

تحسين أداء أنظمة اتصالات الجيل الخامس متعددة المداخل والمخارج باستخدام تقنيات ترميز القناة

م. كرم شمالي*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٣/١١/٢١. قُبِلَ للنشر في ٢٠٢٤/٤/٢٣)

□ ملخص □

يتزايد استخدام البيانات اللاسلكية بمعدل هائل مما جعل هناك حاجة إلى الابتكارات المتواصلة في تكنولوجيا البيانات اللاسلكية لتوفير قدر أكبر من الإمكانيات وجودة أعلى في الخدمات. يعتبر التجميع بالتقسيم الترددي المتعامد OFDM اللبنة الأساسية في أنظمة الاتصالات الحديثة مثل شبكات الخليوي الجيل الخامس 5G و Wimax، ويعتبر الحصول على معدل خطأ بت BER منخفض من أهم التحديات التي تواجه أنظمة الاتصالات الحديثة. تم في هذا البحث دراسة نظام OFDM مطبق على عدد من الهوائيات متعددة المداخل والمخارج MIMO ومتعدد المستخدمين (MU-MIMO-OFDM) حيث تم تطبيق ترميز LDPC المستخدم في الجيل الخامس على هذا النظام والمقارنة مع ترميز turbo و convolution. بينت النتائج التي تم الحصول عليها تم إثبات فعالية التقنية المقترحة من خلال تخفيض معدل خطأ البت BER ومن أجل أنواع مختلفة من التعديل مثل 16QAM و 64QAM و QPSK. جميع إجراءات المحاكاة تمت باستخدام برنامج الماتلاب.

الكلمات المفتاحية: OFDM (التجميع بالتقسيم الترددي المتعامد)، BER (معدل خطأ البت)، LDPC، Turbo، Convolution، MU-MIMO-OFDM.

*حاصل على درجة الماجستير في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات من كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات بجامعة طرطوس.

Improve the performance of Multi-Input Multi-Output fifth generation communication systems using channel coding technologies

Eng. Karam Al Shamali*

(Received 21/11/2023 . Accepted 23/4/2024)

□ ABSTRACT □

Wireless data usage is increasing at a phenomenal rate and driving the need for continued innovations in wireless data technologies to provide more capacity and higher quality of service. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system considered the core of the modern Telecommunications systems like 5G mobile networks and Wimax, and obtaining a low Bit Error Rate (BER) is considered one of the most important challenges facing modern communication systems. In this research, the OFDM system with Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) and Multi-User (MU-MIMO-OFDM) have been studied. The LDPC coding, which is used in 5G, has been applied to this system and compared with turbo and convolutional coding. Based on the obtained results, the effectiveness of the proposed technique has been proved by reducing the BER for different modulation types such as 16QAM, 64QAM, and QPSK. All simulation procedures have been performed using the MATLAB program.

Key Words: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), BER (Bit Error Rate), LDPC, Turbo, Convolution, MU-MIMO-OFDM .

* Master of communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University.

١ - المقدمة

تطورت الاتصالات النقالية اللاسلكية تاريخياً من الجيل الأول عندما كان هذا النظام تشابهاً وأمن الخدمة الصوتية فقط، ثم جاء الجيل الثاني لأنظمة الاتصالات النقالية الرقمية والذي امتلك أداء أفضل لاستخدامه تقنيات TDMA أو FDMA إلا أنه كان محدوداً بعرض الحزمة، وبعدها ظهر الجيل الثالث ليعزز معدل البيانات لكن التطور المستمر في تطبيقات الوسائط المتعددة جعل معدل البيانات المستخدم غير كافٍ. يجب أن يملك الاتصال اللاسلكي فعالية طيفية عالية و قدرة على مقاومة خفوت القناة في البيئة متعددة المسار، ومن الصعب تحقيق هذه المتطلبات بتقنيات التعديل التقليدية. يعد نظام التقسيم الترددي المتعامد OFDM من أكثر الأنظمة شيوعاً في أنظمة الاتصالات اللاسلكية حيث اعتمد في العديد من المعايير اللاسلكية، وفي الجيل الرابع من أنظمة الاتصالات الخلوية وذلك لكفاءته الطيفية ومعدلات نقل البيانات العالية التي يؤمنها [1].

تم استخدام نظام OFDM مع عدة هوائيات في كل من المرسل والمستقبل من أجل تحسين أداء النظام في قنوات الخفوت المتعددة وزيادة معدل نقل البيانات ويطلق على هذه الهوائيات MU-MIMO-OFDM، وقد حسنت هذه الأنظمة من أداء أنظمة الاتصالات اللاسلكية بالنسبة للعديد من العوامل مثل تحسين السعة والحصول على معدل معطيات أعلى ومعدل خطأ بت (BER) أقل [2]، كما أعطت أنظمة MIMO إنتاجية جيدة وكفاءة طيفية عالية معنفس الاستطاعة المرسله وعرض حزمة المتطلبه في حالة الأنظمة التي لا تعتمد التعدد (Single input-Single output) [3].

تطبق أنظمة MIMO وفق عدة نماذج فمن الممكن أن نرسل نفس الإشارة على كل الهوائيات، مما يعني أننا سنحسن من أداء النظام تجاه قنوات الخفوت، ولكننا لن نزيد من سعة البيانات، ويسمى هذا النموذج بتقنية التباين الفراغي (Spatial Diversity) حيث يتم توليد N نسخة بديلة عن الإشارات وهذه الإشارات ستكون مرتبطة بهوائيات الإرسال، ويتم تخفيض تأثير خفوت الإشارة بشكل كبير في هذه الحالة.

بالرغم من أن نظام MU-MIMO-OFDM تقنية جديدة في الشبكات اللاسلكية إلا أنه لاقى مؤخراً اهتماماً ملحوظاً من قبل الباحثين نظراً للتحسين الذي يقدمه في زيادة سرعة نقل البيانات وفي وثوقية هذه البيانات، ويوجد الكثير من الدراسات السابقة التي تناولت نظام MU-MIMO-OFDM وعملت على تحسين أدائه، وستنطرق فيما يلي إلى بعض تلك الدراسات :

❖ تم دراسة أداء نظام MU-MIMO-OFDM باستخدام طرق تعديل مختلفة وقناة خفوت نوع رايلي، وأظهرت النتائج أن حالة استخدام استطاعات إرسال غير متساوية عند هوائيات الإرسال بحيث يحصل هوائي الإرسال الأول على استطاعة أكبر من هوائي الإرسال الثاني يحقق توفير في استطاعة الإرسال بمقدار 1.33 dB مرة من حالة استخدام استطاعات إرسال متساوية عندما يكون $BER=10^{-3}$ ، كما أظهرت النتائج أن استخدام تقنية اختيار الهوائيات (Antenna selection) مع نظام MU-MIMO-OFDM يحقق ربح مقدار 1.25 dB مرة من حالة عدم استخدامها عندما يكون $BER=10^{-3}$ [4].

❖ تم في هذه الدراسة استخدام خوارزمية Genetic Algorithm في نظام MIMO_OFDM للحصول على أفضل مقاربة في مصفوفات الهوائيات عند طرف الإرسال والاستقبال، وتتضمن هذا المقاربة انتقاء أقل عدد من الهوائيات المرسله من مصفوفة الهوائيات المرسله الكلية في طرف الاستقبال [5].

❖ اقترح الباحثون في هذه الدراسة استخدام تقنية Water Filling algorithm حيث يمكن فيها حساب ربح الاستطاعة وجمعها مع الاستطاعة الكلية، وبعد حساب الاستطاعة لكل قناة فرعية ضمن النظام MIMO-OFDM، يتم توزيع الاستطاعة بشكل يضمن زيادة في نسبة الإشارة إلى الضجيج في القنوات الفرعية وبالتالي تحسين معدل الإرسال [6].

❖ اقترح الباحثون في هذه الدراسة إطار عامل تخصيص الموارد في أنظمة MU-OFDMA و SU-MIMO-OFDMA حيث تم تقديم معيار لتخصيص الموارد الديناميكي وتم توفير خوارزمية جدولة لتخصيص الموارد الأمثل. تم تقييم أداء الخوارزمية المقترحة لنموذج AAS ثنائي الأبعاد باستخدام نموذج قناة 5G-SCM وأظهرت النتائج بوضوح فوائد جدولة المستخدم من زيادة كبيرة في معدل نقل المستخدم [7].

❖ اقترح الباحثون في هذه الدراسة ثلاث تقنيات لتحسين سرعة وقوة الأداء في أنظمة الإدخال والإخراج المتعددة للمستخدمين وتقسيم التردد المتعامد (MU-MIMO-OFDM) و هي الأنظمة ذات المعدل المستمر للطاقة C-MU-MIMO-OFDM-CR والأنظمة ذات المعدل المتقطع D-MU-MIMO-OFDM-CR وأنظمة P-D-MU-MIMO-OFDM-CR ويتم تنفيذ هب نفس الطريقة لـ D-MU-MIMO-OFDM-CR، ولكن يتم إضافة كمية طاقة غير مستخدمة بشكل زائد للميزانية الطاقة في التكرار التالي، وأظهرت النتائج فعالية نظام P-D-MU-MIMO-OFDM-CR وحقق ربح في الطاقة بمقدار 1dB عندما تكون النسبة SNR منخفضة و بمقدار 5dB عندما تكون النسبة SNR مرتفعة [8].

٢. أهمية البحث وأهدافه

تتم أهمية نظام MU-MIMO-OFDM في أنه يشكل النواة الأساسية في أنظمة الاتصالات النقلة ويحقق هذا النظام معدل بيانات عالي ووثوقية عالية في نقل البيانات. يهدف البحث إلى الحصول على معدل أكبر في نقل البيانات لنظام MU-MIMO-OFDM من خلال تطبيق ترميز LDPC الذي يعتبر من أهم تقنيات ترميز القناة في الجيل الخامس بهدف الحصول على معدل خطأ البت BER منخفض وبالتالي تحسين أداء النظام وزيادة الوثوقية.

٣. طرائق البحث ومواده

اعتمد هذا البحث على العديد من الدراسات المرجعية

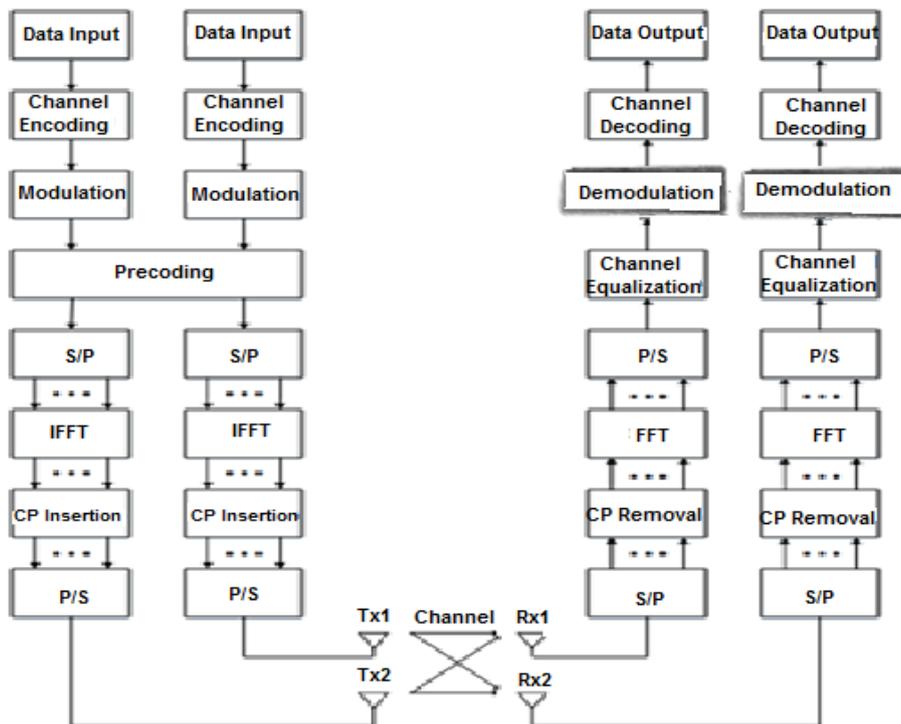
٣-١- تقنية MU-MIMO-OFDM:

يمكن أن يكون MIMO-OFDM مستخدم واحد (Single-user) SU أو متعدد المستخدمين (Multiple User) MU. الفرق الرئيسي بين SU-MIMO و MU-MIMO هو أن SU-MIMO يسمح فقط لزوج من الأجهزة اللاسلكية بإرسال أو استقبال تدفقات بيانات متعددة في نفس الوقت بينما يتيح MU-MIMO للعديد من أجهزة اللاسلكية استقبال تدفقات بيانات متعددة خلال نفس الفترة الزمنية.

تم تقديم تقنيات متقدمة للهوائيات المتعددة في اتصالات اللاسلكي مثل MU-MIMO-OFDM، نظراً للطلب المتزايد على زيادة سعة النظام وتحسين الإنتاجية. تحسن هذه التقنيات المتقدمة موثوقية الروابط اللاسلكية وكفاءة الطيف في أنظمة اللاسلكي في المستقبل. تتواصل محطة القاعدة (BS) ذات الهوائيات المتعددة، في أنظمة MU-

MIMO-OFDM، في نفس الوقت مع عدة مستخدمين، لذلك يتطلب إنشاء رابط بين هذا BS وجهاز المستخدم المحمول. في عملية الإرسال الهابط DL، ترسل BS تدفقات بيانات متعددة من خلال هوائياته نحو جهاز المستخدم المحمول عبر قناة DL. في عملية الإرسال الصاعد UL، يرسل جهاز المستخدم المحمول تدفقات بيانات متعددة نحو BS من خلال قناة UL بشكل متوازي.

تعتمد تنفيذ نظام MU-MIMO-OFDM على إدخالين لتدفق البيانات مع بتات عشوائية لكل هوائي ناقل. يوضح الشكل (١) مخطط MU-MIMO-OFDM المستخدم في المحاكاة.



الشكل (١) مخطط نظام MU-MIMO-OFDM المستخدم في المحاكاة

٢-٣-٢- تقنيات ترميز القناة (Channel coding):

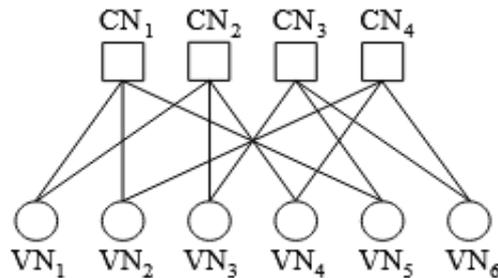
تتعرض البيانات أثناء الإرسال عبر القناة إلى تشويش بسبب تأثيرات أنواع الضجيج المختلفة للقناة ونتيجة لذلك يتم زيادة معدل لأخطاء البت BER. لذلك، يتم استخدام خوارزميات تصحيحاً لأخطاء للحد من هذا النوع من الأخطاء فينقل البيانات التي تحصل بسبب قنوات الاتصال غير الموثوقة أو المعرضة للضجيج. سيتم فيما يلي شرح أهم تقنيات ترميز القناة المستخدمة في المحاكاة:

١-٢-٣- ترميز LDPC:

تعتبر مصفوفة فحصاً لتكافؤ هي الخاصة الأكثر أهمية في نظام التشفير LDPC. تضمن هذه المصفوفة تعقيداً منخفضاً لعمليات التشفير وفك التشفير. المصفوفة H هي مثال على هذه المصفوفة فحص التكافؤ الموضحة في المعادلة (١).

$$(1)H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

يتم تمثيل رموز LDPC بواسطة مخطط Tanner [9]. يتم تمثيل كل صف بواسطة عقدة فحص (CN) ، ويتم تمثيل كل عمود بواسطة عقدة متغيرة (VN). تمثل "1" في المصفوفة عملية الاتصالات بين CNs و VNs. يُظهر الشكل (2) مخطط Tanner للمصفوفة H السابقة.



الشكل (2) مخطط Tanner للمثال المرز

يمكن وصف عملية الترميز في LDPC وفق العلاقة:

$$c = uG \quad (2)$$

حيث c هي الكلمة المرمة الناتجة و u تمثل الدخل و G تمثل مصفوفة التوليد [10].

يتم فك تشفير رموز LDPC باستخدام خوارزمية SPA [11] (Sum-Product Algorithm). يعتمد ذلك على تبادل الرسائل بين CNs و VNs في مخطط Tanner. في البداية، تقوم لعقد المتغيرة VNs بإرسال القيم LLR (وهي قيم رقمية تستخدم في عملية فك تشفير البيانات) للقناة L_j إلى CNs المتصلة بها. ثم يقوم CNs بإجراء حساباتها وإرسال رسائل جديدة إلى VNs المتصلة بها وفقاً للمعادلة (3) [10].

$$L_{i \rightarrow j} = 2 \tanh^{-1} \left[\prod_{j \in N(i) - \{j\}} \tanh(L_{j \rightarrow i} / 2) \right] \quad (3)$$

حيث $L_{i \rightarrow j}$ تمثل الرسالة المرسل من العقدة رقم i في CN إلى العقدة رقم j في VN، و $L_{j \rightarrow i}$ تمثل الرسالة المرسل من العقدة رقم j في VN إلى العقدة رقم i في CN، و $N(i)$ هو مجموعة العقد المتغيرة VNs المتصلة بالعقد المراقبة الثابتة CNs. تستلم العقد المتغيرة هذه الرسائل، وتقوم بمعالجتها، ثم تمرير رسائل جديدة إلى العقد المراقبة المتصلة بها وفق المعادلة (4).

$$L_{j \rightarrow i} = L_j + \sum_{i \in N(j) - \{i\}} L_{i \rightarrow j} \quad (4)$$

حيث أن $N(j)$ هي مجموعة العقد الثابتة CN المتصلة بالعقدة المتغيرة VN. عند هذه النقطة يكون تكرار واحد قد انتهى ويمكن حساب نسبة سجل الاحتمالية (LLRLog-Likelihood Ratio) الكلي وفق العلاقة (5):

$$L_{j(\text{total})} = L_j + \sum_{i \in N(j)} L_{i \rightarrow j} \quad (5)$$

إن التسلسل الذي يتم فيه جدولة العقد يمكن أن يؤثر على الأداء. تسمى الجدولة السابقة جدولة الفيض Flood schedule، حيث تقوم جميع العقد المراقبة وجميع العقد المتغيرة بتحديث رسائلها بشكل متوازٍ. يمكن تحقيق أداء محسن

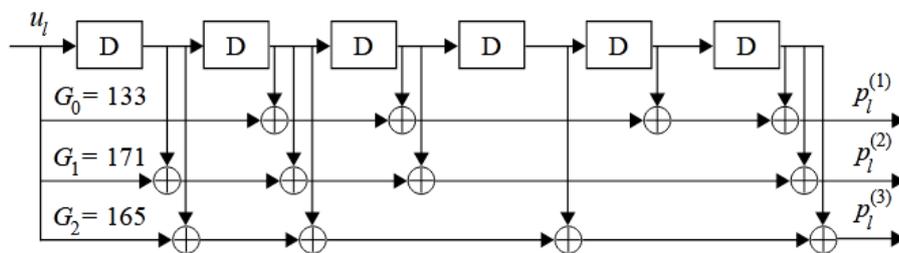
إذا تم تنفيذ جدولة تسلسلية. يُطلق عليها اسم انتشار الاعتقاد المتدرج [12] Layered Belief Propagation (LBP) [10]، وتوفر سرعة تقارب قريباً مضاعفة (منحي تعدد التكرارات) مقارنة بجدولة الفيض. يمكن إجراء تقريب للمعادلة (٣) كما هو موضح في المعادلة (٦).

$$L_{i \rightarrow j} = \left(\prod_{j \in N(i) - \{j\}} \alpha_{j \rightarrow i} \right) \min_{j \in N(i) - \{j\}} \beta_{j \rightarrow i} \quad (6)$$

حيث $\alpha_{j \rightarrow i}$ ، و $\beta_{j \rightarrow i}$ هي إشارة ومطال $L_{j \rightarrow i}$ [13].

٣-٢-٢ ترميز الطي convolutional:

يمكن تنفيذ عملية الضرب التبادلي بين بتات الإدخال ومعاملات لرموز باستخدام مزيج بسيط من مكونات الذاكرة وعمليات XOR. يتم عرض المُشفر التبادلي بمعدل 1/3 المستخدم في LTE [14] كما في الشكل (٣)، حيث يتم تمثيل المعاملات (G_i) على شكل ٨ بت، كما أن فهم انتقالات الحالات مهم في وقت لاحق لعملية فك التشفير ويت طلب معرفة حالات البدء والانتهاؤ للمشفر في من أجل عملية فك التشفير.



الشكل (٣) ترميز convolutional المستخدم في LTE بمعدل 1/3 [14]

تم دراسة فك التشفير بأقصى احتمالية عن طريق البت (MAP)، والذي يستخدم خوارزمية BCJR. وللحصول على معلومات البت u_i في الوقت i ، والرمز المستلم y ، والبت المفكوك \hat{u}_i ، يتم إعطاء نسبة سجل الاحتمالية LLR لـ u_i في المعادلة (٧).

$$L_{u_i} = \log \left(\frac{P\{u_i = 0 | y\}}{P\{u_i = 1 | y\}} \right) \quad (7)$$

نظراً للهيكال الشبكي للأكواد الترددية، يمكن كتابة هذا لاحتماليات وفقاً لمعادلة (٨) [١٥].

$$L_{u_i} = \log \left(\frac{\sum U_0 P\{s_{i-1} = \hat{s}, s_i = s, y\}}{\sum U_1 P\{s_{i-1} = \hat{s}, s_i = s, y\}} \right) \quad (8)$$

حيث s_i هو الحالة في الوقت i ، و U_0 هو مجموعة الأزواج (s, \hat{s})، لانتقال الحالة $s \rightarrow s'$ عندما $u_i = 0$ ، و U_1 هو مجموعة الأزواج (s, \hat{s})، لانتقال عندما $u_i = 1$. باستخدام خوارزمية BCJR يمكن تفكيك هذا لاحتماليات كما هو موضح في المعادلة (٩).

$$P\{s_{i-1} = \hat{s}, s_i = s, y\} = \alpha_{i-1}(\hat{s}) \gamma_i(\hat{s}, s) \beta_i(s) \quad (9)$$

حيث أن $\gamma_i(\hat{s}, s)$ هي مقياس الفرع. يتم حسابا لاحتماليات α_i و β_i بشكل متكرر. باستخدام المعالجة في المجالا للوغاريتمي، يتم تقديم التعبير النهائي لـ LLR في المعادلة (١٠) [١٥].

$$L_{u_i} = \max_{U_0}^* [\alpha_{i-1}(\hat{s}) \gamma_i(\hat{s}, s) \beta_i(s)] - \max_{U_1}^* [\alpha_{i-1}(\hat{s}) \gamma_i(\hat{s}, s) \beta_i(s)] \quad (10)$$

يعطى الدالة \max^* في المعادلة (١١).

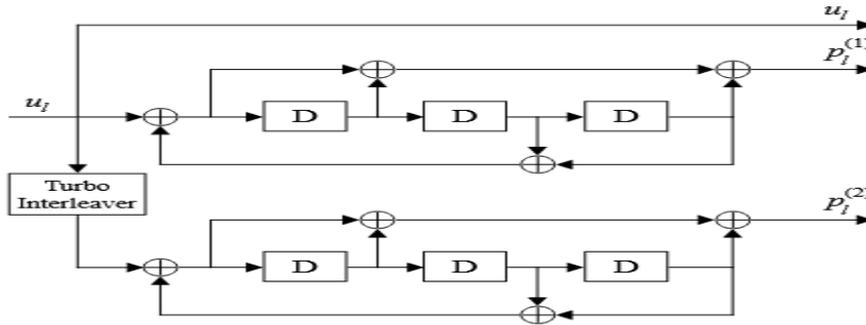
$$\max^*(a, b) = \max(a, b) + \log(1 + e^{-|a-b|}) \quad (11)$$

يمكن إجراء تقريب بتجاهل المصطلح اللوغاريتمي، مما يؤدي إلى خوارزمية Max-Log-MAP.

٣-٢-٣ ترميز Turbo:

يتم إنشاء ترميز turbo عن طريق الجمع بين اثنين من ترميز convolutional ويتم فصلهما عن طريق جهاز تبديل تردد عالي، يتم بعد ذلك إنشاء متعددات رموز لكل مشفر واستخدام جهاز تبديل تردد مناسب. نظراً لأن المشفرات الفردية عبارة أساساً عن تشفير ترددي، فإن المناقشة التي كانت لدينا في القسم السابق هي نفسها هنا. العنصر الجديد الوحيد هو جهاز التبديل. يوضح الشكل (٤) المشفر التوربو المستخدم في [16] [14] LTE، حيث يتم استخدام جهاز تبديل ترددي (Quadratic Permutation Polynomials) QPP.

تكون مخرجات المشفر الأول تياراً نظامياً u_i ، وتيار التكافؤ $(1)P_i$ ، في حين يوّد المشفر الثاني تيار التكافؤ فقط $(2)P_i$. وهذا يجعل ترميز turbo بمعدل 1/3.



الشكل (٤) ترميز turbo المستخدم في LTE بمعدل 1/3 [14]

تتكون عملية فك التشفير في turbo من اثنين من عمليات فك التشفير للمدخلات الناعمة والمخرجات الناعمة (Soft-Input Soft-Output) SISO. وتكون مشابهة لفك التشفير convolutional، باستثناء بعض التعديلات حيث يتم إدخال التدفق لنظام ويولد تدفق التكافؤ الأول إلى وحدة فك التشفير الأولى. ويتم إدخال نسخة متباعدة من التدفق النظام وتدفق التكافؤ الثاني إلى وحدة فك التشفير الثانية. تبدأ وحدة فك التشفير الأولى وبدلاً من إنشاء LLR نهائي، يتم إنشاء نسخة حديثة تسمى المعلومات خارجية ويتم إرسالها إلى وحدة فك التشفير الثانية. تقوم وحدة فك التشفير الثانية بفك التشفير الذي يكون أكثر موثوقية مقارنة بالحالة التي لا يحتوي فيها على المعلومات الإضافية من وحدة فك التشفير الأولى. بنفس الطريقة، تولد معلومات خارجية للوحدة الأولى وهكذا يتم التكرار، في التكرار التالي، يبدأ فك التشفير الأول بنفس الطريقة كما كان في السابق ومع ملاحظة أنه يحتوي على معلومات خارجية من فك التشفير الثاني. وبالتالي، يتم حساب إخراج أكثر موثوقية. يستمر عملية فك التشفير حتى تتحقق معايير الإيقاف أو يتم الوصول إلى الحد الأقصى لعدد التكرارات.

يتم حساب إجمالي LLR بعد كل تكرار بناءً على المعادلة (١٢) [15]:

$$L_{ul(total)} = L_{ul(channel)} + L_{u_{Deint(1)}}^{e(2 \rightarrow 1)} + L_{u_1}^{e(1 \rightarrow 2)} \quad (12)$$

حيث أن $L_{ul(channel)}$ تمثل LLR للقناة، $L_{u_1}^{e(1 \rightarrow 2)}$ تمثل هو المعلومات الخارجية المرسل من فك التشفير الأول إلى الثاني. $Deint(1)$ يشير إلى الموقع غير المتداخل (Deinterleaved) u_1 .

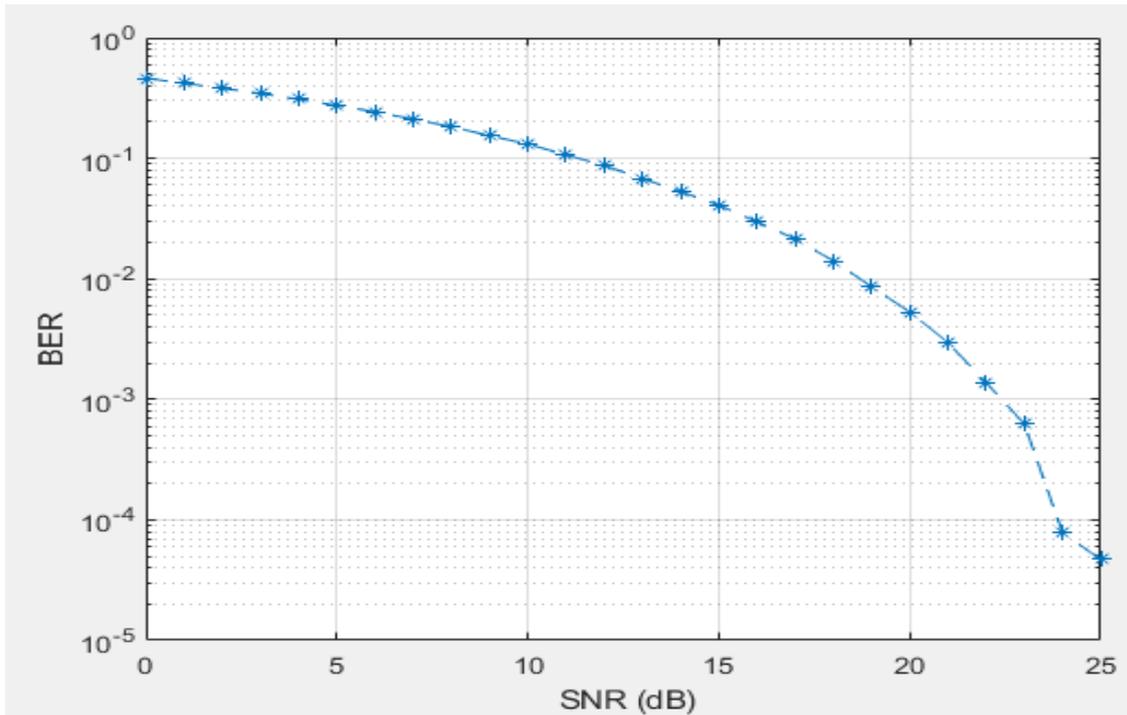
٤. النتائج والمناقشة

يوضح هذا الجزء من العمل تأثير تطبيق ترميز LDPC على نظام MU-MIMO-OFDM والمقارنة مع الترميزات convolutional و turbo، حيث تم تنفيذ العمل باستخدام البيئة البرمجية MATLAB مع بارمترات المحاكاة الموضحة في الجدول (١) كما يلي :

الجدول (1) البارمترات المستخدمة في المحاكاة

Channel types	AWGN
number of iteration (K)	1000
Coupling	Neglected
spacing between array elements	Uniform (0.5 λ)
The signals	Narrow band signals and uncorrelated
Frequency Band	28GHz
Bandwidth	100MHz
Subcarrier Spacing	75 KHz
Modulation Methods	16 QAM
Access Method	OFDM
Error Correction	Uncoded
Code Rate	1/3
Channel Estimation	Ideal
Number of Phased Array Antennas	١٠
Terminal Angular Interval	٢٥ deg
Number of Signal Streams	10 (5 Terminals)
Number of Receive Antennas	2/Terminal
Number of Data Subcarriers	١٥١
Guard Interval	1.30 μ s (1st Symbol) 1.17 μ s (2nd-7th Symbols)
CSI feedback delay	0.25 ms
Number of Bits	42000
FFT size	١٠٢٤
Maximum Doppler Shift	Quasi Static, 120-480 Hz

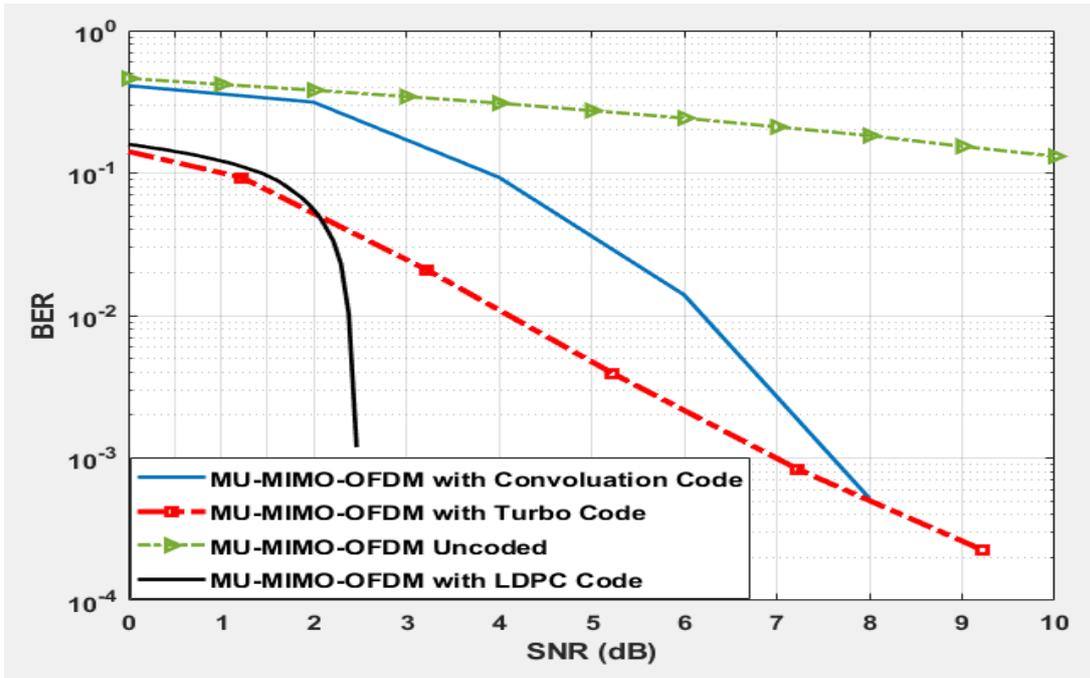
تم في البداية تقييم أداء نظام MU-MIMO-OFDM من دون استخدام تقنيات ترميز القناة وبعد تنفيذ بارمترات المحاكاة الموضحة في الجدول (١) ينتج لدينا الشكل (٥).



الشكل (٥) نظام MU-MIMO-OFDM من دون استخدام تقنيات ترميز القناة (uncoded)

٤-1 مقارنة معدل خطأ البت BER مع نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR عند تطبيق LDPC في أنظمة MU-MIMO-OFDM:

تم تطبيق ترميز LDPC على نظام MU-MIMO-OFDM والمقارنة مع ترميزات turbo و convolution والقناة غير المرزمة، وبعد تطبيق بارامترات المحاكاة الموضحة في الجدول (١) م ينتج لدينا الشكل (٦)، وتم استنتاج الجدول (٢) من الشكل (٦).



الشكل (٦) مقارنة بين ترميزات LDPC و turbo و convolution و un coded في نظام MU-MIMO-OFDM

الجدول (٢) مقارنة بين قيم BER في ترميزات LDPC و turbo و convolution و un coded في نظام MU-MIMO-OFDM من أجل قيم SNR مختلفة

SNR (dB)	BER (dB)			
	Un-coded	convolution	Turbo	LDPC
0.5	0.41	0.41	0.135	0.147
1	0.41	0.4	0.1	0.120
1.5	0.4	0.35	0.07	0.093
2	0.38	0.31	0.05	0.05
٢,٥	٠,٣٥	٠,٢٨	٠,٠٣٣	٠,٠٠٠١
٣	٠,٣٤	٠,٢	٠,٠٠٦	٠

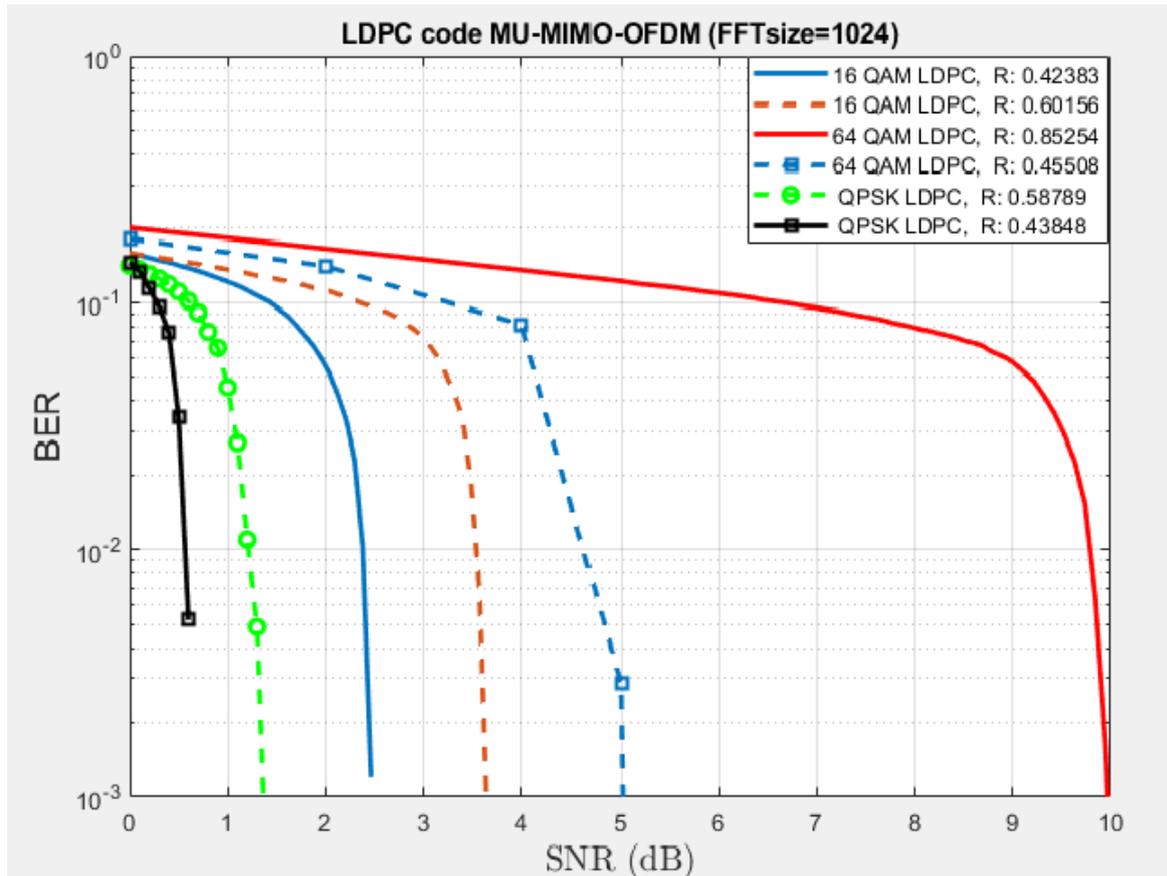
نلاحظ من الشكل (٦) والجدول (٢) أن ترميز LDPC حقق أفضل أداء من حيث معدل خطأ البت وبشكل خاص مع قيم SNR مرتفعة حيث ينعدم BER بعد قيمة 2.5 ل SNR، كما أن ترميز turbo حقق أداء جيد من أجل قيم صغيرة ل SNR بينما حقق ترميز convolution أسوأ أداء بين الترميزات المستخدمة، وبشكل عام جميع أنواع ترميزات القناة المستخدمة حققت تحسن في BER بالمقارنة مع القناة غير المرمزة un coded.

مقارنة معدل خطأ البت BER مع نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR عند تطبيق LDPC في أنظمة-MU

MIMO-OFDM من أجل أنواع تعديل مختلفة ومعدلات ترميز مختلفة:

١- حجم نافذة فورييه FFTsize ١٠٢٤: تم دراسة تطبيق ترميز LDPC على نظام MU-MIMO-

OFDM من أجل أنواع تعديل 16QAM و ٦٤QAM و QPSK، كما تم تطبيق معدلات ترميز مختلفة وفق المعيار TS38.214، وبعد تطبيق بارامترات المحاكاة من الجدول (١) نستنتج الشكل (٧) وتم استنتاج الجدول (٣) من الشكل (٧).



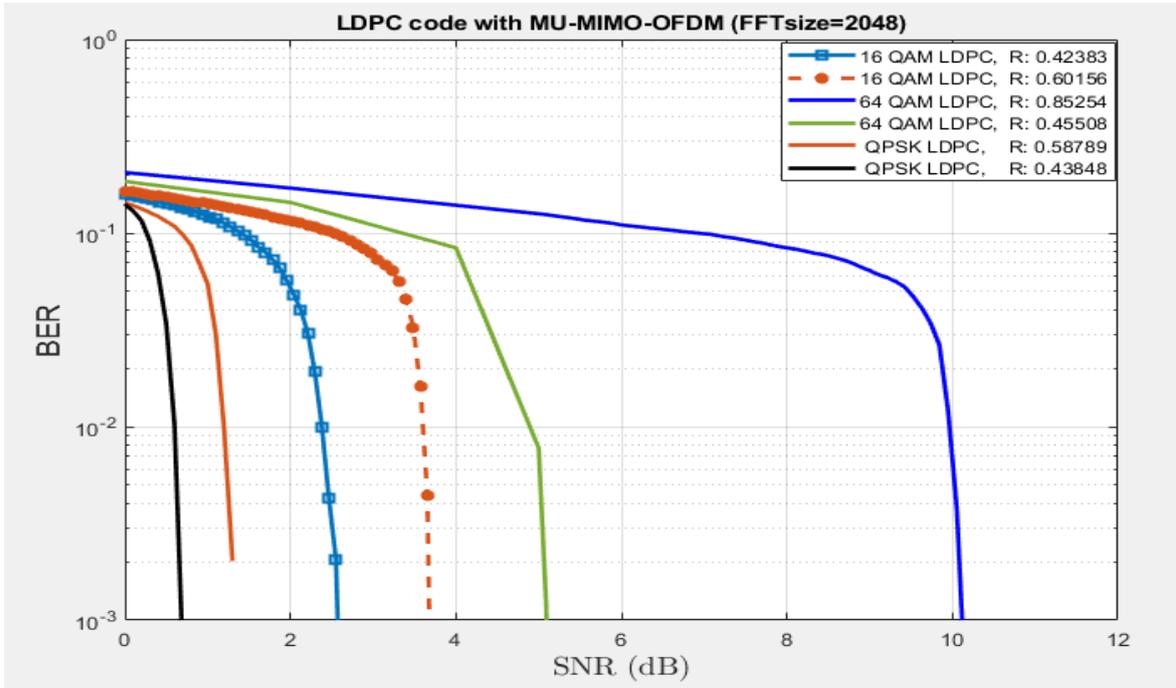
الشكل (٧) معدل خطأ البت BER ل نظام MU-MIMO-OFDM عند تطبيق ترميز LDPC من أجل أنواع تعديل مختلفة ومعدلات ترميز مختلفة في حالة FFTsize = 1024

الجدول (٣) مقارنة بين قيم BER في ترميز LDPC من أجل أنواع تعديل مختلفة ومعدلات ترميز مختلفة وحالة FFTsize=1024 في نظام MU-MIMO-OFDM

SNR (dB)	BER (dB)					
	16 QAM, R = 0.42983	16 QAM, R = 0.60156	64 QAM, R = 0.85254	64 QAM, R = 0.45508	QPSK, R= 0.58789	QPSK, R= 0.43848
0.5	0.147	0.147	0.20	0.181	٠,١١٠	٠,٠٣٤
1	٠,١٢٠	٠,١٣٥	٠,١٨٠	٠,١٤٧	٠,٠٤٥	٠
1.5	٠,٠٩٣	٠,١٢٢	٠,١٧٠	٠,١٤٣	٠	٠
2	٠,٠٥	٠,١١١	٠,١٦٥	٠,١٤٠	٠	٠

نستنتج من الشكل (٧) والجدول (٣) أن نوع التعديل QPSK حقق أفضل أداء في ترميز LDPC مقارنة مع أنواع التعديل الأخرى وبشكل خاص مع معدل ترميز ٠,٤٣٨٤٨، بينما حقق ترميز 64 QAM أسوأ أداء و معدل خطأ بت BER مرتفع جداً مقارنة مع الأنواع الأخرى.

٢- حجم نافذة فورييه $FFTsize = 2048$: تم دراسة تطبيق ترميز LDPC على نظام MU-MIMO-OFDM من أجل أنواع تعديل 16QAM و 64QAM و QPSK، كما تم تطبيق معدلات ترميز مختلفة وفق المعيار TS38.214، وبعد تطبيق بارامترات المحاكاة من الجدول (١) مع تغيير قيمة $FFTsize$ إلى ٢٠٤٨ نستنتج الشكل (٨) وتم استنتاج الجدول (٤) من الشكل (٨).



الشكل (٨) معدل خطأ البت BER ل نظام MU-MIMO-OFDM عند تطبيق ترميز LDPC من أجل أنواع تعديل مختلفة ومعدلات ترميز

مختلفة في حالة $FFTsize = 2048$

الجدول (٤) مقارنة بين قيم BER في ترميز LDPC من أجل أنواع تعديل مختلفة ومعدلات ترميز مختلفة وحالة $FFTsize=2048$ في

نظام MU-MIMO-OFDM

SNR (dB)	BER (dB)					
	16 QAM, R = 0.42983	16 QAM, R = 0.60156	64 QAM, R = 0.85254	64 QAM, R = 0.45508	QPSK, R = 0.58789	QPSK, R = 0.43848
0.5	٠,١٣٨	٠,١٥٢	٠,٢	٠,١٨٤	٠,١١٤	٠,٠٣٣
1	٠,١١٨	٠,١٤١	٠,١٧٥	٠,١٥٠	٠,٠٥٤	٠
1.5	٠,٠٩١	٠,١٢٨	٠,١٨٠	٠,١٥٥	٠	٠
2	٠,٠٤٨	٠,١١٤	٠,١٧٠	٠,١٤٣	٠	٠

نستنتج من الشكل (٨) والجدول (٤) أن أداء النظام يتحسن ويصبح أفضل عند استخدام $FFTsize = 2048$

مقارنة مع $FFTsize = 1024$.

٥. الاستنتاجات والتوصيات

تم في هذا البحث دراسة تحليلية لأنظمة MU-MIMO-OFDM باستخدام برنامج الماتلاب بحيث تم تطبيق ترميز LDPC وإثبات فعاليته من خلال المقارنة مع ترميز turbo و convolution وتم الاستنتاج أن ترميز LDPC يحقق فعالية كبيرة في تخفيض معدل خطأ البت BER وبشكل خاص مع القيم المرتفعة ل SNR.

تم بعد ذلك دراسة ترميز LDPC مع أنواع مختلفة من التعديل وهي 16QAM و 64QAM و QPSK مع معدلات ترميز مختلفة وفق المعيار TS38.214 وتم الاستنتاج أن QPSK حقق أفضل أداء للنظام عند معدل ترميز ٠,٤٣٨٤٨ ثم يليه 16QAM ثم 64QAM، وتم أيضاً تغيير قيمة نافذة فورييه FFTsize إلى 2048 وتم تحقيق تحسن في النظام مقارنة مع $FFTsize = 1024$.

يمكن في الأبحاث القادمة دراسة أنظمة الهوائيات الكثيفة ومتعددة المستخدمين -Massive MU-MIMO- OFDM وتقنيات ترميز القناة وطرق تحسينها، كما يمكن استخدام تقنيات الذكاء الصناعي والتعلم العميق Deep learning في تقنيات ترميز القناة لتحسين أداء نظام MU-MIMO-OFDM.

المراجع

- [1] Anibal Luis Intini ,2000-Orthogonal Frequency Division Multiplexing For Wireless Network Standard IEEE 802.11a,University of California.
- [2] A Molisch ,Wireless Communications. Wiley-IEEE Press,2005.
- [3] T.Kaiser ,’’Smart antenna-State of art’’, Hindawi Publishing Corp-2005.
- [4] Manik, G. Kalra, A. &Kalra.S. (2012). Performance Analysis of STBC- OFDM System Under Multipath Fading Channel.IJSCE, volume 1, Issue 6.87 90.
- [5] VipinKumar,ParveenDhyani, Performance Analysis of MIMO-OFDM System Using BPSK Modulation Scheme, International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development Issue 5, Vol.4 (June -2015).
- [6] Ben Zarlingo, MIMO RF Measurements :Choosing and Using Tools, agilent technologyJanuary 22, 2009.
- [7] Bontu, C. S., Ghimire, J., & El-Keyi, A. (2020, May). Optimum resource allocation in MU-MIMO OFDMA wireless systems.In 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring) (pp. 1-5). IEEE.
- [8] Labdaoui, R., Ghanem, K., &Ettoumi, F. Y. (2023). A Hybrid Spatial Adaptive Modulation and Frequency Stochastic Approach for MU-MIMO-OFDM Systems in the Context of Underlay Cognitive Radios. PeriodicaPolytechnica Electrical Engineering and Computer Science.
- [9] R. Tanner, "A recursive approach to low complexity codes," IEEE Transactions on Information Theory 27, 533–547(1981).
- [10] H. Kfir and I. Kanter, "Parallel versus sequential updating for belief propagation decoding," Physica A Statistical Mechanics and its Applications 330, 259–270(2003)
- [11] T. Ta, A Tutorial on Low Density Parity-Check Codes, The University of Texas at Austin (2009).
- [12] M. M. Mansour and N. R. Shanbhag, "Turbo decoder architectures for low-density parity-check codes," in Global Telecommunications Conference IEEE, 1383–1388 (2002)
- [13] E. Arikan, "Channel polarization: A method for constructing capacity- achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," IEEE Transactions on Information Theory 55, 3051–3073 (2009).
- [14] “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 36.212 (2016).
- [15] W. E. Ryan and S. Lin, Channel Codes: Classical and Modern. Cambridge, Cambridge University Press (2009).
- [16] J. C. Ikuno, S. Schwarz, and M. Simko, "LTE Rate Matching Performance with Code Block Balancing," in 17th European Wireless - Sustainable Wireless Technologies, 1–3 (2011).