

基于 GIS 和 OTDR 的光纤智能监控系统研究

张娜

(西昌学院 汽车与工程学院, 四川 西昌 615013)

摘要: 为了提高光纤故障处置效率, 设计了一种基于 GIS 和 OTDR 的光纤智能监控系统; 介绍了系统的总体技术架构和软件功能框架; 采用小波分析技术, 提取 OTDR 曲线中的事件信息, 找出故障点位置; 将故障点的光纤长度数据转换为经纬度数据, 并结合光缆拓扑结构和 GIS 系统, 将故障点在电子地图上实时显示并告警; 经过系统测试, 结果表明: 系统的 OTDR 损耗分辨率达到 0.01 dB, 动态范围为 34~45 dB, 监测响应时间为 5 ms; 故障定位误差小于 10 m, 告警时间为 2 ms, 完全满足光缆应急处置要求。

关键词: 光纤智能监测; OTDR 曲线; 故障定位; GIS

Research on Fiber Intelligence Monitor System Based on GIS and OTDR

Zhang Na

(School of Automotive and Electronic Engineering, Xichang College, Xichang 615013, China)

Abstract: In order to improve the disposition efficiency of fiber fault, a fiber intelligence monitor system based on GIS and OTDR is designed. The total technology framework and software function structure are introduced. The incident information in OTDR curve is distilled by adopting wavelet analysis technology, and the position of fault point is found out. Then the fiber length data of fault point is transformed into longitude and latitude data, and by combining the fiber topology structure and GIS system, the fault point is duly displayed on the electronic map and an alarm is throw out. Through the system testing, the results demonstrate that the wastage resolving ratio of OTDR is 0.01 dB, the dynamic scope is 34~45 dB, the measure response time is 5 ms, the orientation error of fault is less than 10 meter, and the alarm time is 2 ms, which fully meets the demand of fiber emergency treatment.

Keywords: fiber intelligence monitor; OTDR curve; fault orientation; GIS (geography information system)

0 引言

航天发射场的光纤网络作为数据承载层, 在整个航天发射任务的数据、语音、图像的传输过程中发挥着重要的作用。随着发射场各业务系统的发展, 场区铺设的光纤线路也越来越多, 管理难度也越来越大, 一旦有光纤线路发生故障而不能及时排除, 这将给航天发射任务带来不可估量的损失。目前, 发射场光纤维护和故障排查采用专业人员到现场手持时光域反射仪 OTDR^[1] (optical time domain reflecting-meter, OTDR) 进行离线测量和故障定位, 这种方式存在故障排查时间长、故障定位不准、易人为误判等缺点, 不能及时、快速地恢复光纤网络的正常通信。为了提高航天发射场光纤线路的维护效率, 设计了一种基于 GIS 和 OTDR 的光纤智能监测系统, 通过 OTDR 监测设备实现对发射场光纤线路的实时智能监测, 及时发现和定位光纤线路的故障点, 并发出报警, 然后通过地理信息系统 GIS^[2] (geographic information system, GIS) 在地图上将故障点进行实时定位显示, 方便人员快速查找并修复故障。同时, 系统还可对光纤性能劣化情况进行分析, 对性能的劣化严重的

光纤线路进行预警, 为光纤网络的预防性维修提供参考, 从而大大提高了发射场光纤线路维护的效率, 增强了故障应急处置的能力。

1 系统设计

1.1 系统硬件总体架构

系统硬件总体架构如图 1 所示, 主要由一个监测中心、多个远程监测站、试验任务 IP 网、光配线架等组成。其中, 监测中心包括光纤测试数据库服务器、地理信息 GIS 服务器、便携式终端和网管客户端等, 负责向对各个远程监测站下达指令, 接收和处理各监测站上报的光纤测试数据, 完成故障点的分析和定位, 并将故障点的地理位置在地图上实时显示; 通过分析光纤测试的历史数据, 完成光纤劣化性能分析, 对性能低于门限条件的光纤进行预警。各远程监测站由光功率测试模块、OTDR 数据采集模块、核心控制模块、多路选择光开关、电源模块和自动保护模块等组成, 按照监测中心的指令, 完成被测光纤的光功率测试、光纤性能测试和故障光纤的监测, 并将光纤测试结果上报监测中心进行处理、定位和显示。

1.2 系统软件功能框架

系统软件功能如图 2 所示。在监测中心的网管客户端部署监测软件, 主要完成光纤的 OTDR 曲线测试、故障定位分析、光纤劣化分析、系统管理和告警管理等功能。其中, OTDR 曲线测试模块可实现对发射场光纤的点名测试和轮询测

收稿日期:2015-08-29; 修回日期:2015-09-16。

基金项目:四川省教育厅青年基金项目(11ZB115)。

作者简介:张娜(1974-),女,副教授,硕士,主要从事光通信技术与网络构建等方向的研究。

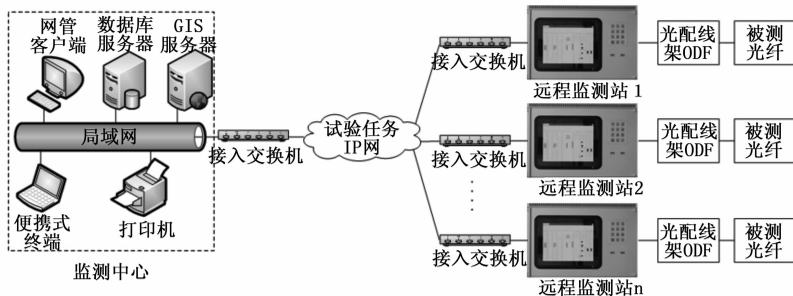


图 1 系统硬件总体架构

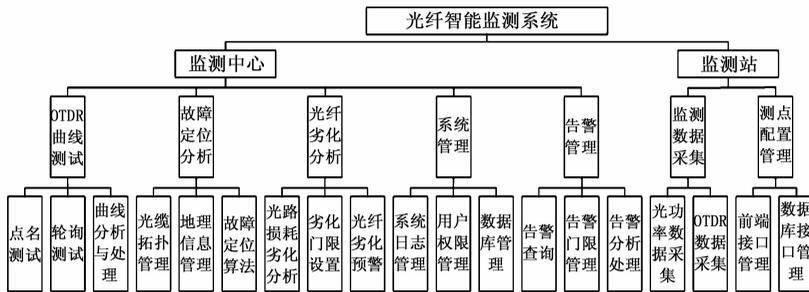


图 2 系统软件功能

试，并对测试曲线进行分析和处理，找出光纤的故障点；故障定位分析模块采用故障定位算法，结合光缆拓扑结构和地理信息系统，将光纤故障点进行直观显示，并进行报警；光纤劣化分析模块对光纤整个光路的光功率损耗、平均损耗等参数进行分析，结合数据库中测得的光功率历史数据，对光纤的性能劣化趋势进行预测，并结合系统设置的性能劣化门限，及时发出告警，以便对光纤进行预防性维修；系统管理模块对不同的用户分配信息查询和管理权限，实现系统日志、数据库等的查询和维护管理；告警管理模块提供光功率告警、设备故障告警、OTDR 曲线告警、故障点告警的显示、查询和删除功能，并将告警信息以声音、短信和邮件等形式发送给用户，确保工作人员在第一时间处理这些告警信息。

在各个监测站部署的监测软件主要完成监测数据采集管理和测点的配置管理等功能。监测数据采集模块实时采集被测光纤的光功率和 OTDR 曲线数据，并将数据传回监测中心进行分析和处理；测点配置管理模块完成对监测站设备的前端接口参数的配置管理，并配好监测设备与监测中心数据库的接口参数，确保监测数据在数据库存储的可靠性。

2 关键模块设计与实现

监测站按照监测中心的指令，对发射场光纤线路进行点名测试或轮询测试，当被测测试光纤的光功率低于系统设定的阈值时，监测站的主控单元立即通过光切换开关，将该光纤切换到 OTDR 模块，并启动 OTDR 模块对该路光纤进行测试，获取该路光纤的 OTDR 曲线数据，上传到监控中心进行分析和处理，找出故障点的光纤长度，判断故障的类型和告警级别。然后，调用地理信息系统，结合光缆拓扑结构，将 OTDR 测得的故障点在光纤中的长度数据转化为地理经纬度数据，在光缆拓扑图上进行标识和报警，并以短信、电子邮件的形式，将故

障点的地理位置信息发送给光纤维护人员。故障排除后，维修人员上报相关维修报表，系统自动更新光纤数据库中的信息，以方便人员查询。

2.1 OTDR 曲线测试

2.1.1 OTDR 曲线的获取

在对被测光纤监测时，监测站的 OTDR 板产生波长为 1 625nm 的光脉冲，经耦合后发送到被测光纤，由于光纤材料中的不均匀粒子引起的瑞利散射^[3]以及在连接处、断裂处或者尾部引起的菲涅尔反射^[4]将该光脉冲的部分信号反射回 OTDR 板的接收端，经过光/电转换、放大、去噪等处理后，得到被测光纤的 OTDR 曲线。

设 OTDR 板入射被测光纤的 1 625nm 光脉冲的功率为 P_0 ，光纤传输损耗系数为 β ，光纤反射系数为 δ ，则光纤在距离监测站 L 处的反射光功率 P_f 为：

$$P_f = \delta P_0 e^{-\beta L} \quad (1)$$

光纤长度 L 处的反射光返回到 OTDR 板接收端时的反射功率 P_{rf} 为：

$$P_{rf} = P_f e^{-\beta L} = \delta P_0 e^{-2\beta L} \quad (2)$$

OTDR 板接收到反射功率 P_{rf} 相对于入射光功率 P_0 的相对功率 P'_{OTDR} 为：

$$P'_{OTDR} = \frac{P_{rf}}{P_0} = \delta e^{-2\beta L} \quad (3)$$

将 (3) 式转换为分贝形式，用 P_{OTDR} 表示为：

$$P_{OTDR} = 10 \lg P'_{OTDR} = 10 \lg \delta - \frac{20\beta}{\ln 10} L \quad (4)$$

从公式 (4) 可以看出，由于光纤反射系数 δ 是常数，OTDR 板接收到的反射光相对功率与光纤长度 L 呈线性关系。在实际测量中，设光纤的折射率为 γ ，OTDR 板从发射光脉冲到接收到反射光功率所用的时间为 t ，光在真空中的传播速度为 c ，则光纤长度 L 可表示为：

$$L = \frac{1}{2\gamma} c \times t \quad (5)$$

从公式 (4) 和 (5) 可以看出，OTDR 板以一定的时间间隔对返回的反射光功率进行采样，就可以得到反射光相对功率与光纤长度的线性关系曲线，即 OTDR 测试曲线。

2.1.2 OTDR 信号的处理

在实际的光纤工作中，由于光纤接头的散射衰减、光纤断裂处和光纤尾部产生的菲涅尔反射的影响，造成 OTDR 测试曲线不是标准的线性直线，会有局部突变的现象，这些突变点在 OTDR 曲线中被称为事件。在 OTDR 曲线中表征的事件有：盲区、非反射事件、反射事件、光纤末端等^[5]。由于这些事件在 OTDR 曲线中具有高频特性，且包含了噪声，因此，为了更好地提取出 OTDR 曲线中包含的事件信息，首先必须对 OTDR 曲线进行预处理，滤除 OTDR 曲线中的低频部分；其次，采用小波变换^[6]的方法，将事件信息的高频部分与噪声的高频部分分离，准确提取出事件发生点。

对 OTDR 信号进行小波变换的过程分为小波分解、小波系数估计和信号重构等 3 个步骤。

1) 小波分解：用 $SN(i)$ 表示获得带噪声的 OTDR 信号，

$N(i)$ 表示方差为 σ^2 的高斯白噪声, $S_{OTDR}(i)$ 为真实的 OTDR 信号, 其中, i 表示被测光纤上等距的采样点, $i = 1, 2, \dots, n$, 则 $SN(i)$ 可用下面的公式表示:

$$SN(i) = S_{OTDR}(i) + N(i) \quad (6)$$

将 $SN(i)$ 以小波基函数 $\psi(t)$ 进行离散小波变换, 得到小波系数 $w(j, k)$ 为:

$$w(j, k) = \nabla[SN(i)] = 2^{\frac{j-k}{2}} \sum_{i=1}^n SN(i) \psi(2^{-j} - k) \quad (7)$$

式中, $\nabla(\cdot)$ 为离散小波变换算子, $w(j, k)$ 表示在尺度 j 上的第 k 个小波系数。在工程应用时, 小波系数 $w(j, k)$ 采用如下的递推方法实现:

$$S(j+1, k) = S(j, k) * h(j, k) \quad (8)$$

$$w(j+1, k) = S(j, k) * g(j, k) \quad (9)$$

式中, $h(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 分别表示尺度函数和小波函数对应的低通滤波器和高通滤波器的阶跃响应函数, $S(j, k)$ 为尺度系数, 其中, $S(0, k)$ 表示原始 OTDR 信号。

2) 小波系数估计: 采用小波阈值去噪法进行 OTDR 事件的提取。若小波系数 $w(j, k)$ 小于规定的阈值时, 认为这部分信号是噪声, 则将其弃掉; 若小波系数 $w(j, k)$ 大于规定的阈值时, 认为这部分信号是有用信号, 则将其保留。因此, 在进行小波系数估计时, 阈值的计算显得非常重要。按照 Donoho 等人给出的阈值计算方法^[7], 可得尺度 j 上的阈值 T_j 为:

$$T_j = 2\sqrt{3}\sigma_j \quad (10)$$

式中, σ_j 为尺度 j 上的噪声标准方差, 通常 σ_j 通过尺度 j 上的小波系数 $w(j, k)$ 取中值得到, σ_j 的计算方法为:

$$\sigma_j = \frac{\text{middle}[w(j, k)]}{0.6745} \quad (11)$$

其中: middle 表示对尺度 j 上的 k 个小波系数取中值。

求得尺度 j 上的阈值 T_j 后, 按照下面的公式对小波系数进行估计, 得到小波系数估计值 $\tilde{w}(j, k)$ 为:

$$\tilde{w}(j, k) = \begin{cases} \text{sgn}[w(j, k)] \times [|w(j, k)| - T_j], & |w(j, k)| > T_j \\ 0, & |w(j, k)| \leq T_j \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\text{sgn}(\cdot)$ 为取符号函数, 保持尺度 j 上小波系数的符号保持不变。

3) 信号重构: 设重构低通滤波器和高通滤波器的阶跃响应函数分别为 $\tilde{h}(\cdot)$ 和 $\tilde{g}(\cdot)$, 则重构后得到 OTDR 信号的估计值 $\tilde{S}_{OTDR}(j, k)$ 为:

$$\tilde{S}_{OTDR}(j, k) = S(j, k) * \tilde{h}(j, k) + \tilde{w}(j, k) * \tilde{g}(j, k) \quad (13)$$

通过小波变换, 有效抑制了 OTDR 信号中的噪声, 并可在 $\tilde{S}_{OTDR}(j, k)$ 信号中有效地提取到 OTDR 信号中的各类事件特征, 得到各类事件特征点距离 OTDR 测试点的光纤长度, 如图 3 所示。

2.2 故障定位分析

经过对得到的各类事件特征点的筛查, 找到光纤故障点和故障点距离 OTDR 测试点的光纤长度, 将故障点的光纤长度数据转换为故障点的经纬度信息, 并结合光缆拓扑结构和 GIS 地理信息系统, 将故障点在电子地图上实时显示并告警。故障定位的业务流程如图 4 所示。

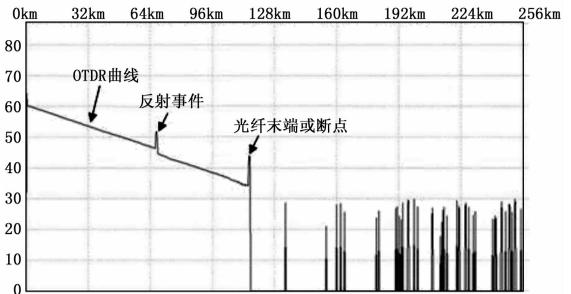


图 3 OTDR 曲线测得的各类事件

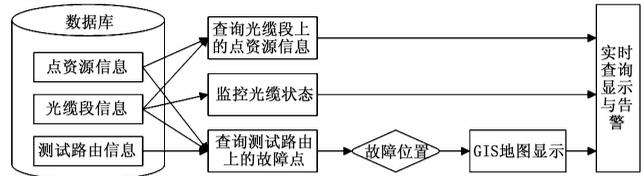


图 4 故障定位的业务流程

2.2.1 数据库的设计

在光缆测试中, 一条测试路由包括部站 ID、光缆箱 ID、槽位号、通道号等, 这些信息一旦确定, 则光缆的路由就唯一确定。同时, 在一条光缆路由中, 包含一段或者多段光缆; 每段光缆由人井、电杆、手控、接头盒、标石等若干个资源组成, 通过 GPS 技术^[8], 采集每个点资源的地理经纬度信息, 并保存到数据库。因此, 建立每条光缆的点资源信息数据库, 通过读取这些点资源的地理经纬度信息就能表示出每条光缆及走向; 建立光缆段信息数据库, 通过读取每段编号和每段光缆的点资源信息, 就能区分出不同的光缆; 建立路由信息数据库, 通过读取部站 ID、光缆箱 ID、槽位号、通道号、光缆段信息, 就能在 GIS 地图上显示出所有路由信息和各条光缆的位置及走向。

在数据库设计中用到的点资源属性表如表 1 所示。

表 1 点资源属性表

字段名称	数据类型	字段长度	意义
mark_id	int	4	点资源的 ID 号, 唯一标识一个点资源
mark_name	varchar	40	点资源名称
mark_type	int	4	点资源类型
belongToSeg	varchar	60	该点资源所属光缆段
lati	float	8	该点资源的经度
longi	float	8	该点资源的纬度
sno	int	4	该点资源在所属光缆段中的相对位置
distance	float	8	该点资源距离测试端的距离
preleng	float	8	在该点资源处预留的光缆长度

2.2.2 故障定位算法

由于光缆在敷设过程中, 采用熔接方法进行连接。在 OTDR 测试曲线中, 熔接点会以一个信号尖峰的形式表现为反射

事件。因此，这里提出一个基于熔接点的故障定位算法，具体定位过程如下：

第一步，通过 OTDR 曲线测试，得到故障点距离测试端的光纤长度 d_f ，以及每个机房距离测试端的距离。

第二步，将故障点定位到两个机房之间的光缆段上。设机房 A 距离测试端的距离为 d_A ，机房 B 距离测试端的距离为 d_B ，且 $d_A < d_f < d_B$ ，则可判定故障点在机房 A 和机房 B 之间的光缆段上。

第三步，将故障点定位到两个光缆接头盒之间的光缆上。调用该光缆段的数据库信息，找到该光缆段中所有的接头盒距离测试端的距离。通过比较，将故障点定位到两个接头盒之间，进一步缩小故障点的计算区间。

第四步，故障点的精确定位。设上一步将故障点定位到接头盒 A 与 B 之间，接头盒 A 的纬度为 x_A 、经度为 y_A ，距离测试端光缆的长度为 d_{jA} ，预留光缆的长度为 L_{pA} ；接头盒 B 的纬度为 x_B 、经度为 y_B ，距离测试端光缆的长度为 d_{jB} ，预留光缆的长度为 L_{pB} 。

首先，计算接头盒 A 与 B 的纬度差 Δx 、经度差 Δy 分别为：

$$\Delta x = (x_A - x_B) \times \frac{\pi}{180} \tag{14}$$

$$\Delta y = (y_A - y_B) \times \frac{\pi}{180} \tag{15}$$

其次，计算两个接头盒之间的空间距离 S_{AB} 和光缆长度 L_{AB} ：

$$S_{AB} = 2R \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta x}{2}\right) + \cos x_A \times \cos x_B \times \sin^2\left(\frac{\Delta y}{2}\right)} \tag{16}$$

式中， R 为地球半径，取值为 6378.137 km。

$$L_{AB} = S_{AB} + L_{pA} + L_{pB} \tag{17}$$

最后，按比例计算出故障点距离接头盒 A 的光缆长度 L_f ：

$$L_f = \frac{d_f - d_{jA}}{d_{jB} - d_{jA}} \times L_{AB} \tag{20}$$

分 3 种情况进行故障点精确定位：

1) 当 $L_f < L_{pA}$ 时，则故障点发生在接头盒 A 处，接头盒 A 的经纬度坐标即为故障点的经纬度坐标。

2) 当 $L_{pA} < L_f < L_{pA} + S_{AB}$ 时，则故障点介于接头盒 A 与 B 之间，故障点的地理纬度 x_f 和经度 y_f 分别为：

$$x_f = x_A + \frac{L_f + L_{pA}}{L_A} \times (x_B - x_A) \tag{21}$$

$$y_f = y_A + \frac{L_f + L_{pA}}{L_A} \times (y_B - y_A) \tag{22}$$

3) 当 $L_f > L_{pA} + S_{AB}$ 时，则故障点发生在接头盒 B 处，接头盒 B 的经纬度坐标即为故障点的经纬度坐标。

3 系统集成与运行

系统通过 GIS 的 Maps API 接口调用地图信息，结合资源数据库中的光缆拓扑结构、路由信息和点资源信息，可以在地图上详细显示光缆的分布与走向。选用的 OTDR 工作波长为 1 625 nm，光脉冲宽度为 10 ns，事件盲区小于 5 m。以发射场

光缆承载网为基础，经过系统测试，系统的 OTDR 损耗分辨率达到 0.01 dB，动态范围为 34~45 dB；光缆的光功率探测范围为 -65~0 dBm，监测响应时间为 5 ms；故障定位误差小于 10 m，告警时间为 2 ms，完全满足发射场光缆应急处置要求。系统运行界面如图 5 所示。

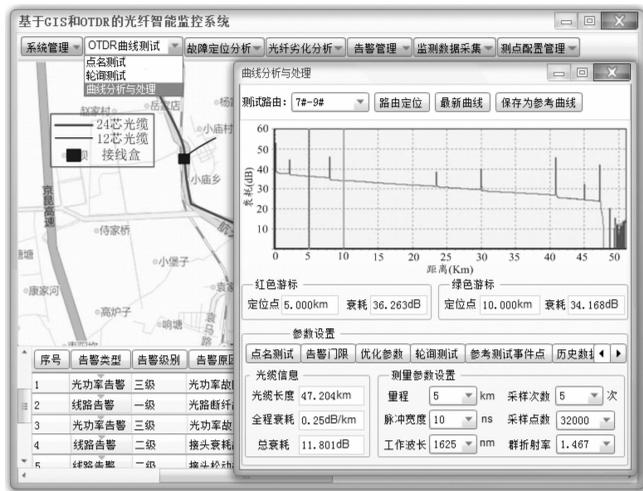


图 5 系统运行界面

4 结束语

本文将 GIS 与 OTDR 技术相结合，构建了一种基于 GIS 和 OTDR 的光纤智能监测系统，设计了系统的硬件架构和软件框架，对 OTDR 曲线测试、故障定位分析等关键模块的实现技术进行了详细介绍。最后，通过系统集成和测试，系统能够实现光纤故障的快速定位，并对故障位置和告警信息提供实时查询和显示服务，大大提高了发射场光纤通信的保障效率。在后续的研究中，将把小波分析与神经网络技术相结合，利用神经网络技术动态计算小波去噪、滤波的最佳阈值和尺度，进一步提高故障定位的精度。

参考文献：

- [1] 黎 华. 基于 OTDR 和光功率测试的光纤故障监测应用方法[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (5): 1357-1359.
- [2] 杨雪春, 刘东兰, 郑小贤. 基于 GIS 的森林采伐辅助决策系统研究 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30 (4): 217-222.
- [3] 陈 力, 杨富荣, 苏 铁, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的瑞利散射测速技术研究 [J]. 光子学报, 2015, 44 (1): 1139-1143.
- [4] 龙润泽, 张 鹏, 黄榜才, 等. 光纤耦合器回波损耗研究与测试分析 [J]. 光通信技术, 2015, 39 (3): 38-40.
- [5] 易水寒, 喻杰奎, 罗 清. OTDR 非反射事件自适应检测算法设计与研究 [J]. 光通信技术, 2014, 38 (9): 59-61.
- [6] 李金伦, 崔少辉, 汪 明. 基于改进中值滤波和提升小波变换的阈值去噪方法研究 [J]. 应用光学, 2014, 35 (5): 817-822.
- [7] 姜 磊. 基于自适应小波阈值收缩算法的冲击去噪 [J]. 测控技术, 2015, 34 (1): 45-47.
- [8] 王艳丽, 雷继兆, 赵 笛. 一种 GPS 载波相位差分相对定位算法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (7): 2447-2449.