

การลดค่าพีเอพ็อดสำหรับสัญญาณโอเอฟดีเอ็มโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

PAPR Reduction for OFDM Signals Using Machine Learning Techniques



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty Of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดค่าพีเอพียอร์สำหรับสัญญาณโอเอฟดีเอ็มโดยใช้
	เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง
โดย	นายทยากร มหกรเพชร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ปลื้มปิติวิริยะเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ปลื้มปิติวิริยะเวช)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ทยากร มหกรเพชร : การลดค่าพีเอพ็อาร์สำหรับสัญญาณโอเอฟดีเอ็มโดยใช้เทคนิคการ
เรียนรู้ของเครื่อง. (PAPR Reduction for OFDM Signals Using Machine Learning
Techniques) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ชาญชัย ปลื้มปิติวิริยะเวช

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับเลือกค่าของสัญญาณโทนสำรองที่เหมาะสมในการลดค่าพีเอพ็อาร์ของสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการลดค่าพีเอพ็อาร์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้กระบวนการค้นหาแบบเต็มรูปแบบซึ่งได้การลดค่าพีเอพ็อาร์ที่ดีที่สุด ในงานวิจัยได้พัฒนาโปรแกรมจำลองสัญญาณโอเอฟดีเอ็มเพื่อคำนวณค่าพีเอพ็อาร์ของระบบโดยพิจารณาทั้งกรณีที่ใช้และไม่ใช้เทคนิคการลดค่าพีเอพ็อาร์ด้วยเทคนิคการสำรองโทน สร้างชุดข้อมูลสำหรับการฝึกและการทดสอบ พัฒนาและประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องโดยใช้ซอฟต์แวร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียมในการเลือกคลื่นพายุย่อยสำรองที่เหมาะสม ทดสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะการลดค่าพีเอพ็อาร์ของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นโดยประเมินจากค่าการความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มเติม จากการศึกษาพบว่าทั้งสองเทคนิคสามารถช่วยลดปัญหาพีเอพ็อาร์ได้โดยที่วิธีโครงข่ายประสาทเทียมมีผลลัพธ์ที่ดีกว่าซอฟต์แวร์แมชชีน จึงสามารถประยุกต์ใช้กับกับเทคนิคการสำรองโทนได้เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370456521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: PAPR, OFDM, Tone reservation, SVM, ANN

Tayakorn Mahakornpetch : PAPR Reduction for OFDM Signals Using Machine Learning Techniques. Advisor: Assoc. Prof. CHARNCHAI PLUEMPITIWIRIYAWAJ, Ph.D.

The purpose of this thesis is to apply support vector machines and artificial neural networks to select appropriate alternate tone reservation to reduce the PAPR of OFDM signals. Test and evaluate the performance of the developed PAPR reduction technique against a full search algorithm that achieves the best PAPR reduction. In the research, an OFDM signal simulation program was developed to calculate the PAPR value of the system by considering both the case and not using the PAPR reduction technique with the tone reservation technique. Create datasets for training and testing. Develop and apply machine learning using support vector machines and neural networks to select appropriate alternative tone reservation. Test and compare the PAPR reduction performance of the developed algorithms by complementary cumulative distribution function. The study found that both techniques can help reduce PAPR problems, with the neural network method having better results than the support vector machine. Therefore, it can be applied with tone reservation techniques as another option.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2023

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ปลื้มปิติวิริยะเวช ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ท่านได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำแนวทาง และถ่ายทอดความรู้ที่จำเป็นสำหรับการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งช่วยตรวจสอบความถูกต้องและเสนอแนะแนวทางแก้ไขอย่างอดทนจนเกิดเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ ผู้เป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและแนวทางและช่วยส่งเสริมความรู้ที่จำเป็นรวมถึงช่วยตรวจสอบเพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบคุณ อาจารย์ปรมินทร์ แสงวงษ์งาม ผู้เป็นอาจารย์ที่ให้คำแนะนำ แนวทางและช่วยส่งเสริมกำลังใจ แก่วิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิริกุลกิจ ผู้เป็นอาจารย์ที่ให้คำแนะนำและแนวทาง และช่วยส่งเสริมความรู้ที่จำเป็นแก่วิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ นายพฤกษ์ สระศรีทอง นางสาวศิวนาถ เจียรวงศ์ตระกูล และ Sunita Khichar ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่คอยสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดมา ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจศึกษาไม่มากนักน้อย

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แบบจำลองระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	3
2.2 ค่าพีเอพียาร์.....	4
2.3 เทคนิคการลดค่าพีเอพียาร์.....	5
2.3.1 เทคนิคการตัดและการกรอง.....	5
2.3.2 เทคนิคการเลือกจับกลุ่ม.....	5
2.3.3 เทคนิคลำดับการส่งบางส่วน.....	6
2.3.4 การสำรองโหนด.....	8

2.4 ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน.....	8
การจำแนกหลายกลุ่มโดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Multiclass SVM Classification) .	10
2.5 โครงข่ายประสาทเทียม	10
บทที่ 3 งานวิจัยที่เสนอและการพัฒนาโปรแกรมทดสอบ.....	13
3.1 การสร้างชุดข้อมูลสัญญาณโอเพนติเอ็มสำหรับการฝึกและทดสอบ.....	13
3.2 การประยุกต์ใช้เอเอ็นเอ็นสำหรับการเลือกสัญญาณหักล้าง	14
3.3 การประยุกต์ใช้เอสวีเอ็มสำหรับการเลือกสัญญาณหักล้าง	15
บทที่ 4 ผลการศึกษาและทดสอบ.....	16
4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะของค่าพีเอพียาร์.....	16
4.2 ผลการทดสอบการใช้เอสวีเอ็มร่วมกับเทคนิคการสำรองโหนดเพื่อลดค่าพีเอพียาร์	19
4.3 ผลการทดสอบการใช้เอเอ็นเอ็นร่วมกับเทคนิคการสำรองโหนดเพื่อลดค่าพีเอพียาร์.....	21
4.4 ผลการศึกษา	23
บทที่ 5 สรุป.....	24
บรรณานุกรม.....	26
ประวัติผู้เขียน.....	29

สารบัญตาราง

หน้า

No table of figures entries found.



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 แผนภาพจำลองโครงสร้างพื้นฐานของระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	3
รูปที่ 2 แผนภาพบล็อกของเทคนิคเอสแอลเอ็ม	6
รูปที่ 3 แสดงแผนภาพบล็อกของเทคนิคพีทีเอส	7
รูปที่ 4 แสดงแผนภาพบล็อกของเทคนิคการสำรองโทน	8
รูปที่ 5 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมหรือเอเอ็นเอ็น	11
รูปที่ 6 ตัวอย่างโครงสร้างของโหนดในชั้นซ่อนเร้นและชั้นขาออก.....	12
รูปที่ 7 ตัวอย่างฟังก์ชันการเปิดใช้งาน	12
รูปที่ 8 กราฟคอนฟิวชันเมทริกซ์	14
รูปที่ 9 กราฟความแม่นยำขณะฝึกเอเอ็นเอ็น	15
รูปที่ 10 กราฟฟังก์ชันการสูญเสียขณะฝึกเอเอ็นเอ็น	15
รูปที่ 11 รูปสัญญาณโอเอฟดีเอ็มสำหรับคลื่นพาห์ย่อย 1 ความถี่.....	17
รูปที่ 12 การมอดูเลตคิวเอ็ม 4.....	17
รูปที่ 13 รูปสัญญาณโอเอฟดีเอ็มสำหรับคลื่นพาห์ย่อย 2 ความถี่	18
รูปที่ 14 ฮิสโตแกรมของค่าพีเอพ็อดสำหรับสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่จำนวนคลื่นพาห์ย่อยแตกต่างกัน	19
รูปที่ 15 การแบ่งช่วงการค้นหาค่า γ ที่เหมาะสมที่สุดเป็นสามระดับการค้นหา	20
รูปที่ 16 ผลการทดสอบค่าความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มของวิธีเอสวีเอ็มโดยใช้คอร์เนลที่แตกต่างกัน ..	21
รูปที่ 17 โครงสร้างของเอเอ็นเอ็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้	22
รูปที่ 18 ค่าความแม่นยำของการฝึก.....	23
รูปที่ 19 ค่าความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มเติมของวิธีการที่เสนอเทียบกับการค้นหาทุกกรณี	23

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากสถิติจำนวนสมาชิกผู้ใช้โทรศัพท์มือถือทั่วโลกใน พ.ศ. 2565 พบว่ามีอยู่ประมาณ 6.5 พันล้านราย และคาดว่าจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็น 8 พันล้านรายใน พ.ศ. 2571 มีความหมายว่าผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถือจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเข้าใกล้จำนวนประชากรของโลกมากขึ้น นอกจากนี้ ยังคาดการณ์กันว่าเมื่อมีการนำแอปพลิเคชันสมัยใหม่ที่ใช้เทคโนโลยีเอไอ ไอโอที วีอาร์ เออาร์ รวมถึงการเล่นเกมผ่านระบบคลาวด์บนแท็บเล็ตและสมาร์ทโฟน ความต้องการความเร็วในการเชื่อมต่อก็จะเพิ่มสูงขึ้นอีกมาก [1]

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบ่งความถี่แบบตั้งฉาก (Orthogonal frequency-division multiplexing) หรือที่เรียกโดยย่อว่า โอลเอฟดีเอ็ม เป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่มีการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติอย่างแพร่หลาย มาตรฐานการสื่อสารไร้สายยุคใหม่ล้วนแล้วแต่เลือกใช้เทคโนโลยีดังกล่าว ด้วยมีข้อดีหลายประการ สัญญาณโอลเอฟดีเอ็มมีประสิทธิภาพสเปกตรัมสูงและความทนทานต่อการซีดจางแบบหลายเส้นทาง การสื่อสารในยุคที่ 5 ใช้รูปคลื่นส่งสัญญาณโอลเอฟดีเอ็มสำหรับทั้งแอปพลิเคชันและดาวนลิงก์ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียหลักของสัญญาณโอลเอฟดีเอ็มจะมีอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ย (the Peak-to-Average Power Ratio: PAPR) หรือค่าพีเอพียาร์ที่ค่อนข้างสูงโดยเฉพาะในกรณีที่มีคลื่นพาห่อย่อยจำนวนมาก ถึงแม้งานวิจัยเกี่ยวกับการลดค่าพีเอพียาร์มีอยู่จำนวนมากโดยที่งานวิจัยระยะหลังมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึกมาช่วยแก้ปัญหา อย่างไรก็ตามยังมีผลงานตีพิมพ์ไม่มากนักและยังไม่มีการนำอัลกอริทึมเอสบีเอ็มและเอเอ็นเอ็นมาใช้สำหรับการเลือกคลื่นพาห่อย่อยสำรองในเทคนิคการสำรองโทนเพื่อลดค่าพีเอพียาร์ ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องกับการสำรองโทนเพื่อลดค่าพีเอพียาร์ให้มีประสิทธิภาพ

เอสบีเอ็ม (Support Vector Machine) เป็นอัลกอริทึมการจำแนกประเภทและไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการลดพีเอพียาร์ในระบบสื่อสาร อย่างไรก็ตาม เป็นไปได้ว่าสามารถใช้เอสบีเอ็มร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เพื่อลดพีเอพียาร์ในระบบสื่อสารได้ เทคนิคหนึ่งที่มีใช้เพื่อลดพีเอพียาร์ในระบบโอลเอฟดีเอ็มคือการสำรองโทน (tone reservation) การสำรองโทนเกี่ยวข้องกับการสำรองผู้ให้บริการย่อยบางส่วนในสัญญาณโอลเอฟดีเอ็มเพื่อจุดประสงค์ในการลดพีเอพียาร์ผู้ให้บริการย่อยที่สงวนไว้ได้รับการแก้ไขในลักษณะที่ลดพลังงานสูงสุดของสัญญาณ ซึ่งจะเป็นการลดพีเอพียาร์โดยรวม จึงนำเอสบีเอ็มประยุกต์ร่วมกับการสำรองโทนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเทคนิคการลดพีเอพียาร์ ตัวอย่างเช่น สามารถใช้เอสบีเอ็มเพื่อทำนายลักษณะของคลื่นพาหู่ที่น่าจะทำให้เกิดพีเอพียาร์ต่ำลง และใช้ลักษณะของคลื่นพาหู่เหล่านั้นสำหรับการสำรองโทน สิ่งนี้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเทคนิคการลดพีเอพียาร์และลดความซับซ้อนในการคำนวณของระบบโดยรวม นอกจากนี้ จะมีการนำการเรียนรู้เชิงลึกที่

เรียกว่า เอเอ็นเอ็น (ANN) มาประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าที่เหมาะสมให้กับคลื่นพาร์สำหรับกรองเพื่อที่ทำได้ค่าพีเอพาร์ที่ต่ำ โดยสามารถนำมาเปรียบเทียบกับการใช้เอสวีเอ็ม

อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญคือต้องดำเนินการทดสอบว่าประสิทธิภาพของเอสวีเอ็มและเอเอ็นเอ็นในการลดค่าพีเอพาร์ด้วยการสำรองทอนนั้นขึ้นอยู่กับการใช้งานเฉพาะและลักษณะของระบบการสื่อสาร ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะดำเนินการวิจัยและการวิเคราะห์เพื่อประเมินถึงประโยชน์ที่เป็นไปได้ของการใช้เอสวีเอ็มและเอเอ็นเอ็นสำหรับการลดค่าพีเอพาร์ในระบบการสื่อสาร

1.2 วัตถุประสงค์

1. การประยุกต์ใช้เอสวีเอ็มและเอเอ็นเอ็นสำหรับเลือกค่าของสัญญาณทอนสำรองที่เหมาะสมในการลดค่าพีเอพาร์ของสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม
2. ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการลดค่าพีเอพาร์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้กระบวนการค้นหาแบบเต็มรูปแบบซึ่งได้การลดค่าพีเอพาร์ที่ดีที่สุด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. พัฒนาโปรแกรมจำลองสัญญาณโอเอฟดีเอ็มเพื่อคำนวณค่าพีเอพาร์ของระบบโดยพิจารณาทั้งกรณีที่ใช้และไม่ใช้เทคนิคการลดค่าพีเอพาร์ด้วยเทคนิคการสำรองทอน
2. สร้างชุดข้อมูลสำหรับการฝึกและการทดสอบเพื่อใช้ประยุกต์กับการเรียนรู้ของเครื่องทั้งสองประเภทที่วิจัยในงานวิจัยนี้
3. พัฒนาและประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องโดยใช้อัลกอริทึมเอสวีเอ็มและโครงข่ายประสาทเทียมเอเอ็นเอ็นในการเลือกค่าสำหรับคลื่นสำรอง
4. ทดสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะการลดค่าพีเอพาร์ของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นทั้งสองแบบเปรียบเทียบกับผลที่ดีที่สุดของเทคนิคการสำรองทอน
5. ใช้จำนวนคลื่นพาร์ย่อยสำหรับส่งข้อมูล 10 ความถี่ และคลื่นพาร์ย่อยสำรอง 2 ความถี่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อัลกอริทึมเอสวีเอ็มและโครงข่ายประสาทเทียมเอเอ็นเอ็นสำหรับเลือกค่าของสัญญาณทอนสำรองที่มีประสิทธิภาพในการช่วยลดค่าพีเอพาร์สำหรับสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม
2. ได้โปรแกรมการจำลองระบบโอเอฟดีเอ็มที่ไม่มี การลดค่าพีเอพาร์กับวิธีการลดค่าพีเอพาร์ที่ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมเอสวีเอ็มและเอเอ็นเอ็นเปรียบเทียบกัน
3. ได้ผลการทดสอบของอัลกอริทึมที่นำเสนอว่ามีประสิทธิภาพในการลดค่าพีเอพาร์มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับค่าที่ดีที่สุดของเทคนิคการสำรองทอน

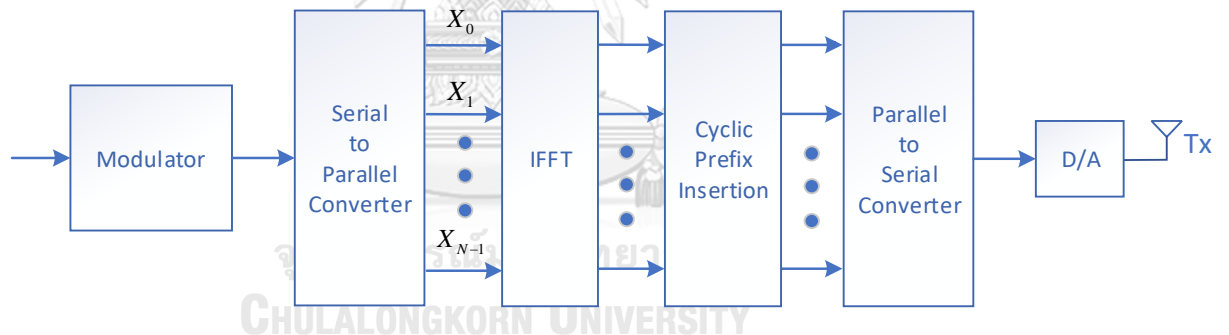
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองระบบโอเอฟดีเอ็ม

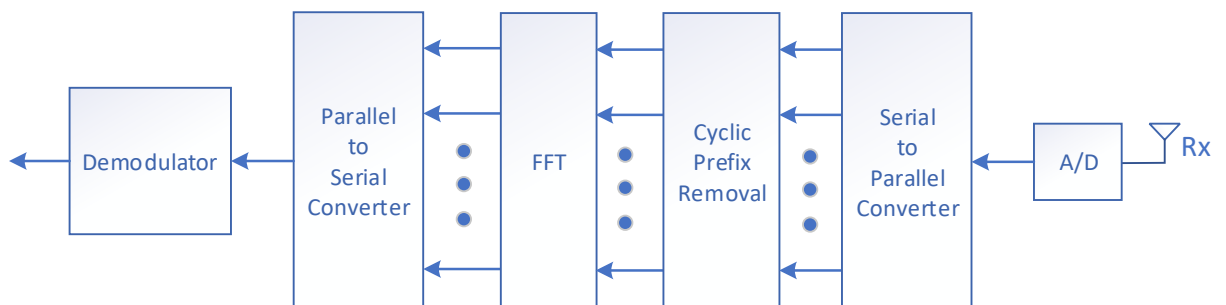
แบบจำลองการมัลติเพล็กซ์แบ่งความถี่แบบตั้งฉาก (Orthogonal frequency-division multiplexing) หรือระบบโอเอฟดีเอ็ม (OFDM system) มีโครงสร้างพื้นฐานโดยรวมดังแสดงในรูปที่ 1 ในส่วนของวงจรภาคส่งประกอบด้วย วงจรมอดูเลเตอร์ (modulator) เพื่อแมปชุดข้อมูลไบนารี $\{0,1\}$ ให้ได้เป็นสัญลักษณ์หรือค่าตัวเลขเชิงซ้อนที่สอดคล้องกับวิธีการมอดูเลตที่เลือกใช้ ในการให้กำเนิดสัญญาณโอเอฟดีเอ็มแต่ละครั้ง จะรับสัญลักษณ์ข้อมูลเชิงซ้อน X_0, X_1, \dots, X_{N-1} จากวงจรมอดูเลเตอร์จำนวน N ค่า สำหรับส่งผ่านลงบนคลื่นพาห่อย่อย N คลื่น เพื่อป้อนเข้าสู่วงจรการแปลงฟูริเยร์ผกผัน (inverse fast Fourier transform) หรือใช้อักษรย่อว่า ไอเอฟเอฟที (IFFT)

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi nk}{N}}, \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

ผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่าของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในโดเมนเวลา x_n จากนั้นมีการเพิ่มไซคลิกพรีฟิกซ์ (Cyclic prefix) เพื่อป้องกันการรบกวนกันระหว่างสัญลักษณ์ (Inter Symbol Interference) ทั้งนี้มีการเปลี่ยนสัญญาณจากขนานไปเป็นอนุกรมเพื่อนำไปแปลงจากสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกก่อนส่งออกสู่สายอากาศต่อไป



(ก) ภาคส่ง



(ข) ภาครับ

รูปที่ 1 แผนภาพจำลองโครงสร้างพื้นฐานของระบบโอเอฟดีเอ็ม

ในส่วนของภาครับสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม ในรูปที่ 1(ข) คลื่นสัญญาณจากสายอากาศรับถูกป้อนเข้า วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อป้อนเข้าสู่วงจรแปลงจากอนุกรมไปเป็นขนาน จากนั้นใช้ คลิกริพิกซ์จะถูกกลบออกก่อนนำไปประมวลผลด้วยการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) หรือเอฟ เอฟที (FFT) ตามสมการต่อไปนี้

$$X_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินการการแปลงฟูริเยร์คือสัญญาณเบสแบนด์ของข้อมูลและสามารถนำไป แปลงเป็นข้อมูลไบนารีโคไซน์ใช้วงจรดีมอดูเลเตอร์ [2]

2.2 ค่าพีเอพียอร์

เนื่องจากสัญญาณโอเอฟดีเอ็มเกิดจากการรวมของสัญญาณคลื่นพหุคูณจำนวน N คลื่นที่มีความถี่ตั้งฉากกัน จะเกิดมีสถานการณ์ที่แตกต่างกันได้หลากหลายขึ้นกับรูปแบบของข้อมูลที่ส่งลง บนคลื่นพหุคูณ ในบางรูปแบบสัญญาณจากคลื่นพหุคูณเหล่านี้มีค่าที่เสริมกัน และในบางรูปแบบ สัญญาณก็มีการหักล้างกัน ด้วยเหตุนี้ สัญญาณ x_n ที่ได้ก็มักมีค่ายอดที่สูงหรือต่ำหลากหลายแตกต่างกัน ในช่วงกว้างโดยขึ้นอยู่กับค่าของข้อมูลที่ป้อนเข้าวงจรสร้างสัญญาณโอเอฟดีเอ็มเป็นสำคัญ จึงมีการ กำหนดค่ากำลังสูงสุดต่อค่ากำลังเฉลี่ย (Peak-to-Average-Power-Ratio) หรือค่าพีเอพียอร์ (PAPR) ขึ้นมาเพื่อใช้ในการระบุว่าสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่ได้สร้างขึ้นมีค่ากำลังสูงสุดต่อค่ากำลังเฉลี่ยมากน้อย เพียงใด โดยเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$PAPR(x_n) = \max_{n=0,1,\dots,N-1} \frac{|x_n|^2}{E[|x_n|^2]} \quad (3)$$

ในกรณีที่สัญญาณมีค่าพีเอพียอร์สูง จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องขยายกำลังสัญญาณ ณ เครื่องส่งสัญญาณ เนื่องจากเครื่องขยายกำลังมีช่วงขยายสัญญาณที่จำกัด เมื่อใดที่สัญญาณโอเอฟ ดีเอ็มมีขนาดใหญ่เกินกว่าช่วงการทำงานเชิงเส้น สัญญาณขาออกจากวงจรขยายจะเกิดความผิดเพี้ยน แบบไม่เชิงเส้นและส่งผลกระทบต่อการแผ่ตัวของสเปกตรัม [3] ด้วยเหตุนี้ การส่งสัญญาณโอเอฟดีเอ็มแต่ละ ครั้งจำเป็นต้องมีการควบคุมมิให้ค่าพีเอพียอร์มีขนาดสูงเกิน ในเชิงทฤษฎีเมื่อพิจารณาสัญญาณโอเอฟ ดีเอ็มทางเวลา x_n ที่เกิดจากคลื่นพหุคูณ N คลื่นรวมเข้าด้วยกัน ถ้า N มีขนาดใหญ่พอ ตาม ทฤษฎีบทขีดจำกัดศูนย์กลาง (central-limit theorem) สัญญาณผลลัพธ์ x_n จะใกล้เคียงกับ กระบวนการเกาส์เซียนเชิงซ้อนซึ่งหมายความว่าทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพของมันถูกกระจายแบบ เกาส์เซียน ส่วนแอมพลิจูดและกำลังของมันก็เป็นไปตามการแจกแจงแบบเรย์ลีห์และการแจกแจงแบบ เอ็กซ์โปเนนเชียลตามลำดับ หากกล่าวในภาพรวมพบว่า ค่าพีเอพียอร์จัดเป็นข้อเสียหลักที่เกิดขึ้นใน ระบบที่มีคลื่นพหุคูณจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระบบโอเอฟดีเอ็ม ที่พิจารณา ด้วยเหตุนี้จึงมีความ

พยายามในการแก้ปัญหาค่าพีเอพ็อร์ของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มกันอย่างจริงจัง ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 เทคนิคการลดค่าพีเอพ็อร์

2.3.1 เทคนิคการตัดและการกรอง

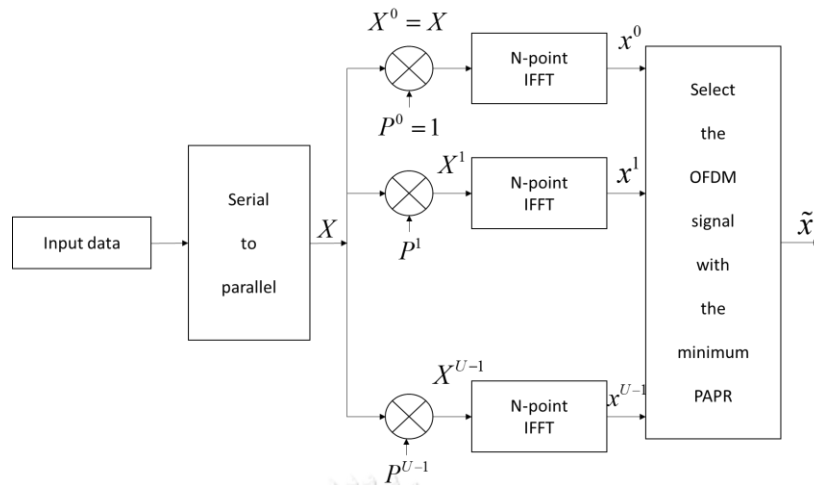
เทคนิคการตัดยอดจัดเป็นวิธีการลดค่าพีเอพ็อร์อย่างง่ายวิธีหนึ่ง [4] หลักการที่ใช้คือการจำกัดแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณขาเข้าให้มีขนาดไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า นั่นคือ

$$B(x) = \begin{cases} x, & |x| \leq A \\ Ae^{j\phi(x)}, & |x| > A \end{cases} \quad (4)$$

โดยที่ $\phi(x)$ คือเฟสของสัญญาณขาเข้า x จะเห็นว่าเมื่อใดที่แอมพลิจูดของสัญญาณ x มีค่าสูงกว่า A สัญญาณขาออกจะถูกปรับให้มีขนาดเท่ากับ A โดยยังมีเฟสเท่ากับสัญญาณขาเข้า เนื่องจากการตัดยอดสัญญาณในลักษณะนี้ก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณหรืออาจกล่าวว่าการตัดยอดสัญญาณเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนก็ได้เช่นกัน สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อทั้งในแถบความถี่และนอกแถบความถี่ของสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม ในส่วนของสัญญาณที่อยู่ในแถบความถี่จะไม่สามารถกำจัดได้ในขณะที่สัญญาณที่อยู่นอกแถบความถี่สามารถกำจัดได้โดยอาศัยวงจรกรองความถี่ อย่างไรก็ตามการลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนนอกแถบความถี่ส่งผลข้างเคียงที่สามารถก่อให้เกิดยอดสัญญาณใหม่ได้ ด้วยเหตุนี้สัญญาณหลังจากการตัดและกรองจะเกินระดับของค่าสูงสุดที่ตั้งไว้ เพื่อลดการเกิดใหม่ของจุดยอดสัญญาณจึงแนะนำให้การดำเนินการตัดและกรองซ้ำหลายครั้ง [5, 6] เพื่อให้การลดค่าพีเอพ็อร์มีประสิทธิภาพ

2.3.2 เทคนิคการเลือกจับกลุ่ม

เทคนิคการเลือกจับกลุ่ม (Selective Mapping Technique) หรือเรียกโดยย่อว่าเอสแอลเอ็มเป็นเทคนิคการลดค่าพีเอพ็อร์แบบไม่บิดเบือนสัญญาณ ในเทคนิคนี้เครื่องส่งสัญญาณจะสร้างชุดของบล็อกข้อมูลตัวเลือกที่แตกต่างกันขึ้นมา โดยบล็อกข้อมูลทั้งหมดจะเก็บข้อมูลเดียวกันกับบล็อกข้อมูลดั้งเดิม และเลือกบล็อกข้อมูลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการส่งข้อมูล [7, 8] แผนภาพบล็อกของเทคนิคเอสแอลเอ็มแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพบล็อกของเทคนิคเอสแอลเอ็ม

ก่อนการส่งสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม บล็อกข้อมูลจะถูกคูณด้วยลำดับเฟสที่แตกต่างกันทั้งหมด U รูปแบบ ดังนี้ $P^{(u)} = [p_{u,0}, p_{u,1}, \dots, p_{u,N-1}]^T$, $u = 1, 2, \dots, U$, ผลลัพธ์ที่ได้เป็นบล็อกข้อมูลที่ผ่านการปรับแก้ไขด้วยเฟสที่แตกต่างกันทั้งหมด U รูปแบบ นั่นคือ $X^{(u)} = [X_0 p_{u,0}, X_1 p_{u,1}, \dots, X_{N-1} p_{u,N-1}]^T$, ซึ่งเมื่อนำมาแปลงไอเอฟเอฟทีแล้วจะได้เป็นสัญญาณโอเอฟดีเอ็มทั้งหมด U รูปแบบ ดังนี้

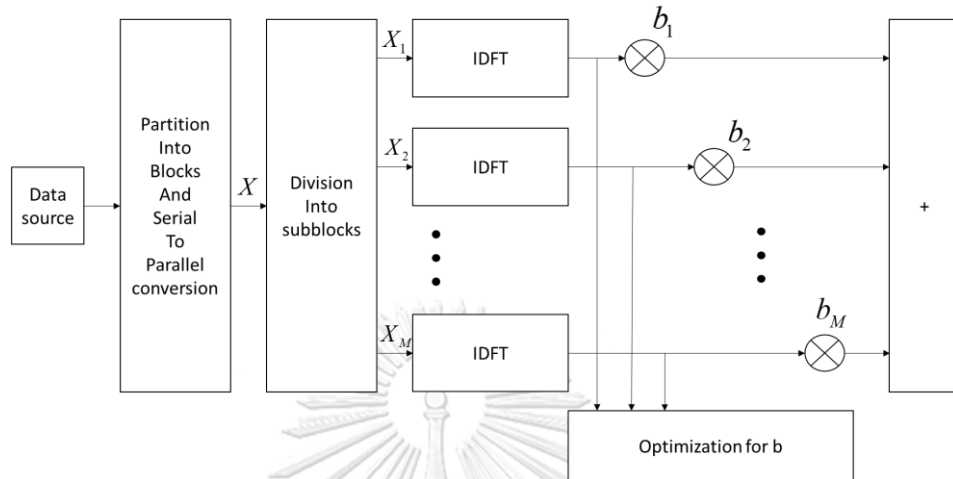
$$x^{(u)}(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n p_{u,n} \cdot e^{j2\pi n f t}, 0 \leq t < NT, u = 1, 2, \dots, U. \quad (5)$$

ในบรรดาบล็อกข้อมูลที่ได้รับการปรับแก้ $X^{(u)}$, $u = 1, 2, \dots, U$, จะมีการเลือกบล็อกที่ให้ค่าพีเอพียาร์ต่ำสุดสำหรับการส่งข้อมูล ข้อมูลเกี่ยวกับลำดับเฟสที่ถูกเลือกจะถูกส่งไปยังเครื่องรับเป็นข้อมูลข้างเคียง ณ เครื่องรับจะดำเนินการย้อนกลับเพื่อกู้คืนบล็อกข้อมูลดั้งเดิม สำหรับการนำไปใช้ เทคนิคเอสแอลเอ็มจำเป็นต้องมีการดำเนินการแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่องผกผัน U ครั้งและจำนวนบิตข้อมูลข้างเคียง $\lceil \log_2 U \rceil$ สำหรับแต่ละบล็อกข้อมูล วิธีการนี้ใช้ได้กับการปรับแก้ทุกประเภทและมีจำนวนคลื่นพาห์เท่าใดก็ได้ ประสิทธิภาพการลดพีเอพียาร์สำหรับเทคนิคเอสแอลเอ็มขึ้นอยู่กับจำนวนของลำดับเฟส U และการออกแบบลำดับเฟส ใน [9] มีการเสนอเทคนิคเอสแอลเอ็มโดยไม่มีข้อมูลข้างเคียงที่ชัดเจน

2.3.3 เทคนิคลำดับการส่งบางส่วน

เทคนิคลำดับการส่งบางส่วน (Partial Transmit Sequence Technique) หรือเรียกโดยย่อว่าพีทีเอส โดยเทคนิคนี้จะบล็อกข้อมูลอินพุตของสัญลักษณ์ N จะถูกแบ่งพาร์ติชันออกเป็นบล็อก

ย่อยที่ไม่เชื่อมต่อกัน คลื่นพาร์ย่อยในแต่ละบล็อกย่อยจะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยดัชนีเฟสสำหรับบล็อกย่อยนั้นๆ ดัชนีเฟสจะถูกเลือกเพื่อให้ค่าพีเอพอาร์โดยรวมของสัญญาณถูกทำให้เหลือน้อยที่สุด รูปที่ 3 แสดงแผนภาพบล็อกของเทคนิคพีทีเอส

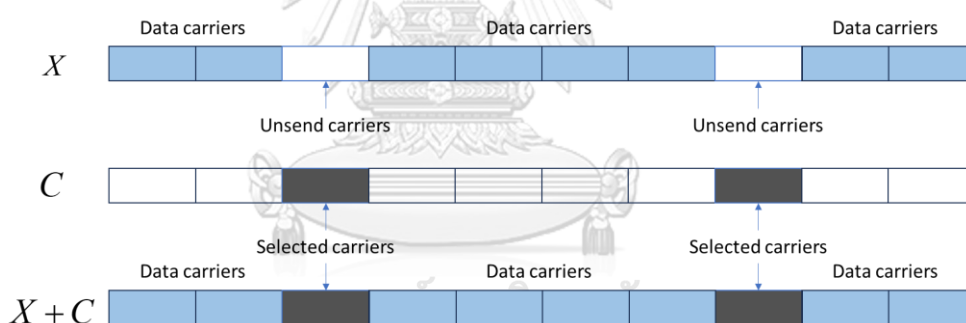


รูปที่ 3 แสดงแผนภาพบล็อกของเทคนิคพีทีเอส

ในเทคนิคพีทีเอสแบบทั่วไป [10, 11] บล็อกข้อมูลอินพุต X จะถูกแบ่งพาร์ติชันเป็น M บล็อกย่อยที่ไม่เชื่อมต่อกัน $X_m = [X_{m,0}, X_{m,1}, \dots, X_{m,N-1}]^T$, $m = 1, 2, \dots, M$, ดังนั้น $\sum_{m=1}^M X_m = X$ ข้อสำคัญของวิธีนี้คือการคูณเฟส $b_m = e^{j\phi_m}$, $m = 1, 2, \dots, M$, ที่เหมาะสมเข้ากับสัญญาณทางเวลาของบล็อกย่อย เพื่อให้สัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่ได้มีค่าพีเอพอาร์ต่ำ โดยทั่วไป การเลือกค่าเฟสที่เหมาะสมจะถูกจำกัดอยู่ที่ขอบเขตของจำนวนองค์ประกอบเพื่อลดความซับซ้อนในการค้นหา ชุดของปัจจัยเฟสที่เป็นไปได้เขียนเป็น $P = \{e^{j2\pi l/W} | l = 0, 1, \dots, W-1\}$, โดยที่ W คือจำนวนของปัจจัยเฟสที่เป็นไปได้ นอกจากนี้ เราสามารถตั้งค่า $b_1 = 1$ ได้โดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพใดๆ ดังนั้นเราจึงควรทำการค้นหาค่าเฟสทั้ง $(M-1)$ อย่างถี่ถ้วน ดังนั้นจึงมีการค้นหาชุดปัจจัยเฟส W^{M-1} เพื่อค้นหาชุดที่เหมาะสมที่สุด ความซับซ้อนในการค้นหาจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามจำนวนบล็อกย่อย M โดยเทคนิคพีทีเอสต้องการการดำเนินการ M การแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่องผกผันสำหรับแต่ละบล็อกข้อมูล และจำนวนของข้อมูลบิตที่ต้องการคือ $\lceil \log_2 W^{M-1} \rceil$, โดยที่ $\lceil y \rceil$, หมายถึงจำนวนเต็มที่น้อยที่สุดที่ไม่เกิน y ประสิทธิภาพในการลดค่าพีเอพอาร์ ขึ้นอยู่กับจำนวนของบล็อกย่อย M และจำนวนค่าเฟสที่เป็นไปได้ W อีกปัจจัยที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดค่าพีเอพอาร์ ด้วยเทคนิคพีทีเอสคือการแบ่งพาร์ติชันบล็อกย่อย ซึ่งเป็นวิธีการแบ่งคลื่นพาร์ย่อยออกเป็นหลายบล็อกย่อยที่ไม่เชื่อมต่อกัน การแบ่งพาร์ติชันบล็อกย่อยมีสามประเภท: ที่อยู่ติดกัน แทรกสลับ และ pseudo-random [11] ทั้งสามประเภท pseudo-random เป็นการแบ่งพาร์ติชันที่เหมาะสมที่สุด

2.3.4 การสำรองโทน

การสำรองโทน (Tone reservation) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจสำหรับใช้ในการลดค่าพีเอพ็อด โดยไม่ทำให้สัญญาณโอเอฟดีเอ็มมีความผิดเพี้ยน หลักการที่ใช้คือสำรองคลื่นพาห่อย่อยจำนวนหนึ่งไว้เพื่อวัตถุประสงค์ของการลดค่าพีเอพ็อด พิจารณาระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีดัชนีของคลื่นพาห่อย่อย $R = \{0, 1, \dots, N - 1\}$ ถูกจัดสรรในการส่งสัญญาณ เทคนิคการสำรองโทนจะจัดสรรชุดดัชนีคลื่นพาห่อย่อย $R^d = \{0, 1, \dots, N - M - 1\}$ ไว้สำหรับส่งสัญญาณข้อมูล และสำรองคลื่นพาห่อย่อยที่เหลือ $R^c = R - R^d$ ไว้สำหรับลดค่าพีเอพ็อด สมมติให้สัญญาณข้อมูลที่บรรจุลงในตำแหน่ง R มีค่าเป็น $X = (X_0, X_1, \dots, X_{N-M-1})^T$ ซึ่งเป็นค่าเชิงซ้อนที่แมปมาจากข้อมูลไบนารีลงบนจุดสัญญาณของการมอดูเลตที่เลือกใช้ เช่น การมอดูเลตแบบคิวเอเอ็ม จะแมปข้อมูลครั้งละ 2 บิต ได้แก่ 00, 01, 10 และ 11 ให้เป็นตัวเลขเชิงซ้อน $\frac{1}{\sqrt{2}} + j\frac{1}{\sqrt{2}}$, $-\frac{1}{\sqrt{2}} + j\frac{1}{\sqrt{2}}$, $\frac{1}{\sqrt{2}} - j\frac{1}{\sqrt{2}}$ และ $-\frac{1}{\sqrt{2}} - j\frac{1}{\sqrt{2}}$ ตามลำดับ ในขณะที่คลื่นพาห่อย่อย ณ ดัชนี R^c ที่สำรองไว้จะบรรจุค่า $C = (C_0, C_1, \dots, C_{M-1})^T$ โดยเป็นค่าเชิงซ้อนที่เลือกอย่างเหมาะสมและทำให้ค่าพีเอพ็อดของสัญญาณต่ำสุด [12-15] ดังรูปที่ 4 ซึ่งเทคนิคการสำรองโทนถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4 แสดงแผนภาพบล็อกของเทคนิคการสำรองโทน

2.4 ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน หรือเอสวีเอ็ม (Support Vector Machines: SVM) เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความนิยมอย่างแพร่หลายในงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดรูปแบบตลอดจนการแก้ปัญหาการจัดกลุ่มโดยอาศัยหลักการของการหาสัมประสิทธิ์ของสมการเพื่อสร้างไฮเปอร์เพลนแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการสอนให้ระบบเรียนรู้โดยเน้นไปยังไฮเปอร์เพลนแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่ดีที่สุด [16] เมื่อเราพิจารณาข้อมูลที่ประกอบด้วยข้อมูล 2 กลุ่ม กำหนดให้ D เป็นชุดข้อมูล (data set) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลทั้ง 2 กลุ่ม โดยมีดัชนีที่กำหนดว่าข้อมูลแต่ละตัวอยู่ในกลุ่มที่ 1 หรือกลุ่มที่ 2

$$D = \{X_i, y_i\}, i = 1, \dots, n \quad (6)$$

เมื่อ $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) \in R^m$,

$y_i \in \{1, -1\}$ โดย 1 คือข้อมูลกลุ่ม 1 และ -1 คือข้อมูลกลุ่ม 2

ซึ่งเป็นการกำหนดกลุ่มเป้าหมายให้เอสวีเอ็มโดยที่เอสวีเอ็มนั้นมุ่งเป้าเพื่อหาฟังก์ชันการตัดสินใจที่สามารถแบ่งแยกค่าที่ไม่ทราบได้ดังสมการที่ 7 และ 8

$$f(x) = \text{sign} \left\{ \sum_{k=1}^{n_v} w_k \varphi_k(X) \varphi_k(X_k) + b \right\} \quad (7)$$

$$\varphi(X) = [\varphi_1(X_1), \varphi_2(X_2), \dots, \varphi_n(X_{n_v})]^T \quad (8)$$

ถ้าหากกลุ่มข้อมูล X จากสมการที่ 6 ไม่สามารถแบ่งแยกได้ด้วยสมการเส้นตรงได้ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเอสวีเอ็ม เคอร์เนลฟังก์ชัน (kernel function) จึงถูกนำเข้ามาปรับใช้ โดยที่ข้อมูล X แต่จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้สมการเส้นตรงแบ่งแยกได้ โดยใช้เคอร์เนลฟังก์ชัน (kernel function) ดังสมการที่ 9

$$K(X, X_k) = \varphi(X) \varphi(X_k) \quad (9)$$

เมื่อ $\varphi(X)$ แทน ฟังก์ชันสำหรับแปลงข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปเชิงเส้นสามารถแบ่งแยกได้ (Mapping function)

w_k แทน ค่าน้ำหนักที่เชื่อมโยงจากพื้นที่คุณลักษณะไปสู่ผลลัพธ์

b แทน ค่าคลาดเคลื่อน

X_k แทน ซัพพอร์ตเวกเตอร์ โดย $k = 1, 2, \dots, n_v$

n_v แทน จำนวนซัพพอร์ตเวกเตอร์

ฟังก์ชันเคอร์เนลที่ใช้กันทั่วไปมี 4 ฟังก์ชันต่อไปนี้

(1) ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear)

$$K(x, y) = x^T y$$

(2) ฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial)

$$K(x, y) = (\rho x^T y + r)^d$$

(3) ฟังก์ชันเกาส์เซียนอาร์บีเอฟ (Gaussian RBF)

$$K_{\text{Gaussian}}(x, y) = \exp\{-\rho|x-y|^2\}$$

(4) ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid)

$$K(x, y) = \tanh(\rho x^T y + r)$$

ในการใช้งานจริง การเลือกฟังก์ชันเคอร์เนลที่เหมาะสมและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อวิเคราะห์ห้มักจะขึ้นอยู่กับสถานการณ์เฉพาะของปัญหา

วิธีการที่ใช้ในการหาเส้นแบ่งที่ดีที่สุดคือการเพิ่มเส้นขอบ (margin) ให้กับเส้นแบ่งทั้งสองข้าง และสร้างเส้นขอบที่สัมผัสกับค่าข้อมูลในพื้นที่คุณสมบัติที่ใกล้ที่สุด ดังนั้นเส้นแบ่งที่มีเส้นขอบกว้างที่สุดจึงเป็นเส้นแบ่งที่ดีที่สุดและเรียกตำแหน่งการสัมผัสข้อมูลที่ใกล้ที่สุดจากการเพิ่มขอบนี้ว่า “ซัพพอร์ตเวกเตอร์” (support vector)

การจำแนกหลายกลุ่มโดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Multiclass SVM Classification)

เอสวีเอ็มได้รับการออกแบบมาสำหรับการจำแนกแบบไบนารีหรือสองกลุ่ม แต่สามารถขยายสำหรับสถานการณ์ที่ต้องการการจำแนกแบบหลายกลุ่มหรือมากกว่าสองกลุ่ม [17] มีการแนะนำแนวทางหลักสองแนวทาง ได้แก่

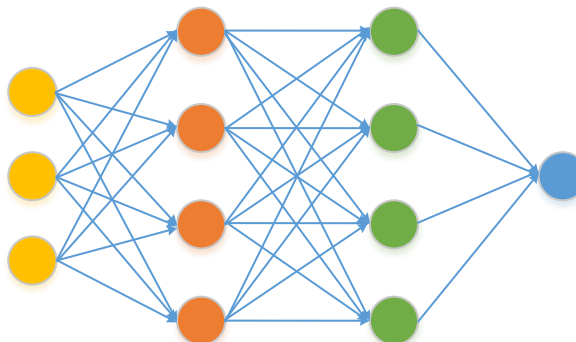
1) แนวทาง “หนึ่งต่อทั้งหมด” ชุดตัวแบ่งประเภทไบนารีซึ่งแต่ละตัวได้รับการฝึกฝนให้แยกกลุ่มหนึ่งออกจากส่วนที่เหลือที่ละกลุ่มให้ครบทุกกลุ่ม มีความหมายว่าต้องมีจำนวนเอสวีเอ็มมากเท่ากับจำนวนกลุ่มและการตัดสินใจว่าข้อมูลจะอยู่ในกลุ่มใดให้พิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นที่แต่ละเอสวีเอ็มคำนวณได้และถูกเลือกให้ไปอยู่ในกลุ่มที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงสุด

2) แนวทาง “หนึ่งต่อหนึ่ง” ในกระบวนการฝึกจะหยิบข้อมูลมาทีละคู่เท่านั้นได้เป็นเอสวีเอ็มสำหรับแต่ละคู่ ดังนั้นแนวทางนี้จะมีจำนวนเอสวีเอ็มทั้งหมด $n(n-1)/2$ ชุด ในการนำไปใช้งานจริงจะป้อนข้อมูลเข้าให้กับเอสวีเอ็มแต่ละตัวเพื่อจำแนกว่าอยู่ในกลุ่มใด กลุ่มที่มีเอสวีเอ็มเลือกมากที่สุดจะถูกเลือกให้เป็นคำตอบสุดท้าย ซึ่งเป็นแนวทางที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.5 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม หรือเอเอ็นเอ็น (Artificial neural networks: ANN) เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นจากการเลียนแบบโครงสร้างการทำงานของระบบโครงข่ายประสาททางชีววิทยา โดยมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นหน่วยย่อยขนาดเล็กที่เรียกว่า นิวรอน (neuron) เมื่อนำนิวรอนเทียมดังกล่าวนี้มาเชื่อมต่อกันเป็นชั้น ๆ จะสามารถใช้ในการวิเคราะห์ประมวลผลข้อมูลได้ใกล้เคียงความสามารถของมนุษย์ ตัวอย่างโครงสร้างของเอเอ็นเอ็นได้ในรูปที่ 4 จากรูปจะเห็นว่าเอเอ็นเอ็นมีการจัดกลุ่มแบ่งนิวรอนหรือโหนดออกเป็นชั้น ในชั้นแรกสุดมีชื่อเรียกว่า ชั้นขาเข้า (input layer) ในตัวอย่างจะมีอยู่ 3 โหนด ชั้นที่ 2 และ 3 เรียกว่าชั้นซ่อนเร้น (hidden layer) ในตัวอย่างนี้

แต่ละชั้นมีอยู่ 4 โหนด ชั้นสุดท้ายเรียกว่า ชั้นขาออก (output layer) ที่ในตัวอย่างนี้มีเพียงโหนดเดียว โหนดที่อยู่แต่ละชั้นมักจะมีการเชื่อมต่อกับโหนดทุกโหนดในชั้นถัดไปเสมอ



Input layer hidden layer 1 hidden layer 2 output layer

รูปที่ 5 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมหรือเอเอ็นเอ็น

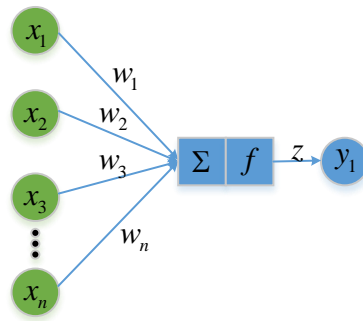
เมื่อพิจารณาเข้าไปในโครงสร้างโหนดของชั้นซ่อนเร้น และชั้นขาออก จะปรากฏเป็นโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่าโหนด y_1 รับค่าผลรวมของค่า x_1, x_2, \dots, x_n ที่ได้จากโหนดในชั้นก่อนหน้าโดยที่มีการถ่วงน้ำหนักด้วย w_1, w_2, \dots, w_n ตามลำดับ ผลรวมที่ได้ก็นำไปผ่านฟังก์ชันการเปิดใช้งาน (activation function) $f(\cdot)$ ที่มีคุณลักษณะของความไม่เชิงเส้น และผลลัพธ์ที่ได้คือ z ซึ่งเป็นค่าของโหนด y_1 ในชั้นที่พิจารณานั้นเอง เมื่อนำมาเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$z = f\left(\sum_{i=1}^n x_i w_i\right) \quad (10)$$

อย่างไรก็ดี ในการใช้งานทั่วไปมักจะมีการเพิ่มค่าไบเอส b เข้ามาด้วยเสมอ ทำให้สมการความสัมพันธ์จะมีรูปแบบดังนี้

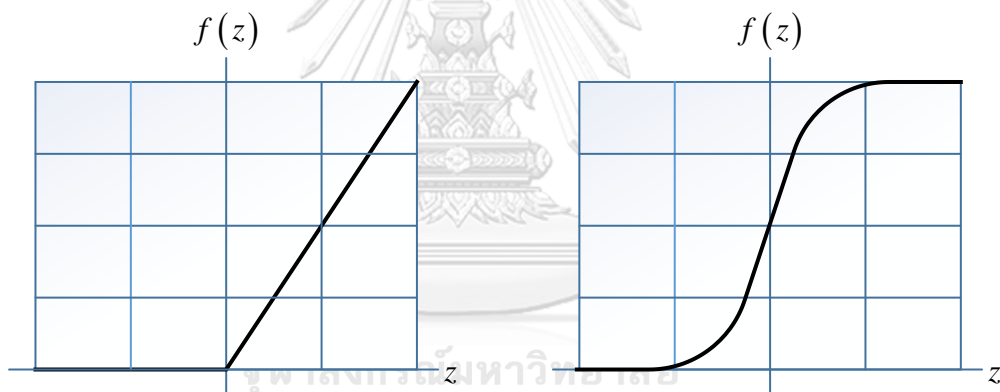
$$z = f\left(b + \sum_{i=1}^n x_i w_i\right) \quad (11)$$

เมื่อพิจารณาในภาพรวมจะเห็นว่าข้อมูลที่ป้อนเข้าเอเอ็นเอ็นจะได้รับการประมวลผลโดยโหนดแต่ละโหนดจากซ้ายไปขวาจนในที่สุดจะได้เป็นสัญญาณที่ชั้นขาออก



รูปที่ 6 ตัวอย่างโครงสร้างของโหนดในชั้นซ่อนเร้นและชั้นขาออก

ฟังก์ชันการเปิดใช้งาน (activation function) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยให้เอเอ็นเอ็นสามารถเรียนรู้รูปแบบไม่เชิงเส้นได้ ตัวอย่างของฟังก์ชันการเปิดใช้งานที่มีใช้งานได้แก่ เลอู (Relu: Rectified linear unit) ที่เขียนเป็นความสัมพันธ์คณิตศาสตร์คือ $f(z) = \max(0, z)$ ทั้งนี้ให้ดูรูปที่ 6 (ก) ประกอบ นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันการเปิดใช้งานรูปแบบอื่น ๆ ให้เลือกใช้งาน เช่น ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid function) ซึ่งเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น $f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$



(ก) ฟังก์ชันเลอู

(จ) ฟังก์ชันซิกมอยด์

รูปที่ 7 ตัวอย่างฟังก์ชันการเปิดใช้งาน

การจะทำให้เอเอ็นเอ็นมีความสามารถในการเรียนรู้และจำแนกข้อมูลจะต้องมีกระบวนการฝึกฝนก่อน โดยทั่วไปจะอาศัยชุดข้อมูลฝึกฝนจำนวนมากพอ และผลที่ได้จากการฝึกฝนคือ ค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าถ่วงน้ำหนัก w_1, w_2, \dots, w_n ที่เหมาะสมสำหรับโหนดแต่ละโหนดในชั้นซ่อนเร้นและชั้นขาออกนั่นเอง กระบวนการฝึกฝนสามารถเขียนสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าสุ่มให้กับค่าถ่วงน้ำหนักของทุกโหนด
2. ในการฝึกฝนแต่ละครั้ง ให้ป้อนข้อมูลขาเข้าของชุดฝึกฝนเข้าไปในเอเอ็นเอ็นทางชั้นขาเข้า และอ่านค่าจากเอเอ็นเอ็นที่ชั้นขาออก จึงเรียกว่าเป็นกระบวนการทำงานไปข้างหน้า (forward pass) จากซ้ายไปขวา

3. เปรียบเทียบค่าที่ขึ้นขาออกกับค่าเป้าหมายที่ถูกตั้งในชุดฝึกฝน คำนวณค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ทำนายกับค่าที่ต้องการ โดยใช้ฟังก์ชันการสูญเสีย (loss function)
4. ดำเนินการทำงานย้อนกลับ (backward pass) จากขวาไปซ้าย เพื่อส่งผ่านค่าความผิดพลาดย้อนกลับไปที่โหนดแต่ละโหนด (backpropagation) คำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละโหนดส่งผลต่อค่าความผิดพลาดมากขึ้น จากนั้นให้ดำเนินการปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักใหม่ให้เหมาะสมโดยใช้เกรเดียนต์เดสเซนต์ (gradient descent) เพื่อหาคำตอบ

บทที่ 3 งานวิจัยที่เสนอและการพัฒนาโปรแกรมทดสอบ

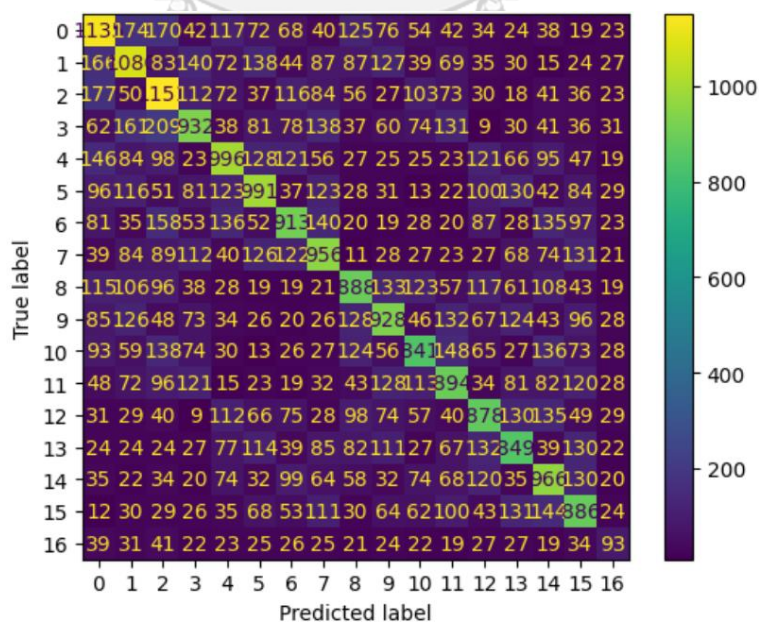
ด้วยวัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องในการช่วยตัดสินใจเลือกค่าของการมอดูเลตสำหรับการหักล้างที่เหมาะสมให้กับเทคนิคการสำรองโหนด ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ การสร้างชุดข้อมูลสัญญาณโอเอฟดีเอ็มสำหรับการฝึกและทดสอบ การประยุกต์ใช้เอชวีเอ็มสำหรับการลดค่าพีเอพ็อด และการประยุกต์ใช้เอเอ็นเอ็นสำหรับการลดค่าพีเอพ็อด ซึ่งจะได้อธิบายแต่ละหัวข้อตามลำดับในหัวข้อย่อยถัดไป

3.1 การสร้างชุดข้อมูลสัญญาณโอเอฟดีเอ็มสำหรับการฝึกและทดสอบ

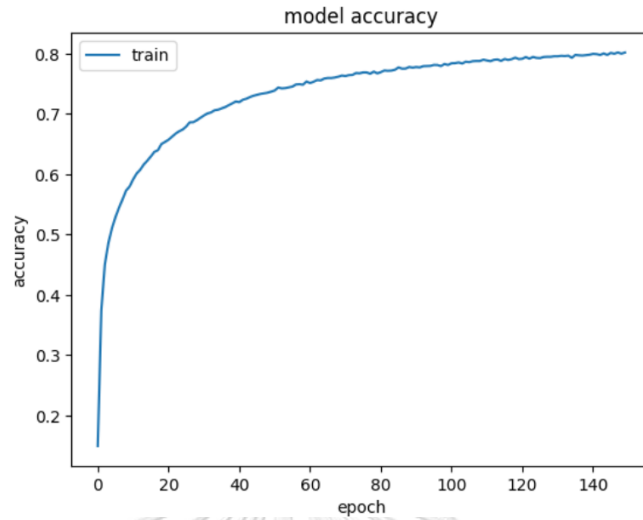
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างชุดข้อมูลสัญญาณโอเอฟดีเอ็มจำนวนหนึ่งแสนที่มีสัญญาณสำรองโหนดที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมการค้นหาทั้งหมด (Exhaustive Search) ซึ่งจะนำไปใช้ในการฝึกอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง ในที่นี้ได้กำหนดให้ใช้คลื่นพาห์ทั้งหมด 16 ความถี่ จัดสรรคลื่นพาห์ย่อยสำหรับส่งข้อมูลจำนวน 10 ความถี่ และจัดสรรคลื่นพาห์ย่อยสำรองสำหรับการลดค่าพีเอพ็อดไว้ 2 ความถี่ คลื่นพาห์ย่อยที่เหลือสองวงยังไม่มีการใช้งาน กำหนดให้ (X_i, y_i) เป็นคู่สัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออก ที่จะนำไปใช้เป็นชุดข้อมูลฝึกและทดสอบของการเรียนรู้ของเครื่องในส่วนถัดไป สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกทดสอบกับการมอดูเลตคิวเอเอ็ม ซึ่งเป็นการมอดูเลตที่จะรับข้อมูลจากผู้ใช้งานครั้งละ 2 บิต ที่มีได้ทั้งหมด 4 รูปแบบ คือ 00, 01, 10 และ 11 ดังนั้น ค่าของสัญญาณที่มอดูเลตจึงมี 4 รูปแบบ คือ $1/\sqrt{2} + j1/\sqrt{2}$, $1/\sqrt{2} - j1/\sqrt{2}$, $-1/\sqrt{2} + j1/\sqrt{2}$ และ $-1/\sqrt{2} - j1/\sqrt{2}$ ตามลำดับ เมื่อสุ่มได้ค่าสัญญาณข้อมูลและให้กำเนิดค่าสัญญาณมอดูเลตแล้ว จึงป้อนเข้าวงจรสร้างสัญญาณโอเอฟดีเอ็มเพื่อได้เป็นสัญญาณทางเวลาต่อไป จากนั้นบันทึกค่ายอดของสัญญาณที่ได้ พร้อมกับค่าเฉลี่ย เพื่อใช้ในการคำนวณค่าพีเอพ็อด ในขั้นตอนต่อมาคือให้แทรกสัญญาณสำหรับหักล้างเข้าไปให้กับคลื่นพาห์ย่อยสำรอง โดยมีรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4×4 รูปแบบ ทำการทดลองใส่ค่าสัญญาณในคลื่นพาห์สำรองแต่ละรูปแบบ และบันทึกค่าพีเอพ็อดของแต่ละกรณี ทั้งนี้ ให้เลือกค่าสัญญาณหักล้างที่ให้ค่าพีเอพ็อดต่ำสุดและเก็บในตัวแปร y_i ให้ดำเนินการสุ่มค่าสัญญาณข้อมูลให้ครบทั้งหนึ่งแสนชุดตามที่กำหนดไว้

3.2 การประยุกต์ใช้เอเอ็นเอ็นสำหรับการเลือกสัญญาณหักล้าง

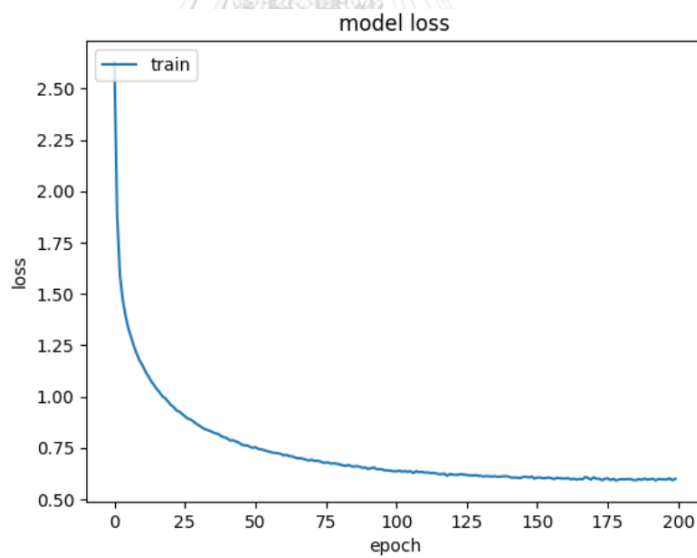
ในหัวข้อย่อหน้านี้เสนอรายละเอียดของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนแพลตฟอร์ม kaggle.com เพื่อประยุกต์ใช้เอเอ็นเอ็นกับการเลือกสัญญาณหักล้างที่เหมาะสม ขั้นตอนแรกจะเป็นการอ่านข้อมูลที่อยู่ในชุดข้อมูลสำหรับการฝึกฝนและทดสอบตามที่ได้สร้างขึ้นในหัวข้อย่อหน้าก่อนหน้า โดยเป็นไฟล์ที่บรรจุกรณีศึกษาที่ใช้สัญญาณหักล้าง 2 สัญญาณ โดยแต่ละสัญญาณมีค่าให้เลือกได้ 4 แบบ ดังนั้น จะมีการจำแนกสัญญาณหักล้างออกเป็น 16 แบบ และมีเพิ่มอีกแบบที่ระบุว่าไม่ต้องใช้สัญญาณหักล้าง รวมทั้งหมดจะมีอยู่ 17 รูปแบบ ทำการแบ่งข้อมูลทั้งหมดออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่ใช้สำหรับฝึกเอเอ็นเอ็นอัลกอริทึม 67000 คอลัมน์หรือประมาณ 66% จากข้อมูลทั้งหมดและส่วนที่ใช้สำหรับทดสอบเอเอ็นเอ็นอัลกอริทึมที่ผ่านการฝึกแล้ว 33000 คอลัมน์หรือประมาณ 33% จากข้อมูลทั้งหมด สร้างโมเดลเอเอ็นเอ็นโดยมีจำนวนโหนดขาเข้า 20 โหนดถัดมาชั้นซ่อนเร้นจำนวน 2 ชั้นแต่ละชั้นมีจำนวนโหนด 256 โหนดโดยใช้ฟังก์ชันการเปิดใช้งานเรลยู (relu) และชั้นขาออกมีจำนวนโหนด 17 โหนด โดยใช้ฟังก์ชันการเปิดใช้งานซอฟแมค (softmax) ซึ่งกำหนดตามค่าตั้งต้นของโมเดลโดยที่โหนดที่อยู่ในแต่ละชั้นจะมีการเชื่อมต่อกับโหนดทุกโหนดในชั้นถัดไปเสมอ ตั้งค่าโมเดลสำหรับการฝึกมี Loss Function เป็นแบบ Categorical Crossentropy Loss และ optimizer เป็น Adam ฝึกโมเดลโดยการแบ่งข้อมูลออกเป็น "แบทช์ (batch)" ที่มีขนาดเป็น 10 และวนซ้ำชุดข้อมูลทั้งหมด 150 รอบ แสดงกราฟคอนฟิวชันเมตริกซ์ กราฟความแม่นยำขณะฝึกเอเอ็นเอ็นและกราฟฟังก์ชันการสูญเสีย ดังรูปที่ 8, 9 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 8 กราฟคอนฟิวชันเมตริกซ์



รูปที่ 9 กราฟความแม่นยำขณะฝึกเอเอ็นเอ็น



รูปที่ 10 กราฟฟังก์ชันการสูญเสียขณะฝึกเอเอ็นเอ็น

3.3 การประยุกต์ใช้เอชวีเอ็มสำหรับการเลือกสัญญาณหักล้าง

ในหัวข้อย่อหน้านี้นำเสนอรายละเอียดของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนแพลตฟอร์ม kaggle.com ต่อเนื่องจากการประยุกต์ใช้เอเอ็นเอ็นเพื่อประยุกต์ใช้เอชวีเอ็มกับการเลือกสัญญาณหักล้างที่

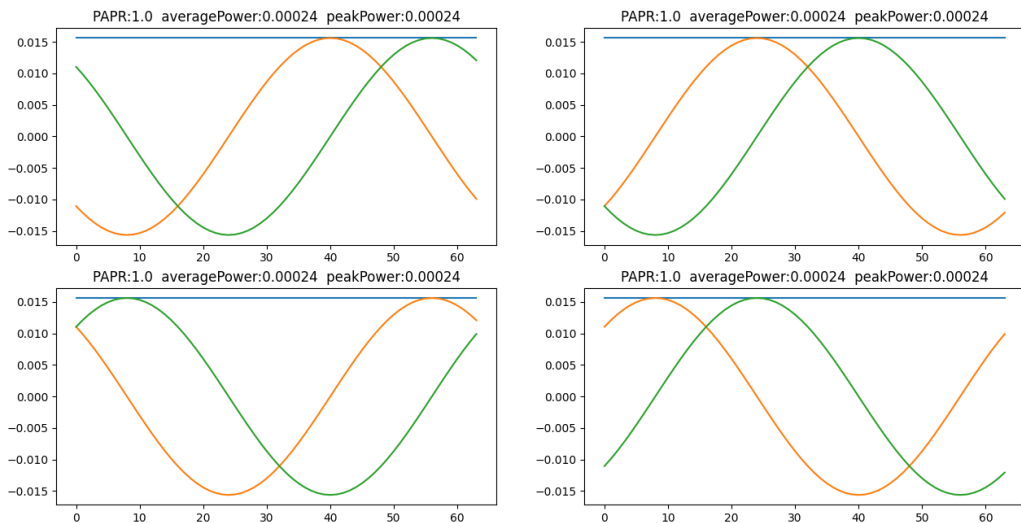
เหมาะสม โดยการสร้างเอสวีเอ็มจำเป็นต้องพิจารณากำหนดค่าแกมมาหรือว่าค่าขอบ (Margin) และฟังก์ชันเคอร์เนลที่เหมาะสม ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป หลังจากที่ทราบกำหนดค่าแกมมาและฟังก์ชันเคอร์เนลที่เหมาะสม จึงกำหนดค่าลงในโปรแกรมโดยเรียกใช้ Class SVC จากโมดูล sklearn.svm เพิ่มทำการฝึกเอสวีเอ็มสำหรับการเลือกสัญญาณหักล้าง

บทที่ 4 ผลการศึกษาและทดสอบ

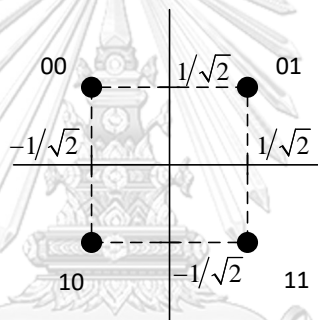
4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะของค่าพีเอพ็อด

ในการศึกษาถึงปัญหาของค่าพีเอพ็อดให้ได้เข้าใจ จึงได้ทำการทดลองวัดค่าพีเอพ็อดของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่มีคลื่นพาห่อย่อยตั้งแต่ 1-10 ความถี่ โดยละเอียดและวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะของค่าพีเอพ็อดในกรณีที่ป้อนชุดข้อมูลที่แตกต่างกันครบทุกรูปแบบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

กรณีศึกษาที่ 1 เป็นกรณีที่สัญญาณโอเอฟดีเอ็มมีการใช้คลื่นพาห่อย่อยเพียง 1 ความถี่ ในการศึกษานี้เลือกใช้การมอดูเลตแบบคิวแอม 4 ฉะนั้นรูปแบบของสัญญาณจึงมีได้ทั้งหมด 4 รูปแบบตามชุดข้อมูลที่ป้อนเข้า 00, 01, 10 และ 11 ผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 11 ยกตัวอย่างเช่นรูปซ้ายบนเป็นกรณีที่ค่าข้อมูลที่ส่งคือ 00 จึงกำหนดค่าสัญลักษณ์เชิงซ้อนเป็น $-1/\sqrt{2} + 1/\sqrt{2}j$ รูปที่ 12 ประกอบ จึงให้สัญญาณโคไซน์บนแกนนอนหรืออินเฟสที่มีเฟส $3\pi/4$ องศา (กราฟสีส้ม) และเป็นสัญญาณไซน์หรือควอเตอร์บนแกนตั้งที่มีเฟส $3\pi/4$ องศา (กราฟสีเขียว) เมื่อคำนวณค่ากำลังของสัญญาณและนำเสนอเป็นกราฟสีน้ำเงิน กล่าวคือ ค่าสมบูรณ์ของจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อน ยกกำลังสองบวกกัน จากรูปจะเห็นว่าค่ากำลังที่ได้มีค่าเท่ากันทุกเวลา โดยค่าเท่ากับ 0.00024 ให้สังเกตว่าค่ากำลังสูงสุดนี้เป็นค่าที่เท่ากับค่ากำลังเฉลี่ยด้วย มีความหมายว่าหากใช้คลื่นความถี่เดียวในการส่งสัญญาณจะให้ค่าพีเอพ็อดเท่ากับ 1

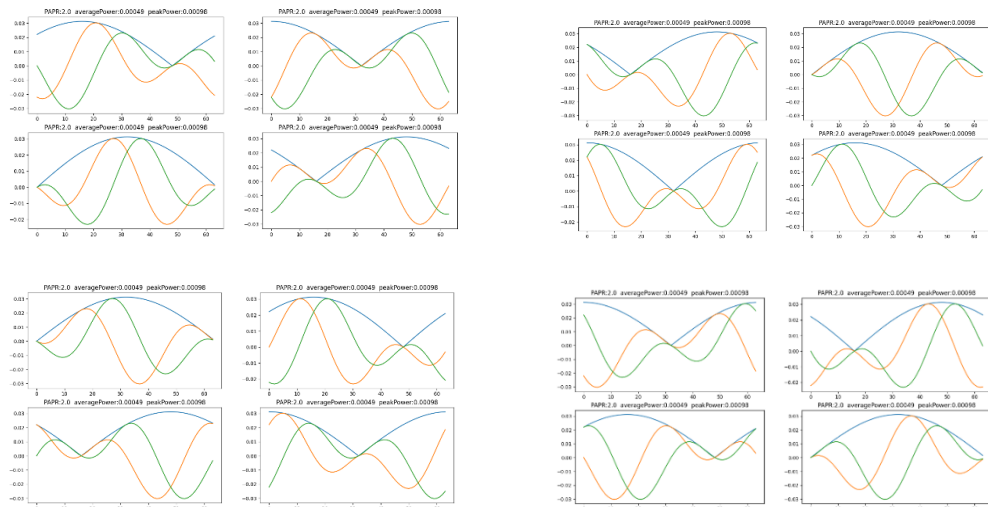


รูปที่ 11 รูปสัญญาณโอเอฟดีเอ็มสำหรับคลื่นพาห้อย่อย 1 ความถี่



รูปที่ 12 การมอดูเลตควิเอเอ็ม 4

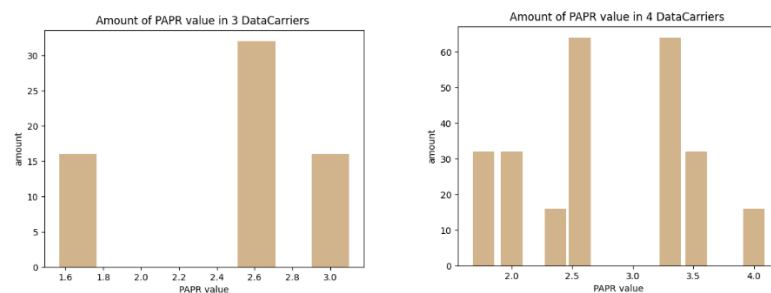
กรณีศึกษาที่ 2 เป็นกรณีที่สัญญาณโอเอฟดีเอ็มใช้คลื่นพาห้อย่อย 2 ความถี่ การมอดูเลตเป็นควิเอเอ็ม 4 เพราะฉะนั้นจะมีรูปแบบของสัญญาณที่ส่งออกแตกต่างกัน 16 กรณี เมื่อคำนวณค่าพีเอพียาร์ของแต่ละกรณีพบว่าได้ค่าพีเอพียาร์สูงสุดเท่ากันที่ 0.00098 สำหรับชุดข้อมูลทุกรูปแบบ ในขณะที่ขณะที่ค่าเฉลี่ยพีเอพียาร์เท่ากันที่ 0.00049 ดังนั้น สัญญาณโอเอฟดีเอ็มในกรณีนี้มีค่าพีเอพียาร์เท่ากับ 2 เท่ากันทั้งหมดทุกกรณี ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 รูปสัญญาณโอเอฟดีเอ็มสำหรับคลื่นพหุย่อย 2 ความถี่

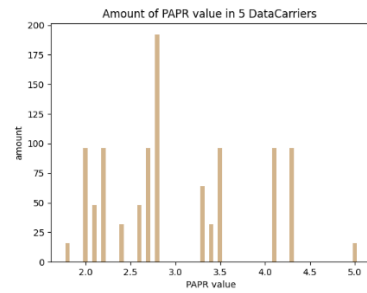
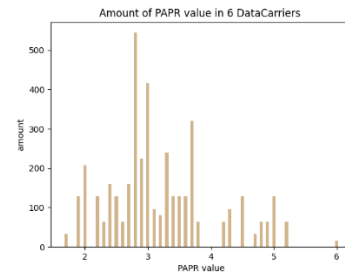
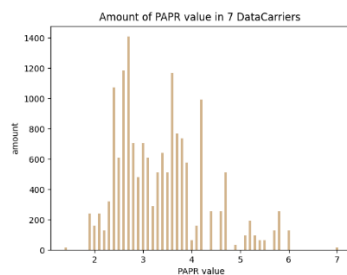
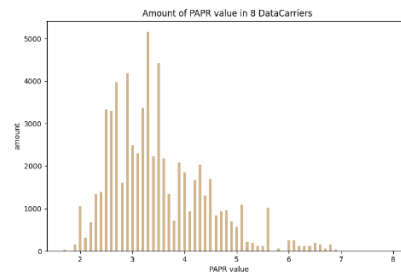
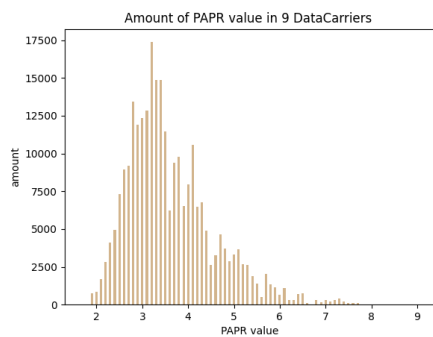
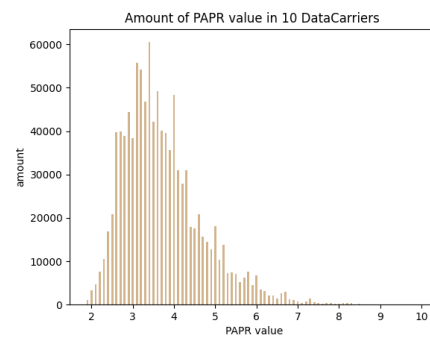
กรณีศึกษาที่ 3 เป็นกรณีที่สัญญาณโอเอฟดีเอ็มใช้คลื่นพหุย่อยตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไป ในกรณีเหล่านี้พบว่าค่าพีเอพียาร์มีขนาดที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับรูปแบบหรือค่าของชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่วงจรสร้างสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม ดังนั้น จึงได้นำเสนอในรูปของกราฟที่แกนนอนเป็นค่าพีเอพียาร์และแกนตั้งเป็นความถี่ของการเกิดค่าพีเอพียาร์แต่ละค่า ดังแสดงในรูปที่ 14 ตัวอย่างเช่นกรณีที่ใช้คลื่นพหุย่อย 3 ความถี่ พบว่ามีค่าพีเอพียาร์ที่ต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 1.69, 2.61 และ 3.0 โดยแต่ละค่ามีรูปแบบข้อมูลจำนวนทั้งหมด 16, 32, และ 16 กรณี ตามลำดับ เมื่อรวมกันทุกกรณีจะได้ทั้งหมด 64 รูปแบบ ซึ่งตรงกับค่าที่ควรจะเป็นคือ 4^3 รูปแบบที่ต่างกันของข้อมูล พิจารณากรณีที่ใช้คลื่นพหุย่อย 4 ความถี่ จำนวนค่าพีเอพียาร์ที่เป็นไปได้มีมากเป็นขึ้น 7 ค่า และค่าพีเอพียาร์สูงสุดก็เพิ่มขึ้นเป็น 4 ด้วยเช่นกัน

เมื่อพิจารณารูปของกรณีอื่น ๆ ในภาพรวมจึงได้ข้อสังเกตว่าการใช้จำนวนคลื่นพหุย่อยที่มากขึ้นทำให้ค่าพีเอพียาร์สูงมากขึ้นตาม การทดสอบนี้จึงเป็นการยืนยันว่าในระบบสื่อสารที่ใช้หลายคลื่นพหุย่อยจะพบกับปัญหาของการที่ค่าพีเอพียาร์มีค่าสูง



(ก) $N = 3$

(ข) $N = 4$

(ค) $N = 5$ (ง) $N = 6$ (จ) $N = 7$ (ฉ) $N = 8$ (ช) $N = 9$ (ซ) $N = 10$

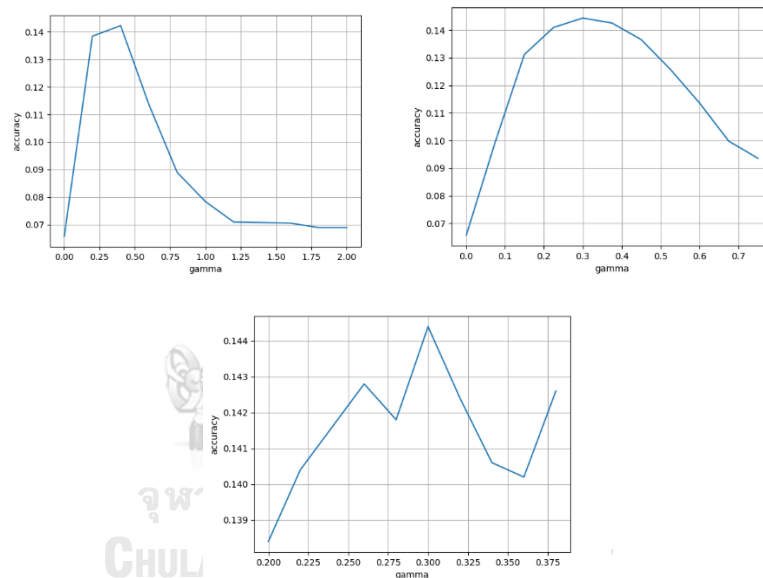
รูปที่ 14 ฮิสโตแกรมของค่าพีเอพอาร์สำหรับสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่จำนวนคลื่นพาร์ย่อยแตกต่างกัน

4.2 ผลการทดสอบการใช้เอสวีเอ็มร่วมกับเทคนิคการสำรองโทนเพื่อลดค่าพีเอพอาร์

ในการทดลองประยุกต์ใช้เอสวีเอ็มร่วมกับเทคนิคการสำรองโทนเพื่อลดค่าพีเอพอาร์มีข้อกำหนดและพารามิเตอร์ที่ใช้ดังนี้ จำนวนคลื่นพาร์ย่อยรวม 16 ความถี่ จำนวนคลื่นพาร์ย่อยสำหรับส่งข้อมูล 10 ความถี่ จำนวนคลื่นสำรองโทน 2 ความถี่ และเว้นไม่ใช้ขอบด้านละ 2 ความถี่ การมอดูเลตที่ใช้ในการทดสอบเป็นคิวเอ็มที่รองรับข้อมูล 2 บิตต่อสัญลักษณ์ ในการทดสอบจะมีการ

ปรับเปลี่ยนคอร์เนลทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ เชิงเส้น (linear) พหุนาม (polynomial) ซิกมอยด์ (sigmoid) และเกาส์เซียนอาร์บีเอฟ (Gaussian Radial Basis Function) เพื่อการเปรียบเทียบและเลือกใช้คอร์เนลที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

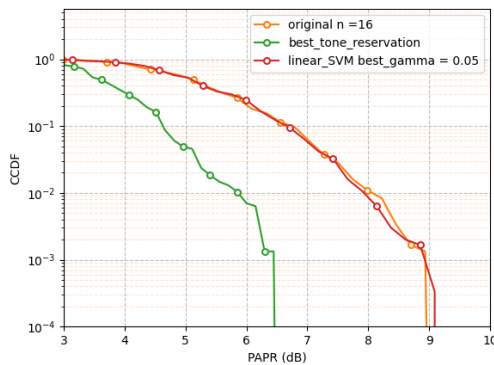
เนื่องจากสมรรถนะของเอสวีเอ็มขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์สำคัญหนึ่งคือ γ ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการค้นหา γ ที่เหมาะสมโดยการทำงานเป็นสามระดับ ในระดับแรกเป็นการค้นหาที่เหมาะสมที่สุดตลอดช่วงของค่าที่เป็นไปได้ซึ่งแตกต่างกันไปสำหรับคอร์เนลแต่ละชนิดที่เลือกใช้ ในที่นี้จะนำเสนอผลการทดสอบของคอร์เนลเกาส์เซียนอาร์บีเอฟเพื่อประกอบการอธิบาย จะเห็นว่าจำเป็นต้องมีการทดสอบจากการค้นหาอย่างหยาบเพื่อหาช่วงที่ค่าที่เหมาะสมอยู่ จากนั้นก็ทำการค้นหาละเอียดขึ้นในระดับที่สอง และในท้ายสุดจะค้นหาด้วยความละเอียดที่สูงสุดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ



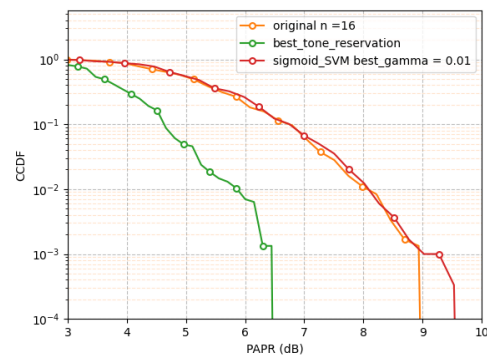
รูปที่ 15 การแบ่งช่วงการค้นหา γ ที่เหมาะสมที่สุดเป็นสามระดับการค้นหา

ผลการทดสอบสมรรถนะของเอสวีเอ็มแต่ละชนิดที่ใช้คอร์เนลแตกต่างกันได้สรุปไว้ในรูปที่ 15 โดยเป็นการประเมินสมรรถนะจากค่าความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มเติม พิจารณารูปที่ 12(ก) จะเห็นว่าคอร์เนลเชิงเส้นให้ผลลัพธ์ที่ไม่สัมฤทธิ์ผลใด ๆ กล่าวคือ ไม่สามารถตัดสินใจเลือกสัญญาณหักล้างได้ถูกต้องแต่อย่างใด ส่งผลให้ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบเอสวีเอ็มที่ใช้คอร์เนลซิกมอยด์ดังแสดงในรูปที่ 12(ข) พบว่าไม่สามารถช่วยลดค่าพีเอพ็อร์ได้เช่นกันกับคอร์เนลเชิงเส้น ในลำดับถัดไปในรูปที่ 12(ค) ซึ่งใช้คอร์เนลเกาส์เซียนอาร์บีเอฟ ให้ผลค่าพีเอพ็อร์ที่ดีขึ้น ส่วนคอร์เนลพหุนามที่แสดงผลในรูปที่ 12(ง) ก็เช่นกันให้ผลการทดสอบที่ดีใกล้เคียงกับคอร์เนลเกาส์เซียนอาร์บีเอฟ ผลการทดสอบที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่าเอสวีเอ็มจะทำงานได้ดีต้องมีการใช้คอร์เนลที่

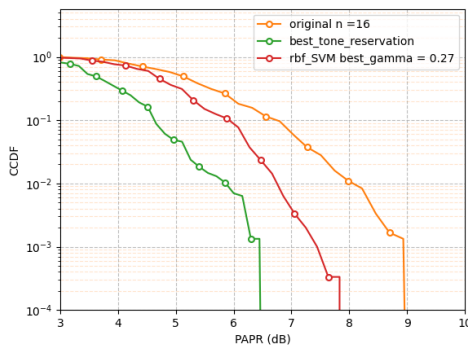
เหมาะสมและในโจทย์ปัญหาที่พิจารณานี้คอร์เนลที่เหมาะสมคือเกาส์เซียนอาร์บีเอฟ และพหุนาม ทั้งนี้เราจะนำผลจากคอร์เนลพหุนามของเอสวีเอ็มไปเปรียบเทียบกับวิธีเอเอ็นเอ็นในหัวข้อย่อยถัดไป



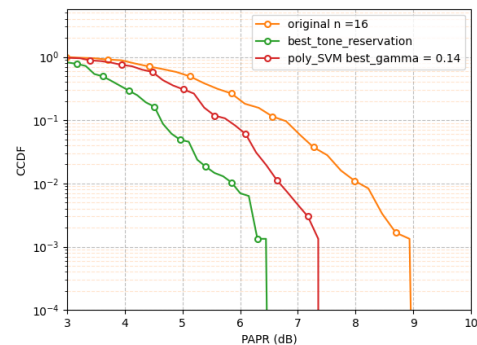
(ก) เซิงเสิ้น



(ข) ชิกมอยัด



(ค) เกาส์เซียนอาร์บีเอฟ



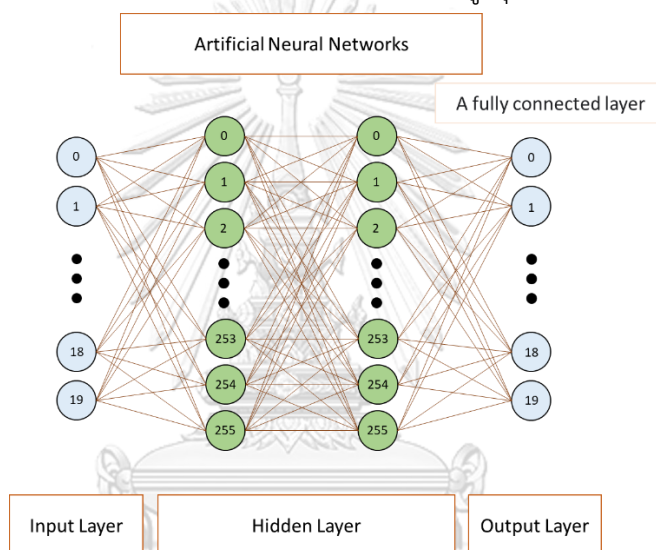
(ง) พหุนาม

รูปที่ 16 ผลการทดสอบค่าความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มของวิธีเอสวีเอ็มโดยใช้คอร์เนลที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบค่าเกมมาและฟังก์ชันคอร์เนลที่เหมาะสม คือค่าเกมมา เท่ากับ 0.14 และฟังก์ชันคอร์เนลแบบพหุนาม และกำหนดค่าที่ได้ลงบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

4.3 ผลการทดสอบการใช้เอเอ็นเอ็นร่วมกับเทคนิคการสำรองโหนดเพื่อลดค่าพีเอพียาร์

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นวิธีการที่รู้จักกันดีในอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งให้ความแม่นยำสูงและทำงานได้ดีสำหรับปัญหาการแบ่งกลุ่มได้หลายกลุ่ม ด้วยความสามารถจากหลักการทำงานของเอเอ็นเอ็น จึงได้เลือกนำมาใช้ประโยชน์เพื่อแก้ไขการเลือกค่าสำหรับคลื่นพายุย่อยสำรองเพื่อลดปัญหาพีเอพียาร์ของระบบโอเอฟดีเอ็มให้เหลือน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้เรากำหนดให้ใช้เอเอ็นเอ็นตามโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 13 จากรูปจะเห็นว่าชั้นขาเข้า (input layer) มีจำนวนโหนดมาก

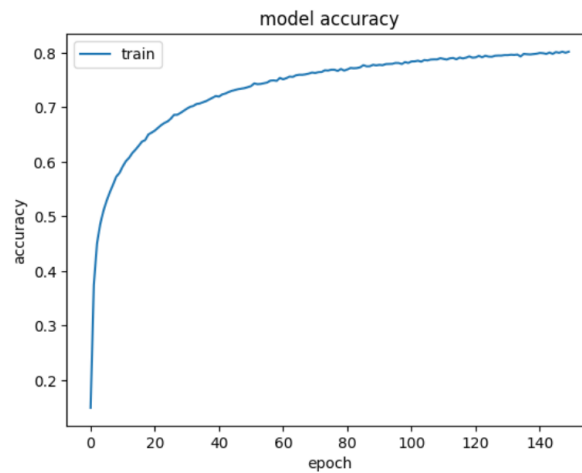
เท่ากับสองเท่าของจำนวนคลื่นพารัลลอลที่ใช้ส่งข้อมูล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20 ชั้นซ่อนเร้น (hidden layers) ได้กำหนดให้มีสองชั้นโดยแต่ละชั้นมี 256 โหนด โดยประกอบขึ้นเป็นเครือข่ายที่เชื่อมต่ออย่างสมบูรณ์ (fully connected) และชั้นขาออก (output layer) ชั้นขาเข้าใช้เพื่อนำชุดข้อมูลและถ่ายโอนข้อมูลไปยังชั้นซ่อนเร้น ซึ่งประกอบด้วยหนึ่งชั้นขึ้นไป ชั้นเหล่านี้รับข้อมูลขาเข้าประมวลผลและส่งต่อไปยังชั้นขาออก ชั้นขาออกมีหน้าที่รับผิดชอบในการจำแนกข้อมูล ขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ที่ได้ กระบวนการฝึกฝนจะดำเนินต่อไปจนกว่าจะพบผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สำหรับชั้นซ่อนเร้นใช้หน่วยเชิงเส้นตรงเรลยู (Relu) เป็นฟังก์ชันการเปิดใช้งานในการประมวลผล ในขณะที่ชั้นขาออกใช้ประโยชน์จากฟังก์ชันซอฟต์แวร์แมกซ์ (softmax) เพื่อจัดประเภทข้อมูล ในกระบวนการวนซ้ำใช้ตัวออปติไมเซอร์ Adam เพื่อปรับฟังก์ชันการสูญเสียให้เหมาะสมเพื่อทำนายความน่าจะเป็นสูงสุดของคลื่นสำรวจโทนที่เหมาะสม



รูปที่ 17 โครงสร้างของเอเอ็นเอ็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

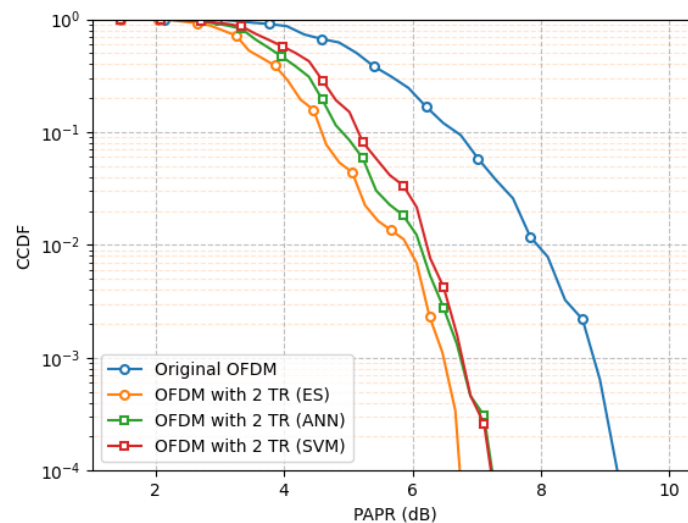
ผลการทดสอบพบว่า หลังจากการฝึกทั้งหมด 150 รอบ โดยใช้ขนาดของแบตช์เท่ากับ 10 ผลการฝึกมีพฤติกรรมดังแสดงในรูปที่ 14 จะเห็นว่าความแม่นยำเริ่มต้นมีค่าต่ำในระดับเพียง 10% หลังจากวนซ้ำปรับค่าเอเอ็นเอ็นไปจนครบ 150 รอบพบว่าค่าความแม่นยำลู่เข้าสู่ค่า 80% แต่เมื่อนำโมเดลที่ฝึกได้ไปทดสอบกับชุดข้อมูลการทดสอบที่แตกต่างจากชุดข้อมูลการฝึกพบว่าค่าความแม่นยำลดลงเหลือเพียง 47% จากนั้นได้นำโมเดลดังกล่าวนี้ไปใช้ประยุกต์กับการเลือกค่าโตนสำรวจให้กับสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม ในรูปที่ 15 ผลลัพธ์ของค่าความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มเติมของวิธีเอเอ็นเอ็นที่เสนอเทียบกับวิธีการค้นหาทุกกรณี พบว่าการเลือกค่าสัญญาณหากล้างของวิธีเอเอ็นเอ็นให้ผลที่ดีเข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากวิธีการค้นหาทุกกรณี และให้ผลที่ดีกว่าวิธีการเอสวีเอ็มแบบใช้เคอร์เนลพหุนามเล็กน้อย



รูปที่ 18 ค่าความแม่นยำของการฝึก

4.4 ผลการศึกษา

หลังจากการฝึกอัลกอริทึมเอชวีเอ็มและเอเอ็นเอ็น นำอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้สำหรับการเลือกคลื่นพายุย่อยสำรอง จากรูปที่ 16 พบว่า ณ ตำแหน่งค่าความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มเติมที่ 0.1 ค่าพีเอพีอาร์ของเอชวีเอ็มมีค่าประมาณ 5.1 dB ค่าพีเอพีอาร์ของเอชวีเอ็มมีค่าประมาณ 4.9 dB ดังนั้นทั้งเอเอ็นเอ็นและเอชวีเอ็มสามารถช่วยลดปัญหาพีเอพีอาร์ได้อย่างมีนัยสำคัญโดยที่อัลกอริทึมเอเอ็นเอ็นมีผลลัพธ์ที่ดีกว่าเอชวีเอ็มเล็กน้อย



รูปที่ 19 ค่าความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มเติมของวิธีการที่เสนอเทียบกับการค้นหาทุกกรณี

บทที่ 5 สรุป

ระบบการมัลติเพล็กซ์แบ่งความถี่แบบตั้งฉากหรือโอเอฟดีเอ็มเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้งานในมาตรฐานระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง อาทิ เทคโนโลยีเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a, g, n, ac และระบบสื่อสารเคลื่อนที่ได้แบบเซลลูลาร์ในยุคที่ 4 และยุคที่ 5 ด้วยเพราะมีคุณสมบัติที่ทนทานต่อการจางหายของสัญญาณเมื่อส่งผ่านช่องสัญญาณสื่อสารไร้สาย โดยอาศัยการส่งข่าวสารลงบนคลื่นพาห่อย่อยจำนวนมากขนานกัน ปัญหาที่สำคัญของระบบหลายคลื่นพาห่ก็คือมีค่ากำลังสูงสุดต่อค่ากำลังเฉลี่ยหรือค่าพีเอพียาร์ที่มีค่าสูงและต่ำแตกต่างกันไปในช่วงกว้าง ขึ้นอยู่กับรูปแบบของข้อมูลที่มอดูเลตลงบนคลื่นพาห่อย่อยแต่ละความถี่ ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ภาคขยายสัญญาณที่ภาคส่งในบางช่วงเวลาเพราะจะต้องทำงานในย่านไม่เชิงเส้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการลดค่าพีเอพียาร์ที่น่าสนใจหลายวิธี

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกเทคนิคที่มีชื่อเรียกว่า การสำรองโทน ซึ่งใช้การสำรองคลื่นพาห่อย่อยส่วนหนึ่งสำหรับเป็นกลไกในการลดค่าพีเอพียาร์ เทคนิคดังกล่าวนี้มีข้อดีสองประการคือ ประการแรกเทคนิคนี้ไม่ส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มแต่อย่างใด จึงรับประกันได้ว่าสมรรถนะของการส่งสัญญาณในระบบโอเอฟดีเอ็มไม่ได้รับผลกระทบแต่อย่างใด ประการที่สอง ระบบไม่จำเป็นต้องมีข่าวสารพิเศษเพิ่มเติมจึงไม่ก่อให้เกิดความซับซ้อนของระบบเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น ด้วยโจทย์ปัญหาหลักของการใช้งานเทคนิคการสำรองโทนคือ การเลือกค่าสัญญาณการมอดูเลตสำหรับการหักล้างที่เหมาะสมให้กับคลื่นพาห่อย่อยสำรองแต่ละความถี่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าพีเอพียาร์ของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มต่ำลง แนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ การประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องจำนวนสองวิธี ได้แก่ ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนหรือเอสวีเอ็ม และโครงข่ายประสาทเทียมหรือเอเอ็นเอ็น เพื่อใช้ในการเลือกค่าสัญญาณการมอดูเลตสำหรับการหักล้างของคลื่นพาห่อย่อยสำรองแต่ละความถี่

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างชุดข้อมูลการฝึกและการทดสอบทั้งหมดหนึ่งแสนตัวอย่างโดยให้กำเนิดสัญญาณข้อมูลขาเข้าสำหรับคลื่นพาห่อย่อยแต่ละความถี่ทั้งหมด 10 ความถี่อย่างสุ่มโดยใช้เป็นค่าเชิงซ้อนตามการมอดูเลตคิวเอเอ็ม และค้นหาค่าของสัญญาณหักล้างที่เหมาะสมให้กับคลื่นพาห่อย่อยสำรองจำนวน 2 ความถี่โดยใช้การค้นหาทั้งหมดทุกกรณี เพื่อประกันได้ว่าข้อมูลชุดฝึกที่สร้างขึ้นเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นได้นำชุดฝึกและการทดสอบไปแบ่งออกเป็นสองส่วน กล่าวคือ ชุดฝึก 70% และชุดทดสอบ 30% ใช้สำหรับทดสอบประสิทธิภาพของการเรียนรู้ของเครื่องทั้งสองวิธี

ในการประยุกต์ใช้งานเอสวีเอ็มกับการตัดสินใจเลือกค่าสัญญาณหักล้างของคลื่นพาห่อย่อยทั้งสองต้องมีการแบ่งกลุ่มของค่าขาออกทั้งหมด 17 กลุ่ม โดยคำนวณจาก $4 \times 4 + 1$ รูปแบบ ทั้งนี้ได้พิจารณากรณีที่ไม่ใช้สัญญาณหักล้างเป็นทางเลือกสุดท้าย ด้วยเพราะในบางสถานการณ์การใส่

สัญญาณหักล้างไม่ช่วยทำให้ค่าพีเอพ็อดดีขึ้น ด้วยพื้นฐานของเอสวีเอ็มได้รับการออกแบบมาสำหรับการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองกลุ่ม ในกรณีของงานวิจัยนี้มีการแบ่งกลุ่มทั้ง 17 กลุ่ม จึงได้พิจารณาเลือกใช้เทคนิคที่เรียกว่า หนึ่งต่อหนึ่ง มาประยุกต์ใช้สำหรับการแบ่งกลุ่มที่มากกว่าสองกลุ่มขึ้นไป การทำงานของวิธีหนึ่งต่อหนึ่งกำหนดให้ต้องมีการสร้างและฝึกเอสวีเอ็มขึ้น 136 ชุด โดยการฝึกเอสวีเอ็มแต่ละชุดให้ใช้ตัวอย่างชุดฝึกข้อมูลที่มาจกสองกลุ่มเท่านั้น เมื่อฝึกจนครบทั้ง 136 ชุดแล้ว ในการทดสอบให้ป้อนข้อมูลเข้าให้กับเอสวีเอ็มทุกชุด และเลือกกลุ่มที่มีเอสวีเอ็มตัดสินใจมากที่สุดเป็นผลเฉลยสุดท้าย ในการทดสอบที่ได้ดำเนินการไปมีการเลือกใช้คอร์เนลทั้งหมดสี่แบบ คือ เชิงเส้น พหุนาม เกาส์เซียนอาร์บีเอฟ และชิกมอยด์ ด้วยการทดสอบต้องใช้เวลาคำนวณนาน ในขั้นตอนการเลือกคอร์เนลที่เหมาะสมใช้จำนวนตัวอย่างการทดสอบหนึ่งหมื่นชุด ซึ่งผลการทดสอบพบว่าคอร์เนลพหุนามให้ผลลัพธ์ของการลดค่าพีเอพ็อดได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด คอร์เนลเกาส์เซียนอาร์บีเอฟก็ให้ผลลัพธ์ที่ดีใกล้เคียงกับพหุนาม ในขณะที่คอร์เนลเชิงเส้นและคอร์เนลชิกมอยด์ไม่สามารถจำแนกกลุ่มได้แต่อย่างใด กล่าวคือ ไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใช้เทคนิคการสำรองโหนดด้วยเหตุนี้ จึงดำเนินการทดสอบอย่างเต็มรูปแบบโดยใช้คอร์เนลพหุนามเพื่อประเมินผลสมรรถนะของการลดค่าพีเอพ็อดโดยพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มเติมของค่าพีเอพ็อด ผลการทดสอบพบว่าวิธีเอสวีเอ็มที่เสนอสามารถช่วยลดค่าพีเอพ็อดได้ดี โดยใช้เป็นทางเลือกสำหรับการประยุกต์ใช้กับเทคนิคการสำรองโหนดที่ดีได้

การประยุกต์ใช้เอเอ็นเอ็นกับการตัดสินใจเลือกค่าสัญญาณหักล้างของคลื่นพายุย่อยได้เลือกใช้จำนวนชั้นซ่อนเร้นไว้ 2 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีจำนวนนิวรอน 256 ตัวต่อเชื่อมกับทั้งหมด โดยเลือกฟังก์ชันเปิดการใช้งานที่เรียกว่า เรลู ในชั้นขาเข้ากำหนดตามจำนวนคลื่นพายุย่อยที่ใช้ส่งข้อมูลและคูณด้วยสองเพื่อรองรับค่าจริงและค่าจินตภาพของสัญญาณการมอดูเลต ทั้งนี้ ได้กำหนดให้มีการทำอลแมลโลเซชันของสัญญาณขาเข้าด้วย ในชั้นขาออกของเอเอ็นเอ็นเลือกใช้ซอฟต์แวร์แมกซ์เป็นฟังก์ชันเปิดการใช้งานโดยมีจำนวนขาออกเท่ากับจำนวนกลุ่ม 17 ขา ฉะนั้น ที่ขาออกแต่ละขาจะเป็นค่าความน่าจะเป็นของกลุ่มนั้น ๆ ดังนั้น ให้เลือกขาออกที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงสุดเป็นผลเฉลยสุดท้าย ผลการฝึกโดยใช้อัลกอริทึมอาดัมพบว่าให้ค่าความแม่นยำที่ 80% ในช่วงการฝึก และให้ค่าความแม่นยำลดลงมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อนำไปใช้ทดสอบกับการลดค่าพีเอพ็อดจริง พบว่าให้ค่าความน่าจะเป็นสะสมเพิ่มเติมของค่าพีเอพ็อดที่ดีใกล้เคียงกับการใช้วิธีค้นหาทั้งหมดทุกกรณี และดีกว่าวิธีเอสวีเอ็ม

กล่าวโดยสรุปจากผลการศึกษาและวิจัยพบว่าเทคนิคทั้งสองวิธีที่เสนอ คือ เอเอ็นเอ็น และเอสวีเอ็ม สามารถช่วยลดปัญหาพีเอพ็อดได้อย่างมีนัยสำคัญโดยที่วิธีเอเอ็นเอ็นมีผลลัพธ์ที่ดีกว่าเอสวีเอ็มเล็กน้อย ทั้งสองวิธีจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการสำรองโหนดในการลดค่าพีเอพ็อดของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มได้

บรรณานุกรม

1. Laricchia, F. *Smartphones - statistics & facts*. 2023 [cited 2023 Nov 15]; Available from: <https://www.statista.com/topics/840/smartphones/#topicOverview>.
2. Wirastuti, N., et al., *Evaluation of clipping and filtering-based PAPR reduction in OFDM system*. J. Electr. Electron. Informatics, 2017. **1**(2): p. 18.
3. Pawar, D.S. and H.S. Badodekar. *Review of papr reduction techniques in wireless communication*. in *2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN)*. 2018. IEEE.
4. O'Neill, R. and L.B. Lopes. *Envelope variations and spectral splatter in clipped multicarrier signals*. in *Proceedings of 6th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. 1995. IEEE.
5. Li, X. and L.J. Cimini. *Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM*. in *1997 IEEE 47th Vehicular Technology Conference. Technology in Motion*. 1997. IEEE.
6. Armstrong, J., *Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering*. Electronics letters, 2002. **38**(5): p. 1.
7. Muller, S.H. and J.B. Huber. *A comparison of peak power reduction schemes for OFDM*. in *GLOBECOM 97. IEEE Global Telecommunications Conference. Conference Record*. 1997. IEEE.
8. Robert, B., F. Robert, and B. Johannes, *Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping*. Electronics letters, 1996. **32**(22): p. 2056-2057.
9. Breiling, H., S.H. Muller-Weinfurtner, and J.B. Huber, *SLM peak-power reduction without explicit side information*. IEEE Communications letters, 2001. **5**(6): p. 239-241.
10. Müller, S.H. and J.B. Huber, *OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences*. Electronics letters, 1997. **33**(5): p. 368-369.

11. Muller, S.H. and J.B. Huber. *A novel peak power reduction scheme for OFDM*. in *Proceedings of 8th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-PIMRC'97*. 1997. IEEE.
12. Electric, S., *Tone reservation method for PAPR reduction scheme*. IEEE 802.16 e-03/60, 2003.
13. Li, J., H. Wang, and X. Zhao. *Chaotic variable based Tone Reservation for reducing PAPR of OFDM signals*. in *2009 WRI World Congress on Software Engineering*. 2009. IEEE.
14. Li, L., C. Tellambura, and X. Tang. *Improved tone reservation method based on deep learning for PAPR reduction in OFDM system*. in *2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. 2019. IEEE.
15. Wang, B., Q. Si, and M. Jin, *A novel tone reservation scheme based on deep learning for PAPR reduction in OFDM systems*. IEEE Communications Letters, 2020. **24**(6): p. 1271-1274.
16. Sebald, D.J. and J.A. Bucklew, *Support vector machine techniques for nonlinear equalization*. IEEE transactions on signal processing, 2000. **48**(11): p. 3217-3226.
17. Mathur, A. and G.M. Foody, *Multiclass and binary SVM classification: Implications for training and classification users*. IEEE Geoscience and remote sensing letters, 2008. **5**(2): p. 241-245.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Tayakorn Mahakornpetch
วัน เดือน ปี เกิด	13 ธันวาคม 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพ
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	5 สุขสวัสดิ์ 9 แยก 2 บางประกอก ราษฎร์บูรณะ 10140



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY