

## การศึกษาความทนทานต่อสัญญาณรบกวนเฟสในระบบสื่อสารหลายกิกะบิต

### โดยใช้ STBC MIMO-OFDM สำหรับ WiFi-8

#### Phase Noise Tolerance of Multi Gigabit Communication using STBC MIMO-OFDM for WiFi-8

บุษกร บุญศรี<sup>1</sup> และ กฤษณะพงศ์ พันธศรี<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

bussakorn.bu@rmuti.ac.th kidsanapong.pu@rmuti.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การวิเคราะห์ความทนทานต่อสัญญาณรบกวนเฟสในการสื่อสารความเร็วหลายกิกะบิต โดยใช้การเข้ารหัสแบบบล็อกพื้นที่-เวลา ร่วมการกรอกล้ำสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก (Space-time block code OFDM) โดยพิจารณาการนำไปใช้งานย่านความถี่สำหรับมาตรฐาน Wi-Fi-8 โดยใช้ MATLAB ในการจำลองแบบ จากการศึกษาผลกระทบตั้งแต่ความกว้างเส้น (Linewidth) ตั้งแต่ 10 100 200 300 400 ถึง 500 เฮิร์ต และใช้การกรอกล้ำสัญญาณที่ 64-QAM 256-QAM 1024-QAM จากผลการจำลองพบว่าความกว้างเส้นมีผลกระทบโดยตรงต่อระบบที่นำเสนอ และมีอัตราบิดเบือนผลลดน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราบิดเบือนผลลดกับสัญญาณรบกวน โดยอัตราบิดเบือนผลลดสำหรับ 64-QAM 256-QAM 1024-QAM ที่  $10^{-7}$   $10^{-4}$  และ  $10^{-2}$  ตามลำดับ เมื่อมีค่า SNR 40dB พบว่าระบบที่นำเสนอมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนเฟส

**คำสำคัญ:** การส่งข้อมูลหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต การเข้ารหัสแบบบล็อกในมิติพื้นที่-เวลา โครงสร้างอาลาโมติ การกรอกล้ำสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก อะลาโมติ Wi-Fi-8

#### Abstract

This paper investigates the phase noise tolerance of multi-gigabit communication systems, employing space-time block coding (STBC) multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing (MIMO-OFDM) for the frequency band in Wi-Fi 8 standard. The system performance was evaluated by MATLAB numerical simulations with considering the oscillator linewidths of 10, 100, 200, 300, 400, and 500 Hz. The QAM order of 64-QAM, 256-QAM, and 1024-QAM are adopted. Simulation results reveal that the linewidth exerts only a marginal impact on the proposed system, which consistently achieves low bit error rates (BER). When evaluating BER performance with respect to the signal-to-noise ratio (SNR), the BER values for 64-QAM, 256-QAM, and 1024-QAM are observed to be  $10^{-7}$ ,  $10^{-4}$  and  $10^{-2}$ , respectively, SNR = 40 dB. These findings confirm that the proposed system exhibits high robustness against phase noise.

**Keywords:** MIMO STBC OFDM Alamouti Wi-Fi-8

#### 1. บทนำ

การสื่อสารไร้สายในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น Wi-Fi 8 (IEEE 802.11nb) [1] มีความต้องการอย่างสูงในด้านความเร็วและประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูล เพื่อรองรับการใช้งานที่หลากหลาย เช่น การสตรีมมิงวิดีโอ (Streaming video) ความละเอียดสูง การเล่นเกมออนไลน์ และเทคโนโลยีโลกเสมือน (Virtual Reality: VR) อีกทั้งยังรองรับความเร็วสูงระดับกิกะบิต แต่การส่งข้อมูลเหล่านี้ต้องเผชิญกับข้อจำกัดทางกายภาพหลายอย่าง เช่น การสูญเสียสัญญาณจากการจางหายของสัญญาณ (Fading) ซึ่งเกิดจากการที่คลื่นวิทยุสะท้อนจากวัตถุต่าง ๆ ทำให้สัญญาณที่มาถึงภาครับมีหลายเส้นทางและมีเฟสที่แตกต่างกัน และสัญญาณรบกวน (Noise) ที่มาจากสภาพแวดล้อม ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของข้อมูลลดลง

เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ เทคโนโลยีการส่งข้อมูลหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต (Multiple input multiple output: MIMO) [2] ร่วมกับการกรอกล้ำสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก (Orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) [3] จึงถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มอัตราข้อมูลและความทนทานของระบบโดยใช้สายอากาศหลายตัวทั้งที่ภาคส่ง (Transmitter) และภาครับ (Receiver) เทคนิคนี้ใช้ประโยชน์จากแนวคิดที่เรียกว่า ความหลากหลายเชิงพื้นที่ (Spatial Diversity) กล่าวคือ หากสัญญาณที่ส่งจากสายอากาศต้นหนึ่งได้รับผลกระทบจากการสูญเสียสัญญาณจากการจางหายของสัญญาณ สัญญาณที่ส่งจากสายอากาศอีกต้นหนึ่งอาจยังคงรับได้ดี เพื่อให้ MIMO สามารถใช้ประโยชน์จากความหลากหลายเชิงพื้นที่ได้อย่างเต็มที่ จึงมีการนำ การเข้ารหัสแบบบล็อกในมิติพื้นที่-เวลา (Space-time Block Coding: STBC) [4] มาใช้ เทคนิคนี้จะกระจายข้อมูลชุดเดียวกันในเชิงเวลา (Time) และพื้นที่ (Space) เพื่อให้ภาครับสามารถถอดรหัสและกู้คืนข้อมูลได้แม่นยำยิ่งขึ้นแม้ว่าช่องสัญญาณจะมีการจางหายอย่างรุนแรง ระบบ STBC สามารถมีขนาดที่แตกต่างกัน เช่น 2x1 (ภาคส่ง 2 สายอากาศ ภาครับ 1 สายอากาศ) และ 2x2 (ภาคส่ง 2 สายอากาศ ภาครับ 2 สายอากาศ) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม OFDM มีผลกระทบต่อนสัญญาณรบกวนเฟส (Phase noise: PN) ทำให้ความถี่ของแต่ละคลื่นพาห์ (Carrier) หายไป ทำให้เกิด การแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห์ (Inter carrier interference: ICI) ดังแสดงได้โน [5] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

Y. Wu, และคณะนำเสนอผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเฟสในเครือข่าย massive MIMO-OFDM แบบไร้เซลล์เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์กำเนิดความถี่ (Local oscillators) ทั้งที่จุดเชื่อมต่อ (APs) และอุปกรณ์ของผู้ใช้ (UEs) สัญญาณรบกวนเฟสนี้ทำให้ความถี่ของคลื่นพาหะใน OFDM หายไป ก่อให้เกิด ICI นอกจากนี้เฟสยังทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio: SNR) [6] ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพสเปกตรัม (Spectral efficiency) ของระบบลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่มขึ้น ดังนั้น การประเมินและชดเชยเฟส จึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบเครือข่ายให้ประหยัดและเชื่อถือได้ซึ่งพบว่าสัญญาณรบกวนเฟสมีผลอย่างมาก

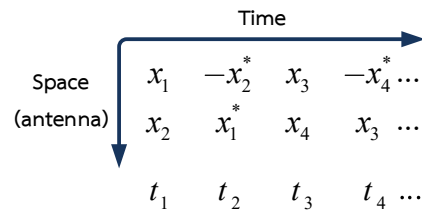
บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทนทานต่อสัญญาณรบกวนเฟสของระบบ STBC 2x2 ร่วมกับ OFDM ซึ่งยังมีนักวิจัยคำนึงถึงการทำงานจุดดังกล่าวไม่มากนัก บทความนี้ยังนำเสนอการประมาณค่าสัญญาณรบกวนด้วยวิธีที่สามารถสร้างจริงได้ คือวิธีการเฟสผิดพลาดร่วม (Common phase error: CPE) โดยใช้วิธีการจำลองแบบ จากผลการจำลองแบบพบว่า เมื่อ SNR เพิ่มขึ้น อัตราบิดเบือนลดลงตามไปด้วย ซึ่งในบทความนี้จำลองการกล้ำสัญญาณ 64 QAM และ 1024-QAM และเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างเส้นที่เพิ่มมากขึ้น อัตราบิดเบือนมีค่าน้อย

## 2. ระบบ STBC สำหรับ Wi-Fi 8

การเข้ารหัสแบบบล็อกพื้นที่-เวลา (Space-time Block coding : STBC) โดยใช้เทคนิคโครงสร้างอาลามูตี (Alamouti) [7] เป็นวิธีการที่ใช้ในการเพิ่มอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio: SNR) สำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยส่งข้อมูลหลายชุดด้วยสายอากาศมากกว่าหนึ่งต้น ทำให้สามารถเพิ่มกำลังส่ง โดยอาศัยช่องสัญญาณการจางหลายหลายเส้นทาง เช่นแบบเรย์ลี (Rayleigh Multipath Channel)

จากรูปที่ 1 พิจารณาที่ขนาด  $2 \times 2$  พบว่ามีการทำงานโดยการส่งข้อมูลชุดเดียวกันในช่วงเวลาที่ต่างกัน เมื่อ  $x_1$  คือข้อมูลที่ส่งจากสายอากาศที่หนึ่ง  $x_2$  คือข้อมูลที่ส่งจากสายอากาศที่สอง  $t_1$  คือช่วงเวลาที่ยาวและ  $t_2$  คือ ช่วงเวลาที่สั้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถอธิบาย STBC MIMO-OFDM ได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยภาคส่งประกอบไปด้วย 2 สายอากาศสำหรับส่งข้อมูล และภาครับประกอบไปด้วย 2 สายอากาศสำหรับรับข้อมูล สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (1) - (2)



รูปที่ 1 การเข้ารหัสแบบบล็อกพื้นที่-เวลา

$$x_1 \quad n \quad \rightarrow \quad x_1 \quad n \cdot h_{11} \quad n + x_2 \cdot h_{12} \quad n \cdot P_N^1 \quad N + Z \quad n \quad (1)$$

$$x_2 \quad n \quad \rightarrow \quad x_1 \quad n \cdot h_{21} \quad n + x_2 \cdot h_{22} \quad n \cdot P_N^2 \quad N + Z \quad n \quad (2)$$

ดังนั้นสัญญาณที่ได้รับได้ของระบบ STBC-OFDM อธิบายได้สมการ

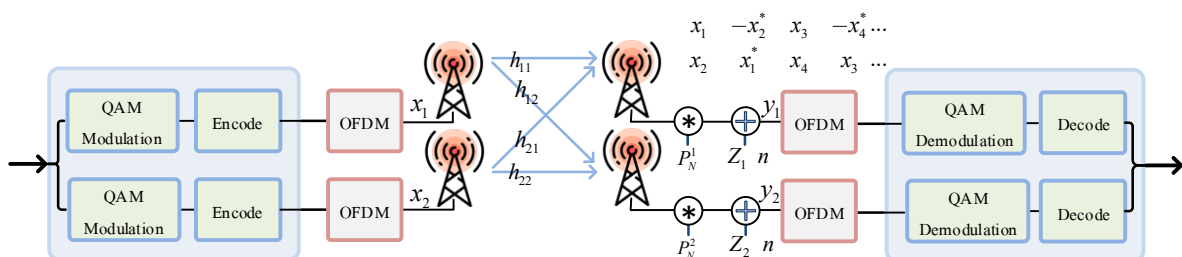
$$y_1 = x_1 \quad n \cdot h_{11} \quad n + x_2 \quad n \cdot h_{12} \quad n \cdot P_N^1 \quad n + Z \quad n \quad (3)$$

และ

$$y_2 = x_1 \quad n \cdot h_{21} \quad n + x_2 \quad n \cdot h_{22} \quad n \cdot P_N^2 \quad n + Z \quad n \quad (4)$$

โดยที่  $y_1$  คือ สัญญาณที่ได้รับได้ของภาครับที่สายอากาศที่หนึ่ง  $y_2$  คือ สัญญาณที่ได้รับได้ของภาครับที่สายอากาศที่ 2 และ \* คือ การคูณประสาน (Convolution)  $x_1 \quad n$  และ  $x_2 \quad n$  คือสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางโดเมนเวลา (Time domain) ที่ถูกส่งในสายอากาศที่หนึ่ง และสายอากาศที่สอง ตามลำดับ  $P_N^1 = e^{j\theta_1 \quad n}$   $P_N^2 = e^{j\theta_2 \quad n}$  คือ สัญญาณรบกวนทางเฟสเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม โดยมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และ  $\sigma^2 = 2\pi\nu T_s$  เมื่อ  $\nu$  คือความกว้างเส้น (Linewidth)  $T_s$  คือเวลาที่ใช้ในการซัดตัวอย่าง (Sampling)  $Z(n)$  คือสัญญาณรบกวน (Noise) มักนิยามเป็นสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (Additive white Gaussian noise: AWGN)  $h_{11} \quad n$  และ  $h_{12} \quad n$  คือช่องสัญญาณสำหรับสายอากาศที่หนึ่ง ส่งครั้งที่หนึ่ง และส่งครั้งที่สองตามลำดับ  $h_{21} \quad n$  และ  $h_{22} \quad n$  คือ ช่องสัญญาณสำหรับสายอากาศที่สอง ส่งครั้งที่หนึ่ง และส่งครั้งที่สอง ตามลำดับ

เมื่อได้สัญญาณ  $y_1$  และ  $y_2$  ที่ภาครับดังสมการที่ (3) - (4) จากนั้นแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Furrier Transform : FFT) [8] ที่สัญญาณที่ได้รับได้จากสมการที่ภาครับหนึ่ง (Rx1) จะได้ว่า



รูปที่ 2 ระบบ STBC-OFDM ที่ใช้ในการวิเคราะห์เฟส

$FFT(y_1)$  และที่ภาครับสอง (Rx2) จะได้ว่า  $FFT(y_2)$  ซึ่งสามารถหาผลของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วได้ดังนี้

$$Y_1 k = X_1 k \cdot H_{11} k + X_2 k \cdot H_{12} k * P_N^1 k + Z k \quad (5)$$

และ

$$Y_2 k = X_1 k \cdot H_{21} k + X_2 k \cdot H_{22} k * P_N^2 k + Z k \quad (6)$$

จากสมการข้างต้นระบบการสื่อสารที่ใช้คลื่นพาห์ (Carrier) ไม่สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนทางเฟสได้ ซึ่งมีผลกระทบมากสำหรับการสื่อสาร OFDM แต่อย่างไรก็ดีสัญญาณรบกวนเฟสนี้สามารถแก้ไขได้ที่ภาครับ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 3. การประมาณค่าและชดเชยเฟส

ในบทความนี้กำหนดให้รู้ค่า  $H_{11} H_{12} H_{21} H_{22}$  ที่เครื่องรับและในวิทยุนี้พิจารณาที่ใช้วงจรกำเนิดความถี่ (Oscillator) ตัวเดียวกันทั้งสายอากาศตัวที่หนึ่งและสองทำให้  $P_N^1 = P_N^2 = P_N$  และเวกเตอร์สัญญาณนำร่องที่รับได้มีค่าเป็น

$$Y_1^{Pilot} = X_1^{Pilot} \cdot H_{11} + X_2^{Pilot} \cdot H_{12} * P_N + Z \quad (7)$$

และ

$$Y_2^{Pilot} = X_1^{Pilot} \cdot H_{21} + X_2^{Pilot} \cdot H_{22} * P_N + Z \quad (8)$$

ทั้งนี้ที่  $k = 0$  และสามารถประมาณค่าเฟสรวมได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \tilde{P}_N^1(0) &= \frac{Y_1^{Pilot}}{X_1(k) \cdot H_{11}(k) + X_2(k) \cdot H_{12}(k)} \\ &= \tilde{P}_N(0) + \tilde{Z}_1 \end{aligned} \quad (9)$$

และ

$$\begin{aligned} \tilde{P}_N^2(0) &= \frac{Y_2^{Pilot}}{X_1(k) \cdot H_{21}(k) + X_2(k) \cdot H_{22}(k)} \\ &= \tilde{P}_N(0) + \tilde{Z}_2 \end{aligned} \quad (10)$$

เมื่อ

$$\tilde{Z}_1 = \frac{(ICI + Z_1)}{X_1(k) \cdot H_{11}(k) + X_2(k) \cdot H_{12}(k)} \quad (11)$$

และ

$$\tilde{Z}_2 = \frac{(ICI + Z_2)}{X_1(k) \cdot H_{21}(k) + X_2(k) \cdot H_{22}(k)} \quad (12)$$

เมื่อ  $Z$  คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาว (AWGN)  $ICI$  คือการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห์ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่ทำให้พลังงานของสัญญาณลดลง ซึ่งมีค่า

$$ICI = \sum_{p=0, p \neq k}^{N_{FFT}-1} X(p) P_N(k-p) \quad (13)$$

โดยที่  $N_{FFT}$  คือขนาด FFT = 4096 จากสมการที่ (9) และ (10)  $\tilde{P}_N^1$  และ  $\tilde{P}_N^2$  สามารถหาค่าคลาดเคลื่อนทางเฟสรวม (Common Phase error: CPF) [9] ได้สำหรับภาครับหนึ่ง

$$P_{CPE1} = \frac{1}{N_p} \sum_{0 \in N_p} \tilde{P}_N^1(0) \quad (14)$$

และภาครับสอง

$$P_{CPE2} = \frac{1}{N_p} \sum_{0 \in N_p} \tilde{P}_N^2(0) \quad (15)$$

จากนั้นทำการสังยุค และคูณกลับสมการที่ (5) และที่ (6) จะได้สัญญาณที่ประมาณค่าได้ที่ภาครับหนึ่ง

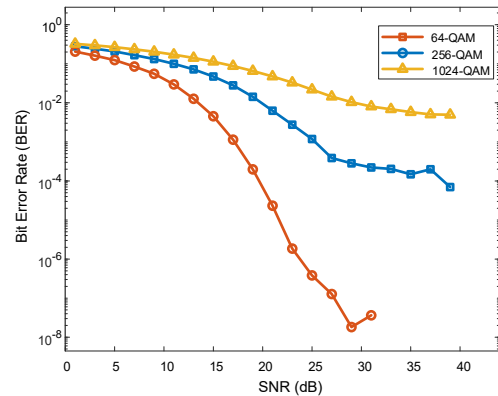
$$\tilde{Y}_1 k = Y_1 k \frac{P_{CPE1}^*}{|P_{CPE1}^*|^2} \quad (16)$$

และสำหรับภาครับสอง

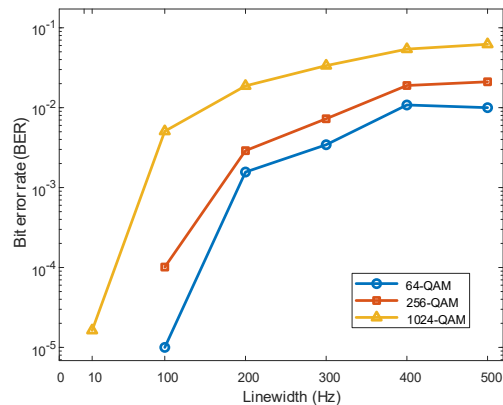
$$\tilde{Y}_2 k = Y_2 k \frac{P_{CPE2}^*}{|P_{CPE2}^*|^2} \quad (17)$$

### 4. ผลการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ MATLAB จำลองผลสำหรับ STBC MIMO-OFDM 2x2 สำหรับการมอดูเลต 64 256 และ 1024-QAM กำหนดให้ FFT มีขนาด 4096 และ ส่วนหัว (Cyclic prefix :CP) มีขนาด 512 จากรูปที่ 3 เปรียบเทียบอัตราบิดเบือนผลาดสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยที่ความกว้างเส้นเท่ากับ 40 Hz พบว่าเมื่อสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น อัตราบิดเบือนผลาดมีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 3 การจำลองผลสำหรับเทคนิค STBC-OFDM 2 x 2 ที่ความกว้างเส้น 40 Hz สำหรับการมอดูเลต 64 256 และ 1024-QAM



รูปที่ 4 การจำลองผลสำหรับเทคนิค STBC-OFDM 2 x 2 SNR = 40 dB สำหรับการมอดูเลต 64 256 และ 1024-QAM

รูปที่ 4 จำลองผลความกว้างเส้นเทียบกับอัตราบิดผิดพลาด โดยที่  
ความกว้างเส้นมีค่าตั้งแต่ 10 Hz ถึง 500 Hz และ SNR = 40 dB จากการ  
จำลองพบว่าเมื่อความกว้างเส้นเพิ่มขึ้น นั่นคือสัญญาณรบกวนเฟสมาก  
ขึ้น ส่งผลกระทบให้อัตราบิดผิดพลาดสูงขึ้น บ่งชี้ว่าสัญญาณรบกวนเฟสมี  
ผลกระทบโดยตรงต่อความถูกต้องของสัญญาณ จะเห็นได้ว่า 64-QAM  
ทนทานต่อสัญญาณรบกวนเฟสมากที่สุด 256-QAM 1024-QAM ไวต่อ  
สัญญาณรบกวนเฟสมากขึ้น และอัตราบิดผิดพลาดสูงขึ้นเมื่อความกว้าง  
เส้นมากกว่า 100 Hz

## 5. สรุป

จากการทดลองสรุปว่าการศึกษาความทนทานต่อสัญญาณรบกวน  
โดยใช้ STBC MIMO-OFDM สำหรับ WiFi-8 สำหรับ 64 256 1024-QAM  
เมื่อ SNR สูงขึ้น อัตราบิดผิดพลาดก็ลดลงตามไปด้วย อีกทั้งผลการทดลอง  
บ่งชี้ได้ว่าเมื่อความกว้างเส้นเพิ่มขึ้นมากกว่า 100 Hz ทำให้อัตราบิด  
ผิดพลาดมีค่าสูงขึ้นสัญญาณรบกวนเฟสมีผลกระทบต่อความถูกต้องของ  
สัญญาณของทุกการมอดูเลต แสดงให้เห็นว่าเมื่อความกว้างเส้นแคบ  
สัญญาณมีความทนทาน สัญญาณเฟสคงที่ และเมื่อความกว้างเส้นกว้างขึ้น  
อัตราบิดพลาดพลาดสูงขึ้นและสัญญาณเฟสไม่คงที่ เป็นไปตาม  
วัตถุประสงค์ของบทความนี้ ในอนาคตผู้วิจัยจะนำไปสร้างจริง  
(Implement) ด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field-  
Programmable Gate Array :FPGA) โดยพิจารณาการสื่อสารความเร็ว  
ระดับกิกะบิตต่อวินาที โดยใช้เทคโนโลยี STBC MIMO-OFDM 2 x 2  
จริงต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] [Online]. Available:<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/23/11-23-0480-03-0uhr-uhr-proposed-par.pdf>.
- [2] H. Kamrani, A. Ebrahimnejad and N. Kohan, "Time Hopping Multiple input-Multiple output (TH-MIMO) systems," 2011 2nd International Conference on Engineering and Industries (ICEI), Seogwipo, Korea (South), 2011.
- [3] I.B. Djordjevic and B. Vasic, "100-gb/s transmission using orthogonal frequency-division multiplexing," *IEEE Photonics Technology Letters* (Volume: 18, Issue: 15, August 2006), 2006, pp. 1576-1578.
- [4] Shang-Chih Ma, "A new super-orthogonal space-time block code," 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, Orlando, FL, USA, 2008, pp. 567-570.
- [5] Wu Yibo, Sanguinetti Luca, Gustavsson Ulf, Graelli Amat Alexandre and Wymeersch Henk, "Impact of Phase Noise on Uplink Cell-Free Massive MIMO OFDM," *GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global*

*Communications Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 5829-5834.

- [6] Bhatnagar R. Manav and Anees Sanya, "On the Performance of Alamouti Scheme in Gamma-Gamma Fading FSO Links With Pointing Errors," *IEEE Wireless Communications Letters* (Volume: 4, Issue: 1, February 2015), 2014, pp. 94-97.
- [7] Giorgio Taricco, "On the Convergence of Multipath Fading Channel Gains to the Rayleigh Distribution," *IEEE Wireless Communications Letters* (Volume: 4, Issue: 5, October 2015), 2015, pp. 549-552.
- [8] Bunsri Bussakorn, Puntsri Kisanapong and Yindeemak Ampawan, "FPGA Implementation of IFFT-2048 Points for High Speed Transmitter OFDM Communication Systems with 64-QAM Mapping," 2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, Thailand, 2024.
- [9] กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี, "การสื่อสารแบบดิจิทัลโดยใช้หลายคลื่นพาห์" หน้าที่ 130, 2561.