



基于 MATLAB 的数字信号处理综合课程实验

杨桃丽, 于瀚雯

(电子科技大学 资源与环境学院, 成都 611731)

摘要: 数字信号处理是一门理论与实践结合性很强的课程, 结合遥感科学与技术专业的特点以及实际应用, 设计了一个基于 MATLAB 的数字信号处理综合课程实验。该实验以 GRACE 卫星 Level 2 数据为研究对象, 通过信号频谱分析、滤波器设计和处理等操作, 从而实现高精度快速减小数据条纹噪声。该综合实验覆盖了数字信号处理课程的主要关键知识点, 有利于学生形成较完整的数字信号处理知识体系, 培养了学生将抽象的理论知识应用于实际遥感处理的能力。

关键词: 数字信号处理; MATLAB; 综合实验; GRACE; 遥感

中图分类号: TP014

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220380

Comprehensive Course Experiment of Digital Signal Processing Based on MATLAB

YANG Taoli, YU Hanwen

(School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Digital signal processing is a course with strong combination of theory and practice. Combined with the characteristics of the remote sensing science and technology and its practical application, a comprehensive course experiment of digital signal processing based on MATLAB is designed. This experiment takes the gravity recovery and climate experiment (GRACE) satellite Level 2 data as the research object. Through the operation of signal spectrum analysis, filter design and processing, it can denoise the stripes efficiently and effectively. This comprehensive experiment covers the main key knowledge points of the digital signal processing course, which is helpful for students to form a relatively complete knowledge system of digital signal processing, and cultivates students' ability to apply abstract theoretical knowledge to actual remote sensing processing.

Key words: digital signal processing; MATLAB; comprehensive experiment; GRACE; remote sensing

数字信号处理课程以高等数学、线性代数、信号与系统等先修课程为基础, 是一门理论与实践结合性很强的学科, 在各个工科院校的专业教学中都具有十分重要的地位^[1]。但是, 该课程总体上内容多、公式繁杂、概念抽象, 而学时一般较短。学生普遍反映这门课的难度较高, 学习兴趣不足, 学习效果较差^[2-3]。同时数字信号处理课程具有很强的应用性, 在遥感、航空、航天、军事、医学、环境等领域有着重要的应用, 如信号采样、频谱分析、信号滤波等^[4]。但在传统数字信号处理课程实验教学中, 大多数将各个知识点单独实践, 与实际应用脱离, 学生无法形成课程完整的知识体系, 较难体会到数字信号处理的各种理论知识是如何具体应用到实践中, 从而降低了数字信号处理课程教学质量。

本文从电子科技大学遥感科学与技术专业本

科人才的培养出发, 与实际遥感应应用相结合, 针对 GRACE 卫星的 Level 2 数据存在的问题^[5-6], 设计了一个综合课程实验, 该实验覆盖了数字信号处理课程的关键知识点。在实验过程中, 学生需要对 GRACE 背景进行理解, 利用 MATLAB 自主设计编程, 完成 GRACE 数据的滤波处理。通过本次综合课程实验, 学生能够将抽象的数字信号处理理论和实际遥感应应用过程联系起来, 同时掌握数字信号处理的关键知识点, 更好地带动学习积极性和对遥感科学与技术专业的热爱。

1 课程主要知识点

数字信号处理课程的内容繁多, 结合遥感科学与技术专业的特点以及实际应用, 我们对数字信号处理课程的关键知识点进行了梳理, 如图 1 所示, 主要包括数字信号分析、离散系统分析以

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2023-11-13

基金项目: 四川省自然科学基金(2022NSFSC0954); 国家自然科学基金(42271456)。

作者简介: 杨桃丽(1987-), 女, 博士, 副教授, 主要从事微波遥感方面的研究。E-mail: yangtl@uestc.edu.cn

及数字滤波器设计 3 大部分^[7-10]:

- 1) 数字信号分析包括信号时域分析、信号频域分析和信号 Z 域分析, 以及由此引出的信号采样;
- 2) 离散系统分析包括系统时域分析、系统频

域分析和系统 Z 域分析;

- 3) 在数字信号分析和离散系统分析的基础上, 引出数字滤波器设计, 包括理想滤波器、FIR 滤波器和 IIR 滤波器。



图 1 数字信号处理的主要知识导图

根据遥感科学与技术专业的实际需求, 在教学过程中, 我们着重强调以数字化的手段进行信号分析和处理, 以遥感信号处理为驱动, 在梳理各个知识点的同时, 帮助学生形成自己的知识体系。因此, 综合课程实验应该以遥感信号处理和应用为背景, 在整个实验过程中, 贯穿数字信号处理课程中的重难点, 包括信号采样、信号频谱分析和滤波器设计等。基于此, 我们将结合实际科研过程中遇到的问题, 将 GRACE 时变重力数据的后处理作为数字信号处理课程的综合课程实验。

2 GRACE 数据

GRACE 卫星于 2002 年 3 月发射, 通过精密监测同一轨道上的两颗卫星间的距离变化观测地球重力场, 可以提供静态以及短周期的时变地球重力场, 如可以根据 GRACE Level 2 数据估计全球月当量水高(equivalent water height, EWH)异常分析和理解陆地蓄水(terrestrial water storage, TWS)变化^[5]。

GRACE 卫星 Level 2 数据是将 Level 1 数据解算后截断高阶项, 并经过多重误差校正得到的重力场解, 是目前使用最广泛的数据产品。但是由于 GRACE 卫星数据测量的是南北向轨道上两颗

卫星的距离变化, 所以最终得到的重力场解中存在沿南北向的明显条纹, 同时重力场误差也随着重力场球谐系数阶数的增加而增大。利用 GRACE 卫星 Level 2 数据反演得到的 EWH 变化值如图 2 所示, 可以看出, 图中存在明显的南北向条纹, 且在赤道附近最严重, 因此必须对其进行滤波处理^[11-12]。

目前典型的 GRACE 滤波方法包括高斯平滑滤波以及类高斯滤波^[13], 这类方法的特点是通过降低高阶项的权重来减小高频信号分量误差, 需要较大的平滑内核半径来充分消除噪声, 但是使用大半径会使数据模糊或过度平滑, 从而影响 GRACE 数据的后期应用。另一种代表性的滤波方法是去相关法^[14], 该方法通过在移动窗口中使用多项式将原始斯托克斯系数替换为拟合值来减少南北条纹。与传统的高斯滤波法相比, 去相关法对 GRACE 数据的空间分辨率影响较小, 但是不能完全去除条纹, 依然需要类高斯滤波器进一步消除条纹。除此以外, 还有主成分分析法(principal component analysis, PCA)、经验正交函数法(empirical orthogonal function, EOF)、独立分量分析法(independent component analysis, ICA)、统计滤波器等, 这些方法都需要类高斯平滑。

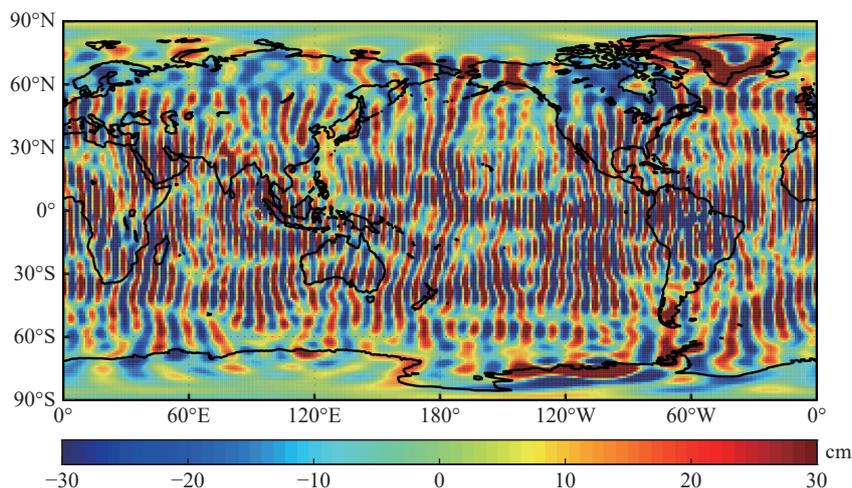


图 2 利用未滤波的 GRACE 数据反演得到的 EWH 变化值

3 实验内容设计

结合在科研过程中的实际问题以及数字信号处理课程的教学经验, 我们发现 GRACE 卫星 Level 2 数据的滤波过程涵盖了数字信号处理课程绝大部分的关键知识点, 如赤道附近的低采样率可能导致的频谱混叠, 高阶项截断引入的信号泄露, 条带误差对应的周期干扰信号, 以及为了实现滤波处理消除条纹误差需要进行的频谱分析以及滤波器设计等。由此可见, 基于 GRACE 卫星 Level 2 数据的滤波处理是一个很好的数字信号处理综合课程实验, 可以帮助学生更好地理解 and 掌握数字信号处理课程的关键知识点, 将抽象的信号理论和实际应用联系起来。

本文实验以 CSR 机构提供的 2003 年 11 月的 RL05 GSM 数据^[6], 直接利用其反演得到的 EWH 变化值如图 2 所示。为了避免引入过多的非数字信号处理背景要求, 减轻学生的畏难情绪, 我们提前将 GRACE 数据进行读取、格式转换, 并导入 MATLAB 工作空间, 学生仅需直接利用数据进行信号处理。实验流程如图 3 所示, 主要包括信号频谱分析、滤波器设计和滤波处理 3 大部分。

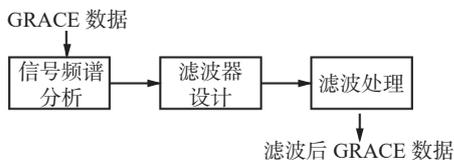


图 3 实验流程图

3.1 信号频谱分析

从信号处理的角度看, 对周期信号, 如正弦信号, 在图像上将显示出条纹特性。条纹越密集, 代表周期越小, 即频率越大。如图 4(a)中的

数据主要包含直流(DC)信号, 其中心频率接近于零, 如图 4(a)频谱曲线图所示。如果数据被正弦波等周期性信号污染, 则图像上会出现条纹, 如图 4(b)被污染数据图所示。可以看出, 原始信号完全被噪声淹没, 无法直接提取。

不失一般性, 利用 $x(n)$ 表示一维原始信号, 噪声为 $\cos(\omega_r n)$, 其中 ω_r 为噪声的数字频率, $-\pi < \omega_r \leq \pi$ 。被噪声污染的数据可以写成:

$$s(n) = x(n) + \cos(\omega_r n) \quad (1)$$

对式(1)进行傅里叶变换可得:

$$S(\omega) = X(\omega) + \pi[\delta(\omega + \omega_r) + \delta(\omega - \omega_r)] \quad (2)$$

式中: $X(\omega)$ 是 $x(n)$ 的傅里叶变换, $\delta(\omega)$ 是冲激函数, $-\pi < \omega \leq \pi$ 。

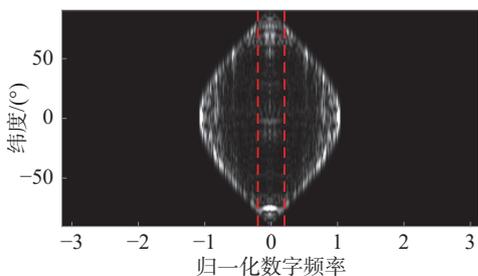
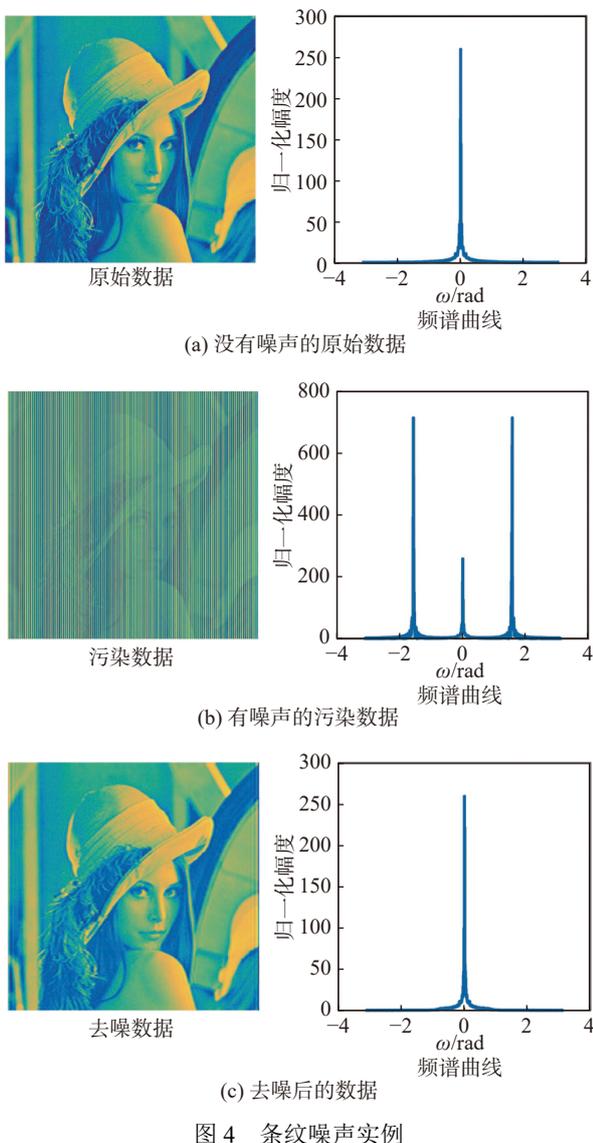
如果信号和噪声的频谱如图 4(b)所示占据不同的频带, 则可以在频域中区分它们。通过设计一个合适的滤波器, 在通过低频信号的同时消除高频噪声, 即条纹, 得到如图 4(c)所示的结果。

与图 4 所示案例类似, 根据 GRACE 数据中存在的明显南北条纹噪声, 学生需联想到 GRACE 数据受到如式(1)所示的周期噪声信号干扰。通过对 GRACE 数据沿经度方向做快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT), 得到如图 5 所示的频谱图。在做 FFT 的过程中, 学生需灵活掌握归一化数字频率的概念, 并使用 MATLAB 表达相应的频率轴^[7], 即:

$$w = \text{floor}(-K/2 + 0.5 : K/2 - 0.5) / K \times 2 \times \pi; \quad (3)$$

式中: K 表示傅里叶变换的长度。为了得到更高的频谱分辨率, 可以增加 K 的大小。同时需要注意的是, FFT 默认是以下标 0 开始的, 即表达的频率范围为 $[0, 2\pi)$, 为了正确表示正负频率,

需对 FFT 的结果进行 `fftshift`，使之在 $(-\pi, \pi]$ ，如图 5 所示。可以看出条纹噪声占据了高频区域，而信号集中在低频部分，这样就可以通过设计相应的低通滤波器对数据进行滤波处理。



3.2 滤波器设计

由图 2 和图 5 可知，赤道附近的条纹最严重，其频谱主要集中在 ± 1.0 rad 左右，而信号主要集中在 ± 0.1 rad 左右，由此我们可以采用低通滤波

器对数据进行处理。这里可以采用窗函数法进行低通滤波器设计，主要步骤如下：

1) 确定滤波器指标，如通带频率 ω_p 、阻带频率 ω_s 和阻带衰减等。根据图 5 可知，信号主要集中在 ± 0.1 rad 左右，因此通带频率 ω_p 不小于 0.1 rad，而噪声频谱在赤道附近主要集中在 ± 1 rad 左右，随着纬度的升高，噪声频谱越靠近信号频谱，但其幅值越小。综合以上考虑，可设置阻带衰减不小于 70 dB， $\omega_p = \pm 0.1$ rad， $\omega_s = \pm 0.3$ rad，由此可得截止频率 $\omega_c = \pm 0.2$ rad，过渡带为 0.2 rad。

2) 根据对过渡带和阻带衰减的要求选择合适的窗函数和窗口长度 N_h 。为了保证足够的阻带衰减，可选择 Blackman 窗，其阻带最小衰减可达到 74 dB，过渡带宽为 $12\pi/N_h$ ，由此可得窗口长度 N_h 不小于 189。为了进一步减小过渡带宽以及满足 I 类线性滤波器的要求^[4]，可将 N_h 设置为奇数，在本实验中，我们设置窗口长度 N_h 为 361。

3) 计算滤波器的单位脉冲响应 $h(n)$ 。单位脉冲响应为理想脉冲响应和窗函数的乘积，即有：

$$h(n) = \begin{cases} \frac{\sin \omega_c (n - \alpha)}{\pi (n - \alpha)} w(n) & 0 \leq n \leq N_h \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中： ω_c 为截止频率，在本实验中可将 ω_c 设置为 ± 0.2 rad，如图 5 中的红虚线所示； $\alpha = (N_h - 1)/2$ ，以保证滤波器系数对称，满足 I 类线性滤波器的要求； $w(n)$ 为窗函数，可根据阻带衰减的要求选择各种不同的窗函数，如矩形窗、Hanning 窗、Hamming 窗、Blackman 窗以及 Kaiser 窗等，在本实验中采用 Blackman 窗，由此得到的滤波器频率响应如图 6 所示，在通带频率 0.1 rad 处，信号衰减约为 0.001 dB，而阻带频率 0.3 rad 处，噪声衰减约为 83 dB，满足设计指标要求。

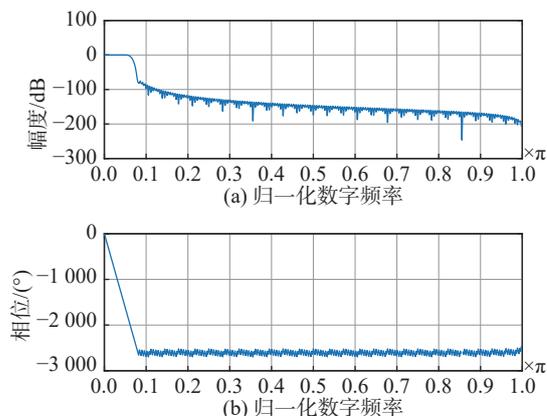


图 6 滤波器频率响应

3.3 滤波处理

得到式(4)所示的滤波器后, 将其与 GRACE 数据进行线性卷积操作, 以实现滤波处理, 即:

$$\hat{x}(n) = s(n) * h(n) \quad (5)$$

式中: *表示线性卷积操作, $\hat{x}(n)$ 为滤波后的结果。在实际处理过程中, 学生需要理解时域卷积等效为频域相乘, 因此为了提升处理效率, 可将卷积操作转换为频域相乘, 即:

$$\hat{X}(\omega) = S(\omega) * H(\omega) \quad (6)$$

式中: $H(\omega)$ 为滤波器的傅里叶变换, 可利用 FFT 得到。然后再对 $\hat{X}(\omega)$ 进行逆傅里叶变换得到滤波后的结果 $\hat{x}(n)$ 。需要注意的是, 利用频域相乘实现的是循环卷积, 为了满足线性卷积的要求, 傅里叶变换的点数至少应大于 GRACE 数据长度和滤波器长度之和。假设沿经度方向的数据大小为 N , 滤波器的长度为 N_h , 则傅里叶变换的点数至少应为 $K=N+N_h-1$ 。需要注意的是, 滤波后的数据大小为 K , 数据的前后部分存在部分卷积的结果, 需要截除, 仅保留完全卷积的部分, 其大小为 N 。

具体流程如图 7 所示。首先将 GRACE 数据沿经度方向补 $K-N_h$ 个零, 滤波器补 $K-N$ 个零, 然后分别对其做 K 点 FFT, 接着将 GRACE 数据和滤波器在频域相乘, 然后对其结果进行逆快速傅里叶变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 使之转换为时域, 此时输出结果为 K 个点, 存在部分卷积结果, 因此需要对数据两端进行截取, 仅保留完全卷积部分的 N 个数据, 由此得到与输入 GRACE 数据大小相同的滤波结果。

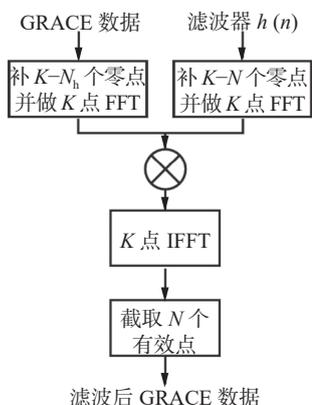


图 7 滤波流程

利用式(4)所示滤波器对图 2 进行滤波处理后反演得到的 EWH 变化值结果如图 8(a)所示, 可以看到经过滤波处理后, 已去除了明显的条纹噪

声。对滤波后的结果沿经度方向做傅里叶变换, 得到频谱图如图 8(b)所示, 可以看到高频噪声已被去除, 保留了低频信号, 由此可利用此滤波后的 GRACE 数据进行后续操作。

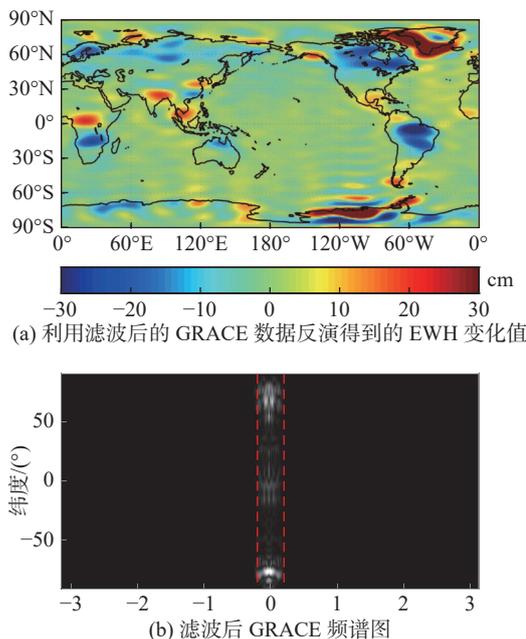


图 8 滤波后的结果

4 结束语

数字信号处理课程的知识点繁多, 传统课程实验对每个不同的知识点设计不同的实验, 缺乏全面知识体系的考察, 与专业应用的结合较弱。针对以上问题, 并结合遥感科学与技术专业的特点, 我们创新性地提出利用数字滤波器实现 GRACE 数据的后处理, 实验基于 MATLAB 编程语言, 包含了课程的主要知识点, 如频谱分析、各种 FT 的关系、FIR 滤波器设计、线性卷积的快速实现以及物理意义等。学生在完成实验的过程中, 不仅需要调用课程的各个知识点, 也需要具有一定的创新性思维, 学会将理论知识与实际应用结合起来, 既锻炼了创新性和动手能力, 又培养了对专业的热爱。

参考文献

[1] 郭东亮. 面向新工科人才培养的数字信号处理教学研究[J]. 大学教育, 2020(8): 135-137.
 [2] 江朝抒, 陈祝明, 段锐. 面向工程设计的数字信号处理实验系统[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(5): 35-37.

(下转第 67 页)