

后香农时代的《信息论与编码》课程教学改革思考与探索

邓莉 李欧迅

(桂林航天工业学院 广西 桂林 541004)

【摘要】 本科《信息论与编码》课程主要讲授香农信息论的基本理论,包括信息的度量、信道容量以及香农信息论的三个基本定理等。然而,经典香农信息论在当代移动通信系统中存在明显的应用局限性,其容量分析、差错指数与渐近分析理论等已无法支撑现代通信系统中对于容量、时延以及可靠性的分析。本文拟针对传统《信息论与编码》课程教学模式、教学内容和课程评价体制进行改革,对经典香农信息论的课程教学进行拓展与延伸,达到课程知识体系与时俱进的目标,使学生能学有所获,并学以致用。

【关键词】 香农信息论;应用局限性;课程教学改革

【基金项目】 广西高等教育教学改革研究项目““两性一度”为导向的《信息论与编码》“金课”建设探索与实践”(项目编号:2021JGB393)。

【作者简介】 邓莉,1983年3月,女,汉族,四川省乐山市,博士,研究方向:通信与信息系统。

【中图分类号】 G63 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1673-9574(2022)07-00025-03

人类社会的生存和发展无时无刻离不开信息的产生、传输和处理。信息论正是一门把信息作为研究对象,以揭示信息的本质特性和规律为基础,应用概率论、随机过程和数理统计等方法来研究信息的一般规律的科学,它主要研究如何提高信息系统的可靠性、有效性、保密性和认证性,以使信息系统最优化。

自从1948年香农发表《通信的数学理论》^[1]一文,宣告了信息论作为一门独立的、全新的学科成立。自此之后,信息理论本身得到不断地发展和深化,尤其是在信息理论的指导下,信息技术也获得飞快发展。这又使信息的研究冲破香农狭义信息的范畴,几乎渗透到自然科学与社会科学的所有领域,从而形成了一门具有划时代意义的新兴学科—信息科学。当人类迈入21世纪高度信息化的时代以来,移动通信、互联网通信等信息技术出现了超越人们想象的、前所未有的发展速度。人们对信息的概念已不再陌生、抽象深奥和难以理解与掌握,同时也越来越意识到学习和掌握信息理论的重要。

信息论与编码理论是在长期通信工程实践和理论研究基础上发展起来的、阐释信息传输、处理、存储和控制规律的学科。它与电子、通信、计算机技术、密码技术的发展密切相关,尤其是与近代网络通信、数据加密与安全技术、多媒体技术密不可分。国内外高等院校中与电子信息及通信类工科专业相关的学科,如通信工程、电子工程、信息工程和信息安全等专业都开设有信息论与编码理论相关课程,并将其作为中高年级本科生一门重要的专业基础必修课或选修课,其重要地位不言而喻。与此同时,全国几百所高校先后在数学、物理学、光学和声学等专业也增设或选修有关信息论的课程。然而,信息技术发展较快,更新迭代的周期短,而《信息论与编码》课程的部分教学内容可能已与时代脱节,因此其对相应地改

革与调整是非常有必要的。

一、《信息论与编码》本科课程的知识结构

香农采用概率测度和数理统计的方法系统地讨论了通信的基本问题。首先,他严格定义了信息的度量—熵的概念,又定义了信道容量的概念,得出几个重要而具有普遍意义的结论,并由此奠定了现代信息论的基础。香农信息论解决了点到点可靠通信理论问题,包括信源信道分离定理:证明了信源与信道满足无记忆或广义平稳遍历特性情况下,当码长趋于无穷时,分别设计信源和信道编码即可实现最优通信;信源压缩定理:熵是无损信息压缩的极限;信道容量定理:只要传输速率小于信道容量,即可通过信道编码实现可靠通信。

通信、电子类专业的《信息论与编码》本科课程主要论述香农信息论和编码基本理论及其应用问题,主要教学内容包括^[2]:

(一)信息的定义和度量:首先传输信息的概念,引出香农关于信息的定义和测度,在此基础上讨论各类离散信源、连续和波形信源的信息测度—信息熵。

(二)信道容量分析:分析各类离散信道、连续和波形信道的信息传输率与信道容量。

(三)香农信息论基本定理:包括无失真信源编码定理、限失真信源编码定理和信道编码定理,此部分内容是香农信息论的核心部分。

(四)经典信源编码技术:介绍若干经典的无失真信源编码方法,以阐明香农无失真信源编码定理的应用与意义,主要包括霍夫曼码、费诺码、香农—费诺—埃利斯码、游程编码、MH编码、算术编码以及字典码等。

(五)经典信道编码技术:从有噪信道编码定理出发,介绍各种经典的纠错编码的编、译码算法,主要包括线性分组

码、循环码和卷积码等。

二、经典香农信息理论在后香农时代的局限性

自20世纪50年代，香农经典信息论系统地提出关于信道容量，以及有限编码长度与可获取速率和传输差错概率之间折中的理论框架，为70余年来通信理论与技术的发展奠定了理论基础。纵观移动通信发展历程，5G提出了“增强宽带、万物互联”的发展理念，将移动通信技术水平推向一个前所未有的高度。可以预计，未来的6G移动通信技术将以此为基础，发展覆盖范围更广、传输速率更高、可靠性与时延等性能指标更为优越的无线传输技术，构建更新一代的普适性、智慧化、全业务移动信息基础设施。需要指出的是，香农经典信息论主要针对传统的单输入、单输出信道进行理论分析，在这个万物互联的后香农时代，香农经典信息论开始存在着明显的应用局限性，主要体现为以下几方面：

(一) 经典香农信息理论所分析的信道模型比较简单，仅限于高斯信道、二元对称信道和离散无记忆信道等，且为单输入单输出形式或针对点到点用户。而实际系统的信道模型大部分为多径衰落信道，且针对多天线多用户的MIMO场景^[9]。

(二) 经典香农理论的容量分析仅涉及频率和时间两个维度，而现代移动通信系统由于引入多天技术，其分析维度扩展至频率、时间和空间三个维度，且信道容量与天线数目相关，因而无法支撑现代移动通信系统的容量分析。

(三) 经典香农信息论只定义了可靠信息传输的问题。1949年，香农在文献[1]中指出，通信应该包含三个层次的内容：层次一（语法问题）：通信符号如何准确地传输；层次二（语义问题）：传输的符号如何精确地表达期望的含义；层次三（语用问题）：传递意义如何有效地影响期望的行为。经典香农信息论主要集中在技术问题，对语义问题和语用问题尚没有定论。为了支持可靠机器推理下的信息传输问题，6G不仅要采集与传输数字信息，也要处理语义信息，这就要求必须突破经典信息论的局限，发展广义信息论，构建语义信息与语法信息的全面处理方案，这也是实现人机智能交互的理论基础^[4,5]。

毋庸置疑，经典香农信息论框架奠定了近70余年的通信理论与技术基础。然而时代车轮轰隆向前，现代通信技术以日新月异的速度不断推陈出新。如果简单地将经典香农信息论应用于当代移动通信系统，可能无法实现理想的分析、预测与辅助设计的效果。高等教育的主要目的是传承经典、启迪未来。因此，高等教育也应该与时俱进，特别是通信、电子类等发展迅速的专业，更应该注重课程教学的同步更新。如果课程教学只一味地讲授经典，而不知取其精华，舍弃其远离时代的“糟粕”，也不教授学生顺时而变的技能，便达不到教书育人的本

意。因此，在我们所处的后香农时代，《信息论与编码》本科课程的教学改革势在必行，如何更好地传承经典香农信息论，并以此启迪当代通信系统的分析、研究与设计，是《信息论与编码》本科课程教学改革的宗旨。

三、《信息论与编码》课程教学内容改革措施

在保证上文所述《信息论与编码》本科课程知识体系完整性前提下，拟从以下几方面展开课程教学改革：

(一) 结合多种现代教育技术，开展线上线下的混合式教学模式，拓展课程教学的维度，解决课程教学内容受课时偏少，以及教学大纲等诸多限制的问题。

首先，可以将需要拓展延伸的、不在大纲考核范围的理论知识点做成线上的视频资料库，学生利用课后业余时间，在规定时间内按时完成相关课程的在线学习和作业，作为其平时成绩的一部分，从而达到不占用课内教学时间并拓展知识面的目的。

其次，由于《信息论与编码》这门课程内容难度较大、涉及到的数学知识很多，而课时也较短，学生通过传统单一的线下学习方式，效果较差。可以通过线上教学资源让学生在课余进行预习和复习，并针对教师给出的课程重点及难点，查阅相关资料。

另外，教师可以利用课堂教学与信息化技术相结合的教学方法，利用智慧教学软件全面提升课堂教学体验，将课前-课上-课后的每一个环节都赋予全新的体验，让师生互动更多、教学更为便捷。在课外学习与课堂教学间建立了沟通桥梁，让课堂互动永不下线。

(二) 在原教学内容基础上需要拓展与延伸的理论知识主要包括以下几方面：

在信道容量分析方面，增加对实际移动通信系统的信道模型的介绍，如瑞利衰落信道、莱斯多径衰落信道等。另一方面，多天线MIMO是现代移动通信系统所必备的技术，也是经典香农信息论更为一般的扩展形式。假设信道信息是全局性已知的提前下，则单用户、多用户或多基站联合处理等复杂应用场景下的信道模型及容量分析均可以用统一的形式加以描述[3]。因此线上教学可增加MIMO信道容量构造性逼近的两种重要途径：特征模式MIMO无线传输以及Gallager指数分析法，并讨论MIMO信道的分集增益、空间复用增益，以及性能折中的基本原理等。

在香农信息论基本定理方面，增加对经典香农通信信息论基本框架的扩充，包括限编码长度条件下的Gallager指数与Polar码信道容量逼近、香农与Polyanskiy等提出的有限分块长度渐进容量理论等。另外，需要在此基础上，对经典信息论应

用于现代移动通信系统的局限性进行分析总结,例如香农信道容量理论的MIMO扩展形式与分块长度(时延)和差错概率(可靠性)等传输性能的折中^[3]。

在信源编码技术方面,增加2000年以后发展起来的高速压缩技术。例如,LZ4编码通过巧妙使用哈希表存储字典并利用动态规划加速搜索,达到了数倍于Gzip的压缩速度和吞吐量,常用于内存压缩;LZ4的发明者Yann Collet还设计实现了可以同时取得高压缩率和高压压缩速度的算法ZSTD;2010年前后提出的非对称数字系统ANS,可以取得与霍夫曼编码一样的高压压缩速度和近似算术编码的极致压缩率;Google推出并持续更新的基于LZ77核心理论突破而开发的新一代算法Brotli。2020年以来,随着AI的发展带来的大量计算层面的突破,压缩算法可利用的算力进一步得到提升,因此对压缩率本身的进一步提高又重新成为了新的需求。结合统计和动态预测模型设计的压缩方法被逐渐重视和研究,其中,PAQ和基于其发展而来的CMIX,将数据视作某种不确定性模型的输出,通过对预测模型的动态选择和参数优化,实现相比传统方法更高的压缩率。然而,基于AI的压缩算法的主要局限性在于其压缩速度,由于需要对神经网络中的大量参数进行训练和优化,压缩和解压需要的时间通常比传统方法多1000倍以上,极大地限制了其实用性。在未来的极致无损压缩编码需要解决的根本问题是,如何重新定义压缩算法的最优性,如何建立基于预训练模型的压缩算法的理论框架,如何利用异构的计算环境设计高效压缩算法,如何快速识别并利用数据中重复的片段,以及如何在压缩率和压缩速度间达到最佳的平衡^[5]。

在信道编码技术方面,增加介绍5G信道编码标准中的LDPC码和Polar码的编译码算法的介绍。尽管5G移动通信的信道编码标准已经确定采用极化码,但极化码的编码构造与译码算法还存在很大的优化空间。由于极化码是基于差异化原理编码,非常适合未来6G移动通信灵活多变的业务需求,因此,需要进一步对极化码的设计构造理论展开研究,以及对高性能低复杂度编译码算法展开研究。香农在经典信息论中只定义了可靠信息传输的问题,后来在1949年,香农和Weaver指出,通信应该包含三个层次的内容:层次一(语法问题):通信符号如何准确地传输。层次二(语义问题):传输的符号如何精确地表达期望的含义。层次三(语用问题):传递意义如何有效地影响期望的行为。我们熟知的经典香农信息论主要集中在技术问题,对语义问题和语用问题尚没有定论。可靠机器推理下的信息传输问题正是语义问题,突破语义问题可能会为通信界带来颠覆性的新技术和新产业机会^[5]。

(三)以自主学习和综合实践能力为核心的课程评价体制

改革

由于上述以学生为主导的教学模式改革以及信息理论前沿技术在课程教学中的融入,传统的以卷面考试为主的传统课程评价体系将无法正确评估新课程体制下学生的创新与工程实践能力,因而也需要做较大的调整与改革。本文拟加重过程考核的比例,重视学生的创新与综合实践能力的评价。可以增加文献调研、分析与研讨环节,以及期末的课程设计环节,例如完成某个主流信源编码或信道编码算法的软件仿真,加强学生对课程知识的延伸与拓展,并正确地评估学生在学习过程中表现出的对知识的理解和掌握情况,对具体方法的应用与实践能力,以及自主学习的能力。

四、结语

本文探讨了经典香农信息理论在后香农时代的应用局限性给《信息论与编码》课程教学改革带来的必要性,并从课程教学模式、课程教学内容以及课程评价体制三方面分别展开论述,希望通过与时俱进的课程教学改革,给学生带来新的课程教学体验,达到提高专业素养、自主学习和应用实践能力,并能够学有所获,并学以致用。

参考文献

- [1] Shannon C E. A mathematical theory of communication. Bell Syst Tech J, 1948, 27: 379-423.
- [2] 傅祖芸. 信息论(第四版)—基础理论与应用[M]. 电子工业出版社, 2015.2.
- [3] 肖尤虎. Shannon信息论与未来6G技术潜能[C]. 中国科学:信息科学, Vol (50), No. 9, 2020, 1377-1394.
- [4] 张平, 牛凯, 田辉, 聂高峰, 秦晓琦, 戚琦, 张娇. 6G移动通信技术展望[C], 通信学报, Vol (40), No.1, 2019, 141-148.
- [5] 徐文伟, 张弓, 白铂, 艾超, 吴瑾. 后香农时代ICT领域的十大挑战问题[C]. 中国科学:数学, Vol(51), No. 7, 2021, 1095-1138.