

基于线性回归预测的城市轨道交通车地无线通信性能提升方法研究

白 轩^{1,2}, 李 晋³, 张小虎³, 钟敏富³

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081;

3. 广州地铁集团有限公司, 广州 510330)

摘要: 车地无线通信是城市轨道交通信号系统正常运行的基础, 切换性能是无线通信质量的重要指标, 也是影响车地列车控制信息传输的重要因素; 在广州地铁运维过程中, 通过分析日志发现切换性能是限制车地无线通信性能的重要因素; 为此提出了一种基于线性回归预测的 WLAN 切换算法, 针对 WLAN 制式的无线通信方式, 以当前连接 AP 的接收信号强度、待连接 AP 的接收信号强度和列车位置作为参数, 计算预测函数并根据预测的两种接收信号强度值进行切换触发判决, 提高 WLAN 切换的性能, 从而提高车地无线通信性能; 基于广州地铁某线路的测试数据的仿真实验结果表明该方法效果良好。

关键词: 无线通信; 回归预测; 切换优化

Research on Improving Wireless Communication Performance of Urban Rail Transit Based on Linear Regression Prediction

Bai Xuan^{1,2}, Li Jin³, Zhang Xiaohu³, Zhong Minfu³

(1. Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences

Group Co., Ltd., Beijing 100081, China;

2. China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081, China;

3. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510330, China)

Abstract: Vehicle-ground wireless communication is the basis of urban rail transit signal systems. Handover performance is not only an important indicator of wireless communication quality, but also an important factor affecting the transmission of train control information. During the operation and maintenance of the Guangzhou Metro, it was found through analysis of the log that handover performance is an important factor limiting the wireless communication performance between trains and grounds. Therefore, a WLAN handover algorithm based on linear regression prediction is proposed. For wireless communication methods of WLAN standard, using the received signal strength of the currently connected Access Point, the received signal strength of the Access Point to be connected, and the train position as parameters, calculate the prediction function. The handover trigger decision is made based on the two kinds of predicted received signal strength value, which improves WLAN handover performance, thereby improving car-ground wireless communication performance. The experimental and simulation based on the test data of a Guangzhou Metro line results show that the method works well.

Keywords: wireless communication; regression prediction; handover optimization

0 引言

随着城市轨道交通运营需求的不断提高以及当前各种制式无线通信技术的发展, 基于通信的列车控制系统 CBTC (communication based train control system) 系统成为城市轨道交通行业中使用最为广泛的列车控制系统。它通过列车与地面相互间的无线数据通信, 完成车载控车设备与地面列车控制设备之间实时的数据传输, 借助无线通信传输带宽高、吞吐量、速度快、时延低的特点实现移动闭塞,

因此提升车地无线通信的性能对于 CBTC 系统正常运行有着十分重要的意义。

WLAN (wireless local area network) 凭借其传输速率快、兼容性强的特点, 成为了当今 CBTC 系统中无线通信制式的主流。在广州地铁的运维工作中发现, 列车在一天的运营过程中会发生数千次的 AP (access point) 与 AP 之间的切换, 因此提高 WLAN 切换的性能能够提升 CBTC 系统中车地无线通信性能。为此本文提出了基于线性回归预测的切换算法, 根据接收信号强度的历史值及列车位置信息作为训练集合, 通过对于连接 AP 和待连接 AP 的接收信号强度值进行回归预测, 再根据预测值进行切换判决, 以此来提高 WLAN 切换的稳定性和抑制乒乓切换的能力, 从而提升城市轨道交通车地无线通信性能。

收稿日期: 2020-02-11; 修回日期: 2020-04-02。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201202)。

作者简介: 白 轩(1990-), 男, 北京人, 硕士, 助理研究员, 主要从事轨道交通信号系统技术方向的研究。

1 CBTC 系统 WLAN 传输模型研究

1.1 CBTC 系统 DCS 网络结构

作为 CBTC 的重要组成部分的 DCS (data communication system) 系统,其主要作用是承载信号系统中所有信号设备之间的数据业务,完成车载控车设备与地面列车控制设备之间的数据交互^[1]。DCS 是一个独立的网络系统,用于在各个子系统之间来进行 IP 报文的传送。DCS 子系统主要包括有线以及无线两部分,其中无线部分包含以下 3 种设备:区域控制器、地面无线设备以及车载设备。地面无线设备 AP 主要是沿着轨道采用线性分布,如图 1 所示。

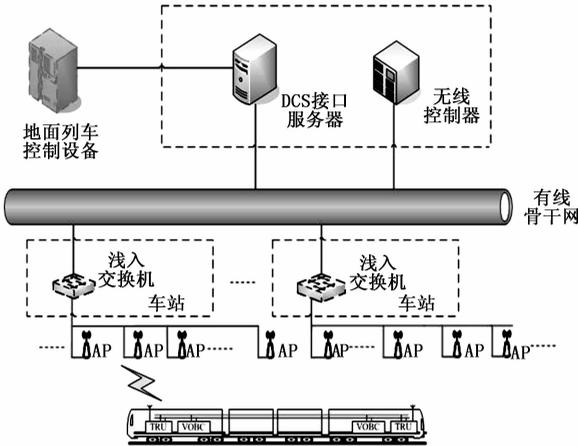


图 1 CBTC 系统车地无线通信系统结构框图

1.2 WLAN 切换机制研究

1.2.1 切换触发

地铁列车在运行过程中,由于轨旁无线设备 AP 是沿着轨道呈线性布置的,所以当列车驶入一个 AP 覆盖区域时,会逐渐离开原本连接的 AP 覆盖区域,导致中间会触发列车在两个 AP 之间的切换。但是不同厂家采用的触发条件并不相同,接收信号强度、连续丢失信标帧、达到最大重传计数或者是速率变化过快等都有可能成为厂家选择的切换触发条件。本文就以绝大多数厂家选择的接收信号强度作为触发条件,来对触发切换进行分析,图 2 为切换过程示意图。

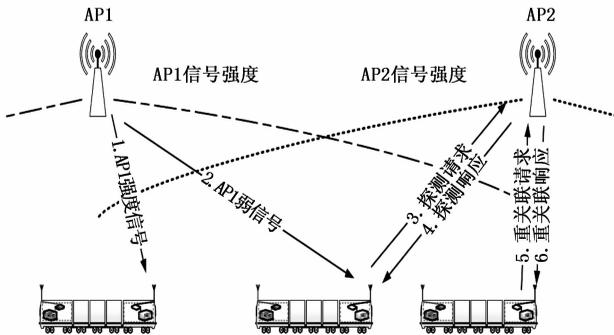


图 2 CBTC 系统中 WLAN 切换示意图

首先根据接收信号强度来设定触发切换的门限值,然后根据车载无线单元 TRU (train radio unit) 接收与当前连接的 AP 最近的另一个 AP 的信标帧来判断是否需要切换。列

车行驶至位置 1 时, AP1 信号强, TRU 与 AP1 正常连接。随着列车向 AP2 方向的移动, TRU 接收到 AP1 的信号强度逐渐减弱,当信号强度下降到某个预设的阈值时, TRU 将断开与 AP1 的连接并向 AP2 发起连接请求,即触发切换。

1.2.2 扫描过程

为了保证 TRU 能够连接到信号最强的 AP,需要其及时获得 AP 信息。TRU 目前有两种获取 AP 的方法,即 TRU 被动接收的被动扫描以及 TRU 主动发起的主动扫描。被动扫描为了接收到完整的信标帧,必须在每个信道上停留足够多的时间对信标帧进行监听。由此可以看出它最大的缺点是停留的时间需要足够长,这段停留的时间被称为扫描时延,扫描时延与信道的数量呈正相关性,也就是说信道数量越多,扫描时延越长,因此城市轨道交通车地无线系统中采用这种方式的不多。主动扫描的方式是指 TRU 在监听信道的同时采用发送探测请求帧来获取 AP 的信息。主动扫描过程采用的是 CSMA/CA (carrier sense multiple access/collision avoidance, 避免冲突的载波侦听多路访问) 的随机竞争信道访问机制^[2],本文采用的就是主动扫描方式,图 3 为主动扫描方式示意图。

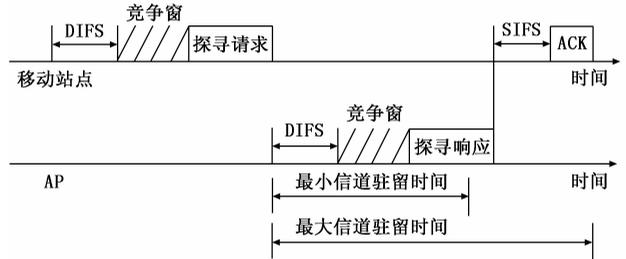


图 3 主动扫描示意图

1.2.3 认证与重认证过程

在扫描过程中获得的新的 AP 需经过认证后才可以正常使用 WLAN, IEEE802.1 规定了非加密认证以及加密认证两种认证方案^[3]。认证后,需要与已经连接的 AP 重关联。首先向 AP 发送重关联请求帧,重关联请求帧主要包含 AP 在网络中的服务集标识 SSID (service set identifier)。AP 处理请求帧并且发送重关联响应帧,实现重关联。这样 TRU 与 AP 便可以正常通信。重关联一样会有时延,一般为 1~2 ms^[4]。

3 个阶段产生的时延应该满足《CBTC 系统技术规格书》的要求,也就是说列车在发生无线切换时产生的时延在 95% 的概率下高于 100 ms,端到端通信时延最多 150 ms,否则会出现行车安全问题。

1.3 地铁环境无线信道传播模型

根据无线信号衰落的具体特征可以将衰落分为不同的类型,其中包括大尺度衰落类型、阴影衰落类型以及小尺度衰落类型。

1.3.1 大尺度衰落模型

大尺度衰落模型描述的是在无线信号传输过程中随着传输距离的逐渐变远信号强度逐渐变弱的过程,故也称之为路径损耗模型。在发射端发出无线信号到接收端接收无线信号的过程中,无线电波的反射、折射等现象均可能使

信号功率产生衰减。路径损耗的多少与路径的长短呈明显的正相关性, 也就是说路径越长, 损耗越大。如果环境因素是确定的, 理论上是可以用电磁理论计算确定路径损耗模型。但是在通常的情况下, 影响电磁波传播因素很多, 很难严格应用电磁理论计算来确定路径损耗模型^[5]。

目前通常采用经验模型来对路径统计进行描述, 预测。通过对大量历史数据进行统计整合, 依据数据归纳得出路径损耗的模型。相比电磁理论而言, 经验模型依据大量历史数据为基础, 模型数据准确真实, 具有很强的参考价值, 并且可以在模型中规避环境的因素, 易于实现。依据此模型对网络进行规划, 辅助各个站点地点的选择, 具有实际的意义。

1.3.2 阴影衰落模型

阴影衰落表示无线信号在平均几十个波长距离上的衰落特性, 阴影衰落是由于电磁波在传播过程中受到物体的阻挡, 在阻挡后面的阴影区接收信号强度下降^[6]而产生衰落。它是一种慢衰落, 符合高斯分布, 基本不受工作频率的影响。阴影衰落是一个服从对数正太分布的随机变量, 均值为零, 标准差为环境特征。

1.3.3 小尺度衰落模型

小尺度衰落主要是由于无线电波传播过程中的反射、折射等造成的。无线电波在碰上例如地表、体积较大的物体之后产生折射或者反射等现象, 经折射、反射等产生的折射波或者反射波会从不同的方向到达信号接收器, 导致电磁波会在接收器处互相叠加, 叠加的方位以及作用不同会对无线电波的强弱造成影响, 它也被称为电磁波在传播过程中的多径效应^[7]。多径效应会在短时间或者短距离内对信号造成影响, 这个变化称之为小尺度衰落。

瑞利分布、莱斯分布、Nakagami 分布、韦伯分布和对数正态分布是常见的随机过程的统计分布。通常采用随机过程统计性地描述小尺度衰落。

2 基于线性回归的 WLAN 切换算法

2.1 线性回归简介

线性回归 (linear regression) 是一种应用于统计学中的回归分析方法, 它能够归纳出自变量和因变量之间相互依赖的定量关系, 这种关系通过线性回归方程来表示, 其

中自变量可以是一个也可以是多个^[8]。

线性回归中通常习惯用 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^{n \times p}$ 表示数据矩阵, 其中 $x_i \in R^p$ 表示一个 p 维度长的数据样本; $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \in R^n$ 表示数据的预测值, 这里只考虑每个样本为一类的情况, 线性回归的模型如下:

$$f(x_i) = \sum_{m=1}^p w_m x_{im} + w_0 = w^T x_i$$

其中: w_0 称为截距, x_i 有 $p+1$ 维度。

2.1.1 线性回归的用途

线性回归在数据、经济、医学等很多领域有很多实际用途, 分为以下两大类:

1) 针对预测的场景, 线性回归可将训练数据集合中 y 值和 x 的值归纳出一个模型, 这个步骤称之为拟合。在预测模型拟合成功之后, 给出任意没有匹配 y 值的 x , 都能够计算出该 x 所对应的预测 y 值。

2) 给定单变量 y 和变量集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}$, 变量集合 X 中的每个值都与 y 有一定相关性, 线性回归分析把 y 与 X 中每个 x_j 值得相关度进行量化, 进而评估出与 y 相关度低的 x_j , 并诊断 x_j 之于 y 的冗余信息。

2.1.2 最小二乘法曲线拟合

最小二乘逼近是用来拟合回归模型最主要的方法之一, 最小二乘法 (又称最小平方方法) 是完成逼近的主要手段。它使用最小化误差的平方和去完成输入数据的最佳函数匹配。其具体方法是将计算得出的数据与实际数据进行对比, 保证计算数据与实际数据之间误差的平方和为最小。

$$J(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 = \frac{1}{n} \|y - Xw\|^2$$

最小二乘法在多项式曲线或直线的拟合问题上都得到广泛地应用^[9]。

2.2 漏泄同轴电缆信号场强覆盖曲线拟合分析

笔者在广州地铁某线路采集大量信号强度值, 以及其对应的位置。该线路采用漏缆进行信号覆盖, 平均每 400 m 布置一个 AP。本文以距离连接 AP 的距离作为变量 x , 接收信号强度指示 RSSI 值为 y 值, 分别对连接 AP 以及待连接 AP 的信号强度进行一次多项式拟合和二次多项式拟合, 其结果摘录如表 1 所示。

表 1 已连接 AP 场强多项式拟合系数表

| 序号 | 一次多项式拟合 | | | 二次多项式拟合 | | | |
|----|----------|---------|---------|-------------------|----------|---------|---------|
| | $y=ax+b$ | | | $y=ax^2+bx+c$ | | | |
| | a | b | R^2 | a | b | c | R^2 |
| 1 | -0.132 0 | -45.985 | 0.965 6 | 1.9×10^6 | -0.132 0 | -45.985 | 0.975 2 |
| 2 | -0.110 3 | -44.445 | 0.948 5 | 1.1×10^6 | -0.110 3 | -44.445 | 0.953 3 |
| 3 | -0.097 8 | -47.865 | 0.932 7 | 2.6×10^6 | -0.097 8 | -47.865 | 0.976 6 |
| 4 | -0.099 5 | -52.668 | 0.958 7 | 2.2×10^6 | -0.099 5 | -52.668 | 0.961 7 |
| 5 | -0.129 8 | -53.004 | 0.969 7 | 2.8×10^6 | -0.129 8 | -53.004 | 0.978 4 |
| 6 | -0.119 1 | -49.344 | 0.923 6 | 1.2×10^6 | -0.119 1 | -49.344 | 0.934 7 |
| 7 | -0.112 9 | -50.213 | 0.914 5 | 4.6×10^6 | -0.112 9 | -50.213 | 0.932 2 |
| 8 | -0.109 8 | -49.340 | 0.954 3 | 3.8×10^6 | -0.109 8 | -49.340 | 0.963 5 |
| 9 | -0.117 3 | -46.355 | 0.922 5 | 3.7×10^6 | -0.117 3 | -46.355 | 0.947 8 |
| 10 | -0.104 5 | -48.363 | 0.933 6 | 3.2×10^6 | -0.104 5 | -48.363 | 0.965 3 |

表 2 待连接 AP 场强多项式拟合系数表

| 序号 | 一次多项式拟合 | | | 二次多项式拟合 | | | |
|----|----------|---------|---------|-------------------|---------|---------|---------|
| | $y=ax+b$ | | | $y=ax^2+bx+c$ | | | |
| | a | b | R^2 | a | b | c | R^2 |
| 1 | 0.101 2 | -81.365 | 0.973 6 | 2.1×10^6 | 0.114 2 | -82.865 | 0.986 2 |
| 2 | 0.110 3 | -80.445 | 0.963 5 | 1.9×10^6 | 0.123 3 | -80.336 | 0.974 3 |
| 3 | 0.099 6 | -79.395 | 0.942 7 | 1.7×10^6 | 0.109 6 | -78.989 | 0.967 6 |
| 4 | 0.097 8 | -81.568 | 0.964 6 | 2.0×10^6 | 0.095 6 | -80.354 | 0.987 7 |
| 5 | 0.119 8 | -78.984 | 0.956 6 | 2.1×10^6 | 0.099 8 | -79.012 | 0.975 4 |
| 6 | 0.120 1 | -77.654 | 0.942 3 | 2.2×10^6 | 0.110 1 | -78.007 | 0.956 7 |
| 7 | 0.109 9 | -80.193 | 0.953 1 | 3.1×10^6 | 0.099 9 | -80.003 | 0.978 2 |
| 8 | 0.107 8 | -79.340 | 0.925 6 | 5.8×10^6 | 0.112 4 | -80.170 | 0.943 5 |
| 9 | 0.120 3 | -77.685 | 0.947 8 | 4.7×10^6 | 0.135 3 | -78.085 | 0.967 8 |
| 10 | 0.094 5 | -78.143 | 0.956 0 | 3.6×10^6 | 0.100 1 | -77.946 | 0.978 3 |

通过表 1 和表 2 可以看出，对于漏缆覆盖的场景采用多项式拟合的方式对已连接 AP 和待连接 AP 的信号强度进行线性拟合所得到的相关系数 R^2 相当高，理论上 R^2 越接近于 1，线性拟合的方程就越贴合，超过 0.8 即可认为拟合的程度比较优秀。而在漏缆覆盖的场景中，一次多项式拟合的就可以达到 0.9 以上，二次拟合的二次项系数非常小可以忽略不计。由此可以得出采用一次多项式拟合完全可以对漏缆覆盖下 AP 信号强度离散值进行线性回归分析，采用线性回归方式来预测下一时刻连接 AP 以及待连接 AP 的信号强度具有很高的可行性和可信度。

2.3 漏泄同轴电缆 WLAN 切换优化算法研究

根据信号覆盖的情况可以将两个 AP 之间的区域划分为 3 个区间，分别为“避免切换区间”、“理想切换区间”、“必须切换区间”，如图 4 所示。

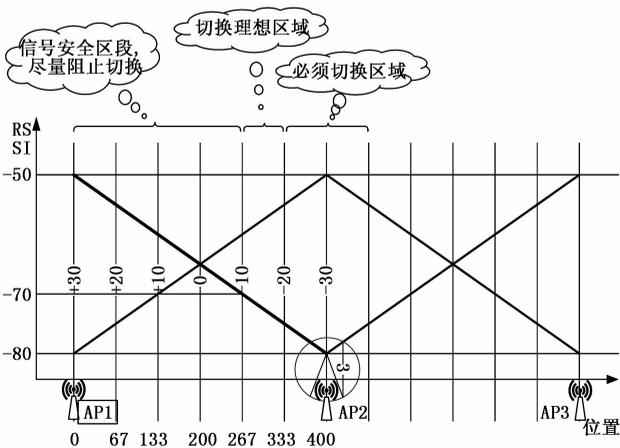


图 4 漏泄同轴电缆 WLAN 切换场景示意图

1) 以 AP1 向 AP2 切换这一场景分析，列车最初连接的 AP1，并向 AP2 方向移动。理论上以地铁线路平均 400 m 分布为例，“避免切换区域”定义为 AP1 原点至 267 m 左右的区域，原因有 3 点：

RSSI 值在 -50 ~ -70 dBm 左右，信号强度较好，能够保持良好的通信质量；

2) 列车在距离 AP1 大概 200 m 以内的位置，其接收到 AP2 信号强度比 AP1 信号强度低，如果切换到 AP2 其通信质量会比保持与 AP1 连接的通信质量差；

3) 列车在距离 AP1 大概 200 ~ 267 m 附近的位置时，虽然接收到的 AP2 信号强度高于 AP1 信号强度，但是 AP1 和 AP2 的信号强度相差不多相差在 10 dB 以内，再考虑到信号的衰落和波动，这个区域内列车容易发生乒乓切换；

“理想切换区域”指的是大概为 267 ~ 333 m 区域，原因有以下两点：

1) 在这个区域内，列车接收到的 AP2 信号强度好，列车在这个时段切换到 AP2 成功率较高，而且 AP1 和 AP2 之间的信号强度差异 10 dB 以上，不容易发生乒乓切换；

2) 在切换前，由于列车连接的 AP1 信号强度还较强，所以通信质量还保持在一个较好的水准；

“必须切换区域”定义为 333 ~ 400 m 的位置，在这个区域切换也是可接受的，但是切换前的通信质量已经较差，丢包的概率变大，切换时机较晚。

传统的切换算法根据当前网络性能参数指标 RSSI (received signal strength indication 接收的信号强度指示) 的值作为主要参考，通过实时的扫描获取 AP 的 RSSI 值，将当前连接 AP 的 RSSI 值与预先设定的切换门限进行比较，如果判断当前连接 AP 的 RSSI 值低于切换门限时，则开始之前章节所述的切换流程。显然，传统的 WLAN 切换算法能够满足一般的通信需求，但是这种算法忽略了信号衰落和隧道壁发射可能带来的信号叠加，当列车受到叠加信号影响并且信号波动时，就可能导致列车在“避免切换区域”从实际情况更好的 AP1 切换到实际情况较差的 AP2，而后当信号再度恢复正常时，再次触发切换条件，切换回 AP1，形成乒乓切换造成不必要的丢包和通信延时。有些车载 TRU 的切换算法中为避免上述情况导致的乒乓切换，将待连接 AP 的 RSSI 值也加入判断，判断待连接 AP 的 RSSI

高于某一阈值时或者判断连接 AP 与待连接 AP 之间 RSSI 的差值高于某一阈值时触发切换, 这样的改进在一定程度上会降低乒乓切换发生的概率, 但是由于信号的波动乒乓切换依然会时不时地发生。

本文考虑到地铁环境中无线信号会发生衰落或叠加这样的情况导致信号强度随机性强这一特点, 针对依据连接 AP 和待连接 AP 随机的实时信号强度指示 RSSI 值作为切换判决会造成大量乒乓切换这一弊端, 采用线性回归预测的方法, 根据连接 AP 和待连接 AP 的历史信号 RSSI 值和列车所在位置, 在列车进入“理想切换区域”时进行信号强度的曲线拟合, 根据拟合曲线预测出下一时刻连接 AP 和待连接 AP 的信号 RSSI 值进行切换判决触发切换, 以此杜绝了乒乓切换的发生, 具体方法如下:

- 1) 车载无线单元 TRU 与车载 ATP 保持 200 ms 周期的通信, 获取列车实时的位置;
- 2) 车载无线单元 TRU 在通过主动扫描的方式, 每 200 ms 获取连接 AP 和待连接 AP 的 RSSI 值;
- 3) 记录每个位置对应的连接 AP 和待连接 AP 的接收信号强度指示 RSSI 值, 组成预测的训练集合序列连接 AP 位置与 RSSI 值序列 $(Pos_i, Rssi_i) = \{(Pos_1, Rssi_1), (Pos_2, Rssi_2), \dots, (Pos_k, Rssi_k)\}$ 和待连接 AP 位置与 RSSI 值序列 $(Pos_j, Rssi_j) = \{(Pos_1, Rssi_1), (Pos_2, Rssi_2), \dots, (Pos_k, Rssi_k)\}$;
- 4) 当列车进入“理想切换区域”时, 根据记录的位置与接收信号强度序列, 用最小二乘法对连接 AP 和待连接 AP 进行一次多项式拟合, 根据拟合曲线计算出下一周期列车的接收到连接 AP 和待连接 AP 的 RSSI 值;
- 5) 如果列车接收到的待连接 AP 的 RSSI 值与连接 AP 的 RSSI 值差值大于 10 dB, 则触发切换, 进入切换流程。否则继续补充记录序列, 并在下一个周期继续判断预测; 算法流程如图 5 所示。

3 仿真测试分析

仿真平台采用与广州某线路现场布置相同的 AC-AP 的结构, 仿真平台采用真实线路无线覆盖数据作为输入, 通过可编程衰减器使 TRU 接收连接 AP 和待连接 AP 的信号强度与现场相同, 分别应用传统算法和本文提出基于线性回归预测的切换算法进行模拟仿真, 仿真参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数表

| 参数类型 | 参数值 |
|-------|---------------|
| AP 间距 | 400 m |
| 发射功率 | 23 dBm |
| 工作频段 | 2.4 G |
| 系统带宽 | 20 MHz |
| 加密方式 | WPA2 |
| 切换触发 | -70 dB |
| 列车速度 | 30/60/90 km/h |

本文使用真实线路场强覆盖数据分别模拟了列车以 30km/h、60km/h、90km/h 的低中高速在传统算法和线性回归预测算法下的切换场景, 每种情况做 100 次仿真, 仿真结果如表 4 所示。

表 4 仿真结果表

| 切换次数 | 传统切换算法 | | | 基于线性回归预测的切换算法 | | |
|--------|---------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | 30 km/h | 60 km/h | 90 km/h | 30 km/h | 60 km/h | 90 km/h |
| 总切换次数 | 116 | 108 | 102 | 100 | 100 | 100 |
| 避免切换区域 | 19 | 11 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| 理想切换区域 | 97 | 96 | 94 | 100 | 100 | 99 |
| 必须切换区域 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 1 |
| 乒乓切换 | 8 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |

通过仿真结果可以看出传统的切换算法对于切换触发的判决有很好的实时性, 能够及时地发起切换, 基本能够避免在“必须切换区域”内才执行切换。但是对于信号强度临时突变应对较差, 当车载 TRU 连接 AP 的信号强度突然变弱时就会触发切换, 导致在“避免切换区域”发生了切换, 而在这“避免切换区域”发生的切换则进而导致了乒乓切换。同时通过仿真可以得知车速对于传统切换算法的切换判决有着较为明显的影响, 当车速较慢时, 车载 TRU 在两个 AP 信号强度相差无几的区域采样点较多, 此时车载 TRU 更容易发生乒乓切换; 随着车速的提高, 车载 TRU 在两个 AP 信号强度相差无几的区域采样点减少, 在一定程度上规避了乒乓切换的发生。

基于线性回归预测的切换算法由于将两个 AP 的信号强度做了一次多项式拟合, 因此两个拟合曲线只可能存在一个交点, 之后两个 AP 信号强度的预测值之间的差距将

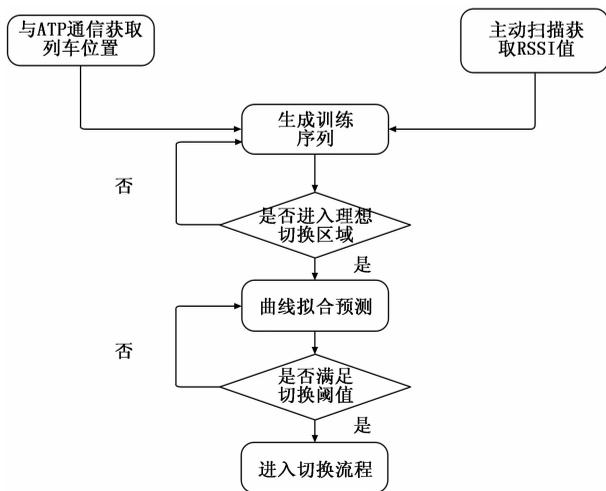


图 5 基于线性预测的切换算法流程图

会越来越大。这样在车载 TRU 根据连接 AP 和待连接 AP 信号强度预测值进行切换判决时, 最多只会发生一次切换, 杜绝了乒乓切换的可能。同时, 根据仿真结果可以看出基于线性回归预测的切换算法在适应不同车速的稳定性上具有很好的表现。仅仅是在列车高速行驶时, 由于采样点较少, 曲线拟合的相关系数有所下降, 导致了一次切换时机较晚。

综上所述, 本文提出的基于线性回归预测的切换算法在稳定性和抑制乒乓切换方面较之传统算法有着很大的提升。

4 结束语

本文提出了基于线性回归预测的 WLAN 切换算法, 将回归预测引用到切换判决中来, 利用多项式拟合的方式将漏泄同轴电缆覆盖的地铁环境下多变的信号强度进行线性回归, 并根据线性的预测值进行切换判决。提高了稳定性和抑制乒乓切换的能力。本文将广州地铁某线路的信号场强数据作为输入进行仿真, 结果表明基于线性回归预测的 WLAN 切换算法较之传统算法有着明显的优越性, 采用基于线性回归预测的 WLAN 切换算法能够提升 CBTC 中车体

(上接第 144 页)

5 结束语

针对三维运动无人机在动态环境下进行局部规划收敛时间长, 路径节点扩展代价大, 易陷入局部最优问题, 提出了一种基于全局与局部相结合的动态三维 A* 寻路算法, 对评价函数的权值系数动态分配, 路径生成策略进行改进, 有效提高了算法效率, 实现了无人机在三维动态环境中的路径规划。

研究结果表明, 提出的基于全局与局部相结合的动态三维 A* 寻路算法能够有效减少路径规划时间, 缩短路径规划距离, 同时能够避免由于地图复杂而带来的陷入局部最优问题, 在避开静态和动态障碍物前提下, 能快速到达目标点, 完成路径规划。

参考文献:

- [1] 孙 炜, 吕云峰, 唐宏伟, 等. 基于一种改进 A* 算法的机器人路径规划 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2017, 44 (4): 94-101.
- [2] Tavares P, Lima J, Costa P, et al. Multiple manipulators path planning using double A* [J]. The Industrial Robot, 2016, 43 (6): 119-130.
- [3] Ammar A, Bennaceur H, Chaari I, et al. Relaxed Dijkstra and A* with linear complexity for robot path planning problems in large-scale grid environments [J]. Soft Computing, 2016, 20 (10): 4149-4171.
- [4] Xie L, Xue S F, Zhang J F, et al. A path planning approach based on multi-direction A* algorithm for ships navigating

无线通信系统的可用性。

参考文献:

- [1] 何林娜, 应子雯. 城轨 CBTC 系统中数据通信子系统的研究 [J]. 通信技术, 2009, 42 (10): 139-141.
- [2] 张 峰, 向新, 杨宝强. 基于 IEEE 802. 11 DCF 的优化竞争窗口算法 [J]. 电子技术应用, 2011, 37 (7): 111-114.
- [3] 张晓军. 基于混合 Markov 预测模型的 WLAN 越区切换机制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2006: 19-21.
- [4] 石 亮. CBTC 系统无线局域网越区切换性能仿真分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 6-10.
- [5] 李建玉, 李 健, 吕晓军. 车地通信大尺度衰落模型的建立及其应用 [A]. 中国智能交通年会 [C]. 2015.
- [6] 蒋秋红. 移动通信信道建模与仿真的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [7] 杨大成. 移动传播环境 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [8] 王惠文, 孟 洁. 多元线性回归的预测建模方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33 (4): 500-504.
- [9] 丁克良, 沈云中, 欧吉坤. 整体最小二乘法直线拟合 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010, 29 (1): 44-47.
- [10] within wind farm waters [J]. Ocean Engineering, 2019, 184 (C): 657-664.
- [11] Duchoň F, Babinec A, Kajan M, et al. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot [J]. Procedia Engineering, 2014, 96: 59-69.
- [12] Guruji A K, Agarwal H, Parsediya D K. Time-efficient A* algorithm for robot path planning [J]. Procedia Technology, 2016, 23: 144-149.
- [13] Cui S G, Wang H, Yang L. A simulation study of A*-star algorithm for robot path planning [A]. 16th International Conference on Mechatronics Technology [C]. 2012: 506-510.
- [14] 陈 豪, 李 勇, 罗靖迪. 基于改进 A* 算法优化的移动机器人路径规划研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2018 (12): 1-4.
- [15] 王殿君. 基于改进 A* 算法的室内移动机器人路径规划 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2012, 52 (8): 1085-1089.
- [16] 何雨枫, 曾庆化, 王云舒, 等. 室内微型飞行器实时路径规划算法研究 [J]. 电子测量技术, 2014, 37 (2): 23-27.
- [17] 赵 峰, 杨春曦, 陈 飞, 等. 改进蚁群算法的局部信息动态路径规划 [J]. 计算机测量与控制 2017, 25 (8): 130-134.
- [18] Guruji A K, Agarwal H, Parsediya D K. Time-efficient A* Algorithm for Robot Path Planning [J]. Procedia Technology, 2016, 23: 144-149.
- [19] Dai X L, Long S, Zhang Z W, et al. Mobile robot path planning based on ant colony algorithm with A* heuristic method [J]. Frontiers in Neurorobotics, 2019, 13: 15.
- [20] 刘 源, 王海泉. 基于理论最短距离变权重 A* 算法的路径规划 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (4): 175-178.