

水声网络按序递归与限制反馈的在线 喷泉码算法与分析

柳秀秀^{1,2,3}, 杜秀娟^{1,2,3,4}, 韩多亮^{1,2}

(1. 青海师范大学计算机学院, 青海西宁 810008; 2. 青海省物联网重点实验室, 青海西宁 810008;
3. 高原科学与可持续发展研究院, 青海西宁 810008; 4. 藏语智能信息处理及应用国家重点实验室, 青海西宁 810008)

摘 要: 水声网络具有低带宽、长时延、高误码率等特征,这使得数据的可靠传输面临着巨大挑战。在线喷泉码具有低开销、在线反馈和通过给定瞬时解码状态获得最优编码策略等优点,因此,针对水声网络的特点,分析在线喷泉码的编解码和反馈问题,提出了按序递归与限制反馈的在线喷泉码(Sequential Recursive Online Fountain Code with Limited Feedback, SROFC-LF)。基于随机图理论对SROFC-LF需要的编码包数量进行理论分析,理论分析和实验仿真一致。实验表明:无论开销和反馈包数量,SROFC-LF比大部分在线喷泉码均表现出更好性能,适合水声网络。

关键词: 在线喷泉码;水声网络;按序递归与限制反馈的在线喷泉码;开销;反馈

基金项目: 青海省物联网重点实验室(No.2022-ZJ-Y21);国家自然科学基金(No.61962052)

中图分类号: TN911.22;TN929.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)07-1734-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220050

Algorithm and Analysis of Sequential Recursive Online Fountain Code with Limited Feedback in Underwater Acoustic Networks

LIU Xiu-xiu^{1,2,3}, DU Xiu-juan^{1,2,3,4}, HAN Duo-liang^{1,2}

(1. College of Computer, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China;

2. Qinghai Provincial Key Laboratory of IoT, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China;

3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining, Qinghai 810008, China;

4. The State Key Laboratory of Tibetan Intelligent Information Processing and Application, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: Underwater acoustic networks (UANs) have low bandwidth, long delay, high bit error rate and other features. All these features bring about significant challenges to the reliable transmission for UANs. Online fountain code (OFC) has the advantages such as low overhead, online feedback, and obtaining the optimal coding strategy through a given instantaneous decoding state. Therefore, according to the characteristics of UANs, the problems of codec and feedback of the OFC are analyzed. The sequential recursive online fountain code with limited feedback (SROFC-LF) is proposed. The number of coding packets required by the SROFC-LF is theoretically analyzed based on the random graph theory, and the theoretical analysis is consistent with the experimental simulation results. The experimental results show that regardless of the overhead and the number of feedback packets, the SROFC-LF shows better performance than most OFCs, which is suitable for UANs.

Key words: online fountain code; underwater acoustic networks; sequential recursive online fountain code with limited feedback (SROFC-LF); overhead; feedback

Foundation Item(s): Qinghai Provincial Key Laboratory of IoT (No.2022-ZJ-Y21); National Natural Science Foundation of China (No.61962052)

1 引言

水声网络(Underwater Acoustic Networks, UANs)在

水下环境监测、资源勘探、海洋军事等方面具有广泛的应用前景^[1,2],因此,近年来UANs已成为研究热点。

UANs 具有低带宽、长时延、高误码率、能量受限、半双工通信等特征^[1,2],这些特征导致水下采集的数据出现较高的传输错误或丢失,为了保证数据可靠传输,本文提出了按序递归与限制反馈的在线喷泉码来保证 UANs 中数据的可靠传输。

UANs 中数据的可靠传输分为基于重传的(Automatic Repeat-request, ARQ)和基于前向纠错(Forward Error Correction, FEC)的可靠传输机制^[2]。UANs 的长延时和低比特率特点导致传统的 ARQ 机制在水声信道的利用率极低。传统的 FEC 是采用固定码率的纠错码,由于水声信道的时变性,很难预先确定信道删除概率。喷泉码是一类无码率编码^[3],更适合于高动态变化的水声信道。因此,近年来,很多学者用喷泉码来保证 UANs 数据的可靠传输^[4-6]。

在线喷泉码(Online Fountain Code, OFC)^[7]是一类新型基于一部图的无速率码。喷泉码是基于二部图的。相比二部图,一部图只有源节点,不存在校验节点。与喷泉码比较,OFC 表现出良好的实时性能;对于恢复相同数量的原始包,OFC 需要的编码包数量更少^[7];OFC 和喷泉码一样采用简单的异或运算进行编解码。因此,基于 OFC 的可靠传输引起了学者的关注。本文针对 UANs 的特点,改进 OFC 的编解码算法和反馈控制,提出了适用于 UANs 的按序递归与限制反馈的在线喷泉码。

2 相关工作

随着 UANs 的深入研究,一些学者将喷泉码用于 UANs 来保证数据的可靠传输^[4-6]。由于喷泉码的解码过程不能被接收者控制和监督,因此,近几年,具有在线能力的喷泉码受到学者的广泛关注。文献[7]提出了具有低开销的 OFC,其能根据任何给定的解码状态计算出最优的编码策略,相比喷泉码,OFC 具有更低的编译码开销和良好的在线性能。

近几年,很多学者研究 OFC 的编解码及反馈问题,取得了良好的研究效果。文献[8-12]改进 OFC,在编解码算法、中间过程解码性能或者反馈性能上进行了提升。文献[13]提出基于 OFC 的广播机制,该广播机制具有较好的性能相比其他喷泉码的广播机制。文献[14]基于 UANs 的特点,提出递归与限制反馈的 OFC(Recursive Online Fountain Code with Limited Feedback, ROFC-LF),ROFC-LF 在开销、计算复杂度、编码效率等方面优于大部分 OFC。因此,ROFC-LF 适用于资源受限的 UANs。结合 ROFC-LF,进一步降低 OFC 编解码开销和反馈包数量,提出适用于 UANs 的按序递归与限制反馈的 OFC(Sequential Recursive Online Fountain Code with limited feedback, SROFC-LF)。

SROFC-LF 和 ROFC-LF 在完成阶段均是基于反馈信息进行递归编码和反馈限制;但两种编码机制存在三点不同:一是 SROFC-LF 改进了建立阶段,提出按序号规则编码策略;二是 ROFC-LF 在完成阶段只发送度 1 和度 2 的编码包,而 SROFC-LF 还发送度 m 的编码包;三是反馈限制策略不同,ROFC-LF 是根据最优度对应 β 的取值范围(β 是已恢复的原始包数量占原始包数量 k 的比值)进行反馈限制;SROFC-LF 是通过连通组件的大小进行反馈限制。

3 OFC 在 UANs 中的应用分析

OFC 在编解码时,接收方在完成阶段只处理符合要求的编码包,丢弃了很多已成功接收的编码包。OFC 通过反馈实现在线性能,对于 UANs 而言反馈包数量较多。因此,根据 UANs 的特点,分析 OFC,设计出适合 UANs 的 OFC。

本文提出的 SROFC-LF 和 ROFC-LF 在完成阶段的性能分析相同,详情见文献[14]。SROFC-LF 在完成阶段同样基于带所有原始包解码状态字段的反馈包,将原始包分为已成功解码原始包集合 $A_i(|A_i|, \text{SNsa})$ 和未成功解码原始包集合 $W_i(k - |A_i|, \text{SNsw})$,并根据反馈信息不断更新,从 $W_i(k - |A_i|, \text{SNsw})$ 中选择原始包进行递归编码;SNsa 和 SNsw 分别表示成功解码的和未成功解码的原始包序号。同时根据反馈策略进行反馈限制。不同点是:除了发送度 1、度 2 编码包以外,SROFC-LF 还发送度 m 的编码包, m 等于建立阶段结束后,未解码的原始包数量 $k - |A_i|$ 。度 m 编码包的数量 $N_m = \lfloor 1/(1 - \text{PER}) \rfloor$,PER 表示信道丢包率。由于 UANs 的误码率高,导致 PER 较高,因此,发送度 m 的编码包来弥补由于信道较高的丢包率造成的某个包或某些包一直丢包的现象,也就是为了保证在完成阶段所有未解码的原始包全部参与编码。

建立阶段性能分析

根据文献[7,8]可知,减少连通组件数量将推进解码进程,减少建立阶段连通组件的数量,完成阶段需要的编码包和反馈包数量将减少。结合文献[9]的编码方式,建立阶段首先按序编码;然后,和 OFC 的建立阶段一样,再进行随机编码。按序编码分三步:

第一步:让所有的原始包按序号顺序两两编码,生成度 2 的编码包,即 $C_j = D_i \oplus D_{(i+1)}$,其中, $i = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$, i 为任意一个小于或等于 k 的奇数序号。 j 是任意编码包的序号。

第二步:让所有奇数序号的原始包按序号顺序两两编码,生成度 2 的编码包,即 $C_j = D_i \oplus D_{(i+2)}$,其中, $i = 1, 5, 9, 13, \dots$ 。

第三步:从整除4余1的奇数序号(1,5,9,13,...)的原始包中,同样按序号顺序两两编码,生成度2的编码包,即 $C_j = D_i \oplus D_{(i+4)}$, 其中, $i = 1, 9, 17, 25, 33, \dots$.

4 SROFC-LF 编码机制

SROFC-LF 具有三个性能:一是减少建立阶段连通组件的数量;二是使完成阶段发送的每个编码包均对解码有用;三是减少反馈包的数量.

4.1 解码状态设置

根据完成阶段分析,SROFC-LF 根据反馈包中所有原始包的解码状态寻找最优编码策略. 因此,解码状态表示为 $F'(A_i)$, 和 ROFC-LF 同理.

$$F'(A_i) = \underbrace{\{0, 0, 0, 0, \dots, 1, 0, 0, \dots, 0, 1, 0\}}_{\substack{k \text{ bits} \\ \text{the number of 1 is } |A_i|}} \quad (1)$$

其中,一共有 k 个比特,每个比特代表着一个原始包,其中,0表示该原始包未成功解码,1表示该原始包已成功解码.

4.2 反馈设置

在建立阶段,SROFC-LF 按序编码后,将 k 个原始包合并成 $k/8$ 个大小为8的连通组件;随机编码过程中会形成更大组件;在完成阶段,接收方接收一个度1的编码包,至少解码8个原始包,因此,设置反馈门限 $\delta > 8/k$.

本次解码成功的比例和上次解码成功的比例作差,若大于 δ ,接收者将发送反馈包. 即: $f(j) - f(j-1) > \delta (j \geq 1)$, 其中, $f(j)$ 表示第 j 次原始包解码成功的比例 $f(j) = N_j/k$, N_j 表示接收第 j 次反馈后,成功解码原始包的数量; $f(j-1)$ 表示第 $j-1$ 次原始包解码成功的比例 $f(j-1) = N_{(j-1)}/k$. 最大组件解码成功后,原始包解码成功的比例记为第0次. 反馈门限 δ 根据 $8/k$ 设置,并保留一位有效数字,见表1.

表1 反馈门限

k	100	500	512	1 000	1 500	2 000
δ	0.1	0.02	0.02	0.01	0.006	0.005

4.3 编解码过程

SROFC-LF 的编解码过程也分两个阶段:建立阶段和完成阶段. 假设发送方需要传输包含 k 个原始包的块数据,接收方维护着解码图 $G(V, E)$, 解码初始阶段, $V = k, E = \emptyset$, 解码图中有 k 个白点,没有边.

建立阶段:首先,发送方进行按序编码(详见3.1节),发送度2的编码包,接收方接收度2的编码包,更新解码图 G ; 然后,和 OFC 的建立阶段一样,进行随机编码,继续发送度2的编码包,直到最大连通组件达到

$k\beta_0$; 最后,随机从所有原始包中选择一个原始包,生成度1的编码包并发送,直到最大连通组件解码成功.

完成阶段:发送方根据最大组件解码成功的反馈包信息,将所有原始包分为集合 $W_i(k - |A_i|, \text{SN}_{\text{sw}})$ 和集合 $A_i(|A_i|, \text{SN}_{\text{sa}})$, 根据集合 $W_i(k - |A_i|, \text{SN}_{\text{sw}})$ 生成度 m 的编码包并发送. 根据度1和度2编码包各自所占概率,从集合 $W_i(k - |A_i|, \text{SN}_{\text{sw}})$ 中随机选择原始包递归编码,产生度1和度2的编码包并发送;接收方接收编码包,更新解码图 G ; 当接收方发现满足 $f(j) - f(j-1) > \delta (j \geq 1)$ 时,向发送方发送包含“所有原始包解码状态”信息的反馈包;若收到反馈包,则更新集合 $W_i(k - |A_i|, \text{SN}_{\text{sw}})$, 继续递归编码,产生度1和度2的编码包并发送;递归编码,直到所有的原始包解码成功. 完成阶段发送的度1,度2和度 m 的编码包均是对解码有用的,发送的度 m 的编码包数量是确定的,为了控制度1和度2编码包的发送,设置度1编码包的概率为 p_1 , 度2编码包的概率为 $p_2 = 1 - p_1$.

5 SROFC-LF 性能分析

将水声信道等效为擦除信道. 根据文献[9]的基于随机图论的需要的编码包数量与恢复的原始包数量之间的关系框架,对 SROFC-LF 的编解码和反馈问题进行性能分析.

5.1 编解码分析

由于 SROFC-LF 限制了反馈包数量,导致集合 $W_i(k - |A_i|, \text{SN}_{\text{sw}})$ 更新不及时,出现重复的编码包,因此,当信道擦除概率 $\varepsilon = 0$ 时,首先分析 SROFC (即 $\delta = 0$). 根据文献[7]知, OFC 最大组件达到 $k\beta_0$ 时,解码图记为 $g(k, c/k)$. 其中, c 是每个节点被平均选择的次数,一个节点相当于一个原始包[15, ch10].

SROFC 的建立阶段按序编码的第一步和文献[9]改进的在线喷泉码 (Improved Online Fountain Code, IOFC) 的第一步是相同的,因此, SROFC 的按序编码一共发送 $N_{d=2}^{\text{bbp}}$ 个编码包.

$$N_{d=2}^{\text{bbp}} = k/2 + k/4 + k/8 \quad (2)$$

建立阶段按序编码后, k 个原始包变成了 $k/8$ 个大小为8的连通组件. 最大组件占比仍然是 β_0 , 记 $k_2 = k/8$, 随机选择边构成解码图 $g'(k_2, c/k_2)$. 图 $g'(k_2, c/k_2)$ 中一共有 k_2 个原始包,每个原始包被平均选择的概率为 c , 则 $k_2 c$ 是原始包总共被选择的次数,两个原始包编码生成一个编码包,因此,达到最大组件时,所需的编码包数量为

$$N_{d=2}^{\text{bp}} = \frac{1}{2} k_2 c = \frac{1}{16} k c \quad (3)$$

依据文献[9], SROFC 期望传输的度1的编码包数

量为

$$N_{d=1}^{bp} = 1/\beta_0 \quad (4)$$

推理 1 在完成阶段, SROFC 有用的编码包分为建立阶段未解码的度 2 的编码包, 完成阶段度 1、度 2 和度 m 的编码包. 由于 SROFC 完成阶段传输的编码包都是对解码有用的, 因此, 完成阶段期望传输的编码包数量为

$$N_{d=1|2|m}^{cp} = k(1-\beta_0) \left[\frac{1}{8} - \frac{1}{16} c(1-\beta_0) \right] \quad (5)$$

证明

根据文献[7, 9, 15]知, 记 SROFC 建立阶段后的解码图为 $g_1=(t_1, d_1/t_1)$, $t_1=(1-\beta_0)k/8$ 表示大小为 8 的未解码的原始包数量; $d_1=(1-\beta_0)c$ 表示大小为 8 的原始包的平均度. 在图 g_1 中, 在完成阶段之前, $t_1 d_1$ 是 t_1 个原始包总共被选择的次数, 则生成 $t_1 d_1/2$ 个编码包.

根据文献[9], 在完成阶段平均恢复一个原始包需要一个有用的编码包. SROFC 完成阶段需要恢复的大小为 8 的连通组件数量为 $t_1=(1-\beta_0)k/8$; 建立阶段未解码的大小为 8 的连通组件数量为 $t_1 d_1/2$. 结合文献[14, 16], 完成阶段产生环的概率以及产生的度 1、度 2 和度 m 的编码包重复的概率均很小; 因此, 可认为在完成阶段产生的编码包都是有用的. 综上, 完成阶段期望传输的编码包数量为

$$t_1 - \frac{1}{2} t_1 d_1 = k(1-\beta_0) \left[\frac{1}{8} - \frac{1}{16} c(1-\beta_0) \right] \quad (6)$$

对于恢复 k 个原始包, SROFC 期望传输的编码包数量为

$$\begin{aligned} E &= N_{d=2}^{bbp} + N_{d=2}^{bp} + N_{d=1}^{bp} + N_{d=1|2|m}^{cp} \\ &= \frac{14k+kc}{16} + \frac{1}{\beta_0} + (k-k\beta_0) \left[\frac{1}{8} - \frac{1}{16} c(1-\beta_0) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

由于 SROFC-LF 限制了反馈, 导致集合 $W_i(k-|A_i|, SNsw)$ 不能及时更新, 可能产生重复的度 1 和度 2 的编码包. 因此, SROFC-LF 期望传输的编码包数量将大于或等于 SROFC 期望传输的编码包数量. 当信道擦除概率 $\varepsilon > 0$ 时, SROFC-LF 发送的编码包数量和 ε 有关. 由于 SROFC-LF 发送了度 m 的编码包, 防止了某些原始包一直未解码的情况; 因此, 当擦除概率 ε 较大时, SROFC-LF 需要的编码包数量理论上具有一定优势.

5.2 反馈分析

SROFC-LF 满足 $f(j)-f(j-1) > \delta (j \geq 1)$ 时, 发送反馈包; 而 SROFC 没有限制反馈, 只要接收方成功接收度 1 的编码包, 就会发送反馈; 可见, SROFC 比 SROFC-LF 发送的反馈包要多.

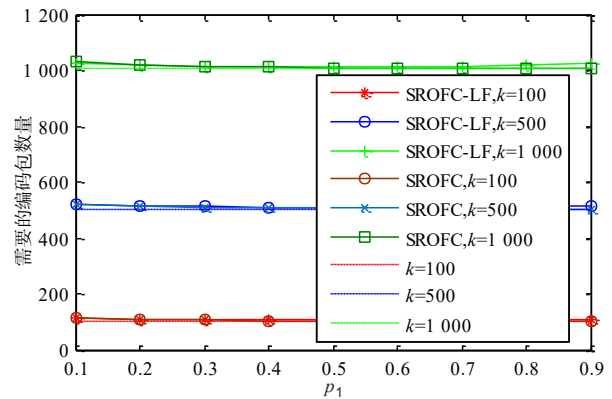
当 k 和 β_0 确定时, 建立阶段解码的原始包数量是相

对一定的, 则完成阶段需要解码的原始包数量也是相对确定的, 无论是否存在信道擦除概率, SROFC-LF 都是在满足反馈条件时, 才会发送反馈包. 因此, 发送的编码包数量对实际发送的反馈包数量影响不大.

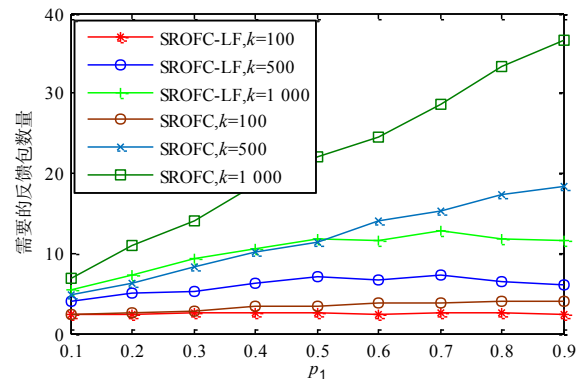
6 仿真实验

为了验证 SROFC-LF 的性能, 与文献[7]的 OFC、文献[8]的 IOFC-SLDD (Improved Online Fountain Codes based on Shaping for Left Degree Distribution)、文献[9]的 IOFC、文献[10]的 ZDOF-BDM (Zigzag Decodable Online Fountain with Buffer Decoding Method) 编码机制、文献[11]的 WOFC-LF (Weighted Online Fountain Codes with Low Feedback) 以及文献[12]的 OFCNB-EBDS (Estimation Based Degree Selection scheme for Online Fountain Codes with No Build-up phase) 做对比. 图中虚线代表理论分析, 实线代表仿真实验. 由于对比文献之间仿真参数设置不同, 将本文提出的 SROFC-LF 分别画图与以上文献进行对比分析.

图 1 是 p_1 对 SROFC-LF 和 SROFC 需要的编码包数量和反馈包数量的影响. 随着 p_1 的增大, SROFC 需要的编码包数量和理论分析结果越来越接近, SROFC-LF



(a) 需要的编码包数量



(b) 需要的反馈包数量

图 1 p_1 对需要的编码包数量和反馈包数量的影响

需要的编码包数量比 SROFC 稍多,而需要的反馈包数量明显少. 综合考虑,度 1 编码包的概率选择 $p_1=0.2$. 由于 UANs 的局限性,发同样数量的反馈包比发同样数量的编码包产生的影响大,因此, SROFC-LF 相比 SROFC 更适合 UANs.

开销是所需的编码包数量减去原始包数量 k 的值与 k 的比值. 图 2 设置 $\varepsilon=0.1$ 和 $\beta_0=0.5$. 当恢复相同数量的

原始包时, OFC 和 IOFC 的开销与需要的反馈包数量均比 SROFC-LF 大的多.

图 3 设置 $\beta_0=0.5$ 和 $k=1000$. SROFC-LF 的中间过程解码能力比 OFC、IOFC 和 WOFC-LF 弱,是由于 SROFC-LF 在建立阶段发送了大量度 2 的编码包来形成大小为 8 的连通组件. 但对恢复所有的原始包而言, SROFC-LF 恢复的速度较快,发送的编码包数量较少,更适合 UANs.

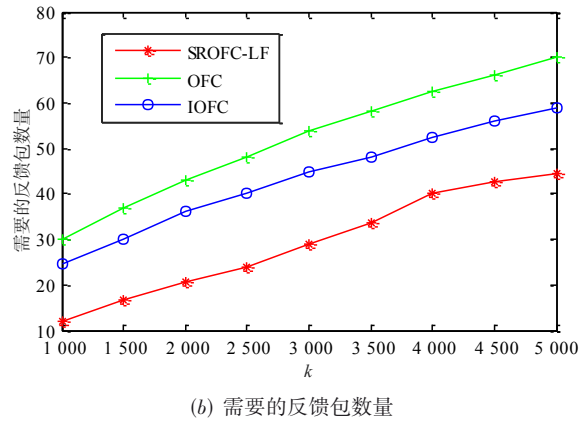
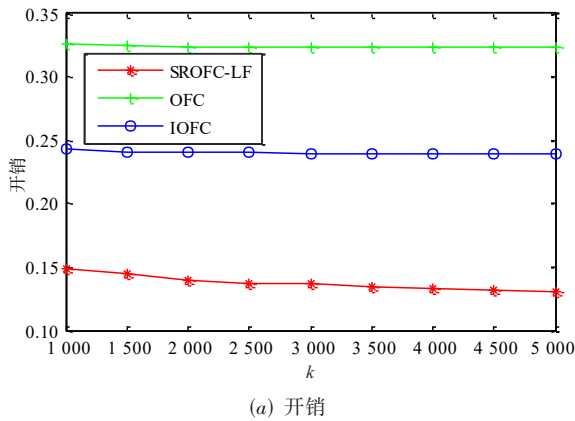


图 2 k 值对开销和需要的反馈包数量的影响

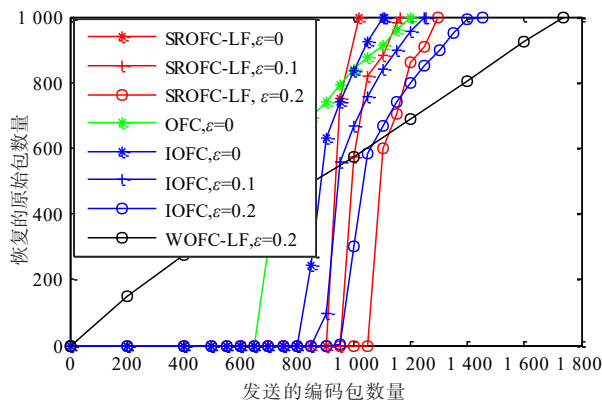


图 3 发送的编码包数量和恢复的原始包数量之间的关系

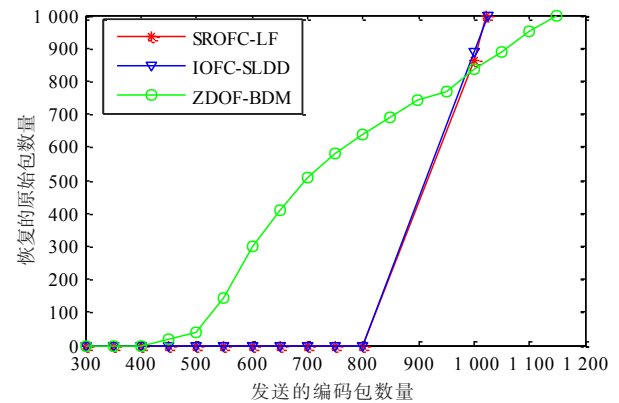


图 4 发送的编码包数量和恢复的原始包数量之间的关系

图 4 设置 $\varepsilon=0$, $\beta_0=0.65$ 和 $k=1000$. 由于 UANs 具有低带宽、长时延和能量受限等特征,需要开销低的编码机制,因此, SROFC-LF 和 IOFC-SLDD 两种编码机制适合 UANs.

图 5 设置 $\varepsilon \geq 0$, $\beta_0=0.65$ 和 $k=1000$. 当 ε 相同时,基本上 SROFC-LF 需要的编码包数量要低于 IOFC-SLDD; 当 $\varepsilon \geq 0.02$ 时,随着 ε 的增加, SROFC-LF 需要的反馈包数量少于 IOFC-SLDD. 由于水声信道是高误码率信道,因此, SROFC-LF 更适用 UANs.

表 2 设置 $k=1000$, $\beta_0=0.5$, 可见, SROFC-LF 在需

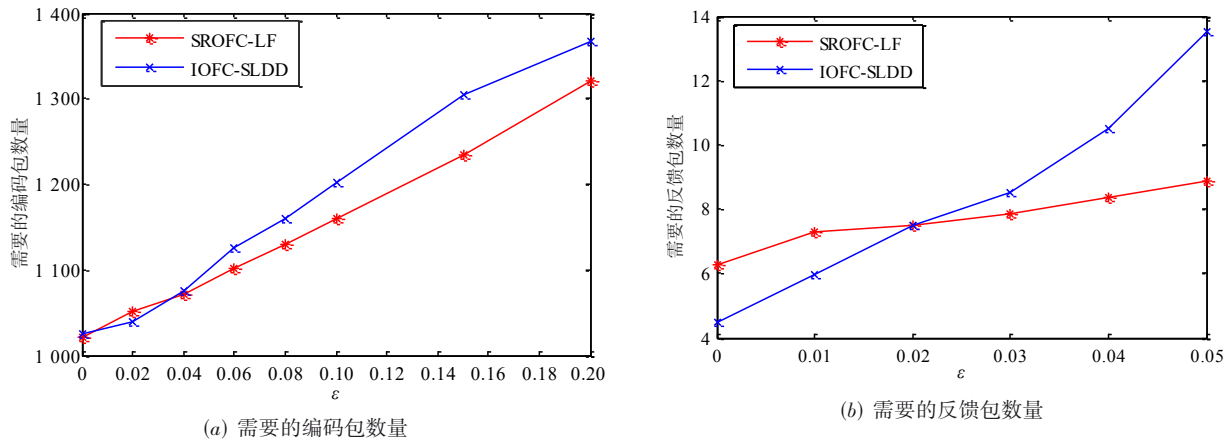
要的编码包和反馈包数量两个方面均表现较好,更适合 UANs.

7 结论

本文针对 UANs 的带宽窄、误码率高、能量受限等

表 2 需要的编码包和反馈包数量两项性能指标

机制	编码包($\varepsilon=0.2$)	反馈($\varepsilon=0.2$)
SROFC-LF	1 306.28	15.84
OFCNB-EBDS	1 580	2

图5 ϵ 对需要的编码包数量和反馈包数量的影响

特点,对 OFC 在 UANs 中的应用进行分析,提出了 SROFC-LF 编码机制,并基于随机图理论对 SROFC-LF 需要的编码包数量和原始包数量之间的关系进行理论分析和仿真实验,两者结果一致. 实验表明:SROFC-LF 在开销和反馈包数量两个方面均表现出更好的性能,因此,SROFC-LF 更适用于 UANs.

参考文献

- [1] YAN L, MA X L, LI X B, et al. Shot interference detection and mitigation for underwater acoustic communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3274-3285.
- [2] JIANG S M. On reliable data transfer in underwater acoustic networks: A survey from networking perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1036-1055.
- [3] MACKAY D J C. Fountain codes[J]. IEE Proceedings - Communications, 2005, 152(6): 1062-1068.
- [4] YILDIZ H U. Maximization of underwater sensor networks lifetime via fountain codes[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4602-4613.
- [5] DU X J, LI K Q, LIU X X, et al. RLT code based handshake-free reliable MAC protocol for underwater sensor networks[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016: 1-11.
- [6] SONG Y. Underwater acoustic sensor networks with cost efficiency for internet of underwater things[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 1707-1716.
- [7] CASSUTO Y, SHOKROLLAHI A. Online fountain codes with low overhead[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(6): 3137-3149.
- [8] HUANG T Q, YI B S. Improved online fountain codes based on shaping for left degree distribution[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2017, 79: 9-15.
- [9] HUANG J X, FEI Z S, CAO C Z, et al. Performance analysis and improvement of online fountain codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(12): 5916-5926.
- [10] SHI P C, WANG Z Y, LI D Z, et al. Zigzag decodable online fountain codes with high intermediate symbol recovery rates[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(11): 6629-6641.
- [11] HUANG J X, FEI Z S, CAO C Z, et al. Weighted online fountain codes with limited buffer size and feedback transmissions[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(12): 7960-7973.
- [12] XIAO Y W, ZHANG Y S, HUANG J X. Estimation based feedback reduction for online fountain codes[C]// 2022 3rd Information Communication Technologies Conference (ICTC). Piscataway: IEEE, 2022: 194-198.
- [13] HUANG J X, FEI Z S, CAO C Z, et al. Reliable broadcast based on online fountain codes[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(2): 369-373.
- [14] LIU X X, DU X J, ZHANG J L, et al. ROFC-LF: Recursive online fountain code with limited feedback for underwater acoustic networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(7): 4327-4342.
- [15] ALON N, SPENCER J H. The Probabilistic Method[M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [16] ERDŐS P, RÉNYI A. On the evolution of random graphs [J]. Publ Math Inst Hung Acad Sci, 1960, 5(1): 17-60.

作者简介



柳秀秀 女,1989年2月出生,河北衡水人. 分别于2013年和2016年在青海师范大学获工学学士和理学硕士学位,现为青海师范大学计算机学院在读博士生和讲师. 主要研究方向为水声网络可靠传输.

E-mail: 1154894860@qq.com



杜秀娟(通讯作者) 女,1970年2月出生,河北藁城人. 天津大学计算机工学博士. 青海师范大学计算机学院教授、博士生导师. 主要研究方向为网络和信息安全、移动自组织网络和水下传感器网络.

E-mail: dxj@qhnu.edu.cn



韩多亮 男,1994年5月出生,甘肃张掖人. 分别于2017年和2020年在青海师范大学获工学学士和理学硕士学位,现为青海师范大学在读博士生. 主要研究方向为水声网络协议设计和优化.

E-mail: 2945219148@qq.com