图

3. 2. 1. 1. 1. 4 数据载波的旁瓣

K 个子载波的数据信号的频率是由 $x(0), x(1), \dots, x(k-1)$ 表示。D(k) 是调制在载波 k 个数据符号。然后在 CR-OFDM 系统中，符号可以在离散时间表示为：

$$\begin{aligned} d(n) &= \frac{1}{N} \sum_{k \in S} D(k) \exp(j2\pi k \Delta f \frac{n}{f_s}) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k \in S} D(k) \exp(\frac{j2\pi kn}{N}), n = 0, \dots, N-1 \end{aligned}$$

其中 N 是快速傅立叶反变换的大小，S 是一组数据子载波的索引。Δf 是系统子载波之间的频率间隔， f_s 是数据的采样频率。

我们要观察的是在优化范围内的旁瓣功率。如果我们把 M 个频点 $\{f_0^t, f_1^t, \dots, f_{M-1}^t\}$ 作为在优化范围内的采样点时，旁瓣的采样能量的总和为

$$E_d(m) = \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \exp(\frac{-j2\pi n f_m^t}{f_s}), m = 0, \dots, M-1$$

结合得出：

$$E_d(m) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{k \in S} D(k) \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) \right] \exp\left(\frac{-j2\pi n f_m^t}{f_s}\right)$$

$$m = 0, \dots, M-1$$

简单的说有：

$$E_d = P_d \cdot D$$

这里， $E_d = [E_d(0), E_d(1), \dots, E_d(M-1)]^T$ ， $D = [D(0), D(1), \dots, D(N-1)]^T$ ， P_d 是 $M \times N$ 矩阵的 $(m+1)$ 行 $(k+1)$ 个列元素

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) \exp\left(\frac{-j2\pi n f_m^t}{f_s}\right)$$

3.2.1.1.1.5 扩展消除载波的旁瓣

对于 ECCs， $C(l)$ 是其加权因子，它们频点为 $\{f_0^c, f_1^c, \dots, f_{L-1}^c\}$ 。旁瓣抑制信号 $c(n)$ 表示为

$$c(n) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{L-1} C(l) \exp\left(\frac{j2\pi n f_l^c}{f_s}\right), n = 0, \dots, N-1$$

在发送端所发送的信号 $t(n) = d(n) + c(n)$ ，为了计算 $c(n)$ ， $C(l)$ 将被分解。同样，我们将观察消除信号的旁瓣功率优化范围和 $c(n)$ 采样能量的优化范围的总和。

$$E_c(m) = \sum_{n=0}^{N-1} c(n) \exp\left(\frac{-j2\pi n f_m^t}{f_s}\right), m = 0, \dots, M-1$$

对比得到

$$E_c(m) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{l=0}^{L-1} C(l) \exp\left(\frac{j2\pi n f_l^c}{f_s}\right) \right] \exp\left(\frac{-j2\pi n f_m^t}{f_s}\right)$$

$$m = 0, \dots, M-1$$

简单的，我们得到：

$$E_c = P_c \cdot C$$

这里 $E_c = [E_c(0), E_c(1), \dots, E_c(M-1)]^T$ ， $C = [C(0), C(1), \dots, C(L-1)]^T$ ， P_c 为 $M \times N$ 矩阵中的 $(m+1)$ 行 $(k+1)$ 个列的元素

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(\frac{j2\pi n f_l^c}{f_s}\right) \exp\left(\frac{-j2\pi n f_m^t}{f_s}\right)$$

$C(l)$ 是应加权的 ECC 载波，以使 $\|E_d + E_c\|^2$ 最小化，从而抑制在优化范围的旁瓣。该优化可以处理成下列约束线性最小二乘问题

$$\min_C \{\|E_d + E_c\|^2\}, \text{ s.t. } \|C\|^2 \leq \alpha$$

约束 ECC 的发射功率限制为 α 。解线性最小二乘问题可在文献中得到解决方法。

为了解决上式问题，对于每个 CR-OFDM 符号，数据 $D(k)$ 将产生 E_d 并可以解决 ECC 的加权因素当 P_d 和 P_c 预先计算。

3.2.1.1.1.6 仿真与结果

在我们的仿真中，我们假设一个次级用户占用 CR-OFDM 系统 $N_s = 10$ 个子载波， $N = 64$ 是 FFT 变换的位数。为了清楚地观察旁瓣，SU 的归一化频率点位于系统的频率点的中间，它们分别是 [28:37]。

因为保护带 SU 和 PU 之间的带宽很窄，ECC 的范围不会很大。在这里，我们假设 ECC 的范围是 [26:27] 和 [38:39]。ECC 的之间的时间间隔为 $1/K$ ，其中 K 为整数，我们假设 $K = 1, 3, 5$ ，那么它的长度为 $L = 4K$ 。优化范围将保护频带的带外，我们设置采样点间隔为系统归一化频率点实际上是 1 的 1/10。

对于 OFDM 系统中，我们生成 1000000 比特数据源，然后通过 QPSK 调制，然后再通过一个 8dB 信噪比的 AWGN 信道。最后，我们假设 $\alpha = 3$ 的发射功率约束。

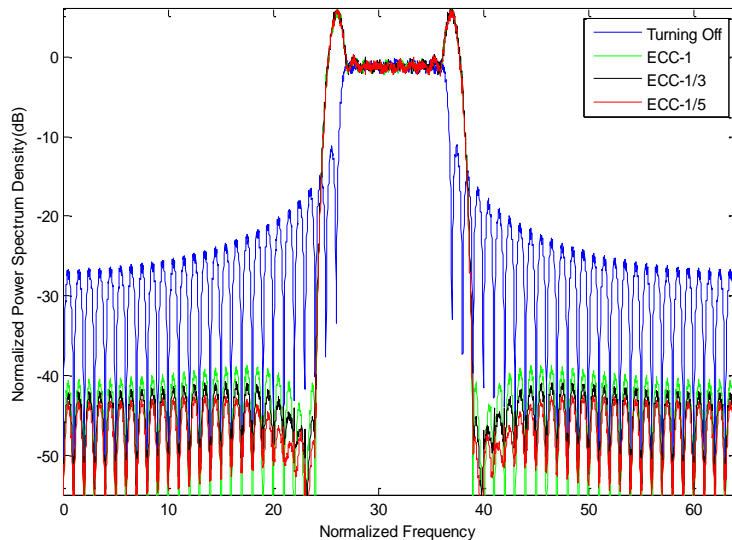


图 3-28 使用旁瓣抑制的不同的方式发射的信号的归一化功率谱。

很明显，单纯地关闭 SU 带宽的子载波只会引起的 -20dB 的优化范围内的平均旁瓣，这就是到 PU 相当的干扰，不能理想的满足保护 PU。当 ECC 的间隔是 $I \cdot \Delta F$ ，会显著抑制的旁瓣功率大约 40dB。干扰大大降低，从而确保保护 PU 到一定程度。然而，更大的改善是通过扩展消除载波，使得他们的间隔更接近，如 1/3 的 ΔF 和 1/5 的 ΔF 和收益分别是 -45dB 和 -50dB。很显然，越小的 ECC 的间隔，我们越能获得更好的抑制性能。在一定程度上，与插入消除载波的数量增加，并且间隔减小，在求解最优线性最小二乘问题的过程中会有更多的其加权因子的选择。因此，它们可以抑制旁瓣功率使得更光滑，甚至准确，有一个更好的结果。

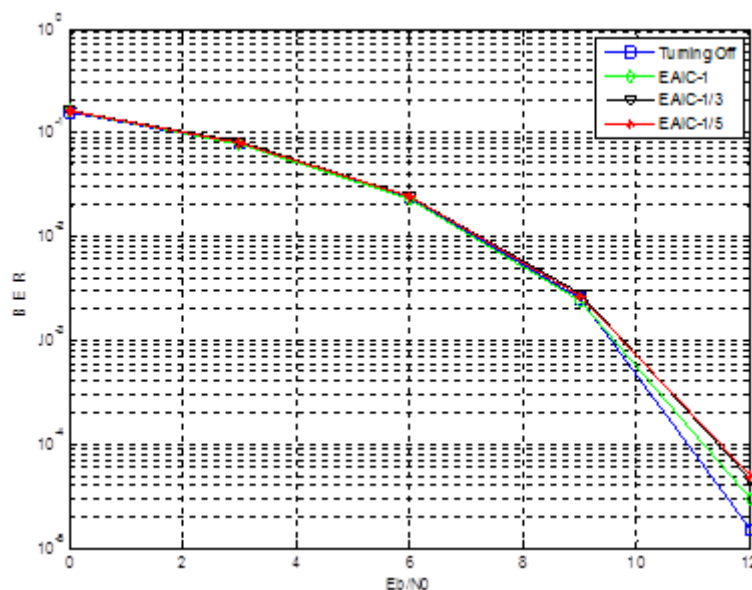
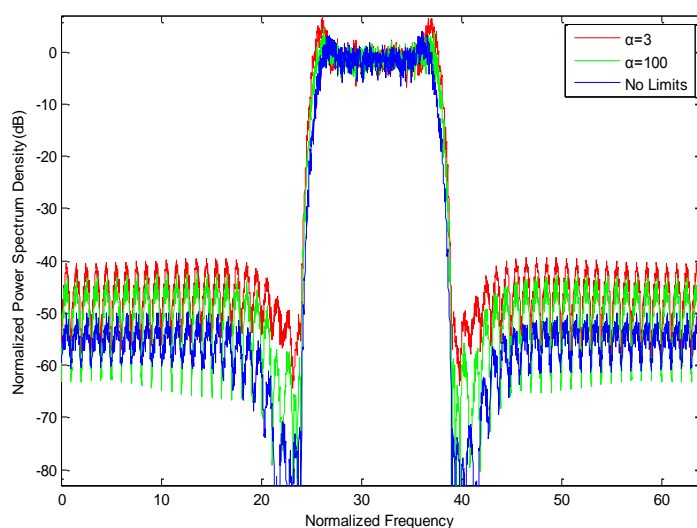


图 3-29 不同的抑制旁瓣方法具有不同的误码率

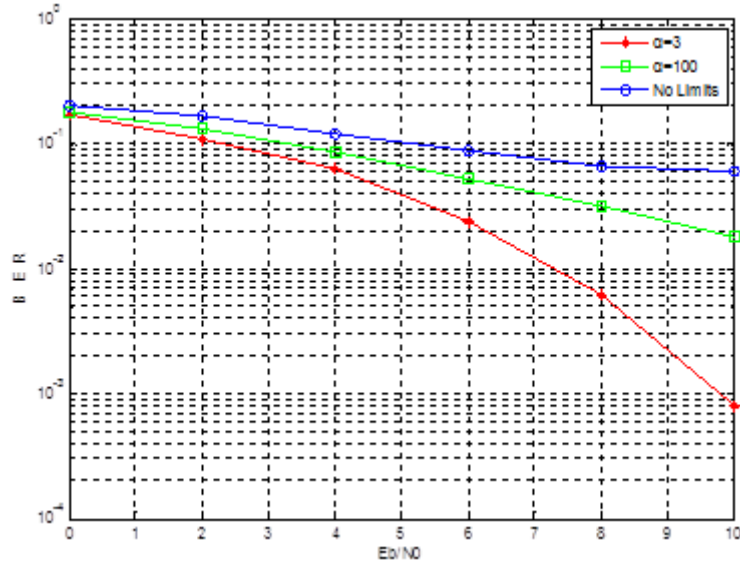
作为一个整体，所有的观察方法提供了一个可以接受和允许的误码率性能。不过，考虑关闭子载波出来的 SU 带宽作为基准的 BER 曲线的时候，我们可以清楚地看到，无论间隔多大，所有的 ECC 的误码率会出现性能下降。消除载波方法以 $1 \cdot \Delta f$ 间隔是所有的 ECC 方法中最好的。显然，BER 性能将变差与副载波间隔的尺寸的减小，也就是说间隔和误码率性能之间的关系是不那么清晰。其原因可能是正交的丢失会导致载波之间的干扰，从而导致较低的误码率性能。事实上，我们可以看到这是一个经济有效地抑制旁瓣的方法。

如上图所示，所有具有不同的子载波的间隔扩展消除载波发送的平均振幅比原始数据信号 1 要大。比较与数据载体 ECC 的数量，这将是很容易理解这种现象。实际上，前者是足够低的。

实际上图中所示的结果可以通过发送功率约束 α 在一定程度上加以解释。因为这里 α 是足够低以限制 ECC 的平均振幅。因此，我们想观察不同的约束 α 的不同结果。



(a) 归一化功率谱密度



(b) BER

图 3-30 不同约束条件下的结果

上面给出了在不同的约束的一些结果，如 $\alpha=3$ ， $\alpha=100$ ，和没有限制时用 $1/5 \Delta f$ 的时间间隔的 ECC。ECC 的旁瓣抑制 $\alpha=3$ 的效果是最差的，虽然它的 BER 性能是最好的。即便如此，他们都符合要求。对于无 α 限制的条件下，其旁瓣抑制性能优异，并获得比 $\alpha=3$ 优 20db，但其 BER 性能是如此可怕，该系统几乎无法正常工作。因此，我们可以得出结论，越宽松的 ECC 的发射功率限制，越糟糕的 BER 性能。因此约束的选择 α 应给予足够的考虑。

3.2.1.1.7 结论

我们提出了一种称为使用插入的子载波，具有比 OFDM 系统中的更小的间隔的扩展的消除载波的改进方法。我们分析了在优化的范围，原始发送的数据信号中的干扰和 ECC 的干扰。此外，我们推导出用矩阵形式的各种干扰的制定。这两个结合起来，我们得到 SU 影响 PU 的干扰总和。为了得到 ECC 的加权因素，我们将此作为一个线性最小二乘问题，这个问题受发射功率的限制，并解决它。

然后我们研究不同旁瓣抑制方法中归一化的功率谱密度，BER 和平均信号幅度的差异。我们可以说，与仅仅是关掉载波相比较小间隔的 ECC 更加显著抑制旁瓣，越小的时间间隔越能更好的抑制效果。而随着发射功率的限制较宽松，抑制效果会好很多。然而，宽松的发射功率约束下 BER 性能将变差了。

3.3 数据库技术

3.3.1 非 IMT 频段数据库

3.3.1.1 关键功能概述

非 IMT 频段频谱共享场景下的数据库，也可称之为地理位置信息数据库 (GLDB, Geo-Location Database)，其主要职责在于：实现对授权系统用户的保护。具体的，为非授权用户提供授权用户的频谱使用信息，及空闲频谱的相关保护准则，非授权用户对该频谱资源的使用必须满足保护准则的要求，从而避免对授权用户造成干扰。

GLDB 通常由监管机构或者监管机构授权的第三方来运营。如下图所示为 GLDB 参考

功能架构图，这里做简单概述，后续章节对各关键技术功能分别详细展开。

- 信息收集与维护：信息收集与维护是 GLDB 其他功能的支撑，具体包括如下四方面信息：授权系统信息、无线环境信息、监管域信息、非授权系统信息。
- 空闲频谱地图生成：根据收集到的授权系统频谱使用信息，以及无线环境信息，可以进一步生成空闲频谱地图，至少从时间、空间、频率、保护准则等维度上对空闲频谱进行描述。
- 注册鉴权：在非授权用户申请使用空闲频谱之前，必须通过 GLDB 的注册鉴权；注册鉴权用于“授权”该非授权用户使用空闲频谱的资格。除此之外，注册鉴权还有利于干扰源的查找。
- 空闲频谱统计/分配：当非授权用户通过了 GLDB 的注册鉴权，并发起了空闲频谱申请时，GLDB 需要根据非授权用户的位置坐标，及设备类型等信息，结合空闲频谱地图，为其提供空闲频谱列表，并指示对应于各空闲频谱的干扰保护要求。
- 优先级管理：当涉及多个非授权系统资源协调分配时，需要根据优先级进行管理。
- 计费：由监管域给出基准单价，影响单价的各个因素，及各因素转化为系数的方法，最终由计费功能根据非授权系统对空闲频谱的实际应用情况来计算费用。

注：图中“频谱共享管理功能”为非授权系统的频谱配置管理实体，其具体功能可以参考频谱策略相关内容。

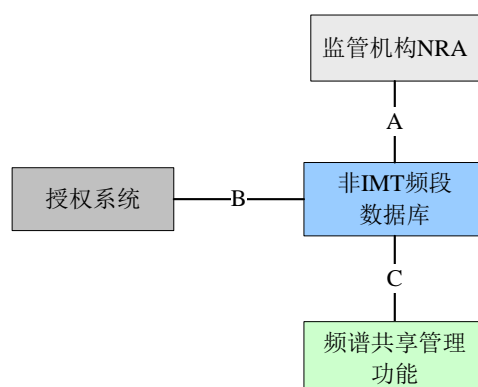


图 3-31 非 IMT 授权数据库连接图

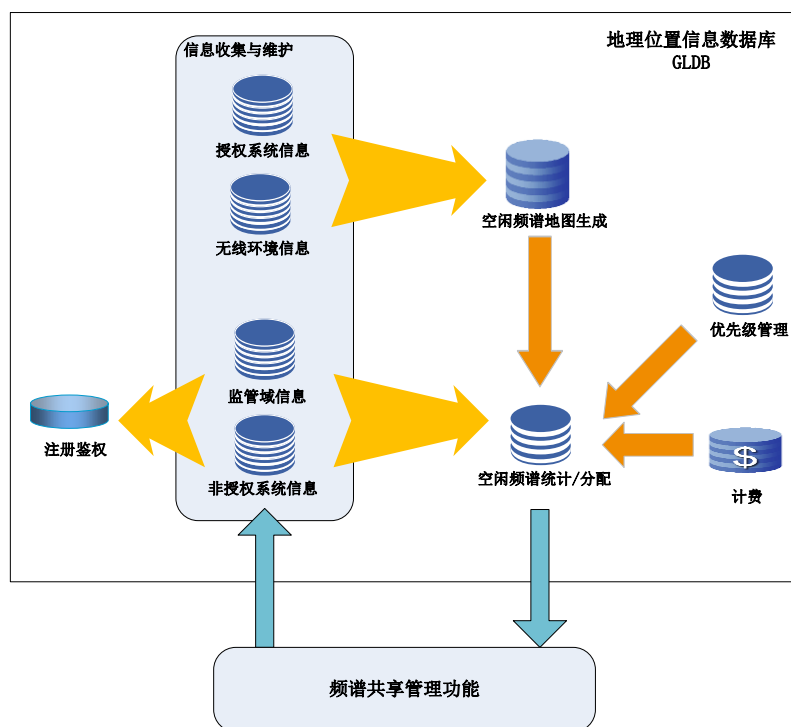


图 3-32 GLDB 参考功能架构

依托于上述结构，需要研究信息收集与维护（无线环境信息、监管域信息、授权系统信息、非授权系统信息）、空闲频谱地图生成、注册鉴权、频谱申请/访问管理、空闲信道统计/分配、计费、优先级管理等技术。

3.3.2 IMT 频段数据库

3.3.2.1 关键功能概述

针对不同系统架构的频谱共享策略，可以包含集中式、分布式、混合式三种频谱共享的架构。

◇ 集中式频谱共享架构

在集中式频谱共享架构中，数据库作为通信站点的上层管理节点，用于集中式管理下属各通信站点的资源配置，我们称之为协调数据库，协调数据库可以是独立的实体，也可以位于现有实体（如 OAM）中，主要功能包括：

- 1) 信息收集与维护：相关信息主要用于通信站点间灵活的资源配置以及网络性能优化；
- 2) 通信站点间资源配置管理：负责对具体通信站点进行频谱资源的协调分配，该分配过程需要考虑通信站点间的干扰，各通信站点资源分配的优先级，以及网络整体性能的最优化等。

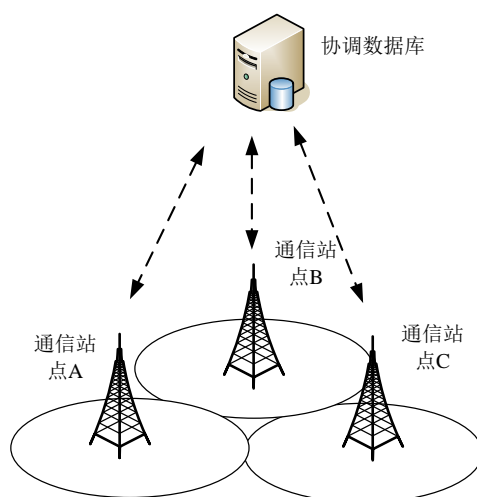


图 3-33 集中式频谱共享网络部署示意

✧ 混合式频谱共享架构

在混合式频谱共享架构中，数据库分别为位于通信站点上层的协调数据库，以及通信站点内部的站内数据库。为了方便对各通信站点进行频谱资源配置管理，协调数据库可以依据地理位置、干扰关系、支持的工作频段等对各通信站点进行“分簇”，并进行簇间的频谱资源配置管理；站内数据库主要用于簇内各通信站点间的具体资源配置。

具体的，协调数据库的主要功能包括：

- 1) 信息收集与维护：相关信息主要用于簇间灵活的资源配置；
- 2) 簇的划分：根据预先定义规则将通信站点分簇；
- 3) 簇间资源配置管理，具体的，为不同簇规划不同的频率资源，或者通过发射功率的限制实现簇间通信站点的干扰抑制。

站内数据库位于通信站点内，用于在簇间资源配置管理基础上，进一步完成簇内各通信站点的具体资源配置，主要功能包括：

- 1) 信息收集与维护：相关信息主要用于簇内通信站点间灵活的资源配置及网络性能优化；
- 2) 簇内通信站点的具体资源配置：基于簇内通信站点的干扰共存原则，进一步确定通信站点的具体配置参数。

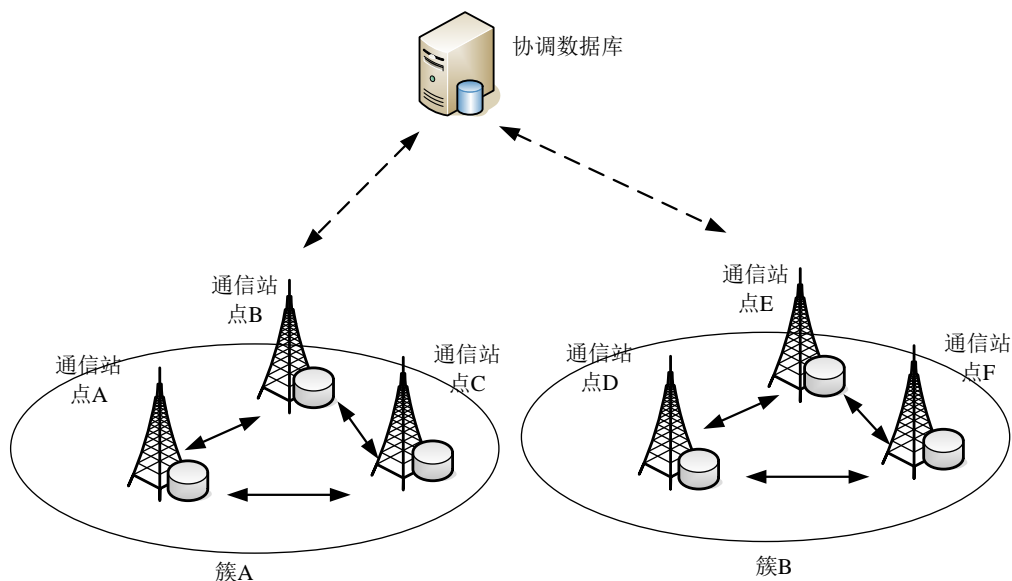


图 3 - 34 混合式频谱共享网络部署示意

依托于上述结构，需要研究协调数据库（信息收集与维护、通信站点间资源配置管理、簇的划分、簇间资源配置管理）、站内数据库（信息收集与维护、簇内通信站点资源配置）等技术。

3.4 干扰处理技术

3.4.1 干扰的定义

干扰是指在通信过程中发生的，由于外部环境或通信系统自身产生的导致有用信号接收质量下降、损害或者阻碍的情况。从本质上来说，干扰是指未按频率分配规定的信号占据了合法信号的频率，造成合法信号无法正常工作。

干扰是无线通信系统性能的主要限制因素，与无线系统各个层面的质量指标密切相关，最直接的体现在无线信道的通信质量和无线网络的容量。

3.4.2 干扰场景

3.4.2.1 系统间干扰场景

在相当长的一段时间内，IMT 系统（IMT2020）需要和其它的移动通信共存。在这种多无线系统共存的情况下，系统间的干扰是不可避免的。

1) 频谱共享系统间干扰

当 IMT 系统和其它系统进行频谱共享时，IMT 系统和同频的其它系统之间存在着明显的干扰。

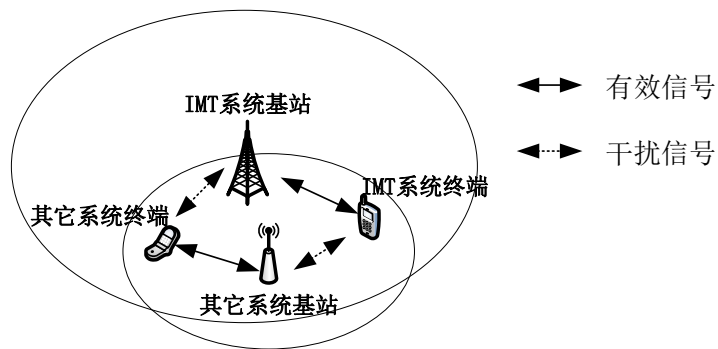


图 3 - 35 系统间干扰场景

2) 非共享频谱系统间干扰

当 IMT 系统与其它系统占用不同的频段时,系统间仍然会在特定情况下存在一定的干扰。此时形成的干扰主要以杂散干扰、互调干扰和阻塞干扰为主。

(1) 杂散干扰: 指干扰系统设备发射的带外信号以噪声的形式落入被干扰系统接收机的接收频道带内,形成对有用信号的同频干扰。由于发射机中功放、混频、滤波等器件工作特性不理想,会在工作带宽以外较宽的范围内产生辐射信号分量。

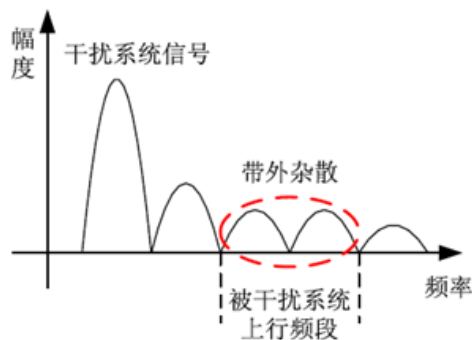


图 3 - 36 杂散干扰示意图

(2) 互调干扰: 指多个强信号同时落入接收机时,在接收机前段非线性电路作用下产生互调频率,互调频率落入被干扰系统接收机频带内造成的干扰。单频信号通过一个非线性系统/设备/器件时,在时域失真,在频域产生一系列基本频率分量的组合。

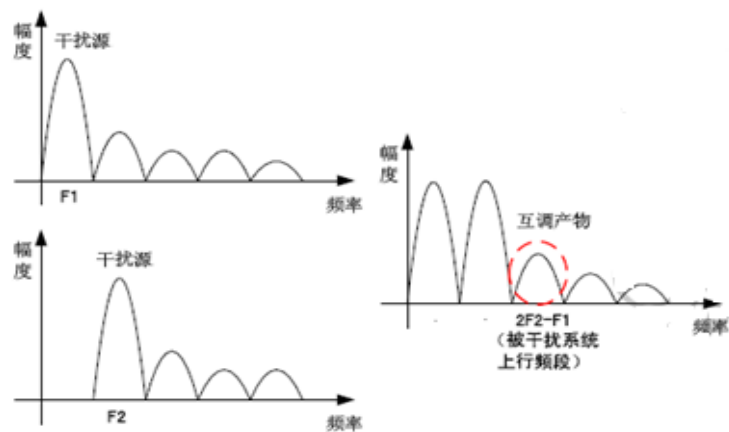


图 3 - 37 互调干扰示意图

(3) 阻塞干扰：任何系统接收机都有一定的接收动态范围，在接收功率超过允许的最大功率电平时，会导致接收机饱和和阻塞。被干扰系统接收频带外的强信号，导致接收机过载，使链路中的有源器件饱和进入非线性区，放大增益被抑制，引起的接收机饱和失真造成干扰。

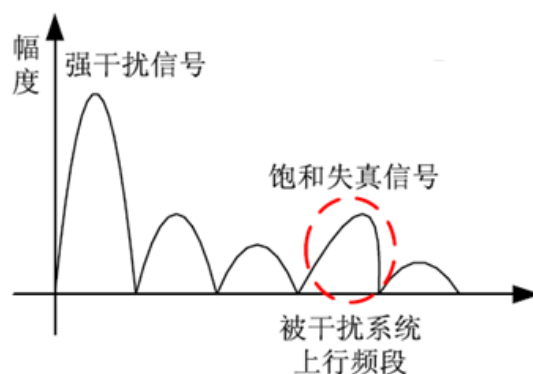


图 3 - 38 阻塞干扰示意图

3.4.2.2 系统内干扰场景

在 IMT 无线通信系统内部，由于对频谱资源加以规划、管理与利用等处理与操作，同样有可能会造成的频率上的干扰或者超出允许范围的干扰影响。

1) 邻近同频小区干扰

在蜂窝无线通信系统中，频率复用技术可以大大提高系统容量，但也造成了临近小区之间的同频干扰和泄露干扰。

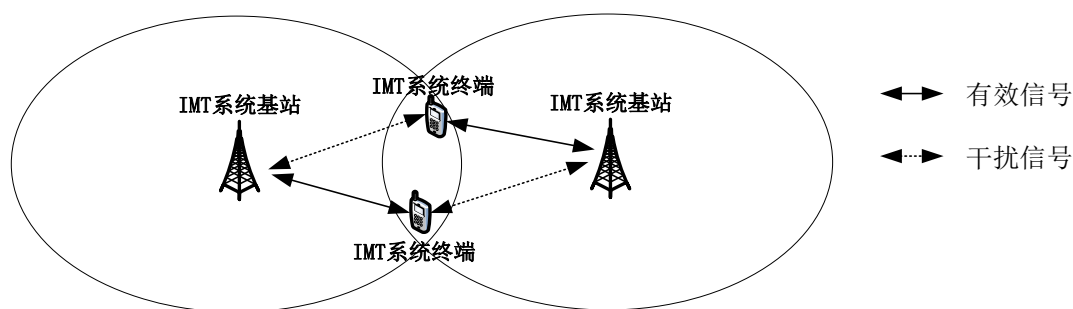


图 3 - 39 邻近同频小区干扰

2) 衍生系统干扰

为了提高无线通信系统的服务质量，系统中引入的无线中继 (Relay)、小基站 (small cell 基站，例如家庭基站 Femtocell) 等衍生系统，会造成系统内部的干扰出现。

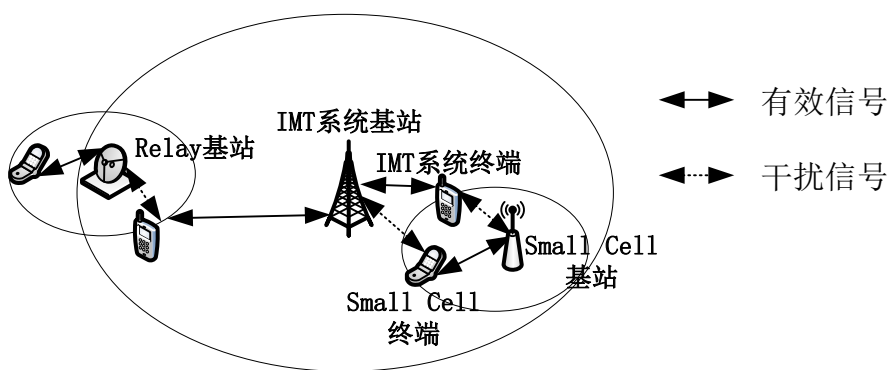


图 3 - 40 衍生系统干扰

3.4.2.3 多运营商干扰场景

一般情况下，同一运营商内的小小区可以进行完全规划或半规划的部署，而不同运营商之间是不会对部署情况进行协商的，可以认为运营商之间的站点是无规划的，这会导致不同运营商的小小区之间存在重叠覆盖的情况，当不同运营商共享频谱时，便会导致不可预期的运营商间的干扰（Inter-operator interference, IOI）。为评估运营商间的干扰情况，下面给出不同运营商在同一区域部署的小小区共享频谱资源时的干扰仿真。仿真中假设 2 个运营商共享频谱资源(运营商 A 和运营商 B)，小小区部署采用单层双条模型(Dual strip model)，小小区半径为 10m，信道参数参考家庭基站的典型参数，载波带宽为 10MHz，不同运营商的小小区同频部署，每个运营商在每个房间最多部署一个基站，其中运营商 A 部署的小小区比例是 0.5，运营商 B 部署的小小区比例是 0.6，小小区部署的房间和位置随机撒播，每个小小区服务 1 个用户。

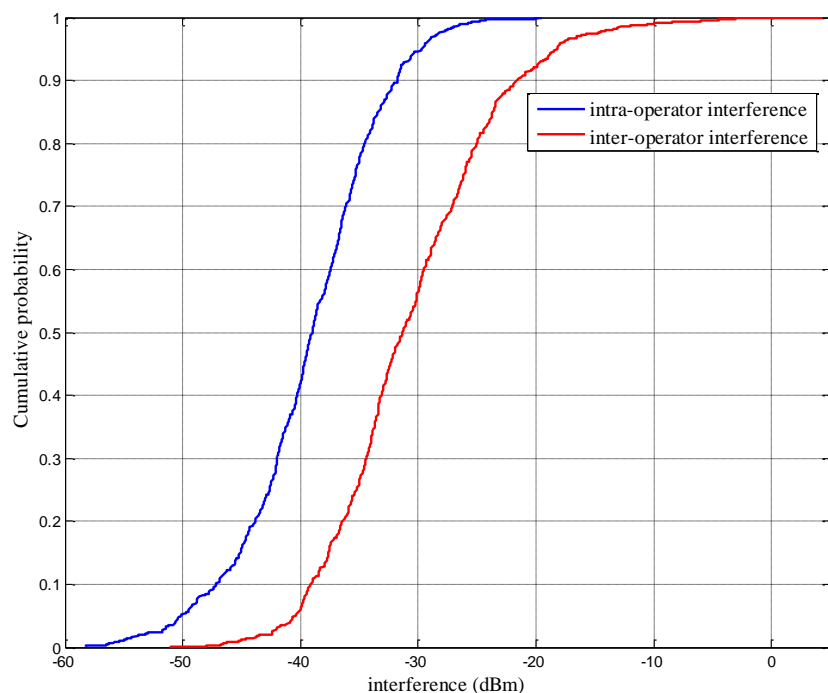


图 3 - 41 运营商内和运营商间的下行干扰的 CDF

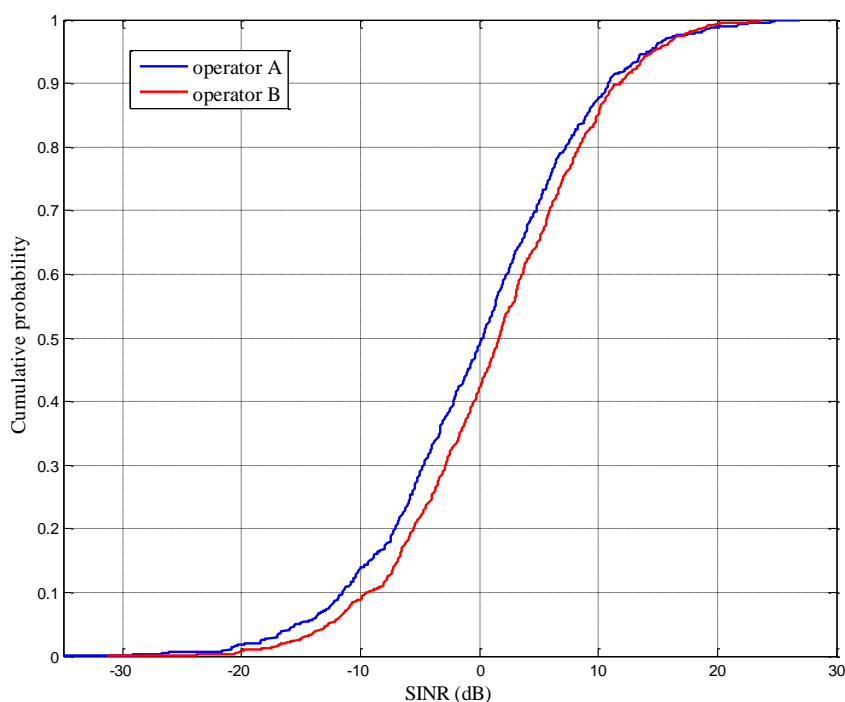


图 3-42 不同运营商下行 SINR 的 CDF

从图中可以看出，由于不同运营商部署的小小区重叠程度比运营商内的重叠程度更大，从而导致运营商间的干扰远远大于运营商内的干扰。由此可以推断，在跨运营商频谱共享场景中，运营商间的干扰在总干扰中占主导地位。图中显示，下行 $\text{SINR} < 0\text{dB}$ 的可能性约为 40~50%。由此可见，运营商间的干扰会成为跨运营商频谱共享亟需解决的问题之一。

3.4.3 干扰管理技术

干扰管理技术的目标是为了降低或者消除干扰对系统和用户通信性能的影响。

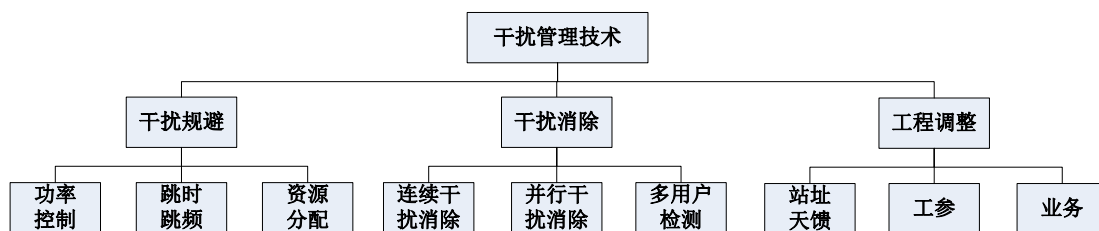


图 3-43 干扰管理技术分类

1) 干扰规避技术

从发射端进行考虑，以避免干扰的出现或者降低干扰的影响程度方面着手的技术，包含了功率控制、信道分配、调度、切换、接入控制、负载控制、端到端的 QoS 和自适应编码调制等技术。

(1) 频率复用和资源调度技术

针对蜂窝无线通信系统，对蜂窝小区的复用频谱进行规划和优化管理，从而在提升系统的频谱资源利用效率和容量时，不形成或者较少形成系统内部的干扰。典型的优化复用技术包括软频率复用（SFR）、频率选项性调度（FSS）等。

（2）用户调度和业务调度技术

针对无线通信系统中的共道干扰用户进行管理，通过合理的用户调度或者业务调度回避干扰，以获得好的系统性能。

（3）多天线 MIMO 技术

在无线通信系统中，利用多天线 MIMO 技术，以及波束、编码等技术，对系统通信信号加以成型处理，从而降低系统用户间的干扰。

2）干扰消除技术

这是在接收端降低干扰的一类算法，其要点在于要求干扰信号的特性，它也要求接收系统的天线阵列消除任何干扰。该技术需要解调、解码所需的信息，随后使用这些信息及信道预测，从接收到的信号消除接收到的干扰。

3）工程优化

基于网络的技术、业务的特点和分布，通过对网络结构、网络参数及业务的分流调整等措施，降低网内基站间的干扰水平。

4）干扰预测技术

在用户调度过程中，对后续可能发生的、潜在的干扰进行预估计（现有算法主要是基于对既有的、已发生的干扰的考察进行用户调度），避免发生干扰之后再进行处理，以便获得系统性能的改善。

5）干扰管理方法的综合应用

在干扰管理处理方法中，可以综合考虑多种多类不同方法的混合使用，针对多维度上不同类型通信间的干扰进行整体管理，有机的结合多种方法共同作用，以期获得更好的系统性能。

3.4.3.1 多运营商频谱共享的干扰管理

3.4.3.1.1 基于功率水平协调的跨运营商干扰管理

近年来，异构组网（Heterogeneous Network, HetNet）早已得到业界广泛的关注和研究，它给网络部署提供了极大的空间灵活性，宏小区可以提供广域覆盖，微小区（Micro cell）、微微小区（Pico cell）、家庭基站小区（Femto cell）等小小区（Small cell）可以增强热点或盲区覆盖并提供高速接入。超密集网络（Ultra-dense network, UDN）是实现 1000x 速率提升的关键技术之一，网络中会存在海量小站，静态频谱规划和分配方式远远不能满足业务增长的需求。由于小小区的覆盖范围较小、服务用户数量较少，运营商间在小小区进行频谱共享相对宏站较为容易，本方案主要关注小小区场景下的跨运营商频谱共享。由于运营商之间的测量和信息交互较为敏感，跨运营商的载波选择和调度不易实现，这里提出基于模糊信息交互的跨运营商资源管理机制，在避免运营商间干扰的前提下使频谱使用效率最大化。该方案的具体步骤如下：

(1) 各运营商分别对本运营商内的环境进行测量。

- 各运营商频谱控制器控制范围内的小小区根据测量获取运营商内的小小区之间的干扰关系，并构建频谱共享区域内的邻居关系拓扑图，当邻居关系拓扑图发生变化时，更新频谱共享过程。

(2) 各运营商的频谱控制器计算本运营商内的最小频谱需求 D_A 和 D_B 。

- 根据邻居关系拓扑图，各运营商的频谱控制器计算本运营商内的最大团信息，并以此作为最小频谱需求信息。
- 为避免敏感信息的泄露，假设各运营商不对其他运营商的小小区进行测量，只需维护本运营商内的邻居关系，从而可以获取本运营商内的干扰关系拓扑。下图是运营商 A 和运营商 B 的小小区干扰关系拓扑图，红点表示运营商 A 的小小区，蓝点表示运营商 B 的小小区，两点之间的连线表示小小区之间存在干扰邻居关系，不能使用相同的载波。根据干扰关系拓扑图，各运营商可以计算各自在本区域内的最大团，每个小站节点可以根据本节点服务用户的数量以及业务状况来获取本节点的频谱需求，从而计算最大团区域内总的最大频谱需求，即 $D_i = \sum_{j=1:N} d_j, i = A, B$ ，其中 N 表示本区域内运营商 i 的小站节点个数。

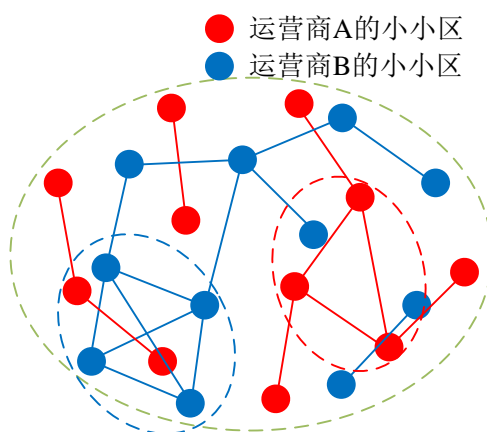


图 3 - 44 干扰关系拓扑图

(3) 运营商 A 和运营商 B 的频谱控制器将各自频谱共享区域内的最小频谱需求信息上报给第三方集中管理实体或者通过跨运营商通信接口来交互最小频谱需求信息。

(4) 第三方集中管理实体根据各运营商内的最小频谱需求信息以及异运营商的最小频谱需求信息计算每个运营商可利用的频谱资源。或者各运营商通过另外一个运营商的信息来计算本运营商可利用的频谱资源。

- 当两个运营商的最小频谱需求之和不大于共享频谱池内的资源时，每个运营商可以按照各自的需求获取足够的资源接入频谱。
- 当两个运营商的最小频谱需求之和大于共享频谱池内的资源时，频谱资源匮乏，此时需要一定的机制保障小小区正常工作。为保证公平性，将共享频谱池分为三部分，对不同运营商的每一部分作一定的功率限制。如下图所示，运营商 A

在红色部分使用较高功率 P_H ，在蓝色部分使用较低功率 P_L ，相应地，运营商 B 在蓝色部分使用较高功率 P_H ，在红色部分使用较低功率 P_L 。而中间部分是两个运营商都必然会接入的部分，限制使用中等功率 P_M ，这样可以缩小小区范围，本来会有干扰的小小区之间的干扰从而会消除。

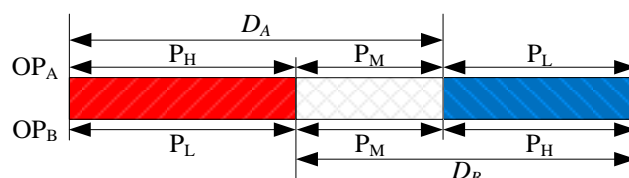


图 3-45 功率控制

(5) 第三方集中管理实体将每个运营商可以使用的频谱资源以及对应的功率限制发送给各运营商的频谱管理器。

(6) 各运营商的频谱控制器给其所辖的小小区配置频谱资源。

- 为避免运营商之间的干扰，在分配频谱的时候，运营商 A 从低频段向高频段进行载波分配，运营商 B 从高频段向低频段进行载波分配。

为验证本方案的性能，下面给出了本方案的性能仿真，仿真参数如下表所示。

部署模型	单层双条模型
房间大小	10 m * 10 m
激活率	密集 1；稀疏 0.5
运营商数量	2
用户和基站的最小距离	0.3 m
用户分布	一个基站服务一个 UE
基站功率	23 dBm
系统带宽	80 MHz
共享频谱池	8 CCs
每个载波的带宽	10 MHz
接收噪声指数	9 dB
路径损耗模型	TR 36.872
渗透损耗	外墙 23 dB；内墙 5 dB
阴影衰落标准差	10 dB

下图是小小区密集部署场景下的仿真结果，小小区的激活率是 1，即所有房间的小小区都处于激活状态。红色线条表示使用功率控制的跨运营商频谱共享方案，蓝色线条表示不使用功率控制的频谱共享方案，紫色线条表示运营商之间不进行频谱共享的方案。从图中可以看出，在小小区密集部署场景下，运营商之间进行频谱共享比无共享方式的性能有较为可观的性能增益。由于使用了功率控制，降低了运营商之间的干扰，使得有功率控制的方案比无功率控制的方案性能有所提升。

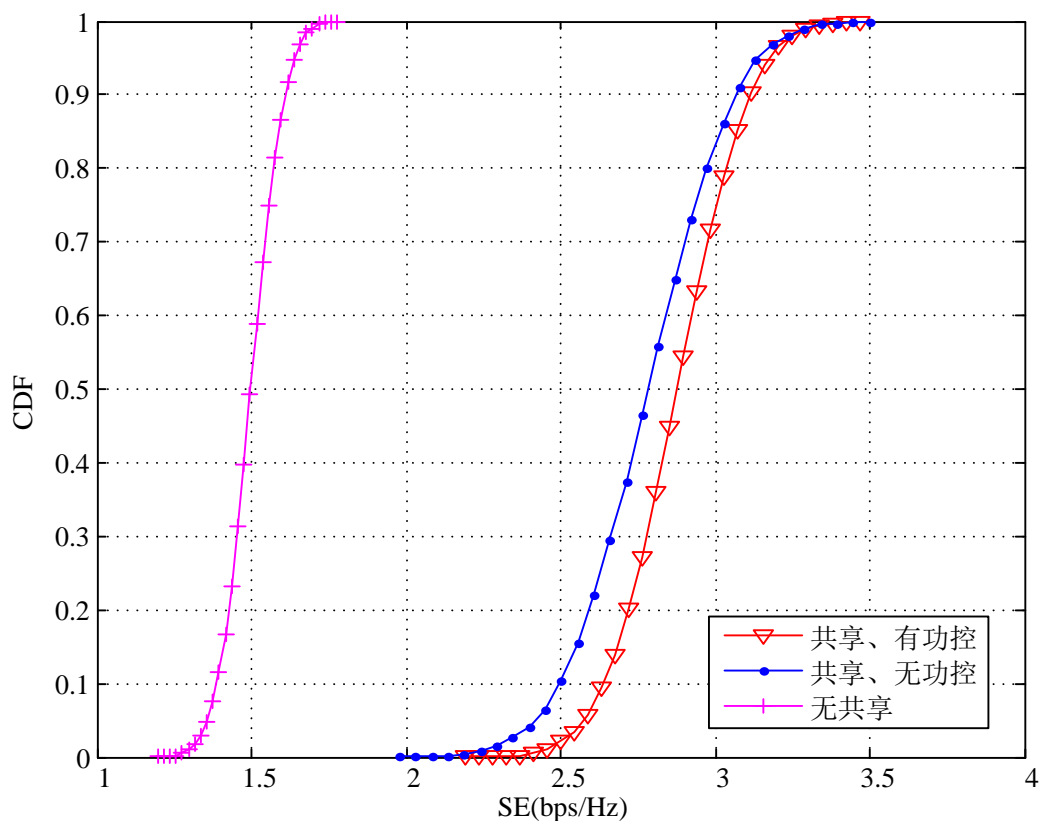


图 3 - 46 密集部署场景下的性能

下图是小小区稀疏部署场景下的仿真结果，小小区的激活率是 0.5，即每个运营商只有一半的房间的小小区处于激活状态。在小小区稀疏部署场景下，即使运营商间无共享的方案也可以满足小小区的频谱接入需求，因此，三种方案的性能曲线基本上重合。该仿真说明在稀疏部署场景下，无需进行运营商间的频谱共享。当然，该仿真的业务量仿真条件受限，如果每个小小区承载的业务量较大，可能也会出现本运营商内的频谱资源不足的情况，从而需要运营商间的频谱共享。

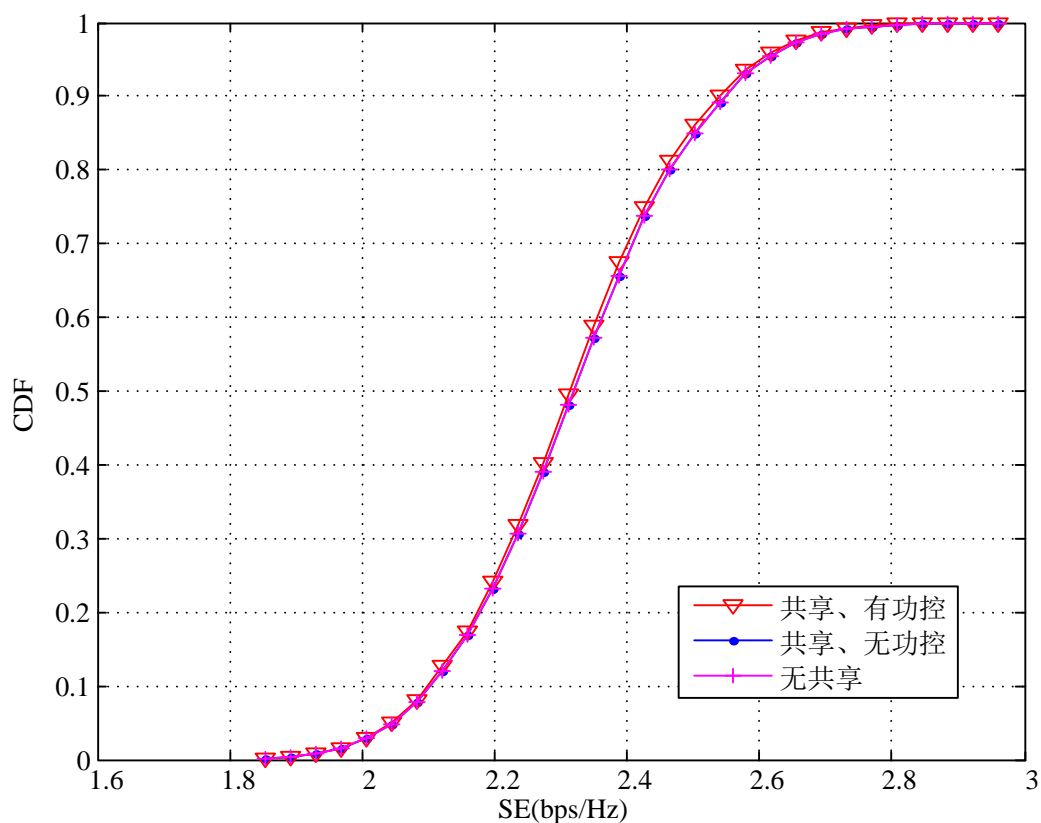


图 3 - 47 稀疏部署场景下的性能

3.4.3.1.2 基于对等协作的跨运营商载波选择算法

在只考虑单个运营商（如运营商 A）的情况下，相邻网络节点相互影响，形成干扰邻居关系拓扑，如下图所示。其中， Q_A 表示运营商 A 的网络节点，网络节点 Q_{A1} 和 Q_{A2} 是干扰邻居关系， Q_{A4} 、 Q_{A5} 和 Q_{A6} 分别为干扰邻居关系。网络节点之间可通过载波选择算法接入合适的载波来避免对邻居节点的干扰，网络节点能够获取无线资源分配表（Radio Resource Allocation Table, RRAT）和背景干扰矩阵表（Background Interference Matrix, BIM），在载波选择的过程中，根据表中的无线资源分布情况和干扰关系来选择载波。值得注意的是，这些载波选择算法都是在同一网络侧实施的，比如单运营商的网络节点载波选择。

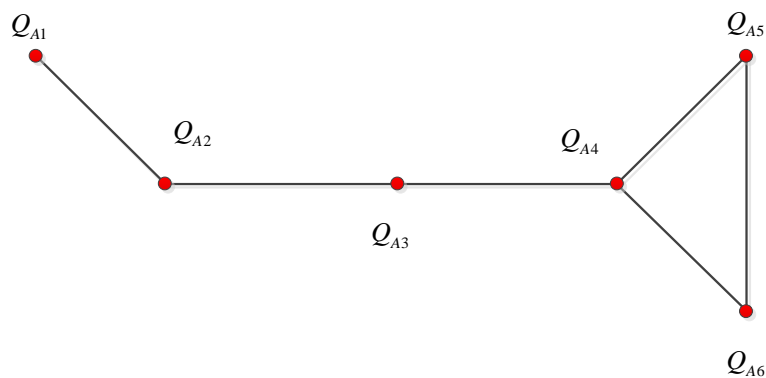


图 3 - 48 单一运营商场景的节点拓扑结构图

然而，在多运营商频谱共享场景下，运营商之间共享频谱共享池中的频谱资源，在没有跨运营商协调的情况下，不同运营商的网络节点之间必然会产生干扰。图 8 是多运营商场景的节点拓扑结构图，其中 Q_A 是运营商 A 的网络节点， Q_B 为运营商 B 的网络节点， Q_{A1} 和 Q_{A2} 为同一运营商内的干扰邻居， Q_{B1} 是 Q_{A2} 的异运营商干扰邻居。由于运营商之间信息交互的敏感性，多运营商不会像单个运营商一样能够获取足够多的信息，因此，如何协调不同运营商网络节点的频谱接入是当前面临的问题。

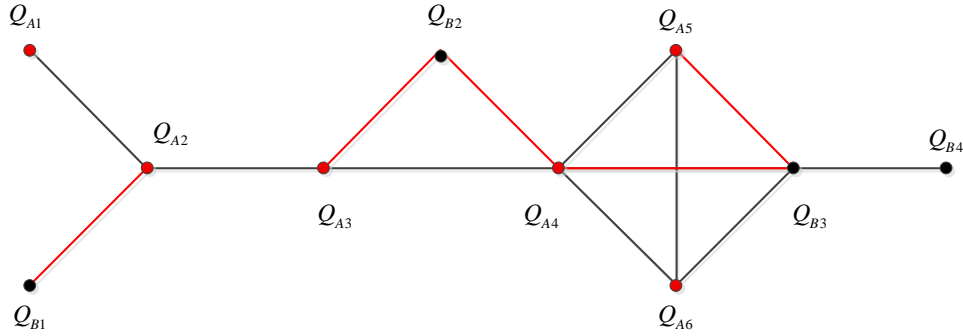


图 3 - 49 单一运营商场景的节点拓扑结构图

运营商 A 的网络节点在接入运营商 B 的频谱资源时，与运营商 B 的网络节点平等竞争接入。运营商 B 的网络节点很容易掌握自己的授权频谱的信道质量情况，因为一些利益关系，运营商 B 将自己的网络参数视为敏感信息，不愿与运营商 A 分享，这就会导致运营商间信息不对称情况。理论上，用户终端是可以通过测量得到非注册运营商网络节点的频谱使用情况，这给运营商网络节点通过感知周围无线环境，测量其非注册运营商网络节点的频谱占用情况和信道质量提供了可能。本文提出一种对等协作算法，运营商 A 的网络节点通过其下行接收机或者注册 UE 的测量报告，平等竞争接入运营商 B 的频谱资源，算法如下：

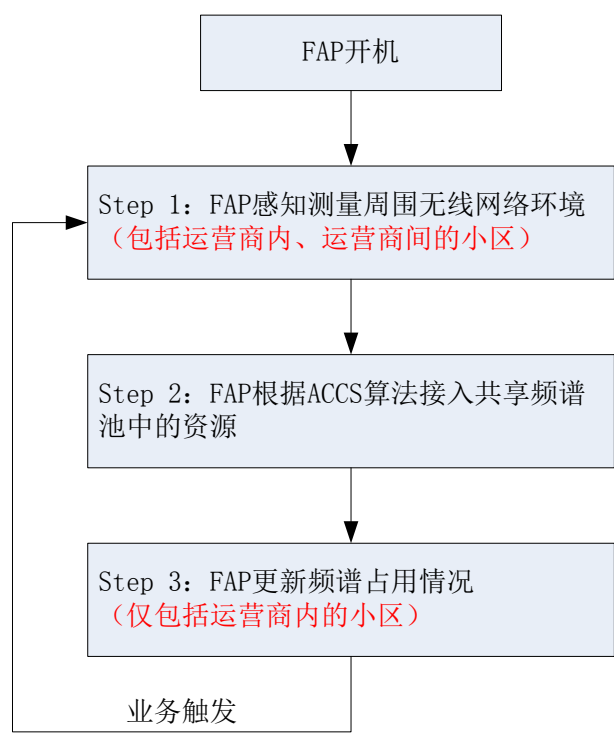


图 3 - 50 多运营商对等协作频谱共享接入算法

具体的算法描述如下：

Step 1: FAP 开机后通过其下行接收机测量其周围无线环境或通过其注册 UE 上报的测量报告获得运营商内以及运营商间的无线资源分布情况和信道质量，确定干扰邻居关系。

Step 2: FAP 根据其测量到的邻居 FAP（包括异运营商 FAP）对其的干扰信息和当前无线资源分布情况，使用自主载波选择（Autonomous Component Carrier Selection, ACCS）算法接入共享频谱池中的频谱资源。

Step 3: FAP 根据通过广播信道通知同一运营商的基站更新其频谱资源占用情况。当无线业务变化时，触发 Step 1，继续接入或释放更多的频谱资源。

仿真结果及分析

本节使用 MATLAB 仿真平台，验证了基于对等协作的动态频谱资源分配算法对网络中的性能增益。仿真 FAP 密集部署模型，下表为本仿真使用的参数。A 和 B 运营商的家庭基站在每个房间的分布概率相同，每个房间只部署一个家庭基站。仿真场景为 2×10×2 双排模型，房间大小均为 10m×10m，每个房间随机放置一个 CSG 模式的 FAP 且随机部署 5 个 UE，UE 只能接入同一房间内的 FAP，基站开机时选择载波且每个 FAP 开机顺序是随机的，房间中的 FAP 属于哪个运营商时也是随机的。本仿真不考虑 CC 类型的差异性，FAP 的下行接收机在所有载波上均以同样功率发射。本仿真使用轮询包调度方式和全缓存业务模型。

参数	设置
房间大小	10*10m
网络结构	双排 2*10*2

载波频率	2GHz
A 运营商载波带宽	20MHz
B 运营商载波带宽	20MHz
FAP 发射功率	23dBm
FAP 天线增益	0dBi
用户天线增益	0dBi
用户噪声系数	9dBi
噪声功率谱密度	-174dBm/Hz
UE 噪声系数	9dB
内墙衰减	5 dB
外墙衰减	10 dB
阴影衰落标准差	4dB
用户和 FAP 最小距离	3m
路损	$30\lg(d)+37$
每个房间 UE 个数	5
A 运营商 CC 数量	3
B 运营商 CC 数量	3
FAP 位置	随机分布在每个房间

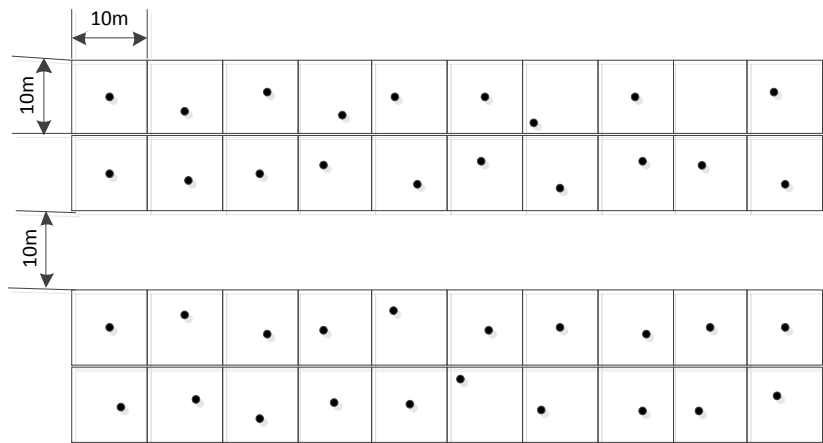


图 3 - 51 Dual Strip 仿真场景

本提案主要从运营商间是否进行频谱共享以及是否进行信息交互设置四种仿真对比方案。方案 1 是运营商间无频谱共享、无信息交互场景(No Sharing and No Information, NSNI)；方案 2 是运营商间有频谱共享、无信息交互场景（Sharing and No Information, SNI）；方案 3

是运营商间有频谱共享、部分信息交互的对等协作场景（**Proposed**），运营商之间只通过测量来对异运营商频谱资源占用情况以及干扰关系进行判定；方案 4 是运营商间有频谱共享、完全信息交互的对等协作场景（**Sharing and full Information, Sfl**），运营商之间可以精确获取异运营商频谱占用情况以及干扰关系，等价于单个运营商的场景。除方案 3 以外的三种方案可作为该方案的一种性能对比的基准。

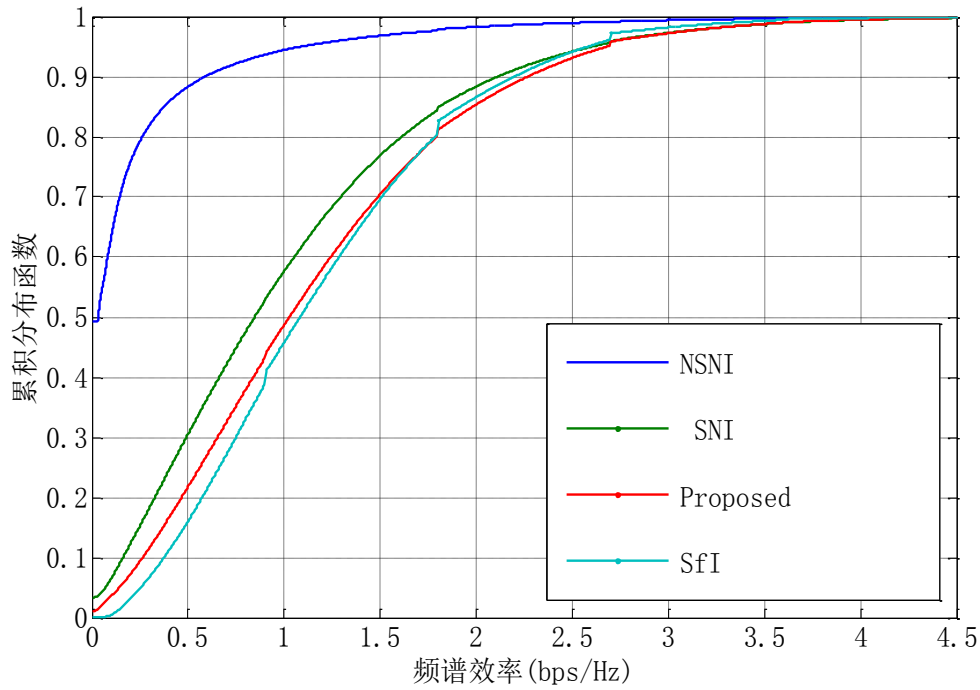


图 3 - 52 频谱效率累积分布图

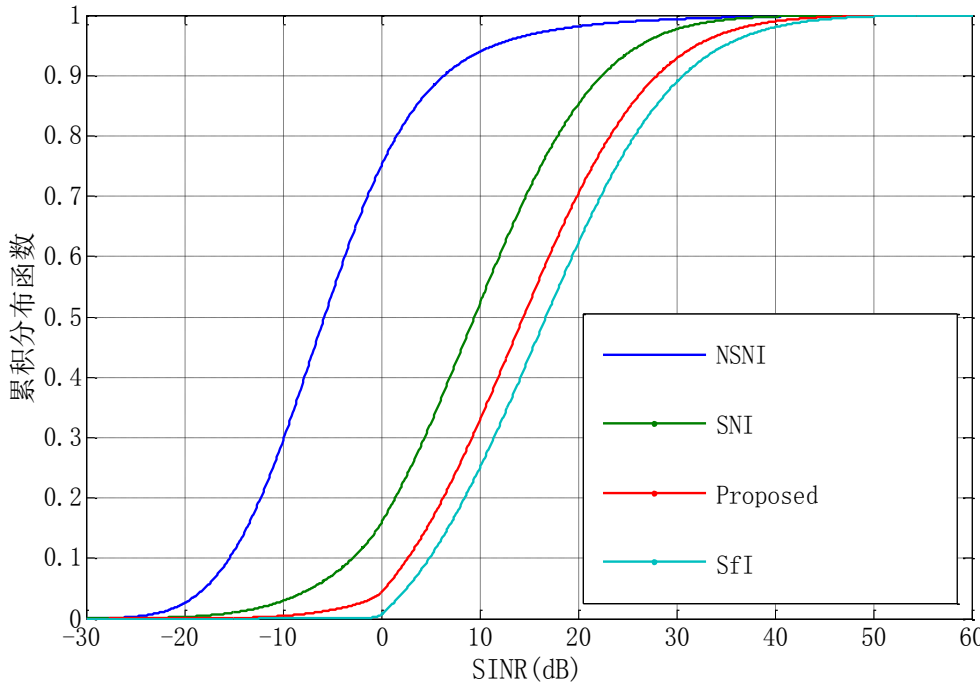


图 3 - 53 SINR 累积分布函数图

上面分别为频谱效率累积分布函数图和 SINR 的累积分布函数图。通过分析可知，本文提出的对等协作算法比 NSNI 以及 SNI 方案的频谱效率和 SINR 要好很多；并且非常接近无差别的频谱共享方案 SfI，这说明只要网络节点的认知能力足够强，就能够通过分布式获得大部分的异运营商基站的无线资源分布情况。

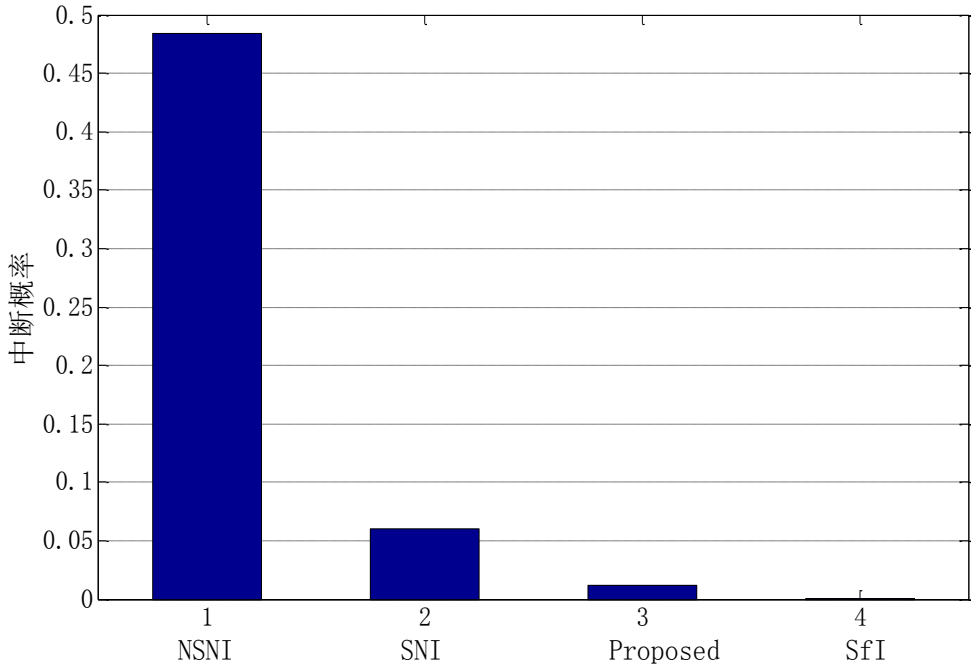


图 3 - 54 用户中断概率柱状图

上图为当中断功率为-6dB 时的各场景中中断概率，很明显本文提出的方案，SNI 方案，SfI 方案的小区边缘用户中断概率比 NSNI 小很多，这说明频谱共享对提升网络整体性能帮助巨大。与此同时，对等协同方案和 SfI 方案的中断概率很接近。

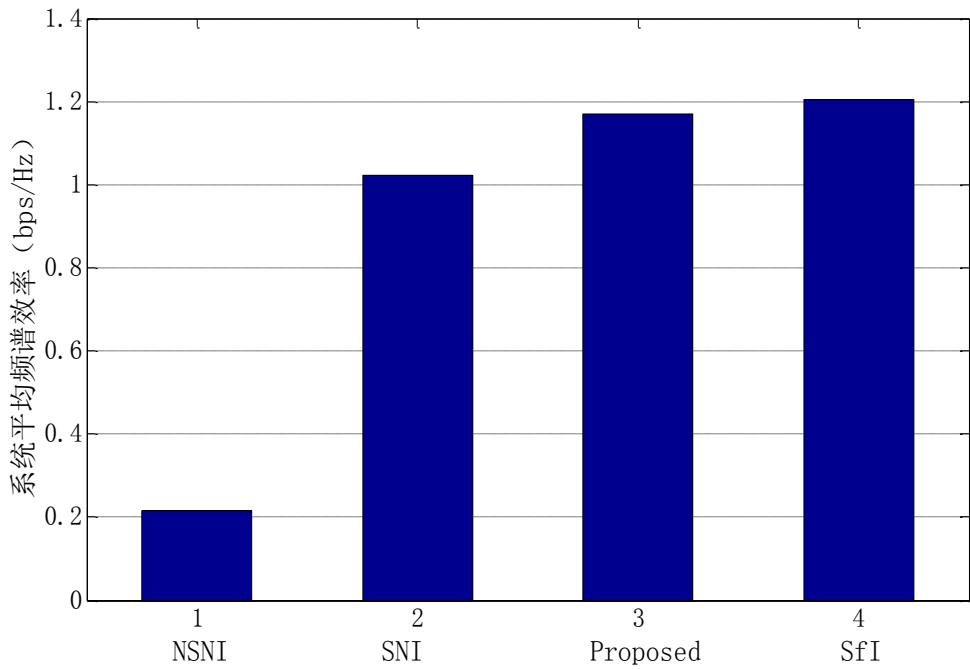


图 3 - 55 系统平均频谱柱状图

上图为网络系统平均频谱效率，很明显，共享频谱资源方案景（Proposed 方案，SNI 方案和 Sfl 方案）比不共享方案（NSNI 方案）的平均频谱效率提高 400%-500%，对等协作方案与 Sfl 方案的系统平均频谱效率非常接近。

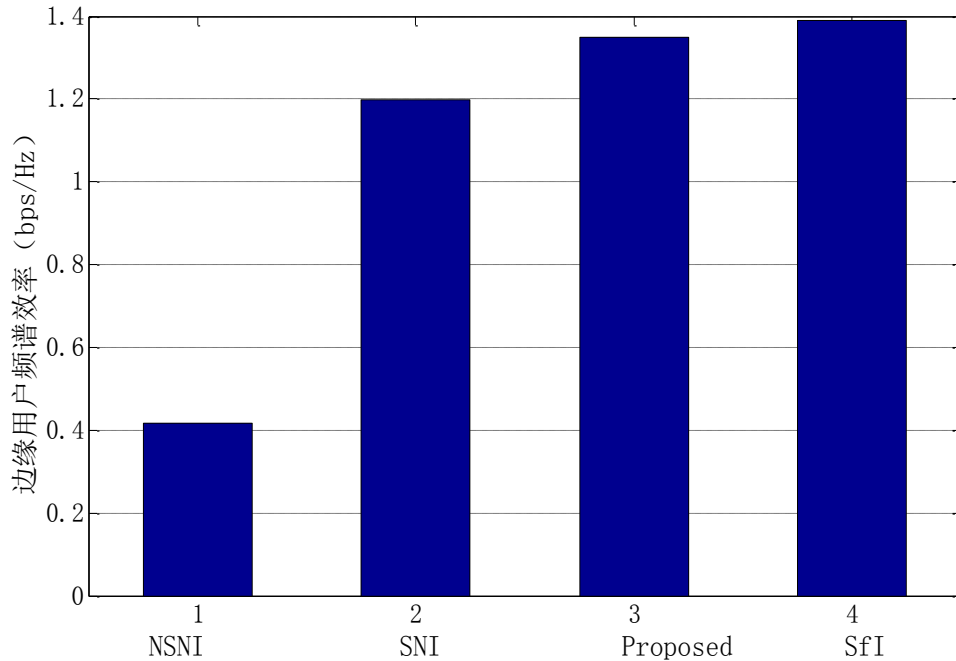


图 3 - 56 边缘用户频谱效率柱状图

上图为小区边缘用户的频谱效率，共享频谱资源方案（Proposed 方案，SNI 方案和 Sfl 方案）比不共享方案（NSNI 方案）的边缘用户频谱效率高 188%-234%，本文所提算法与 Sfl 方案的边缘频谱效率非常接近。

由上面分析结果可知，频谱共享方案的性能增益要好于非频谱共享方案的增益，信息交换场景比不信息交换的场景性能增益高。对等协作算法虽然没有向异运营商小区更新频谱占用信息，但是其各方面网络性能均非常接近运营商间完全信息交互场景。

本章提出了一种新型的对等协同动态频谱共享方案。运营商间通过认知无线电技术，感知其周围所有运营商的无线资源分配情况，分布式协调频谱资源分配，尽量避免同信道干扰。通过仿真验证表明，在中断 SINR 为-6dB 时，固定频谱分配方式的中断概率远远大于对等协同场景，同时本文提出的对等协作算法在接入频谱池时各方面网络性能非常接近运营商间完全信息交互场景。

3. 4. 3. 1. 3 基于干扰协调的跨运营商频谱共享方案

为消除运营商间的干扰并提高网络频谱使用效率，本节提出多运营商的节点共享频谱资源时的频谱共享方案，该方案称为运营商间的频谱友好协商方案。该方案中，假设有两个运营商（运营商 A 和运营商 B），共享频谱池将被分为三部分，即运营商 A 独自使用的频谱、运营商 B 独自使用的频谱，运营商 A 和运营商 B 共享使用的频谱。下图是该方案的示意图。

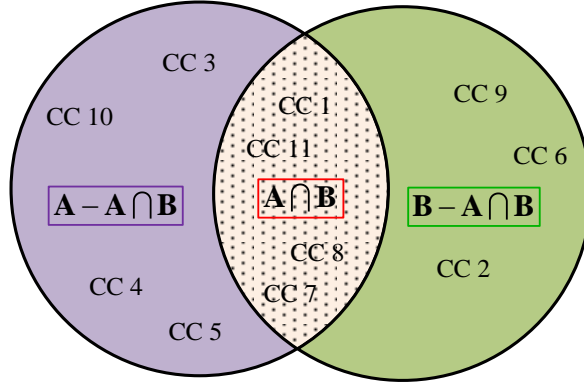


图 3 - 57 共享频谱池的分割方案

运营商 A 和运营商 B 共享使用的频谱资源集合如下：

$$\{CC_1, CC_2, CC_3, CC_4, CC_5, CC_6, CC_7, CC_8, CC_9, CC_{10}, CC_{11}\}$$

运营商 A 可以使用的频谱资源集合如下：

$$\text{Set A} = \{CC_1, CC_3, CC_4, CC_5, CC_7, CC_8, CC_{10}, CC_{11}\}$$

运营商 B 可以使用的频谱资源集合如下：

$$\text{Set B} = \{CC_1, CC_2, CC_6, CC_7, CC_8, CC_9, CC_{11}\}$$

运营商 A 和运营商 B 共享使用的频谱资源集合如下：

$$A \cap B = \{CC_1, CC_7, CC_8, CC_{11}\}$$

运营商 A 独自使用的频谱资源集合如下：

$$A - A \cap B = \{CC_3, CC_4, CC_5, CC_{10}\}$$

运营商 B 独自使用的频谱资源集合如下：

$$B - A \cap B = \{CC_2, CC_6, CC_9\}$$

在共享频谱资源池被分割的情况下，两个运营商分别独立的将可用频率资源以分量载波（Component Carrier，CC）为单位分配给各自部署的小基站。在分段式分割的前提下，我们对采用两种干扰协调机制的方案进行了仿真，并与不对共享频谱池分割的完全复用（full reuse）的方式进行了对比。

- 运营商内部采用小区间干扰协调机制，即运营商内的小区之间通过干扰测量，建立网络干扰拓扑，若两个小区之间的干扰超过一定门限值，则这两个小区不分配同样的分量载波。在满足前述条件下，两个运营商分别将自己的可用载波随机分配给各自部署的小基站。
- 除了采用方案一中的运营商内协调机制外，还采用运营商间的协调机制，若异运营商的两个小区之间有较强的干扰关系（干扰超过给定门限值），则避免将相同的载波分配给这两个小区。若某个小区与较多的异运营商小区之间有强干扰关系，则尽量将该小区所属运营商的独占频率资源分配给该小区。

针对上述方案仿真的场景如下所示，在典型的双排模型（Dual Strip model）下，运营商 A 和运营商 B 在同一区域部署室内小基站，每个运营商在每个房间内部署的小基站数量小于或等于 1，基站在房间内随机放置。部分参数设置如下表所示。为便于区分，上述两个方案在仿真结果中分别对应于 scheme2 和 scheme3。

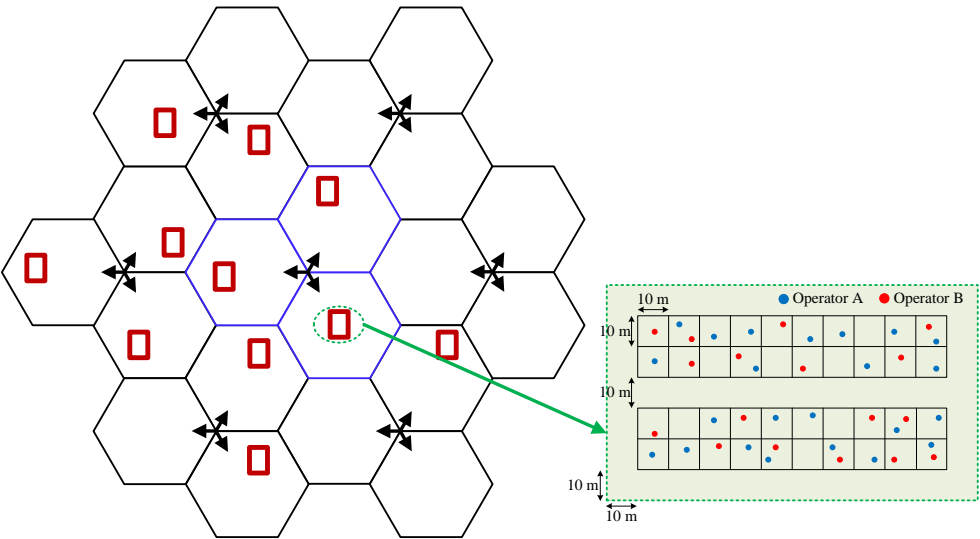


图 3 - 58 运营商间协调方案仿真场景

参数类型	参数假设
小基站部署模型	双条模型
信道模型	家庭基站网络中的典型信道模型
运营商 A 的基站部署比例	0.4
运营商 B 的基站部署比例	0.8
分量载波带宽	10 MHz
房间宽度	10 m
UE 与基站之间的最小距离	1m
基站的发射天线数	1
基站的天线模式	全向天线
基站发射天线增益	0 dBi
基站发射功率	23 dBm
每个小区中的用户数	1

为了体现不同方案的差异，我们分别对比了三种方案情况下，运营商 A 网络下行链路受到的运营商间干扰（IOI, Inter-Operator Interference）的统计分布情况、UE 下行 SINR 的统计分布情况，以及下行平均频谱效率。相应仿真结果如下所示：

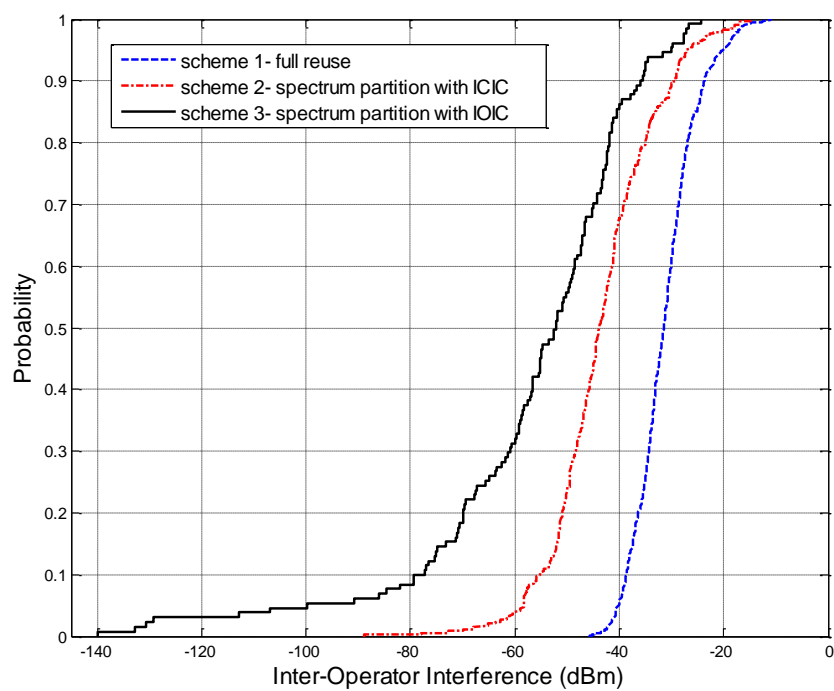


图 3 - 59 三种方案对应的 IOI 累计概率分布图

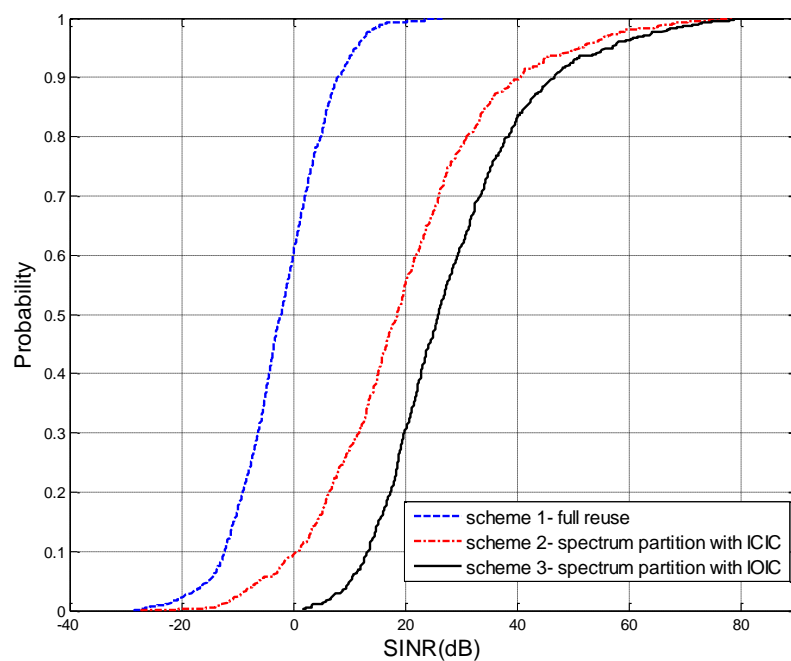


图 3 - 60 三种方案对应的下行 SINR 累计概率分布图

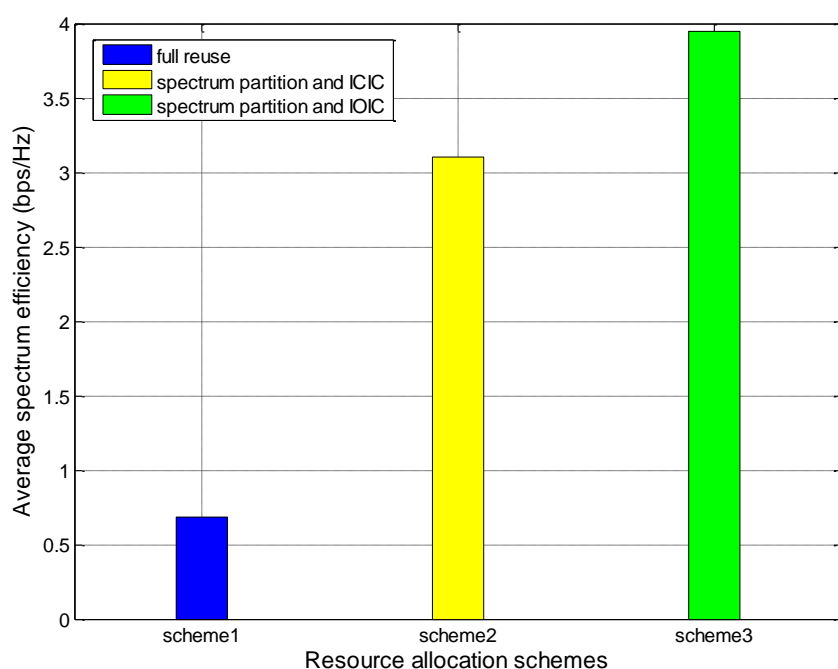


图 3 - 61 三种方案对应的平均频谱效率

从图中的结果可以看出，对共享频谱资源池进行三段式划分后，对运营商间干扰有明显的抑制作用（对比 scheme1-蓝色虚线和 scheme2-红色点划线）；而采用了运营商间的干扰协调机制后，IOI 更是大幅降低(参见 scheme3-黑色实线)。相应地，进行运营商间协调的方案在信干噪比（SINR）和平均频谱效率两个方面都表现出明显的性能优势（scheme2 较之 scheme1 在平均频谱效率方面提升约 343%，scheme 3 较之 scheme2 在平均频谱效率方面提升约 26%）。因此，通过仿真，我们验证了在运营商之间进行同优先级频谱共享的场景下，对共享频谱池进行划分结合运营商间干扰协调方案对抑制运营商之间干扰方面的有效性，以及其在提升系统平均频谱效率方面的效果。

3.4.3.2 基于主动干扰认知的频谱共享接入

3.4.3.2.1 概述

随着无线通信的发展和人们接入无线数据的需求变化，无线业务的种类和数据流量呈现爆发式增长。为了避免同频干扰、提高用户体验，无线业务被分配专有的频段。目前，可供使用的低频段频谱已经非常稀缺。虽然大多数无线业务被分配专有的频段，但是相当大部分的专有频段的占用率非常低。因此，相对于寻找新的频谱资源，如何提高频谱的使用率成为了近年来学术界和工业界的研究热点。

机会式频谱接入（Opportunistic Spectrum Access, OSA）和频谱共享（Spectrum Sharing, SS）是两种能有效提高频谱使用率的无线通信技术。机会式频谱接入中，没有被分配频段的用户（认知用户）被允许使用被分配给特定业务用户（主用户）但处于闲置状态的专用频段。频谱共享中，只要认知用户能准确控制对主用户的干扰，认知用户就可以使用正在被主用户占用的频段。因此，频谱共享技术相对于机会式频谱接入技术可以更加有效的提高频谱利用率。

在频谱共享中，获取认知用户发射端到主用户接收端之间信道增益(称为干扰信道增益)

成为了认知用户控制干扰的关键问题。如果认知用户能够获取瞬时干扰信道增益，那么认知用户可以在干扰约束条件下最大化发射功率，获得最大瞬时通信速率。相反，如果认知用户不能够获得瞬时干扰信道增益，那么认知用户只能利用统计干扰信道增益信息，配置发射功率满足干扰约束条件。

3.4.3.2.2 研究现状和存在的问题

目前的信道增益获取主要分为两种，一种是被动式估计，另一种是主动式估计。

在被动式估计中，发射端向接收端发送包含有训练序列的信号。接收端接收信号，根据训练序列估计信道增益。最后，接收端将估计得到的信道增益通过反向链路反馈给发射端。但是，认知无线电中不存在主用户接收端到认知用户发射端的反馈链路。因此，认知用户不能通过被动方式获取干扰信道增益。

在主动式估计中，往往假设主用户收发端之间存在功率自适应或者速率自适应。在功率自适应下，主用户接收端向主用户发射端反馈信道信息，主用户发射端根据信道状态实时调整发射功率，维持接收端处恒定的信干噪比。在速率自适应下，主用户发射端固定发射功率，主用户接收端向主用户发射端反馈信道信息，主用户发射端根据信道状态实时调整适合信道传输的调制编码方式。

认知用户发射端主动通过干扰信道增益向主用户接收端发送干扰信号，降低主用户接收端的信干噪比。从而，主用户接收端测量到一个低于真实值的信干噪比，反馈给主用户发射端一个低于真实值的信道增益。在主用户功率自适应或者速率自适应的作用下，主用户发射端提高发射功率或者降低调制编码速率。由于该调整包含了干扰信道信息，因此，认知用户可以通过比较干扰前后的调整估计干扰信道增益。

一般来说，认知用户发射的干扰信号越强，干扰信道增益估计越准确。然而，认知用户通过干扰主用户的方式来估计干扰信道增益是不被允许的。因此，该方法在实际应用中也会受到一定的限制。

3.4.3.2.3 主动干扰认知的频谱共享

3.4.3.2.3.1 基本原理

基于现有信道增益估计方法对干扰信道增益估计的局限性，我们试图提出一种在实际场景中适用的新的干扰信道增益估计方法。在现有的主动式估计方法中，认知用户发射端向主用户接收端发送干扰信号，改变主用户接收端的信干噪比，触发主用户的功率自适应或者速率自适应，从而估计干扰信道增益。

我们首次将全双工中继引入到干扰信道增益估计中。具体而言，主用户不知道认知用户的存在，但是认知用户发射端主动充当主用户的全双工中继，接收主用户发射端的发送信号，同时向主用户接收端放大转发该信号。这样，认知用户改变了主用户接收端处的信干噪比，从而获得干扰信道增益估计。因此，在我们提出的方法中，认知用户发射端发射主用户信号代替干扰信号，不仅能获取干扰信道增益的估计，还避免了在估计过程中对主用户的干扰。

3.4.3.2.3.2 主动干扰认知实现步骤

下面为主动干扰认知原理图，PT，PR，和 CU 分别表示主用户发射端，主用户接收端，和主动为主用户充当全双工中继的认知用户。 h_0 、 h_1 、和 h_2 分别为 PT-PR 信道、PT-CU 信道、和 CU-PR 信道（干扰信道）。

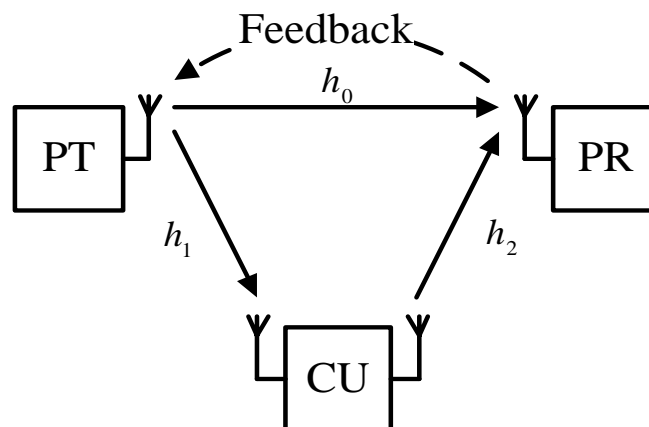


图 3 - 62 主动干扰认知原理图

实现步骤如下：

- a). CU 接收 PT 发射的主用户信号。如果 PT 和 PR 之间采用功率自适应，那么 CU 测量主用户信号在 CU 处的信噪比；如果 PT 和 PR 之间采用速率自适应，那么 CU 观察主用户信号的星座图，估计传输速率。
- b). CU 以放大增益 G 放大接收到的主用户信号，并同时想 PR 转发。
- c). PR 同时接收到来自 PT 的直接链路信号和来自 CU 的中继链路信号。PR 测量到一个不同于真实值的接收信干噪比，并根据该信干噪比估计 PT-PR 信道信息（该信息是直接链路 h_0 与中继链路 PT-CU-PR 的综合作用，因此这里的 PT-PR 信道信息与 h_0 不等效）。
- d). PR 将测到的 PT-PR 信道信息通过反馈链路反馈给 PT。如果 PT 和 PR 之间采用功率自适应，那么 PT 根据反馈的信道信息调整发射功率；如果 PT 和 PR 之间采用速率自适应，那么 PT 根据反馈的信道信息调整调制编码方式（星座图）。
- e). CU 观察中继后主用户信号的变化。如果 PT 和 PR 之间采用功率自适应，那么 CU 测量主用户信号在 CU 处的信噪比；如果 PT 和 PR 之间采用速率自适应，那么 CU 观察主用户信号的星座图，估计传输速率。
- f). CU 估计干扰信道增益。如果 PT 和 PR 之间采用功率自适应，那么 CU 通过比较中继前后主用户信号在 CU 处的信噪比估计干扰信道增益；如果 PT 和 PR 之间采用速率自适应，那么 CU 通过比较中继前后主用户传输速率估计干扰信道增益。

3. 4. 3. 2. 3. 3 可能应用场景

Case 1: 同一个运营商下 Femtocell 与基站的共存

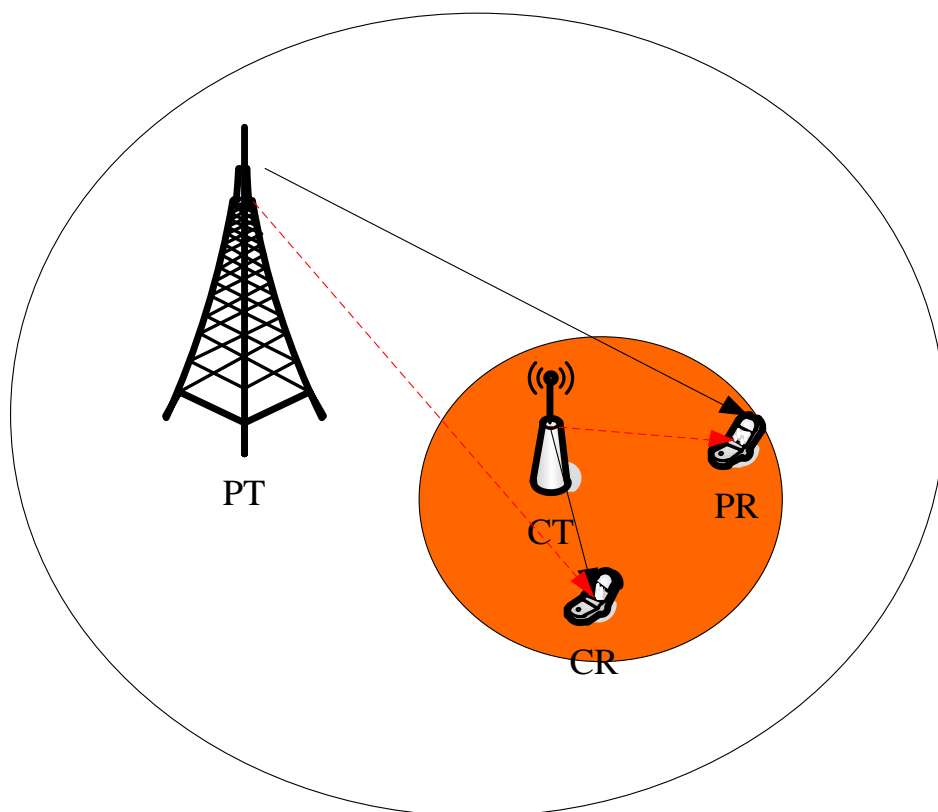


图 3 - 63 Case 1

图中，白色区域是基站 PT 覆盖区域，橘红色区域为 Femtocell CT 覆盖区域，PR 与 CR 分别接收 PT 和 CT 的数据。黑色实线箭头表示信号链路，红色虚线箭头表示可能的干扰链路。CT 与 PT 属于同一个网络运营商，但是他们之间没有协作，即 PT-PR 链路与 CT-CR 链路不能交换相互之间的信道信息。如果 CT 试图向 CR 发送数据，CT 需要准确控制对 PR 的干扰。在这种情况下，CT 可以通过我们提出的主动干扰认知方法估计 CT-PR 信道增益，控制干扰，实现共存。

Case 2: 同一个运营商下 Femtocell 之间的共存

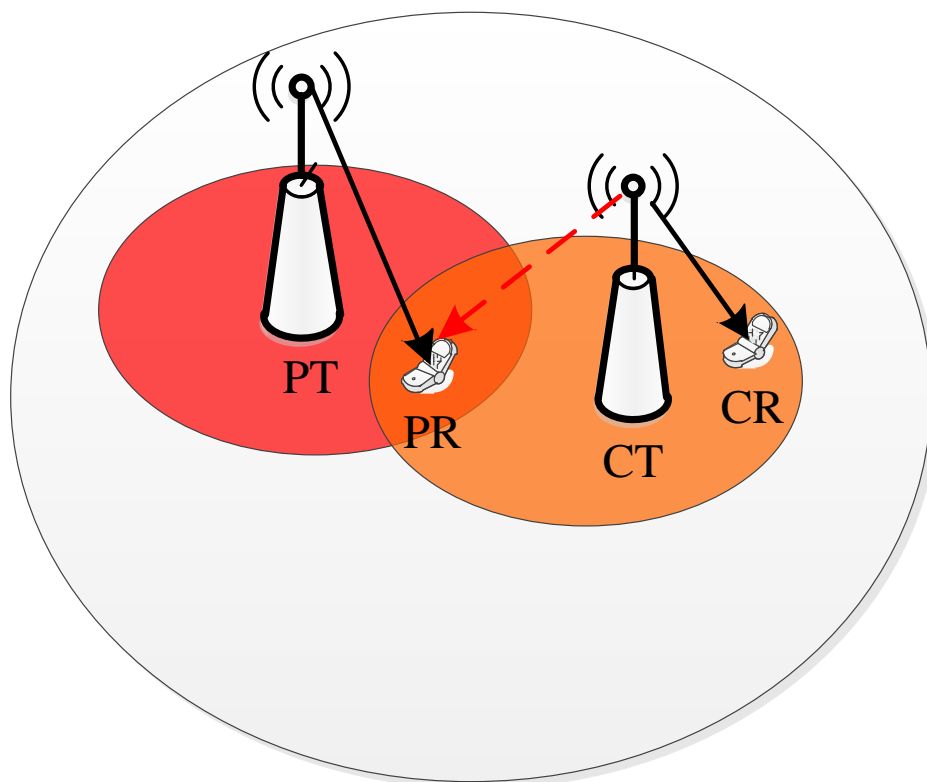


图 3 - 64 Case 2

图中，PT 和 CT 表示同一运营商下的两个 Femtocell，红色区域和橘黄色区域分别表示 PT 和 CT 的覆盖范围。红色和橘黄色重叠处表示处于该区域的用户能同时接收来自 PT 和 CT 的信号。PR 和 CR 分别表示 PT 和 CT 和接收端。其中，PR 处于颜色重叠区，即 PR 能同时收到 PT 和 CT 的发射信号，CR 处于橘黄色区域，即 CR 只能接收到来自 CT 的信号。黑色实线箭头表示信号链路，红色虚线箭头表示可能的干扰链路。假设 PT 拥有接入某一频段的优先权，且两个 femtocell 没有信息交互的链路。若 CT 试图与 PT 同时使用该频段，那么 CT 必须控制对 PR 的干扰。在这种情况下，CT 可以通过我们提出的主动干扰认知方法估计 CT-PR 信道增益，控制干扰，实现共存。

Case3: 不同运营商下 Femtocell 与基站的共存

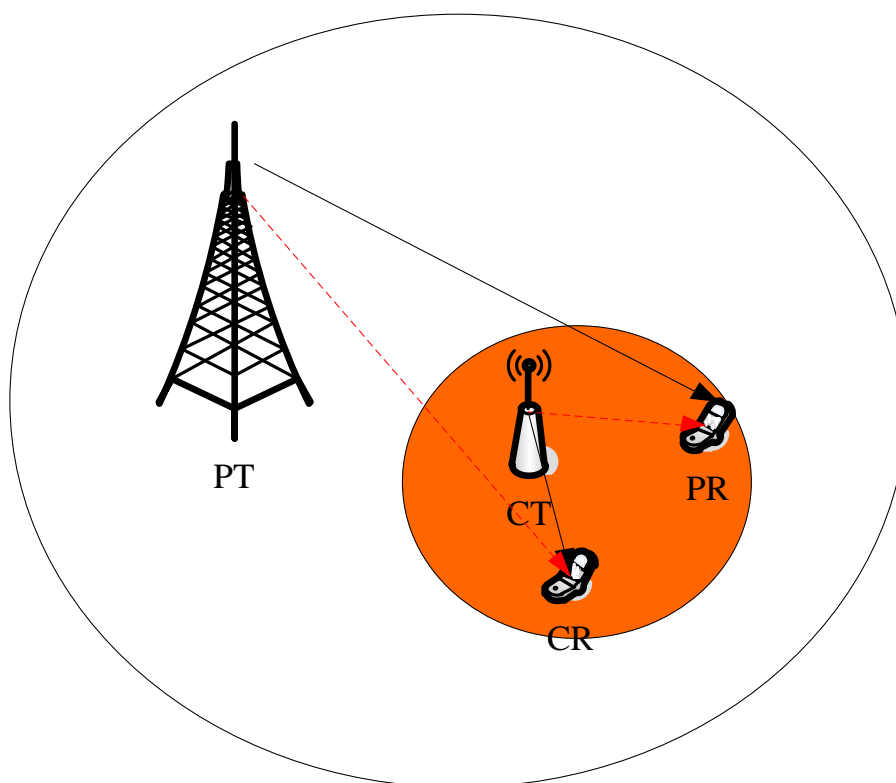


图 3 - 65 Case 3

图中，PT 和 CT 表示两个不同运营商的基站和 Femtocell。橘黄色区域表示 CT 覆盖的范围，白色区域和橘黄色区域表示 PT 覆盖的范围。PR 和 CR 分别表示 PT 和 CT 的接收端，且 PR 和 CR 都能同时接收到来自 PT 和 CT 的信号。黑色实线箭头表示信号链路，红色虚线箭头表示可能的干扰链路。由于 PT 和 CT 属于两个不同运营商，他们之间没有协作，即 PT-PR 链路与 CT-CR 链路不能交换相互之间的信道信息。如果 CT 试图向 CR 发送数据，CT 需要准确控制对 PR 的干扰。在这种情况下，CT 可以通过我们提出的主动干扰认知方法估计 CT-PR 信道增益，控制干扰，实现共存。

Case 4: 不同运营商下 Femtocell 之间的共存

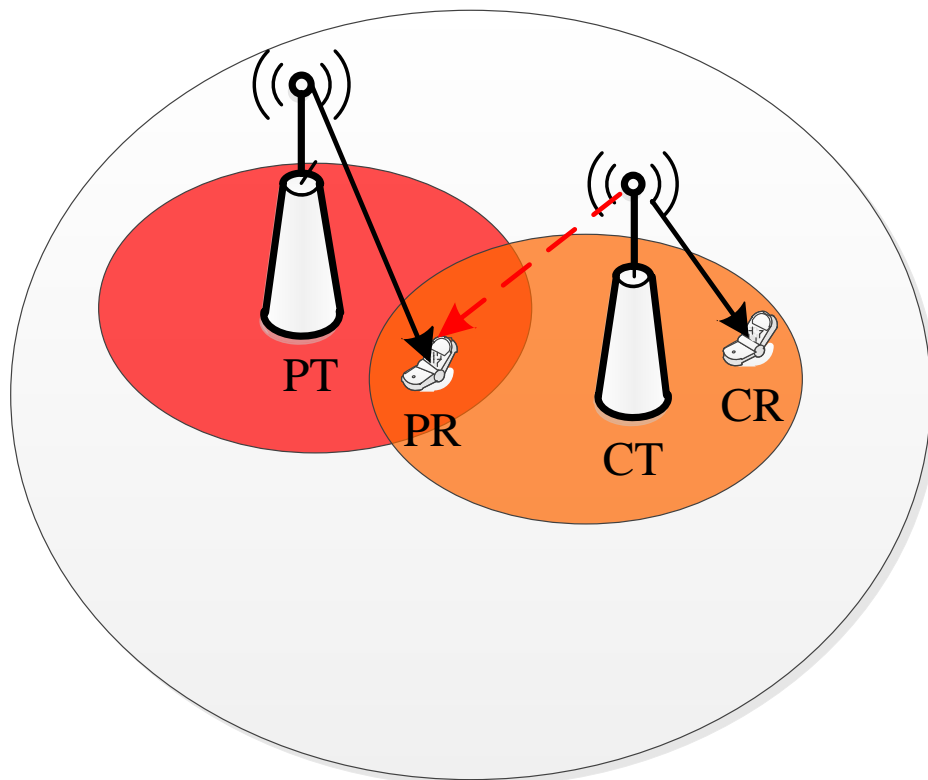


图 3 - 66 Case 4

图中，PT 和 CT 表示不同运营商下的两个 Femtocell，红色区域和橘黄色区域分别表示 PT 和 CT 的覆盖范围。红色和橘黄色重叠处表示处于该区域的用户能同时接收来自 PT 和 CT 的信号。PR 和 CR 分别表示 PT 和 CT 和接收端。其中，PR 处于颜色重叠区，即 PR 能同时收到 PT 和 CT 的发射信号，CR 处于橘黄色区域，即 CR 只能接收到来自 CT 的信号。黑色实线箭头表示信号链路，红色虚线箭头表示可能的干扰链路。由于两个 Femtocell 属于不同运营商，他们之间不能进行协作。若 CT 试图接入 PT 所使用的频段，实现频谱共享，那么 CT 必须控制对 PR 的干扰。在这种情况下，CT 可以通过我们提出的主动干扰认知方法估计 CT-PR 信道增益，控制干扰，实现共存。

Case 5: 低速移动城市公交上的接入点与轨道附近的用户共存

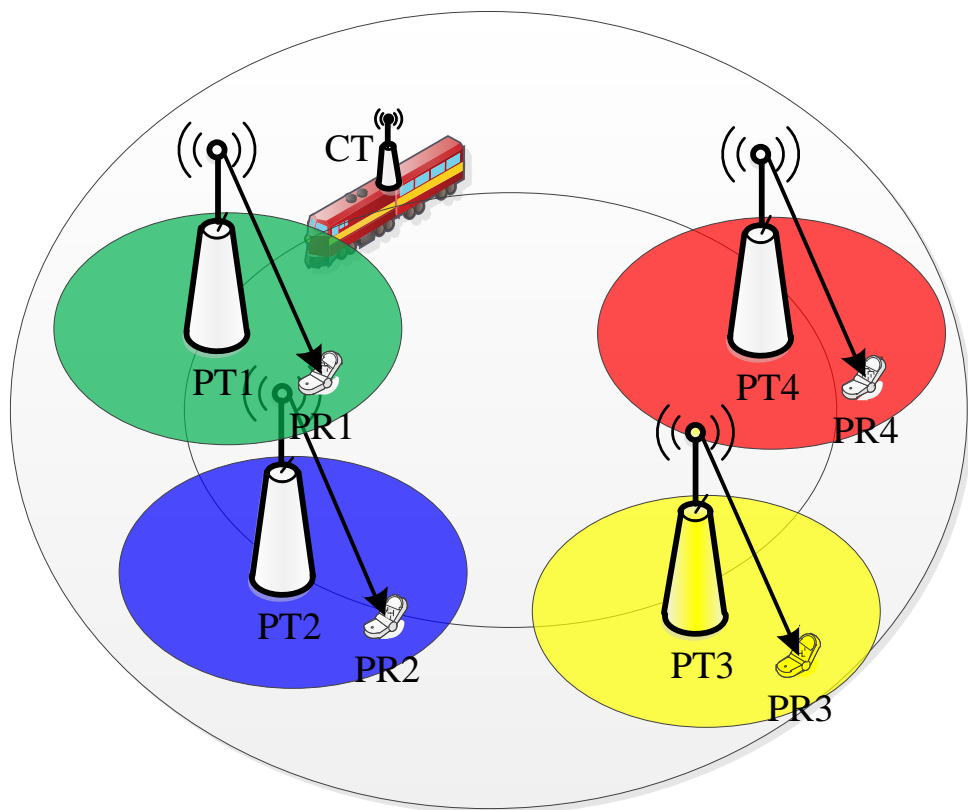


图 3 - 67 Case 5

图中，大圆内部表示一个城市区域，小圆表示一城市低速公交的固定行驶轨道。公交上安装有一个具有认知能力的移动基站，该移动基站试图利用频谱共享技术持续为公交上的用户提供数据接入。当公交车行驶到不同位置时，这些位置可能处于不同基站覆盖范围，且这些基站可能属于不同网络运营商。因此，移动基站在不同位置可能需要跟不同的基站、不同运营商之间实现频谱共享，同时控制管理对该基站覆盖区域用户的干扰。由于移动基站与轨道沿线基站可能属于不同网络运营商，他们之间不能进行信息交互。在这种情况下，CT 可以通过我们提出的主动干扰认知方法估计 CT 到各个 PR 之间的信道增益，控制干扰，实现共存。

3.4.3.2.4 仿真验证

3.4.3.2.4.1 仿真模型

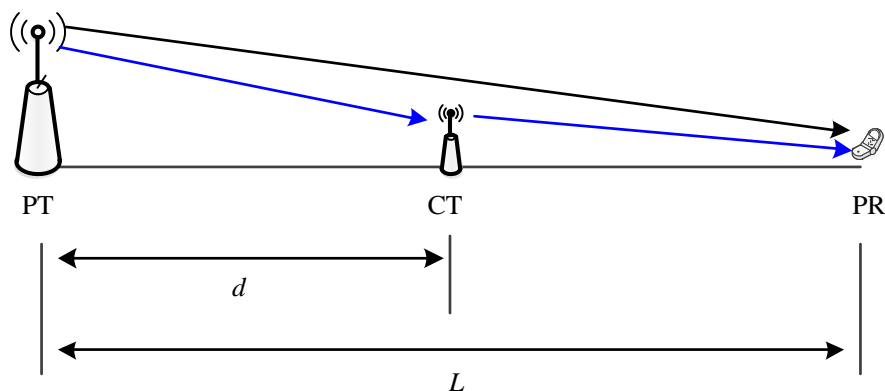


图 3 - 68 仿真模型

如图所示，我们在仿真中考虑线模型，即 PT、CT、和 PR 在一条直线上。其中，黑线表示直接链路，蓝线表示中继链路。不失一般性，我们在仿真中验证 CT 在不同位置处，干扰信道增益的估计性能。假设主用户发射端和接收端采用功率自适应，主用户接收端的目标信噪比为 10dB。无线信道受到路径损耗、阴影衰落、瑞利衰落的影响。路径损耗模型为

$P_L(\text{dB}) = 128.1 + 37.6 \log_{10}(l)$, $l \geq 0.035 \text{ km}$ ，阴影衰落服从标准差为 10dB 的 lognormal 分布，瑞利衰落服从方差为 1 的瑞利分布。仿真中，我们设置 L 为 0.25km。

3.4.3.2.4.2 仿真结果

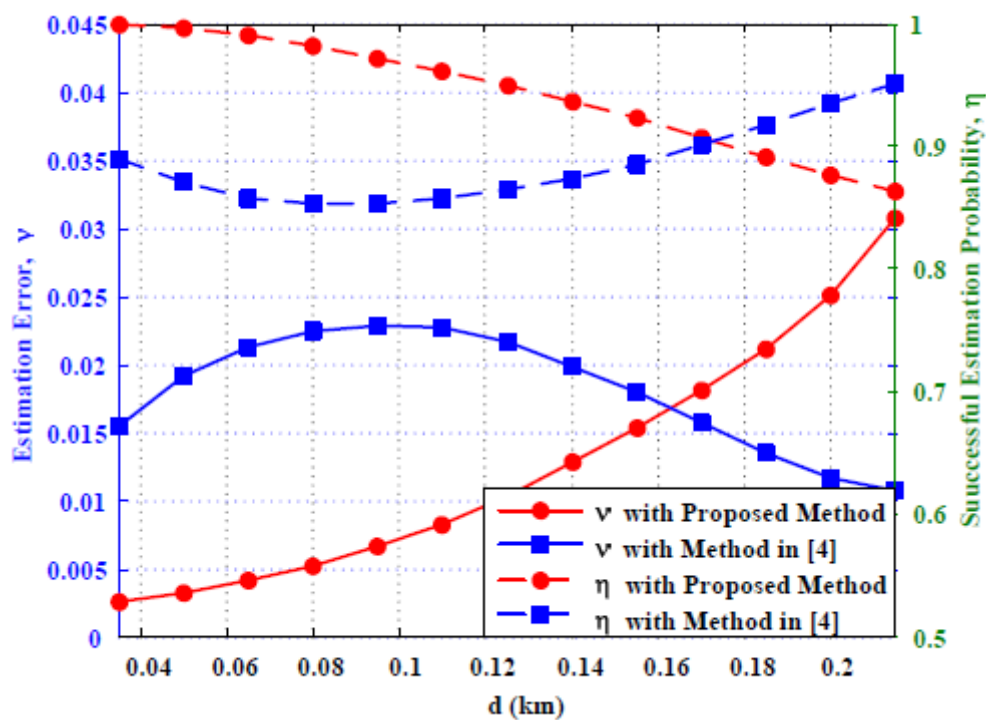


图 3 - 69 估计性能

上图给出了我们提出的主动式干扰信道增益估计方法的估计误差和估计成功率。为了方便比较，我们也给出了现有的一个主动式估计方法估计误差和成功率。可以看出，两种方法的估计误差和估计成功率大致相同。

在保证相似估计性能的条件下，下图给出了 PT 的发射功率变化情况。从图中可以知道，CU 主动充当主用户的全双工中继后，PT 的发射功率相对于中继前的发射功率下降了。这说明，CU 为主用户充当全双工中继，不但没有干扰主用户，还为主用户的传输提供了帮助。相反，利用现有的主动式估计方法后，PT 的发射功率相较于估计前的发射功率提高了，这说明现有的主动式估计方法对主用户有较大的干扰。

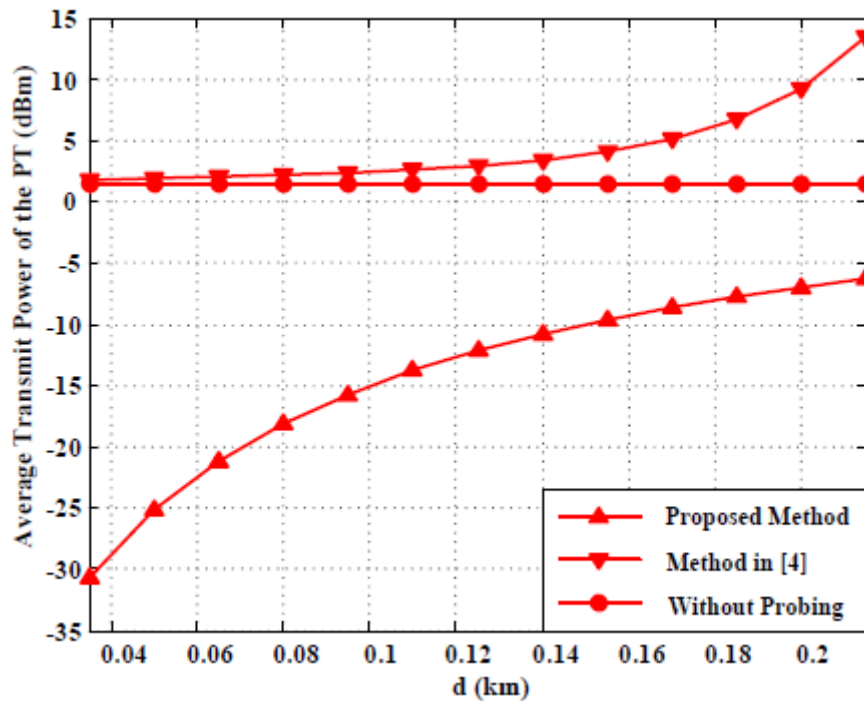


图 3 - 70 PT 的发射功率变化情况

3.4.3.2.5 结论

随着 5G 时代的到来和现有频谱资源的稀缺，频谱共享技术的应用必将越来越被广泛应用。我们提出的主动干扰认知频谱共享接入关键技术：信道增益估计方法，能够解决频谱共享里面的关键问题，有潜力丰富 5G 技术。

目前我们提出的技术仅考虑了实信号和实信道，在以后的研究中，我们将会考虑复信号和复信道，扩大该方法的适用范围。

3.4.3.3 基于被动定位的干扰预测技术

3.4.3.3.1 概述

在频谱共享系统中，不同系统之间的干扰管理是非常重要的。为了有效管理干扰，我们需要对系统之间的潜在干扰进行预测，基于预测的信息，才可以更好的管理干扰。这里，我们考虑通过定位技术来估计其它系统的接收机位置，这样就可以利用自身系统节点的位置与其它系统的接收机位置，通过链路预算来估计出本系统对其它系统接收机可能产生的干扰。

就定位技术而言，当前大多数的定位技术都是在多个锚点已知的情况下，来估计第三方的发射机端的位置，而很少去估计第三方的接收机位置。而我们讲研究估计第三方接收机位置的新方法。

3.4.3.3.2 研究现状和存在的问题

实际中，在很多应用场景都需要知道第三方的接收机位置，当前对接收机定位的方法主要有两种，一种是主动式估计，另一种是被动式估计。

在主动式估计中，其操作过程很复杂且效率不高，例如在 FDD（频分双工）系统中，

其会占用多个频带，并只能估计少量的与之同频的接收机；此外，主动式估计会不可避免的对第三方的接收机造成信号干扰。因此，用主动式方法进行接收机定位是欠佳的。

在被动式估计中，假设主用户收发端之间存在 CLPC（闭环功率控制），在外界干扰变化时，其主用户发射机会实时的调整其发射功率，以维持恒定的目标信噪比。在假设已知目标信噪比的情况下，认知用户通过可以通过接收信号估计出第三方接收机位置，但这种方法是不现实的。

3.4.3.3.3 被动式接收机定位技术

3.4.3.3.3.1 系统模型

基于当前主动式和被动式接收机定位的技术，我们提出了一种更合理的被动式接收机定位技术，在不需要知道接收机的目标信噪比的条件下，根据外界干扰位置和强度的变化，采用期望最大算法，对其目标信噪比和位置做估计。

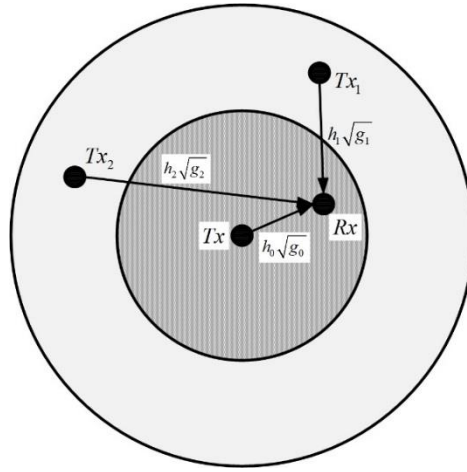


图 3-71 系统模型

如上图所示，主发射机 (Tx) 在固定的一点，接收机 (Rx) 在以 Tx 为圆心，半径为 r 的圆内随机分布，在 $L \in (r, R)$ 的圆环内存在随机的 Tx_n 发射机的同频干扰。无线信道受到路径损耗、阴影衰落、瑞利衰落的影响。其中 $h_k \sqrt{g_k}$ ，($k = 0, 1, 2$) 分别为两点之间的信道系数， h_k 为小尺度衰落系数， g_k 为路径损耗系数。

路径损耗模型为 $P_L(\text{dB}) = 128.1 + 37.6 \log_{10}(l)$ ， $l \geq 0.035 \text{ km}$ ，阴影衰落服从标准差为 4dB 的对数正态分布，瑞利衰落服从方差为 1 的瑞利分布。仿真中，我们设置 r 为 0.10km， R 为 0.20km；Block 数和 Sample 数分别为 200 和 50；噪声功率为 -114dBm。

3.4.3.3.2 仿真结果

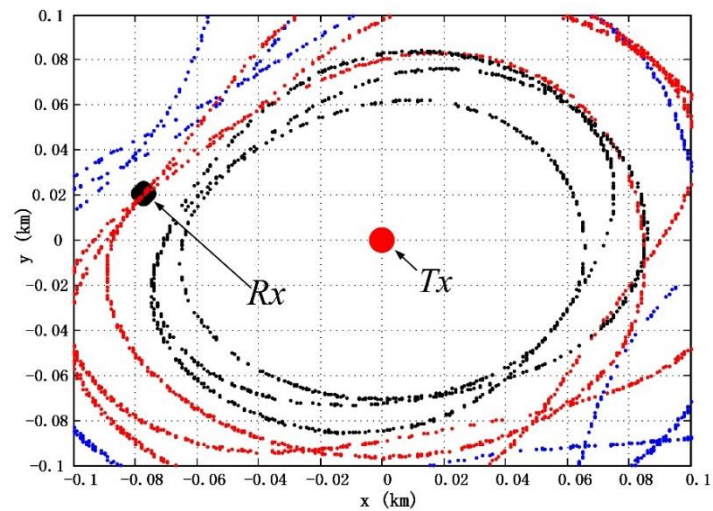


图 3 - 72 接收机的目标信噪比和位置估计

如上图所示，在干扰端的 Tx_n 发射机位置不断变化，其会形成一个如图的等信噪比区域线，因 Rx 和 Tx 的位置在一段时间内是不变的，则 RX 一定在该目标信噪比的等高线焦点上。

下图表示的接收机定位的性能，即接收机 Rx 的位置估计的 RMSE（均方根误差）随干扰点 Tx_n 变化次数的关系，由图可知，随着 N 值的增加，其估计误差低于 5m。

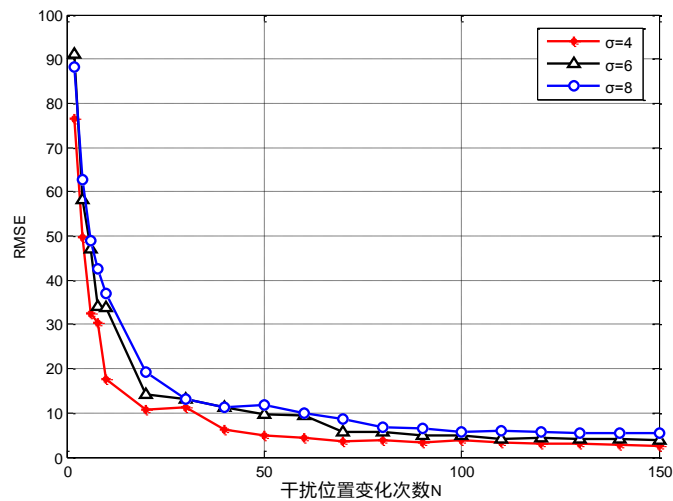


图 3 - 73 接收机的位置估计性能与干扰位置变化次数关系

3.4.3.3.4 结论

在无线通信不断发展的今天，随着接收机定位技术越来越被广泛的应用，该方法必将在

5G 通信技术中占有重要的地位。

3.5 射频技术

由于无线频谱的稀缺性,使得通过频谱共享的方式提高频谱利用率的研究获得越来越高的关注。虽然通过频谱共享的方式可以满足未来大量,动态业务对大量频谱的需求,同时也对射频带来了新的挑战。

3.5.1 射频挑战和候选方案

3.5.1.1 频率范围广

随着 4G 技术的引入,多频芯片已经成为市场的迫切需求。另外由于 2G, 3G 网络也会和 4G 网络同时存在,已经有多个国内外厂家能够提供多模多频芯片,可以覆盖 2G、3G、4G 的频谱范围,还可以提供部分免执照频段。当频谱共享工作频段不在目前射频已经支持的频段范围内,为了支持新的频段,使得射频工作频段范围进一步扩大。

一种直接的方法是通过增加新的射频通道,但这样会增加面积和成本。也可以通过合理的通道频段范围划分,减少新增射频通道。这种方法取决于新增频段和现有频段的间隔,通道的最大带宽。因此,对于和现有 IMT 频段或已经支持的免执照频段间隔比较近的频段实现难度不大。另一种方法是采用宽带 RF 器件,使得单通道能支持包括新频段的整个频段范围。以上几种方法可以结合使用,以减少对终端面积和成本的需求。

3.5.1.2 多通道互干扰

为了使得零散的频谱支持更大的数据量,多个射频通道可能同时工作。当收发机同时分别使用相邻的频点进行接收和发射,由于 RF 器件的非线性,造成邻频干扰或互调干扰。多通道互干扰并不是一个新问题,目前标准中已经讨论过的多通道互干扰可以分为 1) 相同制式载波聚合引起的多个载波通道干扰,如 TDD 载波聚合 2) 不同制式通道的并发,如 LTE 和 GSM 数据的并发 3) 不同系统的通道的并发,如 LTE TDD 和 WiFi 的 2.4G 数据并发。

频谱共享可能支持更灵活的多通道并发,引入更复杂的多通道互干扰情况。但从频谱角度上来看,高频频谱资源较为丰富,使用连续可能性较大,因此多通道互干扰的问题在高频不是主要挑战。

多通道间干扰可以通过设备内部实现,如设计滤波器,自干扰消除,非线性补偿等技术。或通过协议设计避免干扰,协议处理干扰可以简化射频对干扰的处理,如波形设计,干扰共存,频谱交换等。

3.5.1.3 更灵活的带宽

支持灵活的带宽,可以提高频谱利用率。但是会带来带通滤波器设计困难。并且 LTE 已经支持可扩展带宽,可以在 1.4/3/5/10/15/20MHz 带宽中灵活配置。而高频频谱资源较为丰富,建议利用较大的固定带宽降低高频器件的设计难度。

因此,支持更灵活的带宽可以分为三个层面,1) 新增一种或多种(有限种)带宽配置,如针对 TV 白频谱增加 6/7/8MHz 带宽,或高频>100MHz 的带宽。2) 基站支持灵活带宽,终端保持不变,如 segment carrier 场景。3) 基站和终端都支持灵活带宽。

射频可通过多个固定的表面声波(SAW, Surface Acoustic Wave)滤波器实现一定程度

的灵活带宽，也可以通过可调带通滤波器来实现灵活带宽，还可以通过 RF-sampling ADC 技术，通过数字滤波器来实现更灵活的带宽。。

3.5.1.4 灵活调制

恒包络的调制技术对功放(PA)线性度要求低，非恒包络的调制技术对 PA 线性要求高。不同的调制技术即使在相同的频段中，对于 PA 的要求也不尽相同。例如同在 Band1 中传输 LTE 或 GSM 信号，对 PA 的线性度和效率的设计需求不同。

当频谱共享允许不同的系统接入相同的频谱，如果系统的调制方式不同，而 PA 没有相应的处理，可能会导致 PA 效率下降。另外如果新频谱内频谱共享引入新波形，也可能影响到 PA 的效率。

3.5.1.5 宽频谱检测

对于频谱共享的频谱占用情况除了通过接入数据库的方式获得，终端或基站可能需要通过频谱检测获得频谱占用，特别是非授权频段。如果检测频段过宽，引起噪声系数的恶化，如 2.7G~3.7G(1GHz)，或要求检测时延较短，无法用单个通道扫描实现。

宽带频谱检测可以通过多路（TI，Time Interleaved ADC 或者 RF-sampling ADC）检测并行实现，或通过压缩感知的方法实现稀疏占用的宽带频谱检测。

3.5.1.6 典型应用场景和射频挑战

综上所述，射频性能与工作频段范围，以及工作带宽有关，还与频谱共享方式有关。根据频谱共享的场景，以及对应的频段，参考现有多模多频产品能力，下表列出典型应用场景和射频挑战。

射频挑战 应用场景	频谱范围 广	多通道互 干扰	更灵活的 带宽	灵活调制	宽带频谱 检测
1、现有 IMT 频段 (<3.6G)	√	○	--	○	--
2、unlicense 频段 (2.4G,5G)	√	×	--	--	○
3、TV 白频谱(UHF, VHF)	○	×	○	--	○
4、新频谱 1 (<6G)	○	×	×	×	×
5、新频谱 2 (>6G)	×	--	--	--	×

×主要挑战 ○次要挑战 --没有明显需求 √有产品已经支持

3.5.2 研究进展

自软件定义无线技术（SDR,Software Defined Radio）提出以来，人们一直探索宽带收发机。但是宽带收发机不仅对 ADC 的设计带来了巨大的挑战，而且对低噪声放大器(LNA, Low Noise Amplifier)和功率放大器（PA, Power Amplifier）的设计也带来了挑战。另外也可以采用的多带结构实现多模多频，即将整个工作频段划分成多个子通道，每个通道内多个相邻频

带共用射频通道。在实现复杂度，性能，成本，面积，功耗方面获得折中的效果。

3.5.2.1 产业界进展

在多模多频芯片方面，高通在 2013 年 2 月宣布 RF360 射频前端解决方案，可支持 700MHz 到 2.7GHz 的全球 LTE 频段以及传统 2G/3G 频段的架构。国内联发科，展讯，海思，联兴科技也有系列芯片。

RF-sampling ADC/DAC 技术支持 GSPS 级的采样率，在较低的频段可以实现射频信号和数字信号间直接转换，不再需要模拟的下/上变频和带通滤波器。使得宽带收发机成为可能，目前 ADI，IT，MAXIM 都有支持该技术的系列芯片。在此技术基础上 ADI 还推出了 AD9361（两通道）或 AD9364（1 通道）灵活收发机，支持 70MHz~6GHz 工作频段范围，可调带宽 200KHz~56MHz，支持点对点通信系统，毫微微蜂窝/微微蜂窝/微蜂窝基站应用。

3.5.2.2 学术界进展

IMEC 将 RF-MEMS 用于灵活射频设计，将 RF-MEMS 用于射频开关，滤波器/双工器，匹配电路设计。IMEC 并推出 SCALDIO 系列可配置接收机 IP，支持频带范围 100 MHz – 6GHz，带宽 200kHz – 40MHz，支持手持终端芯片或 M2M 应用。

在多通道接收机中，需要采用带通滤波器获得较好的带间隔离。为了实现灵活的接收机 N-path filter 作为固定前端滤波器的替代技术被提出，但是由于寄生电容引入了较大的插入损耗（Insert loss）。2014 年布朗大学提出基于 Lumped transmission line-path filter，用于获得灵活的带宽和较小的插入损耗。

近年来一些新型的宽带接收机结构被提出：2009 年一种 mixer-first 的结构被康奈尔大学提出，这种结构虽然能够获得较好的线性度，但是 NF（Noise figure）却不理想；2012 年 UCLA 和博通联合提出一种 Noise-Cancelling LNA 结构，这种结构对噪声进行消除，保证线性度的同时保持了较低的 NF；UCLA 在 2014 年提出一种基于 time interleaved ADC+driving-point impedance (DPI) +low-noise transconductance amplifier (LNTA)技术结合的接收机结构，避免传统 LNA 在频率选择性方面的限制，可以保证接收机的频率选择性。

3.5.3 RF 设计

RF 中包括天线（Antenna），滤波器/双工器（Filter/Duplex），功率放大器(PA)，低噪声放大器（LNA），震荡器（VCO），混频器(Mixer)，数模转换（ADC/DAC）等关键器件。常见的单通道射频收发机结构有超外插，零中频，低中频。

3.5.3.1 射频关键设计参数

能力类型	信号带宽	频率范围或频点	最大输出功率	支持波形
1	2G/3G/4G 带宽	<6GHz		
2	2G/3G/4G/TV 带宽	<6GHz		

3	2G/3G/4G/5G/TV 带宽	<6GHz		新波形?
4	灵活带宽	<6GHz		新波形?
5	新的带宽	>6GHz		

3.5.3.2 射频参考结构

序号	射频结构	优点	缺点
1	多频天线 共射频	1、模拟电路最少，容易实现灵活配置	1、对 ADC、DAC 的要求高 2、对 LNA，PA 要求高 3、天线灵活性较差
2	可调天线 共射频	1、模拟电路最少，容易实现灵活配置 2、天线可灵活配置	1、对 ADC、DAC 的要求高 2、对 LNA，PA 要求高
3	多个单频天线 独立射频	1、可选芯片范围广泛 2、ADC采样速率适中	1、可能存在射频自干扰问题 2、可扩展天线数受设备体积限制
4	多频天线 独立射频	1、天线数目不随频带增加而线性增长	1、需要多个带通滤波 2、需要RF开关 3、天线灵活性较差
5	混合结构（ 部分频带共用， 部分频带独立）	1、成本和面积方面折中	

4. 总结

频谱共享技术通过解决多种重点场景（运营商内、运营商间、免授权频段、次级接入）

的系统架构、接口、空口技术、干扰管理等多项技术问题，能够推进新型的频谱管理理念，促进现有网络能力提升，兼容载波聚合、数据库、无线资源管理等无线技术。同时，能够充分结合其它 5G 关键技术，以动态网络频谱管理支撑超密集覆盖，可联合使用现有 IMT 频段和高频段来满足 5G 大频谱需求。从而，提升运营商总频谱资源使用效率，解决多 RAT 间和多小区间的负载平衡，提升用户体验速率，缓解运营商频谱过饱和或过闲置，扩展 IMT 可用频谱，对 5G 在广域覆盖和热点覆盖场景的指标方面具有重大意义。频谱共享技术需要频谱管理政策的支持，制定新型使用规则、安全策略、经济模型等，并对基带算法与器件能力具有较高要求。目前从国外的研究趋势来看，频谱共享技术是 5G 的重要组成部分，具有很好的应用前景。

本报告是在《频谱共享需求分析和应用场景报告》的基础上，基于频谱共享技术的重点应用场景，给出总体方案，并对关键技术展开深入研究与评估，具体关键技术包括：高层技术、物理层技术、干扰处理技术、射频技术等，为技术组的后续工作方向决策与方案制定提供参考，为 5G 的技术推进和标准化奠定理论基础。

在后续工作中，还需要基于最新的国内外研究进展，关注重点频段和场景，深入全面研究频谱共享技术，根据国内的频谱管理政策和使用规则，结合 5G 其它重点关键技术，设计完善的系统方案。

5. 缩写词

AWGN	Additive White Gaussian Noise	加性高斯白噪声
CR	Cognitive Radio	认知无线电
GI	Guard Interval	保护间隔
GP	Guard Period	保护间隔
IF	Intermediate Frequency	中频
ITU	International Telecom Union	国际电信联盟
LOS	Light of Sight	视线距离
MF	Matched Filter	匹配滤波
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
PN	Pseudo-random Noise	伪随机噪声
RF	Radio Frequency	射频
ROC	Receiver Operating Characteristic	接收机操作特性
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
TDD	Time Division Duplex	时分双工
UHF	Ultra High Frequency	超高频

6. 参考文献

- [1]. FCC Spectrum Policy Task Force, Report of the Spectrum efficiency working group, Technical Report 02-155, Federal Communications Commission, 2002.
- [2]. T. Weiss and F. Jondral, "Spectrum pooling: An innovative strategy for enhancement of spectrum efficiency," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 3, pp. 8–14, Mar. 2004.
- [3]. IEEE 802.16-2004, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, October 2004.
- [4]. R. van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House Publishers, 2000.
- [5]. ETSI DVB-RCT (EN 301 958), Interaction Channel for Digital Terrestrial Television (RCT) Incorporating Multiple Access OFDM, Sophia Antipolis, France, 2001. Cosovic, S. Brandes, and M. Schnell, "Subcarrier weighting: A method for sidelobe suppression in OFDM systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 444–446, Jun. 2006.
- [6]. Cosovic and T. Mazzoni, "Sidelobe suppression in OFDM spectrum sharing systems via additive signal method," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, Apr. 2007, pp. 2692–2696.
- [7]. S. Brandes, I. Cosovic, and M. Schnell, "Sidelobe suppression in OFDM systems by insertion of cancellation carriers," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, Sep. 2005, vol. 1, pp. 152–156.
- [8]. S. Brandes, I. Cosovic, and M. Schnell, "Reduction of out-of-band radiation in OFDM systems by insertion of cancellation carriers," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 420–422, Jun. 2006.
- [9]. H. Yamaguchi, "Active interference cancellation technique for MB-OFDM cognitive radio," in *Proc. 34th IEEE Eur. Microw. Conf.*, Oct. 2004, vol. 2, pp. 1105–1108.
- [10]. D. Qu and Z. Wang, "Extended active interference cancellation for sidelobe suppression in cognitive radio OFDM systems with cyclic prefix," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59 (4), pp. 1689–1695, May 2010.
- [11]. W. Gander, "Least squares with a quadratic constraint," *Numer. Math.*, vol. 36, pp. 291–307, 1981.
- [12]. Lin Zhang, Guodong Zhao, Gang Wu, and Zhi Chen, "Proactive Channel Gain Estimation for Coexistence between Cognitive and Primary Users," *IEEE Globecom* 2012.
- [13]. Guodong Zhao, Lin Zhang, Liying Li, and Gang Wu, "Proactive Channel Gain Estimation in Asymmetric TDD Primary Systems," *IEEE ICC Workshop* 2013.
- [14]. Lin Zhang, Guodong Zhao, Gang Wu, and Zhi Chen, "Relay-Assisted Proactive Channel Gain Estimation in Cognitive Radio," *IEEE VTC* 2013 fall.
- [15]. R. Zhang, "On active learning and supervised transmission of spectrum sharing based cognitive radios by exploiting hidden primary radio feedback," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 10, pp. 2960–2970, Oct. 2010.

- [16].Lin Zhang, Guodong Zhao, Gang Wu, and Zhi Chen, “Cross-Channel Gain Estimation with Amplify-and-Forward Relaying in Cognitive Radio,” IEEE Globecom 2013.

7. 主要贡献单位

序号	贡献单位	贡献人
1	大唐电信集团	杨宇、康绍莉
2	中国联通	韩潇
3	华为&海思	张亮亮、刘劲楠、成艳
4	中兴通信	程翔、赵亚军
5	上海无线通信中心	于巧玲
6	西安电子科技大学	刘勤
7	北京邮电大学	谢刚
8	中国电信	王楠、王敏
9	电子科技大学	武刚、胡苏