فصلنامه سیستم‌های پردازشی و ارتباطی چندرسانه‌ای هوشمند
Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS)

Summer 2021, 2 (2), 35-42
DOR: 20.1001.1.27832570.1400.2.1.2.3

Received: 21 Mar. 2021
Accepted: 25 May 2021

A Syndrome Based Decoding of Linear Codes Using Deep Learning Method

Ali Moradi[1], Mohammad Tahghighi Sharabyan[2*]

1. MSc Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran. moradi.ali2@gmail.com
2. Assistant Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran. *(Corresponding Author)* mntahghighi@gmail.com

Abstract

Introduction: The development of digital communication with high reliability has been made possible in the first place by designing codes that allow the receiver to recover the received message efficiently and correctly in noisy channel conditions. Coding theory has progressed tremendously over the past seven decades, and we now see near-optimal codes for relatively long codes. The private codes have reached the Shannon capacity limit using the belief propagation algorithm. Although this shows acceptable performance for relatively long codes, for medium and short codes, the belief propagation algorithm performs poorly. Hence, we are still facing challenges with short codes, which are of paramount importance currently in digital communication thanks to the spread of the Internet of Things. With the emergence of deep learning models that have obtained good results in various fields such as object recognition and speech recognition, the use of neural networks in the field of coding has been revived. Among these, convolutional networks, which play an essential role in the success of deep learning models, have been favored by researchers in the field of coding.

Method: To increase the coding accuracy of short-length LDPC (Density-Low Parity Check Codes) based on the sign equation and reduce its computational complexity, the combined architecture of a one-dimensional convolutional network, and recurrent neural network was used. To determine the solution of the sign equation, the error pattern detection method was utilized. For this purpose, first, a one-dimensional convolutional network with three main layers was used, each layer containing sublayers of convolution and integration. Then, the output of the convolutional network was applied to the return network of the GRU. The GRU return network with three times the length of the codeword was used with the ReLU activation function.

Findings: We consider Maximizer Posterior Probability or MAP as the comparison metric. The comparison between the combined model of the one-dimensional convolutional network and the return network with the pure return network model shows that for the 64-length LDPC code in reducing the bit error rate, the combined model of the convolutional network and the GRU network performs better. The bit error rate in different noise conditions is 0.5 to 0.8 dB less than the rate of maximum likelihood coder.

Discussion and Conclusion:

In the last few years, in the encoding method of linear codes based on the syndrome equation, methods based on deep learning are used to solve the equation of the symbol and also to detect the error pattern. We showed that convolutional networks have the potential to improve the performance of such networks.

Keywords: Text Attacks, Adversarial Examples, Loss function gradient, Sentiment Analysis, Natural Language Processing.

فصلنامه سیستم‌های پردازشی و ارتباطی چندرسانه‌ای هوشمند
Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS)
انجمن علمی تجارت الکترونیکی ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵

سال دوم، تابستان ۱۴۰۰
شمارهٔ دوم، صص: ۳۵-۴۲

کدبرداری از کدهای خطی بر مبنای معادله سندرم با استفاده از یادگیری عمیق

علی مرادی[۱]، محمد تحقیقی شربیان[۲*]

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجان، زنجان، ایران: moradi.ali2@gmail.com
۲. استادیار، گروه کامپیوتر، دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران. mntahghighi@gmail.com

چکیده: استفاده از کدهای طول کوتاه در ارتباطات دیجیتال به خاطر فراگیرشدن پدیده اینترنت اشیاء از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی مدل‌های یادگیری عمیق در زمینه‌های مختلفی مانند تشخیص اشیاء و تشخیص گفتار نتایج لبه علمی را بدست آورده‌اند. از این میان شبکه‌های کانولوشنی نقش اساسی در موفقیت مدلهای یادگیری عمیق دارند. برای افزایش دقت کدبرداری کدهای طول کوتاه LDPC (Low Density Parity Check Codes) بر مبنای معادله علامت از شبکه کانولوشنی استفاده‌گردید. برای تعیین جواب معادله علامت از روش تشخیص الگوی خطا بهره‌گرفته شد. به این منظور، نخست شبکه کانولوشنی یک بعدی با سه لایه اصلی که هر لایه شامل زیرلایه‌های کانولوشن و ادغام می‌باشند، استفاده شد؛ و سپس خروجی شبکه کانولوشنی بر شبکه برگشتی GRU اعمال گردید. شبکه برگشتی GRU با تعداد سه برابر طول کدواژه با تابع فعالسازی ReLU مورد استفاده واقع‌گردید. تعیین مقدار ابرپارامترهای شبکه عصبی مورد استفاده ابتدا به‌صورت مقادیر پیش فرض کتابخانه تنسورفلو نسخه ۲ مقداردهی شد و در برخی موارد برای افزایش دقت تغییرداده‌شدند. مقایسه بین مدل ترکیبی حاصل از شبکه کانولوشنی یک بعدی و شبکه برگشتی با مدل شبکه برگشتی نشان‌می‌دهد که برای کد LDPC با طول ۶۴ در کاهش نرخ خطای بیت، مدل ترکیبی حاصل از شبکه کانولوشنی و شبکه GRU بهتر عمل‌می‌کند. نرخ خطای بیت در شرایط نویزی مختلف به میزان ۰٫۵ تا ۰٫۸ دسیبل کمتر از میزان کدبردار بیشینه‌گر احتمال می‌باشد. همچنین ما نشان‌دادیم که شبکه‌های کانولوشنی در کنار شبکه‌های برگشتی پتانسیل این امر را دارند که بتوانند عملکرد چنین شبکه‌هایی را بهبود ببخشند.

واژه‌های کلیدی: کدینگ، یادگیری عمیق، شبکه‌های کانولوشنی، کدهای LDPC

۱. مقدمه

گسترش سریع اینترنت بسیاری از مسائل امنیت شبکه همچون نشت اطلاعات شخصی، حملات هکرها و ویروس‌های تهدیدآمیز (بدون امضا) را به همراه داشته‌است و موضوع امنیت سایبری مسئله مهم قرن بیست و یکم شده‌است. مسائلی همچون طغیان جنگ سایبری، نیازهای امنیت شبکه را بیش از پیش تهییج کرده‌است و ارزیابی وضعیت امنیت سایبری به منظور رفع کارآمد این قبیل مشکلات امنیتی بسیار ضروری است.

اتحادیه بین‌المللی مخابرات، اولین نسخه از راهنمای راهبرد امنیت سایبر را در سال ۲۰۰۸ و نسخه اصلاحی این شاخص را برای اندازه‌گیری کمی سطح پیشرفت امنیت سایبری در کشورها طراحی کرده‌است. هدف نهایی اتحادیه بین‌المللی مخابرات از تهیه این شاخص تقویت فرهنگ جهانی امنیت سایبری است. این شاخص شامل پنج مؤلفه قوانین و مقررات، اقدامات فنی، ساختارهای اجرایی و سازمانی، ظرفیت‌سازی، همکاری ملی و بین‌المللی می‌باشد.

کدینگ ارتباط قابل‌اطمینانی را بر روی کانال‌های نویزی و نامطمئن میسرمی‌سازد. به این صورت که با کدگذاری پیام به‌وسیله بیت‌هایی که به آن می‌افزاید، خطاهای اعمال‌شده توسط نویز کانال را می‌توان تصحیح‌کرد و یا نرخ خطا را به حد قابل‌قبولی رساند. کدهای مدرن به نرخ خطای بسیار پایین برای کدهای با طول زیاد دست‌یافته‌اند ولی کدهای با طول زیاد در کاربردهایی که نیاز به تأخیرکم دارند قابل‌قبول عمل نمی‌کنند. شیوع استفاده از ابزارهای ارتباطی درقالب اینترنت اشیاء نیازمند طراحی کدهایی با تأخیر کم می‌باشد و این به معنی نیاز به طراحی کدهایی با طول کوتاه می‌باشد که همچنان به‌عنوان یک مسئله حل‌نشده در این حوزه باقی مانده‌است.

استفاده از کدینگ در سیستم‌های ارتباطی و انتقال اطلاعات به قدری حائز اهمیت می‌باشد که در هر گوشی تلفن همراه نسل ۲ تا نسل ۵ یکی از الگوریتم‌های کدینگ مورد استفاده قرار گرفته‌است. در حقیقت کدینگ زیربنای ارتباط سالم و با کیفیت را فراهم‌می‌کند. از طرفی، موفقیت‌هایی که مدل‌های یادگیری عمیق در حوزه‌های پردازش تصویر و گفتار به‌دست‌آورده‌اند حاکی از قدرت این گونه الگوریتم‌ها در تشخیص الگوها می‌باشد و از این روی در کدینگ نیز برای کشف الگوهای خطایی که بر روی کد واژه‌ها حین عبور از کانال بر آن‌ها اعمال‌می‌شود، اهمیت کاربرد این الگوریتم‌ها را برای بهبود کیفیت کدینگ افزایش داده‌است. توسعه ارتباط دیجیتالِ با قابلیت اطمینان بالا، در وهله اول به وسیله طراحی کدهایی میسر شده‌است که به گیرنده این امکان را می‌دهد تا بتواند پیام ارسالی را به‌صورت کارا و صحیح در شرایط کانال نویزی بازیابی کند. با وجود نویز به‌عنوان ویژگی و مشخصه ذاتی کانال‌های ارتباطی، این علم کدینگ است که از بدو ظهور سیستم‌های ارتباطی دیجیتال توانسته است انتقال صحیح و بدون خطای اطلاعات را

جدول ۱ : خلاصه پیشینه پژوهش

در طیف گسترده‌ای از سیستم‌های ارتباطی فراهم کند. رشته نظریه کدینگ در طول هفت دهه گذشته پیشرفت شایانی را تجربه-کرده‌است و ما اکنون شاهد کدهای نزدیک به کد بهینه برای کدهای با طول نسبتاً زیاد هستیم [۹].

در سال ۱۹۴۸ شانون در مقاله معروف خود [۱] چارچوب ریاضی و نظری سلسله پژوهش‌هایی را پی‌ریزی‌کرد که اکنون با عنوان نظریه کدینگ یا کدهای تصحیح‌کننده خطا[1] شناخته‌می‌شود. جان کلام نظریه شانون این بود که اگر نرخ انتقال سیگنال در یک سیستم از ظرفیت کانال کمتر باشد، ارتباط بدون خطا با انتخاب روش کدگذاری و کدبرداری مناسب قابل دستیابی خواهد بود؛ و مهمتر اینکه شانون اثبات می‌کند هر کدی هرچند بسیار بزرگ می‌تواند به این ظرفیت برسد و البته از جزئیات و نحوه ساخت این کدها و همچنین از نحوه کدگذاری و کدبرداری آن‌ها سخنی به میان نیاورده است. نکته جالب در کار شانون، علاوه بر اثبات وجود کدهایی با نرخ انتقال نزدیک به ظرفیت کانال، این است که این کدها را می‌توان‌ساخت ولی هزینه عملیات کدگذاری و کدبرداری از این کدها (پیچیدگی محاسباتی) بسیار بالاست. با این وجود مقاله ایشان سرآغاز تلاش‌های محققان برای ساخت کدهایی با پیچیدگی محاسباتی کم شده‌است. تلاش برای طراحی این نوع کدها و روش‌های کدبرداری کارا توسط همینگ و سایر دانشمندان در دهه ۱۹۴۰ میلادی آغازشد و تاکنون توجه بسیاری از پژوهشگران را معطوف خود ساخته‌است. از جمله کدهای خطی معروف که توانسته به حد شانون نزدیک‌شود کدهای خلوت (LDPC[2]) هستند که اولین بار توسط گلگر در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی ارائه‌شدند [۲] و به مدت ۲۰ سال نادیده گرفته‌شدند.

در سال ۱۹۸۱ دانشمندی به نام تنر[3] تفسیر گرافیکی از کدهای خلوت ارائه‌داد ولی بازهم این کدها مورد اقبال قرارنگرفتند. در دهه ۱۹۹۰ گروهی از پژوهشگران، کدهای خلوت را با تعمیم گسترده‌تری دوباره کشف‌کردند؛ به‌طوری‌که کدهای خلوت با طول زیاد با الگوریتم کدگشایی انتشار باور تکراری تا رسیدن به حد شانون فقط کسری از دسی‌بل فاصله‌دارند [۳]. تمایل برای به‌کارگیری شبکه‌های عصبی در کد برداری از دوران دهه ۸۰ میلادی وجود داشته‌است. این کارهای اولیه به دلیل محدودیت‌های شبکه‌های عصبی موفقیت چندانی نداشتند. از طرفی روش‌های کدبرداری مبتنی بر تکرار مانند الگوریتم انتشار باور بر روی کدهای با طول بیش از ۱۲۸ نرخ خطای بیت پایینی را کسب‌کرده و به حد شانون رسیده‌اند و برای کدهای با طول کم کارایی مناسبی ندارند [۴]. کدهای با طول کم به دلیل کاربردشان درزمینهٔ اینترنت اشیاء بسیار موردتقاضا و مهم می‌باشند؛ بنابراین یکی از چالش‌های پیش روی کدینگ، کاهش نرخ خطای بیت برای کدهای با طول کم است.

۲. روش تحقیق

دو مقاله [۴] و [۵] با استفاده از خاصیت مستقل‌بودن کارایی الگوریتم انتشار باور از کدواژه و نیز استفاده از ساختار گراف تنر

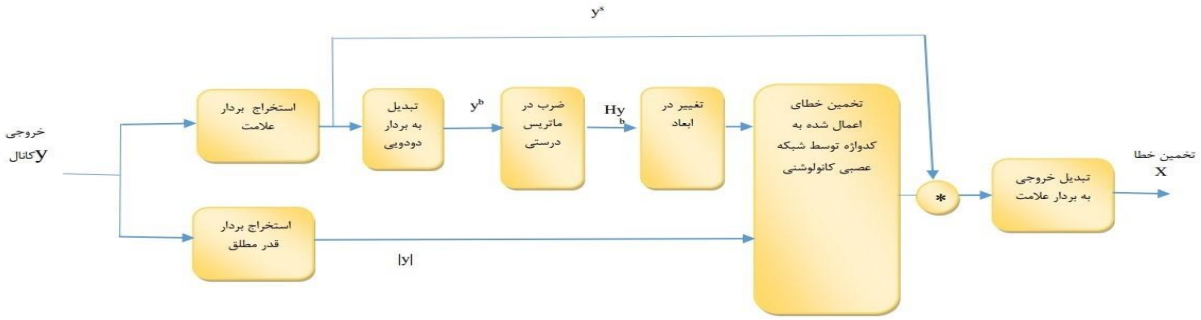
نام مرجع	کارهای قبل از یادگیری عمیق	Nachmani 2017	Lugosch 2017	Gruber 2017	Bennaten 2018
نقطه قوت	استفاده از شبکه عصبی	حل مشکل بیش برازش – استفاده از تنها یک کدواژه	استفاده از جمع کمینه	برای گذرواژه نسبتاً کوتاه	معادله علامت
نقطه ضعف	محدودیت قدرت پردازش و دقت پایین	محدودیت معماری مدل	محدودیت معماری مدل	تعداد پارامتر زیاد	تعداد پارامتر زیاد
محدودیت معماری شبکه عصبی	دارد	دارد	دارد	ندارد	ندارد
غلبه بر بیش برازش	ندارد	دارد	دارد	دارد	دارد
شبکه برگشتی	استفاده نشده	استفاده شده	استفاده شده	استفاده نشده	استفاده شده
شبکه کانولوشنی	استفاده نشده	استفاده نشده	استفاده نشده	استفاده نشده	استفاده نشده
پیش‌پردازش کدواژه	دارد	دارد	دارد	ندارد	دارد

مورداستفاده در الگوریتم انتشار باور به‌عنوان ساختار معماری شبکه عصبی، الگوریتمی پیشنهادداده‌اند که مشکل بیش برازش را ندارد. مشکل کار ایشان این است که معماری شبکه عصبی استفاده‌شده محدود به چهارچوب ساختار گراف تنر شده‌است و نمی‌توان از مزایای معماری‌های مختلف شبکه‌های عمیق بهره‌برد.

رویکرد دیگر برای مواجهه با مشکل بیش برازش استفاده از روش کدبرداری بر مبنای معادله علامت[۴] است. در این روش با جدا کردن نویز از کدواژه، نیاز به استفاده از کدواژه های مختلف برای آموزش شبکه مرتفع می‌شود؛ و به این صورت می‌توان شبکه عصبی را با تنها یک کدواژه آموزش داد تا مسئله بیش برازش حل شود. مکانیسم کدبرداری با استفاده از معادله علامت ایجاب‌می‌کند که بخشی از سیستم کدینگ وظیفه تشخیص نویز اعمال‌شده را داشته‌باشد. استفاده از شبکه‌های عصبی برای انجام وظیفه تشخیص الگوی خطا زمینه را برای استفاده از پتانسیل قوی شبکه‌های عصبی درزمینهٔ کدبرداری فراهم‌می‌کند. انتخاب معماری شبکه عصبی که بتواند به‌صورت کارا و مؤثری این وظیفه را انجام‌دهد مسئله موردنظر در این پژوهش است. یکی از چالش‌های مهم برای استفاده از شبکه‌های عصبی کاملاً متصل و برگشتی تعداد زیادی پارامتر شبکه عصبی است. شبکه‌های کانولوشنی به دلیل داشتن مزیت اشتراک پارامترها و اتصال خلوت، راهکار بسیار مناسبی برای این مشکل است که در زمینه‌های تشخیص اشیاء، طبقه‌بندی تصاویر و تشخیص گفتار و ترجمه ماشینی موفقیت‌هایی در حد لبه علمی به دست آورده‌است. در جدول شماره ۱ پیشینه پژوهش به‌صورت خلاصه و طبقه‌بندی شده آورده شده‌است.

ما در این پژوهش بر آنیم که با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنی نرخ خطای بیت در کدبرداری کدهای خطی را کاهش‌دهیم. مسئله پژوهش حاضر کاهش هزینه محاسباتی و افزایش دقت کدبرداری بر مبنای معادله سندرم است که ما این کار را با استفاده از شبکه‌های کانولوشنی انجام می‌دهیم. مطابق شکل۱ پس از دریافت خروجی کانال نویزی مراحل زیر بر روی آن انجام‌می‌شود. جهت کدبرداری از کدواژه عبور داده‌شده از کانال نویزی با نویز گوسی، یعنی y، به این صورت عمل می‌شود که با اعمال عملگر علامت که برای هر سیگنال دریافت‌شده علامت آن را استخراج می‌کند، برداری به طول n شامل ۱ و -۱ خواهیم داشت. سپس عملگر باینری بر روی بردار اعمال‌می‌شود که در آن ۱ به ۰ و -۱ به ۱ تبدیل می‌شود. سپس حاصل در ماتریس درستی ضرب شده که همان معادله علامت خوانده‌می‌شود و با ایجاد تغییر در ابعاد آن به همراه قدر مطلق خروجی کانال به ورودی شبکه عصبی کانولوشنی اعمال‌می‌شود. برای بهترین تخمین از الگوی خطا، همین دو آیتم قدر مطلق خروجی کانال و معادله علامت کافی است. خروجی شبکه نیز پس از ضرب‌شدن در بردار علامت، برآورد الگوی خطا را در خود دارد؛ که با جمع این الگوی خطا با کدواژه دریافت‌شده، بردار حاوی پیام اصلی و بدون خطا را خواهیم‌داشت.

همان‌گونه که در بخش قبل بیان‌گردید، مسئله اصلی در این پژوهش ساخت کدهایی با طول کوتاه و نزدیک به ظرفیت کانال با پیچیدگی محاسباتی کم است. کارهای قبلی صورت گرفته برای حل این مسئله شامل دو رویکرد کلی با استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق می‌شوند. رویکرد نخست با استفاده از ساختار گراف تنر و شبکه عصبی منطبق با آن توانسته به مقدار ۹/۰ دسی‌بل دقت کدبرداری از کدهای خطی را بهبودبخشد و در کاری دیگر با همین رویکرد با پیوند پارامترهای شبکه عصبی به یکدیگر، از مزیت شبکه عصبی برگشتی استفاده‌شده و تعداد پارامترها کاهش داده‌شده و درنتیجه از هزینه محاسباتی کاسته شده-است.



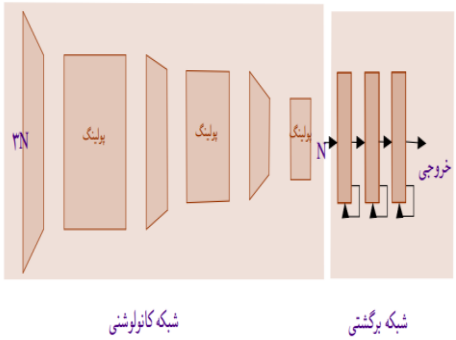
شکل ۱: دیاگرام منطقی ارتباط بین متغییرها

رویکرد دوم مبتنی بر استفاده از معادله سندم است. معادله سندرم در حقیقت برای تشخیص این که در دریافت کدواژه خطایی رخداده است یا نه به‌کارمی‌رود. این معادله در رابطه (۱/۱) آورده شده‌است که در آن r بردار کدواژه و H ماتریس توازن هستند و وقتی r معتبر است که این معادله برابر با صفر قرارداده شود. که منجر به یک دستگاه با n-k معادله با n مجهول می‌شود. اینکه بتوان الگوی خطایی که رخداده است را نیز تشخیص‌داد کاری است که با حل تعداد n-k معادله با n مجهول که در آن n طول کدواژه و k نیز تعداد بیت‌های اضافه‌شده به‌عنوان بیت‌های توازن به پیام است، انجام‌می‌دهد. به تعداد K^2 جواب برای معادله‌های سندرم وجوددارد که تنها یکی صحیح است؛ بنابراین این‌یک مسئله از مرتبه نمایی است. برای کمینه‌کردن احتمال خطای کدگشایی باید محتمل‌ترین الگوی خطایی که در معادلات سندرم صدق‌می‌کند را به‌عنوان الگوی خطا انتخاب‌کنیم. به‌یادداریم که کدگشای درست‌نمایی بیشینه نیز کد واژه‌ای را انتخاب‌می‌کند که فاصله همینگ الگوی خطا را کمینه‌کند.

$$S = (S_0, S_1, \ldots, S_{n-k-1}) = rH^T = 0 \qquad (1.0)$$

با استفاده از شبکه عصبی عمیق می‌توان این کدگشایی را انجام‌داد. آنچه انجام‌شده است این است که شبکه عمیق استفاده‌شده یک شبکه کاملاً متصل است و این منجر به افزایش تعداد پارامترهای شبکه و نیز به‌تبع آن هزینه محاسباتی می‌شود. باوجوداینکه روش مبتنی بر سندرم مشکل محدودیت معماری شبکه عصبی را ندارد ولی تعداد بسیار زیاد پارامترهای شبکه، خود مانع بزرگی برای کارا بودن الگوریتم است. بنابراین مسئله اساسی در پژوهش حاضر کاستن از هزینه محاسباتی الگوریتم کدبرداری بر مبنای معادله علامت است؛ که برای این منظور می‌توان با کاستن تعداد پارامترهای شبکه عصبی مورداستفاده برای کدبرداری، از بار محاسباتی عمل کدبرداری کاست. در شبکه‌های عصبی هدف یافتن مقدار بهینه پارامترها است که این امر به‌واسطه محاسبه خروجی شبکه برای ورودی‌های آموزشی و مقایسه خروجی شبکه با مقدار واقعی خروجی و کاهش‌دادن این فاصله تا حد امکان صورت می‌گیرد. برای یافتن مقدار کمینه خطا ما از تابع هزینه مشتق می‌گیریم.

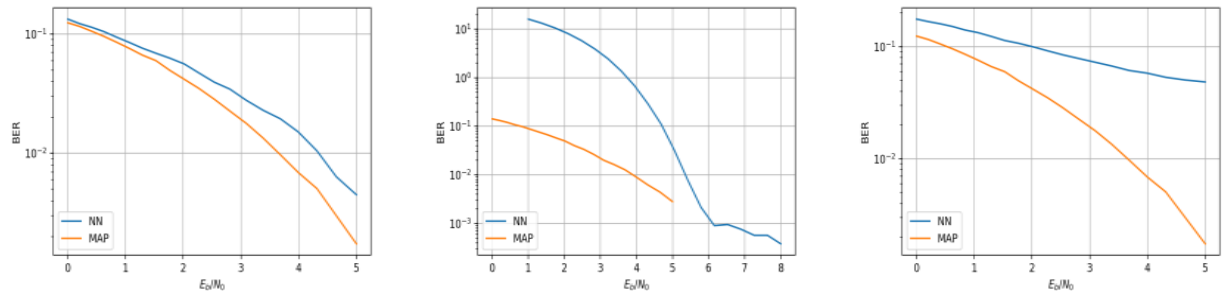
این مشتق‌گیری توسط الگوریتم مشتق‌گیری پس انتشار صورت می‌گیرد.



شکل ۲ : ترکیب شبکه کانولوشنی و برگشتی

این امر در شبکه‌های برگشتی و کانولوشنی نیز صادق است. ما برای بهبود کارایی شبکه برگشتی، ابتدا کد واژه‌ها را توسط شبکه کانولوشنی پردازش و سپس به شبکه برگشتی وارد می‌کنیم. این کار دقت کدبرداری را افزایش‌می‌دهد. در شکل ۲ این امر مشاهده‌می‌شود.

ترکیب دو نوع شبکه برگشتی و کانولوشنی برای افزایش دقت کدبرداری است که پیاده‌سازی آن در محیط کتابخانه تنسورفلو ۲,۰ انجام گرفت. مزیت ترکیب این دو شبکه پرکاربرد و قدرتمند پتانسیل زیادی برای کشف الگوهای پنهان در درون داده‌ها دارد و ما با استفاده از این پتانسیل الگوی خطای نهفته در کد واژه‌های را کشف کنیم. مقادیر ابر پارامترها ابتدا به‌صورت پیش‌فرض تنسورفلو قرارداده‌شد و سپس برای افزایش دقت با انجام آزمایش‌های مختلف برخی از آن‌ها تغییر داده شد. شبکه کانولوشنی سه لایه برای بخش ابتدایی مدل استفاده‌گردید. هر لایه شامل دو زیر لایه ادغام و کانولوشن می‌باشند. تابع فعالیت ReLU هم در شبکه برگشتی و هم در کانولوشنی مورداستفاده قرار گرفت. در ابتدای امر به دلیل اینکه مقداردهی پارامترها تأثیر مستقیمی بر روی نتایج کار دارد. این پارامترها عبارت‌اند از نرخ یادگیری در الگوریتم ADAM که ما برای این الگوریتم آن را برابر با ۰,۰۰۱ قراردادیم. برای کامپایل مدل نیز از هر دو تابع MSE و Binary-Cross-Entropy استفاده‌کرده‌ایم که با تابع MSE نتیجه بهتری حاصل‌شده است.



شکل۳: نتایج نرخ خطای بیت بر اساس مقادیر ابرپارامترها

تعداد لایه‌ها در شبکه برگشتی و شبکه کانولوشنی، اندازه فیلتر مورداستفاده در شبکه کانولوشنی، تابع فعال‌سازی در لایه‌های مختلف، اندازه لایه‌های پولینگ در شبکه کانولوشنی و همچنین پدینگ ازجمله پارامترهای مهم در مدل ما هستند که مقداردهی آن‌ها را طوری انجام‌دادیم که بهترین نتیجه حاصل‌گردد. داده‌های آموزش با اعمال طیف ۰ تا ۵ دسی‌بل نویز سفید گوسی[۵] به کد واژه‌ها با طول ۶۴ ساخته‌شده‌اند. در همه آزمایش‌های انجام‌شده مقدار نسبت سیگنال به نویز (SNR) را برای داده‌های آموزشی و هم برای داده‌های آزمایش، یکسان در نظر گرفته‌ایم. تابع ضرر مورد استفاده ما به شکل زیر است:

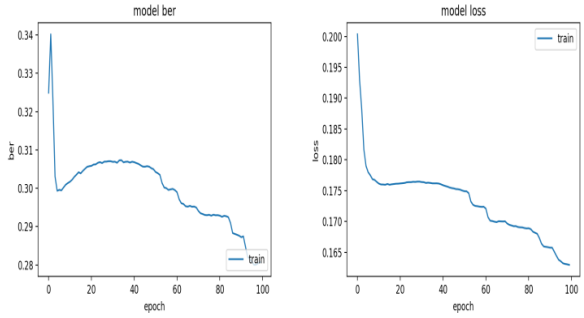
$$L = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\Upsilon^{T-t}H_{CE}(\tilde{z}_i^s, \hat{z}_i^s(t)) \qquad (2.0)$$

که در آن N طول کد، T تعداد کل گام‌های زمانی، Υ ضریب تخفیف که ما آن را برای همه گام‌های زمانی برابر با ۰٫۵ قراردادیم، H_{CE} تابع Cross-entropy، $\tilde{z}_i^s$ علامت کدواژه i-ام و $\hat{z}_i^s(t)$ نیز خروجی شبکه برگشتی در گام زمانی t-ام برای کدواژه i-ام است. ما در نمودارهایمان از کدبرداری پایه MAP به‌عنوان معیار برای مقایسه استفاده‌کرده‌ایم. این داده‌ها از سایت گیتهاب[۶] تهیه شده‌است. معیار مقایسه عملکرد روش ما بیشینه‌گر احتمال پسین[۷] یا همان MAP است. دلیل اینکه نتایج را با بیشینه‌گر احتمال پسین مقایسه‌کرده‌ایم این است که این معیار پایه برای کدبرداری است و مقایسه با این معیار امری رایج است [۶].

۳. یافته‌ها

همان‌طور که در شکل-۳ دیده می‌شود نتایج مختلفی با تغییر دستی ابرپارامترهای مدل به‌دست آمده و در یکی از نتایج عملکرد کدبرداری بهتر از کدبرداری MAP داشته است. ما از پیکره‌بندی‌های موفق مدل‌های یادگیری عمیق که در [۷] و [۸] پیشنهادشده‌اند استفاده کرده‌ایم. پس از یافتن پیکره‌بندی مناسب پارامترها نوبت به نمایش نحوه عملکرد مدل درزمینه[۸] کاهش مقدار تابع هزینه (Loss) و نرخ خطای بیت (BER) می‌رسد. مدل در حین آموزش یادمی‌گیرد که مقدار تابع هزینه را کاهش‌دهد که این منجر به کاهش نرخ خطای بیت می‌شود.

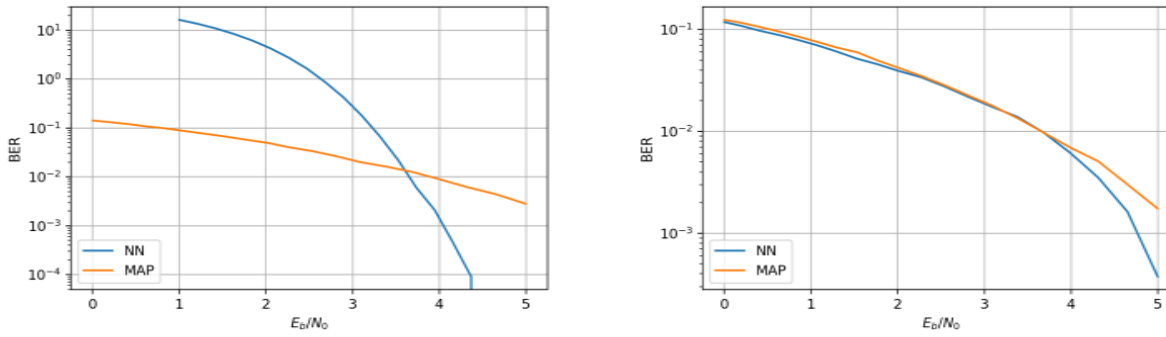
شکل ۴ نتایج عملکرد مدل درزمینه‌ی کاهش loss نرخ خطای بیت را نشان‌می‌دهد. هر چه تعداد دوره‌های آموزشی بیشتر می‌شود به دلیل عملکرد صحیح مدل، مقدار تابع هزینه کاهش‌می‌یابد.



شکل۴: نتایج عملکرد مدل برای کاهش نرخ خطای بیت

تعیین تعداد بهینه ایپاک‌ها با تکیه‌بر مقایسه مقدار هزینه در حین آموزش و حین آزمایش مدل صورت‌می‌گیرد. ما مقدار تابع هزینه را برای تعداد ایپاک‌های مختلف اندازه‌گیری‌می‌کنیم و سپس در حین آزمایش مدل نیز چنانچه مقدار تابع هزینه افزایش بدون دلیل داشته‌باشد در همان تعداد ایپاک آموزش را متوقف‌می‌کنیم. برای مدل ما تعداد صد ایپاک (دور) بهترین نتیجه را داشته‌است. پس‌ازاینکه مدل به‌خوبی آموزش دید و توانست نتیجه قاب قبولی در کاهش مقدار تابع هزینه و نرخ خطای بیت برای داده‌های آموزشی به‌دست‌آورد باید قادر باشد تا با داده‌های آزمون که قبلاً با آن‌ها آموزش ندیده‌است کمترین نرخ خطا را داشته‌باشد. داده‌های آموزشی در شرایط نویزی با بازه نسبت سیگنال به نویز ۱ تا ۵ آموزش‌دیده‌اند و شرایط داده‌های آزمون نیز به همین منوال است. شکل-۵- آ نتیجه کدبرداری در شرایط نویزی ذکرشده برای کد خطی LDPC با طول ۶۴ را نشان‌می‌دهد. همان‌طور که در شکل نمایش داده‌شده است کدبردار طراحی‌شده در اکثر مواقع در شرایط نویزی مختلفی بهتر از کدبردار پایه بیشینه‌گر احتمال پسین عمل‌می‌کند. و در پایان برای مقایسه، نتیجه کدبرداری با مدلی که در آن از شبکه کانولوشنی استفاده‌نشده و فقط با شبکه برگشتی آموزش دیده است را در شکل۵-ب نشان‌داده‌ایم. این نوع معماری شبکه برگشتی بر اساس کار بنناتن [۹] ساخته و آموزش دیده‌است. برای مقایسه با سایر

روش‌های جدول ۱، در شکل ۶ نتایج مشابه برای روش‌های مقالات [۹و۱] آورده شد است.



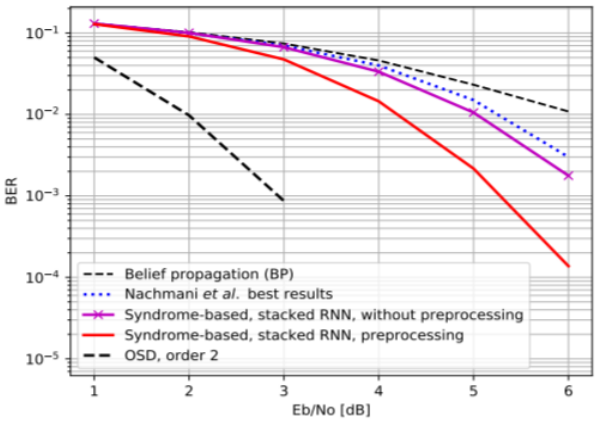
(آ) با استفاده از ترکیب شبکه کانولوشنی و برگشتی (ب) بدون استفاده از شبکه کانولوشنی

شکل ۵: نتایج حاصل از کدبرداری با مدل پیشنهادی

۴. نتیجه‌گیری

ما با ترکیب شبکه کانولوشنی یک‌بعدی و شبکه برگشتی توانستیم کدبرداری از کدهای خطی بر مبنای معادله علامت را بهبودبخشیم. در حقیقت ما با استفاده از پتانسیل ترکیب این دو نوع شبکه عصبی توانستیم الگوی خطای اعمال‌شده بر کد واژه‌ها که در حین عبور از کانال با نویز گوسی بر آن‌ها اعمال‌می‌شود را کشف‌کنیم و کدواژه اصلی ارسال‌شده از طرف فرستنده را با کمترین خطا در طرف گیرنده بازیابی کنیم.

از آنجا که تعیین پارامترهای مدل‌های یادگیری عمیق کاری طاقت‌فرسا و پرهزینه در حین ساخت مدل است روش‌های کدبرداری با استفاده از یادگیری عمیق با تکیه بر الگوریتم‌های فرا اکتشافی جهت تعیین پارامترها به‌عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده مطرح‌می‌شود. این پژوهش‌ها می‌تواند در حوزه بهینه‌سازی مدل‌ها و یا بهینه‌سازی مقادیر پارامترها انجام‌شود؛ که به دلیل فراخ و بی‌نهایت بودن فضای مسئله، روش‌های فرا اکتشافی بهترین ابزار برای این کار شناخته شده است.



شکل ۶ : مقایسه با سایر روش‌ها

مراجع

[۱] E. Nachmani, E. Marciano, L. Lugosch, W. Gross, D. Burshtein و Y. Be'ery, "Deep learning methods for improved decod- ing of linear codes ", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*.۲۰۱۸ ,

[۲] Gruber, T et al, "On Deep Learning based۵۱ ",*st Annual Conference on Information Sciences and Systems) CISS ,(* .۲۰۱۷

[۳] F. Chollette, Deep Learning with Python in Keras, MIT Press, .۲۰۱۷

[۴] I. Goodfellow, Y. Benjio , A. couville, Deep Learning, Cambridge: MIT press, .۲۰۱۷

[۵] E. Nachmani, Y. Be'ery , D. Burshtein, "Learning to decode linear codes using deep learning ",*communication, control and computing* ,Alerton, .۲۰۱۶

[۶] D. J. C. a. S. Lin, Error control coding: Fundamentals and applications, .۱۹۸۲

[۷] R. Gallager, "Low-density parity-check codes ",*IRE Transactions on information theory* ,Vol. 8, No. 1 ,pp. -۲۱ ۲۸, .۱۹۶۲

[۸] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication ",*Bell system technical journal* ,pp. -۳۷۹ ۴۲۳, .۱۹۴۸

[۹] e. a. A. Bennaten, "Deep learning for decoding of linear codes-a syndrome-based approach ",*arXiv preprint arXiv:*.۲۰۱۸ , ۱۸۰۲/۰۴۷۴۱

پی‌نوشت

1. Error Correcting Codes
2. Low Density Parity Check Code
3. Tanner
4. Syndrome Equation
5. Added White Gaussian Noise
6. https://github.com/gruberto/DL/ChannelDecoding
7. Maximum A-posteriori