

基于 K-SVD 的星载 GPS 观测数据压缩方法

刘迎娜, 赵里恒, 李宏刚, 董娟娟, 李伟超

(航天恒星科技有限公司, 北京 100095)

摘要: 空间飞行器主要采用双频 GPS 精密定轨技术提高轨道预报精度, 但需对双频 GPS 导航系统的观测数据进行预存储, 为星载固存的存储资源增加负担; 为此, 文章提出了针对星载 GPS 观测数据的压缩方法, 该方法引入稀疏表示理论, 采用 K 奇异值分解 (K-SVD, k-singular value decomposition) 字典学习方法构建出压缩字典, GPS 导航系统将采集的观测数据时间序列稀疏分解到 K-SVD 压缩字典中, 达到数据压缩目的; 通过地面仿真验证, 该方法不仅具有高压缩比、低失真率等特点, 还能够降低 GPS 观测数据的噪声水平, 从而提升了 0.2~0.36 mm 的精密定轨精度, 并且该方法适合不同轨道高度的低轨飞行器应用。

关键词: 双频 GPS 精密定轨技术; GPS 观测数据; 时间序列, K-SVD; 稀疏分解; 数据压缩; 压缩比

Compression Method of GPS Observation Data for Satellite Navigation Based on K-SVD

LIU Yingna, ZHAO Liheng, LI Honggang, DONG Juanjuan, LI Weichao

(Space Star Technology Co., Beijing 100095, China)

Abstract: Spacecraft mainly adopts Dual-frequency GPS precision orbit determination technology to improve orbit prediction accuracy, but it's necessary to pre-store GPS observation data, which increases burden on the storage resources stored of spacecraft. So, problem of on-orbit compression of GPS's observation data needs to be studied and solved urgently. Combined with sparse representation theory, introduce sparse representation theory and uses K-Singular Value Decomposition (K-SVD) dictionary learning method to construct a compression dictionary, GPS navigation system collected observation data time series and sparsely decomposed into K-SVD compression dictionary to achieve GPS's Observer data compression. Through ground simulation verification, method not only has the characteristics of high compression ratio, low distortion rate, etc., but also can reduce the noise level of GPS observation data, thereby improve the precision orbit determination accuracy of 0.2~0.36 mm, and can be used by spacecraft of different orbital altitudes applications.

Keywords: Dual-frequency GPS precision orbit determination technology; GPS's observation data; Time series data; K-SVD, sparse decomposition; data compression; compression ratio

0 引言

随着卫星对地观测技术的发展, 低轨空间飞行器已应用于资源遥感、大气探测、重力场精化、地磁探测和海洋动力环境研究等领域, 并且低轨飞行器大部分应用领域, 对卫星轨道精度有较高要求, 例如海洋测高卫星 TOPEX 要求轨道径向精度优于 5cm [Melbourne, 1994] 等^[1-2], 促使低轨空间飞行器精密定轨技术^[3]得到快速发展。精密定轨技术需空间飞行器事先对星载 GPS 导航系统的观测数据进行存储, 再分时下传到测控站, 考虑到星载 GPS 观测数据存在数据量大的特点, 为星载固存^[4]的存储资源增加负担, 提出了 GPS 观测数据压缩处理的工程应用需求。

目前相关方面研究主要面向地面 Rinex 格式 GPS 观测数据的压缩^[5-6], 根据数据中字符出现的冗余情况, 对其进

行熵编码实现数据压缩, 为无损压缩方法, 此类方法对文本文件压缩具有应用优势, 但对于星上实时产生的二进制 GPS 观测数据时间序列, 压缩效果不明显, 且计算复杂度, 无法满足在轨使用。除无损压缩方法外, 基于信号变换的有损压缩方法在声波、地震时间序列以及图像等应用中取得了显著成果, 该方法主要利用信号处理中存在某些频率成分不敏感特征, 允许压缩过程中损失一定的信息, 虽然不能完全恢复原始数据, 但所损失的部分特征不影响信号处理应用, 从而达到高的数据压缩比 (压缩前数据量与压缩后数据量的比值), 较为常用的方法有傅里叶变换、DCT 变换以及小波变换等。星载 GPS 观测数据属于精密测量信息, 在高压缩比条件下使用上述方法, 将大量丢失 GPS 观测数据的内部结构信息, 无法满精密定轨处理要求。

收稿日期: 2021-07-08; 修回日期: 2021-07-23。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501300, 2016YFB0501304)。

作者简介: 刘迎娜(1980-)女, 北京市, 硕士, 高级工程师, 主要从事中低高轨空间飞行器导航系统等方向的研究。

引用格式: 刘迎娜, 赵里恒, 李宏刚, 等. 基于 K-SVD 的星载 GPS 观测数据压缩方法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 174-181.

信号稀疏表示理论在信号处理应用中是一个非常引人关注的研究领域, 其目的就是在给定的完备字典中用尽可能少的原子来表示信号, 获得信号更为简洁的表示方式, 利用信号的稀疏性, 可实现信号压缩应用, 并成功应用于图像^[7-8]、地震^[9]等数据压缩。

本文对稀疏表示理论在 GPS 观测数据的压缩应用进行研究, 提出了基于 K-SVD 的 GPS 观测数据压缩方法。利用一个通过训练样本训练获得的 K-SVD 压缩字典, 对 GPS 观测数据时间序列进行稀疏表示, 并对表示系数中非零元素位置和数值进行存储和传输, 从而实现 GPS 观测数据压缩。

1 稀疏表示理论

通常, 有限维空间 R^N 中的一维离散信号 y 可以线性表示为:

$$y = D\xi \tag{1}$$

其中, $D = [d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_K]^T \in R^{N \times K}$ 是 R^N 空间中的一组表示基函数; d_i 为字典 D 的第 i 个原子; $\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_N]^T$ 是信号 y 在字典 D 上展开的系数向量。如果 y 能够用 S 个基向量的线性组合近似表示, 近似表示结果不影响信号 y 的后处理应用, 且 $S \geq N$, 则称信号 y 在表示基上具有稀疏性 (或可压缩性), S 为 y 的稀疏度。将稀疏表示应用于数据压缩, 压缩比可近似表示为 $\rho \approx N/S$ 。

稀疏表示问题可分为稀疏编码和字典学习两部分。给定信号 y 和字典 D , 稀疏编码就是寻找稀疏解 ξ 的过程, 它可以表示为如式 (2) 所示的优化问题:

$$\min_{\xi} \|\xi\|_0, s.t. y = D\xi \tag{2}$$

式 (2) 为 l_0 范数最小化问题, 通常采用贪心算法近似求解该问题, 如正交匹配追踪^[10] (Orthogonal Matching Pursuit, OMP)。与稀疏编码不同, 字典学习用于估计基函数字典 D 。给定一个包含 P 个信号的训练样本集合 $Y = \{y_i | y_i \in R^N\}, 1 \leq i \leq P$, 字典可以通过求解公式 (3) 的优化问题获得。

$$\min_{D, \{\xi_i\}_{i=1}^P} \sum_{i=1}^P \|y_i - D\xi_i\|_F^2, s.t. \|\xi_i\|_0 \leq S \tag{3}$$

其中: $\|d_k\|_2 = 1, 1 \leq k \leq K$; ξ_i 为信号 y_i 在字典 D 中线性表示的系数; S 为 ξ_i 中非 0 元素的个数。

2 GPS 观测数据压缩方法

星载 GPS 导航系统通过接收处理 GPS L1、L2 双频点导航信号^[11-12], 计算获取表征 GPS 导航接收机与 GPS 星座相对位置关系的伪距、载波相位等测量量, 统称为 GPS 观测数据, 如图 1 所示。

那么 GPS 观测数据组成的时间序列为描述 GPS 导航接收机与 GPS 星座之间相对运动关系的离散采样信号, 具体实例见图 2 所示。

不同时间段对同一颗 GPS 星号、相同时间段对不同 GPS 星号的观测数据时间序列的内部结构相似、且简单,

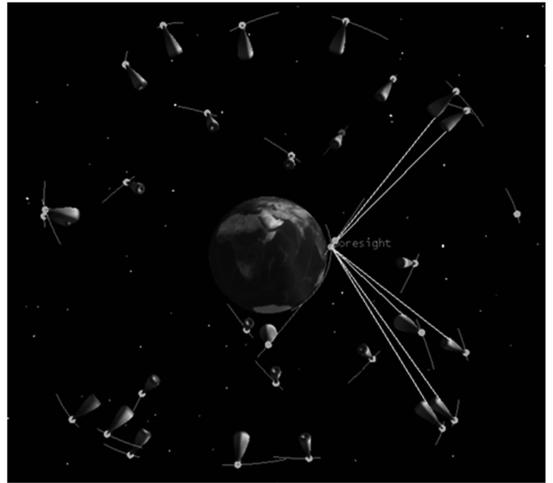


图 1 低轨卫星与 GPS 星座空间位置关系图

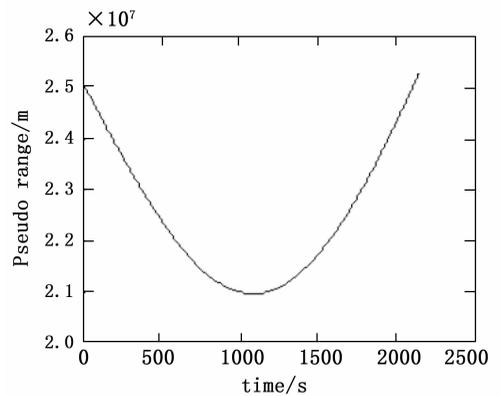


图 2 对 GPS_25 号星的伪距观测数据时间序列

存在信息冗余, 能够通过稀疏表达方式, 实现 GPS 观测数据时间序列压缩。

具体压缩流程如图 3 所示。

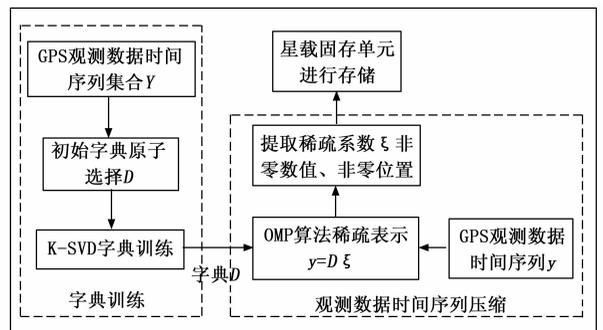


图 3 GPS 观测数据时间序列压缩方法框图

2.1 训练样本选取

将 GPS 观测数据时间序列裁剪成短时长时间序列集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m, \dots, y_p\} \in R^{N \times P}$, 作为字典学习样本集合, 其中 $y_m = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_N\}^T \in R^{N \times 1}$, a_i 表示 GPS 观测数据时间序列 y_m 中第 i 个观测点, 具体裁剪实例如图 4~5 所示。

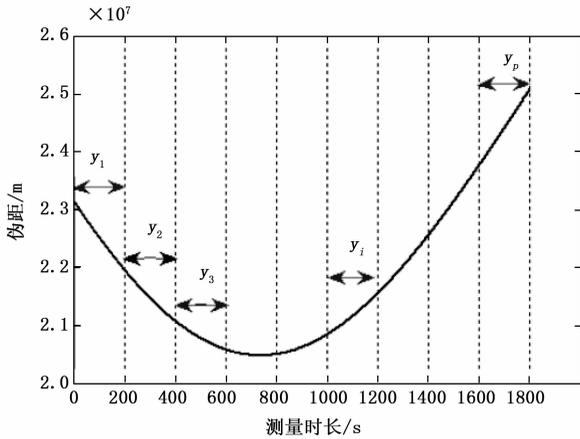


图 4 时长为 1 800 s 的伪距观测数据时间序列变化曲线

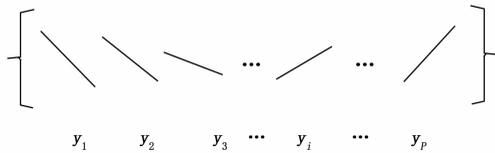


图 5 伪距组成的时间序列集合 (N = 200 s)

2.2 字典 D 初始化方法

主成分分析^[13] (PCA, principal component analysis) 是基于变量协方差矩阵原理完成对信号的逻辑处理和特征提取的科学方法, 同时也是一种最基本的数据降维方法, 被广泛用于图像去噪^[14]、图像分类^[15]等, 同时也被用于数据处理中参数初始化操作, 提高优化处理收敛速度^[16]。本文引用 PCA 方法初始化公式 (3) 中的矩阵 D , 将缩短最优字典 D 的求解时间。

GPS 观测数据时间序列样本集合 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\} \in \mathbf{R}^{N \times P}$ 为数据集合, 通过优化求解公式 (4) 目标方程获取主成分矩阵 $U = W^T Y$ 。

$$\max_{W^T Y Y^T W} s. t. W W^T = 1 \quad (4)$$

需计算数据矩阵 Y 的协方差矩阵, 对计算带来困难, 引入了奇异值分解 (SVD, singular value decomposition) 方法, 即 $Y = U \Sigma V$ 。其中, V 等价于 PCA 算法中 W 投影矩阵; U 即为主成分矩阵; Σ 为对角阵, 表示 Y 投影到新坐标系下的权值系数。

2.3 字典学习方法

K-SVD^[17] 是 K-均值聚类 (K-means) 的一般形式, 通过字典更新、稀疏编码交替应用, 实现对字典的自适应调整。稀疏编码过程, 使用 OMP 编码方法; 字典更新过程使用奇异值分解 (SVD)。

具体学习流程如下所示:

参数初始化: 给定 GPS 观测数据组成的时间序列数据集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m, \dots, y_p\} \in \mathbf{R}^{N \times P}$, 对其进行主成分分析获取主成分矩阵 U , 作为字典 $D^{(0)} \in \mathbf{R}^{N \times K}$, 最大迭代次

数为 $Iter$, 稀疏编码中非零个数惩罚项为 S 。

1) 稀疏编码阶段, 使用 OMP 对目标函数公式 (2) 进行稀疏分解, 得到稀疏系数矩阵 $\xi = \{\xi_i\}, i = 1, 2, \dots, P$ 。

2) 字典更新阶段, 固定稀疏系数矩阵 ξ , 逐列更新字典 D 中的原子。

(1) 假定当前正在更新的字典原子为 d_k , 记 $I_k = \{i \mid \xi_i(k) \neq 0, 1 \leq i \leq P\}$, 其中 $\xi_i(k)$ 为 ξ_i 中的第 k 个元素, I_k 表示全部训练样本中用到原子 d_k 的索引集;

(2) 计算残差 $E_k = Y - \sum_{j \neq k} d_j \xi_j^T$, 其中 ξ_j^T 为 ξ 中的第 j 行; E_k 表示去除 d_k 后的误差;

(3) 选取 E_k 中与 I_k 存放的索引相对应的列, 构成新的误差矩阵 E_k^R ; 对其进行奇异值分解运算 $E_k^R = U \Sigma V^T$, 将矩阵 U 的首列作为更新后的原子 d_k , 然后将半正定对角矩阵 $\Sigma(1, 1)$ 与矩阵 V 的首列进行相乘作为更新后的稀疏系数;

(4) 计算 K 次, 对 D 所有原子更新一遍, 获得 $D^{(n+1)}$ 。

3) 终止条件判断阶段, 令 $n = n + 1$, 判断是否满足 $n > Iter$, 若满足, 停止迭代, 否则, 继续执行 1) ~ 3)。

2.4 GPS 观测数据压缩

导航接收机积累 N 时长的 GPS 观测数据时间序列后, 使用 K-SVD 对其进行稀疏编码, 并将获取表示系数中的非零数值、非零位置存储到星上固存单元, 达到 GPS 观测数据压缩目的, 数据压缩比近似为 N 与稀疏度 S 的比值。

3 实验验证

通过仿真软件获取理论 GPS 观测数据时间序列, 生成训练样本集合, 使用文中提到的方法训练获得 K-SVD 字典。通过地面仿真, 获取不同轨道高度场景下双频 GPS 导航接收机生成的压缩前/后观测数据, 对观测数据重构精度进行分析, 并对比 GPS 观测数据压缩前后的数据质量、精密定轨精度; 同时引入实际在轨 GPS 观测数据, 对其进行压缩重构后精密定轨精度进行分析, 检验方法的有效性。

3.1 压缩字典获取

3.1.1 参数设置

使用 SimGEN 软件仿真获取 650 km 轨道高度的无测量噪声的星载 GPS 观测数据, 仿真软件界面、软件参数设置详见表 1 所示。

表 1 SimGEN 软件参数设置

参数名称	参数值
UTC 起始时间	2020.01.01 00:00:00
半长轴/m	7020000.000 000
轨道倾角/(°)	97.339 541
升交点赤经/(°)	15.121 105
偏心率	0.001 010 8
平近点角/(°)	202.665 45
近地点角/(°)	116.143 05
GPS 观测数据生成频率	1 Hz

将 GPS 观测数据时间序列长度 N 设置为 30 s; 稀疏度

S 设置为 4; 字典迭代次数 *Iter* 设置为 800。那么数据压缩比即为 $\rho \approx N/S \approx 7.0$ 。

3.1.2 字典训练收敛性分析

对 K-SVD 压缩字典进行迭代更新, 并按照公式 (5) 评估字典优化过程收敛情况。

$$error = \sum_{i=1}^p \|y_i - D\xi_i\|_2^2 \quad (5)$$

通过误差收敛曲线分析可知, 使用 PCA 初始化压缩字典后的第一次字典更新完成获得的字典已具有高精度稀疏稀疏表达训练样本的能力, 经过多次调整, 最终在第 600 次迭代更新后完成收敛, 获得最优 K-SVD 压缩字典, 如图 6 所示。

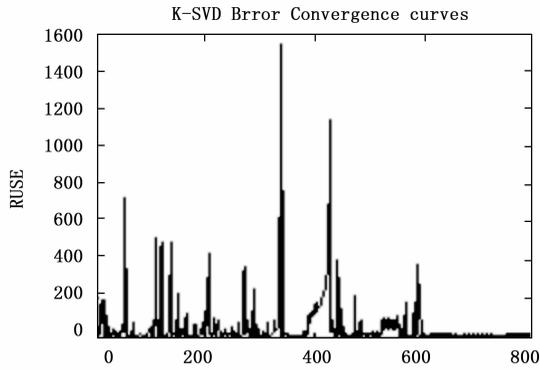


图 6 K-SVD 学习过程误差收敛曲线

3.1.3 字典结构分析

对 K-SVD 字典中的原子分别进行分析可知, 训练获取的 K-SVD 字典为表征信号运动规律 (一次、二次、三次曲线变化规律) 的基函数集合, 与 GPS 观测数据组成的时序信号内在结构信息一致, 具体基函数变化规律如图 7 所示。

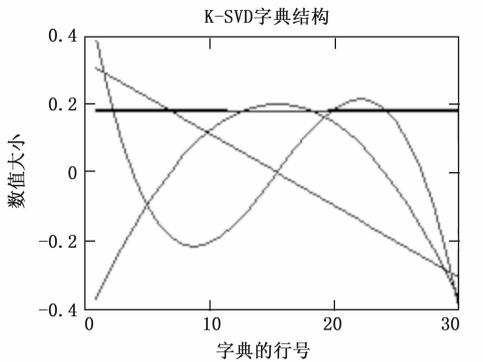


图 7 字典中基函数变化曲线图

随机选择 100 个测试样本, 按照不同稀疏度约束, 使用 K-SVD 字典对其进行稀疏分解, 按照公式 (5) 计算稀疏重构误差, 具体误差值如表 2 所示。

表 2 重构误差统计表

稀疏度	1	2	3	4	5
重构误差	2.43e+12	1.04 e+08	5.15e+02	3.18e-2	3.18e-2

由表可知, 当稀疏度 > 4 时, 稀疏表达精度无明显提升, 因此 GPS 观测数据时序信号在上述训练获取的 K-SVD 字典中是稀疏的, 且稀疏度为 4。

稀疏度固定后, 相应压缩比将固定。实际工程应用中, 双频 GPS 接收机每秒产生 560 字节的 GPS 观测数据, 使用 K-SVD 字典稀疏表达方式, 可对连续观测 24 小时共 48.38 兆字节观测数据压缩到 6.912 兆字节, 具有显著的压缩效果。

表 3 压缩前后数据量对比表

项目	压缩前	压缩后
数据量(字节)	48.384 兆	6.912 兆

3.2 地面设备仿真实验

使用双频 GPS 导航系统、思博伦 GPS 信号模拟源、上述训练获取的 K-SVD 压缩字典以及 4 种不同轨道高度的轨道参数等, 开展地面仿真测试。

具体仿真轨道参数如表 4 所示。

表 4 仿真轨道信息

名字	国际代号	轨道参数	轨道高度/km
ZIYUAN 3-1	2012-001A	1 38046U 12001A 21015.13679808.00000750 00000-0 36586-4 0 9990 2 38046 97. 3991 91. 9912 0003943 138. 4756 308. 7527 15.21291641500802	≈500
HAIYANG -2A	2011-043A	1 37781U 11043A 21015.14879970 -. 00000029 00000-0 14880-4 0 9996 2 37781 99. 3166 25. 0691 0001414 115. 6135 244. 5163 13.78725462474215	≈910
GAOFEN 2	2014-049A	1 40118U 14049A 21015.18235356.00000082 00000-0 17356-4 0 9990 2 40118 97. 8219 93. 4344 0007351 190. 0159 170. 0919 14.80646077346407	≈650
ZIYUAN1 -02C	2011-079A	1 38038U 11079A 21015.12734959 -. 00000292 00000-0 -86305-4 0 9990 2 38038 98. 6618 75. 0527 0007384 9. 3744 350. 7615 14.35290341475136	≈770

3.2.1 重构精度分析

考虑到信号处理射频电路中带电粒子的热运动形成热噪声等，双频 GPS 接收机实际观测的 GPS 数据中将存在噪声，使用 K-SVD 字典对其进行压缩重构，重构误差将大于字典学习误差收敛值，但重构误差需控制在 <5 cm 范围内，才可满足厘米级精密定轨应用需求。

对实验获取的 L1、L2 载波相位测量数据重构精度进行分析，使用相同的 K-SVD 压缩字典对不同轨道高度 GPS 观测数据压缩后的重构误差均 <5 cm，压缩重构后数据满足厘米级精密定轨要求，具体详见图 8~11 所示。

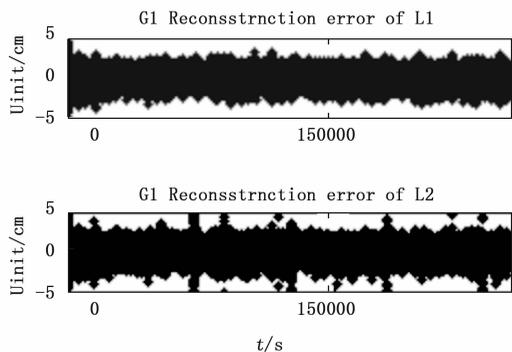


图 8 ZIYUAN 3-1 载波相位测量值压缩重构精度

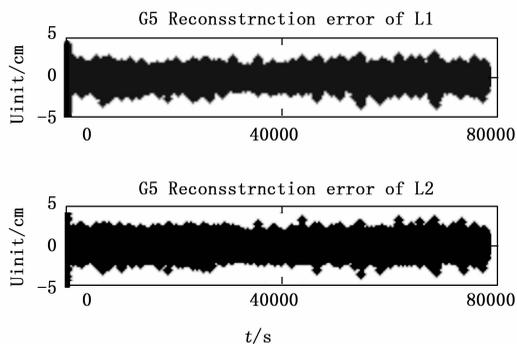


图 9 HAIYANG-2A 载波相位测量值压缩重构精度

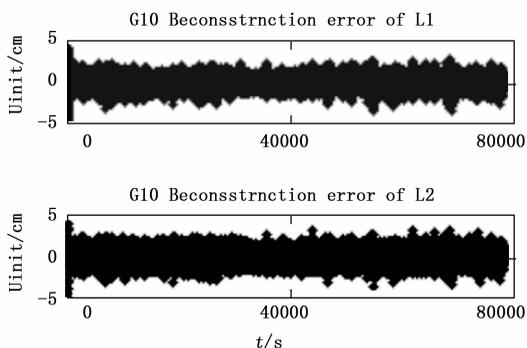


图 10 GAOFEN 2 载波相位测量值压缩重构精度

3.2.2 观测数据质量分析

使用伪距相位差 (code minus phase combination, CC)

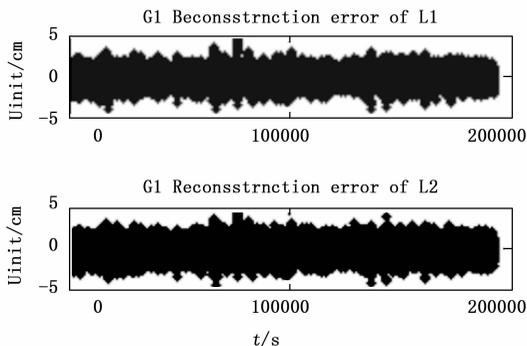
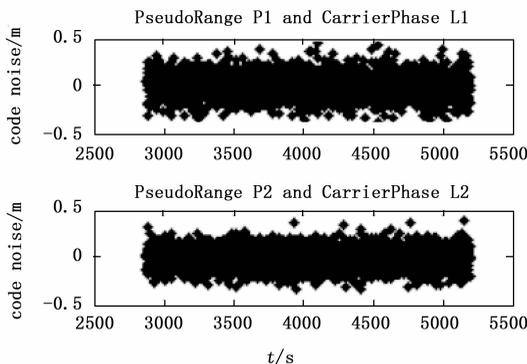
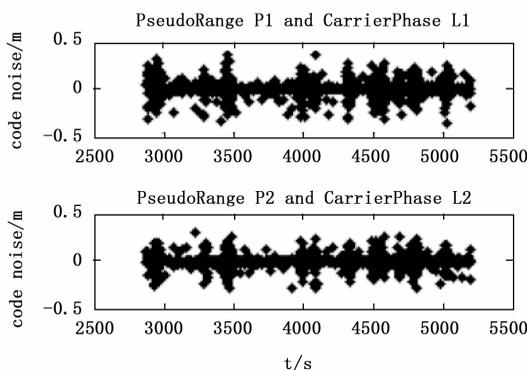


图 11 ZIYUAN1-02C 载波相位测量值压缩重构精度

组合法^[18]评估压缩前后 GPS 观测数据的噪声水平，可知相同 K-SVD 字典压缩重构出的不同轨道高度 GPS 观测数据的噪声水平均明显低于压缩前 GPS 观测数据，说明 K-SVD 字典在 GPS 观测数据压缩应用中表现出显著的降噪效果，具体详见图 12~15 所示。



(a) 压缩前GPS观测数据噪声



(b) 重构后GPS观测数据质量

图 12 ZIYUAN 3-1 轨道 GPS 观测数据质量

3.2.3 精密定轨处理仿真

使用精密定轨技术^[3]，对 GPS 观测数据进行精密定轨处理，并与理论轨道做差，获取 X、Y、Z 轴方向的轨道位置误差，误差曲线的标准差统计即为精密定轨精度。

通过精密定轨处理分析可知，使用 K-SVD 字典压缩

后 GPS 观测数据的精密定轨精度优于压缩前观测数据, 具体精密定轨精度比对如表 5 所示, 精密定轨误差曲线图如图 16~19 所示。主要由于 K-SVD 字典的压缩方法, 可通过降低 GPS 观测数据的噪声水平提升了观测数据的质量, 从而提升了精密定轨精度。

表 5 精密定轨误差结果(轨道仿真) m

Name	类型	ΔX	ΔY	ΔZ
ZIYU AN	压缩前	0.014 2	0.004 7	0.008 9
	重构后	0.013 3	0.003 9	0.007 5
HAIY	压缩前	0.006 8	0.009 7	0.017 7
	重构后	0.004 8	0.006 2	0.014 1
GAO	压缩前	0.006 1	0.005 4	0.007 7
	重构后	0.005 8	0.005 2	0.007 2
ZIYUA	压缩前	0.011 8	0.006 9	0.009 5
N1-02C	重构后	0.010 4	0.005 6	0.008 0

具体精密定轨精度曲线见图 16~19 所示。

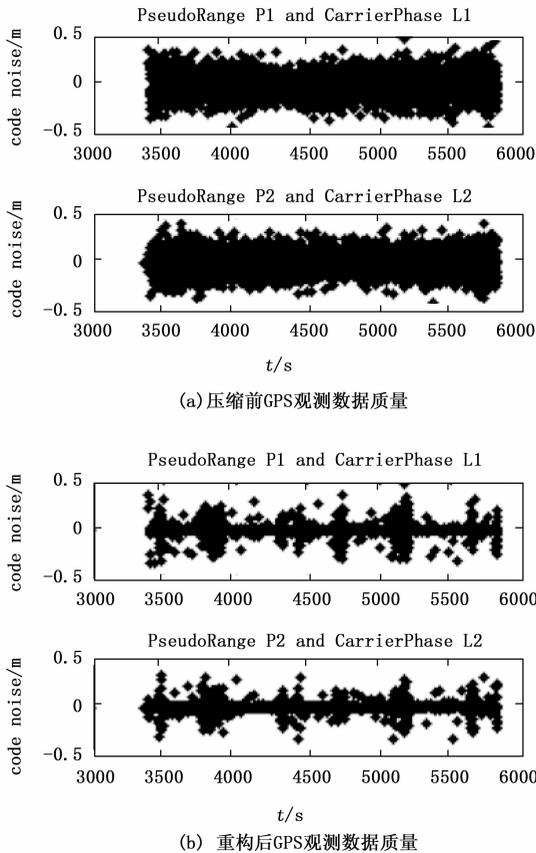
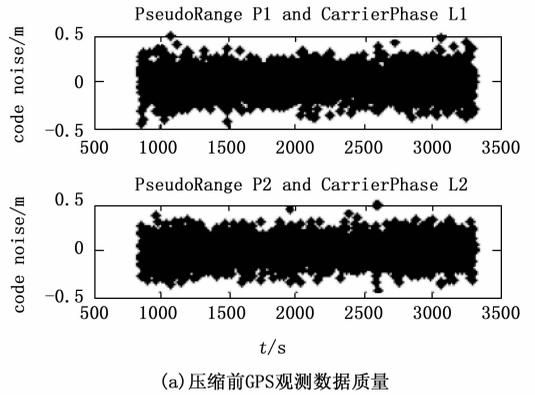


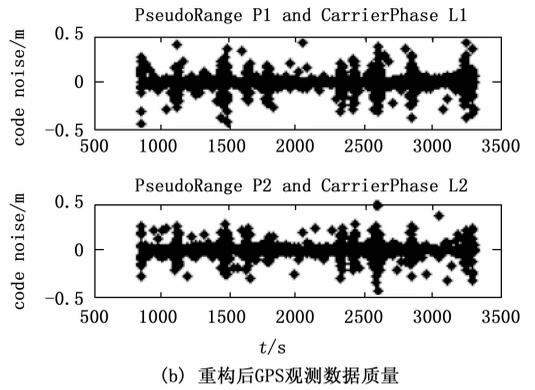
图 13 HAIYANG-2A 轨道 GPS 观测数据质量

3.3 在轨实测 GPS 观测数据压缩效果验证分析

对资源一号 02D 卫星^[19]下传到地面的 GPS 观测数据进行压缩重构试验, 并对其进行精密定轨处理, 计算压缩前后精密定轨数据差值可知, 压缩后与压缩前相比 X 方向轨道位置相差 0.014 6 m、Y 方向轨道位置相差 0.021 8 m、Z

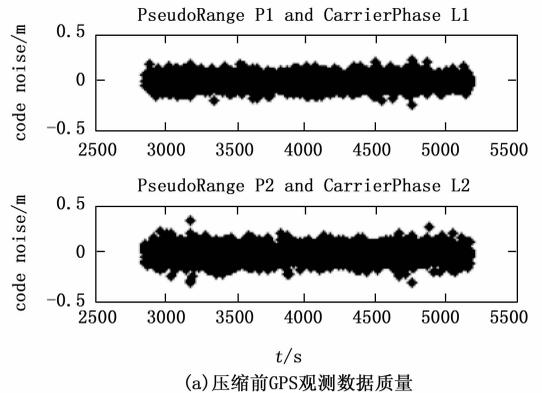


(a) 压缩前GPS观测数据质量

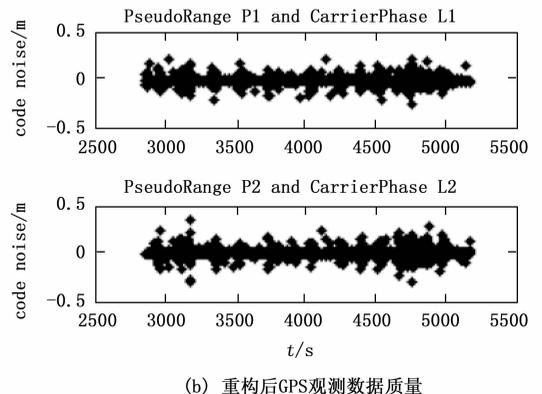


(b) 重构后GPS观测数据质量

图 14 GAOFEN 2 轨道 GPS 观测数据质量



(a) 压缩前GPS观测数据质量



(b) 重构后GPS观测数据质量

图 15 ZIYUAN1-02C 轨道 GPS 观测数据质量

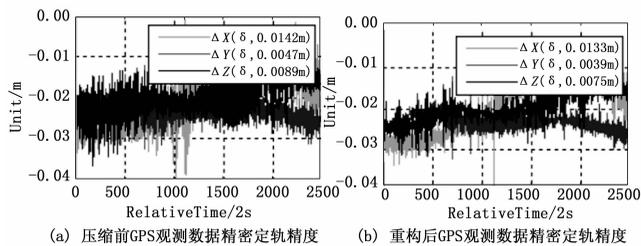


图 16 ZIYUAN 3-1 精密定轨精度

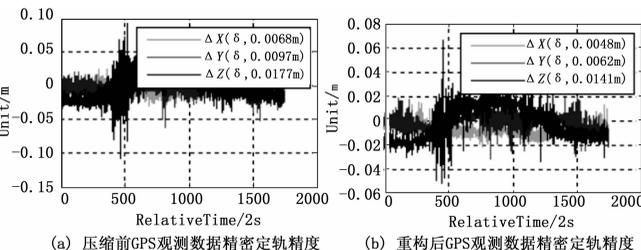


图 17 HAIYANG-2A 精密定轨精度

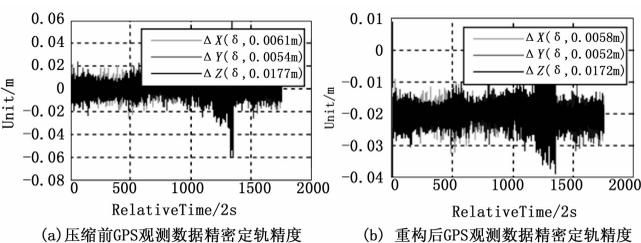


图 18 GAOFEN 2 精密定轨精度

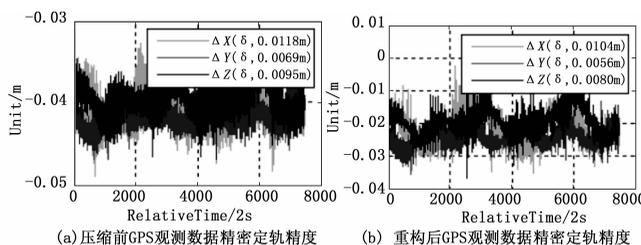


图 19 ZIYUAN1-02C 精密定轨精度

方向轨道位置相差 0.011 2 m, 具体详见图 20 所示。

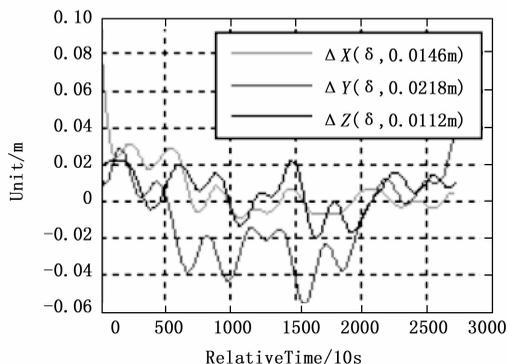


图 20 资源一号 02D 卫星在轨数据压缩后观测数据精密定轨精度

通过对在轨实测数据进行压缩前后精密定轨结果进行比对 (误差 ≤ 0.022 m), 可说明压缩后观测数据重构精度高, 使得压缩前后精密定轨结果相差较小。因此, 文章提出的压缩方法可实际在轨应用。

4 结束语

通过实验仿真, 文中提到的压缩方法能够对不同轨道高度的低轨卫星 GPS 观测数据进行高压比压缩, 压缩比可达到 7.0, 并且能够降低观测数据的观测噪声, 从而提升精密定轨精度。

由于星载 GPS 观测数据不仅可以应用于精密定轨, 还有相对定位、大气层厚度反演^[20]、土壤湿度反演等工程应用, 而文中只针对精密定轨应用进行了实验仿真, 后续将针对其他应用进行研究。

参考文献:

[1] MELBOURNE W G, DAVIS E S, YUNCK T P, et al. The GPS flight experiment on TOPEX/POSEIDON [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 21 (19): 2171-2174.

[2] MELBOURNE W G, DAVIS E S. GPS-based precision orbit determination - A Topex flight experiment [C] // Kalispell, MT; Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference, 1987; 339-362.

[3] 赵齐乐. GPS 导航星座及低轨卫星的精密定轨理论和软件研究 [J]. 武汉: 武汉大学学报 (信息科学版), 2005, 30 (4): 375-375.

[4] 马屹巍. 小规模星载固态存储器的研究与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.

[5] 秦士琨, 郝金明, 王 东, 等. 对 RINEX 格式 GPS 观测文件的压缩算法研究及软件实现 [J]. 海洋测绘, 2008 (1): 39-41.

[6] 徐晓华, 熊 剑, 罗 佳. 利用 Huffman 算法对 Rinex 格式 GPS 观测文件进行压缩 [J]. 测绘信息与工程, 2002, 27 (5): 21-22.

[7] 赵海峰, 鲁毓苗, 陆 明. 基于快速稀疏表示的医学图像压缩 [J]. 计算机工程, 2014, 40 (4): 233-236.

[8] 吴 倩, 张 荣, 徐大卫. 基于稀疏表示的高光谱数据压缩算法 [J]. 电子与信息学报, 2015, 37 (1): 78-84.

[9] 刘婧玉. 基于稀疏分解的地震数据压缩编码 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.

[10] TROPP J, GILBERT A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. Transactions on Information Theory, 2007, 53 (12): 4655-4666.

[11] 谢 钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[12] 王先毅. 双频 GPS 接收机的动态辅助 L2P (Y) 跟踪 [J]. 电子学报, 2012, 40 (10): 1938-1942

[13] JOLLIFFE I T. Principal Component Analysis [M]. Second Edition, New York: Springer, 2002; 1-6.

- [14] CHEN G Y, QIAN S E. Denoising of hyperspectral imagery using principal component analysis and wavelet shrinkage [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49 (3): 973-980.
- [15] CHAN T H, et al. PCANet: A Simple Deep Learning Baseline for Image Classification [J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2015, 24 (12): 5017.
- [16] 马义超. 基于 PCA 初始化卷积核的 CNN 手写数字识别算法 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (13): 134-139.
- [17] A HA RON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A. K-SVD: An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54 (11): 4311-1322.
- [18] 郭亮亮, 李建文, 刘瑞宁, 等. GNSS 测量型接收机观测数据质量评估 [C] // 第八届中国卫星导航学术年会论文集, 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心: 中国卫星导航学术年会组委会, 2017 (4): 37-40.
- [19] 王 建, 赵里恒, 武小栋, 等. 资源一号 02D 卫星双频 GPS 导航系统容错设计 [J]. 航天器工程, 2020, 29 (6): 128-135.
- [20] 胡 雄, 曾 楨, 张训械, 等. 大气 GPS 掩星观测反演方法 [J]. 地球物理学报, 2005, 048 (4): 768-774.

(上接第 173 页)

用系统不论在系统稳定性还是测试精度上都优于前两者, 具有技术优越性。

4 结束语

本研究基于大数据研究, 对传统雷电监测部门气象防雷进行改良。利用模块化结构技术, 构建出气象防雷大数据云平台网络架构, 再通过 CART 算法与 ID3 算法相结合的大数据防雷算法对雷电产生的条件进行分类判断, 进一步改进了传统雷电监测中系统稳定性不足与精确度低的缺点, 实现了高效且高准确率对大气中的雷电数据的采集与分析工作, 这使得雷电监测与预警领域提升了一个新的技术高度。

通过对大数据雷电监测预警系统的搭建与新型算法的引用, 进而对整个雷电监测的系统架构与雷电防治的方案设计进行研究, 将这一技术应用到日常生活与生产中, 能够有效减少雷击事故的发生, 对现代化建设与审过提供了安全的保障, 同时对雷电监测行业进入大数据时代提供坚实的理论与实践基础。

参考文献:

- [1] 郑荣金. 浅谈中波台的防雷系统 [J]. 东南传播, 2018 (7): 152-153.
- [2] 车现法, 陈 波, 王光博, 等. 防雷设施智能监测在云湛高速公路中的应用 [J]. 广东公路交通, 2020, 46 (3): 53-58.
- [3] 范景祥. 铁路信号设备智能防雷系统研究与应用实践 [J]. 科技视界, 2019 (32): 9-12.
- [4] 刘德泉. 超高层智能建筑外部雷电防护系统设计与研究 [J]. 广西水利水电, 2019 (4): 116-119.
- [5] 杨梦青. 建筑智能化系统中防雷接地设计 [J]. 广东建材, 2019, 35 (2): 69-70.
- [6] 黄建忠, 陈 东, 虞 敏. 长江河口主要物理参数智能监测站点防雷供电保障措施研究 [J]. 现代建筑电气, 2018, 9 (6): 1-5.
- [7] 关 磊, 庞玉泽. 一种新型智能综合防雷接地监测系统的应用 [J]. 建筑电气, 2019, 38 (9): 59-62.
- [8] 周歧斌, 杨鸿翔, 王振兴, 等. 基于物联网技术的智能防雷研究进展 [J]. 建筑电气, 2019, 38 (6): 3-9.
- [9] 王亚静, 魏映华, 王 赞, 等. 基于气象大数据的雷电灾害防御重点单位量化方法研究 [J]. 气象研究与应用, 2019, 40 (1): 118-121.
- [10] 单永涛, 崔 浩, 吴 莹, 等. 应用大数据加强防雷安全监管研究 [J]. 科技与创新, 2019 (3): 35-39.
- [11] 杨亚力. 电气化铁路防雷技术浅谈 [J]. 电子世界, 2019 (8): 150-151.
- [12] 刘元林, 王子夏, 唐翠云. 温州市易燃易爆场所防雷智能监测平台在气象安全中的应用 [J]. 科技风, 2021 (3): 79-80.
- [13] 陈显强. 防雷减灾气象服务科技体系建设 [J]. 科技风, 2021 (2): 11-12.
- [14] 朱加红. 设施农业雷电灾害成因途径及防雷对策分析研究 [J]. 农业开发与装备, 2020 (12): 105-106.
- [15] 吴 彬, 杨咏钢, 李艳芳, 等. 茶园可视化农业气象信息动态监测预警系统研制及试验 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (8): 195-199.
- [16] 姚 胜. 基于 Android 的天气预报客户端设计与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (9): 253-256.
- [17] 杜小芳, 陈毅红. Spark MLlib 中决策树算法不同特征选择标准比较 [J]. 太原师范学院学报 (自然科学版), 2020, 19 (4): 37-39.
- [18] 宋甫成, 李艳军, 曹愈远, 等. 基于 CART 决策树的分层数据无损检测 [J]. 航空计算技术, 2020, 50 (6): 34-37.
- [19] 薛斯文, 周 旗. 基于 CART 决策树的陕北气候变化风险感知信息通道研究 [J]. 河南科学, 2020, 38 (10): 1641-1649.
- [20] 曾庆锋, 力 梅, 兰红平, 等. 闪电定位数据替代雷暴日人工观测初探 [J]. 干旱气象, 2018, 36 (5): 813-819.
- [21] 徐 耕, 焦美玲, 白 铎. ADTD 型闪电定位仪雷击分析及防雷防静电措施 [J]. 河南科技, 2020 (2): 153-155.
- [22] 张岚晶. 呼和浩特地区闪电定位监测数据与雷暴日观测数据对比分析 [J]. 内蒙古科技与经济, 2019 (10): 53-54.
- [23] 卢治钢, 邱 实, 石立华, 等. 时频联合分析在闪电定位中的应用 [J]. 电波科学学报, 2019, 34 (4): 422-428.