

การศึกษาที่ครอบคลุมด้านการออกแบบและประสิทธิภาพของรหัสโพลาร์สำหรับมาตรฐาน 5G

A COMPREHENSIVE STUDY ON THE DESIGN AND PERFORMANCE OF POLAR CODES FOR 5G STANDARDS

อนุสรณ์ วงศ์ษา¹ และ เวธิต ภาคย์พิสุทธิ์²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 ประเทศไทย

¹62601094@kmitl.ac.th, ²watid.ph@kmitl.ac.th

Anusorn Wongsas¹ and Watid Phakphisut²

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

¹62601094@kmitl.ac.th, ²watid.ph@kmitl.ac.th

วันรับบทความ วันที่ 4 กรกฎาคม 2564

วันแก้ไขบทความ วันที่ 14 สิงหาคม 2564

วันตอบรับบทความ วันที่ 17 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

มาตรฐานการสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 หรือมาตรฐาน 5G มีรหัสช่องสัญญาณที่ถูกเลือกใช้งานอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ รหัสแอลดีพีซี (LDPC) ใช้ในช่องสัญญาณข้อมูล และรหัสโพลาร์ (Polar) ใช้ในช่องสัญญาณควบคุม ทั้งนี้ รหัสโพลาร์ได้ให้สมรรถนะการแก้ไขบิตผิดพลาดที่ต่ำกว่ารหัสแอลดีพีซีกรณีข้อมูลที่ใช้สื่อสารมีขนาดสั้น จึงถูกเลือกใช้สำหรับช่องสัญญาณควบคุมในมาตรฐาน 5G ในบทความนี้จึงสนใจการศึกษาการเข้ารหัสโพลาร์ในมาตรฐาน 5G โดยบทความได้นำเสนอรายละเอียดของกระบวนการเข้ารหัสโพลาร์ตามมาตรฐาน 5G และอธิบายถึงเหตุผลและข้อกำหนดของการออกแบบกระบวนการเข้ารหัส นอกจากนี้บทความยังศึกษาถึงสมรรถนะของรหัสโพลาร์ตามมาตรฐาน 5G โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของรหัสโพลาร์สำหรับช่องสัญญาณอัปลิงก์และดาวนลิงก์ ที่มีความยาวคำรหัส (codeword) ความยาวเพย์โหลด และอัตรารหัสที่เท่ากัน ภายใต้การถอดรหัสหากล้างต่อเนื่องแบบลิสต์ที่มีขนาดลิสต์ที่เท่ากัน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงรหัสสำหรับช่องสัญญาณอัปลิงก์ที่ให้สมรรถนะที่ดีกว่า ซึ่งอาจลดข้อเสียของการสื่อสารที่สามารถถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนได้โดยง่าย

คำสำคัญ: 5G, รหัสโพลาร์, ช่องสัญญาณควบคุม, มาตรฐานการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5

ABSTRACT

The 5th generation of mobile communication (5G standard) has chosen two channel codes: low-density parity-check (LDPC) codes and polar codes, which are used in the data and control channels, respectively. Since the control channel uses the short-length data and polar codes have provided a better performance for the short-length data. Therefore, polar codes are selected for the control channel. In this work, we will provide a detail of polar encoding processes as it is specified in the 5G standard. This work also analyzes the 5G polar code performances for uplink and downlink communication channels with the same codeword length, payload length and code rate under successive cancellation list decoding at the same list size. According to the results, the 5G

polar code for uplink provides superior performance, which may compensate for the communication channel easily disrupted by noise.

KEYWORDS: 5G, polar code, control channel, 5th generation mobile communication standard

1. บทนำ

มาตรฐานการสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 หรือมาตรฐาน 5G ถูกกำหนดโดยสมาคม 3rd generation partnership project หรือ 3GPP สมาคมดังกล่าวได้มีบทบาทในการกำหนดมาตรฐานการสื่อสารไร้สายตั้งแต่ช่วงปีพ.ศ. 2542 ซึ่งการสื่อสารไร้สายกำลังเริ่มเข้าสู่ยุคที่ 3 หรือ 3G ในช่วงเวลาดังกล่าว สมาคม 3GPP ได้จัดทำรายละเอียดเทคนิคหรือมาตรฐาน release 1999 (3rd Generation Partnership Project [3GPP], 1999) เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์สื่อสารไร้สายในยุคที่ 3 และในปีพ.ศ. 2550 การสื่อสารไร้สายได้เข้าสู่ยุคที่ 4 หรือ 4G สมาคม 3GPP ได้จัดทำมาตรฐาน release 8 (3rd Generation Partnership Project [3GPP], 2007) ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญของการสื่อสารไร้สายที่มุ่งเน้นการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง ทั้งนี้ จะสังเกตได้ว่า การพัฒนามาตรฐานการสื่อสารไร้สายในยุค 3G ถือเป็นจุดเริ่มต้นของการใช้งานอุปกรณ์สมาร์ตโฟนที่สามารถสืบค้นข้อมูลในโลกอินเทอร์เน็ต ต่อมาในยุค 4G จัดเป็นยุคที่มีการใช้งานอุปกรณ์สมาร์ตโฟนอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความเร็วในการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ผู้ใช้งานสามารถดูวิดีโอความละเอียดสูง ดูการถ่ายทอดสดผ่านทางสมาร์ตโฟนได้ อีกทั้ง การบูรณาการระหว่างโครงข่ายการสื่อสารแบบมีสายและไร้สาย ทำให้อุปกรณ์สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้ตลอดเวลาและอย่างต่อเนื่อง

การใช้งานยุค 4G มุ่งเน้นการรองรับการเชื่อมต่อความเร็วสูงของอุปกรณ์สื่อสารจำพวกโทรศัพท์เคลื่อนที่เท่านั้น ทำให้ยุค 5G จึงมีเป้าหมายการเพิ่มรูปแบบการใช้งานมากขึ้น โดยหน่วยงานสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (international telecommunications union) หรือ ITU ได้กำหนดรูปแบบการใช้งานการสื่อสารไร้สายยุค 5G จำนวน 3 รูปแบบ (IMT-2020 TECH PERFREQ, 2016) รูปแบบแรกคือ enhanced mobile broadband หรือ eMBB ซึ่งมีลักษณะการใช้งานที่เน้นการสื่อสารที่มีความเร็วสูงมาก เช่น การส่งข้อมูลดิจิทัลขนาดใหญ่หรือการถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์ผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต รูปแบบที่สองคือ massive machine type communications หรือ mMTC มีลักษณะการใช้งานที่ต้องการการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หลากหลายชนิด เช่น อุปกรณ์ Internet of things หรือ IoT รูปแบบสุดท้ายคือ ultra-reliable and low latency communications หรือ URLLC มีลักษณะการใช้งานที่ต้องการการสื่อสารอย่างทันท่วงทีหรือ real-time เช่น รถยนต์ไร้คนขับหรือปฏิบัติการทางการแพทย์

ในปีพ.ศ. 2560 หน่วยงาน 3GPP ออกแบบมาตรฐาน release 15 (3rd Generation Partnership Project [3GPP], 2017) ซึ่งครอบคลุมถึงองค์ประกอบในการสื่อสารต่าง ๆ ทั้งระบบโครงข่าย การประมวลผลสัญญาณ และการเข้ารหัสข้อมูล โดยการออกแบบแต่ละองค์ประกอบ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายการใช้งานทั้ง 3 รูปแบบ ตามที่กล่าวในข้างต้น หนึ่งในองค์ประกอบย่อยที่จะพูดถึงในบทความนี้ก็คือ การเข้ารหัสโพลาไรซ์ (polar encoding) สมาคม 3GPP ได้เลือกการเข้ารหัสช่องสัญญาณอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ รหัสแอลดีพีซี (low-density parity-check code :LDPC) และรหัสโพลาไรซ์ (polar code) โดยมาตรฐานจะกำหนดเฉพาะกระบวนการเข้ารหัสเท่านั้น ทำให้ในภาครับสามารถออกแบบกระบวนการถอดรหัสรูปแบบใดก็ได้ ช่วยเพิ่มความความยืดหยุ่นสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ เช่น การเลือกใช้ตัวถอดรหัสที่มีความหน่วงต่ำสำหรับการใช้งานการสื่อสารอย่างทันท่วงทีหรือ URLLC การเลือกใช้ตัวถอดรหัสที่มีความซับซ้อนต่ำ สำหรับการใช้งานบนอุปกรณ์ราคาถูกหรือ mMTC การสื่อสารยังสามารถแบ่งเป็นช่องสัญญาณข้อมูล (data channel) ซึ่งใช้ส่งข้อมูลของผู้ใช้งาน และช่องสัญญาณควบคุม (control channel) ที่ใช้ส่งข้อมูลสำหรับการควบคุมการสื่อสาร เช่น คุณภาพของช่องสัญญาณ การจัดการทรัพยากร และอื่น ๆ รหัสโพลาไรซ์ได้ถูกเลือกให้ใช้ในช่องสัญญาณควบคุม เนื่องจากรหัสโพลาไรซ์ให้สมรรถนะที่ดีกว่ารหัสแอลดีพีซีสำหรับข้อมูลขนาดเล็ก ซึ่งเป็นขนาดข้อมูลที่ใช้ในช่องสัญญาณควบคุม ส่วนรหัสแอลดีพีซีถูกเลือกให้ใช้งานสำหรับช่องสัญญาณข้อมูล เนื่องจากรหัสแอลดีพีซีให้สมรรถนะที่ดีกว่ารหัสโพลาไรซ์สำหรับข้อมูลขนาดยาว และสามารถรองรับการส่งข้อมูลซ้ำด้วยวิธี incremental redundancy-hybrid automatic repeat request หรือ IR-HARQ ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลซ้ำใน

กรณีที่เกิดการสื่อสารเกิดความผิดพลาด โดยการใช้ IR-HARQ จะใช้การส่งข้อมูลเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นเทคนิคที่สำคัญที่ช่วยเพิ่มทราฟฟิคสำหรับการใช้งาน eMBB ของมาตรฐาน 5G

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) บทความมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการเข้ารหัสโพลาร์มาตรฐาน 5G ซึ่งประกอบไปด้วย 11 ขั้นตอนหลัก
- 2) ศึกษาสมรรถนะของรหัสโพลาร์มาตรฐาน 5G ในช่องสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนขาวบวก (additive white Gaussian noise :AWGN) และสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ binary phase shift keying หรือ BPSK

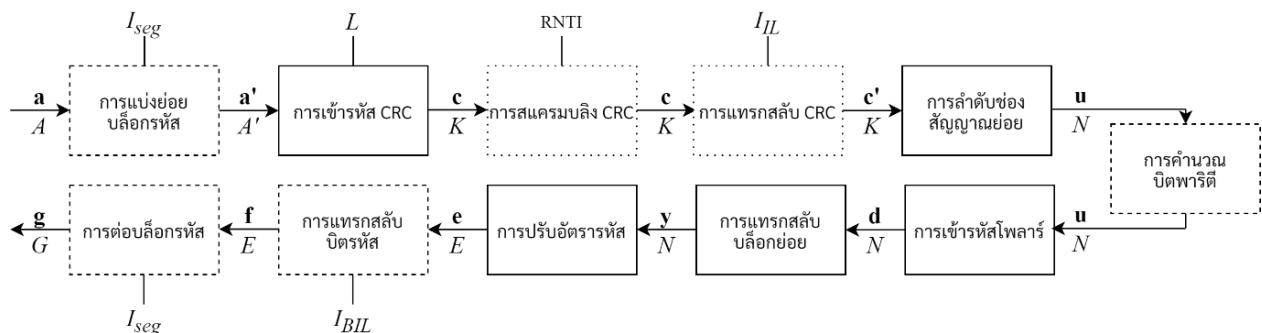
3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ภาพรวมการเข้ารหัสโพลาร์มาตรฐาน 5G

การเข้ารหัสช่องสัญญาณในมาตรฐาน 5G ประกอบด้วยการเข้ารหัสแอลดีพีซี รหัสโพลาร์ และรหัสสลับ ซึ่งรหัสดังกล่าวจะถูกใช้ในช่องสัญญาณสื่อสารที่ต่างกันดังตารางที่ 1 พิจารณาการเข้ารหัสโพลาร์จะพบว่ามีการใช้งานในช่องสัญญาณ broadcast channel (BCH) downlink control information (DCI) ซึ่งจัดได้เป็นช่องสัญญาณดาวนลิงก์ (downlink) และ uplink control information (UCI) ซึ่งจัดได้เป็นช่องสัญญาณอัปลิงก์ (uplink) รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการเข้ารหัสโพลาร์มาตรฐาน 5G ตามเอกสาร 3GPP TS 38.212 (3GPP, 2017)

ตารางที่ 1 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของแต่ละประเภทช่องสัญญาณ

ช่องสัญญาณข้อมูล (data channel)	การเข้ารหัสช่องสัญญาณ
uplink shared channel (UL-SCH)	รหัสแอลดีพีซี
downlink shared channels (DL-SCH)	
paging channel (PCH)	
broadcast channel (BCH)	รหัสโพลาร์
ช่องสัญญาณควบคุม (control channel)	การเข้ารหัสช่องสัญญาณ
downlink control information (DCI)	รหัสโพลาร์
uplink control information (UCI)	
	รหัสสลับ



รูปที่ 1 กระบวนการเข้ารหัสโพลาร์มาตรฐาน 5G โดยขั้นตอนในกล่องเส้นทึบจะถูกใช้งานในทุกช่องสัญญาณ
กล่องเส้นประจะถูกใช้งานเฉพาะช่องสัญญาณ UCI และกล่องเส้นประจุดใช้งานเฉพาะช่องสัญญาณ BCH และ DCI

จากรูปที่ 1 กระบวนการเข้ารหัสกรณีช่องสัญญาณ uplink จะมีกระบวนการที่เพิ่มเติมจากกรณีช่องสัญญาณดาวนลิงก์ ได้แก่ การแบ่งย่อยบล็อกรหัส (code block segmentation) การคำนวณพาริตี (parity calculation) การแทรกสลับบิตรหัส (coded bit interleaving) และการต่อบล็อกรหัส (code block concatenation) และกรณีช่องสัญญาณดาวนลิงก์ จะมีกระบวนการเกี่ยวกับการตรวจสอบด้วยส่วนซ้ำซ้อนแบบวน (cyclic redundancy check) หรือ CRC เพิ่มเติม เช่น กระบวนการสแครมเบิล CRC (CRC scrambling) และการแทรกสลับ CRC (CRC interleaving) เพิ่มเติมจากกรณีช่องสัญญาณอัปลิงก์ กระบวนการเข้ารหัสจะทำงานตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แทนตัวแปรเวกเตอร์ด้วยตัวอักษรหนาและแทนค่าคงที่หรือตัวแปรสเกลาร์ด้วยตัวอักษรบางเอียง ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เพย์โหลด (payload) แทนด้วย a และความยาวเพย์โหลดแทนด้วย A มีความยาวสูงสุด $A \leq 1706$

2) การเข้ารหัส CRC ในช่องสัญญาณ UCI ใช้พหุนาม g_{CRC6} ความยาว $L = 6$ บิตและ g_{CRC11} ความยาว $L = 11$ บิตและช่องสัญญาณ DCI ใช้พหุนาม g_{CRC24C} ความยาว $L = 24$ บิต

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของรหัสโพลาร์สำหรับช่องสัญญาณต่าง ๆ (Bioglio, Condo, & Land, 2020)

		UCI				DCI	BCH
		$A > 20$		$12 \leq A \leq 19$			
		$(A \geq 1013) \vee$ $(A \geq 360 \wedge G \geq 1088)$	$(A < 360) \vee$ $(A < 1013 \wedge G < 1088)$	$E - A \leq 175$	$E - A > 175$		
เลขชี้กำลังสูงสุดความยาวคำรหัสแม่	$n_{\max}$	10				9	
ตัวบ่งชี้การแทรกสลับ CRC	I_{IL}	0				1	
ตัวบ่งชี้การแทรกสลับบิตรหัส	I_{BIL}	1				0	
ตัวบ่งชี้การแบ่งย่อยบล็อกรหัส	I_{seg}	1	0			0	
ความยาวเพย์โหลดขาเข้าสูงสุด	$A_{\max}$	1706				140	32
ความยาวเพย์โหลดขาเข้าต่ำสุด	$A_{\min}$	12				1	32
ความยาวบิต CRC	L	11		6		24	
ความยาวบิตพาริตีตรวจสอบ	n_{PC}	0		3		0	
ความยาวบิตพาริตีตรวจสอบโดยเลือกจากน้ำหนักแถวที่ต่ำสุด	n_{PC}^{wm}	0		0	1	0	

3) บิตข้อมูลที่ถูกดำเนินการการเข้ารหัสโพลาร์จะมีขนาดเท่ากับ K บิต ประกอบไปด้วยเพย์โหลดขาเข้า บิต CRC รวมถึงบิตพาริตี โดยที่ $K < N$ บิต

4) ความยาวคำรหัสแม่ (mother code length) มีขนาดเท่ากับ $N = 2^n$ บิต ซึ่งค่า n จะถูกคำนวณโดยสมการที่ 1

$$n = \max(\min(n_1, n_2, n_{\max}), n_{\min}) \quad (1)$$

โดยช่องสัญญาณดาวนลิงก์ จะมีค่า $n_{\min} = 5$ และ $n_{\max} = 9$ สำหรับช่องสัญญาณอัปลิงก์ จะมีค่า $n_{\min} = 5$ และ $n_{\max} = 10$ สำหรับ n_1 และ n_2 คำนวณได้จากสมการที่ 2 และ 3

$$n_1 = \begin{cases} \lfloor \log_2 E \rfloor & \text{หาก } E \leq (9/8) \cdot 2^{\lfloor \log_2 E \rfloor} \text{ และ } K/E < 9/16 \\ \lceil \log_2 E \rceil & \text{อื่น ๆ} \end{cases} \quad (2)$$

$$n_2 = \lceil \log_2 (K/R_{\min}) \rceil \quad \text{โดยที่ } R_{\min} = 1/8 \quad (3)$$

5) ความยาว E บิต คือความยาวคำรหัสหลังดำเนินการปรับอัตราหัส เพื่อให้ได้อัตราหัส R ที่ต้องการ โดยความยาวสูงสุดมีค่าเท่ากับ $E \leq 8192$ บิต

6) อัตราหัส $R = A/E$ คืออัตราส่วนระหว่างความยาวเพย์โหลดขาเข้าต่อความยาวคำรหัสที่ผ่านการปรับอัตราหัส

7) ความยาว U คือจำนวนบิตที่ตัดออกกรณีการปรับอัตราหัสด้วยการฟังก์ชันเซอร์ (puncturing) และการชอร์ตเทน (shortening) ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 3.2.9

8) ตำแหน่งบิตแช่แข็ง (frozen bit) ที่ต้องคำนวณเพิ่มเติม เมื่อใช้การปรับอัตราหัสด้วยการฟังก์ชันเซอร์จะมีความยาว T บิต หากเป็นวิธีการชอร์ตเทนจะมีความยาว U บิต

9) ความยาวบิตข้อมูลและบิตแช่แข็งจะแทนด้วย $|Q_I|$ และ $|Q_F|$ ตามลำดับ โดยให้ n_{PC} คือความยาวบิตพาริตี

3.2 รายละเอียดกระบวนการเข้ารหัสโพลาร์มาตรฐาน 5G

3.2.1 การแบ่งย่อยบล็อกรหัส

การแบ่งย่อยบล็อกรหัสเป็นการแบ่งข้อมูลเพย์โหลด a ออกเป็น 2 ส่วน เพื่อทำการเข้ารหัสแยกกัน ไม่ให้เกิดความซับซ้อนในการเข้ารหัสมากเกินไป โดยความซับซ้อนในการถอดรหัสจะเพิ่มขึ้นตามความยาวคำรหัส โดยความยาวคำรหัสในช่องสัญญาณ UCI จะมากกว่าช่องสัญญาณอื่น ๆ เนื่องจากช่องสัญญาณ UCI จำเป็นต้องส่งข้อมูลคุณภาพช่องสัญญาณจากอุปกรณ์ของผู้ใช้ (user equipment) หรือ UE ขึ้นไปยัง radio access network หรือ RAN ซึ่งจัดเป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่

กรณีช่องสัญญาณ UCI และมีเงื่อนไข $(A \geq 360 \wedge E \geq 1088) \vee A \geq 1013$ กระบวนการแบ่งย่อยบล็อกรหัสจะทำงาน โดยกำหนดตัวบ่งชี้การแบ่งย่อยบล็อกรหัส $I_{seg} = 1$ นอกจากนั้นกำหนดให้ $I_{seg} = 0$ เวกเตอร์ $\mathbf{a}$ ความยาว A จะถูกแบ่งเป็น 2 เวกเตอร์ $\mathbf{a}'$ ความยาว $A' = A/2$ หากความยาว A เป็นจำนวนคี่ เวกเตอร์ $\mathbf{a}'$ จะถูกแบ่งเป็น 2 เวกเตอร์ โดยเวกเตอร์ $\mathbf{a}'$ ชุดแรกมีความยาว $\lfloor A/2 \rfloor$ บิต และเติมบิต 0 ไว้ด้านหน้า เวกเตอร์ $\mathbf{a}'$ ชุดที่สองมีความยาว $\lceil A/2 \rceil$ บิต

สำหรับช่องสัญญาณ BCH และ DCI และกรณีอื่น ๆ กระบวนการนี้จะไม่ทำงานและกำหนดให้ $I_{seg} = 0$ เวกเตอร์ $\mathbf{a}$ จะผ่านไปยังกระบวนการเข้ารหัส CRC ถัดไป

3.2.2 การเข้ารหัส CRC

การเข้ารหัส CRC จะทำการคำนวณบิต CRC จำนวน L บิต จากนั้นจะนำบิต CRC ที่คำนวณได้ต่อท้ายกับเวกเตอร์ $\mathbf{a}$ ความยาว A จากอินพุต (หรือ $\mathbf{a}'$ ความยาว A' ในกรณีที่ $I_{seg} = 1$) โดยจะได้เวกเตอร์ $\mathbf{c}$ ที่มีความยาว $K = A + L$ (หรือ $\mathbf{c}'$ ความยาว $K = A' + L$ ในกรณีที่ $I_{seg} = 1$) การคำนวณบิต CRC ในมาตรฐาน 5G จะใช้พหุนามกำเนิด (generator polynomial) ตาม (3GPP, 2017, หัวข้อที่ 5.1) ประกอบด้วยพหุนาม g_{CRC6} g_{CRC11} และ g_{CRC24C} สำหรับรหัสโพลาร์

รหัสโพลาร์ที่มีรหัส CRC สามารถเพิ่มสมรรถนะของรหัสโพลาร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการถอดรหัสโพลาร์ด้วยตัวถอดรหัสหักล้างต่อเนื่องแบบลิส (successive cancellation list) หรือ SCL (Tal & Vardy, 2015) (Niu & Chen, 2012) จะทำงานร่วมกับรหัส CRC โดยจะช่วยเลือกบิตจากการถอดรหัสแบบลิส ช่วยลดความผิดพลาดของตัวถอดรหัสได้อย่างมาก

กรณีช่องสัญญาณ UCI จะใช้พหุนาม g_{CRC6} ในการคำนวณบิต CRC ความยาว $L=6$ บิต กรณีที่เวกเตอร์ **a** มีความยาว $12 \leq A \leq 19$ หากเป็นกรณี $A \geq 20$ จะใช้พหุนาม g_{CRC11} ในการคำนวณบิต CRC ความยาว $L=11$ บิต ได้ผลลัพธ์เป็นเวกเตอร์ **c**

กรณีช่องสัญญาณ BCH พหุนามที่ใช้คำนวณบิต CRC คือ g_{CRC24C} ซึ่งจะได้บิต CRC ความยาว $L=24$ บิต เวกเตอร์ **a** ความยาว $A=A_{\min}=A_{\max}=32$ บิต จะถูกสแครมเบิลก่อนหน้ากระบวนการเข้ารหัสช่องสัญญาณ โดยการสแครมเบิลคือการนำสองเวกเตอร์มาทำการกระบวนการเอ็กซ์คลูซีฟออร์ จากนั้นจะเข้ารหัส CRC ตามปกติ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นเวกเตอร์ **c** ความยาว $K=56$ บิต

กรณีช่องสัญญาณ DCI พหุนามที่ใช้คำนวณ CRC คือ g_{CRC24C} ซึ่งจะได้บิต CRC ความยาว $L=24$ บิต การเข้ารหัส CRC จะแตกต่างจากการเข้ารหัส CRC แบบทั่วไป โดยตัวตั้งของการคำนวณ CRC จะนำเวกเตอร์ 1 ขนาดเท่ากับ ความยาวของบิต CRC ไว้ด้านหน้าและตามด้วยเวกเตอร์ **a** ความยาว A บิต (ซึ่งต่างจากวิธีทั่วไปที่จะนำเวกเตอร์ **a** ไว้ด้านหน้าและตามหลังด้วยเวกเตอร์ 0 ขนาดเท่ากับ ความยาวบิต CRC) เมื่อคำนวณบิต CRC จะนำบิต CRC ต่อด้านหลังเวกเตอร์ **a** ตามปกติ เวกเตอร์ **a** สามารถมีความยาวตั้งแต่ $A_{\min}=1$ ถึง $A_{\max}=140$ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นเวกเตอร์ **c**

3.2.3 การสแครมเบิล CRC

เวกเตอร์ **c** จากกระบวนการก่อนจะถูกสแครมเบิลเพื่อให้มีคุณสมบัติ (blind detection หรือ blind decoding) (Condo, Hashemi, & Gross, 2017) ของการส่งข้อมูลระหว่าง radio access network (RAN) และอุปกรณ์ผู้ใช้งาน (user equipment: UE) ในการส่งข้อมูลควบคุมผ่านช่องสัญญาณ DCI อุปกรณ์ฝั่ง RAN จะไม่มีการใส่ข้อมูลส่วนหัว (header) เพื่อระบุตัวตนของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน แต่จะมีการสแครมเบิลด้วยรหัสเฉพาะตัว ซึ่งเป็นรหัสเฉพาะตัวของอุปกรณ์ที่ต้องการสื่อสาร จากนั้นอุปกรณ์ RAN จะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ผู้ใช้งาน จากนั้นอุปกรณ์ของผู้ใช้งานจะทำการถอดรหัสข้อมูลแบบ blind detection การสแครมเบิลจะทำให้ข้อมูลที่ตรงกับอุปกรณ์ที่ต้องการสื่อสารมีโอกาสถอดรหัสผิดสูง และข้อมูลที่ตรงกับอุปกรณ์ที่ต้องการสื่อสารสามารถถอดรหัสถูกต้อง ซึ่งรหัสเฉพาะดังกล่าวจะถูกกำหนดโดย radio network temporary identifier (RNTI) โดยเทคนิค blind detections ดังกล่าวมีการใช้งานตั้งแต่มาตรฐาน 4G

กรณีช่องสัญญาณ DCI เวกเตอร์ **a** ที่มีการเข้ารหัส CRC 24 บิต c_{A+8}^{A+L-1} (บิต CRC 16 บิตท้ายสุด) จะถูกสแครมเบิลด้วยบิต RNTI ความยาวที่เท่ากัน 16 บิต ซึ่งบิต RNTI จะถูกเลือกจากประเภทของช่องสัญญาณและประเภทหน้าที่ของข้อมูล สำหรับช่องสัญญาณ BCH และ UCI กระบวนการสแครมเบิลนี้จะไม่ทำงาน โดยเวกเตอร์ **c** จะส่งต่อไปยังกระบวนการแทรกสลับ CRC ในลำดับถัดไป

3.2.4 การแทรกสลับ CRC

เวกเตอร์ **c** ที่ผ่านกระบวนการก่อนหน้าจะถูกแทรกสลับตามลำดับ (3GPP, 2017, ดังตารางที่ 5.3.1.1-1) เพื่อลดระยะเวลาในการถอดรหัสด้วยเทคนิค early termination (Chen, Chen, Jayasinghe, Du, & Tan, 2017) ซึ่งจะหยุดการถอดรหัสระหว่างทาง หากพบความผิดพลาดระหว่างการถอดรหัส

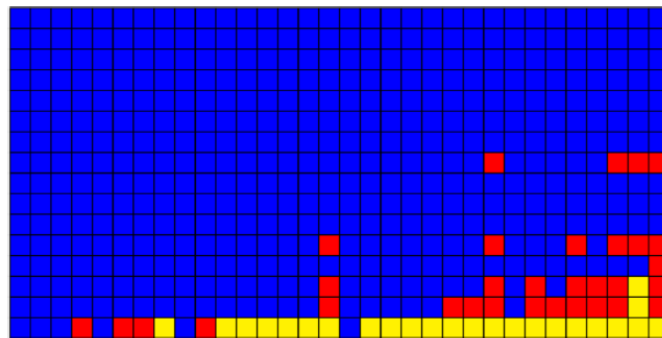
กรณีช่องสัญญาณ BCH และ DCI กระบวนการนี้จะทำงานและกำหนดให้ $I_L=1$ เนื่องจากเวกเตอร์ **a** สามารถมีความยาวได้หลากหลาย ดังนั้นเวกเตอร์ **c** จึงไม่จำเป็นต้องมีขนาดเท่ากับ $K_L^{\max}=164$ บิต วิธีการแทรกสลับจะนำเวกเตอร์ **c** ต่อท้ายด้วยบิตว่าง (null) จนมีความยาวเท่ากับ $K_L^{\max}$ จากนั้นทำการแทรกสลับตามลำดับตามเอกสาร (3GPP, 2017, ดังตารางที่ 5.3.1.1-1) และนำ

บิตว่างออกจากเวกเตอร์แทรกสลับเพื่อจะได้ผลลัพธ์เป็นเวกเตอร์ c' สำหรับช่องสัญญาณ UCI กระบวนการนี้จะไม่ทำงานและกำหนดให้ $I_{LL} = 0$ เวกเตอร์ c จะผ่านไปยังกระบวนการลำดับถัดไป

3.2.5 การลำดับช่องสัญญาณย่อย

ระบบจะทำการสร้างรหัสโพลาร์ ซึ่งเป็นเวกเตอร์ u ความยาว N บิต โดยการเลือกตำแหน่งของบิตซ้ำแข็ง Q_F และบิตข้อมูล Q_I บิตข้อมูลหรือเวกเตอร์ c (หรือ c') จากกระบวนการก่อนจะถูกวางไว้ในตำแหน่งบิตข้อมูล ส่วนตำแหน่งบิตซ้ำแข็งจะถูกกำหนดค่าเป็นบิต 0 การเลือกความยาว N จะมีใช้สมการที่ 1 2 และ 3 โดยจะเลือกค่า n สุดท้ายเพื่อให้ได้ความยาว $N = 2^n$ การเลือกตำแหน่งของบิตซ้ำแข็งจะสอดคล้องกับเงื่อนไขการปรับอัตราหัส รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการลำดับช่องสัญญาณย่อยของช่องสัญญาณ BCH ซึ่งสามารถมีความยาว A หรือ K ได้เพียงค่าเดียวตามตารางที่ 2

การเลือกลำดับช่องสัญญาณจากพิจารณาจากการปรับอัตราหัสและลำดับความน่าเชื่อถือช่องสัญญาณ โดยลำดับความน่าเชื่อถือของช่องสัญญาณจะเป็นลำดับคองที่ (He et al., 2017) ซึ่งแตกต่างจากรหัสโพลาร์ทั่วไปที่ลำดับความน่าเชื่อถือของช่องสัญญาณแตกต่างกันออกไปในแต่ละคุณภาพช่องสัญญาณหรือสัญญาณรบกวน ข้อดีของลำดับความน่าเชื่อถือช่องสัญญาณที่เป็นลำดับคองที่จะช่วยลดความซับซ้อนในการเข้ารหัสโพลาร์ได้เป็นอย่างมาก



รูปที่ 2 ตัวอย่างการลำดับช่องสัญญาณย่อยสำหรับช่องสัญญาณ BCH ของเวกเตอร์ c' ความยาว $K = 56$ และเวกเตอร์ u ความยาว $N = 2^n = 512$ โดยการปรับอัตราหัส $E = N$ สี่น้ำเงิน สีแดงและสีเหลืองคือบิตซ้ำแข็ง บิตข้อมูลและบิต CRC ตามลำดับ

1) การเลือกตำแหน่งบิตซ้ำแข็งสำหรับทุกช่องสัญญาณ สรุปขั้นตอนได้ 2 ขั้นตอนดังนี้

1.1) เลือกตำแหน่งบิตซ้ำแข็งสำหรับการปรับอัตราหัส หาก $K/E \leq 7/16$ จะปรับอัตราหัสด้วยการฟังก์เจอร์ ซึ่งจะกำหนดบิตซ้ำแข็งที่ T ตำแหน่งแรก ในกรณีอื่นจะปรับอัตราหัสด้วยการช็อดเทน ซึ่งจะกำหนดบิตซ้ำแข็งที่ $U = N - E$ ตำแหน่งสุดท้าย T คำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$T = \begin{cases} \left\lceil \frac{3}{4}N - \frac{E}{2} \right\rceil - 1 & \text{หาก } E \geq \frac{3}{4}N \\ \left\lceil \frac{9}{16}N - \frac{E}{4} \right\rceil - 1 & \text{อื่น ๆ} \end{cases} \quad (4)$$

สาเหตุที่ใช้ความยาว T เพิ่มเติมจาก U เพื่อป้องกันไม่ให้บิตข้อมูลถูกฟังก์เจอร์ไปในการปรับอัตราหัส

1.2) หากจำนวนบิตซ้ำแข็งสำหรับการปรับอัตราหัสยังมีขนาดไม่เกินจำนวนบิตซ้ำแข็งที่ควรมี จะทำการกำหนดตำแหน่งบิตซ้ำแข็งเพิ่มเติมตามจำนวนที่เหลือและกำหนดตามลำดับความน่าเชื่อถือช่องสัญญาณตามเอกสาร (3GPP, 2017, ดังตารางที่ 5.3.1.2-1) ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการเลือกตำแหน่งบิตซ้ำแข็งตามลำดับความน่าเชื่อถือได้ 2 ขั้นตอนดังนี้

1.2.1) เลือกลำดับช่องสัญญาณ Q จากต่ำ (ค่าน้อย) ไปสูง (ค่ามาก) (ลำดับตามตารางไม่จำเป็นต้องติดกัน) ตามความยาวคาร์ทาส์ N ซึ่งจะได้ลำดับความน่าเชื่อถือ $w(Q)$ ที่คู่กับลำดับช่องสัญญาณ

1.2.2) ตำแหน่งของบิตแก้ไขจะอยู่ในตำแหน่งของช่องสัญญาณที่คู่กับลำดับความน่าเชื่อถือที่ต่ำที่สุดตามจำนวนบิตแก้ไข $|Q_F|$ ที่ต้องการ

2) การเลือกจำนวนช่องสัญญาณย่อย

กรณีช่องสัญญาณ UCI ที่มีเงื่อนไข $12 \leq A \leq 19$ จะมีการใช้งานบิตพาริตี ซึ่งตำแหน่งของบิตพาริตี Q_{PC} จะถูกแทรกไปในบิตข้อมูลจำนวน $n_{PC} = 3$ บิต หากกรณีเงื่อนไข $E - A \leq 175$ จะเลือกจากตำแหน่งที่ลำดับความน่าเชื่อถือต่ำที่สุด 3 บิตตามเอกสาร (3GPP, 2017, ดังตารางที่ 5.3.1.2-1) ภายในตำแหน่งของบิตข้อมูล แต่หากกรณีเงื่อนไข $E - A > 175$ จะเลือกจากตำแหน่งที่ลำดับความน่าเชื่อถือต่ำที่สุดเพียง 2 บิต โดยอีก 1 บิตพาริตีจะเลือกตำแหน่งจากตำแหน่งที่มีน้ำหนักแถวของเมทริกซ์ G_N ต่ำที่สุด ซึ่งหากมีตำแหน่งดังกล่าวมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง จะเลือกตำแหน่งดังกล่าวที่ความน่าเชื่อถือสูงที่สุดด้วย ทำให้จำนวนของบิตแก้ไขจะลดลงเหลือ $|Q_F| = N - (K + 3)$

สำหรับช่องสัญญาณ BCH DCI และ UCI ที่มีเงื่อนไข $A \geq 20$ จะไม่ใช้งานบิตพาริตี ซึ่งจะเลือกบิตแก้ไขตามจำนวน $|Q_F| = N - K$

3.2.6 การคำนวณบิตพาริตี

กรณีช่องสัญญาณ UCI หากช่องสัญญาณ UCI มีการใช้งานบิตพาริตี (Zhang et al., 2018) หลังจากการเลือกตำแหน่งของบิตพาริตีจำนวน 3 บิตแล้ว การคำนวณบิตพาริตีสามารถทำได้โดยใช้ปริมาตรวนซ้ำขนาด 5 บิต โดยตั้งค่าบิตเริ่มต้นเป็นบิต 0 โดยบิตพาริตีจะคำนวณโดยการเอ็กซ์คลูซีฟกับบิตลำดับหน้าเว้นครั้งละ 5 บิต โดยทำการวนการเอ็กซ์คลูซีฟเฉพาะบิตข้อมูลซึ่งไม่รวมบิตพาริตีลำดับก่อนและไม่รวมบิตแก้ไข สามารถสรุปการคำนวณบิตพาริตี u_i ได้ดังสมการที่ 5

$$u_i = \bigoplus_{j=\lfloor i_{PC}/5 \rfloor}^{q-1} u_{5j+p} \quad (5)$$

โดยที่ $q = \lfloor i/5 \rfloor$ $p = \text{mod}(i, 5)$ และ $i_{PC} \in Q_{PC}$ คือค่าตำแหน่งบิตพาริตีสูงสุดที่น้อยกว่า i เมื่อ $\text{mod}(i_{PC}, 5) = p$ หากไม่มีค่าของตำแหน่งพาริตีจะกำหนดให้ $i_{PC} = 0$ จากนั้นเวกเตอร์ $\mathbf{u}$ จะถูกส่งผ่านไปยังกระบวนการเข้ารหัสโพลาร์ในลำดับถัดไป

สำหรับช่องสัญญาณ BCH และ DCI กระบวนการนี้จะไม่ทำงาน เวกเตอร์ $\mathbf{u}$ จากกระบวนการก่อนหน้าจะถูกส่งผ่านไปยังกระบวนการเข้ารหัสโพลาร์ในลำดับถัดไป

3.2.7 การเข้ารหัสโพลาร์

การเข้ารหัสโพลาร์ (Arıkan, 2009, pp 3051-3073) สามารถดำเนินการทางคณิตศาสตร์โดยสมการที่ 6

$$\mathbf{d} = \mathbf{uG}_N \quad (6)$$

โดยที่เมทริกซ์กำเนิด (generator matrix) แทนด้วย $\mathbf{G}_N = \mathbf{G}_2^{\otimes n}$ เป็นผลคูณไครเน็กเกอร์ (Kronecker product) และ $\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$

มีนัยพุดคือ $\mathbf{u}$ ความยาว N บิต เมื่อดำเนินการเข้ารหัสจะได้ผลลัพธ์เป็นคาร์ทาส์ $\mathbf{d}$ ความยาว N ในทางปฏิบัติสามารถดำเนินการได้โดยตัวดำเนินการเอ็กซ์คลูซีฟ โครงสร้างการเข้ารหัสสามารถขยายได้ในลักษณะเรียกซ้ำ (recursive) จำนวนสองเท่าได้เรื่อย ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ความยาวคาร์ทาส์ต้องมีขนาด $N = 2^n$ บิต

3.2.8 การแทรกสลับบล็อกย่อย

เวกเตอร์ $\mathbf{d}$ ความยาว N บิต จากกระบวนการก่อนหน้าจะถูกแบ่งเป็น 32 บล็อกย่อย แต่ละบล็อกย่อยมีความยาวเท่ากับ $N/32$ บิต กำหนดให้แทนลำดับบิตในการแทรกสลับด้วย $J(j)$ ผลลัพธ์จะได้เวกเตอร์ $\mathbf{y}$ ความยาว N บิต โดยที่ $y_j = d_{J(j)}$ และ $j = 0, 1, \dots, N-1$ สามารถคำนวณลำดับบิตของการแทรกสลับดังสมการที่ 7

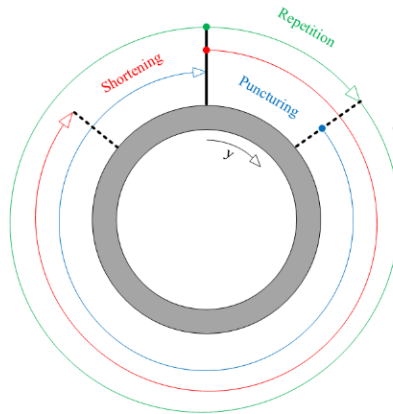
$$J(j) = \left(P \left(\left\lfloor 32 \frac{j}{N} \right\rfloor \right) \cdot \frac{N}{32} \right) + \text{mod} \left(j, \frac{N}{32} \right) \quad (7)$$

ลำดับการแทรกสลับ $P(i)$ แสดงในเอกสาร (3GPP, 2017, ตารางที่ 5.4.1.1-1) การแทรกสลับเกิดขึ้นเพื่อเรียงลำดับบิตในเวกเตอร์ $\mathbf{d}$ ความยาว N บิต เพื่อให้มั่นใจว่าบิตที่สำคัญยังคงอยู่หลังจากการตัดบิตออกในขั้นตอนการปรับอัตราหัส (Samsung, 2017)

3.2.9 การปรับอัตราหัส

การปรับอัตราหัสถูกกำหนดโดยค่ารหัส $\mathbf{e}$ ที่มีความยาว E บิต ซึ่งเป็นความยาวที่ถูกกำหนดจากการสื่อสารชั้นถัดไป กระบวนการนี้จะทำการตัดบิตออกจากเวกเตอร์ $\mathbf{y}$ ในกรณีที่ใช้การปรับอัตราหัสด้วยวิธีการพังก์เจอร์หรือการช็อตเทน หรือส่งบิตเวกเตอร์ $\mathbf{y}$ เข้าในกรณีที่ใช้การส่งซ้ำ รายละเอียดของการปรับอัตราหัสทั้ง 3 รูปแบบ สรุปได้ดังรูปที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การพังก์เจอร์ (puncturing) จะทำเมื่อ $E < N$ และ $K/E \leq 7/16$ โดยจะไม่ทำการส่งบิต $U = N - E$ แรก จะได้ผลลัพธ์เวกเตอร์ $\mathbf{e}$ ที่ความยาว E โดยที่ $e_i = y_{i+U}$ และ $i = 0, 1, \dots, E-1$



รูปที่ 3 บัฟเฟอร์วงกลมสำหรับการปรับอัตราหัส โดยให้วงกลมสีเทาเป็นความยาวของเวกเตอร์ $\mathbf{y}$ และลูกศรสีต่าง ๆ เป็นเวกเตอร์ $\mathbf{e}$ ที่จะเลือกบิตในเวกเตอร์ $\mathbf{y}$ ส่งไปยังกระบวนการถัดไป (Bioglio et al., 2020)

2) การช็อตเทน (shortening) จะทำเมื่อ $E < N$ และ $K/E > 7/16$ โดยจะไม่ทำการส่งบิต $U = N - E$ สุดท้าย จะได้ผลลัพธ์เวกเตอร์ $\mathbf{e}$ ที่ความยาว E โดยที่ $e_i = y_i$ และ $i = 0, 1, \dots, E-1$

3) การส่งซ้ำ (repetition) จะทำเมื่อ $E > N$ โดยจะส่งบิต $U = N - E$ แรกซ้ำ จะได้ผลลัพธ์เวกเตอร์ $\mathbf{e}$ ที่ความยาว E โดยที่ $e_i = y_{\text{mod}(i, N)}$ และ $i = 0, 1, \dots, E-1$

3.2.10 การแทรกสลับบิตรหัส

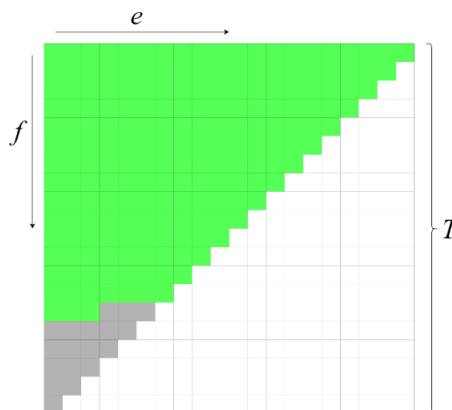
ก่อนการนำรหัสที่ผ่านการปรับอัตรารหัสส่งไปยังการสื่อสารชั้นถัดไปเพื่อทำการมอดูเลชัน เวกเตอร์ **e** จะถูกแทรกสลับอีกครั้งโดยการแทรกสลับแบบสามเหลี่ยมขั้นบันได การแทรกสลับนี้ถือมีความสำคัญเนื่องจากสามารถทำให้มีอัตราบิตผิดพลาดลดลงในการมอดูเลชันลำดับสูง (Chen, Niu, & Lin, 2013)

กรณีช่องสัญญาณ UCI การแทรกสลับจะทำงานและกำหนดให้ I_{BIL} รูปแบบการแทรกสลับจะสร้างจากโครงสร้างสามเหลี่ยมขั้นบันไดที่มีความกว้าง-ยาวขนาด $T \times T$ ดังรูปที่ 4 โดย T จะมีความยาวเท่ากับจำนวนเต็มค่าน้อยสุดที่ทำให้ $T(T+1)/2 \geq E$ เวกเตอร์ **e** แต่ละบิตจะถูกเขียนลงในโครงสร้างสามเหลี่ยมสามเหลี่ยมคว่ำดังรูปที่ 4 จากซ้ายไปขวาและมีทิศทางจากบนลงล่าง จากนั้นจะสร้างรหัสที่ผ่านการแทรกสลับบิตรหัส **f** โดยการอ่านค่าจากโครงสร้างสามเหลี่ยมจากทิศทางบนลงล่างและมีทิศทางจากซ้ายไปขวา ส่วนที่ว่างของโครงสร้างสามเหลี่ยมสามารถแทนค่าด้วย null ทำให้สามารถเขียนการแทรกสลับบิตรหัสได้ดังสมการที่ 8

$$v_{i,j} = \begin{cases} \text{null} & \text{หาก } i+j \geq T \text{ หรือ } j+iT-i((i+1)/2) \geq E \\ e_{j+iT-i((i+1)/2)} & \text{อื่น ๆ} \end{cases} \quad (8)$$

โดยที่ $i = 0, 1, \dots, T-1$ และ $j = 0, 1, \dots, T-1$

สำหรับช่องสัญญาณ BCH และ DCI กระบวนการนี้จะไม่ทำงานและกำหนดให้ $I_{BIL} = 0$ เวกเตอร์ **e** จากกระบวนการปรับอัตรารหัสจะถูกส่งไปยังการสื่อสารชั้นถัดไป



รูปที่ 4 รูปแบบการแทรกสลับแบบสามเหลี่ยมขั้นบันได (Bioglio et al., 2020)

3.2.11 การต่อบิตรหัส

กรณีช่องสัญญาณ UCI หากกระบวนการข้างต้นมีการแบ่งบิตรหัส หรือมีเงื่อนไขว่า $(A \geq 360 \wedge E \geq 1088) \vee A \geq 1013$ และ $I_{seg} = 1$ เวกเตอร์ **f** จำนวนสองเวกเตอร์จะถูกต่อกันตามลำดับเดิมและส่งไปยังการสื่อสารชั้นถัดไป

สำหรับช่องสัญญาณ BCH และ DCI กระบวนการนี้จะไม่ทำงานและมีตัวบ่งชี้ $I_{seg} = 0$ เวกเตอร์ **e** จากกระบวนการปรับอัตรารหัสจะถูกส่งและส่งไปยังการสื่อสารชั้นถัดไป

4. วิธีดำเนินการวิจัย/ระเบียบวิธีวิจัย/Research Methodology

บทความนี้จะจำลองระบบการเข้าและถอดรหัสโพลาร์ตามมาตรฐาน 5G ด้วยหลักการสุ่มชุดบิตข้อมูลซ้ำ ๆ หรือมอนเตคาร์โล (Monte Carlo) เพื่อทดสอบสมรรถนะอัตราบิตและเฟรมผิดพลาดในช่องสัญญาณ DCI และ UCI โดยอัตราบิตและเฟรมผิดพลาดถือเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดของรหัสช่องสัญญาณทั่วไปที่ดี โดยทำการสุ่มข้อมูลแบบไบนารีเป็นบิตข้อมูล

เวกเตอร์ **a** และถูกเข้ารหัสตามกระบวนการของแต่ละช่องสัญญาณดังรูปที่ 1 จากนั้นระบบจะถอดรหัสด้วยตัวถอดรหัส SCL ที่ขนาดลิสแตกต่างกัน

การจำลองจะกำหนดให้ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK เนื่องจากการมอดูเลตแบบ BPSK เป็นวิธีที่เรียบง่ายและสามารถบ่งบอกสมรรถนะของรหัสช่องสัญญาณได้โดยไม่ต้องแปลงค่าพลังงานเฉลี่ยของบิต แทนด้วย E_b ซึ่งการมอดูเลตแบบอื่นก็สามารถทำให้สมรรถนะของรหัสช่องสัญญาณสอดคล้องกันได้ด้วยการปรับพลังงานต่อบิตให้เท่ากันได้ โดยข้อมูลที่ผ่านการมอดูเลชันแล้วจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณเกาส์เซียนขาวววก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และค่าความแปรปรวนของช่องสัญญาณกำหนดด้วยค่าเอสเอ็นอาร์ (Signal-to-Noise Ratio :SNR) แทนด้วย $SNR(dB)$ ซึ่งนิยามโดย

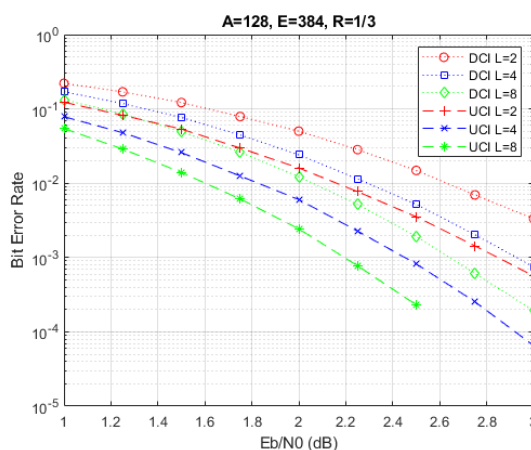
$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{E_b}{2\sigma^2 R} \right) \quad (9)$$

เมื่อ σ^2 คือความแปรปรวนของช่องสัญญาณ และ R คืออัตรารหัส

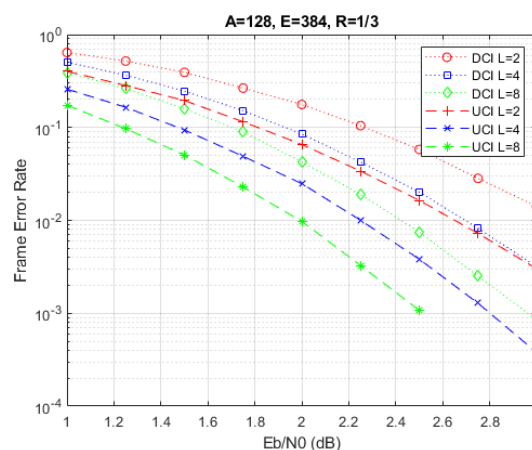
5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

รูปที่ 5 แสดงผลการจำลองสมรรถนะการแก้ไขความผิดพลาดทั้งในรูปแบบอัตราบิตผิดพลาดในรูป 5 (ก) และรูปแบบอัตราเฟรมผิดพลาดในรูป 5 (ข) และทั้งสองรูปมีสมรรถนะการแก้ไขความผิดพลาดของรหัสโพลาร์ในช่องสัญญาณ DCI และ UCI ผ่านการถอดรหัสด้วยตัวถอดรหัส SCL ขนาดลิส 2 4 และ 8 รหัสโพลาร์ของทั้งสองช่องสัญญาณมีความยาวเพย์โหลด $A=128$ และความยาวคำรหัส $E=384$ ที่อัตรารหัส $R=1/3$ ซึ่งเป็นค่าที่ทั้งสองช่องสัญญาณสามารถใช้ร่วมกันได้ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของรหัสโพลาร์ของทั้งสองช่องสัญญาณ

รูปที่ 5 (ก) เปรียบเทียบอัตราบิตผิดพลาดของช่องสัญญาณ DCI และ UCI โดยรหัสโพลาร์ของช่องสัญญาณ UCI ให้สมรรถนะที่ดีกว่ารหัสโพลาร์ของช่องสัญญาณ DCI 0.5 dB ที่อัตราบิตผิดพลาด 10^{-3} รูปที่ 5 (ข) เปรียบเทียบอัตราเฟรมผิดพลาดของช่องสัญญาณ DCI และ UCI ซึ่งให้แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับอัตราบิตผิดพลาด โดยรหัสโพลาร์ของช่องสัญญาณ UCI ให้สมรรถนะที่ดีกว่ารหัสโพลาร์ของช่องสัญญาณ DCI 0.5 dB ที่อัตราเฟรมผิดพลาด 10^{-3}



(ก) อัตราบิตผิดพลาด



(ข) อัตราเฟรมผิดพลาด

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบสมรรถนะการแก้ไขความผิดพลาดของช่องสัญญาณ DCI และ UCI ที่อัตรารหัส 1/3

6. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบรหัสโพลาร์-ในมาตรฐาน 5G บทความได้สรุปขั้นตอนการเข้ารหัสโพลาร์มาตรฐาน 5G ประกอบด้วย กระบวนการจำนวน 11 กระบวนการซึ่งแตกต่างกันตามเงื่อนไขของแต่ละช่องสัญญาณ รวมถึงบทความได้ให้เหตุผลของการออกแบบการเข้ารหัสขั้นตอนต่าง ๆ นอกจากนี้ บทความได้เปรียบเทียบสมรรถนะการแก้ไขความผิดพลาดของรหัสโพลาร์ในช่องสัญญาณ DCI และ UCI ซึ่งพบว่ารหัสโพลาร์ของช่องสัญญาณ UCI มีสมรรถนะที่ดีกว่าช่องสัญญาณ DCI ที่ความยาวคำรหัส อัตรารหัส และขนาดลิสต์เดียวกัน

7. เอกสารอ้างอิง

- 3rd Generation Partnership Project. (1999, April). Multiplexing and channel coding (FDD). 3GPP TS 25.212 V.1.0.0. Author.
- 3rd Generation Partnership Project. (2007, Mar). Multiplexing and channel coding. 3GPP TS 36.212 V.1.0.0. Author.
- 3rd Generation Partnership Project. (2017, Sep). Multiplexing and channel coding. 3GPP TS 38.212 V.1.0.0. Author.
- Arikan, E. (2009). Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels. *IEEE Transactions on information Theory*, 55(7), 3051-3073.
- Bioglio, V., Condo, C., & Land, I. (2020). Design of polar codes in 5G new radio. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(1), 29-40.
- Chen, J., Chen, Y., Jayasinghe, K., Du, D., & Tan, J. (2017, December). Distributing CRC bits to aid polar decoding. In 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps) (pp. 1-6). IEEE.
- Chen, K., Niu, K., & Lin, J. R. (2013, September). An efficient design of bit-interleaved polar coded modulation. In 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) (pp. 693-697). IEEE.
- Condo, C., Hashemi, S. A., & Gross, W. J. (2017). Blind detection with polar codes. *IEEE Communications Letters*, 21(12), 2550-2553.
- He, G., Beliore, J. C., Land, I., Yang, G., Liu, X., Chen, Y., ... & Tong, W. (2017, December). Beta-expansion: A theoretical framework for fast and recursive construction of polar codes. In GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference (pp. 1-6). IEEE.
- IMT-2020 TECH PERFREQ. (2016, Oct). Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT2020 Radio Interface(s). ITU-R M. Author.
- Niu, K., & Chen, K. (2012). CRC-aided decoding of polar codes. *IEEE communications letters*, 16(10), 1668-1671.
- Samsung. (2017, June). Design of Unified Rate-Matching for Polar Codes. Qingdao, China: 3GPP TSG RAN WG1 NR Ad-Hoc2, R1-1710750.
- Tal, I., & Vardy, A. (2015). List decoding of polar codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 61(5), 2213-2226.
- Zhang, H., Li, R., Wang, J., Dai, S., Zhang, G., Chen, Y., ... & Wang, J. (2018, May). Parity-check polar coding for 5G and beyond. In 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC) (pp. 1-7). IEEE.

ประวัติผู้เขียนบทความ



อนุสรณ์ วงศ์ษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 080 212 0235 E-mail: 62601094@kmitl.ac.th

กำลังศึกษาระดับปริญญาโท งานวิจัยที่สนใจได้แก่รหัสช่องสัญญาณในการสื่อสารและอุปกรณ์เคลื่อนที่



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เวธิต ภาคย์พิสุทธิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อีเมล watid.ph@kmitl.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ รหัสช่องสัญญาณและปัญญาประดิษฐ์ในระบบสื่อสารไร้สายและระบบบันทึกข้อมูล