

基于电离层延迟智能估计的完好性评估

卢丹,张宏健,钟伦珑,胡铁乔

(中国民航大学电子信息与自动化学院,天津 300300)

摘要:完好性是民用航空导航系统的性能要求之一,而电离层延迟是进行完好性评估的重要误差来源之一。对于单频系统来说,通常采用 Klobuchar 模型对单频信号进行修正,但修正率仅为 60%左右,精度有限。本文提出一种估算电离层延迟并将其用于完好性评估的方法,首先,通过反向传播(BP, back propagation)神经网络对观测站电离层延迟进行训练,得到观测站的 BP 神经网络模型并计算电离层延迟,提高了观测站的电离层延迟修正率;其次,利用经过训练的观测站 BP 神经网络模型以及三点插值法计算装备单频接收机的航空器在其飞行位置的电离层延迟并进行完好性评估。以 2015 年 2—3 月的数据为例进行评估,结果表明,通过 BP 神经网络模型以及三点插值法计算部分地区的电离层延迟与 Klobuchar 模型相比,计算电离层延迟效果较好,提高了日间和夜间电离层延迟的修正率,从而提高了保护级的精度。

关键词: 电离层延迟;完好性评估;Klobuchar 模型;BP 神经网络;保护级

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2025)01-0053-07

Integrity evaluation based on intelligent estimation of ionospheric delay

LU Dan, ZHANG Hongjian, ZHONG Lunlong, HU Tiejiao

(College of Electronic Information and Automation, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: Integrity is one of the performance requirements of civil aviation navigation systems, and ionospheric delay is an important error source for integrity evaluation. For the single-frequency system, Klobuchar model is usually used to correct the single-frequency signal, but the correction rate is only about 60%, and the accuracy is limited. This paper proposes a method for estimating ionospheric delay and using it for integrity evaluation. Firstly, the ionospheric delay of observation station is trained by back propagation (BP) neural network, and the ionospheric delay is calculated by BP neural network model of the observation station, which improves the ionospheric delay correction rate of the observation station. Secondly, the ionospheric delay of the aircraft equipped with single-frequency receiver at its flight position is calculated by using the trained observation station BP neural network model and the three-point interpolation method, and the integrity evaluation is carried out. Evaluation based on the data from February to March 2015 shows that, when calculating the ionospheric delay, the BP neural network model and the three-point interpolation method perform better than the Klobuchar model in some areas. They improve the correction rates of ionospheric delay during both daytime and nighttime, thus enhancing the accuracy of the protection level.

Key words: ionospheric delay; integrity evaluation; Klobuchar model; BP neural network; protection level

一般卫星导航系统除了需要提供定位、导航和授时功能之外,还必须具有在该系统不能用于导航服务时及时向用户发出告警的能力,这种能力被称为系统的完好性^[1]。完好性是对整个系统所提供信息正确性的置信度的测量,包括系统无法用于某些预定操作时向用户及时发出告警的能力^[2]。其中主要通过计算保护

级与完好性指标中的告警门限进行比较,评估其完好性。文献[3]建立了全球卫星导航系统(GNSS, global navigation satellite system)组合系统的完好性监测算法,计算多个导航系统组合在一定完好性风险下的保护级。文献[4]介绍了接收机自主完好性监测(RAIM, receiver autonomous integrity monitoring)算法,利用冗余

观测量对卫星导航系统进行监测并排除故障卫星。本文评估时并不进行排故处理,因此,选择文献[3]中进行完好性评估的方法。而电离层延迟是进行完好性评估中计算保护级的主要误差来源,因此,准确估计电离层延迟可以更好地计算保护级,评估导航系统的完好性。

对于接收单频信号的接收机来说,通常采用经典的 Klobuchar 模型计算电离层延迟并进行修正^[9],其主要通过电文播发的 8 个电离层参数计算电离层延迟并进行修正,但由于修正精度有限,修正率仅为 60% 左右,有时无法满足用户要求,因此,必须要有更好的电离层延迟计算模型。许多学者对 Klobuchar 模型进行改进:文献[6]考虑了季节因素的影响,分析了北纬 45° 电子密度总数的峰值与谷值随年积日的变化,在原有参数的基础上增加 10 个参数进行计算,使修正精度提高;文献[7]提出 14 个参数的 Klobuchar 模型,将初始相位与夜间常数值改为随纬度变化的多项式,但这些方法都需要大量数据进行计算;文献[8]利用观测站双频信号计算的 TEC 对 Klobuchar 模型的 8 个电离层参数进行改进,得到新的 8 个参数重新代入模型中计算电离层延迟,适用于观测站附近的地区,但是这种方法没有考虑到夜间电离层延迟。国内外的大部分研究成果对 Klobuchar 模型进行了很好的改进,但利用改进后的模型进行完好性评估的相关研究较少。

本文采用了反向传播(BP, back propagation)神经网络与三点插值法建立了电离层延迟模型,并利用计算的电离层延迟进行完好性评估。通过对国际 GNSS 服务(IGS, international GNSS service)观测站播发的国内站点的与交换机无关的交换格式(RINEX, receiver independent exchange format)文件计算电离层延迟并进行训练,利用训练好的模型估计观测站的电离层延迟,由于安装单频接收机的航空器飞行时不一定在观测站附近,对此利用三点插值法计算其飞行位置的电离层延迟并进行修正,提高电离层延迟的修正率,从而提高了完好性评估中计算的保护级精度。

1 基于 BP 神经网络模型的电离层延迟估计

1.1 Klobuchar 模型

Klobuchar 模型给出了卫星在距离地面 350 km 的电离层穿刺点处的垂直电离层延迟^[9],将白天的电离层延迟视为余弦函数并在当地时间下午两点达到最大峰值,将夜间电离层延迟视为常数值,然后通过倾

斜因子转换为传播路径上的电离层延迟。垂直方向上的电离层延迟表示为

$$T_{ion} = \begin{cases} c \times \left(D + A \cos \left[\frac{2\pi(t - T_p)}{P} \right] \right) & |t - T_p| < \frac{P}{4} \\ c \times D & t \text{ 为其他值} \end{cases} \quad (1)$$

式中: c 为光速; D 为夜间电离层延迟,为常数值,取值为 5 ns; T_p 为初始相位,取值为 50 400 s; t 为周内秒; A 为日间电离层延迟余弦函数的幅度,通过广播星历头文件中的电离层参数 $\alpha_0 \sim \alpha_3$ 与穿刺点的地磁纬度得到; P 为日间电离层延迟余弦函数的周期,通过广播星历头文件中的电离层参数 $\beta_0 \sim \beta_3$ 与穿刺点的地磁纬度得到^[10]。

1.2 BP 神经网络模型

由于通过 Klobuchar 模型计算的电离层延迟不够准确,而通过双频信号计算的电离层延迟相对较准确^[11],考虑到 IGS 观测站播发的 RINEX 文件包含双频数据,因此,本节通过 BP 神经网络^[12],基于 IGS 观测站播发的 RINEX 文件训练模型并估计电离层延迟,训练过程如下。

(1) Klobuchar 模型主要通过接收机的经度、纬度、仰角、方位角、周内秒、电离层参数等总共 13 个输入量计算电离层延迟,故输入层节点数选为 13 个。

(2) 由于双频信号计算的电离层延迟更加准确,所以将其作为 BP 神经网络的期望输出,故输出层节点数选为 1 个。

(3) 一般对于单隐层的 BP 神经网络隐含层节点的经验公式为

$$l = \sqrt{\omega + \eta} + \chi \quad (2)$$

式中: l 为隐含层节点数; ω 为输入层节点数; η 为输出层节点数; χ 为 1~10 的常数,可以根据训练效果进行调整。故隐含层节点数选为 13 个。

(4) 训练 BP 神经网络并保存。

通过 BP 神经网络训练模型计算电离层延迟的过程如图 1 所示。

将 1.1 节中计算 Klobuchar 模型需要的经度 λ_u 、纬度 φ_u 、仰角 e 、方位角 a 、周内秒 t 、电离层的 8 个参数 $\alpha_0 \sim \alpha_3$ 、 $\beta_0 \sim \beta_3$ 作为输入参数: $X_{in} = [\lambda_u \ \varphi_u \ e \ a \ t \ \alpha_0 \ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \beta_0 \ \beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$,对 X_{in} 进行归一化处理得到输入层第 i 个值为 $X_i, i = 1, 2, \dots, 13$,输入层向量为 $X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_{13}]^T$,隐含层输出向量为 $Z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_{13}]^T$,输入层到隐含层第 j 个神经元的权值矩阵为 $W_j = [w_{1,j} \ w_{2,j} \ \dots \ w_{13,j}]^T, j = 1, 2, \dots, 13$ 。

对于隐含层

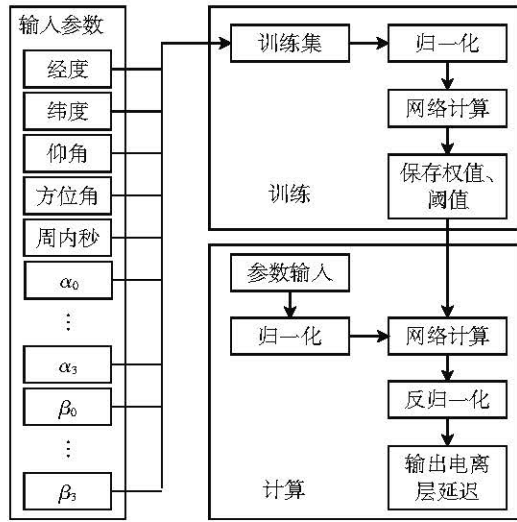


图 1 单隐含层 BP 神经网络电离层延迟

Fig.1 Ionospheric delay of BP neural network with single hidden layer

$$z_j = f(\text{net}_j) \quad (3)$$

$$\text{net}_j = W_j^T \times X \quad (4)$$

式中,转移函数 $f(\cdot)$ 均为单极性函数,具有连续可导的特点,即

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5)$$

隐含层到输出层之间的权值矩阵为 $G = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_{13}]^T$ 。

对于输出层

$$y_1 = f(\text{net}) \quad (6)$$

$$\text{net} = \sum_{j=1}^{13} g_j z_j \quad (7)$$

式中, y_1 为输出层的值。对输出层的值 y_1 进行反归一化得到电离层延迟为 τ 。

1.3 评价指标

将双频信号计算的电离层延迟作为真实值,对通过 Klobuchar 模型与通过 BP 神经网络模型计算的电离层延迟进行均方根误差与修正率的比较。

$$E_{\text{RMS,K}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\tau_{i,j} - \tau_{\text{K},i,j})^2} \quad (8)$$

$$E_{\text{RMS,BP}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\tau_{i,j} - \tau_{\text{BP},i,j})^2} \quad (9)$$

$$E_{\text{K}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{|\tau_{i,j} - \tau_{\text{K},i,j}|}{\tau_{i,j}} \right)} \quad (10)$$

$$E_{\text{BP}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{|\tau_{i,j} - \tau_{\text{BP},i,j}|}{\tau_{i,j}} \right)} \quad (11)$$

式中: $E_{\text{RMS,K}}$ 与 $E_{\text{RMS,BP}}$ 分别为 Klobuchar 模型与 BP 神经网络模型计算的电离层延迟的均方根误差; E_{K} 与

E_{BP} 分别为 Klobuchar 模型与 BP 神经网络模型计算电离层延迟的修正率; m 为一天中的历元数量; n 为每个历元中的卫星个数; $\tau_{i,j}$ 为通过双频信号计算的第 j 颗卫星在 i 时刻的电离层延迟; $\tau_{\text{K},i,j}$ 与 $\tau_{\text{BP},i,j}$ 分别为 Klobuchar 模型与 BP 神经网络模型计算的第 j 颗卫星在 i 时刻的电离层延迟。

2 基于三点插值法的电离层延迟估算

安装单频接收机的航空器在飞行过程中,距离一个观测站较远时,利用观测站的训练模型估计其所在位置的电离层延迟并不准确,因此,本文利用了三插值法计算航空器位置的电离层延迟。

当三角形的 3 个顶点具有 3 个值时,计算三角形内部点的值可以通过线性插值进行计算,三角形一般有 2 个自由度 u 与 v ,在已知三角形顶点的坐标时,就可以计算三角形内部点的值,如图 2 所示。

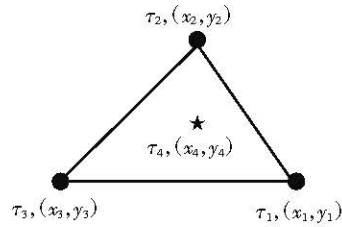


图 2 三角形示意图

Fig.2 Triangle diagram

图 2 中: τ_1 、 τ_2 、 τ_3 为三角形顶点的值; (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 分别为顶点坐标,可计算三角形的自由度 u 与 v ,即

$$\begin{cases} x_4 = (1 - u - v)x_1 + ux_2 + vx_3 \\ y_4 = (1 - u - v)y_1 + uy_2 + vy_3 \end{cases} \quad (12)$$

则内部点的值 τ_4 表示为

$$\tau_4 = (1 - u - v)\tau_1 + u\tau_2 + v\tau_3 \quad (13)$$

通过三点插值法,将观测站的纬度、经度作为三角形顶点的横坐标与纵坐标;假设航空器分别飞到三角形顶点的 3 个观测站,将参数输入 3 个观测站训练的电离层延迟模型,计算出电离层延迟 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 ;再由式(12)计算三角形自由度 u 和 v ;最后根据式(13)计算航空器所在位置的电离层延迟 τ_4 ,并利用计算的电离层延迟进行完好性评估。

3 完好性评估方案

在进行完好性评估时,通常采用水平保护级(HPL,

horizontal protection level)与垂直保护级(VPL, vertical protection level)进行分析^[13-14]并评估定位结果的可靠性,将计算的保护级与告警门限进行比较和完好性分析,当保护级超过告警门限时需要告警。

完好性的评估方案如图 3 所示。

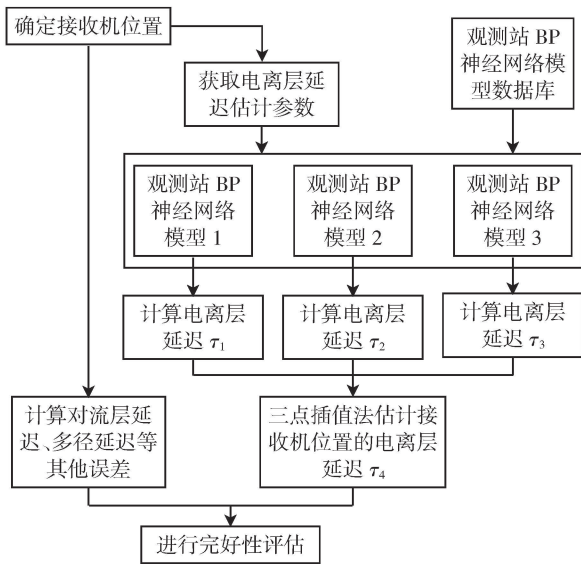


图 3 完好性评估方案框图

Fig.3 Diagram of integrity assessment scheme

完好性评估流程如下:

(1)建立观测站 BP 神经网络模型数据库,参考航空器导航数据库 28 d 更新一次,该数据库以 28 d 为周期,将观测站每一天观测到的电离层数据保存,通过 BP 神经网络模型对 28 d 保存下来的数据进行训练,得到观测站的电离层延迟模型;

(2)确定航空器接收机所在位置,获取电离层延迟估计需要的 13 个参数,在观测站 BP 神经网络模型数据库中选取距离接收机位置最近的观测站建立插值三角形;

(3)将电离层延迟估计需要的 13 个参数分别输入选取的 3 个观测站 BP 神经网络模型计算电离层延迟,再应用三点插值法估计接收机所在位置的电离层延迟;

(4)运用估计的电离层延迟与对流层延迟等其他误差进行完好性评估。

4 实验结果及分析

利用 IGS 观测站播发的 RINEX 文件进行分析。应用 BP 神经网络模型对电离层延迟进行估计,将双频信号计算的电离层延迟作为真实值,与 Klobuchar 模

型计算的电离层延迟进行对比。利用 BP 神经网络训练时,隐含层采用 logsig 函数将数据映射到区间(0,1),激励函数选择线性传输函数 purelin,设定学习速率为 0.05,最大训练次数为 5 000 次。

选取香港的 HKKS 站点 2015 年 3 月 16 日(第 75 天)与武汉的 JFNG 站点 2015 年 3 月 4 日(第 63 天)的数据进行计算,计算结果如图 4 和图 5 所示。其中:横坐标为世界协调时(UTC, universal time coordinated);纵坐标为电离层延迟;不同颜色代表不同卫星的电离层延迟。

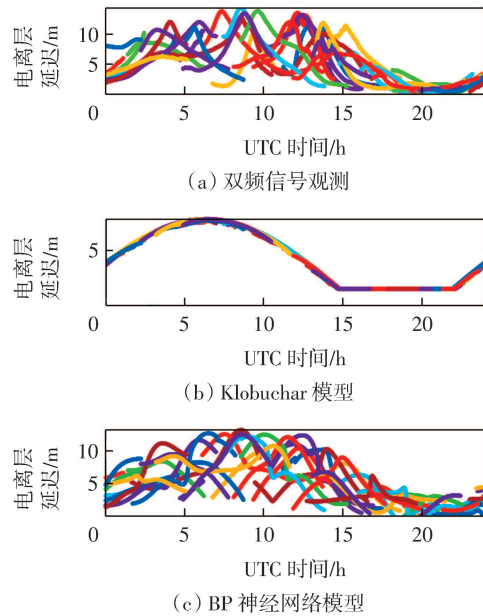


图 4 HKKS 站点 2015 年 3 月 16 日电离层延迟

Fig.4 Ionospheric delay at HKKS station on March 16, 2015

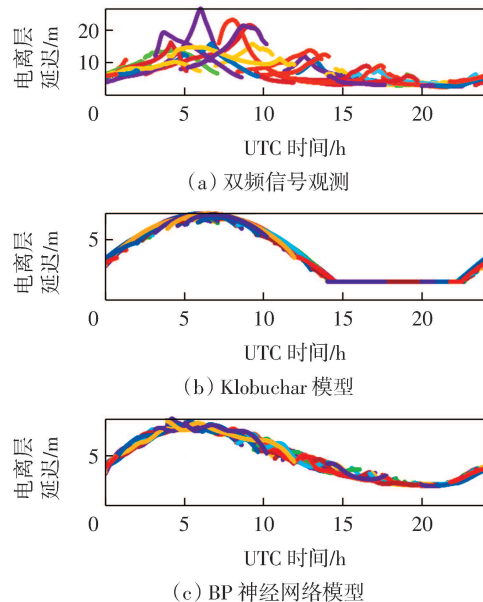


图 5 JFNG 站点 2015 年 3 月 4 日电离层延迟

Fig.5 Ionospheric delay of JFNG station on March 4, 2015

从图 4 与图 5 中可以看出,经过 BP 神经网络模型计算的电离层延迟比 Klobuchar 模型计算的电离层延迟误差小,特别是计算夜间电离层延迟时,趋势更加接近。在图 4 中 13~15 h 发生电离层异常时,通过 BP 神经网络模型训练后比 Klobuchar 模型更能反映出电离层异常情况下电离层延迟的变化。

同时对北京的 BJFS 站点、拉萨的 LHAZ 站点、武汉的 JFNG 站点、香港的 HKKS 站点的前 28 d 的数据进行训练,利用两种模型计算的各站点接下来 28 d 的

电离层延迟,其中,BJFS 站点 2015 年 3 月 4 日与 3 月 31 日、LHAZ 站点 2015 年 3 月 1 日与 3 月 28 日、JFNG 站点 2015 年 2 月 23 日与 3 月 21 日、HKKS 站点 2015 年 3 月 6 日与 4 月 1 日的计算结果,如表 1 所示。通过 BP 神经网络训练后的模型计算的电离层延迟与 Klobuchar 模型计算的电离层延迟相比,日间均方根误差与夜间均方根误差均有所减小,日间修正率均值提高了 20%,夜间修正率均值提高了 25%左右。

为验证三点插值法计算的电离层延迟是否准确,

表 1 BP 神经网络模型与 Klobuchar 模型对比情况

Tab.1 Comparison between BP neural network model and Klobuchar model

文件来源	Klobuchar 模型				BP 神经网络模型			
	日间		夜间		日间		夜间	
	均方根误差/m	修正率/%	均方根误差/m	修正率/%	均方根误差/m	修正率/%	均方根误差/m	修正率/%
BJFS 站点 2015 年 3 月 4 日(第 63 天)	0.917 0	82.25	0.784 2	67.46	0.575 0	88.29	0.416 9	83.20
BJFS 站点 2015 年 3 月 31 日(第 90 天)	1.357 4	77.81	1.866 9	45.90	1.260 4	79.15	1.498 6	56.52
LHAZ 站点 2015 年 3 月 1 日(第 60 天)	2.402 6	32.47	1.705 5	36.73	1.266 2	51.92	1.140 0	57.55
LHAZ 站点 2015 年 3 月 28 日(第 87 天)	2.544 9	21.05	0.787 4	65.00	2.478 6	51.14	0.549 0	75.00
JFNG 站点 2015 年 2 月 23 日(第 53 天)	2.707 6	73.70	1.033 6	74.88	1.606 1	84.55	0.714 0	85.30
JFNG 站点 2015 年 3 月 21 日(第 80 天)	1.260 1	81.97	1.046 5	69.09	0.953 9	85.68	0.597 6	80.71
HKKS 站点 2015 年 3 月 6 日(第 65 天)	5.915 1	50.00	3.877 8	39.66	2.401 8	79.03	1.692 7	70.31
HKKS 站点 2015 年 4 月 1 日(第 92 天)	4.644 7	63.90	3.647 0	40.78	2.978 0	75.68	1.547 9	66.36

假设以香港的 HKKT 站点作为航空器飞行位置进行估计,通过观测站的 BP 神经网络模型训练的电离层延迟模型,利用三点插值法计算航空器飞行位置的电离层延迟。

计算时,RINEX 文件选取的是香港的 HKKT 站点 2015 年 3 月 16 日(第 75 天)的数据,作为 28 d 更新周期中的第 11 天的数据,观测站选择为武汉的 JFNG 站点、香港的 HKSL 站点、香港的 HKKS 站点,对观测站数据进行训练。HKKT 站点的电离层延迟计算结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,与 Klobuchar 模型计算的电离层延迟相比,BP 神经网络训练之后的模型更接近实际电离层延迟的变化情况,在夜间电离层延迟的变化趋势也更加接近,总体误差有所减小。在 13~15 h 发生电离层异常时,通过 BP 神经网络训练之后的模型比 Klobuchar 模型更能反映出电离层异常情况下电离层延迟的变化。

为进一步验证本文方法估计是否准确,进行了电离层延迟的均方根误差与修正率的比较。表 2 为 HKKT 站点 2015 年 3 月 16 日不同观测站的数据估计情况,RINEX 文件选取香港的 HKKT 站点 2015 年中 3

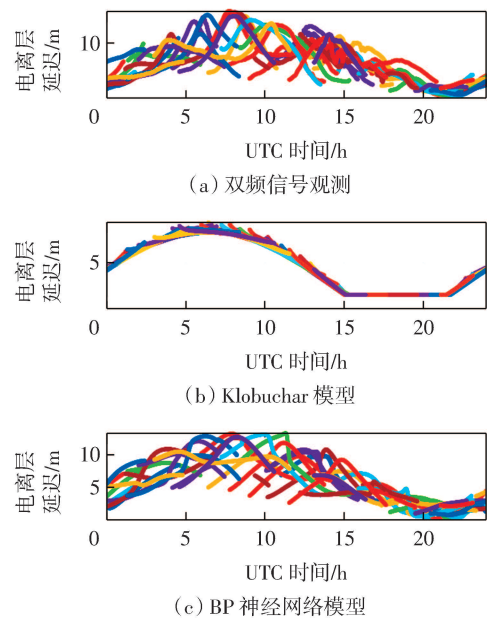


图 6 HKKT 站点 2015 年 3 月 16 日电离层延迟

Fig.6 Ionospheric delay at HKKT station on March 16, 2015

月 16 日(第 75 天)的数据,分别选取:①北京的 BJFS 站点、香港的 HKSL 站点、香港的 HKKS 站点;②武汉的 JFNG 站点、香港的 HKSL 站点、香港的 HKKS 站点;③香港的 HKTK 站点、香港的 HKSL 站点、香港的 HKKS

表 2 HKKT 站点 2015 年 3 月 16 日不同观测站的计算情况

Tab.2 Calculation of HKKT station with different observation stations on March 16, 2015

文件来源	Klobuchar 模型				BP 神经网络模型			
	日间		夜间		日间		夜间	
	均方根误差/m	修正率/%	均方根误差/m	修正率/%	均方根误差/m	修正率/%	均方根误差/m	修正率/%
BJFS, HKSL, HKKS	3.646 2	56.20	3.345 7	36.10	1.734 3	81.32	1.467 6	66.00
JFNG, HKSL, HKKS	3.646 2	56.20	3.345 7	36.10	1.729 1	82.46	1.425 7	66.21
HKTK, HKSL, HKKS	3.646 2	56.20	3.345 7	36.10	1.700 8	86.99	1.199 5	73.99

站点,建立插值三角形,对 RINEX 文件进行分析。通过表 2 可以看出,对于所选择的站点建立三角形进行插值来说,利用 BP 神经网络模型与三点插值法计算的电离层延迟与 Klobuchar 模型计算的电离层延迟相比,日间与夜间电离层延迟均方根误差均有所减小,日间电离层延迟的修正率均值提高了 25%左右,夜间电离层延迟的修正率均值提高了 30%左右。同时选取观测站建立的插值三角形越小,计算的均方根误差越小,修正率越高。因此,应尽量选择距离所选位置较近的观测站点建立插值三角形。

将通过 BP 神经网络模型与三点插值法计算的电离层延迟利用倾斜因子转化为传播方向的电离层延迟,进行保护级的计算,每隔 30 s 定位一次,将通过双频信号计算的保护级作为真实值参考,RINEX 文件选为香港的 HKKT 站点中 2015 年 3 月 16 日(第 75 天)的数据,计算结果如图 7 所示。其中:蓝色线为通过双频信号的电离层延迟计算的保护级;黑色线为通过 Klobuchar 模型得到的电离层延迟计算的保护级;粉色线为通过 BP 神经网络模型与三点插值法结合的方法得到的电离层延迟计算的保护级;红色虚线为垂直引导进近程序第 2 类(APV II, approach procedure with vertical

guidance category 2)阶段的保护限值(AL, alert limit)。

从图 7 中可以看出,通过 BP 神经网络模型与三点插值法结合的方法得到的电离层延迟计算的保护级包络更加接近双频信号计算的保护级,在定位次数 1 500 次左右发生电离层异常时,通过 BP 神经网络模型得到的电离层延迟计算的保护级也更加接近双频信号计算的保护级。

计算 HKKT 站点 2015 年 3 月 16 日(2015 年第 75 天)保护级的均方根误差,Klobuchar 模型得到的电离层延迟与双频信号计算 HPL 的均方根误差为 35.021 7 m,VPL 的均方根误差为 16.814 6 m;BP 神经网络模型与三点插值法结合的方法得到电离层延迟计算的 HPL 与双频信号计算的保护级均方根误差为 17.309 3 m,VPL 的均方根误差为 8.384 5 m。通过比较可以看出,BP 神经网络模型与三点插值法得到的电离层延迟计算的 HPL 与 VPL 精度更高。

在 APV II 阶段,安装单频接收机的航空器在只依靠全球定位系统(GPS, global positioning system)系统时,往往会超过保护限值 AL,因此,需要增强系统提供信息。实际上,电离层延迟还会受到其他物理因素影响,也可以将相关参数作为 BP 神经网络模型的输入参数进行训练。

5 结语

对于单频信号来说,通过 Klobuchar 模型计算的电离层延迟与真实的电离层延迟相比存在误差,且修正精度有限,可能不满足完好性的需求。本文通过 Klobuchar 模型与双频信号计算的电离层延迟进行比较,发现电离层延迟的变化规律,再利用 BP 神经网络模型先对观测站的电离层延迟进行计算,然后利用三点插值法估算电离层延迟,通过估算的电离层延迟进行完好性分析。通过实验对算法进行了验证,并与经典的 Klobuchar 模型进行比较,本文方法计算电离层延迟效果较好,降低了误差,同时提高了修正率与保护级的计算精度,但影响电离层延迟的因素还有很多,

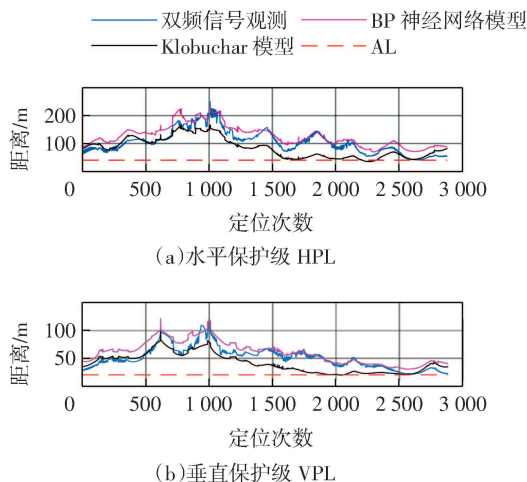


图 7 HKKT 站 2015 年 3 月 16 日保护级计算情况

Fig.7 Calculation of protection level of HKKT station on March 16, 2015

其他因素的影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] ELLIOTT D K, CHRISTOPHER J H. Understanding GPS: principles and applications[M]. 2nd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 230-233.
- [2] 牛 飞. GNSS 完好性增强理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2008.
- [3] 杨 林, 吴德伟, 卢 虎, 等. GNSS 组合系统用户完好性监测保护门限算法研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(10): 61-64.
- [4] 王雪艳, 李俊敏. 基于 RAIM 算法的 GNSS 完好性分析[J]. 中国科技信息, 2021(9): 86-88.
- [5] 冯 磊. 基于不同电离层模型的精密单点定位精度分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(1): 134-140.
- [6] 李启航, 王 剑, 刘瑞华. 45°(N) 纬度带的 Klobuchar-like 电离层延迟季节修正模型与评估[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(6): 30-37.
- [7] 章红平. 基于地基 GPS 的中国区域电离层监测与延迟改正研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海天文台), 2006.
- [8] RATNAM D V, DABBAKUTI J R K K, LAKSHMIN V V N J S. Improvement of Indian-regional klobuchar ionospheric model parameters for single-frequency GNSS users[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(7): 971-975.
- [9] JONGSINTA WEE S, RUNRAENGWAJIAKE S, SUPNITHI P, et al. Improvement of GPS positioning accuracy when utilizing Klobuchar model with ionospheric conditions in Thailand[C]//2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), June 28-July 1, 2016, Chiang Mai, Thailand. IEEE, 2016: 1-5.
- [10] TONGKASEM N, SUPNITHI P, PHAKPHISUT W, et al. Improvement of GPS positioning accuracy when utilizing Klobuchar model with ionospheric conditions in Thailand[C]//2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), June, JeJu, Korea (South). IEEE, 2019: 1-4.
- [11] NISHIMOTO K, OHASHI M, KUBO Y, et al. Determination of the parameters of a Japanese-regional klobuchar ionospheric model based on GR models and SCH analysis by GEONET data[C]//ION Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, 2013: 723-734.
- [12] 王文中, 张树生, 余隋怀. 基于粒子群优化的 BP 神经网络图像复原算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(4): 709-714.
- [13] ICAO. 航空电信: 第一卷 无线电助航设施(第七版): Annex 10[S]. Montreal: ICAO, 2018.
- [14] 李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.

(责任编辑: 孟 欣)

(上接第 52 页)

4 结语

由于 ADS-B 信号是脉冲信号, 故采用样本协方差估计理论协方差时, 会使 Capon 算法在进行交织信号分离时不能获得较为理想的性能。故本文分析了 ADS-B 信号的脉冲信号特性, 并利用其阵列响应特征, 提出了基于聚类加权协方差矩阵的 ADS-B 信号分离算法。首先根据前两阵元的接收信号幅值分析结果, 构建了有效的样本集, 并借助 K 均值聚类算法, 实现了对 ADS-B 二重交织信号快拍的初步聚类。再根据聚类中心坐标的模值, 对聚类结果进行二次筛选。最后, 利用基于聚类加权协方差的估计值代替 Capon 算法目标函数中原本采用的样本协方差, 加强权矢量对预消除信号的抑制, 实现了 ADS-B 信号的交织分离。仿真结果说明了利用基于聚类加权协方差矩阵估计的方法在多种情况下都使得原 Capon 算法性能有了显著提升。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局飞行标准司. 广播式自动相关监视(ADS-B)在飞行运行中的应用: IB-FS-2008-002[S]. 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2008.
- [2] 张召悦. 空管监视技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [3] SU Z G, DENG Q, HAO J T. A study on the collision probability of satellite-based ADS-B messages based on homogeneous Poisson process[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2020, 21(3): 845-857.
- [4] RTCA. Minimum operational performance standards for 1 090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information services-broadcast (TIS-B): RTCA DO-260B[S]. Washington DC: RTCA, 2009.
- [5] 张小飞, 汪 飞, 陈伟华, 等. 阵列信号处理的理论与应用[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [6] CAPON J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis [J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(8): 1408-1418.
- [7] PETROCHILIOS N, GALATI G, PIRACCI E. Separation of SSR signals by array processing in multilateration systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 965-982.
- [8] WANG W Y, WU R B, LIANG J L. ADS-B signal separation based on blind adaptive beamforming[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6547-6556.
- [9] HARTIGAN J A, WONG M A. Algorithm AS 136: a K-means clustering algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(1): 100-108.
- [10] 陈 庚. 基于十字阵列的 ADS-B 多类干扰抑制算法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- [11] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [12] 吴仁彪, 吴琛琛, 王文益. 基于累加分类的 ADS-B 交织信号处理方法[J]. 信号处理, 2017, 33(4): 572-576.

(责任编辑: 明 月)