

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202501005

基于改进简单加权法的多制式通信切换策略

徐东辉, 刘思佚, 张文博, 刘丁胤
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 为解决复杂电磁环境下多制式无线网络难以实现高效稳定的通信制式切换问题, 提出了一种基于改进简单加权法 (Simple Additive Weighting, SAW) 的多制式通信切换策略。该策略通过引入熵权法实现权重的动态更新, 综合考虑接收信号强度 (Received Signal Strength, RSS) 和信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 等关键性能参数, 并引入时间迟滞阈值, 以增强切换决策的稳定性和可靠性。结果表明: 与传统基于 RSS 的方法相比, 该算法在减少切换次数方面表现突出, 平均切换次数减少 40%; 在拒止环境下, 能够在 0.05 ms 和 0.075 ms 时刻准确识别干扰并执行切换, 保持网络传输速率在 90% 以上的时间较传统方法提高了 15%; 在涉及短波、超短波、移动通信和卫星通信等多种制式的场景中, 始终能够选择数据传输速率最高的网络, 切换成功率达到 98%。进一步表明多制式通信切换策略在拒止环境下提高无线通信网络的抗干扰能力和资源利用效率的真实性。

关键词: 多制式通信; 简单加权法; 多属性决策; 切换策略; 拒止环境
中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **开放科学标识码(OSID):**
文章编号: 2097-2741(2025)01-041-09



听语音
与作者互动
聊科研

Improved Simple Additive Weighting-based Multi-standard Communication Switching Strategy

XU Donghui, LIU Siyi, ZHANG Wenbo, LIU Dingyin
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: In multi-standard wireless communication networks, achieving efficient and stable standard communication switching in complex electromagnetic environments is difficult. Therefore, a multi-standard communication switching strategy based on improved simple additive weighting (SAW) was proposed. This strategy dynamically updated the weights using the entropy weight method. By comprehensively considering key performance parameters, such as the Received Signal Strength (RSS) and Signal-to-Noise Ratio, as well as by introducing a time lag threshold, the stability and reliability of the proposed switching strategies were enhanced. Results showed that compared with conventional RSS-based methods, the proposed algorithm significantly reduces the number of switches by an average of 40%. In refusal environments, the algorithm

收稿日期: 2024-09-05

第一作者: 徐东辉 (1979—), 男, 副教授, 主要从事雷达对抗、移动通信、信号分析与处理研究。E-mail: xdh_45@163.com

引用格式: 徐东辉, 刘思佚, 张文博, 等. 基于改进简单加权法的多制式通信切换策略[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (1): 41-49. XU Donghui, LIU Siyi, ZHANG Wenbo, et al. Improved simple additive weighting-based multi-standard communication switching strategy[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (1): 41-49.

accurately identifies interference and executes switches at 0.05 ms and 0.075 ms respectively, as well as improves the period-maintaining network transmission rates above 90% by 15% more than traditional methods. Furthermore, in scenarios involving multiple standards, such as shortwave, ultra-shortwave, mobile communication, and satellite communication, the algorithm invariably selected the network with the highest data transmission rate, with a switching success rate of 98%. Research results indicated that the proposed switching strategy can effectively improve the anti-interference capability and resource utilization efficiency of wireless communication networks in refusal environments.

KEYWORDS: multi-standard communication; simple additive weighting; multi-attribute decision making; switching strategy; refusal environment

在现代军事作战中,拒止环境的特征包括敌方对我方通信信号的干扰、破坏和监控,对信息传输造成了极大挑战。通过同时接入多个不同制式的网络,终端异构无线网络^[1]在遭受干扰时能够进行垂直切换^[2],选择更优的信道传输信息,这为应对拒止环境下无线通信的可靠性问题提供了有效手段。然而,制式切换的过程中会受到各通信制式自身性能差异以及外界干扰对不同频谱传输性能影响的限制。终端在不同通信制式下的传输速率、误码率、时延等性能指标差异显著^[3]。在拒止环境中,由于持续的干扰和信号衰减,传统通信方式面临着更高的失误风险和延迟。因此,如何在拒止环境中,综合考虑各通信制式的性能参数,实现最优的垂直切换,以提升无线网络的可靠性和抗干扰能力,仍然是亟待解决的问题之一。

近年来,针对此类问题,研究者们提出了多种垂直切换判决算法^[4-5],以应对不同通信制式之间的切换需求。其中,基于接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)的垂直切换算法和基于多属性决策(Multiple Attribute Decision Making, MADM)的切换算法是应用最为广泛的两大类方法^[6]。RSS作为垂直切换的重要判据,已被广泛应用于无线通信网络中^[7]。当原通信制式的RSS低于新制式时,移动终端会切换到信号更强的网络。Mir等^[8]提出了一种基于RSS的自适应切换技术,该技术根据终端的移动速度和网络切换延迟自适应调整RSS阈值,以提高无线网络切换的成功率。然而,由于RSS容易受到外界干扰的影响,该方法在实际应用中存在不稳定的切换行为,频繁的切换不仅增加了网络时延,还可能导致无线资源浪费和通信质量下降^[9]。文献[10]提出了一种基于驻留计时器的优化方案,有效减少了不必要的切换次数。然而,这些方法仍

然存在一定的局限性,如在复杂电磁环境下仍然难以避免切换的频繁性和稳定性问题^[11]。随着拒止环境的复杂化,仅依赖RSS已不足以应对多制式通信中的垂直切换需求。因此,基于MADM的切换算法成为研究热点^[12]。此类算法综合考虑了多个性能参数,如信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)、传输速率、误码率、信道容量、切换时延和抖动等^[13]。通过将这些属性进行加权评分并选择得分最高的制式进行切换,可以更好地适应复杂环境。Yadav等^[14]对异构网络中基于MADM的网络选择和切换管理进行了全面的比较分析,研究了各种MADM技术,如简单加权法(Simple Additive Weighting, SAW)、加权积法、灰色关联分析法和偏向理想方案的序数偏好法等,并评估了这些方法在不同场景下的性能。研究结果表明,虽然这些方法都能有效改善网络性能,但在不同的网络环境和用户需求下,各方法的表现存在差异。这一发现为选择适合特定场景的MADM技术提供了重要参考。Wang等^[15]提出了基于多目标模型的垂直切换算法,不仅考虑了传统的性能指标,还引入了能源效率和用户满意度等新的评估维度,通过构建多目标优化模型,成功地在网络性能、能源消耗和用户体验之间取得了平衡。仿真结果显示,与传统方法相比,该算法在降低切换失败率和提高资源利用率方面具有显著优势,尤其是在高负载和复杂干扰环境下表现更为突出。然而,多属性决策方法在实际应用中也面临挑战,主要包括如何合理设定各属性的权重、处理属性之间的相互影响以及在高动态环境下的决策延迟等问题^[16]。

综上所述,尽管以上方法在一定程度上提高了多制式通信的切换效率和稳定性,但仍存在若干不足。一方面是RSS作为主要判据的方法对外

界干扰极为敏感, 容易导致频繁的“乒乓效应”(Ping-Pong Effect)^[17], 即终端设备在不同通信制式之间频繁切换, 却未能维持较长时间的稳定连接, 这种现象会显著增加网络延迟, 浪费通信资源, 并降低整体网络性能; 另一方面是MADM虽然综合考虑了多种性能指标, 但在实际应用中, 由于各指标之间的权重难以合理设定, 导致切换决策过程不够稳健^[18]。另外, 切换时延和决策延迟在高动态环境下仍是影响网络性能的关键因素^[15]。现有研究未能有效解决这些问题, 导致无线通信网络在拒止环境下的抗干扰能力和资源利用效率仍有待提升^[19]。

针对上述问题, 本文提出了一种基于改进SAW的多制式通信切换策略。该策略通过引入熵权法实现SAW权重的在线更新, 综合考虑RSS和SNR等关键性能参数, 同时引入时间迟滞阈值, 结合多属性决策方法, 以增强切换决策的稳定性和可靠性。仿真实验结果表明, 本文算法在多种通信制式间能够实现高效且稳定的切换, 有效减少切换间存在的“乒乓效应”, 提高无线通信网络在拒止环境下的抗干扰能力和资源利用效率。

1 基础SAW多制式切换策略

基础的SAW是基于加权平均的多属性判决方法, 其主要原理是通过创建与候选通信制式相关的收益函数, 综合考虑多个性能属性, 从而确定最佳的通信制式。其基本运行步骤如下。

1.1 归一化处理

假设有 m 个候选通信制式, 每个制式有 n 个性能属性。为了消除量纲的影响, 首先对各个性能属性进行归一化处理。对于第 j 个性能属性, 其归一化值可以表示为

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}}$$

式中: r_{ij} 为归一化后的值; x_{ij} 为第 i 个候选制式在第 j 个性能属性上的原始值。归一化后的矩阵 R 可表示为

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

1.2 加权求和

对每个候选通信制式的归一化参数进行加权求和, 得到每个制式的综合得分, 可表示为

$$Z_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}$$

式中: Z_i 为第 i 个候选制式的综合得分; w_j 为第 j 个属性的权重。

在这种方法中, 每个候选制式的综合得分 Z_i 反映了该制式的总体性能。

1.3 确定目标制式

对所有候选制式的综合得分进行排序, 得分最高的制式即为目标制式, 即:

$$T = \arg \max Z_i$$

式中: T 为最终选择的目标制式。

2 改进SAW多制式切换策略

在拒止环境下, 外界干扰无法被彻底消除, 会严重影响无线通信传输质量, 但可通过寻找并切换到其他空闲可用通信制式来解决此类问题。本文提出了一种基于SAW的垂直切换改进算法进行多制式通信之间的切换决策。基础的SAW算法权重设置对结果的影响较大, 科学合理的权重设置能够有效提高SAW的切换效果。本文引入熵权法来实现权重的在线更新, 以适应外部环境的动态变换; 通过获取各个通信制式的性能参数, 进行归一化处理后, 对各参数进行加权求和; 通过比较各个制式的加权平均值, 选择加权平均值最高的制式作为切换目标, 并将接收信号强度和信噪比作为判决指标。在SAW的基础上, 通过引入时间迟滞阈值并结合多属性决策方法, 减少切换中存在的“乒乓效应”, 从而提高多制式通信切换的稳定性。

2.1 算法改进思路

2.1.1 基于熵权法的权重在线更新

根据不同场景下的用户需求, 选取若干个评价指标, 对于每一个指标, 计算其信息熵值, 信息熵越大, 表示该指标提供的信息量越多, 同时也说明该指标在当前环境下比较敏感, 波动较大。熵的计算公式为

$$S = -k \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot \log_2(P_i)$$

式中: S 为某个评价指标的信息熵; $k = \frac{1}{\log_2(n)}$,

以确保每个指标的熵值为 0~1; P_i 为某个评价指标第 i 个样本值出现的概率。则每个指标的权重为

$$w_j = \frac{1 - S_j}{\sum_{k=1}^n (1 - S_k)}$$

式中: S_j 为第 j 个评价指标的信息熵; w_j 为第 j 个评价指标的权重。

通过熵权法, 可以客观地确定各个评价指标的权重, 从而更准确地进行综合评价和决策。同时, 考虑到现实场景变化的多样性, 通过动态更新指标数据库来实现权重的在线更新, 从而根据环境变化实现 SAW 算法的权重自适应更新, 进而提高 SAW 算法在复杂场景下的适应性。其基本步骤如下。

1) 更新指标数据

假设选定 j 个性能属性。设置样本数量为 N , 使用堆栈数据格式来保存性能属性的实时采集样本, 当样本数小于 N 时, 正常保存数据, 当样本数量大于 N 时, 采用先进先出的方式, 动态更新新样本库, 使得样本数量始终保存为 N 。 t 时刻的指标数据库为 $s_{j,t}$ 。

2) 动态计算性能属性权重

设置性能属性权重更新间隔为 T_{refresh} , 记录上次更新的时刻为 $T_{\text{last_refresh}}$, 当前时刻为 T_{now} , 若 $T_{\text{now}} - T_{\text{last_refresh}} = T_{\text{refresh}}$, 则对系统的属性权重进行更新:

$$\begin{aligned} &\text{if } T_{\text{now}} - T_{\text{last_refresh}} = T_{\text{refresh}}: \\ &\quad w_{j,t+1} = EWM(s_{j,t+1}) \\ &\text{else:} \\ &\quad w_{j,t+1} = w_{j,t} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $EWM()$ 为熵权法函数; $s_{j,t+1}$ 为指标数据库; $w_{j,t+1}$ 为 $s_{j,t+1}$ 对应的权重值。

2.1.2 引入时间迟滞阈值

为了减少频繁切换带来的“乒乓效应”, 本文在 SAW 的基础上引入了时间迟滞阈值^[20]。设当前的最佳候选制式为 T_{current} , 在时刻 t 上, 当新的制式 T_{new} 的得分 Z_{new} 大于 T_{current} 的得分 Z_{current} 并且持续时间 T_{last} 超过阈值 Δt 时, 才进行切换:

$$\begin{aligned} &\text{if } Z_{\text{new}} > Z_{\text{current}} \text{ 且 } T_{\text{last}} > \Delta t: \\ &\quad \text{切换制式} \\ &\text{else:} \\ &\quad \text{不切换制式} \end{aligned}$$

通过上述步骤, 能够在多制式通信中实现稳定高效的切换决策。尤其是在考虑将接收信号强度和信噪比作为主要判决指标时, 结合时间迟滞

阈值及多属性决策方法能够有效减少终端设备切换中存在的“乒乓效应”, 提高切换的稳定性^[21]。

2.2 改进算法具体流程

改进算法的具体流程如图 1 所示。

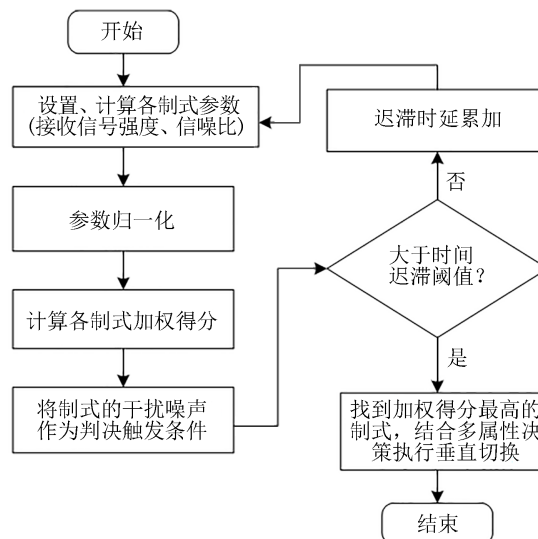


图 1 改进 SAW 切换算法流程

Fig. 1 Flow chart of the improved SAW switching algorithm

Step1 设置各个通信制式的性能参数;

Step2 将各参数归一化后得到各个参数归一化后的值;

Step3 使用熵权法动态更新各性能参数权重并进行加权求和;

Step4 根据各制式的干扰噪声情况作为触发条件, 设置时间延迟阈值判断是否进行切换;

Step5 找出加权平均值最高的制式, 并结合多属性决策进行垂直切换。

3 仿真实验及结果分析

为了验证本文提出的基于改进 SAW 的多制式通信切换策略的有效性, 设计了 3 组仿真实验。实验在 MATLAB R2021a 环境下进行, 使用通信系统工具箱 (Communications System Toolbox) 进行信号处理和性能分析。实验对象为移动终端设备, 能够支持多种通信制式, 如短波、超短波、移动通信和卫星通信。仿真环境模拟了一个包含多个基站的异构无线网络环境, 其中包括不同程度的噪声干扰, 以模拟拒止环境下的通信场景。

3.1 典型场景设置

本文选择将不同通信制式的接收信号强度和

信噪比作为切换决策关键性能参数。信噪比是指信号发射功率与噪声功率的比值, 而接收信号强度则为基站发射信号功率减去无线传输损耗后的差值。

在自由空间中, 电磁波的强度随距离的增加而降低, 具体数学模型为

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

式中: P_r 为接收功率; P_t 为发射功率; G_r 、 G_t 分别为接收增益和发射增益; λ 为电磁波波长; d 为发射基站和接收基站之间的距离。

基于式 (2), 传输路径损耗采用分贝进行表述时, 可表示为

$$P_L = 32.44 + 20\lg f + 20\lg r$$

式中: r 为基站与终端之间的距离, 单位为 km; f 为基站发射信号的中心频率值, 单位为 MHz。

因此, 接收信号强度可表示为:

$$P_{sr,i} = P_t - P_L$$

式中: $P_{sr,i}$ 为第 i 个通信制式的接收信号强度; P_L 为路径损耗。

将各参数进行归一化处理。而后, 设置各性能参数权重并进行加权求和。得到各个通信制式的参数加权平均值, 表示为:

$$R_i = \sum_{j=1}^n \omega_j r_{ij}$$

式中: r_{ij} 为第 i 个通信制式的综合得分; n 为考虑的性能参数总数; w_j 为第 j 个性能参数的权重, 所有权重之和为 1。

具体而言, 本文设时间迟滞阈值为 1 个时间单位 (可以是 s 或 ms, 具体取决于系统要求), 初始切换时钟设为 0。当切换时钟超过迟滞阈值时, 系统将执行垂直切换, 选择加权平均值最高的通信制式进行切换; 若未超过阈值, 则延迟时间累积, 重复上述判断过程。时间迟滞阈值可以根据实际网络环境和业务需求进行调整, 以达到最佳的切换效果。

3.2 不同算法的切换效果对比分析

在本实验中, 主要对比分析了基于 SAW 的垂直切换算法、基于 RSS 的垂直切换算法和基于改进 SAW 的垂直切换算法的性能, 仿真结果如图 2 和图 3 所示。

图 2 和图 3 表明, 在相同的时间内, 基于 RSS 的方法在极端情况下出现了频繁的反复切换, 导

致通信稳定性下降, 而基于改进 SAW 的垂直切换算法由于引入了时间迟滞阈值, 显著减少了“乒乓效应”的发生。切换次数的减少能够降低资源消耗, 避免了频繁切换网络导致的通信中断或传输速率下降, 进而提高服务质量 (Quality of Service, QoS), 确保通信的连续性和可靠性。

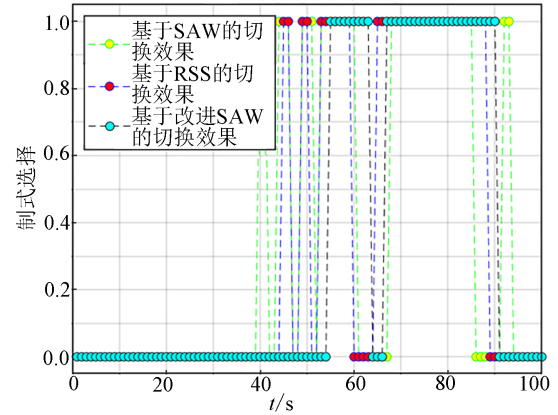


图 2 不同算法的切换效果对比

Fig. 2 Comparison of switching effects of different algorithms

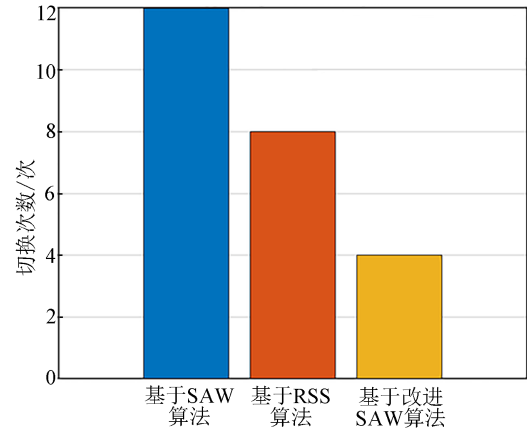


图 3 不同算法的切换次数对比

Fig. 3 Comparison of switching times of different algorithms

3.3 拒止环境下切换效果对比分析

在本实验中, 主要通过引入无法去除且不可忽略的噪声来模拟拒止环境, 噪声干扰的分布情况如图 4 所示。在整个仿真实验过程中, 制式 1 和制式 2 均存在低于 1 dBm 的白噪声。在这种情况下, 噪声对通信的影响可以忽略不计, 制式仍能正常通信。然而, 在 0.05~0.075 ms 之间, 对制式 1 加入严重的噪声干扰, 在 0.075~0.1 ms 之间, 对制式 2 加入严重的噪声干扰。这些干扰的引入将严重影响通信质量, 迫使终端系统必须进行制式切换以维持无线通信的稳定性和可靠性。

仿真环境设置为：制式1的基站位于坐标轴的零点位置，即 $(0, 0)$ ；制式2的基站位于坐标轴的横轴上，坐标为 $(500, 0)$ ；制式1基站的发射中心频点频率值为 $2\ 000\ \text{MHz}$ ；制式2基站的发射中心频点频率值为 $2\ 500\ \text{MHz}$ ；移动终端初始位置在坐标轴的横轴上，坐标为 $(100, 0)$ ；移动终端在横轴上随机移动，整个移动时间设为 $0.01\ \text{ms}$ 。仿真实验的参数设置为：制式1的基站发射信号功率 $33\ \text{dBm}$ ，制式2的基站发射信号功率 $23\ \text{dBm}$ ；时间迟滞阈值设为1。在切换过程中为体现噪声干扰对切换决策的主要影响，将信噪比的权重设为0.6，接收信号强度的权重设为0.4。根据算法流程，进行仿真测试，结果如图5所示。

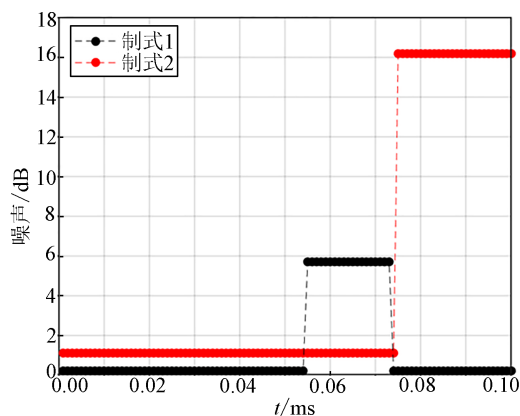


图4 噪声分布情况

Fig. 4 Noise distributions

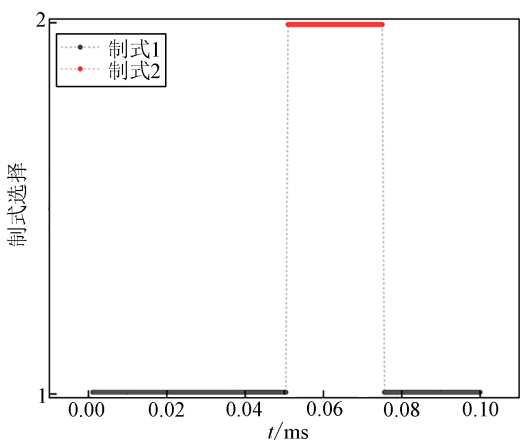


图5 拒止环境下改进SAW算法的切换效果

Fig. 5 Switching effects of the improved SAW algorithm in a refusal environment

可以看出，基于改进SAW的算法能够成功实现不同通信制式之间的切换，切换时间分别为 $0.05\ \text{ms}$ 和 $0.075\ \text{ms}$ 。在 $0\sim 0.05\ \text{ms}$ 之间，制式1和制式2都未受到显著的噪声干扰，均能正常通信。

然而，由于此时段内制式2的性能不如制式1，因此选择制式1进行通信；在 $0.05\sim 0.075\ \text{ms}$ 之间，制式1受到了不可消除的干扰，通信质量受到影响，而制式2未受到严重干扰，仍能够正常通信，此时制式2的性能优于制式1，因此选择制式2进行通信；在 $0.075\ \text{ms}$ 至切换过程结束的这段时间内，制式1未受到显著噪声干扰，但制式2的噪声影响了正常通信，导致制式1的性能优于制式2，因此选择制式1进行通信。

尽管切换决策仍受接收信号强度的影响，但切换时间基本与噪声干扰出现的时间相符，表明在复杂电磁环境下的多制式切换策略有效。

图6展示了切换不同通信制式前后的网络速率变化，除了在 $0.05\ \text{ms}$ 时有短暂的网络延迟，整体网络速率均保持较平稳的水平，证明在受干扰后，基于改进SAW切换策略的效果较好。

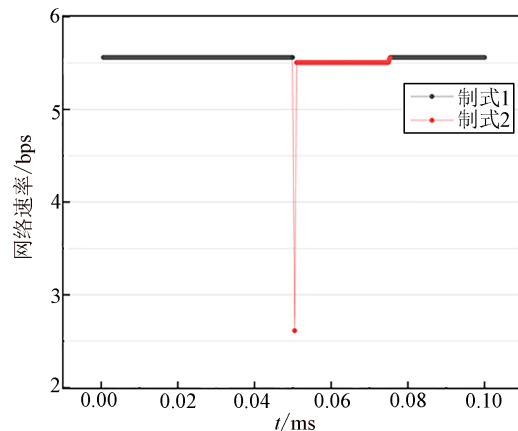


图6 制式切换前后网络速率变化

Fig. 6 Changes of network rates before and after switching

图7和图8为切换过程的各制式的接收信号强度以及信噪比。

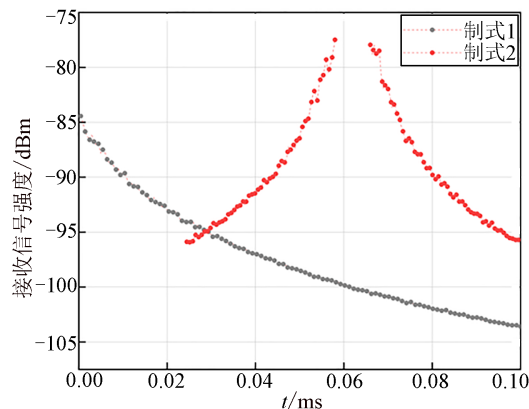


图7 各制式接收信号强度

Fig. 7 Received signal strengths of two standards

由图7可以看出, 各通信制式的接收信号强度随时间变化呈现不同的波动特性, 主要受到基站位置和干扰环境的影响。在制式1和制式2之间切换的时间点0.05 ms和0.075 ms, 可以明显观察到接收信号强度的突变, 这与环境干扰引起的通信质量变化密切相关。此外, 在噪声干扰减弱后, 信号强度逐步恢复, 表明终端能够及时响应并切换至性能较优的通信制式。由图8可以看出, 在干扰出现的时刻, 信噪比迅速下降, 从而触发了通信制式的切换。改进SAW算法不仅在干扰时间点成功完成了制式切换, 同时在干扰消除后能够迅速选择信噪比更高的通信制式以恢复通信质量。这种动态响应能力确保了通信系统在复杂电磁环境下的稳定性。

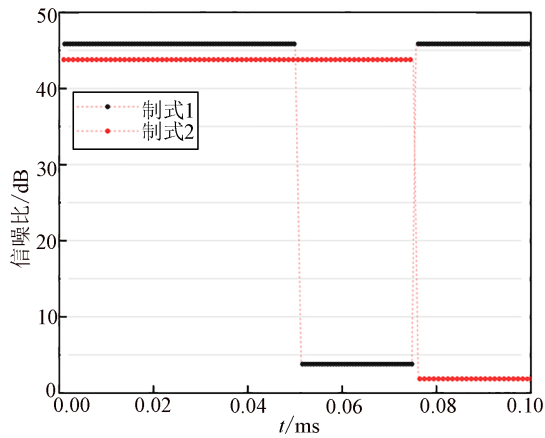


图8 各制式信噪比

Fig. 8 SNR of two standards

总体来看, 改进SAW算法通过综合评估接收信号强度和信噪比, 在保证通信稳定性的同时, 能够最大限度地提高资源利用效率, 尤其是在拒止环境下, 其良好的抗干扰性能和快速响应能力, 可以为多制式无线通信提供保障。

3.4 多制式之间的切换仿真

为检验改进SAW算法在多种通信制式间的切换效果, 在实验中设置了4种通信制式, 包括短波、超短波、移动通信和卫星通信。仿真环境设置为: 短波基站位置位于坐标轴的零点位置, 即(0, 0); 超短波基站位置坐标为(600, 600); 移动通信基站位置坐标为(200, 1000); 卫星通信基站位置位于坐标轴的横轴上, 坐标为(900, 0); 短波基站发射中心频点频率值为3 MHz; 超短波基站发射中心频点频率值为100 MHz; 移动通信基站发射中心频点频率值为2 000 MHz; 卫星通信基站发射中心频点频率值为3 900 MHz; 移动终端初

始位置在坐标轴的横轴上, 坐标为(100, 0), 在横轴上移动, 移动速度为10 m/s, 整个移动时间设为100 s。

仿真实验的参数设置为: 短波基站发射信号功率23 dBm, 超短波基站发射信号功率33 dBm; 移动通信基站发射信号功率33 dBm, 卫星通信基站发射信号功率40 dBm; 时间迟滞阈值设置为0.000 5。在切换过程中为体现噪声干扰对切换决策的主要影响, 将信噪比的权重设为0.6, 接收信号强度的权重设为0.4。多制式切换仿真结果和制式切换前后网络速率变化, 如图9和图10所示。

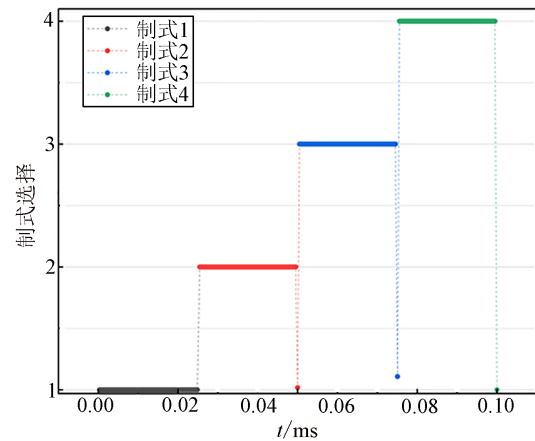


图9 多制式切换仿真结果

Fig. 9 Simulation results of multi-standard switching

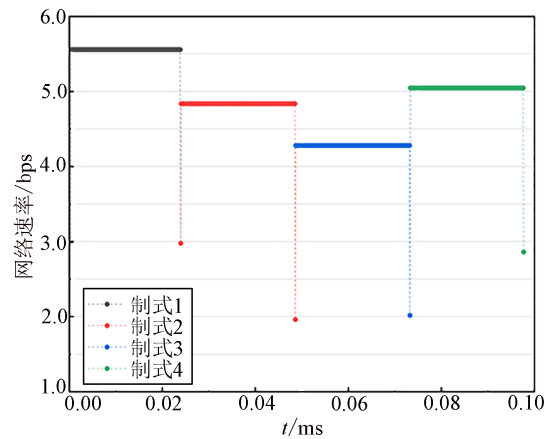


图10 制式切换前后网络速率变化

Fig. 10 Changes of network rates before and after standard switching

由图9可以看出, 在终端位置发生变化时, 系统能够及时选择性能较优的通信制式进行切换, 尤其是在切换节点处, 算法能快速响应信噪比和接收信号强度的变化, 体现出良好的动态适应能力, 验证了改进SAW算法在多制式通信场景中的有效性。由图10可以看出, 尽管切换过程中网络

速率在个别时刻略有波动,但整体表现平稳。表明改进 SAW 算法在切换过程中有效避免了速率的显著下降,同时减少了切换对用户体验的负面影响,进一步证明了算法在复杂环境下的稳定性和可靠性。

实验结果表明,改进的 SAW 切换算法能够在多种通信制式之间实现有效切换。通过仿真可以看到,在不同制式间的切换过程中,移动终端始终能够选择数据传输速率更高的网络,从而确保通信的稳定性和效率。此外,随着移动终端位置的变化,算法能够在适当的时间点进行切换,体现了其对信号强度和信噪比的良好适应性,验证了改进 SAW 算法在拒止环境下的应用潜力。

4 结论

本文研究了在拒止环境下,通过基于改进 SAW 的多制式通信切换策略,引入接收信号强度和信噪比 2 个关键性能参数,并结合时间迟滞阈值,有效提高了不同通信制式间切换的稳定性和可靠性。仿真实验结果表明,该改进算法能够在多种通信制式之间实现高效且稳定的切换,减少“乒乓效应”的发生,并提高通信网络在复杂环境下的抗干扰能力和资源利用效率。今后,将考虑更多的网络环境和性能参数,进一步优化本文算法,提高在拒止环境下多场景中的适应性和性能。此外,将其他机器学习和深度学习算法引入垂直切换决策过程中,以实现更加智能和高效的通信制式选择策略也是下一步需要重点解决的问题。

参考文献

- [1] BEN Z A, AYADI M, TABBANE S. Fuzzy MADM based vertical handover algorithm for enhancing network performances[C]//2015 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 153-159.
- [2] 刘胜美, 孟庆民, 潘甦, 等. 异构无线网络中基于 SINR 和层次分析法的 SAW 垂直切换算法研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 235-239.
LIU S M, MENG Q M, PAN S, et al. A simple additive weighting vertical handoff algorithm-based on SINR and AHP for heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(1): 235-239.
- [3] ZHU F, MCNAIR J. Multiservice vertical handoff decision algorithms[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2006, 2006(1): 025861.
- [4] 吴利平, 王双双, 马彬. 改善用户体验的垂直切换算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(8): 2824-2832.
WU L P, WANG S S, MA B. Vertical handoff algorithm for improving user experience[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(8): 2824-2832.
- [5] 邓红, 张平平, 李丹. 基于改进的区间二型模糊逻辑的垂直切换算法[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(12): 107-110, 114.
- [6] SATAPATHY P, MAHAPATRO J. Energy efficient vertical handover in heterogeneous networks [C]//2021 IEEE International IoT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-7.
- [7] ZIA K, CHIUMENTO A, HAVINGA P J M. AI-enabled reliable QoS in multi-RAT wireless IoT networks: prospects, challenges, and future directions[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2022, 3: 1906-1929.
- [8] MIR U, MUNIR A. An adaptive handoff strategy for cognitive radio networks[J]. Wireless Networks, 2018, 24: 2077-2092.
- [9] ALRAIH S, NORDIN R, ABU-SAMAH A, et al. A survey on handover optimization in beyond 5G mobile networks: challenges and solutions[J]. IEEE Access, 2023, 11: 59317-59345.
- [10] GOH M I, MBULWA A I, YEW H T, et al. Handover decision-making algorithm for 5G heterogeneous networks[J]. Electronics, 2023, 12(11): 2384.
- [11] ABDULLAH R M, ABUALKISHIK A Z, ALWAN A A. Improved handover decision algorithm using multiple criteria[J]. Procedia Computer Science, 2018, 141: 32-39.
- [12] ALMUTAIRI A F, HAMED M, LANDOLSI M A, et al. A genetic algorithm approach for multi-attribute vertical handover decision making in wireless networks[J]. Telecommunication Systems, 2018, 68(2): 151-161.
- [13] ZHONG Y, WANG H, LYU H, et al. A vertical handoff decision scheme using subjective-objective weighting and grey relational analysis in cognitive heterogeneous networks[J]. Ad Hoc Networks, 2022, 134: 102924.
- [14] YADAV A K, SINGH K, ARSHAD N I, et al. MADM-based network selection and handover man-

- agement in heterogeneous network: a comprehensive comparative analysis[J]. *Results in Engineering*, 2024, 21: 101918.
- [15] WANG S, DENG H, XIONG R, et al. A multi-objective model-based vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, 2021(1): 75.
- [16] SATAPATHY P, MAHAPATRO J. An efficient multicriteria-based vertical handover decision-making algorithm for heterogeneous networks[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2022, 33(4): e4409.
- [17] KIM W I, LEE B J, SONG J S, et al. Ping-pong avoidance algorithm for vertical handover in wireless overlay networks[C]//2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1509-1512.
- [18] KUNARAK S, SULEESATHIRA R. Multi-criteria vertical handoff decision algorithm for overlaid heterogeneous mobile IP networks[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 357(10): 6321-6351.
- [19] TAN X N, CHEN G, SUN H Y. Vertical handover algorithm based on multi-attribute and neural network in heterogeneous integrated network[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, 2020(1): 202.
- [20] ZHANG B L, QI W J, ZHANG J. An energy efficiency and ping-pong handover ratio optimization in two-tier heterogeneous networks[C]//2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 532-536.
- [21] LIU Q Y, KWONG C F, ZHANG S B, et al. Fuzzy-TOPSIS based optimal handover decision-making algorithm for fifth-generation of mobile communications system[J]. *Journal of Communications*, 2019, 14(10): 945-950.

(编辑: 于福兴)