

# “数字信号处理”课程思政案例探索

戚晨皓

(东南大学 信息科学与工程学院, 南京, 210096)

**摘要:** 通过发掘“数字信号处理”课程蕴含的思政元素, 给出了三个思政案例。首先从离散傅里叶变换到快速傅里叶变换的发展过程, 凝练出国家战略需求的牵引往往能获得更有价值的研究成果; 其次通过介绍线性卷积与循环卷积的联系, 引出我国移动通信技术从空白到领跑的奋斗之路; 再次通过介绍无限长冲激响应和有限长冲激响应滤波器设计方法, 阐明要从多维度全面看待事物并能从不同维度切入解决问题。

**关键词:** 数字信号处理; 课程思政; 思政案例

中图分类号: G642

文献标识码: A

文章编号: 1008-0686 (2023) 04-0094-04

## Case Study on Ideological and Political Education of Digital Signal Processing Course

QI Chenhao

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** By exploring the ideological and political elements contained in the "Digital Signal Processing" course, three ideological and political cases are given. First, from the development process of discrete Fourier transform to fast Fourier transform, it is implied that the traction of national strategic needs can often obtain more valuable research results. Then by introducing the connection between linear convolution and circular convolution, it gives the road of the struggle of our country's mobile communication technology from the lagging to leading. Finally, by introducing the filter design methods of infinite impulse response and finite impulse response, it is indicated that we must comprehensively view things from multiple dimensions and be able to solve problems from different dimensions.

**Keywords:** digital signal processing; ideological and political education of courses; ideological and political cases

大学教育的根本任务是立德树人, 课程作为大学教育的重要组成部分, 在人才培养中发挥了重要作用。因此, 要充分利用课堂的主渠道, 增强课程的育人功能, 大力挖掘课程教学中蕴含的思政元素, 将其润物细无声地融入到各类课程的教学与实践中, 实现显性的基础知识学习和隐性的思政熏陶渐染。

数字信号处理是工科专业的重要课程, 每年上课学生人数庞大, 课程受众面广, 影响范围大, 学生主观上对课程也比较重视, 因此, 研究数字信号处理课程的思政并设计典型的思政案例具有重要意义。

本文针对数字信号处理课程设计了三个思政案例。首先介绍了从离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 到快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 的发展过程及背景, 凝练出了国家战略需求的牵引往往能获得更有价值

的研究成果; 其次通过介绍线性卷积与循环卷积的联系, 引出了我国移动通信技术从空白到领跑的奋斗之路; 再次通过介绍无限长冲激响应 (Infinite Impulse Response, IIR) 和有限长冲激响应 (Finite Impulse Response, FIR) 滤波器设计方法, 阐明要从多维度全面看待事物并能从不同维度切入解决问题。

### 1 DFT 和 FFT 的思政教学

“数字信号处理”课程的重要内容之一是 DFT 及 FFT 算法。尽管离散时间傅里叶变换 (Discrete-Time Fourier Transform, DTFT) 能有效呈现序列的频率响应特征, 但由于 DTFT 在频域是连续的, 不便于计算机存储, DFT 的出现快速解决了这一问题。然而, DFT 的运算量与其序列长度的平方成正比, 当序列较长时, 运算量太大, 例如当序列长度为 1024 点时, 计算该序列的

收稿日期: 2023-04-16; 修回日期: 2023-04-27

基金项目: 东南大学校级教学改革与研究项目 (2019-031); 江苏省高等教育教改课题 (2019JSJG069)

第一作者: 戚晨皓 (1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事信号处理方面的教学和科研工作, Email: qch@seu.edu.cn

一次 DFT 需要约一百多万次复数乘法运算和一百多万次复数加法运算。而序列较短时，难以通过 DFT 变换刻画出序列的内在特征。特别对于需要实时计算信号 DFT 的场合，运算量开销非常可观。因此，DFT 自出现之后的两百年内一直得不到广泛使用。直到 1965 年，IBM 公司的 James William Cooley 和美国普林斯顿大学的 John Wilder Tukey 利用了 DFT 运算中的周期性和对称性，通过使用蝶形结，将大点数的 DFT 一步步拆成若干小点数的 DFT 运算，从而提出了基二 FFT 算法。FFT 的运算量与其序列长度的对数成正比，相比于 DFT 显著降低了运算量。例如当序列长度为 1024 点时，计算该序列的一次 FFT 仅需要约五千次复数乘法运算和一万次复数加法运算。此后，FFT 运算得到广泛应用。

大学教育，除了让学生学习课程的专业知识本身外，更重要的是培养学生的自主学习的能力，提高学生的创新精神。学生们不禁会思考，为什么直到 1965 年才提出能大幅降低运算量的 FFT 算法而在此之前一直没有学者提出呢？其实这里面就蕴含了课程思政的元素。首先，要树立上下而求索、不断追求完美、止于至善的科学精神，主动去探索降低 DFT 运算量的方法，遇到问题多思考、多分析，充分发掘 DFT 运算的特点和性质，探究其中的规律。其次，我们回顾一下 FFT 提出的时代背景<sup>[1]</sup>。1962 年古巴导弹危机差点触发了美国和前苏联的核战争，此后，美国和前苏联都意识到了管控核武器的重要性，就签订《美苏限制战略核武器条约》进行一轮轮的谈判。而在同一时间，美国肯尼迪总统的科学顾问委员会也在研究如何在不需要侦查苏联设施的情况下，判断前苏联是否偷偷进行了核试验而违背了上述条约，一种可行的方案是通过观察部署在前苏联周围的地震仪来检测前苏联的核试验，然而该方案需要对地震仪产生的时间序列进行 DFT 运算并且运算量巨大。John Wilder Tukey 作为该科学顾问委员会的成员，初步给出了一种如何降低 DFT 运算量的方法。而同为该委员会的 IBM 公司的 Richard Garwin，立即意识到了该方法的重要性，因为降低 DFT 运算量对很多其他的国防应用例如核潜艇远距离的声学检测等均有重要的意义，随后，Richard Garwin 介绍 John Wilder Tukey 与 IBM 公司的 James William Cooley 联系，共同研究降低 DFT 运算量的有效方法，并在 1965 年发表了一

篇学术论文<sup>[2]</sup>，提出了基二 FFT 算法。

结合 FFT 提出的时代背景，可以看出，科学技术的发展与国家的战略需求紧密相关，在国家战略需求的牵引下，往往能获得更有价值的研究成果。当前我们国家在芯片工艺和硬件算力等方面还面临着诸多的挑战，与国外先进水平具有一定的差距，特别是当前的卡脖子技术更需要我们花大力气去攻关和突破。而另一方面，我们也可以优化软件和算法，降低算法的运算量，在相同性能条件下减少对硬件算力的要求，这也正是 FFT 算法当年在美国国家战略需求下的思路，如今看来仍具有重要参考价值。

## 2 线性卷积与循环卷积的思政教学

“数字信号处理”课程在介绍完 FFT 算法之后，通常会给出其重要的应用——通过 FFT 来快速计算线性卷积。

当两个序列的循环卷积的长度大于等于这两个序列的长度之和减一时，这两个序列的循环卷积等价于它们的线性卷积。而循环卷积可以通过三次 FFT 运算快速获得，具体而言，首先分别对两个序列进行相同点数的 FFT 运算，然后将运算结果进行逐点相乘，最后作一次 FFT 反变换（Inverse FFT, IFFT）运算，考虑到 IFFT 运算量几乎与 FFT 相同，因此共计三次 FFT 运算。由于 FFT 的运算量与其序列长度的对数成正比，当序列长度较长时，三次 FFT 的运算量会远小于直接按照定义式进行逐点移位再对应元素相乘相加的线性卷积，因此实际工程应用中，计算机通常使用三次 FFT 来计算线性卷积。

围绕循环卷积可充分利用 FFT 进行快速实现这一优势，无线通信构建了新型的传输方式。众所周知，无线通信的接收信号序列通常等于发送信号序列与无线信道冲激响应序列的线性卷积再额外加上噪声，为了能使接收信号序列等于发送信号序列与无线信道冲激响应序列的循环卷积再加上噪声，大家通常会联想到对上述三个序列分别实施加长点数的 FFT，其中 FFT 点数长度不短于发送信号序列长度与无线信道冲激响应序列长度之和减一。那么，如果不实施加长点数的 FFT，有没有其他方法呢？不妨鼓励学生们另辟蹊径，积极探索，寻找新的思路。

实际上，目前有两种方法，一种是对发送信号序列添加循环前缀（Cyclic Prefix, CP）之后再

将其发送进入无线信道,其中 CP 是将发送信号序列尾部的一部分复制并搬移到该序列的头部,并且满足 CP 的长度不短于无线信道冲激响应序列的长度;相应的,在无线通信的接收端需要先去掉对应的 CP,剩下的序列部分作为接收信号序列。这样,FFT 的点数只需要大于发送信号序列长度,这相比于实施加长点数的 FFT,FFT 点数更少,更加经济划算,复杂度更低。为了能让同学们充分理解这一目前已广泛工程应用的方法,可以鼓励同学们从现象看到本质。循环卷积本质上是先将序列进行周期延拓,然后进行线性卷积并取主值区间。在这一方法中,其实可看作是固定了无线信道冲激响应序列不变,将发送信号序列进行周期延拓后再进行线性卷积,而这样的周期延拓并不需要延拓发送信号序列的完整的一个周期,只需要延拓其 CP 长度的部分,因为超过 CP 长度多延拓出来的部分其实对主值区间内的结果并没有贡献,这正是 CP 的长度不短于无线信道冲激响应序列的长度的原因所在,是源于循环卷积定义式的细化思考和认识。在这点上,也给学生们带来一些启发,要深入理解概念并看到其根本,只有立足根本,才能学得更加扎实,以不变应万变。

另一种方法是对发送信号序列尾部补零(Zero Padding, ZP)之后再将其发送进入无线信道,其中 ZP 是指全零序列,ZP 的长度跟 CP 的要求一样——不短于无线信道冲激响应序列长度;相应的,在接收端需要进行对应处理,将接收信号的尾部 ZP 长度部分截取下来,叠加到其头部 ZP 长度部分,再将其作为有效的接收信号序列,这样,仍能满足接收信号序列等于发送信号序列与无线信道冲激响应序列的循环卷积再加上噪声。这不禁启发学生们思考,既然第一种方法在头部增加 CP 有效果,为什么还要用第二种方法在尾部增加 ZP 并在接收端头尾混叠相加处理呢?其实,增加 CP 是要额外消耗发射信号能量的,而增加 ZP 却不会;特别当 CP 比较长的时候,消耗的发射信号能量更大,而 ZP 却没有这个问题。在实际工程应用例如水下声通信时,水声信道冲激响应序列通常很长,这时增加 CP 对发射信号功率的消耗就比较可观,因为要求 CP 和 ZP 的长度大于等于信道冲激响应序列长度,这时使用 ZP 就具有明显的优势<sup>[3]</sup>。目前这种使用 ZP 的方法已经在国防中得到了广泛应用。

而第一种方法,是多载波无线传输技术——

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)的重要理论基础<sup>[4]</sup>。目前 OFDM 技术已在第四代移动通信(4G)和第五代移动通信(5G)中广泛使用。我国移动通信技术水平经历了 1G 空白、2G 跟随、3G 突破和 4G 并跑的不断突破,现在 5G 已处于领跑状态。在 1G 时代,我国的通信网络建设刚刚起步,技术和设备全部依赖进口,关键核心技术处于一片空白状态。在 2G 时代,我国的通信领域实现了从模拟到数字的跨越,开始努力跟随国际先进技术。在 3G 时代,我国在移动通信领域实现了突破和创新,研发了具有自主知识产权的 TDS-CDMA 国家标准,为后续的技术突破奠定了基础。在 4G 时代,我国通信装备制造业已与世界先进水平同步,处于与国际领先水平并跑的状态。如今在 5G 时代,我们在 5G 技术研发和应用上扮演了国际领跑者的角色,特别是涌现了华为等处于国际领先水平的龙头企业。今天的辉煌成就,离不开党和国家的正确领导和坚定支持,是一代代通信人的艰苦奋斗的成果。从上述案例中,能让学生更清晰的认识到的课堂知识如何在科研中得到应用,使教学与科研相结合。很多同学实际上经常困惑,课堂学习的书本知识是否过时了?与当前的新技术有何关系?而上述案例,正好能解决学生的这一困惑。而更重要的是,在这一过程中,还能增强同学们的民族自信心,激发同学们的自豪感和历史使命感,鼓励同学们秉承光荣传统,积极投身国家关键核心行业,立志科技报国,为实现中华民族伟大复兴的中国梦而不懈奋斗,在伟大梦想中成就个人理想。

### 3 IIR 与 FIR 滤波的思政教学

数字信号处理课程中分别介绍了 IIR 和 FIR 滤波器设计方法。IIR 滤波器的设计方法具体包括了脉冲响应不变法、双线性变化法和最优化设计方法,FIR 滤波器的设计方法具体包括了窗口法、频率采样法和最优化设计方法<sup>[5]</sup>。有同学问,既然学了 IIR 滤波器设计方法,为什么还要学 FIR 滤波器设计方法?其实,这就要看 IIR 和 FIR 的优缺点了。学完这两部分内容后,可知,IIR 滤波器设计可借助经典模拟滤波器例如巴特沃斯、切比雪夫和椭圆等辅助数字滤波器的设计,其中模拟经典滤波器通常都有解析表达式;而 FIR 滤波器一般无解析表达式,通常要借助计算机程序进行设计。

FIR 滤波器稳定且具有线性相位，而 IIR 滤波器不具备。但在相同性能指标下，FIR 滤波器的阶数要比 IIR 滤波器更高。因此，IIR 滤波器和 FIR 滤波器各有优缺点，正如任何事物都有两面性，既有优点又有缺点，只有从多个维度看待事物才能看得更加全面，实际中需要结合应用场景具体问题具体分析。

IIR 滤波器的设计方法中，最先给出了脉冲响应不变法，但是它的缺点在于无法实现 S 平面到 Z 平面的唯一映射、不能直接用来设计高通滤波器和带阻滤波器。针对该缺点，通过引入正切变换提出了双线性变化法，实现了 S 平面到 Z 平面的唯一映射，并且实现了四种类型的滤波器都能设计的目的，但也带来了新的问题——模拟角频率和数字角频率之间出现了非线性的变化关系，使得数字滤波器的幅频响应相对于模拟滤波器的幅频响应出现了畸变，而在脉冲响应不变法中两者是线性的变换关系并没有畸变。因此，同学们在课程学习的过程中，也要同时培养客观看待事物的多面性的能力和心态。

FIR 滤波器的设计方法中，最先给出了窗口法，随后给出了频率采样法。窗口法以逼近理想滤波器的时域冲激响应为目标来设计数字滤波器，而频率采样法以逼近理想滤波器的频率响应为目标来设计数字滤波器，两者分别从时域和频域切入进行分析。窗口法需要利用滤波器时域解析表达式，设计方法简单；而频率采样法不需要解析表达式更适合计算机处理。最优化设计方法，对窗口法和频率采样法进一步泛化，又涉及多种最优化的设计准则。因此，同学们在课程学习过程中，不仅要能从多个维度看待事物，也要提高从多个维度切入分析问题和解决问题的能力。例如，能从时域切入解决问题最好，若不能解决，那能否从频域切入解决呢？若频域也不能解决，是否还有其他的维度呢？

不仅在课堂上，在课余学习生活中，也要学会从多个维度全面的看待事物并能从不同维度切入解决问题。我们的国家、社会处于快速发展和进步中，有些其他国家抨击我们的报道，是否正确，需要多思考思考，不要一味盲从，古人云“人言务经、自心悟之”也就是这个道理，要能从多个维度去看问题，相信党和国家的决策和部署。自己身边的朋友、同学，所处的学校、社会，都不可能尽善尽美，或多或少都会有缺点或这样那

样的问题，不要只看到缺点而看不到优点，事物都有多面性，要多维度全面看待，具有包容、宽容的心态。自己做好手头的工作，从自己做起，不要怨天尤人，多树立积极向上的心态，多传播正能量，世界会因你而更加美好。

#### 4 总结

上述思政内容部分用于 2022 年的“数字信号处理”课程教学，学生表现出对课程思政内容更高的兴趣，更加清楚的认识国家战略需求与个人科研的内在联系，学习的积极性和主动性进一步提高，能针对相关内容进行更全面的思考和分析，同时也进一步了解了课程内容如何在实际工程中应用，实现了更好的课程教学效果。其实，“数字信号处理”课程包含了诸多的思政元素和思政素材，本文给出的三个案例只是进行了初步的探索，主要是希望能给读者们一些启发，产生更多更好的思政内容，从而推动课程思政工作更加完善。

#### 参考文献:

- [1] Cooley, J W, Tukey, J W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series[J], *Mathematics of Computation*, 1965, 19(90): 297-301.
- [2] Cooley, J W, Lewis, P A. W., Welch, P D, Historical notes on the fast Fourier transform [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967, 55(10): 1675-1677.
- [3] 戚晨皓, 王昕, 张在琛. 线性卷积与循环卷积等价关系及水声通信应用[J]. *电气电子教学学报*, 2017, 39(6): 60-63.
- [4] 戚晨皓, 王昕, 吴镇扬. 循环卷积在正交频分复用通信系统中的应用[J]. *电气电子教学学报*, 2016, 38(6):77-80.
- [5] 吴镇扬. 数字信号处理[M]. 第3版, 北京: 高等教育出版社, 2016.