

การปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าแบบผสมร่วมกับรหัสเทอร์โบสำหรับระบบสื่อสารแบบไร้สาย

Mixed Phase-Precoding and Applications with Turbo Coding for Wireless Communications

ดิสพล นำเฉียวกุล* เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์** และ อรรถสิทธิ์ หล้าสกุล*

*ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

**ห้องปฏิบัติการโทรคมนาคมและเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ปทุมธานี 12120

E-Mail: ditsapon@hotmail.com keattisak.sripimanwat@nectec.or.th klattasi@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอรูปแบบใหม่ของการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าสำหรับระบบสื่อสารแบบไร้สายที่มีการผสมสัญญาณเชิงเฟส ถูกเรียกว่าเป็น “การปรับแต่งสัญญาณแบบผสม” โดยได้พัฒนาจากวิธีการ Spiral curve เพื่อให้มีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนลดลง นอกจากนี้ ยังได้พัฒนารูปแบบเฉพาะของภาคตรวจจับข้อมูลสำหรับการใช้งานร่วมกับรหัสเทอร์โบขึ้นมาซึ่งผลจากการทดสอบโดยใช้โปรแกรมจำลองระบบสื่อสารทั้งในกรณีที่ใช้งานร่วมกับรหัสเทอร์โบและปราศจากการเข้ารหัสแสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าที่ได้นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้วิธีการ Spiral curve ในระบบสื่อสารที่มีลักษณะเดียวกัน ดังนั้น จึงนับเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

คำสำคัญ: การปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า รหัสเทอร์โบ การทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์

Abstract

This paper presents a novel precoding method for phase-modulated signals through multipath fading channel. It is named as “mixed phase-precoding method” that is developed on the principle of spiral curve phase precoding to have the proper performance. In order to apply this method for applications with turbo code, a specific detector is also proposed. Simulation results show that concatenation of turbo codes and mixed phase-precoding achieves the better gain compared to that of spiral curve with the same turbo coding schemes.

Keywords: Pre-Equalization, Turbo Codes, Intersymbol Interference

1. บทนำ

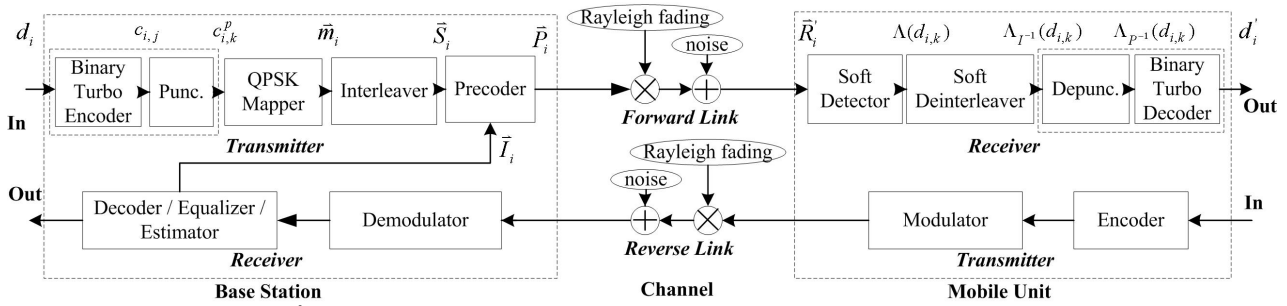
สำหรับระบบสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communications) การเกิดความคิดเฟี้ยนของข้อมูลซึ่งถูกส่งผ่านระบบเป็นปัญหาหนึ่งที่มีความ

นาย ดิสพล นำเฉียวกุล ได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจาก สถาบันพัฒนาบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โครงการพัฒนาเทคนิคใหม่ในการปรับปรุงคุณภาพข้อมูลสำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 และอนาคต

สำคัญ โดยพบว่า ผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Noise) และการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference; ISI) ที่เกิดขึ้นสืบเนื่องมาจากคุณสมบัติของระบบสื่อสารเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลรูปแบบต่าง ๆ ขึ้นมา ดังเช่นการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาด (Error Control Coding) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับกัน มีรูปแบบของรหัสหลายประเภทที่พัฒนาขึ้นมา เช่น รหัสคอนโวลูชัน (Convolution codes) [1] รหัส TCM (Trellis-Coded Modulation) [2] และ รหัสเทอร์โบ (Turbo Codes) [3] เป็นต้น สำหรับรหัสเทอร์โบ เป็นรูปแบบหนึ่งของรหัสที่มีความสำคัญ ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2536 โดย Claude Berrou, Avram Blin และ Pierre Glavieux เนื่องจากเป็นรหัสที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันความผิดพลาดของข้อมูลสูงมาก และได้รับการประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารหลายประเภท เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 และ ระบบสื่อสารในอวกาศ เป็นต้น

นอกจากนี้ หลักการทำงานของรหัสเทอร์โบยังได้ถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ขึ้นมา เช่น รหัส Turbo Trellis-Coded modulation (T-TCM) และการปรับแต่งสัญญาณแบบ Turbo Equalization เป็นต้น สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมา [4] ได้ดัดแปลงการทำงานของวิธีการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า (Pre-Equalization หรือ Precoding) แบบ Spiral curve [5] และ แบบ Dimension Partitioning [6] เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับรหัสเทอร์โบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งคุณสมบัติของการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้ อย่างไรก็ตาม ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate; BER) ของข้อมูลในระบบสื่อสารดังกล่าวยังคงมีค่าที่ค่อนข้างมาก และการทำงานของระบบยังต้องการชุดคำนวณเพิ่มเติมเพื่อแปลงข้อมูลให้สามารถใช้งานร่วมกับภาคถอดรหัสแบบเทอร์โบได้

ดังนั้น ในบทความนี้จึงได้นำเสนอการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าแบบผสม (Mixed Phase-Precoding) ซึ่งเป็นรูปแบบใหม่ของการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าสำหรับระบบสื่อสารที่มีการมอดูเลตแบบเฟสที่ได้พัฒนาต่อมาจากวิธีการ Spiral curve เพื่อให้มีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 1 แบบจำลองระบบสื่อสารที่ใช้รหัสเทอร์โบร่วมกับการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า

2. โครงสร้างระบบสื่อสาร

ลักษณะของระบบสื่อสารที่ใช้ในบทความนี้มีลักษณะดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นแบบจำลองของระบบที่มีการรับและส่งข้อมูลระหว่างสถานีกับอุปกรณ์เคลื่อนที่ ด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ในส่วนที่เคลื่อนที่ การปรับแต่งสัญญาณจะถูกคิดตั้งที่สถานีเท่านั้น การทำงานในส่วน Forward Link มีการนำข้อมูลดิจิทัล d_i มาผ่านกระบวนการเข้ารหัส (Encoding) แบบเทอร์โบเพื่อคำนวณข้อมูลคำรหัส (Code word) $c_{i,0}^p$ และ $c_{i,1}^p$ จากนั้นชุดข้อมูลคำรหัสจะถูกส่งต่อมาที่ภาค Symbol Mapper เพื่อคำนวณค่าจำนวนเชิงซ้อน $\bar{m}_i = Ae^{j\beta_i}$ ที่มีความสัมพันธ์กับชุดข้อมูลดังกล่าว เมื่อ A เป็นขนาดของสัญญาณข้อมูลซึ่งมีค่าคงที่ในกรณีที่มีการมอดูเลตแบบเฟส และ β_i เป็นเฟสของสัญญาณข้อมูล ต่อจากนั้น สัญญาณข้อมูล \bar{S}_i ที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการ Interleaving เพื่อลดผลของ Burst Error ถูกนำมาคำนวณร่วมกับข้อมูลที่แสดงถึงผลกระทบของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ ณ ขณะนั้นเพื่อหารูปแบบของสัญญาณ \bar{P}_i ที่จะถูกส่งออกไปผ่านระบบสื่อสาร สำหรับข้อมูลการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ของช่องสัญญาณ ณ เวลาต่าง ๆ นั้น จะสามารถนำข้อมูลของการทำงานในส่วน Reverse Link ในเวลาที่ใกล้เคียงกันได้ เนื่องจากช่องสัญญาณที่ใช้งานมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้ามาก (Slowly Fading Channel) จึงสามารถประมาณได้ว่ามีค่าที่เท่ากัน

เมื่อสัญญาณข้อมูล \bar{R}'_i ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับ ภาคตรวจจับข้อมูล (Detector) จะนำสิ่งที่ได้รับมาใช้เพื่อคำนวณข้อมูลซึ่งอยู่ในรูปแบบของค่า Logarithm of Likelihood Ratio (LLR), $\Lambda(d'_{i,k})$ เป็นข้อมูลที่ส่งต่อให้กับภาคถอดรหัสแบบเทอร์โบได้ มีลักษณะดังสมการ

$$\Lambda(d'_{i,k}) = \log \left[\frac{P(d_{i,k} = 1 | \bar{R}'_i)}{P(d_{i,k} = 0 | \bar{R}'_i)} \right] \quad (1)$$

โดยค่า LLR ที่ได้นี้จะต้องผ่านกระบวนการ Deinterleaving ก่อนส่งไปที่ภาคถอดรหัสแบบเทอร์โบเพื่อคำนวณค่าของชุดข้อมูลดิจิทัลที่รับได้ d'_i ต่อไป

3. หลักการสำหรับการพัฒนา

เมื่อกำหนดให้สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ ณ เวลาใด ๆ \bar{R}'_i เป็น

สัญญาณที่มีความผิดเพี้ยนเนื่องจากผลของสัญญาณรบกวนและการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\bar{R}'_i = \sum_{k=0}^{N-1} (a_{k,i} e^{j\phi_{k,i}} \bar{S}_{i-k}) + \bar{n}_i \quad (2)$$

\bar{S}_{i-k} คือเลขจำนวนเชิงซ้อนที่แสดงถึงสัญญาณข้อมูล ณ เวลา t_{i-k} N คือจำนวนของเส้นทางทั้งหมด a_k และ ϕ_k คือสัมประสิทธิ์การผิดเพี้ยนของขนาดและมุมในเส้นทางต่าง ๆ และ \bar{n}_i คือค่าของสัญญาณรบกวน ผลของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของสัญญาณที่ถูกส่งไปในอดีต \bar{I}_i สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\bar{I}_i = \sum_{k=1}^{N-1} (a_{k,i} e^{j\phi_{k,i}} \bar{S}_k) \quad (3)$$

เพื่อให้สัญญาณที่ภาครับสามารถนำมาผ่านกระบวนการตรวจจับแล้วได้รูปแบบของข้อมูลที่ถูกต้อง การปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าแบบ Spiral curve จึงได้นำสมการ Spiral curve เข้ามาช่วยในการคำนวณของภาคปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าและภาคตรวจจับข้อมูล โดยการทำงานที่ภาคตรวจจับข้อมูล จะมีการนำค่าขนาดและมุมของ \bar{R}'_i ที่รับได้มาคำนวณเพื่อหาค่าเฟสของข้อมูลที่ได้ออกการตรวจจับ β'_i ด้วยสมการ

$$\beta'_i = \phi'_i + \left(\frac{r'_i}{A} - 1 \right) C\pi \quad (4)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่ของสมการ Spiral curve อย่างไรก็ตาม การใช้งานในกรณีที่ตำแหน่งของ \bar{R}'_i มีค่าอยู่ใกล้กับจุดกำเนิดมากเกินไปอาจทำให้ข้อมูลที่ได้รับการตรวจจับเกิดความผิดเพี้ยนได้ง่ายเนื่องจากรูปแบบของสมการ Spiral curve ที่ใช้งานมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่จุดกำเนิด นอกจากนั้น เนื่องจากข้อมูลที่ได้ออกการตรวจจับของ Spiral curve เป็นข้อมูลที่แสดงถึงค่าเฟส ดังนั้นหากนำไปใช้ร่วมกับรหัสเทอร์โบจึงต้องมีการนำข้อมูลมาคำนวณใหม่อีกครั้งเพื่อให้ได้ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของค่า LLR แนวทางหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้คือการเปลี่ยนรูปแบบของสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณของทั้งภาคปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าและภาคตรวจจับข้อมูลให้สามารถคำนวณได้อย่างเหมาะสมในทุก ๆ กรณี ดังจะบรรยายในหัวข้อถัดไป

4. การทำงานของภาคปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าแบบผสม

สำหรับการทำงานของภาคปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าแบบผสมเพื่อกำเนิดสัญญาณที่ได้รับการปรับแต่ง \bar{P}_i จะเริ่มต้นจากการนำค่า I_k ของช่องสัญญาณ ณ เวลานั้นมาใช้คำนวณรูปแบบของสัญญาณทั้งหมดที่สามารถถูกตรวจจับได้ทีท่ากรับเมื่อระบบไม่มีผลของสัญญาณรบกวน ซึ่งถูกแสดงโดยใช้จุดต่าง ๆ ที่อยู่บนวงกลม ISI (ISI-Circle) ในระนาบของสัญญาณ (Signal Space) มีรัศมีเป็น a_0A และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ \bar{I}_i ดังสมการ

$$(a_0A)^2 = (\text{Re}(\bar{I}_i) - x)^2 + (\text{Im}(\bar{I}_i) - y)^2 \quad (5)$$

เมื่อ (x, y) เป็นพิกัดบนระนาบของสัญญาณ ต่อจากนั้น เฟสของสัญญาณข้อมูล β_i ถูกใช้เพื่อกำหนดสมการสำหรับกำเนิดสัญญาณ เป็นสมการเส้นตรงซึ่งขนานกับแกนจำนวนจริงที่มีค่าในแกนจินตภาพเป็น $y = \dots, y_{-1}, y_0, y_1, \dots$ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$y_z = zL_r + \frac{\beta_i L_r}{2\pi} \quad ; \quad z = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

เมื่อ L_r เป็นระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างเส้นตรงใด ๆ จากนั้นจะมีการคำนวณรากของสมการที่ (5) และ (6) เพื่อนำจุดตัดที่ได้จากการคำนวณ \bar{B}_p เพียงหนึ่งจุดไปใช้เพื่อคำนวณค่าของสัญญาณ \bar{P}_i

$$\bar{P}_i = Ae^{j\theta_i} = \bar{B}_p - \bar{I}_i \quad (7)$$

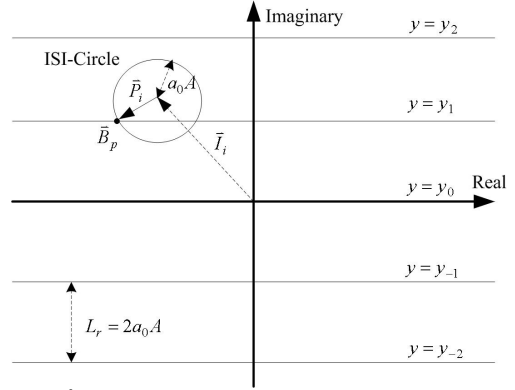
และเพื่อชดเชยผลของการผิดเพี้ยนทางเฟสจาก First path Fading เฟสของสัญญาณ \bar{P}_i จะถูกลบด้วย φ_0 ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร สำหรับการกำหนดค่าของตัวแปร L_r ในบทความนี้ได้กำหนดให้มีค่าเป็น $2a_0A$ เพื่อให้สามารถคำนวณรากระหว่างสมการ (5) และ (6) ได้ในทุกกรณี สำหรับการดำเนินงานของภาคตรวจจับข้อมูล มีการนำลักษณะของสัญญาณ \bar{R}'_i มาคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งบนแกนจินตภาพกับค่า β_i ดังสมการที่ (6) เพื่อกำหนดค่า β'_i โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\beta'_i = (\text{Im}(\bar{R}'_i) \bmod(L_r)) \frac{2\pi}{L_r} \quad (8)$$

เมื่อ $\text{Im}(\bar{R}'_i)$ คือค่าจินตภาพของ \bar{R}'_i และ $\bmod(x)$ คือฟังก์ชันมอดุโล

5. การประยุกต์ใช้ร่วมกับรหัสเทอร์โบ

สำหรับการกำเนิดข้อมูลที่ท่ากรับซึ่งอยู่ในรูปของค่า LLR จะต้องมีกร



รูปที่ 2 การทำงานของภาคปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า

ตารางที่ 1 ตัวแปรของการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าแบบต่าง ๆ

รูปแบบการปรับแต่งสัญญาณ	การกำหนดค่าของตัวแปร
Mixed Phase	$A = 1, L_r = 2a_0A$
Spiral curve	$A = 1, C = 1/a_0$
Dimension Partitioning	$A = 1, L = 1/1.3$

คำนวณค่าความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข $p(\bar{S}_i = Ae^{j\beta_x} | \bar{R}'_i)$ ในกรณีที่ มีการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีเฟสเป็น $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{M-1}$ เมื่อสัญญาณรบกวนมีการกระจายข้อมูลเป็นแบบเกาส์ (Gaussian Distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนเป็น σ_N^2 ค่าความน่าจะเป็นเหล่านี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$p(\bar{S}_i = Ae^{j\beta_x} | \bar{R}'_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \exp\left\{-\frac{\left(\text{Im}(\bar{R}'_i) - \left(z'L_r + \frac{\beta_x L_r}{2\pi}\right)\right)^2}{2\sigma_N^2}\right\} \quad (9)$$

เมื่อตัวแปร z' เป็นเลขจำนวนเต็มที่สามารถทำให้สมการต่อไปนี้เป็นจริง

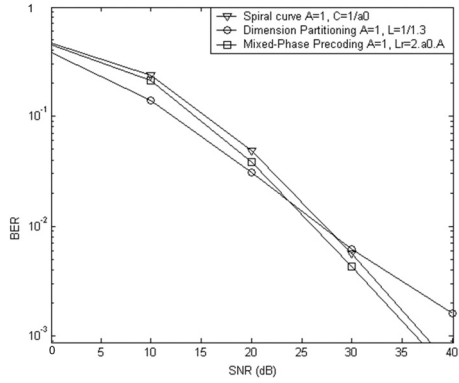
$$\left|\text{Im}(\bar{R}'_i) - \left[z'L_r + \frac{\beta_i L_r}{2\pi}\right]\right| \leq L_r / 2 \quad (10)$$

และจากค่าความน่าจะเป็นทั้งหมดที่ได้รับจากการคำนวณ จะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณค่า LLR จากสมการ

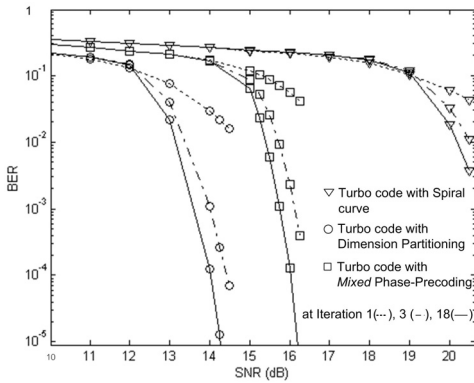
$$\Lambda(d'_{i,k}) = \log \left[\frac{\sum_{j=1}^{M/2} p(\bar{S}_i = Ae^{j\beta_{j,d_{i,k}=1}} | \bar{R}'_i)}{\sum_{j=1}^{M/2} p(\bar{S}_i = Ae^{j\beta_{j,d_{i,k}=0}} | \bar{R}'_i)} \right] \quad (11)$$

6. ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบคุณสมบัติของการการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้า ที่นำเสนอมีลักษณะดังรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดสอบในกรณีที่ไมใช้การเข้ารหัสและใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบตามลำดับ เพื่อส่งสัญญาณข้อมูล QPSK ผ่านช่องสัญญาณที่มีผลของสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3 ผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อการปรับแต่งสัญญาณ



รูปที่ 4 ผลการทดสอบการใช้งานร่วมกับรหัสเทอร์โบ

และมีเส้นทางในการส่งข้อมูล 2 เส้นทางที่มีความเข้มของสัญญาณที่ภาครับเท่ากัน (2-Rays with Equal Strength) และมีลักษณะการกระจายข้อมูลแบบ Rayleigh Fading โดยมีการพิจารณาสัญญาณทุก ๆ คาบเวลา T การทดสอบนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างวิธีการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าแบบ Dimension Partitioning แบบ Spiral curve และ วิธีการที่นำเสนอโดยกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 รหัสเทอร์โบที่ใช้งานมีค่า Generator Matrix เป็น $[23, 35]$ เข้ารหัสข้อมูลครั้งละ 1024 บิตด้วยอัตราการใช้รหัส (Code Rate) $1/2$ ใช้การถอดรหัสแบบ Log-MAP ภาค Interleaver ภายในชุดเข้ารหัสและถอดรหัสเป็นแบบ Pseudo-Random Interleaving และ ภาค Symbol Interleaver เป็นแบบ Block Interleaving ซึ่งจากผลการทดสอบทั้งสองแสดงให้เห็นว่าระบบสื่อสารที่ใช้การปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าแบบผสมมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้วิธีการ Spiral curve ในระบบสื่อสารลักษณะเดียวกัน แต่หากเปรียบเทียบกับวิธีการ Dimension Partitioning แล้ว วิธีการที่ได้นำเสนอยังคงมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่มากกว่า ดังนั้น จึงต้องมีการพัฒนาต่อไปเพื่อให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

7. สรุป

บทความนี้แนะนำรูปแบบใหม่ของการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าสำหรับใช้ในระบบสื่อสารแบบไร้สายที่มีการมอดูเลตแบบเฟส โดยได้

พัฒนามาจากวิธีการ Spiral curve เพื่อให้มีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้น และเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับรหัสเทอร์โบได้อย่างเหมาะสม รูปแบบเฉพาะของภาคตรวจจับข้อมูลที่สามารถกำเนิดข้อมูลที่เป็ค่า LLR จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น ผลจากการทดสอบทั้งในกรณีที่ใช้งานร่วมกับรหัสเทอร์โบและปราศจากการเข้ารหัสแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้วิธีการ Spiral curve ในระบบสื่อสารลักษณะเดียวกัน แต่เนื่องจากค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบสื่อสารยังคงมีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้เหมาะสมมากยิ่งขึ้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. David Forney, JR., et. al., "Convolution Codes I: Algebraic Structure", *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. IT-16, No. 6, Nov., 1970.
- [2] G. Ungerboeck, "Trellis-Coded Modulation with redundant signal sets Part I: Introduction", *IEEE Comm. Magazine*, Vol. 25, No. 2.
- [3] C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes", *Proc. ICC'93*, pp. 1064-1070, May, 1993.
- [4] D. Chumchewkul, K. Sripimanwat, A. Lasakul, I. Fair, P. Thitimajshima, "Pre-Equalized QPSK-Signal with Turbo Codes for Wireless-ISI Channel", *3rd International Symposium on Turbo Codes & Related topics*, Breast, France, September, 2003.
- [5] W. Zhuang, V. Huang, "Phase precoding for frequency-selective Rayleigh and Rician slowly fading channels", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 46, pp. 129-142, Feb., 1997.
- [6] Y. Chan, W. Zhuang, "Channel Precoding for Indoor radio Communications Using Dimension Partitioning", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 48, No. 1, Jan., 1999.



นาย ดิศพล จำเริญกุล สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ณ สถาบันแห่งชาติ มีความสนใจทางด้านระบบสื่อสารไร้สาย และการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาด



ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก Telecommunications program จาก Asian Institute of technology (AIT) ปัจจุบันเป็นนักวิจัย ณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) มีความสนใจทางด้านระบบสื่อสารไร้สาย Digital & Quantum และ Modulation & Coding



ผศ.ดร. อรรถสิทธิ์ หล้าสกุล สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก Tokai University ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจทางด้าน Digital Signal และ Image Processing