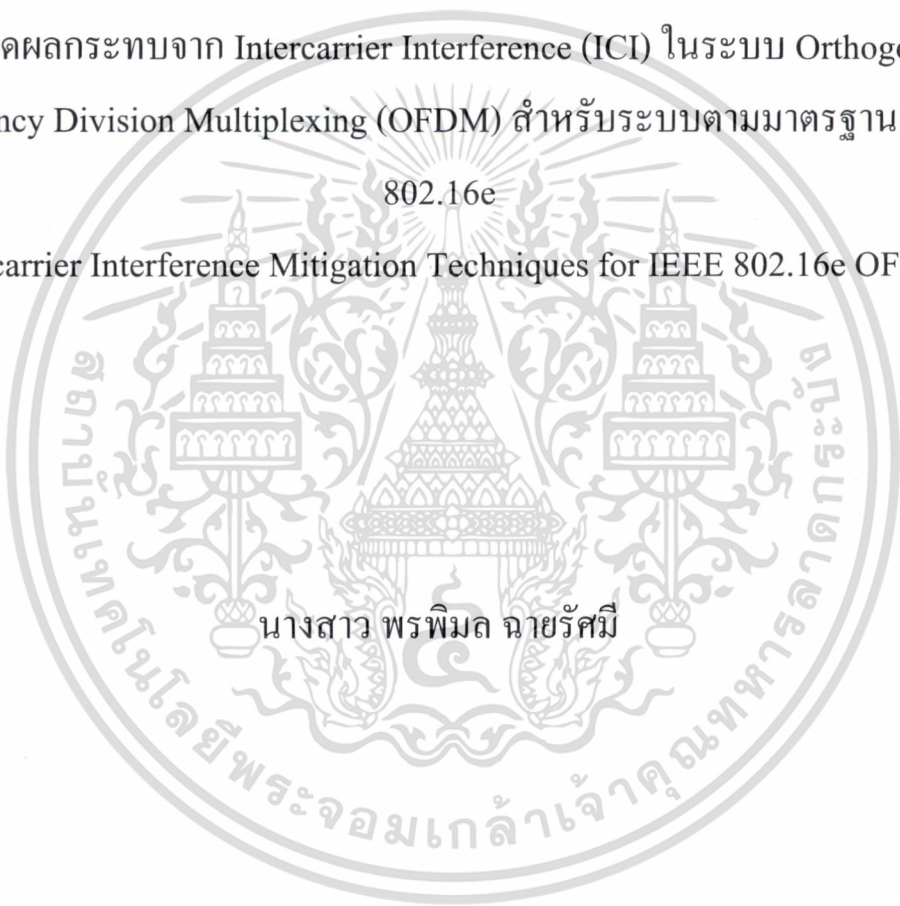


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



การลดผลกระทบจาก Intercarrier Interference (ICI) ในระบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) สำหรับระบบตามมาตรฐาน IEEE 802.16e

Intercarrier Interference Mitigation Techniques for IEEE 802.16e OFDM



นางสาว พรพิมล ฉายรัศมี

RCH

TK

5105,5668

พ ๒49๗ รายงานการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากเงินรายได้

เลขหมู่.....

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

เลขทะเบียน 105831

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วัน,เดือน,ปี - 4 S.ศ. 2552

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

b. 1016935x  
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อโครงการวิจัย** : การลดผลกระทบจาก Inter-carrier Interference (ICI) ในระบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) สำหรับระบบตามมาตรฐาน IEEE 802.16e
- ผู้ดำเนินการวิจัย** : พรพิมล นายรัศมี
- หน่วยงาน** : ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ปีงบประมาณ** : 2551

### บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพของการมอดูเลตแบบ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) จะลดลงจากผลกระทบของ inter-carrier interference (ICI) ที่เกิดจาก Doppler spread ในช่วงสัญญาณ ดังนั้นในเอกสารที่ [5] จึงเสนอการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณที่เรียกว่า sequential interference cancellation (SIC) เพื่อลดปริมาณ ICI ในช่วงสัญญาณ โดยทฤษฎีการ Sampling จะทำให้ปริมาณ ICI ในช่วงสัญญาณคู่ที่อยู่ด้านริมนอกสุดมีปริมาณน้อยที่สุด และการตรวจจับสัญญาณแบบ SIC ได้นำประโยชน์จากปริมาณ ICI ที่น้อยที่สุดของช่วงสัญญาณคู่นอกสุดนี้โดยการเริ่มการตรวจจับสัญญาณจากด้านนอกสุดและค่อยๆ เคลื่อนไปตรวจจับสัญญาณในช่วงสัญญาณด้านในเข้ามาเรื่อยๆ ซึ่งทำให้ระดับของความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจจับลดต่ำลง ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการตรวจจับแบบ SIC detection ที่ใช้ร่วมกับทฤษฎีการ Sampling และการประมาณค่าของช่วงสัญญาณ โดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยใช้การจำลองระบบทางคอมพิวเตอร์กับระบบที่ใช้การประมาณค่าของช่วงสัญญาณแบบอื่นๆ ที่มีอยู่แล้ว อันได้แก่ การประมาณค่าของช่วงสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา เมื่อไม่มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling และการประมาณค่าของช่วงสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ lowpass ผลที่ได้แสดงว่า การตรวจจับแบบ SIC detection ที่ใช้ร่วมกับทฤษฎีการ Sampling และการประมาณค่าของช่วงสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการประมาณค่าด้วยวิธีอื่นๆ เมื่อใช้การเข้ารหัสสัญญาณแบบ Binary Phase Shift Keying (BPSK) และแบบ Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) แต่ส่งผลในทางตรงข้ามเมื่อใช้การเข้ารหัสแบบ 16 Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM)

**Research Title** : Intercarrier Interference Mitigation Techniques for IEEE 802.16e OFDM

**Researchers** : Pornpimon Chayratsami

**Department** : Department of Engineering Education Faculty of Industrial Education King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Year** : 2008

### ABSTRACT

The performance of OFDM modulation degrades in a Doppler spread channel due to intercarrier interference (ICI). Multirate sampling theory and a detection scheme, called sequential interference cancellation (SIC), are applied to a standard OFDM system to reduce ICI in [1]. The increased sampling rate (upsampling) causes less ICI for the edge subcarriers. The SIC detection scheme recovers the data from the outer carriers first and then detection moves from the outer carrier to the inner carriers to lower the error floor. In this research, SIC detection with modified time-domain interpolation estimation is presented and its performance is compared to the existing time-domain and low-pass interpolation estimations via computer simulation. The results show that the modified method performs better than existing estimation schemes for BPSK and QPSK modulations, but not for 16-QAM modulation.

## สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.4 สมมติฐานของการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ระบบสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE 802.16e	4
2.2 การมอดูเลตแบบ OFDM	5
2.3 Inter-carrier Interference (ICI)	6
2.4 ทฤษฎีการ Sampling (Sampling Theory)	8
2.5 Sequential Interference Cancellation Detection (SIC Detection)	9
2.6 สัญญาณนำร่องแบบ Comb (Comb-Type Pilot Tone)	11
2.7 การประมาณพฤติกรรมของช่องสัญญาณ (Channel Estimation)	12
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	17
3.1 การจำลองระบบ	17
3.2 ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง (Parameters)	18
3.3 การบันทึกผลการทดลอง	19
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	20
4.1 ผลการทดลองของแบบจำลองที่ค่าสูงสุดของความถี่คอปเปอเรอร์ 35 Hz	20
4.2 ผลการทดลองของแบบจำลองที่ค่าสูงสุดของความถี่คอปเปอเรอร์ 70 Hz	23
4.3 ผลกระทบของความถี่คอปเปอเรอร์ต่อประสิทธิภาพของระบบ	26
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	27
5.1 สรุปผลการวิจัย	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย	28
บรรณานุกรม	29
ภาคผนวก MATLAB Files	30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายในช่วงสุดท้ายก่อนถึงผู้รับโอนั้นมีการพัฒนาในหลายๆ ด้าน หนึ่งในนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.16e ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กับระบบที่มีการส่งข้อมูลแบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) และมีการเคลื่อนที่ของเครื่องรับสัญญาณ

โดยทั่วไประบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ OFDM นั้นจะเป็นระบบที่เหมาะสมกับระบบสื่อสารสัญญาณที่ไม่มีหรือมีการเคลื่อนที่ที่น้อยมาก เช่น Wireless local area networks (WLAN) และ Digital terrestrial television and radio broadcasting (DTVB) เนื่องจาก OFDM มีความอดทนต่อการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ได้น้อย ซึ่งทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณจากการซ้อนทับกันของช่องสัญญาณย่อยที่เรียกว่า Inter-carrier Interference (ICI) ดังนั้นหากต้องการปรับปรุงระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ OFDM และมีการเคลื่อนที่ของระบบ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดหรือลดผลกระทบจาก ICI ที่เกิดขึ้น [3]

ระบบตามมาตรฐาน IEEE 802.16e เป็นระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ OFDM และเน้นให้ผู้ใช้สามารถใช้ในการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงได้ในขณะที่มีการเคลื่อนที่มากที่สุดถึง 120 km/hr ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบตามมาตรฐานนี้จะถูกลดทอนโดย ICI และต้องมีการปรับปรุงแก้ไขให้ระบบสามารถทำงานได้ดีขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการกำจัดหรือลดผลกระทบจาก ICI ที่มีต่อระบบในมาตรฐาน IEEE 802.16e
2. เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิจัยกับวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่เดิม เช่น การใช้ interpolation แบบ lowpass, และแบบ frequency domain

### 1.3 กรอบแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การมอดูเลตสัญญาณแบบ OFDM นั้น โดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการประมวลผลเชิงตัวเลขที่เรียกว่า Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) และ FFT ในการผสมสัญญาณ ซึ่งทำให้เกิด spectrum ที่ซ้ำกันในลักษณะของคาบเวลาและทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่าง spectrum หลัก และ spectrum ที่ซ้ำ การเพิ่มการสุมของสัญญาณจะทำให้ spectrum ที่ซ้ำเลื่อนห่างออกไป ดังนั้นการรบกวนจึงมีน้อยกว่าในช่องสัญญาณย่อยด้านนอก ซึ่งมีผลทำให้อัตราการตรวจจับสัญญาณได้ถูกต้องมีมากขึ้น [1]

นอกจากนี้ในระบบที่ไม่ทราบพฤติกรรมของช่องสัญญาณ ที่เครื่องรับจำเป็นต้องมีการประมาณค่าความประพฤติของช่องสัญญาณเพื่อช่วยในการแก้ไขข้อมูลที่รับมาได้ เพื่อการตรวจจับสัญญาณที่แม่นยำขึ้น [2] ได้นำเสนอการใช้ pilot เพื่อการประมาณค่าของช่องสัญญาณ ร่วมกับการ interpolation สัญญาณแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการแก้ไขสัญญาณให้ได้รับการตรวจจับสัญญาณ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ซึ่งพบว่า การ interpolate แบบ lowpass นั้น ให้ผลดีที่สุด

### 1.4 สมมติฐานการวิจัย

หากนำวิธีที่ใช้ใน [1] และ [2] มาใช้ร่วมกัน ประสิทธิภาพของการตรวจจับสัญญาณน่าจะมีความแม่นยำมากขึ้นกว่าการใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณเพียงอย่างเดียว

### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะครอบคลุมถึงการเสนอวิธีการในการลดผลกระทบจาก ICI ที่มีต่อระบบในมาตรฐาน IEEE 802.16e รวมถึงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิจัยกับวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่เดิม โดยการวิจัยนี้จะใช้วิธีการทางประมวลผลเชิงตัวเลขของสัญญาณ (digital signal processing) มาช่วยในการลดผลกระทบ และเสนอวิธีใหม่ในการประมาณค่าของช่องสัญญาณและลดผลกระทบของ ICI ที่มีต่อสัญญาณที่ส่ง

### 1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ระบบที่จำลองขึ้นไม่มีผลกระทบของ ICI จาก Local Oscillator
2. ระบบที่จำลองขึ้นมี cyclic prefix เพียงพอต่อการรองรับผลกระทบของ ICI ที่เกิดจากสถานะ Delay Spread
3. ระบบที่จำลองขึ้นไม่ได้รับผลกระทบจากระบบสื่อสารอื่นที่ใช้ความถี่เดียวกัน (Co-channel interference)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ได้วิธีการกำจัดหรือลดผลกระทบจาก ICI ที่มีต่อระบบในมาตรฐาน IEEE 802.16e
2. ได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิจัยกับวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่เดิม เช่น การใช้ interpolation แบบ lowpass, และแบบ frequency domain
3. ผลสำเร็จที่ได้จะนำมาซึ่งการพัฒนาระบบตามมาตรฐาน IEEE 802.16e ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะนำไปประยุกต์ใช้ในการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ระบบ TV broadcasting มีถือือ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่องการลดผลกระทบจาก Inter-carrier Interference (ICI) ในระบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) สำหรับระบบตามมาตรฐาน IEEE 802.16e นี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นให้การทดสอบและทดลองเพื่อให้ได้ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE 802.16e ซึ่งใช้การมอดูเลตแบบ OFDM ที่เสนอใหม่กับระบบที่มีอยู่เดิมโดยใช้การจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ลำดับหัวข้อการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาข้อมูลต่างๆ ดังนี้

#### 2.1 ระบบสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE 802.16e

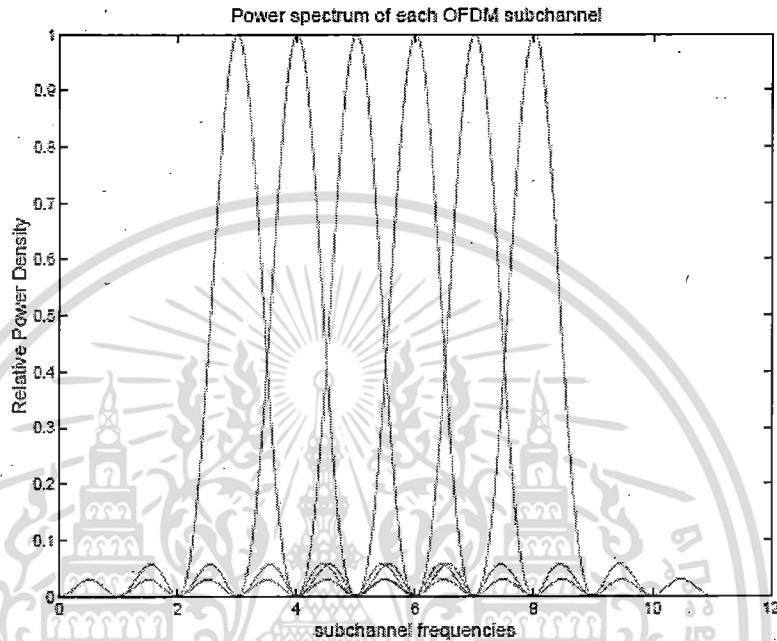
มาตรฐาน IEEE 802.16e นี้ ถูกกำหนดให้ใช้การมอดูเลตแบบ OFDM และเน้นให้ผู้ใช้งานสามารถใช้การสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงได้ในขณะที่มีการเคลื่อนที่มากที่สุดถึง 120 km/hr การมอดูเลตแบบ OFDM ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลแบบขนานกันไปตามช่องสัญญาณ ซึ่งถูกแบ่งเป็นช่องสัญญาณย่อยๆ การสื่อสารข้อมูลแบบนี้มีข้อดีคือสามารถส่งสัญญาณได้ในปริมาณมากๆ ในแต่ละครั้งและมีความทนทานต่อสภาวะ delay spread ซึ่งเกิดจากการที่สัญญาณที่ถูกส่งไปยังเครื่องรับนั้นจะมีหลายสัญญาณที่กระทบกับวัตถุต่างๆ ก่อนที่จะไปถึงตัวรับ แต่อย่างไรก็ดี การส่งสัญญาณแบบ OFDM ก็มีข้อเสียที่เกิดจาก Doppler Spread ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวรับหรือตัวส่งทำให้ช่องสัญญาณย่อยแต่ละช่องนั้นมีลักษณะที่เปลี่ยนไป ขยายใหญ่ขึ้นจึงทำให้เกิดผลกระทบต่อช่องสัญญาณย่อยด้านข้าง ดังนั้นการสื่อสารแบบ OFDM จึงไม่เป็นที่นิยมสำหรับระบบการสื่อสารแบบเคลื่อนที่เช่น มือถือ แต่จะนิยมใช้กับระบบการสื่อสารแบบไม่เคลื่อนที่ เช่น ระบบ LAN แบบไร้สาย (WLAN) หรือระบบ การส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบวิทยุความเร็วสูง (Digital Terrestrial Television and Radio Broadcasting (DTVB)) อย่างไรก็ตามได้มีการมีความพยายามในการนำระบบการส่งสัญญาณแบบ OFDM มาใช้ในการสื่อสารที่มีการเคลื่อนที่โดยมีการกำหนดมาตรฐานออกมาสำหรับระบบการสื่อสารแบบ WiMAX ซึ่งเป็นการสื่อสารในช่วงระยะทางสุดท้ายก่อนถึงผู้บริโภค ซึ่งเน้นการส่งข้อมูลในปริมาณมากๆ รวมทั้งต้องรองรับการเคลื่อนที่ได้ โดยมาตรฐานที่ถูกกำหนดมานี้คือ มาตรฐาน IEEE 802.16e นั่นเอง

ดังนั้นการกำจัดผลกระทบของ ICI ซึ่งเกิดขึ้นจาก Doppler Spread จึงมีความสำคัญมากในการทำให้ประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณซึ่งมีการมอดูเลตแบบ OFDM มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การมอดดูเลตแบบ OFDM

การมอดดูเลตแบบ OFDM เป็นการส่งสัญญาณแบบขนานซึ่งเกิดจากการแบ่งช่องสัญญาณที่มีเป็นช่องเล็กๆ ย่อยๆ โดยแต่ละช่องสัญญาณจะตั้งฉากต่อกัน (Orthogonal) ซึ่งทำให้ไม่มีผลกระทบต่อกัน รูปแบบของสเปกตรัมของการมอดดูเลตแบบ OFDM แสดงดังรูปที่ 2.1



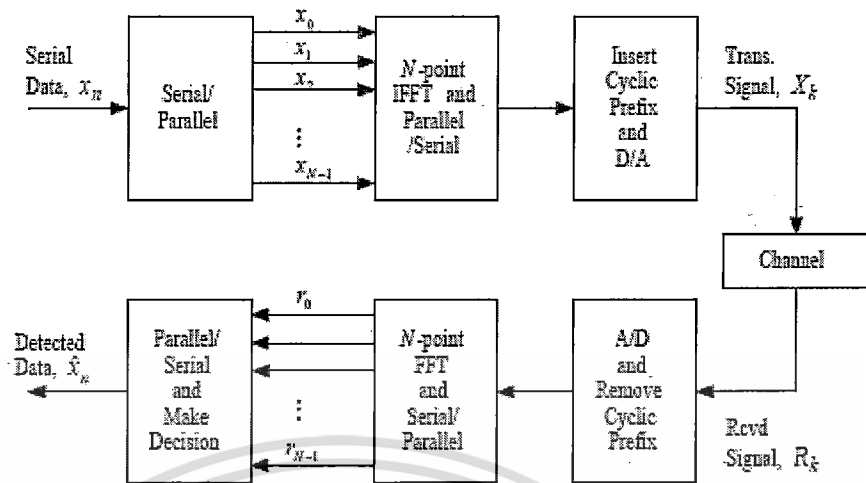
รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของการส่งสัญญาณแบบ OFDM

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าการมอดดูเลตแบบ OFDM นั้นมีการจัดการด้านการใช้งานของแบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้กับการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง (High speed data) การสร้างช่องสัญญาณย่อยในการมอดดูเลตแบบ OFDM นี้สามารถทำได้โดยใช้ IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) ที่เครื่องส่งสัญญาณและทำการดีมอดดูเลตโดย FFT (Fast Fourier Transform) ที่เครื่องรับสัญญาณ ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.2

จากรูปที่ 2.2 ข้อมูลจะถูกเข้ารหัสและเปลี่ยนการส่งข้อมูลแบบอนุกรม (Serial) เป็นแบบขนาน (Parallel) ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ IFFT ขนาด  $N$  จุดเพื่อทำการมอดดูเลตข้อมูล หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่ม cyclic prefix เข้าไปที่ด้านหน้าของข้อมูลที่ได้เพื่อเป็นการป้องกันการผลกระทบจากดีเลย์สเปรด แล้วจึงเปลี่ยนสัญญาณซึ่งเป็นดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital to Analog converter) เพื่อส่งไปตามช่องสัญญาณในช่วงความถี่ใดๆ ซึ่งปกติจะเป็นช่วงความถี่ขนาด 5 GHz สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.16e ในขณะเดียวกัน ที่เครื่องรับ สัญญาณที่รับมาจะถูกเปลี่ยนกลับจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital converter) และตัดเอา cyclic prefix ออกแล้วจึงผ่านเข้าสู่กระบวนการดีมอดดูเลตด้วย FFT ขนาด  $N$  จุด สุดท้ายข้อมูลที่ถูกดีมอดดูเลตแล้วจึงนำมาถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของการมอดูเลตแบบ OFDM

และตัดสินใจว่าเป็นข้อมูลใด ถ้าหากว่าการส่งข้อมูลนั้นไม่มีการรบกวนจากภายนอก (noise) ข้อมูลที่ได้รับได้ก็จะไม่มีข้อผิดพลาดใดๆ แต่ถ้ามีการรบกวนจากภายนอกซึ่งสามารถเกิดได้จากหลายๆสาเหตุ ข้อมูลที่ได้รับได้ก็จะเกิดการถอดรหัสที่ผิดพลาดได้

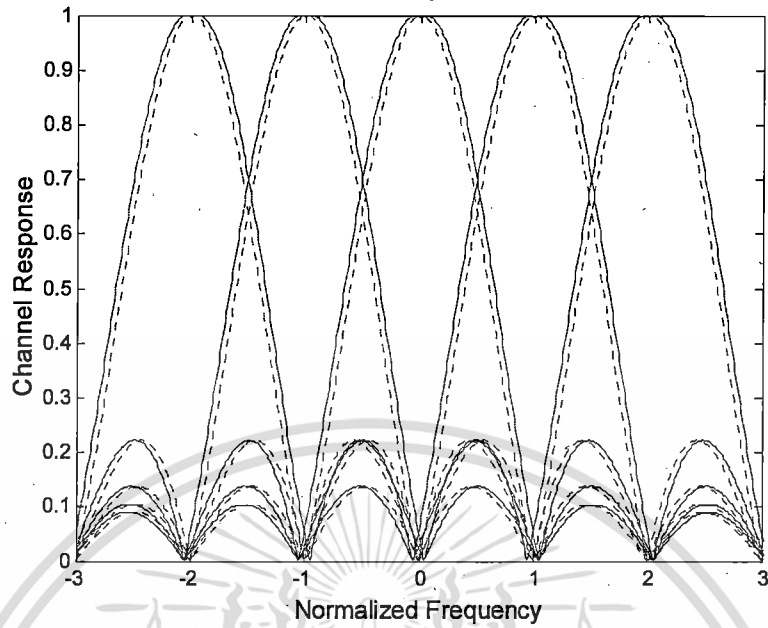
สำหรับระบบแบบ OFDM นั้น นอกเหนือจากข้อผิดพลาดที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอกแล้ว ยังเกิดความผิดพลาดจากสาเหตุของการสูญเสียการตั้งฉากกัน (Orthogonal) ของช่องสัญญาณอันเกิดจากการที่เครื่องรับหรือเครื่องส่งมีการเคลื่อนที่ซึ่งทำให้เกิด ICI นั้นเอง

### 2.3 Intercarrier Interference (ICI)

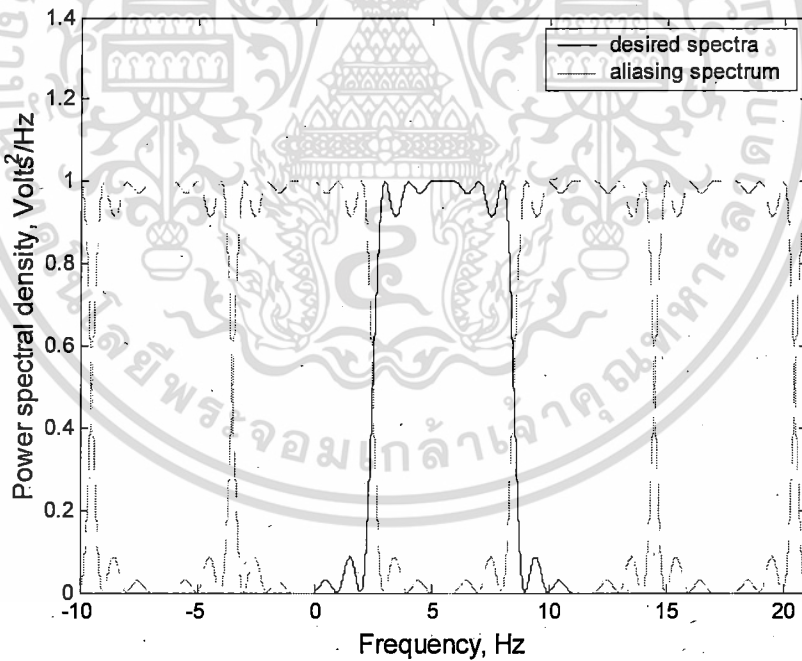
ICI เกิดจากการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณ (cross talk) ซึ่งทำให้ลดประสิทธิภาพของระบบการส่งสัญญาณ ICI นี้สามารถเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ดิเลย์สเปรด คอปเปอร์สเปรด ที่เกิดในช่องสัญญาณของวิทยุเคลื่อนที่ และความไม่เสถียรของความถี่ที่เกิดจากออสซิลเลเตอร์ ของเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ในสภาพแวดล้อมที่มีการเคลื่อนที่นั้น ระบบแบบ OFDM จะทำงานด้อยลงจากคอปเปอร์สเปรดซึ่งทำให้เกิด ICI โดย ICI จะส่งผลให้ระดับของความคลาดเคลื่อน (Error floor) มีค่าสูงขึ้น [3] การเกิด ICI จากคอปเปอร์สเปรดนี้จะทำให้สเปคตรัมของช่องสัญญาณมีขนาดที่เปลี่ยนไป และการตั้งฉากกันของช่องสัญญาณเหล่านี้หมดไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดสเปคตรัมของช่องสัญญาณมีขนาดใหญ่ขึ้นและล้นไปยังช่องสัญญาณข้างเคียง ซึ่งจะมีผลกระทบทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในช่องสัญญาณด้านข้างนั้นเอง จากผลกระทบอันนี้ใน [3] พบว่าปริมาณ ICI ในแต่ละช่องสัญญาณจะมีปริมาณเท่าๆ กัน ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติการเป็นคาบเวลาของสเปคตรัมของกระบวนการ IFFT/FFT ซึ่งใช้ในการมอดูเลตและดีมอดูเลตในการสร้างสัญญาณ

OFDM นั้นเอง โดยสเปคตรัมของระบบแบบ OFDM จะแสดงการ aliasing ให้เห็นดังรูปที่ 2.4

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของการส่งสัญญาณแบบ OFDM ในช่องสัญญาณที่มีคอปเปอร์สเปรด



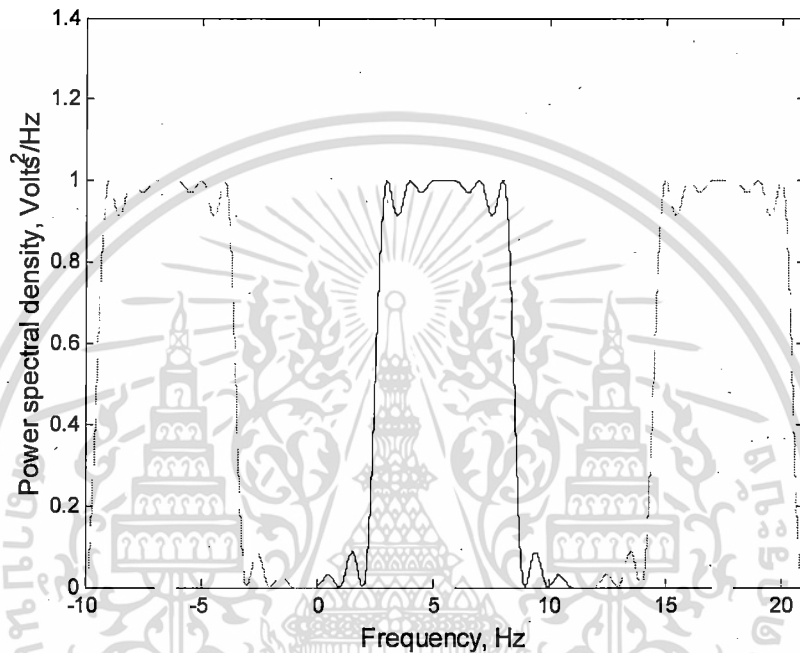
รูปที่ 2.4 การ Aliasing ของสเปกตรัมของระบบแบบ OFDM

จากสเปกตรัมในรูปที่ 2.4 การแยกสเปกตรัมที่เป็นคาบเวลาออกจากกันทำได้โดยการนำทฤษฎีการ Sampling มาใช้ [4] ซึ่งจะทำให้ผลกระทบที่เกิดจากสเปกตรัมที่ติดกันนั้นลดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

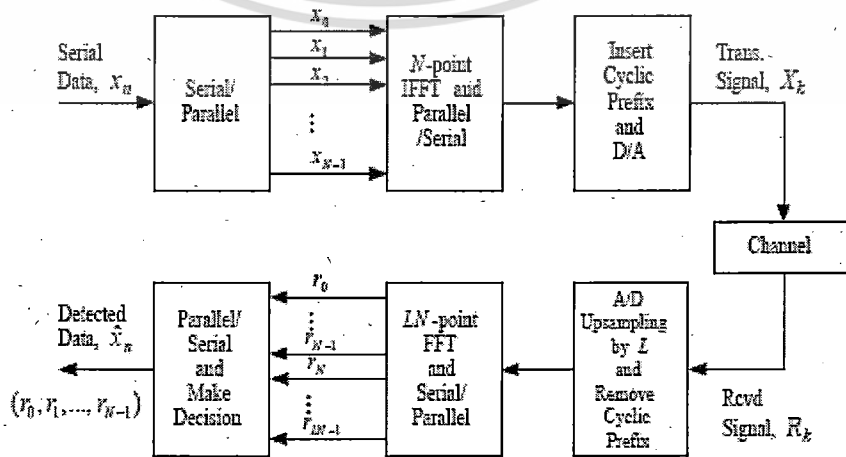
### 2.4 ทฤษฎีการ Sampling (Sampling Theory)

การนำทฤษฎีการ Sampling มาใช้ในการแยกสเปกตรัมของระบบแบบ OFDM ออกจากกันนั้นทำได้โดยการเพิ่มอัตราการ sampling ตามด้วยการ interpolate โดยใช้ Lowpass filter [4] ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมของระบบเปลี่ยนไปดังแสดงโดยระบบที่ได้จากการนำทฤษฎีการ sampling มาใช้นั้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของระบบ OFDM หลังจากทำการเพิ่มอัตราการ Sampling 2 เท่า

จากสเปกตรัมของระบบ OFDM ในรูปที่ 2.5 พบว่าผลกระทบของกำลังของสเปกตรัมของสเปกตรัมที่ซ้ำนั้นมีผลน้อยลง ดังนั้น [1, 11] ได้ทำการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling ซึ่งบล็อกไดอะแกรมของระบบจึงเป็นดังรูปที่ 2.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.6 บล็อก ไดอะแกรมของระบบ OFDM ที่มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

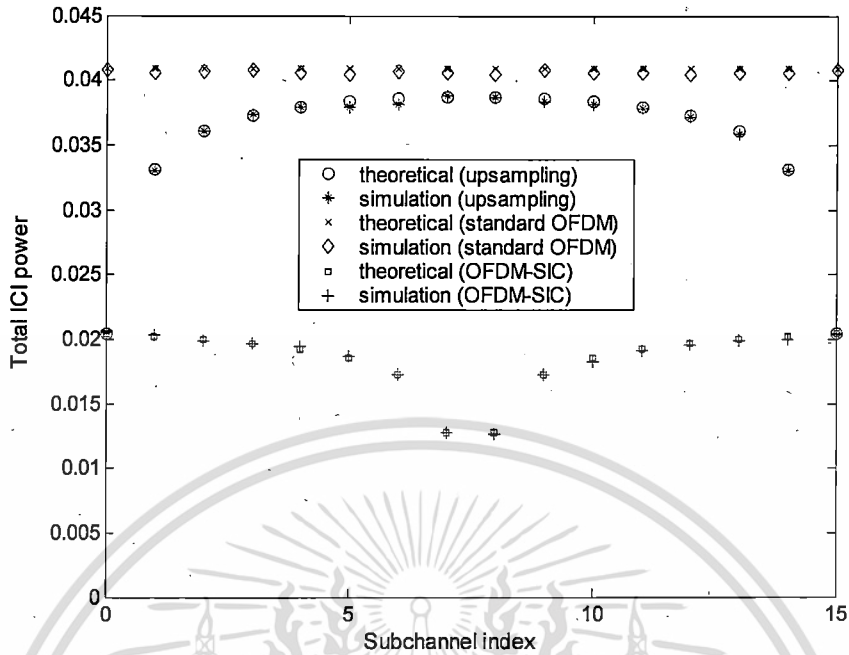
จากการจำลองระบบตามแบบบล็อกโคเดสแแกรมในรูปที่ 2.6 นั้นพบว่าปริมาณ ICI ของช่องสัญญาณแต่ละช่องของระบบ OFDM จะไม่เท่ากัน และช่องสัญญาณที่อยู่ริมสุดทั้งสองข้างจะเป็นช่องสัญญาณที่มีปริมาณ ICI น้อยที่สุด เนื่องจากสเปกตรัมหลัก (Baseband Spectrum) ได้รับความกระทบจากสเปกตรัมที่ข้ำน้อยลงนั่นเอง ดังนั้น [1] จึงเสนอการตรวจจับสัญญาณ (Detection) แบบใหม่ซึ่งใช้ประโยชน์จากการที่ช่องสัญญาณด้านริมสุดทั้งสองด้านของช่องสัญญาณมีปริมาณ ICI ที่น้อยที่สุดหลังจากผ่านกระบวนการเพิ่มอัตราการ Sampling โดยการตรวจจับนี้จะตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าเมื่อมีผลกระทบจาก ICI น้อยการตรวจจับจะมีโอกาสในการตรวจจับได้ถูกต้องแม่นยำมาก ดังนั้นการตรวจจับจะเริ่มจากช่องสัญญาณคู่ที่อยู่นอกสุดและใช้ผลจากการตรวจจับที่ได้นำมาใช้ในการคำนวณหาค่า ICI ของช่องสัญญาณที่ถูกตรวจจับไปแล้วและไปรบกวนช่องสัญญาณข้างเคียง เพื่อที่จะนำไปลดการรบกวนนั้น และทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนครบทุกช่องสัญญาณ การตรวจจับแบบนี้เรียกว่า Sequential Interference Cancellation Detection (SIC Detection)

## 2.5 Sequential Interference Cancellation Detection (SIC Detection)

SIC Detection เป็นการใช้ประโยชน์จากการที่ปริมาณ ICI ในช่องสัญญาณคู่ริมสุดนั้นมีปริมาณน้อยที่สุดมาใช้ร่วมกับทฤษฎีการ Sampling ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

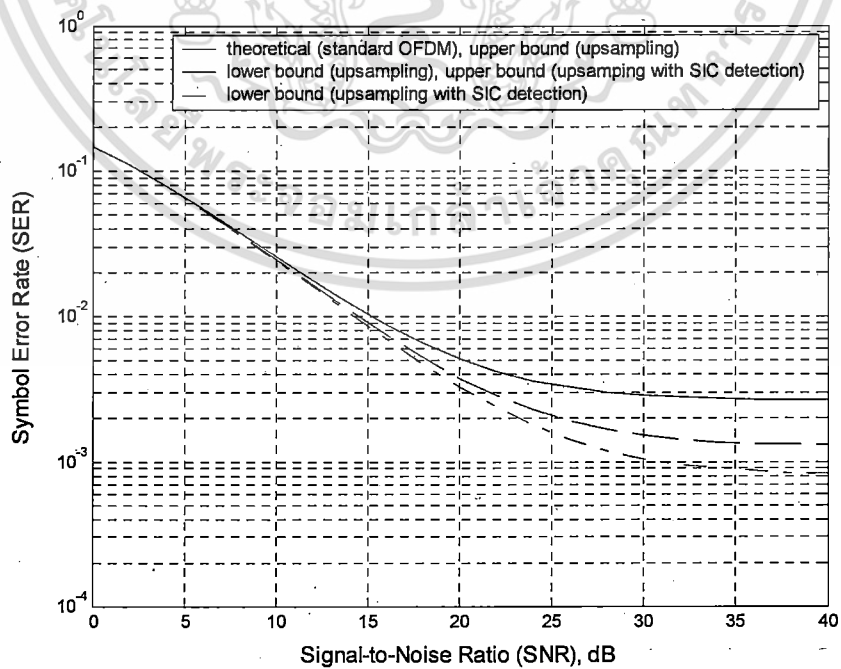
1. สัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณที่อยู่ริมสุดของช่องสัญญาณย่อยทั้งหมดจะถูกตรวจจับ (detect) เป็นคู่แรกเนื่องจากเป็นช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจาก ICI น้อยที่สุดหลังจากที่มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ดังนั้น สัญญาณที่ตรวจจับได้จะมีความเป็นไปได้ที่จะตรวจจับได้ถูกต้องมากที่สุด
2. ภายได้ข้อสมมติฐานว่าสัญญาณที่ตรวจจับได้จากสัญญาณคู่แรกนั้นตรวจจับได้ถูกต้อง ปริมาณ ICI ที่มีผลกระทบจากช่องสัญญาณคู่แรกที่มีต่อช่องสัญญาณคู่ด้านในถัดมาจะสามารถคำนวณได้
3. เมื่อทราบปริมาณ ICI ที่กระทบจากช่องสัญญาณคู่แรกที่มีต่อช่องสัญญาณคู่ถัดไปที่ได้จากการคำนวณแล้วนั้น ICI ที่คำนวณได้จะถูกนำไปหักออกจากสัญญาณที่รับได้ในช่องสัญญาณคู่ถัดไป ทำให้ปริมาณ ICI ในช่องสัญญาณคู่ดังกล่าวมีน้อยลง และโอกาสของการตรวจจับที่ถูกต้องแม่นยำมีมากขึ้นในช่องสัญญาณคู่นี้
4. ทำตามข้อที่ 1-3 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณย่อยทุกช่องถูกตรวจจับหมด

จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling ร่วมกับ SIC detection กับระบบ OFDM ทั่วไปจะทำให้ปริมาณ ICI ในช่องสัญญาณที่อยู่กึ่งกลางมีปริมาณน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.7



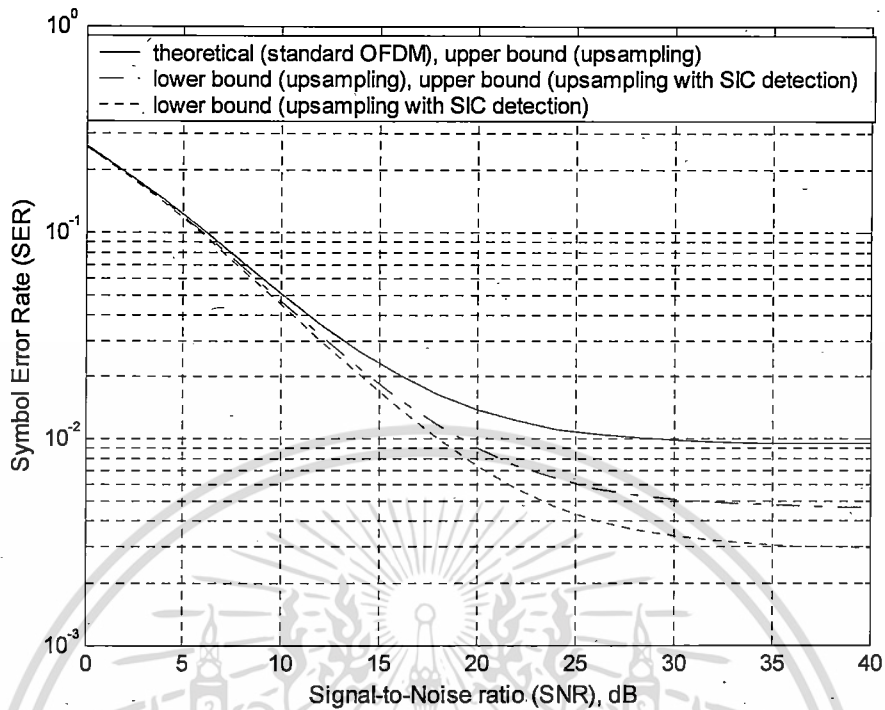
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงปริมาณ ICI ในแต่ละช่องสัญญาณในกรณีต่างๆ

จากรูปที่ 2.7 พบว่าปริมาณของ ICI จะน้อยที่สุดเมื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling ร่วมกับการตรวจจับแบบ SIC Detection ทำนองเดียวกันเมื่อทำการวัดค่าคลาดเคลื่อนที่ได้ใน รูปแบบของ Signal to Noise ratio (SNR) ต่อ Symbol Error Rate (SER) พบว่าการใช้ทฤษฎีการ Sampling กับ SIC Detection จะให้ Error Floor ที่ต่ำสุดเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ค่าคลาดเคลื่อนของการตรวจจับ (SER) กับ SNR ของสัญญาณที่เข้ารหัสแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า BPSK ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



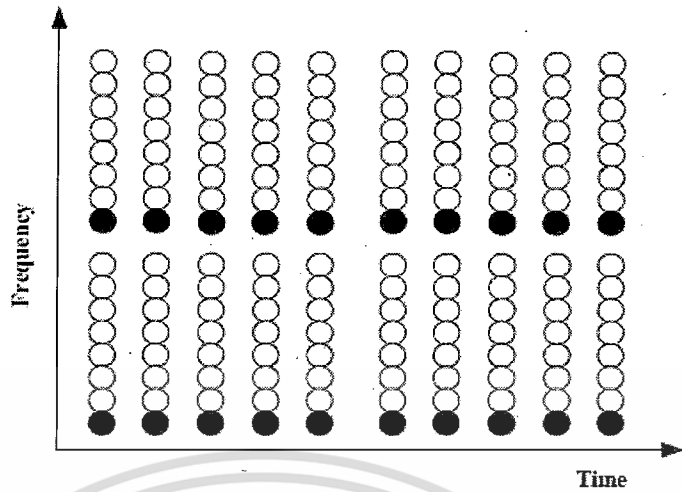
รูปที่ 2.9 ค่าคลาดเคลื่อนของการตรวจจับ (SER) กับ SNR ของสัญญาณที่เข้ารหัสแบบ QPSK

อย่างไรก็ตาม กราฟในรูปที่ 2.8 นี้ทำการจำลองภายใต้สมมติฐานว่าที่เครื่องรับมีข้อมูลของช่องสัญญาณ ดังนั้น [11] จึงทำการเพิ่มการประมาณพฤติกรรมของช่องสัญญาณ (Channel Estimation) ในกรณีที่ไม่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณ โดยการเพิ่มสัญญาณนำร่อง (Pilot Tone) เข้าไปเพื่อช่วยในการประมาณพฤติกรรมของช่องสัญญาณ เป็นแบบ comb และเสนอวิธีการประมาณช่องสัญญาณแบบโดเมนเวลา (Time Domain Estimation) เข้ามา

## 2.6 สัญญาณนำร่องแบบ Comb (Comb-Type Pilot Tone)

การเพิ่มสัญญาณนำร่อง (Pilot Tone) เข้าไปในสัญญาณนั้นทำได้ตามรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นการใส่สัญญาณนำร่องเข้าไปในช่องสัญญาณย่อยของการมอดูเลตแบบ OFDM โดยใส่เข้าไปทุกๆ  $L$  ช่องสัญญาณดังแสดงในรูป

การเพิ่มสัญญาณนำร่องเป็นการใส่สัญญาณที่เครื่องรับรู้ค่าข้อมูลล่วงหน้าเพื่อช่วยในการประมาณพฤติกรรมของช่องสัญญาณอื่นๆ ที่ไม่ใช่ช่องสัญญาณที่ใส่สัญญาณนำร่อง ซึ่งการประมาณนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธี Least Square Estimation (LS Estimation) วิธี Minimum Mean Square Estimation (MMS Estimation) ซึ่งในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้วิธี LS Estimation ในการประมาณค่าช่องสัญญาณที่ใส่สัญญาณนำร่องที่เครื่องรับ



รูปที่ 2.10 การใส่สัญญาณนำร่อง (Pilot Tone) ในระบบแบบ OFDM

### 2.7 การประมาณพฤติกรรมของช่องสัญญาณ (Channel Estimation)

การประมาณพฤติกรรมของช่องสัญญาณของระบบแบบ OFDM ซึ่งมีสัญญาณรบกวนทั้งหมดสองแบบคือสัญญาณรบกวนจาก ICI และสัญญาณรบกวนจากอื่นๆ ภายนอก ที่เรียกว่า Gaussian Noise ดังนั้นสัญญาณที่รับได้คือ

$$Z_p = \eta_p X_p + c_p + n_p \tag{2.1}$$

โดย

$Z_p$  คือ สัญญาณที่รับได้ในช่องสัญญาณนำร่อง

$\eta_p$  คือ สัญญาณ Multiplicative

$X_p$  คือ สัญญาณนำร่อง

$c_p$  คือ ICI

$n_p$  คือ Gaussian Noise

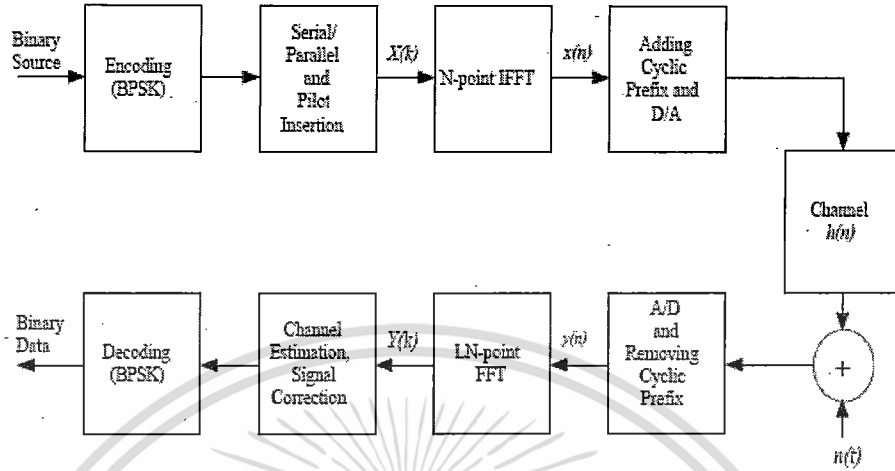
จาก [6] การประมาณช่องสัญญาณจะทำโดยวิธี Least Square Estimation (LS Estimation) ซึ่งเป็นการประมาณโดยใช้สัญญาณที่รับได้ในช่องสัญญาณที่ส่งสัญญาณนำร่อง หรือ Pilot tone มาและหารด้วยสัญญาณ pilot tone ซึ่งรู้ค่าดังสมการที่ 2.2

$$\hat{\eta}_p = \frac{\eta_p X_p + c_p + n_p}{X_p} = \eta_p + \frac{c_p}{X_p} + \frac{n_p}{X_p} = \hat{H}_p \tag{2.2}$$

โดย

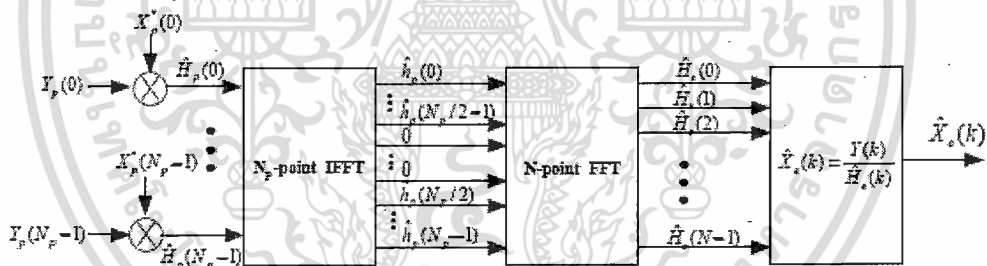
$\hat{H}_p$  คือ ค่าประมาณของช่องสัญญาณนำร่อง

เมื่อนำขั้นตอนการประมาณช่องสัญญาณประกอบเข้าไปในระบบ OFDM แล้วนั้นทำให้บล็อกไดอะแกรมเป็นไปดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบ OFDM ที่มีการประมาณช่องสัญญาณ

จากรูปที่ 2.11 จะพบว่าสัญญาณที่รับได้นั้นจะผ่านกระบวนการในการประมาณช่องสัญญาณก่อนที่จะผ่านการถอดรหัสโดยการประมาณจะนำเอาสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณที่ส่งสัญญาณนำร่องมาใช้ในการประมาณ ซึ่งมีวิธีการประมาณดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของวิธีการประมาณช่องสัญญาณในโดเมนเวลา

สัญญาณที่รับมาจากช่องสัญญาณที่ส่งสัญญาณนำร่องในโดเมนความถี่นั้นจะถูกนำมาใช้ประมาณช่องสัญญาณนำร่องในโดเมนความถี่ ดังแสดงในสมการ (2.3)

$$\hat{H}_p(k) = \frac{Y_p(k)}{X_p(k)}, \quad 0 \leq k \leq N_p - 1 \tag{2.3}$$

โดย

$\hat{H}_p(k)$  คือ ค่าประมาณของช่องสัญญาณนำร่องที่  $k$  ในโดเมนความถี่

$Y_p(k)$  คือ สัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณนำร่องที่  $k$  ในโดเมนความถี่

ช่องสัญญาณที่ถูกประมาณมานี้จะถูกเปลี่ยนกลับเป็นสัญญาณในโดเมนเวลาคือ

$$\hat{h}_p(n) = \sum_{k=0}^{N_p-1} H_p(k) \exp\left(j \frac{2\pi nk}{N_p}\right), \quad 0 \leq n \leq N_p - 1 \quad (2.4)$$

โดย  $\hat{h}_p(n)$  คือ ค่าประมาณของช่องสัญญาณนำร่องที่  $n$  ในโดเมนเวลา

$N_p$  คือ จำนวนของช่องสัญญาณนำร่อง

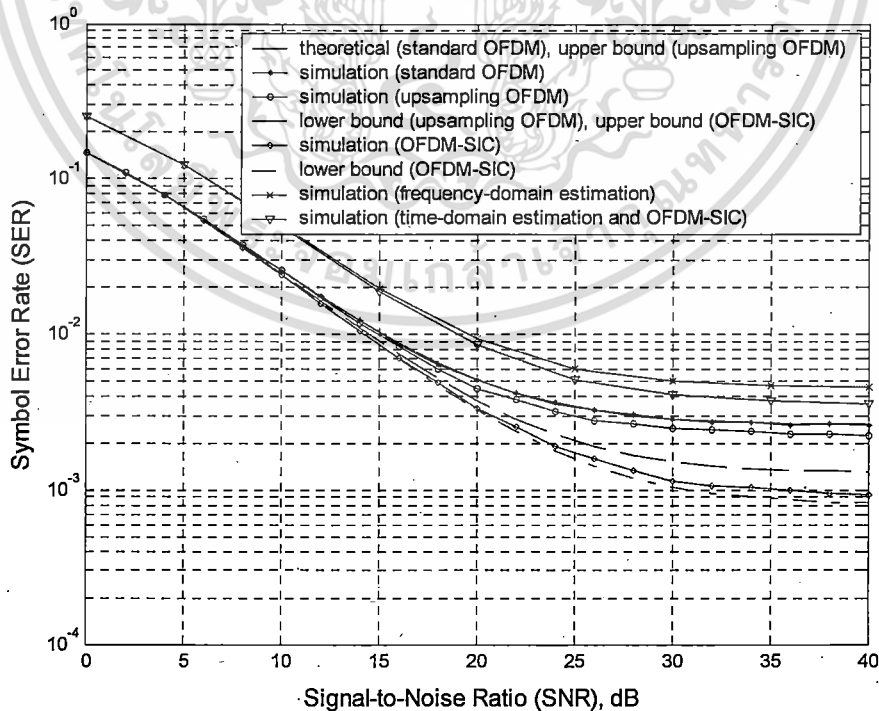
สัญญาณที่ประมาณได้จากสัญญาณนำร่องนั้นจะนำไปใช้ในการประมาณช่องสัญญาณที่เหลือต่อไปโดยวิธีการ Interpolation ใน โดเมนเวลา [11] เพื่อให้ได้ช่องสัญญาณคือ

$$\hat{h}_e(n) = \begin{cases} \hat{h}_p(n), & 0 \leq n \leq N_p/2 - 1 \\ 0, & N_p/2 \leq n \leq N - N_p/2 - 1 \\ \hat{h}_p(n - N + N_p), & N_p/2 \leq n \leq N - 1 \end{cases} \quad (2.5)$$

โดย  $N$  คือ จำนวนของช่องสัญญาณย่อยในระบบ OFDM

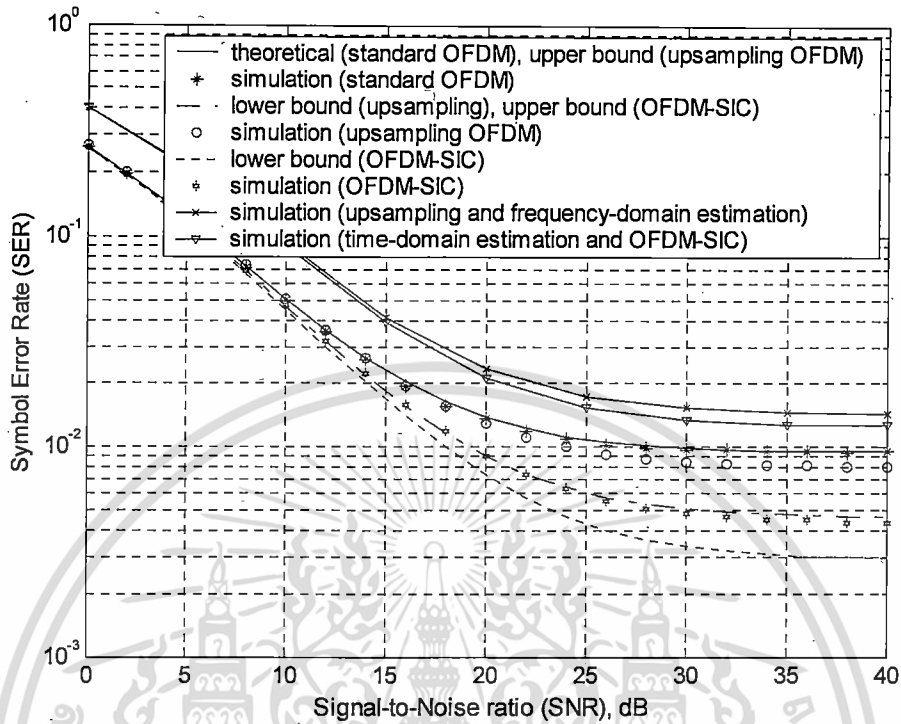
ค่าที่ประมาณได้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่า ICI ที่กระทบต่อช่องสัญญาณข้างเคียงและใช้ในการตรวจจับสัญญาณโดยวิธี SIC detection ต่อไป

จากผลการจำลองระบบ OFDM ที่ไม่ทราบค่าของช่องสัญญาณ โดยใช้ทฤษฎีการ Sampling และการตรวจจับสัญญาณแบบ SIC Detection นั้น ผลที่ได้เมื่อส่งสัญญาณที่เข้ารหัสแบบ BPSK และ QPSK ทำให้ได้ผลดังรูปที่ 2.13 และ 2.14



รูปที่ 2.13 ค่าคลาดเคลื่อนของการตรวจจับ (SER) กับ SNR ของสัญญาณที่เข้ารหัสแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ BPSK เมื่อไม่ทราบค่าของช่องสัญญาณให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ค่าคลาดเคลื่อนของการตรวจจับ (SER) กับ SNR ของสัญญาณที่เข้ารหัสแบบ QPSK เมื่อไม่ทราบค่าของช่องสัญญาณ

จากผลที่ได้นี้เป็นผลของค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณ โดยการใช้การ interpolation ในโดเมนเวลา แต่จาก [2] และ [6] แสดงว่าการประมาณค่าของช่องสัญญาณนั้นให้ผลดีที่สุดเมื่อประยุกต์ใช้การ interpolation แบบ Lowpass ในระบบ OFDM แบบทั่วไป

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ OFDM และเกี่ยวกับการประมาณค่าของช่องสัญญาณที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

[3] ระบุว่า การเคลื่อนที่ของระบบทำให้เกิด Doppler spread ซึ่งเป็นที่มาของ ICI ที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นในระบบที่ใช้การมอดูเลตมีความจำเป็นต้องกำจัดหรือลดผลกระทบของ ICI ที่มีต่อสัญญาณ โดยเฉพาะในระบบที่มีการส่งข้อมูลความเร็วสูง ผลของ ICI จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบ และปริมาณของช่องสัญญาณย่อยของระบบ OFDM

[1] และ [11] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ แบบ Sequential Interference Cancellation (SIC) detection มาใช้ในการลดผลกระทบของ ICI ที่มีไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อระบบ OFDM ทั่วไป และพบว่าวิธีที่นำมาใช้นั้นช่วยให้ระบบที่ได้รับผลกระทบจาก ICI ที่เกิดจากความถี่ดอปเปลอร์ลดลง แต่จะทำให้ระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น

[6] ระบุว่าในระบบ OFDM ทั่วไปนั้น การประมาณค่าของช่องสัญญาณที่เครื่องรับจะให้ผลที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพดีที่สุดในกรณีที่ใช้การประมาณแบบ Least Square (LS) Estimation นั้น ได้จากการประมาณที่ใช้การ interpolation แบบ lowpass



### บทที่ 3

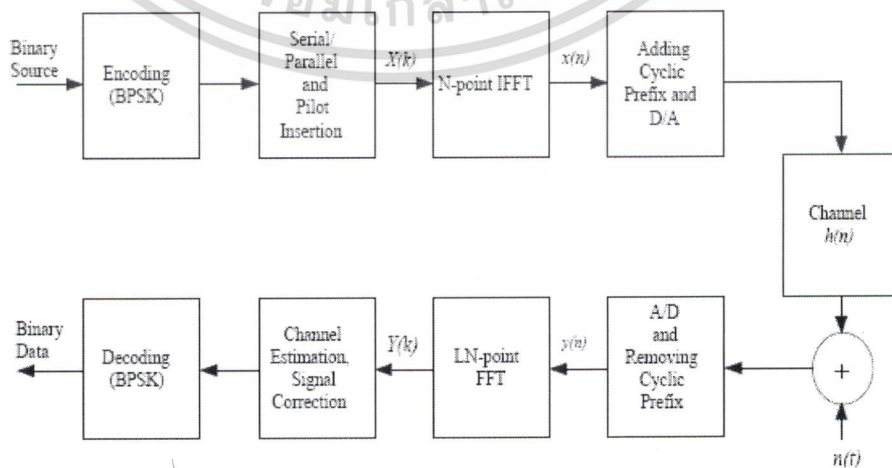
## วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่องการลดผลกระทบจาก Intercarrier Interference (ICI) ในระบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) สำหรับระบบตามมาตรฐาน IEEE 802.16e นี้ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยด้วยการใช้การจำลองระบบผ่านทางคอมพิวเตอร์เป็นหลัก โดยยึดหลักการทางทฤษฎีเพื่อให้ได้ผลการทดสอบและทดลองและนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE 802.16e ซึ่งใช้การมอดูเลตแบบ OFDM ที่เสนอใน [] กับระบบที่มีอยู่เดิมโดยใช้การจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB

ในรายงานฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลาในระบบ OFDM ที่ใช้ในมาตรฐาน IEEE 802.16e เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ lowpass ในระบบ OFDM แบบทั่วไป

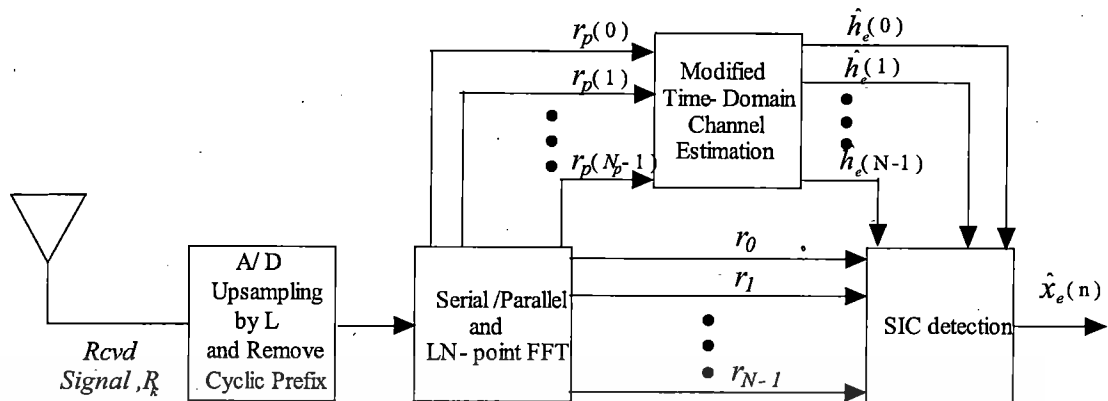
### 3.1 การจำลองระบบ

การจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB นี้เป็นวิธีมาตรฐานในการทดสอบและทดลองระบบที่ได้มาตรฐานเป็นที่ยอมรับกันในหมู่นักวิจัยทั่วไป ระบบที่ผู้วิจัยได้จำลองนี้เป็นระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลาในระบบ OFDM ที่ใช้ในมาตรฐาน IEEE 802.16e ซึ่งมีการจำลองระบบตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่จำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของการจำลองระบบที่เครื่องรับ

จากรูปที่ 3.2 การประมาณค่าของช่องสัญญาณเพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบสัญญาณแบบ SIC detection นั้นเกิดจากการส่งสัญญาณนำร่องไปในช่องสัญญาณที่เป็นช่องสัญญาณนำร่องเพื่อใช้ในการประมาณค่าของสัญญาณที่เหลือแล้วจึงนำสัญญาณที่ประมาณได้ไปใช้ในการตรวจจับสัญญาณแบบ SIC detection

### 3.2 ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง (Parameters)

การกำหนดค่าต่างๆ ในแบบจำลองนั้นเป็นดังนี้

1. จำนวนช่องสัญญาณย่อยที่ใช้คือ 1705 ช่องสัญญาณ ซึ่งก็คือจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่กำหนดในมาตรฐาน IEEE 802.16e ในการส่งสัญญาณของระบบ DVB ซึ่งการกำหนดจำนวนช่องสัญญาณนี้จะมีผลต่อจำนวนจุดของ IFFT/FFT ที่ใช้ในระบบที่จำลองนั่นเอง

2. การเข้ารหัสของสัญญาณเป็นแบบ Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) และ 16-Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM) และจากมาตรฐานที่กำหนดการเข้ารหัสสัญญาณที่มีการเข้าโค้ดแบบ convolutional code ก่อนการมอดูเลตสัญญาณให้เป็นสัญญาณ OFDM โดย convolutional code ที่ใช้นั้นมีอัตราของโค้ด เป็น  $R = \frac{1}{2}$  และมีค่า  $K = 7$

3. จำนวนของสัญญาณนำร่องนั้นจะใช้การใส่แบบ comb ซึ่งจะใส่ทุกๆ จำนวนช่องที่ถึงที่ในที่นี้ใส่ด้วยอัตราทุกๆ 8 ช่องสัญญาณ หรือ 1/8 นั่นเอง การใส่สัญญาณนำร่องนี้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิธที่ลดลง โดยการใส่สัญญาณนำร่องด้วยอัตรา 1/8 นี้จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง 12.5%

4. ค่าสูงสุดของความถี่ดอปเปลอร์ (Doppler frequency) นั้นเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิด ICI ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่รับได้ในระบบ OFDM เนื่องจากค่าสูงสุดของความถี่ดอปเปลอร์นี้เป็นสิ่งบ่งบอกถึงความเร็วของเครื่องรับหรือเครื่องส่งของระบบ ในการวิจัยนี้ได้ทำการ

สมมติค่าของค่าสูงสุดของความถี่คอปเปอเรเตอร์เป็น 35 Hz และ 70 Hz เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสูงสุดของความถี่คอปเปอเรเตอร์ที่มีผลต่อระบบที่จำลองนี้

5. ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR) เป็นค่าอัตราการรบกวนของสัญญาณจากภายนอกต่อสัญญาณที่ส่งไปในช่องสัญญาณ ซึ่งผู้วิจัยกำหนดให้เปลี่ยนแปลงได้จาก 0 ถึง 40 dB

### 3.3 การบันทึกผลการทดลอง

การบันทึกผลการทดลองจากระบบจำลองนี้ ผู้วิจัยบันทึกเป็นจำนวนข้อมูลที่ตรวจจับผิดพลาดเป็นบิต (Bit Error Rate) เปรียบเทียบกับค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR) ซึ่งข้อมูลที่สร้างขึ้นเพื่อส่งผ่านระบบนี้จะอยู่ในระดับจำนวนประมาณหนึ่งล้านข้อมูลเพื่อความถูกต้องแม่นยำทางสถิติ เมื่อบันทึกจำนวนข้อมูลที่คลาดเคลื่อนได้แล้วจึงนำมาคำนวณอัตราความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ค่า SNR ใดๆ ดังนั้นกราฟที่ได้จากการทดลองจะเป็นกราฟระหว่าง SNR กับ BER นั่นเอง ลักษณะกราฟที่ได้จะเป็นกราฟที่เรียกว่า Waterfall Curve กราฟที่ได้นี้สามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อสรุปประสิทธิภาพของของการประมาณค่าแบบต่างๆ ที่ใช้ในระบบอันได้แก่

1. ระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และทราบค่าของช่องสัญญาณ
2. ระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา
3. ระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา
4. ระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ lowpass

ผลการทดลองที่ได้นั้น ได้เสนออยู่ในบทที่ 4 ต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

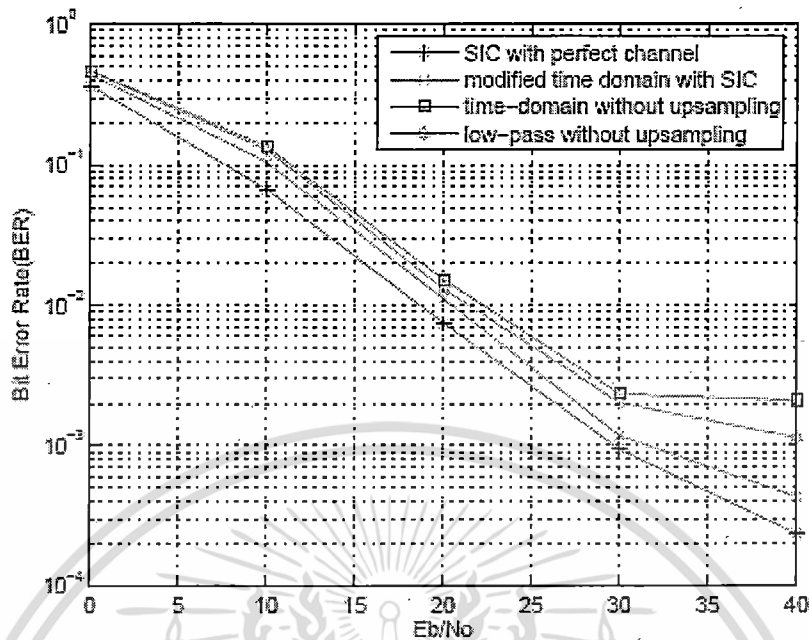
การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาวิธีการกำจัดหรือลดผลกระทบจาก ICI ที่มีต่อระบบในมาตรฐาน IEEE 802.16e และเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิจัยนี้ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบ SIC detection และการประมาณค่าช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลากับวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่เดิม เช่น การใช้ interpolation แบบ lowpass ในการประมาณค่าช่องสัญญาณซึ่งให้ผลดีที่สุดในการประมาณค่าช่องสัญญาณของระบบ OFDM ทั่วไป □

จากการจำลองระบบ ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 และกำหนดค่าต่างๆ ดังหัวข้อที่ 3.3 โดยใช้โปรแกรม MATLAB นั้น ผลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาวาดเป็นกราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบเมื่อมีค่าต่างๆ กัน โดยผลการทดลองสามารถแบ่งตามค่าสูงสุดของความถี่ดอปเปลอร์ คือ 35 Hz และ 70 Hz และการเข้ารหัสทั้งสองแบบอันได้แก่ BPSK (Binary Phase Shift Keying) และ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

#### 4.1 ผลการทดลองของแบบจำลองที่ค่าสูงสุดของความถี่ดอปเปลอร์ 35 Hz

รูปที่ 4.1 เป็นผลการทดลองของระบบ OFDM ที่มีช่องสัญญาณ 1705 ช่องสัญญาณและมีค่าสูงสุดของความถี่ดอปเปลอร์ 35 Hz โดยมีการเข้ารหัสแบบ BPSK โดยมีการประมาณค่าของช่องสัญญาณแบบต่างๆ ได้แก่

1. ระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และทราบค่าของช่องสัญญาณ
2. ระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา
3. ระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา
4. ระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ lowpass

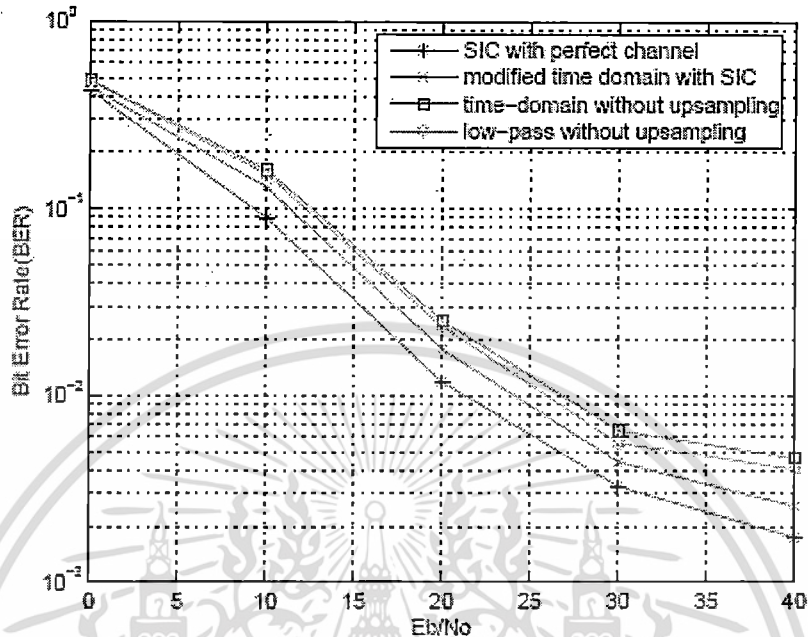


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงประสิทธิภาพในเชิง SNR และ BER ของระบบ OFDM ที่ความถี่ออปเลเตอร์ 35 Hz และเข้ารหัสแบบ BPSK

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ผลการทดลองที่ได้จากระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และทราบค่าของช่องสัญญาณ (perfect channel estimation) เป็นระบบที่ให้ผลดีที่สุดนั่นคือมีความผิดพลาดในการส่งสัญญาณน้อยที่สุด เนื่องจากทราบค่าของช่องสัญญาณ แต่หากไม่ทราบค่าของช่องสัญญาณและต้องมีการประมาณค่าของช่องสัญญาณเพื่อนำมาช่วยในการตรวจจับสัญญาณนั้น พบว่าการระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดระหว่างระบบแบบที่ประยุกต์ใช้ SIC detection ร่วมกับการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา และระบบที่ประยุกต์ใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ lowpass ซึ่งเคยเป็นระบบที่ให้ผลดีที่สุดในระบบแบบ OFDM ทั่วไป

ส่วนในรูปที่ 4.2 เป็นผลการทดลองของระบบ OFDM ที่มีช่องสัญญาณ 1705 ช่องสัญญาณ และมีค่าสูงสุดของความถี่ออปเลเตอร์ 35 Hz โดยมีการเข้ารหัสแบบ QPSK โดยมีการประมาณค่าของช่องสัญญาณแบบต่างๆ เช่นเดียวกับกราฟในรูปที่ 4.1 ผลที่ได้เป็นในทำนองเดียวกันกับระบบที่มีการเข้ารหัสแบบ BPSK นั่นคือ ระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และทราบค่าของช่องสัญญาณ (perfect channel estimation) เป็นระบบที่ให้ผลดีที่สุด ในส่วนของระบบที่ไม่ทราบค่าของช่องสัญญาณและต้องมีการประมาณค่าของช่องสัญญาณเพื่อนำมาช่วยในการตรวจจับสัญญาณนั้น พบว่าการระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดและระบบที่ประยุกต์ใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ

lowpass ให้ผลเป็นที่สอง และสุดท้ายคือระบบแบบที่ประยุกต์ใช้ SIC detection ร่วมกับการประมาณค่าของช่องสัญญาณ โดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา

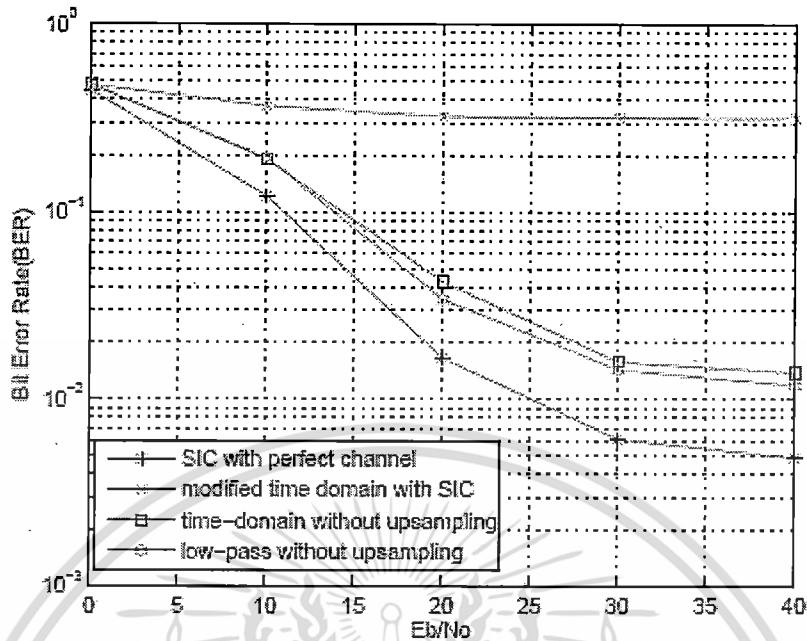


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพในเชิง SNR และ BER ของระบบ OFDM ที่ความถี่คอปเปอเรอร์ 35 Hz และเข้ารหัสแบบ QPSK

แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างประเภทของการเข้ารหัสแบบ BPSK และ QPSK แล้ว รูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าการเข้ารหัสแบบ BPSK จะให้ผลที่ดีกว่าการเข้ารหัสแบบ QPSK ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีนั่นคือ การเข้ารหัสแบบ QPSK มีรูปแบบของสัญญาณที่สามารถเกิดความผิดพลาดในการตรวจจับสัญญาณได้มากกว่าเนื่องจากการส่งสัญญาณครั้งละสองบิต ในขณะที่การเข้ารหัสแบบ BPSK เป็นการส่งสัญญาณทีละบิตเดียวเท่านั้น

กราฟสุดท้ายในการทดลองที่ความถี่คอปเปอเรอร์ 35 Hz แสดงในรูปที่ 4.3 เป็นกราฟที่แสดงประสิทธิภาพของระบบที่มีการเข้ารหัสแบบ 16-QAM ซึ่งเป็นการเข้ารหัสแบบที่มีการส่งข้อมูลครั้งละ 4 บิตต่อหนึ่งครั้ง ผลที่ได้จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา ซึ่งเคยเป็นระบบที่ให้ผลดีที่สุดในระบบแบบที่ต้องมีการประมาณค่านั้น มีประสิทธิภาพลดลงไปเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพแย่มากที่สุด นั่นเป็นผลมาจาก การส่งข้อมูลครั้งละหลายบิตซึ่งส่งผลให้การตัดสินใจในการตรวจจับข้อมูลผิดพลาดได้ง่าย และมีผลต่อเนื่องทำให้การคำนวณปริมาณ ICI ที่มีผลต่อช่องสัญญาณข้างเคียงมีความผิดพลาดด้วย ดังนั้นค่าความผิดพลาดเหล่านี้จะเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้การตรวจจับสัญญาณในช่องสัญญาณข้างเคียงผิดพลาดตามไปด้วย กรณีแบบนี้เรียกว่า ความผิดพลาดสะสม (Accumulative Error)

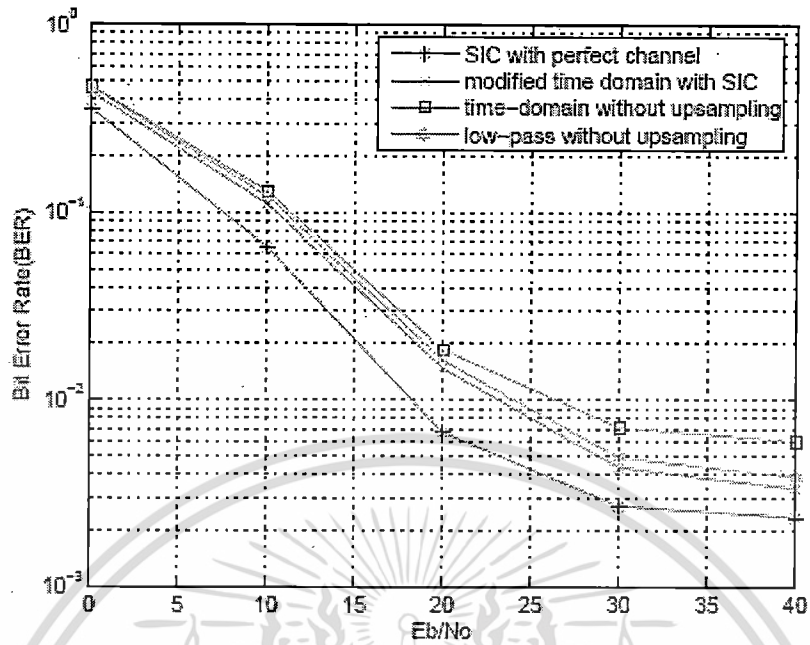
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



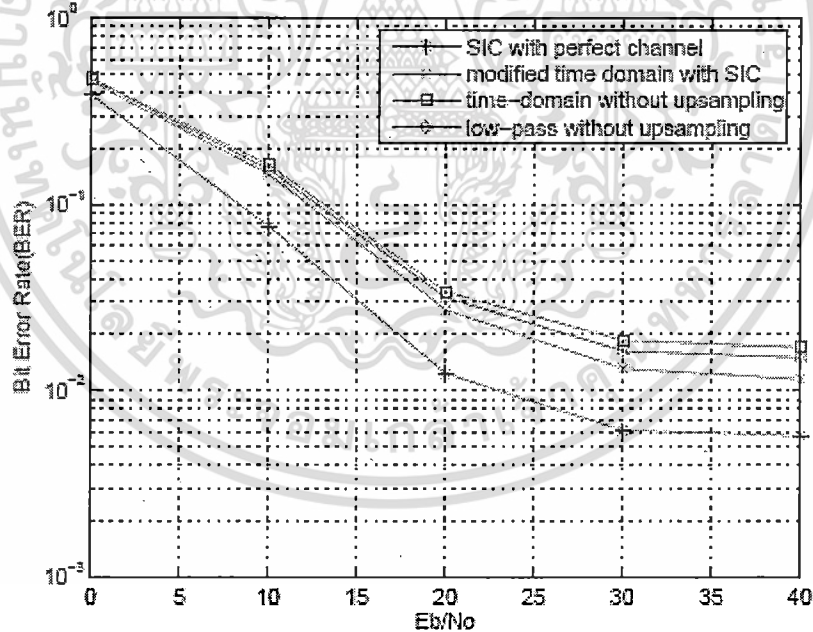
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพในเชิง SNR และ BER ของระบบ OFDM ที่ความถี่คอปเปอเรอร์ 35 Hz และเข้ารหัสแบบ 16-QAM

#### 4.2 ผลการทดลองของแบบจำลองที่ค่าสูงสุดของความถี่คอปเปอเรอร์ 70 Hz

ในรูปที่ 4.4 เป็นผลการทดลองของระบบ OFDM ที่มีช่องสัญญาณ 1705 ช่องสัญญาณและมีค่าสูงสุดของความถี่คอปเปอเรอร์ 70 Hz โดยมีการเข้ารหัสแบบ BPSK โดยมีการประมาณค่าของช่องสัญญาณแบบต่างๆ เช่นเดียวกับกราฟในรูปที่ 4.1 ผลที่ได้เป็นในทำนองเดียวกันกับระบบที่มีค่าความถี่คอปเปอเรอร์ 35 Hz นั่นคือ ระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และทราบค่าของช่องสัญญาณ (perfect channel estimation) เป็นระบบที่ให้ผลดีที่สุด และรองลงมาคือการระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา และระบบที่ประยุกต์ใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ lowpass ให้ผลเป็นอันดับที่สาม และสุดท้ายคือระบบแบบที่ประยุกต์ใช้ SIC detection ร่วมกับการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพในเชิง SNR และ BER ของระบบ OFDM ที่ความถี่คอปเปอเรเตอร์ 70 Hz และเข้ารหัสแบบ BPSK



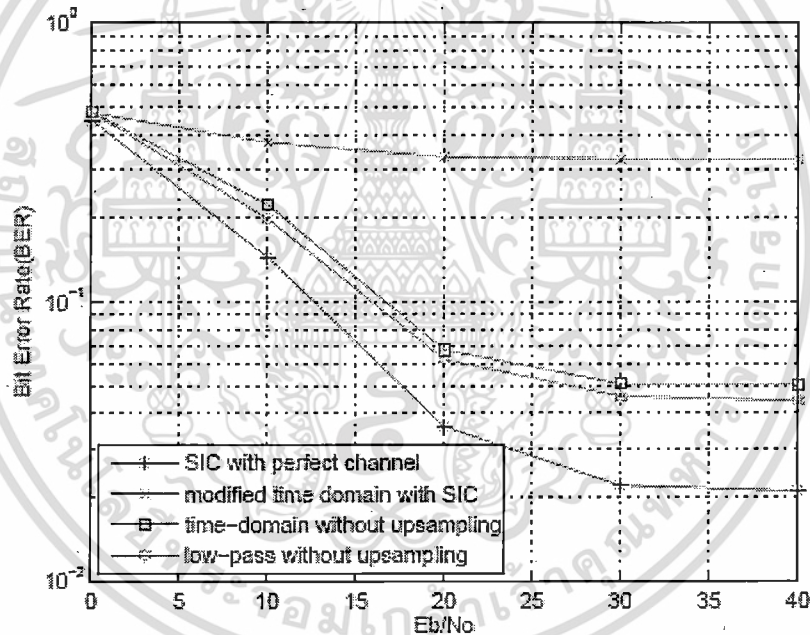
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงประสิทธิภาพในเชิง SNR และ BER ของระบบ OFDM ที่ความถี่คอปเปอเรเตอร์ 70 Hz และเข้ารหัสแบบ QPSK

ในรูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลองของระบบ OFDM ที่มีช่องสัญญาณ 1705 ช่องสัญญาณ และมีค่าสูงสุดของความถี่คอปเปอเรเตอร์ 70 Hz โดยมีการเข้ารหัสแบบ QPSK โดยมีการประมาณค่าของช่องสัญญาณแบบต่างๆ เช่นเดียวกับกราฟในรูปที่ 4.3 ผลที่ได้เป็นในทำนองเดียวกันกับระบบที่มีการเข้ารหัสแบบ BPSK ที่แสดงในรูปที่ 4.3 นั่นคือ ระบบที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการ sampling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมกับ SIC detection และทราบค่าของช่องสัญญาณ (perfect channel estimation) เป็นระบบที่ให้ผลดีที่สุด และรองลงมาคือระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณ โดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา และระบบที่ประยุกต์ใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณ โดยใช้การ interpolation แบบ lowpass ให้ผลเป็นอันดับที่สาม และสุดท้ายคือระบบแบบที่ประยุกต์ใช้ SIC detection ร่วมกับการประมาณค่าของช่องสัญญาณ โดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา

แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างประเภทของการเข้ารหัสแบบ BPSK และ QPSK แล้ว รูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าการเข้ารหัสแบบ BPSK จะให้ผลที่ดีกว่าการเข้ารหัสแบบ QPSK ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีนั้นคือ การเข้ารหัสแบบ QPSK มีรูปแบบของสัญญาณที่สามารถเกิดความผิดพลาดในการตรวจจับสัญญาณได้มากกว่าเนื่องจากการส่งสัญญาณครั้งละสองบิต ในขณะที่การเข้ารหัสแบบ BPSK เป็นการส่งสัญญาณทีละบิตเท่านั้น



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงประสิทธิภาพในเชิง SNR และ BER ของระบบ OFDM ที่ความถี่ดอปเปลอร์ 35 Hz และเข้ารหัสแบบ 16-QAM

ในทำนองเดียวกันกับกรณีของระบบ OFDM ที่ความถี่ดอปเปลอร์ 35 ในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า การเข้ารหัสแบบ 16-QAM ทำให้ประสิทธิภาพของระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณ โดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา ซึ่งเคยเป็นระบบที่ให้ผลดีที่สุดในระบบแบบที่ต้องการมีการประมาณค่านั้น มีประสิทธิภาพลดลงไปเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพแย่งที่สุด อันเป็นเหตุมาจากความผิดพลาดสะสมนั่นเอง

### 4.3 ผลกระทบของความถี่คอปเปอเรเตอร์ต่อประสิทธิภาพของระบบ

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลจากรูปที่ 4.1 และ 4.3 ซึ่งเป็นระบบที่มีช่องสัญญาณ 1705 ช่องสัญญาณและมีการเข้ารหัสแบบ BPSK ที่เหมือนกัน แต่มีค่าสูงสุดของความถี่คอปเปอเรเตอร์ที่แตกต่างกัน จะพบว่า ระบบที่มีค่าคอปเปอเรเตอร์ที่ต่ำกว่าจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า ซึ่งสามารถเห็นได้จาก Error floor ที่ต่ำกว่านั่นเอง

ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 เกิดในทำนองเดียวกันคือ ระบบที่มีความถี่คอปเปอเรเตอร์ที่ต่ำกว่าจะให้ผลที่ดีกว่า



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาวิธีการกำจัดหรือลดผลกระทบจาก ICI ที่มีต่อระบบในมาตรฐาน IEEE 802.16e ซึ่งใช้การมอดูเลตแบบ OFDM ที่มีสภาพแวดล้อมที่มีการเคลื่อนที่ของเครื่องรับหรือเครื่องส่ง และเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิจัยนี้ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบ SIC detection และการประมาณค่าช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลากับวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่เดิม อันได้แก่ การใช้ interpolation แบบ lowpass ในการประมาณค่าของช่องสัญญาณซึ่งให้ผลดีที่สุดในการประมาณค่าของสัญญาณของระบบ OFDM ทั่วไป [2, 6]

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยครั้งนี้พบว่าเมื่อนำวิธีที่ใช้ในทฤษฎีการ Sampling ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบ SIC detection และการประมาณค่าช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา ประสิทธิภาพของการตรวจจับสัญญาณน่าจะมีแนวโน้มมากขึ้นกว่าการใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณเพียงอย่างเดียว ดังเห็นได้จากผลการทดลองในบทที่ 4 ที่แสดงให้เห็นว่า ระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ Sampling ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบ SIC detection และการประมาณค่าช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ได้ใช้ทฤษฎีการ Sampling แต่ใช้การ interpolation แบบ lowpass และให้ผลดีกว่าระบบที่ใช้ทฤษฎีการ Sampling เพียงอย่างเดียว

นอกจากนี้จากการทดลองยังสามารถสรุปได้ว่าความถี่ดอปเปลอร์มีผลกระทบต่อระบบแบบ OFDM นั่นคือเมื่อความถี่ดอปเปลอร์มีค่ามากจะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าไปด้วยหรืออีกนัยหนึ่ง หากเครื่องรับหรือเครื่องส่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่าความผิดพลาดในการส่งสัญญาณจะมากตามไปด้วยเช่นกัน อันเป็นผลมาจากปริมาณ ICI ที่มากขึ้น ดังนั้นวิธีที่เสนอในการวิจัยครั้งนี้จึงเป็นอีกหนึ่งทางออกในการลดทอนผลกระทบจาก ICI ที่มีต่อระบบ OFDM ที่ใช้ในมาตรฐาน IEEE 802.16e

อย่างไรก็ตาม ระบบที่เสนอนี้มีข้อเสียคือระบบมีความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากจะต้องเพิ่มขนาดของ FFT ที่ใช้ในการดีมอดูเลตสัญญาณ OFDM เพื่อทำการเพิ่มการ Sampling และการใช้ SIC detection ก็มีความซับซ้อนซึ่งเกิดการคำนวณมากขึ้น ทำให้ระบบที่เสนอนี้ต้องมีการลงทุนมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ ในระบบที่มีการเข้ารหัสที่มีจำนวนบิตในการเข้ารหัสมากกว่า 2 บิต อาจมีข้อจำกัดอื่นๆ อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อครั้ง เช่น การเข้ารหัสแบบ 16-QAM ซึ่งมีการเข้ารหัสจำนวน 4 บิตต่อครั้ง ระบบจะเกิดความผิดพลาดสะสม (Accumulative Error) ขึ้น ซึ่งเป็นข้อเสียของการตรวจจับสัญญาณแบบ SIC detection ทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าต่ำสุดดังแสดงในบทที่ 4

## 5.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยนี้ดังต่อไปนี้

1. จากการวิจัยพบว่าการเข้ารหัสแบบที่มีการเข้ารหัสครั้งละจำนวนมากกว่า 2 บิตต่อครั้งจะทำให้เกิดความผิดพลาดสะสม (Accumulative Error) ซึ่งส่งผลให้ระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา ทำงานแยกลงมากนั้น เกิดจากความตรวจจับสัญญาณที่ไม่แม่นยำอันสืบเนื่องมาจากการประมาณค่าของช่องสัญญาณที่ผิดพลาดจากการคำนวณปริมาณ ICI ที่มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณข้างเคียง ดังนั้นหากประยุกต์ใช้วิธีการประมาณค่าของช่องสัญญาณที่มีความแม่นยำมากกว่าวิธี Least Square Estimation เช่น การประมาณค่าช่องสัญญาณแบบ Minimum Mean Square Estimation (MMS Estimation) จะทำให้การตรวจจับมีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับระบบที่มีการเข้ารหัสที่มีจำนวนข้อมูลที่ส่งมากกว่า 2 บิตต่อครั้ง
2. จากการวิจัยพบว่า ระบบที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลานั้นให้ผลที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม ระบบที่ประยุกต์ใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ lowpass โดยไม่มีการใช้ทฤษฎีการ Sampling มาช่วยลดผลกระทบของ ICI นั้นให้ผลดีที่สุดในบรรดา ระบบต่างๆ ไป ดังนั้นหากนำทฤษฎีของการ Sampling มาใช้ร่วมกับการประมาณค่าช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ lowpass ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ OFDM ทั่วไปได้

## บรรณานุกรม

- [1] P. Chayratsami and M. Wickert, "Novel Mitigation Techniques for an OFDM in a Doppler Spread Channel," 2004 IEEE Radio and Wireless Conference (2004 RAWCON), pp. 395-398, 2004.
- [2] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Channel Estimation Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM System," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 48, No. 3, September 2002.
- [3] Mark Russell and Gordon L. Stuber, "Interchannel Interference Analysis of OFDM in a Mobile Environment," 1995 IEEE 45th Vehicular Technology Conference, pp. 820-824, 1995.
- [4] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, and John R. Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, second edition, Prentice Hall, 1998.
- [5] Richard Van Nee and Ramjee Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House Publishers, 2000.
- [6] Meng-Han Hsieh and Che-Ho Wei, "Channel Estimation for OFDM Systems Based on Comb-Type Pilot Arrangement in Frequency Selective Fading Channels," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 44, No. 1, February 1998.
- [7] R. E. Ziemer and R. L. Peterson, *Introduction to Digital Communication*, Second Edition, Prentice Hall, 2000.
- [8] P.A. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 11, pp. 360-383, December 1963.
- [9] F. Tufvesson and T. Maseng, "Pilot Assisted Channel Estimation for OFDM in Mobile Cellular Systems," *Proceeding of IEEE VTC 47<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference*, vol. 3, pp. 1639-1643, 1997.
- [10] A. Dowler, A. Doufexi and A. Nix, "Performance Evaluation of Channel Estimation Techniques for a Mobile Fourth Generation Wide Area OFDM System," *IEEE*, 2002.
- [11] P. Chayratsami and M. Wickert, "Novel Mitigation Techniques for an OFDM in a Doppler Spread Channel part II," *Proc. 2005 IASTED international conference on Networks and Communications Systems*, pp. 314-318, April 2005.
- [12] U.S. Jha and R. Prasad, *OFDM Towards Fixed and Mobile Broadband Wireless Access*, Artech House, Boston, MA, 2007



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการวิจัย

โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยโปรแกรมหลักๆ จำนวน 3 โปรแกรมดังนี้คือ

1. ฟังก์ชัน codedOFDM1.m เป็นฟังก์ชันคำนวณหาค่าความผิดพลาดของการรับส่งข้อมูลของระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และทราบค่าของช่องสัญญาณ
2. ฟังก์ชัน codedOFDMtime.m เป็นฟังก์ชันคำนวณหาค่าความผิดพลาดของการรับส่งข้อมูลของระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling และไม่ใช่ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณ โดยการใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา
3. ฟังก์ชัน codedOFDMlowpass.m เป็นฟังก์ชันคำนวณหาค่าความผิดพลาดของการรับส่งข้อมูลของระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยการใช้การ interpolation แบบ lowpass



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. โปรแกรมการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของการรับส่งข้อมูลของระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการ sampling ร่วมกับ SIC detection และทราบค่าของช่องสัญญาณ ที่สภาพแวดล้อมต่างๆ กัน โปรแกรมนี้สามารถปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ได้ เช่น ค่าของความถี่คอปเปลอร์ จำนวนของช่องความถี่ย่อย อัตราเร็วของสัญญาณที่ส่ง อัตราการ Sampling ประเภทของการเข้ารหัส

```
function ber = codedOFDM1(N,M,N1,N2,Nsamp,depth,rr,inl,fd_Ts,Rs,fc,modt,fd);
```

```
% Coded OFDM with RCPC of rate 3/4 in perfect channel estimation
% where ber = symbol error rate (SER)
% N = number of messages, N = 118272 for this function
% M = number of signal space, M = 2 for BPSK, M = 4 for QPSK
% N1 = number of iteration
% N2 = number of subcarriers in OFDM system
% Nsamp = sampling factor
% depth = interleaver size
% rr = option of SIC, rr = 1 for SIC detection
% inl = option for interleaver, inl = 1 for applying interleaver
% fd_Ts = a ratio of Doppler frequency and a symbol rate
% Rs = data rate, set to 3e6 symbols/second for this dissertation
% fc = carrier frequency, set to 850 MHz
```

```
w1 = floor(N/N2);
```

```
% coding parameters
```

```
Rc = 1/2; %3/4; % coding rate
%Rp = 1/2/Rc; % punctured rate
tcode = [171 133]; % code generator
trellis = poly2trellis(7,tcode); % define trellis code
tblen = 96; % traceback length
v = 3e8*Rs/fc/1e6*fd_Ts*3600/1000; % velocity of the verhicle in km/hr.
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Warm up the channel for OFDM system
```

```
Chan = WSSUS_chan(v, fc, Rs/N2, N2*Nsamp, [0], [0], [-100], 1);
Chan1 = WSSUS_warm(Chan);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Create the H matrix
```

```
h1 = 1:N2-2;
h2 = -1:-1:-(N2-2);
hh1 = exp(j*2*pi/Nsamp/N2*[0:Nsamp*N2-1]*h1); %E+
hh2 = exp(j*2*pi/Nsamp/N2*[0:Nsamp*N2-1]*h2); % E-
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for n = 1:N1;
```

```
clear transmit sig_noise fft_out msg bgen msg_out;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากพบการผิดเพี้ยนหรือข้อผิดพลาด กรุณาแจ้งไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
bgen = randint(w1*N2,1,M); % input symbol (0 to M-1)
```

```
msg = bgen;
```

```

for bg = 0:log2(M)-1 % convert to input bits (0 and 1)
    msg(:,bg+1)= bitget(bgen,log2(M)-bg);
end;
msg1 = msg';
msg = msg1(:);
code = convenc(msg,trellis); % generate codeword

%      % Puncturing codes
%
%      code(3:6:end) = [];
%      code(5:5:end) = [];
x1 = code.';

% interleaver
if in1 ==0;

    x1 = x1;
else
    mm = sqrt(depth);
    [x1,n1] = binterleaver(x1,depth,mm);%(x1,1024,32);
    x1 = x1.';
end;
% convert from binary to decimal

x1= bin2dec((reshape(char(x1+'0'),log2(M),[[]]'))); % MPSK signal from
0 to M-1

%transmit = MPSK1(x1,M);
if modt == 1
    transmit = pskmod(x1,M,pi/M);% MPSK signals
else
    transmit = qammod(x1,M); % qam signals
end;

transmit1 = transmit;
q1 =
reshape(transmit1(1:floor(length(x1)/N2)*N2),N2,floor(length(x1)/N2));
q1_ifft = ifft(q1,N2*Nsamp); % OFDM Symbols
transmit3 = q1_ifft(:);
if fd==1
    %fading channel

    [x_fade,Chan1,Wgts] = WSSUS_wgts(transmit3,Chan1);
    Wgts1 = reshape(Wgts,N2*Nsamp,length(Wgts)/N2/Nsamp);

    % Create multiplicative noise

    Wgts2 = mean(Wgts1,1);
    W = repmat(Wgts2,N2,1);
    transmit_fade = reshape(x_fade,Nsamp*N2,length(x_fade)/Nsamp/N2);
    % transmit4 = x_fade;
    transmit4 = [real((x_fade(:)).'); imag((x_fade(:)).')];
else
    transmit4 = [real(transmit3. '); imag(transmit3. ')];
end;
% Add Noise

for SNR = 0:10:40;
    %sig_noise1 = awgn(transmit4,SNR,'measured');

```

```

Noise =
noisel(q1,SNR,length(transmit4),M)/sqrt(N2)/sqrt(Nsamp)*sqrt(1/Rc);
sig_noise = transmit4 + Noise;
sig_noisel = sig_noise(1,:)+j*sig_noise(2,:);

% At the receiver

sig_noise =
reshape(sig_noisel,N2*Nsamp,length(sig_noisel)/N2/Nsamp);
q1_fft = fft(sig_noise,N2*Nsamp); % demodulate OFDM signal by
N2*Nsamp-fft implementation
q1_fft = q1_fft(1:N2,:);

if rr == 0; % no recursive detection
    if fd==1

        q1_fft = q1_fft(1:N2,:)./W; % Use only N2*w1 received
                                signals
    else
        q1_fft = q1_fft(1:N2,:);
    end;
    if modt == 1
        I1 = pskdemod(q1_fft,M,pi/M);
    else
        I1 = qamdemod(q1_fft,M);
    end;
    I = I1(:);
    fft_out1 = I;
else
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Use recursive detection

I = SIC(Wgts1,hh1,hh2,N2,Nsamp,W,q1_fft,M,modt);
fft_out1 = I;

end;

% end;

% convert from decimal to binary
msg_out = [];
fft_out = fft_out1(:);
for bg1 = 0:log2(M)-1 % convert to input bits (0 and 1)
    msg_out(:,bg1+1) = bitget(fft_out,log2(M)-bg1);
end
msg_out1 = msg_out';
msg_out=msg_out1(:);
% Deinterleaver

if inl == 0;

    fft_out = msg_out;
else
    fft_out =
msg_out(1:floor(length(fft_out1(:))/depth)*depth*log2(M));

```

```

[fft_out,n1] = bdeinterleaver(fft_out,depth,mm);

end;

% Depuncture

zz1 = real(fft_out);
z2 = zz1;
% z2 = zeros(length(zz1)*3/2,1);
% z2(1:6:end) = zz1(1:4:end);
% z2(2:6:end) = zz1(2:4:end);
% z2(4:6:end) = zz1(3:4:end);
% z2(5:6:end) = zz1(4:4:end);
decode1 = vitdec(z2,trellis,tblen,'cont','hard');

biterror(n,SNR+1) = sum(abs(sign(msg(1:length(decode1)-tblen)-
decode1(tblen+1:end)))));

end;
end;

ber = sum(biterror)/(length(decode1)-tblen)/N1;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โปรแกรมการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของการรับส่งข้อมูลของระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการ sampling และไม่ใช่ทฤษฎีการ sampling ร่วมกับ SIC detection และการประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบโดเมนเวลา ที่สภาพแวดล้อมต่างๆ กัน โปรแกรมนี้สามารถปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ได้ เช่น ค่าของความถี่ต่อเฮิรตซ์ จำนวนของช่องความถี่ย่อย อัตราเร็วของสัญญาณที่ส่ง อัตราการ Sampling ประเภทของการเข้ารหัส

```
function ber=codedOFDMtime(NN,M,N1,N2,Nsamp,depth,inl,fd_Ts,Rs,fc,plspace);
```

```
% Coded OFDM with SIC detection employing time-domain estimation
% Coded OFDM with RCPC of rate 3/4 in channel estimation
% where ber = symbol error rate (SER)
% NN = number of messages, N = 118272 for this function
% M = number of signal space, M = 2 for BPSK, M = 4 for QPSK
% N1 = number of iteration
% N2 = number of subcarriers in OFDM system
% Nsamp = sampling factor
% depth = interleaver size
% inl = option for interleaver, inl = 1 for applying interleaver
% fd_Ts = a ratio of Doppler frequency and a symbol rate
% Rs = data rate, set to 3e6 symbols/second
```

```
w1 = floor(NN/N2);
```

```
plnumber = N2/plspace;
```

```
% coding parameters
```

```
Rc = 3/4; % coding rate
```

```
Rp = 1/2/Rc; % punctured rate
```

```
tcode = [171 133]; % code generator
```

```
trellis = poly2trellis(7,tcode); % define trellis code
```

```
tblen = 96; % traceback length
```

```
v = 3e8*Rs/fc/1e6*fd_Ts*3600/1000; % velocity of the vehicle in km/hr.
```

```
m = 0:M-1;
```

```
if M == 2;
```

```
    i_output = cos((2*m'-1)*pi/M-pi/4);
```

```
    q_output = sin((2*m'-1)*pi/M-pi/4);
```

```
else
```

```
    i_output = cos((2*m'-1)*pi/M);
```

```
    q_output = sin((2*m'-1)*pi/M);
```

```
end;
```

```
decode = [i_output q_output];
```

```
% Pilot Signal
```

```
pilot_1 = [0; M/2];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการ  $\text{pilots} = \cos((2*\text{pilot}_1-1)*\pi/M-\pi/4) + j*\sin((2*\text{pilot}_1-1)*\pi/M-\pi/4);$

```
else
```

```
    pilots = cos((2*pilot_1+1)*pi/M)+j*sin((2*pilot_1+1)*pi/M);
```

```
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Warm up the channel for OFDM system
```

```
Chan = WSSUS_chan(v, fc, Rs/N2, N2*Nsamp, [0], [0], [-100], 1);  
Chan1 = WSSUS_warm(Chan);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Create the H matrix
```

```
h1 = 0:N2/2-1;  
h2 = 0:-1:-(N2/2-1);  
hh1 = [0:N2-1]'*h1;  
hh2 = [0:N2-1]'*h2;  
h31 = [-(N2/2):-1:-(N2-2) 0];  
h32 = [-(N2/2):-2 0];  
h41 = [(N2/2):-1:2 0];  
h42 = [N2/2:N2-2 0];  
hh31 = [0:N2-1]'*h31;  
hh32 = [0:N2-1]'*h32;  
hh41 = [0:N2-1]'*h41;  
hh42 = [0:N2-1]'*h42;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for n = 1:N1;
```

```
    clear transmit sig noise fft out;  
    msg = randint(wl*N2,1,2,94384);  
    code = convenc(msg,trellis); % generate codeword
```

```
    %puncturing codes
```

```
    code(3:6:end) = [];  
    code(5:5:end) = [];  
    x1 = code.');
```

```
    % interleaver  
    if in1 ==0;
```

```
        x1 = x1;
```

```
    else
```

```
        mm = sqrt(depth);  
        [x1,n1] = binterleaver(x1,depth,mm); % (x1,1024,32);  
        x1 = x1.');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end;

transmit = MPSK1(x1,M); % MPSK signals
transmit1 = -(transmit(1,:)+j*transmit(2,:)); %*exp(-j*pi/4);

q1 = reshape(transmit1(1:floor(length(x1)/N2)*N2),N2-
plnumber, floor(length(x1)/log2(M)/(N2-plnumber)));
pandom1 = repmat([1:plspace]',1,length(q1)); % use for pilot random
comparison

% Insert Pilot Signals

pandom = repmat(zeros(1,length(q1))*plspace,plspace,1);
[YY,plocation] = min(abs(pandom-pandom1)); % Pilot location
inserted
plocation1 = plocation(1,:);
Xp = repmat(pilots,plnumber/2,length(q1)); % transmitted pilot
signals; use for channel estimation
inputpilot = repmat(pilot_1,plnumber/2,length(q1)); % pilot input
signal.
qpilot = zeros(N2,length(q1));

for plindex1 = 1:plnumber;

qpilot((plindex1-1)*plspace+1,:) = Xp(plindex1,:);
qpilot((plindex1-1)*plspace+2:(plindex1-1)*plspace+plspace,:) =
q1((plindex1-1)*(plspace-1)+1:(plindex1-1)*(plspace-1)+plspace-
1,:);

end;

q1 = qpilot;
q1_ifft = ifft(q1,N2*Nsamp); % OFDM Symbols

%fading channel

transmit3 = q1_ifft(:);
[x_fade,Chan1,Wgts] = WSSUS_wgts(transmit3,Chan1);
transmit_fade = reshape(x_fade,Nsamp*N2,length(x_fade)/Nsamp/N2);
transmit4 = [real((x_fade(:)).'); imag((x_fade(:)).')];

% Add Noise

for SNR = 40:5:40;

Noise =
noise1(SNR,length(transmit4)/log2(M),M)/sqrt(N2)/sqrt(Nsamp)*sqrt
(1/Rc);
sig_noise = transmit4 + Noise;
sig_noise1 = sig_noise(1,:)+j*sig_noise(2,:);
% At the receiver

```

```

sig_noise =
reshape(sig_noisel,N2*Nsamp,length(sig_noisel)/log2(M)/N2/Nsamp);
q1_fft = fft(sig_noise,N2*Nsamp); % demodulate OFDM signal by
N2*Nsamp-fft implementation
q1_fft = q1_fft(1:N2,:);

% ***** start doing channel estimation with AWGN channel *****

Yp = [];
for plindex = 1:length(q1);

    Yp1 = q1_fft(:,plindex); % received signal
    Yp2 = Yp1(plocation1(plindex):plspace:end); % received
    pilot signal
    Yp = [Yp Yp2];
end;
Hp = Yp./Xp; % Channel estimation for pilot signal

% Interpolation Hp by using zero padding
for plnumberindex = 1:plnumber;

    plocation(plnumberindex,:) = plocation(1,:) + (plnumberindex-
1)*plspace;
end;

He = zeros(N2,length(q1));
for plindex1 = 1:length(q1);
    for plnumberindex1 = 1:plnumber/2

        He(plnumberindex1:N2-(2*plnumberindex1-1):N2-
plnumberindex1+1,plindex1) = Hp(plnumberindex1:plnumber-
(2*plnumberindex1-1):plnumber-plnumberindex1+1,plindex1);

    end;
end;

he = ifft(He,N2); % Channel estimation

% ***** multiplicative noise *****

Wgts2 = mean(he,1);
W = repmat(Wgts2,N2,1);

% Use recursive detection

I = [];

for m1 = 1:length(q1);

    % Create the H matrix
    h = he(:,m1);
    xx = h.*exp(j*2*pi*hh1/N2);
    yy = h.*exp(j*2*pi*hh2/N2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

```

zz = toeplitz(xx,yy)-N2*diag(W(1:N2/2,m1));
zz11 = triu(zz);
zz22 = tril(zz);
xx31 = h.'*exp(j*2*pi*hh31/N2);
xx32 = h.'*exp(j*2*pi*hh32/N2);
zzz1 = fliplr(toeplitz(xx32,xx31));
zz12 = fliplr(triu(zzz1-diag(diag(zzz1))));
yy31 = h.'*exp(j*2*pi*hh41/N2);
yy32 = h.'*exp(j*2*pi*hh42/N2);
zzz2 = flipud(toeplitz(yy32,yy31));
zz21 = flipud(triu(zzz2-diag(diag(zzz2))));
H = [zz11 zz12; zz21 zz22]/(-N2)+diag(ones(N2,1));
% compensate received signal by multiplicative noise
z = q1_fft(:,m1).';

for m2 = 0:N2/2-1

    z_comp = [z(m2+1)/W(m2+1,m1) z(N2-m2)/W(N2-m2,m1)];
    % start detection from edge subcarriers
    detect1 = decode*[real(z_comp); imag(z_comp)];
    [Y1,I1] = max(detect1);
    I1 = I1-1;
    output(m2+1) = I1(1);
    output(N2-m2) = I1(2);

    if M == 2;
        i_a_detect = cos((2*I1-1)*pi/M-pi/4);
        q_a_detect = sin((2*I1-1)*pi/M-pi/4);
    else
        i_a_detect = cos((2*I1-1)*pi/M);
        q_a_detect = sin((2*I1-1)*pi/M);
    end;

    a_detect= i_a_detect+j*q_a_detect;
    z(m2+1) = a_detect(1);
    z(N2-m2) = a_detect(2);

    if m2+1<=N2/2-1

        z(m2+2) = z*H(:,m2+2);
        z(N2-m2-1)=z*H(:,N2-m2-1);

    else
        end;
    end;

    I = [I output];

end;

qq1 = I;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ qq1(1:plspace:end) = []; และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fft_out = 2*qq1-1;

% Deinterleaver

if inl == 0;

    fft_out = fft_out;

else

    [fft_out,n1] = bdeinterleaver(fft_out,depth,mm);

end;

zz1 = real(fft_out);
z2 = zeros(length(zz1)*3/2,1);
z2(1:6:end) = zz1(1:4:end);
z2(2:6:end) = zz1(2:4:end);
z2(4:6:end) = zz1(3:4:end);
z2(5:6:end) = zz1(4:4:end);
decode1 = vitdec(z2,trellis,tblen,'cont','unquant');

symberror(n,SNR+1) = sum(abs(sign(msg(1:length(decode1)-tblen)-
decode1(tblen+1:end)))));

end;
end;

ber = sum(symberror)/(length(decode1)-tblen)/N1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โปรแกรมการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของการรับส่งข้อมูลของระบบ OFDM ที่ประยุกต์ใช้การประมาณค่าของช่องสัญญาณโดยใช้การ interpolation แบบ lowpass ที่สภาพแวดล้อมต่างๆ กัน โปรแกรมนี้สามารถปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ได้ เช่น ค่าของความถี่คอปเปลอร์ จำนวนของช่องความถี่ย่อย อัตราเร็วของสัญญาณที่ส่ง อัตราการ Sampling ประเภทของการเข้ารหัส

```
function ber =
codedOFDMlowpass(NN,M,N1,N2,Nsamp,depth,inl,fd_Ts,Rs,fc,plspace,modt);
```

```
% Coded OFDM employing frequency-domain estimation
% Coded OFDM with RCPC of rate 3/4 in channel estimation
% where ber = symbol error rate (SER)
% NN = number of messages, N = 118272 for this function
% M = number of signal space, M = 2 for BPSK, M = 4 for QPSK
% N1 = number of iteration
% N2 = number of subcarriers in OFDM system
% Nsamp = sampling factor
% depth = interleaver size
% inl = option for interleaver, inl = 1 for applying interleaver
% fd_Ts = a ratio of Doppler frequency and a symbol rate
% Rs = data rate, set to 3e6 symbols/second
% plspace = pilot speration
% modt = option for modulation techniques, modt = 1 for MPSK
% modulation and modt = 0 for MQAM modulation
```

```
w1 = floor(NN/N2);
plnumber = floor(N2/plspace);
```

```
Rc = 1/2; %3/4; % coding rate
%Rp = 1/2/Rc; % punctured rate
tcode = [171 133]; % code generator
trellis = poly2trellis(7,tcode); % define trellis code
tblen = 96; % traceback length
v = 3e8*Rs/fc/1e6*fd_Ts*3600/1000; % velocity of the verhicle in km/hr.
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Pilot Signal
```

```
pilot_1 = [0; M/2];
if modt ==1
    pilots = pskmod(pilot_1,M,M/pi);
else
    pilots = qammod(pilot_1,M);
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Warm up the channel for OFDM system
```

```
Chan = WSSUS_chan(v, fc, Rs/N2, N2*Nsamp, [0], [0], [-100], 1);
Chan1 = WSSUS_warm(Chan);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for n = 1:N1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้น มีขออนุญาตเป็นอย่างชัดเจนจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
clear transmit sig_noise fft_out msg bgen msg_out;
```

```

bgen = randint(w1*N2,1,M); % input symbol (0 to M-1)
msg = [];
for bg = 0:log2(M)-1 % convert to input bits (0 and 1)
    msg(:,bg+1)= bitget(bgen,log2(M)-bg);
end;
msg1 = msg';
msg = msg1(:);
code = convenc(msg,trellis); % generate codeword

% Puncturing codes
%
% code(3:6:end) = [];
% code(5:5:end) = [];
x1 = code.';

% interleaver
if in1 ==0;

    x1 = x1;

else

    mm = sqrt(depth);
    [x1,n1] = binterleaver(x1,depth,mm);%(x1,1024,32);
    x1 = x1.';

end;

% convert from binary to decimal

x1= bin2dec((reshape(char(x1+'0'),log2(M),[]))'); % MPSK signal from
0 to M-1

%transmit = MPSK1(x1,M);
if modt == 1
    transmit = pskmod(x1,M,pi/M);% MPSK signals
else
    transmit = qammod(x1,M); % qam signals
end;

transmit1 = transmit;

q1 = reshape(transmit1(1:floor(length(x1)/(N2-plnumber))*(N2-
plnumber)),N2-plnumber,floor(length(x1)/(N2-plnumber)));
prandom1 = repmat([1:plspace]',1,length(q1)); % use for pilot random
comparison

% Insert Pilot Signals

prandom = repmat(zeros(1,length(q1))*plspace,plspace,1);
[YY,plocation] = min(abs(prandom-prandom1)); % Pilot location
inserted
plocation1 = plocation(1,:);
Xp = repmat(pilots,plnumber/2,floor(length(x1)/(N2-plnumber))); %
transmitted pilot signals; use for channel estimation
inputpilot = repmat(pilot_1,plnumber/2,floor(length(x1)/(N2-
plnumber))); % pilot input signal.
if mod(plnumber,2)==0

```

```

Xp = Xp;
inputpilot = inputpilot;
else
    Xp = [Xp;Xp(1,:)];
    inputpilot = [inputpilot; inputpilot(1,:)];
end;
qpilot = zeros(N2,floor(length(x1)/(N2-plnumber)));

for plindex1 = 1:plnumber;

    qpilot((plindex1-1)*plspace+1,:) = Xp(plindex1,:);
    qpilot((plindex1-1)*plspace+2:(plindex1-1)*plspace+plspace,:) =
    q1((plindex1-1)*(plspace-1)+1:(plindex1-1)*(plspace-1)+plspace-
    1,:);

end;

q1 = qpilot;
q1_ifft = ifft(q1,N2*Nsamp); % OFDM Symbols

%fading channel

transmit3 = q1_ifft(:);
[x_fade,Chan1,Wgts] = WSSUS_wgts(transmit3,Chan1);
transmit_fade = reshape(x_fade,Nsamp*N2,length(x_fade)/Nsamp/N2);
transmit4 = [real((x_fade(:)).'); imag((x_fade(:)).')];

% Add Noise
for SNR =0:10:40;

    Noise =
    noises1(qpilot,SNR,length(transmit4),M)/sqrt(N2)/sqrt(Nsamp)*sqrt(
    1/Rc);
    sig_noise = transmit4 + Noise;
    sig_noises1 = sig_noise(1,:)+j*sig_noise(2,:);

    % At the receiver

    sig_noise =
    reshape(sig_noises1,N2*Nsamp,length(sig_noises1)/N2/Nsamp);
    q1_fft = fft(sig_noise,N2*Nsamp); % demodulate OFDM signal by
    N2*Nsamp-fft implementation
    q1_fft = q1_fft(1:N2,:);

    % ***** start doing channel estimation *****

    Yp = []; %zeros(plnumber,length(q1));
    for pl = 1:plnumber;

        Yp(pl,:) = q1_fft((pl-1)*plspace+1,:);

    end;

    Hp = Yp./Xp; % Channel estimation for pilot signal

    % Interpolation by using interp.m function
    He = [];
    for t = 1:size(Hp,2)
        He(t) = interp(Hp,t);
    end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร  
 He = [];  
 for t = 1:size(Hp,2)

```

    He(:,t)=interp(Hp(:,t),8);
end;

He(size(q1_fft,1),:)=Hp(end,:);

%He = fft(HHp,N2); % Channel estimation
XX = q1_fft./He;
qq1 = XX(:);
if modt == 1
    qq1 = pskdemod(qq1,M,pi/M);% MPSK signals
else
    qq1 = qamdemod(qq1,M); % qam signals
end;
% remove pilot signals
qq1 = reshape(qq1,N2,floor(length(x1)/(N2-plnumber)));
qq1(1:plspace:plspace*floor(N2/plspace)-1,:)= [];

% convert from decimal to binary
msg_out = [];
fft_out = qq1(:);
for bg1 = 0:log2(M)-1 % convert to input bits (0 and 1)
    msg_out(:,bg1+1)= bitget(fft_out,log2(M)-bg1);
end
msg_out1 = msg_out';
msg_out=msg_out1(:);

% Deinterleaver
if inl == 0;
    fft_out = msg_out;
    % (1:floor(length(fft_out1(:))/depth)*depth*log2(M));
else
    fft_out =
    msg_out(1:floor(length(qq1(:))/depth)*depth*log2(M));
    [fft_out,n1] = bdeinterleaver(fft_out,depth,mm);
end;

% Depuncture
zz1 = real(fft_out);
z2 = zz1;
% z2 = zeros(length(zz1)*3/2,1);
% z2(1:6:end) = zz1(1:4:end);
% z2(2:6:end) = zz1(2:4:end);
% z2(4:6:end) = zz1(3:4:end);
% z2(5:6:end) = zz1(4:4:end);
decode1 = vitdec(z2,trellis,tblen,'cont','hard');

biterror(n,SNR+1) = sum(abs(sign(msg(1:length(decode1)-tblen)-
decode1(tblen+1:end)))));

```

```
end;
```

```
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ควรคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ber = sum(biterror)/(length(decode1)-tblen)/N1;
```