

电子围栏技术应用现状与思考

胡晨阳, 张天明, 杨庆超

国家无线电监测中心检测中心 国际认证事业部, 北京 100041

DOI: 10.61369/TACS.2026060053

摘 要 : 为深入探究电子围栏技术在无线电设备准入管控及空间精细化治理领域的实际应用价值, 本文以北美 6GHz Wi-Fi 频段所采用的自动频率协调机制 (AFC) 为主要研究案例, 开展系统性分析与试验验证。研究结果表明, AFC 机制可结合无线设备的实际地理位置, 动态匹配并分配可用通信信道, 同时划定设备发射功率的上限阈值, 有效缓解了标准功率无线接入设备对存量合法无线电业务的干扰隐患。结合行业发展现状分析, 定位精度瓶颈、系统部署与运维成本、个人隐私数据保护以及行业监管边界模糊, 是当前制约电子围栏技术规模化落地推广的核心因素。

关 键 词 : 电子围栏; 自动频率协调; 短距离定位; 功率控制

Application Status and Reflections on Geofencing Technology

Hu Chenyang, Zhang Tianming, Yang Qingchao

The State Radio Monitoring Center Testing Center, Beijing 100041

Abstract : To thoroughly investigate the practical application value of electronic fence technology in radio equipment access control and refined spatial governance, this study conducts a systematic analysis and experimental validation using the Automatic Frequency Coordination (AFC) mechanism employed in North America's 6 GHz Wi-Fi band as the primary case study. The results demonstrate that the AFC mechanism dynamically matches and allocates available communication channels based on the actual geographical locations of wireless devices while setting upper power limits for device transmissions, thereby effectively mitigating interference risks posed by standard-power wireless access devices to existing legitimate radio services. Analysis of industry development trends identifies four key barriers hindering the widespread adoption of electronic fence technology: precision limitations in positioning accuracy, high system deployment and maintenance costs, challenges in personal privacy data protection, and ambiguous regulatory boundaries across industries.

Keywords : electronic fence; automatic frequency coordination; short-range positioning; power control

引言

随着物联网智能终端、车联网及无线通信技术的快速普及, 各行各业对终端设备区域准入管控、合规稳定运行以及空间安全精细化管理的需求持续攀升, 电子围栏技术已然成为无线电管理与物联网应用领域的重点研究方向。从技术本质来看, 电子围栏依托卫星导航、蜂窝网络、Wi-Fi、蓝牙、UWB 等多元化定位与测距手段, 在实体物理空间中构建虚拟的数字化管控边界。当受控终端进入或退出预设虚拟区域时, 系统可依据提前配置的管控策略, 自动完成设备准入放行、异常风险告警、发射功率动态调节、终端功能限制等一系列智能化操作^[1]。

本文以 FCC 6GHz 频段 AFC 管控机制为核心研究对象, 系统梳理其技术原理与工作流程, 参照 FCC 官方技术标准搭建模拟测试环境, 验证该机制的实际管控效能。同时结合蓝牙、UWB 等新型短距离定位技术的发展现状, 探讨电子围栏在家庭生活、商业运营、公共治理等领域的应用潜力, 最终总结该技术的发展趋势、应用价值及规模化落地的主要制约因素。

一、技术应用与场景分析

(一) AFC 技术应用现状

1. 技术原理

自动频率协调 (AFC) 是 FCC 为规范 6GHz 频段标准功率设

备频谱接入秩序、规避跨业务信号干扰而推出的核心管控机制。该系统的核心运行逻辑为, 结合区域内需重点保护的授权业务地理位置、设备天线参数、频谱占用状态及官方防护标准, 融合多种无线信号传播模型测算空间路径损耗, 精准核算出不同地理位置无线设备的可用通信信道及等效全向辐射功率上限。

作者简介: 胡晨阳 (1995.10—), 男, 汉族, 河北省邢台市, 通信工程师, 本科, 从事短距离无线通信技术检测, 负责相关测试能力建设、实验室资质维护及认证技术支持工作。

根据 FCC 相关规范, 6GHz 频段标准功率接入点的理论最大等效全向辐射功率可达 36dBm, 但设备实际发射功率必须严格遵循 AFC 系统的动态约束要求。设备启动运行前, 需主动向 AFC 云端平台上报自身精准位置、设备型号、天线架设高度等关键参数, 平台结合区域频谱保护规则完成智能核算后, 向设备反馈当前点位的可用频段、最大发射功率等授权参数, 设备仅可在授权范围内开展通信工作, 以此实现 6GHz 频段无线设备的空间化、精细化频谱管控。

从技术本质而言, AFC 机制以受保护无线电业务信息与终端地理位置为核心输入, 构建起随空间位置、通信频段、运行时间动态变化的频谱使用规则体系。系统核心数据库与业务保护参数由官方认证的 AFC 运营机构负责常态化维护与更新。终端设备通过网络与云端平台完成数据交互, 获取实时有效的频谱使用权限, 这套动态更新的权限约束体系, 即为管控 6GHz 无线设备的数字化动态电子围栏^[2]。

2. 模拟测试方案设计

本次研究的模拟测试工作严格依据 FCC KDB 技术文件、C63.10 行业规范开展, 整体测试体系分为软件控制功能验证与射频性能实测验证两大模块, 全方位检验 AFC 机制的管控有效性与稳定性。

在软件控制验证环节, 本次研究搭建专属模拟测试平台, 完整复刻无线接入点与 AFC 云端服务器的真实数据交互逻辑。首先在模拟服务器中预配置电子围栏管控范围、授权可用频点、各频段对应发射功率限值等基础参数。随后由待测无线接入点向服务器发送携带模拟地理位置的频谱使用申请, 服务器依据预设防护规则, 反馈对应区域的可用频点清单与功率约束标准。

待测设备接收云端授权参数后, 需自动完成工作频点切换、最大发射功率阈值调整等适配操作。为模拟真实高负载运行场景、保障测试结果真实可信, 通过伴测终端持续生成高吞吐数据业务, 促使待测设备维持高功率发射状态, 充分检验设备对 AFC 管控规则的适配与执行能力。

在射频性能实测验证环节, 待测设备运行状态稳定后, 采用专业频谱分析仪对设备实际工作频率、发射功率等核心射频参数进行精准检测, 核对设备实际运行状态是否与 AFC 授权参数保持一致。待软件交互链路稳定无异常后, 通过频谱仪扫描采集射频参数, 结合定向耦合器、测试线缆、衰减器等测试设备的固有链路损耗完成数据修正, 将修正后的实测数据与授权阈值进行对比, 以此判定 AFC 电子围栏管控机制是否有效生效。若设备实际工作频点处于授权范围、发射功率不超限定阈值, 即可判定管控功能正常运行。

3. 射频测试环境搭建与测试结果

本次测试严格参照 FCC KDB 标准搭建射频测试链路, 整体拓扑结构清晰完整。待测无线接入点输出的射频信号经定向耦合器实现分路处理, 一路信号接入频谱仪, 用于实时监测设备工作频率、发射功率等核心参数; 另一路信号对接伴测终端, 通过持续的数据交互业务, 维持待测设备的稳定发射工况。频谱仪采集的原始数据需经过链路损耗补偿修正, 剔除设备、线缆带来的固有

损耗误差, 最终得到设备真实的发射功率参数。

测试环境搭建与调试完成后, 依据 C63.10-2013 规范标准, 结合待测设备的实际工作特性, 合理配置频谱仪的分辨率带宽、视频带宽、扫描时长、采样点数等关键测试参数, 最大限度保障测试数据的精准性与可靠性。本次测试结果表明, 待测无线接入点可精准识别 AFC 系统下发的电子围栏管控规则, 能够根据所在地理位置的频谱权限, 自动适配工作频率与最大发射功率, 完全达到预设的频谱管控目标, 机制运行稳定有效^[3]。

(二) 短距离定位技术及电子围栏拓展应用

1. 主流短距离定位技术发展现状

近年来, 短距离无线通信技术持续迭代升级, 测距与定位的精度、稳定性、安全性大幅提升, 为电子围栏从室外大范围粗粒度管控, 向室内小范围精细化场景延伸提供了坚实的技术支撑。其中, Bluetooth 6.0 新增的信道探测技术、FiRa 4.0 规范优化后的 UWB 超宽带定位技术, 是当前落地性最优、定位精度最高的两类核心技术, 广泛适配各类精细化电子围栏场景。

早期低功耗蓝牙的测距定位主要依托接收信号强度指示 (RSSI) 实现, 核心原理是终端读取 iBeacon 广播报文内的基准发射功率参数, 结合现场实际接收的信号强度测算传输损耗, 进而估算设备间的大致距离。但该技术存在明显短板, 信号极易受环境遮挡、多径传播、设备硬件差异等因素干扰, 测距精度与稳定性较差, 且无法识别设备相对方位, 仅能实现粗略的距离判定, 难以满足精细化管控需求。

后续迭代的蓝牙 5.1 版本新增寻向功能, 依托到达角、出发角两种测量方式, 弥补了传统蓝牙无方位感知能力的缺陷。

Bluetooth 6.0 搭载的信道探测技术, 在协议层面实现了安全测距的标准化落地, 目前主流应用相位测距与往返时间测距两种核心算法。相位测距通过不同频率信号的相位差核算传输距离, 测距精度优势显著, 仅存在少量相位模糊问题; 往返时间测距依托信号往返传输时长判定距离, 安全性能更强, 可用于辅助校准测距数据、提升结果可靠性。

UWB 超宽带技术是当前短距离高精度定位的最优方案之一, 技术优势极为突出。该技术采用纳秒级窄脉冲信号, 信号带宽不低于 500MHz, 具备极高的时间分辨率, 能够有效抑制多径传播带来的测距误差, 定位稳定性与精度远超传统短距离无线技术。目前行业常用的 UWB 定位算法包含双向测距、到达时间、到达时间差等多种类型, 可适配不同场景的定位需求。

2. 多元化应用场景设想

结合本次测试结果与行业技术迭代趋势可以看出, 精准的位置感知能力、稳定的策略执行能力, 是电子围栏技术落地应用的核心前提。传统 GPS、GNSS 卫星定位更适配室外开阔场景, 可实现园区、街区级别的大范围边界管控; 而蓝牙、UWB 等短距离高精度定位技术聚焦室内场景, 能够将管控粒度细化至楼宇、楼层乃至单个房间。随着定位精度持续提升、动态策略下发机制不断完善, 电子围栏的应用边界持续拓宽, 从传统单一的设备准入管控, 逐步延伸至空间精细化治理、安全风险预警、多设备智能协同等多元化场景。

在家庭应用场景中，电子围栏可实现无感化、智能化居家管控。依托短距离精准测距与设备身份认证双重技术，智能门锁、全屋智能家居可精准识别用户终端位置，实现近距离无感解锁，同时有效抵御信号中继攻击等网络安全风险。

在商业运营场景中，电子围栏可助力商业场所实现精细化运营与数字化升级。在大型商业综合体、展会、展厅等复杂场所内，管理人员可通过电子围栏划分商铺、展位、功能区等虚拟边界。在合规获取用户授权、严格保障隐私安全的前提下，统计各区域人流密度、顾客停留时长、互动消费行为等运营数据。

在公共管理与交通治理领域，电子围栏是柔性化、智能化治理的重要工具，应用过程中必须坚守合规底线，严禁随意限制终端与车辆正常功能。在车联网应用场景中，可通过地理围栏为不同路段、不同区域的车辆推送差异化管控策略，包含路段限速提示、危险区域预警、低速通行管控、车载设备发射功率约束等。针对车辆动力强制限制、交通执法取证、强制性管控等核心功能，必须严格遵循相关法律法规，坚持最小干预、全程可追溯、结果可申诉的管控原则，在保障公共安全秩序的同时，充分维护公众合法权益。

3. 技术规模化落地的核心挑战

电子围栏技术应用前景广阔、适配场景丰富，但从当前行业落地现状来看，大规模商业化、普及化应用仍面临多项亟待突破的瓶颈问题。首先是部署与运维成本偏高，想要进一步提升定位精度、优化管控效果，需要部署更多定位基站与锚点设备，同时对终端硬件性能、算法算力要求更高，直接推高了系统搭建、现场部署、后期运维的综合成本，不利于技术大范围推广普及。

其次是系统运行可靠性有待提升，电子围栏的管控精度完全依赖精准的位置定位、稳定的网络传输与统一的策略执行标准。在实际复杂场景中，虚假位置模拟、室内信号遮挡、设备时钟偏

差、多径信号干扰等各类干扰因素，极易造成定位偏差，引发电子围栏误触发、漏触发等问题，严重影响系统管控的准确性与稳定性。

最后是隐私保护与监管合规难题，精细化空间定位需要持续采集、分析用户实时位置数据，此类数据属于高度敏感的个人信息。位置数据的采集、传输、存储、分析、共享全流程，必须严格恪守最小必要、用户明示授权、用途限定、全程加密防护的原则。如何平衡技术应用价值、商业运营需求、公共治理需要与个人隐私保护之间的关系，明确技术应用的监管边界，是当前电子围栏行业规范化发展的核心难题。

二、结论

在物联网、车联网与泛在感知网络全面普及的产业背景下，无线电终端设备数量呈爆发式增长，设备类型、工作频段、运行模式愈发多元复杂，传统粗放式的频谱管理、设备管控、空间安全治理模式，已无法适配当下无线通信行业的高速发展需求。电子围栏作为一种依托虚拟空间边界、可自定义智能管控策略的新型技术，能够将地理位置信息转化为频谱准入权限、设备功率限值、终端功能管控规则、安全预警触发条件，为复杂无线环境下的设备管控、频谱资源优化、空间安全治理提供了更灵活、精细、智能的全新解决方案。本文以6GHz Wi-Fi 频段 AFC 自动频率协调机制为核心研究案例，通过模拟测试验证了基于地理位置与功率约束的电子围栏技术，在频谱共享、信号干扰防控场景中的实际应用成效。同时通过梳理蓝牙信道探测、UWB 超宽带等短距离定位技术的迭代成果，深入分析了电子围栏在室内精细化管控、多行业场景落地的拓展潜力。

参考文献

-
- [1] Wi-Fi Alliance, "AFC_System_Reference_Model_v1.0," Mar. 12, 2023.
 - [2] Wi-Fi Alliance, "AFC System to AFC Device Interface Specification v1.5," May. 8, 2023.
 - [3] Wi-Fi Alliance, "AFC Device (DUT) Compliance Test Plan v1.7," Jun. 17, 2024.