



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113437981 B

(45) 授权公告日 2022. 04. 22

(21) 申请号 202110592073.4

(22) 申请日 2021.05.28

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113437981 A

(43) 申请公布日 2021.09.24

(73) 专利权人 暨南大学
地址 510632 广东省广州市天河区黄埔大道西601号

(72) 发明人 赵山程 王锋 马啸

(74) 专利代理机构 广州市华学知识产权代理有限公司 44245

代理人 李斌

(51) Int. Cl.

H03M 13/29 (2006.01)

H04L 1/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 112332867 A, 2021.02.05

CN 112910474 A, 2021.06.04

CN 112953561 A, 2021.06.11

CN 109792255 A, 2019.05.21

WO 0074249 A1, 2000.12.07

US 2015039963 A1, 2015.02.05

US 6351832 B1, 2002.02.26

CN 101989887 A, 2011.03.23

WO 2018136761 A1, 2018.07.26

Shancheng Zhao et,al.Spatially

Coupled Codes via Partial and Recursive Superposition for Industrial IoT With High Trustworthiness.《IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS》.2020,第16卷(第9期),

审查员 邱翠婷

权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

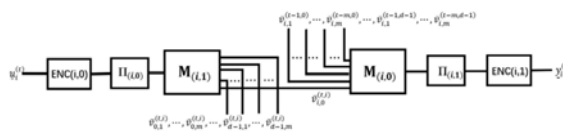
一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法,以码长为 $n^{(i)}$ 、信息位长度为 $k^{(i)}$ 的码 $C[n^{(i)}, k^{(i)}]$ 为外码,以码长为 $z^{(i)}$ 、信息位长度为 $q^{(i)}$ 的码 $C[z^{(i)}, q^{(i)}]$ 为内码,将长度为 $\sum_{i=0}^{d-1} k^{(i)}l$ 的信息序列 u 编码成长度为

$\sum_{i=0}^{d-1} ((k^{(i)} + \bar{z}^{(i)})(l + T))$ 的码字 c ,其中

$\bar{z}^{(i)}$ 是将长度为 $z^{(i)}$ 的内码编码后的序列经过打孔后得到的码字序列的长度。本发明所提出的编码方法构造灵活,具有更好的瀑布区域性能,误比特率低,可逼近信道容量。



1. 一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法,其特征在于,第*i*维空间耦合级联码以码长为 $n^{(i)}$ 、信息位长度为 $k^{(i)}$ 的码 $C[n^{(i)}, k^{(i)}]$ 为外码,以码长为 $z^{(i)}$ 、信息位长度为 $q^{(i)}$ 的码 $C[z^{(i)}, q^{(i)}]$ 为内码,其中, $n^{(i)} = \sum_{k=0}^{d-1} \sum_{j=1}^m n_{k,j}^{(i)} + n_0^{(i)}$, $q^{(i)} = \sum_{k=0}^{d-1} \sum_{j=1}^m n_{i,j}^{(k)} + n_0^{(i)}$, m 为耦合记忆长度, m 取值为正整数, d 为耦合维度, d 取值为正整数, $i=0, 1, \dots, d-1$; $j=1, 2, \dots, m$; $k=0, 1, \dots, d-1$, $n_0^{(i)}$ 表示第*i*维空间耦合级联码的外码输出中作为第*i*维的当前层的内码编码器的输入的子序列的长度, $n_0^{(i)}$ 为非负整数, $n_{k,j}^{(i)}$ 表示第*i*维空间耦合级联码的外码输出作为第*k*维且与当前层距离为*j*的内码编码器的输入的子序列的长度, $n_{k,j}^{(i)}$ 为非负整数;

将长度为 $\sum_{i=0}^{d-1} k^{(i)} l$ 的信息序列 \underline{u} 编码成长度为 $\sum_{i=0}^{d-1} ((k^{(i)} + \bar{z}^{(i)})(l + T))$ 的码字 \underline{c} ,其中, $\bar{z}^{(i)}$ 是将长度为 $z^{(i)}$ 的内码编码后的序列经过打孔后得到的码字序列的长度, T 为结尾长度, T 取大于零的整数;

所述编码方法包括以下步骤:

S1、将长度为 $\sum_{i=0}^{d-1} k^{(i)} l$ 的信息序列 \underline{u} 划分为*d*个分组 $\underline{u} = (\underline{u}_0, \underline{u}_1, \dots, \underline{u}_{d-1})$,其中,序列 \underline{u}_i 的长度为 $k^{(i)} l$;对于*i* = 0, 1, ..., *d* - 1,将序列 \underline{u}_i 划分为*l*个等长分组 $\underline{u}_i = (\underline{u}_i^{(0)}, \underline{u}_i^{(1)}, \dots, \underline{u}_i^{(l-1)})$;

S2、在 $t = -1, -2, \dots, -m$ 时刻, $\bar{v}_{k,j}^{(t,i)}$ 设置为全零序列,其中, $i=0, 1, \dots, d-1$; $j=1, 2, \dots, m$; $k=0, 1, \dots, d-1$;对于 $t=0, 1, \dots, l-1$,分别执行以下编码步骤:

S21、对于*i* = 0, 1, ..., *d* - 1,将长度为 $k^{(i)}$ 的序列 $\underline{u}_i^{(t)} = (u_0^{(t)}, u_1^{(t)}, \dots, u_{k^{(i)-1}}^{(t)})$ 送入第*i*维串行级联空间耦合码的外码 $C[n^{(i)}, k^{(i)}]$ 的编码器 $ENC(i, 0)$,得到长度为 $n^{(i)}$ 的编码序列 $\underline{v}_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{n^{(i)}-1}^{(t)})$;然后将编码序列 $\underline{v}_i^{(t)}$ 送入交织器 $\Pi_{(i,0)}$ 得到序列 $\bar{v}_i^{(t)}$;最后将序列 $\bar{v}_i^{(t)}$ 送入解复用器 $M_{(i,1)}$ 得到一个长度为 $n_0^{(i)}$ 的序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)}$ 和*md*个长度分别为

$n_{0,1}^{(i)}, \dots, n_{0,m}^{(i)}, n_{1,1}^{(i)}, \dots, n_{1,m}^{(i)}, \dots, n_{d-1,1}^{(i)}, \dots, n_{d-1,m}^{(i)}$ 的序列

$\bar{v}_{0,1}^{(t,i)}, \dots, \bar{v}_{0,m}^{(t,i)}, \bar{v}_{1,1}^{(t,i)}, \dots, \bar{v}_{1,m}^{(t,i)}, \dots, \bar{v}_{d-1,1}^{(t,i)}, \dots, \bar{v}_{d-1,m}^{(t,i)}$;

S22、对于*i* = 0, 1, ..., *d* - 1,首先将长度为 $n_0^{(i)}$ 的序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)}$ 和*md*个长度分别为 $n_{i,1}^{(0)}, \dots, n_{i,m}^{(0)}, n_{i,1}^{(1)}, \dots, n_{i,m}^{(1)}, \dots, n_{i,1}^{(d-1)}, \dots, n_{i,m}^{(d-1)}$ 的序列

$\bar{v}_{i,1}^{(t-1,0)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-m,0)}, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,1)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-m,1)}, \dots, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,d-1)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-m,d-1)}$ 送入复用器 $M_{(i,0)}$, 得到长度 $q^{(i)} = \sum_{k=0}^{d-1} \sum_{j=1}^m n_{i,j}^{(k)} + n_0^{(i)}$ 的序列 $\underline{a}_i^{(t)} = (\bar{v}_{i,0}^{(t,i)}, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,0)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-m,0)}, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,1)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-m,1)}, \dots, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,d-1)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-m,d-1)})$, 其中, $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)}$ 为第 i 维在 t 时刻的外码码字经交织后作为第 i 维在 t 时刻的内码编码器输入的子序列, $\bar{v}_{i,m}^{(t-m,d-1)}$ 为第 $d-1$ 维在 $t-m$ 时刻的外码码字经交织后作为第 i 维在 t 时刻的内码编码器输入的子序列; 然后将序列 $\underline{a}_i^{(t)}$ 送入交织器 $\Pi_{(i,1)}$, 得到序列 $\underline{b}_i^{(t)}$; 最后将序列 $\underline{b}_i^{(t)}$ 送入内码 $C[z^{(i)}, q^{(i)}]$ 的编码器 $ENC(i, 1)$, 得到长度为 $z^{(i)}$ 的码字序列 $\underline{y}_i^{(t)} = (y_0^{(t)}, y_1^{(t)}, \dots, y_{z^{(i)}-1}^{(t)})$;

S3、对于时刻 $t=1, 1+1, \dots, 1+T-1$ 和维度 $i=0, 1, \dots, d-1$, 将序列 $\underline{u}_i^{(t)}$ 设置为长度为 $k^{(i)}$ 的全零序列, 执行步骤 S2, 得到长度为 $z^{(i)}$ 的编码序列 $\underline{y}_i^{(t)} = (y_0^{(t)}, y_1^{(t)}, \dots, y_{z^{(i)}-1}^{(t)})$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法, 其特征在于, 信息序列 \underline{u} 为二元序列或多元序列。

3. 根据权利要求 1 所述的一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法, 其特征在于, 编码器 $ENC(i, 0)$ 和 $ENC(i, 1)$ 为任意类型的编码器。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法, 其特征在于, 交织器 $\Pi_{(i,0)}$ 与 $\Pi_{(i,1)}$ 为任意类型的交织器。

5. 根据权利要求 1 所述的一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法, 其特征在于, 复用器 $M_{(i,0)}$ 将输入的多个短序列拼接组合成一个新的长序列输出, 复用器为任意类型的复用器。

6. 根据权利要求 1 所述的一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法, 其特征在于, 解复用器 $M_{(i,1)}$ 将一个长序列拆分为多个短序列输出。

一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法

技术领域

[0001] 本发明属于数字通信技术领域,具体涉及一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法。

背景技术

[0002] 自Shannon在1948年提出著名的信道容量并证明信道编码定理以来,编码理论家一直致力于构造可逼近信道容量的好码。1966年,Forney等人提出了级联码,用短码构造性能更好的长码。1962年,Gallager首次提出了迭代译码的概念,但直到Berrou等人于1993年提出了基于迭代译码的Turbo码,由此才掀起迭代译码的研究热潮。Turbo码可分为并行级联码(Parallel Concatenated Code,简称PCC)、串行级联码(Serially Concatenated Code,简称SCC)等。低信噪比下Turbo码的误比特率偏高,当信噪比增加到某一数值后,误比特率会大幅下降,此误比特率大幅下降的区间称为瀑布区;高信噪比下,误比特率维持在低水平且不再明显变化,继续增大信噪比将不会带来增益,此区间称为错误平层区。

[0003] 空间耦合码是一类适用于流数据传输的高性能信道编码。2017年,S.Moloudi等在“Spatially Coupled Turbo-Like Codes”中将空间耦合的概念扩展到Turbo类码中得到空间耦合Turbo类码(Spatially Coupled Turbo-like Code,SC-TC码)。SC-TC码在瀑布区与错误平层区的性能都优于Turbo码。在空间耦合串行级联码中,当前时刻的外码码字被分拆为若干个子序列,并分别作为后续的内码编码器的编码输入。与串行级联码相比,空间耦合串行级联码的瀑布区性能较好。但相对并行级联码相比,空间耦合串行级联码在瀑布区域性能较差。因此,现有空间耦合串行级联码虽有较低的错误平层区,但其瀑布区域的性能仍需改善。

发明内容

[0004] 本发明的主要目的在于克服现有技术的缺点与不足,提出一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法,一方面,本发明所提出的编码方法具有构造灵活的优点,另一方面,本发明提出的编码方法具有更好的瀑布区域性能。

[0005] 为了达到上述目的,本发明采用以下技术方案:

[0006] 一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法,第*i*维空间耦合级联码以码长为 $n^{(i)}$ 、信息位长度为 $k^{(i)}$ 的码 $C[n^{(i)}, k^{(i)}]$ 为外码,以码长为 $z^{(i)}$ 、信息位长度为 $q^{(i)}$ 的码 $C[z^{(i)}, q^{(i)}]$ 为内码,其中,
$$n^{(i)} = \sum_{k=0}^{d-1} \sum_{j=1}^m n_{k,j}^{(i)} + n_0^{(i)},$$

$$q^{(i)} = \sum_{k=0}^{d-1} \sum_{j=1}^m n_{i,j}^{(k)} + n_0^{(i)},$$
 m 为耦合记忆长度, m 取值为正整数, d 为耦合维度, d 取值为正整数, $i=0,1,\dots,d-1$; $j=1,2,\dots,m$; $k=0,1,\dots,d-1$, $n_0^{(i)}$ 表示第*i*维空间耦合级联码的外码输出中作为第*i*维的当前层的内码编码器的输入的子序列的长度, $n_0^{(i)}$ 为非负整数,

$n_{k,j}^{(i)}$ 表示第i维空间耦合级联码的外码输出作为第k维且与当前层距离为j的内码编码器的输入的子序列的长度, $n_{k,j}^{(i)}$ 为非负整数;

[0007] 将长度为 $\sum_{i=0}^{d-1} k^{(i)}l$ 的信息序列 \underline{u} 编码成长度为 $\sum_{i=0}^{d-1} ((k^{(i)} + \bar{z}^{(i)})(l + T))$ 的码字 \underline{c} ,其中, $\bar{z}^{(i)}$ 是将长度为 $z^{(i)}$ 的内码编码后的序列经过打孔后得到的码字序列的长度, T为结尾长度, T取大于零的整数;

[0008] 所述编码方法包括以下步骤:

[0009] S1、将长度为 $\sum_{i=0}^{d-1} k^{(i)}l$ 的信息序列 \underline{u} 划分为d个分组 $\underline{u} = (\underline{u}_0, \underline{u}_1, \dots, \underline{u}_{d-1})$,其中, 序列 \underline{u}_i 的长度为 $k^{(i)}l$; 对于 $i = 0, 1, \dots, d-1$, 将序列 \underline{u}_i 划分为l个等长分组 $\underline{u}_i = (\underline{u}_i^{(0)}, \underline{u}_i^{(1)}, \dots, \underline{u}_i^{(l-1)})$;

[0010] S2、在 $t = -1, -2, \dots, -m$ 时刻, $\bar{v}_{k,j}^{(t,i)}$ 设置为全零序列, 其中, $i = 0, 1, \dots, d-1$; $j = 1, 2, \dots, m$; $k = 0, 1, \dots, d-1$; 对于 $t = 0, 1, \dots, l-1$, 分别执行以下编码步骤:

[0011] S21、对于 $i = 0, 1, \dots, d-1$, 将长度为 $k^{(i)}$ 的序列 $\underline{u}_i^{(t)} = (u_0^{(t)}, u_1^{(t)}, \dots, u_{k^{(i)}-1}^{(t)})$ 送入第i维串行级联空间耦合码的外码 $C[n^{(i)}, k^{(i)}]$ 的编码器 $ENC(i, 0)$, 得到长度为 $n^{(i)}$ 的编码序列 $\underline{v}_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{n^{(i)}-1}^{(t)})$; 然后将编码序列 $\underline{v}_i^{(t)}$ 送入交织器 $\Pi_{(i,0)}$ 得到序列 $\bar{v}_i^{(t)}$; 最后将序列 $\bar{v}_i^{(t)}$ 送入解复用器 $M_{(i,1)}$ 得到一个长度为 $n_0^{(i)}$ 的序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)}$ 和md个长度分别为 $n_{0,1}^{(i)}, \dots, n_{0,m}^{(i)}, n_{1,1}^{(i)}, \dots, n_{1,m}^{(i)}, \dots, n_{d-1,1}^{(i)}, \dots, n_{d-1,m}^{(i)}$ 的序列

$\bar{v}_{0,1}^{(t,i)}, \dots, \bar{v}_{0,m}^{(t,i)}, \bar{v}_{1,1}^{(t,i)}, \dots, \bar{v}_{1,m}^{(t,i)}, \dots, \bar{v}_{d-1,1}^{(t,i)}, \dots, \bar{v}_{d-1,m}^{(t,i)}$;

[0012] S22、对于 $i = 0, 1, \dots, d-1$, 首先将长度为 $n_0^{(i)}$ 的序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)}$ 和md个长度分别为 $n_{i,1}^{(0)}, \dots, n_{i,m}^{(0)}, n_{i,1}^{(1)}, \dots, n_{i,m}^{(1)}, \dots, n_{i,1}^{(d-1)}, \dots, n_{i,m}^{(d-1)}$ 的序列

$\bar{v}_{i,1}^{(t-1,0)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-1,0)}, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,1)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-1,1)}, \dots, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,d-1)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-1,d-1)}$ 送入复用器

$M_{(i,0)}$, 得到长度 $q^{(i)} = \sum_{k=0}^{d-1} \sum_{j=1}^m n_{i,j}^{(k)} + n_0^{(i)}$ 的序列

$\underline{a}_i^{(t)} =$

$(\bar{v}_{i,0}^{(t,i)}, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,0)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-1,0)}, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,1)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-1,1)}, \dots, \bar{v}_{i,1}^{(t-1,d-1)}, \dots, \bar{v}_{i,m}^{(t-1,d-1)})$,

其中, $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)}$ 为第i维在t时刻的外码码字经交织后作为第i维在t时刻的内码编码器

输入的子序列, $\bar{v}_{i,m}^{(t-m,d-1)}$ 为第d-1维在t-m时刻的外码码字经交织后作为第i维在t时刻的内

码编码器输入的子序列;然后将序列 $\underline{a}_i^{(t)}$ 送入交织器 $\Pi_{(i,1)}$,得到序列 $\underline{b}_i^{(t)}$;最后将序列 $\underline{b}_i^{(t)}$ 送入内码 $C[z^{(i)},q^{(i)}]$ 的编码器 $ENC(i,1)$,得到长度为 $z^{(i)}$ 的码字序列 $\underline{y}_i^{(t)} = (y_0^{(t)}, y_1^{(t)}, \dots, y_{z^{(i)}-1}^{(t)})$;

[0013] S3、对于时刻 $t=1, 1+1, \dots, 1+T-1$ 和维度 $i=0, 1, \dots, d-1$,将序列 $\underline{u}_i^{(t)}$ 设置为长度为 $k^{(i)}$ 的全零序列,执行步骤S2,得到长度为 $z^{(i)}$ 的编码序列 $\underline{y}_i^{(t)} = (y_0^{(t)}, y_1^{(t)}, \dots, y_{z^{(i)}-1}^{(t)})$ 。

[0014] 进一步的,信息序列 \underline{u} 为二元序列或多元序列。

[0015] 进一步的,编码器 $ENC(i,0)$ 和 $ENC(i,1)$ 为任意类型的编码器。

[0016] 进一步的,交织器 $\Pi_{(i,0)}$ 与 $\Pi_{(i,1)}$ 为任意类型的交织器。

[0017] 进一步的,复用器 $M_{(i,0)}$ 将输入的多个短序列拼接组合成一个新的长序列输出,复用器为任意类型的复用器。

[0018] 进一步的,解复用器 $M_{(i,1)}$ 将一个长序列拆分为多个短序列输出。

[0019] 本发明与现有技术相比,具有如下优点和有益效果:

[0020] 1、本发明提出的基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法,具有构造灵活、可逼近信道容量等优点。

[0021] 2、本发明提出的基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法,与现有的空间耦合串行级联码构造方法相比,可以得到更好的瀑布区。

附图说明

[0022] 图1是基于多维编码的空间耦合串行级联码的编码框图;

[0023] 图2是记忆长度 $m=1$ 、维度 $d=2$ 的基于多维编码的空间耦合串行级联码的编码框图;

[0024] 图3是本发明实施例1的外码内码编码框图,实施例2的内码编码框图;

[0025] 图4是本发明实施例2的外码编码框图;

[0026] 图5是本发明实施例1中的多维空间耦合串行级联码的性能;

[0027] 图6是本发明实施例2中的多维空间耦合串行级联码的性能。

具体实施方式

[0028] 下面结合实施例及附图对本发明作进一步详细的描述,但本发明的实施方式不限于此。

[0029] 实施例1

[0030] 一种基于多维编码的空间耦合串行级联码编码方法,本实施例中设置耦合长度 $m=1, d=2, k^{(0)}=k^{(1)}=1024, n_{0,1}^{(0)}=n_{1,1}^{(0)}=n_{0,1}^{(1)}=n_{1,1}^{(1)}=512$;长度为 $\sum_{i=0}^{d-1} k^{(i)}l$ 的二元信息序列 \underline{u} 划分为2份 $l=49$ 个等长分组 $\underline{u}_i = (\underline{u}_i^{(0)}, \underline{u}_i^{(1)}, \dots, \underline{u}_i^{(48)})$, ($i=0, \dots, d-1$), 每个分组长度为 $k^{(i)}=1024$ 。级联码的外码与内码选用两个相同的生成矩阵为 $G=[1, 5/7]$ 的递归系统卷积码 $C[2, 1]$, 编码器结构示意图如图3所示, 编码器寄存器的起始状态为零状态。本实施例中, 交织器均为随机交织器。

[0031] 解复用器将当前外码码字 $v_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{2051}^{(t)})$ 拆分为码字序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)})$ 与传到当前维度下一时刻进行内码编码的码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t,i)} = (v_{1028}^{(t)}, v_{1029}^{(t)}, \dots, v_{1539}^{(t)})$, 传到下一时刻在第二维度进行内码编码的码字序列 $\bar{v}_{k \neq i,1}^{(t,i)} = (v_{1540}^{(t)}, v_{1541}^{(t)}, \dots, v_{2051}^{(t)})$, $i = 0,1; k = 0,1$ 。复用器将当前维度输入的当前时刻外码码字序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)})$ 与当前维度来自上一时刻的外码码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t-1,i)} = (v_{1028}^{(t-1)}, v_{1029}^{(t-1)}, \dots, v_{1539}^{(t-1)})$, 来自另外一维度上一时刻的外码码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t-1,k \neq i)} = (v_{1540}^{(t-1)}, v_{1541}^{(t-1)}, \dots, v_{2051}^{(t-1)})$, ($i = 0,1; k = 0,1$) 复接为 $a_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)}, v_{1028}^{(t-1)}, v_{1029}^{(t-1)}, \dots, v_{1539}^{(t-1)}, v_{1540}^{(t-1)}, v_{1541}^{(t-1)}, \dots, v_{2051}^{(t-1)})$ 。两条链的结尾长度一致, $T=1$ 。如图1和图2所示, 其编码方法包括以下步骤:

[0032] S1、对于 $i=0,1$, 将长度为 $\sum_{i=0}^1 k^{(i)} l$ 的信息序列 \underline{u} 划分为2个分组 $\underline{u} = (\underline{u}_0, \underline{u}_1)$, 其中, 序列 \underline{u}_i 的长度为 $k^{(i)} l$; 将序列 \underline{u}_i 划分为49个长度 $k^{(i)} = 1024$ 的等长分组 $\underline{u}_i = (\underline{u}_i^{(0)}, \underline{u}_i^{(1)}, \dots, \underline{u}_i^{(48)})$;

[0033] S2、对于时刻 $t=-1$, $\bar{v}_{i,1}^{(t,i)} = (0_{1028}, 0_{1029}, \dots, 0_{1539})$,

$\bar{v}_{k \neq i,1}^{(t,i)} = (0_{1540}, 0_{1541}, \dots, 0_{2051})$, $i = 0,1; k = 0,1$; 即对于时刻 $t=0$, 内码的输入只有当前维度当前时刻外码输出的前1028位, 后面1024位为全零序列。在 $t=0,1, \dots, 48$ 时刻, 分为以下两个步骤进行编码:

[0034] S21、对于 $i=0,1$, 将长度为1024的序列 $\underline{u}_i^{(t)} = (u_0^{(t)}, u_1^{(t)}, \dots, u_{1023}^{(t)})$, 分别送入2个维度的外码 $C[2,1]$ 编码器 $ENC(i,0)$ 进行编码, 并在最后附加输入两位为0的比特, 得到长度为2052的编码序列 $v_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{2051}^{(t)})$; 将序列 $v_i^{(t)}$ 送入交织器 $\Pi_{(i,0)}$ 得到序列 $\bar{v}_i^{(t)}$, 然后将交织后的序列 $\bar{v}_i^{(t)}$ 送入解复用器 $M_{(i,1)}$ 划分为长度为1028的序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)})$, 1个长度为512的序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t,i)} = (v_{1028}^{(t)}, v_{1029}^{(t)}, \dots, v_{1539}^{(t)})$, 1个长度为512的序列 $\bar{v}_{k \neq i,1}^{(t,i)} = (v_{1540}^{(t)}, v_{1541}^{(t)}, \dots, v_{2051}^{(t)})$, $k = 0,1$ 。

[0035] S22、对于 $i=0,1$, $M_{(i,0)}$ 复用器将输入的当前时刻外码码字序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)})$ 与来自上一时刻的外码码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t-1,i)} = (v_{1028}^{(t-1)}, v_{1029}^{(t-1)}, \dots, v_{1539}^{(t-1)})$, 来自另一维上一时刻的外码码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t-1,k \neq i)} = (v_{1540}^{(t-1)}, v_{1541}^{(t-1)}, \dots, v_{2051}^{(t-1)})$, ($k = 0,1$) 复接为

$\underline{a}_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)}, v_{1028}^{(t-1)}, v_{1029}^{(t-1)}, \dots, v_{1539}^{(t-1)}, v_{1540}^{(t-1)}, v_{1541}^{(t-1)}, \dots, v_{2051}^{(t-1)})$ 。将 $\underline{a}_i^{(t)}$ 送入交织器 $\Pi_{(i,1)}$, 得到序列 $\underline{b}_i^{(t)} = (b_0^{(t)}, b_1^{(t)}, \dots, b_{2051}^{(t)})$, 将 $\underline{b}_i^{(t)}$ 按比特依次送入内码 C[2, 1] 编码器 ENC(i, 1) 进行编码, 并在最后依次输入两位为 0 的比特, 得到长度为 4108 的编码序列 $\underline{y}_i^{(t)} = (y_0^{(t)}, y_1^{(t)}, \dots, y_{4107}^{(t)})$ 。

[0036] S3、在 $t=49$ 时刻, 对于 $i=0, 1$, $\underline{u}_i^{(t)}$ 为长度为 1024 的全零序列, 执行步骤 S2, 得到长度为 4108 的码字序列 $\underline{y}_i^{(t)}$ 。

[0037] 码字 $\underline{c}_i = (c_i^{(0)}, c_i^{(1)}, \dots, c_i^{(48)}, c_i^{(49)})$, 对于 $i=0, 1$, $\underline{c}_i^{(t)} = (\underline{u}_i^{(t)}, \bar{y}_i^{(t)})$, $\bar{y}_i^{(t)}$ 为当前时刻内码编码后的序列 $\underline{y}_i^{(t)}$ 经过穿孔后得到的码字校验位, 长度为 $\bar{z}^{(i)}$, 由此得到码率为 $\frac{1}{3}$ 的码字; 经 BPSK 调制后送入 AWGN 信道, 接收端接收到对应码字 \underline{c}_i 的接收序列 $\underline{r}_i = (\underline{r}^{(0)}, \underline{r}^{(1)}, \dots, \underline{r}^{(48)}, \underline{r}^{(49)})$ 。每一维设定译码窗口大小为 4, 也即延迟为 3。当接收端接收到 $\underline{r}^{(t)}, \underline{r}^{(t+1)}, \dots, \underline{r}^{(t+7)}$, 进行迭代译码并得到发送消息序列 \underline{u}_i 的估计序列 $\hat{\underline{u}}_i$ 。

[0038] 仿真结果如图 5 所示, 前后仿真了本实施例给出的码在 $m=1, d=1, k^{(i)}=1024, n_{k,j}^{(i)}=1024$; $m=1, d=2, k^{(i)}=1024, n_{k,j}^{(i)}=512$ 与 $m=1, d=3, k^{(i)}=1024, n_{k,j}^{(i)}=410$ 下的性能, 其中 $k=0, \dots, d-1; i=0, \dots, d-1; j=1, \dots, m$; 参数 d 越大, 该编码结构的维度越大, 如图 5 所示, 相比现有的空间耦合串行级联码, 本实施例给出的码随着维度的增加时可以得到更好的性能, 瀑布区很好。

[0039] 实施例 2

[0040] 本实施例中, 设置耦合长度 $m=1, d=2, k^{(0)}=k^{(1)}=1024, n_{0,1}^{(0)}=n_{1,1}^{(0)}=n_{0,1}^{(1)}=n_{1,1}^{(1)}=512$; 长度为 $\sum_{i=0}^{d-1} k^{(i)}l$ 的二元信息序列 \underline{u} 划分为 2 份 $l=49$ 个等长分组 $\underline{u}_i = (\underline{u}_i^{(0)}, \underline{u}_i^{(1)}, \dots, \underline{u}_i^{(48)}), (i=0, \dots, d-1)$, 每个分组长度为 $k^{(i)}=1024$ 。级联码的外码与内码选用生成矩阵分别为 $G=[1, 7], G=[1, 5/7]$ 的非递归系统卷积码 C[2, 1] 和递归系统卷积码 C[2, 1], 编码器结构示意图分别如图 4 和图 3 所示, 编码器寄存器的起始状态为零状态。本实施例中, 交织器均为随机交织器。

[0041] 解复用器将当前外码码字 $\underline{v}_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{2051}^{(t)})$ 拆分为传到当前维度当前时刻的码字序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)})$ 与传到当前维度下一时刻进行内码编码的码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t,i)} = (v_{1028}^{(t)}, v_{1029}^{(t)}, \dots, v_{1539}^{(t)})$, 传到下一时刻在第二维度进行内码编码的码字序列 $\bar{v}_{k \neq i, 1}^{(t,i)} = (v_{1540}^{(t)}, v_{1541}^{(t)}, \dots, v_{2051}^{(t)}), k=0, 1; i=0, 1$ 。复用器将当前维度

输入的当前时刻外码码字序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)})$ 与当前维度来自上一时刻的外码码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t-1,i)} = (v_{1028}^{(t-1)}, v_{1029}^{(t-1)}, \dots, v_{1539}^{(t-1)})$, 来自另外一维度上一时刻的外码码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t-1,k \neq i)} = (v_{1540}^{(t-1)}, v_{1541}^{(t-1)}, \dots, v_{2051}^{(t-1)})$, ($k = 0, 1; i = 0, 1$) 复接为:

$$[0042] \quad \underline{a}_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)}, v_{1028}^{(t-1)}, v_{1029}^{(t-1)}, \dots, v_{1539}^{(t-1)}, v_{1540}^{(t-1)}, v_{1541}^{(t-1)}, \dots, v_{2051}^{(t-1)})$$

[0043] 两条链的结尾长度一致, $T=1$ 。如图1和图2所示, 其编码方法包括以下步骤:

[0044] S1、对于 $i=0, 1$, 将长度为 $\sum_{i=0}^1 k^{(i)} l$ 的信息序列 \underline{u} 划分为2个分组 $\underline{u} = (\underline{u}_0, \underline{u}_1)$, 其中, 序列 \underline{u}_i 的长度为 $k^{(i)} l$; 将序列 \underline{u}_i 划分为49个长度 $k^{(i)} = 1024$ 的等长分组 $\underline{u}_i = (\underline{u}_i^{(0)}, \underline{u}_i^{(1)}, \dots, \underline{u}_i^{(48)})$;

[0045] S2、对于时刻 $t=-1$, $\bar{v}_{i,1}^{(t,i)} = (0_{1028}, 0_{1029}, \dots, 0_{1539})$,

$\bar{v}_{k \neq i, 1}^{(t,i)} = (0_{1540}, 0_{1541}, \dots, 0_{2051})$, $k = 0, 1; i = 0, 1$; 即对于时刻 $t=0$, 内码的输入只有当前维度当前时刻外码输出的前1028位, 后面1024位为全零序列; 在 $t=0, 1, \dots, 48$ 时刻, 分为以下两个步骤进行编码:

[0046] S21、对于 $i=0, 1$, 将长度为1024的序列 $\underline{u}_i^{(t)} = (u_0^{(t)}, u_1^{(t)}, \dots, u_{1023}^{(t)})$, 分别送入2个维度的外码 $C[2, 1]$ 编码器 $ENC(i, 0)$ 进行编码, 并在最后附加输入两位为0的比特, 得到长度为2052的编码序列 $\underline{v}_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{2051}^{(t)})$; 将序列 $\underline{v}_i^{(t)}$ 送入交织器 $\Pi_{(i,0)}$ 得到序列 $\bar{v}_i^{(t)}$; 然后将交织后的序列 $\bar{v}_i^{(t)}$ 送入解复用器 $M_{(i,1)}$ 划分为长度为1028的序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)})$, 1个长度为512的序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t,i)} = (v_{1028}^{(t)}, v_{1029}^{(t)}, \dots, v_{1539}^{(t)})$, 1个长度为512的序列 $\bar{v}_{k \neq i, 1}^{(t,i)} = (v_{1540}^{(t)}, v_{1541}^{(t)}, \dots, v_{2051}^{(t)})$, $k = 0, 1$ 。

[0047] S22、对于 $i = 0, 1$, $M_{(i,0)}$ 复用器将输入的当前时刻外码码字序列 $\bar{v}_{i,0}^{(t,i)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)})$ 与来自上一时刻的外码码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t-1,i)} = (v_{1028}^{(t-1)}, v_{1029}^{(t-1)}, \dots, v_{1539}^{(t-1)})$, 来自另一维上一时刻的外码码字序列 $\bar{v}_{i,1}^{(t-1,k \neq i)} = (v_{1540}^{(t-1)}, v_{1541}^{(t-1)}, \dots, v_{2051}^{(t-1)})$, ($k = 0, 1$) 复接为:

$$[0048] \quad \underline{a}_i^{(t)} = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{1027}^{(t)}, v_{1028}^{(t-1)}, v_{1029}^{(t-1)}, \dots, v_{1539}^{(t-1)}, v_{1540}^{(t-1)}, v_{1541}^{(t-1)}, \dots, v_{2051}^{(t-1)})$$

[0049] 将 $\underline{a}_i^{(t)}$ 送入交织器 $\Pi_{(i,1)}$, 得到序列 $\underline{b}_i^{(t)} = (b_0^{(t)}, b_1^{(t)}, \dots, b_{2051}^{(t)})$, 将 $\underline{b}_i^{(t)}$ 按比特依次送入内码 $C[2, 1]$ 编码器 $ENC(i, 1)$ 进行编码, 并在最后依次输入两位为0的比特, 得到长度为4108的编码序列 $\underline{y}_i^{(t)} = (y_0^{(t)}, y_1^{(t)}, \dots, y_{4107}^{(t)})$ 。

[0050] S3、在 $t=49$ 时刻,对于 $i=0,1$, $\underline{u}_i^{(t)}$ 为长度为1024的全零序列,执行步骤S2,得到长度为4108的码字序列 $\underline{y}_i^{(t)}$ 。

[0051] 码字 $\underline{c}_i = (\underline{c}_i^{(0)}, \underline{c}_i^{(1)}, \dots, \underline{c}_i^{(48)}, \underline{c}_i^{(49)})$,对于 $i=0,1$, $\underline{c}_i^{(t)} = (\underline{u}_i^{(t)}, \bar{y}_i^{(t)})$, $\bar{y}_i^{(t)}$ 为当前时刻内码编码后的序列 $\underline{y}_i^{(t)}$ 经过穿孔后得到的码字校验位,长度为 $\bar{z}^{(i)}$,由此得到码率为 $\frac{1}{3}$ 的码字;经BPSK调制后送入AWGN信道,接收端接收到对应码字 \underline{c}_i 的接收序列 $\underline{r}_i = (\underline{r}^{(0)}, \underline{r}^{(1)}, \dots, \underline{r}^{(48)}, \underline{r}^{(49)})$ 。每一维设定译码窗口大小为4,也即延迟为3。当接收端接收到 $\underline{r}^{(t)}, \underline{r}^{(t+1)}, \dots, \underline{r}^{(t+7)}$,进行迭代译码并得到发送消息序列 \underline{u}_i 的估计序列 $\hat{\underline{u}}_i$ 。

[0052] 仿真结果如图6所示,仿真了本实施例给出的码在 $m=1, d=2, k^{(i)}=1024, n_{k,j}^{(i)}=512$ 的性能,与实施例1中同样参数下内外码都使用递归系统码的情况进行比较,其中 $k=0, \dots, d-1; i=0, \dots, d-1; j=1, \dots, m$;在维度一样的情况下,从图6可见,使用混合码相比之下可以得到更好的性能,更加逼近信道容量,但相对的错误平层会变差一些。

[0053] 还需要说明的是,在本说明书中,诸如术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0054] 对所公开的实施例的上述说明,使本领域专业技术人员能够实现或使用本发明。对这些实施例的多种修改对本领域的专业技术人员来说将是显而易见的,本文中所定义的一般原理可以在不脱离本发明的精神或范围的情况下,在其他实施例中实现。因此,本发明将不会被限制于本文所示的这些实施例,而是要符合与本文所公开的原理和新颖特点相一致的最宽的范围。

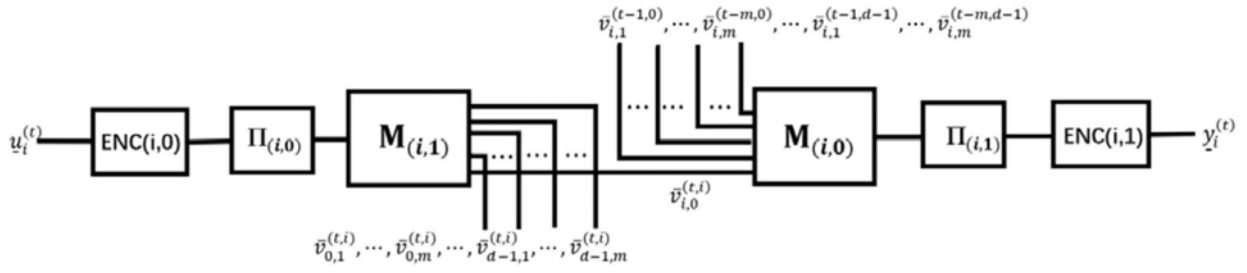


图1

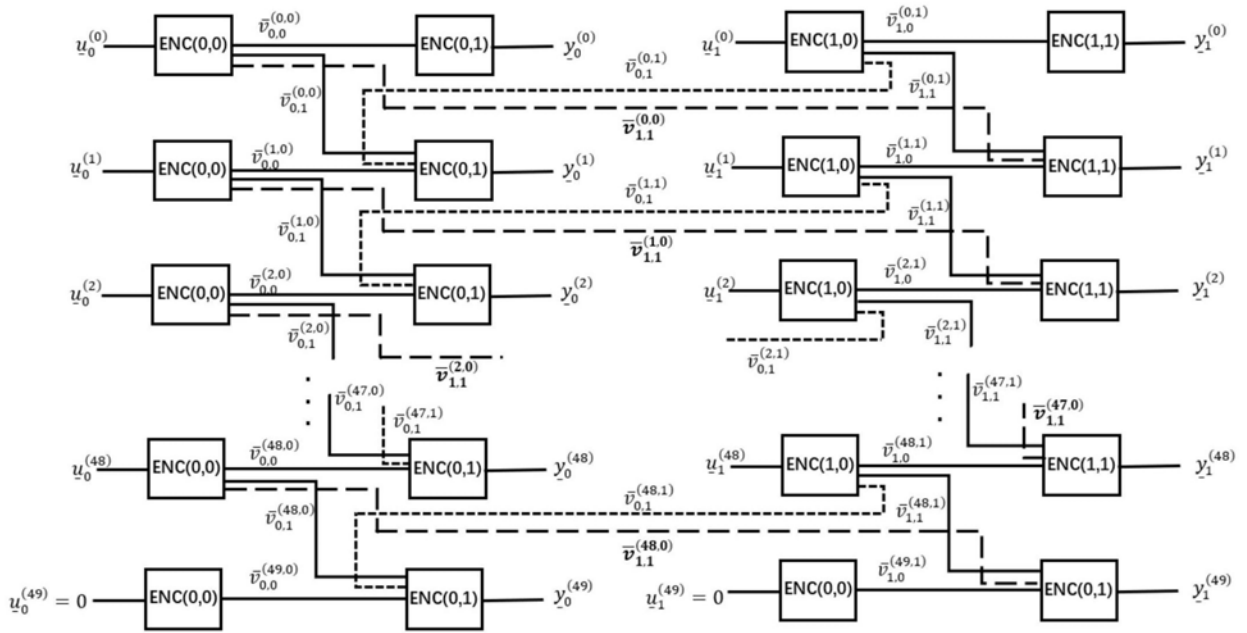


图2

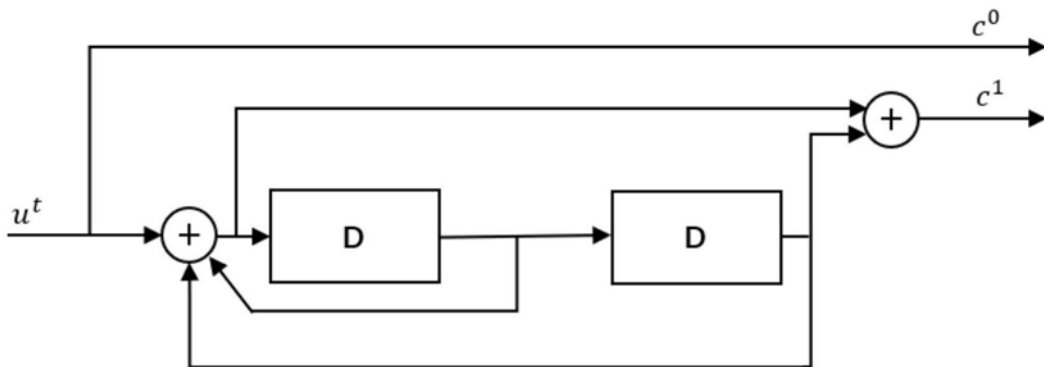


图3

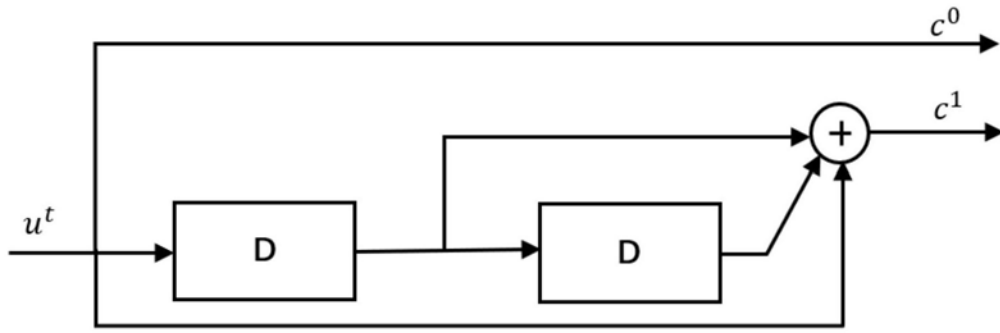


图4

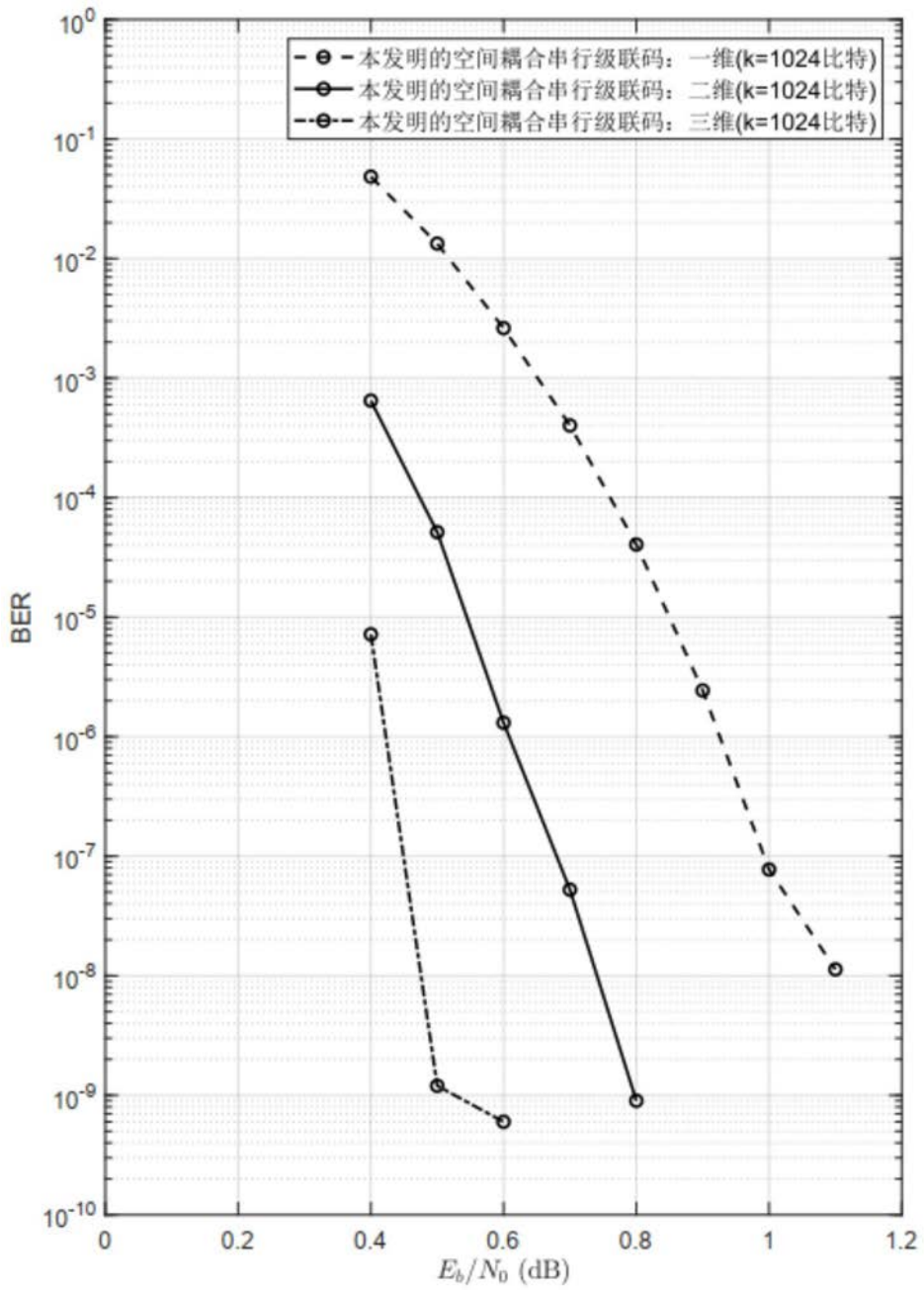


图5

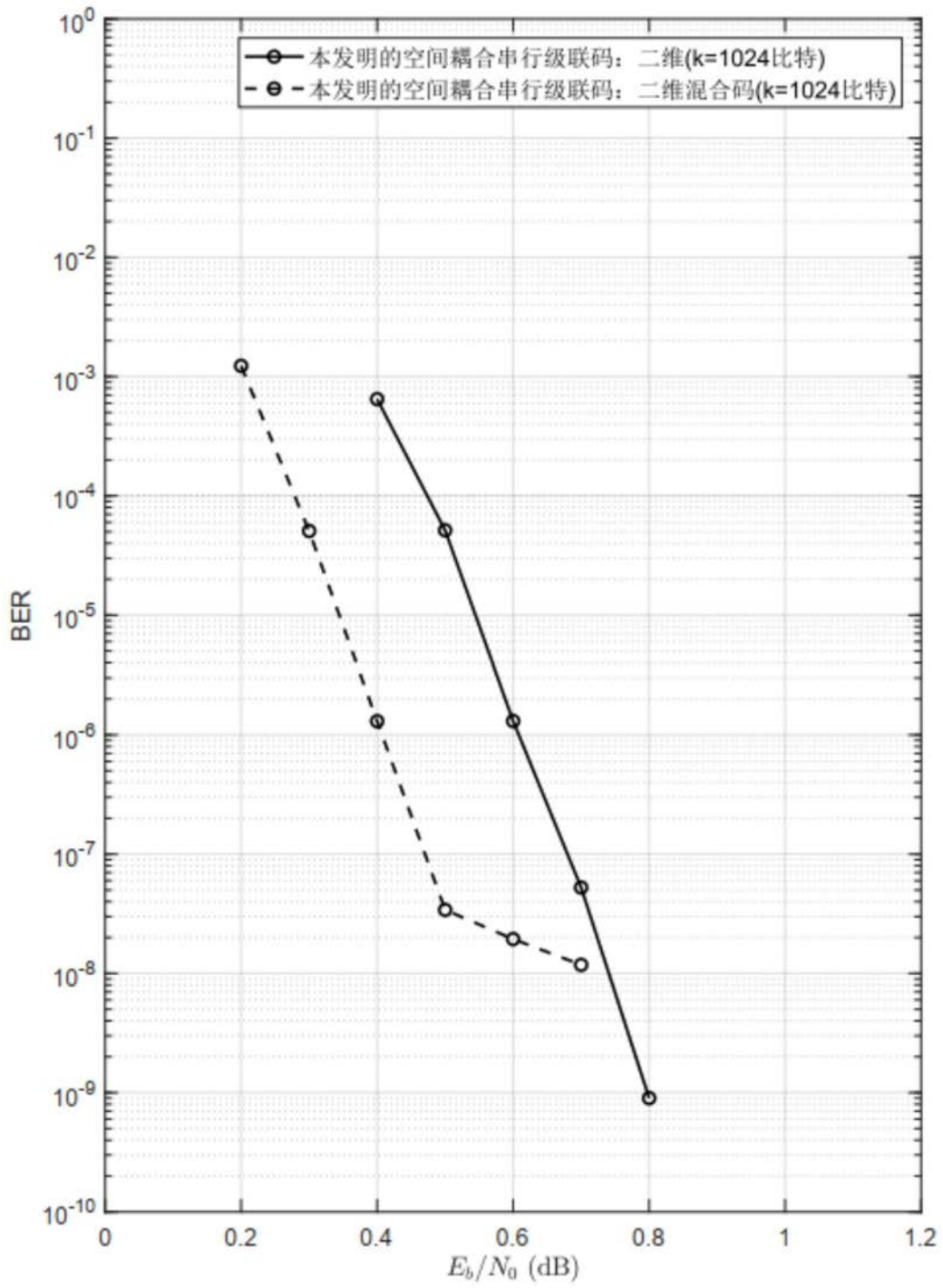


图6