การวิเคราะห์สมรรถนะของการประยุกต์ใช้งานสัญญาณย่านความถี่ UWB บนโปรโตคอล CSMA/CA บนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบนาคากามิ

PERFORMANCE ANALYSIS OF APPLICATION FOR UWB ON CSMA/CA PROTOCOL OVER NAKAGAMI FADING CHANNELS

สุททิพัฒน์ ชนินนนทพัทธ์

SUTTIPUN CHANINNONTHAPHAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2276-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์สมรรถนะของการประยุกต์ใช้งานสัญญาณย่านความถี่ UWB บนโปรโตคอล CSMA/CA บนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบนาคากามิ

PERFORMANCE ANALYSIS OF APPLICATION FOR UWB ON CSMA/CA PROTOCOL OVER NAKAGAMI FADING CHANNELS

T061708

สุทธิพัฒน์ ชนินนนทพัทธ์

SUTTIPUN CHANINNONTHAPHAT

วพ.
ส773ก
2549
เลขหมู่ 61708
เลขทะเบียน
วัน,เดือน,ปี 19 ก.ค. 2549

.b 11602041
.i

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2276-2

PERFORMANCE ANALYSIS OF APPLICATION FOR UWB ON CSMA/CA PROTOCOL OVER NAKAGAMI FADING CHANNELS

SUTTIPUN CHANINNONTHAPHAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2006

ISBN 974-15-2276-2

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะของการประยุกต์ใช้งานสัญญาณ UWB บนโปรโตคอล CSMA/CA บนช่องสัญญาณที่มีการจางหาย แบบนาคากามิ
นักศึกษา	นายสุทธิพัณฌ์ ชนินนนทพัทธ์
รหัสนักศึกษา	46061221
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิทธิชีภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การวิเคราะห์สมรรถนะในการประยุกต์ใช้งานของสัญญาณในย่านความถี่ Ultra-Wideband บนระบบการสื่อสารโปรโตคอล CSMA/CA แบบไร้สายในช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบนาคากามิ โดยจะทำการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์เป็นส่วน ๆ คือ การวิเคราะห์ของโปรโตคอล CSMA/CA และการวิเคราะห์สัญญาณย่านความถี่ Ultra wideband และหลังจากนั้น เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขระหว่างการสื่อสารบนย่านความถี่ Ultra wideband และการสื่อสารของโปรโตคอล CSMA/CA มาใช้ในการวิเคราะห์การประยุกต์ ซึ่งจะประกอบด้วยความน่าจะเป็นของบิตบิดพลาดในการส่งข้อมูลไร้สายที่ผ่านการจางหายแบบนาคากามิ และการรองรับการใช้งานของระบบ และค่า Throughput โดยอยู่ในความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลจะแสดงในรูปความสัมพันธ์เชิงกราฟ ที่มีการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

Thesis Title	Performance analysis of application for UWB on CSMA/CA protocol over Nakagami fading channels
Student	Mr. Suttipun Chaninnonthaphat
Student ID.	46061221
Degree	Master of Engineering
Programme	Telecommunications Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suvepol Sittichevapak

ABSTRACT

This thesis presents an analysis of the application of ultra wideband signal in CSMA/CA protocol over Nakagami fading model. The performance analysis is separated in three sections, performance of CSMA/CA, performance of ultra wideband and the conditional probability between ultra wideband and CSMA/CA protocol. Two performance indicators are investigated in this thesis, namely the probability of bit error in wireless channel and the system throughput with Nakagami fading model. The results section, we present in graph relation with variance parameter.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและการให้คำปรึกษา หรือ การช่วยเหลือ หรือ การสนับสนุนเกี่ยวกับการทำงานวิจัย ดังนั้นผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุวิพล สิทธิชีวภาค ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้แนวความคิดในการทำวิจัย ให้คำปรึกษาและแนวทางในการดำเนินงาน และให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการ T-304 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยเป็นกำลังใจ และช่วยเหลือการวิจัยมาเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุทธิพัฒณ์ ชนินนนทพัทธ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย……………………………………………………………………I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ…………………………………………………………………II

กิตติกรรมประกาศ………………………………………………………………………III

สารบัญ……………………………………………………………………………………IV

สารบัญตาราง……………………………………………………………………………VII

สารบัญรูป…………………………………………………………………………………VIII

บทที่ 1 บทนำ……………………………………………………………………………1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา…………………………………………1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา……………………………………1

1.3 สมมติฐานของการศึกษา……………………………………………………………2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย……………………………………………2

1.5 ขอบเขตการวิจัย………………………………………………………………………3

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา…………………………………………………………………3

บทที่ 2 เทคโนโลยีสัญญาณ Ultra Wideband ……………………………………………4

2.1 ประวัติและความสำคัญของเทคโนโลยีสัญญาณUltra Wideband…………………4

2.2 ข้อกำหนดของรูปสัญญาณ Ultra Wideband ………………………………………7

2.3 พื้นฐานของเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra Wideband …………………………………10

2.3.1 Pulse Amplitude Modulation ……………………………………………10

2.3.2 On-Off Keying ……………………………………………………………11

2.3.3 Pulse Shape Modulation ……………………………………………… 12

2.3.4 Pulse Position Modulation ………………………………………………13

2.4 การวิเคราะห์สัญญาณ Ultra Wideband บนพื้นฐาน TH-PPM……………………15

บทที่ 3 การจางหายบนช่องสัญญาณ ……………………………………………………19

3.1 คุณลักษณะของสัญญาณที่ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบหลายเส้นทาง ……19

3.2 รูปแบบของการจางหายแบบหลายเส้นทาง…………………………………………20

3.2.1ผลกระทบจากการจางหายเนื่องจากการกระจายทางเวลา ……………………20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1.1 การจางหายแบบราบ.....20

3.2.1.2 การจางหายแบบเลือกความถี่.....21

3.2.2ผลกระทบจากการจางหายเนื่องจากการกระจายดอปเปอร์.....22

3.2.2.1การจางหายแบบรวดเร็ว.....22

3.2.2.2 การจางหายแบบช้า.....23

3.3 แบบจำลองของช่องสัญญาณการจางหาย.....24

3.3.1แบบจำลองของช่องสัญญาณการจางหายแบบราบ.....24

3.3.1.1 แบบจำลองของเรย์ลี.....25

3.3.1.2 แบบจำลองของ Rician.....25

3.3.1.3 แบบจำลองของนาคากามิ.....26

3.3.1.4 แบบจำลองแบบล็อกนอร์มอล.....27

3.3.2 แบบจำลองของช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่.....27

3.4 แบบจำลองสัญญาณทางด้านรับหลังผ่านการจางหายในช่องสัญญาณ.....28

3.5 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่เกิดการผิดพลาดของสัญญาณที่มีการจางหาย.....29

บทที่ 4 CSMA/CA.....30

4.1 สถาปัตยกรรมทั่วไปของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11.....30

4.1.1ระดับชั้น Physical Layer.....30

4.1.2ระดับชั้น MAC (Medium Access Control).....33

4.2 ระเบียบการเข้าถึงแบบ CSMA/CA.....36

4.3 แบบจำลองการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ตามมาตรฐาน IEEE 802.11.....40

4.4 การวิเคราะห์ Throughput ของระบบวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA.....41

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์.....50

5.1 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นผิดพลาดของสัญญาณ Ultra Wideband.....50

5.2 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดบนการจางหายแบบนาคากามิ.....53

5.3 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการสื่อสารแบบ UWB OFDM.....55

5.4 การวิเคราะห์ค่า Throughput บนระบบ CSMA/CA.....56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์..60

บรรณานุกรม……………………………………………..……………………………….62

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ 64

ประวัติผู้เขียน……………………..………………………………………………….………....65

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ระดับพลังงานที่กำหนดสำหรับการประยุกต์ใช้งานภายในอาคารและภายนอกอาคารของ
สัญญาณ Ultra Wideband 7
4.1 เปรียบเทียบระยะการส่ง อัตราการส่ง และ ความถี่ที่ใช้ระหว่าง WLAN แบบต่าง ๆ 31

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 เทคโนโลยีทางด้าน Ultra Wideband..........5
2.2 เทคโนโลยีทางด้านคลื่นวิทยุความถี่ UWB..........6
2.3 ระดับ EIRP ที่กำหนดสำหรับ GPRS, Wall Imaging, Media Imaging Systems..........8
2.4 ระดับ EIRP ที่กำหนดสำหรับ Through-Wall Imaging, Surveillance Systems..........8
2.5 ระดับ EIRP ที่กำหนดสำหรับการใช้ภายในอาคาร (Indoor)..........9
2.6 ระดับ EIRP ที่กำหนดสำหรับ Hand-Held ภายในอาคาร..........9
2.7 การมอดูเลตแบบ Pulse Amplitude Modulation..........11
2.8 การมอดูเลตแบบ On-Off Keying..........12
2.9 การมอดูเลตแบบ Pulse Shape Modulation..........13
2.10 การมอดูเลตแบบ Pulse Position Modulation..........14
2.11 การมอดูเลตแบบต่าง ๆ และ M-ary PPM..........15
2.12 องค์ประกอบของเครื่องรับและเครื่องส่งสัญญาณ Ultra Wideband..........16
2.13 รูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ทำการส่ง..........16
2.14 รูปแบบสัญญาณพัลส์ในช่องสัญญาณอุดมคติ..........17
2.15 รูปแบบสัญญาณพัลส์ทางด้านรับ..........18
3.1 องค์ประกอบของช่องสัญญาณที่เกิดการสะท้อนหรือหักเหของสัญญาณ..........19
3.2 ชนิดของการจางหายแบบต่าง ๆ..........20
3.3 รูปแบบของการจางหายแบบต่าง ๆ..........24
3.4 รูปแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นของ Nakagami เมื่อ $\Omega = 1$..........26
4.1 กระบวนการเข้าถึงแบบพื้นฐานที่ใช้ CSMA/CA ตามมาตรฐาน IEEE 802.11..........33
4.2 ช่วงเวลา Contention-free period และ Contention period..........35
4.3 ตัวอย่างกระบวนการทำงานของการเข้าถึงแบบพื้นฐานที่ใช้ CSMA/CA..........38
4.4 การส่งสัญญาณข้อมูลในกรณีที่เป็นการส่งแบบ Unicast..........40
4.5 แบบจำลองของช่องสัญญาณในการเข้าถึงแบบ CSMA/CA..........41
5.1 (ก) Ultra Wideband Transmission..........50
5.1 (ข) Ultra Wideband Receiver..........51
5.2 สัญญาณพัลส์ที่ส่งออก (Transmitted Pulse)..........51
5.3 รูปแบบสัญญาณในช่องสัญญาณ..........52
5.4 สัญญาณทางด้านรับ (Received Signal)..........52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.5 ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดเฉลี่ยของสัญญาณ Ultra Wideband......................53

5.6 ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดเฉลี่ยบนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบนาคากามิ...54

5.7 รูปแบบการสื่อสารของ UWB OFDM 55

5.8 ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดเมื่อหนึ่งสัญลักษณ์สามารถแทนได้ k บิต 56

5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Probability of bit error และค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA เมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ M 57

5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Probability of bit error และค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA เมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g 58

5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Offered Load และค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA เมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ p 59

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารได้มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตมากขึ้น ทั้งการสื่อสารแบบใช้สายและการสื่อสารแบบไร้สาย และเนื่องด้วยการสื่อสารแบบไร้สายเป็นรูปแบบที่สะดวกในการใช้งานของผู้ใช้ ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการเพิ่มขึ้นของระบบการใช้งานของการสื่อสารไร้สาย ทั้งการสื่อสารของระบบคอมพิวเตอร์ไร้สาย ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Telephone) หรือระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีของการสื่อสารจึงต้องมีการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น เพื่อที่จะสามารถรองรับการให้บริการของผู้ใช้งานและการบริการในการสื่อสารข้อมูลต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพที่สูง

การสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบันได้อยู่ในระหว่างยุคของการสื่อสารในยุคที่สาม และยุคที่สี่ ซึ่งเป็นยุคที่มีการใช้งานของผู้ใช้จำนวนมากขึ้น ดังนั้นความต้องการในการใช้ช่องสัญญาณในการสื่อสารจึงต้องมีมากขึ้นตามไปด้วย เพื่อที่จะรองรับสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสาร ของข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และ จำนวนผู้ใช้งานที่มีมากขึ้น [1]

เทคโนโลยีการสื่อสารบนย่านความถี่ของช่องสัญญาณที่มีความกว้างมาก (Ultra wideband: UWB) เป็นหนึ่งในการพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สาย ซึ่ง การสื่อสารของสัญญาณ UWB สามารถส่งข้อมูลที่อัตราเร็วสูงมาก โดยอาจมีความเร็วในการรับส่งสัญญาณข้อมูลสูงถึง 480 Mbps และยังเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารของสัญญาณที่ ใช้พลังงานในการสื่อสารระดับต่ำ และ มีความสามารถในการทะลุทะลวงสิ่งกีดความได้ดี เนื่องจากความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ มีค่าสูงมาก [2-4]

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ระบบการสื่อสารโดยใช้เทคโนโลยีสัญญาณ Ultra wideband สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่าง อาทิเช่น การสื่อสารไร้สายของระบบคอมพิวเตอร์ภายในอาคาร (Wireless home networking) การส่งสัญญาณทะลุสิ่งกีดขวาง (See-through the walls) การเชื่อมต่อข้อมูลของสัญญาณ Home entertainment การใช้สัญญาณที่ตัวรถในการเตือนสิ่งกีดขวาง (Collision avoidance system for cars) เป็นต้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาเทคโนโลยีการสื่อสารของสัญญาณ Ultra wideband, UWB ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรูปแบบใหม่ ที่สามารถถ่ายโอนข้อมูลได้จำนวนมากในระยะทางสั้น ๆ แต่กลับใช้พลังงานในการส่งที่ต่ำ พร้อมทั้งเทคโนโลยีนี้ยังสนับสนุนการ

สื่อสารในระบบพื้นที่โครงข่ายส่วนบุคคล (Personal Area Network) ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานของสัญญาณ Ultra wideband บนแบบจำลองช่องสัญญาณนาคากามิ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้หรืออ้างอิงในการวิเคราะห์การจางหายแบบต่าง ๆ และ การจางหายของสัญญาณหลายวิถีได้ และวิทยานิพนธ์นี้ยังได้ทำการศึกษา หรือวิเคราะห์การประยุกต์ใช้งานสัญญาณ Ultra wideband ควบคู่ไปกับเทคโนโลยี CSMA/CA ในปัจจุบัน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องด้วยเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra wideband เป็นเทคโนโลยีที่ถูกคิดค้นมาเพื่อ ให้มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่มีในปัจจุบัน ในด้านของความเร็วในการรับส่งข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำ รวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่สามารถทะลุทะลวงสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้ทำการวิเคราะห์การนำเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra wideband มาวิเคราะห์ในส่วนของ สมรรถนะของระบบ (Performance) หรือ การวิเคราะห์สัญญาณนี้เมื่อมีการจางหายแบบนาคากามิ (Nakagami) และ การนำเทคโนโลยีนี้มาใช้ร่วมกับเทคโนโลยี CSMA/CA

โดยสมรรถนะของระบบที่ทำการศึกษาควรจะขึ้นกับตัวแปรเหล่านี้ คือ จำนวนผู้ที่เข้ามาใช้งานในระบบ หรือ ระดับสัญญาณส่งต่อสัญญาณรบกวน (SNR) หรือ ขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการส่ง หรือ ตัวแปรพารามิเตอร์ของการจางหาย ซึ่ง สมรรถนะของระบบ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิธีการวิเคราะห์พื้นฐานของสัญญาณ Ultra wideband ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ยึดหลักของ การสื่อสารแบบ Pulse Position Modulation ซึ่งเป็นการสื่อสารที่ช่วงเวลาในการส่งพัลส์ต่ำมาก ดังนั้น ความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณจะมีค่าสูงมาก (คาบเวลาในการส่ง แปรผกผัน กับความถี่ที่ใช้งาน)

ในส่วนของการจางหาย ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองการจางหายของนาคากามิ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายลักษณะของการจางหายของคลื่นหลายวิถี หรือ สามารถอธิบายการจางหายของสภาพแวดล้อมทั้งในเมือง และ ชนบทได้ นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายเชื่องโยงไปยังแบบจำลองอื่น ๆ ได้ อาทิเช่น การจางหายแบบเกาส์เซียนข้างเดียว ในกรณีที่พารามิเตอร์ของการจางหายนาคากามิเท่ากับ 0.5 หรือ การจางหายแบบเรย์ลี ในกรณีที่พารามิเตอร์การจางหายนาคากามิเท่ากับ 1

ในส่วนของการสื่อสารของโปรโตคอล CSMA/CA วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สมมติให้สัญญาณที่ใช้บนระบบเป็นสัญญาณของเทคโนโลยี Ultra wideband แทน แล้วจึงวิเคราะห์

สมรรถนะ Throughput โดยใช้ความสัมพันธ์แบบมีเงื่อนไขของการสื่อสารบนย่านความถี่ Ultra wideband และ โปรโตคอล CSMA/CA

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการวิเคราะห์ ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาด ของเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra wideband บนพื้นฐานของการมอดูเลตแบบ PPM และ วิเคราะห์ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาด ของเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra wideband เมื่อมีการจางหายแบบนาคากามิ และ การวิเคราะห์ Throughput ของระบบ CSMA/CA โดยใช้สัญญาณ Ultra wideband ในระบบแทน ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงรูปเชิงความสัมพันธ์คณิตศาสตร์ ที่อยู่ในความสัมพันธ์เชิงกราฟ ที่แปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra wideband

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีการจางหายบนช่องสัญญาณ

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการการทำงานของโปรโตคอล CSMA/CA

บทที่ 5 เป็นผลของการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิเคราะห์ระบบในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2
เทคโนโลยีสัญญาณ Ultra Wideband

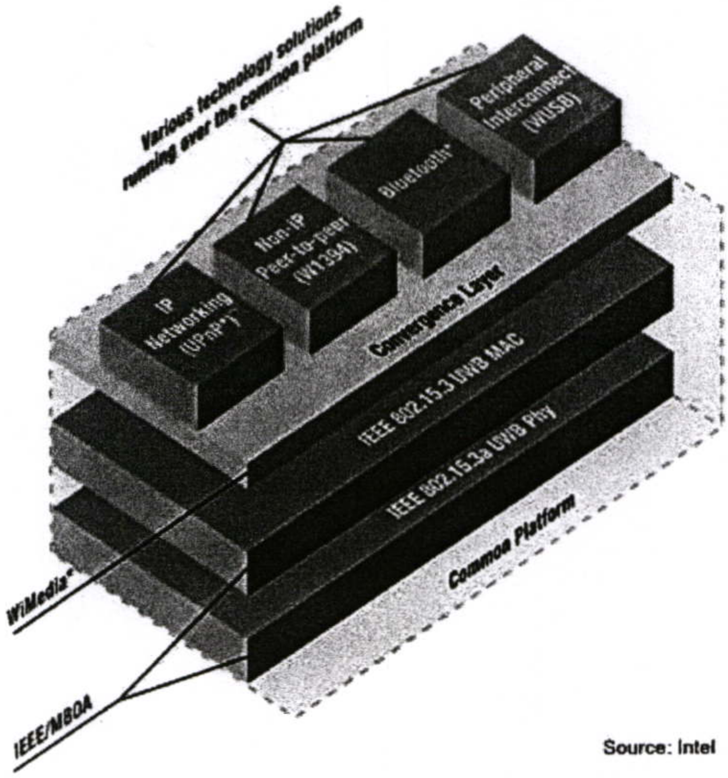
ปัจจุบันความต้องการในการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งาน เริ่มมีสูงขึ้นไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมต่อเครือข่ายในอาคารสำนักงาน หรือ การเชื่อมต่อเครือข่ายเพื่อความบันเทิงภายในแหล่งที่พักอาศัย โดยมีเทคโนโลยีไร้สายที่นิยมให้เพื่อการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย Wi-Fi, Bluetooth และเทคโนโลยีคลื่นสั้น Short-length แต่อย่างไรก็ดี ปัจจุบันได้เกิดกระแสความสนใจในวงกว้างเกี่ยวกับเทคโนโลยี Ultra wideband (UWB) ซึ่งคาดว่าจะเข้ามาเปลี่ยนแปลงระบบการสื่อสารข้อมูลครั้งใหญ่ ด้วยความสามารถที่เหนือกว่าเทคโนโลยีเดิมอย่าง Wi-Fi หรือ Bluetooth อย่างเห็นได้ชัด

2.1 ประวัติและความสำคัญของเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra Wideband

Ultra Wideband (UWB) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรูปแบบใหม่ที่ได้รับการสนับสนุนจากกลุ่มพันธมิตร MBOA (MultiBand OFDM Alliance) ที่ได้เริ่มก่อตั้งเมื่อเดือนมิถุนายน 2003 และปัจจุบันมีสมาชิกมากกว่า 50 ราย นำโดย Texas Instruments (TI), Intel, Samsung Electronics, Mitsubishi Electic, Philips, Nokia, Sony, Infineon Technologies เป็นต้น โดยเทคโนโลยีดังกล่าวจะแตกต่างจากเทคโนโลยีไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น Wi-Fi หรือ Bluetooth ที่เป็นการส่งผ่านคลื่นวิทยุความถี่แคบ ขณะที่ Ultra Wideband จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลแบบ Pulse สั้น ๆ ผ่านคลื่นวิทยุความถี่กว้าง ทำให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลจำนวนมาก ๆ ได้ในระยะทางสั้น ๆ แต่กลับใช้พลังงานในระดับต่ำเพียง 0.0001 มิลลิวัตต์ต่อเมกะเฮิรตซ์ นอกจากนี้ภายในระยะทาง 10 เมตร เทคโนโลยีสัญญาณ Ultra Wideband ยังสนับสนุนการสร้างพื้นที่โครงข่ายส่วนบุคคลที่เรียกว่า Personal Area Network (PAN) ซึ่งช่วยให้เราสามารถจัดการข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างหลากหลาย

นอกเหนือจากคุณสมบัติข้างต้นแล้ว Ultra Wideband ยังได้รับการวางตำแหน่งในฐานะเทคโนโลยีที่สามารถใช้ประสิทธิภาพของคลื่นความถี่ได้คุ้มค่าที่สุด โดย FCC (Federal Communications Commission) หรือ คณะกรรมการบริหารความถี่ของสหรัฐอเมริกา ตั้งความหวังไว้ว่า Ultra Wideband จะเข้ามาช่วยลดปัญหาความขาดแคลนของช่องสัญญาณที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต เนื่องจากการแบ่งสรรช่วงความถี่ในปัจจุบัน จะมีการกำหนดความถี่คลื่นสูงสุดและต่ำสุด และจะต้องมีคลื่นความถี่อีกช่วงหนึ่งที่เป็นส่วนป้องกันไม่ให้คลื่นในแต่ละย่านความถี่รบกวนซึ่งกันและกัน ปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ทุกครั้งที่มีการจัดย่านความถี่ใหม่ ก็จะมีช่วงความถี่ที่ต้องสูญเสียไปมากขึ้นด้วย

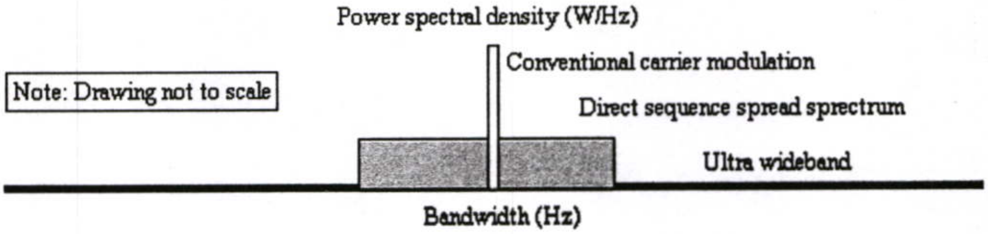
เทคโนโลยี Ultra Wideband ได้รับการกำหนดให้อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.3a โดยมีย่านความถี่ที่ถูกกำหนดโดยคณะกรรมการ FCC (Federal Communications Commission) อยู่ที่ 3.1 – 10.6 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่เดียวกันกับการสื่อสารผ่านดาวเทียม ทั้งนี้การกำหนดความถี่ในย่านดังกล่าวจะช่วยป้องกันปัญหาการรบกวนของสัญญาณวิทยุกับเทคโนโลยีภาคพื้นอื่น ๆ ที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน [5]

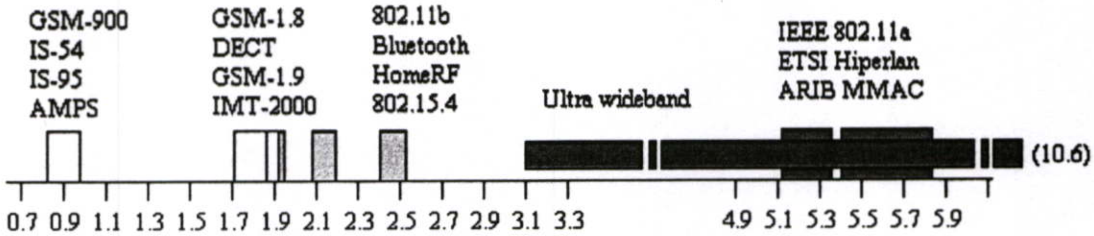


รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีทางด้าน Ultra wideband

ทั้งนี้หากเราเปรียบเทียบเทคโนโลยี Ultra Wideband กับเทคโนโลยีอย่าง Wi-Fi หรือ Bluetooth แล้วก็จะพบว่า Ultra Wideband มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ ทั้งทางด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำ รวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลทะลุทะลวงผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ โดยเทคโนโลยี Ultra Wideband จะมีความเร็วในการรับการส่งข้อมูลสูงถึง 480 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตร และ ความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 10 เมตร ในขณะที่ Wi-Fi สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุดที่ 54 Mbps และหากเปรียบเทียบกับ Bluetooth ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมสำหรับเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลในปัจจุบัน Ultra Wideband จะให้ความสามารถในการรับส่งข้อมูลสูงกว่า Bluetooth ถึง 100 เท่า ซึ่ง

ด้วยความเร็วในระดับดังกล่าวเทคโนโลยี Ultra Wideband จึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภท Home Entertainment ภายในบ้าน โดยตัวอย่างที่เราจะเห็นได้ในอนาคตอันใกล้นี้ก็คือ การที่โทรทัศน์สามารถส่งรายการไปยังหน้าจอโทรทัศน์อื่น ๆ ได้แบบไร้สายโดยไม่มีปัญหาการกระตุกของสัญญาณภาพ หรือ การเชื่อมต่อเพื่อถ่ายโอนภาพจากกล้องวีดิโอไปยังคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย และหากเป็นการใช้งานภายในสำนักงาน Ultra Wideband ก็จะเข้ามาช่วยลดความยุ่งยากในการติดตั้งสายเคเบิลต่าง ๆ ได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้เทคโนโลยี Ultra Wideband ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อนการค้นหาวัตถุ โดยมันมีความสามารถในการอ่านตำแหน่งของวัตถุด้วยความแม่นยำระดับเซนติเมตร ซึ่งถือว่าสูงมากเมื่อเทียบกับเทคโนโลยี GPS ที่ให้ความแม่นยำเพียงแค่หน่วยเมตรเท่านั้น นอกจากนี้ เทคโนโลยีนี้ยังสามารถใช้เป็นเครื่องเรดาห์ตรวจสอบใต้ผิวดิน รวมไปถึงความสามารถในการจับภาพทะลุกำแพงที่อาจจะนำมาเป็นประโยชน์จำเป็นของอุปกรณ์ของตำรวจ ที่ใช้สำหรับในการตรวจสอบก่อนเข้าทำจับกุมคนร้ายได้ [6-8]





รูปที่ 2.2 เทคโนโลยีทางด้านคลื่นวิทยุย่านความถี่ UWB

(ด้านบน) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างย่านความถี่ของการสื่อสารไร้สายแบบต่าง ๆ

(ด้านล่าง) เค้าโครงสเปกตรัม

2.2 ข้อกำหนดของรูปสัญญาณ Ultra wideband

การจัดสรรช่วงความถี่ในเทคโนโลยีการสื่อสารระบบ Ultra wideband เป็นจุดสำคัญจุดหนึ่งในการกำหนดมาตรฐาน ดังนั้นในเดือน กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2002 คณะกรรมการ FCC ได้กำหนดขอบเขตเกี่ยวกับคลื่นวิทยุ Ultra wideband มา อาทิเช่น กำหนดค่า Fractional bandwidth ต้องมีค่าต่ำสุดที่ 0.20 โดย Fractional bandwidth, B_f [6] สามารถหาได้จากสมการ

$$B_f = 2\frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \tag{2.1}$$

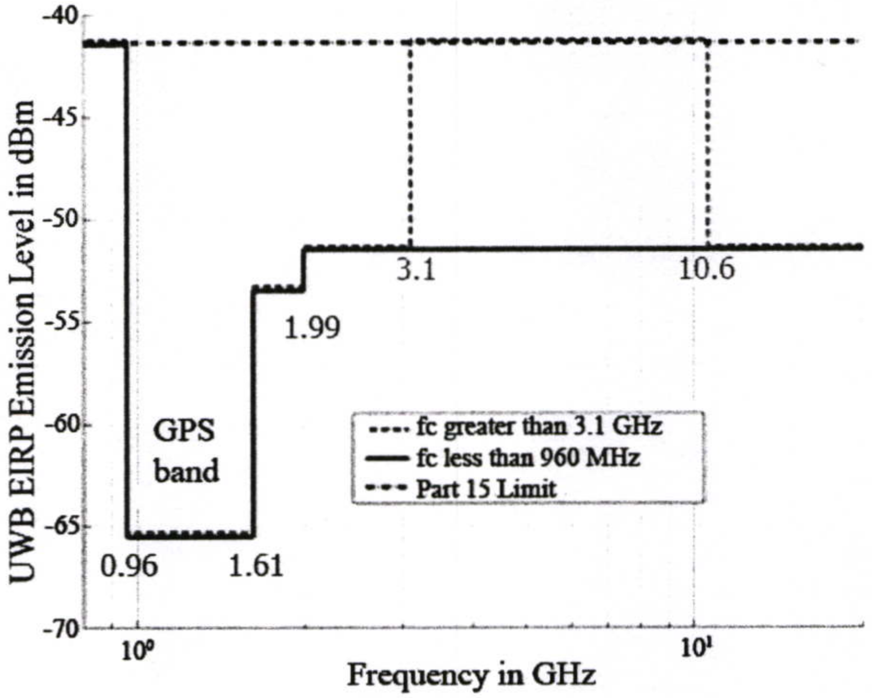
โดย f_H คือ ความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารสูงสุด

f_L คือ ความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารต่ำสุด

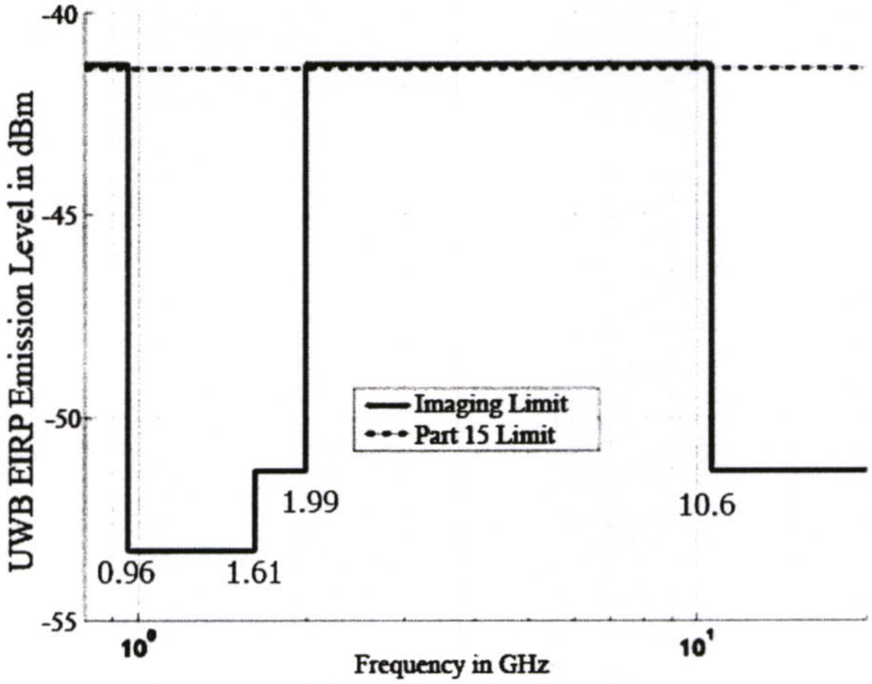
ข้อกำหนดอีกอย่างหนึ่งคือ ย่านความถี่ (Bandwidth) ที่ใช้ในการสื่อสารจะต้องมากกว่า 500 MHz หรือ ในระดับการสื่อสารระดับชั้น Physical ระบบการสื่อสารเทคโนโลยี Ultra wideband จะต้องมีการแผ่สัญญาณการสื่อสารแล้วได้ระดับพลังงานต่ำกว่า 0.56 มิลลิวัตต์ หรือ ระดับพลังงานต้องมีค่าน้อยว่า Effective isotropic radiated power (EIRP) ดังตัวอย่าง ตารางด้านล่างซึ่งทางคณะกรรมการ FCC ได้กำหนดระดับพลังงาน EIRP ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสื่อสาร Ultra wideband ณ ย่านความถี่ต่าง ๆ ที่กำหนด ของภายในอาคาร และ นอกอาคาร หรือ ในรูปที่ 2.3 – 2.6 คือรูปกราฟแสดงระดับค่า EIRP ในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 ระดับพลังงานที่กำหนดสำหรับการประยุกต์ใช้งานภายในอาคารและนอกอาคารของสัญญาณ Ultra wideband [6]

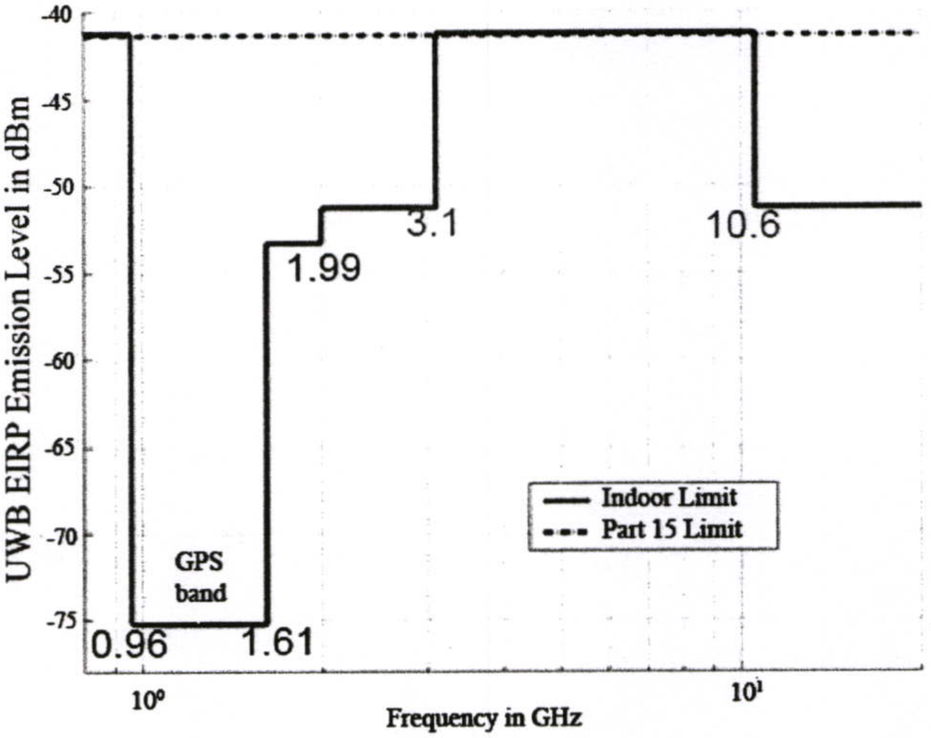
	Indoor	Outdoor
Frequency in MHz	EIRP in dBm	EIRP in dBm
960-1610	-75.3	-75.3
1610-1990	-53.3	-63.3
1990-3100	-51.3	-61.3
3100-10600	-41.3	-41.3
Above 10600	-51.3	-61.3



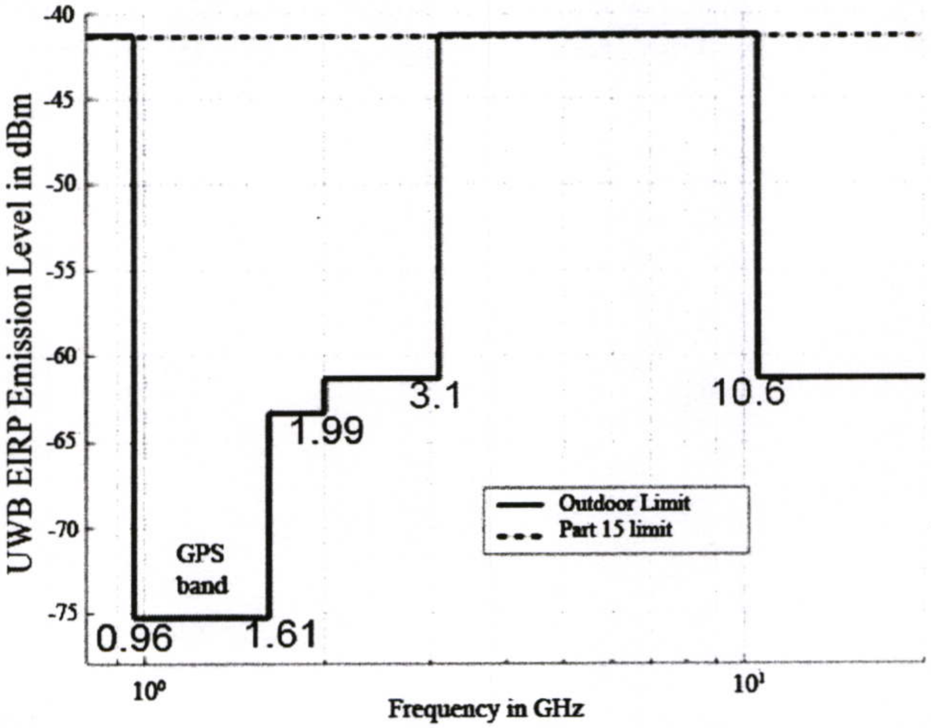
รูปที่ 2.3 ระดับ EIRP ที่กำหนดสำหรับ GPRS, Wall Imaging, Medial Imaging Systems



รูปที่ 2.4 ระดับ EIRP ที่กำหนดสำหรับ Through-wall Imaging, Surveillance Systems



รูปที่ 2.5 ระดับ EIRP ที่กำหนดสำหรับการใช้ภายในอาคาร (Indoor)



รูปที่ 2.6 ระดับ EIRP ที่กำหนดสำหรับ Hand-held ภายในอาคาร

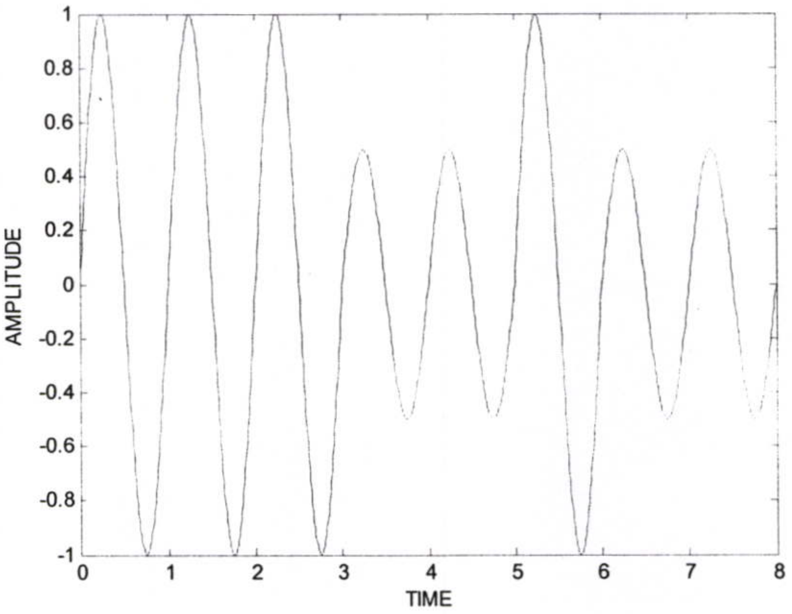
2.3 พื้นฐานของเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra Wideband

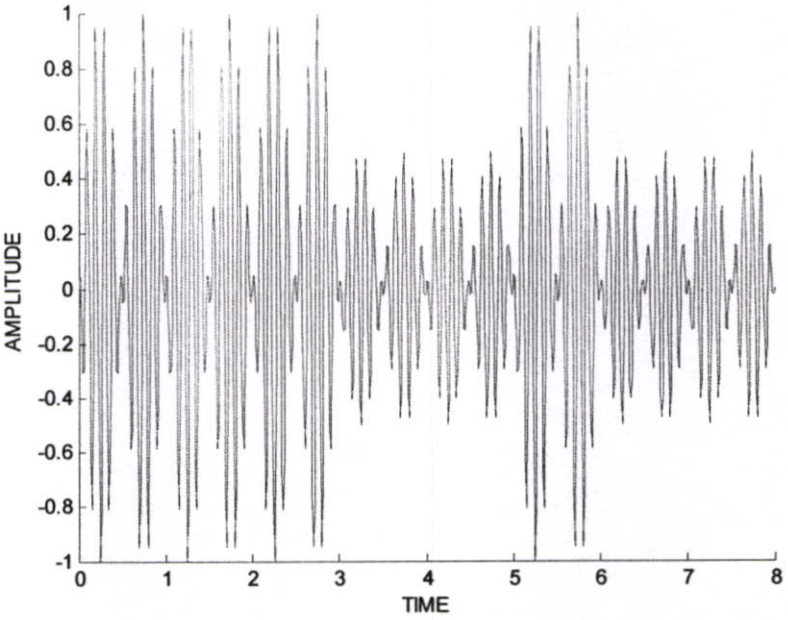
หลักการการส่งสัญญาณเทคโนโลยี Ultra Wideband ก็ยังยึดหลักการคำนวณพื้นฐานเบื้องต้นเหมือนของการสื่อสารสัญญาณ Narrowband แต่มีจุดแตกต่างในเชิงของเวลา ซึ่งถ้าพิจารณาในเชิงความสัมพันธ์ของความถี่และคาบของเวลาจะเป็นปฏิปักษ์กันกล่าวคือ ถ้าแถบความถี่มีค่ามากแล้วช่วงเวลาที่ทำการสั้น pulse จะมีความแคบมาก

วิธีในการสร้างคลื่น (Modulation) สำหรับเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra Wideband อาจมีด้วยกันหลายวิธี อาทิเช่น Pulse Amplitude Modulation (PAM), On-Off Keying, Pulse Position Modulation, Pulse Shape Modulation [6-9]

2.3.1 Pulse Amplitude Modulation

การมอดูเลตแบบ PAM จะใช้หลักการการเข้ารหัสสัญญาณโดยให้ขนาดของพัลส์ (Pulse) ที่ส่งออกไปมีขนาดที่แตกต่าง อาทิเช่น ถ้าให้ข้อมูลหนึ่งบิตแทนหนึ่งพัลส์ ดังนั้นในการส่งสัญญาณ อาจจะกำหนดให้บิตที่มีค่าเป็น 0 มีขนาดแอมพลิจูดน้อยกว่าบิตที่มีค่าเป็น 1 ดังเช่น ถ้าข้อมูลบิตที่ต้องการส่ง คือ '11 10 01 00' ดังนั้น สัญญาณอินพุท และเอาท์พุทจะได้ ดังรูปตามลำดับ

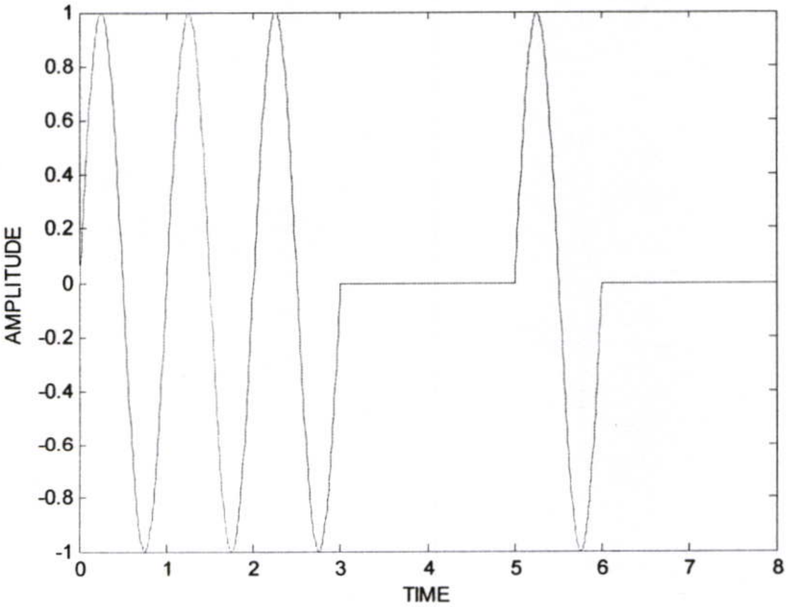


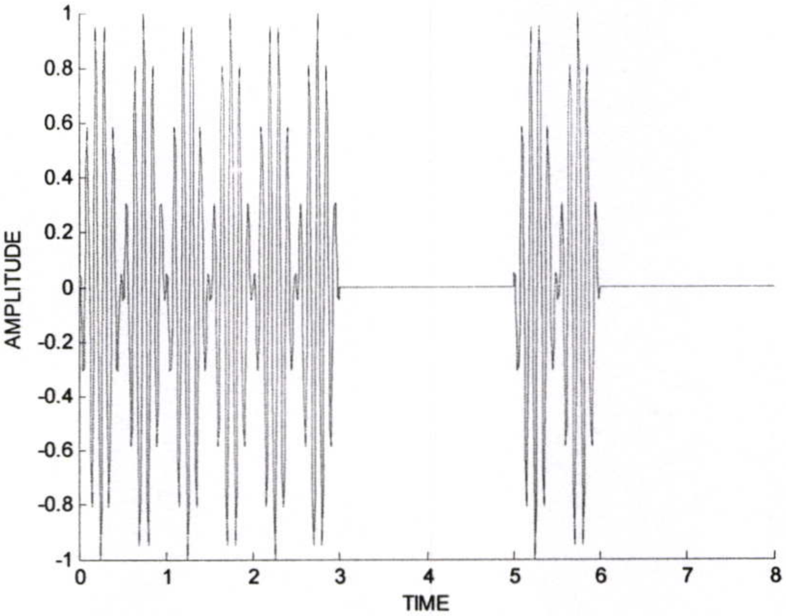


รูปที่ 2.7 การมอดูเลตแบบ Pulse Amplitude Modulation

2.3.2 On-Off Keying

การมอดูเลตแบบ OOK จะใช้หลักเกณฑ์เดียวกันกับ PAM แต่การส่งสัญญาณบิตที่มีค่าเป็น 0 จะไม่มีการส่งสัญญาณใดไปเลย และบิตที่มีค่าเป็น 1 จะส่งสัญญาณพัลส์ปกติขนาดแอมพลิจูดใดขนาดหนึ่งไป ถ้าข้อมูลบิตที่ต้องการส่ง คือ ‘11 10 01 00’ ดังนั้น สัญญาณอินพุท และเอาท์พุทจะได้ ดังรูปตามลำดับ

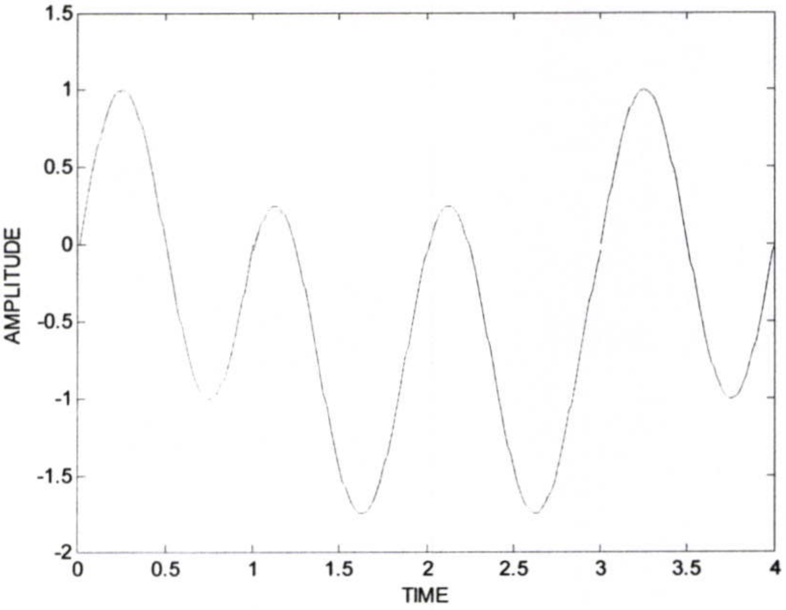


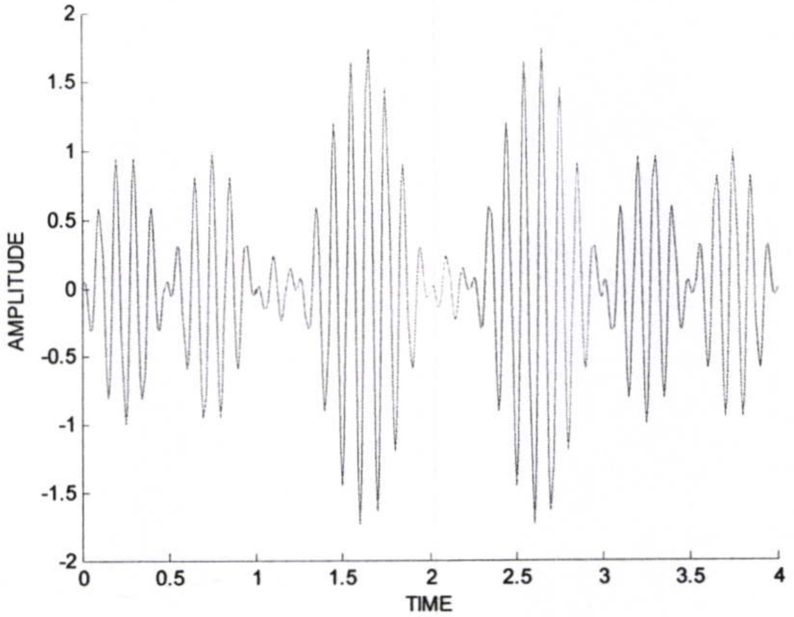


รูปที่ 2.8 การมอดูเลตแบบ On-Off Keying

2.3.3 Pulse Shape Modulation

การมอดูเลตแบบ PSM เป็นการมอดูเลตโดยให้รูปแบบของพัลส์ที่จะส่งมีความต่างกัน กล่าวคือ พัลส์ที่มีค่า 1 และ พัลส์ที่มีค่า 0 จะมีรูปร่างต่างกัน ถ้าข้อมูลบิตที่ต้องการส่ง คือ '10 01' ดังนั้น สัญญาณอินพุท และเอาท์พุทจะได้ ดังรูปตามลำดับ

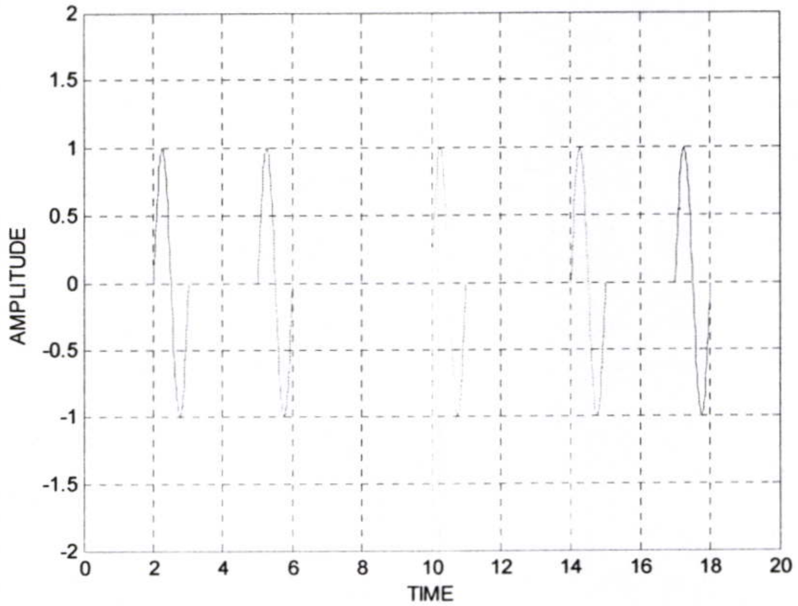


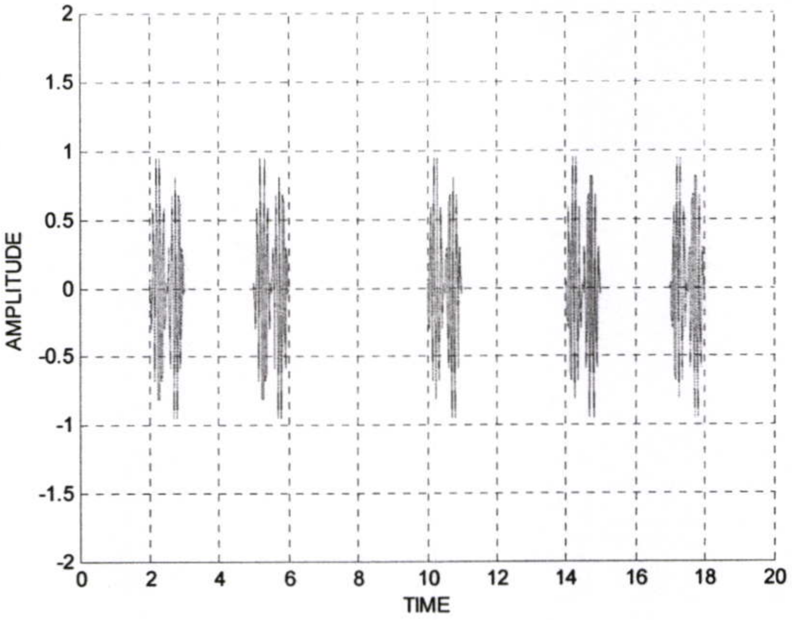


รูปที่ 2.9 การมอดูเลตแบบ Pulse Shape Modulation

2.3.4 Pulse Position Modulation

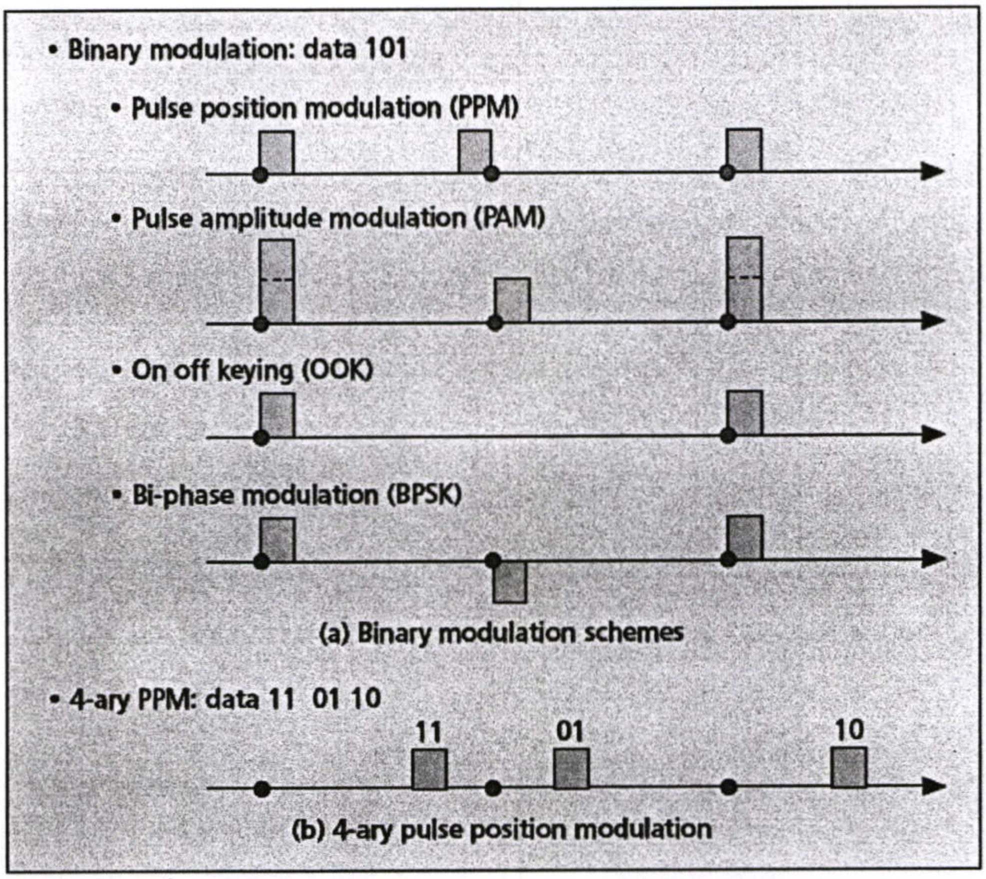
การมอดูเลตแบบ PPM เป็นการมอดูเลตโดยยึดตำแหน่งของพัลส์ โดยอ้างอิงจากตำแหน่งของ Nominal pulse position กล่าวคือ ถ้าพัลส์ถูกส่งในช่วงเวลาตำแหน่งของ Nominal pulse position แล้วจะมีค่าเป็น 0 แต่ถ้าส่งเลื่อนจากตำแหน่งนี้ ก็จะมีค่าเป็น 1 ถ้าข้อมูลบิตที่ต้องการส่งคือ '10 11 0' ดังนั้น สัญญาณอินพุท และเอาท์พุทจะได้ ดังรูปตามลำดับ





รูปที่ 2.10 การมอดูเลตแบบ Pulse Position Modulation

และวิธีในการมอดูเลตแบบ Pulse Position Modulation ได้รับความนิยมในการนำมาวิเคราะห์เทคโนโลยีสัญญาณ Ultra Wideband มากที่สุด ก็ด้วยเหตุผลที่ว่า สามารถให้กำหนดและอธิบายถึง รูปแบบ M-ary ในส่วนของเทคโนโลยี Ultra wideband ได้โดยตรง หรือการวิเคราะห์อัตราบิตผิดพลาดของ M-ary PPM สามารถเทียบเคียงได้กับสัญญาณ Ultra wideband และการมอดูเลตแบบ PPM ยังเหมาะสมกับสามารถสุ่มการกำเนิดของเวลา เพราะว่าสัญญาณพัลส์ต่อ ๆ ไปจะอ้างอิงระยะห่างจากเวลาพัลส์แรก แต่ไม่มีเรื่องของระบบซิงค์โคไนส์ (Synchronize) เหมือนการมอดูเลตอื่น ๆ [9]



รูปที่ 2.11 สัญลักษณ์การมอดูเลตแบบต่าง ๆ และ M-ary PPM [10]

2.4 การวิเคราะห์สัญญาณ Ultra wideband บนพื้นฐาน TH-PPM

หลักการทำงานที่สำคัญของระบบการสื่อสารบนย่านความถี่สูง สามารถอธิบายได้จากพื้นฐานการสื่อสารของระบบวิทยุที่มีการมอดูเลตแบบตำแหน่งพัลส์ แต่ทว่าเป็นพัลส์ที่มีขนาดสั้นมาก หรือกล่าวอีกนัยคือ การมอดูเลตแบบ TH-PPM ยังสามารถนำไปให้นิยามโดยตรงกับรูปแบบคลื่นของพัลส์ในย่านความถี่สูง Ultra wideband ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการสัญญาณพัลส์ของผู้ใช้ลำดับที่ k ได้ดังสมการ [11-13]

$$s_{Tx}^{k}(t)=\sum_{i=-\infty}^{+\infty} p_{Tx}\left(t-iT_F-c_i^{(k)}T_h-\delta\alpha_{\lfloor i/Ns\rfloor}^{(k)}\right) \tag{2.2}$$

ซึ่ง p_{Tx} คือ สัญญาณพัลส์ที่ทำการส่งข้อมูล

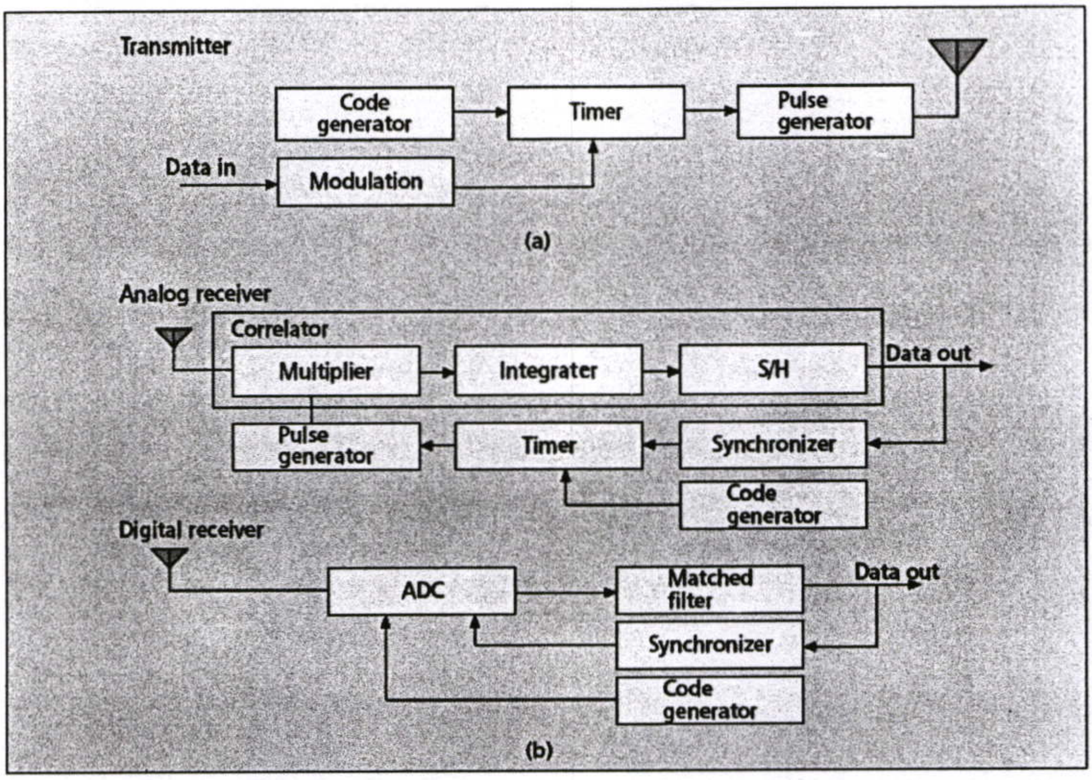
T_F คือ ระยะห่างระหว่างเฟรม (frame duration)

Ns คือ จำนวนสล๊อตที่ถูกแบ่งในแต่ละเฟรม

T_h คือ เวลาในแต่ละสล๊อต

$c_i^{(k)}$ คือ รหัส code ที่ใช้กำหนดผู้ใช้แต่ละคน

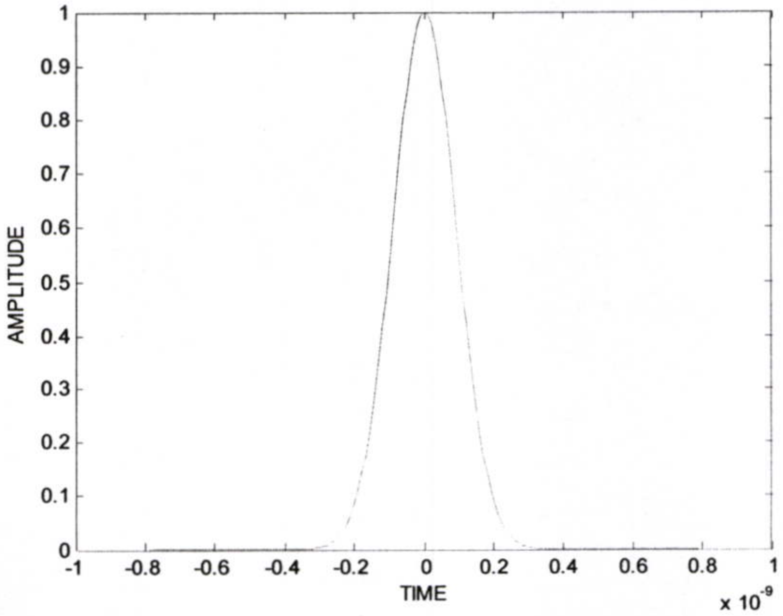
$\alpha^{(k)}$ คือ ข้อมูลที่จะส่ง (transmitted information)



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบของเครื่องรับและเครื่องส่งสัญญาณ Ultra Wideband [10]

หรือ คลื่นพัลส์ที่ส่งสามารถเขียนตามฟังก์ชันของเกาส์เซียนอย่างง่ายได้ดังสมการ

$$p_{Tx}(t) = \exp\left[-2\pi\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right] \tag{2.3}$$

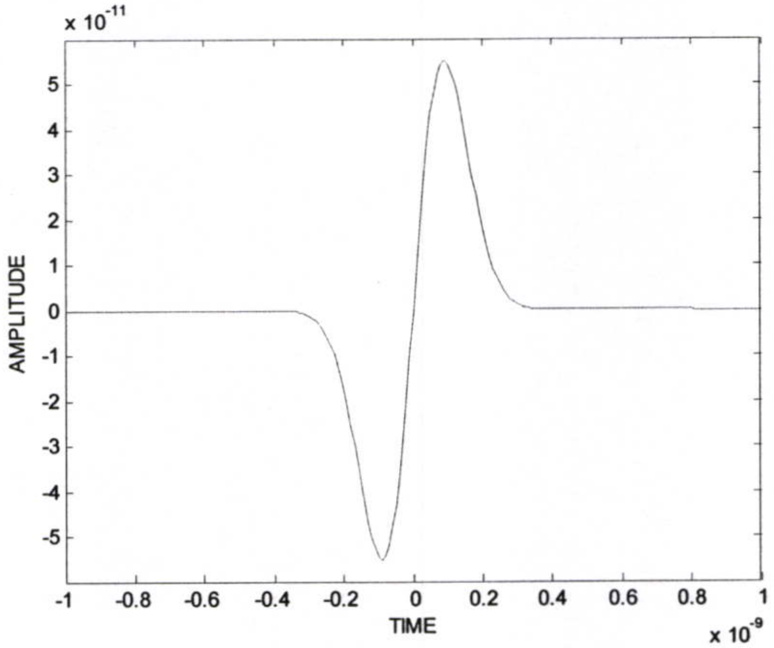


รูปที่ 2.13 รูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ทำการส่ง

จากรูปที่ 2.13 เป็นรูปแบบของสัญญาณพัลส์ที่ทำการส่งในระบบ PPM ตามสมการที่ 2.3 โดยกำหนดให้ค่า $\tau = 0.322 \times 10^{-9}$sec

และถ้าทางด้านเครื่องรับและเครื่องส่งของจานรับสัญญาณเป็นไปตามอุดมคติดังนั้นพัลส์ในช่องสัญญาณสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$p_{Ch}(t) = t\exp\left[-2\pi\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right] \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.14 รูปแบบสัญญาณพัลส์ในช่องสัญญาณอุดมคติ

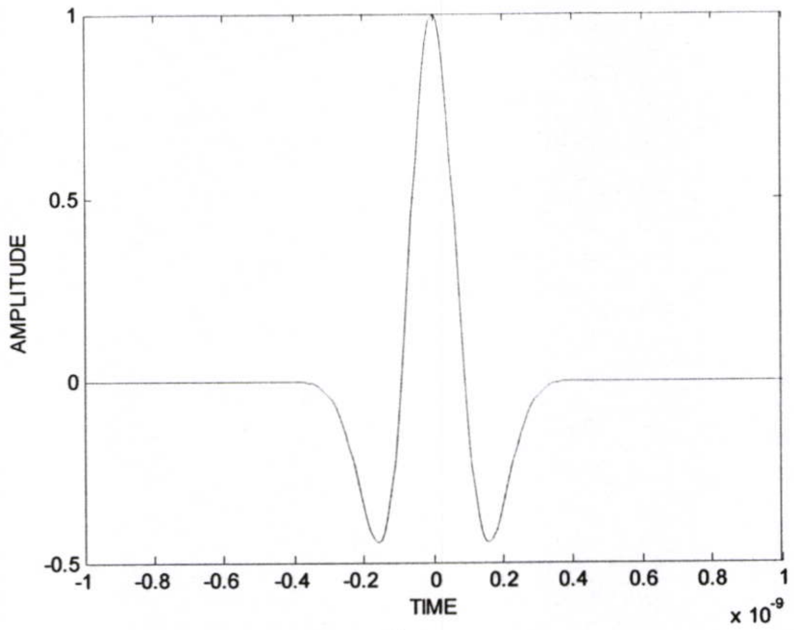
จากรูปที่ 2.14 เป็นรูปแบบของสัญญาณพัลส์ในช่องสัญญาณอุดมคติ ตามสมการที่ 2.4 โดยกำหนดให้ค่า $\tau = 0.322 \times 10^{-9}$sec

และพัลส์ทางด้านรับสามารถเขียนสมการอย่างง่ายได้ดังสมการ

$$p_{Rx}(t) = \left[1-4\pi\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right]\exp\left[-2\pi\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right] \quad (2.5)$$

โดยในรูปที่ 2.15 เป็นรูปแบบของสัญญาณพัลส์ทางด้านรับ ตามสมการที่ 2.5 โดยกำหนดให้ค่า $\tau = 0.322 \times 10^{-9}$sec

61708



รูปที่ 2.15 รูปแบบสัญญาณพัลส์ทางด้านรับ

การหาค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดบน AWGN สามารถคำนวณได้จาก

$$BER = \frac{M}{2} \int_{\sqrt{\log_2(M)SNR_b}}^{\infty} \frac{\exp(-\xi^2/2)}{\sqrt{2\pi}} d\xi \qquad (2.6)$$

โดยที่ M คือ จำนวนสัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้

SNR_b คือ ระดับพลังงานสัญญาณส่งต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละบิต และมีค่า เท่ากับ $\frac{1}{\log_2(M)} \frac{E_\psi}{N_0}(1-\beta)$

β เท่ากับ 0.1909

หรือเราสามารถเขียนได้ในรูปของ

$$P(E|\gamma) = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}\frac{1-\gamma(\delta)}{2}}\right) \qquad (2.7)$$

โดยที่ $\gamma(t)$ คือ ฟังก์ชัน Auto-correlation ของพัลส์ที่ได้จากสมการที่ (2.4) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\left[1-4\pi\left(\frac{t}{\tau}\right)^2 + \frac{4}{3}\pi^2\left(\frac{t}{\tau}\right)^4\right]\exp\left[-\pi\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right]$$

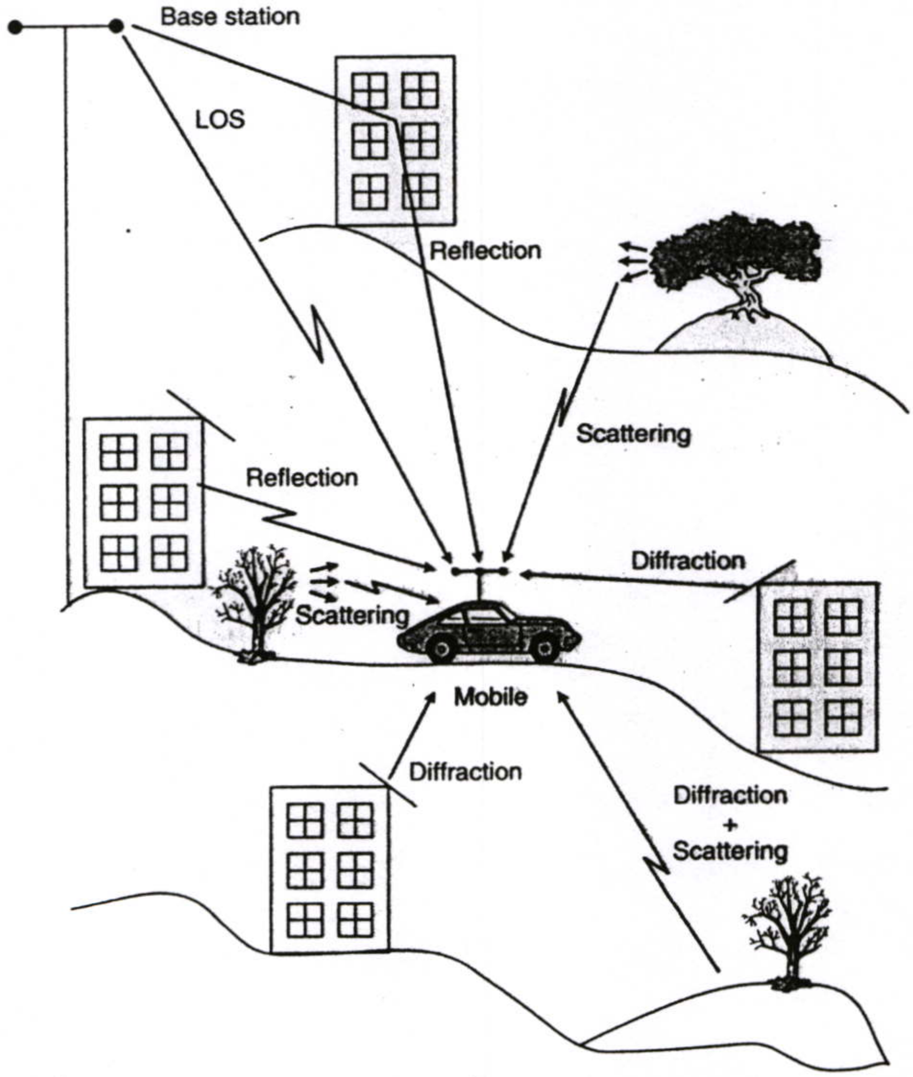
และ δ คือ เวลา Shift จาก 1 เป็น 0

บทที่ 3

การจางหายบนช่องสัญญาณ

3.1 คุณลักษณะของสัญญาณที่ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบหลายเส้นทาง

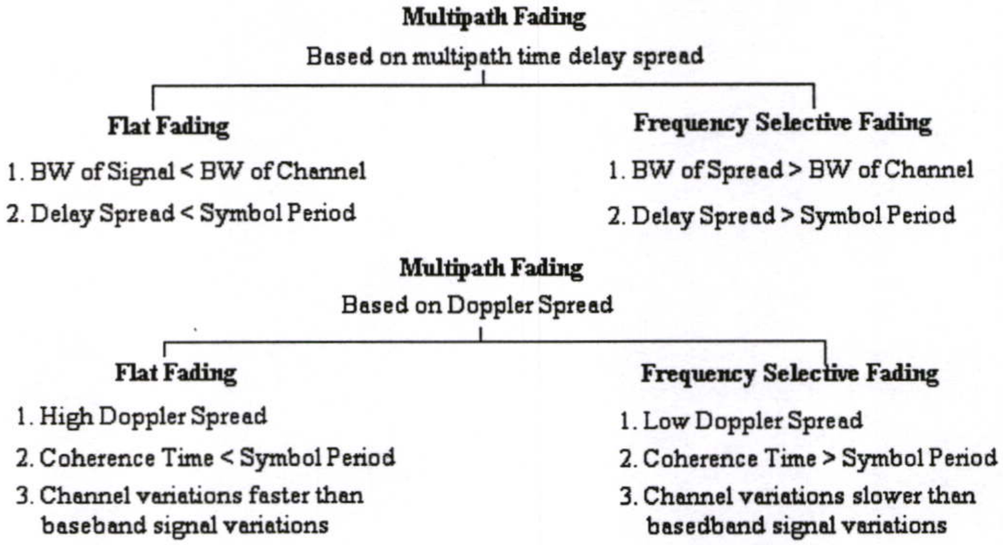
ในการสื่อสารด้วยเทคโนโลยีแบบไร้สาย ทางด้านส่งเมื่อมีการส่งสัญญาณออกไปผ่านยังช่องสัญญาณต่าง ๆ จะเกิดการแทรกสอดหรือหักล้างกันของสัญญาณ หรือ การสะท้อนและการลดทอนของสัญญาณ ดังนั้นสัญญาณที่มาถึงทางด้านรับจะเกิดการรวมกันของสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง ซึ่งมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับว่าองค์ประกอบสัญญาณนั้นมีการเสริมกันหรือหักล้างกันหรือการสะท้อนหรือลดทอนของสัญญาณอย่างไร [14]



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของช่องสัญญาณที่เกิดการสะท้อนหรือหักเหของสัญญาณ

3.2 รูปแบบของการจางหายแบบหลายเส้นทาง

ประเภทของการจางหาย สามารถแบ่งได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสัญญาณ เช่น ความกว้างของแถบความถี่ หรือ คาบของสัญลักษณ์ เป็นต้น และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ เช่น ค่า RMS ของการกระจายการหน่วงเวลา หรือ การกระจายดอปเปอร์ เป็นต้น สัญญาณที่ส่งออกไปโดยใช้พารามิเตอร์ต่างกัน จะได้รับอิทธิพลจากช่องสัญญาณที่ต่างกันด้วย การกระจายทางเวลาและการกระจายทางความถี่ของช่องสัญญาณ ทำให้สามารถแบ่งอิทธิพลหรือผลกระทบจากช่องสัญญาณได้เป็น 4 รูปแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ส่ง ช่องสัญญาณและความเร็วของเครื่องส่งและเครื่องรับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชนิดของการจางหายแบบต่าง ๆ

3.2.1 ผลกระทบจากการจางหายเนื่องจากการกระจายทางเวลา

การกระจายทางเวลาเนื่องจากการจางหายแบบหลายวิถี เป็นสาเหตุให้สัญญาณที่ส่งออกไปตกอยู่ใต้อิทธิพลของสัญญาณได้ 2 แบบ คือ การจางหายแบบไม่เลือกความถี่ (Frequency Non-selective Fading) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การจางหายแบบราบ (Flat Fading) และอิทธิพลของสัญญาณอีกแบบ คือ การจางหายแบบเลือกความถี่ (Frequency Selective Fading)

3.2.1.1 การจางหายแบบราบ (Flat Fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีอัตราขยาย (Gain) คงที่และมีการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบเชิงเส้นภายในช่วงความกว้างที่มีค่ามากกว่าความกว้างแถบของสัญญาณที่ส่งมาแล้ว สัญญาณที่รับได้จะเรียกได้ว่าได้รับผลกระทบจากการจางหายแบบราบ สัญญาณที่ได้รับผลกระทบแบบนี้โดยมากจะยังคงมีลักษณะของสัญญาณที่ไม่เปลี่ยนไปมากนัก แต่ขนาดของสัญญาณที่รับได้อาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากอัตราขยายของช่องสัญญาณเกิดการผันแปรไปตามการจางหาย

ลักษณะของสัญญาณที่ไม่เปลี่ยนไปมากนัก แต่ขนาดของสัญญาณที่รับได้อาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากอัตราขยายของช่องสัญญาณเกิดการผันแปรไปตามการจางหาย

โดยลักษณะของการจางหายแบบราบ ถ้าอัตราขยายของช่องสัญญาณเมื่อเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแล้ว ขนาดของสัญญาณที่รับได้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน เพราะฉะนั้นตลอดเวลาที่ทำการรับสัญญาณจะพบว่าสัญญาณที่รับได้จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตลอดตามอัตราขยายของช่องสัญญาณ แต่สิ่งหนึ่งที่ไม่เปลี่ยน คือ ลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณจะยังคงเหมือนเดิม ในช่องสัญญาณการจางหายแบบราบนั้น ค่าส่วนกลับของความกว้างแถบของสัญญาณที่ส่งผ่าน จะมีค่ามากกว่าค่าการกระจายการหน่วงเวลาของช่องสัญญาณ และผลตอบสนองของช่องสัญญาณสามารถประมาณเป็นฟังค์ชั่นเดลต้า (Delta Function) ได้ โดยทั่วไป ช่องสัญญาณการจางหายแบบราบนี้สามารถจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณได้เป็นอย่างมาก ดังนั้นในการส่งสัญญาณจะต้องใช้กำลังส่งสูง ๆ เพื่อให้มีค่าอัตราบิตผิดพลาดที่ต่ำ (Low Bit Error Rate) ซึ่งอาจจะสูงกว่าการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณธรรมดาถึง 20-30 dB การแจกแจงของอัตราขยายของช่องสัญญาณการจางหายแบบราบที่เวลาใด ๆ เป็นส่วนสำคัญมากในออกแบบระบบ โดยมากแล้ว จะมีการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh)

โดยสรุปแล้ว สัญญาณจะได้รับผลกระทบจากการจางหายของช่องสัญญาณเป็นแบบราบก็ต่อเมื่อ

$$B_s \quad << \quad (\Delta f)_c$$

และ

$$T_s \quad >> \quad \sigma_\tau$$

เมื่อ T_s คือ ส่วนกลับของความกว้างแถบของสัญญาณ หรือ คาบของสัญญาณ และ B_s คือ ความกว้างแถบของสัญญาณ ซึ่งทั้งสองค่านี้จะขึ้นอยู่กับการมอดูเลตของสัญญาณ และ σ_τ คือ ค่า RMS ของการกระจายการหน่วงเวลาของช่องสัญญาณ และ $(\Delta f)_c$ คือ ค่าแบนด์วิดท์ร่วมนัยของช่องสัญญาณ

3.2.1.2 การจางหายแบบเลือกความถี่ (Frequency Selective Fading)

ถ้าช่องสัญญาณมีอัตราขยายคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบเชิงเส้น ภายในช่วงความกว้างแถบที่มีค่าน้อยกว่าความกว้างแถบของช่องสัญญาณแล้ว เมื่อนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสัญญาณที่รับได้จะเป็นการจางหายแบบเลือกความถี่ ภายใต้สภาวะการจางหายแบบนี้ จะพบว่าผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของช่องสัญญาณ จะมีค่าการกระจายการหน่วงเวลามากกว่าส่วนกลับของความกว้างแถบของสัญญาณที่ส่งมา เมื่อเกิดการจางหายแบบนี้ขึ้น สัญญาณที่รับได้ จะรวมถึงสัญญาณที่มีเส้นทางการเดินทางต่างกันหลาย ๆ เส้นทาง ซึ่งแต่ละเส้นทางจะมีการลดทอนและ

การหน่วงเวลาที่ต่างกัน ทำให้สัญญาณที่รับได้เกิดความเพี้ยนไปจากเดิม การจางหายแบบเลือกความถี่นี้ จะเกิดการกระจายของสัญลักษณ์ (Symbol) ที่ส่งมากับสัญญาณในโดเมนของเวลาขึ้น ทำให้เป็นสาเหตุให้เกิดการแทรกสอดของสัญลักษณ์ขึ้น (Inter Symbol Interference: ISI) เมื่อมองในโดเมนของความถี่แล้ว จะพบว่า เฉพาะบางส่วนของสเปกตรัมของสัญญาณที่ส่งมา จะได้รับการขยายจากช่องสัญญาณไม่ใช่สเปกตรัมทั้งหมด

ช่องสัญญาณการจางหายแบบเลือกความถี่ จะทำการจะลองได้ยากกว่าแบบราบ เพราะว่าจะต้องจำลองว่า สัญญาณนั้นมีที่เส้นทาง และช่องสัญญาณจะต้องถูกพิจารณาว่าเป็นฟิลเตอร์แบบเชิงเส้น ในการวิเคราะห์บางครั้งอาจจะจำลองเป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ เช่น แบบจำลองเรย์ลีที่มี 2 เส้นทาง (2-ray Rayleigh Fading Model) หรือบางครั้งอาจจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองก็ได้

สำหรับการจางหายแบบเลือกความถี่ สเปกตรัม S(f) ของสัญญาณที่ส่งมาจะมีค่าความกว้างแถบมากกว่าค่าแบนด์วิดท์ร่วมนัยของช่องสัญญาณ เมื่อมองในโดเมนของความถี่ จะพบว่าช่องสัญญาณจะเป็นแบบเลือกความถี่ เพราะว่าจะมีช่วงความถี่บางส่วนเท่านั้นที่ได้รับการขยาย ดังนั้นการจางหายแบบนี้จะเป็นสาเหตุให้ค่าการกระจายการหน่วงเวลามีค่ามากกว่าการจางหายแบบราบ บางครั้งอาจจะมีค่าเท่ากับ คาบเวลาของสัญลักษณ์ของข้อมูลที่ส่งมาหลาย ๆ คาบเลยก็ได้ เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป อัตราขยายและเฟสของช่องสัญญาณที่คร่อมสเปกตรัมของสัญญาณที่ส่งมา จะเกิดการผันแปร ผลที่ตามมาก็คือ สัญญาณที่รับได้เกิดการผิดเพี้ยนขึ้น โดยสรุปแล้วสัญญาณจะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของการจางหายแบบเลือกความถี่ก็ต่อเมื่อ

$$B_s > (\Delta f)_c$$

และ

$$T_s < \sigma_\tau$$

3.2.2 ผลกระทบจากการจางหายเนื่องมาจากการกระจายดอปเปอร์

3.2.2.1 การจางหายแบบรวดเร็ว (Fast Fading)

ผลกระทบที่เกิดขึ้นแบบนี้ จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ส่งมา เมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ ดังนั้นช่องสัญญาณอาจจะถูกแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ช่องสัญญาณการจางหายแบบรวดเร็ว (Fast Fading Channel) และช่องสัญญาณแบบช้า (Slow Fading Channel) ในช่องสัญญาณการจางหายแบบรวดเร็วนั้น ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของช่องสัญญาณจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่าคาบเวลาของสัญลักษณ์ นั่นคือ ค่าเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณ จะมีค่าน้อยกว่าคาบเวลาของสัญลักษณ์ที่ส่งมา เป็นสาเหตุทำให้เกิดการกระจายทางความถี่ขึ้น (Frequency Dispersion) เนื่องจากการกระจายดอปเปอร์ ซึ่งผลที่ตามมาก็คือ การ

ผิดเพี้ยนของสัญญาณ (Signal Distortion) เมื่อมองในโดเมนของความถี่ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าการกระจายดอปเปอร์ที่สัมพันธ์กับความกว้างแถบของสัญญาณที่ส่งมามีค่ามากขึ้น เพราะฉะนั้นกล่าวโดยสรุปก็คือ สัญญาณจะตกอยู่ภายใต้การจางหายแบบรวดเร็วก็ต่อเมื่อ

$$T_s > (\Delta f)_c$$

และ

$$B_s < B_d$$

จะสังเกตว่า เมื่อช่องสัญญาณถูกระบุว่าเป็นการจางหายแบบรวดเร็วหรือแบบช้าแล้ว มันไม่ได้เป็นการระบุว่า ช่องสัญญาณนั้นมีการจางหายเป็นแบบราบหรือแบบเลือกความถี่ การจางหายแบบรวดเร็วเป็นการบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณและอัตราเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ส่งมาเท่านั้น ในกรณีของการจางหายแบบราบ เราสามารถประมาณได้ว่าผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของช่องสัญญาณเป็นฟังก์ชันเดลต้า อย่างไรก็ตามช่องสัญญาณสามารถที่จะเป็นแบบราบที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วก็ได้ ซึ่งก็คือ ช่องสัญญาณที่ขนาดของฟังก์ชั่นเดลต้า มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแถบฐานที่ส่งมา ในกรณีของช่องสัญญาณการจางหายแบบเลือกความถี่ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วก็เช่นกัน เป็นการบอกว่าขนาด หรือ เฟส และการหน่วงเวลาของช่องสัญญาณ ณ เส้นทางใด ๆ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ส่งมา ในทางปฏิบัติแล้ว การจางหายอย่างรวดเร็ว จะเกิดขึ้นเมื่อมีการส่งสัญญาณที่ความเร็วต่ำ

3.2.2.2 การจางหายแบบช้า (Slow Fading)

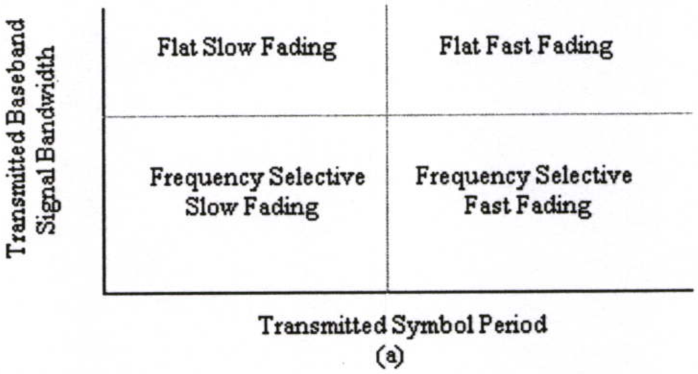
ในช่องสัญญาณการจางหายแบบช้านั้น ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของช่องสัญญาณ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้ากว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแถบฐานที่ส่ง ในกรณีนี้ช่องสัญญาณอาจจะสมมติว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งอาจจะมีค่าเป็นหลาย ๆ เท่าของส่วนกลับของความกว้างแถบของสัญญาณที่ส่งมา เมื่อมองในโดเมนความถี่ มันเป็นการบอกเป็นนัย ๆ ว่า การกระจายดอปเปอร์ของช่องสัญญาณ จะมีค่าน้อยกว่าความกว้างแถบของสัญญาณแถบฐานดังนั้นสัญญาณจะตกอยู่ภายใต้สภาวะการจางหายแบบช้า ก็ต่อเมื่อ

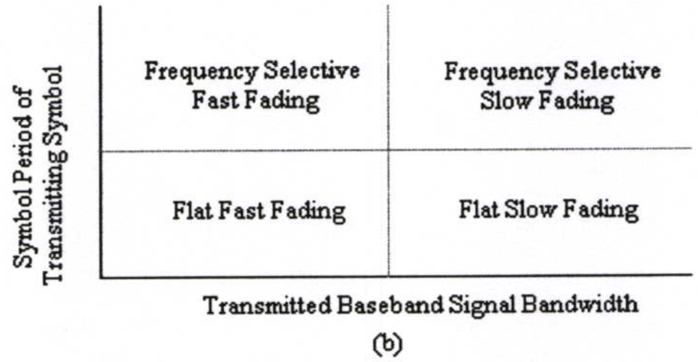
$$T_s < (\Delta f)_c$$

และ

$$B_s > B_d$$

ความเร็วขณะรับสัญญาณของเครื่องรับ เครื่องส่งและลักษณะของการส่งสัญญาณ จะเป็นตัวที่ใช้ในการพิจารณาว่าสัญญาณจะเกิดการจางหายแบบเร็วหรือแบบช้า
ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจางหายแบบหลายเส้นทางและชนิดของการจางหายแบต่าง ๆ ได้แสดงในรูปต่อไปนี้





รูปที่ 3.3 รูปแบบของการจางหายแบบต่าง ๆ บนฟังค์ชั่นของ

(a) คาบเวลาของสัญลักษณ์ (Symbol Period)

(b) ความกว้างของแถบสัญญาณแถบฐาน (Baseband Signal Bandwidth)

3.3 แบบจำลองของช่องสัญญาณการจางหาย (Model of Fading Channels)

3.3.1 แบบจำลองของช่องสัญญาณการจางหายแบบราบ (Model of Flat Fading Channels)

เมื่อผลกระทบจากช่องสัญญาณการจางหายเป็นแบบราบ สัญญาณที่รับได้จะมีขนาดของแอมพลิจูดเท่ากับขนาดของสัญญาณที่ส่งมาคูณกับค่าแอมพลิจูดการจางหาย (Fading Amplitude) ซึ่งในที่นี้แทนด้วยตัวแปร α โดยที่ α คือ ตัวแปรสุ่ม (Random Variable) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\overline{\Omega^2}$ และมีการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) คือ $p_\alpha(\alpha)$ ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพแวดล้อมของการแพร่สัญญาณ นอกจากนี้ หลังจากสัญญาณเดินทางผ่านช่องสัญญาณการจางหายแล้ว สัญญาณที่รับได้ยังจะถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนแบบ

ขาว (AWGN) ซึ่งจะเป็นอิสระจากตัวแปร α และจะมีความหนาแน่นสเปกตรัมของกำลังงานเป็นแบบคงที่ข้างเดียว (One-sided power spectrum density) ที่มีค่าเท่ากับ $N_0(W / Hz)$

3.3.1.1 แบบจำลองของเรย์ลี (Rayleigh Model)

แบบจำลองของ Rayleigh นั้นสามารถอธิบายการแจกแจงของความหนาแน่นกำลังของสัญญาณในชนบทได้ดี ซึ่งมีบ้านเรือนหรือภูเขาที่มีขนาดไม่สูงมากนัก ในการใช้งานในชนบทก็พบปัญหาซึ่งมีผลกระทบกับระดับความแรงของสัญญาณซึ่งเรียกว่า การจางหายแบบหลายเส้นทาง เมื่อสัญญาณเดินทางมากกว่าหนึ่งเส้นทางจากทางด้านส่งไปยังด้านรับ สัญญาณจะไม่ได้รับโดยตรงจากด้านส่งแต่จะได้รับจากทิศทางอื่น ๆ ซึ่งจะตกกระทบมา เช่น จากบ้านเรือนในชนบท จึงเป็นการยากมากที่การส่งในระดับสายตา (Line-of-Sight) ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณอาจจะเดินทางไปถึงเครื่องรับโดยผ่านการสะท้อนกับบ้านเรือนหลายครั้ง นั่นหมายความว่าสัญญาณที่รับได้จะเป็นผลรวมของสัญญาณเดียวกันที่มีความต่างเฟสกันเล็กน้อย โดยมากมักใช้กับการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณวิทยุ เช่น การสื่อสารวิทยุแบบรังผึ้ง โดยสรุปแล้วการแจกแจงแบบเรย์ลีนี้จะใช้กับช่องสัญญาณการจางหายที่ไม่มีเส้นทางที่เป็น Line of Sight เลย ในกรณีนี้แอมพลิจูดการจางหาย จะมีการแจกแจงเป็นไปตามสมการ [15]

$$p_\alpha(\alpha) = \frac{2\alpha}{\Omega}\exp\left(-\frac{\alpha^2}{\Omega}\right), \quad \alpha \ge 0 \tag{3.1}$$

โดยที่ Ω มีค่าเท่ากับ $\overline{\alpha^2}$

3.3.1.2 แบบจำลองของ Rician (Rician Model)

แบบจำลองของ Rician เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมในเมือง ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ค่า ใช้จำลองเส้นทางในการกระจายสัญญาณประกอบด้วยส่วนหลักคือ ส่วนของ Direct Line-of-Sight และส่วนประกอบในเส้นทางอื่น ๆ ที่มีความแรงของสัญญาณแรงลงมา และใช้กับการสื่อสาร Micro-cellular land mobile การสื่อสาร Pico-cellular indoor และสภาพแวดล้อมในโรงงาน ซึ่งแสดงด้วยฟังก์ชั่นค่าความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังสมการ [15]

$$p_\alpha(\alpha) = \frac{2(1+K)e^{-K}\alpha}{\Omega}\exp\left(-\frac{(1+K)\alpha^2}{\Omega}\right) I_0\left(2\sqrt{K}\alpha\sqrt{\frac{1+K}{\Omega}}\right), \quad \alpha \ge 0 \tag{3.2}$$

เมื่อ I_0 คือ ฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function)

และ K คือ พารามิเตอร์ Rician

3.3.1.3 แบบจำลอง Nakagami (Nakagami Model)

แบบจำลองของ Nakagami เป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมทั้งในชนบทและในเมือง ซึ่งเหมาะสมกับการแพร่กระจายของ Land Mobile และ Indoor Mobile และสามารถอธิบายปรากฏการณ์ของการเกิดการจางหายในบริเวณอื่น ๆ ได้ดี อย่างไรก็ตามแบบจำลอง Nakagami ยังสามารถอธิบายแบบจำลองอื่น ๆ ได้อีกด้วย โดยค่าความหนาแน่นของความน่าจะเป็นเป็นดังสมการ [15]

$$p_\alpha(\alpha)=\frac{2m^m\alpha^{2m-1}}{\Omega^m\Gamma(m)}\exp\left(-\frac{m\alpha^2}{\Omega}\right),\quad \alpha\geq 0 \tag{3.3}$$

โดยสรุปแล้ว จุดเด่นของแบบจำลองนาคากามิ คือ

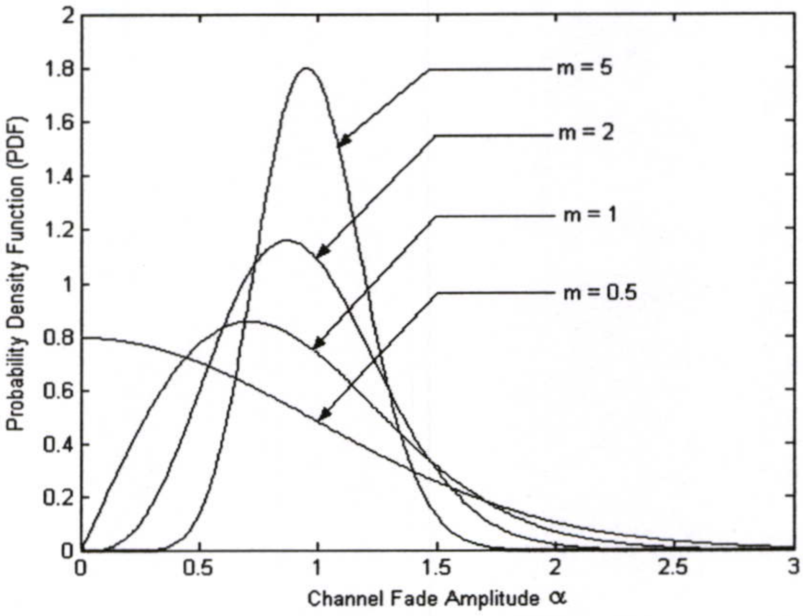
1) เป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทดลองและสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมทั้งในชนบทและเมืองใหญ่

2) เป็นแบบจำลองที่สอดคล้องกับการแจกแจงของแอมพลิจูด (Amplitude distortion) ซึ่งแสดงด้วยตัวแปรเสริมการจางหาย (m) ต่าง ๆ ดังนี้

$m = 0.5$ คือ การแจกแจงแบบเกาส์เซียนข้างเดียว

$m = 1$ คือ การแจกแจงแบบเรย์ลี

$m \rightarrow \infty$ คือ กรณีอุดมคติที่ไม่มีการเพี้ยนของสัญญาณ



รูปที่ 3.4 รูปการแจกแจงความน่าจะเป็นของNakagami เมื่อ Ω =1

3.3.1.4 แบบจำลองแบบล็อกนอร์มอล (Lognormal Fading Channels)

ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินแบบอ้างอิงโลก (Terrestrial land-Mobile Systems) และ แบบผ่านดาวเทียม (Satellite Land-Mobile Systems) คุณภาพของการสื่อสารจะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระดับของพลังงานเฉลี่ยของสัญญาณแบบช้า ๆ เนื่องมาจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ เช่น อาคารต่าง ๆ หรือ ต้นไม้ เป็นต้น ประสิทธิภาพในการสื่อสารจะขึ้นอยู่กับการบดบังของสัญญาณ (Shadowing) เท่านั้น ถ้าเครื่องรับสามารถเฉลี่ยผลกระทบจากการจางหายอย่างรวดเร็วนั้น ๆ ได้ หรือว่ามีการใช้ไดเวอร์ซิตี้แบบต่าง ๆ ในการกำจัดผลกระทบจากการจางหายออกไปจากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง จะได้ว่า สัญญาณที่รับได้จะได้ผลกระทบเฉพาะการบดบังสัญญาณเท่านั้น และจะมีการแจกแจงเป็นแบบ lognormal ซึ่งเป็นไปตามสมการนี้ [15]

$$p_\alpha(\alpha) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma\gamma}\exp\left(-\frac{(10\log_{10}\gamma - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (3.4)$$

เมื่อ γ คือ อัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวนต่อสัญลักษณ์ (SNR per symbol) ของแต่ละเส้นทาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\alpha^2 E_s / N_0$ คือ พลังงานต่อสัญลักษณ์ (Symbol Energy), $\xi = 10/\ln 10$ = 4.3429, $\mu(dB)$ และ $\sigma(dB)$ คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $10\log_{10}\gamma$ ตามลำดับ

3.3.2 แบบจำลองของช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเลือกความถี่ (Model of Frequency Selective Fading Channels)

เมื่อสัญญาณแบนด์กว้างถูกส่งผ่านช่องสัญญาณแบบเลือกความถี่ สเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ตะมีลักษณะเปลี่ยนไป ผลลัพธ์ก็คือ เกิดการกระจายของสัญญาณขึ้น ลักษณะของการจางหายแบบนี้จะถูกจำลองในลักษณะเป็นฟิลเตอร์ที่มีผลตอบสนองแถบฐานต่ออิมพัลส์แบบเชิงซ้อน (Complex-valued equipvalent impulse response) ซึ่งแสดงได้ตามสมการ

$$h(t) = \sum_{l=1}^{L_p} \alpha_l e^{-j\theta_l}\delta(t-\tau_l) \qquad (3.5)$$

เมื่อ $\delta(.)$ คือฟังค์ชั่นเดลต้า, l คือ ค่าที่ใช้ในการระบุเส้นทางที่ l ใด ๆ และ $\{\alpha_l\},\{\theta_l\},\{\tau_l\}$ โดยที่ $l = 1,\ldots,L_p$ คือ เซตของตัวแปรสุ่มขนาด, เฟสและการหน่วงเวลาของช่องสัญญาณตามลำดับในสมการที่ 4.5 และ Lp คือ จำนวนเส้นทางทั้งหมดของสัญญาณที่เดินทางเข้ามาที่เครื่องรับและเครื่องรับสามารถแยกแยะได้ (Resolvable Paths) โดยจะอ้างอิงจากเส้นทางแรกที่เข้ามา และจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างการกระจายการหน่วงเวลาสูงสุดกับคาบของสัญลักษณ์ ภายใต้การจางหายอย่างช้า ๆ (Slow fading) และ Lp จะถูกสมมติว่ามีค่าคงที่

ตลอดระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง และ $\{\alpha_l\},\{\theta_l\},\{\tau_l\}$ ที่ $l=1,...,L_p$ จะมีค่าคงที่ ตลอดระยะเวลาภายในแต่ละคาบของสัญลักษณ์ ถ้าเส้นทางต่าง ๆ ของสัญญาณ มีผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ที่ถูกสร้างขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดคนละแหล่งแล้ว แต่ละเส้นทางสามารถจะประมาณได้ว่ามีคุณสมบัติอิสระจากกันได้ แอมพลิจูดการจางหายบนเส้นทางใด ๆ จะถูกสมมติว่าเป็นตัวแปรสุ่มและมีค่าเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ Ω โดยที่การแจกแจงจะสามารถจำลองได้เป็นแบบต่าง ๆ เช่นเดียวกับในช่องสัญญาณการจางหายแบบราบหลังจากสัญญาณถูกส่งผ่านช่องสัญญาณแล้ว จะถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนแบบขาว (AWGN) ซึ่งจะอิสระจากตัวแปรสุ่มแอมพลิจูดของการจางหาย นอกจากนี้แล้วค่า SNR ต่อสัญลักษณ์ ณ เวลาใด ๆ ของช่องสัญญาณที่ l จะมีค่าเท่ากับ $\alpha^2 E_s / N_0$ และ ค่า SNR เฉลี่ยต่อสัญลักษณ์ของช่องสัญญาณที่ l จะมีค่าเท่ากับ $\Omega E_s / N_0$

สัญญาณของเส้นทางแรกที่เข้ามา จะเกิดการจางหายน้อยกว่าสัญญาณของเส้นทางหลัง ๆ ที่เข้าต่อมา เพราะว่าเส้นทางแรกนี้อาจจะเป็นเส้นทางที่เป็น LOS นอกจากนี้แล้ว โดยมากสัญญาณที่เข้าต่อ ๆ กันมาที่เครื่องรับ จะมีกำลังงานของสัญญาณลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาที่หน่วงออกไป สัญญาณจากเส้นทางสุดท้ายที่เข้ามาจะเกิดการจางหายมากที่สุด ซึ่งกำลังงานของแต่ละเส้นทางนี้จะใช้ในการคำนวณหาหน้าตัดข้างของการหน่วงเวลาของกำลังงาน (Power Density Profile) ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถสมมติให้เป็นแบบต่าง ๆ ได้หลายแบบขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมโดยรอบและลักษณะการแพร่กระจายของสัญญาณ ดังตัวอย่างเช่น จากการวัดจริงในช่องสัญญาณภายในตัวอาคารและบริเวณในตัวเมืองของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

3.4 แบบจำลองสัญญาณทางด้านรับหลังผ่านการจางหายในช่องสัญญาณ

ถ้าสัญญาณทางด้านส่งที่มีการมอดูเลตแบบตำแหน่งพัลส์ บนพื้นฐานการมอดูเลตแบบ TH-PPM ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.2)

$$s_{Tx}^{k}(t)=\sum_{i=-\infty}^{+\infty} p_{_{Tx}}\left(t-iT_F-\delta\alpha\right)$$

ซึ่ง $p_{_{Tx}}$ คือ สัญญาณพัลส์ที่ทำการส่งข้อมูล

T_F คือ ระยะห่างระหว่างเฟรม (frame duration)

$\alpha^{(k)}$ คือ ข้อมูลที่จะส่ง (transmitted information)

ดังนั้นสัญญาณทางด้านรับจะมีการลดทอนของแอมพลิจูดเนื่องจากผ่านการจางหายของช่องสัญญาณ และผลจากสัญญาณรบกวนแบบ AWGN (Additive White Gaussian Noise) ดังนั้นสมการทางสัญญาณด้านรับสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$r(t)=\sum_{i=-\infty}^{+\infty}\alpha p_{_{Tx}}\left(t-iT_{F}-\delta\alpha-\tau\right)+n(t) \tag{3.6}$$

ซึ่ง $r(t)$ คือ สัญญาณทางด้านรับที่รับได้

α คือ อัตราการลดทอนของการจางหาย

$n(t)$ คือ สัญญาณรบกวน AWGN ซึ่งมีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมของกำลังสัญญาณเท่ากับ $N_0/2$

ดังนั้นถ้าระบบที่เราพิจารณาเป็นการจางหายในรูปแบบของนาคากามิ ดังนั้นตัวแปรอัตราการลดทอนของการจางหาย จะขึ้นกับความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของอัตราการลดทอนทางแอมพลิจูด ซึ่งมีค่าตามสมการ (3.3)

$$p_{\alpha}(\alpha)=\frac{2m^{m}\alpha^{2m-1}}{\Omega^{m}\Gamma(m)}\exp\left(-\frac{m\alpha^{2}}{\Omega}\right),\quad \alpha\geq 0$$

โดย Ω มีค่าเท่ากับ $\overline{\alpha^2}$

3.5 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่เกิดการผิดพลาดของสัญญาณที่มีการจางหาย

การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดเฉลี่ยของการสื่อสารของสัญญาณย่านความถี่ UWB บนการจางหายสามารถคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดเฉลี่ยที่เกิดจากการจางหายในช่องสัญญาณ หาได้จาก [15]

$$P_b(E)=\int_{0}^{\infty}P(E\,|\,\gamma).p_{\gamma}(\gamma)d\gamma \tag{3.7}$$

โดยที่ $p_{\gamma}(\gamma)$ คือ ความน่าจะเป็นบนช่องสัญญาณการจางหายรูปแบบต่าง ๆ และ $P(E/\gamma)$ คือ ความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดที่ มาจาก Coherent detection รูปแบบต่าง ๆ

บทที่ 4

CSMA/CA

กระบวนการเข้าถึงพื้นฐานตามมาตรฐาน IEEE 802.11 นั้น จะเป็นแบบ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ซึ่งเป็นระเบียบการเข้าถึงแบบสุ่ม ที่ใช้การตรวจจับการส่งสัญญาณ (Carrier Sense) และหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล (Collision Avoidance)

4.1 สถาปัตยกรรมทั่วไปของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11

ลักษณะโครงข่ายและสถาปัตยกรรมทั่วไปของมาตรฐาน IEEE 802.11 แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า โครงข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 จะมี 2 แบบด้วยกัน คือ ระบบโครงข่ายที่เครื่องลูกข่ายสามารถติดต่อกับโครงข่ายหลัก (Backbone Network) ได้โดยตรง โดยผ่านทาง AP (Access Point) ซึ่งส่วนนี้ใน IEEE 802.11 เรียกว่า "ระบบโครงข่ายแบบกระจาย" (Distribution System) ส่วนโครงข่ายอีกประเภทหนึ่ง คือ โครงข่ายของกลุ่มของเครื่องลูกข่าย ที่สามารถติดต่อกันได้โดยตรง โดยที่ไม่จำเป็นต้องผ่านสถานีฐาน (Base Stations) ใด ๆ เลย โครงข่ายแบบนี้ เรียกว่า "โครงข่ายแบบ Ad hoc" โครงข่ายแบบแรกนั้น ใช้สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ที่ออกแบบมาให้สามารถครอบคลุมบริเวณทั้งหมด ภายในตึกหรือภายในสถานที่ต่าง ๆ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ AP เป็นจำนวนมาก เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด รวมถึงการออกแบบเซลแต่ละเซล จะต้องให้มีการซ้อนทับกันเล็กน้อย เพื่อให้สามารถสื่อสารกันได้อย่างสมบูรณ์ ในมาตรฐาน IEEE 802.11 เครื่องลูกข่ายที่สามารถติดต่อกับ AP หนึ่ง ๆ ได้ จะเรียกว่า "BSS" (Best Service Set) โดยที่เครื่องลูกข่ายนี้ อาจจะเป็นสมาชิก (member) ของเซลมากกว่าหนึ่งเซลก็ได้ สำหรับโครงข่ายแบบที่สองนั้น จะให้สำหรับโครงข่ายแบบ Ad hoc ซึ่งจะใช้ในงานบางประเภท เช่น ใช้ในการประชุมกันภายในห้องประชุม เป็นต้น โปรโตคอลสำหรับระดับชั้น MAC นั้น มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ระบุไว้ว่าโครงข่ายทั้งสองแบบ จะใช้โปรโตคอลเดียวกัน

4.1.1 ระดับชั้น Physical layer

ในมาตรฐาน IEEE 802.11 จะมีการใช้ระดับชั้น Physical อยู่ 4 แบบด้วยกัน คือ

- 2.4 GHz, ISM แบนด์ ซึ่งใช้ FH-SS ในการส่งสัญญาณ
- 2.4 GHz, ISM แบนด์ ซึ่งใช้ DS-SS ในการส่งสัญญาณ
- แสงอินฟราเรด ซึ่งใช้สัญญาณแสงอินฟาเรดในการส่งสัญญาณ
- 5 GHz, ISM แบนด์ ซึ่งใช้การส่งสัญญาณแบบ OFDM

ระดับชั้นทั้ง 4 แบบ แสดงเปรียบเทียบกันในตารางที่ 4.1 [16-17]

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบระยะการส่ง อัตราการส่ง และ ความถี่ที่ใช้ระหว่าง WLAN แบบต่าง ๆ

Technology	Standard	Maximum Range (Meters)	Fie Transfer Speed (Mbps.)	Frequency Band (GHz)
DS-SS	IEEE 802.11b	91	11	2.4
FH-SS	IEEE 802.11b	91	2	2.4
Infrared	IEEE 802.11b		10	
OFDM	IEEE 802.11a	91	54	5

คณะกรรมการของ IEEE 802.11 อนุญาตให้มีการใช้ Physical ได้หลายแบบ เพราะว่าแต่ละสมาชิกของคณะกรรมการนี้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้ผลิตอุปกรณ์ ได้มีการค้นคว้าและวิจัยเทคโนโลยีที่แตกต่างกันไปก่อนหน้านี้แล้ว ประโยชน์ที่เกิดขึ้น คือ ข้อดีของ Physical แต่ละแบบจะได้รับการตรวจสอบและพัฒนาไปเรื่อย ๆ จากบริษัทผู้ผลิตที่ใช้เทคโนโลยีนั้น ๆ [18] ส่วนข้อเสียที่เกิดขึ้น คือ ผู้ใช้ 2 คนที่ต้องการใช้งานระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายร่วมกัน จะต้องมีการกำหนดอัตราการส่งข้อมูลระหว่างกันที่ชัดเจน

ในระบบที่ใช้ระดับชั้น Physical แบบ FH ความถี่ที่ใช้ในการส่งข้อมูล จะเปลี่ยนแปลงไปตามชุดของความถี่ที่ใช้กัน ตัวอย่างเช่น ความถี่ที่ใช้ใน US/European ของมาตรฐาน IEEE 802.11 คือ 79 ความถี่ และ 23 ความถี่ในกรณีที่ใช้ในญี่ปุ่น เครื่องส่งจะส่งข้อมูล ณ ที่ความถี่ที่กำหนดให้เป็นเวลาค่าใดค่าหนึ่งตามที่ได้ถูกกำหนดไว้ (Dwell time) หลังจากครบช่วงเวลาที่กำหนดแล้ว มันจะเปลี่ยนความถี่ที่ส่ง เป็นอีกความถี่หนึ่ง และส่งข้อมูล ณ ความถี่นี้ เป็นเวลาค่าใดค่าหนึ่งหลังจากนั้นก็จะเปลี่ยนไปอีกเรื่อย ๆ ความถี่ที่เปลี่ยนไประหว่างการส่งข้อมูลนั้น ที่เครื่องรับจะต้องทราบด้วย เพื่อจะได้สามารถรับข้อมูลได้ถูกต้อง นอกจากนี้แล้ว ที่เครื่องรับ จะต้องมีเครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesizer) เพื่อจะใช้ในการ Detect ข้อมูลที่ต้องการ ณ ที่ความถี่นั้น ๆ ออกมาได้ ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ใช้ FH ในมาตรฐาน IEEE 802.11 จะใช้การกระโดความถี่แบบช้า (Slow Frequency Hopping) ซึ่งก็คือ จะมีการกระโดจากความถี่หนึ่ง ไปยังอีกความถี่หนึ่ง หลังจากการส่งสัญลักษณ์ข้อมูลไปแล้วหลาย ๆ สัญลักษณ์ ในระบบ FH นั้นเซลที่ติด ๆ กัน หรือ เซลที่เกิดการซ้อนทับกัน จะใช้ชุดของความถี่ที่แตกต่างกัน ชุดของความถี่ที่ใช้แต่ละชุดนั้น จะประกอบด้วยความถี่ต่าง ๆ มากมายและเซลที่อยู่ติดกัน (Adjacent Cell) จะต้องไม่ใช้ความถี่เดียวกัน ณ เวลาเดียวกัน

ในระบบที่ใช้ระดับชั้น Physical แบบ DS ข้อมูลก่อนที่จะทำการส่ง จะต้องถูกนำไป Modulate กับสัญญาณ Wideband ก่อน ซึ่งสัญญาณ Wideband ที่ใช้ในการ Modulate นี้จะต้องบอกให้ที่เครื่องรับทราบด้วย เพื่อที่จะได้สามารถทำการตรวจรับข้อมูลที่ส่งมาได้ สังเกตว่า

มาตรฐาน IEEE 802.11 ที่ใช้ DS จะแตกต่างจากระบบ CDMA (Code Division Multiple Access) ทั่วไปตรงที่ในแต่ละเซลนั้น จะใช้ชุดของสัญญาณ Wideband เพียงชุดเดียวเท่านั้น ค่า factor ที่สำคัญที่ใช้ในการบอกว่าสัญญาณถูกกระจายไปมากน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับสัญญาณเดิม คือ อัตราการกระจาย (Process Gain) ของระบบ DS ซึ่งในมาตรฐาน IEEE 802.11 ระบุไว้ว่าให้มีค่า 11 (10.4 dB) เพื่อให้สามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Noise) ได้ และให้แบ่งช่วงความถี่ทั้งหมด 83 MHz ออกเป็นช่องสัญญาณย่อย ๆ

ส่วนในระบบที่ใช้ Physical แบบ OFDM ที่ใช้ความถี่ 5 GHz นั้น เป็นมาตรฐานใหม่ที่ถูกกำหนดขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถให้กับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ให้สามารถส่งข้อมูลที่ความเร็วสูงขึ้น โดยที่ความซับซ้อนของอุปกรณ์ที่ใช้ ไม่มีความซับซ้อนมากขึ้นเท่าไหร่นัก โดยในการส่งข้อมูลนั้น จะส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณย่อย ๆ หลาย ๆ ช่องสัญญาณ (Sub channel) โดยให้การทำงานร่วมกันของ S/P (Serial-to-Parallel Converter) และ P/S (Parallel-to-Serial Converter) ช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณนั้น ในมาตรฐาน IEEE 802.11a ได้ระบุไว้ว่าใช้ 64 ช่องสัญญาณ โดยที่เป็นช่องสัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูล 48 ช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญลักษณ์ชี้นำ (Pilot Symbol) 4 ช่องสัญญาณ ส่วนช่องสัญญาณที่เหลือจะไม่ใช้ อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดที่ส่งได้คือ 54 Mbps ในการมอดูเลตสัญลักษณ์ข้อมูลนั้นจะใช้กระบวนการ IFFT [19] ในการมอดูเลตเพื่อลดความซับซ้อนของการมอดูเลต

ในส่วนของระดับชั้น Physical ที่ใช้การส่งสัญญาณโดยใช้อินฟาเรดนั้น จะใช้อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 850-950 ม.ม. ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ได้มีการควบคุม (ใช้เลเซอร์ไดโอดแทน LED) ในมาตรฐานระบุไว้ว่า ในการส่งสัญญาณ ไม่จำเป็นต้องเป็นแบบ LOS ระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งแต่แสงอินฟาเรดที่ใช้ควรเป็นแบบ Diffuse การส่งโดยใช้แสงอินฟาเรดแบบนี้ จะใช้สำหรับการสื่อสารแบบจุดไปยังหลายจุด (Point-to-Multipoint Communication) ระยะทางไกลสุดที่สามารถใช้งานได้ คือ ประมาณ 10 เมตร ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่ได้รับผลกระทบจากแสงอาทิตย์ และไม่เกิดปัญหาการรบกวนเนื่องจากความร้อนที่แหล่งกำเนิดแสง โดยทั่วไป การส่งสัญญาณโดยใช้แสงอินฟาเรดตามมาตรฐาน IEEE 802.11 นี้จะใช้กับระบบเครือข่ายภายในตัวอาคาร เช่น ภายในห้องเรียนหรือห้องประชุม เป็นต้น กระบวนการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่นั้น (Frequency Reuse) สามารถทำได้ง่ายมาก เนื่องจากสัญญาณอินฟาเรดตามมาตรฐาน IEEE 802.11 นั้น จะถูกกำหนดมาให้ไม่สามารถส่งผ่านผนังได้ ทำให้การแบ่งเซลสามารถกำหนดขอบเขตได้ง่าย

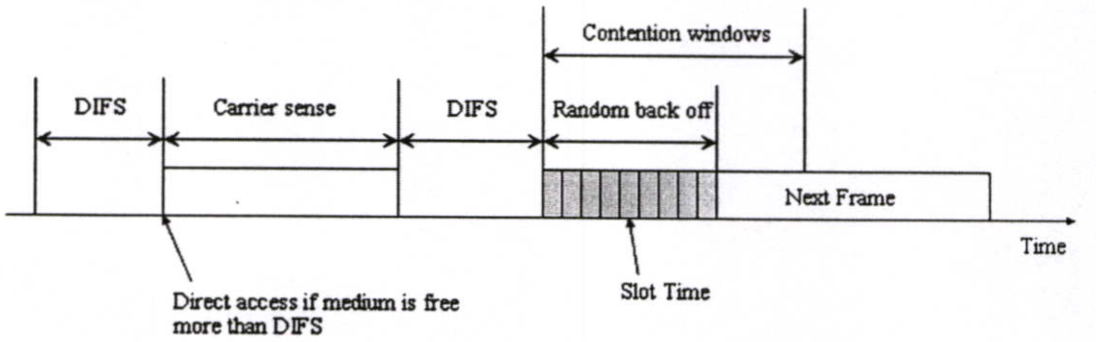
กล่าวโดยสรุปก็คือ ในระบบ FH นั้นจะใช้จำนวนของช่องความถี่ ที่มีจำนวนมากกว่าระบบ DS และ OFDM ในบริเวณที่มีเซลต่าง ๆ มาก ๆ หรือมีการซ้อนทับกันของเซลมาก ๆ นั้น สามารถใช้ระบบ FH ได้ดีกว่าแบบอื่น นอกจากนี้แล้ว ในระบบ DS และ FH ยังมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี ในระบบ FH นั้น จะเกิดการรบกวนเฉพาะช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น ขณะที่ในระบบ DS นั้นการรบกวน ณ ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง จะมีผลต่อช่วงเวลาการส่งสัญญาณ

ทั้งหมด ดังนั้นระบบ FH จะมีประสิทธิภาพในการทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า ในกรณีถ้าบริเวณนั้น มีสัญญาณรบกวนมาก ๆ ส่วนระบบ DS นั้น เหมาะสำหรับใช้ในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนน้อย ๆ ส่วนในระบบ OFDM นั้น จะทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีเช่นกัน นอกจากนี้แล้ว ยังจะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการจางหายได้เป็นอย่างดีด้วย [20-21] ระบบทั้ง 3 นี้ จะใช้กำลังงานในการส่งประมาณ 100 mW ซึ่งสามารถจะส่งสัญญาณครอบคลุมได้ในพื้นที่รัศมีไม่เกิน 100 เมตร ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของข้อมูลที่ส่ง

4.1.2 ระดับชั้น MAC (Medium Access Control)

ในมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้มีการกำหนดโปรโตคอลที่ใช้ สำหรับ Physical ทั้ง 4 แบบ ไว้โปรโตคอลเดียว โปรโตคอลที่กำหนดขึ้นนี้ ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ผู้ผลิตแต่ละราย สามารถที่จะผลิตได้เป็นจำนวนมาก ๆ โดยที่ราคาไม่สูงมากนัก โปรโตคอลที่สามารถใช้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้นั้น จะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ

- สามารถรองรับโครงข่ายได้ทั้งแบบทั่วไปและแบบ Ad hoc (ดังรูปที่ 4.1)
- สามารถทำงานได้ทั้งแบบอะซิงโครนัสและแบบ time-critical traffic (เรียกว่า การบริการแบบกำหนดขอบเขตเวลา
- มีคุณสมบัติในการจัดการกำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณได้



รูปที่ 4.1 กระบวนการเข้าถึงแบบพื้นฐานที่ใช้ CSMA/CA ตามมาตรฐาน IEEE 802.11

วิธีการเข้าถึงพื้นฐานที่ใช้กันตามมาตรฐาน IEEE 802.11 คือ Distributed Co-ordination Function ซึ่งจะใช้การเข้าถึงที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ซึ่งเป็นแบบหนึ่งของ CSMA และมีลักษณะคล้ายกันกับ CSMA/CD ที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.3 [22-23] การเข้าถึงแบบ CSMA/CA นี้จะใช้การสุ่มของช่วงเวลา เพื่อลดการชนกันของข้อมูล การชนกันของข้อมูล มักจะเกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูลของสถานีหนึ่ง แต่สถานีอื่น ๆ ตรวจไม่พบการส่งข้อมูลนั้น แล้วทำการส่งข้อมูลออกมา กระบวนการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ในมาตรฐาน IEEE 802.111 นี้ จะใช้การสุ่มของช่วงเวลาที่มีการแจกแจงแบบยูนิ

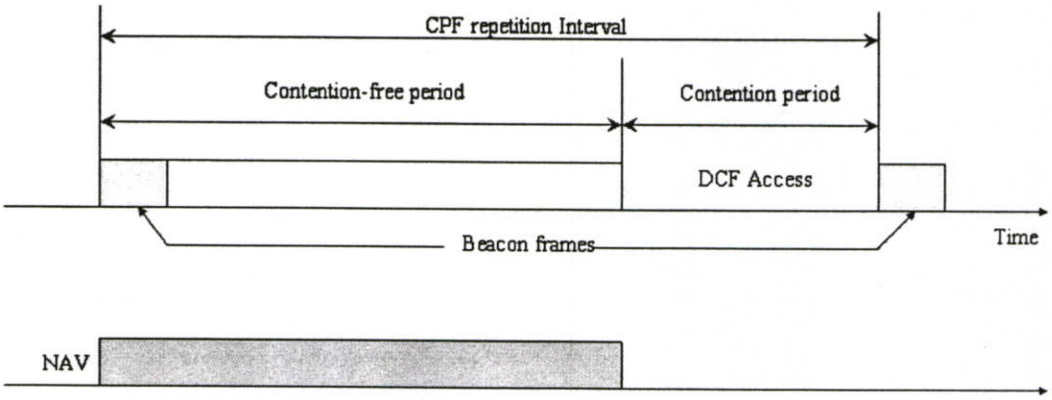
ฟอร์ม (Uniform Distribution) ในลักษณะของสล๊อตของเวลา ซึ่งค่ามากที่สุดของช่วงเวลาที่สุ่มได้นั้นเรียกว่า Contention Windows พารามิเตอร์ CW นี้ คือ ขอบเขตของช่วงเวลาที่ได้จากการสุ่ม ซึ่งจะมีค่าเป็น 2 เท่าของคาบเวลาของเฟรมข้อมูลที่ส่งไปไม่สำเร็จ โดยพิจารณาจากการสูญหายไปของเฟรม ACK กระบวนการ Exponential Backoff นี้จะช่วยลดการชนกันของเฟรมข้อมูลได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้ว จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าค่า IFS (Initial Inter-frame Space) จะมีค่าแตกต่างกันอยู่ 3 ค่า ตามแต่ความสำคัญ (Priority) ของการส่งสัญญาณเฟรมนั้น ๆ เฟรมที่สำคัญมาก ๆ จะถูกส่งโดยใช้ IFS ที่มีค่าน้อยที่สุดคือ Short IFS (SIFS) ตัวอย่างเช่น สัญญาณของ ACK ที่ถูกส่งกลับมาจากสถานีรับ เพื่อยืนยันการรับข้อมูลได้อย่างถูกต้อง สาเหตุที่ต้องใช้ IFS ที่มีค่าน้อยที่สุด ก็เพื่อว่าเป็นการรับรองว่า จะไม่มีสถานีอื่นส่งสัญญาณ ก่อนที่สัญญาณ ACK นี้จะถูกส่ง IFS ต่อมา คือ PIFS (Point Co-ordination function IFS) ซึ่งถูกใช้ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการส่งเฟรมแบบ Time-critical เพื่อให้เฟรมแบบนี้สามารถที่จะถูกส่งได้ก่อน อะซิงโคนัสเฟรมข้อมูลทั่วไป ซึ่งอะซิงโครนัสเฟรมข้อมูลทั่วไปนี้ จะใช้ IFS ที่มีค่ามากที่สุด คือ DIFS (Distribution Co-ordination Function IFS)

ในระบบการสื่อสารที่ใช้หลักการติดต่อสื่อสาร โดยอาศัยการตรวจจับการส่งสัญญาณวิทยุนั้น (Carrier Sensing) ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้น คือ โหนดที่มองไม่เห็น (Hidden Node) ซึ่ง เกิดจากการที่สถานีหนึ่ง สามารถตรวจจับสัญญาณวิทยุที่ส่งมาจากสถานีอื่น ๆ ได้ ขณะที่สถานีอื่น ๆ นั้น ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณวิทยุที่ส่งมาจากสถานีนี้ได้ เพราะฉะนั้น เมื่อสถานีอื่น ๆ ทำการส่งเฟรมข้อมูลออกมา อาจจะทำให้เกิดการชนกันของเฟรมข้อมูลได้ เนื่องจากขณะนั้น สถานีที่เป็น โหนดที่มองไม่เห็น อาจจะกำลังส่งสัญญาณข้อมูลอยู่ก็ได้ ปัญหาของโหนดที่มองไม่เห็นนี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดการชนกันของข้อมูลมากขึ้น กระบวนการเข้าถึงในชั้น MAC ของมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดวิธีการแก้ปัญหานี้ไว้ด้วย โดยการให้เฟรมควบคุม (Control Frame) 2 ชนิด คือ

- เฟรม RTS (Request to Send) ซึ่งส่งจากสถานีส่งไปยังสถานีปลายทางที่เป็นสถานีรับ
- เฟรม CTS (Clear to Send) ซึ่งส่งจากสถานีรับไปยังสถานีส่ง เมื่อสถานีรับสามารถรับสัญญาณของเฟรม RTS ที่ส่งมาได้

เฟรม CTS จะถูกส่งจากสถานีที่เป็นด้านรับ กลับมายังสถานีที่ต้องการส่งเฟรมข้อมูลนั้น เพื่อยืนยันถึงการมีตัวตน ขณะเดียวกันก็จะเป็นการแจ้งสถานีอื่น ๆ ที่อยู่ในขอบเขตของสัญญาณวิทยุนั้นหรือในขอบเขตเซลนั้น ไปพร้อม ๆ กันด้วยว่า ขณะนี้ มีสถานีที่กำลังจะส่งสัญญาณออกมา เพราะฉะนั้นสถานีอื่น ๆ นั้น อย่าพึ่งทำการส่งสัญญาณออกมา ภายในช่วงระยะเวลาช่วงหนึ่ง ซึ่งช่วงระยะเวลานี้จะเรียกว่า ช่วงเวลา NAV (Net Allocation Vector) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 การส่งเฟรม RTS/CTS นี้จะไม่ใช้ในการส่งสัญญาณของเฟรมข้อมูลที่สั้น ๆ เนื่องจากความน่าจะเป็นที่ข้อมูลจะชนกัน จะมีค่าน้อยกว่า และนอกจากนั้นแล้ว การใช้วิธีนี้มาก ๆ จะทำให้ค่า Throughput ลดลงด้วย

ในกรณีที่เป็นการส่งข้อมูลแบบจำกัดของเขตเวลานั้น (Time-Bounded Service) มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ระบุถึงการนำ PCF มาใช้ที่สถานีที่เรียกว่า Point Co-ordination ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว สถานี PCF จะเป็น AP นั่นเอง เพราะฉะนั้น การบริการส่งข้อมูลแบบจำกัดขอบเขตเวลานี้ จะใช้กับโครงข่ายแบบธรรมดาเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับโครงข่ายแบบ Ad hoc ได้ ซึ่งจะมีความสามารถในการควบคุมการส่งสัญญาณเฟรมข้อมูลได้ นั่นคือ เมื่อมีการใช้งานในโหมด PCF สถานีที่เป็นสถานี PCF อนุญาตให้เพียงสถานีเดียวเท่านั้นในแต่ละเซล ที่จะสามารถส่งสัญญาณเฟรมข้อมูลออกมาได้ในช่วงขณะเวลาใดเวลาหนึ่ง ในการควบคุมนั้น จะใช้ PIFS และเฟรม Beacon ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะใช้ในการแจ้งบอกสถานีอื่น ๆ ทั้งหมดในเซลนั้น เพื่อไม่ให้สถานีใด ๆ มีการส่งสัญญาณออกมาภายในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ที่เรียกว่า CFP (Contention free period) เมื่อสถานีทั้งหมดในเซลไม่มีการส่งสัญญาณข้อมูลออกมาแล้ว สถานี PCF จะแจ้งบอกให้ สถานีที่กำหนดให้สามารถส่งสัญญาณได้ เริ่มการส่งสัญญาณเฟรมข้อมูลออกมา ซึ่งในการส่งสัญญาณเฟรมข้อมูลนั้น จะส่งโดยอาศัยเฟรมโพลลิ่ง (Polling Frame) ที่ส่งมาจากสถานี PCF ซึ่งสังเกตว่า CPF สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงความยาวได้ ในแต่ละครั้งของการใช้งานของระบบ ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายโดยทั่วไป ในการติดตั้งจะกำหนดให้เซลที่อยู่ติดกันจะใช้ช่องสัญญาณที่ต่างกัน เพื่อป้องกันไม่ให้สถานี PCF 2 สถานีใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน ขณะที่ เป็นช่วงเวลา CPF แต่ในกรณีที่เป็นโครงข่ายแบบ Ad hoc ที่มีการใช้งานเฉพาะแบบ DCF นั้น จะยอมให้มีการใช้ช่องสัญญาณเดียวกันได้



รูปที่ 4.2 ช่วงเวลา Contention-free period และ Contention period

อุปกรณ์ส่วนใหญ่โดยทั่วไป ที่ใช้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายนั้น โดยมากแล้วจะเป็นแบบจำกัดกำลังงาน (Power Limitation) เพราะฉะนั้นฟังก์ชันในการควบคุมกำลังงานนั้นจะต้องถูกรวมอยู่ด้วย ในกระบวนการการเข้าถึงของระดับชั้น MAC เมื่อสถานีใดก็ตาม อยู่ในโหมดของการประหยัดพลังงาน (Power Saving Mode) สถานีนั้น ๆ จะไม่สามารถส่งหรือรับสัญญาณเฟรมข้อมูลใด ๆ ได้เลย แต่มันจะยังคงมีช่วงเวลา ที่สามารถทำงานได้อยู่ด้วยเช่นกัน นั่นคือ ช่วงเวลาที่สามารถส่งและรับสัญญาณเฟรมข้อมูลได้ ในมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนด

กระบวนการ ในการควบคุมกำลังงานของสถานีต่าง ๆ ไว้ ทั้งที่อยู่ในโครงข่ายแบบธรรมดา และในโครงข่ายแบบ Ad hoc ในกรณีที่เป็นโครงข่ายแบบธรรมดา สถานีต่าง ๆ จะอยู่ในโหมดประหยัดพลังงาน และในโหมดทำงานสลับกันไปเรื่อย ๆ โดยการตรวจจับสัญญาณเฟรม Beacon ที่ส่งมาจาก AP ถ้าสถานีตรวจจับสัญญาณของเฟรมควบคุมที่ส่งมาจาก AP และระบุว่าถึงคิวของตัวเองแล้ว ที่จะสามารถส่งข้อมูลได้ มันจะส่งเฟรมโพลแบบพิเศษ (Special Poll Frame) กลับไปที่ AP เพื่อบอก AP ว่ามันจะส่งข้อมูลหรือไม่ ในกรณีที่ไม่ใช่โครงข่ายแบบธรรมดา สถานีที่อยู่ในโหมดประหยัดพลังงาน ในเซลที่เป็นแบบ Ad hoc นั้น จะเปลี่ยนมาอยู่ในโหมดการทำงาน Wake up ภายในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ที่ได้มีการกำหนดค่าไว้ก่อนแล้ว เพื่อให้สามารถรับสัญญาณของเฟรมข้อมูล ที่ส่งมาหามันได้ ในกรณีที่สถานีเหล่านั้น ยังคงเหลือข้อมูลที่ยังต้องการรับอยู่

สิ่งสำคัญสุดท้าย ในมาตรฐานระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย คือ ระบบรักษาความปลอดภัย ที่สามารถรับประกันได้ ถึงความเป็นส่วนตัวของข้อมูลที่ถูกส่งไป นอกจากนั้น ยังต้องมีการตรวจสอบความมีตัวตนจริง ของสถานีหรือผู้ใช้นั้น ๆ ด้วย ในมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ระบุเป็นฟังก์ชันเพิ่มเติม ถึงวิธีการในการเข้ารหัสลับของข้อมูล ที่เรียกว่า WEP (Wired Equivalency Privacy Algorithm) อัลกอริทึม WEP นี้ มีพื้นฐานมาจากอัลกอริทึม RC4 PRNG ซึ่งถูกพัฒนาโดยองค์กร RSA Data Security Inc. มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดวิธีการในการตรวจสอบความเป็นตัวตนจริงอยู่ 2 วิธี แต่อย่างไรก็ตามขณะนี้ ได้มีการกำหนดวิธีการออกมาเพียงวิธีการเดียว คือ วิธีการ Share key ซึ่งมีหลักการอยู่ว่า ผู้ใช้แต่ละคนจะสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ จะต้องรู้รหัสลับของอีกฝ่ายหนึ่งด้วยเสมอ ซึ่งรหัสลับนั้นก็คือ Shared Key นั่นเอง

4.2 ระเบียบการเข้าถึงแบบ CSMA/CA

กระบวนการเข้าถึงพื้นฐานตามมาตรฐาน IEEE 802.11 จะใช้เป็นแบบ CSMA/CA ซึ่งเป็นระเบียบการเข้าถึงแบบสุ่ม ที่ใช้การตรวจจับการส่งสัญญาณ (Carrier Sense) และหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล (Collision Avoidance) โดยใช้กระบวนการ Random Backoff หลักการของการทำงานของระเบียบการเข้าถึงแบบสุ่มนี้แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยถ้าตัวกลางถูกตรวจจับได้ว่า ไม่มีการส่งสัญญาณเกิดขึ้น เป็นเวลาไม่น้อยกว่าช่วงเวลา DIFS แล้ว โหมดนั้น ๆ จะสามารถเริ่มการส่งสัญญาณข้อมลได้อีกครั้ง ซึ่งกระบวนการนี้จะสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี ในกรณีที่มีโหลดหรือมีการส่งข้อมูลน้อย ๆ แต่ในกรณีที่มีโหลดมาก ๆ หรือมีการส่งข้อมูลมาก ๆ แล้ว จะมีกระบวนการทำงานบางอย่างเพิ่มเข้าไปอีกด้วย

ถ้าตัวกลางถูกตรวจจับได้ว่า มีการส่งสัญญาณเกิดขึ้น หรือก็คือตัวกลางไม่ว่าง โหนดจะทำการรอคอย เป็นเวลาเท่ากับช่วงเวลา DIFS หลังจากนั้น โหนดนั้น ๆ จะทำการเลือกค่าของช่วงเวลา Backoff สุ่มออกมาค่าหนึ่ง ภายในช่วง Contention Windows ซึ่งโหมดนั้น ๆ จะทำการรอคอยการส่งสัญญาณข้อมูลอีกต่อไปอีก เป็นเวลาเท่ากับค่าที่สุ่มได้นี้ เมื่อครบตามเวลาที่ต้องรอ

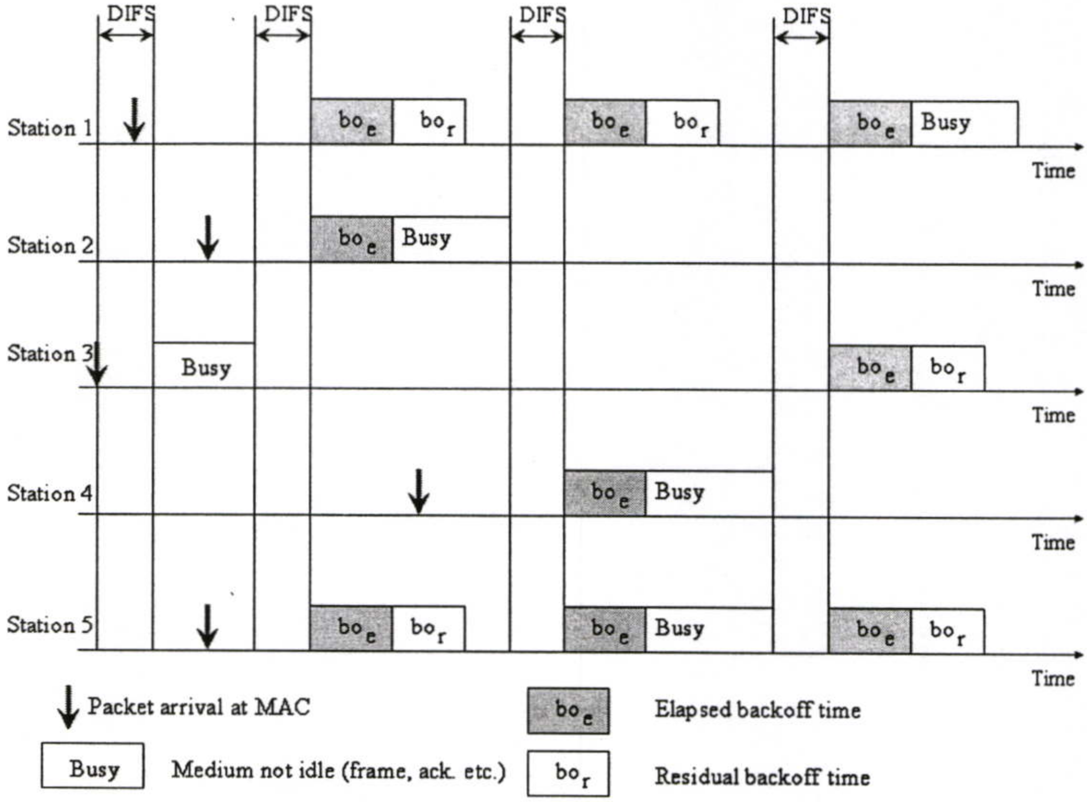
คอยแล้ว โหนดก็จะทำการตรวจจับตัวกลางอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งถ้าตรวจพบว่า ตัวกลางยังไม่ว่างอีก ก็จะทำกระบวนการเดิมต่อไปอีก แต่ถ้าเมื่อรอคอยครบตามเวลาที่สุ่มได้แล้ว พบว่าตัวกลางว่าง โหนดก็จะทำการส่งสัญญาณออกไปทันที ช่วงเวลาที่ต้องรอคอยนั้น จะวัดเป็นหน่วยของสล๊อต ในการแบ่งช่วงเวลาออกเป็นสล๊อต ๆ นั้น จะถูกพิจารณาจาก ค่าของการหน่วงเวลาที่เกิดจากการแพร่กระจายสัญญาณ ค่าของการหน่วงเวลาที่เกิดจากกระบวนการส่งสัญญาณ และพารามิเตอร์อื่น ๆ ในระดับชั้น Physical

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว จะพบว่ากระบวนการเข้าถึงแบบ CSMA/CA นั้นไม่ค่อยมีประสิทธิภาพเท่าไรหนัก เพราะว่า แต่ละโหนดจะมีโอกาสในการส่งข้อมูลเท่า ๆ กันในรอบถัดไป และไม่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่แต่ละโหนดจะต้องรอคอยก่อนหน้านั้น เพื่อให้ประสิทธิภาพดีขึ้น ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 จึงได้มีการเพิ่มส่วนที่เรียกว่า Backoff Timer เข้าไปอีก ซึ่งจะใช้ในกรณี ที่เมื่อแต่ละโหนดเลือกค่า Backoff แบบสุ่มภายใน Contention window แล้ว ถ้าสถานีใด ๆ ไม่มีการเข้าถึง ตัวกลางในรอบแรก มันจะทำการหยุดค่าของ Backoff timer แล้วรอคอยจนกว่าช่องสัญญาณจะว่างอีกครั้ง เป็นเวลาเท่ากับ DIFS แล้วจึงเริ่มทำการนับเวลา Backoff timer ใหม่อีกครั้ง ทันทีที่ Timer หยุดการนับ โหนดจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกไปทันที นั่นหมายความว่าสถานีที่ Backoff timer ยังไม่หยุดนับ จะไม่ทำการเลือกค่าของช่วงเวลา Random backoff แต่จะทำการรอคอยต่อไป ดังนั้นสถานีที่ต้องรอคอยเป็นเวลานาน ๆ จะมีโอกาสในการเข้าถึงตัวกลางมากขึ้น เพียงแค่รอคอยให้ครบ ตามค่าของ Backoff Timer จากรอบก่อนหน้านี้เท่านั้น

รูปที่ 4.3 จะอธิบายถึงกระบวนการเข้าถึงแบบสุ่มตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ที่เพิ่มกระบวนการ Backoff timer เข้าไปด้วย โดยจะมีสถานีอยู่ 5 สถานี พยายามที่จะส่งสัญญาณข้อมูล ณ ช่วงเวลาที่ลูกศรชี้ไว้ในรูป สถานที่ 3 ได้มีการร้องขอ เพื่อจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลก่อนเป็นอันดับแรก จึงทำการรอคอยเป็นเวลาเท่ากับ DIFS ซึ่งหลังจากรอคอยแล้ว พบว่าตัวกลางว่าง จึงได้ทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกมาทันที ในขณะที่สถานที่ 1 หรือ 2 หรือ 5 จะต้องรอจนกว่าตัวกลางจะว่าง และจะต้องรอคอยออกไปอีกเป็นเวลาไม่น้อยกว่า DIFS หลังจากที่สถานที่ 3 ส่งสัญญาณเสร็จ หลังจากนั้น ทั้ง 3 สถานีก็จะทำการเลือกค่าของช่วงเวลา Random backoff ภายในช่วง Contention window แล้วจึงเริ่มตั้งค่าของ Backoff timer ให้เท่ากับค่าที่สุ่มได้ แล้วจึงเริ่มนับถอยหลังไปเรื่อย ๆ

ในรูปที่ 4.3 แสดงค่าของ Random backoff ของสถานีที่ 1 คือผลรวมของ bo_e (ช่วงเวลา random backoff ที่ผ่านมาแล้ว และ bo_r (ช่วงเวลา random backoff ที่ยังเหลืออยู่) ซึ่งก็จะมีลักษณะเหมือนกันในกรณีที่เป็นของสถานีที่ 5 ในส่วนของที่สถานีที่ 2 จะเห็นว่าค่า Random backoff จะมีค่าเฉพาะ bo_e เท่านั้น ดังนั้นจากรูป หลังจากสถานีที่ 2 รอคอยเป็นเวลาเท่ากับ bo_e แล้ว จะพบว่าตัวกลางว่าง จึงได้ทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกไปทันที และจะไม่เหลือเวลาที่ต้องรอคอยอีกสำหรับสถานที่ 2 ขณะที่สถานีที่ 2 ทำการส่งสัญญาณข้อมูล Backoff timer ของสถานีที่ 1 และ 5 จะหยุดเดิน และแต่ละสถานีจะทำการเก็บค่าของ Random backoff ที่เหลือไว้ ขณะเดียวกัน ก็มีอีก

สถานีหนึ่ง ต้องการส่งข้อมูลเหมือนกัน คือ สถานีที่ 4 ซึ่งจะตรวจพบว่ามีสถานีกำลังส่งสัญญาณข้อมูลอยู่ จึงได้ทำการเลือกค่า Random backoff ภายใน contention window แล้วจึงนำค่าที่สุ่มได้ใช้ในการรอคอยต่อไป



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างกระบวนการทำงานของการเข้าถึงแบบพื้นฐานที่ใช้ CSMA/CA

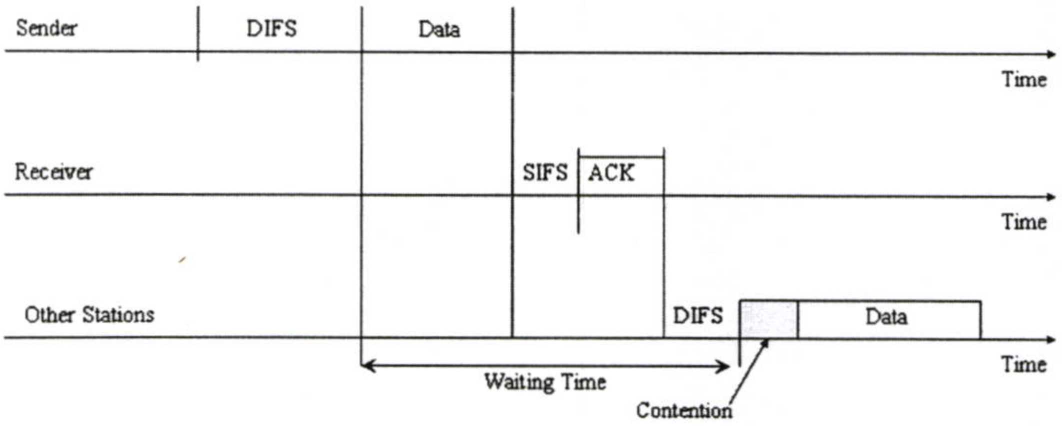
เมื่อสถานีที่ 2 ส่งสัญญาณข้อมูลเสร็จ สถานีที่ 1 หรือ 4 และ 5 ก็จะทำการรอคอยเป็นเวลาเท่ากับ DIFS หลังจากนั้น Backoff timer ของสถานีที่ 1 และสถานีที่ 5 ก็จะทำการนับถอยหลังต่อไปจากค่า Random backoff ที่เก็บไว้ ส่วนสถานีที่ 4 ก็จะทำการรอคอยต่อไป ตามค่า random backoff ที่เลือกได้ แต่จากรูป จะพบว่า ค่าของ bo_r ที่เหลือของสถานีที่ 5 และส่วนของค่า Random backoff ที่เลือกได้ของสถานีที่ 4 จะมีค่าเท่ากัน ทำให้สถานีทั้ง 2 ต้องรอคอยต่อไป จนครบกำหนดแล้ว จะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกมาพร้อมกัน ก่อให้เกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น ทำให้เฟรมที่ส่งไปถูกทำลาย หรือ สามารถรับได้แต่ไม่สมบูรณ์ หลังจากที่สถานีที่ 5 ส่งสัญญาณเสร็จ (เพราะว่าส่งสัญญาณนานกว่า Station 4) สถานีที่ 1 ก็จะรอคอยต่อไปเป็นเวลาเท่ากับ DIFS หลังจากนั้น ก็จะรอคอยต่อไปอีกเป็นเวลาเท่ากับค่าของ Backoff timer ที่เหลือ และสุดท้าย เมื่อครบตามเวลาที่ต้องรอคอยแล้ว พบว่าตัวกลางว่าง สถานีที่ 1 จึงทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกมาทันที ขณะที่สถานีที่ 4 และ 5 จะต้องรอคอยต่อไป เนื่องจากสถานีที่เกิดการชนกันของข้อมูล

จะต้องทำการสุ่มเวลา Backoff ใหม่อีกครั้ง เพื่อที่จะทำการส่งสัญญาณข้อมูลเดิมกลับไปอีกครั้งหนึ่ง

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการเพิ่ม backoff timer เข้าไปแล้ว กระบวนการเข้าถึงแบบนี้ก็ยังคงมีปัญหาเกิดขึ้นอยู่ ไม่ว่าจะมีโหลดมากหรือน้อยก็ตาม นั่นคือ ปัญหาที่เกิดจาก contention window มีขนาดไม่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น ค่าช่วงเวลาที่เลือกมาได้ภายใน contention window อาจจะมีค่าใกล้กันเกินไป เป็นสาเหตุทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลจำนวนมาก ๆ หรือ ค่าที่เลือกได้ อาจจะมีมากจนเกินไป เป็นสาเหตุทำให้เกิดการหน่วงของข้อมูลอย่างไม่จำเป็น ดังนั้นระบบจึงจะต้องคอยปรับขนาดของ contention window ให้มีความเหมาะสมกับจำนวนของสถานี ที่ต้องการส่งสัญญาณข้อมูลขณะนั้น ๆ

Contention window จะมีขนาดเริ่มต้นที่ค่า ๆ หนึ่ง เช่น CWmin = 7 แต่ละครั้งที่เกิดการชนกันของข้อมูล จะเป็นการระบุว่า ตัวกลางหรือช่องสัญญาณเริ่มมีโหลดมากขึ้นแล้ว ขนาดของ Contention window จะถูกปรับให้มีขนาดเพิ่มขึ้นทีละ 2 เท่าเรื่อย ๆ ไป ซึ่งจะมีขนาดใหญ่ที่สุดที่ 255 และเมื่อ Contention window มีขนาดใหญ่ที่สุด จะพบว่า ความน่าจะเป็นที่จะสุ่มเอาค่าที่ใกล้กัน หรือ เท่ากันนั้น เป็นไปได้น้อยมาก อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะที่โหลดน้อย ขนาดของ CW ควรมีขนาดเล็กที่สุด เพื่อให้แน่ใจว่า การเข้าถึงจะไม่ถูกหน่วงโดยไม่จำเป็น วิธีการดังที่กล่าวมานี้เรียกว่า Exponential backoff ซึ่งมีลักษณะเดียวกับที่ใช้ในมาตรฐาน IEEE 802.3 CSMA/CD ในระบบอินเตอร์เน็ต

ขณะที่กระบวนการเข้าถึงแบบนี้ จะสามารถใช้ได้ดี สำหรับการส่งที่เป็นแบบแพร่สัญญาณ ในมาตรฐาน IEEE 802.11 ยังได้มีรูปแบบการเข้าถึงนอกเหนือจากที่ได้กล่าวมาแล้วเพื่อใช้ในการส่งแบบ Unicast หรือ การส่งและการรับระหว่างสถานี 2 สถานี ดังรูปที่ 4.4 แสดงการเข้าถึงของตัวกลาง และการส่งสัญญาณข้อมูลของสถานีส่ง แต่ที่สถานีรับ จะตอบรับกลับมาด้วยสัญญาณ ACK (Acknowledgement) ที่สถานีรับ จะทำการเข้าถึงตัวกลางหรือช่องสัญญาณหลังจากที่สถานีส่งส่งสัญญาณเสร็จ และสถานีรับรอคอยเป็นเวลาเท่ากับช่วงเวลา SIFS ดังนั้นสถานีอื่น จะไม่สามารถเข้าถึงตัวกลางได้ในช่วงเวลานี้ ทำให้จะไม่เกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น สถานีอื่น ๆ จะต้องรอคอยเป็นเวลาเท่ากับ DIFS บวกกับช่วงเวลา Backoff ที่แต่ละสถานีเลือกได้ การส่งสัญญาณ ACK จากสถานีรับ Receiver กลับมายังสถานีส่ง Sender นั้นเพื่อเป็นการบอกว่าสัญญาณข้อมูลที่ส่งไปสามารถรับได้อย่างถูกต้อง โดยการที่สถานีรับจะตรวจสอบจาก CRC ที่ส่งมากับข้อมูล ซึ่งจะกระทำในระดับชั้น MAC แต่ถ้าไม่มีสัญญาณ ACK ส่งกลับมาที่สถานีส่ง สถานีส่งจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลเดิมกลับไปอีกครั้งหนึ่ง (Retransmit) โดยอัตโนมัติ แต่ก่อนที่จะทำการส่งอีกครั้ง สถานีส่งก็จะต้องทำกระบวนการเข้าถึงตามขั้นตอนเหมือนเดิม



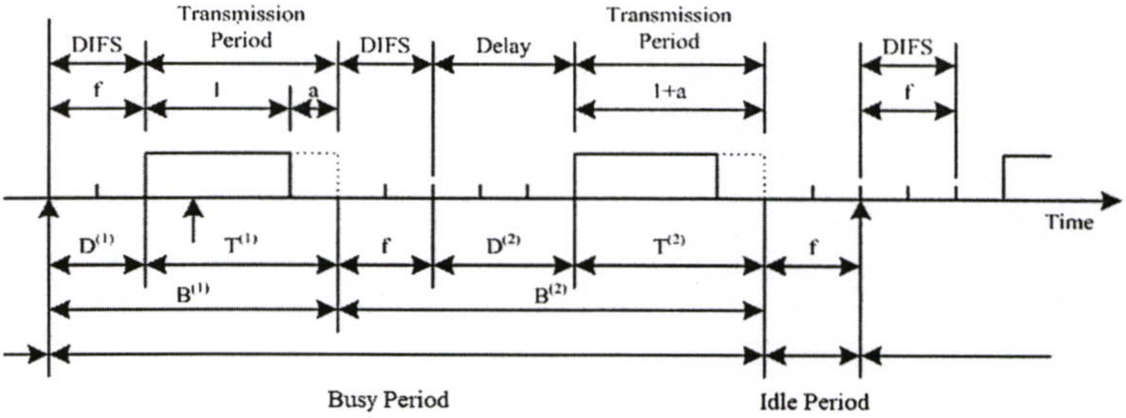
รูปที่ 4.4 การส่งสัญญาณข้อมูลในกรณีที่เป็นการส่งแบบ Unicast

4.3 แบบจำลองการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ตามมาตรฐาน IEEE 802.11

แบบจำลองของช่องสัญญาณในการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ในรูปที่ 4.5 ถ้าสมมติให้สถานีมีการเข้ามาใช้ช่องสัญญาณทั้งหมด 3 สถานีซึ่งเวลาที่แต่ละสถานีต้องการส่งข้อมูล ถ้าช่องสัญญาณว่างอยู่ เมื่อสถานีแรกต้องการส่งข้อมูล ก็จะทำการตรวจสัญญาณในช่องสัญญาณ (Sense) ว่างอยู่หรือไม่ ถ้าปรากฏว่าช่องสัญญาณว่าง และยังคงว่างต่อไปเป็นระยะเวลาเท่ากับ DIFS (Distributed Inter Frame Space) ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ f แล้วจึงทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกไป ซึ่งข้อมูลที่ส่งมีความยาวเท่ากับ 1 หลังจากส่งสัญญาณข้อมูลเสร็จสิ้นแล้ว สถานีทั้งหมดก็จะต้องรอเป็นระยะเวลาอีกเท่ากับ a เพื่อรอให้สัญญาณที่ส่งออกมาสามารถส่งถึงสถานีทั้งหมดได้ก่อน (Propagation Delay) ระหว่างที่สถานีแรกกำลังส่งสัญญาณข้อมูลอยู่นั้นปรากฏว่า มีอีกสถานีหนึ่งกำลังต้องการใช้ช่องสัญญาณ เพื่อส่งสัญญาณข้อมูล ในที่นี้สมมติให้เป็นสถานีที่สอง แต่เมื่อสถานีนี้ตรวจสัญญาณในช่องสัญญาณจะพบว่ามีการส่งสัญญาณอยู่ สถานีนี้จึงจะต้องทำการรอคอยจนกว่าการส่งสัญญาณที่ตรวจพบนั้นจะสิ้นสุด รวมถึงช่วงเวลารอคอยเท่ากับ a อีกด้วย หลังจากสิ้นสุดช่วงเวลา a แล้ว สถานีที่สองนี้ก็จะทำการรอคอยต่อไปอีกเป็นระยะเวลาเท่ากับ f (=DIFS) เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลานี้แล้ว สถานีนี้ก็จะทำการสุ่มเวลาออกมาค่าหนึ่ง โดยจะนำค่าที่ได้นี้มาทำการรอคอยต่อไปก่อนการส่ง ถ้าสิ้นสุดช่วงเวลาที่สุ่มได้แล้ว ช่องสัญญาณยังคงว่างอยู่ จึงทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกมา ซึ่งช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณข้อมูลทั้งหมดเท่ากับ 1+a (ความยาวของข้อมูล รวมกับ ช่วงเวลา propagation delay) เมื่อสิ้นสุดการส่งก็จะมีสถานีที่สามเข้ามาใช้ช่องสัญญาณ ซึ่งจะสามารถส่งได้ทันทีเนื่องจากช่องสัญญาณว่างเป็นระยะเวลาเท่ากับ f

โดยสรุปก็คือ สถานีที่ต้องการใช้ช่องสัญญาณในการส่งสัญญาณข้อมูลนั้น ก่อนทำการส่งจะต้องตรวจช่องสัญญาว่าว่างเป็นระยะเวลาเท่ากับ DIFS ก่อน ถ้ายังคงว่างอยู่ จึงสามารถส่งสัญญาณได้ หากการส่งครั้งแรกไม่ว่างก็จะทำการรอโดยใช้หลักการที่กล่าวมา เพียงแต่ว่าจะมีการสุ่มเวลามารอคอมเพิ่มเติมเข้าไปอีกก่อนที่จะทำการส่งได้ ซึ่งค่าเวลาที่สุ่มนี้จะมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ

ตามจำนวนครั้งที่พยายามใช้ช่องสัญญาณแต่พบว่าช่องสัญญาณยังคงไม่ว่าง โดยจะมีค่าจำกัดไว้ที่ค่า ค่าหนึ่งตามมาตรฐาน IEEE 802.11



รูปที่ 4.5 แบบจำลองของช่องสัญญาณในการเข้าถึงแบบ CSMA/CA

4.4 การวิเคราะห์ Throughput ของระบบวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA

เราจะสมมติว่าช่วงเวลาแบ่งออกไปเป็นสล๊อต ซึ่งแต่ละสล๊อตมีค่าเท่ากับ a หรือมีค่าเท่ากับ propagation delay นั่นเอง และในระบบมีผู้ใช้อยู่ M สถานี และแต่ละสถานีจะสร้างแพ็คเกจเข้ามาในระบบด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ g และแต่ละสถานีจะส่งสัญญาณออกไปด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ p ซึ่งค่านี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการหน่วงเวลา backoff delay ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 สภาวะของช่องสัญญาณที่สามารถเป็นไปมี 2 สภาวะ คือ ว่าง (Idle) และไม่ว่าง (Busy) ค่า throughput ที่จะทำการวิเคราะห์นี้เป็นไปตามสมการ [23]

$$S = \frac{\overline{U}}{\overline{B} + \overline{I}} \tag{4.1}$$

โดยที่ S คือ ค่า throughput

U คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูลและส่งได้สำเร็จ Useful transmission.

B คือ ช่วงเวลาที่ใช้ไปทั้งหมดในการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูล Busy period.

I คือ ช่วงเวลาที่ไม่ได้มีการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูล Idle Period

ก่อนอื่น เราจะต้องทำการหาเฉลี่ยของ U, B, และ I ให้ได้ก่อน จึงจะสามารถหาค่าเฉลี่ยของ throughput ได้ โดยจากรูปที่ 4.1 ช่วงเวลา B จะถูกแบ่งออกเป็น sub-busy period ซึ่งแต่ละ sub-busy period จะประกอบด้วย ช่วงเวลาที่รอคอยเนื่องจากการสุ่มค่าออกมาและช่วงเวลาในการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูล เราจะกำหนดตัวแปรที่ใช้แทนด้วยช่วงเวลาดังนี้

$B^{(k)}$ = Sub-busy period ที่ k ใด ๆ

$D^{(k)}$ = ช่วงเวลาที่ต้องรอคอยต่อไปเนื่องจากค่าที่สุ่มออกมาได้ของ Sub-busy period ที่ k ใด ๆ

$T^{(k)}$ =ช่วงเวลาในการสัญญาณแพ็คเกจข้อมูลของ Sub-busy period ที่kใด ๆ

ในช่วงเวลา $B^{(1)}$, $D^{(1)}$ ก็คือ ค่าของ DIFS นั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ $k \geq 2$, ค่าของ $B^{(k)}$ จะเป็นตัวแปรสุ่ม (Random Variable) และจะประกอบด้วย 3 ส่วนด้วยกัน คือ DIFS, $D^{(k)}$ และ $T^{(k)}$ ค่าของ DIFS จะสมมติให้มีค่า l สล๊อตซึ่งมีค่าเท่ากับ $f(=lxa)$ จากรูปที่ 4.1 จะพบว่า $T^{(k)}$ จะมีค่าคงที่เท่ากับ 1+a เสมอไม่ว่าการส่งนั้นจะเป็นการส่งที่สำเร็จหรือไม่ก็ตาม สมมติว่าถ้าให้ J เป็นตัวแปรสุ่มที่บอกถึงจำนวน Sub-busy period ทั้งหมดใน Busy period, B และเช่นเดียวกัน ช่วงเวลาที่มีการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูลสำเร็จก็มีจำนวนเท่ากับ J เช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการดังนี้

$$B = \sum_{k=1}^{J} B^{(k)} \tag{4.2}$$

$$U = \sum_{k=1}^{J} U^{(k)} \tag{4.3}$$

ต่อมาเราจะต้องทำการหาว่าจำนวนของ sub-busy period ในช่วงเวลา busy period มีค่าเท่าใดในระเบียบการเข้าถึงแบบ CSMA/CA นั้น ทุกสถานี หรือทุกผู้ใช้ สามารถที่จะส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูลได้ หลังจากตรวจแล้วว่า ช่องสัญญาณว่างเป็นระยะเวลามากกว่าหรือเท่ากับ DIFS ดังนั้นช่วงเวลา Busy period จะมีอยู่ต่อไปเรื่อย ๆ ตราบใดที่ยังคงมีแพ็คเกจข้อมูลจากสถานีใด ๆ ถูกสร้างขึ้นระหว่างช่วงเวลา $T^{(k)} + DIFS$ สุดท้ายของ busy period ซึ่งกำหนดให้ TP แทนผลรวมของ $T^{(k)} + DIFS$ สุดท้ายของ Busy period ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$TP = 1 + a + f \tag{4.4}$$

จาก g = ความน่าจะเป็นที่แต่ละสถานีจะสร้างแพ็คเกจขึ้นมาใน 1 สล๊อต

$1-g$ = ความน่าจะเป็นที่แต่ละสถานีจะไม่สร้างแพ็คเกจขึ้นใน 1 สล๊อต

$(1-g)^M$ = ความน่าจะเป็นที่สถานีทั้งหมด M สถานีจะไม่สร้างแพ็คเกจขึ้นมาใน 1 สล๊อต

$(1-g)^{(TP/a)M}$ = ความน่าจะเป็นที่สถานีทั้งหมด M สถานีจะไม่สร้างแพ็คเกจขึ้นมาใน (TP/a) สล๊อต

$1-(1-g)^{(TP/a)M}$ = ความน่าจะเป็นที่จะมีอย่างน้อยหนึ่งสถานีที่จะสร้างแพ็คเกจขึ้นมาใน (TP/a) สล๊อต

เพราะฉะนั้น จะเห็นได้ว่าความน่าจะเป็นที่ J = j สามารถแสดงได้ดังนี้ สมมติว่าในช่วง TP ที่ผ่านไป j-1 ช่วงมีการสร้างแพ็คเกจมาเรื่อย ๆ จนกระทั่งในช่วง TP ที่ j ไม่มีการสร้างแพ็คเกจมาเลย แสดงว่าเมื่อหมดช่วง TP ที่ j นี้แล้ว จะเป็นการสิ้นสุดของ Busy Period ด้วย ซึ่งจะได้สมการ

$$\Pr[J=j]=[1-(1-g)^{(TP/a)M}]^{j-1}(1-g)^{(TP/a)M} \tag{4.5}$$

จากสมการดังกล่าว จะเห็นได้ว่า J มีการแจกแจงแบบเรขาคณิต (Geometric Distribution) ซึ่งค่าเฉลี่ยของ J สามารถหาได้ดังสมการ [24]

$$\overline{J}=\frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}} \tag{4.6}$$

เมื่อพิจารณาว่า $B^{(1)}$ จะเกิดขึ้นเมื่อมีการสร้างแพ็คเกจขึ้นมาในระหว่างสล๊อตสุดท้ายก่อนที่จะมีการเริ่ม Busy period ขณะที่ในกรณีที่ $B^{(k)}$ อื่น ๆ เมื่อ $k \geq 2$ จะเกิดขึ้นเมื่อมีการสร้างแพ็คเกจขึ้นมาในช่วง TP สุดท้าย เพราะฉะนั้นจะได้ว่า ค่าเฉลี่ยของ Busy period สามารถหาได้ดังนี้

$$\overline{B}=E\{B\}=E\left\{\sum_{k=1}^{J}B^{(k)}\right\}=E\left\{B^{(1)}\right\}+E\left\{\sum_{k=2}^{J}B^{(k)}\right\} \tag{4.7}$$

หลังจากนั้น เราจะทำการกระจายส่วนที่ 2 ของสมการ (4.7) เพราะฉะนั้นเมื่อกำหนดให้ J = j ใด ๆ ซึ่งจะได้ว่า

$$E\left\{\sum_{k=2}^{J}B^{(k)}\middle|J=j\right\}=\sum_{k=2}^{J}E\left\{B^{(k)}\middle|J=j\right\} \tag{4.8}$$

เพราะว่า ช่วง เมื่อ จะอิสระจากกันแบบ i.i.d. (Independent Identical Distributions) และจะอิสระจาก J จะได้ว่า

$$E\left\{\sum_{k=2}^{J} B^{(k)} \middle| J=j\right\}=(j-1)E\left\{B^{(2)}\right\} \tag{4.9}$$

หรือ

$$E\left\{E\left\{\sum_{k=2}^{J} B^{(k)} \middle| J=j\right\}\right\}=E\left\{\sum_{k=2}^{J} B^{(k)}\right\} \tag{4.10}$$

เพราะฉะนั้นจากสมการ (4.9) จะได้ว่า

$$E\left\{\sum_{k=2}^{J} B^{(k)}\right\}=E\left\{(J-1)E\left\{B^{(2)}\right\}\right\} \tag{4.11}$$

แต่เพราะว่า $E\left\{B^{(k)}\right\}$ เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} E\left\{\sum_{k=2}^{J} B^{(k)}\right\} &= (E\{J\}-1)E\left\{B^{(2)}\right\} \\ &= (\overline{J}-1)E\left\{B^{(2)}\right\} \end{aligned} \tag{4.12}$$

และ จากสมการที่ (4.7) จะสามารถหาค่าเฉลี่ยของ Busy period ได้ คือ

$$\overline{B}=E\left\{B^{(1)}\right\}+(\overline{J}-1)E\left\{B^{(2)}\right\} \tag{4.13}$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าเฉลี่ยของการส่งที่สำเร็จ (Useful Transmission) ก็จะมีลักษณะเดียวกัน คือ

$$\overline{U}=E\left\{U^{(1)}\right\}+(\overline{J}-1)E\left\{U^{(2)}\right\} \tag{4.14}$$

ต่อไปเมื่อเราพิจารณาในช่วงที่ไม่ได้มีการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูล (Idle Period) จะเห็นว่าช่วงเวลานี้ ก็มีลักษณะการเกิดเช่นเดียวกับ Sub busy period ก็คือ ช่วงเวลาที่ไม่ได้มีการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูลจะคงดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะมีการสร้างแพ็คเกจขึ้นมาที่สล๊อตสุดท้ายของช่วงเวลานี้ เพราะฉะนั้นถ้าเราสมมติว่าเวลาในช่วงนี้ผ่านไป k-1 สล๊อต ก่อนที่จะมีการสร้างแพ็คเกจขึ้นมาที่สล๊อตที่ k จะได้ความน่าจะเป็นที่ช่วงเวลานี้จะมีค่าเท่ากับ k สล๊อตจะเป็นไปตามสมการด้านล่างนี้

$$\Pr(I = ka) = (1-g)^{(k-1)M}[1-(1-g)^M] \quad ,k = 1,2,... \tag{4.15}$$

จากสมการข้างบนจะพบว่า ตัวแปรสุ่ม I มีการแจกแจงแบบเรขาคณิต (Geometric Distributions) เพราะฉะนั้นจะได้ว่า ค่าเฉลี่ยของ I จะมีค่าเป็นไปตาม [24]

$$\bar{I} = \frac{a}{[1-(1-g)^M]} \tag{4.16}$$

โดยค่า a คือ ความน่าจะเป็นที่เกิด I เท่ากับ k สล๊อตคูณกับช่วงเวลาของแต่ละสล๊อต

ในส่วนต่อไปเราจะทำการหาค่าเฉลี่ยของ $D^{(k)}$ และ $U^{(k)}$, $E\{D^{(k)}\}$ และ $E\{U^{(k)}\}$ โดยสมมติให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะมี n แพ็คเกจจากสถานี M สถานีถูกสร้างเข้ามาระหว่าง X สล๊อต แทนด้วย $P_n(X)$ ซึ่งเป็นไปตามสมการด้านล่างนี้

$$P_n(X) = \frac{\binom{M}{n}[1-(1-g)^{(X/a)}]^n(1-g)^{(X/a)(M-n)}}{1-(1-g)^{(X/a)M}} \quad ,n = 1,2,...,M \tag{4.17}$$

ดังนั้นถ้าเรากำหนดให้ $N_0^{(j)}$ แทนจำนวนแพ็คเกจที่ถูกสร้างขึ้นและสะสมอยู่ ณ ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเวลา TP ที่ j ใด ๆ เพราะฉะนั้นความน่าจะเป็นที่ $N_0^{(j)}$ จะมีค่าเท่ากับ n สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Pr(N_0^{(j)} = n) = P_n(TP) \quad ,j = 2,3,... \tag{4.18}$$

ต่อมาเราจะทำการหาสมการการแจกแจงของ $D^{(j)}$ เมื่อกำหนด $N_0^{(j)}$ มาให้ ณ ที่ $j = 2,3,...$ เราจะสมมติว่าค่า k, k=0,1,2,... แทนจำนวนขอบเขตของสล๊อตของ $D^{(j)}$ ว่าจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ k สล๊อต ซึ่งเหตุการณ์นี้จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ มีสถานีจำนวน n สถานีที่มีการสร้างแพ็คเกจขึ้นมาเรียบร้อยแล้วแต่ยังไม่มีการส่ง และสถานีอีก M-n สถานีจะยังไม่มีการสร้างแพ็คเกจขึ้นมาในระหว่าง k สล๊อตนี้ เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\Pr(D^{(j)} \geq ka \mid N_0^{(j)} = n) = (1-p)^{kn}(1-g)^{k(M-n)} \tag{4.19}$$

นำเงื่อนไข $N_0^{(j)}$ ออกโดยใช้สมการที่ (4.17) และสมการที่ (4.18) จะได้ดังนี้

$$\Pr(D_0^{(j)} \geq ka)$$

$$= \frac{1}{1-(1-g)^{(TP/a)M}} \sum_{n=1}^{M} \left\{ \binom{M}{n} [1-(1-g)^{(TP/a)}]^n (1-g)^{(TP/a)(M-n)} (1-p)^{kn} (1-g)^{k(M-n)} \right\}$$

(4.20)

เมื่อกระจายพจน์ออกมาแล้วทำการบวกเข้าและลบออกด้วย $(1-g)^{(TP/a)M}(1-g)^{kM}$ หลังจากนั้นทำการจัดรูปใหม่จะได้เป็นสมการ

$$\Pr(D_0^{(j)} \geq ka)$$

$$= \frac{1}{1-(1-g)^{(TP/a)M}} \left(\left\{ (1-p)^k - (1-g)^{(Tp/a)}[(1-p)^k - (1-g)^k] \right\} - (1-g)^{(TP/a)M} (1-g)^{kM} \right)$$

(4.21)

เพราะฉะนั้นเราสามารถหา $E[D^{(j)}]$ ได้ดังสมการ

$$\overline{D} = E[D^{(j)}]$$

$$= \begin{cases} f[1-(1-g)^M & ,j=1 \\ \dfrac{a}{1-(1-g)^{(TP/a)M}} \left(\sum_{k=1}^{\infty} \left\{ (1-p)^k - (1-g)^{(TP/a)}[(1-p)^k - (1-g)^k] \right\}^M - (1-g)^{(TP/a)M} . \sum_{k=1}^{\infty} (1-g)^{kM} \right) & ,j=2,3,\ldots \end{cases}$$

(4.22)

จากสมการที่ (4.13), (4.16) และ (4.22) เราจะสามารถหาผลรวมระหว่างค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่ใช้ไปทั้งหมดในการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูลกับช่วงเวลาที่ไม่ได้ส่งแพ็คเกจข้อมูลได้เป็นไปตามสมการ

$$\overline{B} + \overline{I} = E\left\{D^{(1)}\right\} + 1 + a + \left[\left(\frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}} - 1 \right) \left(E\{D^{(2)}\} + 1 + a + f \right) \right] + \overline{I}$$

$$= f\left[1-(1-g)^M\right] + 1 + a + \left[\left(\frac{1-(1-g)^{(TP/a)M}}{(1-g)^{(TP/a)M}} \right) \left(E\{D^{(2)}\} + 1 + a + f \right) \right] + \overline{I}$$

$$= f\left[1-(1-g)^{M}\right]+1+a+\left\{\left[\left(\frac{1-(1-g)^{(TP/a)M}}{(1-g)^{(TP/a)M}}\right)(1+a+f)\right]+\right.$$

$$\left[\frac{1-(1-g)^{(TP/a)M}}{(1-g)^{(TP/a)M}}\right].\left[\frac{a}{1-(1-g)^{(TP/a)M}}\left(\sum_{k=1}^{\infty}\{(1-p)^{k}-(1-g)^{(TP/a)}[(1-p)^{k}-(1-g)^{k}]\}^{M}-\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.(1-g)^{(TP/a)M}.\sum_{k=1}^{\infty}(1-g)^{kM}\right)\right]\right\}+\frac{a}{[1-(1-g)^{M}]}$$

$$\overline{B}+\overline{I}=f\left[1-(1-g)^{M}\right]+1+a+\frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}}\{[1-(1-g)^{(TP/a)M}](1+a+f)+$$

$$[a.(\sum_{k=1}^{\infty}\{(1-p)^{k}-(1-g)^{(TP/a)}[(1-p)^{k}-(1-g)^{k}]\}^{M}-(1-g)^{(TP/a)M} \tag{4.23}$$

$$.\sum_{k=1}^{\infty}(1-g)^{kM})]\Big\}+\frac{a}{[1-(1-g)^{M}]}$$

ต่อไปเราจะทำการวิเคราะห์ หาค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณแพ็คเกจข้อมูล และส่งได้สำเร็จ สมมติว่าเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลา $B^{(j-1)}$ มีผู้ใช้สะสมอยู่ $N_0^{(j-1)}$ เท่ากับ n แสดงว่ายังมีผู้ใช้อีก M-n ที่ยังไม่มีการสร้างแพ็คเกจข้อมูลขึ้นมา ในช่วงเวลา $B^{(j)}$ มีการหน่วงเวลาไปมากกว่าหรือเท่ากับ $ka\ (D^{(j)} \geq ka)$ พิจารณาว่าเมื่อมีการส่งแพ็คเกจข้อมูลขึ้นในช่วงเวลา $B^{(j)}$ นี้ การส่งที่สามารถจะเป็นการส่งที่สำเร็จได้มี 3 กรณีดังต่อไปนี้ (ไม่คิดผลของ Capture Effect)

1 เมื่อ k = 0 แสดงว่าจะมีเฉพาะผู้ใช้ในจำนวน n ผู้ใช้เท่านั้นที่จะสามารถส่งแพ็คเกจข้อมูลได้ เพราะฉะนั้นจะเป็นการส่งที่สำเร็จได้ก็ต่อเมื่อในจำนวน n ผู้ใช้จะต้องมีเพียงผู้ใช้เดียวเท่านั้นที่มีการส่งแพ็คเกจเกิดขึ้น

2. เมื่อ k > 0 จะสามารถแย่งได้เป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 เมื่อหนึ่งในผู้ใช้จำนวน n ผู้ใช้เกิดการส่งข้อมูลขึ้น เพราะฉะนั้นจะเป็นการส่งที่สำเร็จก็ต่อเมื่อผู้ใช้คนอื่น ๆ จำนวน n-1 ผู้ใช้ที่สะสมอยู่ ยังไม่ได้ส่งข้อมูลและผู้ใช้ที่เหลืออีกจำนวน M-n ผู้ใช้ก็จะต้องไม่มีการสร้างแพ็คเกจข้อมูลใหม่ขึ้นมาด้วย

กรณีที่ 2 เมื่อหนึ่งในผู้ใช้ M-n ผู้ใช้ได้มีการส่งแพ็คเกจข้อมูลขึ้น เพราะฉะนั้นเพื่อให้การส่งนั้นเป็นการส่งที่สำเร็จแน่นอนก็ต่อเมื่อ ผู้ใช้คนอื่น ๆ จำนวน M-n-1 ผู้ใช้ ซึ่งทั้งที่เป็นผู้ใช้ที่ยังไม่ได้สร้างแพ็คเกจขึ้นมาใหม่และเป็นผู้ใช้ที่มีแพ็คเกจสะสมอยู่ จะต้องยังไม่มีการส่งแพ็คเกจข้อมูลออกมา

จากกรณีทั้ง 3 ที่ได้อธิบายไป จะสามารถเขียนเป็นสมการความน่าจะเป็นได้ดังนี้

$$E\{U^{(j)} \big| D^{(j)} \geq ka, N_0^{(j)} = n\} = \begin{cases} \binom{n}{1} p(1-p)^{n-1} & ,k=0 \\ \binom{n}{1} p(1-p)^{n-1}(1-g)^{M-n} + (1-p)^n \binom{M-n}{1} g(1-g)^{M-n-1} & ,k>0 \end{cases}$$

(4.24)

กระจายพจน์ออกมาจะได้ดังสมการ

$$E\{U^{(j)} \big| D^{(j)} \geq ka, N_0^{(j)} = n\} = \begin{cases} np(1-p)^{n-1} & ,k=0 \\ np(1-p)^{n-1}(1-g)^{M-n} + (1-p)^n (M-n) g(1-g)^{M-n-1} & ,k>0 \end{cases}$$

(4.25)

ในกรณีที่ k = 0 ไม่จะเป็นที่จะต้องเอาเงื่อนไข จำเป็นที่จะต้องเอาเงื่อนไข ออกในกรณีที่ k > 0 เท่านั้น โดยใช้สมการที่ (4.16) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ดังสมการ

$$E\{U^{(j)} \big| N_0^{(j)} = n\} = \sum_{k=1}^{\infty} [(np(1-p)^{n-1}(1-g)^{M-n} + (1-p)^n (M-n)^g (1-g)^{M-n-1})(1-p)^{kn}(1-g)^{k(M-n)}]$$

(4.26)

จัดรูปสมการที่ (4.26) ใหม่ โดยใช้ผลรวมแบบอนันต์ของอนุกรมเรขาคณิต (Infinite Geometric Sum Formula) จะได้ว่า

$$E\{U^{(j)} \big| N_0^{(j)} = n\}$$
$$= (np(1-p)^{n-1}(1-g)^{M-n} + (1-p)^n (M-n) g(1-g)^{M-n-1}).\frac{(1-p)^n (1-g)^{M-n}}{1-(1-p)^n (1-g)^{M-n}}$$

(4.27)

จากสมการที่ (4.25) และ (4.27) มาทำการเอาเงื่อนไข $N_0^{(j)}$ ออกโดยใช้สมการ (4.17) และ (4.18) เพราะฉะนั้นจะได้สมการ

$$E\{U^{(j)}\}$$
$$= \sum_{n=1}^{M} \{[n(1-p)^{n-1} + (np(1-p)^{n-1}(1-g)^{M-n} + (1-p)^n (M-n) g(1-g)^{M-n-1}) \qquad (4.28)$$
$$.\frac{(1-p)^n (1-g)^{M-n}}{1-(1-p)^n (1-g)^{M-n}}\Bigg].\frac{\binom{M}{n}[1-(1-g)^{(TP/a)n}]^n (1-g)^{(TP/a)(M-n)}}{1-(1-g)^{(TP/a)M}}\Bigg\}$$

ในกรณีที่เป็น $U^{(1)}$ การส่งนั้นจะเป็นการส่งที่สำเร็จได้ก็ต่อเมื่อ ในสล๊อตสุดท้ายของช่วงเวลาที่ไม่ได้มีการส่งแพ็คเกจข้อมูล (Idle Period) จะต้องมีเพียงผู้ใช้เดียวเท่านั้นที่จะสร้างแพ็คเกจข้อมูลออกมาเพื่อส่ง จากสมการที่ (4.17) ความน่าจะเป็นที่จะผลิตเหตุการณ์นี้ขึ้น สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} P_1(1) &= \Pr\{\text{one user arrive during last slot of previous idle period}\} \\ &= \frac{\binom{M}{1}[1-(1-g)^1]^1(1-g)^{(M-1)}}{1-(1-g)^M} \\ &= \frac{M[1-(1-g)](1-g)^{(M-1)}}{1-(1-g)^M} \end{aligned} \tag{4.29}$$

เพราะฉะนั้น เราจะได้ว่าค่าเฉลี่ยของ $U^{(j)}$ เมื่อ $j=1,2,...$ จะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\overline{U} = \frac{M[1-(1-g)](1-g)^{M-1}}{1-(1-g)^M} + \left(\frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}}-1\right).\sum_{n=1}^{M}\Big\{[np(1-p)^{n-1} + (np(1-p)^{n-1}(1-g)^{M-n} + (1-p)^n(M-n)g(1-g)^{M-n-1}).\frac{(1-p)^n(1-g)^{M-n}}{1-(1-p)^n(1-g)^{M-n}}\Big] . \frac{\binom{M}{n}[1-(1-g)^{(TP/a)}]^n(1-g)^{(TP/a)(M-n)}}{1-(1-g)^{(TP/a)M}}\Big\}$$

$$\overline{U} = \frac{M[1-(1-g)](1-g)^{M-1}}{1-(1-g)^M} + \left(\frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}}\right).\sum_{n=1}^{M}\Big\{[np(1-p)^{n-1} + (np(1-p)^{n-1}(1-g)^{M-n} + (1-p)^n(M-n)g(1-g)^{M-n-1}).\frac{(1-p)^n(1-g)^{M-n}}{1-(1-p)^n(1-g)^{M-n}}\Big] . \binom{M}{n}[1-(1-g)^{(TP/a)}]^n(1-g)^{(TP/a)(M-n)}\Big\} \tag{4.30}$$

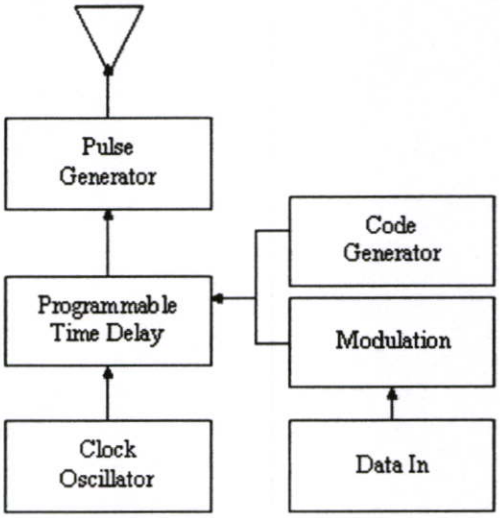
เมื่อนำสมการที่ (4.23) และสมการที่ (4.30) แทนลงในสมการที่ (4.1) เราก็จะสามารถหาค่า Throughput ของระบบการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ได้

บทที่ 5
ผลการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์

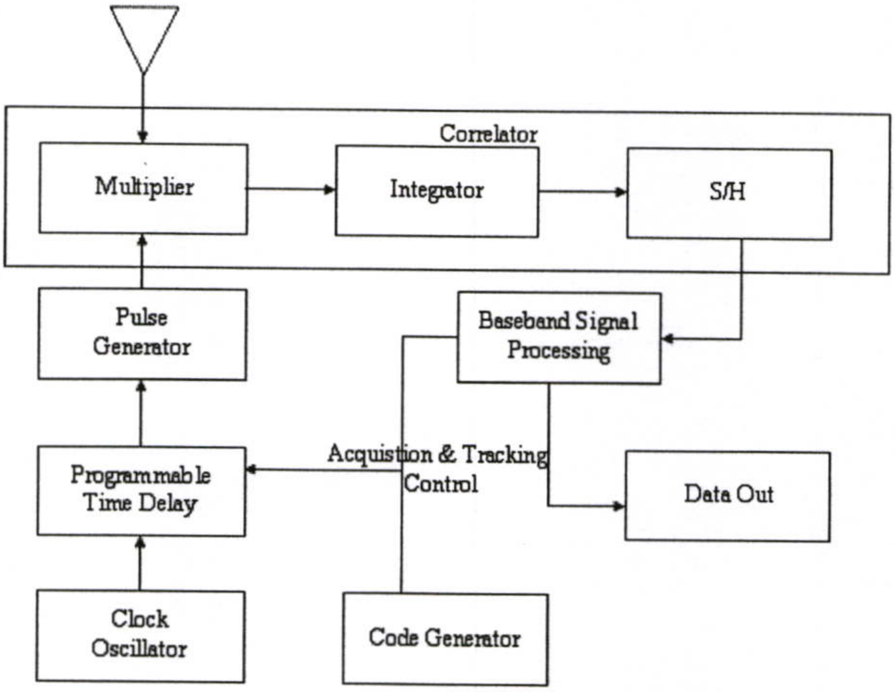
ในบทนี้จะนำเสนอรูปของสัญญาณ Ultra wideband พื้นฐานในการส่ง และสัญญาณที่ตอนรับที่ได้จากสมการที่ (2.2) และ (2.4) พร้อมทั้ง ทำการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ ของสมการความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาด (Probability of bit error) ของสัญญาณเทคโนโลยี Ultra wideband หลังจากนั้น จะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดบนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบนาคากามิ (Nakagami fading) บนระบบ Ultra wideband และในส่วนต่อมาเราจะทำการวิเคราะห์ค่า Throughput ของค่าความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขระหว่างการสื่อสารบนเทคโนโลยี Ultra wideband และโปรโตคอล CSMA/CA

5.1 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นผิดพลาดของสัญญาณ Ultra Wideband

ในส่วนนี้เราจะทำการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นผิดพลาดของเทคโนโลยี Ultra Wideband บนพื้นฐานการมอดูเลตแบบ PPM โดยถ้าระบบการสื่อสารสัญญาณ Ultra Wideband มีส่วนในการส่งสัญญาณ และรับสัญญาณ [25] ดังรูปที่ 5.1

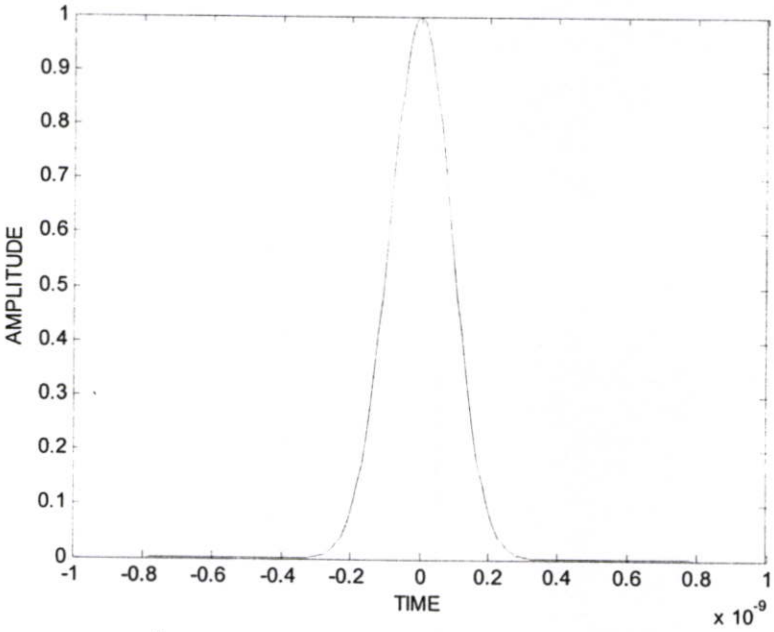


รูปที่ 5.1 (ก) Ultra Wideband Transmission



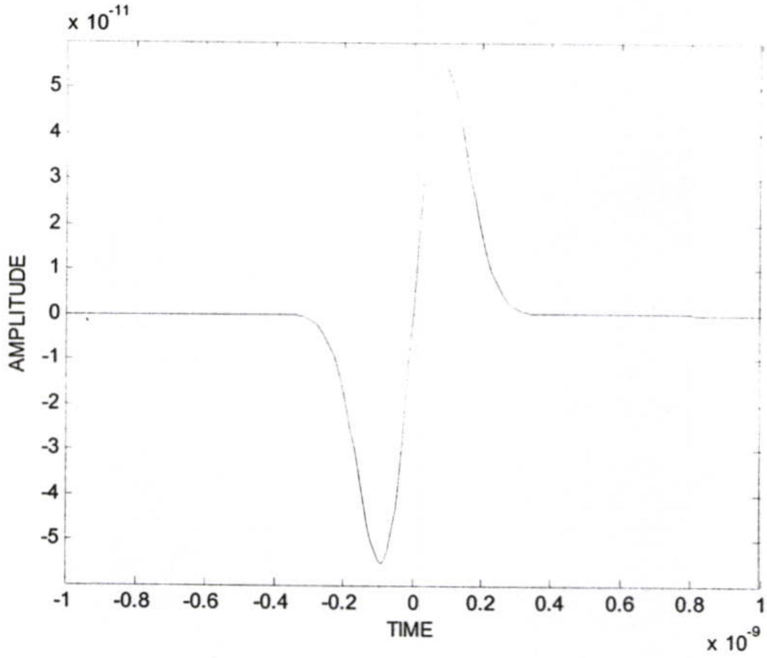
รูปที่ 5.1 (ข) Ultra Wideband Receiver

และรูปแบบสัญญาณ Ultra wideband ทางด้านส่ง (2.3) เป็นดังรูป 5.2



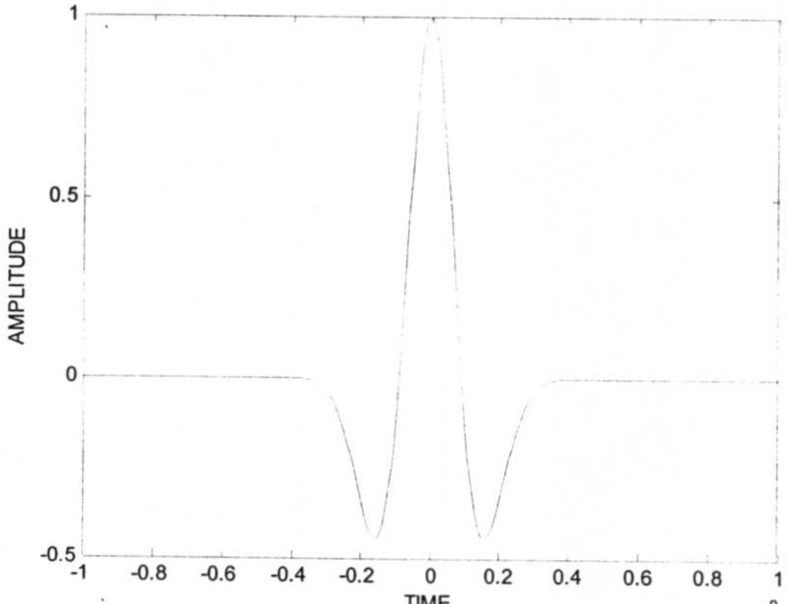
รูปที่ 5.2 สัญญาณพัลส์ที่ส่งออก (Transmitted Pulse)

และรูปแบบสัญญาณ Ultra wideband (PPM) ในช่องสัญญาณ (2.4) เป็นดังรูป 5.3



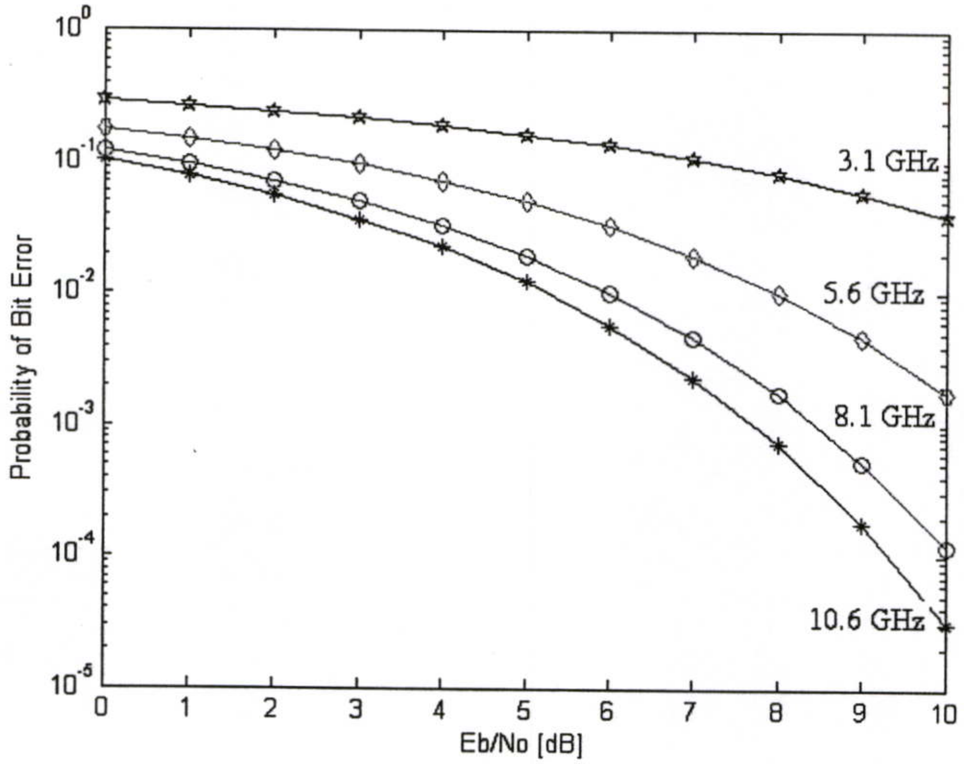
รูปที่ 5.3 รูปแบบสัญญาณในช่องสัญญาณ

และรูปแบบสัญญาณ Ultra wideband (PPM) ทางด้านรับ (2.5) เป็นดังรูป 5.4



รูปที่ 5.4 สัญญาณทางด้านรับ (Received Signal)

ดังนั้นความน่าจะเป็นผิดพลาดเฉลี่ยของระบบการสื่อสารเทคโนโลยี Ultra Wideband จะเป็นดังรูปที่ 5.4

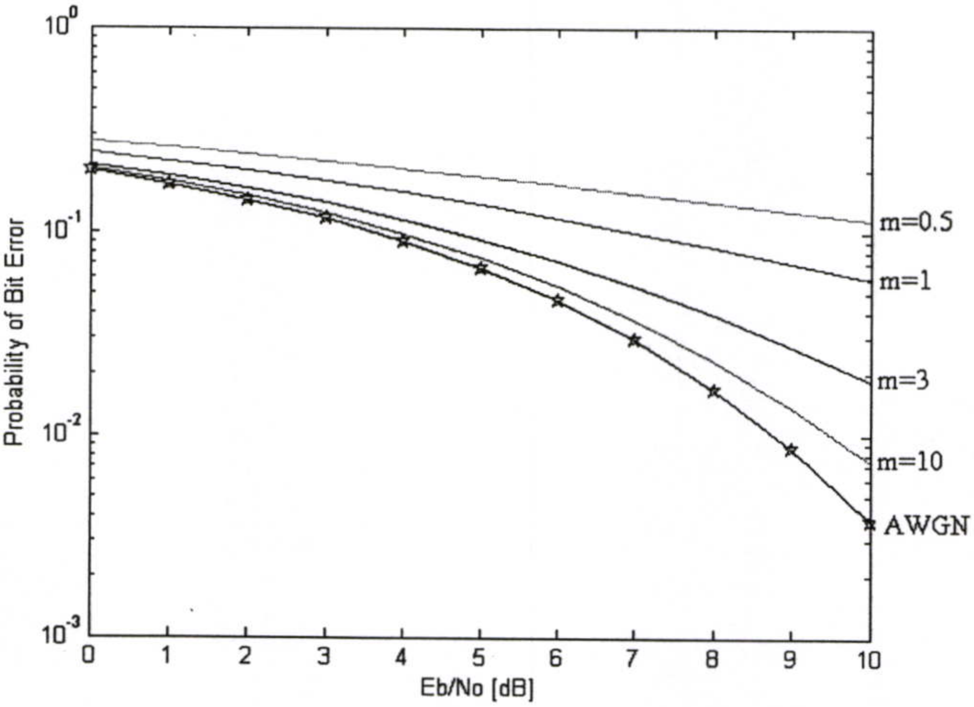


รูปที่ 5.5 ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดเฉลี่ยของสัญญาณ Ultra Wideband

โดยจากรูปที่ 5.5 จะเป็นกราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดต่อระดับสัญญาณส่งต่อคลื่นรบกวน ณ ความถี่ที่ใช้ในการส่งระดับต่าง ๆ ซึ่งสัญญาณ Ultra Wideband ความถี่ที่ต่ำสุดที่ใช้ในการส่งจะเริ่มต้นที่ 3.1 GHz จนถึงระดับความถี่ที่ใช้ในช่องสัญญาณ 10.6 GHz ซึ่งในรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่า ความถี่ของสัญญาณที่สูง จะมีค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดต่ำกว่า สัญญาณที่มีความถี่น้อยลงมา

5.2 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดบนการจางหายแบบนาคากามิ

หลังจากการหาค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดเฉลี่ยของสัญญาณ Ultra Wide band ที่ไม่มีการจางหาย ในหัวข้อที่แล้ว ในหัวข้อนี้เราจะทำการหาความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดของสัญญาณบนการจางหายแบบนาคากามิ (3.3) และ (3.6)



รูปที่ 5.6 ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดเฉลี่ยบนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบนาคากามิ

จากรูปที่ 5.6 กราฟที่ได้จะแปรเปลี่ยนตามค่าพารามิเตอร์การจางหาย โดยกราฟเส้น AWGN จะเป็นกราฟที่ไม่ได้ผ่านการจางหายใด ๆ ทั้งสิ้น (เทียบเท่ารูปที่ 5.4) กราฟเส้นพารามิเตอร์การจางหายนาคากามิมีค่าเท่ากับ 0.5 จะมีการเทียบเท่าการจางหายแบบ เกาส์เซียนข้างเดียว หรือ กราฟเส้นเส้นพารามิเตอร์การจางหายนาคากามิมีค่าเท่ากับ 1 จะมีค่าเทียบเท่ากับการจางหายแบบเรย์ลี ดังนั้น จากกราฟจะเห็นได้ว่าถ้าค่าพารามิเตอร์ยิ่งมีค่ามาก ระบบก็จะค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดที่ลดลง

5.3 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการสื่อสาร UWB OFDM

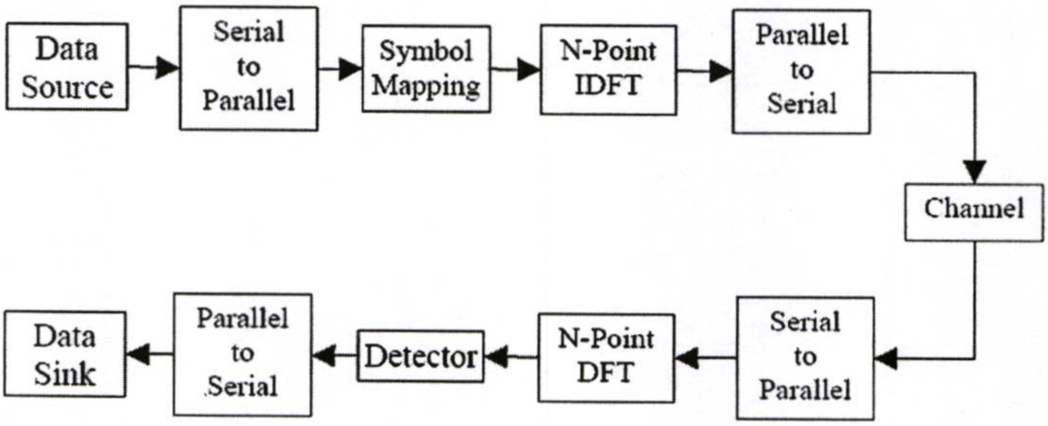
ในระบบการสื่อสารแบบ UWB OFDM ลำดับแรกข้อมูลในแต่ละบิตจะถูกเปลี่ยนจาก Serial เป็น Parallel หลังจากนั้นข้อมูลที่ถูกแปลงนั้นจะทำการแปลงเป็นสัญลักษณ์ (Mapped to Symbols)

ดังนั้นในการหาค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาด เราจะต้องหาความน่าจะเป็นของสัญลักษณ์ผิดพลาดก่อน ซึ่งมีค่าเท่ากับ

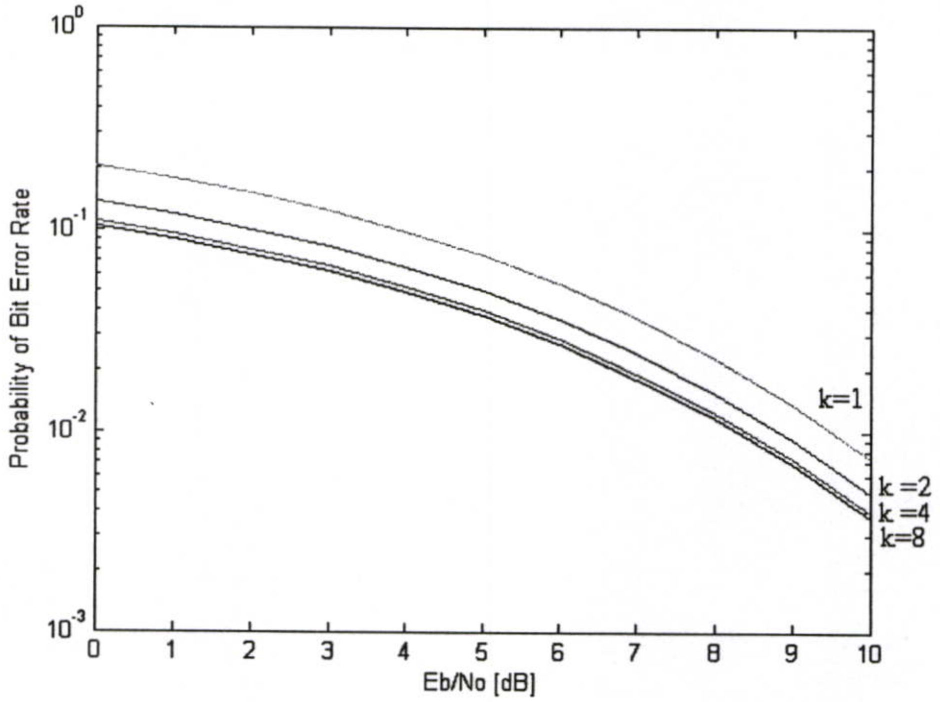
$$SER = \int_{0}^{\infty} P(E|\gamma).p_{\gamma}(\gamma)d\gamma \tag{5.1}$$

และถ้าในหนึ่งสัญลักษณ์สามารถแทนข้อมูลจำนวน k บิต ดังนั้นในการหาค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดของผิดในระบบ UWB OFDM สามารถหาได้จาก

$$BER = \frac{2^{k-1}}{2^{k}-1} SER \tag{5.2}$$



รูปที่ 5.7 รูปแบบการสื่อสารของ UWB OFDM

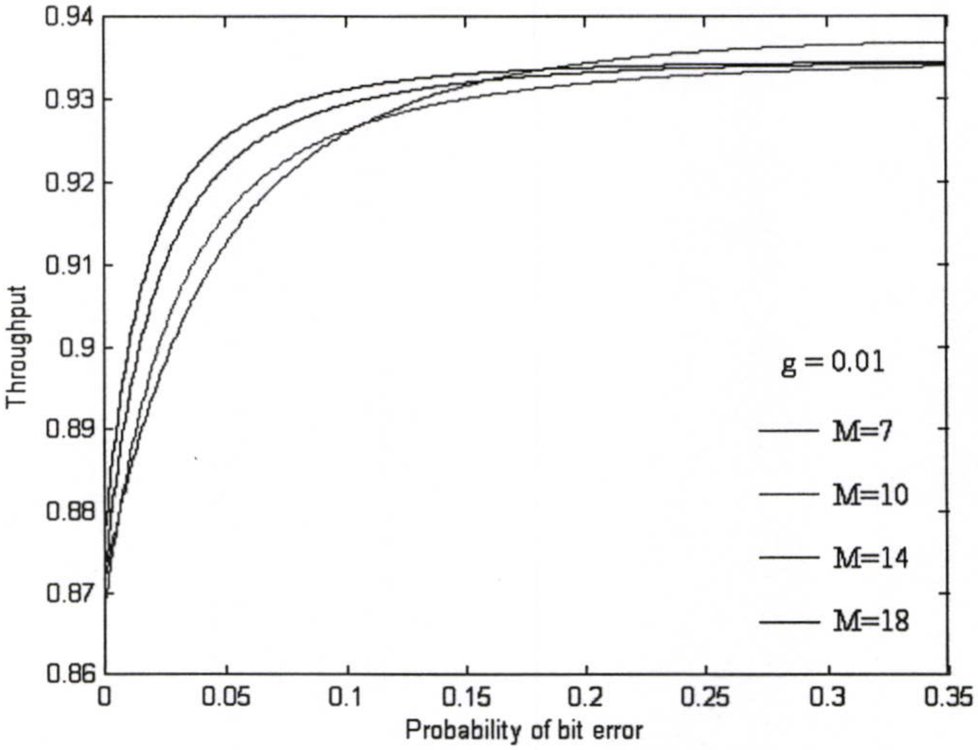


รูปที่ 5.8 ความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดเมื่อหนึ่งสัญลักษณ์สามารถแสดงได้ k บิต

5.4 การวิเคราะห์ค่า Throughput บนระบบ CSMA/CA

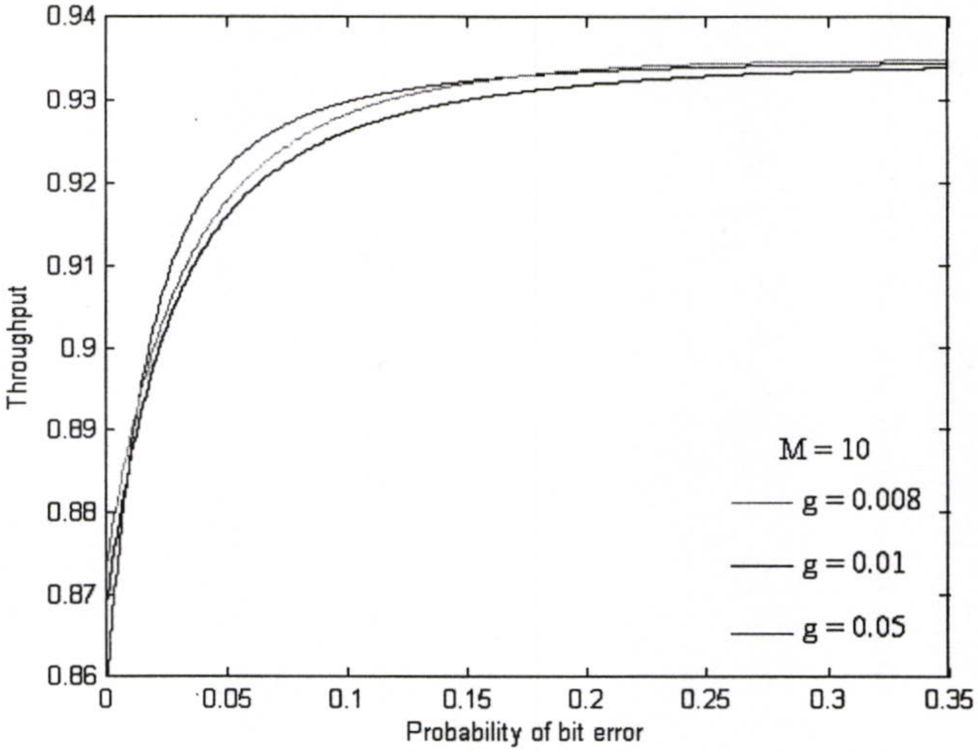
ในหัวข้อนี้เราจะทำการวิเคราะห์หาค่า Throughput บนระบบ CSMA/CA โดยคิดพื้นฐานสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลเป็นแบบ UWB โดย ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ได้แก่

- ค่าการกระจายการหน่วงเวลา (Propagation Delay, a) = 0.01
- ขนาดของ DIFS (f) = 0.06
- ช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็คเกต (T = 1+a) = 1.01



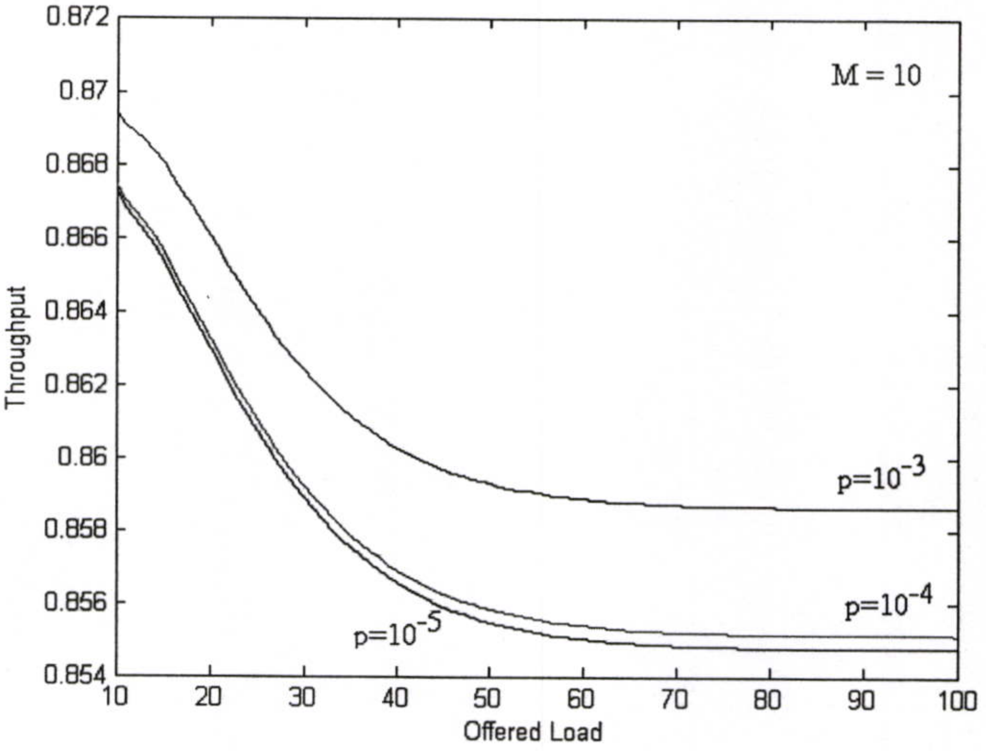
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Probability of bit error และค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA เมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ M

จากรูปที่ 5.9 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดของสัญญาณ UWB กับค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA โดยกำหนดให้ค่า g (ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดของแพ็คเกต) คงที่เท่ากับ 0.01 แต่มีการแปรเปลี่ยนค่า จำนวนผู้ใช้งานของระบบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าถ้าค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดมีค่ามากขึ้นแล้ว ค่า Throughput ของระบบก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึงช่วงหนึ่งก็จะเริ่มคงที่ แต่เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของจำนวนผู้ใช้งานของระบบแล้ว ในช่วงความน่าจะเป็นที่เกิดบิตผิดพลาดน้อย จำนวนผู้ใช้งานถ้ามากขึ้น ค่า Throughput ของระบบก็จะมีค่ามากขึ้นเล็กน้อย แต่ในช่วงความน่าจะเป็นที่เกิดบิตผิดพลาดมากกว่าค่าระดับหนึ่ง ค่า Throughput ของระบบเริ่มคงที่ ซึ่งก็คือจำนวนผู้ใช้งานไม่ค่อยมีผลกระทบต่อ Throughput ของระบบ



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Probability of bit error และค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA เมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g

จากรูปที่ 5.10 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดของสัญญาณ UWB กับค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA โดยกำหนดให้ค่า M (จำนวนผู้ที่ใช้งานในระบบ) คงที่เท่ากับ 10 แต่มีการแปรเปลี่ยนค่า ความน่าจะเป็นในการเกิดของแพ็คเกต ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ถ้าค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดมีค่ามากขึ้นแล้ว ค่า Throughput ของระบบก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึงช่วงหนึ่งก็จะเริ่มคงที่ แต่ถ้าความน่าจะเป็นในการเกิดแพ็คเกตมีค่ามากขึ้นค่า Throughput ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Offered Load และค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA เมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ความน่าจะเป็น p

จากรูปที่ 5.11 ในอีกทางหนึ่งเมื่อเรากำหนดจำนวนผู้ที่ใช้งานคงที่แล้ว ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 10 แต่มีการแปรเปลี่ยนค่า Offered Load แล้ว จะเห็นได้ว่าถ้า ค่า Offered Load มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่า Throughput ของระบบก็จะลดลง และถ้าระดับสัญญาณที่มีค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดที่แตกต่างกันแล้ว ถ้าค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดที่น้อยจะทำให้ค่า Throughput ของระบบน้อยตามลงไปด้วย

บทที่ 6
สรุปผลการวิเคราะห์

ในปัจจุบันความต้องการในการสื่อสารข้อมูลมีความต้องการที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีเทคโนโลยีใหม่ที่เรียกว่า Ultra wideband มารองรับในการใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถทำให้ส่งข้อมูลที่มีความถี่มาก หรือ ย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลสูง ซึ่งจะทำให้สามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็วมากขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้นำเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra wideband นี้มาวิเคราะห์ และประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการสื่อสารโปรโตคอล CSMA/CA

โดยในส่วนแรกของการวิเคราะห์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์การนำเทคโนโลยีสัญญาณ Ultra wideband ในส่วนของการหาค่าความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดเฉลี่ยของสัญญาณ Ultra wideband บนช่องที่มีการจางหายแบบ AWGN และบนช่องที่มีการจางหายแบบนาคากามิ ซึ่งเทคโนโลยี Ultra wideband ที่นำมาวิเคราะห์จะใช้หลักการพื้นฐานของการสื่อสารแบบ PPM (Pulse Position Modulation) โดยผลของการวิเคราะห์จะอยู่ในกราฟที่ 5.5 และ 5.6 โดยในกราฟที่ 5.5 จะแสดงค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดเฉลี่ยของสัญญาณ Ultra Wideband ณ ความถี่ที่ใช้งานต่าง ๆ ที่ผ่านการจางหายแบบ AWGN ซึ่งผลในกราฟแสดงให้เห็นว่า ถ้าความถี่ที่ใช้งานยิ่งมีค่ามากขึ้นแล้ว ค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดก็จะลดลง และในกราฟที่ 5.6 จะเป็นการแสดงค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดของการสื่อสาร Ultra wideband ณ ความถี่ 5 GHz โดยถ้าค่าพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับ 0.5 จะเทียบเท่ารูปแบบการจางหายของ เกาส์เซียนข้างเดียว หรือ ถ้าค่าพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 จะเทียบเท่าการจางหายแบบเรย์ลี ซึ่งจากกราฟถ้าค่าพารามิเตอร์การจางหายมีค่าน้อยแล้ว ความน่าจะเป็นที่มีอัตราบิตผิดพลาดจะมีมากขึ้น เมื่อเทียบกับระดับสัญญาณรับต่อสัญญาณรบกวนเดียวกัน

ในส่วนที่สอง จะเป็นการวิเคราะห์ระบบ UWB OFDM คือข้อมูลที่จะทำการส่งจะมีการแปลงเป็นสัญลักษณ์ก่อนการส่ง ซึ่งผลของการวิเค ราะห์ในส่วนนี้จะแสดงในกราฟที่ 5.8 โดยในกราฟที่ 5.8 ถ้า k เท่ากับ 1 หมายความว่าไม่มีการแปลงเป็นสัญลักษณ์ แต่ถ้า k เริ่มเพิ่มมากขึ้นแล้ว ค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดก็จะลดน้อยลง จนเมื่อค่า k เพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดก็จะเริ่มคงที่

ในส่วนสุดท้าย จะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขระหว่างการสื่อสารบนย่านความถี่ Ultra wideband และโปรโตคอลการสื่อสารระบบ CSMA/CA ซึ่งผลของการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะแสดงในกราฟที่ 5.9, 5.10 และ 5.11 โดยในกราฟที่ 5.9 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดของสัญญาณ Ultra wideband กับค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA ซึ่งจากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าถ้าค่าความน่าจะเป็นของอัตรา

บิตผิดพลาดมีค่ามากขึ้นแล้ว ค่า Throughput ของระบบก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึงช่วงหนึ่งก็จะเริ่มคงที่ แต่เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของจำนวนผู้ใช้งานของระบบแล้ว ในช่วงความน่าจะเป็นที่เกิดบิตผิดพลาดน้อย จำนวนผู้ใช้งานถ้ามากขึ้น ค่า Throughput ของระบบก็จะมีค่ามากขึ้นเล็กน้อย แต่ในช่วงความน่าจะเป็นที่เกิดบิตผิดพลาดมากกว่าค่าระดับหนึ่ง ค่า Throughput ของระบบจะเริ่มคงที่ ซึ่งจำนวนผู้ใช้งานจะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อ Throughput ของระบบ

ส่วนในกราฟที่ 5.10 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดของสัญญาณ UWB กับค่า Throughput ของระบบ CSMA/CA เมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่า ความน่าจะเป็นในการเกิดของแพ็คเกต ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ถ้าค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดมีค่ามากขึ้นแล้ว ค่า Throughput ของระบบก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึงช่วงหนึ่งก็จะเริ่มคงที่ แต่ถ้าความน่าจะเป็นในการเกิดแพ็คเกตมีค่ามากขึ้นค่า Throughput ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

และในกราฟที่ 5.11 เมื่อเรากำหนดจำนวนผู้ที่ใช้งานคงที่แล้ว แต่มีการแปรเปลี่ยนค่า Offered Load แล้ว จะเห็นได้ว่าถ้า ค่า Offered Load มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่า Throughput ของระบบก็จะลดลง และถ้าระดับสัญญาณที่มีค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดที่แตกต่างกันแล้ว ถ้าค่าความน่าจะเป็นของอัตราบิตผิดพลาดที่น้อยจะทำให้ค่า Throughput ของระบบน้อยตามลงไปด้วย

ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้งานจากข้อมูลที่ได้ในวิทยานิพนธ์ เราควรคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ของการจางหาย ค่าความต้องการการใช้งานของระบบ ขนาดของแพ็คเกจที่ใช้ในการสื่อสาร กล่าวคือ เมื่อระดับสัญญาณที่มีความคมชัด (SNR มีค่ามาก) ดังนั้นความน่าจะเป็นในการรับข้อมูลที่ผิดพลาดก็ย่อมมีน้อยกว่า และถ้าสัญญาณมีการจางหายมากขึ้น (พารามิเตอร์ของการจางหายลดลง) ก็ทำให้ระดับสัญญาณมีความคมชัดลดลง ทำให้ความน่าจะเป็นในการรับข้อมูลที่ผิดพลาดมากขึ้น และความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนความต้องการการใช้งานของระบบ และค่า Performance ระบบจะสามารถรองรับจำนวนความต้องการได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าระบบมีการใช้งานที่มากขึ้นเกิดเกณฑ์แล้ว ระบบก็จะมีค่า Performance ที่ลดลง

บรรณานุกรม

[1] A., D. Prakash, **Introduction to wireless and mobile systems**, Thomson, Australia, 2003

[2] **www.nectec.or.th/bid/mkt_info_tech_ultrawideband.htm**

[3] G. Roverto Aiello and Gerald D. Rogerson, "**Ultra-Wideband Wireless Systems**," IEEE Microwave Magazine, June 2003, pp. 36-47

[4] D. Porcino and W. Hirt, "**Ultra-Wideband Radio Technology: Potential and Challenges Ahead**," IEEE Communications Magazine, July 2003, pp. 66-74

[5] **www.mvt.co.th/viewnews.php?cid=38&nid=79&page=**

[6] I. Oppermann, M. Hamalainen and J. Iinatti, **UWB Theory and Applications**, John Wiley & Sons Ltd, England, 2004

[7] K. Siwiak and D. McKeown, **Ultra-Wideband Radio Technology**, John Wiley & Sons Ltd, England, 2004

[8] M. Ghavami, L.B. Michael, R. Kohno, **Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering**, John Wiley & Sons, Ltd, England, 2004

[9] F. R.-Mireles, "**On the performance of ultra wide band signals in Gaussian noise and dense multipath**," IEEE Trans. Vehicular Technology, vol 50, no 1, Jan 2001, pp. 244-249

[10] W. C. Chung, N. J. August, and Dong Sam Ha, "**Signaling and Multiple Access Technique for Ultra Wideband 4G Wireless Communication Systems,**" IEEE Wireless Communications, April 2005, pp. 46-53

[11] M. Schmidt and F. Jondral, "**Ultra Wideband Transmission based on MC-CDMA**," Globecom IEEE 2003, pp. 749-753

[12] G. Yue, G. Lijia, S. Li, "**Ultra Wideband Impulse Radio Signal Interference to Code Division Multiple Access System**," IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communicaiton Proceedings, pp. 2437-2441

[13] G. Durisi and S. Benedetto, "**Performance Evaluation of TH-PPM UWB Systems in the presence of Multiuser Interference**," IEEE Commnucations Letters, vol. 7, no. 5, May 2003, pp. 224-226

[14] N. Blaunstein and J. B. Andersen, **Multipath Phenomena in Cellular Networks**, Artech House Boston , London, 2002

[15] M. K. Simon and M.S. Alouini, **Digital Communication over Fading Channels**, John Wiley & Sons, inc., Canada, 2000

[16] IEEE 802.11, **Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**, Piscataway, NJ: IEEE Standards Dept., June 1997

[17] IEEE 802.11a, **Wireless LAN Medium Access Control (MAC and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band,** Piscataway, NJ: IEEE Standard Dept., Sep 1999.

[18] L. Goldberg, "**Wireless LANs: Mobile Computing's Second Wave**," Elect. Design, vol. 43, June 26, 1995, pp. 55-72.

[19] A.V. Oppenheim and R.W. Shafer, **Discrete-Time Signal Processing**, 2nd ed., New Jersey, Prentice-Hall, 1999.

[20] L.J. Cimini, Jr., "**Analysis and Simulation of Digital Mobile Channel using Orthogonal Frequency Division Multiplexing**," IEEE Trans. Commun., vol. COM-33., pp. 665-675, July 1985.

[21] R.V. Nee and R. Prasad, **OFDM for Wireless Multimedia Communication**, Boston-London, Artech House, 2000.

[22] ANSI/IEEE Std 802.3, **IEEE Standards for Local Area Network: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications**, NJ: IEEE Standards Dept., 1985.

[23] L. Kleinrock and F. Tobagi, "**Packet Switching in Radio Channels: Part I – Carrier Sense Multiple Access Modes and Their Throughput Delay Characteristics**," IEEE Trans. Commun., vol. COM23, No. 12, December 1975, pp. 1400-1416.

[24] A. Papoulis, **Probability, Random Variables and Stochastic Processes**, 3rd ed., New York: McGraw-Hill, 1991.

[25] K. Siwiak, "**Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New technology**," Vehicular Technology Conference 2001, VTC 01, pp. 1088-1093

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] **สุทธิพัณณ์ ชนินนนทพัทธ์**, พิศากร สิทธิวัจน์, สุวิพล สิทธิชีวภาค, เกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์ "การวิเคราะห์สมรรถนะของการประยุกต์ใช้งานสัญญาณ UWB บนโปรโตคอล CSMA/CA บนช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบนาคากามิ" การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 20-21 ตุลาคม 2548

[2] Chugpeth Suwanruang, **Suttipun Chaninnonthaphat**, Suvepon Sittichevapak and Kriengkrai "Performance Analysis of Reed-Solomon Codes for 16-QAM OFDM System over Nakagami Fading Channels" The International Conference on Information and Communication Technologies 2004 (ICT 2004), Bangkok, Thailand, November 18-19, 2004

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย สุทธิพัณณ์ ชนินนนทพัทธ์
วัน เดือน ปีเกิด	19 มิถุนายน 2524
ที่อยู่	781 ซ.จรัญสนิทวงศ์ 75 ถ.จรัญสนิทวงศ์ บางพลัด บางพลัด กรุงเทพ 10700
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2544