DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.220814001

动态扰动辅助的串行抵消双比特翻转 Polar 译码算法*

曾俏丽[1,2],陈海强[1,2],周 泉[1,2],刘远博[1,2],孙友明[1,2],黎相成[1,2]

(1.广西大学 计算机与电子信息学院,南宁 530004;2.广西多媒体通信与网络技术重点实验室,南宁 530004)

摘 要:针对串行抵消翻转译码算法(Successive Cancellation Flip,SCF)受限于单比特翻转而性能提升有限问题,提出了一种双比特翻转译码算法(Successive Cancellation Flip with 2 Bits,SCF2)。针对 SCP 算法扰动方差初始值固定的问题,设计了一种扰动方差可随码长和码率变化的改进 SCP 算法。在此基础上,结合翻转和扰动机制,提出了一种动态扰动辅助的串行抵消双比特翻转(Dynamic Perturbation-Aided SCF2,DPA-SCF2)译码算法,并对其译码复杂度和性能进行了分析。仿真结果显示,相比于列表长度为 4 的循环冗余校验辅助串行抵消列表(Cyclic Redundancy Check Aided Successive Cancellation List,CA-SCL)译码算法,所提算法最大可获得约 0.5 dB 的性能增益。

关键词:Polar 码;串行抵消翻转(SCF)译码;串行抵消扰动(SCP)译码;动态扰动

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN911.22 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-893X(2024)01-0126-06

Decoding Algorithms for Polar Codes Based on Dynamic Perturbation-aided Successive Cancellation Flip with 2 Bits

ZENG Qiaoli[1,2],CHEN Haiqiang[1,2],ZHOU Quan[1,2],LIU Yuanbo[1,2],SUN Youming[1,2],LI Xiangcheng[1,2]

(1. School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, Nanning 530004, China)

Abstract: To solve the performance limitation problem of the Successive Cancellation Flip (SCF) with single bit decoding algorithm, a Successive Cancellation Flip with 2 Bits (SCF2) decoding algorithm is proposed for polar code. Since the initial variance of the original Successive Cancellation Perturbation (SCP) algorithm is fixed, an improved SCP algorithm is presented based on a new designed perturbation variance strategy, in which the variance can vary with the code length and code rate. Furthermore, according to the flipping and permutation mechanism, a Dynamic Perturbation-aided SCF2 (DPA-SCF2) decoding algorithm is presented and the decoding complexity and performance are analyzed. Simulation results show that, compared with the Cyclic Redundancy Check (CRC) aided Successive Cancellation List (CA-SCL) decoding algorithm, the proposed DPA-SCF2 algorithm can achieve performance gain about 0.5 dB.

Key words: polar code; successive cancellation flip (SCF) decoding; successive cancellation perturbation (SCP) decoding; dynamic perturbation

0 引 言

Polar 码是首个可在理论上被证明达到信道容量的编码技术。Arikan 给出其最基础的串行抵消(Successive Cancellation,SC)译码算法,但译码性能有限。Tal 等人[1]提出串行抵消列表(Successive Cancellation List,SCL)译码算法,其性能可逼近最大

* **收稿日期**:2022-08-14;**修回日期**:2022-09-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(62261003,61961004);广西重点研发计划(2021AB05081)
通信作者:陈海强 Email:haiqiang@gxu.edu.cn

似然(Maximum Likelihood,ML)译码。在此基础上,Niu 等人[2]将 CRC 码与 Polar 码进行级联,提出 CA-SCL 译码算法,获得了优于低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check Code,LDPC)和 Turbo 码的译码性能[3]。这些算法获得了译码性能的提升,但增加了译码空间复杂度。Afisiadis 等人[4]提出串行抵消翻转(Successive Cancellation Flip,SCF)译码算法,在译码性能提升的同时获得与 SC 译码相同的空间复杂度。Gerrar 等人[5]将加噪译码的思想运用于 SC 译码上,提出串行抵消扰动(Successive Cancellation Perturbation,SCP)译码算法。Xiao 等人[6]对 SCP 进行改进,提出了动态扰动的串行抵消(Dynamic Perturbation SC,DP-SC)译码算法。相比于原始的 SC 译码,SCF 和 SCP 虽然可以获得一定的性能增益,但译码性能仍与 CA-SCL 存在较大的差距。

本文针对 SCF 受限于单比特翻转而性能提升有限问题,提出双比特翻转的 SCF(Successive Cancellation Flip with 2 Bits,SCF2))译码算法;针对 SCP 扰动方差初始值固定的问题,通过仿真实验获取最适合的初始方差值,并对扰动噪声的方差进行改动,提出了改进算法。在此基础上,提出了一种动态扰动辅助的串行抵消双比特翻转(Dynamic Perturbation-Aided SCF2,DPA-SCF2)译码算法,并对其译码复杂度和性能进行了分析。仿真结果显示,所提出的 DPA-SCF2 算法在性能上获得了进一步的提升。

1　系统模型和符号定义

将二进制离散无记忆信道(Binary Input Discrete Memoryless Channel,BI-DMC)表示为 W:$X\to Y, X\in\{0,1\}$ 为输入信号,$Y\in\mathbb{R}$ 为输出信号。N 个 W 经信道极化得到 N 个极化信道 $W_N^{(i)}$,其中一部分极化信道的信道容量 $C(W_N^{(i)})\to 1$,用于放置信息比特;另一部分 $C(W_N^{(i)})\to 0$,用于存放冻结比特。

Polar 码表示为(N,K),N 为 Polar 码的码长,K 为信息比特数量,其码率为 $R=K/N$。在本文中,将 CRC 校验比特的数量计入信息比特的数量中,因此构成信息序列的 K 个信息比特将包含发送端发送的信息比特以及校验用的 CRC 比特。将 Polar 码中的信息序列表示为 $U=(u_0,u_1,\cdots,u_{N-1})$,其经极化编码后得到码字序列 $C=(c_0,c_1,\cdots,c_{N-1})$。码字序列经过 BPSK 调制过后得到调制序列 $X=(x_0,x_1,\cdots,x_{N-1})$,经过加性高斯白噪声(Additive Gaussian White Noise,AWGN)信道传输,在译码端得到接收序列 $Y=(y_0,y_1,\cdots,y_{N-1})$。对 Y 进行译码得到码字序列 C 的估计序列 $\hat{C}=(\hat{c}_0,\hat{c}_1,\cdots,\hat{c}_{N-1})$。

2　改进的 SCP 译码算法

在 LDPC 译码算法的研究中,随机扰动就被用于提高译码性能[7-8]。而对于 Polar 码,随机扰动最早被用于 BP 译码算法。这一策略加快了 BP 译码算法的收敛速度并有效提升了其译码性能[9-10]。

考虑到重复扰动会带来相同的译码结果,文献[6]提出了 DP-SC 译码算法。该算法采用估计序列列表 P 来调整 σ_p,以便更大程度地纠正接收值的错误。文献[5-6]提出的两种算法的初始 σ_p 均固定,但经过实验仿真发现,不同 Polar 码的最佳初始 σ_p 值是不同的。因此,本文根据仿真结果进行初始 σ_p 值设定。考虑到调整 σ_p 是为了获得方差更大的噪声,本文提出直接对方差 σ_p^2 进行改进。为了更快速简洁地获得 P 中最可靠的接收序列,本文对估计序列选择方案进行改进。

2.1　初始 σ_p 值的选择和 σ_p^2 的步进设置

本文对码长 128、码率 1/2 的 Polar 码进行测试,其中 CRC 设置为 24。本文以 $\sigma_p=0.25$ 进行左右扩展,对不同初始值下的 SCP 进行性能仿真。仿真结果表明,该 Polar 码的最优 σ_p 处在于 0.3~0.35 之间。为了后续调整方便,将其初始 σ_p 设置为 0.3。

为了在更少的扰动次数下更快地得到正确估计序列,本文不再对噪声的方差平方根 σ_p 做修正,转而直接对噪声的方差 σ_p^2 做修正,当出现相同估计序列后,使 $\sigma_p^2=\sigma_p^2+\Delta t$,$\Delta t$ 为步进长度。通过仿真试验,得到(128,64)的 Polar 码的最优 Δt 为 0.005。该结果将用于后续的改进 SCP 译码算法中。

2.2　接收估计序列选择

文献[6]提出如式(1)的可靠度判断方法:

$$L(\hat{c}_p)=-\frac{N}{2}\ln(\pi N_0)-\sum_{n=1}^{N}\frac{(y_i-c_i(\hat{c}_p))^2}{N_0} \quad (1)$$

式中:$N_0=2\sigma_0^2$,$\sigma_0^2=\dfrac{1}{2R10^{0.1R_{SN_0}}}$,$\sigma_0$ 为当前信噪比 R_{SN_0} 下的噪声方差根;y_i 为接收序列的第 i 个接收值;$c_i(\hat{c}_p)$ 为估计序列的第 i 个估计值;$\hat{c}_p$ 为扰动接收序列。

公式(1)通过 y_i 和 c_i 的差值平方计算可靠度,

但经过极化编码以后，y_i 和 c_i 并不存在一一对应的关系。考虑到估计比特的对数似然比（Log Likelihood Ratio，LLR）可以直观地体现 $\hat{c}$ 本身的可靠度，本文提出式（2）所示的序列可靠度计算方式：

$$R(\hat{c}_p)=\sum_{n=1}^{N}\left|(1-2c_i(\hat{c}_p))+R_{\mathrm{LL}_i}\right| \tag{2}$$

如上所示，公式（2）仅使用 c_i 与其对应 R_{LL} 相加做一级运算，相较于公式（1）使用了乘方运算这一三级运算，降低了运算复杂度。

2.3 改进的 SCP 译码算法描述

根据以上描述，改进的 SCP 算法可总结如下：

步骤 1 设置最大扰动次数为 $P_{\max}$，扰动次数 $P_{_\mathrm{num}}=0$，将估计列表 P 内部数据清零。对 Y 进行 SC 译码并作 CRC 校验，若能通过则输出，反之执行步骤 2。

步骤 2 生成 $N(0,\sigma_p^{\ 2})$ 的噪声 n_p，对 Y 进行加噪，使得 $Y_p=Y+n_p$，对 Y_p 执行 SC 译码得到 $\hat{C}_p$，执行步骤 3。

步骤 3 将 $\hat{C}_p$ 与 P 中候选序列进行一一比较，若未出现相同序列则执行步骤 4，反之则执行步骤 6。

步骤 4 对 $\hat{C}_p$ 进行 CRC 校验，若能通过则输出 $\hat{C}_p$，反之则执行步骤 5。

步骤 5 将 $\hat{C}_p$ 添加到列表 P 中，并计算 $R(\hat{c}_p)$ 并存储，同时使得 $P_{_\mathrm{num}}=P_{_\mathrm{num}}+1$。重复步骤 2 直至 $P_{_\mathrm{num}}=P_{\max}$。

步骤 6 执行 $\sigma_p^{\ 2}=\sigma_p^{\ 2}+\Delta t$，且使得扰动次数 $P_{_\mathrm{num}}=P_{_\mathrm{num}}+1$。重复步骤 2 直至 $P_{_\mathrm{num}}=P_{\max}$。

步骤 7 当 $P_{_\mathrm{num}}=P_{\max}$ 仍没有估计序列能通过 CRC 校验，则选择 P 中 $R(\hat{c}_p)$ 最大的序列作为译码输出序列。

2.4 改进 SCP 译码算法的性能分析

在这部分，本文使用校验位长度为 24 b 的 CRC 码与信息位长度为 40 b 的 Polar 码级联，得到级联 CRC-Polar 码，其参数为（128，64）。在 AWGN 信道中进行 SC、CA-SCL2、SCP、DP-SC 和本文所提的改进 SCP 译码算法的仿真，其误帧率（Frame Error Rate，FER）性能如图 1 所示。由图可见，随着扰动次数的增加，改进 SCP 译码的 FER 性能逐渐提升，当 $P_{\max}$ 等于 16 时，改进的 SCP 译码算法相较于 CA-SCL2 译码算法 将获得约 0.1 dB 的 FER 性能增益；当 $P_{\max}$ 达到 32 时，增益将提高至 0.25 dB，相比于 DP-SC 译码算法也有约 0.1 dB 的 FER 增益。

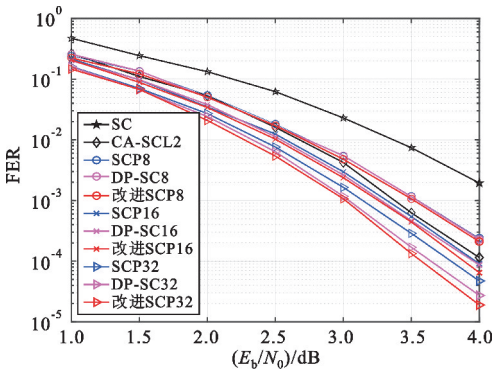


图 1 $N=128, R=1/2$ 的不同译码算法性能

Fig. 1 FER performance of different decoding algorithms ($N=128, R=1/2$)

3 双比特翻转译码算法

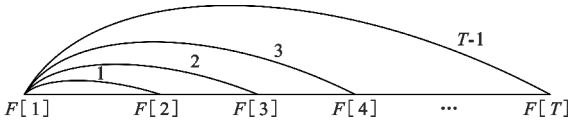
相对于上述的 SCP 算法，SCF 译码算法[4]具有接近 SC 译码算法的低复杂度，却获得了译码性能的大步提升。SCF 算法的基本思想如下：由于估计比特 $\hat{c}_i$ 的 $|R_{\mathrm{LL}}|$ 正比于 $\hat{c}_i$ 估计正确的概率，SCF 译码算法利用估计比特的 $|R_{\mathrm{LL}}|$ 对 $\hat{c}_i$ 的正确概率进行估计，选取其中不可靠的 T 个估计比特依次进行翻转修正，使得后续序列能够获得正确译码的机会。

该算法的主要实现步骤如下：当初始 SC 译码失败后，对初始 SC 译码得到的估计序列进行 $|R_{\mathrm{LL}}|$ 排序，选取其中 $|R_{\mathrm{LL}}|$ 最小的 T 个比特组成翻转集合。在后续的每一次翻转译码过程中，依次在翻转集合中选择一个比特作为翻转比特，使该比特前的估计比特保持不变，对该比特进行 0→1 或 1→0 的翻转，并在此基础上继续进行 SC 译码。重复执行上述的翻转译码过程直至译码成功，或达到最大译码次数。但对于 SC 这类串行译码算法，其译码失败的原因往往不是单个比特错误造成的。为了提高 SC 译码的纠错能力，本文提出一种双比特翻转（SCF2）译码算法，给予 SC 译码 2 次纠错机会，在不造成译码复杂度大幅度上升的同时获得较 SCF 译码算法更优异的译码性能。

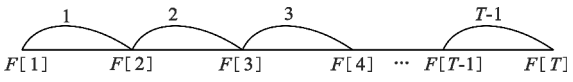
3.1 翻转比特位置的选择

为获取翻转比特位置集合 F，需对估计序列中的 K 个信息位进行 $|R_{\mathrm{LL}}|$ 排序，选取其中值最小的 T 个比特，将其下标放入 F 中。考虑到估计比特的正确性正比于 $|R_{\mathrm{LL}}|$，本文提出在翻转 2 位估计比特时，将 $F[1]$ 对应的估计比特固定为第一个翻转比

特,再将 $F[2]\sim F[T]$ 对应的 $T-1$ 比特分别作为第二个翻转比特与之结合,构成双比特翻转集。为了验证 $F[1]$ 对双比特翻转译码的性能影响,本文对图 2 所示的两种翻转比特选取方式进行了测试。



(a)翻转比特下标为 $F[1]+F[i]$



(b)翻转比特下标为 $F[i]+F[i+1]$

图 2　翻转比特下标示意图

Fig. 2 Flip bit index illustration

图 2(a)所示方案为第一位翻转比特下标固定为 $F[1]$,第二位翻转比特下标依次为 $F[i]$,$i\in 2,3,\cdots,T$。图 2(b)所示方案为第一位翻转比特下标依次为 $F[i]$,$i\in 1,2,\cdots,T-1$,第二位翻转比特下标为 $F[i+1]$。测试结果表明,图 2(a)所示翻转比特选取方案较图 2(b)方案可获得更大的性能增益。

3.2　双比特翻转译码算法描述

双比特翻转译码算法流程如下:

步骤 1　设置最大翻转次数为 $T_{\max}$,设置翻转次数 $T_{_num}=0$。对 Y 进行 SC 译码并做 CRC 校验,若能通过则输出 $\hat{C}$,反之则执行步骤 2。

步骤 2　对 $\hat{C}$ 中信息位对应的 $|R_{LL}|$ 进行排序,将值最小的 $T_{\max}$ 个比特的下标放入翻转集 F,设置 $T_{_num}=1$,执行步骤 3。

步骤 3　选取 $F[T_{_num}]$ 对应比特为翻转比特进行 SC 重译码并做 CRC 校验,校验通过则输出,否则令 $T_{_num}=T_{_num}+1$,并判断是否满足 $T_{_num}\leqslant T_{\max}$:若满足,则重新执行步骤 3;若不满足,则设置 $T_{_num}=2$,执行步骤 4。

步骤 4　选取 $F[1]$ 和 $F[T_{_num}]$ 对应比特为翻转比特进行重译码,并对重译码结果进行 CRC 校验,通过则输出,反之则令 $T_{_num}=T_{_num}+1$,判断是否满足 $T_{_num}\leqslant T_{\max}$,满足则返回执行步骤 4,反之则退出译码程序。

3.3　双比特翻转译码算法的性能分析

本文使用校验位长度为 24 b,参数为(128,64)的级联 CRC-Polar 码在 AWGN 信道下进行翻转译码算法的性能测试。分别使用单比特翻转译码算法(SCF)和双比特翻转译码算法(SCF2)进行译码操作,其结果如图 3 所示,图中译码算法名称中的(x b)表示该算法的翻转集合包含了 x 个翻转比特。由图可见,当翻转集合达到 16 时,所提算法可获得近似于 CA-SCL4 的译码性能,而 SCF 在此情况下与 CA-SCL4 还存在 0.25~0.35 dB 的性能差异。

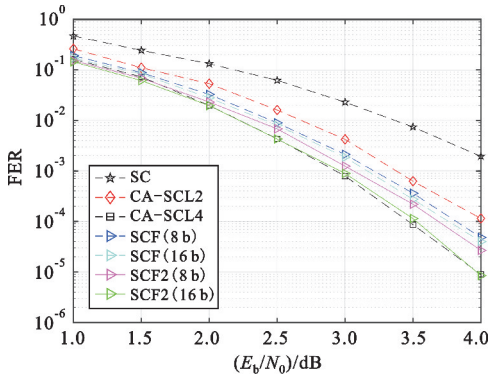


图 3　$N=128$,$R=1/2$ 的 SCF2 和 SCF 译码性能

Fig. 3 FER performance of SCF2 and SCF ($N=128$,$R=1/2$)

4　动态扰动辅助的串行抵消双比特翻转译码算法

4.1　动态扰动辅助的串行抵消双比特翻转译码算法描述

虽然两种改进算法可以带来译码性能的提升,但是改进的 SCP 译码算法无法针对某个指定比特进行纠正;当译码错误多于 2 b 时,SCF2 则无法纠正。基于此,本文提出一种动态扰动辅助的串行抵消 2 比特翻转(DPA-SCF2)译码算法,在进行随机扰动后仍无法正确译码时,转而对其执行 SCF2 译码。算法描述如下:

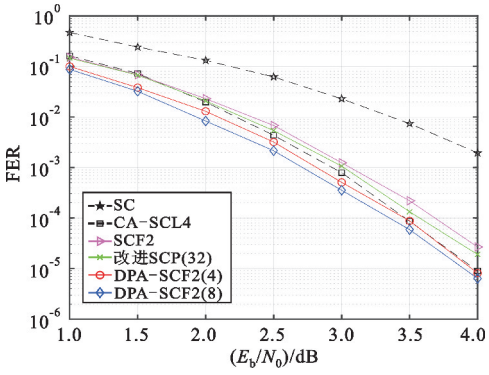
步骤 1　设置最大扰动次数为 $P_{\max}$,扰动次数为 $P_{_num}=0$,最大翻转次数为 $T_{\max}$,翻转次数 $T_{_num}=0$。对 Y 进行 SC 译码并做 CRC 校验,若能通过则输出 $\hat{C}$;反之令 $T_{_num}=1$,执行步骤 2。

步骤 2　对 $\hat{C}$ 执行 SCF2 译码得到多组 $\hat{C}'$,若存在 $\hat{C}'$能通过 CRC 校验,则输出 $\hat{C}'$;若整个 SCF2 译码结束后,仍无 $\hat{C}'$能通过 CRC 校验,则执行步骤 3。

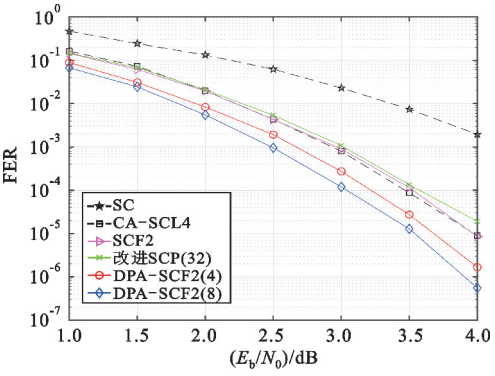
步骤 3　对 Y 按改进的 SCP 译码算法进行扰动译码得 $\hat{C}$,对 $\hat{C}$ 进行 CRC 校验,若能通过校验则输出 $\hat{C}$,若无法通过校验则令 $P_{_num}=P_{_num}+1$,若 $P_{_num}<P_{\max}$,则令 $T_{_num}=1$,并返回执行步骤 3;若 $P_{_num}\geqslant P_{\max}$,则译码失败。

4.2 动态扰动辅助的串行抵消双比特翻转译码算法性能分析

仿真采用 2PSK 调制的(128,64),(128,96)以及(256,128)3 组 Polar 码,其 CRC 校验比特都为 24 b。仿真对比的算法包括 DPA-SCF2 译码算法、SC 译码算法、CA-SCL 译码算法以及 SCF、SCP 的改进译码算法,仿真结果如图 4~6 所示。图中扰动译码算法名称后的(x)表示算法执行 x 次扰动运算,图 5 和图 6 的 $T_{_max}=16$。



(a)翻转算法最大翻转次数 $T_{_max}=8$



(b)翻转算法最大翻转次数 $T_{_max}=16$

图 4 (128,64) Polar 码 FER 性能

Fig. 4 FER performance of Polar code (128,64)

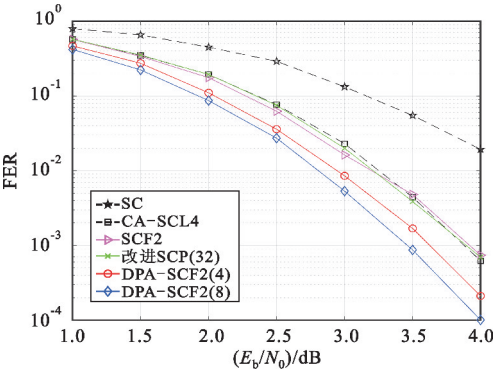


图 5 (128,96) Polar 码 FER 性能

Fig. 5 FER performance of Polar code (128,96)

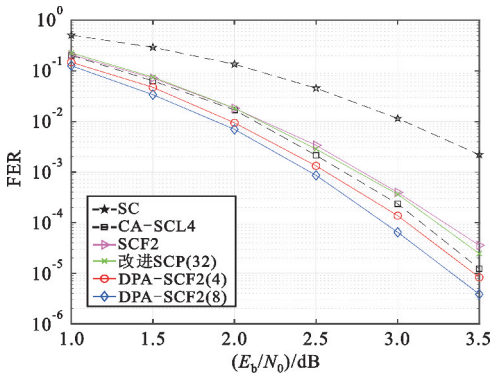


图 6 (256,128) Polar 码 FER 性能

Fig. 6 FER performance of Polar code (256,128)

由图 4 可以看出,随着 $T_{_max}$ 的增加,原本 FER 性能落后于改进 SCP 的 SCF2 译码算法将超越改进 SCP 而接近 CA-SCL4。受 SCF2 在 $T_{_max}$ 增加时所带来的影响,DPA-SCF2 在 $T_{_max}=16$ 时获得比 $T_{_max}=8$ 高出约 0.35 dB 的 FER 增益。当最大扰动次数 $P_{_max}$ 达到 8 时,DPA-SCF2 较 CA-SCL4 可获得约 0.5 dB 的 FER 性能提升。从图 5 可以看出,当 $T_{_max}=16$,$P_{_max}=8$ 时,DPA-SCF2 较 CA-SCL4 可获得约 0.45 dB 的 FER 性能提升。从图 6 可以看出,DPA-SCF2 较 CA-SCL4 最多可以获得约 0.25 dB 的性能增益。

5 复杂度分析

首先,对 SCF2 译码算法和改进的 SCP 译码算法的复杂度进行分析。对 SCF2 而言,其复杂度可计算为 T_{max} 次单比特翻转译码的复杂度 $O(T_{max}\cdot N\text{lb}\ N)$ 和 $(T_{max}-1)$ 次双比特翻转译码的复杂度 $O((T_{max}-1)\cdot N\text{lb}\ N)$ 之和,即 $O((2T_{max}-1)\cdot N\text{lb}\ N)$,而 T_{max} 为最大翻转次数,因此 $O((2T_{max}-1)\cdot N\text{lb}\ N)$ 也是一次 SCF2 译码所产生的最大译码复杂度。对改进的 SCP 译码算法而言,其复杂度相当于 P_{max} 次 SC 译码,即 $O(P_{max}\cdot N\text{lb}\ N)$。在此基础上,可以轻松地获得动态扰动辅助的串行抵消双比特翻转译码算法的译码复杂度。

对 DPA-SCF2 而言,其第 2 步执行的 SC 译码,译码复杂度为 $O(N\text{lb}\ N)$。而第 3 步和第 4 步均在当前帧的 SC 译码失败后才会被执行,假设每帧 SC 译码失败的概率为 P_e,则第 3 步的平均译码复杂度可计算为 $O(P_e\cdot(2T_{max}-1)\cdot N\text{lb}\ N)$,第 4 步的可计算为 $O(P_e\cdot P_{max}\cdot N\text{lb}\ N)$。由前面的算法描述可以看到,当改进 SCP 译码失败后,SCF2 会被继续执行。因此,第 3、4 步的译码复杂度可共同计算为 $O(P_e\cdot(P_{max}+1)\cdot(2T_{max}-1)\cdot N\text{lb}\ N)$。因此,总

体上 DPA-SCF2 的平均译码复杂度为 $O(P_e \cdot (P_{max}+1) \cdot (2T_{max}-1) \cdot N\text{lb}\ N+N\text{lb}\ N)$。需要指出的是,式中的 P_e 反比于信道中的信噪比[11]。因此,当系统的信噪比增大到一定程度时,DPA-SCF2 的译码复杂度接近 SC 译码的 $O(N\text{lb}\ N)$。

为更直观地显示所提算法的复杂度,本文对 SC 译码算法、CA-SCL4 译码算法、翻转比特集合为 8 的 SCF2 译码算法、加噪次数为 32 的改进 SCP 译码算法,以及翻转集合为 8、加噪次数分别为 4 和 8 的 DPA-SCF2 译码算法这 6 组算法进行平均 SC 译码次数仿真,结果如图 7 所示。

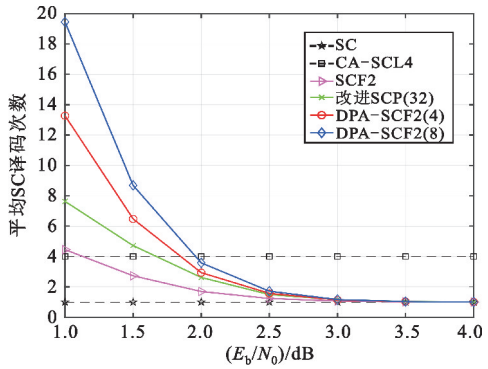


图 7　各算法平均 SC 译码次数对比

Fig. 7 Average SC decoding number for each algorithm

由图 7 可见,当信噪比达到 2.0 dB 时,所提出的改进 SCP 译码算法、双比特翻转译码算法,以及动态扰动辅助的串行抵消双比特翻转译码算法均获得了低于 CA-SCL4 的平均 SC 译码次数;当信噪比增加时,上述算法的平均 SC 译码次数均趋向于 1,可获得接近 SC 译码算法的译码复杂度。

6　结　论

本文在 SCP 和 SCF 两种 Polar 码后处理译码算法的基础上,提出了改进的 SCP 译码算法和双比特翻转译码算法(SCF2)。仿真实验显示,两种改进的算法都能获得一定的性能增益。结合本文提出的双比特翻转和可变方差扰动机制,进一步提出了一种动态扰动辅助的串行抵消双比特翻转(DPA-SCF2)译码算法。在复杂度方面,所提算法在大信噪比区域,其译码复杂度接近 SC 译码;在性能方面,相比于列表长度为 4 的循环冗余校验辅助串行抵消列表(CA-SCL)译码算法,最大可获得约 0.5 dB 的增益。需要指出的是,所提出的译码算法适用于不同的码长和码率,其译码性能随着最大翻转次数和最大扰动次数的增加而有不同程度的提升。

参考文献:

[1] TAL I, VARDY A. List decoding of polar codes[C]// Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. St. Petersburg: IEEE, 2011:1-5.

[2] NIU K, CHEN K. CRC-aided decoding of polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10):1668-1671.

[3] 陈国泰,张朝阳,张亮,等. 系统极化码的置信传播译码性能分析[J]. 电讯技术,2016,56(8):839-843.

[4] AFISIADIS O, BALATSOUKAS-STIMMING A, BURG A. A low-complexity improved successive cancellation decoder for polar codes[C]//Proceedings of 2014 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove: IEEE, 2014:2116-2120.

[5] GERRAR N, ZHAO S, Kong L. A CRC-aided perturbed decoding of polar codes[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Chongqing: IEEE, 2018:479-487.

[6] XIAO D, GU Z. Dynamic perturbation decoding of polar-CRC cascaded code[C]//Proceedings of 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing. Limassol: IEEE, 2020:42-45.

[7] LIN C, XIAO D, et al. A perturbation method for decoding of LDPC aided by CRC[C]//Proceedings of 2006 IEEE Vehicular Technology Conference. Montreal: IEEE, 2006:1-4.

[8] ASATANI J, KONDO Y, KATAYAMA K, et al. Mitigating clipping effects on error floors under belief propagation decoding of polar codes[C]//Proceedings of 2017 International Symposium on Wireless Communication Systems. Bologna: IEEE, 2017:384-389.

[9] KNOLL C, RATH M, TSCHIATSCHEK S, et al. Message scheduling methods for belief propagation[C]// Proceedings of Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Cham: Springer, 2015:295-310.

[10] 王华华,石丹,赵昊明. 一种低迭代次数的极化码置信传播译码算法[J]. 电讯技术,2021,61(1):95-100.

[11] 李桂萍,慕建君,焦晓鹏. 极化码串行抵消多比特翻转译码算法[J]. 西安电子科技大学学报,2017,44(2):63-68.

作者简介:

曾俏丽　女,1997 年生于广西桂林,硕士研究生,主要研究方向为信道编码理论。

陈海强　男,1976 年生于广西苍梧,2011 年于中山大学获博士学位,现为广西大学教授、博士生导师,主要研究方向为现代编码理论、协作通信。

周　泉　男,1995 年生于安徽铜陵,硕士研究生,主要研究方向为信道编码理论。

刘远博　男,1999 年生于江苏淮安,硕士研究生,主要研究方向为信道编码理论。

孙友明　男,1975 年生于湖南邵阳,2017 年于华南理工大学获博士学位,现为广西大学硕士生导师,主要研究方向为信道编码理论。

黎相成　男,1979 年生于广西桂林,2017 年于华南理工大学获博士学位,现为广西大学硕士生导师,主要研究方向为信道编码理论。