

无线通信中的信道编码技术研究

周 锐

中国电信股份有限公司南宁分公司 广西 南宁 530007

摘 要: 本文围绕无线通信中的信道编码技术展开研究。介绍了无线通信系统基本原理与特点, 阐述无线信道衰落、噪声等特性及信道编码基本原理与分类。探讨信道编码技术性能评估指标, 包括误码率、编码效率与冗余度。随后介绍自适应与混合信道编码技术, 分析其优势。阐述了信道编码技术在移动通信、卫星通信、物联网通信等无线通信系统中的应用, 展现其在提高通信质量与可靠性方面的重要作用。

关键词: 无线通信; 信道编码; 编码技术分类

1 无线通信系统概述

1.1 无线通信系统的基本原理

无线通信系统是利用电磁波在自由空间中传输信息的通信系统, 其基本原理涵盖信号的产生、调制、发射、传播、接收和解调等多个环节。在信息发送端, 首先将原始信息(如语音、文字、图像等)转换为电信号, 这一过程称为信源编码, 目的是提高信息传输的有效性, 去除冗余信息。随后, 信源编码后的信号通过调制器进行调制。调制是将低频的基带信号加载到高频载波上, 使信号具备适合在无线信道中传输的特性。常见的调制方式有幅度调制(AM)、频率调制(FM)和相位调制(PM)等。调制后的信号经功率放大器放大后, 由天线辐射到自由空间中, 以电磁波的形式进行传播。在接收端, 天线捕获到电磁波并将其转换为电信号, 经过低噪声放大器放大后, 送入解调器进行解调。解调器将调制信号还原为原始的基带信号, 再通过信源解码恢复出原始信息。整个无线通信过程中, 电磁波的传播特性对通信质量起着关键作用。电磁波在传播过程中会受到多径效应、衰落、噪声等因素的影响, 这些因素将直接影响信号的传输质量和可靠性。

1.2 无线通信系统的特点

无线通信系统具有诸多鲜明特点, 使其在现代通信领域中占据重要地位。一是移动性强, 与传统的有线通信相比, 无线通信摆脱了线缆的束缚, 用户可以在移动过程中随时随地进行通信。无论是在行驶的汽车中使用手机通话, 还是在户外使用笔记本电脑通过无线网络办公, 无线通信的移动性都极大地提高了通信的便利性和灵活性^[1]。二是部署便捷, 无线通信系统无需铺设大量的电缆或光缆, 只需安装相应的无线设备即可快速搭建通信网络。在一些偏远地区、临时场所或紧急救援场景中, 无线通信系统的快速部署优势能够迅速满足通信需

求。三, 无线通信系统具有广泛的覆盖范围, 随着技术的不断发展, 从宏基站到微基站、毫微微基站, 再到卫星通信, 无线通信能够实现全球范围内的无缝覆盖。四是无线通信系统还具有较强的兼容性, 可以与多种不同类型的设备和网络进行连接, 支持语音、数据、视频等多种业务的传输。然而无线通信系统也存在一些局限性。由于无线信道的开放性, 信号容易受到外界干扰和窃听, 安全性面临挑战。无线信道的衰落、多径效应等特性会导致信号失真和误码, 影响通信质量和可靠性。

2 信道编码技术基础理论

2.1 无线通信信道特性

无线信道具有衰落特性, 衰落可分为大尺度衰落和小尺度衰落。大尺度衰落包括路径损耗和阴影衰落, 路径损耗是指信号在传播过程中, 随着传播距离的增加, 信号强度逐渐减弱, 其衰减程度与传播距离的幂次方成正比; 阴影衰落是由于障碍物对信号的遮挡, 导致信号在局部区域内出现随机的强度变化。小尺度衰落是由于多径效应引起的, 当信号在传播过程中遇到多个反射、散射和衍射物体时, 会形成多条不同路径到达接收端, 这些路径信号的相位和幅度各不相同, 相互叠加后会导致信号的快速衰落和频率选择性衰落。此外, 无线信道还存在噪声, 噪声主要包括热噪声、人为噪声等, 噪声的存在会降低信号的信噪比, 增加误码率。无线信道的时变性也是其重要特性之一, 信道特性会随着时间、环境和用户移动等因素发生变化。

2.2 信道编码基本原理

信道编码的基本原理是在原始信息序列中按照一定的规则添加冗余信息, 通过这些冗余信息与原始信息之间的关联关系, 在接收端能够检测和纠正传输过程中产生的错误, 从而提高通信系统的可靠性。其核心思想基于香农的信道编码定理, 该定理指出, 在给定的信道容

量和误码率要求下,通过合适的编码方式可以实现接近信道容量的可靠通信。具体来说,发送端的编码器根据特定的编码算法,将原始信息序列映射为编码后的码字序列。这些码字序列不仅包含了原始信息,还包含用于纠错和检错的冗余信息。当编码后的信号在信道中传输时,不可避免地会受到噪声、衰落等干扰,导致接收端接收到的信号可能出现错误。在接收端,解码器利用编码规则和接收到的码字序列,通过一定的算法进行错误检测和纠正。信道编码通过牺牲一定的传输效率(增加冗余信息),换取了通信系统在恶劣信道条件下的可靠性提升。

2.3 信道编码分类

信道编码根据不同的分类标准可以分为多种类型。按照编码的结构,可分为分组码和卷积码。分组码是将原始信息序列划分成固定长度的信息组,在每个信息组中独立地添加冗余信息,生成相应的码字。常见的分组码有汉明码、循环码等,汉明码主要用于检错和纠正单个错误,循环码具有良好的代数结构,便于编码和解码实现。卷积码则是将输入信息序列通过一个有记忆的线性移位寄存器进行编码,编码过程中当前时刻的码字不仅与当前时刻的信息组有关,还与之前若干个时刻的信息组相关。卷积码具有连续编码的特点,在相同的码率和纠错能力下,卷积码的性能通常优于分组码,常用于对实时性要求较高的通信系统中。根据编码的功能,信道编码还可分为纠错码、检错码和纠错删码^[2]。纠错码能够检测并纠正传输过程中的错误,使接收端恢复出原始信息;检错码只能检测出传输过程中是否存在错误,但无法对错误进行纠正,通常在检测到错误后要求发送端重传数据;纠错删码则是针对数据丢失(删除)的情况进行纠错,在一些数据传输过程中,可能会出现部分数据丢失的情况,纠错删码可以利用冗余信息恢复出丢失的数据。

3 信道编码技术的性能评估

3.1 误码率性能评估

误码率(BitErrorRate, BER)是衡量信道编码技术性能的重要指标之一,它表示在传输过程中发生错误的比特数与传输总比特数的比值。误码率越低,说明信道编码技术在纠正错误方面的能力越强,通信系统的可靠性越高。在实际评估中,通常通过仿真或实验的方式来获取误码率。在仿真中,利用计算机模拟无线信道环境和信号传输过程,将编码后的信号通过模拟信道传输,加入各种噪声和干扰,然后在接收端进行解码,统计错误比特数,从而计算出误码率。实验则是在实际的通信设备和信道环境中进行测试,通过向信道发送已知的编

码序列,接收端接收并解码后,与原始序列进行对比,计算误码率。误码率与多种因素相关,包括信道条件(如信噪比、衰落程度等)、编码方式、调制方式等。不同的编码方式在相同的信道条件下,误码率性能可能会有很大差异。

3.2 编码效率与冗余度分析

编码效率和冗余度是评估信道编码技术性能的另外两个重要方面。编码效率是指编码后有效信息比特数与编码后总比特数的比值,它反映了信道编码对传输带宽的利用率。编码效率越高,意味着在相同的传输带宽下,能够传输更多的有效信息,系统的传输效率也就越高。冗余度则是指编码后添加的冗余信息比特数与编码后总比特数的比值,它与编码效率密切相关,冗余度越高,编码效率越低。冗余度的大小直接影响着信道编码的纠错能力,一般来说,冗余度越大,编码能够提供的纠错信息就越多,纠错能力也就越强,但同时也会降低编码效率,增加传输带宽的占用。在实际应用中,需要根据具体的通信需求和信道条件,在编码效率和冗余度之间进行权衡。

4 自适应与混合信道编码技术

4.1 自适应编码技术

自适应编码技术是根据信道条件的变化动态调整编码参数和编码方式的技术。由于无线信道具有时变性和不确定性,不同时刻、不同环境下的信道质量差异较大,传统的固定编码方式难以在各种信道条件下都达到最优性能。自适应编码技术能够实时感知信道状态信息(如信噪比、衰落情况等),根据信道状态自动选择最合适的编码方式、码率和调制方式^[3]。自适应编码技术可以通过多种方式实现,如基于反馈的自适应编码,接收端将信道状态信息反馈给发送端,发送端根据反馈信息调整编码参数;还有基于信道预测的自适应编码,通过对信道未来状态的预测,提前调整编码策略。自适应编码技术能够充分利用信道资源,在保证通信质量的前提下,最大限度地提高系统的传输效率和可靠性,是现代无线通信系统中的关键技术之一。

4.2 混合编码技术

混合编码技术是将两种或多种不同类型的编码方式相结合,以充分发挥各自的优势,弥补彼此的不足,从而提高通信系统性能的技术。常见的混合编码方式包括分组码与卷积码的混合、纠错码与检错码的混合等。在混合编码中,可以先利用卷积码对信息进行初步编码,提高对随机错误的纠正能力,然后再使用分组码对卷积码编码后的序列进行进一步编码,增强对突发错误的处

理能力。另一种常见的混合编码是纠错码与检错码的混合,在这种混合编码方式中,先使用纠错码对信息进行编码,纠正大部分可纠正的错误,然后再使用检错码对编码后的序列进行校验,当纠错码无法纠正所有错误时,检错码能够检测出剩余的错误,并通过重传等机制保证信息的正确传输。

5 信道编码技术在无线通信系统中的应用

5.1 移动通信系统

在移动通信系统中,信道编码技术发挥着至关重要的作用。随着移动通信技术从2G、3G发展到4G、5G,对通信的速率、可靠性和容量要求越来越高,信道编码技术也不断演进和创新。在4G移动通信系统(LTE)中,采用了Turbo码和低密度奇偶校验码(LDPC码)作为信道编码方式。Turbo码具有接近香农极限的优异性能,通过迭代解码算法能够有效纠正传输过程中的错误;LDPC码则具有结构简单、编码复杂度低、纠错能力强等优点,能够在保证通信质量的同时,提高系统的传输效率。在5G移动通信系统中,信道编码技术进一步升级,采用了极化码作为控制信道的编码方式,极化码是第一种被严格证明能够达到香农极限的编码方式,具有良好的纠错性能和较低的编码复杂度,能够满足5G系统对控制信道可靠性和低时延的要求;对于数据信道,仍然采用LDPC码,以实现更高的数据传输速率和更大的系统容量。

5.2 卫星通信系统

卫星通信系统具有覆盖范围广、通信距离远等特点,但也面临着信道衰落严重、信号传输延迟大、噪声干扰强等挑战。信道编码技术在卫星通信中是保障通信质量的关键技术之一。在卫星通信中,常用的信道编码方式包括卷积码、级联码等。卷积码由于其良好的纠错性能和实时性,常用于对数据传输实时性要求较高的卫星通信业务中^[4]。级联码是将两种或多种不同的编码方式级联使用,一般由内码和外码组成。随着卫星通信技术的发展,新型的信道编码技术如LDPC码也逐渐应用于卫星通信系统中,进一步提高了卫星通信的传输效率和可靠性,满足了日益增长的卫星通信业务需求,如高清视频传输、宽带数据接入等。

5.3 物联网(IoT)通信

物联网是通过各种传感器、设备实现物与物、物与人之间的互联互通,具有设备数量庞大、通信场景复杂、数据量小且分散等特点。对于物联网中的短距离通信,如蓝牙、ZigBee等,常采用简单高效的编码方式,如循环冗余校验码(CRC)和汉明码等。CRC码主要用于检错,能够快速检测出数据传输过程中的错误,在数据量较小的物联网通信中,简单的CRC码检错结合重传机制可以有效保证数据的正确传输;汉明码则具有一定的纠错能力,适用于对纠错纠正要求不高、成本敏感的物联网设备。在广域物联网(LPWAN)通信中,如窄带物联网(NB-IoT)和LoRa等,由于通信距离较远、信道条件复杂,通常采用纠错能力较强的编码方式,如卷积码和Turbo码等。这些编码方式能够在低信噪比环境下有效降低误码率,保证物联网设备之间的可靠通信,满足物联网大规模连接和数据传输的需求。

结束语

无线通信中的信道编码技术作为保障通信质量与可靠性的关键技术,在无线通信系统发展进程中发挥着不可替代的作用。随着通信技术不断进步,从移动通信到卫星通信,再到物联网通信,信道编码技术不断演进创新,以适应不同通信场景需求。未来,随着通信业务对速率、可靠性等要求持续提高,信道编码技术将面临更多挑战与机遇,需进一步深入研究与创新,推动无线通信系统迈向更高水平,为人们提供更优质、高效的通信服务。

参考文献

- [1]田丰硕,张川,姜洋.无线通信系统中的信道编码与调制技术研究[J].电脑校园,2024(8):1350-1352.
- [2]党欢,王力,张航,等.无线通信中的LDPC编码技术研究及其性能评估[J].电脑编程技巧与维护,2024(10):72-74,80.DOI:10.3969/j.issn.1006-4052.2024.10.021.
- [3]李佳益,袁琼,李晓峰.基于UFMC的类语音调制解调技术研究[J].北京电子科技学院学报,2022,30(04):40-47.
- [4]刘翠,薛鹏.高速光纤通信系统中的信号调制与解调技术[J].电声技术,2023,47(11):115-117+121.