

基于自适应 MIMO 技术的深空探测对流层延迟预测

邓 力^{1,2}, 陈 钱², 贺元骅^{1*}, 隋修宝²

(1. 中国民用航空飞行学院 民航安全工程学院, 四川 广汉 618307;
2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 在深空探测中探测信号经过对流层延迟后在接收机端信号将出现一定程度的时延, 影响探测精度。现有方法主要通过网格模型、空间模型实现时延预测, 但由于区域差异导致模型准确度受限, 预测精度仍有改进空间。提出了一种基于自适应多输入多输出 (MIMO) 信号的深空探测对流层延迟预测模型。基于单一收发天线模拟卫星信号 MIMO 传输方式, 然后构建自适应卡尔曼滤波器, 通过自适应调整 MIMO 信号分量权重系数的方法选取最优传输路径以实现对对流层延迟量的预测。参与测量的卫星数目为 4 颗, 在不同信噪比以及改变 MIMO 通道数目情况下开展实验, 研究自适应 MIMO 模型的准确度和实际测量误差。实验结果表明, 新方法相对于 GPT2 模型、GPT2w 模型以及实时导航定位中常用的 UNB3 模型、EGNOS 模型的预测精度有较大提高。

关键词: 深空探测; 对流层延迟; MIMO; 自适应卡尔曼滤波

中图分类号: V11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190471

Deep space detection tropospheric delay prediction based on adaptive MIMO technology

Deng Li^{1,2}, Chen Qian², He Yuanhua^{1*}, Sui Xiubao²

(1. College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;
2. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the deep space exploration, the signal is delayed by the troposphere and a certain delay will occur at the receiver end, which affects the detection accuracy. The existing methods mainly realize the delay prediction by the grid model and the space model, but the accuracy of the model is limited due to the regional difference, and the prediction accuracy still has room for improvement. In this paper, a deep-space tropospheric delay prediction model based on adaptive multiple-input multiple-output (MIMO) signals was proposed. The satellite signal MIMO transmission mode was simulated based on a single transceiver antenna, and then an adaptive Kalman filter was constructed. The optimal transmission path was selected by adaptively adjusting the weight coefficient of the MIMO signal component to predict the tropospheric delay. The number of satellites participating in the measurement was four. Experiments were carried out under different signal-to-noise ratios and changing the number of MIMO channels to study the accuracy and actual measurement error of the adaptive MIMO model. The experimental results show that the prediction accuracy of the new method is much higher than that of the GPT2 model, GPT2w model and the commonly used UNB3 model and EGNOS model in real-time navigation and positioning.

收稿日期:2020-02-25; 修订日期:2020-03-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0809500);国家自然科学基金(U1933105)

作者简介:邓力(1986-),男,讲师,硕士,主要从事航空安全、航空探测预警技术方面的研究。Email: bitdengli@163.com

通讯作者:贺元骅(1965-),男,教授,硕士,主要从事航空安全方面的研究。Email: he_yuan_hua@163.com

Key words: deep space exploration; tropospheric delay; MIMO; adaptive Kalman filter

0 引言

卫星信号在与地面传输过程经过大气层会产生信号时延,引起测距误差。精确估计对流层延迟是提高深空探测问题中卫星定位测距精度、信号时延估计精度的重要方法。对流层延迟主要包括干延迟(干分量)和湿延迟(湿分量),天顶方向的干延迟可达 2~3 m,模型改正精度可以达到 90%~95%,实际测量中环境是复杂的,现有的模型采用单一天线测量,探测范围及性能有限,需要探求更精确有效的测量方法^[1]。

目前,常用的对流层延迟改正方法主要有模型改正法、参数估计法以及外部修正法等,预测结果的可靠性主要取决于预测模型的准确性和稳定性^[2]。模型改正法缺少实时的气象参数时,改正精度并不高;参数估计的方法一般应用于长基线,这将导致基线两端参数相关性较小;外部修正法精度高,但是对测量设备的要求相当高,难以应用到实际预测模型中。文中在参数估计法的基础上提出一种基于多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)信号参数估计的自适应时延预测模型,弥补了单一天线误差估计精度不足的问题。

1 现有对流层模型分析

1.1 空间模型

空间探测信号经过对流层时延后具有较强的空间相关特性,也具有一定的规律性。在区域精密对流层建模问题中,经度在区域对流层建模中影响较小,纬度和高程信息是影响对流层分布的主要因素,建立了天顶对流层延迟与高程差及纬度的函数关系^[3]。

$$ZTD(h, f(x)) = \sum Ahf(x) \quad (1)$$

式中: $f(x)=\cos 2x$; h 为观测站所在大地高度; x 的取值为观测站纬度; A 为矩阵参数。该模型通过建立天顶时延函数提高预测精度,缺点是在海拔较高处矩阵出现严重病态。

1.2 网格模型

在经验模型中,网络模型精度较高,文中选用 GPT2 及 GPT2w 与提出的方法进行比较,气温、加权平均温度等气象参数^[4]采用 GPT2w 提供的气压参

数。这两种模型计算天顶湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)的方法类似,方法如下:

$$ZWD = 10^{-6}(a+b/T) \frac{R}{(1+q)g} p \quad (2)$$

式中: a 和 b 为经验参数; T 为加权平均气温; R 为干气常数; g 为重力参数; p 为环境水汽压; q 为水汽变化梯度。GPTw2 网络是目前精度较高的模型之一,但由于没有充分利用局部地区对流层参数,精度上略低于区域对流层模型。文中 GPTw 及 GPTw2 模型采用分辨率^[5]为 0.5°的网格。

2 自适应系统建模

2.1 MIMO 技术

为了消除天线差异带来的时延预测误差,采用单一天线通信系统^[6],接收机端的带噪声信号可以描述为:

$$x(t) = s(t) + u(t) + v(t) \quad (3)$$

式中: $v(t)$ 为复高斯白噪声,具有 0 均值与固定方差; $s(t)$ 为发送的信号; $u(t)$ 为多径干扰信号。为方便讨论,文中采用 BFSK 作为基带信号^[7]。因此, $s(t)$ 可描述为:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) \quad (4)$$

$$s_i(t) = A \sum_{n=1}^k M \text{rect} \left[\frac{t - T_i/2 - (m-1)T_i}{T_i} \right] \exp(2\pi j t f_n) \quad (5)$$

式中: A 为信号幅值; M 为系数矩阵; T 为符号周期; f 为基带信号频率。将信号采样离散化后可以得到信号格式为:

$$x[n] = s[n] + u[n] + v[n] \quad (6)$$

设信道传输矩阵为 H , 则接收端收到的复采样信号为:

$$R = H(X + U) + \bar{V} \quad (7)$$

文中采用单一 GPS 天线模拟^[8]MIMO 信号,发送信号为多个 $s(t)$ 信号的叠加。

$$S = [s^1(t), s^2(t), \dots, s^k(t)]^T \quad (8)$$

式中: S 为 MIMO 信号发送矩阵; k 为信号通道数。在对流层延迟预测模型中,由于该模拟信号由单一天线

发出,则对流层延迟参数对于每个信号通道来说相等。

2.2 自适应预测模型

预测信号在空间传播过程中,经过大气层会发生信号衰减与折射,到达地面接收机时将产生时延误差。对流层由于高度低于电离层且接近地面^[9],大气状变化更为明显,理想情况下卫星信号在真空中传播的速度为 $c = 299792.458 \text{ km/s}$,假设地面接收机测得的第 i 颗卫星的伪距为 D_i ,第 i 颗卫星信号至接收机到达时间 TOA 为 t_i ,接收机与卫星时钟偏差为 Δt ,则 D_i 可表示为:

$$D_i = c(t_i - \Delta t) \quad (9)$$

对于 MIMO 传输信号,第 j 个通道中卫星 i 的传播时延为 $t_{i,j}$,则信号到达接收机的伪距误差如下:

$$\Delta_{i,j} = t_{i,j} \times c + u_{i,j} \quad (10)$$

式中: u 为多径干扰项。对 j 个通道误差取算术平均,可以得到第 i 个卫星进行对流层延迟预测的平均误差 $\text{err}[i]$,如公式 (11) 所示:

$$\text{err}[i] = \sum_j^k \Delta_{i,j} \quad (11)$$

3 模型计算与分析

3.1 自适应滤波器构建

由于参与对流层时延的每个卫星传播路径及距离均不相同,文中求取最终时延结果时对不同传输路径的 MIMO 预测结果进行加权平均,采取自适应卡尔曼滤波的方式确定权重系数。构建自适应卡尔曼滤波器^[10],引入时间因子 p ,在时刻 p 第 i 颗卫星测量信号的传播时延记为 $\Delta_{i,j}(p)$,系统状态方程如下:

$$\hat{g}_i(p+1) = F[g_i(p)] + w_i(p) \quad (12)$$

其中, $\hat{g}_i(p+1)$ 为 $p+1$ 时刻第 i 颗卫星时延预测权重的估计量;函数 F 为:

$$F[g_i(p)] = g_i(p) - \Delta_{i,j}(p) \quad (13)$$

$w_i(p)$ 为该卡尔曼滤波器的过程噪声,并假设为高斯白噪声。则 p 时刻的时延预测误差为:

$$\text{err}(p) = \frac{1}{kQ} \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^k g_i(p) \Delta_{i,j}(p) \quad (14)$$

3.2 权重计算结果分析

基于广汉机场 2019 年气象观测站点采样率为 3 h

的对流层数据进行区域对流层延迟建模,为改善数据完整性,实际建模中使用年积日 1~80 天的数据进行模型参数的初始化,采用观测站的大地坐标和 ZTD 数据进行模型精度评定。MIMO 预测模型采用的 GPS 卫星经过 RAIM(Receiver Autonomous Integrity Monitoring)完好性检测^[11],自适应卡尔曼滤波器在 1 h 内完成预测模型的权重计算,并输出最终时延预测结果。

文中实验中一共用到 4 颗卫星,单次实验计算的归一化权重系数如下:

$$(\tilde{w}_{1,1}, \tilde{w}_{1,2}, \tilde{w}_{1,3}, \tilde{w}_{1,4}) = (0.125, 0.233, 0.619, 0.012)$$

$$(\tilde{w}_{2,1}, \tilde{w}_{2,2}, \tilde{w}_{2,3}, \tilde{w}_{2,4}) = (0.013, 0.331, 0.469, 0.204)$$

$$(\tilde{w}_{3,1}, \tilde{w}_{3,2}, \tilde{w}_{3,3}, \tilde{w}_{3,4}) = (0.047, 0.028, 0.875, 0.106)$$

$$(\tilde{w}_{4,1}, \tilde{w}_{4,2}, \tilde{w}_{4,3}, \tilde{w}_{4,4}) = (0.579, 0.328, 0.009, 0.117)$$

式中: $\tilde{w}_{i,j}$ 为第 i 颗卫星第 j 通道 MIMO 预测信号的权重系数,归一化权重系数后取值范围在 $[0, 1]$ 区间内。重复 10 次实验,自适应滤波的迭代次数为 5 000,权重系数 MSE 如图 1 所示。

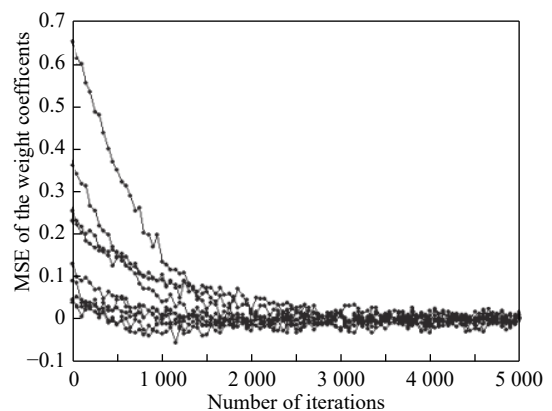


图 1 权重系数 MSE 变化

Fig.1 MSE fluctuation of the weight coefficients

分析可知当迭代次数大于 3 000 时,算法能够收敛到稳定的权重系数。实验计算滤波器达到稳态情况下,当自适应 MIMO 算法通道数目为 3、6、9 时,权重系数均方误差,经过相应次数迭代计算,产生的权重系数误差如图 2 所示。

由图 2 实验结果可知,10 次实验中权重系数更新产生的误差接近于稳态,这是因为在 1 h 的实验周期内,对流层参数基本恒定不变,当滤波器收敛后得到的权重系数更接近真实的情况。将文中提出的算法与 GPT2、GPT2w、UNB3 以及 EGNOS 模型^[10]进行比较,结果如表 1 所示。

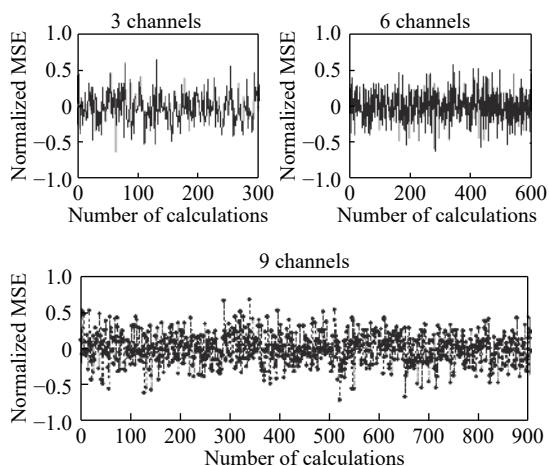


图 2 权重系数误差

Fig.2 Weight coefficients errors

表 1 不同模型计算误差比较

Tab.1 Comparison of calculation errors of different models

Error distribution	Average STD/mm	Average BIAS/mm
GPT2	6.012	0.028
GPT2w	5.725	0.034
UNB3	7.132	0.012
EGNOS	6.249	0.076
Adaptive MIMO	5.683	0.083

比较结果可以看出, 5 种模型的 BIAS 都较小, 说明模型的稳定性较好, 文中提出自适应 MIMO 算法的误差区间在 [-10 cm, 10 cm] 范围内, 优于 GPT2、GPT2w、EGONS 和 UNB3 模型, 但系统稳定性不及这 4 种模型。5 种模型时延预测误差进行比较如图 3 所示。

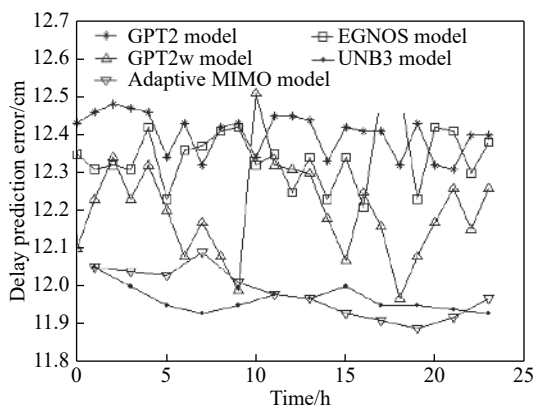


图 3 时延预测误差比较

Fig.3 Comparison of delay prediction errors

由于权重系数的加权导致 MIMO 信号不同通道的信号能量不一致, 接收机端总的信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 为:

$$SNR = \frac{\sum_k E_{2FSK}}{E_v + E_J} \quad (15)$$

在不同 SNR 下根据自适应 MIMO 信号观测值计算对流层延迟误差, 结果如图 4 所示。

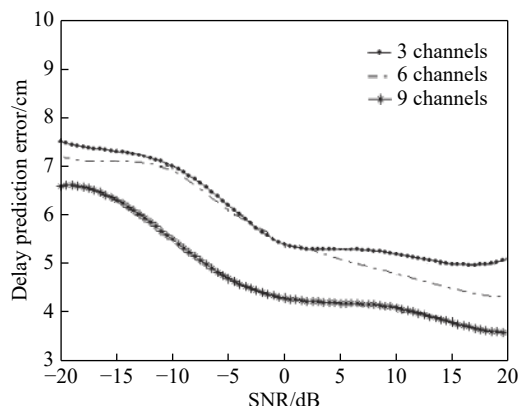


图 4 不同 SNR 时延预测误差

Fig.4 Delay prediction errors with different SNR

实验结果表明, 自适应 MIMO 算法的时延预测模型精确度随信噪比 SNR 的增大而提高, 且当通道数目更大时, 预测误差将显著下降。

4 结 论

文中基于 MIMO 技术提出一种自适应 MIMO 方法改善深空探测中卫星信号对流层延迟测量误差。实验结果与现有对流层延迟预测模型 GPT2、GPT2w、EGNOS 以及 UNB3 进行了对比, 结果表明文中算法预测精度更优, 并且能通过提高 MIMO 通道数的途径进一步提高预测模型精度。该技术于卫星导航定位及深空探测信号处理领域具有广阔的应用前景。

在此次实验中发现, 虽然增加自适应 MIMO 方法通道数目能改善模型精度, 但是当通道数目过大时, 信噪比 SNR 会显著下降, 从而导致预测精度的降低, 下一步将通过采取多天线收发模式改进这类问题。

参考文献:

[1] Du Xiaoyan, Qiao Jiang, Wei Peipei. A real-time correction model for tropospheric zenith delay in China [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 156-164.

- (in Chinese)
- [2] Zhang Yu, Li Shuang, Zhu Yifan, et al. Accuracy analysis of tropospheric delay correction model of Beidou system [J]. *Radar Science and Technology*, 2018, 16(4): 366–370. (in Chinese)
- [3] Huang Liangke, Li Chen, Huang Junsheng, et al. Applicability Analysis of GPT2w Tropospheric Delay Model in Guangxi Region [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2018, 38(2): 289–294. (in Chinese)
- [4] Liu Chen, Zheng Nanshan, Feng Qiulin. Quality Evaluation of Global Tropospheric Delay Model [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(10): 1005–1010. (in Chinese)
- [5] Hu Yufeng, Yao Yibin. A new method for vertical stratification of zenith tropospheric delay [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(9): 2857–2866.
- [6] Han Liping, Cheng Gen, Han Guorui, et al. Reconfigurable ultra - wideband monopole antenna with single-, dual-, and triple-band notched functions [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2019, 29(9): 21837.
- [7] Gao Tongqiang, Chen Zhenxiong, Zhao Siqi, et al. A BFSK and OOK IF demodulation circuit with 2.8 μs settling time and reconfigurable image rejection functions for MICS/BCC applications [J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(7): 109–114.
- [8] Shahabi S M M, Ardebilipour, Yasaman Omid. Low-complexity fairness-driven pilot decontamination schemes for multi-cell massive MIMO systems [J]. *Physical Communication*, 2019, 36: 100803.
- [9] Duan Chenglin, Ma Chuanling, Cao Jianfeng, et al. A new method for correction of tropospheric refraction at low elevation angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1195–1199. (in Chinese)
- [10] Yao Yi Bin, Zhang Bao, Xu Chaoqian, et al. A global empirical model for estimating zenith tropospheric delay [J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2016, 59(1): 118–128. (in Chinese)