บทที่ 4
ผลการศึกษา

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโดยใช้โปรแกรมจำลองระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ไร้สายแบบร่วมมือที่นำเสนอในบทที่ 3 โดยนำค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit error rate) มาพิจารณา เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ระยะห่างและจำนวนของรีเลย์ที่มีในระบบแตกต่างกัน และวิเคราะห์ผลของการเลือกรีเลย์เพื่อนำมาใช้เป็นเส้นทางในการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน

4.1 ข้อกำหนดและตัวแปรที่ใช้ในการจำลองระบบ

ในการจำลองระบบ จะทำการจำลองการส่งบิตข้อมูล BPSK จำนวน 1 ล้านบิต (1 Mbit) โดยการส่ง 1 ล้านบิตในแต่ละรอบ จะทำการแบ่งบิตข้อมูลออกเป็นบล็อค บล็อคละ 10,000 บิต (ค่าความยาวของเฟรมเฉลี่ย ที่ส่งออกไปเท่ากับ 1,250 ไบต์ สำหรับการทดสอบช่องสัญญาณก่อนส่งบิตข้อมูลโดย Pilot Signal ในช่วง Pre-Transmission Phase กล่าวคือ ระบบโครงข่ายจะใช้เวลาในการส่ง Pilot Signal ก่อนการส่งบิตข้อมูลจริง) โดยในที่นี้จะทำการเขียนโปรแกรม MATLAB 7.8.0 (R2009a) และทำการจำลองระบบสำหรับวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU แบบ Intel Core 2 Duo (P7350) ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.0 GHz และข้อกำหนดเบื้องต้นที่ใช้ในการจำลองระบบเป็นไปตามที่ระบุไว้ในบทที่ 3 ส่วนที่ 3.1

และเพื่อให้ระบบที่จะทำการจำลองออกมาใกล้เคียงกับระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบไร้สายที่ใช้งานอยู่จริงมากที่สุด จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลหลายส่วนมาประกอบเป็นตัวแปรที่ใช้ในการพัฒนาและปรับแต่งระบบ ตามตารางที่ 4.1 ได้แก่ Modulation เป็นแบบ BPSK (Binary Phase Shift Keying) คือการส่งข้อมูลให้ได้ 1 บิต ต่อหนึ่งคาบเวลา โดยใช้จำนวนรีเลย์ที่มีในระบบจำนวน 4 รีเลย์ ซึ่งตัวแปรที่จะทำการเปรียบเทียบในการจำลองระบบ นอกจากจะทำการเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางแบบใช้ช่องสัญญาณ (Channel capacity) แล้ว จะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าการจางหายในเส้นทาง Path loss exponent (Alpha) โดยในพื้นที่แหล่งชุมชนเมือง (Urban Area) กำหนดให้ค่า Alpha เท่ากับ 3 และแหล่งชุมชนเมืองหนาแน่นที่มีอาคารสูงจำนวนมาก (No LOS) กำหนดให้ค่า Alpha เท่ากับ 5 นอกจากนั้นยังใช้ฟังก์ชั่นการจับเวลาแบบ Tic-Toc ที่เขียนขึ้นใน

โปรแกรม MATLAB 7.8.0 (R2009a) เพื่อใช้จับเวลาในการส่งข้อมูลในระบบที่จำลองขึ้นมา ทั้งนี้ จำนวนบิตที่ส่งใน 1 บล็อคหรือเฟรมที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับขนาดความยาวของ 1 เฟรมจริงที่ใช้งาน

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, 5 (Urban Area, No LOS)[1]
Propagation Channel Model	Rayleigh fading + path loss with AWGN

ข้อกำหนดเบื้องต้นในการจำลองระบบ

1) ระยะห่างในการวางตำแหน่งระหว่างรีเลย์แต่ละตัวห่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่ง และถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าอยู่ในสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณแล้ว

2) การส่งผ่านข้อมูลระหว่างแหล่งกำเนิดกับรีเลย์ และรีเลย์กับสถานีฐานเป็นแบบไม่มีเส้นทางเชื่อมต่อโดยตรง (No direct link)

3) การส่งข้อมูลในแต่ละเส้นทางมีความเป็นอิสระต่อกัน และเวลาในการทำงาน (Processing time) ตลอดจนเวลาแฝง (Latency) ที่แต่ละโหนดน้อยมาก

4) แหล่งกำเนิดและรีเลย์แต่ละตัวสามารถรับรู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ (CSI) ได้อย่างสมบูรณ์โดยมีการทำงานรับส่งสัญญาณแบบเต็มรูปแบบ (Full-duplex mode)

5) ช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบมีการกระจายตัวแบบ Rayleigh ที่มีการจางหายแบบ Flat and Slow Fading โดยถือว่าไม่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ดอปเปอร์ (Doppler Effect)

---

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

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

7) ผู้ใช้งานในระบบที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์หรือโหนดส่งผ่านใช้โปรโตคอลการส่งสัญญาณแบบ Amplify-and-Forward (AF)

4.2 การวิเคราะห์ผลของระบบที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางโดยความจุของช่องสัญญาณ เมื่อค่า Alpha = 3

ตารางที่ 4.2 ระยะห่างระหว่าง Relay ที่ตั้งค่าและค่า SNR ที่ได้จากการจำลองระบบ

Relays	**ระยะห่างจาก Source ถึง Relay ตัวที่ i (km)**	**ระยะห่างจาก Relay ตัวที่ i ถึง Base Station (km)**	**ค่า SNR equivalent**
Relay 1	0.03	0.27	3.3932e-022
Relay 2	0.15	0.15	4.0575e-019
Relay 3	0.20	0.10	1.3452e-018
Relay 4	0.25	0.05	1.3227e-019

ตารางที่ 4.3 เวลาเฉลี่ยในการส่งบิตข้อมูลจำนวนหนึ่งล้านบิตในแต่ละวิธีที่ได้จากการจำลองระบบ

เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (SNR)	**เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (Channel Capacity)**
3.4667 วินาที	5.1921 วินาที

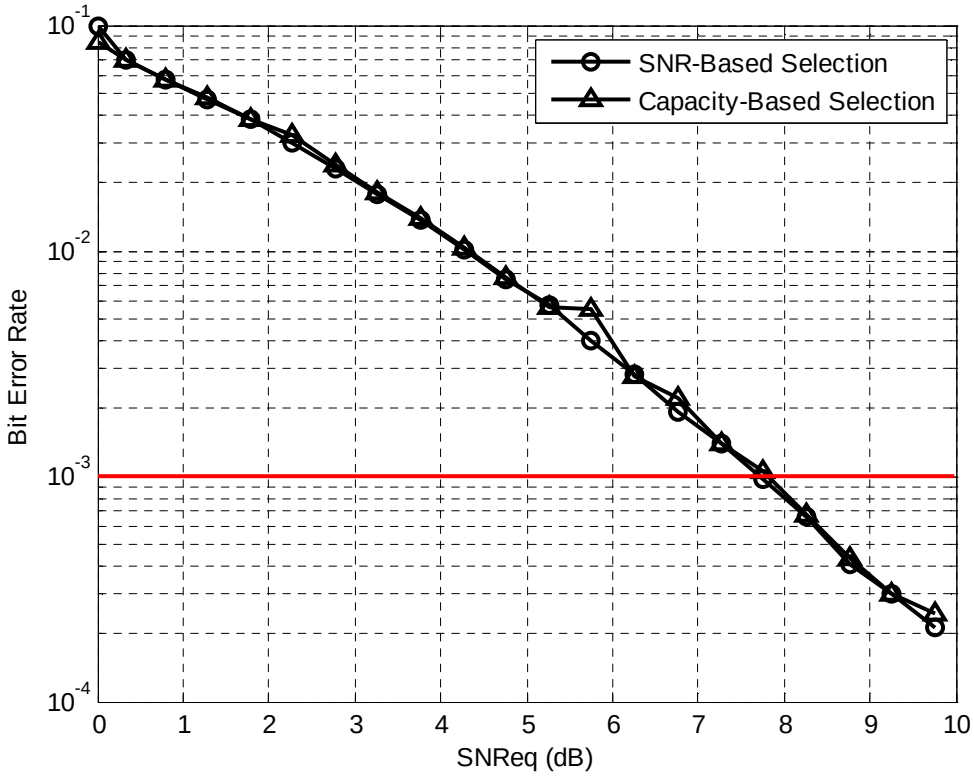
จากตารางที่ 4.2 การตั้งค่าระยะทางรวมจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีฐานปลายทางในทุกเส้นทางมีค่าเท่ากันหมดคือเท่ากับ 0.3 กิโลเมตร หรือ 300 เมตร และโดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ระบบจะทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 จากทั้งหมด 4 เส้นทาง (เนื่องจากการทำ Pre-coding STBC แบบ Alamouti นั้นจำเป็นต้องใช้

เส้นทางในการส่งสองเส้นทางจากสองรีเลย์ตามสมการที่ระบุไว้ในบทที่ 3) ซึ่งระบบทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 นั้น เป็นผลมาจากช่องสัญญาณและค่าการจางหาย (Path loss) ในแต่ละเส้นทางซึ่งส่งผลต่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสุดท้ายที่สถานีฐานปลายทางรับได้ (SNR equivalent) ซึ่งปรากฏว่าเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 มีค่า SNR equivalent มากที่สุดสองลำดับแรกจากทั้งหมด 4 ค่า ระบบจึงทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 เพื่อใช้ส่งข้อมูลไปยังปลายทาง

จากตารางที่ 4.3 ด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งบิตข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1 ล้านบิต จะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 3.4667 วินาที ดังนั้น อัตราการส่งข้อมูลในระบบไร้สายที่นำเสนอจะมีค่าประมาณ 0.2885 Mbps และด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งบิตข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1 ล้านบิต จะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 5.1921 วินาที ดังนั้น อัตราการส่งข้อมูลจะมีค่าประมาณ 0.1926 Mbps และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะได้ว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวน 1 ล้านบิต ด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มีอัตราการส่งข้อมูลเร็วกว่าวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) อยู่โดยเฉลี่ย 0.0958 Mbps โดยใช้เวลาในการส่งเร็วกว่าประมาณ 1.7254 วินาที หรือเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 33.23% ดังที่แสดงผลในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบในการเลือกเส้นทางแต่ละวิธี

เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (SNR)	**เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (Channel Capacity)**	**ผลต่าง**	**เร็วกว่าคิดเป็นร้อยละ (%)**
3.4667 วินาที	5.1921 วินาที	1.7254 วินาที	33.2313 %
อัตราการส่งข้อมูล	**อัตราการส่งข้อมูล**	**ผลต่าง**	**เร็วกว่าคิดเป็นร้อยละ (%)**
0.2885 Mbps	0.1926 Mbps	0.0958 Mbps	49.77 %



รูปที่ 4.1 แสดงประสิทธิภาพของระบบในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) โดยวิธีการเลือกเส้นทางในแต่ละแบบเปรียบเทียบกัน เมื่อค่า Alpha = 3

และเพื่อให้ระบบที่นำเสนอประยุกต์ใช้งานได้จริง จึงใช้ค่าความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ (Imperfection Channel) เท่ากับ 1 คือ ช่องสัญญาณผิดไปจากความเป็นจริงประมาณ 50% โดยเมื่อจำลองระบบแล้วจะได้กราฟที่แสดงประสิทธิภาพของระบบในรูปของอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) ตามรูปที่ 4.1 ซึ่งวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) กับวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่ใกล้เคียงกันมาก เป็นผลมาจากในสมการของ Shannon–Hartley theorem จะใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และค่าความจุของช่องสัญญาณ ในการคำนวณเหมือนกัน ดังนั้นในการส่งข้อมูลแบบ Alamouti STBC จึงให้ประสิทธิภาพของระบบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/1000 (10^{-3}) จะได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 7.8 dB

4.3 การวิเคราะห์ผลของระบบที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางโดยความจุของช่องสัญญาณ เมื่อค่า Alpha = 5

ตารางที่ 4.5 ระยะห่างระหว่าง Relay ที่ตั้งค่าและค่า SNR ที่ได้จากการจำลองระบบ

Relays	**ระยะห่างจาก Source ถึง Relay ตัวที่ i (km)**	**ระยะห่างจาก Relay ตัวที่ i ถึง Base Station (km)**	**ค่า SNR equivalent**
Relay 1	0.03	0.27	1.4607e-030
Relay 2	0.15	0.15	1.0399e-025
Relay 3	0.20	0.10	2.1523e-025
Relay 4	0.25	0.05	3.2294e-027

ตารางที่ 4.6 เวลาเฉลี่ยในการส่งบิตข้อมูลจำนวนหนึ่งล้านบิตในแต่ละวิธีที่ได้จากการจำลองระบบ

เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (SNR)	**เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (Channel Capacity)**
3.6803 วินาที	5.3829 วินาที

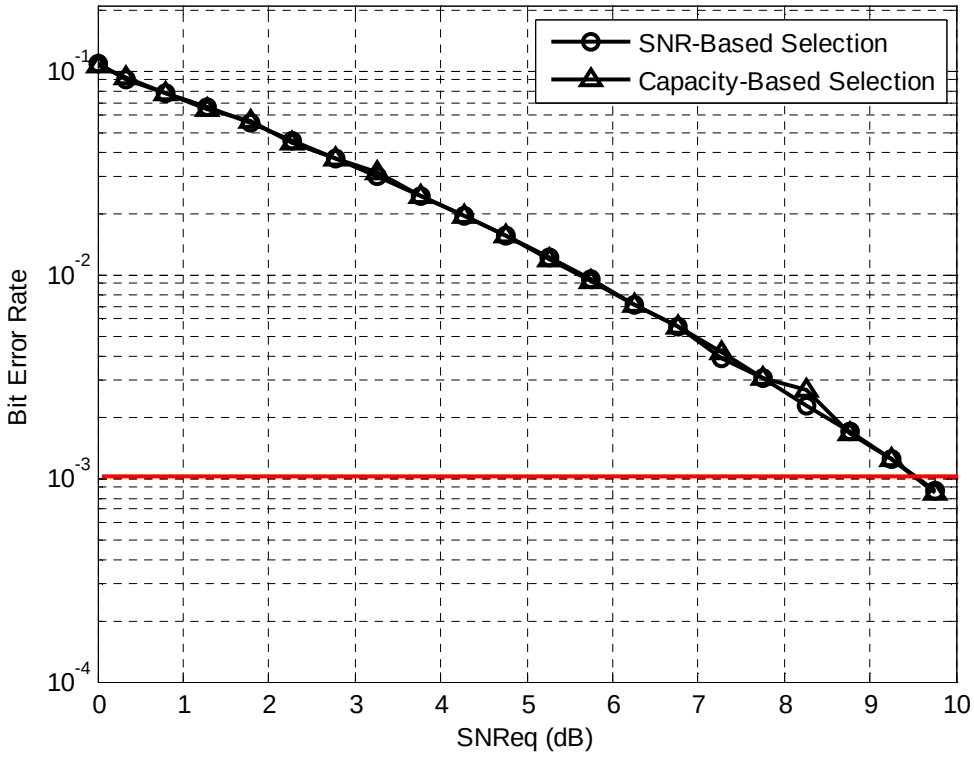
จากตารางที่ 4.5 การตั้งค่าสภาวะแวดล้อมในการจำลองระบบเหมือนกันกับสภาวะแวดล้อมเดิม เพียงแต่เปลี่ยนค่า Path loss exponent จาก 3 เป็น 5 คือเป็นสภาวะแวดล้อมที่เป็นบริเวณที่มีอาคารสูงจำนวนมากที่ไม่มีเส้นสายตา (No Line of Sight, No LOS) โดยระยะทางรวมจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีฐานปลายทางในทุกเส้นทางมีค่าเท่ากันหมดคือเท่ากับ 0.3 กิโลเมตร หรือ 300 เมตร และโดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ระบบจะทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 จากทั้งหมด 4 เส้นทาง (เนื่องจากการทำ Pre-coding STBC แบบ Alamouti นั้นจำเป็นต้องใช้เส้นทางในการส่งสองเส้นทางจากสองรีเลย์ตามสมการที่ระบุไว้ในบทที่ 3) ซึ่งระบบทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 นั้น เป็นผลมาจากช่องสัญญาณและค่าการจางหาย (Path loss) ในแต่ละเส้นทางซึ่งส่งผลต่อค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสุดท้ายที่สถานีฐานปลายทางรับได้ (SNR equivalent) ซึ่งปรากฏว่าเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 มี

ค่า SNR equivalent มากที่สุดสองลำดับแรกจากทั้งหมด 4 ค่า ระบบจึงทำการเลือกเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 เพื่อใช้ส่งข้อมูลไปยังปลายทาง

จากตารางที่ 4.6 ด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งบิตข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1 ล้านบิต จะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 3.6803 วินาที ดังนั้น อัตราการส่งข้อมูลในระบบไร้สายที่นำเสนอจะมีค่าประมาณ 0.2717 Mbps และด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งบิตข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1 ล้านบิต จะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 5.3829 วินาที ดังนั้น อัตราการส่งข้อมูลจะมีค่าประมาณ 0.1858 Mbps และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะได้ว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวน 1 ล้านบิต ด้วยวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มีอัตราการส่งข้อมูลเร็วกว่าวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) อยู่โดยเฉลี่ย 0.0859 Mbps โดยใช้เวลาในการส่งเร็วกว่าประมาณ 1.7026 วินาที หรือเร็วกว่าโดยเฉลี่ย 31.629 % ดังที่แสดงผลในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบในการเลือกเส้นทางแต่ละวิธี

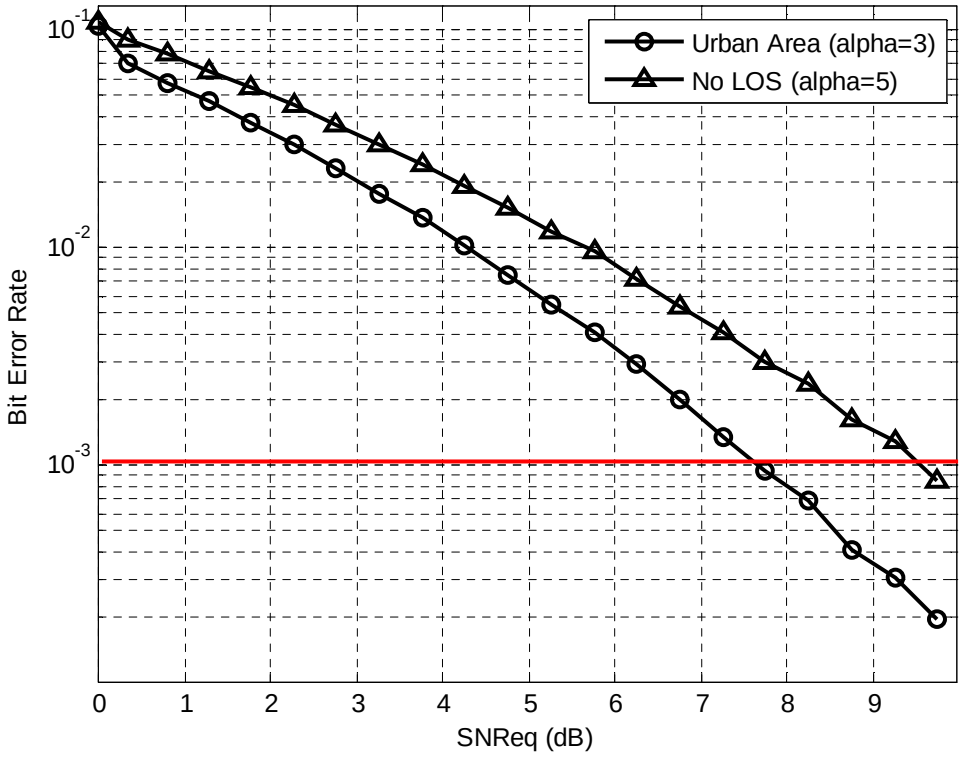
เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (SNR)	**เวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูล 1 Mb (Channel Capacity)**	**ผลต่าง**	**เร็วกว่าคิดเป็นร้อยละ (%)**
3.6803 วินาที	5.3829 วินาที	1.7026 วินาที	31.629 %
อัตราการส่งข้อมูล	**อัตราการส่งข้อมูล**	**ผลต่าง**	**เร็วกว่าคิดเป็นร้อยละ (%)**
0.2717 Mbps	0.1858 Mbps	0.0859 Mbps	46.26 %



รูปที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพของระบบในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) โดยวิธีการเลือกเส้นทางในแต่ละแบบเปรียบเทียบกัน เมื่อค่า Alpha = 5

และเพื่อให้ระบบที่นำเสนอประยุกต์ใช้งานได้จริง จึงใช้ค่าความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ (Imperfection Channel) เท่ากับ 1 คือ ช่องสัญญาณผิดไปจากความเป็นจริงประมาณ 50% โดยเมื่อจำลองระบบแล้วจะได้กราฟที่แสดงประสิทธิภาพของระบบในรูปของอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) ตามรูปที่ 4.2 ซึ่งวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) กับวิธีการเลือกเส้นทางจากค่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ที่ใกล้เคียงกันมาก เป็นผลมาจากในสมการของ Shannon–Hartley theorem จะใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และค่าความจุของช่องสัญญาณ ในการคำนวณเหมือนกัน ดังนั้นในการส่งข้อมูลแบบ Alamouti STBC จึงให้ประสิทธิภาพของระบบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/1000 (10^{-3}) จะได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 9.5 dB

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ เมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5



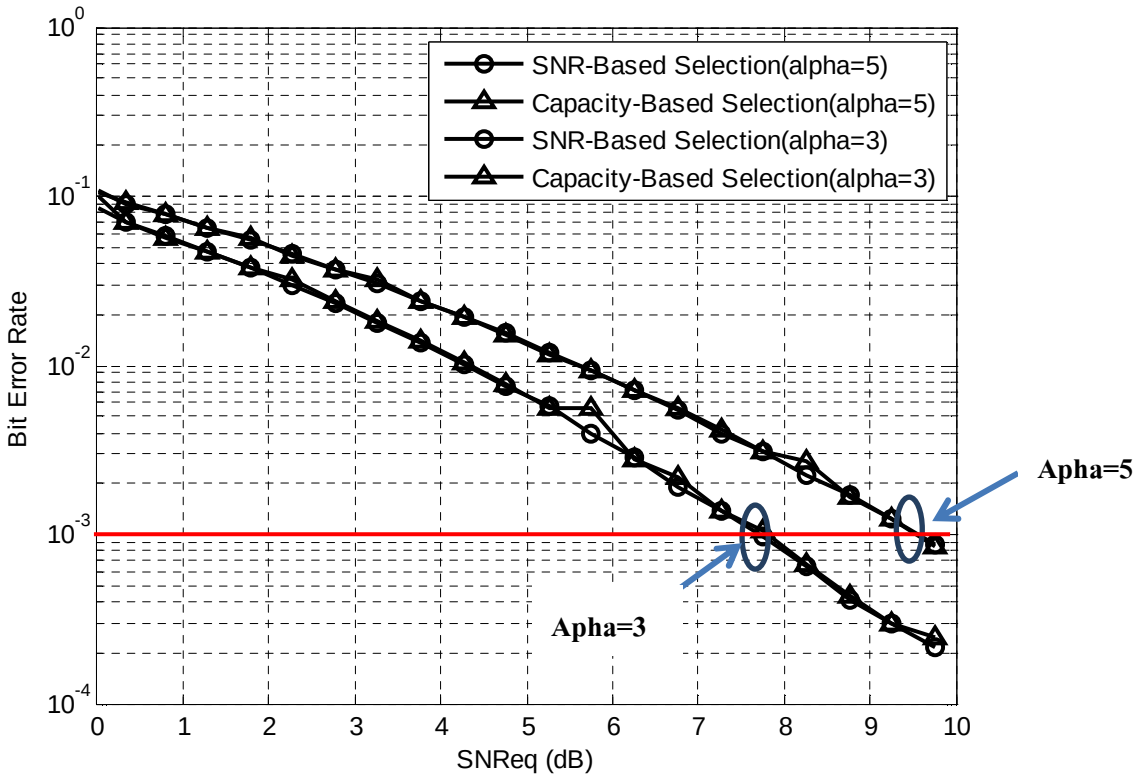
รูปที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพของระบบแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) เมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5 โดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบ SNR

จากรูปที่ 4.3 เมื่อทำการเปรียบกันระหว่างสภาวะแวดล้อมที่เป็นชุมชนเมือง (Urban Area) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 3 และสภาวะแวดล้อมที่เป็นอาคารสูงจำนวนมาก (No LOS) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 5 และที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/1000 (10^{-3}) จะได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เป็นไปตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่า SNR ที่ได้จากการจำลองระบบที่ระดับ BER = 10^{-3}

SNR at BER = 10^{-3} (Apha = 3)	**SNR at BER = 10^{-3} (Apha =5)**
7.8 dB	9.5 dB

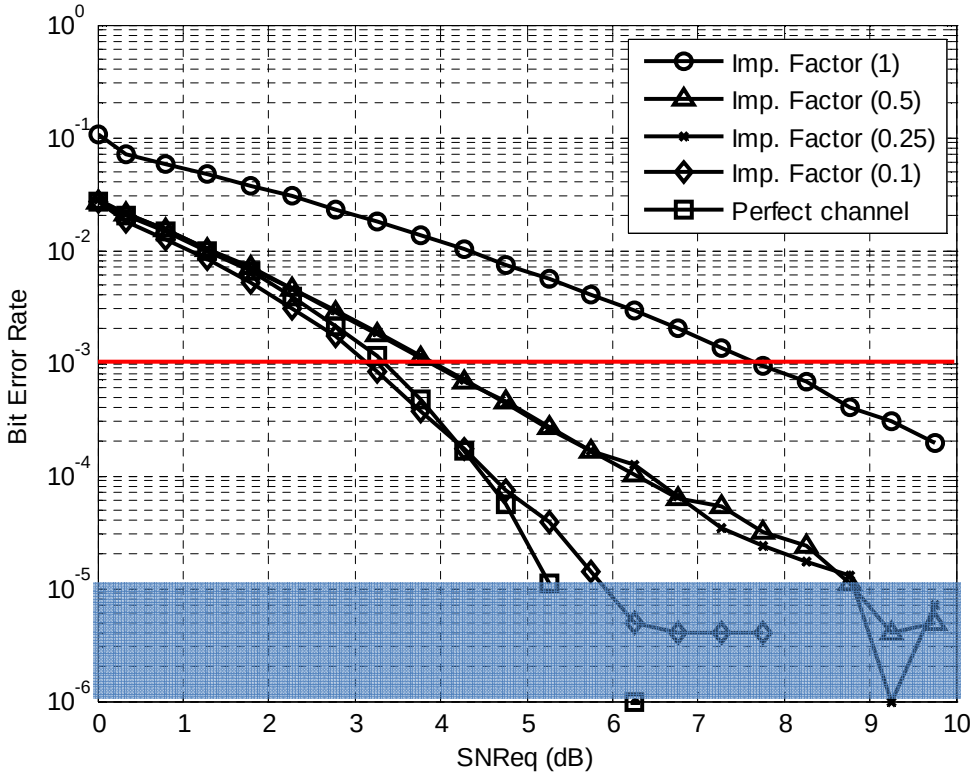
ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจากทั้งสองสภาวะแวดล้อมที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) 10^{-3} มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ 1.7 dB หมายถึงต้องใช้กำลังส่งมากขึ้น 1.49 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลในสภาวะแวดล้อมแบบที่มีอาคารสูงจำนวนมาก (No LOS) เท่ากันกับประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง (Urban Area)



รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพของระบบแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) เมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5 โดยวิธีการเลือกเส้นทางแบบ SNR เปรียบเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางแบบ Channel capacity

4.5 การวิเคราะห์ผลของระบบที่นำเสนอเมื่อเกิดความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณที่ค่าต่างๆ

กรณีที่ 1 : เมื่อค่า Alpha = 3



รูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพของระบบซึ่งได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 3

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ได้รับผลจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 3

BER = 10^{-3} ($\alpha = 3$)	Perfect Channel (100%)	Imp. Factor 0.10 (90%)	Imp. Factor 0.25 (80%)	Imp. Factor 0.50 (67%)	Imp. Factor 1.00 (50%)
SNR eq. (dB)	3.3	3.2	3.9	3.9	7.8

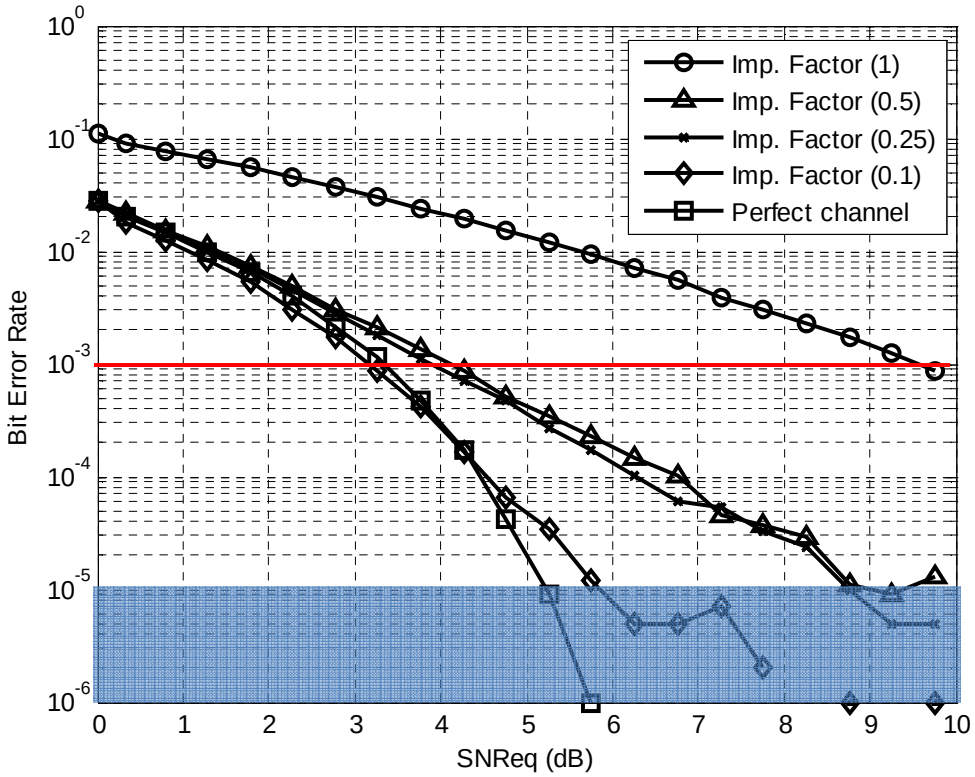
เมื่อวิเคราะห์ความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณที่ใส่ไว้ในการจำลองระบบตามที่ระบุไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.9 แสดงว่าช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ในช่องสัญญาณจะมีผลทำให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลมากขึ้น โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลเท่ากับ 10^{-3} จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3.3 dB เมื่อช่องสัญญาณไม่ได้รับผลกระทบหรือเป็นช่องสัญญาณในอุดมคติ (Perfect Channel) แต่เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.1 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 90% (ผิดเพี้ยนไป 10%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.2 dB ซึ่งมีผลต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบเพียง 0.1 dB

เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.25 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 80% (ผิดเพี้ยนไป 20%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.9 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 0.6 dB และเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.5 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 67% (ผิดเพี้ยนไป 33%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.9 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 0.6 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 1.15 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ

และเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 1.0 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 50% (ผิดเพี้ยนไป 50%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 7.8 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 4.5 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 2.82 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ

ในรูปที่ 4.5 พบว่าที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่า 10^{-5} รูปเส้นกราฟจะเริ่มผิดเพี้ยนไปจากแนวปกติเป็นผลมาจากสองปัจจัยหลักในการเขียนโปรแกรมได้แก่ จำนวนครั้งในการจำลองระบบไม่มากพอที่จะนำข้อมูลมาเฉลี่ยกันได้ และอีกปัจจัยเนื่องมาจากจำนวนข้อมูลที่ส่งนั้นมีเพียง 1 ล้านบิต ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ระดับ 1/100,000 (10^{-5}) ถึง 1/1,000,000 (10^{-6}) จะถือว่าน้อยมากจนสามารถตัดออกจากการพิจารณาได้ ดังนั้นในการพิจาณาระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลจะพิจารณาที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 1/1000 (10^{-3})

กรณีที่ 2 : เมื่อค่า Alpha = 5



รูปที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพของระบบซึ่งได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 5

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ได้รับผลจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 5

BER = 10^{-3} ($\alpha = 5$)	Perfect Channel (100%)	Imp. Factor 0.10 (90%)	Imp. Factor 0.25 (80%)	Imp. Factor 0.50 (67%)	Imp. Factor 1.00 (50%)
SNR eq. (dB)	3.3	3.2	3.9	4.1	9.5

เมื่อวิเคราะห์ความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.10 แสดงว่าช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ในช่องสัญญาณจะมีผลทำให้อัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลมากขึ้น โดยที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลเท่ากับ 10^{-3} จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3.3 dB เมื่อช่องสัญญาณไม่ได้รับผลกระทบหรือเป็นช่องสัญญาณในอุดมคติ (Perfect Channel) แต่เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.1 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 90% (ผิดเพี้ยนไป 10%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.2 dB ซึ่งมีผลต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบเพียง 0.1 dB

เมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.25 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 80% (ผิดเพี้ยนไป 20%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 3.9 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 0.6 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 1.15 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ และเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.5 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 67% (ผิดเพี้ยนไป 33%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 4.1 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 0.8 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 1.2 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ

และเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 1.0 คือช่องสัญญาณมีความสมบูรณ์ 50% (ผิดเพี้ยนไป 50%) จะใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 9.5 dB ซึ่งต่างจากช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ 6.2 dB คือต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้นประมาณ 4.17 เท่า จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเท่ากับการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ

และเช่นเดียวกัน ในรูปที่ 4.6 ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (BER) ต่ำกว่า 10^{-5} รูปเส้นกราฟจะเริ่มผิดเพี้ยนไปจากแนวปกติเป็นผลมาจากสองปัจจัยหลักในการเขียนโปรแกรม ได้แก่ จำนวนครั้งในการจำลองระบบไม่มากพอที่จะนำข้อมูลมาเฉลี่ยกันได้ และอีกปัจจัยเนื่องมาจากจำนวนข้อมูลที่ส่งนั้นมีเพียง 1 ล้านบิต ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ระดับ 1/100,000 (10^{-5}) ถึง 1/1,000,000 (10^{-6}) จะถือว่าน้อยมากจนสามารถตัดออกจากการพิจารณาได้

และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างสภาวะแวดล้อมทั้งสองแบบคือสภาวะแวดล้อมที่เป็นชุมชนเมือง (Urban Area) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 3 และสภาวะแวดล้อมที่เป็นอาคารสูงจำนวนมาก (No LOS) ซึ่งมีค่า Alpha เท่ากับ 5 จะได้ผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ได้รับผลจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณเมื่อค่า Alpha = 3 และ Alpha = 5

BER = 10^{-3}	Perfect Channel (100%)	Imp. Factor 0.10 (90%)	Imp. Factor 0.25 (80%)	Imp. Factor 0.50 (67%)	Imp. Factor 1.00 (50%)
SNR eq. (dB) ($\alpha = 3$)	3.3	3.2	3.9	3.9	7.8
SNR eq. (dB) ($\alpha = 5$)	3.3	3.2	3.9	4.1	9.5

จากตารางที่ 4.11 จะพบว่าที่ช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบ (Perfect channel), ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.1 และช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบเท่ากับ 0.25 ที่ระดับอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) เท่ากับ 10^{-3} จะได้ค่า SNR ที่ใกล้เคียงกัน และจะต่างกันเมื่อช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ด้วยตัวประกอบมากกว่า 0.5 ขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกันกับการจำลองระบบที่ใช้ตัวแปรและออกแบบเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับการใช้งานจริงได้ตามที่วิเคราะห์แล้วในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3