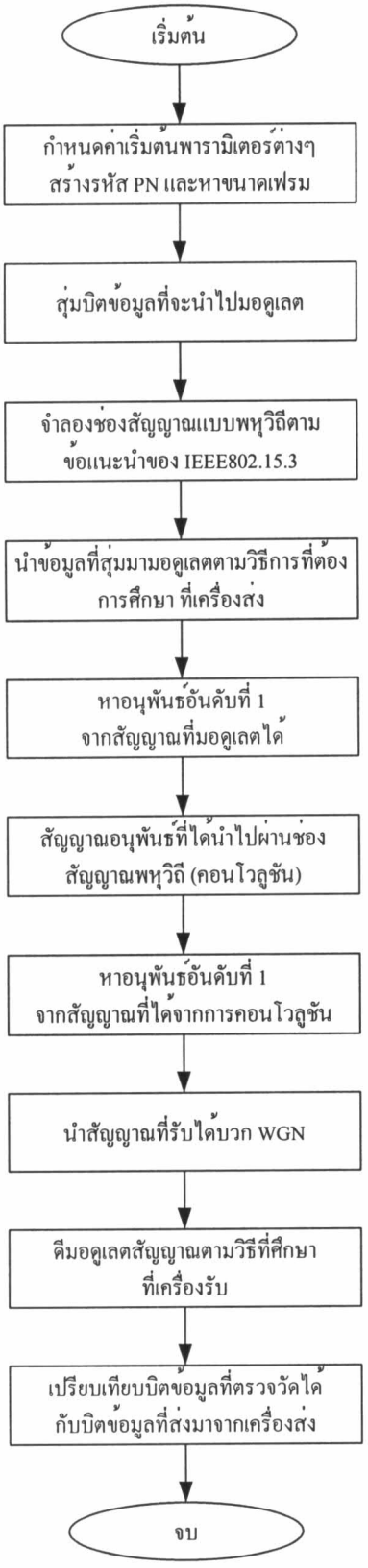
# บทที่ 4

# ผลการศึกษาหาสมรรถนะต่างๆ

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการ, พารามิเตอร์ และผลลัพธ์ในสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เพื่อวิเคราะห์หาสมรรถนะต่างๆ ของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ได้นำเสนอ ซึ่งจะเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารแบบ TH-PPPM UWB

## 4.1 วิธีการจำลองการทำงานและพารามิเตอร์ต่างๆ

การทำงานของระบบสื่อสารแบบ UWB แบบต่างๆ ที่เสนอนี้จำลองโดยการเขียนโปรแกรมจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ตามไดอะแกรมในรูปที่ 4.1 เริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้กับแบบจำลอง เช่นอัตราการส่งข้อมูล ขนาดของเฟรม เป็นต้น แล้วจึงทำการสุ่มบิตข้อมูลที่จะนำไปมอดูเลต โดยใช้การสุ่มที่มีการกระจายแบบเท่าเทียมกัน (uniform distribution) จากนั้นจึงทำการจำลองช่องสัญญาณแบบพหุวิถีแบบ CM1 ตามคำแนะนำโดยร่างมาตรฐาน IEEE802.15.3 เพื่อหาค่าการตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ (channel impulse response) เพื่อนำไปใช้ในการทำคอนโวลูชันต่อไป แล้วจึงทำการมอดูเลตบิตข้อมูลที่สุ่มขึ้นมาด้วยวิธีการสื่อสารแบบ UWB แบบต่างๆ ที่ศึกษา สัญญาณที่มอดูเลตได้จะถูกนำไปหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 ก่อนเพื่อเป็นการจำลองการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศของเครื่องส่ง ซึ่งสมมติให้สายอากาศนี้มีการทรานส์ฟอร์มสมบูรณ์แบบ แล้วจึงทำการคอนโวลูชันกับค่าการตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณที่ได้จำลองมาก่อนหน้านี้ จากนั้นก็จะทำการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 อีกครั้งเพื่อเป็นการจำลองการรับสัญญาณของสายอากาศของเครื่องรับ ซึ่งก็สมมติให้สายอากาศนี้มีการทรานส์ฟอร์มสมบูรณ์แบบเช่นเดียวกัน จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้บวกกับสัญญาณรบกวนสีขาว (white Gaussian noise, WGN) แล้วจึงทำการดีมอดูเลตสัญญาณที่รับได้ ซึ่งจะใช้รหัสการแผ่สเปกตรัมเดียวกันกับที่เครื่องส่งใช้ แล้วจึงทำการตรวจวัดบิตข้อมูล บิตข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับบิตข้อมูลที่ถูกส่งมาจากเครื่องส่ง เพื่อคำนวณหาสมรรถนะการทำงานต่อไป




รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการจำลองการทำงาน

เนื่องจากระบบสื่อสารแบบ UWB ที่นำเสนอนี้ได้ถูกออกแบบให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ในอัตราตั้งแต่ระดับไม่กี่ล้านบิตต่อวินาที (Mbps) จนถึงระดับมากกว่าหนึ่งร้อยล้านบิตต่อวินาที ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ได้ศึกษาวิจัยจึงสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

| พารามิเตอร์ | TH-PPM | | DS-QPSK/TH-QPSK | | TH-QPSK-PPM | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $N_s = 1$ | $N_s = 2$ | $N_s = 1$ | $N_s = 2$ | $N_s = 1$ | $N_s = 2$ |
| $R_b$ (Mbps) | 6.25→200 | | | | | |
| Symbol rate (MHz) | 6.25→200 | | 3.125→100 | | 2.083→66.67 | |
| Number of bits/symbol | 1 | | 2 | | 3 | |
| $T_f$ (ns) | 160→5 | 80→2.5 | 320→10 | 160→5 | 480→15 | 240→7.5 |
| $T_c$ (ns) | 0.625 | | 0.625 | | 0.75 | |
| $N_h$ (chips/frame) | 256→8 | 128→4 | 512→16 | 256→8 | 640→20 | 320→10 |
| $\Delta$ (ns) | 0.044 | | - | | 0.1654 | |

ระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาทุกระบบจะใช้สัญญาณอิมพัลส์ที่มีคาบเวลาเท่ากับ 0.58 ns ตามรูปที่ 3.2 สำหรับระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB นั้นจะใช้เฉพาะสัญญาณอิมพัลส์อินเฟสในการรับส่งสัญญาณ โดยมีวิธีการรับส่งสัญญาณและการสร้างสัญญาณเทมเพลตที่เครื่องรับใช้ในการดีมอดูเลตแบบ PPM จะใช้วิธีเดียวกับวิธีที่ใช้ใน [3]

กำหนดให้ตำแหน่งของเครื่องส่งของผู้ใช้งานแต่ละคนมีการกระจายแบบเท่าเทียม และอยู่ภายในรัศมีไม่เกิน 4 เมตร โดยมีเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ทดสอบและทำการวัดอยู่ ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง โดยสายอากาศของเครื่องส่งและเครื่องรับนั้นกำหนดให้มีคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (isotropic antenna) และมีอัตราการขยายสัญญาณของสายอากาศเป็น 0 dB เพราะฉะนั้นคุณลักษณะของช่องสัญญาณแบบพหุวิถีจะเป็นไปตามข้อกำหนดของแบบจำลองแบบ CM1 ที่มีส่วนของสัญญาณใน LOS ซึ่งแนะนำโดยกลุ่มทำงาน IEEE802.15.3a [16] ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองช่องสัญญาณแบบพหุวิถี

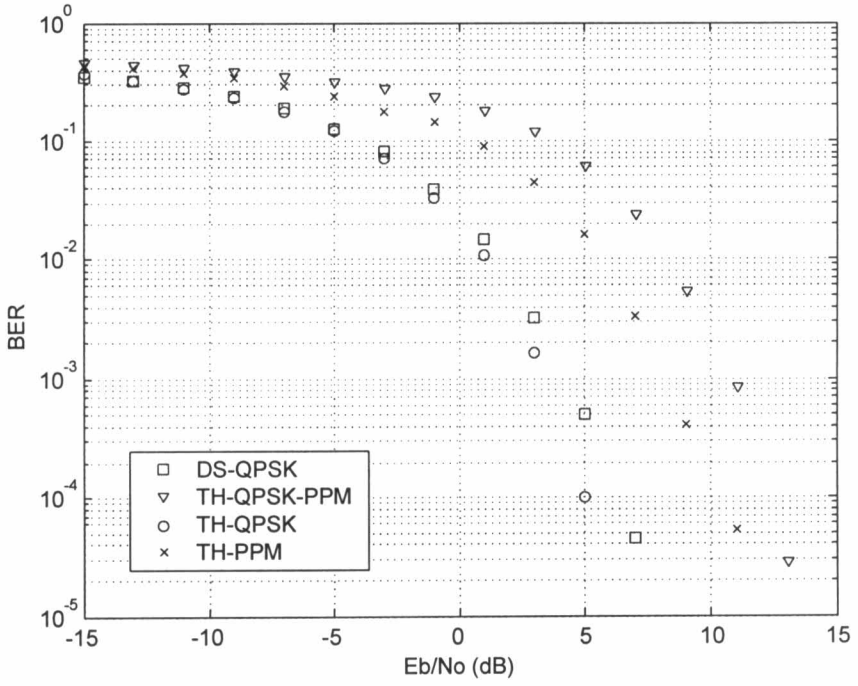
| **พารามิเตอร์ที่ต้องการ** | |
|---|---|
| Mean excess delay (nsec) ( $\tau_m$ ) | 5.05 |
| RMS delay (nsec) ( $\tau_{rms}$ ) | 5.28 |
| NP 10dB | |
| NP (85%) | 24 |
| **พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง** | |
| $\Lambda$ (1/nsec) | 0.0233 |
| $\lambda$ (1/nsec) | 2.5 |
| $\Gamma$ | 7.1 |
| $\gamma$ | 4.3 |
| $\sigma_1$ (dB) | 3.3941 |
| $\sigma_2$ (dB) | 3.3941 |
| $\sigma_x$ (dB) | 3 |

กำหนดให้ไม่มีสัญญาณรบกวนเนื่องจากระบบสื่อสารอื่นๆ มารบกวนระบบสื่อสารแบบ UWB ที่กำลังศึกษาวิจัย ผลการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาวิจัยที่ได้นั้นมาจากผลจำลองการทำงานของข้อมูลประมาณ 100 ชุด ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน และในข้อมูลแต่ละชุดจะมีการรับส่งข้อมูลทั้งหมดประมาณ 1200 บิต แต่จะไม่มีการนำข้อมูล 200 บิตแรกมาใช้ในการวัดหาสมรรถนะ ทั้งนี้เพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นทำงานจนเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ก่อนที่จะวัดหาสมรรถนะต่างๆ ของแบบจำลอง

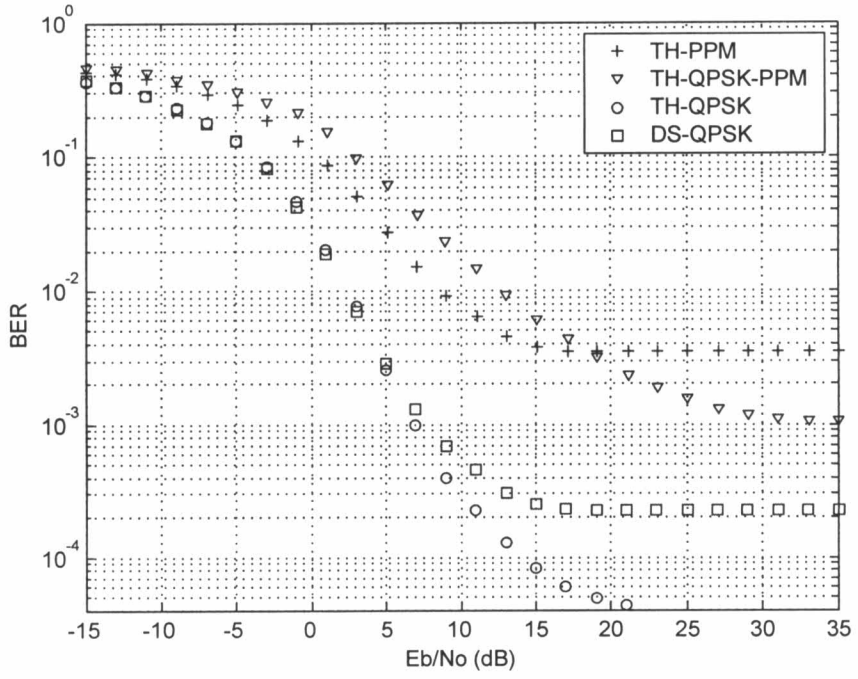
4.2 ผลการจำลองการทำงานผ่านช่องสัญญาณ AWGN

ในส่วนนี้จะเป็นผลการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ ที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่ 100 Mbps และส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณแบบ AWGN เพื่อหาสมรรถนะการทำงานของระบบที่มีผู้ใช้งานหลายคน (MUS) โดยในรูปที่ 4.2 เป็นผลการจำลองของระบบที่มีผู้ใช้งาน 5 คนในระบบ จะพบว่าระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB นั้นจะมีอัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) ดีที่สุด ซึ่งดีกว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB ประมาณ 2 dB ทั้งนี้เมื่อประเมินจากค่าพลังงานต่อบิตต่อกำลังสัญญาณรบกวน ($E_b/N_o$) จะพบว่าที่ BER เท่ากับ $10^{-5}$ นั้น ค่า $E_b/N_o$ ที่ต้องการของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB และ DS-QPSK UWB จะมีค่าไม่เกิน 7 dB และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.1 พบว่า $(E_b/N_o)_{req}$ มีค่าเท่ากับ 15 dB ซึ่งต่างกัน 8 dB ดังนั้นเราสามารถเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณจาก 4 เมตรเป็น 10 เมตรได้ เพราะค่าการสูญเสียเนื่องจากระยะทาง (path loss) ตามสมการที่ (3-4) ที่ระยะ 4 เมตรนั้นมีค่า 12 dB ในขณะที่ค่าการสูญเสียเนื่องจากระยะทางที่ระยะ 10 เมตรนั้นมีค่า 20 dB ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB และ TH-QPSK-PPM UWB จะมีค่าอัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูลด้อยกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ประมาณ 5 dB และ 6 dB ตามลำดับ

ค่าอัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบสื่อสารแบบ UWB กรณีที่มีผู้ใช้งานในระบบ 10 คน แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะพบว่าจะเกิด error floor ของ BER เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงที่เกิดจากสัญญาณรบกวน MAI ในระบบผู้ใช้งานหลายคน ทั้งนี้ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ยังคงให้ผลการทำงานดีที่สุด ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะมี error floor เกิดขึ้นที่ BER = 0.0002 ส่วนระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB จะมี error floor เกิดขึ้นที่ BER = 0.001 สุดท้ายระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB จะมี error floor ที่ BER = 0.0035 ซึ่งระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB มีอัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูลดีที่สุดนั้นมีสาเหตุมาจากเมื่อระบบมีอัตราการส่งข้อมูลที่ 100 Mbps ทำให้จำนวนชิปที่ใช้ในการแผ่สเปกตรัมแบบ TH มีทั้งสิ้น 16 ชิปต่อเฟรม ในขณะที่มีผู้ใช้งาน 10 คน ดังนั้นความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้งานมากกว่า 1 คน ส่งสัญญาณอิมพัลส์ในชิปเดียวกันมีน้อย ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะส่งสัญญาณอิมพัลส์ไปทุกชิปแต่มีขนาดต่ำกว่ามาก การแทรกสอดระหว่างรหัสจึงขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้งานโดยตรง ส่วนค่าอัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB จะมีค่าลดลงได้มากกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB เป็นเพราะระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB มีเฟรมหรือจำนวนชิปที่ใช้ในการแผ่สเปกตรัมแบบ TH มากกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB ประมาณ 3 เท่า ย่อมทำให้ระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้มากกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB ทั้งนี้เมื่อ $E_b/N_o$ มีค่ามากเพียงพอ




รูปที่ 4.2 BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ
เมื่อ $R_b$ = 100 Mbps และ $K$ = 5 ผ่านช่องสัญญาณ AWGN




รูปที่ 4.3 BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ
เมื่อ $R_b$ = 100 Mbps และ $K$ = 10 ผ่านช่องสัญญาณ AWGN

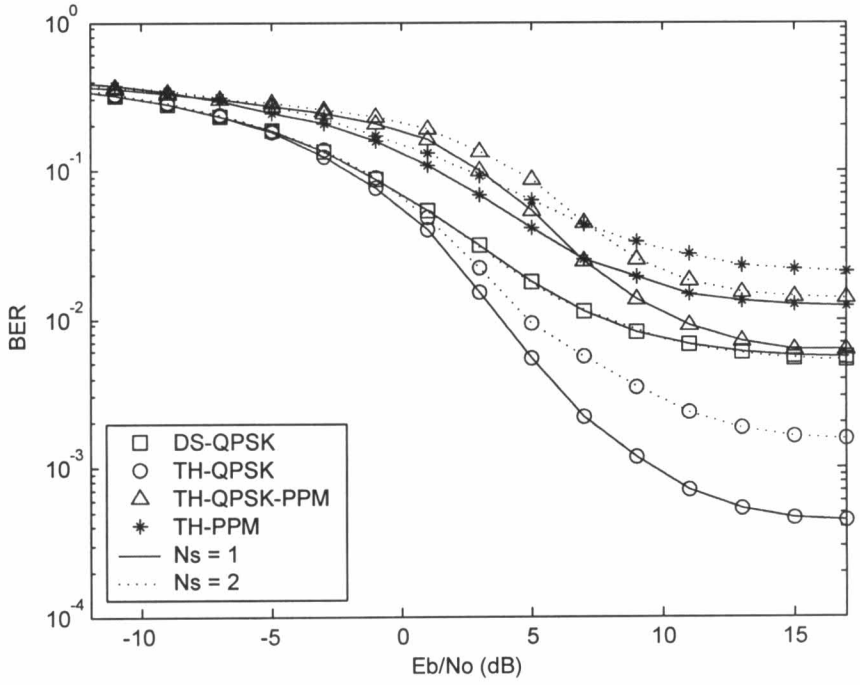
4.3 อัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER)

การจำลองการทำงานตั้งแต่หัวข้อนี้เป็นต้นไปจะทำการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ ผ่านช่องสัญญาณแบบพหุวิถีที่มีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.2

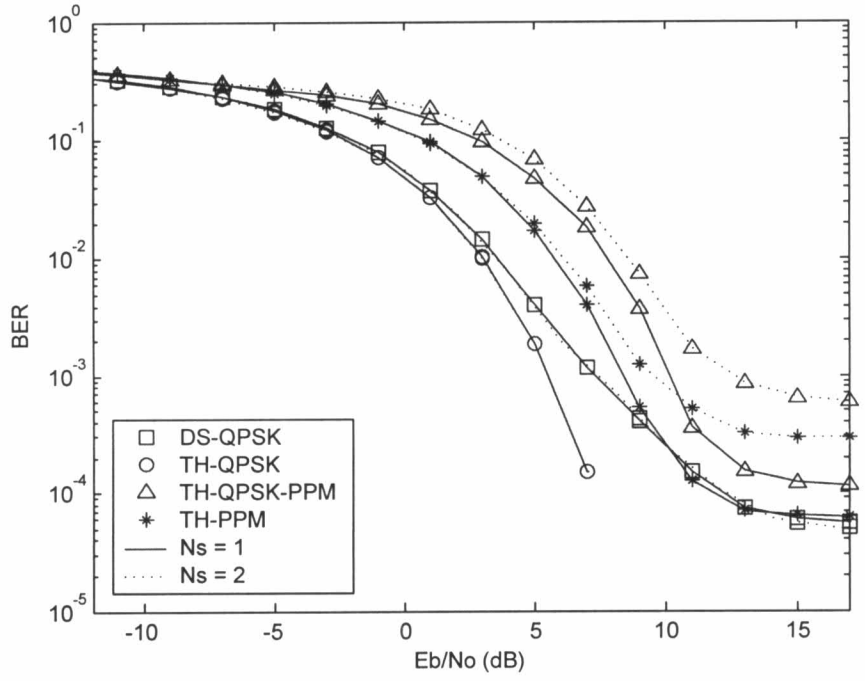
ผลการจำลองการทำงานเพื่อหาอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูล หรือ BER แสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 สำหรับระบบสื่อสารแบบ UWB สำหรับระบบที่มีผู้ใช้งานคนเดียว ($K$ = 1) และมีอัตราการส่งข้อมูลที่ 100 และ 25 Mbps ตามลำดับ การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวน ISI ที่เกิดจากช่องสัญญาณแบบพหุวิถี นั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากระบบสื่อสารที่มีผู้ใช้งานเพียงคนเดียว

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.4 พบว่าการสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB มีสมรรถนะการทำงานของ BER ดีที่สุดในระบบสื่อสารแบบ UWB ที่มีผู้ใช้งานเพียงคนเดียวที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่ 100 Mbps และเมื่อสังเกตจากกราฟในรูปจะเห็นว่า กราฟของ BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ทุกระบบจะมีค่าลดลงเมื่อ $E_b/N_o$ มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นอย่างแน่นอนเพราะเมื่อพลังงานของสัญญาณที่รับได้มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจวัดบิตข้อมูลของเครื่องรับมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม BER ดังกล่าวกลับไม่ได้ดีขึ้นเมื่อ $E_b/N_o$ มีค่ามากขึ้นมากๆ หรือมี error floor เกิดขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการลดทอนสัญญาณจาก ISI ที่เกิดจากสัญญาณอิมพัลส์ที่ถูกส่งออกไปก่อนหน้าและสะท้อนมาจากวัตถุรอบข้าง มาเสริมหรือหักล้างกับสัญญาณอิมพัลส์ปัจจุบันที่เครื่องรับรับได้ โดยพบว่ามีค่า BER ของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB มีค่าประมาณ 0.0004 เมื่อ $E_b/N_o$ = 15 dB และ $N_s$ = 1 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ในกรณีที่ $N_s$ = 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB จะมี BER ประมาณ 0.0017

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.2 และ 4.3 นั้นจะพบว่าผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวน ISI นั้นมีมากกว่าสัญญาณรบกวน MAI ค่อนข้างมาก ทั้งนี้เป็นเพราะสัญญาณอิมพัลส์ที่เกิดจากการสะท้อนนั้นมีจำนวนค่อนข้างมาก และมีระยะเวลาของการเกิดการสะท้อนของสัญญาณค่อนข้างยาวนาน ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.13 และ 2.14 เมื่อเทียบกับความยาวของเฟรมของสัญญาณ แต่ทั้งนี้เมื่อลดอัตราการส่งข้อมูลลงก็จะทำให้เฟรมของสัญญาณยาวมากขึ้น ซึ่งจะทำให้จำนวนชิปต่อเฟรมมีจำนวนมากขึ้นด้วย ดังนั้นผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวน ISI นี้จึงลดน้อยลงดังปรากฏในรูปที่ 4.5 เมื่ออัตรการส่งข้อมูลมีค่าเท่ากับ 25 Mbps ซึ่งเฟรมของข้อมูลหรือจำนวนชิปต่อเฟรมมีค่าเพิ่มขึ้น 4 เท่า




รูปที่ 4.4 BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ
เมื่อ $R_b$ = 100 Mbps และ $K$ = 1




รูปที่ 4.5 BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ
เมื่อ $R_b$ = 25 Mbps และ $K$ = 1

สาเหตุที่ BER ของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ไม่ดีไปกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 1 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ในกรณีของอัตราการส่งข้อมูลที่ 100 Mbps เพราะเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเท่ากัน เฟรมของสัญญาณที่มี $N_s$ = 1 เฟรมต่อสัญลักษณ์ จะยาวกว่าเฟรมของสัญญาณที่มี $N_s$ = 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ กล่าวคือ ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 1 เฟรมต่อสัญลักษณ์ จะมีคาบเวลาของเฟรมของสัญญาณประมาณ 20 ns ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ จะมีคาบเวลาของเฟรมของสัญญาณประมาณ 10 ns เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.14 หรือพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.2 จะพบว่าค่าเฉลี่ยของค่าการหน่วงเวลาส่วนเกิน (excess delay) จะมีค่าประมาณ 5 ns และมากกว่าครึ่งหนึ่งของพลังงานทั้งหมดจะอยู่ในกลุ่มของสัญญาณจากวิถีต่างๆ ที่อยู่ในช่วง 10 ns แรกนับจากสัญญาณในวิถีแรกที่เดินทางมาถึงเครื่องรับ ทำให้ผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวน ISI ในระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ รุนแรงกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 1 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ถึงแม้ว่าจะส่งสัญญาณถึง 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ก็ตาม แต่เมื่ออัตราการส่งข้อมูลลดลง เช่นกรณี $R_b$ = 25 Mbps จะพบว่า BER ของระบบสื่อสาร TH-QPSK UWB เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ มีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่ออัตราการส่งข้อมูลลดลงเหลือ 25 Mbps จะทำให้เฟรมของสัญญาณมีค่ามากขึ้นเป็น 80 และ 40 ns สำหรับระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ ซึ่งคาบเวลาของเฟรมดังกล่าวมีค่ากว้างมากพอ ทำให้สัญญาณรบกวน ISI ที่เกิดจากสัญญาณอิมพัลส์ก่อนหน้ามีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อสัญญาณอิมพัลส์ในเฟรมปัจจุบัน จนกระทั่งไม่เกิด error floor ดังปรากฏในรูปที่ 4.5

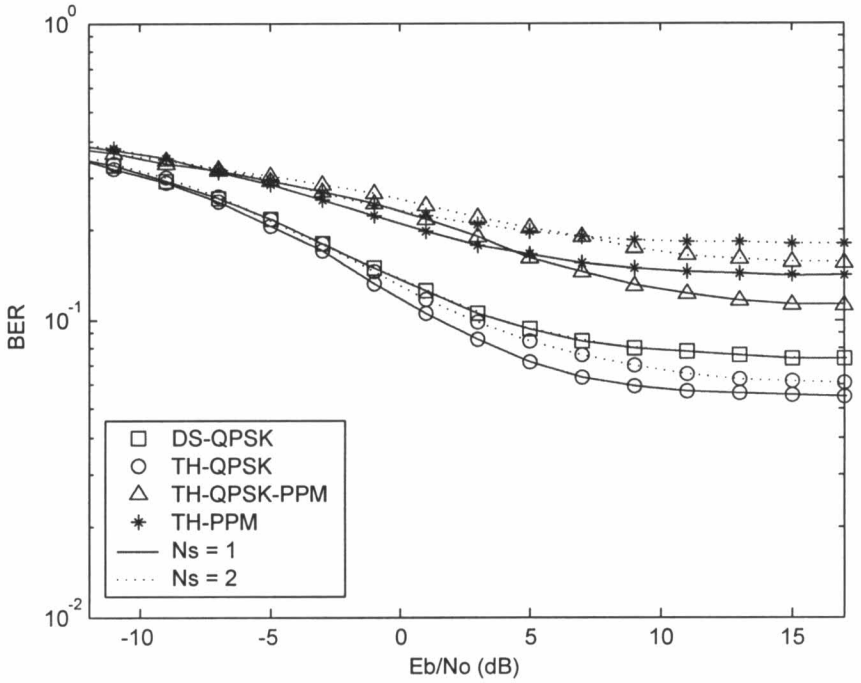
ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB ที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่ 100 Mbps จะมี error floor ของ BER ประมาณ 0.005 และที่อัตราการส่งข้อมูลที่ 25 Mbps จะมี floor ของ BER ประมาณ 0.00005 เมื่อ $E_b/N_o$ = 12 และ 14 dB ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าจำนวนเฟรมต่อสัญลักษณ์ไม่ค่อยมีผลต่อ BER ของระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB เท่าใด เพราะระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะมีจำนวนสัญญาณอิมพัลส์ที่ใช้แทนบิตข้อมูลเท่ากันถึงแม้จะมีจำนวนเฟรมต่อสัญลักษณ์ไม่เท่ากัน หรือมีค่า $N_sN_h$ เท่ากันนั่นเอง เช่น กรณี $R_b$ = 25 Mbps ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 1 เฟรมต่อสัญลักษณ์จะมีจำนวนชิปต่อเฟรมหรือ $N_h$ = 128 ชิปต่อเฟรม นั่นหมายความว่าจะใช้สัญญาณอิมพัลส์ทั้งสิ้นเท่ากับ 128 อิมพัลส์ สำหรับการส่งสัญญาณ 1 สัญลักษณ์ ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ จะมีจำนวนชิปต่อเฟรมหรือ $N_h$ = 64 ชิปต่อเฟรม ก็จะใช้สัญญาณอิมพัลส์ทั้งสิ้น 128 อิมพัลส์สำหรับการส่งสัญญาณ 1 สัญลักษณ์เช่นกัน อย่างไรก็ตามรหัส PN ที่ใช้ในการแผ่สเปกตรัมในแต่ละเฟรมจะไม่เหมือนกัน หมายความ

ว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของรหัส PN ต่อสัญลักษณ์มากกว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB ที่มี $N_s$ = 1 เฟรมต่อสัญลักษณ์

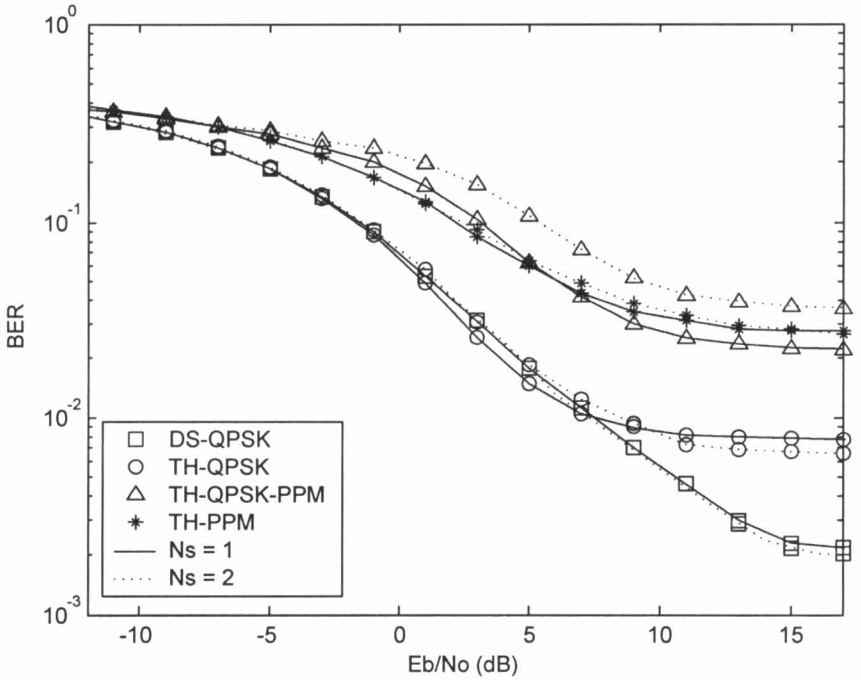
ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB ที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่ 100 Mbps จะมี error floor ของ BER ประมาณ 0.006 เมื่อ $N_s$ = 1 เฟรมต่อสัญลักษณ์ และประมาณ 0.01 เมื่อ $N_s$ = 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ที่อัตราการส่งข้อมูลที่ 25 Mbps จะมี floor ของ BER ประมาณ 0.0001 เมื่อ $N_s$ = 1 เฟรมต่อสัญลักษณ์ และประมาณ 0.0006 เมื่อ $N_s$ = 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ที่ $E_b/N_o$ = 14 dB นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของ BER ของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM นั้นจะช้ากว่าระบบสื่อสารแบบ UWB อื่นๆ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจวัดหาตำแหน่งของสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ว่ามีการเลื่อนไปด้วยค่า $\Delta$ หรือไม่ แต่เมื่อพลังงานของสัญญาณต่อบิตต่อกำลังของสัญญาณรบกวนมีค่ามากพอ ค่า BER ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว และลดลงมากกว่าค่า BER ของระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB ด้วย ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่ $R_b$ = 100 Mbps อย่างไรก็ตาม ค่า BER ที่ได้ไม่ดีไปกว่า BER ของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB และ DS-QPSK UWB

ค่า BER ของระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB นั้นจะมีค่าแย่ที่สุดเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 100 Mbps เป็นเพราะเฟรมของสัญญาณมีความกว้างเท่ากับ 10 และ 5 ns เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ ทำให้สัญญาณรบกวน ISI จากสัญญาณอิมพัลส์ในเฟรมก่อนหน้ามีผลกระทบต่อเฟรมสัญญาณอิมพัลส์ปัจจุบันค่อนข้างมาก แต่เมื่ออัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 25 Mbps ค่า BER ของระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB มีค่าดีกว่า BER ของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB เล็กน้อย เป็นเพราะเฟรมของสัญญาณของระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB มีความกว้างมากขึ้นเป็น 40 และ 20 ns เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ ทำให้สัญญาณรบกวน ISI จากสัญญาณอิมพัลส์ในเฟรมก่อนหน้ามีผลกระทบต่อสัญญาณอิมพัลส์ในเฟรมปัจจุบันน้อยลง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลกระทบของสัญญาณรบกวน ISI ที่เกิดจากระบบสื่อสารแบบ UWB ที่มีผู้ใช้งานในระบบเพียงคนเดียว แล้วพบว่าระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB สามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวน ISI ได้ดีที่สุดส่งผลให้มีค่า BER ต่ำสุด ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB ให้สมรรถนะที่ดีรองลงมา ส่วนระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB จะมี BER ที่ดีกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB เมื่ออัตราการส่งข้อมูลมีค่าสูง และแย่กว่าระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB เมื่ออัตราการส่งข้อมูลมีค่าต่ำ




รูปที่ 4.6 BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ
เมื่อ $R_b$ = 100 Mbps และ $K$ = 5




รูปที่ 4.7 BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ
เมื่อ $R_b$ = 25 Mbps และ $K$ = 5

ส่วนการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวน MAI ที่เกิดจากผู้ใช้งานอื่นๆ ในระบบร่วมกับสัญญาณรบกวน ISI สามารถศึกษาได้จากระบบสื่อสาร ที่มีผู้ใช้งานมากกว่า 1 คน ($K > 1$) รูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นผลการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารแบบ UWB ต่างๆ เพื่อหา BER ในกรณีที่มีผู้ใช้งาน 5 คน สำหรับอัตราการส่งข้อมูลที่ 100 และ 25 Mbps ตามลำดับ

สัญญาณรบกวน MAI ที่เกิดจากผู้ใช้งานอื่นๆ มีผลกระทบค่อนข้างรุนแรงต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารแบบ UWB จะสังเกตได้จากค่า BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ทุกระบบมีค่าแย่ลงเช่น เมื่ออัตราการส่งข้อมูลอยู่ที่ 100 Mbps ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB เกิด error floor ของ BER ที่ประมาณ 0.055 และ 0.06 สำหรับ $N_s = 1$ และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ แต่ก็เป็นระบบที่ให้ BER ที่ดีที่สุด ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB มี error floor ของ BER ที่ประมาณ 0.075 โดยที่ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB และ TH-PPM UWB มี error floor ของ BER มากกว่า 0.1 แต่ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB มี BER ดีกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB เล็กน้อย

แต่เมื่ออัตราการส่งข้อมูลลดลงเป็น 25 Mbps ค่า BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ทุกระบบมีค่าที่ดีขึ้น โดยเฉพาะระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB มีค่า BER ที่ดีขึ้นอย่างมากและดีที่สุดเมื่อเทียบกับระบบสื่อสารแบบ UWB อื่นๆ โดยมี error floor ของ BER ที่ประมาณ 0.002 เท่านั้นเมื่อ $E_b/N_o =$ 15 dB นั่นหมายความว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน MAI ที่เกิดจากผู้ใช้งานคนอื่นๆ ในระบบได้ดีกว่าระบบสื่อสารแบบ UWB แบบอื่นๆ ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB มี error floor ของ BER ประมาณ 0.008 ส่วนระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB และระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB นั้นจะมี error floor ของ BER อยู่ที่ประมาณ 0.02 ถึง 0.04 ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก

ดังนั้นระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB สามารถให้ BER ที่ดีกว่าระบบสื่อสารแบบ UWB อื่นๆ เมื่ออัตราการส่งข้อมูลมีค่าสูงมาก แต่เมื่ออัตราการส่งข้อมูลลดลงกลับพบว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB สามารถทนทานต่อการเกิดสัญญาณรบกวน MAI ได้ดีกว่าระบบสื่อสารแบบ UWB อื่นๆ

อย่างไรก็ตามผลการศึกษาผลกระทบจากสัญญาณรบกวน MAI จากผู้ใช้งานคนอื่นๆ ในระบบที่มีจำนวนผู้ใช้งานในระบบหลายๆ คนจะได้แสดงให้เห็นอย่างละเอียดในภายหลัง

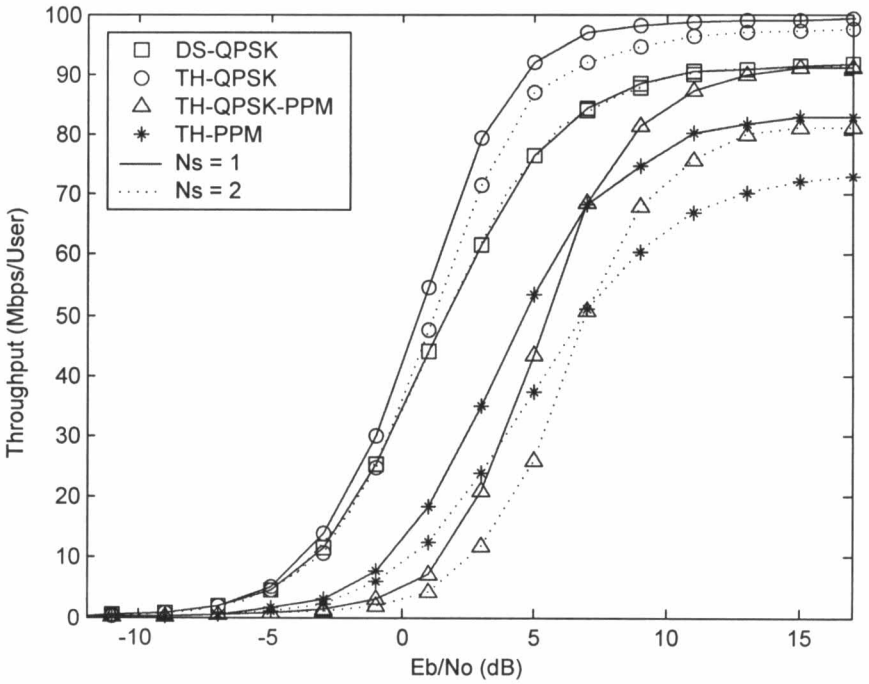
4.4 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จ

ผลการศึกษาหาอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จหรือ throughput จากแบบจำลองของระบบสื่อสารแบบ UWB ต่างๆ นั้นแสดงดังรูปที่ 4.8 ถึง 4.11 โดยกำหนดให้เฟรมข้อมูลของการส่งข้อมูลของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB, DS-QPSK UWB และ TH-PPM UWB มีขนาดเท่ากับ 16 บิต และระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB มีขนาดเฟรมข้อมูลเท่ากับ 15 บิต

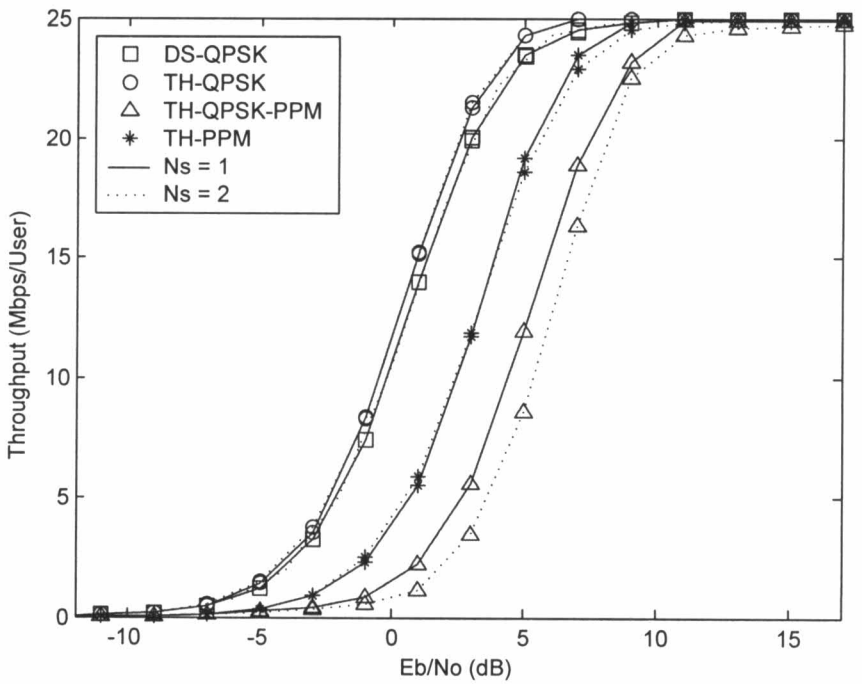
รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงผลการศึกษาหาอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จในกรณีที่ระบบสื่อสารแบบ UWB มีผู้ใช้งานคนเดียว เมื่ออัตราการส่งข้อมูลอยู่ที่ 100 และ 25 Mbps ตามลำดับ โดยระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB จะให้อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จที่ดีที่สุด โดยอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จมีแนวโน้มเกือบเท่ากับค่าอัตราการส่งข้อมูล $R_b$ เมื่อพลังงานต่อบิตต่อกำลังสัญญาณรบกวนมีค่าประมาณ 12 และ 8 dB ขึ้นไปเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 100 และ 25 Mbps ตามลำดับ ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จที่ดีรองลงมา กล่าวคือเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 100 Mbps ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จประมาณ 90 Mbps แต่เมื่ออัตราการส่งข้อมูลลดลงมาเหลือ 25 Mbps ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จเท่ากับอัตราการส่งข้อมูล ซึ่งผลลัพธ์ในลักษณะนี้ก็เกิดขึ้นกับระบบสื่อสารแบบ UWB อื่นๆ ด้วยเมื่ออัตราการส่งข้อมูลลดลงก็จะให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านข้อมูลที่ดีขึ้น

เมื่อผู้ใช้งานส่งข้อมูลที่อัตราการส่งเท่ากับ 100 Mbps ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB นั้นจะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสูงสุดที่ประมาณ 90 และ 80 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จสูงสุดที่ประมาณ 80 และ 70 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ ซึ่งแย่กว่าระบบสื่อสารแบบ UWB อื่นๆ ที่เสนอ อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการส่งข้อมูลลดลงเหลือ 25 Mbps ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB และ TH-PPM UWB ก็สามารถให้ค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จที่ดีจนเท่ากับอัตราการส่งข้อมูลได้ เมื่อพลังงานต่อบิตต่อกำลังสัญญาณรบกวนมีค่ามากเพียงพอ ดังนั้นเมื่อระบบมีผู้ใช้งานคนเดียว ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จที่ดีที่สุด และระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จที่ดีรองลงมา ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จดีกว่าระบบสื่อสาร TH-PPM UWB เมื่อผู้ใช้งานมีอัตราการส่งข้อมูลสูง

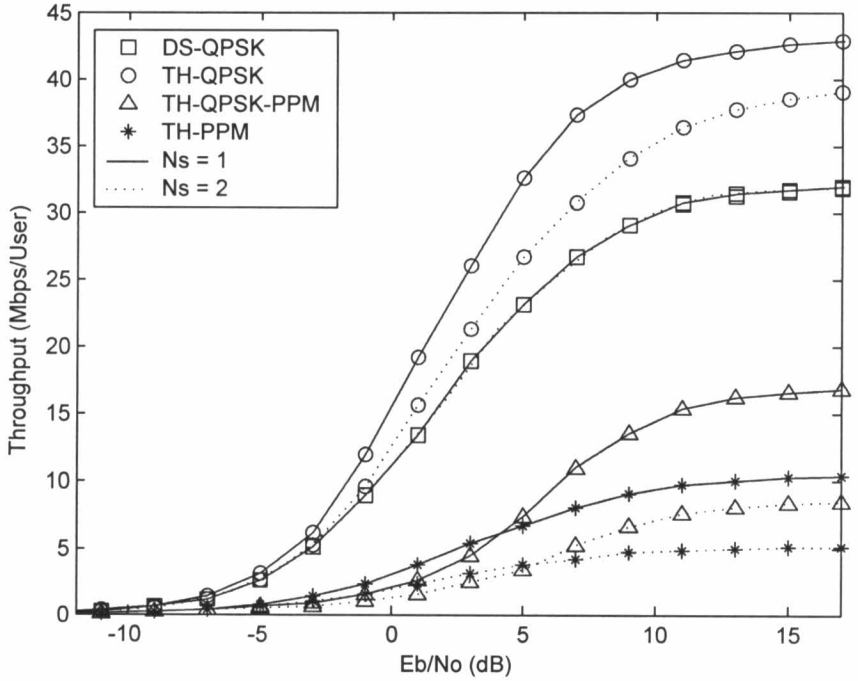
ต่อไปจะพิจารณาผลกระทบของสัญญาณรบกวน MAI ที่เกิดจากผู้ใช้งานในระบบคนอื่นๆ ที่มีต่ออัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จ ซึ่งมีผลการจำลองทำงานตามรูปที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อผู้ใช้งานส่งข้อมูลที่อัตราการส่งเท่ากับ 100 และ 25 Mps ตามลำดับ สำหรับระบบที่มีผู้ใช้งานทั้งสิ้น 5 คน



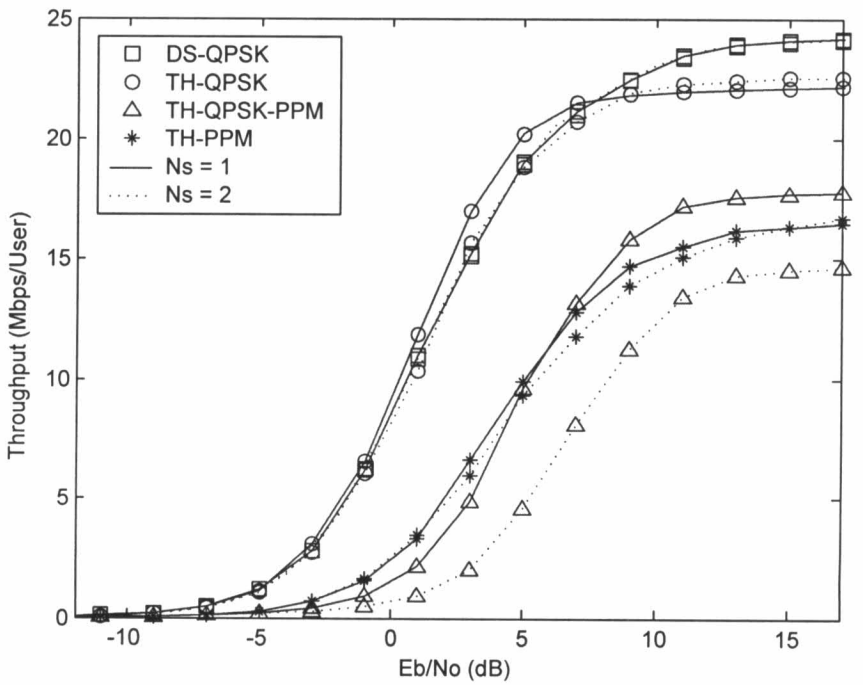

รูปที่ 4.8 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ เมื่อ $R_b$ = 100 Mbps และ $K$ = 1




รูปที่ 4.9 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ เมื่อ $R_b$ = 25 Mbps และ $K$ = 1




รูปที่ 4.10 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ เมื่อ $R_b = 100$ Mbps และ $K = 5$




รูปที่ 4.11 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ เมื่อ $R_b = 25$ Mbps และ $K = 5$

เมื่อผู้ใช้งานในระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษามีจำนวนเท่ากับ 5 จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวน MAI เนื่องจากสัญญาณอิมพัลส์ของผู้ใช้งานคนอื่นมาลดทอนกำลังของสัญญาณอิมพัลส์ของผู้ใช้งานที่เรากำลังสนใจอยู่ ซึ่งทำให้อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จมีประสิทธิภาพด้อยลง

เมื่อผู้ใช้งานทุกคนส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งเท่ากับ 100 Mbps จากรูปที่ 4.10 พบว่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB จะเริ่มอิ่มตัวที่ค่าประมาณ 43 และ 38 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ ซึ่งดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารแบบ UWB อื่นๆ ที่ศึกษา แต่ก็ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับระบบที่มีผู้ใช้งานคนเดียว ส่วนระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จที่อิ่มตัวที่ 32 Mbps ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จอิ่มตัวที่ประมาณ 17 และ 8 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ และระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จอิ่มตัวที่ประมาณ 10 และ 5 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวน MAI ที่มีต่ออัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ นั้นมีค่อนข้างมาก แต่ เมื่อผู้ใช้งานทุกคนส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งเท่ากับ 25 Mbps จากรูปที่ 4.11 พบว่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะเริ่มอิ่มตัวที่ค่าประมาณ 24 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ซึ่งดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารแบบ UWB อื่นๆ ที่ศึกษา ส่วนระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จที่อิ่มตัวที่ 22 Mbps ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จอิ่มตัวที่ประมาณ 17 และ 15 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ ส่วนระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จอิ่มตัวที่ประมาณ 16 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าจำนวนเฟรมต่อสัญลักษณ์มีส่วนช่วยให้อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB, TH-QPSK-PPM UWB และ TH-PPM UWB ดีขึ้นอย่างมากเมื่ออัตราการส่งข้อมูลมีค่าลดลง

สัญญาณรบกวน MAI จะมีผลกระทบค่อนข้างรุนแรงต่ออัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาทุกระบบ เมื่อผู้ใช้งานทุกคนมีอัตราการส่งข้อมูลสูง ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB จะให้ประสิทธิภาพของอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จที่ดีที่สุด เพราะจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวน ISI ที่เกิดจากผู้ใช้งานคนอื่นตลอดเฟรมของสัญญาณ เมื่อผู้ใช้งานมีอัตราการส่งข้อมูลลดลงระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จดีที่สุดแทน เพราะจำนวนชิปต่อเฟรมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความยาวของรหัส PN ที่ใช้ในการแผ่สเปกตรัมมีมากขึ้น สหสัมพันธ์ระหว่างรหัสของผู้ใช้งานแต่ละคนจึงน้อยลงนั่นเอง

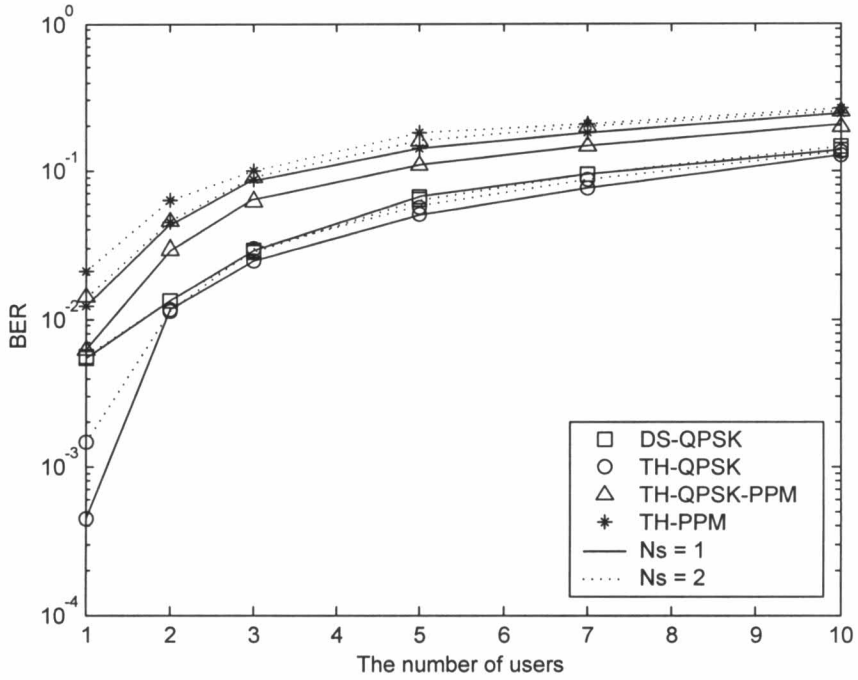
4.5 อัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูลเปรียบเทียบกับจำนวนผู้ใช้งาน

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาจะพบว่าสัญญาณรบกวน MAI นั้นมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ ดังนั้นในส่วนนี้จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมื่ออัตราการส่งข้อมูลมีค่าเท่ากับ 100 และ 25 Mbps ตามลำดับ เมื่อผู้ใช้งานส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่ง 100 Mbps นั้นจะพบว่าระบบการสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB จะมีอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลที่ดีที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบมีจำนวนน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อผู้ใช้งานในระบบมีจำนวนมากขึ้นพบว่าอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB และแบบ DS-QPSK UWB มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB นั้นมีประสิทธิภาพของอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลรองลงมาและดีกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB

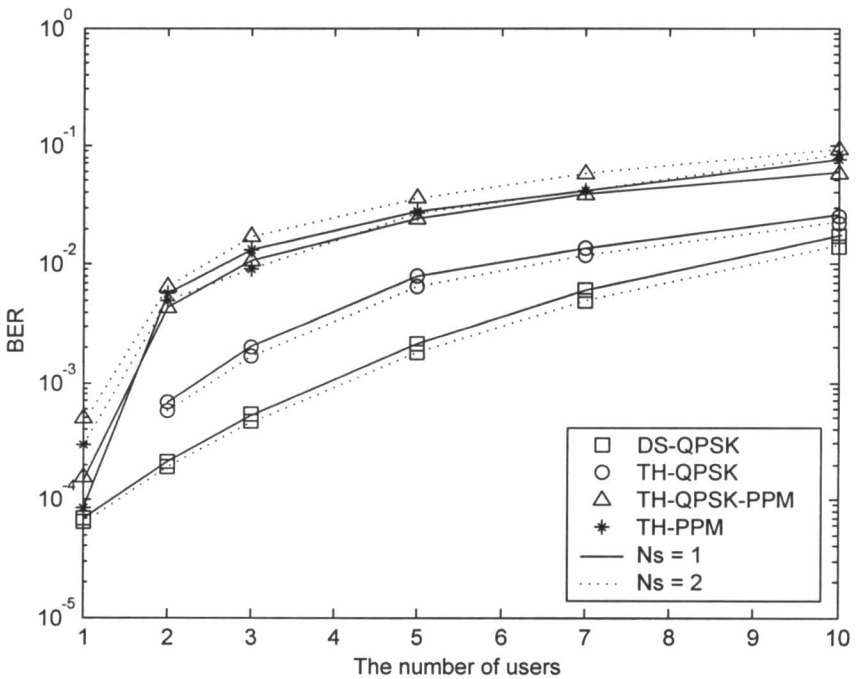
เมื่อผู้ใช้งานส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่ง 25 Mbps นั้นจะพบว่าระบบการสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะมีอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลโดยรวมดีที่สุด ยกเว้นในกรณีที่ระบบมีผู้ใช้งานเพียงคนเดียว อย่างไรก็ตาม เมื่อผู้ใช้งานในระบบมีจำนวนมากขึ้นพบว่าอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลของระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งต่างจากระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB ที่มีอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลน้อยมากเมื่อมีผู้ใช้งานในระบบคนเดียว แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อผู้ใช้งานคนอื่นในระบบ ส่วนระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB นั้นมีประสิทธิภาพของอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลที่ใกล้เคียงกับระบบสื่อสารแบบ TH-PPM UWB

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกราฟที่ได้ในรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะพบว่าจำนวนเฟรมต่อสัญลักษณ์ไม่ได้มีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพของอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลดีขึ้น แต่กลับไปลดประสิทธิภาพดังกล่าวเมื่อผู้ใช้งานในระบบมีอัตราการส่งข้อมูลสูง ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงขนาดของเฟรมสัญญาณจะสั้นลง ทำให้สัญญาณรบกวน ISI ที่เกิดจากสัญญาณอิมพัลส์ก่อนหน้ามีผลกระทบต่อสัญญาณอิมพัลส์ปัจจุบันค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม จำนวนเฟรมต่อสัญลักษณ์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลเมื่ออัตราการส่งข้อมูลมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของเฟรมสัญญาณมีค่ามากขึ้นนั่นเอง

จากรูปที่ 4.12 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ BER ของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่มีการแผ่สเปกตรัมแบบ TH จะมีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือ เมื่อมีผู้ใช้งานในระบบคนเดียว BER จะมีค่าน้อยมาก แต่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ในขณะที่ BER ของระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป หมายความว่า ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB ทนทานต่อผลกระทบจากสัญญาณ MAI ดีกว่าระบบสื่อสารแบบ UWB แบบอื่นๆ




รูปที่ 4.12 BER เปรียบเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบ
เมื่อ $R_b$ = 100 Mbps



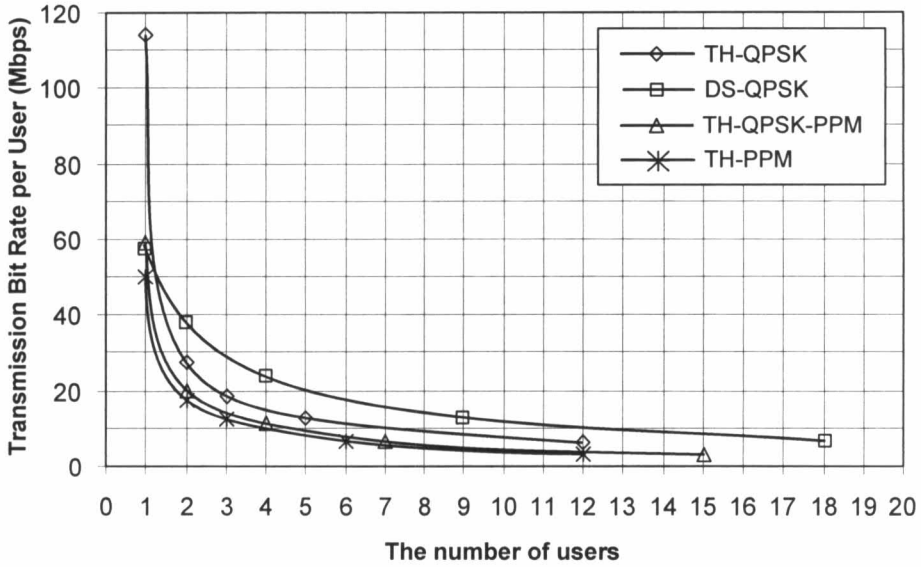

รูปที่ 4.13 BER เปรียบเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบ
เมื่อ $R_b$ = 25 Mbps

4.6 อัตราการส่งข้อมูล

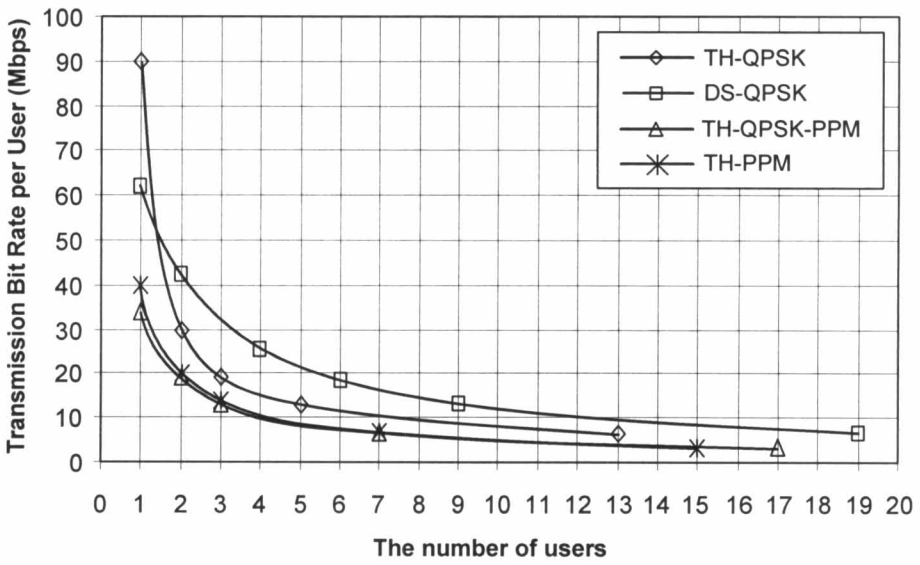
ผลการศึกษาหาอัตราการส่งข้อมูลของผู้ใช้งานในระบบแต่ละคนที่ทำให้ BER ของระบบโดยรวมมีค่าเท่ากับ $10^{-3}$ แสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 เมื่อจำนวนของเฟรมต่อสัญลักษณ์เท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ เป็นการศึกษาให้เห็นถึงผลลัพธ์ของการปรับเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูลของผู้ใช้งานที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ทั้งนี้เพราะตามร่างมาตรฐานของ IEEE สำหรับการรับส่งข้อมูลในโครงข่าย WPAN นั้นผู้ใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูลได้

จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบมีเพียงคนเดียว ระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง แต่เมื่อมีผู้ใช้งานมากกว่า 1 คน อัตราการส่งข้อมูลของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อจำนวนผู้ใช้งานมีมากขึ้น อัตราการส่งข้อมูลของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ จะลดลงอย่างช้าๆ โดยที่ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB จะมีอัตราการส่งข้อมูลสูงที่สุดที่ประมาณ 115 และ 90 Mbps เมื่อมีผู้ใช้งานในระบบหนึ่งคน และ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนผู้ใช้งานมีเพิ่มขึ้น อัตราการส่งข้อมูลของระบบ TH-QPSK UWB จะลดลงอย่างรวดเร็ว และน้อยกว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB เมื่อมีผู้ใช้งานในระบบตั้งแต่ 2 คนขึ้นไป นั่นหมายความว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB สามารถรองรับระบบที่มีผู้ใช้งานหลายคนได้ดีกว่า ซึ่งเป็นการยืนยันกับผลการศึกษาต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ โดยพบว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้มากกว่าประมาณ 2 เท่าเมื่อเทียบกับระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB เมื่ออัตราการส่งข้อมูลมีค่าเท่ากัน เช่นเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 20 Mbps ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้ประมาณ 5 คน ส่วนระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้ไม่ถึง 3 คน และเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 10 Mbps ระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะรองรับผู้ใช้งานได้ 12 คน ส่วนระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB จะรองรับผู้ใช้งานได้ประมาณ 7 คน

ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB และแบบ TH-PPM UWB นั้นสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้ในอัตราที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ก็น้อยกว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB และแบบ TH-QPSK UWB นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าจำนวนของเฟรมต่อสัญลักษณ์จะทำให้จำนวนผู้ใช้งานในระบบน้อยลงเมื่อมีอัตราการส่งข้อมูลสูง แต่ในทางกลับกันเมื่ออัตราการส่งข้อมูลมีค่าต่ำลงจะทำให้ระบบสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของเฟรมสัญญาณที่ยาวมากขึ้นเมื่ออัตราการส่งข้อมูลลดลง ทำให้ผลกระทบของสัญญาณรบกวน ISI มีน้อยลง




รูปที่ 4.14 อัตราการส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบ ที่ทำให้ BER = $10^{-3}$ เมื่อ $N_s = 1$ เฟรมต่อสัญลักษณ์




รูปที่ 4.15 อัตราการส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบ ที่ทำให้ BER = $10^{-3}$ เมื่อ $N_s = 2$ เฟรมต่อสัญลักษณ์

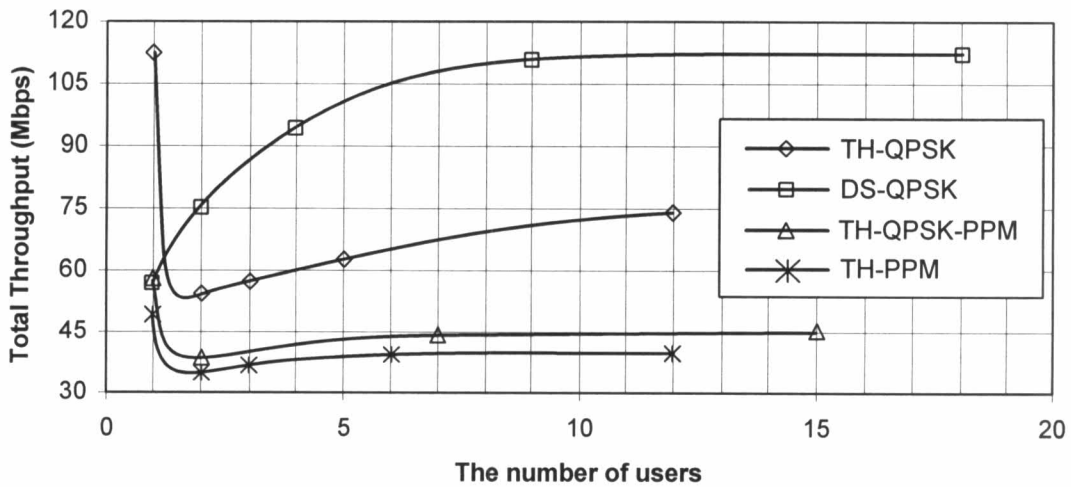
4.7 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวม

ผลการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ เพื่อหาอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวม (total throughput) เปรียบเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบ เมื่ออัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลของระบบมีค่าเท่ากับ $10^{-3}$ แสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ตามลำดับ อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวมคืออัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของผู้ใช้งานในระบบทุกคนรวมกัน โดยกำหนดให้ผู้ใช้งานแต่ละคนจะส่งข้อมูลในอัตราการส่งข้อมูลที่ทำให้อัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลมีค่าเท่ากับ $10^{-3}$ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อระบบมีผู้ใช้งานเพียงคนเดียว ระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB จะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวมดีที่สุด คือมีค่าประมาณ 118 และ 90 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ตามลำดับ แต่กลับมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวมลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีจำนวนผู้ใช้งานมากกว่า 1 คน และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เกิดจากเมื่อผู้ใช้งานมากขึ้น ผู้ใช้งานแต่ละคนต้องลดอัตราการส่งข้อมูลลง เพื่อทำให้ระบบมีอัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูลเท่าเดิม สังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 4.14 กรณีของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB นั้นเมื่อผู้ใช้งานในระบบมีเพียงคนเดียว จะมีอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 115 Mbps แต่เมื่อผู้ใช้งานในระบบมี 2 คน ทำให้อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละคนลดลงเหลือ 38 Mbps เพื่อให้ BER มีค่าเท่ากับ $10^{-3}$ เท่าเดิม ทำให้อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จรวมมีค่าลดลงนั่นเอง ทั้งนี้ระบบการสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB และแบบ TH-PPM UWB ก็มีผลการทำงานที่คล้ายๆ กัน ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการแผ่สเปกตรัมด้วยวิธี TH เหมือนกัน อย่างไรก็ตามอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จโดยรวมของระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK-PPM UWB และแบบ TH-PPM UWB น้อยกว่าระบบสื่อสารแบบ TH-QPSK UWB มาก

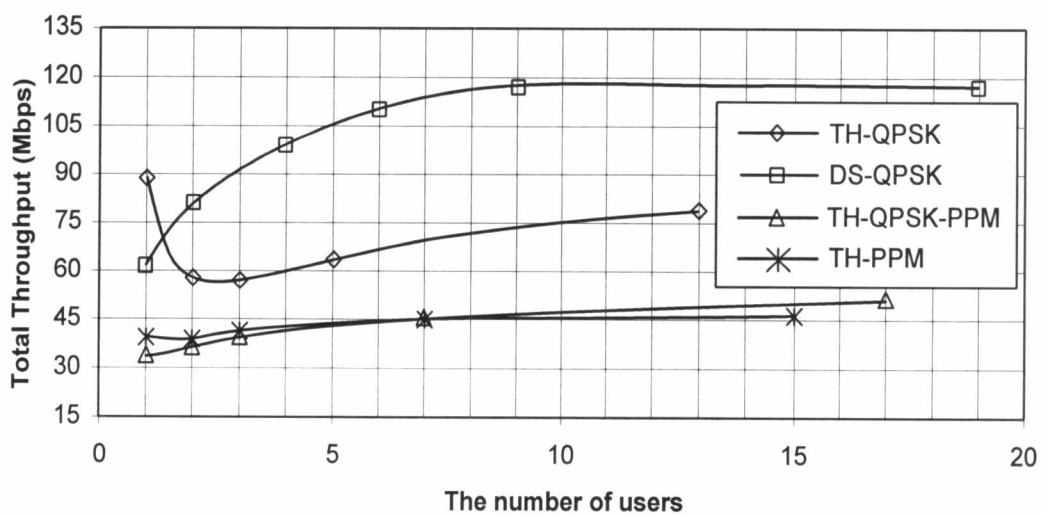
ส่วนระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB นั้นจะมีลักษณะของกราฟของอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จโดยรวมแตกต่างออกไป กล่าวคืออัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวมของระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบมีมากขึ้น นั่นหมายความว่าระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB สามารถรองรับการเพิ่มขึ้นของผู้ใช้งานในระบบได้ดีกว่าระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบอื่นๆ อย่างไรก็ตามอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จโดยรวมจะเริ่มอิ่มตัวเมื่อผู้ใช้งานในระบบมีจำนวนมากกว่า 10 คน ซึ่งอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB จะอิ่มตัวที่ค่าประมาณ 111 และ 118 Mbps เมื่อ $N_s$ = 1 และ 2 เฟรมต่อสัญลักษณ์ ตามลำดับ

จำนวนของเฟรมต่อสัญลักษณ์จะมีผลต่ออัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวมของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาแบบต่างๆ แตกต่างกันออกไป เมื่อระบบมีจำนวนผู้ใช้งานพร้อมกันน้อย จำนวนเฟรมต่อสัญลักษณ์จะไม่ช่วยเพิ่มค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวมของระบบสื่อสารแบบ

UWB ที่มีการแผ่สเปกตรัมแบบ TH แต่เพิ่มอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวมของระบบสื่อสารแบบ DS-QPSK UWB อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบมีมากขึ้นจำนวนเฟรมต่อสัญลักษณ์จะช่วยเพิ่มอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวมของระบบสื่อสารแบบ UWB ที่ศึกษาทุกระบบ เพราะผู้ใช้งานแต่ละคนจะมีอัตราการส่งข้อมูลต่ำมากทำให้เฟรมมีความยาวค่อนข้างมาก ดังนั้นจำนวนเฟรมต่อสัญลักษณ์จึงเริ่มมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ




รูปที่ 4.16 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวม เปรียบเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบที่ทำให้ BER = $10^{-3}$ เมื่อ $N_s = 1$ เฟรมต่อสัญลักษณ์




รูปที่ 4.17 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จรวม เปรียบเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบที่ทำให้ BER = $10^{-3}$ เมื่อ $N_s = 2$ เฟรมต่อสัญลักษณ์