

面向 5G 的多元 LDPC 改进译码算法的仿真研究

孟嘉慧 赵旦峰 田海

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

摘要 根据 5G 移动通信中高速率、低时延、大容量数据传输及多种场景的特点,提出了一种面向 5G 的基于多元 LDPC 码的低复杂度译码算法,即混合域 Log-FFT-BP(Mixed Log-FFT-BP)译码算法。该算法直接对概率信息求对数,避免求解对数似然比操作,并且在校验节点的更新过程中,采用对中间变量求对数再对校验节点信息求傅里叶逆变换的方式,来进一步降低译码复杂度。从 5G 信道编码需支持更广泛的码块长度和更多码率的角度进行仿真,结果表明,与传统译码算法相比,改进的 Mixed log-FFT-BP 算法性能相差不大,约为 0.1~0.2 dB,且能够降低译码复杂度,更利于硬件平台的实现。

关键词 5G,多元 LDPC 码,低复杂度,Mixed log-FFT-BP 算法

中图分类号 TN919.3+ **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.09.022

Simulation Research on Improved Decoding Algorithm Based on Non-binary LDPC for 5G

MENG Jia-hui ZHAO Dan-feng TIAN Hai

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract According to the characteristics of high speed, low delay, high capacity data transmission and various scenes in 5G mobile communication, this paper proposed a low complexity decoding algorithm based on Non-binary LDPC codes for 5G, which is called mixed Log-FFT-BP decoding algorithm. The algorithm directly computes the logarithm of the probability information and avoids the operation of computing the log likelihood ratio. In the process of updating the check nodes, the algorithm uses the logarithm of the intermediate variable and the inverse Fourier transform of the check node information to reduce the decoding complexity. The simulation was conducted for 5G channel coding to support a wider range of code block lengths and more code rates. The simulation results show that the performance of the improved mixed log-FFT-BP algorithm has little difference (about 0.1~0.2 dB) compared with the traditional decoding algorithm, which reduces the decoding complexity and is more conducive to the realization of hardware platform.

Keywords 5G, Non-binary LDPC codes, Low complexity, Mixed log-FFT-BP algorithm

1 引言

第四代移动通信技术(4G)已经在全球商业化,关于第五代移动通信(5G)标准的制定早已展开争论。目前,5G NR(New Radio)标准中规定,数据下载峰值速率达到 20Gbps,端到端连接数据时延小于 1 ms,URLLC 场景中用户数据时延为 0.5 ms^[1]。5G 标准已经定义了增强移动宽带(eMBB)、大连接物联网(mMTC)和超高可靠超低时延通信(URLLC)三大应用场景。eMBB 对应的是 3D/超高清视频等大流量移动业务带宽。

3GPP RAN1 在 2016 年 10 月的里斯本会议和同年 11 月的里诺会议中已形成决议,在 eMBB 场景的上行和下行数据信道上均采用 LDPC 编码方案。LDPC 码的编码效率接近香

农限,并且具有低编译码复杂度,对芯片的性能要求和功耗都不高。因此,LDPC 编译码更适应 5G 的高速率、低时延、大容量数据传输及多种场景的要求。

面向 2020 年的未来 5G 移动通信系统要求在确保低成本及传输的安全性、可靠性、稳定性的前提下,能够提供更高的数据传输速率、服务更多的连接数和获得更好的用户体验。5G 需要保障更高可靠性的通信。LET 对一般数据的空口误块率要求初始传输为 10%,经过几次重传后,误块率低于 1%即可。但是,5G 要求误块率要降到十万分之一。这意味着,10 万个码块中,只允许信道译码器犯一次错,最多只能有一个码块不能纠错。另外,5G 信道编码需支持更广泛的码块长度和更多的编码率。例如,短码块应用于物联网,长码块应用于高清视频,低码率应用于基站分布稀疏的农村站点,高码率

到稿日期:2017-10-01 返修日期:2018-01-20 本文受中兴产学研合作论坛合作项目:多元 LDPC 译码算法复杂度优化研究(KY10800160020)资助。

孟嘉慧(1993—),女,硕士,主要研究方向为信道编译码算法、编码与调制技术、现代通信系统,E-mail:mengjiahui@hrbeu.edu.cn(通信作者);

赵旦峰(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为通信信号处理、无线通信技术、水声通信技术;田海(1990—),男,博士,主要研究方向为现代通信技术、信道编译码、通信信号处理。

应用于密集城区。如果都用同样的码率就会造成数据比特浪费,进而浪费频谱资源。综上,决定5G采用哪种编译码方式的因素就是:译码吞吐量、时延、纠错能力、灵活性、实施复杂性、成熟度和后相兼容性等。

LDPC码由Gallager博士于1962年提出,但受限于当时落后的条件无法对其进行实现^[2]。直到1995年,Mackay和Neal发现在码长较长的情况下采用LDPC译码算法的系统比采用Turbo码的系统容量更接近香农限^[3-4]。理论研究表明,当码长趋于无穷大时,使用误码率为1/2的非规则LDPC码,在加性高斯白噪声(AWGN)信道上进行可靠通信,所需的信噪比门限值距香农极限仅有0.0045 dB^[5]。目前,关于LDPC码的设计、构造、性能分析及应用几乎都集中在二元码^[6],而相关研究表明,具有特别列重的低码率多元LDPC码,在AWGN信道下的性能优于二元LDPC码,并且多元LDPC码的抗突发错误性能要明显优于二元LDPC码^[7-9]。多元LDPC码还具有以下优点:1)具有消除小环(特别是4环)的潜力,可以获得更好的纠错性能^[10];2)在移动通信、卫星通信、深空通信、磁盘存储、无人机通信等数字通信中^[11-12],信道产生的错误往往是突发的,多元LDPC码可以将多个突发错误合成较少的多元符号错误,从而提高抗突发错误的能力,在5G系统中将得到广泛应用。除此之外,将多元LDPC码的编码技术与多天系统相结合,可极大地提高移动通信系统中的用户容量。多元LDPC编码技术将成为各大研究机构 and 通信公司的研究热点,未来移动通信标准也都将多元LDPC码作为信道编码方案之一。

多元LDPC译码算法的复杂度优化应该是多元LDPC码实际应用的关键科学技术。本文提出改进的Mixed Log-FFT-BP译码算法可突破多元LDPC码在硬件实现上面临的译码算法复杂度高和存储空间要求大这两大挑战,为5G移动通信的设计提供了更广阔的选择空间和选择依据。而多元LDPC码相对于传统信道编码的优势,使其在其他频带受限系统中有很强的实用价值。综上所述,本文从不同码长、不同码率的角度对改进的Mixed Log-FFT-BP算法进行仿真研究,提出了多元LDPC码的改进的Mixed Log-FFT-BP译码算法在5G系统中的应用思路。在满足5G系统的更低传输时延和更高吞吐量的前提下,该方法能够改善译码性能,进一步降低译码复杂度,提升译码速率,且更适合硬件平台的实现。仿真结果验证了本方案的有效性。

2 多元LDPC编码

首先,在 $GF(q)$ 有限域上构造出能够满足性能指标的校验矩阵 H ,并基于高斯消元的方法^[13]将校验矩阵 H 转换成图1所示的下三角矩阵。然后,对校验矩阵 H 进行初等变换,即将校验矩阵 H 的校验部分转换成单位矩阵的形式,如式(1)所示:

$$H=[P|I_{n-k}] \quad (1)$$

其中, H 为 $(n-k) \times n$ 的校验矩阵, k 为编码前信息的长度, n 为编码后码字的长度, $n-k$ 为添加校验位长度, P 为 $m \times k$ 维矩阵, I 为 $m \times m$ 维单位阵。根据 $H \cdot G^T=0$ 可以得到LDPC码的生成矩阵 G :

$$G=[I_k|-P^T] \quad (2)$$

若信源信息向量用 s 表示(其中, s 为输入信息码流,长度为 k),经过直接矩阵相乘得到多元LDPC编码序列,则生成的码字向量 c 为:

$$c=s \times G \quad (3)$$

在高斯消元中所有的运算都是基于 $GF(q)$ 的,该编码方法可以得到如图2所示的系统线性分组码结构。基于高斯消元的编码方法中编码复杂度由两部分构成:预处理复杂度 $O(n^3)$ 和编码复杂度 $O(n^2)$ 。由于高斯消元的过程只在校验矩阵构造生成矩阵时出现,在后续编码过程中不再出现,因此生成矩阵固定的直接编码运算量为 $n^2R(1-R)/2$,其中 R 为编码码率,可以实现线性关系的编码次数。

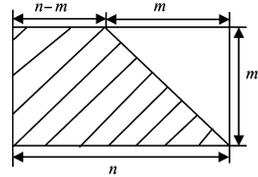


图1 下三角结构的校验矩阵

Fig. 1 Check matrix of lower triangular structure

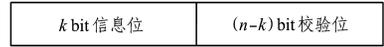


图2 系统线性分组码结构

Fig. 2 Structure of linear block code of system

3 改进的Mixed Log-FFT-BP译码算法

由于改进的Mixed Log-FFT-BP算法直接对概率信息求对数,因此用 $F_n^a, R_{mn}^a, Q_{mn}^a$ 表示对数域上的信息,其中 $F_n^a = \log(f_n^a)$ 表示初始化信息, $R_{mn}^a = \log(r_{mn}^a)$ 表示校验节点信息, $Q_{mn}^a = \log(q_{mn}^a)$ 表示变量节点信息。用 $q_{mn}^a = [q_{mn}^0, q_{mn}^1, \dots, q_{mn}^{a-1}]$ 和 $r_{mn}^a = [r_{mn}^0, r_{mn}^1, \dots, r_{mn}^{a-1}]$ 表示时域信息矢量。由于是多进制LDPC码的译码,信息从变量节点到校验节点的过程需要经过置换节点,因此用 $P_{h_{mn}}$ 表示变量节点到校验节点进行消息传播的置换矩阵。同理,信息从校验节点到变量节点的过程也需要经过置换节点,因此用 $P_{h_{mn}}^{-1}$ 表示校验节点到变量节点进行消息传播的逆置换矩阵。这两个矩阵都与校验方程中的非零元素 h_{mn} 相关,并且矩阵间的运算均是基于 $GF(q)$ 的运算。 $M(n) := \{m: h_{mn} \neq 0\}$ 为与第 n 个变量节点相关的校验节点集合,即 H_{MN} 中第 n 列 $GF(q)$ 上的非“0”元素。 $N(m) := \{n: h_{mn} \neq 0\}$ 为与第 m 个校验节点相关的变量节点集合,即 H_{MN} 中第 m 行的 $GF(q)$ 上的非“0”元素。 $N(m) \setminus n$ 为与第 m 个校验节点相关但不包含变量节点 n 的变量节点的集合。 $M(n) \setminus m$ 为与第 n 个变量节点相关但不包含校验节点 m 的校验节点集合。

具体的译码步骤如下。

(1) 初始化过程

将对数域初始化信息 F_n^a 作为对数域变量节点信息 Q_{mn}^a 的初始化值,则有:

$$Q_{mn}^a = F_n^a \quad (4)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N, m \in M(n), a \in GF(2^p)$ 。

(2) 校验节点更新

校验节点的更新过程需将对数域上的概率信息经过指数

运算转换到实数域上。因此,本文提出的混合域即为对数域和实数域的混合。其中,校验节点更新的具体过程如图 3 所示。

$$q_{mn}^a = \exp(Q_{mn}^a) \quad (5)$$

其中, $m=1, 2, \dots, M, n \in N(m), \alpha \in GF(2^p)$ 。

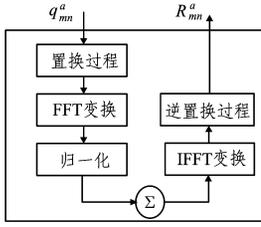


图 3 校验节点的更新过程

Fig. 3 Updating process of check nodes

校验节点按矩阵行的顺序进行更新,其结果按照行的顺序进行更新和存储。结合 $q_{mn}^a = [q_{mn}^0, q_{mn}^1, \dots, q_{mn}^{q-1}]$, 可得:

$$u_{mn}^a = a_{mn} FFT(P_{h_{mn}} q_{mn}^a) \quad (6)$$

$$U_{mn}^a = \log(u_{mn}^a) \quad (7)$$

$$R_{mn}^a = P_{h_{mn}}^{-1} IFFT(\sum_{j \in N(m)n} U_{mj}^a) \quad (8)$$

其中, $P_{h_{mn}}$ 表示与校验矩阵 H 中的元素 h_{mn} 有关的置换矩阵; $\Sigma(\cdot)$ 表示向量中各元素的逐项求和; α_{mn} 为归一化因子,且满足 $\sum_{\alpha \in (0, q-1)} q_{mn}^a = 1$ 。

(3) 变量节点更新

变量节点按照矩阵列的顺序进行更新,其结果按照列的顺序进行存储,可得:

$$Q_{mn}^a = F_n^a + \sum_{j \in M(n) \setminus m} R_{jn}^a \quad (9)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N, m \in M(n), \alpha \in GF(2^p)$ 。变量节点更新的过程如图 4 所示。

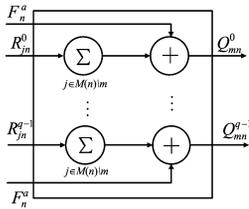


图 4 变量节点的更新过程

Fig. 4 Updating process of variable node

(4) 译码硬判决

根据译码算法的迭代原理,每次变量节点重新更新后,都需要对其进行译码硬判决,以判断此次译码是否成功。

$$\hat{x} = \arg \max_a (F_n^a + \sum_{j \in M(n) \setminus m} R_{jn}^a) \quad (10)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N$ 。当满足校验方程 $Hx=0$ 或者达到最大译码迭代次数时,译码成功,跳出译码程序。

多元 LDPC 码的 Mixed Log-FFT-BP 译码算法的实现过程不同于传统的 BP 译码算法,它将变量节点更新步骤中的归一化过程转移到校验节点更新步骤中,因为变量节点更新步骤是在对数域上进行运算的,而对数域上的归一化需要运用雅克比递归来计算,所以为了避免引入雅克比递归运算,在 FFT 运算后进行信息的归一化。归一化过程的转移并不影响译码算法的最终结果。

4 仿真结果及复杂度分析

多元 LDPC 码的改进 Mixed Log-FFT-BP 译码算法在 Log-FFT-BP 译码^[14-15]的基础上做了改进,将浪费资源且运算复杂的乘法运算简化成加法运算和查表运算,因此无论是在数字信号处理器件还是数字逻辑器件上,它都能简单地实现,为多元 LDPC 码的硬件实现提供了可靠的保障。

针对多元 LDPC 码译码算法的计算复杂度,对多元 LDPC 码的 BP 译码算法、Log-BP 译码算法、FFT-BP 译码算法、Log-FFT-BP 以及改进的 Mixed Log-FFT-BP 译码算法进行对比分析。表 1 列出了 5 种译码算法的运算复杂度,其中设多元 LDPC 码的校验矩阵为 H , M 为 H 矩阵的行数, N 为 H 矩阵的列数, d_c 和 d_v 分别为 H 矩阵的行重和列重, q 为多元 LDPC 码的阶数。

表 1 多元 LDPC 码译码算法的运算复杂度的对比

Table 1 Comparison of computational complexities of nonbinary

LDPC codes decoding algorithms

译码算法	乘法运算	加法运算	查表运算
BP 算法	$Mq^{d_v}(d_v-1) + N(d_c+1)q$	Mq^{d_v-1}	0
Log-BP 算法	0	$6Md_v(q-1)^2 + N(q-1)(d_c-1)d_c$	$2Md_v(q-1)^2$
FFT-BP 算法	$q \log_2 q (d_v^2 + 4d_v)$	$q \log_2 q + 2qd_v$	0
Log-FFT-BP 算法	0	$(4q \log_2 q + 2q)d_v$	$2qd_v$
改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法	0	$(4q \log_2 q + 2q)d_v$	$2qd_v$

由表 1 可得:多元 LDPC 码的 BP 译码算法需要乘法运算和加法运算,其运算复杂度为 $O(q^2)$;Log-BP 译码算法需要加法运算和查表运算,其运算复杂度为 $O(q^2)$;FFT-BP 译码算法需要乘法运算和加法运算,其运算复杂度为 $O(q \log_2 q)$;Log-FFT-BP 译码算法需要加法运算和查表运算,其运算复杂度为 $O(q \log_2 q)$;改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法不需要乘法运算,所需的加法运算和查表运算均易于硬件实现,并且整体的运算复杂度由 $O(q^2)$ 降低为 $O(q \log_2 q)$ 。

本文通过搭建面向 5G 系统的多元 LDPC 码仿真平台,利用 MATLAB 对改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法的误比特率性能进行仿真,从误比特率性能的角度,对改进的译码算法与现有的 Log-BP 译码算法进行对比,以验证改进算法的有效性。链路级仿真框图如图 5 所示。

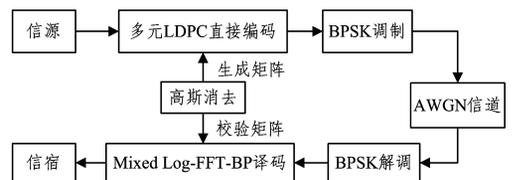


图 5 链路级仿真框图

Fig. 5 Link-level simulation block diagram

在算法的误比特率性能仿真中,采用的调制方式均为 BPSK 调制^[16],信道均设定为 AWGN 信道,码长均由二进制比特的数目表示。改进的 Mixed Log-FFT-BP 译码算法的实现流程如图 6 所示。

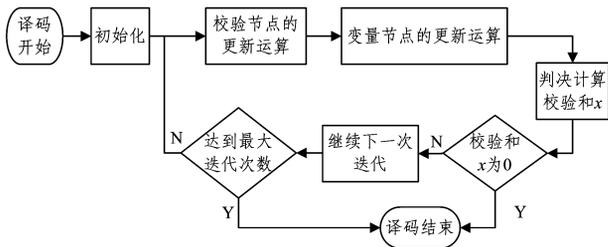
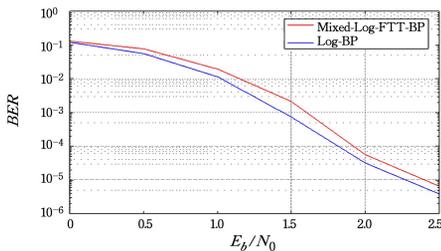
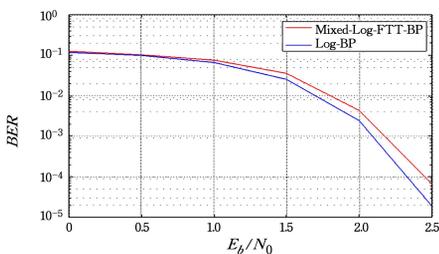


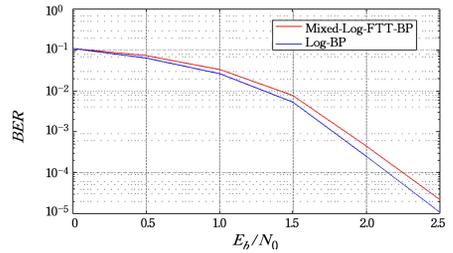
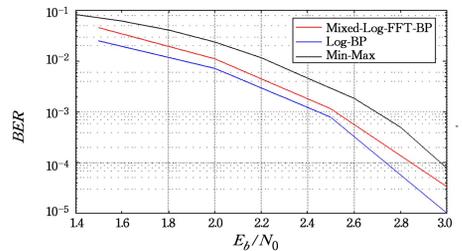
图6 改进译码算法的流程图

Fig. 6 Flowchart of improved decoding algorithm

本文首先对 $GF(64)$ 、码率为 $1/2$ 、码长为 $1440b$ 的多进制 LDPC 码进行仿真,分别使用 Log-BP 译码算法和改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法进行仿真,二者的误比特率如图 7 所示。从图 7 可以看出,改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法和 Log-BP 译码算法性能相近,相差约 $0.1\sim 0.2\text{ dB}$ 。然后在 $GF(64)$ 、码长为 $1440b$ 的多进制 LDPC 码的基础上将码率提高为 $2/3$,分别使用 Log-BP 译码算法和改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法进行仿真,二者的误比特率如图 8 所示。由图 8 可知,改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法和 Log-BP 译码算法性能相近,相差约 $0.1\sim 0.2\text{ dB}$ 。

图7 $GF(64)$ LDPC 码 $1/2$ 码率误比特率性能Fig. 7 Bit error rate performance of $GF(64)$ LDPC code with $1/2$ code rate图8 $GF(64)$ LDPC 码 $2/3$ 码率误比特率性能Fig. 8 Bit error rate performance of $GF(64)$ LDPC code with $2/3$ code rate

本文分别对长码和短码进行了仿真。对于长码,图 9 给出了 $GF(16)$ LDPC 码的仿真结果,对比了 Log-BP 译码算法和改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法的性能,其中码率为 $1/2$,码长为 $8000b$ 。由图 9 可知,改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法与 Log-BP 译码算法性能相近,相差约 0.1 dB 。对于短码,图 10 给出了 $GF(8)$ LDPC 码的仿真结果,对比了 Min-max 译码算法^[17]、Log-BP 译码算法和改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法的性能,其中码率为 $1/2$,码长为 $612b$ 。由图 10 可知,改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法与 Log-BP 译码算法性能接近,相差约 0.1 dB ,Min-max 译码算法与 Log-BP 译码算法的性能相差约 0.2 dB 。

图9 $GF(16)$ LDPC 码 $1/2$ 码率的误比特率性能Fig. 9 Bit error rate performance of $GF(16)$ LDPC code with $1/2$ code rate图10 $GF(8)$ LDPC 码 $2/3$ 码率的误比特率性能Fig. 10 Bit error rate performance of $GF(8)$ LDPC code with $1/2$ code rate

对于改进的 Mixed Log-FFT-BP 译码算法,在码长从 $612b$ 变化到 $8000b$,码元数从 8 变化到 64 的各种不同的码参数条件下,与经典的 Log-BP 译码算法相比,改进算法的误码率性能下降不大,均保持在 $0.1\sim 0.2\text{ dB}$ 的范围之内。

结束语 本文针对 5G 移动通信的特点,提出了面向 5G 的基于多元 LDPC 码的低复杂度译码算法,采用改进的 Mixed Log-FFT-BP 译码算法,避免了直接求解对数似然比的过程,从而将译码复杂度从 $O(q^2)$ 降低为 $O(q\log_2 q)$,且不需乘法运算,所需的加法运算、查表运算均易于 5G 系统中的硬件实现。仿真结果表明,对于不同阶数、不同码长的多元 LDPC 码,与传统译码算法相比,改进的 Mixed Log-FFT-BP 算法的性能相差不大,大约相差 $0.1\sim 0.2\text{ dB}$,且具有更高的编码增益,更低的错误平层以及更强的抗衰落能力,更适于 5G 系统高速率、高吞吐量、低时延的传输链路应用。因此,在深空通信、卫星通信、光纤通信等应用领域的基础上将其扩展到 5G 系统应用,具有一定的实际意义和应用价值,适合硬件平台的实现。由于多元 LDPC 码译码的复杂度较大,虽然本文算法在一定程度上减缓了复杂度压力,但对于时延更低、速率更快的 5G 系统而言,必须研究进一步减小译码复杂度的方法。

参考文献

- [1] IMT-2020. 5G 愿景与需求白皮书[EB/OL]. (2014-05-28)[2016-12-02]. <http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/download/1>.
- [2] GALLAGER R G. Low Density Parity Check Codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1962, 8(3): 208-220.
- [3] DAVEY M C, MACKAY D J C. Low-Density Parity-Check Codes over $GF(q)$ [J]. IEEE Communication Letters, 1998, 2(6): 165-168.
- [4] BAI B M, SUN C, CHEN P Y, et al. Recent Progress in Channel Coding[J]. Radio Communications Technology, 2016, 42(2): 1-8. (in Chinese)

- 白宝明,孙成,陈佩瑶,等.信道编码技术新进展[J].无线电通信技术,2016,42(2):1-8.
- [5] JIAO X P,WEI H Y,MU J J. Improved ADMM penalized decoder for irregular low-density parity-check codes [J]. IEEE Communications Letters,2015,19(6):913-916.
- [6] ANASSI O,CONDE-CANENCIA L,MANSOUR M,et al. Non-binary Low-Density Parity-Check coded cyclic Code-Shift Keying [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Shanghai,China,2013:3890-3894.
- [7] MA Z,SHI Z,ZHOU C,et al. Design of signal space diversity based on non-binary LDPC code [C]//International Conference on Communications. Fujian,China,2008:31-34.
- [8] RONG B,JIANG T,LI X,et al. Combine LDPC codes over GF(q) with q-ary modulations for bandwidth efficient transmission [J]. IEEE Transactions on Broadcasting,2008,54(1):78-84.
- [9] LI G,FAIR I J,KRZYMIEN W A. Density evolution for nonbinary LDPC codes under Gaussian approximation [J]. IEEE Transactions on Information Theory,2009,55(3):997-1015.
- [10] CHEN Y M,GAO X L,WANG Z X,et al. Performance Analysis of Nonbinary and Binary LDPC Codes[J]. Electronic Design Engineering,2013,23(21):94-95. (in Chinese)
陈明阳,高兴龙,王中训,等.多元 LDPC 码与二元 LDPC 码的性能分析[J].电子设计工程,2013,23(21):94-95.
- [11] SAMAD A M,KAMARULZAMAN N,HAMDANI M A,et al. The potential of Unmanned Aerial Vehicle(UAV) for civilian and mapping application [C]//Proceedings of 2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology. Shah Alam:IEEE,2013:313-318.
- [12] XU Y H,ZHOU S K,ZHU Q M,et al. Simulation of UAV Communication Channel Based on Flight Trajectory [J]. Telecommunication Engineering,2013,53(5):656-660. (in Chinese)
徐仪华,周生奎,朱秋明,等.基于飞行轨迹无人机通信信道仿真[J].电讯技术,2013,53(5):656-660.
- [13] SALAMANCA L,OLMOS P M,Murillo-Fuentes J J,et al. Tree Expectation Propagation for ML Decoding of LDPC Codes over the BEC [J]. IEEE Transactions on Communications,2013,61(2):465-473.
- [14] SONG H,CRUZ J R. Reduced-complexity decoding of Q-ary LDPC codes for magnetic recording[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2003,39(2):1081-1087.
- [15] WYMEERSCH H,STEENDAM H,MOENECLAHEY M. Log-domain decoding of LDPC codes over GF(q) [C]//2004 IEEE International Conference on Communications,2004:772-776.
- [16] ZHAO S,WANG X,WANG T,et al. Joint detection-decoding of majority-logic decodable nonbinary LDPC coded modulation systems;An iterative noise reduction algorithm[C]//IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing,2013:412-416.
- [17] LACRUZ J O,GARCIA-HERRERO F,VALLS J,et al. One minimum only trellis decoder for non-binary low-density parity-check codes[J]. IEEE transactions on circuits and systems I: regular papers,2015,62(1):177-184.
- [18] PENG T,YI X X,LI H,et al. OFDM-IDMA System with LDPC [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology,2012,26(11):80-82. (in Chinese)
彭涛,益晓航,李辉,等. LDPC 码在正交频分复用-交织多址系统中的应用[J].重庆理工大学学报,2012,26(11):80-82.

(上接第 112 页)

- [2] MENG X F,CI X. Big Data Management: Concept, technology and challenge[J]. Computer Research and Development,2013,51(1):146-169(in Chinese).
孟小峰,慈祥.大数据管理:概念、技术与挑战[J].计算机研究与发展,2013,51(1):146-169.
- [3] CHENG X Q,JIN X L,WANG Y Z,et al. A summary of large data systems and analysis techniques[J]. Journal of Software,2014(9):1889-1908. (in Chinese)
程学旗,靳小龙,王元卓,等.大数据系统和分析技术综述[J].软件学报,2014(9):1889-1908.
- [4] DEAN J,GHEMAWAT S. MapReduce:simplified data processing on large clusters [J]. Communications of the ACM,2008,51(1):107-113.
- [5] SHVACHKO K,KUANG H,RADIA S,et al. The hadoop distributed file system[C]//2010 IEEE 26th Symposium on Mass Storage Systems and Technologies(MSST). IEEE,2010:1-10.
- [6] THUSOO A,SARMA J S,JAIN N,et al. Hive:a warehousing solution over a map-reduce framework[C]//Proceedings of the VLDB Endowment,2009:1626-1629.
- [7] ZAHARIA M,CHOWDHURY M,DAS T,et al. Resilient distributed datasets: A fault-tolerant abstraction for in-memory cluster computing[C]//Proceedings of the 9th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. USENIX Association,2012:2.
- [8] ARMBRUST M,XIN R S,LIAN C,et al. Spark sql:Relational data processing in spark[C]//Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM,2015:1383-1394.
- [9] OLSTON C,REED B,SRIVASTAVA U,et al. Pig latin:a not-so-foreign language for data processing[C]//Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM,2008:1099-1110.
- [10] KORNACKER M,BEHM A,BITTORF V,et al. Impala:A Modern, Open-Source SQL Engine for Hadoop [C] // Proceedings of the 7th Biennial Conference on Innovative Data Systems Research,2015.
- [11] MELNIK S,GUBAREV A,LONG J J,et al. Dremel:interactive analysis of web-scale datasets[J]. Proceedings of the VLDB Endowment,2010,3(1/2):330-339.
- [12] AGARWAL S,MOZAFARI B,PANDA A,et al. BlinkDB:queries with bounded errors and bounded response times on very large data [C]//Proceedings of the 8th ACM European Conference on Computer Systems. ACM,2013:29-42.
- [13] PARR T J,QUONG R W. ANTLR:A Predicated[J]. Software—Practice and Experience,1995,25(7):789-810.
- [14] ZOUZIAS A. Spark-lucenerdd (Version 0. 3. 0) [EB/OL]. <http://github.com/zouzas/spark-lucenerdd>.