DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201601111

城市道路 GNSS 脆弱性评估技术

梅 浩,战兴群,李 源,刘宝玉

(上海交通大学 航空航天学院,上海 200240)

摘 要: 全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)在交通领域应用广泛,其服务性能的可靠性受到交通用户日益增长的关注.但是,由于系统故障、电离层闪烁、多路径效应、电磁干扰等脆弱性因素的存在,GNSS 存在固有脆弱性,它影响 GNSS 的服务性能,甚至给用户带来巨大风险.当 GNSS 服务性能受到脆弱性因素干扰时,评估 GNSS 脆弱性,并且为用户提供及时的脆弱性告警,可以有效降低脆弱性因素对用户服务性能的影响.为评估不同城市道路环境下的 GNSS 脆弱性,在现有 GNSS 脆弱性评估算法的基础上,针对城市道路环境的特点,提出了相应的 GNSS 交通应用脆弱性评估指标;并采用基于信息熵权的数据融合算法,计算导航场景距正负理想场景的距离,实现了多个导航场景的脆弱性评估.路测实验表明,隧道、城市峡谷、林荫道和开阔路段的脆弱性依次降低,该方法所选取的脆弱性评估指标和采用的脆弱性评估算法可满足城市道路 GNSS 脆弱性评估需求.

关键词: GNSS;城市道路;脆弱性;评估;熵权;交通应用

中图分类号: TN967.1 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2017)04-0101-07

A GNSS vulnerability assessment technique of urban roads

MEI Hao, ZHAN Xingqun, LI Yuan, LIU Baoyu

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Global Navigation Satellite System (GNSS) is now widely used in transportation, and the users have shown growing concerns with the service reliability of GNSS. However, due to the factors such as ionospheric scintillation, multi-path effect, and electromagnetic interference, GNSS has inherent vulnerability, which may damage the quality of GNSS service, and even cause enormous risks. Assessing GNSS vulnerability and releasing alarms to users when vulnerability factors happen are the valid way to consolidate GNSS utilization. To assess GNSS vulnerability under urban roads, this paper proposes three proper vulnerability assessment indexes and conducts vulnerability assessment by the utilization of entropy weight method. Road experiments showed that tunnel, urban canyon, avenue and open road are decreasingly vulnerable, and the algorithm proposed is capable of assessing GNSS vulnerability of urban roads.

Keywords: GNSS; urban roads; vulnerability; assessment; entropy weight; transportation application

全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)是一个能够连续、全天候为用户提供导航、定位以及授时服务的无线电导航系统.近年来,GNSS 发展迅速,在航海、测绘、交通、机械控制等领域得到了广泛应用.但是,卫星信号到达地面时强度很弱,只有大约-160 dBW,并且存在着诸如电离层闪烁、多路径效应、电磁干扰、卫星数量不足等因素可能使 GNSS 功能失效,这些因素称为脆弱性因素.

脆弱性这一概念刚被提起时,文献[1]对交通领域的 GPS 脆弱性进行了初步评估.随后,各国学者对 GNSS 脆弱性问题进行了研究.文献[2-3]分析了电离层闪烁对 GPS 信号的影响;文献[4-5]用自适应滤波的手段实现了对连续 GPS 测量信号的多径缓解;文献[6-7]提出了依据信号强度、噪声强度和载噪比进行抗欺骗干扰技术的方法;文献[8]进行了针对精密单点定位的钟跳修复研究等等.这些研究以定性研究或单项技术研究为主,定量的 GNSS 整体脆弱性研究刚刚起步.在有限的成果中,尚未出现适用于评价城市道路 GNSS 脆弱性的评估方法.例如,文献[9]设计的基于 D-S 证据理论的脆弱性评估方法.通过大量长期观测计算载噪比理论值,通过 GNSS 基站的自身精确定位计算几何精度因子理论值.但对于城市普通道路环境,难以满足上述要求,所以该方法难以评估城市道路 GNSS 脆弱性.文献[10]设计的基于用户端适用性的 GNSS 脆弱性评估方法.该方法以用户为核心,通过用户提供的“适

收稿日期: 2016-01-29
基金项目: 面向中国中东部地区的相位增强运行服务系统研制与应用示范(2014AA123103)
作者简介: 梅 浩(1990—),男,硕士研究生;
战兴群(1970—),男,教授,博士生导师
通信作者: 战兴群,xqzhan@sjtu.edu.cn

用度”与“容忍度”两个指标确定评估指标的应用适用性,然后融合各个评估指标的应用适用性得到适用度.但是,不同交通用户提供的“适用度”与“容忍度”不尽相同且难以得到.

本文针对不同城市道路环境的特点,选取了 3 个 GNSS 脆弱性评价参数,提出了基于信息熵权与正、负理想方案“距离”的脆弱性评估方法.利用数据融合算法,对不同城市道路环境完成了 GNSS 脆弱性性能排序.

1 城市道路 GNSS 脆弱性及脆弱性因素

1.1 GNSS 脆弱性与系统的关系[11]

GNSS 脆弱性与系统的关系体现在:1)脆弱性是 GNSS 的固有属性;2)脆弱性含义,为系统受到威胁的可能性;3)脆弱性表现,为系统受到威胁时,威胁对系统的影响程度.

1.2 GNSS 脆弱性与用户的关系[10]

GNSS 脆弱性与用户的关系体现在:1)GNSS 脆弱性的评估紧紧依赖于用户需求;2)对于不同用户,GNSS 脆弱性的评估指标可能不同;3)对于同一用户,GNSS 脆弱性的评估转变为对 GNSS 性能的评估.

对于城市道路上的交通用户,上述总结仍然适用.因此,对城市道路 GNSS 脆弱性的评估,可转变为对不同城市道路环境 GNSS 性能的评估.

对于城市道路环境,GNSS 脆弱性因素可分为 3 大类:系统相关脆弱性、建筑物遮挡相关脆弱性和电磁干扰相关脆弱性.

1)系统相关脆弱性.卫星数量不足时,例如当 GPS 卫星数量少于 24 颗时,用户服务范围将下降,用户服务可能中断;卫星时钟异常时,例如当卫星时钟出现钟漂或钟跳时,卫星时钟变得不可预测,最后钟差缓慢增长使系统功能失效.

电离层闪烁,是电离层对卫星信号造成延时中比较严重的部分.它指卫星信号穿过电离层时,由于电离层中的离子浓度分布不均匀,载波将出现幅值和相位的剧烈变化.当接收机接收到受到电离层闪烁影响的卫星信号时,载噪比将会出现剧烈抖动,信噪比也会下降;更为严重的情况下,甚至将会导致卫星失锁的情况发生.

2)建筑物遮挡相关脆弱性.城市中高楼林立,建筑物遮挡卫星信号,使接收机无法接收,对卫星信号形成物理上的阻塞.例如隧道中,卫星信号被完全频闭.

在城市峡谷等典型路段,多路径效应相当严重.即接收机接收到卫星信号时,所接收到的不仅是卫星信号,同时,还有经过多路径反射后再传播至接收机的卫星信号.当多路径效应相当严重时,伪距测量误差急剧增大,造成定位功能失效;此时,多路径效应从误差影响因素转变为脆弱性因素.

3)电磁干扰相关脆弱性.城市中电磁环境复杂,存在严重的电磁干扰.

非故意干扰,来源可以是甚高频通信电台、GNSS 频带带宽内的雷达系统,军用设备等.这些设备发出的电磁信号与卫星信号形成干涉,对卫星信号形成干扰;故意干扰,即人为干扰.阻塞干扰时,即利用 GNSS 卫星信号功率低的特点,制造功率远大于卫星信号的同频率干扰信号,使卫星信号淹没于干扰信号中.欺骗干扰时,制造虚假卫星信号,发射虚假卫星电文,进而使 GNSS 功能失效.

2 城市道路 GNSS 脆弱性评估系统

本文采取的评估方式是:车辆携带设备在多个目标导航场景进行实地信号采集,利用实地采集到的接收机数据,采用数据融合算法对数据进行处理,最后评价多个导航场景 GNSS 脆弱性.评估框架如图 1 所示,可分为:选取脆弱性评估指标,利用相对距离数据融合算法计算单个导航场景评估指标特征值,利用双基点数据融合算法计算多个导航场景脆弱性性能.

2.1 评估指标选取

城市道路条件复杂,存在着诸如隧道、城市峡谷、林荫道等典型道路,对卫星信号产生遮挡.城市峡谷中的多路径效应相当严重,同时存在着大量的电磁干扰,降低卫星信号质量甚至频闭卫星信号.考虑到城市环境的特殊性,同时结合 GNSS 的固有脆弱性,本文选取载噪比、几何精度因子、伪距测量误差作为脆弱性评估指标,如图 2 所示.

2.1.1 载噪比

本文采用实际 C/N_0(carrier power to noise density ratio)的计算方法.假设在累积间隔 γ 内,I、Q 支路的采样值被划分 M 个区间,利用 I/Q 支路的相干积分结果计算带宽为 M/γ 的宽带功率 P_W 和带宽为 $1/\gamma$ 的窄带功率 P_N 为:

$$P_W = \left(\sum_i^M (I_{Pi}^2 + Q_{Pi}^2)\right),$$

$$P_N = \left(\sum_i^M I_{Pi}\right)^2 + \left(\sum_i^M Q_{Pi}\right)^2.$$

通道内 I、Q 支路的相干积分 I_{Pi} 和 Q_{Pi} 表示为:

$$I_{Pi} = \sqrt{2(C/N_0)\,\gamma/M}\cos\varphi + w_{IPi},$$

$$Q_{Pi} = \sqrt{2(C/N_0)\,\gamma/M}\sin\varphi + w_{QPi}.$$

式中:w_{IP}、w_{QP} 分别为标准正态高斯噪声.为降低窄

带功率和宽带功率的比值中噪声的影响,对测量值做 n 个时刻的平均:

$$\bar{P}_{N/W}=\frac{1}{n}\sum_{r=1}^{n}\frac{P_{Nr}}{P_{Wr}}.$$

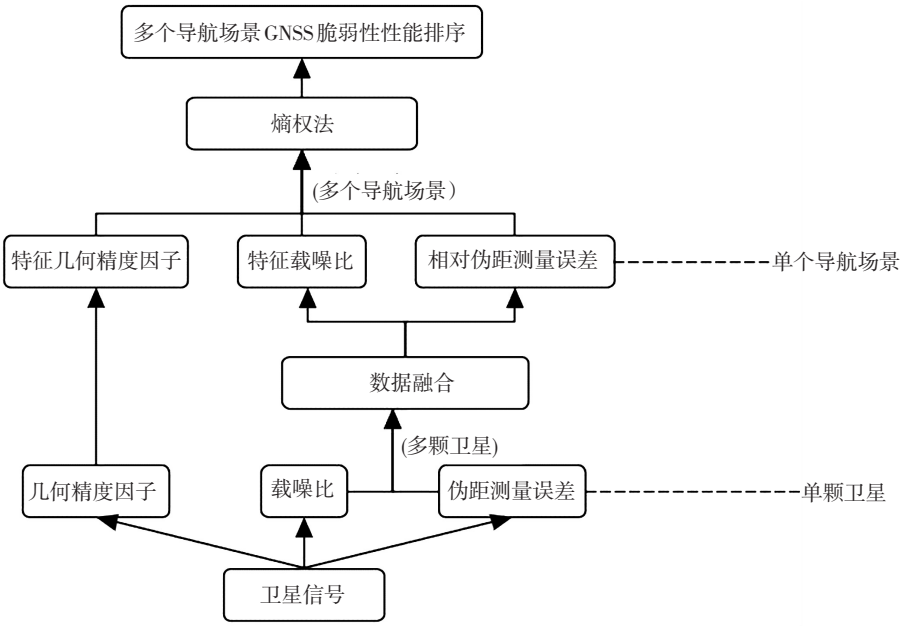


图 1　城市道路 GNSS 脆弱性评估框架

Fig.1　GNSS vulnerability assessment model of urban roads

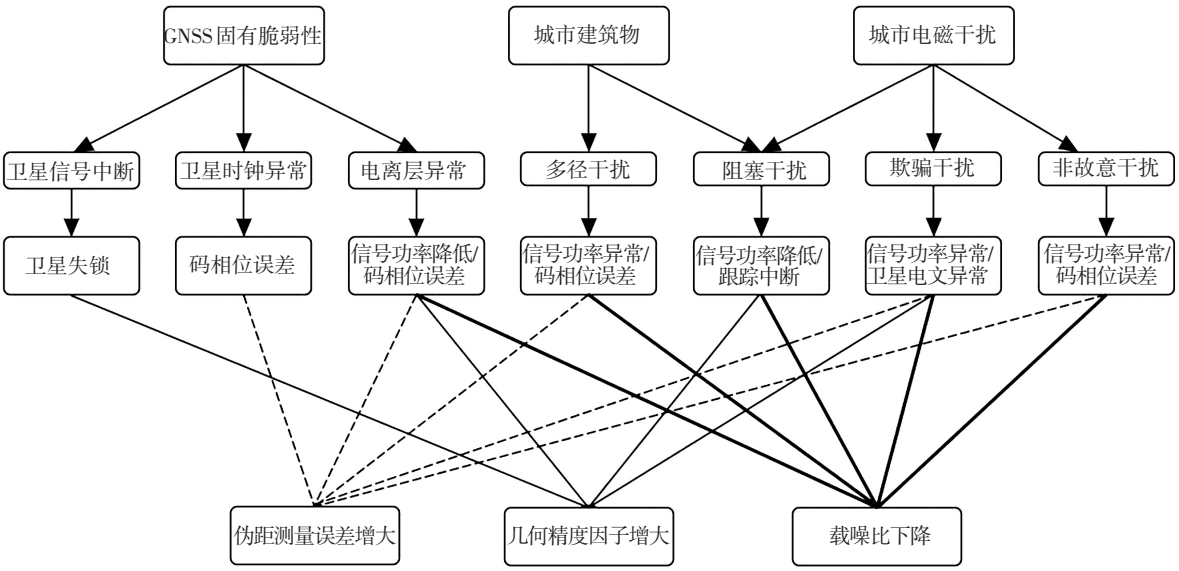


图 2　脆弱性因素与评估指标的关系

Fig.2　Relationship between vulnerability factors and indexes

由概率论可知 C/N_0 与上述比例均值 $\bar{P}_{N/W}$ 的关系为

$$E(\bar{P}_{N/W})=\frac{M(C/N_0\cdot\gamma+1)}{M+C/N_0\cdot\gamma},$$

于是,以 Hz 为单位的 C/N_0 计算公式为

$$C/N_0=\frac{M}{\gamma}\frac{\bar{P}_{N/W}-1}{M-\bar{P}_{N/W}}.$$

2.1.2　几何精度因子

导航学用精度因子 DOP 反应卫星布局的好坏. DOP 决定测量误差在不同卫星布局时被放大的倍数. 本文选取 GDOP(几何精度因子)反映卫星的几何分布.

接收机中的观测误差方程组为:

$$\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{\delta X}=\boldsymbol{L},$$

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}-h_{11} & -h_{12} & -h_{13} & 1\\ -h_{21} & -h_{22} & -h_{23} & 1\\ \cdots & \cdots & \cdots & 1\\ -h_{n1} & -h_{n2} & -h_{n3} & 1\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\delta X}=[\delta x \quad \delta y \quad \delta z \quad \delta u_t]^{\mathrm{T}}.$$

式中:$\boldsymbol{H}$ 为观测矩阵;$\boldsymbol{L}$ 为接收机测量伪距和卫星与接收机几何距离之差;(h_{i1},h_{i2},h_{i3}) 为用户到第 i 颗卫星的方向余弦;$(\delta x,\delta y,\delta z)$ 为用户坐标修正值;δu_t 为时钟误差.

将初始坐标 X_0 代入观测误差方程组,迭代得到:

$$\boldsymbol{G}=(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H})^{-1}=\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14}\\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24}\\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34}\\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44}\end{bmatrix},$$

$$\mathrm{GDOP}=(g_{11}+g_{22}+g_{33}+g_{44})^{\frac{1}{2}}=$$
$$(\sigma_x^2+\sigma_y^2+\sigma_z^2+\sigma_1^2)^{\frac{1}{2}}/\sigma=$$
$$[\mathrm{Trace}\ (G_u^{\mathrm{T}}G_u)^{-1}]^{1/2}$$

2.1.3 伪距测量误差

伪距测量值与定位精度直接相关,在信号质量和卫星布局不变时,伪距测量误差越小,定位精度越高.

定义单颗卫星的伪距测量误差 $\Delta\rho$ 为

$$\Delta\rho=(\rho-I-T-\Delta t)-R.$$

式中:ρ 为软件接收机通过码相位得到的伪距测量值;I 为电离层延时误差修正项;T 为对流层延时误差修正项;Δt 为接收机时钟误差修正项;R 为卫星与监测站之间的真实距离.

本文中,利用自身精确定位和卫星星历计算真实距离 R,文献[12]说明了差分 GPS 技术计算精确定位的方法.

2.2 导航场景特征参数计算

每个导航场景中,交通用户依赖多颗卫星实现定位;接收机接收到每颗卫星的信号,均可计算此卫星的 C/N_0、$\Delta\rho$.

取接收机接收到所有卫星定位解算时刻的数据段,计算 GDOP、C/N_0、$\Delta\rho$,得到评估指标随时间变化的曲线.求平均值,得到导航场景 GDOP 特征值及每颗卫星的 C/N_0、$\Delta\rho$.

现需要将多颗卫星的 C/N_0、$\Delta\rho$ 科学地融合起来,得到最能反应导航场景特性的载噪比特征值 CH_C/N_0及相对伪距测量误差 RPE.

以 4 颗卫星计算 CH_C/N_0 为例(GDOP 特征值与 RPE 同理可得).将 4 颗卫星 C/N_0 记为 x_1、x_2、x_3、x_4.

测量两数据的相对距离为

$$d_{ij}=|x_i-x_j|,\ (i,j=1,2,3,4).$$

定义隶属度函数:

$$r_{ij}=1-\frac{d_{ij}}{\max(d_{ij})},$$

可以看到,两数据越接近时,相对距离 d_{ij} 越小,隶属度函数 r_{ij} 越大,表示两者相互支持的程度越大,则两者在融合中所占的权重越大.那么,可以建立支持度矩阵:

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix} r_{12} & \cdots & r_{14}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ r_{41} & \cdots & r_{44}\end{pmatrix}.$$

由于矩阵 $\boldsymbol{R}$ 是非负的实对称矩阵,必存在非负的实特征值.设矩阵 $\boldsymbol{R}$ 最大模特征值为 γ,对应的特征向量为

$$\boldsymbol{V}=(v_1\quad v_2\quad v_3\quad v_4)^{\mathrm{T}}.$$

文献[13]给出了各数据基于整体数据的权系数,可得特征载噪比为:

$$\omega_i=\frac{v_i}{\sum_{i=1}^{4}v_i},$$

$$CH_C/N_0=\sum_{i=1}^{4}\omega_i x_i.$$

2.3 多种导航场景脆弱性评估

以 3 个典型交通导航场景为例开展评估.首先建立数据库:

$$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} \mathrm{GDOP}_1 & CH_C/N_{01} & \mathrm{RPE}_1\\ \mathrm{GDOP}_2 & CH_C/N_{02} & \mathrm{RPE}_2\\ \mathrm{GDOP}_3 & CH_C/N_{03} & \mathrm{RPE}_3\end{pmatrix}.$$

将各个评价指标标准化,以 GDOP 为例:

$$\pi_i=\frac{\mathrm{GDOP}_i-\min(\mathrm{GDOP})}{\max(\mathrm{GDOP})-\min(\mathrm{GDOP})},$$

可得到评估指标隶属度矩阵:$\boldsymbol{R}=(\pi_{ij})_{3\times3}$.文献[14]将热力学中"熵"的概念引入信息论,利用信息熵表示系统无序的程度.信息熵越大,则系统无序程度越小.定义一组指标的信息熵为

$$E_j=-k\sum_{i=1}^{n}(p_{ij}\ln p_{ij}).$$

式中:$k=\frac{1}{ln(n)}$,$p_{ij}=\frac{\pi_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\pi_{ij}}$,$n=3$.

系统中,某个指标的信息熵越小,表示指标的变异程度越大,提供的信息量越大,在综合评价中所占的权重越大.文献[15]给出了熵权的计算方法:

$$w_i=\frac{1-E_i}{3-\sum_{i=1}^{3}E_i}.$$

导航场景的载噪比特征值 CH_C/N_0 反应了交通用户在该导航场景中接收到卫星信号的质量;几何精度因子特征值 GDOP 反应了接收机对卫星的观测误差对定位精度的影响;相对伪距测量误差 RPE 反应了接收机的测距误差对定位精度的影响.

由于 3 个评价指标从 3 个不同方面反应了

GNSS 的性能,若简单地乘以熵权相加,则无法准确评价 GNSS 脆弱性.所以,将不同导航场景的同一指标先进行比较,再结合各指标的熵权,可以更为准确地评价各导航场景 GNSS 脆弱性.

从各导航场景中,选取一组最优指标建立 1 套虚拟的正理想方案;选取一组最劣指标建立 1 套虚拟的负理想方案;再结合各指标的熵权,计算各实际导航场景距正、负理想方案的距离,从而更准确地比较各实际导航场景 GNSS 脆弱性的优劣.

由于 GDOP、RPE 越小,C/N_0 越大,GNSS 性能越好;所以,选取最小的 GDOP、RPE 和最大的 C/N_0 为正理想方案;选取最大的 GDOP、RPE 和最小的 C/N_0 为负理想方案.结合各指标的熵权,计算实际方案距正、负理想方案的距离:

$$d_j^+ = \sum_{i=1}^{3} w_i \left| r_{ij} - r_j^+ \right|,$$

$$d_j^- = \sum_{i=1}^{3} w_i \left| r_{ij} - r_j^- \right|,$$

式中,GDOP 和 RPE 的 r_j^+ 选取最小值,而 C/N_0 的 r_j^+ 则选取最大值.

距离正理想方案越近,则脆弱性性能越好;距离负理想方案越近,则脆弱性性能越差.

3　路测实验

3.1　典型城市道路

3.1.1　开阔路段

开阔道路,指两侧均无遮挡的道路.开阔路段对卫星信号没有遮挡,接收机在开阔路段不仅可跟踪到 10 颗以上 GPS 卫星,而且参与定位解算的几何构型非常好,同时,信号质量不受影响.足够数量的卫星及优质的信号质量导致了 GNSS 良好的服务性能.

3.1.2　林荫道

林荫道,指两侧有高大树木的道路.林荫道两侧的树木及树叶遮挡卫星信号,并且增强了多路径效应.由于卫星数量的减少及信号质量的略微降低,GNSS 服务性能将略微降低.

3.1.3　城市峡谷

城市峡谷,指道路两侧均有高度≥20 m 的建筑物.由于高大建筑物对卫星信号的遮挡,接收机无法搜索到 4 颗卫星完成定位.并且,多路径效应严重,信号质量严重降低.城市峡谷中,GNSS 服务性能严重降低.

3.1.4　隧道

隧道中,卫星信号被完全阻隔.接收机无法搜索到卫星,GNSS 服务性能瘫痪.

各城市道路条件可看作“不同类型”的特征道路或特征道路的“组合”.例如,高架桥下可视为另一“类型”的城市峡谷,对卫星信号的两侧遮挡转变为上方遮挡;一侧高楼、一侧高大树木的道路则可视为城市峡谷及林荫道的组合.

3.2　导航场景选取与卫星轨道参数

选取导航场景与卫星星历见表 1.

表 1　主要导航场景信息

Tab.1　Information of main scenes

地点	导航场景类型	数据采集开始 UTC 时间	可用星历发出时刻
徐浦大桥	开阔路段	2015-03-31　10:07:55	2015-03-31　10:02:11
万芳路	普通道路	2015-03-31　07:52:54	2015-03-31　08:07:59
明月路	林荫道	2015-04-01　12:44:33	2015-04-01　12:36:12
东绣路	城市峡谷	2015-04-01　03:15:39	2015-04-01　03:02:02
天后宫大楼	隧道	2015-04-01　11:44:00	2015-04-01　11:40:22

3.3　计算单颗卫星特征值

3.3.1　开阔路段

接收机捕获到 9 颗卫星,8 颗用于定位解算.计算得到评估指标特征值,见表 2.

3.3.2　普通道路

接收机捕获到 6 颗卫星,均用于定位解算,计算得到评估指标特征值,见表 3.

3.3.3　林荫道

接收机捕获到 5 颗卫星,均用于定位解算,计算得到评估指标征征值,见表 4.

表 2　开阔路段评估指标特征值

Tab.2　Characteristic value of vulnerability indexes in open road

PRN (卫星编号)	载噪比/(dB · Hz)	几何精度因子	相对伪距测量误差/m
4	30.00	2.35	2.97
7	35.18		2.55
9	38.02		5.05
16	40.64		12.30
19	40.29		12.30
23	41.02		5.53
27	41.91		10.81
31	32.45		6.91

表 3 普通道路评估指标特征值

Tab.3 Characteristic value of vulnerability indexes in common road

PRN（卫星编号）	载噪比/（dB · Hz）	几何精度因子	相对伪距测量误差/m
3	20.73	2.38	15.76
16	46.13		7.14
23	41.00		80.22
27	41.06		16.09
29	36.26		30.95
31	46.73		30.95

表 4 林荫道评估指标特征值

Tab.4 Characteristic value of vulnerability indexes in avenue

PRN（卫星编号）	载噪比/（dB · Hz）	几何精度因子	相对伪距测量误差/m
4	20.67	6.32	55.14
9	25.48		65.58
16	17.41		62.19
23	19.67		62.78
27	22.43		55.56

3.3.4 城市峡谷

接收机无法同时捕获到 4 颗卫星，无法完成定位.特征 $C/N_0=0$(dB · Hz)，GDOP = 99.99(接收机软件上阈值)，$\Delta\rho$ 分别为：644.383 6、365.435 9、606.659 6、1 089.185 1 m.

3.3.5 隧道

卫星信号被完全频闭，接收机无法捕获到卫星.特征 $C/N_0=0$(dB · Hz)；GDOP = ∞，实际计算时取值 99.99；$\Delta\rho=\infty$，实际计算时，取值 1 000 m，以近似正无穷.若取值过大，则使伪距测量误差在评估中所占权重过大而不切实际.

3.4 计算导航场景评估指标特征值

由多种导航场景脆弱性评估，计算导航场景评估指标特征值，见表 5.

表 5 各导航场景特征指标

Tab.5 Characteristic value of vulnerability indexes in all scenes

各导航场景	载噪比/（dB · Hz）	几何精度因子	相对伪距测量误差/m
开阔路段	38.412 2	2.357 1	6.891 4
普通道路	41.189 5	2.381 0	23.319 5
林荫道	21.281 1	6.324 3	60.755 7
城市峡谷	0	99.999 9	625.454 8
隧道	0	99.999 9	1 000.000 0

3.5 评价各导航场景脆弱性性能

由多种导航场景脆弱性评估，确定正、负理想方案，见表 6.同时，计算各场景距正、负理想方案距离，见表 7.

表 6 正负理想方案

Tab.6 Positive and negative ideal schemes

各导航场景	载噪比/（dB · Hz）	几何精度因子	相对伪距测量误差/m
开阔路段	38.412 2	2.357 1(正)	6.891 4(正)
普通道路	41.189 5(正)	2.381 0	23.319 5
林荫道	21.281 1	6.324 3	60.755 7
城市峡谷	0(负)	99.999 9(负)	625.454 8
隧道	0(负)	99.999 9(负)	1 000.000 0(负)

表 7 距正、负理想方案距离

Tab.7 Distances to positive and negative ideal schemes

距理想方案的距离	距正理想方案的距离	距负理想方案的距离
开阔路段	0.029 9	9.970 1
普通道路	0.013 5	9.986 5
林荫道	2.076 0	7.924 0
城市峡谷	9.891 6	0.108 4
隧道	1.000 0	0

4 结 论

1)本文选择载噪比、几何精度因子、伪距测量误差作为脆弱性评价指标，采用基于信息熵权的数据融合算法，计算导航场景距正、负理想场景的距离，实现了多个导航场景的 GNSS 脆弱性评估.

2)路测试验表明，开阔道路、林荫道、城市峡谷、隧道的 GNSS 脆弱性性能依次降低.本文算法可以完成城市道路 GNSS 脆弱性评估.

3)普通道路的实验地点——万芳路两侧遮挡物较少，因此脆弱性情况较好.

4)评价导航场景不同“时段”脆弱性，则需要在不同时段采集数据，然后利用本文算法评估脆弱性.

参考文献

[1] VOLPE J A. Vulnerability assessment of the transportation infrastructure relying on the global positioning system[R]. [S.l.]: NTSC NAVCEN draft report, 2001.

[2] VAN DIERENDONCK A J. Eye on the ionosphere: measuring ionospheric scintillation effects from GPS signals [J]. GPS Solutions, 1999, 2(4): 60-63. DOI: 10.1007/PL00012769.

[3] SKONE S, KNUDSEN K, DE JONG M. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions[J].

Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2001, 26(6/7/8): 613-621. DOI: 10.1016/S1464-1895(01)00110-7.

[4] GE Linlin, HAN Shaowei, RIZOS C. Multipath mitigation of continuous GPS measurements using an adaptive filter[J]. GPS Solutions, 2000, 4(2): 19-30. DOI: 10.1007/PL00012838.

[5] BRAASCH M S. Performance comparison of multipath mitigating receiver architectures[C]//Proceedings of the 2001 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2001: 31309-31505. DOI: 10.1109/AERO.2001.931361.

[6] JAHROMI J A, BROUMANDAN A, NIELSEN J, et al. GPS spoofer countermeasure effectiveness based on signal strength, noise power, and C/N0 measurements[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2012, 30(4): 181-191. DOI: 10.1002/sat.1012.

[7] ALEGRE F, AMEHRAYE A, EVANS N. A one-class classification approach to generalised speaker verification spoofing countermeasures using local binary patterns[C]//Proceedings of the 2013 IEEE Sixth International Conference on. Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS). Washington, DC: IEEE, 2013: 1-8. DOI: 10.1109/BTAS.2013.6712706.

[8] GUO Fei, ZHANG Xiaohong. Real-time clock jump compensation for precise point positioning[J]. GPS Solutions, 2014, 18(1): 41-50. DOI: 10.1007/s10291-012-0307-3.

[9] LIU Xuan, ZHAN Xingqun, CHEN Maolin. Quantitative assessment of GNSS vulnerability based on DS evidence theory[J]. Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, 2014, 46(3): 191-201. DOI: 10.6125/14-0331-790.

[10] JING Shuai, ZHAN Xingqun, LIU Xuan, et al. GNSS vulnerability assessment based on application suitability[C]//Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation. Tampa, Florida: ION GNSS+ 2014, 2014: 2291-2298.

[11] 严凯.GNSS 脆弱性仿真评估平台技术研究[D].上海:上海交通大学,2013.
YAN Kai. Research on GNSS vulnerability simulation assessment platform technique[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[12] MORALES Y, TSUBOUCHI T. DGPS, RTK-GPS and Starfire DGPS performance under tree shading environments[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Integration Technology. Shenzhen: IEEE, 2007: 519-524. DOI: 10.1109/ICITECHNOLOGY.2007.4290370.

[13] KLEIN L A.多传感器数据融合理论及应用[M]. 戴亚平,刘征,郁光辉,译.北京:北京理工大学出版社, 2004:47-56.
KLEIN L A. Multi-sensor data fusion theory and application[M]. DAI Yaping, LIU Zheng, YU Guanghui, T. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004:47-56.

[14] ZHOU Jian, LI Xibing. Integrating unascertained measurement and information entropy theory to assess blastability of rock mass[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(7): 1953-1960. DOI: 10.1007/s11771-012-1231-y.

[15] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 257-263. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.03.001.
MENG Xianmeng, HU Heping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 257-263. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.03.001.

(编辑　张　红)