

基于5G高阶QAM和F-OFDM 的LDPC编码研究

Research on LDPC Coding Based on 5G High Order QAM and F-OFDM

张长青(中国移动通信集团湖南有限公司岳阳分公司,湖南 岳阳 414000)

Zhang Changqing(China Mobile Group Hunan Co.,Ltd. Yueyang Branch, Yueyang 414000, China)

摘要:

5G的高速率、高吞吐量、高可靠和低时延等特点,要求系统在物理底层不仅要采用高阶基带调制解调技术,还要采用滤波器组技术,以实现3个由3GPP定义的标准应用场景。高阶QAM和F-OFDM的应用,虽然可以部分满足三大应用场景的需要,但也会带来系统性能的下降,必须有其他新技术引入,才可以弥补已有新技术带来的相关缺陷。LDPC编码译码是一个物理底层的,应用于传输末端的,且技术难度适中、技术性能较高的信道编码技术,是以牺牲部分数据传输率换取系统传输可靠性的5G系统不可或缺的基础技术之一。

关键词:

高阶正交振幅调制;滤波器组正交频分复用;低密度奇偶校验码

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.09.011

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1007-3043(2019)09-0051-05

Abstract:

As 5G has the characteristics of high speed, high throughput, high reliability and low delay, it requires the system not only to adopt high order baseband modulation and demodulation technology, but also filter bank technology to realize 3 standard application scenarios defined by 3GPP. The application of high order QAM and F-OFDM can partly meet the needs of the 3 applications, in the same time brings down the performance of the system. It is necessary to introduce other new technologies to make up for the related defects of the existing new technologies. LDPC coding and decoding is one of the basic technologies that are applied at the end of the physics, and the technical difficulty is moderate and the technical performance is high. It is also one of the essential basic technologies for the 5G system to sacrifice part of the data transmission rate and exchange the reliability of the system.

Keywords:

HOQAM; F-OFDM; LDPC

引用格式:张长青. 基于5G高阶QAM和F-OFDM的LDPC编码研究[J]. 邮电设计技术, 2019(9): 51-55.

1 概述

3GPP定义了5G三大应用场景,其中eMBB对应的是3D/超高清视频等大流量移动宽带业务,mMTC对应的是大规模超连接物联网业务,uRLLC对应的是无人驾驶、工业自动化等需要低时延高可靠连接的业务。与4G仅支持单一的宽带移动互联网业务等应用场景相比,5G的三大应用场景对技术的设计标准和业务规范等基本宏观要求都要高远许多。

5G系统应用期望中的最大需求和技术难点,是系

统能够支持海量数据的快速传输和可靠性传输,使得信息传输和应用能够尽可能地突破现有成熟移动通信技术应用中的时空限制,能够高效地为用户提供感知极佳的交互体验,提供便捷、高速和可靠的人与人、人与物和物与物之间的智能互联。作为物理底层传输的重要关隘,若能将优秀的信道编码技术和高阶基带调制解调技术有机结合,至少在基础技术方面可以在保证数据传输可靠性的基础上,提高数据传输的吞吐量。LDPC长码块编码方案不仅适合5G eMBB对应的3D/超高清视频等海量数据业务的传输,配合高阶基带调制解调方式,还可以使高阶基带调制解调的传输品质降低几个dB的信噪比值。

收稿日期:2019-07-01

信源编码器可以将信源变换成高效率信息承载的比特序列,信道编码器可以将信源编码变换成高可靠性传输的比特序列,基带调制器可以将信道编码变换成可以远距离正常传输的调制符号。信道编码上承信源编码,下启基带调制,在移动通信物理层的三大基础技术中举足轻重,是移动通信领域基础技术中的关键技术。正因如此,在5G三大应用场景对应的信道中,目前仅有eMBB场景的信令信道和数据信道的编码方案已分别确定为Polar码和LDPC码,其他方案都为待定,说明3GPP对移动通信系统中信道编码技术非常重视,提交方案的选择也非常谨慎。

2 LDPC 码

2.1 LDPC 码简介

2016年10月14日葡萄牙首都里斯本,3GPP RAN1(无线物理层)#86bis会议,确定了5G eMBB场景数据业务信道长码块编码方案使用美国高通公司推荐提交的低密度奇偶校验(LDPC)码。

LDPC是一种检错纠错能力极强的长码块信道编码技术,编码性能可以比肩甚至高于Turbo码,仅以0.004 dB的微弱差距接近香农极限,因而具有比Turbo码更高的可靠性。LDPC码利用校验矩阵的稀疏性,使得译码复杂度只与码长成线性关系,但在长码长时仍然可以有效地进行译码,因而具有更简单的译码算法。LDPC码只需通过Multi-Edge构造就可以灵活地得到不同速率的可变长信道编码方案,是一种非常合适通信系统的递增冗余技术。LDPC码采用了并行译码方式,可以大幅度节省解码时间,降低解码复杂度。LDPC码的码长较长,可通过校验矩阵 H 的图像表达进行迭代译码,使译码器结构变得非常简单,可以消耗较少的资源获得极高的块吞吐量。

LDPC码实际上是技术成熟、应用悠久的线性分组码或块码中的一种特殊方式,数据业务中一般作为固定长度信道编码技术使用。假设经过信源编码后的总信息比特序列长为 k ,分组后形成的分组码元的信息比特序列长为 n ,作为监督码元的校验比特序列长为 $m=n-k$ 。若取分组码元与监督码元之间的关系为线性关系,再将监督码元添加到分组码元中形成新的比特序列。LDPC编码的关键技术是,从总信息长度为 k 比特序列到分组信息长度为 n 比特序列之间的映射关系,通常由一个尺寸为 $m \times k$ 的二进制校验矩阵 H 表示,由于校验矩阵 H 是非零元素很少的稀疏阵,而用

一个稀疏的向量空间把信息分散到整个码字当中时,可以极大地简化算法,降低LDPC编码的实现难度。

2.2 LDPC 码编码原理

2.2.1 LDPC 码校验矩阵

显然,LDPC码的编码关键是一个作为校验矩阵的 m 行 n 列稀疏矩阵 H 。与之对应的LDPC码码长为 n ,校验位长约为 m ,信息位长 $n_1 \approx n-m$ 。同时,该稀疏矩阵必须满足如下条件:

- 矩阵的行重、列重与码长的比值远小于1。
- 任意2行或列最多只有1个相同位置上的1。
- 任意线性无关的列数尽量大。

若校验矩阵 H 的列重和行重分别为常数 d_v 和 d_c ,则叫规则LDPC码,对应的码率为 $r \geq 1-m/n=1-d_v/d_c$ 。式(1)所示为行数 $m=15$,列数 $n=20$,行重 $d_c=4$,列重 $d_v=3$,码率 $r=1-d_v/d_c=1/4$,信息位长 $n_1=n-m=5$ 的规则LDPC码校验矩阵。可以看出,该稀疏矩阵满足校验矩阵 H 的定义标准。

$$H_{15 \times 20} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

若矩阵 H 的列重和行重不是常数,则叫不规则LDPC码,不规则LDPC码可以用重量分布多项式来方便描述。

一个优秀的LDPC码,首先是有一个优秀的校验矩阵 H 。虽然满足条件的校验矩阵可以有多种表示,但并非所有满足条件的校验矩阵都能产生优秀的信道编码效果。优秀的校验矩阵,不仅可以提高编码的可靠性和有用数据率,还能够提高译码率和数据的传输速率。一个优秀的校验矩阵,并不是一个行长或列长较小或较大的矩阵,但适量大小的校验矩阵,完全可以起到事半功倍的效果,式(1)所示校验矩阵的编码性能比较优秀。

2.2.2 LDPC 编码原理

通用LDPC编码算法主要包括基于生成矩阵的算法和基于校验矩阵的算法,前者又叫线性分组码编码,对应的 $m \times n$ 校验矩阵 H 中的所有行都是线性无关的,后者包括LU分解法和RU算法,其中RU算法通过行列置换,将一般的低密度奇偶校验矩阵化为一个近似下三角矩阵,可以有效降低编码的复杂度。因原矩阵稀疏,变换后的校验阵仍然是稀疏的,如图1所示,近似下三角矩阵可以简化为由6个子矩阵组成的矩阵,其中子矩阵 T 是对角线元素全为1的下三角矩阵。而矩阵 $A、B、C、D、E、T$ 的维数分别是 $(m-g) \times (n-m)、(m-g) \times g、g \times (n-m)、g \times g、g \times (m-g)、(m-g) \times (m-g)$ 。若以左上角为原点,则各子阵元素的取值位置分别为: $A=[1:(m-g), 1:(n-m)]、B=[1:(m-g), (n-m):(n-m+g)]、C=[(m-g):m, 1:(n-m)]、D=[(m-g):m, (n-m):(n-m+g)]、E=[(m-g):m, (n-m+g):n]、T=[1:(m-g), (n-m+g):n]$ 。

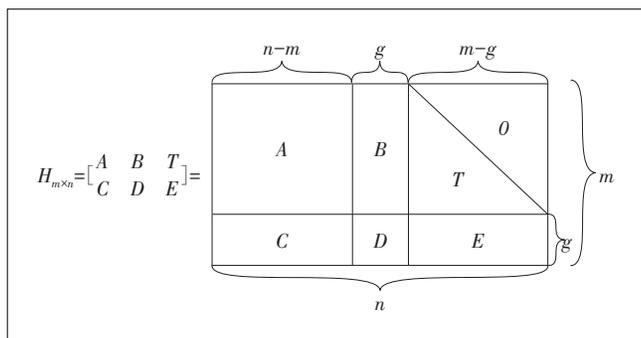


图1 近似下三角形形式奇偶校验矩阵

若信源向量 S 是长度为 N 的比特序列,若将 S 等分成 n_0 组的分组向量 $s(i), i=1, 2, \dots, n_0$,其中每个分组向量 $s(i)$ 的长度为 $n_1=n-m$,则 $N=n_0 \times n_1$ 。若采用RU算法将分组向量 $s(i)$ 与校验矩阵 H 编码,可以得到 n_0 组LDPC编码码字向量 $c(i)=[s(i), p_1, p_2], i=1, 2, \dots, n_0$,式中 $p_1、p_2$ 分别为校验向量, p_1 长为 g, p_2 长为 $m-g$,最后形成可以传输到下游基带调制器中的新的LDPC编码分组 $[s(i), p_1, p_2]$ 。简单编码步骤如下:

- 上校正子: $Z_A=A \times s^T$ 。
- 临时校验向量: $P_a=T^{-1} \times Z_A$ 。
- 下校正子: $Z_B=C \times s^T-E \times P_a$ 。
- 临时校验向量: $P_b=-F^{-1} \times Z_B$ 。
- 校验向量: $p_1=(P_b)'$ 。
- 临时校正子: $Z_c=Z_A+B \times p_1$ 。
- 临时校验向量: $P_c=-T^{-1} z_c, p_2=(P_c)'$ 。

h) 校验向量: $p_2=(P_c)'$ 。

2.2.3 LDPC 译码原理

通用的LDPC译码算法主要有MP法、硬判决法和软判决法,其中软判决主要是BP算法,硬判决主要有BF算法和WBF算法等。BF算法又叫比特翻转法,是一种比较简单和容易理解的译码算法,虽然性能相对较差,但对系统的运算量和存储量要求很低,比较适合低端终端技术设计标准。下面就来分析BF法的译码过程。

经过RU算法编码的发送序列经过基带调制后形成符号序列,再经过IFFT变换形成OFDM符号序列,最后经过信道传输中的噪声干扰后形成接收信号,接收天线收到接收信号后,经过FFT变换恢复为符号序列,又经过基带解调恢复为包含有分组向量 $s(i)$ 与校验向量 p_1 和 p_2 的码字向量序列 $r(i)=[s(i), p_1, p_2], i=1, 2, \dots, n_0$,开始译码。

BF算法的目的是从向量序列 r 中译码出信源序列 s ,基本流程如图2所示。

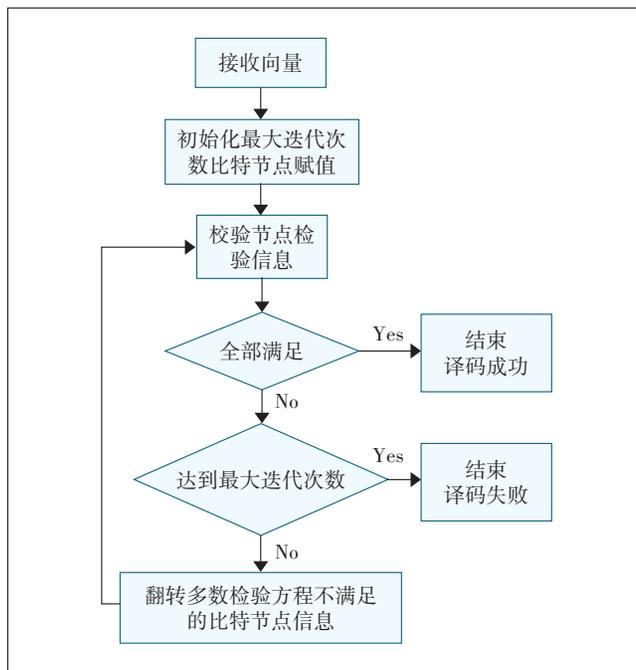


图2 BF译码算法流程

首先,根据接收端的向量序列 $r=(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 得到硬判决二元向量序列 $z(i)=[z_1, z_2, \dots, z_n]$,其中 $r(i)>0$ 时, $z(i)=1; r(i) \leq 0$ 时, $z(i)=0$ 。由此可以得到码字伴随式 $d=(d_1, d_2, \dots, d_n)=z \times H^T$,若 $d(i)=0$,说明接收向量满足第 i 个校验方程;若 $d \neq 0$,表示接收向量满足所有校验方程,接收码字 z 正确,译码成功;若伴随式 d 为非全

“0”向量,接收序列 z 有错误,此时则需要计算出每个码元不满足校验方程的个数 $f=(f_1, f_2, \dots, f_n)=s \times H$,搜索 f 中的最大值,翻转对应位置的码元 $z(i)$,再重复上述过程,直到译码成功后达到最大迭代次数。所以,BF译码算法只有简单的3个步骤。

a) 根据硬判决二元向量序列 z 得到码字的伴随式为 d ,判断 d 是否为全“0”,如果是全“0”,则译码成功,否则转b)。

b) 计算 f ,并找出最大值 $f_j=\max(f)$,翻转对应位置的码元 $z(j)$ 。

c) 将得到的新的向量序列代替原向量,转步骤a),如果满足伴随式全为“0”,译码成功,跳出,否则重复上述步骤,直到达到最大迭代次数。

3 LDPC 码仿真

3.1 仿真建模

根据3GPP初定,5G系统将采用滤波器组OFDM(F-OFDM)和高阶基带调制解调(MQAM)等新技术。为了使建模尽可能接近应用场景,除了没有仿真信源编解码外,还因计算机内存资源有限,没有仿真上下变频。所以,仿真过程中只仿真了信道编解码、基带调制解调、IFFT与FFT变换、综合与分析滤波和插入与除去CP等。因此,必须先建立校验矩阵和原型滤波器等专用模块,其中校验矩阵是式(1)所示的 15×20 稀疏矩阵 H ,行重为4,列重为3,在20位码长中只有5位是有效传输比特,因而码率较低仅为1/4。原型滤波器则是叠加因子 $K=4$ 的通用滤波方程。整个仿真过程较为复杂。

基带调制解调器实际上是比特序列与符号序列的分界点,即基带调制器之前和基带解调器之后的信号流是二进制比特流,基带调制器之后和基带解调器之前的信号流是模拟连续波符号流,每个符号包含的比特数由调制阶数决定,如在64QAM符号中仅包含6 bit信息,在256QAM符号中则包含了8 bit信息,在1024QAM符号中包含有10 bit信息。所以,高阶QAM调制解调可以大幅度提高物理层的数据传输率,但高阶QAM因传输波的幅度调制阶数较多(如256QAM的传输波调制幅度有16个等级,1024QAM的传输波调制幅度有32个等级),不仅降低了接收端解调过程中的分辨率,还大大提高了接收端的技术复杂度,需要有其他技术提高系统性能。

在信源编码仿真中,因校验矩阵结构特点,每个

信源编码分组块中的20 bit数据,有效信息只有5位,其他15位分别为校验向量 p_1 和校验向量 p_2 ,又因计算内存资源的限制,所以信源码字比特流容量只能取720 000。在F-OFDM仿真中,IFFT/FFT中采用的抽样数为512,其中子载波数为400,补零数112,再通过子载波映射方式完成快速傅里叶变换。循环前缀CP直接用每个子帧中后面的4个符号代替,采用卷积算法可方便实现。同样因内存资源有限等原因,无线信道中只取高斯噪声干扰,没有采用瑞利信道算法。仿真流程的具体过程如下。

发射端:产生信源→信道编码→并串变换→电平变换→QAM调制→串并变换→子载波映射→IFFT变换→综合滤波→加循环前缀→发射信号。

接收端:加高斯噪声→串并变换→去循环前缀→分析滤波→FFT变换→子载波逆映射→并串变换→QAM解调→接收符号→接收比特→串并变换→信道译码→输出信宿。

3.2 误码率分析

若在基带调制解调器的前后增加品质优异的信源编解码方案,可以极大地改善因高阶QAM应用引起的传输品质恶化的现象。5G系统为了提高数据传输的高速率,需要在物理底层采用高阶QAM调制技术。同样为了适应万物互联和万网融合的设计理念,需要在5G中采用滤波器组OFDM多载波传输技术。这些已经应用于固网中的高新技术,对传输信道品质的要求较高,若应用于传输环境恶劣的无线信道,则必须采用其他补偿技术来抗衡无线信道中的多径效应和噪声干扰,LDPC编码技术便是其中之一。

图3所示为基于256QAM的有无LDPC编译码的误比特率曲线。256QAM是3GPP明确定义为5G的基

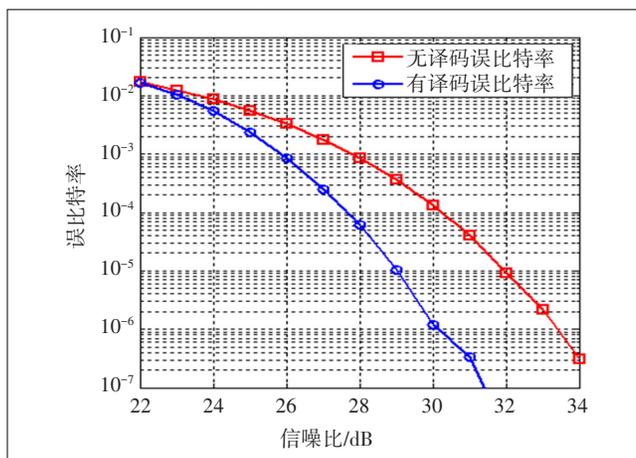


图3 基于256QAM的有无LDPC编译码的误比特率曲线

带调制解调方式,随着调制阶数的提高,传输信道的信噪比标准也提高了。该仿真过程中,发射端全部采用了基于校验矩阵的编码方式,对接收端采用和没有采用BF算法的译码方式来予以比较。可以看出,虽然接收端的译码方式是最简单的硬判决BF算法,但译码带来的传输性能优化效果非常明显,且随着信噪比的增加,两者的差距也越来越大。在误比特率等于 10^{-7} 时,采用LDPC编码系统性能的优化效果至少有3 dB。

图4所示为基于1024QAM的有无LDPC编译码的误比特率曲线。1024QAM技术虽然目前还没有被3GPP确定为5G的基带调制解调标准,但随着5G的商用和演进,系统对数据传输的速率和吞吐量要求的进一步提升,采用结构相对简单的方形星座1024QAM是最佳方案。从图4中可以发现,随着QAM调制阶数的增加,MQAM误比特率曲线的变化特点是越来越平缓,但采用LDPC编码后的优化效果也越来越好。图3中信噪比256QAM在误比特率为 10^{-7} 时只降低了约3 dB,但图4中1024QAM则降低了约6 dB,LDPC编码更适合高阶QAM方案。

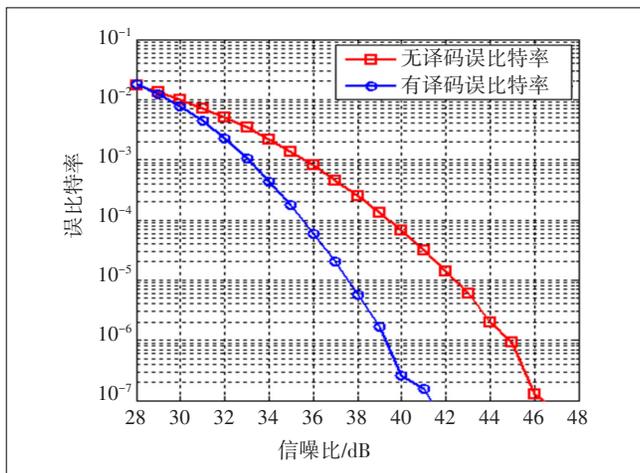


图4 基于1024QAM的有无LDPC编译码的误比特率曲线

图5所示为基于64、256、1024QAM的LDPC编码的误比特率曲线。之所以引入64QAM,一方面64QAM是4G基带调制解调方案中的最高阶方式,另一方面可以与其他高阶QAM进行比较,为此还专门考虑了64QAM有无LDPC译码2种情况。可以看出,通过LDPC编码译码和3种高阶QAM基带调制解调,以及F-OFDM等传输技术处理后,系统性能得到了较大的提高。在误比特率为 10^{-7} 时,与有LDPC译码的64QAM误比特率曲线相比,高阶256QAM的信噪比增加约7 dB,1024QAM信噪比增加了约17 dB;但若与无LDPC

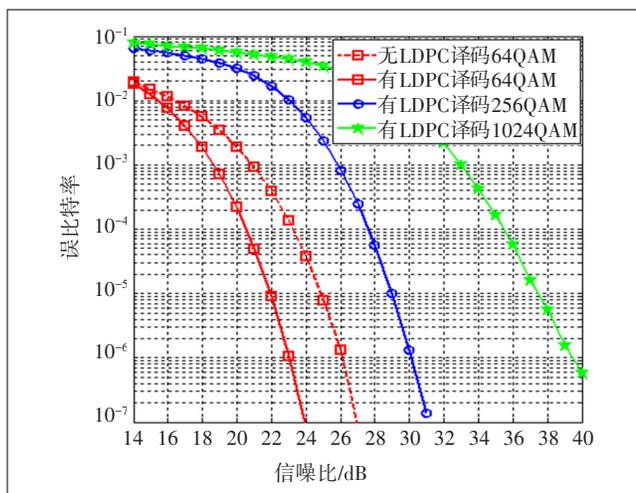


图5 基于64、256、1024QAM的LDPC编码的误比特率曲线
 译码的64QAM的误比特率曲线比较,高阶256QAM信噪比仅增加了2 dB,1024QAM信噪比仅增加了约14 dB。当然,仿真中采用的LDPC译码算法是最简单的硬判决,系统性能提升有限,若采用软判决,系统性能提升的空间将会更大。

4 结束语

LDPC编码技术从传输源头开始提高系统性能,为系统在传输后阶段的其他环节,增添其他提高系统性能的新技术,预留了更多的空间,对于5G应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 于清苹,史治平. 5G信道编码技术研究综述[J]. 无线电通信技术,2018(1):1-8.
- [2] 赵元苏. 5G通信信道编码研究综述[J]. 北京工业职业技术学院学报,2017,16((1):36-38.
- [3] 高峰,高泽华. TD-LTE技术标准与实践[M]. 北京:人民邮电出版社,2011.
- [4] 郑洋,李雷. 5G射频测试技术及发展趋势[J]. 电信网技术,20117(12):26-29.
- [5] 张长青. TD-LTE承载资源与物理信道分析[J]. 邮电设计技术,2014(10):21-25.

作者简介:

张长青,毕业于中科院长春物理研究所,高级工程师,硕士,主要从事计算机网络和移动通信技术相关工作。

