บทที่ 4
ผลการศึกษา

หลังจากที่ได้กล่าวถึง ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ตลอดจนระบบที่นำเสนอในบทที่ 3 ไปแล้ว ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบโดยใช้โปรแกรมจำลองระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเสนอ โดยในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่นำเสนอ ซึ่งเป็นการพัฒนาระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ ซึ่งเป็นการส่งต่อข้อมูลที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK โดยใช้เทคนิคการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า(Precoding) ในที่นี้ จะเรียกเทคนิคดังกล่าวว่า Space-Time Block Coding - with Precoding หรือ STBC-PC และใช้โพรโทคอลการส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward (AF) ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh-Fading) พร้อมทั้งการพิจารณาเลือกเส้นทางของโหนดส่งผ่าน (Path Selection) ซึ่งกำหนดให้โหนดต้นทางและโหนดส่งผ่านรู้ถึงข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ (Channel State Information หรือ CSI) เป็นแบบสมบูรณ์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ ML Decision ถอดรหัสข้อมูลออกมาในส่วนของ โหนดปลายทางกับระบบการสื่อสารแบบร่วมมือที่ผ่านมา

4.1 ข้อกำหนดและตัวแปรที่ใช้ในการจำลองระบบ

ในการจำลองระบบ จะทำการจำลองการส่งบิตข้อมูล BPSK จำนวน 1ล้านบิต(1 Mbit) โดยการส่ง 1ล้านบิตในแต่ละรอบ จะทำการแบ่งบิตข้อมูลออกเป็นบล็อกๆละ 10,000 บิต (ค่าความยาวของเฟรมเฉลี่ยที่ส่งออกไปเท่ากับ 1,250 ไบต์ สำหรับการทดสอบช่องสัญญาณก่อนส่งบิตข้อมูลโดย Pilot Signal ในช่วง Pre-Transmission Phase กล่าวคือ ระบบโครงข่ายจะใช้เวลาในการส่ง Pilot Signal ก่อนการส่งบิตข้อมูลจริง) โดยในที่นี้จะทำการเขียนโปรแกรม MATLAB 7.8.0 (R2009a) และทำการจำลองระบบสำหรับวิธี Channel Capacity-Based Path Selection ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU แบบ Intel Core 2 Duo processor (T6500) ความเร็วคล็อค 2.1 GHz และเพื่อให้ระบบที่จะทำการจำลองออกมาใกล้เคียงกับระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบไร้สายที่ใช้งานอยู่จริงมากที่สุด จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลหลายส่วนมาประกอบเป็นตัวแปรที่ใช้ในการพัฒนาและปรับแต่งระบบดังตารางที่ 4.1 สำหรับการ Modulation เป็นแบบ BPSK (Binary Phase Shift Keying)

ซึ่งเป็นการส่งข้อมูล 1 บิตต่อหนึ่งคาบเวลา โดยใช้โหนดส่งผ่านในระบบจำนวน 4 โหนด และมีแนวทางในการพิจารณาการใช้งานเปรียบเสมือน เป็นการใช้งานในพื้นที่แหล่งชุมชนเมือง (Urban Area) ซึ่งกำหนดให้ค่า Alpha เท่ากับ 3 โดยค่าอัตราการส่งข้อมูลที่ได้นี้เกิดจากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ แต่ทั้งนี้จำนวนบิตที่ส่งใน 1 บล็อคหรือเฟรมที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ อาจจะเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับขนาดความยาวของ 1 เฟรม และอัตราการส่งข้อมูลจริงที่ใช้งานในแต่ละเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่ติดตั้งใช้งาน

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบระบบ

Number of Symbols (bits)	1,000,000
Modulation	BPSK
Number of Relays	4
Symbol Processing	Alamouti's STBC with pre-coding scheme
Path Loss Exponent (Alpha)	3 (Urban Area and No LOS)[1]
Propagation Channel Model	Rayleigh fading + path loss with AWGN

ข้อกำหนดเบื้องต้นในการจำลองระบบ

1. ระยะห่างในการวางตำแหน่งระหว่างรีเลย์แต่ละตัวห่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่ง และถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าอยู่ในสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณแล้ว

2. การส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดส่งผ่าน และระหว่างโหนดส่งผ่านกับโหนดปลายทางเป็นแบบไม่มีเส้นทางเชื่อมต่อโดยตรง (No direct link)

3. การส่งข้อมูลในแต่ละเส้นทางมีความเป็นอิสระต่อกัน และใช้เวลาในการทำงาน (Processing time) ตลอดจนเวลาแฝง (Latency) ที่แต่ละโหนดน้อยมาก

4. โหนดต้นทางและโหนดส่งผ่านแต่ละตัวในระบบ สามารถรับรู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ (CSI) ได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีการทำงาน รับ-ส่งสัญญาณแบบเต็มรูปแบบ (Full - duplex mode)

---

[1] E.M. van Eenennaam, 'A Survey of Propagation Models used in Vehicular Ad hoc Network (VANET) Research', University of Twente, June 2008.

5. ช่องสัญญาณในระบบมีการกระจายตัวแบบ Rayleigh และได้รับผลกระทบจากภาวะการจางหายแบบ Flat and Slow Fading โดยถือว่าไม่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ดอปเปอร์ (Doppler Effect)

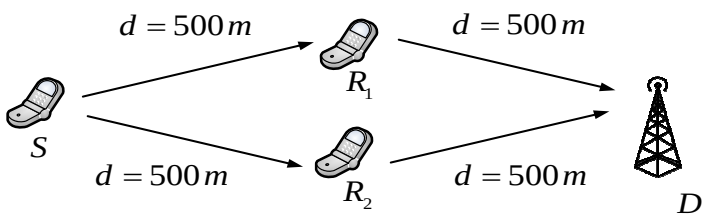
6. ทุกโหนดในระบบส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งเฉลี่ยที่เท่ากัน $P \cong \mathrm{E}\left\{\left|x_i\right|^2\right\}$ และสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณเป็นแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) ที่มีความหนาแน่นของกำลังส่ง (PSD) เท่ากับ N_0 และ $\left[N\right]_{i,j} \cong CN(0,1)$

7. ผู้ใช้งานในระบบที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์หรือโหนดส่งผ่าน ใช้โปรโตคอลการส่งต่อสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward (AF)

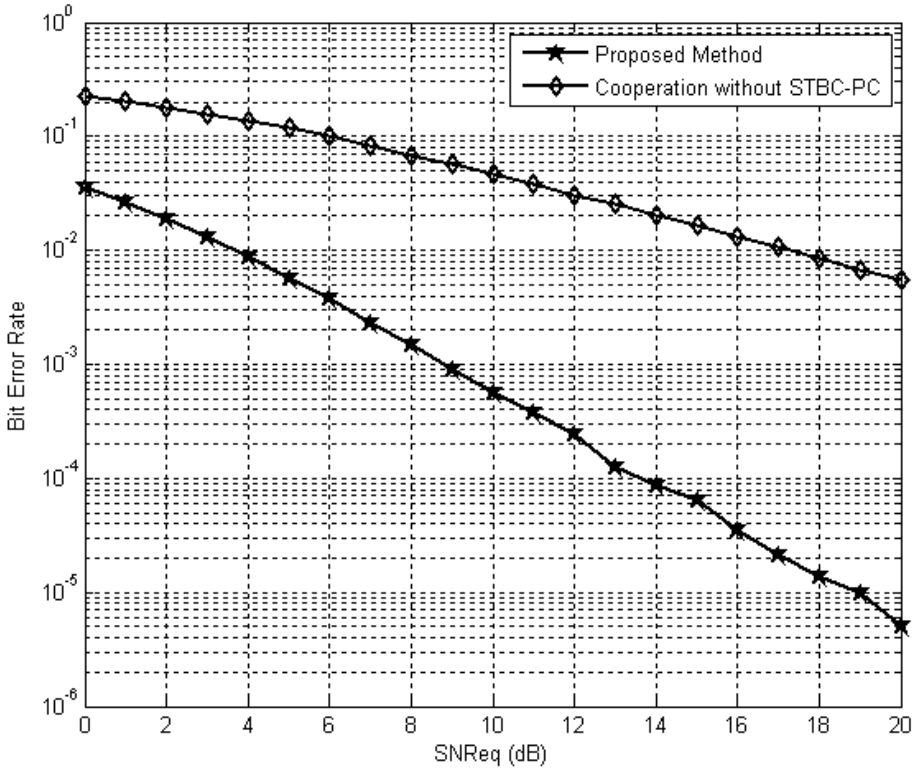
การศึกษาผลของการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอ จะเป็นผลลัพธ์ของค่าความผิดพลาดของบิต (Bit Error Rate หรือ BER) และอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio หรือ SNR) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของระบบ รายละเอียดของหัวข้อต่างๆ มีดังนี้

4.2 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) กับ การสื่อสารแบบร่วมมือที่ไม่ใช้ STBC-PC

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงถึงสมรรถนะของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลมาใช้งานซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอโดนใช้เทคนิคการส่งแบบ STBC-PC เปรียบเทียบกับระบบที่ทำการส่งโดยไม่ใช้เทคนิคการส่งแบบ STBC-PC โดยรูปแบบจำลองการติดต่อสื่อสารประกอบด้วยโหนดต้นทาง 1 ตัว โหนดส่งผ่าน 2 ตัว และโหนดปลายทาง 1 ตัว ระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน ($S \rightarrow R_i$) และโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง ($R_i \rightarrow D$) ในแต่ละฮอฟมีค่าเท่ากันทั้งหมดคือ 500 เมตร ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบที่นำมาพิจารณามีแบบจำลองโครงข่ายเดียวกัน ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอใช้การส่งที่ใช้เทคนิคการเข้ารหัส STBC-PC กับวิธีการส่งที่ไม่ใช้การเข้ารหัส STBC-PC



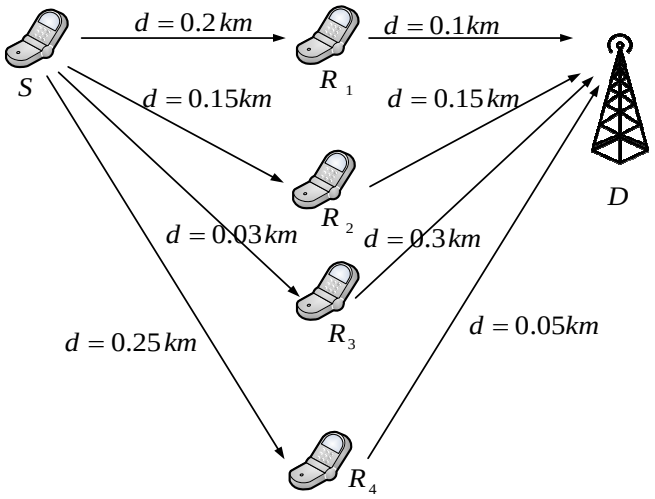
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการส่งแบบใช้ STBC-PC และไม่ใช้ STBC-PC

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองตามรูปที่ 4.1 เพื่อเปรียบเทียบผลของการส่งข้อมูลโดยการนำเทคนิคการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti ร่วมกับวิธีการเข้ารหัสล่วงหน้า(Precoding) และการส่งข้อมูลโดยไม่ใช้เทคนิค STBC-PC ซึ่งระบบจะกำหนดให้มีโหนดส่งผ่าน แค่ 2 โหนด และระยะห่างแต่ละฮอฟเท่ากัน เพื่อให้เห็นผลการเปรียบเทียบอย่างชัดเจน ซึ่งผลการจำลองระบบจะเห็นได้ดังรูปที่ 4.2 พบว่า การส่งข้อมูลโดยวิธีการส่งที่ใช้เทคนิคการเข้ารหัส STBC-PC ที่ระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่ 4 dB จะมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/100 (10^{-2}) และเมื่อดูเส้นกราฟของการส่งที่ไม่ใช้เทคนิค STBC-PC จะมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) มากกว่าคือ 1/10 (10^{-1}) นอกจากนี้เมื่ออัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ยิ่งมากขึ้นผลของอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) จะมีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด เช่นการส่งตามวิธีที่นำเสนอที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 16 dB จะมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล(BER) เท่ากับ 1/100,000(10^{-5}) ซึ่งในวิธีการส่งที่ไม่ได้ไม่ใช้เทคนิค STBC-PC มีอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลถึง 1/100 (10^{-2}) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอ และการสื่อสารแบบร่วมมือที่ไม่ใช้ STBC-PC แล้ว การส่งข้อมูลจะมีอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ต่ำกว่ามาก อีกทั้งยังมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR) ดีกว่าถึง 12 dB ส่งผลให้

ประสิทธิภาพดีกว่าประมาณ 75% หรือประมาณ 15.84 เท่า และยังตอบสนองการใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ที่มีเสาอากาศเดียว เป็นผลทำให้สามารถใช้งานในการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

4.3 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) ที่มีการเลือกเส้นทางกับวิธีที่ ไม่มีการเลือกเส้นทาง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงถึงสมรรถนะของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเทคนิคการส่งต่อข้อมูลมาใช้งานโดยการใช้การส่งสัญญาณ แบบ STBC-PC ในระบบที่มีการเลือกเส้นทางและระบบที่ไม่มีการเลือกเส้นทาง โดยรูปแบบการจำลองจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นโหนดต้นทาง 1 ตัว โหนดส่งผ่าน 4 ตัว และโหนดปลายทาง 1 ตัว โดยระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน ($S \rightarrow R_i$) และโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง ($R_i \rightarrow D$) ของทั้ง 2 แบบ ที่นำมาเปรียบเทียบนั้นมีระยะห่างเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโหนดมีค่าแตกต่างจากกัน ดังแสดงลักษณะของแบบจำลอง ตามรูปที่ 4.3



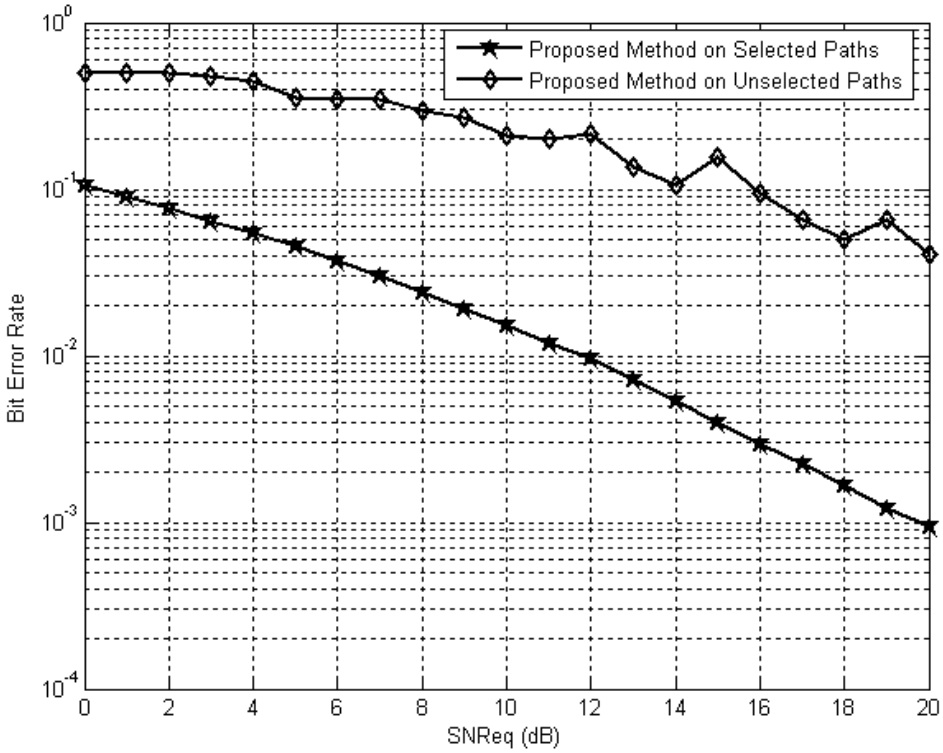
รูปที่ 4.3 รูปแบบที่ใช้การส่งที่ใช้การเข้ารหัส STBC-PC ที่มีการเลือกเส้นทางกับวิธีที่ไม่มีการเลือกเส้นทาง

จากลักษณะของแบบจำลอง ตามรูปที่ 4.3 เมื่อทำการส่งข้อมูลผ่านระบบที่จะทำการทดสอบและเปรียบเทียบลักษณะการส่งข้อมูลตามวิธีการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดโดยการพิจารณาจากค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ผลของค่าต่างๆที่ใช้ในการพิจารณาจะเป็นไปตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า Channel Capacity ในแต่ละฮอฟที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ

Relay Path	Channel Capacity		
	Hop 1 ($S \rightarrow R$)	**Hop 2** ($R \rightarrow D$)	**Best Channel Capacity**
Path1 (R_1)	1.1776e-009	1.0800e-012	1.0800e-012
Path2 (R_2)	1.7831e-010	1.2617e-010	1.2617e-010
Path3 (R_3)	4.3082e-014	7.2278e-0016	4.3082e-014
Path4 (R_4)	2.5532e-008	3.3307e-013	3.3307e-013

จากตารางที่ 4.2 เป็นค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่ได้จากการทดสอบช่องสัญญาณก่อนส่งบิตข้อมูลโดย Pilot Signal จะถูกส่งผ่านโหนดส่งผ่าน(Relay) ในแต่ละเส้นทางในระบบ โดยค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ของแต่ละฮอฟของแต่ละโหนดส่งผ่านนั้นจะพิจารณาเลือกจากค่าที่น้อยกว่าจากสูตร $C_{\min}^{i} = \min_{i}\left(C_{S\rightarrow R_i}, C_{R_i\rightarrow D}\right)$ จากนั้นระบบจะทำการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่มากที่สุดเปรียบเทียบทั้ง 4 เส้นทางจากสูตร $R_{sel} = \max\left\{C_{\min}^{1}, C_{\min}^{2}, \ldots, C_{\min}^{k}\right\}$ โดยทำการเลือก 2 เส้นทางที่ดีที่สุด เพื่อทำการส่งข้อมูลใน 2 เส้นทางนั้นต่อไป โดยผลจากการทดสอบช่องสัญญาณก่อนส่ง ค่าความจุของช่องสัญญาณ **(Channel Capacity)** ที่ดีที่สุดจะเป็น เส้นทางที่ 2 (Path 2) ที่มีระยะห่างจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน($S \rightarrow R_1$) และระยะห่างจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง($R_1 \rightarrow D$) ที่เท่ากันคือ 150 เมตร ในลำดับต่อมาเป็นเส้นทางที่ 1 (Path 1) ที่มีระยะห่างจากโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน($S \rightarrow R_1$) เท่ากับ 200 เมตร และระยะห่างจากโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง ($R_1 \rightarrow D$) เท่ากับ 100 เมตร โดยทั้ง 2 เส้นทางที่เลือกนี้มีค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) คือ 1.2617e-010 และ 1.0800e-012 ตามลำดับ ในการเลือกเส้นทางที่จะช่วยส่งต่อข้อมูลนั้น เป็นไปตามเทคนิคการทำ Precoding STBC แบบ Alamouti โดยจำเป็นต้องใช้เส้นทางในการส่งต่อข้อมูล 2 เส้นทางหรือรีเลย์ (ตามสมการที่ระบุไว้ในบทที่ 3) และระบบจะทำการเลือกเส้นทางใดนั้น เป็นผลมาจากช่องสัญญาณและค่าการจางหาย (Path loss) ในแต่ละเส้นทาง ซึ่งส่งผลต่อค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่โหนดปลายทางรับได้ และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของช่องสัญญาณที่ใช้ส่งตามวิธีที่นำเสนอกับวิธีที่ไม่มีการเลือกช่องสัญญาณก่อนส่งจะเป็นตามรูปที่ 4.4

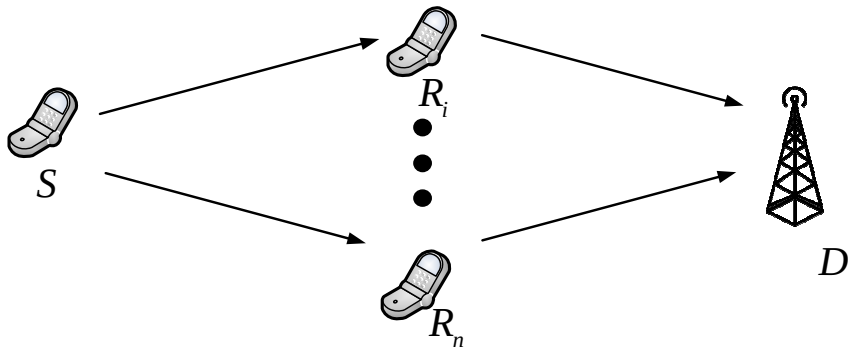


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง การส่งแบบเลือกเส้นทางและไม่มีการเลือกเส้นทาง

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้รับในรูปที่ 4.4 พบว่า การส่งข้อมูลโดยวิธีการส่งที่ใช้เทคนิคการเข้ารหัส STBC-PC ด้วยการเลือกเส้นทางโดยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่าวิธีที่ไม่มีการเลือกเส้นทางก่อนส่งมากอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/10 (10^{-1}) มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของวิธีที่นำเสนอ จะอยู่ที่ 2 dB และการส่งโดยไม่มีการเลือกเส้นทางก่อนส่งนั้นจะมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่ 14 dB โดยเมื่อเปรียบเทียบแล้วอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR) ดีกว่าถึง 12 dB ส่งผลให้ประสิทธิภาพดีกว่าประมาณ 75% หรือประมาณ 15.84 เท่า และเมื่อดูเส้นกราฟจากอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่น้อยลงนั้นวิธีการที่นำเสนอ จะมีอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มากขึ้นและผลของอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) จะมีค่าต่ำลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบวิธีการส่งโดยไม่มีการเลือกเส้นทาง เส้นกราฟที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/100 (10^{-2}) ลงไปจะไม่พบอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) จะต้องมีค่าอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มากกว่า 20 dB ซึ่งเป็นผลระดับกำลังงานที่สูงมากในการส่ง ทำให้สิ้นเปลืองกำลังในการส่งเป็นอย่างมาก ในส่วนวิธีการที่นำเสนอใช้กำลังในการส่งต่ำ อีกทั้งยังเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการ แม้จะอยู่ในบริเวณที่เป็นจุดอับสัญญาณก็ตาม

4.4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์วิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) เมื่อมีโหนดส่งผ่านจำนวนมากในระบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงถึงสมรรถนะของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลมาใช้งานโดยการใช้การส่งสัญญาณแบบ STBC-PC แบบมีการเลือกเส้นทางก่อนส่ง ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงกระบวนส่งต่อข้อมูลด้วยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณในแต่ละโหนดส่งผ่านที่มีในระบบ โดยสมมติให้มีโหนดส่งผ่านอยู่ในเครือข่ายมีค่าเป็น 2,4 และ 8 โหนด ตามลำดับ ซึ่งมีแบบจำลองโครงข่าย ตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 รูปแบบที่ใช้การส่งที่ใช้การเข้ารหัส STBC-PC ที่มีการเลือกเส้นทางเมื่อจำลองให้ระบบ มีโหนดส่งผ่านเพิ่มมากขึ้น

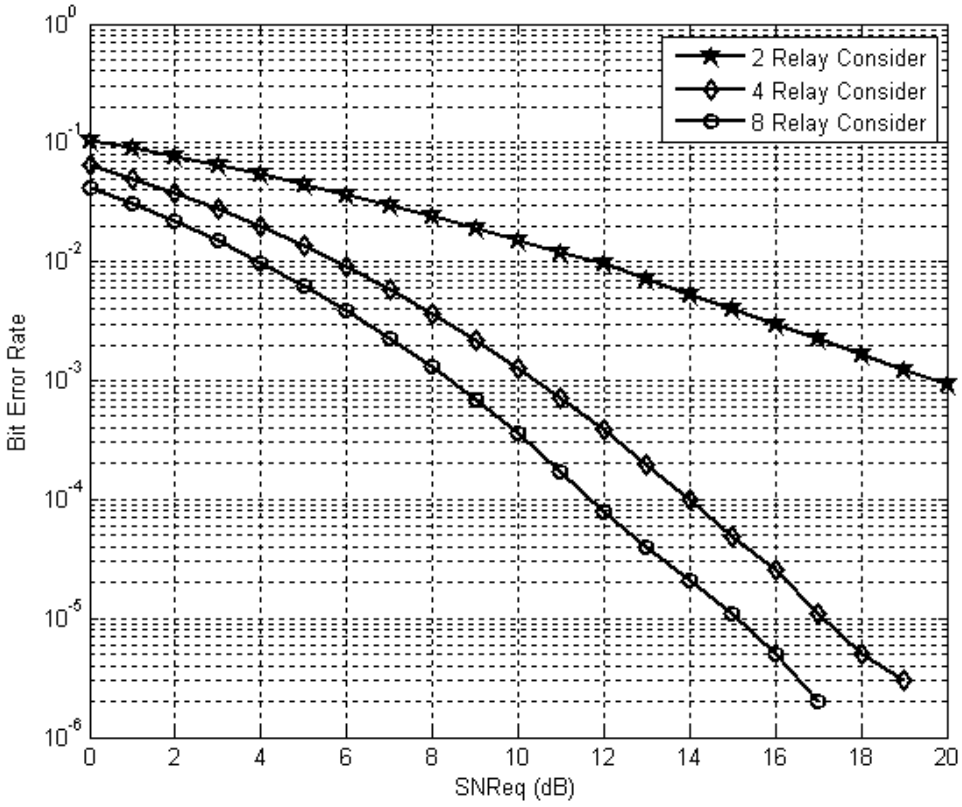
ในแบบจำลองตามรูปที่ 4.5 นี้ จะเป็นการกำหนดให้ระบบมีโหนดส่งผ่านที่จะเลือกใช้ในการส่งต่อข้อมูล มีจำนวน 2 , 4 และ 8 โหนด เพื่อที่จะเปรียบเทียบให้เห็นถึงเมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะส่งต่อข้อมูลผ่านผู้ใช้คนอื่นๆ ในระบบ หรือ โหนดส่งผ่าน และระบบมีผู้ใช้งานในเครือข่ายจำกัดมากน้อยต่างกัน ในการเลือกเส้นทางที่จะช่วยส่งต่อข้อมูลด้วยวิธีพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณนั้น ซึ่งระยะห่างระหว่างโหนดต้นทางไปยังโหนดส่งผ่าน ($S \rightarrow R_i$) และโหนดส่งผ่านไปยังโหนดปลายทาง ($R_i \rightarrow D$) ในแต่ละฮอฟของแต่ละโหนดส่งผ่านในระบบที่ใช้พิจารณา มีค่าเท่ากันทั้งหมดคือ 500 เมตร และผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง ที่เพิ่มจำนวนโหนดส่งผ่านในการพิจารณาเลือกเส้นทางในการส่งต่อข้อมูล จะมีค่าของความจุช่องสัญญาณเป็นไปตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความจุของช่องสัญญาณในการพิจารณาเลือกเส้นทางเมื่อมีโหนดส่งผ่านเพิ่มขึ้น

Number Relay Paths	**Channel Capacity**		
	Hop 1 ($S \rightarrow R$)	**Hop 2** ($R \rightarrow D$)	**Best Channel Capacity**
2 Relay			
Path1 (R_1)	1.1776e-009	1.0800e-012	1.0800e-012
Path2 (R_2)	1.7831e-010	1.2617e-010	1.2617e-010
4 Relay			
Path1 (R_1)	1.2000e-010	3.9326e-008	1.2000e-010
Path2 (R_2)	2.3965e-010	5.3105e-012	5.3105e-012
Path3 (R_3)	2.6063e-010	7.8415e-011	7.8415e-011
Path4 (R_4)	1.0992e-008	2.0588e-011	2.0588e-011
8 Relay			
Path1 (R_1)	1.8343e-009	1.0807e-011	1.0807e-011
Path2 (R_2)	5.1579e-011	3.8720e-012	3.8720e-012
Path3 (R_3)	1.3933e-010	2.5485e-012	2.5485e-012
Path4 (R_4)	7.0795e-009	4.9960e-016	4.9960e-016
Path5 (R_5)	1.3776e-009	1.2292e-007	1.3776e-009
Path6 (R_6)	2.5323e-010	1.3278e-010	1.3278e-010
Path7 (R_7)	1.3842e-009	6.0319e-008	1.3842e-009
Path8 (R_8)	2.0562e-009	3.4972e-015	3.4972e-015

เมื่อพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่ได้จากการคำนวณจากการส่งบิตทดสอบช่องสัญญาณ (Pilot Signal) ก่อนส่งบิตข้อมูล นั้น ในกรณีที่ระบบมีโหนดส่งผ่านเพียงแค่ 2 โหนด โดยมีค่าที่ได้ 1.2617e-010 และ 1.0800e-012 จากเส้นทางที่ 2 และ1 ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่กำหนดให้มีโหนดส่งผ่านในระบบ 4 โหนด หรือ 4 เส้นทางที่จะใช้ทำการพิจารณาส่งต่อข้อมูล โดยเมื่อทำการการส่งบิตทดสอบช่องสัญญาณ (Pilot Signal) และทำการคำนวณค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) แล้วพบว่าเส้นทางที่มีค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดี

ที่สุดคือเส้นทางที่ 1 และ 4 โดยมีค่าที่ได้ 1.2000e-010 และ 7.8415e-011 ตามลำดับ และกรณีที่กำหนดให้มีโหนดส่งผ่านในระบบ 8 โหนด หรือ 8 เส้นทางที่จะใช้ในการพิจารณาในการส่งต่อข้อมูล เมื่อทำการการส่งบิตทดสอบช่องสัญญาณ (Pilot Signal) และทำการคำนวณค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) แล้วพบว่าเส้นทางที่มีค่าความจุของช่องสัญญาณที่ดีที่สุดคือเส้นทางที่ 7 และ 5 โดยมีค่าที่ได้ใกล้เคียงกันคือ 1.3842e-009 และ 1.3776e-009 ตามลำดับ ในการเลือกเส้นทางที่จะช่วยส่งต่อข้อมูลนั้นเป็นไปตามเทคนิคการทำ Precoding STBC แบบ Alamouti โดยจำเป็นต้องใช้เส้นทางในการส่งต่อข้อมูล 2 เส้นทางหรือรีเลย์ (ตามสมการที่ระบุไว้ในบทที่ 3) และระบบจะทำการเลือกเส้นทางใดนั้น เป็นผลมาจากช่องสัญญาณและค่าการจางหาย (Path loss) ในแต่ละเส้นทางซึ่งส่งผลต่อค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ที่โหนดปลายทางรับได้ ซึ่งผลของการเปรียบเทียบเมื่อระบบมีโหนดส่งผ่านหรือรีเลย์ให้พิจารณาใช้งานในจำนวนที่แตกต่างกัน เป็นไปตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง วิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) แบบมีการเลือกเส้นทางเมื่อจำลองให้ระบบ มีโหนดส่งผ่านเพิ่มมากขึ้น

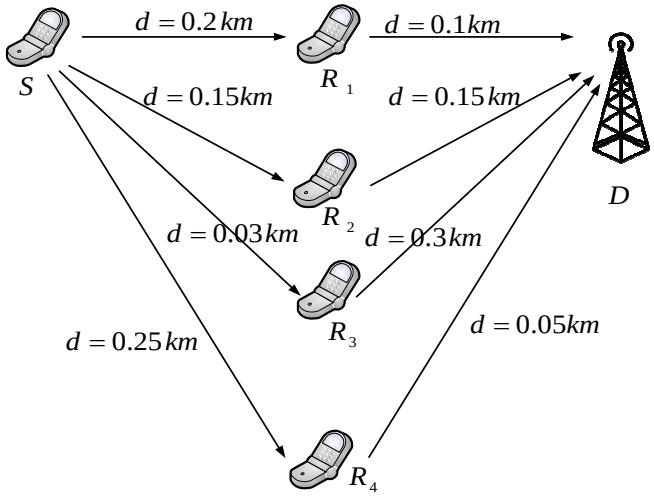
จากการวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้รับในรูปที่ 4.6 พบว่า การส่งข้อมูลด้วยวิธีที่นำเสนอเมื่อระบบผู้ใช้อื่นๆ หรือโหนดส่งผ่านให้พิจารณาใช้งานในจำนวนที่แตกต่างกันคือ 2,4 และ 8 โหนด ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/100 (10^{-2}) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) อยู่ที่ 12,6 และ 4 dB ตามลำดับ และเมื่อดูเส้นกราฟจำนวนของโหนดส่งผ่านที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มากขึ้นและผลของอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) จะมีค่าต่ำลง เช่นเมื่อสังเกตุเส้นกราฟที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/10000 (10^{-4}) ของระบบที่มีโหนดส่งผ่านจำนวน 4 และ 8 โหนด อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) อยู่ที่ 14 และ 12 dB ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของระบบที่มีโหนดส่งผ่านให้ใช้งานแค่ 2 โหนด จะมีค่ามากกว่า 20 dB ซึ่งเท่ากับว่าต้องใช้กำลังงานในการส่งมากขึ้นนั่นเอง โดยเมื่อพิจารณาแล้วการที่มีจำนวนโหนดส่งผ่านเพิ่มขึ้นในระบบจะทำให้สามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำลง โดยที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ดีขึ้นประมาณ 2 – 10 dB ประสิทธิภาพดีขึ้นประมาณ 66% หรือประมาณ 8.91 เท่า

ในการส่งต่อข้อมูลด้วยวิธีที่นำเสนอ การพิจารณาเส้นทางก่อนส่งโดยการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณของแต่ละเส้นทาง เมื่อในเครือข่ายมีผู้ใช้งานอื่นๆ หรือโหนดส่งผ่านให้เลือกใช้งานเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้สามารถพิจารณาใช้งานเส้นทางที่ดีที่สุด ในการส่งต่อข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น เป็นการเพิ่มอัตราขยายเนื่องจากความหลากหลายของสัญญาณ (Diversity Gain) ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากสัญญาณ ที่สะท้อนมาในทิศทางที่ต่างๆกัน ทำให้ระบบมีโอกาสรับสัญญาณได้มากขึ้น และหากนำสัญญาณเหล่านั้นมาวิเคราะห์รวมกันจะทำให้ได้สัญญาณที่แรงหรือมีคุณภาพดีขึ้น และการนำเทคนิคการทำ Precoding STBC แบบ Alamouti โดยใช้เส้นทางในการส่งต่อข้อมูล 2 เส้นทางหรือรีเลย์ นั้นเป็นการลดปริมาณการใช้งานโหนดส่งผ่าน เพื่อให้โหนดอื่นๆ สามารถรองรับการใช้งานส่งต่อข้อมูลได้

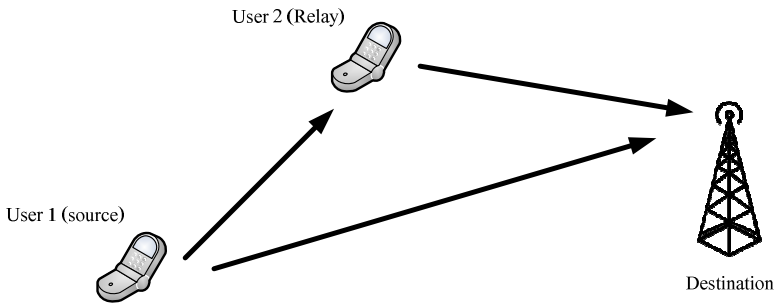
4.5 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) ที่มีการเลือกเส้นทาง

และวิธีการส่งข้อมูลของ Ho-Jung An

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงถึงสมรรถนะของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ ที่นำเทคนิคการส่งต่อข้อมูลมาใช้งานโดยการใช้การส่งสัญญาณแบบ STBC-PC แบบมีการเลือกเส้นทาง เปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลของ Ho-Jung An *et.al* [2] ซึ่งประกอบไปด้วย โหนดต้นทาง ,โหนดส่งผ่าน และโหนดปลายทาง อย่างละ 1 โหนด และยังคงมีเชื่อมต่อสัญญาณที่มาจากวิถีตรง (Line Of Sight หรือ LOS) โดยสุ่มระยะห่างแต่ละโหนด ซึ่งมีแบบจำลองโครงข่ายตามรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 รูปแบบที่ใช้ในการส่งแบบวิธีที่นำเสนอ

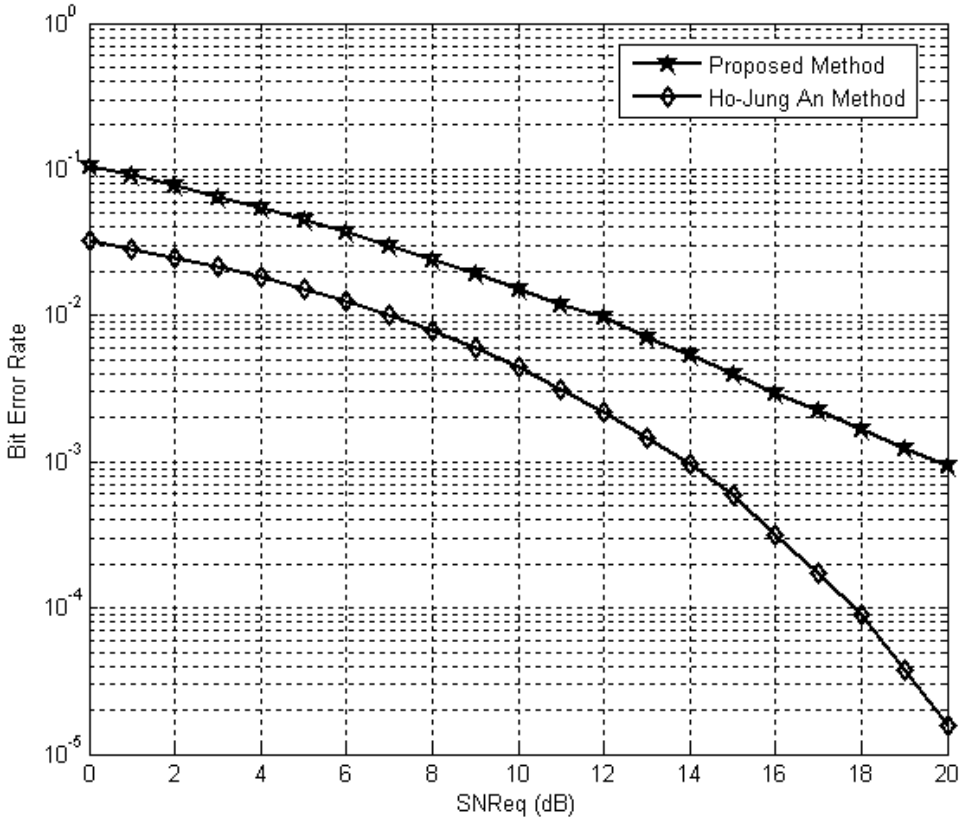


รูปที่ 4.8 รูปแบบที่ใช้ในการส่งแบบวิธีของ Ho-Jung An

---

[2] Ho-Jung An, Jee-Hoon Kim, and Hyoung-Kyu Song, "แหล่งเดิม"

โดยรูปแบบการส่งแบบวิธีที่นำเสนอจะมีระยะห่างแต่ละฮอฟเป็นไปตามรูปที่ 4.8 และการเลือกเส้นทางและการคำนวณหาค่าความจุของช่องสัญญาณผลที่ได้เป็นไปตามตามรางที่ 4.2 สรุปรายละเอียดได้ดังนี้ ในกระบวนเลือกเส้นทางก่อนส่งโดยการส่งบิตทดสอบช่องสัญญาณ (Pilot Signal) และทำการคำนวณค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ระบบเลือกใช้เส้นทางที่ 2และเส้นทางที่ 1 ช่วยในการส่งต่อข้อมูล โดยมีค่าความจุของช่องสัญญาณ 1.2617e-010 และ 1.0800e-012 ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองการส่งในวิธีของ Ho-Jung An ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เป็นไปตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง วิธีที่นำเสนอ (STBC-PC) กับวิธีการส่งข้อมูลของ Ho-Jung An

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองในรูปที่ 4.9 พบว่า การส่งข้อมูลตามแบบวิธีที่นำเสนอโดยใช้การเข้ารหัส STBC-PC แบบมีการเลือกเส้นทางนั้น ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/100 (10^{-2}) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) 12 dB สำหรับวิธีการส่ง

ข้อมูลตามแบบจำลองของ Ho-Jung An จะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่า คือ ประมาณ 7 dB เป็นผลให้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าประมาณ 40% หรือประมาณ 3.16 เท่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบตลอดเส้นกราฟพบว่าวิธีการส่งข้อมูลตามแบบจำลองของ Ho-Jung An ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากัน จะมีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่า การส่งข้อมูลด้วยวิธีที่นำเสนอ ทั้งนี้เพราะตามแบบจำลองของ Ho-Jung An นั้น ยังสามารถเชื่อมต่อสัญญาณและส่งข้อมูลได้จากวิถีตรง (LOS) ซึ่งในแบบจำลองที่นำเสนอนั้นไม่สามารถทำได้ และอาจจะส่งผลให้มีอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่ต่ำกว่า แต่ทั้งนี้ในแบบจำลองที่นำเสนอนั้น มีการเลือกเส้นทางด้วยการพิจารณาช่องสัญญาณก่อนส่งข้อมูล และนำเทคนิคการทำ Precoding STBC แบบ Alamouti โดยใช้เส้นทางในการส่งต่อข้อมูล 2 เส้นทางหรือรีเลย์ ทำให้เกิดไดเวอร์ซิตี้ทางสเปซ (Space Diversity) ลดการจางหายของสัญญาณอันเกิดจาก Multipath และแก้ปัญหาเมื่อผู้ใช้งานอยู่นอกเขตพื้นที่การให้บริการ อีกทั้งยังสอดคล้องกับการใช้งานระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ในปัจจุบันในสภาวะแวดล้อมที่เป็นชุมชนเมือง และอาคารสูงจำนวนมาก