

基于分段模型的信源容错译码算法

王刚¹ 彭华¹ 靳彦青² 唐永旺¹

(信息工程大学 郑州 450002)¹ (国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)²

摘要 针对无损信源编码存在误码扩散的问题,建立了以最大后验概率估计为基础的信源序列分段译码模型,设计了基于统计模型的容错译码算法。该算法充分利用了信源编码数据的残留冗余,较好地消除了无损压缩数据对误码的敏感性,为文本压缩数据的容错译码提供了新思路。实验结果表明,该算法具有纠正信源数据中误码的能力,能够显著减少信息损失。

关键词 无损编码,误码,容错译码,分段译码,符号单元

中图分类号 TP301 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.018

Subsection Model Based Error-resilient Decoding Algorithm for Source Coding

WANG Gang¹ PENG Hua¹ JIN Yan-qing² TANG Yong-wang¹

(Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)¹

(National Digital Switching System Engineering & Technology Research Center, Zhengzhou 450002, China)²

Abstract Aiming at the error code diffusion problems of lossless source coding, a subsection decoding model for source sequence was constructed based on MAP(Maximum A Posteriori), and then a error-resilient decoding algorithm based on statistical model was proposed. The algorithm makes full use of the residual redundancy of source coding data, overcomes the sensitive characteristics of lossless data for error code well, and provides a new solution for error-resilient decoding of text compression data. Experimental results show that this algorithm has the ability of correcting errors in the source data and significantly reduce the information loss.

Keywords Lossless coding, Error code, Error-resilient decoding, Subsection decoding, Symbol unit

1 引言

1948 年 Shannon 发表的“*A Mathematical Theory of Communication*”标志着信息论的诞生。在信源信道分离理论的指导下,目前的通信系统中,信源编码解决了通信的有效性,信道编码解决了通信的可靠性问题。由于分离定理的局限性,级联编码的设计思想使得信源编码后序列的抗干扰能力十分薄弱。误码将导致构造码表和重构数据出现错误,且这些错误产生的负面影响将随着译码的进行而不断扩散,因此少量误码就可能造成严重的后果。LZ 系列算法的主要缺陷就是当误码出现时,极易发生误码扩散。针对这个问题,许多学者开展了联合信源信道编码技术的研究(JSCC)^[1-3]。然而,根据网络协议的划分,信源编码处于协议的最顶层(即应用层),信道编码处于协议的最底层(即物理层),联合编码需要进行跨层优化,而在目前的网络协议中不同层之间的数据是独立的,从而使得 JSCC 难有用武之地^[4]。因此,解决信源编码数据的误码修复的难题仍需要从信源的角度出发。

目前,关于提高 LZ 系列算法抗误码能力的研究主要集

中于改进编码端的容错能力,包括通过研究信源编码的压缩原理和机制,分析挖掘编码后的残留冗余并建立度量方法^[5];通过优化码表的构造和更新规则对码字序列进行保护^[6];通过对编码器进行调整并增加冗余比特数来校验数据^[7]。这些方法虽然能取得一定的效果,但算法复杂,而且会降低压缩性能。为了不影响压缩效果,本研究从对信源数据进行容错译码的角度切入,首先构建了无损信源编码的分段译码模型,利用信源冗余信息建立了基于统计模型的容错译码算法,并通过实验验证了该算法的有效性。

2 分段译码模型

信源编码的基本结构可抽象为图 1 所示的模型,即一个符号序列经过某种变换后,输出为码字序列。信源类型决定了符号的取值集合,例如文本信源的符号取值为字母、汉字。

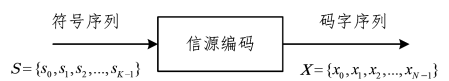


图 1 信源编码结构

Fig. 1 Structure of source coding

到稿日期:2017-09-07 返修日期:2018-02-01 本文受国家自然科学基金:基于信道差异的物理层安全编码技术研究(61501516)资助。

王刚(1981-),男,讲师,主要研究方向为信息处理、模式识别, E-mail: angwzgh@163.com(通信作者);彭华(1973-),男,教授,主要研究方向为通信信号处理、软件无线电;靳彦青(1983-),女,工程师,主要研究方向为无线通信、网络安全;唐永旺(1981-),男,讲师,主要研究方向为信息处理、协议分析。

常见的信源编码有多种分类方式,例如有记忆编码和无记忆编码、有损编码和无损编码等。按照压缩信源修复的基本思想,本研究主要针对无损编码进行修复。

无损编码是两个序列的逐一映射过程。从理论上讲,整个映射过程可以分割为多段逐一映射,即对于每一段映射,符号段与码字比特具有逐一映射的关系。

在信源编译码系统中,设信源输入符号集为 $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_{K-1}\}$, 经过信源编码得到的信源编码符号集为 $X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}\}$, 通过信道传输,接收端收到的编码符号集为 $Y = \{y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N-1}\}$, 如图 2 所示。

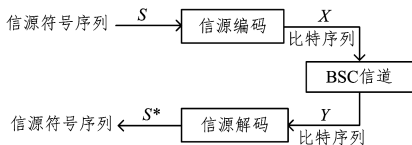


图 2 信源编译码系统

Fig. 2 Source coding/decoding system

根据最大后验概率(MAP)准则,接收端信源符号序列的最优估计可表示为:

$$S^* = \arg \max_{S \in A^K} \frac{P(Y|S)P(S)}{P(Y)} \quad (1)$$

信源符号序列通过信源编码得到编码符号序列,二者可用函数关系式 $X = f(S)$ 表示。在译码时 Y 是已知序列,设判决时接收端只考虑等长码字符符号序列,则式(1)等价于:

$$S^* = \arg \max_{\substack{S \in A^K \\ X = f(S)}} P(Y|X)P(S) \quad (2)$$

无损信源编码的编码过程可以用分段单元映射的关系进行描述。把信源符号序列按照要求进行分段变成相应的符号单元,每一符号单元可映射为一串编码符号,同时每一串编码符号也可映射为一个符号单元。按照符号单元分段映射的思想,符号序列 S 和编码比特序列 X 的对应映射关系可分解为:

$$\begin{aligned} s^1 &\leftrightarrow x^1, s^1 = s_{i_1+1}^1, x^1 = x_{j_1+1}^1 \\ s^2 &\leftrightarrow x^2, s^2 = s_{i_2+1}^2, x^2 = x_{j_2+1}^2 \\ &\dots \\ s^D &\leftrightarrow x^D, s^D = s_{i_D+1}^D, x^D = x_{j_D+1}^D \\ i_1 = j_1 = 0, &\dots, i_{D+1} = K, j_{D+1} = N \end{aligned} \quad (3)$$

设信源具有马尔可夫特性,每个符号单元的先验概率取决于其前面出现的所有符号单元,信道为无记忆信道。由于概率为 $0 \sim 1$,相乘的概率越多,其乘积就越小,因此造成数值下溢的风险。根据对应映射规则,将序列最优估计用对数度量表示为:

$$\begin{aligned} &\log P(Y|X) + \log P(S) \\ &= \sum_{d=1}^D \log P(y^d | x^d) + \sum_{d=1}^D \log P(s^d | s_1^{i^d}) \\ &= \sum_{d=1}^D [\log P(y^d | x^d) + \log P(s^d | s_1^{i^d})] \\ &= \sum_{d=1}^D M_d \end{aligned} \quad (4)$$

其中, M_d 为单元分段度量。对单元分段度量进行累加就能得到完整编码路径的总度量。

3 信源模型的构建

根据压缩数据容错恢复度量,信源先验概率计算是重要的一环,也是决定容错恢复效果的关键。一种典型的方法是马尔可夫模型。

设信源符号集为 A , 输入符号序列为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 则该符号序列的先验概率为:

$$P(s_1, s_2, \dots, s_n) = P(s_1)P(s_2 | s_1)P(s_3 | s_1 s_2) \dots P(s_n | s_1, s_2, \dots, s_{n-1}) \quad (5)$$

假定该符号序列满足 N 阶马尔可夫模型, N 值反映了信源符号的记忆长度。在典型的英文文本中,字母即为符号,由于单词之间同样存在记忆性,因此记忆长度应该至少等于最长单词的长度。如果 N 值较大,则计算复杂度较大。一种简化形式是不考虑单词之间的记忆性,仅考虑字母之间的记忆性。

传统文本处理中一般仅考虑字母之间、单词之间的统计特性,很少考虑单词之间的空格、标点等符号的统计特性,字母的大小写等情况对结果也并不重要。但是由于编码模块引入了记忆性,任意字符的错误都可能导致错误的传播。例如,在字典编码中,即使是一个标点符号恢复错误,字典内容也将产生错误,这将影响后续符号的恢复效果。基于上述情况和计算复杂度的考虑,本研究采用符号单元的概念,依据功能把信源符号集划分为两个不相交的子集 C 和 U 。子集 C 中的元素是组成单词的合法符号集合,子集 U 中的元素包含了数据中可能存在的其他所有符号集合。任意文本都可看作是 C 和 U 两个集合中符号元素的交替组合,其形式为: $c_1, u_1, c_2, u_2, \dots, c_N, u_N$, 其中, $c_i (1 \leq i \leq N)$ 和 $u_i (1 \leq i \leq N)$ 分别是由 C 和 U 两个集合内的元素组成的符号串。把下标相同的 c_i, u_i 作为一个符号单元,记为 $[c_i, u_i]$, 则可把符号串切分为 N 个单元,假设此 N 个单元之间统计独立,称其为符号单元。符号单元内的所有元素满足马尔可夫过程,记忆长度就是符号单元内字符元素的数量,即符号单元的长度。

于是式(5)的出现概率可表示为:

$$P(c_1, u_1, c_2, u_2, \dots, c_N, u_N) = P(c_1, u_1)P(c_2, u_2) \dots P(c_N, u_N) \quad (6)$$

根据联合概率的公式将式(6)展开,各个符号单元的出现概率服从条件概率的乘积:

$$\begin{aligned} P(s_1, s_2, \dots, s_n) &= P(s_1)P(s_2 | s_1)P(s_3 | s_1 s_2) \dots P(s_n | s_1, s_2, \dots, s_{n-1}) \\ &= \prod_{i=1}^n p(s_i | s_1 \dots s_{i-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $s_i (1 \leq i \leq n)$ 为由 $[c_i, u_i]$ 组成的符号单元。

建立好信源系统的模型之后,就可以对模型进行训练进而得到模型的参数。由于模型中的文本被分割为很多独立段,整个模型可以用树的结构表示。除根节点外,树中的每个节点都存储一个字符,但节点并不只表示其存储的单个字符,而是表示从根节点到该节点所有经过的字符连结起来的字符串,叶子节点即表示某个长度为 N 的符号序列。任意叶子节点的权值等于该节点表示的长度为 N 的符号序列的出现次

数,任意节点的权值等于其所有子节点的权值之和。

例如,训练样本是“I am what I am and I am not what I am not.”,那么训练完毕后模型的树结构如图3所示。节点右上方框内的数值为节点权值。

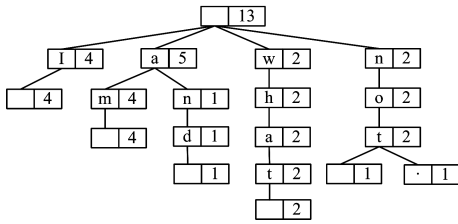


图3 模型的树结构

Fig. 3 Tree structure of model

对于概率模型来说,归一化就是用某个总数来除,使最后得到的概率值处于0~1,以保持概率的合法性。模型的参数估计一般采用最大似然估计(MLE)。因此,树中某一节点表示的符号序列 s_1, s_2, \dots, s_i 的出现概率可通过式(8)进行计算。

$$P(s_1, s_2, \dots, s_i) = \frac{\omega(s_1, s_2, \dots, s_i)}{\omega} \quad (8)$$

其中, $P(s_1, s_2, \dots, s_i)$ 即为字符串 s_1, s_2, \dots, s_i 的先验概率。当得到任意字符串的先验概率后,可得到字符串间的转移概率:

$$\begin{aligned} & P(s_{i+1}, s_{i+2}, \dots, s_j | s_1, s_2, \dots, s_i) \\ &= \frac{P(s_1, s_2, \dots, s_i, s_{i+1}, s_{i+2}, \dots, s_j)}{P(s_1, s_2, \dots, s_i)} \\ &= \frac{\omega(s_1, s_2, \dots, s_i, s_{i+1}, s_{i+2}, \dots, s_j)}{\omega(s_1, s_2, \dots, s_i)} \end{aligned} \quad (9)$$

除基于概率统计的方式外,对于某些存在较强语法规则的信源,基于词典对信源进行建模也是一种有效的方法。例如,对于英文文本信源,可将所有单词组成一个词典,存储于数据库中,在进行符号判决时,如果译码出现的单词并不在词典中,则认为译码错误。这种方式完全基于英语语法,不考虑字母之间、单词之间的概率语义。

相对来说,基于概率的信源模型更能反映信源的语义,该模型面临的主要问题是训练样本的选择,如果事先对信源有所了解,有针对性地选择合适的训练样本,则模型的性能较好。而基于词典的信源模型虽然实现起来相对简单,但性能较差,且适用范围存在局限性。

4 基于规则的容错译码算法

信源容错恢复与信道译码在数学上是一类相似的问题。在进行卷积码译码时,当状态数目十分庞大时,常采用序列译码。典型的序列译码算法有3种:Fano算法、堆栈算法、M算法。Fano算法的性能与门限有关;堆栈算法的性能与堆栈大小有关;M算法的性能与M值有关。相对而言,M算法的时间复杂度和空间复杂度较为固定,更适合于工程实现。本文根据M算法对信源序列进行估计,依据信源模型的结果可以计算出估计所需的度量值。因此,基于报文语法规则的修复方法如图4所示。

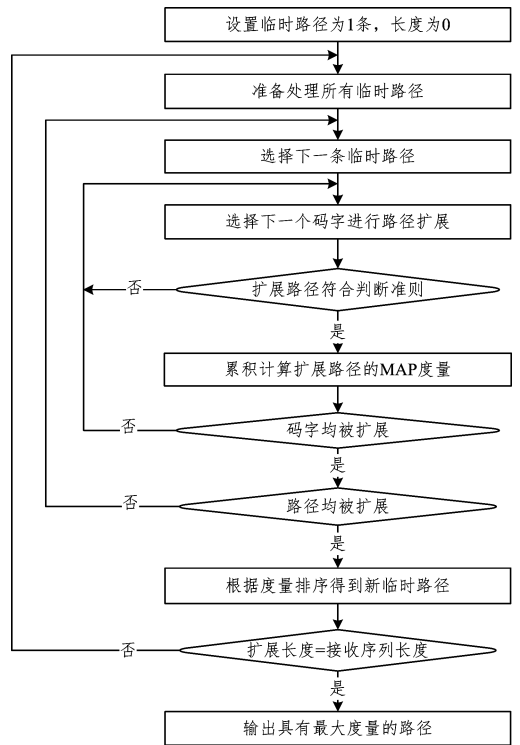


图4 基于规则的容错译码算法

Fig. 4 Error-resilient decoding algorithm based on rules

信源容错译码的目标是在所有候选路径中确定一条最合理的译码路径。由模型可知,候选路径的数量随着编码长度的增加呈指数级递增。为了有效减少候选路径数量,将信源编码序列的译码过程分解为各个符号单元译码结果的叠加。通过计算局部路径的度量值,根据阈值在分段内剔除概率小的候选路径,从而有效减少候选路径数量,避免其呈现指数级增加的现象。

基于以上思想,建立英文文本模型作为实验信源模型,通过训练样本得到该模型的各项参数。采用该模型,设计了针对LZW的容错译码算法。容错译码算法的流程为:在译码过程中,每次优选M条临时译码路径,根据分段码字扩展方案,对所有临时译码路径进行扩展得到候选路径,因为LZW算法采用的是从变长序列到定长编码的规则,所以扩展得到的所有候选路径长度完全相同。根据译码器的当前状态与判断准则删除无效路径,计算剩余候选路径的度量值并进行排序,保留度量值最大的前M条作为优选路径,删除其他候选路径,进行下一个符号单元的扩展与度量。当所有候选路径的长度和接收端的符号序列长度相等时,把拥有最大度量值的路径作为最优的译码结果输出。因此,对于长度为N的码字序列,算法复杂度为 $O(N * M^2)$ 。

除了根据度量对路径进行判决外,该方法引入了以下判断准则用以尽可能多地在计算度量之前排除可疑路径,从而加快算法的运算速度。1)对于任意候选译码路径,若按译码规则得到的符号序列中包含非法字符,则认为该译码路径无效。2)译码时字典是动态生成的,构造的索引项随着译码过程的进行逐渐增多,当扩展候选路径的索引项不在字典当前已构造的索引项中时,扩展得到的为非法索引,译码路径无效。

3) 设 BSC 的误码率为 p , 待判决译码路径的长度为 n , 那么 n 比特中有 k 比特误码的概率为 $C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$ 。可以根据信道特性设定阈值, 使编码符号序列与接收符号序列的汉明距离不超过阈值, 从而提前删除大量低概率路径以加快算法的运算速度。

5 实验与结果分析

本研究引入数据恢复率的概念, 即常规译码出错的地方通过容错处理后译码正确的比例。译码出错包括信源字符被替换、删除或者插入其他字符。从文本语义理解的角度考虑, 实验中采用编辑距离作为衡量算法容错译码性能的判断标准。编辑距离就是指一个字串转成另一个字串所需的最少编辑操作次数。许可的编辑操作包括将一个字符替换成另一个字符、插入一个字符、删除一个字符。编辑距离越小, 两个串的相似度就越大。

假定常规译码所得结果与原信源编辑距离为 d_1 , 经过容错处理后的结果与原信源编辑距离为 d_2 , 如果 $d_2 < \frac{3}{4}d_1$, 即

$\frac{d_2}{d_1} < \frac{3}{4}$, 则说明约 25% 的常规译码错误被纠正过来。

实验中采用文献[8]的所有文本作为训练样本, 采用文献[9]的文本作为测试样本, 文献[8]与文献[9]的主题属于相同专业领域。

5.1 算法有效性实验

某次实验使用的测试数据为:

Several popular programs run on various platforms. Some programs use just the Huffman method

采用无容错译码得到的结果(译码后出错的部分已加下划线表示):

Gevmral popular programs0r}n on varhouuupr

表 2 测试结果(误码率: 10^{-3})
Table 2 Test results(BER: 10^{-3})

n	D_1	D_2
1	22	1
2	69	3
3	36	2
4	41	6
5	133	8
6	49	3
7	115	6
8	95	5
9	45	5
10	39	1
11	70	3
12	51	5

表 3 测试结果(误码率: 3×10^{-3})
Table 3 Test results(BER: 3×10^{-3})

n	D_1	D_2
1	100	12
2	79	7
3	133	7
4	78	3
5	52	6
6	66	3
7	103	9
8	85	5
9	61	2
10	57	5
11	52	1
12	84	6

表 4 测试结果(误码率: 5×10^{-3})
Table 4 Test results(BER: 5×10^{-3})

n	D_1	D_2
1	301	25
2	137	7
3	197	11
4	63	5
5	156	9
6	61	5
7	98	8
8	235	16
9	75	6
10	178	11
11	68	2
12	216	10

从表 2—表 4 的实验结果可以看出, 针对 10^{-3} 范围的不同误码率条件, 算法均能进行容错译码, 并获得良好的修复效果。通过分析发现, 算法对测试样本中相对较短(D_1 较小)的数据的修复效果总体上优于测试样本中相对较长(D_1 较大)的数据。这是因为当数据量逐渐增大时, 信源符号的相关性也会逐渐增加, 在压缩算法利用数据相关性提高压缩性能的同时, 信源符号可被利用的残留冗余却逐渐减少, 从而影响了修复效果。接下来需要进一步挖掘残留冗余及其度量方法,

tdorms> \$ Some programsOuue juut the Huffman method

采用容错译码算法得到的结果($M=100$)为:

Several popular programs run on various platforms > \$ Some programs use just the Huffman method

此次实验中, 常规解码所得结果与采用容错译码算法所得结果的编辑距离分别为 15 和 2。

为了能够定量反映容错译码算法的性能, 从测试样本中随机选取长度不同的 10 段数据作为待压缩信源进行实验, 分别统计 d_1 和 d_2 的值, 统计结果如表 1 所列。表 1 中, n 为测试样本序号; M 为扩展后保留的候选路径数量; d_1 为: (无容错译码后与原始数据的编辑距离)/原始数据 $\times 100\%$; d_2 为: (有容错译码后与原始数据的编辑距离)/原始数据 $\times 100\%$ 。

表 1 算法有效性的测试结果
Table 1 Test results of effectiveness of algorithm

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M	10	20	20	30	30	40	50	50	100	100
d_1	11.51	16.43	13.49	13.94	13.66	15.26	15.43	16.82	19.38	18.95
d_2	3.41	2.95	1.65	1.37	1.43	1.18	1.99	0.56	2.19	0.97

从表 1 可以看出, 本研究设计的容错译码算法能够挖掘信源编码后的残留冗余, 并充分利用这些冗余对误码进行容错译码, 该算法获得了良好的恢复效果。容错译码性能与分段扩展时择优保留的候选路径数目也有关系, 增加候选路径的数目可以提高容错译码的性能, 但代价是运算时间的增加。实验表明, d_1 随测试样本长度的增加而增加, 验证了误码扩散对编码数据的深远影响。

5.2 算法性能实验

为了检验不同误码率(BER)条件下的算法性能, 实验中当误码率分别为 10^{-3} , 3×10^{-3} , 5×10^{-3} 时, 从测试样本中随机选择 12 份数据进行测试, 统计结果分别如表 2—表 4 所列($M=30$)。其中, n 为测试样本序号; D_1 为无容错译码后与原始数据的编辑距离; D_2 为有容错译码后与原始数据的编辑距离。

以期进一步提升容错译码能力。

结束语 本文建立了以最大后验概率估计为基础的信源序列修复模型, 为深入研究信源修复算法奠定了重要基础, 该方法可应用于所有无损信源编码算法; 建立了以马尔可夫模型为基础的概率统计模型, 以多叉树为结构, 构建了模型的训练算法; 设计了以分段序列估计为核心的信源序列容错译码算法, 该算法充分利用了信源编码数据的残留冗余, 并通过实验证明了算法的有效性。该容错译码算法较好地消除了无损

压缩数据对误码的敏感性,为文本压缩数据的容错译码提供了新思路。

参考文献

- [1] JOSE S T, KULKARNI A A. Linear programming-based converses for finite blocklength lossy joint source-channel coding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2017, 63(11): 7066-7094.
- [2] KOSTINA V, POLYANSKIY Y, VERDÚ S. Joint source-channel coding with feedback[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2017, 63(6): 3502-3515.
- [3] PERSSON D, KRON J. Joint source-channel coding for the MIMO broadcast channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 60(4): 2085-2090.
- [4] YU L. Hybrid digital-analog joint source-channel coding[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)

于磊. 混合数字模拟的联合信源信道编码研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.

- [5] JACQUET P, SZPANKOWSKI W. On the limiting distribution of lempel ziv'78 redundancy for memoryless sources[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(11): 6917-6930.
- [6] FRENKEL S, KOPEETSKY M, MOLOTKOVSKI R. Lempel-Ziv-Welch compression algorithm with exponential Decay[C]// 2016 Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management, 2016: 616-619.
- [7] LONARDI S, SZPANKOWSKI W, WARD M D. Error resilient LZ'77 data compression: Algorithms, analysis, and experiments [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(5): 1799-1813.
- [8] SALOMON D. Data compression-The complete reference(4th edition)[M]. London: Springer-Verlag, 2007.
- [9] BLELLOCH G E. Introduction to data compression[EB/OL]. <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/psico-guyb/real-world/www/compression.pdf>, 2001.

(上接第 82 页)

结束语 本文讨论了 D2D 异构通信系统中的无线资源优化问题,提出了基于时间反演的无线资源优化机制。该机制包括时间反演信道签名方法和功率控制算法,在保证用户 QoS 需求的前提下,不仅能有效地抑制 D2D 异构网络中的干扰,而且能降低误码率,同时满足用户对可靠性的需求,保证用户的通信质量。

参考文献

- [1] LIN X, ANDREWS J G, GHOSH A, et al. An overview of 3GPP device-to-device proximity services [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2014, 52(4): 40-48.
- [2] CHANG J, MA Y, CHENG W, et al. Relay selection and power allocation for device-to-device communication underlying heterogeneous cellular networks[C]// *IEEE International Conference on Computer and Communications*, IEEE, 2017: 2891-2896.
- [3] YANG T, ZHANG R, CHENG X, et al. Graph Coloring Based Resource Sharing (GCRS) Scheme for D2D Communications Underlying Full-Duplex Cellular Networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, PP(99): 1-1.
- [4] ZHANG H, LIAO Y, SONG L. D2D-U: Device-to-Device Communications in Unlicensed Bands for 5G System[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6): 3507-3519.
- [5] DOPPLER K, RINNE M, WIJTING C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 47(12): 42-49.
- [6] JANIS P, KOIVUNEN V, RIBEIRO C, et al. Interference-Aware Resource Allocation for Device-to-Device Radio Underlying Cellular Networks[C]// *Vehicular Technology Conference, 2009(Vtc Spring 2009)*. IEEE, 2009: 1-5.
- [7] XU C, SONG L, HAN Z, et al. Interference-aware resource allocation for device-to-device communications as an underlay using sequential second price auction[C]// *IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2012: 445-449.
- [8] YU C H, DOPPLER K, RIBEIRO C B, et al. Resource Sharing

Optimization for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(8): 2752-2763.

- [9] LIN X, HEATH R W, ANDREWS J G. The Interplay Between Massive MIMO and Underlaid D2D Networking [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 14(6): 3337-3351.
- [10] YE Q, AL-SHALASH M, CARAMANIS C, et al. Distributed Resource Allocation in Device-to-Device Enhanced Cellular Networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(2): 441-454.
- [11] FINK M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1992, 39(5): 555-566.
- [12] XU Q, CHEN Y, LIU K J R. Combating Strong-Weak Spatial-Temporal Resonances in Time-Reversal Uplinks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(1): 568-580.
- [13] VITERI-MERA C A, TEIXEIRA F L. Equalized Time Reversal Beamforming for Frequency-Selective Indoor MISO Channels [J]. *IEEE Access*, 2017, PP(99): 1-1.
- [14] CHEN Z, ZHAO Y, ZHAO D. Multipath effects on time reversal OFDM communications between wireless sensors[C]// *International Symposium on Antennas, Propagation and Em Theory*. IEEE, 2017: 376-379.
- [15] CHEN Y, HAN F, YANG Y H, et al. Time-Reversal Wireless Paradigm for Green Internet of Things: An Overview[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(1): 81-98.
- [16] HAN F, YANG Y H, WANG B, et al. Time-Reversal Division Multiple Access over Multi-Path Channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(7): 1953-1965.
- [17] A TR-T. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA): Radio frequency (RF) system scenarios [S]. France: 3GPP, 2010.
- [18] MOHAMAD, RAMLI H A M. Performance Study of Path Loss Models for LTE-A Relay Stations[C]// *International Conference on Computer and Communication Engineering*. IEEE, 2017: 332-336.