

การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้สายระหว่างเรือในทะเลกับสถานีฝั่งโดยใช้  
ระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเชิงรังสี



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Performance analysis and evaluation of wireless communication between ships at sea  
and shore station using Monte Carlo ray method

Commander Attasit Tingsuwatit



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้  
สายระหว่างเรือในทะเลกับสถานีฝั่งโดยใช้ระเบียบวิธีมอน  
ติคาร์โลเชิงรังสี

โดย

นาวาโทอรรถสิทธิ์ ดิงสุวาทิตย์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อิศกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี)

.....กรรมการ

(นาวาเอก ดร.วิทยา ปัญญารญาณ)

อรรถสิทธิ์ ดิงสุวาทิตย์ : การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้สายระหว่างเรือในทะเลกับสถานีฝั่งโดยใช้ระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเชิงรังสี (Performance analysis and evaluation of wireless communication between ships at sea and shore station using Monte Carlo ray method) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี, 56 หน้า.

ในปัจจุบันการสื่อสารไร้สายทางทะเลได้มีความสำคัญมากขึ้นเนื่องจากการใช้งานเครือข่ายแบบแอตชอกไร้สายทางทะเลที่เพิ่มขึ้น แต่สิ่งหนึ่งที่มีผลกระทบต่อเชื่อมโยงสัญญาณคือการโคลงของเรืออันเกิดจากคลื่นในทะเล โดยเฉพาะเรือที่ไม่มีระบบรักษาความเสถียรของเสาอากาศจะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนขอแนวสายอากาศระหว่างเสารับกับเสาส่งไม่ตรงกันเป็นหลัก ซึ่งระดับผลกระทบนั้นขึ้นอยู่กับความกว้างของแถบสัญญาณของเสาอากาศที่เรือและของเสาอากาศบนฝั่ง นอกจากนี้แล้วสาเหตุที่ทำให้สัญญาณมีคุณภาพด้อยลงยังมาจากสาเหตุการเกิดมลติพาธเฟสด้งอันเนื่องจากคลื่นสะท้อนพื้นน้ำทะเล ดังนั้นถ้าจำเป็นต้องประเมินคุณภาพของการเชื่อมโยงสัญญาณต้องสามารถพยากรณ์ประสิทธิภาพของการสื่อสารได้อย่างถูกต้อง

ในการวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการวิเคราะห์การสื่อสารระหว่างเรือในทะเลกับสถานีฝั่งโดยใช้ระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเชิงรังสี สำหรับการจำลองรูปแบบคลื่นในทะเลนั้นใช้การจำลองจากสเปกตรัมแบบด้านเดียวของเพียร์สัน และมอสโควิทซ์ ซึ่งระเบียบวิธีมอนติคาร์โลที่ใช้นั้นอ้างอิงจากพื้นฐานระเบียบวิธีเรย์เทรส์ซึ่งซึ่งถูกใช้ในการพยากรณ์สัญญาณที่กระทบพื้นทะเลที่ไม่เรียบและเคลื่อนไหวไปมาตลอดเวลาของทุกค่าเวลา สำหรับในการปฏิบัตินั้นการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเรย์เทรส์ซึ่งถูกจำกัดให้การสะท้อนสูงสุดที่จำนวนการกระทบ ๒ ครั้ง โดยความเข้มของสัญญาณทั้งหมดที่ได้ นั้นมาจากผลรวมของสัญญาณที่รับได้โดยตรงกับสัญญาณที่รับได้จากการกระทบพื้นน้ำทะเล ซึ่งสุดท้ายแล้วค่าทางสถิติที่ได้นั้นเกิดจากการหาค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากหลายชุดข้อมูล

โดยผลลัพธ์เชิงสถิติที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ นั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากกรณีของเรือที่อยู่กับที่บนพื้นท้องทะเลเรียบเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการเชื่อมโยงสัญญาณ ซึ่งข้อมูลที่ได้เบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าการคลาดเคลื่อนของเสาอากาศระหว่างเสาอากาศรับกับเสาอากาศส่งนั้นมีผลกระทบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณที่สะท้อนพื้นน้ำทะเลที่ไม่เรียบและมีการเคลื่อนที่ไปมาตลอดเวลา

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5770356021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MOBILE ADHOC NETWORK, / MONTE CARLO METHOD, / RAY TECHNIQUE, / ROUGH SEA SURFACE / การสื่อสารเครือข่ายแบบแอดฮอค ไร้สาย ความเร็วสูง, / ระเบียบวิธีการมอนติคาร์โล, / ระเบียบวิธีการเชิงรังสี, / พื้นน้ำทะเลไม่เรียบ

ATTASIT TINGSUWATIT: Performance analysis and evaluation of wireless communication between ships at sea and shore station using Monte Carlo ray method. ADVISOR: PANUWAT JANPUGDEE, Ph.D., 56 pp.

Nowadays a maritime wireless communication has become important due to the increase of maritime mobile ad hoc networks. One of characteristics that affects the communication link performance is the rolling of ships due to the ocean wave. For a ship without antenna stabilization, this will essentially causes the misalignment of transmitting and receiving antennas. The level of impact depends on the beam widths of both ship-based and shore station antennas. Another source of signal degradation is a multipath fading due to the scattering by the sea surface. In order to evaluate the link quality, the accurate prediction of the communication link performance is needed.

In this research, an analysis of a communication between a ship at sea and a shore station by a ray-based Monte Carlo method has been proposed. Specifically, a sea surface is modeled by the one-side Pierson-Moskowitz spectrum. A Monte Carlo method based on a ray tracing has been employed to predict the scattering from the temporally evolving rough sea surface for each time step. As for a practical purpose, the maximum of double reflections has been restricted in the ray tracing. The total signal is obtained by the superposition of the direct radiated wave and the scattered field. Finally, the statistical numerical result is obtained by averaging the results from many realizations.

Numerical results obtained by the proposed method are compared with the base case of a stationary ship over a flat sea surface for the link performance evaluation. The preliminary results show that the misalignment of transmitting and receiving antennas due to the rolling ship has relatively less impact on the communication link performance than the multipath fading due to the scattering by the temporally evolving rough sea surface.

Department: Electrical Engineering                      Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering                      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ถ่ายทอดความรู้ให้กระผมขณะศึกษาอยู่ที่นี้ รวมถึงข้อชี้แนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ อีกทั้งยังให้โอกาส กระผมได้ใช้ความรู้ ความสามารถ และแสดงออกอย่างเต็มที่

กระผมขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี ที่กรุณาช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงข้อแนะนำ และคำปรึกษาต่างๆ ที่ทำให้กระผมมีความรู้ และความเข้าใจในหัวข้อของงานวิจัยนี้อย่างท่องแท้

อาจารย์ ผศ. ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ที่กรุณาให้กระผมติดรถกลับบ้านเป็นประจำ และเลี้ยงแฮมเบอเกอร์ในท้องเรียน ผมอยากจะทำบอกร้อยมากครับ อาจารย์ รศ. ดร.ดวงฤดี (วงศ์ลำซำ) วรสุชีพ ที่กรุณาถ่ายทอดประสบการณ์ดี ๆ สมัยเรียนอยู่ที่อเมริกา และให้โอกาสได้แก้ตัวในหัวข้อการบรรยายอีกครั้ง อาจารย์ ผศ.ดร.ชัยเชษฐ สายวิจิตร ที่กรุณาเสียสละเวลาช่วยทบทวนเนื้อหาวิชาสถิติ และความน่าจะเป็นให้จนกระผมเข้าใจอย่างกระจ่างแจ้ง รวมถึงเป็นตัวอย่างการใช้ภาษาอังกฤษที่ยอดเยี่ยมให้กับกระผม อาจารย์ ผศ. ดร.สุพัฒนา เอื้อทวีเกียรติ ที่ให้ความรู้ และเนื้อหาสาระอย่างเต็มที่ และให้คำปรึกษาในหัวข้อที่กระผมไม่เข้าใจ อาจารย์ทุกท่านในวิชา Communications Engineering Labs ที่ถ่ายทอดความรู้ ด้านการใช้งานอุปกรณ์เครื่องมือสื่อสารต่าง ๆ รวมถึงอาจารย์ทุกท่านในวิชาสัมมนาที่ถ่ายทอดความรู้ รวมถึงให้คำชี้แนะดี ๆ ที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาระดับปริญญาโท และการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณบุคคลากรของจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานต่าง ๆ ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมถึงน้อง ๆ ที่มีน้ำใจคอยช่วยเหลือ เป็นธุระให้ในยามที่ไม่สะดวก

ขอขอบคุณกองทัพเรือที่ให้โอกาสกระผมได้มาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อศึกษาหาความรู้เพิ่มเติม โดยกระผมตั้งใจว่าจะนำความรู้ที่ได้รับนี้กลับไปปรับใช้ และพัฒนากองทัพเรือให้เจริญยิ่งขึ้นอย่างเต็มความสามารถต่อไป

ขอขอบพระคุณพ่อ และแม่ ที่ปลูกฝังให้กระผมเป็นคนดี มีพื้นฐานการศึกษาที่ดี และสนับสนุนให้รักการเรียนรู้ และค้นคว้าอย่างต่อเนื่อง

และสุดท้ายขอขอบคุณภรรยาที่น่ารักของกระผมที่คอยอยู่เคียงข้าง คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจกระผมอยู่ตลอดเวลา และตลอดไป

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
2.1 ประวัติของเทคโนโลยีการสื่อสารทางทะเล.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	10
3.1 การสื่อสารผ่านโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอค (Mobile ad hoc network).....	10
3.2 แบบจำลองคลื่นในทะเล.....	15
3.3 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับเสาอากาศ.....	17
3.3.1 รูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiation pattern).....	18
3.3.2 ความกว้างลำคลื่น หรือบีมวิดท์ (Beamwidth).....	19

3.3.3 ความหนาแน่นกำลังการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiation power density) .....	21
3.3.4 โพลาริเซชัน (Polarization).....	22
3.4 เส้นทางของการแผ่กระจายคลื่น (Propagation paths).....	23
3.5 ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องรับ .....	24
3.5.1 ความเข้มของสัญญาณในแนวตรง (Direct path power) .....	25
3.5.2 ความเข้มของสัญญาณสะท้อน (Reflect path power).....	25
3.5 ระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเชิงรังสี .....	26
3.5.1 ระเบียบวิธีเชิงรังสี.....	27
3.5.2 ระเบียบวิธีมอนติคาร์โล .....	29
บทที่ 4 แนวทางวิทยานิพนธ์ที่เสนอ .....	30
4.1 การคำนวณหาความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ กรณีเรืออยู่นิ่ง และพื้นน้ำทะเลเรียบ.....	30
4.2 สร้างแบบจำลองการเกิดคลื่น.....	33
4.3 แบบจำลองการโคลงของเรือ.....	35
4.4 คำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณที่เกิดจากการโคลงของเรือโดยระเบียบวิธีเชิงรังสี .....	36
บทที่ 5 ผลการทดลองเบื้องต้น .....	47
5.1 การกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง .....	47
5.2 ผลการจำลองค่าขนาดความเข้มของสัญญาณกรณีเรืออยู่นิ่ง กับกรณีเรือโคลง .....	48
5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างกรณีเรืออยู่นิ่ง กับกรณีเรือโคลง.....	51
5.4 สรุปข้อมูลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการโคลงของเรือ และขนาดความกว้าง ของบีมวิคต์เสาอากาศส่ง และเสาอากาศรับ.....	52
บทที่ 6 บทสรุป และข้อเสนอแนะ .....	53
รายการอ้างอิง .....	54
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	56



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1	ความเป็นไปได้ทั้งหมดของเส้นทางที่รังสีเดินทางออกจากจุดกำเนิดไปยังจุดรับ สัญญาณโดยมีจำนวนการสะท้อนมากที่สุดที่จำนวน 2 ครั้ง.....	40
ตารางที่ 5.1	ตารางสรุปค่าต่าง ๆ จากการจำลองทั้ง 2 กรณี.....	51



## สารบัญรูป

รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอดฮอก .....	12
รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอดฮอก ทางเรือ .....	13
รูปที่ 3.3 แบบจำลอง Pierson-Moskowitz (PM) Spectrum ที่ค่าความเร็วลมระหว่าง 2 ถึง 20 เมตร/วินาที (ที่มา: [18]).....	16
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของเสาอากาศแบบ whip (ที่มา [19]) .....	18
รูปที่ 3.5 ความกว้างของลำคลื่นที่ Half Power Beamwidth และ First Null Beamwidth (ที่มา: [21]).....	19
รูปที่ 3.6 รูปแบบการแพร่คลื่นขณะเรือโคลงเมื่อปีมวิตรมีขนาดเล็ก .....	20
รูปที่ 3.7 รูปแบบการแพร่คลื่นขณะเรือโคลงเมื่อปีมวิตรมีขนาดใหญ่.....	20
รูปที่ 3.8 การติดตั้งเสาอากาศเพิ่มเติมเพื่อแก้ปัญหาจากการโคลงของเรือ .....	21
รูปที่ 3.9 โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ (ที่มา: [22]) .....	23
รูปที่ 3.10 เส้นทางการแพร่กระจายคลื่น.....	24
รูปที่ 3.11 กฎของการสะท้อน (Law of reflection) แสดงมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน .....	26
รูปที่ 3.12 แสดงลำคลื่นสะท้อนเพียงลำคลื่นเดียวจากพื้นทะเลเรียบที่สามารถเดินทางไปยังเครื่องรับ .....	26
รูปที่ 3.13 สัญญาณสะท้อนพื้นน้ำทะเลที่สามารถเดินทางไปยังเครื่องรับ .....	26
รูปที่ 3.14 การยิงรังสีแบบ Burst method .....	27
รูปที่ 3.15 วิธีการยิงรังสีไปยังพื้นที่ที่สนใจโดยมีระยะห่างระหว่างจุดที่เท่าๆ กัน .....	28
รูปที่ 3.16 แสดงการสร้างข้อมูลจำนวน 100 ชุดข้อมูลเพื่อขจัด noise ออกไป (ที่มา: [18]) .....	29
รูปที่ 4.1 รูปแบบกรณีเรืออยู่นิ่ง และพื้นน้ำทะเลเรียบ .....	30
รูปที่ 4.2 รูปกรณีเรือโคลง และพื้นน้ำทะเลไม่เรียบ.....	36
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุม กับความชัน.....	37
รูปที่ 4.4 ค่าแสดงความเป็นบวก หรือลบของมุมตกกระทบ.....	39

รูปที่ 4.5 ค่าแสดงความเป็นบวก หรือลบของพื้นผิวดกกระทบ.....	39
รูปที่ 4.6 ค่าแสดงความเป็นบวก หรือลบของมุมตกสะท้อน .....	40
รูปที่ 4.7 รังสีสะท้อนน้ำทะเล 1 ครั้งแล้วเดินทางไปยังเครื่องรับ .....	43
รูปที่ 4.8 เส้นทางที่ระหว่างจุดตกกระทบที่ 1 และ 2 .....	43
รูปที่ 4.9 แสดงความต่างระหว่างฟังก์ชันรังสีสะท้อน กับฟังก์ชันความสูงของคลื่นทะเล .....	44
รูปที่ 4.10 แสดงการหาจุดตกกระทบที่ 2 ของรังสีสะท้อน.....	44
รูปที่ 4.11 การหาค่าเฉลี่ยเอนซิมเบิลของความเข้มสนามไฟฟ้ารวม.....	46
รูปที่ 5.1 ความกว้างบีมวิดิธของการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตั้งขนาด 90 และ 23.765 องศา.....	48
รูปที่ 5.2 ค่าขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ารวม $ \vec{E}_d + \vec{E}_s $ กรณีเรือโคลง และบีมวิดิธของเสาอากาศรับ และส่งมีขนาด 90 องศา.....	49
รูปที่ 5.3 รูปการกระจายความเข้มสนามไฟฟ้ารวมของช่องสัญญาณที่บีมวิดิธ 90 องศา.....	49
รูปที่ 5.4 ค่าขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ารวม $ \vec{E}_d + \vec{E}_s $ กรณีเรือโคลง และบีมวิดิธของเสาอากาศรับ และส่งมีขนาด 23.765 องศา.....	50
รูปที่ 5.5 รูปการกระจายความเข้มสนามไฟฟ้ารวมของช่องสัญญาณที่บีมวิดิธ 23.765 องศา.....	50
รูปที่ 5.6 ค่าอัตราส่วนความเข้มสนามไฟฟ้าของความกว้างบีมวิดิธที่ 90 องศา.....	50
รูปที่ 5.7 ค่าอัตราส่วนความเข้มสนามไฟฟ้าของความกว้างบีมวิดิธที่ 23.765 องศา.....	51

## บทที่ 1

### บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหาที่เป็นหัวข้องานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสื่อสารไร้สายด้วยความเร็วสูงทางทะเล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดต่อสื่อสารระหว่างเรือในทะเลกับศูนย์ควบคุมและสั่งการบนบก รวมทั้งนำเสนอวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากวิทยานิพนธ์นี้ และประมวลวิทยานิพนธ์

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากผู้วิจัยเคยมีประสบการณ์ทำงานรับราชการที่กรมสื่อสารทหารเรือ (ชื่อหน่วยในขณะนั้น) สังกัดกองทัพเรือเป็นระยะเวลาหลายปี และตระหนักถึงความสำคัญในบทบาทและหน้าที่ของกองทัพเรือ ในการรักษาอธิปไตยและผลประโยชน์แห่งชาติทางทะเลที่มีอยู่อย่างมหาศาล รวมถึงการบังคับใช้กฎหมายทางทะเลที่เกี่ยวข้องต่อผู้ที่กระทำผิด การที่กองทัพเรือจะสามารถบรรลุภารกิจดังกล่าวได้ จำเป็นต้องพัฒนาขีดความสามารถด้านการสื่อสาร โดยเฉพาะการใช้งานระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายเป็นศูนย์กลาง ในรูปแบบ Communication Command Control and Computer Intelligent for Surveillance and Recognizance (C4ISR) เพื่อให้กองทัพเรือตอบสนองได้ทันท่วงทีต่อภัยคุกคามในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ทั้งนี้อุปสรรคอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการพัฒนาด้านการสื่อสารแบบเครือข่ายในทะเลคือการขาดประสิทธิภาพด้านการสื่อสารไร้สายเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเรือในทะเลกับสถานีฝั่ง ปัญหาดังกล่าวส่งผลต่อระบบการควบคุมและสั่งการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาและเข้าใจถึงผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการเชื่อมโยงสัญญาณ เพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปปรับปรุงเพิ่มขีดความสามารถด้านการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารด้วยความเร็วสูงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้จะช่วยให้กองทัพเรือสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ตามภารกิจที่ได้รับมอบหมายได้สำเร็จและมีประสิทธิภาพสูงสุด

ความสำคัญของการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงแบบไร้สายในทะเลนั้น ไม่ได้จำกัดแต่เฉพาะในกองทัพเรือ การสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงแบบไร้สายยังมีความสำคัญในภาคพลเรือนและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเรือสินค้า โดยปกติเรือสินค้ามีความจำเป็นต้องใช้การสื่อสารไร้สายด้วยความเร็วสูงในการแลกเปลี่ยนข้อมูลเพื่อติดต่อกับสถานีฝั่ง สำหรับการรับส่งไฟล์ข้อมูลและจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ การค้นหาข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต การประชุมทางไกล การใช้งานด้านความปลอดภัยในการเดินเรือในร่องน้ำ การเข้าออกจากท่าเรือ การช่วยเหลือผู้ประสบภัยกรณีฉุกเฉิน หรือ

แม้แต่การติดต่อเรื่องส่วนตัวของลูกเรือกับครอบครัว เป็นต้น นอกจากนี้ ตามกฎด้านความปลอดภัยในการเดินเรือสากล (International maritime organization – IMO) ได้กำหนดให้เรือสินค้าที่มีระวางขับน้ำตั้งแต่ 300 ตันกรอส (Gross ton - GT) ขึ้นไปจำเป็นต้องมีระบบรายงานตนอัตโนมัติ (Automatic identification system – AIS) เพื่อการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่จำเป็นต่อการเดินเรือในทะเลตลอดเวลา [1] แต่ระบบดังกล่าวใช้การสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายที่มีช่องสัญญาณขนาดเล็กเท่านั้น และยังไม่สนองต่อการรับส่งข้อมูลที่เพียงพอต่อความปลอดภัยในการเดินเรือ ในปัจจุบัน IMO ได้เสนอระบบนำทางอิเล็กทรอนิกส์ (e-navigation) ซึ่งเป็นระบบสารสนเทศที่ใช้จัดเก็บ แลกเปลี่ยน รวบรวม วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลของเรือและสถานีฝั่ง [2] จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงแบบไร้สายในทะเลมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อเรือสินค้าในทะเล

การสื่อสารระหว่างเรือในทะเลกับสถานีสื่อสารบนฝั่งมีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้สัญญาณจากเครื่องส่งไม่สามารถไปถึงเครื่องรับได้ หรือการรับส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ต้องการ ทั้งนี้คลื่นในทะเลเป็นหนึ่งในปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากความคาดเคลื่อนของแนวเสาอากาศระหว่างเรือกับสถานีฝั่งจากตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ เนื่องจากคลื่นทำให้เรือเกิดการโคลงและส่งผลให้เสาอากาศที่ติดตั้งบนเรือมีการเปลี่ยนทิศทางเล็งของเสาอากาศไปตามการโคลงของเรือ ทั้งนี้ระดับผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับความกว้างของลำคลื่นที่ถูกส่งออกมา [3] นอกจากนี้ยังมีผลกระทบที่เกิดจากการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทาง (Multipath propagation) โดยที่สัญญาณที่ส่งจากเรือไปยังสถานีฝั่งมีการสะท้อนพื้นน้ำทะเลและแพร่กระจายไปยังเครื่องรับที่สถานีฝั่งอีกด้วย โดยความเข้มและเฟสของสัญญาณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของคลื่นและการโคลงของเรือ ส่งผลให้มุมที่สัญญาณตกกระทบพื้นน้ำทะเลไม่คงที่ อีกทั้งพื้นผิวน้ำทะเลที่สัญญาณตกกระทบก็มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้ การประเมินประสิทธิภาพการสื่อสารไร้สายระหว่างเรือในทะเลกับสถานีฝั่งจึงทำได้ยาก และมีหลายปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณา การศึกษาวิจัยในงานวิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวทางในการประเมินประสิทธิภาพของการสื่อสารดังกล่าวโดยระเบียบวิธีเชิงสถิติแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo method) ร่วมกับการคำนวณการแพร่กระจายคลื่นด้วยระเบียบวิธีการตามรอยลำคลื่น (Ray tracing method) เพื่อคำนวณความเข้มของสัญญาณรวมที่ไปถึงเครื่องรับที่สถานีฝั่ง โดยการจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจากหลาย ๆ ชุดข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติที่เชื่อถือได้ และสามารถคาดการณ์ประสิทธิภาพของการสื่อสารได้อย่างถูกต้องแม่นยำขึ้น ทั้งนี้ ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาวิเคราะห์หาความกว้างของลำคลื่นที่เหมาะสม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบหรือปรับปรุงระบบสื่อสารไร้สายที่ติดตั้งบนเรือให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาวิจัยและรวบรวมองค์ความรู้ด้านการสื่อสารแบบไร้สายด้วยความเร็วสูงระหว่างเรือในทะเลที่มีคลื่นกับสถานีบนชายฝั่ง
- 2) เพื่อสร้างแบบจำลองและคำนวณการส่งสัญญาณจากเรือในทะเลไปยังสถานีชายฝั่ง สำหรับทะเลในสภาวะต่างๆ โดยใช้ระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเชิงรังสี พร้อมทั้งวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณ
- 3) เพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ของเสาอากาศที่เหมาะสม โดยคิดผลกระทบจากการโคลงของเรือและการสะท้อนของสัญญาณจากทะเลที่มีคลื่น เพื่อให้ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องรับบนสถานีฝั่งมีค่าสูงสุดโดยเฉลี่ย ซึ่งจะส่งผลให้การสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายด้วยความเร็วสูงระหว่างเรือกับสถานีฝั่งมีประสิทธิภาพดีที่สุด

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) วิเคราะห์ผลกระทบของคลื่นทะเลที่มีต่อประสิทธิภาพของสัญญาณ ณ เครื่องรับ
- 2) เปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากขนาดของบีมวิดิธที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสัญญาณ ณ เครื่องรับ

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาแบบการใช้งานการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง ไร้สาย ในทะเล
- 2) สร้างแบบจำลองการเกิดคลื่นในทะเล และรูปแบบการโคลงของเรือ
- 3) ศึกษาระเบียบวิธีเชิงรังสี และมอนติคาร์โล
- 4) จำลองสถานการณ์การสื่อสารกรณีเรือโคลงเพื่อหาความเข้มของสัญญาณที่เกิดขึ้น ณ เครื่องรับ
- 5) วิเคราะห์ผลข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการสื่อสารกรณีเรืออยู่นิ่ง
- 6) สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจผลกระทบที่เกิดจากการโคลงของเรือที่มีผลต่อความเข้มของสัญญาณที่เครื่องรับ

2) รูปแบบของการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการสื่อสารระหว่างเรือกับสถานีฝั่ง

3) เป็นข้อมูลเพื่อใช้ออกแบบเสาอากาศให้สามารถใช้งานได้ดีกับการสื่อสารทางทะเลให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

## 1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 - บทนำ: กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหาที่เป็นหัวข้องานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากวิทยานิพนธ์นี้ และประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 - ทบทวนวรรณกรรม: บทนี้ทบทวนงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 - หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง: บทนี้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่จำเป็นเริ่มต้นจากการสื่อสารในภาพรวมไปจนถึงการคำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ

บทที่ 4 - การสร้างแบบจำลองและการคำนวณ: บทนี้แสดงรายละเอียดขั้นตอนการจำลองรูปแบบคลื่นในทะเล รวมถึงการจำลองสถานการณ์การสื่อสารระหว่างเรือกับสถานีฝั่งขณะเรือโคลงเนื่องจากคลื่น อีกทั้งขั้นตอนการคำนวณความเข้มของสัญญาณที่ส่งจากเรือไปยังสถานีฝั่ง กรณีเรืออยู่นิ่ง (ทะเลเรียบ) และกรณีเรือโคลง (ทะเลมีคลื่น)

บทที่ 5 - ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล: บทนี้แสดงผลที่ได้จากการจำลองการสื่อสารในกรณีต่างๆ รวมถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้

บทที่ 6 - บทสรุปและข้อเสนอแนะ: เป็นส่วนของการสรุปผลการวิจัยทั้งหมดที่ได้ดำเนินการ รวมถึงข้อเสนอแนะต่างๆ ที่อาจเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยในอนาคต

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

ในบทนี้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารทางทะเล รวมถึงปัญหาและข้อจำกัด โดยเริ่มจากการสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite communications) การสื่อสารผ่านโครงข่ายแอตฮอกไร้สายความเร็วสูง (High-speed wireless ad-hoc network) รวมทั้งกล่าวถึงผลกระทบของคลื่นลมในทะเลต่อการโคลงของเรือ และการสะท้อนของสัญญาณโดยพื้นน้ำทะเลทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นหลายทิศทาง (Multi-path propagation) ซึ่งทั้งสองเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายระหว่างเรือกับสถานีฝั่ง จากนั้นจะกล่าวถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องว่าได้มีการศึกษาวิจัยอย่างไรบ้าง ใช้ระเบียบวิธีอะไรในการวิเคราะห์ปัญหา นี้ รวมถึงการนำผลการศึกษางานวิจัยเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้อย่างไรบ้าง

#### 2.1 ประวัติของเทคโนโลยีการสื่อสารทางทะเล

โดยทั่วไปการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงแบบไร้สายระหว่างเรือในทะเลกับศูนย์ควบคุมและสั่งการบนบก ขณะเรือปฏิบัติการกิจอยู่กลางทะเล ใช้การสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นหลัก เนื่องจากดาวเทียมมีพื้นที่ให้บริการครอบคลุมทั้งภาคพื้นดินและในทะเล แต่การสื่อสารผ่านดาวเทียมมีข้อจำกัดทางด้านความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) ทำให้อัตราการสื่อสารข้อมูลจำกัด ส่งผลให้การสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลที่มีขนาดใหญ่กับศูนย์ควบคุมฯ อาจมีความล่าช้า หรือไม่สามารถกระทำได้ เช่น การตรวจสอบฐานข้อมูลเรือต้องสงสัยในทะเล และการสื่อสารผ่านดาวเทียมยังมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงสำหรับการใช้ช่องสัญญาณ อีกเหตุผลหนึ่งที่เป็นข้อจำกัดของการสื่อสารผ่านดาวเทียมคือการใช้งานบนเรือขนาดเล็ก เนื่องจากการสื่อสารผ่านดาวเทียมต้องอาศัยความแม่นยำในการเล็งทิศทางของจานเสาอากาศไปยังตำแหน่งของดาวเทียมที่ใช้งาน ซึ่งขณะที่เรือเล็กแล่นอยู่ในทะเลจะเกิดการโคลงเนื่องจากคลื่น โดยเฉพาะเรือที่ไม่มีระบบรักษาความเสถียรของจานเสาอากาศ (Antenna stabilizer) ซึ่งจะส่งผลให้ทิศทางเล็งของจานเสาอากาศเลื่อนตำแหน่งไปจากตำแหน่งดาวเทียม ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการสื่อสารลดลง หรืออาจไม่สามารถเชื่อมโยงสัญญาณการสื่อสารกับดาวเทียมได้เลย ทำให้การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเรือกับสถานีฝั่งผ่านดาวเทียมเกิดการขาดตอนหรือถูกตัดขาด ดังนั้นการสื่อสารผ่านดาวเทียมจึงอาจไม่เหมาะสมกับเรือที่มีขนาดเล็กและไม่มีการรักษาความเสถียรของเสาอากาศ ผลกระทบดังกล่าวส่งผลต่อการปฏิบัติงานของเรือในทะเลของกองทัพเรืออย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทำให้ประสิทธิภาพการปฏิบัติงานลดลง หรือมีความล่าช้าไม่สามารถ



ตอบสนองทันต่อสถานการณ์ที่เกิดขึ้น หรืออาจส่งผลเสียถึงขั้นก่อให้เกิดความล้มเหลวในการปฏิบัติการก็ได้เช่นกัน

แนวทางเลือกหนึ่งของการสื่อสารข้อมูลไร้สายในทะเลที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูง และกำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในขณะนี้ ได้แก่ การสื่อสารทางทะเลผ่านเครือข่ายแอดฮอกไร้สายความเร็วสูง (Maritime mobile ad-hoc network) [4] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารที่ถูกออกแบบและพัฒนาให้มีขีดความสามารถในการรองรับการสื่อสารข้อมูลด้วยความเร็วสูงแบบไร้สายสำหรับยานพาหนะในขณะเคลื่อนที่ สามารถรองรับปริมาณการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ได้ มีความเหมาะสมกับการใช้งานบนเรือที่แล่นอยู่บริเวณชายฝั่งในระยะครอบคลุมการสื่อสารจากสถานีฝั่ง อย่างไรก็ตามการสื่อสารผ่านเครือข่ายแอดฮอกไร้สายความเร็วสูงก็ประสบปัญหาอันเนื่องจากสภาพคลื่นลมในทะเลเช่นกัน แม้ว่าผลกระทบจะน้อยกว่าในกรณีสื่อสารผ่านดาวเทียม

ดังนั้น งานวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของคลื่นลมในทะเลที่มีผลต่อประสิทธิภาพสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงแบบไร้สายระหว่างเรือกับสถานีฝั่ง อันเนื่องจากสภาพพื้นน้ำทะเลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่งผลให้เรือมีการโคลงไปมาไม่อยู่นิ่ง ทำให้ทิศทางของเสาอากาศที่ติดตั้งบนเรืออาจเกิดการคาดเคลื่อนไปจากแนวที่เล็งไปยังสถานีฝั่ง และยังส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ตกกระทบและสะท้อนพื้นน้ำทะเลไปยังเครื่องรับบนสถานีฝั่งอีกด้วย ผลที่ตามมาคือความเข้มของสัญญาณรวมที่รับได้โดยเครื่องรับมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ และโดยทั่วไปไม่สามารถคาดการณ์หรือทำนายค่าความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับได้ เนื่องจากคุณสมบัติไม่แน่นอนของคลื่นในทะเล โดยความเข้มของสัญญาณจะมีค่าสูงสุดเมื่อแนวของเสาอากาศส่งกับเสาอากาศรับอยู่ในแนวเดียวกัน และมีสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นน้ำทะเลน้อยที่สุด หรือสัญญาณสะท้อนมีเฟสตรงกับสัญญาณที่ส่งโดยตรงจากเรือไปยังสถานีฝั่งพอดี ซึ่งในกรณีหลังมีความเป็นไปได้้น้อยมาก

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทั้งนี้ ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของคลื่นต่อการส่งผ่านสัญญาณแบบไร้สายสำหรับการสื่อสารทางทะเลอย่างแพร่หลาย โดยสามารถแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรกเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองและการคำนวณการส่งผ่านสัญญาณด้วยระเบียบวิธีเชิงรังสี (Ray method) โดยการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับด้วยลำคลื่นที่เดินทางเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับรังสีของแสง และมีคุณสมบัติต่าง ๆ เช่นเดียวกับรังสีของแสง เช่น คุณสมบัติการสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการหักเห (Refraction) ตัวอย่างงานวิจัยกลุ่มนี้เช่น งานวิจัยของ Hubert และคณะ [5] ซึ่งจุดเด่นของงานวิจัยชิ้นนี้คือได้ศึกษาผลกระทบของการเคลื่อนที่ของเรือที่มีผลต่อการสื่อสารไร้สายในทะเลในแบบ 3 มิติ โดยใช้

ระเบียบวิธี Deterministic Two Ray Model สำหรับจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ ประกอบด้วยลำคลื่นที่เดินทางโดยตรง (Direct radiated ray) และลำคลื่นสะท้อนจากพื้นน้ำทะเล (Sea surface reflected ray) เพียง 2 ลำคลื่นเท่านั้น ซึ่งการใช้การคำนวณจากลำคลื่นเพียง 2 ลำคลื่นทำให้มีข้อจำกัดในการคำนวณความเข้มของสัญญาณที่เครื่องรับ เนื่องจากในความเป็นจริงลำคลื่นที่สะท้อนพื้นน้ำทะเลที่เดินทางมายังเครื่องรับสามารถมีได้หลายเส้นทาง นอกจากนั้นแล้วงานวิจัยยังมีข้อจำกัดเนื่องจากไม่ได้มีแบบจำลองการเกิดคลื่นทะเล แต่ใช้เพียงค่าประมาณการพลังงานสะท้อนพื้นน้ำทะเลที่เกิดจากการสะท้อนเพียงค่าเดียวจากมาตรฐาน ITU Rec. P. 526-12 [6] เท่านั้น ดังนั้นเมื่อสภาพของพื้นน้ำทะเลมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเร็วลม จะไม่สามารถให้ค่าพลังงานของรังสีที่สะท้อนพื้นน้ำทะเล ณ สภาพทะเลที่เกิดขึ้นจริงได้ และเนื่องจากไม่ได้มีแบบจำลองการเกิดคลื่นทะเล ทำให้รูปแบบการโคลงของเรือไม่สอดคล้องกับสภาพพื้นน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ขณะที่ Chee-Wei และ Su [7] ใช้ระเบียบวิธี Two Ray Model ร่วมกับแบบจำลองคลื่นในทะเลแบบโทรคอยด์ (Trochoid wave) โดยมีจุดเด่นคือการเลือกวิเคราะห์เฉพาะค่าความเข้มของสัญญาณที่ทำให้ช่องสัญญาณเสถียร เพื่อใช้งานได้กับมาตรฐาน IEEE 802.16 mesh MAC ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือการจำลองการสูญเสียพลังงานของสัญญาณนั้น (Path loss model) เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงโดยใช้งานความถี่ที่ใช้งานในเครือข่าย Wimax เท่านั้น ดังนั้นเมื่อจำเป็นต้องจำลองการสื่อสารในย่านความถี่อื่น ๆ จำเป็นต้องใช้ค่าที่เหมาะสมกับของความถี่นั้น ๆ โดยการทำการทดลองใหม่ นอกจากนั้น งานวิจัยโดย Mehrnia และ Ozdemir [8] ได้ใช้ระเบียบวิธี Two Ray Model เช่นกัน มีจุดเด่นในการนำการสะท้อนของสัญญาณไปมาเหนือพื้นน้ำทะเล (Ducting Channel) มาคำนวณด้วยเพื่อเพิ่มรายละเอียดจากการคำนวณเฉพาะรังสีที่สะท้อนพื้นน้ำทะเลเพียงอย่างเดียว แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการจำลองสภาพแวดล้อมทางทะเลจะต้องทำผ่านโปรแกรม Wireless Insite Tool ที่ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้งานการคำนวณสำหรับสภาพแวดล้อมบนบก โดยเฉพาะในเมือง และภายในอาคาร เท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถจำลองสภาพพื้นน้ำทะเลที่มีความเหมือนจริง ที่มีผลต่อการโคลงของเรือ และการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวดกกระทบน้ำทะเลได้

งานวิจัยกลุ่มที่สองศึกษาวิจัยโดยวิธีทดลองวัดสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงในทะเล เป็นหลัก ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Marbrook และคณะ [9] จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือได้ทำการทดลองวัดค่าความเข้มของสัญญาณการสื่อสารระหว่างเรือกับทุ่นลอยน้ำในสภาวะแวดล้อมจริง แต่ข้อจำกัดส่วนใหญ่ของงานวิจัยลักษณะนี้คือไม่สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ที่มีจำนวนมากในสภาวะแวดล้อมจริงได้ทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นความเร็วและทิศทางของลมกับกระแสน้ำที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เป็นต้น งานวิจัยของ Wang และคณะ [10] จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือความแม่นยำในการใช้เครื่องรับ และ

เครื่องส่งที่ความถี่สูงที่ 5.2 GHz และมีแบนวิดท์กว้างที่ 100 MHz เพื่อวัดค่าความเข้มของสัญญาณการสื่อสารระหว่างเรือกับประชากร โดยใช้นาฬิกาอะตอม (Rubidium clocks) เพื่อสร้างความถี่ที่มีความเสถียร และตรวจสอบความคาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมด้วยการเทียบมาตรฐาน (Calibration) ในแนวสายตา อีกทั้งตรวจสอบด้วยระบบ GPS อีกชั้นหนึ่งด้วย เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องแบบจำลองการสื่อสาร ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือเป็นการเก็บข้อมูลที่ต้องใช้เวลาและงบประมาณสูง อีกทั้งสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ไม่สามารถทำซ้ำหลายครั้งได้ ส่วนงานวิจัยของ Lee และคณะ [11] มีจุดเด่นคือการวัดค่าจริง และนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองถึง 3 แบบด้วยกัน คือ แบบจำลอง Free Space Path Loss (FSPL) Model, แบบจำลอง ITU-R P.1546 Model และแบบจำลอง Two Ray Model เพื่อหาว่าข้อมูลที่วัดได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองไหนมากที่สุด แต่ข้อจำกัดคือแบบจำลอง Two Ray Model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับค่าการวัดจริงกับไม่ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการโคลงของเรือ และไม่ได้กล่าวถึงรูปแบบการจำลองคลื่นในทะเลที่ใช้ในงานวิจัย ใช้สมมติฐานพื้นน้ำทะเลเรียบ และใช้ความสูงของคลื่นทะเลเป็นความสูงของน้ำทะเลเฉลี่ยเพียงค่าเดียวเพื่อหามุมตกกระทบของรังสีตกกระทบ จึงอาจทำให้การเปรียบเทียบข้อมูลมีความคาดเคลื่อนได้

นอกจากนั้น มีงานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์นี้โดยทางอ้อม ได้แก่ การศึกษาวิจัยผลจากการโคลงของเรือและการสะท้อนโดยผิวน้ำทะเลของคลื่นเรดาร์โดย Jamil และ Burkholder [12] ซึ่งจุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการได้เสนอแบบจำลองการโคลงของเรือที่เกิดจากคลื่นทะเลที่สามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบสำหรับการโคลงของเรือได้ ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือการสมมติฐานแบบจำลองการโคลงที่เกิดจากตัวแปรเดียวคือความยาวคลื่นทะเลที่มีความยาวที่สุด ซึ่งในความเป็นจริงมีหลายตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการโคลงของเรือนอกจากความยาวคลื่นทะเลเพียงอย่างเดียว งานวิจัยของ Xu และ Li [13] มีจุดเด่นที่ศึกษาการสะท้อนของคลื่นเรดาร์โดยผิวน้ำทะเลแบบ 2 มิติ และเป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการคลื่นทะเลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา อีกทั้งการเคลื่อนที่ของเรือแบบอิสระ 6 แกน ส่วนข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือการเคลื่อนที่ของเรือมาจากการเคลื่อนที่ของเรือเอง ไม่ได้มาจากการจำลองการเกิดคลื่นทะเล ดังนั้นผลจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวดกกระทบจึงไม่ได้รวมอยู่ในการคำนวณรังสีสะท้อน นอกจากนี้ งานวิจัยของ Johnson และคณะ [14] จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการศึกษเปรียบเทียบรูปแบบจำลองการเกิดคลื่นแบบต่าง ๆ ว่าแต่ละแบบส่งผลกระทบต่อการสะท้อนของคลื่นเรดาร์โดยผิวน้ำทะเลอย่างไร แต่ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือแบบจำลองที่ใช้มีความเหมาะสมกับความถี่การสื่อสารที่ใช้กันแตกต่างกัน ซึ่งแม้ว่างานวิจัยกลุ่มหลังนี้จะไม่ได้เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิจัยทางด้านการศึกษาแบบไร้สายทางทะเลโดยตรง แต่จุดเด่นบางส่วนของงานวิจัยได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เช่น รูปแบบจำลองการโคลงของเรือ

แบบจำลองการเกิดคลื่นทะเลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเหมาะสมกับความถี่การสื่อสารที่ใช้งาน เป็นต้น

นอกเหนือจากการศึกษาวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ระดับของผลกระทบของคลื่นในทะเลต่อประสิทธิภาพการสื่อสารไร้สายระหว่างเรือและสถานีฝั่งยังขึ้นกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ของเสาอากาศเครื่องรับและเครื่องส่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความกว้างลำคลื่น หรือบีมวิดท์ (Beamwidth) เนื่องจากความเข้มของสัญญาณ (Radiation intensity) ในแต่ละทิศทางขึ้นอยู่กับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของเสาอากาศ ด้วยสาเหตุนี้ จึงส่งผลกระทบต่อความเข้มของสัญญาณ ทั้งที่แพร่กระจายจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยตรง และสัญญาณที่สะท้อนพื้นน้ำทะเลไปยังเครื่องรับ

จากการศึกษาค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรม ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ยังไม่พบว่ามิงงานวิจัยใดที่เสนอแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อการสื่อสารไร้สายทางทะเลเนื่องจากการโคลงของเรือและการสะท้อนจากพื้นน้ำทะเลที่มีคลื่นควบคู่กัน งานวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบจากการโคลงของเรือและการสะท้อนจากพื้นน้ำทะเลที่มีคลื่นต่อประสิทธิภาพการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างเรือในทะเลที่แล่นอยู่บริเวณชายฝั่งกับสถานีควบคุมบนบก โดยเฉพาะการสื่อสารผ่านเครือข่ายแบบแอดฮอกไร้สาย ทั้งในกรณีทะเลเรียบปราศจากคลื่นและทะเลที่มีคลื่นแปรปรวน โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงรังสีร่วมกับระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณ พร้อมทั้งนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาเสนอแนะเพื่อเลือกใช้เสาอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของเสาอากาศ เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากคลื่นในทะเลให้น้อยที่สุด และสามารถดำรงการเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างเรือที่แล่นอยู่บริเวณชายฝั่งกับสถานีบนบกได้ตลอดเวลา งานวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความเข้มของสัญญาณที่รับได้โดยเครื่องรับ (Received signal strength indicator - RSSI) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณ นั่นคือเป็นการประเมินประสิทธิภาพในระดับชั้นกายภาพ (Physical layer) ของการสื่อสาร โดยไม่ได้คำนึงถึงโพรโทคอลการสื่อสารในระดับชั้นที่สูงขึ้นไป ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลกระทบโดยตรงจากการโคลงของเรือและการสะท้อนจากพื้นน้ำทะเลต่อประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้สายในทะเลซึ่งสัมพันธ์กับสภาวะคลื่นในทะเลโดยตรง

### บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์นี้ โดยนำเสนอเนื้อหา รายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ โดยสังเขป รวมถึงการกำหนดค่าตัวแปรและเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ใน งานวิจัย เนื้อหาของบทนี้เริ่มจากภาพรวมของการสื่อสารผ่านโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอค หลังจากนั้น เป็นการอธิบายแบบจำลองการเกิดคลื่นทะเลที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อนำไปใช้ ในการจำลองการโคลงของเรือเนื่องจากคลื่นทะเล และการคำนวณสัญญาณสะท้อนจากพื้นน้ำทะเล จากนั้นกล่าวถึงลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของเสาอากาศที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ความหนาแน่นกำลังการแพร่กระจายคลื่น (Radiation power density) ความกว้างลำคลื่นหรือบีมวิดธ์ (Beamwidth) และโพลาไรเซชัน (Polarization) ต่อไปเป็นการ อธิบายถึงเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น (Propagation paths) ของการส่งสัญญาณไร้สายจากเรือใน ทะเล (เครื่องส่ง) ไปยังสถานีฝั่ง (เครื่องรับ) ตามด้วยวิธีการคำนวณความเข้มของสัญญาณที่ส่งผ่านไป ยังเครื่องรับโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงรังสี (Ray method) และระเบียบวิธีติดตามรังสี (Ray tracing) สุดท้ายเป็นการอธิบายรายละเอียด ของการนำระเบียบวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo method) มา ประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณข้อมูลเชิงสถิติของค่าความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ

#### 3.1 การสื่อสารผ่านโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอค (Mobile ad hoc network)

โครงข่ายสื่อสารไร้สายแบบแอดฮอค [15] เป็นโครงข่ายสื่อสารข้อมูลไร้สายทางทะเลรูปแบบ หนึ่ง ที่สามารถใช้งานทดแทนโครงข่ายสื่อสารผ่านดาวเทียมสำหรับเรือที่อยู่บริเวณใกล้ฝั่ง ซึ่งมี ค่าใช้จ่ายถูกกว่า และสามารถใช้ได้กับเรือขนาดเล็กที่ไม่ได้ติดตั้งระบบรักษาความเสถียรของเสา อากาศ (Antenna stabilizer) การสื่อสารผ่านโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอคเป็นทางเลือกที่เหมาะสม สำหรับการรับส่งข้อมูลความเร็วสูงระหว่างเรือกับสถานีฝั่ง เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ต้องการโครงสร้าง พื้นฐานสำหรับโครงข่าย รองรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to-point) หรือการสื่อสารข้อมูลไป ยังผู้รับหลายราย (Point-to-Multi point) ที่เชื่อมต่อผ่านโครงข่าย แรกเริ่มโครงข่ายไร้สายแบบ แอดฮอคถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้งานการสื่อสารระหว่างยานพาหนะที่มีการเคลื่อนที่ สำหรับ ยานพาหนะบนบกเป็นหลัก จึงมีข้อแตกต่างจากการใช้งานบนเรือที่เคลื่อนที่ในทะเล ข้อแตกต่างที่ สำคัญคือเรือในทะเลจะมีการโคลงเนื่องจากคลื่นทะเล และการสะท้อนของสัญญาณจากพื้นน้ำทะเลที่ มีคลื่นแตกต่างจากการสะท้อนของสัญญาณจากพื้นถนนหรือพื้นดินของการสื่อสารระหว่าง ยานพาหนะบนบก อย่างไรก็ตาม หลักการพื้นฐานและโพรโทคอลของการสื่อสารผ่านโครงข่ายไร้สาย

แบบแอตฮอกที่ใช้งานบนบกกับการใช้งานในทะเลไม่ได้มีความแตกต่างกัน และสามารถนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานทางทะเลได้เป็นอย่างดี

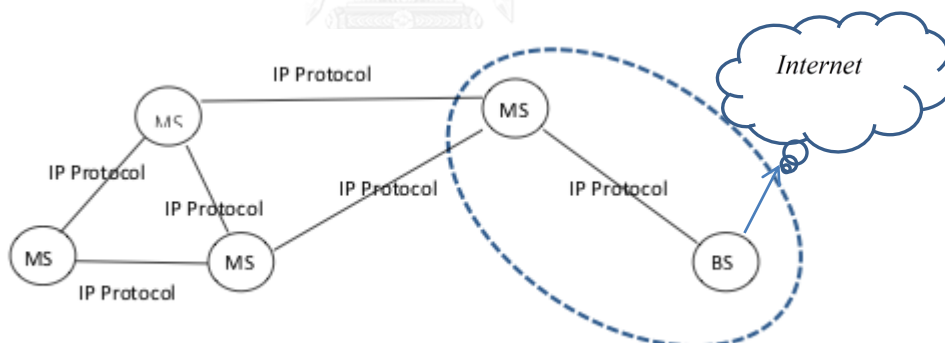
หลังจากถูกพัฒนาขึ้นในช่วงยุคทศวรรษ 1990 โดยภาคพลเรือน ระบบโครงข่ายแอตฮอกสำหรับเคลื่อนที่แบบมัลติฮอป (Multi-hop mobile ad hoc network) ได้นำเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่มีอยู่แล้วมาประยุกต์ใช้งานเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผู้ใช้ เช่น ระบบบลูทูธ (Bluetooth – IEEE 802.15.1) เพื่อใช้งานส่วนบุคคล หรือโครงข่ายเฉพาะที่ (Local area network – IEEE 802.11) เพื่อใช้งานรับส่งข้อมูลความเร็วสูงแบบไร้สายเฉพาะพื้นที่ ลักษณะพิเศษของโครงข่ายชนิดนี้คือการสื่อสารข้อมูลโดยตรงระหว่างผู้ใช้งาน โดยไม่จำเป็นต้องผ่านแม่ข่าย ข้อดีดังกล่าวได้ถูกนำไปพัฒนาต่อเป็นโครงข่ายสื่อสารไร้สายแบบแอตฮอก (Mobile ad hoc network) เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานกับยานพาหนะที่เคลื่อนที่ได้ โดยจุดประสงค์หลักไม่เพียงแต่เพื่อการสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้ส่งและผู้รับเท่านั้น แต่ยังสามารถทวนสัญญาณ (Relay) หรือส่งผ่านข้อมูลเป็นทอดต่อไปยังผู้รับรายอื่นหรือโนด (Node) ต่าง ๆ ของโครงข่ายได้อีกด้วย

เนื่องจากแนวคิดแรกเริ่มของการพัฒนาการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอกเกิดขึ้นจากอินเทอร์เน็ต (Internet) การพัฒนาในช่วงแรกยังคงยึดติดกับแนวความคิดแบบเดิม ๆ คือ ทีซีพี/ไอพี โพรโตคอล (TCP/IP protocol) ดังนั้นการพัฒนาในช่วงแรกจึงมุ่งเน้นเพื่อสนับสนุนโปรแกรม (Application) ของ ทีซีพี/ไอพี เป็นหลัก ไม่ได้คำนึงถึงรูปแบบการใช้งานจริงที่เกิดขึ้นจริงเลย แต่ในความเป็นจริงการใช้งานของการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอกไม่มีรูปแบบการใช้งานที่ตายตัว ส่งผลให้มีข้อจำกัดในเรื่องของการพัฒนาเครื่องมือที่สามารถใช้สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ให้สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี ดังนั้นภายหลังจากแนวคิดในการพัฒนาการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอกจึงเริ่มต้นจากการพัฒนาโปรแกรมที่สามารถใช้งานได้จริงกับรูปแบบการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงที่มีรูปแบบการใช้งานที่ชัดเจนอยู่แล้วในรูปแบบต่าง ๆ ก่อน ด้วยเหตุนี้รูปแบบของการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอกจึงถูกพัฒนาขึ้นในหลายรูปแบบด้วยกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับการใช้งานจริงเป็นสำคัญ มีรูปแบบหลักๆ อยู่ด้วยกัน 5 ประเภท ได้แก่

- 1 Mesh Networking
- 2 Sensor Networking
- 3 Opportunistic Networking
- 4 Vehicular Networking
- 5 The People Centric Revolution

รูปแบบการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอกทั้ง 5 ประเภทมีความเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันไป สำหรับรูปแบบการสื่อสารแบบโครงข่ายยานพาหนะ (Vehicular networking) เป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานการสื่อสารทางทะเล ถูกพัฒนาจากการแก้ปัญหาเรื่องการจราจรคับคั่ง และปัญหาอุบัติเหตุทางบกเป็นหลัก ระบบทำงานโดยให้ยานพาหนะสามารถติดต่อได้กับจุดกระจายสัญญาณริมถนน ซึ่งระบบนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารในทะเลมาช่วงระยะหนึ่งแล้ว และเป็นระบบที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วย

การพัฒนาการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอกรูปแบบการสื่อสารแบบโครงข่ายยานพาหนะ เน้นให้ความสำคัญกับการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่แล้ว โดยเฉพาะการใช้งานจากระบบ Internet ที่มีอยู่เดิม เช่น Wifi และ Wimax เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้โครงข่ายมีความยืดหยุ่นสูงและใช้งบประมาณน้อยในการสร้างระบบโครงข่าย และให้บริการกับผู้ใช้ที่อยู่ในโครงข่าย โดยการเชื่อมต่อโครงข่ายของโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอกมีลักษณะเป็นการเชื่อมต่อแบบไม่เฉพาะเจาะจงกับจุดหนึ่งจุดใด ถ้าผู้ใช้งานในระบบต้องการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตจำเป็นต้องมีผู้ใช้งานอย่างน้อยหนึ่งรายในโครงข่าย หรือหนึ่งโหนดที่เชื่อมต่อกับเมชแอคเซสพอยต์ (Mesh access point) ซึ่งเป็นจุดที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต เพื่อให้จุดอื่นๆ บนโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้ ตามรูปที่ 3.1



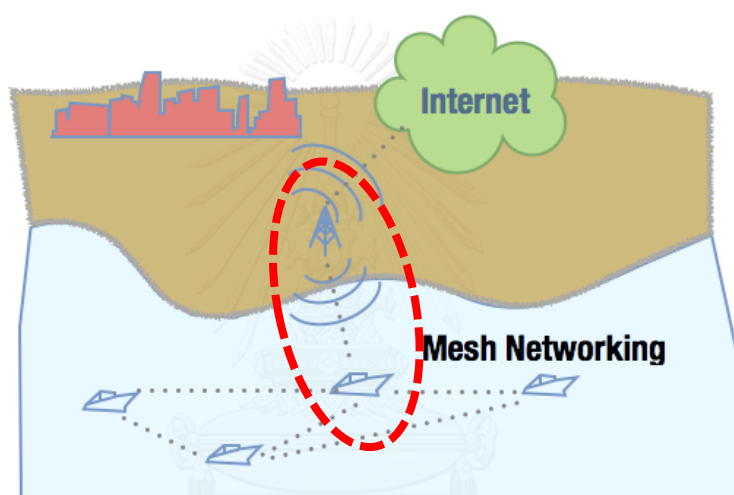
BS – สถานีคงที่ (Base station) หรือสถานีฝั่ง

MS – สถานีเคลื่อนที่ (Mobile station) หรือเรือในทะเล

### รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอก

หลังจากเข้าใจการทำงานของโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอกที่ใช้งานกับยานพาหนะบนบกแล้วต่อไปเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นภาพกับการใช้งานทางเรือในทะเล เรือในทะเลเปรียบได้กับยานพาหนะบนบกที่เคลื่อนที่ไปมา และมีการเชื่อมโยงการสื่อสารกันโดยตรงระหว่างเรือกับสถานีฝั่งหรือระหว่างเรือกับเรือที่เคลื่อนที่อยู่ในทะเลด้วยตัวเอง กรณีเรืออยู่ไกลฝั่งมาก และต้องการติดต่ออินเทอร์เน็ตจำเป็นต้องมีการเชื่อมโยงสัญญาณการสื่อสารกับสถานีอื่น ๆ เป็นทอด ๆ โดยจะต้องมีเรือ

อย่างน้อยหนึ่งลำเชื่อมต่อเข้ากับ Mesh Router ที่สถานีฝั่งที่เชื่อมโยงเข้ากับอินเทอร์เน็ตอีกทอดหนึ่ง เพื่อให้ผู้ใช้งานที่อยู่บนเรือทุกลำในโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้ ทั้งนี้รูปแบบการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตของเรือในทะเลที่อยู่ไกลฝั่ง ต้องอาศัยการเชื่อมต่อผ่านไปยังเรือลำอื่น ๆ ที่อยู่ในระยะใกล้เคียงเป็นทอด ๆ มีรูปแบบการเชื่อมต่อเหมือนกับรูปที่ 3.2 อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์เฉพาะการสื่อสารระหว่างเรือในทะเลที่อยู่ไกลฝั่ง กับสถานีฝั่งเท่านั้น เนื่องจากในบริเวณใกล้ฝั่งนั้นมีปริมาณการใช้งานการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงแบบไร้สายที่หนาแน่น และคับคั่งกว่าการใช้งานของเรือบริเวณไกลฝั่ง ในส่วนการวิเคราะห์การเชื่อมโยงสัญญาณการสื่อสารระหว่างเรือกับเรือที่อยู่นอกเหนือขอบเขตของการวิจัยในครั้งนี้ และอาจเป็นหัวข้อที่น่าสนใจต่อไปในการศึกษาวิจัยได้ในอนาคต



รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อการสื่อสารโครงข่ายระบบโมบายแอตฮอก ทางเรือ

ถึงแม้การสื่อสารโครงข่ายไร้สายแบบแอตฮอก ความเร็วสูง ทางทะเลจะพัฒนาต่อ ยอดมาจากรูปแบบการสื่อสารที่มีใช้งานอยู่แล้วบนบก แต่เมื่อจำเป็นต้องประยุกต์ใช้งานกับเรือในทะเลต้องพิจารณาถึงข้อดี และข้อเสียของมาตรฐานเดิมที่ใช้งานอยู่แล้วบนบกกว่ามีความแตกต่างกับการใช้งานทางทะเลอย่างไรเพื่อให้สามารถใช้งานได้ทางทะเลได้อย่างเหมาะสม โดยหลัก ๆ แล้วมีระบบอยู่ 3 ระบบที่เป็นตัวเลือกสำหรับใช้งานทางทะเลได้แก่ ระบบ Wifi ระบบ Wimax และระบบโทรศัพท์

ระบบ Wifi มาตรฐาน 802.11n สามารถสนับสนุนการสื่อสารไร้สายข้อมูลที่มีความเร็วสูงกว่าระบบ Wimax มาตรฐาน 802.16m แต่มีข้อจำกัดเมื่อต้องใช้งานกับการสื่อสารบนพาหนะที่มีการเคลื่อนที่ และมีพื้นที่ครอบคลุมการใช้งานที่น้อยมาก (92 เมตร) ไม่เหมาะกับการใช้งานในทะเล ส่วน Wimax มาตรฐาน IEEE 802.16 แม้ความเร็วการรับส่งข้อมูลน้อยกว่ามาตรฐาน 802.11n (600 Mbps) แต่สามารถให้คุณภาพของการให้บริการ (Quality of service) ที่ดีกว่า ซึ่งตามมาตรฐานล่าสุดของ IEEE 802.16m (WiMAX Release 2) สามารถสนับสนุนอัตราความเร็วข้อมูล (Data rate)



ได้สูงสุด 1 Gbps สำหรับสถานีคงที่ และ 100 Mbps สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (พาหนะต้องมีความเร็วสูงสุดไม่เกิน 500 กม./ชม.) อีกทั้งยังมีข้อดีตรงที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากันได้กับมาตรฐาน IEEE 802.11 (Wifi) ซึ่งมีการใช้งานเป็นจำนวนมากได้อีกด้วย นอกเหนือจากนั้นแล้วพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการ (Coverage area) ของมาตรฐาน IEEE 802.16m เทียบได้กับระยะครอบคลุมของระบบโทรศัพท์มือถือ (Cellular network) ซึ่งมีรัศมีครอบคลุมที่ค่อนข้างไกล โดยมีระยะครอบคลุมการสื่อสารสำหรับสถานีที่อยู่กับที่ (Fixed station) ที่ระยะ 50 กิโลเมตร และสำหรับสถานีที่เคลื่อนที่ (Mobile station) ที่ระยะ 15 กิโลเมตร จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่าโดยรวมแล้วมาตรฐาน IEEE 802.16m เป็นทางเลือกที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 802.11n เพราะสามารถตอบสนองความต้องการใช้งานของผู้ใช้ที่ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วสูงได้ และยังมีระยะครอบคลุมสัญญาณที่ไกลกว่ามาตรฐาน IEEE 802.11n อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ 2 ระบบที่กล่าวมาแล้วนั้น ระบบโทรศัพท์มือถือเป็นอีกระบบหนึ่งที่สามารถใช้งานได้ดีกับยานพาหนะที่มีการเคลื่อนที่ แต่เนื่องจากอัตราความเร็วการสื่อสารข้อมูลนั้นถือว่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสองระบบที่กล่าวมา ดังนั้นมาตรฐาน IEEE 802.16m จึงถือได้ว่าเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดใน 3 ทางเลือก

นอกเหนือจาก 3 วิธีดังกล่าวแล้วยังมีอีกหนึ่งวิธีการที่ใช้งานแพร่หลายโดยเฉพาะทางทหารคือวิธีการสื่อสารแบบเวฟเรเลย์ (Wave relay) [16] เป็นการสื่อสารด้วยแบบโครงข่ายแอดฮอค ไร้สาย ความเร็วสูง รูปแบบหนึ่งที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีขีดความสามารถในการปรับตัวกับสภาพแวดล้อมที่เลวร้าย ในการรักษาการเชื่อมโยงสัญญาณสื่อสาร และเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารให้ได้ผลดีที่สุด เหมาะสำหรับการใช้งานในพาหนะที่กำลังเคลื่อนที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานทางเรือ โดยมีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุดที่ 37 Mbs ที่ระยะ 17 กิโลเมตร ใช้งานย่าน 2.3-2.5 Ghz และ 5 Ghz

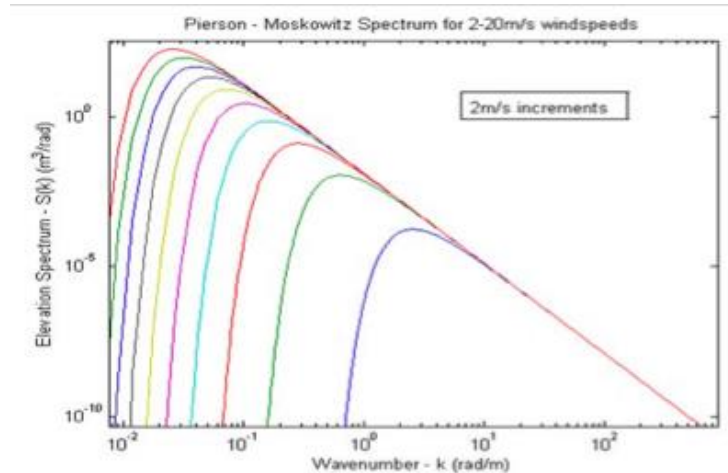
สำหรับการใช้งานในระบบสื่อสารโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอค ความเร็วสูง ในทะเล จำเป็นต้องให้ครอบคลุมระยะการสื่อสารของเรือรบที่มีขนาดเล็กของกองทัพเรือ ที่ปฏิบัติงานอยู่ในระยะทะเลอาณาเขต 12 ไมล์ทะเล หรือ 21.6 กิโลเมตร หรือครอบคลุมพื้นที่ปฏิบัติการบริเวณใกล้ฝั่งที่ความเร็วสูงสุดประมาณ 30 น็อต หรือครอบคลุมพื้นที่บริเวณที่มีเรือสินค้าแล่นเข้าออกอย่างคับคั่ง เช่น บริเวณท่าเรือ ซึ่งส่วนใหญ่เรือสินค้ามีความเร็วเดินทางประมาณ 10 – 15 น็อต เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้งานวิจัยนี้เกิดประโยชน์กับกองทัพเรือจึงพิจารณาใช้ความถี่ย่าน VHF ในการจำลองการสื่อสาร เนื่องจากในกองทัพเรือมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถใช้ในการส่งข้อมูลความเร็วสูง ไร้สายด้วยคลื่นวิทยุย่าน VHF อยู่ในเรือจำนวนหลายลำ

### 3.2 แบบจำลองคลื่นในทะเล

รูปแบบจำลองคลื่นในทะเล [12, 17] ถือว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่องานวิจัยนี้ เนื่องจากมีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณความเข้มของสัญญาณ อย่างไรก็ตามรูปแบบของคลื่นทะเลในแต่ละพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันตามสภาพภูมิศาสตร์ ลม พ้า อากาศ และอุณหภูมิ ซึ่งในสภาพความเป็นจริงแล้วสภาพท้องทะเลในบริเวณหนึ่ง ณ เวลาใด ๆ มีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้อ และมีความซับซ้อนค่อนข้างมาก งานวิจัยนี้จึงเลือกแบบจำลองการเกิดคลื่นในทะเลที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อนเป็นแบบจำลองของ Pierson-Moskowitz (PM) Spectrum [12] แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองคลื่นทะเลที่แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มีผลต่อการเกิดคลื่นทะเลแบบสมดุล หมายความว่าเมื่อลมพัดมาด้วยความเร็ว และนานเพียงพอจะส่งผลให้คลื่นทะเลที่เกิดขึ้นถูกยกตัวจากระดับปกติจนถึงความสูงที่คลื่นก่อตัวสูงสุด ก่อนจะตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และเป็นคลื่นทะเลที่ไม่รวมกรณีที่มีคลื่นหัวแตก (Breaking waves) สันคลื่น (Wave crest) หรือคลื่นหัวพื้นผิว (White caps) ซึ่งมีความซับซ้อน แต่แบบจำลองคลื่นทะเลนี้ยังคงมีคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ ของคลื่นในทะเลที่มีผลกระทบต่อภารกิจของเรือ และการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ครบ อีกทั้งเป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Linear model) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (Zero-mean) และเป็นการเกิดคลื่นทะเลด้วยกระบวนการสุ่มแบบเกาส์เซียน (Gaussian random process) ซึ่งข้อดีของแบบจำลองเชิงเส้นคือคลื่นทะเลแต่ละความยาวคลื่นไม่มีผลต่อกันและกัน หรือมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นคลื่นทะเลที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากผลรวมที่แตกต่างกันทั้งหมดของค่าเพาเวอร์สเปกตรัมเดนซิตี (Power spectrum density function) ณ ค่าตัวแปรเวฟนัมเบอร์ ( $\gamma$ ) ใดค่าหนึ่ง โดยค่าเวฟนัมเบอร์ (Wave number) แต่ละค่า นั้นเกิดจากตัวแปรแบบสุ่ม ซึ่งความสัมพันธ์การเกิดคลื่นทะเลกับค่าพารามิเตอร์ทางสมุทรศาสตร์ (Hydrodynamic) ต่างๆ มีดังนี้

$$\Psi(\gamma) = \frac{\alpha}{4|\gamma|^3} \exp\left(-\frac{\beta g^2}{U^4 \gamma^2}\right) \quad (3.1)$$

จากสมการ (3.1) เป็นสมการความสัมพันธ์การเกิดคลื่นทะเล มีค่า  $\alpha$  กับค่า  $\beta$  เป็นค่าคงที่ และเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 0.0081 และ 0.74 ตามลำดับ ส่วนค่า  $g$  คือค่าแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ( $m/s^2$ ) ค่า  $U$  คือค่าความเร็วลมวัดได้ที่ความสูง 19.5 เมตร เหนือระดับน้ำทะเลมีหน่วยเป็นเมตร/วินาที (meter/second) จากรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสเปกตรัมที่ได้เมื่อความเร็วลมมีค่าระหว่าง 2 ถึง 20 เมตร/วินาที



รูปที่ 3.3 แบบจำลอง Pierson-Moskowitz (PM) Spectrum ที่ค่าความเร็วลมระหว่าง 2 ถึง 20 เมตร/วินาที (ที่มา:[18])

แม้ว่าคลื่นทะเลที่ได้เป็นผลรวมจากความยาวคลื่นทะเลหลาย ๆ คลื่นรวมกัน แต่คลื่นทะเลที่มีผลต่อการโคลงของเรือ คือคลื่นทะเลที่มีความยาวคลื่นยาวสุด (มีค่าเวฟนัมเบอร์ต่ำสุด) [12] โดยแบบจำลองการโคลงของเรือหาได้การเฉลี่ยความชันของคลื่นทะเลที่มีค่าเวฟนัมเบอร์ต่ำสุดตลอดความยาวคลื่นเท่ากับระยะความกว้างของตัวเรือ ค่าความชันเฉลี่ยที่ได้จะถูกใช้เป็นความชันการโคลงของเรือ และใช้สำหรับหาค่ามุมโคลงของเรืออีกด้วย

เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการโคลงของเรือในสภาพพื้นน้ำทะเลไม่เรียบ ซึ่งระดับความไม่เรียบของพื้นน้ำทะเลนั้นมีหลายระดับ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้มาตรฐานการวัดเพื่อกำหนดสภาพพื้นน้ำทะเลไม่เรียบที่ระดับต่าง ๆ โดยทั่วไปมาตรฐานการวัดสภาพพื้นน้ำทะเลมีหลายมาตรฐาน และแต่ละมาตรฐานมีความแตกต่างกันไม่เหมือนกัน หนึ่งในมาตรฐานการวัดสภาพพื้นทะเลที่นิยมใช้เป็นมาตรวัดคือ มาตรวัดแบบโบฟอร์ท (Beaufort wind scale) เป็นมาตรวัดที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแรงลมกับระดับสภาพพื้นทะเลตามมาตรวัดของโบฟอร์ทที่ระดับต่าง ๆ มีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 12 โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$v = 0.836B^{\frac{3}{2}} \text{ m/s} \quad (3.2)$$

$B$  คือ ค่าระดับสภาพพื้นน้ำทะเลตามมาตรวัดของโบฟอร์ท มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 12

$v$  คือ ค่าความเร็วลม มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (meter/second)

ระดับสภาพพื้นน้ำทะเลตามมาตรวัดของโบฟอร์ทที่ระดับ 5 เป็นระดับคลื่นทะเลปานกลาง และเป็นระดับที่เกิดคลื่นทะเลสมดุสูงสุดก่อนจะมีคลื่นหัวแตกรวมอยู่ด้วย โดยมีความสูงของคลื่นทะเลอยู่ระหว่าง 1.219 – 2.438 เมตร ในสภาพพื้นน้ำทะเลดังกล่าวเรือที่มีขนาดเล็กจะยังคงสามารถ

ปฏิบัติงานได้ตามปกติ ดังนั้นจากสมการ (3.2) เมื่อแทนค่าสภาพพื้นทะเลที่ระดับ 5 ตามมาตรวัดของโบฟอร์ท จะได้ค่าความเร็วลมที่ 10.8 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมสูงสุดของระดับความแรงสภาพพื้นน้ำทะเลนี้ ดังนั้นจึงใช้ค่าความเร็วลมที่ 10 เมตรต่อวินาที เป็นค่าความเร็วลมในการคำนวณหาแบบจำลองคลื่นทะเล จากสมการ (3.1)

ส่วนค่า Significant Wavelength ( $\lambda$ ) หรือค่าความยาวคลื่นทะเลที่มีความยาวคลื่นยาวที่สุดสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\lambda = \frac{2\pi}{k_{\max}} \quad (3.3)$$

โดยที่ค่าเวฟนัมเบอร์สูงสุด ( $k_{\max}$ ) หาได้จากความสัมพันธ์

$$k_{\max} = \left(\frac{2\beta}{3}\right)^{0.5} \left(\frac{g}{U^2}\right) \quad (3.4)$$

เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นทะเลแต่ละความถี่สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\omega(K_n)^2 = gK_n \quad (3.5)$$

$\omega(K_n)$  ค่าความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ของคลื่นทะเล มีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที

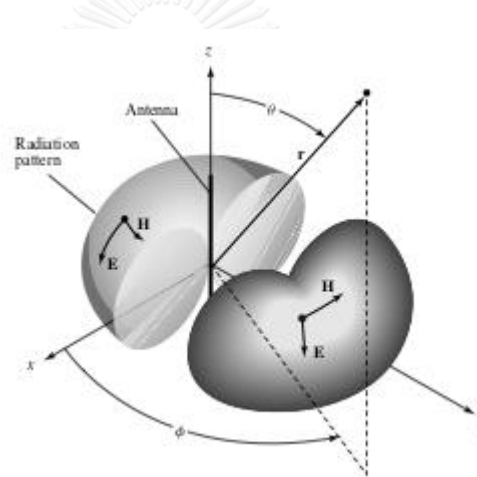
$K_n$  ค่าจำนวนเท่าของแต่ละค่าเวฟนัมเบอร์ มีค่าเท่ากับ  $2\pi n/L$  โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $N$  โดยที่  $N$  มีค่าเท่ากับจำนวนจุดการสุ่มตัวอย่างการเกิดคลื่นทะเล ปกติจะเป็นจำนวนเลขของสองยกกำลัง และ  $L$  เป็นระยะทางในแนวนอนระหว่างเสาอากาศส่งกับเสาอากาศรับ มีหน่วยเป็นเมตร

### 3.3 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับเสาอากาศ

เนื้อหาเบื้องต้นเกี่ยวกับหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับเสาอากาศที่จะกล่าวต่อไปนี้อ้างอิงจาก [19, 20] เป็นหลัก เสาอากาศเป็นองค์ประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของการสื่อสาร เนื่องจากเป็นจุดที่แพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปกรณีเป็นเสาอากาศส่งและเป็นตัวรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีเป็นเสาอากาศรับ เสาอากาศมีผลโดยตรงต่อรูปแบบการแพร่คลื่น ทิศทาง และความเข้มของสัญญาณที่ถูกส่งออกไป ดังนั้นจำเป็นต้องเข้าใจพื้นฐานต่าง ๆ ของเสาอากาศที่มีผลต่อการสื่อสาร ในบทนี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติพื้นฐานของเสาอากาศเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่รูปแบบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiation pattern) ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) ความหนาแน่นกำลังการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiation power density) และโพลาไรเซชัน (Polarization)

### 3.3.1 รูปแบบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiation pattern)

ปกติรูปแบบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีรูปแบบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเสาอากาศแต่ละชนิด และสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงให้เห็นภาพของคุณสมบัติการแพร่คลื่นของเสาอากาศตามตำแหน่งพิกัดต่าง ๆ ในแต่ละพื้นที่ว่ามีค่ากำลังสัญญาณที่แตกต่างกันอย่างไร โดยส่วนมากรูปแบบการแพร่คลื่นที่ใช้กันจะหมายถึงแบบรูปแบบการแพร่คลื่นในระยะไกล และปกติขนาดของรูปแบบสนามการแพร่คลื่นมักจะเป็นขนาดที่ถูกระบุให้เป็นหน่วยนอร์มอลไรซ์ (Normalize) แล้ว สำหรับการสื่อสารโคจรข่ายแบบแอดฮอก ไร้สาย ความเร็วสูง ของเรื่อกับสถานีฝั่งนี้ใช้เสาอากาศแบบวิป (Whip) โดยมีรูปแบบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเสาอากาศในสนามระยะไกลในแนวนอน และแนวตั้ง ดังรูปที่ 3.4 มีรูปแบบการแพร่คลื่นในแนวนอนออกไปทุกทิศทุกทาง (Omni direction) ส่วนแนวตั้งมีลักษณะเหมือนกับภาคตัดขวางของโดนัท

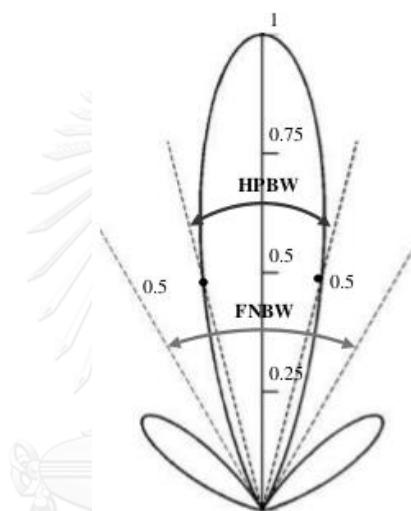


รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของเสาอากาศแบบ whip (ที่มา [19])

ข้อดีของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของเสาอากาศในแนวนอนแบบทุกทิศทางนั้นมีเหมาะสมกับการใช้งานด้านการสื่อสารของเรือในทะเล เนื่องจากการที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ออกไปทุกทิศทางจะครอบคลุมทุกทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือ ดังนั้นเมื่อเรือจำเป็นต้องสื่อสารกับสถานีฝั่ง ไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งโดยเฉพาะ เพื่อให้แนวทิศทางของเสาอากาศระหว่างเรือกับสถานีฝั่งอยู่ในแนวเดียวกันตลอดเวลา ดังนั้นเรือยังสามารถดำรงขีดความสามารถการสื่อสารกับสถานีฝั่งได้ตลอดเวลา トラบใดที่อยู่ในระยะครอบคลุมการสื่อสารจากสถานีฝั่ง จากรูปที่ 3.4 ในส่วนของรูปแบบการแพร่คลื่นในแนวตั้ง หรือภาคตัดขวางของโดนัท มีผลต่อประสิทธิภาพการสื่อสารขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของบีมวิดธ์ (ซึ่งจะกล่าวต่อไป) เมื่อเรือมีอาการโคลงจากคลื่นลมในทะเล

### 3.3.2 ความกว้างลำคลื่น หรือบีมวิดธ์ (Beamwidth)

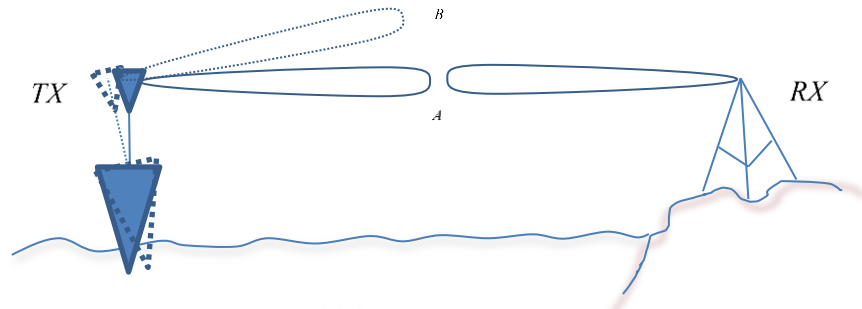
บีมวิดธ์คือมุมที่เกิดจากจุดสองจุด ณ ตำแหน่งที่เหมือนกันและอยู่ตรงข้ามกันของแกนกลาง ความเข้มสัญญาณสูงสุดของแบบรูปการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งความหมายของบีมวิดธ์มีหลายแบบดังรูปที่ 3.5 แต่ที่นิยมใช้กันบ่อยๆ คือ Half Power Beamwidth (HPBW) ตามมาตรฐาน IEEE Half Power Beamwidth หมายถึงมุมที่อยู่บนระนาบเดียวกับความเข้มของสัญญาณสูงสุด และมีความเข้มสัญญาณเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสัญญาณสูงสุด ขณะที่มุมที่รองรับความเข้มของสัญญาณที่ลดลงเป็นศูนย์จากความเข้มสัญญาณสูงสุด คือ First Null Beamwidth (FNBW) ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความกว้างของลำคลื่นที่ Half Power Beamwidth และ First Null Beamwidth (ที่มา: [21])

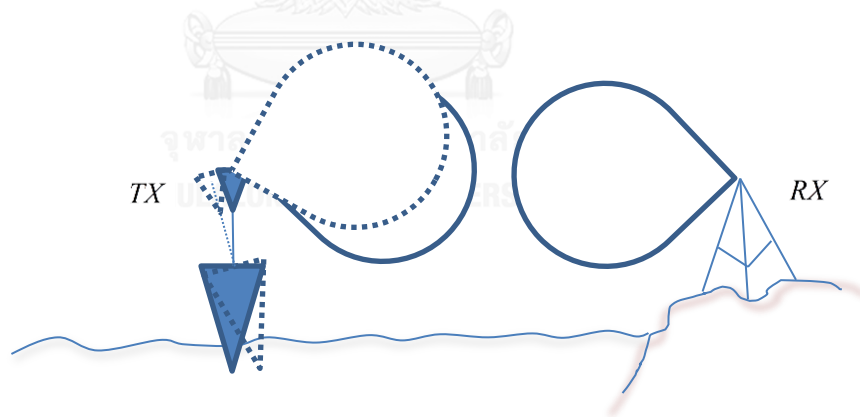
โดยปกติเสาอากาศแบบ whip ขนาดความกว้างบีมวิดธ์ในระนาบแนวตั้งของรูปแบบการแพร่คลื่นจะมีผลกระทบต่อระยะการสื่อสาร ถ้าบีมวิดธ์มีขนาดความกว้างมากจะทำให้ระยะทางสื่อสารลดลงเนื่องจากความเข้มของสัญญาณถูกกระจายออกจากแนวกลางมากขึ้น ขณะที่บีมวิดธ์ที่มีขนาดเล็กจะให้ระยะการสื่อสารที่ไกลกว่า เนื่องจากความเข้มของสัญญาณส่วนใหญ่กระจุกอยู่ที่บริเวณตรงกลางของลำคลื่น แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าขนาดความกว้างของบีมวิดธ์ที่เล็กกว่าจะมีข้อดีในเรื่องของระยะทางการสื่อสารที่ไกลกว่า แต่ก็มีข้อเสียเมื่อเรือมีอาการโคลงจากคลื่นลมในทะเลจะเกิดปัญหาความคลาดเคลื่อนของแนวทิศทางการแพร่คลื่นระหว่างเสาอากาศรับกับเสาอากาศส่งได้ง่ายกว่า ทำให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมโยงการสื่อสารลดลง หรือบางครั้งอาจไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้เลย ถ้าการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีมากจนกระทั่งความเข้มของสัญญาณที่รับได้ต่ำกว่าค่า Sensitivity ของเครื่องรับ จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าถ้าเรือไม่โคลง และรูปแบบการแพร่คลื่นในระนาบแนวตั้งของเสาอากาศเรืออยู่ที่ตำแหน่ง A จะทำให้เรือกับฝั่งสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ แต่ถ้ารูปแบบการแพร่คลื่น

ในระนาบแนวตั้งของเสาอากาศเรือเคลื่อนที่มาอยู่ที่ตำแหน่ง B จะทำให้ความเข้มของสัญญาณลดลง ยิ่งระยะทางการสื่อสารระหว่างเรือกับฝั่งที่ระยะไกล มุมที่คาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยจะยิ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับ



รูปที่ 3.6 รูปแบบการแพร่คลื่นขณะเรือโคลงเมื่อปมวิตร小有ขนาดเล็ก

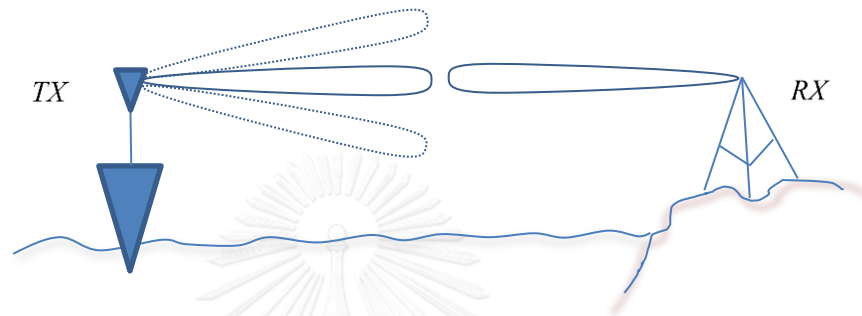
ในทางกลับกันถ้าความกว้างของปมวิตร小有ในระนาบแนวตั้งของรูปแบบการแพร่คลื่นของเสาอากาศมีความกว้างมากขึ้น จะสามารถเพิ่มโอกาสในการสื่อสารระหว่างเรือกับสถานีฝั่งได้เพิ่มขึ้นขณะเรือโคลง แต่ระยะทางการสื่อสารอาจจะไกลขึ้นแทน แต่จะมีผลกระทบอันเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสัญญาณสะท้อนพื้นน้ำทะเลไปยังเครื่องรับที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3.7 ในขณะที่ปมวิตร小有ขนาดเล็กจะมีโอกาสเกิดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่มาจาก การสะท้อนพื้นท้องทะเลไปยังเครื่องรับน้อยกว่า ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 รูปแบบการแพร่คลื่นขณะเรือโคลงเมื่อปมวิตร小有ขนาดใหญ่

จะเห็นได้ว่ากรณีเรือขนาดเล็ก และไม่มีระบบรักษาความเสถียรเสาอากาศเมื่อมีอาการโคลง ความกว้างปมวิตร小有ของรูปแบบการแพร่คลื่นในระนาบแนวตั้งมีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมโยงการสื่อสาร ทั้งนี้ถ้าพิจารณาถึงความสามารถในการดำรงการสื่อสารได้ตลอดเวลา อาจจำเป็นต้องพิจารณาถึงรูปแบบการแพร่คลื่นในระนาบแนวตั้งที่มีขนาดกว้างเพิ่มโอกาสในการรับสัญญาณได้มากขึ้น แต่ถ้าพิจารณาถึงระยะทางการสื่อสารอาจจำเป็นต้องพิจารณารูปแบบการแพร่คลื่นในระนาบแนวตั้งที่มีขนาดแคบ ดังนั้นเพื่อให้คุณภาพความเข้มของสัญญาณรับได้ดีที่สุดจำเป็นต้องหาขนาดของ

ปีมวิคต์ที่เหมาะสม หรือแก้ปัญหาโดยการติดตั้งเสาอากาศเพิ่มเติมโดยให้ทำมุมแยกกัน โดยให้มุมของเสาอากาศทั้งหมดครอบคลุมมุมโคลงของเรือที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้ให้การทำงานของเสาอากาศแต่ละต้นทำงานไม่พร้อมกัน โดยมีเพียงต้นเดียวเท่านั้นที่ทำหน้าที่ในการรับส่งสัญญาณเฉพาะเมื่อเสาอากาศต้นที่มีแนวการแพร่คลื่นของเสาอากาศส่งกับเสาอากาศรับอยู่ในแนวเดียวกันเท่านั้น ส่วนตัวที่เหลือไม่ต้องแพร่คลื่น เพื่อป้องกันการรบกวนกันของสัญญาณที่มาจากเสาอากาศต้นอื่น และยังเป็นการประหยัดพลังงานอีกด้วย ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การติดตั้งเสาอากาศเพิ่มเติมเพื่อแก้ปัญหาจากการโคลงของเรือ

### 3.3.3 ความหนาแน่นกำลังการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiation power density)

การสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงแบบไร้สายจะเกิดขึ้นได้นั้น จำเป็นต้องมีการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปจึงจะสามารถส่งข้อมูลไปในอากาศได้ โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกไปนั้นมีกำลังงาน และพลังงานมาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ กำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า กับ ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

$$W = \frac{1}{2} |\vec{E} \times \vec{H}^*| \quad (3.6)$$

$W$  หมายถึง ความหนาแน่นกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ (Instantaneous poynting vector) มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ )

$\vec{E}$  หมายถึง ความเข้มสนามไฟฟ้า ณ ขณะหนึ่ง (Instantaneous electric-field intensity) มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร (V/m)

$\vec{H}$  หมายถึง ความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ ขณะหนึ่ง (Instantaneous magnetic-field intensity) มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

ทั้งนี้สนามแม่ไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\vec{H} = \frac{1}{\eta} \vec{E} \quad (3.7)$$



$\eta$  หมายถึง ค่าความต้านทานของตัวกลางส่ง (Transmission medium impedance) สำหรับคลื่นที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศ โดยที่  $\eta$  มีค่าเท่ากับ  $377 \Omega$

ปกติสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่คลื่นจากจุดกำเนิดออกไปทุกทิศทางเป็นระยะทางเท่ากัน โดยมีลักษณะเป็นทรงกลม แต่เมื่อพิจารณาการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะไกลมาก หน้าคลื่นของการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเสมือนเป็นพื้นราบ โดยกำลังงานเฉลี่ยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าคลื่นราบหาได้จากความสัมพันธ์

$$P = \frac{1}{2\eta} |\vec{E}|^2 \quad (3.8)$$

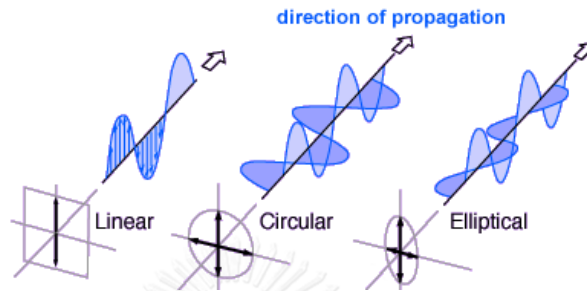
P หมายถึง กำลังงานเฉลี่ยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

เนื่องจากสนามไฟฟ้านั้นเป็นปริมาณเวกเตอร์ จึงมีทั้งขนาดและทิศทาง โดยทั่วไปความเข้มของสนามไฟฟ้าในระบบคาร์ทีเซียน โคออร์ดิเนต ซิสเต็ม (Cartesian coordinate system) ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ  $\vec{E}_x$ ,  $\vec{E}_y$  และ  $\vec{E}_z$  โดยให้  $z$  เป็นทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่  $x$  และ  $y$  มีทิศตั้งฉากกัน และระนาบ  $xy$  ตั้งฉากกับ  $z$  ทั้งนี้เนื่องจากการสื่อสารโครงข่ายแบบแอตฮอก มีทั้งโพลาริเซชันในแนวตั้งและในแนวนอน งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการสื่อสารโครงข่ายแอตฮอกข้อมูลความเร็วสูง ไร้สายที่มีโพลาริเซชันในแนวนอนเท่านั้น การคำนวณความเข้มของสนามไฟฟ้าจึงเหลือเฉพาะส่วนประกอบ  $\vec{E}_x$  เท่านั้น ซึ่งมีข้อดีคือสามารถคำนวณได้แบบปริมาณสเกลาร์

### 3.3.4 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือโพลาริเซชันของเสาอากาศ (Polarization of antenna) กับ โพลาริเซชันของคลื่นที่ถูกส่งออกไป (Polarization of radiated wave) สำหรับโพลาริเซชันของเสาอากาศคือทิศทางโพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกไปโดยเสาอากาศ ส่วนโพลาริเซชันของคลื่นที่ถูกส่งออกไปคือทิศทางของสนามไฟฟ้าเมื่อเทียบกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ปกติโพลาริเซชันของคลื่นที่ถูกส่งออกไปมีรูปแบบตามรูปที่ 3.9 ซึ่งโพลาริเซชันที่สนใจในงานวิจัยนี้เป็นโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear) ในแนวนอน ดังนั้นถ้ากำหนดให้น้ำทะเลเป็นตัวนำแบบสมบูรณ์ (PEC) แล้ว ตามเงื่อนไขแนวแบ่งเขต (Boundary condition) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นในแนวนอน เคลื่อนที่ตกกระทบน้ำทะเลจะเกิดการสะท้อนกลับหมด และมีขนาดเท่าเดิมแต่โพลาริเซชันของคลื่นสะท้อนจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับโพลาริเซชันของคลื่นกระทบเนื่องจากมีการสะท้อนกับเท่ากับ  $-1$  และเนื่องจากเป็นโพลาริเซชันในแนวนอน ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y + \vec{E}_z$ ) จึงมีส่วนประกอบเดียวเท่านั้น ( $\vec{E}_x$ ) ที่ถูกนำมา

คำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า ถ้าให้  $z$  เป็นทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า  $xy$  เป็นระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่  $y$  เป็นแนวตั้ง และ  $x$  เป็นแนวนอน โดยที่  $\vec{E}_x = \vec{a}_x E_0 + \vec{a}_y E_0 + \vec{a}_z E_0$  และเนื่องจากเป็นโพลาริเซชันในแนวนอน  $\vec{a}_y$  และ  $\vec{a}_z$  เท่ากับ 0 ดังนั้น  $\vec{E}_x = \vec{a}_x E_0$  ทำให้  $\vec{E}_x$  เหลือเพียงส่วนประกอบเดียวในแนวแกน  $x$  จึงสามารถคำนวณได้แบบปริมาตรสเกลาร์



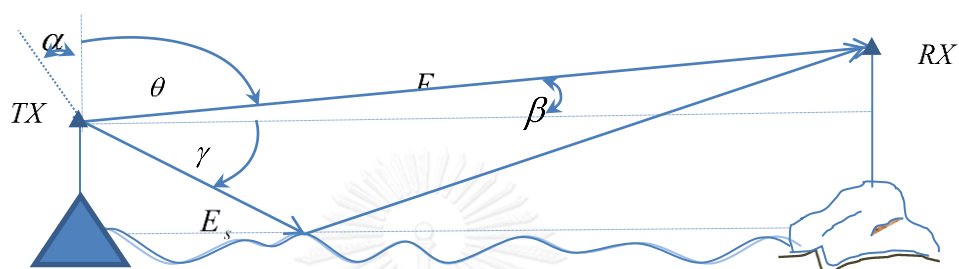
รูปที่ 3.9 โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ (ที่มา: [22])

### 3.4 เส้นทางของการแพร่กระจายคลื่น (Propagation paths)

ในระเบียบวิธีเชิงรังสี เส้นทางของการแพร่กระจายคลื่นในการสื่อสารระหว่างเรื่อกับสถานีฝั่งประกอบด้วย 2 เส้นทาง ได้แก่ เส้นทางในแนวเส้นตรงที่สัญญาณแพร่ออกจากเสาอากาศบนเรือไปยังเครื่องรับบนฝั่ง ( $\vec{E}_d$ ) และสองเส้นทางในแนวสะท้อนพื้นน้ำทะเลที่สัญญาณแพร่ออกจากเสาอากาศบนเรือแล้วไปตกกระทบพื้นน้ำทะเลก่อนที่จะสะท้อนมายังเครื่องรับที่สถานีฝั่ง ( $\vec{E}_s$ ) ดังรูปที่ 3.10 โดยสัญญาณทั้ง 2 เส้นทางที่เดินทางมาถึงยังเครื่องรับนั้นมีความแตกต่างกันเนื่องจากระยะทางในการเดินทางของสัญญาณไม่เท่ากันส่งผลให้เฟสของสัญญาณทั้งสอง ณ เครื่องรับไม่เท่ากัน ถ้าเฟสของสัญญาณทั้ง 2 เส้นทางตรงกัน สัญญาณสะท้อนพื้นน้ำทะเลที่รับได้จะเป็นสัญญาณแบบ Coherence ( $\vec{E}_{sc}$ ) ซึ่งเป็นผลดีต่อคุณภาพสัญญาณที่รับได้ เนื่องจากสัญญาณจะแรงขึ้นกว่าปกติซึ่งโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก ถ้าเฟสของสัญญาณต่างกัน สัญญาณสะท้อนพื้นน้ำดังกล่าวจะเป็นสัญญาณแบบ Incoherence ( $\vec{E}_{si}$ ) แนนอนยอมไม่เป็นผลดีต่อคุณภาพสัญญาณที่รับได้ ทั้งนี้ความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ เกิดจากผลรวมของสัญญาณที่มาจากทั้ง 2 เส้นทางรวมกัน โดยในการวัดความเข้มของสัญญาณใช้การวัดแบบ RSSI (Received signal strength indicator) เป็นการวัดเฉพาะค่าความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับเท่านั้น ไม่ได้รวมถึงข้อมูลที่ถูส่งไปพร้อมกับสัญญาณด้วย

นอกเหนือจาก 2 เส้นทางของการแพร่กระจายคลื่นที่กล่าวมาแล้วนั้น จริง ๆ แล้วยังมีอีกหลายเส้นทางที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการเชื่อมโยงการสื่อสาร เช่น ดักดิ่ง (Ducting) เป็นเส้นทางที่เกิดขึ้นโดยได้รับผลกระทบจากสภาพบรรยากาศเหนือพื้นทะเลทำให้เกิดช่องสัญญาณเหนือพื้นน้ำทะเลส่งผลให้สัญญาณเกิดการสะท้อนไปมาระหว่างชั้นบรรยากาศเหนือพื้นน้ำทะเลที่ค่าแรงดันอากาศแตกต่างกัน และการกระเจิงของสัญญาณ (Scintillation) อันเนื่องมาจากไอน้ำทะเล หมอก หรืออนุภาคเล็กที่ทำ

ให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการหักเหไปมาไม่สามารถเดินทางเป็นแนวเส้นตรงได้เมื่อตกกระทบกับอนุภาคเล็ก ๆ เหล่านั้น แต่เนื่องจากสภาวะการณดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นสภาพดิน ฟ้า อากาศ ที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ และช่วงเวลาที่เกิดขึ้น ไม่มีความแน่นอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเพียง 2 เส้นทางหลักของเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่มีผลต่อความเข้มของสัญญาณ ณ สภาพพื้นทะเลทั่วไป โดยไม่ได้รวมผลกระทบจากเส้นทางอื่น ๆ อยู่ในการพิจารณาและนำมาใช้ในการคำนวณด้วย



รูปที่ 3.10 เส้นทางการแพร่กระจายคลื่น

จากรูปที่ 3.10 พื้นน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้เรือมีการโคลงเป็นมุม  $\theta$  ดังนั้นเมื่อมุมของเสาอากาศเปลี่ยนจึงมีผลต่อความเข้มของสัญญาณที่รับได้ ทั้งจากมุมการแพร่คลื่นที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม และการเปลี่ยนแปลงของพื้นน้ำทะเลที่มีต่อผลต่อมุมตกกระทบของสัญญาณ

### 3.5 ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องรับ

โดยปกติกำหนดให้ความเข้มสัญญาณที่รับได้อยู่ในรูปอัตราส่วนของความเข้มของสนามไฟฟ้าทั้งหมดต่อความเข้มของสนามไฟฟ้าแนวตรง หรือเรียกว่าค่า Normalized Propagation Gain โดยทุกค่าของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ ด้วยค่าความเข้มของสัญญาณเริ่มต้นแล้ว ดังนี้

$$F = \frac{|\vec{E}_d + \vec{E}_s|}{|\vec{E}_{t,ref}|} \quad (3.9)$$

$F$  คืออัตราส่วนความเข้มของสนามไฟฟ้า

$\vec{E}_d$  คือความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนวตรงมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร (V/m)

$\vec{E}_{t,ref}$  คือความเข้มสนามไฟฟ้ารวมระหว่างสนามไฟฟ้าในแนวตรงและแนวสะท้อนพื้นน้ำทะเลที่มีเฟสตรงกันและเป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ มีค่าเท่ากับ  $2\vec{E}_{d,best}$  โดย  $\vec{E}_{d,best}$  เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวตรงที่ดีที่สุดกรณีเรืออยู่นิ่ง

### 3.5.1 ความเข้มของสัญญาณในแนวตรง (Direct path power)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากเสาอากาศภาคส่งบนเรือในแนวเส้นตรงไปยังเสาอากาศภาครับของสถานีฝั่ง เรียกว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตรง (Directed field –  $\vec{E}_d$ ) ปกติสัญญาณในแนวตรงเป็นสัญญาณที่ดีที่สุด และเป็นสัญญาณเดียวที่ต้องการให้เกิดขึ้นเนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่มาจากเส้นทางอื่น ทั้งนี้ในงานวิจัยได้กำหนดรูปแบบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตรงของเสาอากาศทั้งเครื่องส่งและเครื่องรับเป็นดังนี้

$$\vec{E} = \frac{\vec{a}_x E_0 \cos^n(\theta) \exp(-jkd_0)}{d_0} \quad (3.10)$$

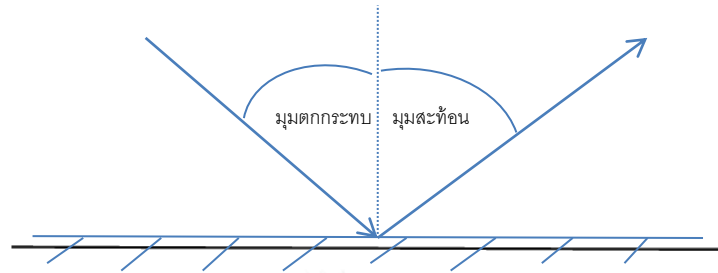
โดยที่  $E_0$  เป็นขนาดของความเข้มสัญญาณเริ่มต้น มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเมตร  $\theta$  เป็นมุมของเสาอากาศที่วัดจากแนวตั้งของเสาอากาศมายังตำแหน่งแนวตรงระหว่างเสาอากาศรับกับเสาอากาศส่ง มีหน่วยเป็นองศา ส่วน  $k$  เป็นค่า wavenumber มีหน่วยเป็น เรเดียนต่ออนาที่ และ  $d_0$  คือระยะทางในแนวตรงระหว่างเสาอากาศส่งถึงเสาอากาศรับ มีหน่วยเป็นเมตร และ  $n$  เป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดความกว้างของบีมวิดธ์ เป็นเลขจำนวนเต็มบวก

จากสมการ (3.10) สัญญาณที่ถูกส่งออกมาประกอบด้วยขนาด (Amplitude) เฟส (Phase) และทิศทาง (Direction) เสมอ โดยที่ขนาดของสัญญาณขึ้นอยู่กับรูปแบบการแพร่คลื่นซึ่งผันตรงกับค่า  $\cos^n(\theta)$  ส่วนเฟสนั้นขึ้นอยู่กับค่า  $d_0$  ในเทอมของ  $\exp(-jkd_0)$  โดยค่า  $k$  เป็นค่าที่ถูกกำหนดด้วยค่าความถี่ที่เลือกใช้ในการสื่อสารระหว่างเรือกับสถานีฝั่งซึ่งถูกกำหนดตั้งเริ่มต้น ดังนั้นเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่า  $d_0$  เพียงค่าเดียว สุดท้ายทิศทางของสัญญาณขึ้นอยู่กับค่ามุม  $\theta$  โดยกำลังของสัญญาณสามารถหาได้จาก  $|\cos^n(\theta)|^2$  หารด้วยค่าความต้านทานตัวกลางส่ง ( $\eta$ ) ตามสมการ (3.8) ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มของสัญญาณได้ถูกนอร์มอลไลซ์ด้วยความเข้มของสัญญาณเริ่มต้นแล้ว ( $E_0$ ) ดังนั้นความเข้มของสัญญาณแรงสูงสุดคือ 1

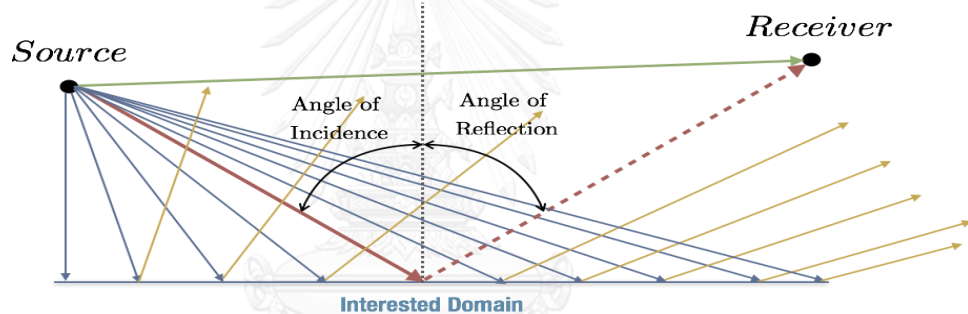
### 3.5.2 ความเข้มของสัญญาณสะท้อน (Reflect path power)

สัญญาณสะท้อนได้แก่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกจากเสาอากาศภาคส่งบนเรือแพร่กระจายไปกระทบพื้นน้ำทะเลแล้วสะท้อนไปยังเสาอากาศภาครับของสถานีบนบก ตามกฎของการสะท้อน (Law of reflection) มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.11 กรณีพื้นทะเลเรียบเสมือนกระจก ลำคลื่นที่สะท้อนไปยังตำแหน่งเครื่องรับจะมีเพียงลำคลื่นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ส่วนกรณีพื้นทะเลไม่เรียบเนื่องจากคลื่น อาจมีลำคลื่นที่สะท้อนจากพื้นน้ำทะเลไปยังเครื่องรับได้หลายลำคลื่นหรือหลายเส้นทาง ซึ่งเรียกว่าการกระเจิงของคลื่น (Scattering) และสนามไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องเรียกว่าสนามเนื่องจากการกระเจิง (Scatter field –  $\vec{E}_s$ ) โดยทั่วไปสนามไฟฟ้าของแต่ละ

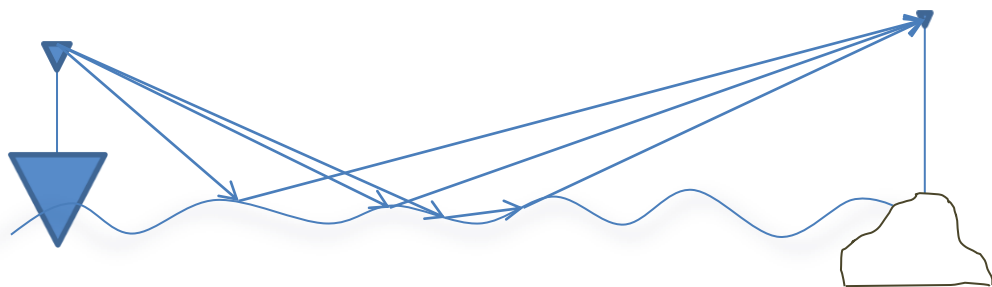
ลำคลื่นหรือแต่ละเส้นทางมีเฟสแตกต่างกันเนื่องจากระยะทางในการเดินทางของแต่ละเส้นทางไม่เท่ากัน ดังรูป 3.13 และยังเปลี่ยนแปลงตามพื้นผิวน้ำทะเล จึงส่งผลให้ความเข้มของสัญญาณรวมมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา



รูปที่ 3.11 กฎของการสะท้อน (Law of reflection) แสดงมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน



รูปที่ 3.12 แสดงลำคลื่นสะท้อนเพียงลำคลื่นเดียวจากพื้นทะเลเรียบที่สามารถเดินทางไปยังเครื่องรับ



รูปที่ 3.13 สัญญาณสะท้อนพื้นน้ำทะเลที่สามารถเดินทางไปยังเครื่องรับ

### 3.5 ระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเชิงรังสี

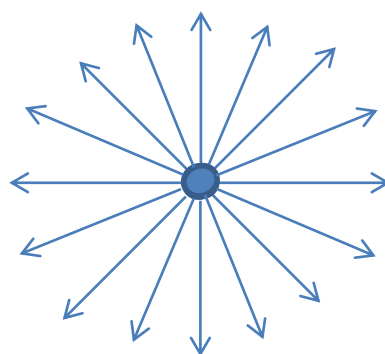
งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเชิงรังสีในการหาความเข้มสัญญาณด้วยข้อมูลเชิงสถิติที่มีความน่าเชื่อถือ ระเบียบวิธีเชิงรังสีเป็นวิธีการมองภาพการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเสมือนแสงที่แพร่

ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นกลุ่มเส้นรังสี โดยมีการเคลื่อนที่ออกจากจุดกำเนิดเป็นแนวเส้นตรงไปทุกทิศทุกทาง แทนการมองภาพการเคลื่อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคลื่นทั่ว ๆ ไป โดยทิศทางของรังสีจากแหล่งกำเนิดจะตั้งฉากกับหน้าคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และมีคุณสมบัติตามการแพร่คลื่นเชิงรังสีที่เป็นไปตามกฎของการสะท้อน Law of reflection ทุกประการ นั่นคือมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนตามรูป ดังรูปที่ 3.11

เนื่องจากข้อมูลที่ได้เกิดจากตัวแปรแบบสุ่ม (Random sampling input) จำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเป็นวิธีการหาผลลัพธ์ในเชิงตัวเลข (Numerical result) เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงสถิติที่เชื่อถือได้ โดยอาศัยข้อมูลทางสถิติจากชุดข้อมูลที่มีจำนวนมากพออย่างน้อยจำนวนหนึ่งในการคำนวณ

### 3.5.1 ระเบียบวิธีเชิงรังสี

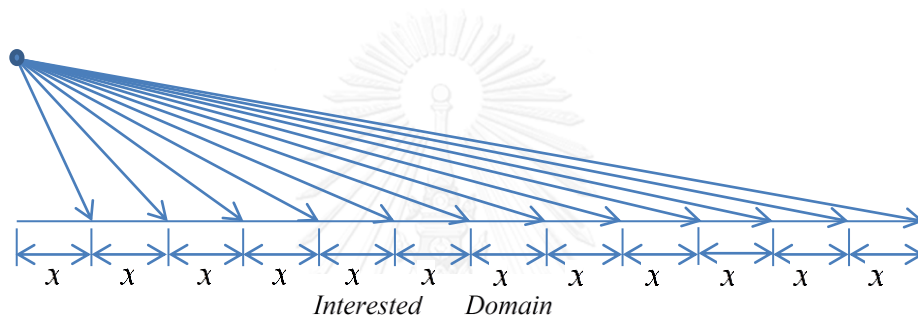
ระเบียบวิธีเชิงรังสีเป็นวิธีที่เข้าใจง่าย ตรงไปตรงมา และไม่ซับซ้อน เนื่องจากเป็นการติดตามเส้นทางการเดินทางของกลุ่มรังสีทั้งหมดที่เดินทางออกจากจุดกำเนิด โดยขอบเขตในการคำนวณของกลุ่มรังสีขึ้นอยู่กับวิธีการยิงรังสี ซึ่งวิธีการยิงรังสีนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่ที่เกี่ยวข้อง และสามารถประยุกต์ใช้ในงานวิจัยมีอยู่ 2 วิธี วิธีแรกคือการยิงรังสีออกไปด้วยมุมที่มีระยะห่างระหว่างมุมที่เท่ากัน (Burst method) ทั้งนี้มุมที่เท่ากันเกิดจากการเฉลี่ยค่ามุมทั้งหมดของมุมการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเสาอากาศออกด้วยมุมที่เท่า ๆ กัน ดังรูปที่ 3.14 วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ตรงไปตรงมา และง่ายที่สุดแล้วในการยิงรังสีเพราะไม่ต้องคำนึงถึงขอบเขตพื้นที่เป้าหมายที่รังสีจะไปตกกระทบ และไม่ได้ต้องการกรรมวิธีใด ๆ ที่ซับซ้อนมากไปกว่าการกระจายรังสีด้วยการเฉลี่ยมุมให้เท่า ๆ กัน และยิงออกไปเท่านั้น



รูปที่ 3.14 การยิงรังสีแบบ Burst method

ข้อเสียของวิธีการนี้คือเป็นวิธีการที่หยาบไม่ละเอียด เนื่องจากพิจารณาเพียงแค่การยิงรังสีด้วยมุมเฉลี่ยที่มีขนาดที่เท่ากันอย่างเดียว ทำให้เกิดมีรังสีส่วนเกินที่ยังออกไปแล้วไม่ได้ไปกระทบกับพื้นที่

เป้าหมาย ในที่นี้คือพื้นน้ำทะเลที่เป็นพื้นผิวดกกระทบระหว่างเรือกับสถานีฝั่ง ดังนั้นจึงทำให้เกิดการ  
 สิ้นเปลืองทรัพยากรในการคำนวณถือได้ว่าเป็นข้อด้อยของวิธีนี้ อีกวิธีการหนึ่งที่มีความซับซ้อน  
 เล็กน้อย แต่มีประสิทธิภาพมากกว่าคือการทำขอบเขตของพื้นที่เป้าหมายขึ้นมาก่อน หลังจากนั้น  
 เฉลี่ยค่าของพื้นที่เป้าหมายให้เท่า ๆ กัน แล้วจึงยิงกลุ่มรังสีไปยังทุกจุดที่ถูกเฉลี่ยแล้วของพื้นที่เป้า  
 หมาย วิธีนี้ยืนยันได้ว่าทุกรังสีที่ถูกยิงออกไปจะไปกระทบกับพื้นที่เป้าหมายแน่นอน และไม่มีรังสี  
 ส่วนเกินที่ยิงออกไปแล้วไม่ถูกนำมาคำนวณ ดังรูปที่ 3.15 วิธีการนี้จึงดีกว่าวิธีการแรก และเป็น  
 วิธีการที่เลือกใช้ในการยิงกลุ่มรังสีของงานวิจัยเพื่อให้ครอบคลุมทุกจุดของข้อมูลจากการสุ่มตัวอย่าง  
 ตลอดความยาวคลื่นทะเลที่สร้างขึ้นมา ดังนั้นจุดที่รังสีตกกระทบบึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็น  
 จุดที่รังสีมีการส่งต่อคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อตกกระทบบ



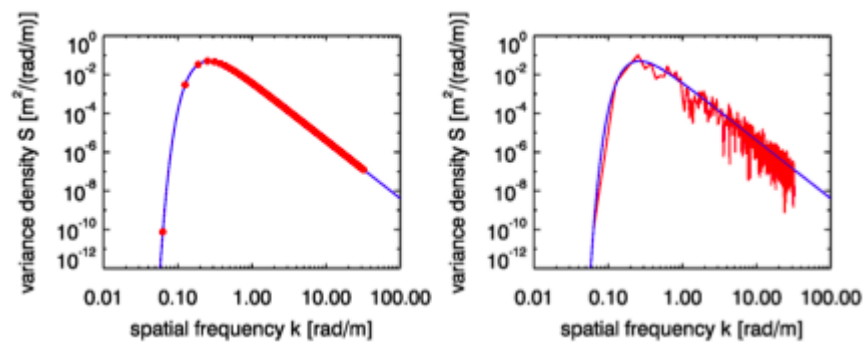
รูปที่ 3.15 วิธีการยิงรังสีไปยังพื้นที่ที่สนใจโดยมีระยะห่างระหว่างจุดที่เท่าๆ กัน

เมื่อรังสีกลุ่มแรกได้ถูกยิงออกไปแล้ว รังสีแต่ละรังสีก็จะเคลื่อนที่อย่างอิสระเป็นแนวเส้นตรง  
 เหมือนกับแสงจนกระทั่งไปกระทบกับพื้นที่เป้าหมาย สำหรับพื้นที่เป้าหมายที่เป็นพื้นผิวที่มีลักษณะ  
 เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์นั้น การสะท้อนต่อไปของรังสีจะเป็นไปตามกฎการสะท้อน โดยรังสีจะสะท้อน  
 ด้วยมุมสะท้อนที่เท่ากับมุมตกกระทบบ และเดินทางต่อไปจนกระทั่งรังสีไปตกกระทบบกับพื้นผิวดก  
 กระทบบถัดไปอีกครั้งหนึ่ง เกิดขึ้นอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดต่ำ  
 กว่าค่าเกณฑ์ที่กำหนด จึงเลิกติดตามเส้นทางการเดินทางของรังสี แต่ในงานวิจัยนี้กำหนดให้รังสี  
 เดินทางมากที่สุดที่จำนวนการสะท้อนจำนวน 2 ครั้ง เพื่อลดความซับซ้อนของงานวิจัย

เนื่องจากกลุ่มรังสีที่เดินทางไปมีคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าติดไปด้วยเสมอทุกรังสี ด้วย  
 วิธีการติดตามเส้นทางการเดินทางของรังสีที่กล่าวมาแล้วนั้น ทำให้ได้ข้อมูลจุดตกกระทบบทุกจุดที่เกิด  
 จากการยิงรังสีออกไปจากแหล่งกำเนิด ข้อมูลที่ได้จากการติดตามเส้นทางการเดินทางของรังสีนั้น  
 ประกอบด้วยระยะทางการเดินทางของแต่ละรังสี ตำแหน่งที่รังสีตกกระทบบ และความชันของพื้นผิวดก  
 กระทบบ สามารถนำไปใช้สำหรับการคำนวณสนามของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อไปได้ หลังจากขั้นตอน  
 การติดตามเส้นทางการเดินทางของรังสีเสร็จแล้ว โดยการผนวกคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับ  
 รังสีในแต่ละรังสีเพื่อหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าได้

### 3.5.2 ระเบียบวิธีมอนติคาร์โล

เนื่องจากการจำลองการเกิดคลื่นทะเลในแต่ละครั้งเกิดจากค่าตัวแปรแบบสุ่ม จึงมีปัญหาจากสัญญาณรบกวนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ ดังนั้นข้อมูลที่เกิดจากการจำลองคลื่นทะเลเพียงชุดเดียว จึงไม่มีความถูกต้องเพียงพอต่อการหาความเข้มของสัญญาณลัพท์ที่ได้จากผลรวมของทุครั้งสี่ที่เครื่องรับ เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะมีความคาดเคลื่อนค่อนข้างมากจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการจำลองคลื่นทะเลเพียงชุดข้อมูลเดียว ดังนั้นจำเป็นต้องสร้างจำนวนชุดข้อมูลขึ้นมาจำนวนมากเพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกไป แต่ว่าการสร้างข้อมูลขึ้นจำนวนมากนั้นทำให้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นและใช้เวลานาน แม้ว่าจะคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงแล้วก็ตาม ดังนั้นจำเป็นต้องใช้จำนวนชุดข้อมูลที่เหมาะสม หมายถึงมีจำนวนมากพอจำนวนหนึ่ง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เชิงสถิติที่เชื่อถือได้ จาก [18] จำนวนข้อมูลของการจำลองการเกิดคลื่นทะเลจำนวน 100 ชุดข้อมูล เป็นจำนวนที่มากเพียงพอต่อการขจัดสัญญาณรบกวนออกไปได้ ทำให้การสร้างคลื่นทะเลได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการเกิดคลื่นทะเลที่เป็นจริงที่สุด ตามรูป 3.15



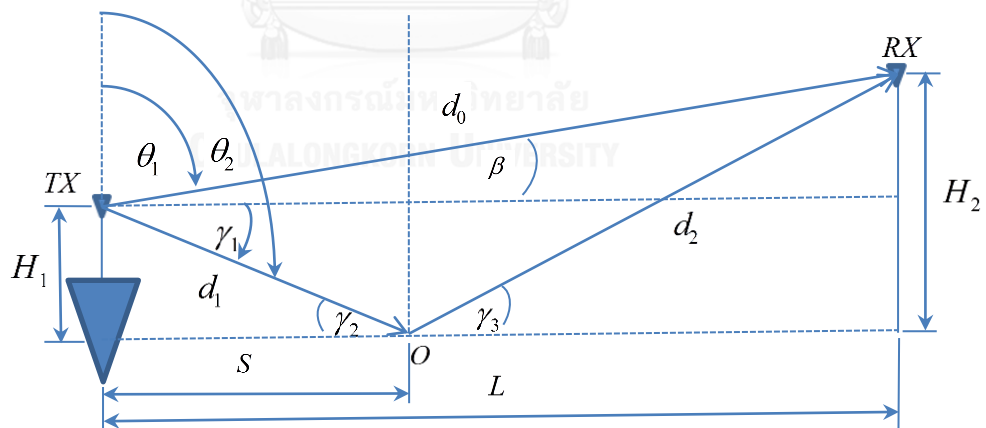
รูปที่ 3.16 แสดงการสร้างข้อมูลจำนวน 100 ชุดข้อมูลเพื่อขจัด noise ออกไป (ที่มา: [18])



#### บทที่ 4 แนวทางวิทยานิพนธ์ที่เสนอ

เนื่องจากมุมมองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวทางการศึกษาของงานวิจัยนี้เป็นเสมือนแสงจึงมีลักษณะเชิงเรขาคณิต ดังนั้นการคำนวณเริ่มด้วยการหาแนวการเคลื่อนที่คลื่นแม่เหล็กฟ้าเชิงรังสีก่อน หลังจากนั้นจึงนำคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ขนาด เฟส และทิศทาง ผนวกเพิ่มเติมในเส้นทางของรังสี โดยคำนวณหาความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ ทั้งกรณีเรืออยู่นิ่ง (พื้นน้ำทะเลเรียบ) และกรณีเรือโคลง (พื้นน้ำทะเลไม่เรียบ) หลังจากจำลองการเกิดคลื่นทะเลที่เคลื่อนที่ตามเวลา  $t$  จาก Pierson Moskowitz สเปกตรัม เพื่อสร้างแบบจำลองการโคลงของเรือ และพื้นที่ตกกระทบ เพื่อคำนวณทุครั้งสี่ที่ยิงไปกระทบทุกจุดตัวอย่างการจำลองการเกิดคลื่นทะเล โดยกำหนดให้มีจำนวนการสะท้อนของรังสีมากที่สุดจำนวน 2 ครั้ง เพื่อหาผลรวมของความเข้มของสัญญาณที่ได้รับได้ระหว่างสัญญาณที่มาในแนวตรง กับแนวสะท้อนพื้นน้ำทะเล โดยคำนวณตลอดระยะเวลาการจำลองการเกิดคลื่นทะเล สุดท้ายใช้ระเบียบวิธีมอนติคาร์โล ด้วยการคำนวณค่า Ensemble Average จากการจำลองข้อมูลซ้ำให้มีจำนวนชุดข้อมูลมากพอจำนวนหนึ่งเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนออกไปเพื่อให้ข้อมูลที่ได้อมีความน่าเชื่อถือทางสถิติ

#### 4.1 การคำนวณหาความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ กรณีเรืออยู่นิ่ง และพื้นน้ำทะเลเรียบ



รูปที่ 4.1 รูปแบบกรณีเรืออยู่นิ่ง และพื้นน้ำทะเลเรียบ

รูปที่ 4.1 เป็นภาพแสดงกรณีเรือลอยอยู่นิ่งขณะพื้นท้องทะเลเรียบ โดยให้เรืออยู่ห่างจากฝั่งเป็นระยะ  $L$  เมตร และเสาอากาศบนเรือและสถานีฝั่งมีความสูงจากระดับน้ำทะเล  $H_1$  และ  $H_2$  เมตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้เสาอากาศมีรูปแบบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตั้งของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปเป็น  $\vec{E} = \vec{a}_x \cos^n(\theta_1)$  โดยที่

$\theta_1$  เป็นมุมของเสาอากาศที่วัดจากแนวตั้งของเสาอากาศไปยังตำแหน่งแนวเส้นตรงระหว่างเครื่องส่งบนเรือ และเครื่องรับบนฝั่ง

$\theta_2$  เป็นมุมของเสาอากาศที่วัดจากแนวตั้งของเสาอากาศไปยังตำแหน่งที่รังสีพุ่งออกจากแหล่งกำเนิดไปกระทบพื้นน้ำทะเล

$\gamma_1, \gamma_2$  และ  $\gamma_3$  เป็นมุมที่วัดจากแนวระดับไปยังถึงตำแหน่งที่รังสีพุ่งออกไปตกกระทบพื้นน้ำทะเล โดยที่  $\gamma_1$  เท่ากับ  $\gamma_2$  เท่ากับ  $\gamma_3$

$\beta$  เป็นมุมที่วัดจากแนวระดับมายังแนวเส้นตรงระหว่างเสาอากาศรับกับเสาอากาศส่ง

$H_1$  และ  $H_2$  เป็นความสูงของเสาอากาศบนเรือ และเสาอากาศบนฝั่งตามลำดับ

$L$  เป็นระยะทางในแนวราบระหว่างเสาอากาศทั้ง 2 ต้น

$S$  เป็นระยะทางในแนวราบระหว่างเสาอากาศส่งมายังจุดที่รังสีตกกระทบพื้นน้ำทะเล

$d_0$  เป็นระยะทางที่รังสีออกจากจุดกำเนิดไปยังจุดรับสัญญาณในแนวเส้นตรงระหว่างเสาอากาศทั้ง 2 ต้น

$d_1$  เป็นระยะทางที่รังสีออกจากจุดกำเนิดไปยังจุดตกกระทบพื้นน้ำทะเล

$d_2$  เป็นระยะทางจากจุดที่รังสีตกกระทบพื้นน้ำทะเลไปยังจุดรับสัญญาณ ณ เครื่องรับ

ในการคำนวณความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ กรณีเรือลอยอยู่นิ่งบนพื้นน้ำทะเลเรียบนั้น เป็นการคำนวณที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ตรงไปตรงมา เนื่องจากมีรังสีที่พุ่งออกจากแหล่งกำเนิดเพียง 2 รังสี ใน 2 เส้นทางเดินทางไปยังจุดรับสัญญาณ โดยเส้นทางแรกเดินทางในแนวเส้นตรงระหว่างเสาอากาศเครื่องส่งกับเสาอากาศเครื่องรับ และเส้นทางที่สองเส้นทางที่รังสีเดินทางออกจากจุดกำเนิดไปตกกระทบกับพื้นน้ำทะเลแล้วสะท้อนไปยังเครื่องรับ ตามกฎของการสะท้อนเมื่อติดตามกลุ่มของรังสีที่ออกจากจุดกำเนิดไปตกกระทบทุกจุดของพื้นน้ำทะเลแล้ว จะเห็นว่าเส้นทางที่สองมีเพียงรังสีเดียวเท่านั้นที่ตกกระทบพื้นน้ำทะเลแล้วสามารถสะท้อนไปยังเครื่องรับได้ เนื่องจากมีมุมตกกระทบ และมุมสะท้อนเพียงมุมเดียวที่เท่ากัน นอกเหนือจากนั้นรังสีอื่น ๆ ในกลุ่มรังสีที่ตกกระทบสะท้อนไปยังจุดอื่น ๆ ไม่ตรงกับเครื่องรับ เมื่อติดตามรังสีจนได้เส้นทางการเดินทางของรังสีทั้ง 2 เส้นทางแล้ว สิ่งต่อไปที่ต้องดำเนินการคือ การหาระยะทางของเส้นทางการเดินทางของรังสีทั้ง 2 เส้นทาง โดยสามารถคำนวณหาระยะทางของทั้งสองเส้นทางได้ดังนี้

ระยะทางของรังสีที่เดินทางในเส้นแนวตรง หรือระยะทางในแนวเส้นตรงระหว่างจุดกำเนิดสัญญาณกับจุดรับสัญญาณ ( $d_0$ ) สามารถหาได้จาก

$$d_0 = \sqrt{L^2 + (H_2 - H_1)^2} \quad (4.1)$$

ส่วนการหาระยะทางของรังสีในแนวสะท้อนพื้นน้ำทะเลสามารถหาได้จากผลรวมของระยะทางจากจุดกำเนิดสัญญาณถึงจุดที่รังสีตกกระทบพื้นน้ำทะเล ( $d_1$ ) กับระยะทางจากจุดที่รังสีตกกระทบพื้นน้ำทะเลแล้วสะท้อนไปยังจุดรับสัญญาณ ( $d_2$ ) ขั้นตอนแรกคือการหาจุดตกกระทบพื้นน้ำทะเลของรังสี โดยจุดตกกระทบจะเป็นจุดที่รังสีมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และเป็นจุดที่รังสีสามารถเดินทางจากจุดกำเนิดสัญญาณไปถึงยังจุดรับสัญญาณได้ จากรูปที่ 4.1 ให้จุด  $O$  เป็นจุดที่รังสีตกกระทบพื้นน้ำทะเล ขั้นตอนต่อไปคือการผนวกคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปกับรังสีดังกล่าวตามสมการ (3.10) เริ่มจากหาระยะทาง  $S$  ซึ่งเป็นระยะทางในแนวราบจากเสาอากาศส่งบนเรือมายังจุดตกกระทบ  $O$  สามารถหาค่า  $S$  ได้จากกฎของการสะท้อนดังนี้

$$\text{มุมตกกระทบ} = \text{มุมสะท้อน} \quad (4.2)$$

$$(90 - \text{มุมตกกระทบ}) = (90 - \text{มุมสะท้อน}) \quad (4.3)$$

$$\gamma_2 = \gamma_3 \quad (4.4)$$

$$\tan(\gamma_2) = \tan(\gamma_3) \quad (4.5)$$

$$\frac{H_1}{S} = \frac{H_2}{(L - S)} \quad (4.6)$$

$$H_1(L - S) = H_2S \quad (4.7)$$

$$H_1L - H_1S = H_2S \quad (4.8)$$

$$H_1L = H_2S + H_1S \quad (4.9)$$

$$H_1L = S(H_1 + H_2) \quad (4.10)$$

$$S = \left[ \frac{H_1}{(H_1 + H_2)} \right] L \quad (4.11)$$

เมื่อหาระยะทาง  $S$  ได้แล้ว ระยะทาง  $d_1$  และ  $d_2$  สามารถหาได้ ดังนี้

$$d_1 = \sqrt{H_1^2 + S^2} \quad (4.12)$$

$$d_2 = \sqrt{H_2^2 + (L - S)^2} \quad (4.13)$$

หลังจากได้ระยะทางเส้นทางเดินทางของรังสีในแนวตรง และแนวสะท้อนแล้ว ต่อไปหาค่ามุม  $\theta$  ที่เกี่ยวข้อง ในที่นี้สำหรับมุมของรังสีที่ต้องการคือมุม  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  ซึ่งเป็นมุมของรังสีในแนวตรงและแนวสะท้อนตามลำดับ โดยที่มุม  $\theta_1 = 90 - \beta$  และมุม  $\theta_2 = 90 + \gamma$  ส่วนมุม  $\beta$  และ  $\gamma$  หาได้จาก

$$\beta = \tan^{-1} \left\{ \frac{(H_2 - H_1)}{L} \right\} \quad (4.14)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{H_1}{S}\right) \quad (4.15)$$

เมื่อได้ค่าระยะทาง และมุมของรังสีครบทั้ง 2 แนวแล้ว ผนวกคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เข้าไป โดยค่า  $\bar{E}_d$  และ  $\bar{E}_s$  ที่ได้คือ

$$\bar{E}_d = \frac{\bar{a}_x \cos^n(90 - \theta_1) \exp(-jkd_0)}{d_0} \quad (4.16)$$

$$\bar{E}_s = \frac{\bar{a}_x \cos^n(\gamma) \exp[-jk(d_1 + d_2)]}{(d_1 + d_2)} \quad (4.17)$$

โดยผลรวมของค่า  $\bar{E}_d$  และ  $\bar{E}_s$  ที่ได้สามารถหาได้จาก

$$\bar{E}_{total} = \bar{E}_d + \bar{E}_s \quad (4.18)$$

$$\bar{E}_{total} = \frac{\bar{a}_x \cos^n(90 - \theta_1) \exp(-jkd_0)}{d_0} + \frac{\bar{a}_x \cos^n(\gamma) \exp[-jk(d_1 + d_2)]}{(d_1 + d_2)} \quad (4.19)$$

สุดท้ายค่ากำลังของสัญญาณรวมทั้งหมดหาได้จากสมการ (3.8) ดังนี้

$$P_{total} = \frac{1}{\eta} |\bar{E}_{total}|^2 \quad (4.20)$$

## 4.2 สร้างแบบจำลองการเกิดคลื่น

การสร้างแบบจำลองการเกิดคลื่นสามารถสรุปเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ได้ ดังนี้ [18]

1 เริ่มต้นจากการกำหนดขนาดของโดเมน (Domain size) ที่สนใจก่อน และระยะเวลาในการจำลองการเกิดคลื่นก่อน ซึ่งโดเมนที่สนใจของงานวิจัยนี้คือระยะทางความยาวของพื้นน้ำทะเลระหว่างเรือกับสถานีสื่อสารบนฝั่งทั้งหมด ในที่นี้ให้ระยะทางพื้นน้ำทะเลเป็น  $L$  เมตร ถ้าให้  $x$  เป็นตัวแปรระยะทาง และกำหนดค่าพิกัดเริ่มต้นของ  $x = 0$  ที่จุดกำเนิด และ  $x$  สิ้นสุด =  $L$  ที่จุดรับสัญญาณ ดังนั้นค่า  $L$  เป็นตัวกำหนดค่าความยาวคลื่นพื้นน้ำทะเลยาวสุดที่สามารถหาได้จากการจำลองคลื่นทะเล โดยกำหนดให้  $L$  มีค่าเท่ากับ 3938.4615 เมตร และกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองการเกิดคลื่นทะเลเป็น 10 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เพียงพอต่อการโคลงของเรือมากกว่า 1 รอบ

2 เมื่อได้ขนาดของโดเมนที่สนใจ และระยะเวลาการเกิดคลื่นทะเลแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการเลือกจำนวนจุด  $N$  ที่ใช้ในการทำ Fast Fourier Transform (FFT) ค่า  $N$  ที่เลือกนี้เป็นค่าจำนวนจุดที่ใช้เป็นความถี่ในการสุ่มตัวอย่างจากสเปกตรัมของวาร์เรียน (Variance spectrum) และมีค่าเท่ากับจำนวนจุดของคลื่นทะเลที่จำลองขึ้นมา โดยค่า  $N$  ควรมีค่าเป็นจำนวน  $2^n$  และ  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็มบวก เพื่อให้สามารถหาค่าของอินเวอร์สฟาสต์ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (IFFT) ได้ลงตัว งานวิจัยนี้กำหนดให้  $N = 2^{15}$  หรือ 32,768 ส่งผลให้ค่าระยะห่างระหว่างระยะทางแต่ละจุดของพื้นน้ำทะเลที่

จำลองขึ้นเป็น  $L/N = 0.1202$  เมตร นั้นหมายความว่าความยาวคลื่นของน้ำทะเลที่สั้นสุดที่เกิดขึ้น ได้มีค่าเท่ากับ  $2x = 0.2402$  เมตร

3 เนื่องจากคลื่นทะเลที่สร้างขึ้นนั้นอยู่ในโดเมนของระยะทาง ณ เวลาใด เวลาหนึ่ง หรือเวลา  $t$  ใด ๆ โดยทั่วไปสามารถใช้ตัวแปรความถี่เวฟนัมเบอร์ (Wavenumber) หรือ ความถี่ระยะทางเชิงมุม (Angular spatial frequency) ตัวใดตัวหนึ่งก็ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกตัวแปรความถี่ที่ใช้ว่าควรเป็นรูปแบบไหน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความถี่ระยะทางเชิงมุม โดยมีค่าความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency)  $k_f = 2\pi/L$  หรือเท่ากับ  $0.0016$  เรเดียนต่อเมตร และค่าความถี่สูงสุดที่ใช้การสุ่ม ตัวอย่าง  $k_{Ny} = \left(\frac{N}{2}\right)k_f = 26.1318$  เรเดียนต่อเมตร

4 เลือกรูปแบบของวาร์เรียนสเปกตรัม โดยรูปแบบของวาร์เรียนสเปกตรัมจะถูกกำหนดด้วยตัวแปรความถี่รูปแบบใดรูปแบบหนึ่งตามข้อ 3 ในที่นี้ใช้รูปแบบวาร์เรียนสเปกตรัมของ Pierson Moskowitz ถูกกำหนดด้วยตัวแปรความถี่ระยะทางเชิงมุม

5 เลือกความเร็วลมที่ใช้ในการจำลองการเกิดคลื่นทะเล เนื่องจากความเร็วลมเป็นตัวแปรเดียวที่ใช้กำหนดสภาวะท้องทะเล และจำเป็นต้องกำหนดขึ้นก่อนจาก Pierson Moskowitz สเปกตรัม เนื่องจากมีผลต่อความสูงของคลื่นทะเล ในงานวิจัยนี้กำหนดความเร็วลมที่ 10 เมตรต่อวินาที ซึ่งตรงกับสภาวะพื้นทะเลระดับ 5 ตามมาตรฐานวัตโบฟอร์ท คือสภาวะสูงสุดที่ทะเลไม่เรียบแต่ยังไม่มีคลื่นหัวแตก ซึ่งสภาวะทะเลดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดย Pierson Moskowitz สเปกตรัม

6 หาอินเวสของฟาสฟูเรียทรานฟอร์มจำเป็นต้องสร้างแอมพิจูด Hermitian แบบสุ่ม ขึ้นมาก่อนจาก Pierson Moskowitz สเปกตรัม โดยแอมพิจูด Hermitian แบบสุ่ม จะต้องถูกกำหนดค่าทั้งค่าตัวแปรที่ความถี่บวก และค่าตัวแปรที่ความถี่ลบ เพื่อให้มีความสมมาตร เนื่องจากอเรียฟูเรียจะต้องมีความสมมาตรทั้ง 2 ข้างตัวแปรความถี่เพื่อให้ค่าอินเวสของฟาสฟูเรียทรานฟอร์มที่ได้เป็นค่าจำนวนจริง และเนื่องจากแบบจำลองการเกิดคลื่นทะเลนี้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น ความถี่ของคลื่นทะเลแต่ละความถี่เป็นอิสระต่อกัน โดยแต่ละความถี่ของคลื่นทะเลมีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมตามสมการ (3.5) โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 2" งานวิจัยนี้กำหนดให้  $n$  มีค่าเท่ากับ 15 ดังนั้นจำเป็นต้องผนวกความสัมพันธ์ของความถี่เชิงมุมแต่ละความถี่ของคลื่นทะเลกับแอมพิจูด Hermitian แบบสุ่มที่ได้ ด้วยการคูณ  $\exp(-j(K_n s - \omega(K_n) t))$  เข้ากับแอมพิจูด Hermitian แบบสุ่ม เพื่อหาค่าความสูงของคลื่นทะเลที่เคลื่อนที่ ณ เวลา  $t$  ใด ๆ

7 เมื่อได้อเรียฟูเรีย ซึ่งเป็นแอมพิจูด Hermitian แบบสุ่ม ที่มีความสมมาตรแล้ว หลังจากนั้นทำการอินเวสฟาสฟูเรียทรานฟอร์มแอมพิจูด Hermitian แบบสุ่มที่สร้างขึ้นมา ค่าของอินเวสฟาส

ฟูเรียรทรานฟอร์มที่ได้คือค่าความสูงของคลื่นทะเล ณ เวลา  $t$  ใด ๆ โดยค่าความสูงของคลื่นทะเลที่ได้เริ่มต้นจาก  $x_0 = 0$  ถึง  $x_{N-1} = (N-1)\Delta x$

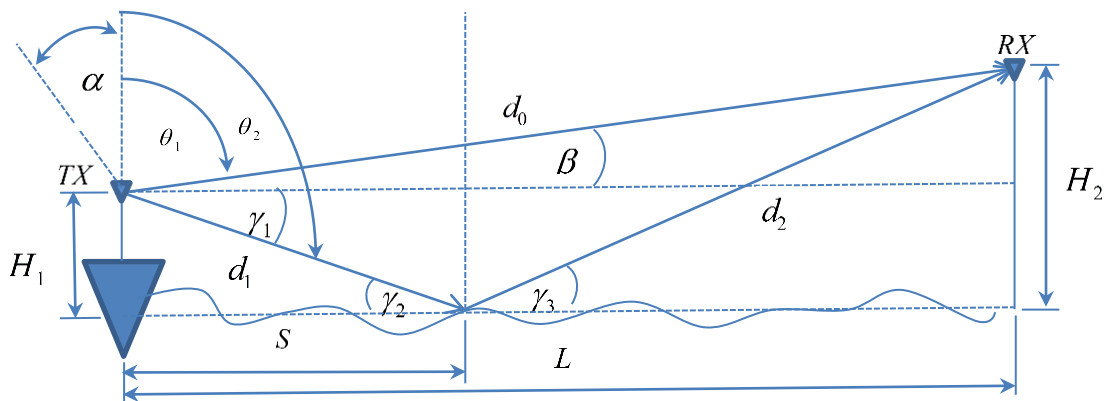
8 เนื่องจากค่าอินเวสฟาสฟูเรียรทรานฟอร์มอเรียที่ได้ให้ค่าความสูงของคลื่นทะเลเป็นจำนวนเชิงซ้อน โดยที่ค่าของคลื่นทะเลเป็นจำนวนจริง และมีจำนวนจินตภาพเป็น 0 ดังนั้นแยกจำนวนจริงออกจากจำนวนเชิงซ้อนซึ่งเป็นค่าความสูงของคลื่นทะเลออกมา

9 ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบผลลัพธ์เพื่อยืนยันว่าความสูงของคลื่นทะเลที่ได้นั้นถูกต้องด้วยการหาค่าเฉลี่ยความสูงของคลื่นทะเลที่ได้ต้องมีค่าเท่ากับ 0 และจำนวนจินตภาพของอินเวสฟาสฟูเรียรทรานฟอร์มอเรียต้องมีค่าเป็น 0 และเมื่อทำการฟาสฟูเรียรทรานฟอร์มของอเรียความสูงคลื่นทะเล และแปลงค่ากลับแอมพิจูด Hermitian แบบสุม จะต้องได้ Pierson Moskowitz สเปกตรัม ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นเหมือนกับขั้นตอนที่ 4

#### 4.3 แบบจำลองการโคลงของเรือ

หลังจากได้แบบจำลองการเกิดคลื่นทะเลที่เคลื่อนที่ ณ เวลา  $t$  ใด ๆ แล้ว สามารถกำหนดแบบจำลองการโคลงของเรือในทะเลได้ด้วยการคำนวณหาความชันเฉลี่ยของทุกจุดของคลื่นทะเลที่มีระยะทางเท่ากับความกว้างของตัวเรือ เพื่อใช้เป็นตัวแทนความชันของเรือ ณ เวลา  $t$  ใด ๆ การคำนวณดังกล่าวเป็นการหาการโคลงของเรือเฉพาะที่เกิดจากผลกระทบของคลื่นในทะเลที่กระทบข้างตัวเรือในทิศตั้งฉาก และส่งผลให้เรือโคลงรอบแนวยาวของตัวเรือเพียงอย่างเดียว ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากการโคลงในแนวอื่น และไม่รวมถึงการที่เรือเคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อมกับคลื่นทะเลด้วย หรือผลกระทบจากน้ำหนักการบรรทุก หรืออาการของเรือที่ตอบสนองในรูปแบบต่างกันตามลักษณะของเรือเมื่อเจอคลื่นลมในทะเล ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของงานวิจัย ได้กำหนดให้ทิศทางของคลื่นทะเลมีทิศตั้งฉากกับตัวเรือตลอดเวลา ส่งผลให้เรือมีอาการโคลงเพียงแกนเดียวเท่านั้น โดยโคลงรอบแกนความยาวของตัวเรือเท่านั้น และกำหนดให้ความสูงเหนือแนวน้ำของเสาอากาศบนเรือมีความสูงคงที่ตลอดเวลา เนื่องจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเสาอากาศนั้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางการสื่อสาร จึงมีแต่เพียงรูปแบบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตั้งเท่านั้นที่มีการเคลื่อนที่ตามการโคลงของเรือ

#### 4.4 คำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณที่เกิดจากการโคลงของเรือโดยระเบียบวิธีเชิงรังสี



รูปที่ 4.2 รูปกรณีเรือโคลง และพื้นน้ำทะเลไม่เรียบ

การคำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณที่เกิดจากการโคลงของเรือตามการเคลื่อนที่ของคลื่นทะเลช่วงเวลา  $t$  นั้นเป็นการหาค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ที่จุดรับสัญญาณ ณ เวลา  $t$  ใด ๆ โดยเริ่มต้นจากการติดตามการเดินทางของรังสีขณะเรือโคลงจาก 2 เส้นทาง เส้นทางแรกคือในแนวเส้นตรงระหว่างเสาอากาศส่งกับเสาอากาศรับ เส้นทางนี้ค่อนข้างง่ายเนื่องจากมีรังสีเส้นเดียวที่เดินทางออกจากเสาอากาศส่งมายังเสาอากาศรับ เป็นการติดตามรังสีที่พุ่งออกจากแหล่งกำเนิดว่ามีมุม ระยะทาง เฟสเท่าไร และขนาดเท่าไร ทั้งนี้จากรูปที่ 4.2 มุมที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างเสาอากาศส่งกับเสาอากาศรับยังคงเหมือนเดิมเมื่อวัดจากแนวตั้ง แต่มุมของรังสีที่สัมพันธ์กับแนวตั้งของเสาอากาศนั้นมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีมุมโคลง ( $\alpha$ ) เพิ่มขึ้นมา ดังนั้นมุมของการแพร่คลื่น หรือรังสีพุ่งออกไปขณะที่เรือโคลงเป็น  $\theta_1 + \alpha$  เมื่อได้มุมที่รังสีพุ่งออกไปแล้ว ขั้นตอนการหาความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับในแนวเส้นตรงเหมือนกับขั้นตอนในหัวข้อ 4.1 เพียงเปลี่ยนมุมจากเดิม  $\theta_1$  เป็น  $\theta_1 + \alpha$  เมื่อผนวกคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปกับรังสีแล้ว สามารถหาสนามไฟฟ้า ณ เครื่องรับ ได้ดังนี้

$$\bar{E}_d = \frac{\bar{a}_x \cos^n(\theta_1 + \alpha) \exp(-jkd_0)}{d_0} \quad (4.21)$$

ขณะที่การหาค่าความเข้มของสัญญาณที่สะท้อนพื้นน้ำทะเลมีความซับซ้อนมากกว่า เนื่องจากโดเมนที่สนใจในการยิงกลุ่มรังสีไปตกกระทบคือระยะทางทั้งหมดของพื้นน้ำทะเลระหว่างเสาอากาศบนเรือจนถึงเสาอากาศบนฝั่ง ดังนั้น ณ เวลา  $t$  ใด ๆ จึงมีรังสีจำนวนมากที่ต้องติดตาม หรือเรียกง่าย ๆ ว่าต้องติดตามรังสีที่พุ่งออกจากจุดกำเนิดสัญญาณไปยังทุกจุดของการเกิดคลื่นทะเลที่สุมขึ้นมา หรือเท่ากับ 32768 จุด ทุกเวลา  $t$  ใด ๆ อีกทั้งงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตให้มีการติดตามการสะท้อนของรังสีมากที่สุดที่จำนวนการสะท้อน 2 ครั้ง จึงทำให้มีความยุ่งยากเพิ่มขึ้น สำหรับขั้นตอนต่าง ๆ ของการหาค่าความเข้มสัญญาณในแนวสะท้อนพื้นน้ำทะเล ณ เวลา  $t$  ใด ๆ มีดังนี้

1 หาความชันระหว่างจุด 2 จุดของความสูงของคลื่นทะเลเพื่อใช้เป็นความชันของพื้นผิวดกกระทบของรังสี หลังจากนั้นหาจุดตกกระทบของรังสี  $(x, L(x))$  โดยให้จุดตกกระทบเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างจุดสองจุดของพื้นผิวดทะเลที่เกิดจากการสุม ความชันของพื้นผิวดกกระทบหาได้ ดังนี้

$$Slope_{\text{tangent}} = \frac{H(x+1) - H(x)}{\Delta X} \quad \text{ขณะที่ } x = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (4.22)$$

$$Y(x) = (Slope_{\text{tangent}} X) + \text{Constant } t \quad (4.23)$$

$H(x)$  ความสูงของคลื่นทะเล ณ ตำแหน่ง  $X$  มีหน่วยเป็นเมตร

$Slope_{\text{tangent}}$  ความชันของพื้นผิวดทะเลที่ตกกระทบ

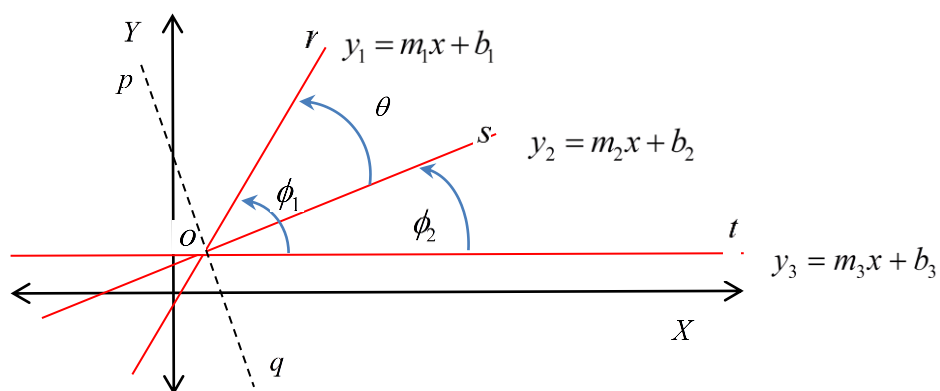
$X(x)$  เป็นระยะทางในแนวนอนจากจุดกำเนิดมายังจุดตกกระทบ ณ ตำแหน่ง  $x$  มีหน่วยเป็นเมตร

$\Delta X$  เป็นระยะห่างระหว่างจุดสองจุดที่อยู่ติดกันของคลื่นทะเลที่เกิดขึ้นแบบสุม มีหน่วยเป็นเมตร

Constant  $t$  ค่าคงที่ หรือค่าจุดตัดแกน  $Y$  ของแต่ละรังสี

$Y(x)$  ความสูงของจุดตกกระทบแรกๆของรังสี ณ ตำแหน่ง  $x$  มีหน่วยเป็นเมตร

2 การติดตามรังสีไปยังจุดตกกระทบทุกจุดนั้น อันดับแรกจะต้องพิจารณาตรวจสอบว่ารังสีสามารถเดินทางผ่านไปยังจุดตกกระทบแต่ละจุดได้หรือไม่ ด้วยการหาว่าทุกจุดบนเส้นทางของรังสีจากจุดกำเนิดไปยังจุดตกกระทบจะต้องอยู่สูงกว่าความสูงของพื้นน้ำทะเลทุกจุด ถ้ารังสีสามารถเดินทางผ่านความสูงของคลื่นทะเลไปได้ จึงสามารถหาจุดตกกระทบ มุมตกกระทบ และมุมสะท้อนต่อไปโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับความชันดังนี้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับความชัน



$$\theta = \phi_1 - \phi_2 \quad (4.24)$$

$$\tan(\theta) = \tan(\phi_1 - \phi_2) \quad (4.25)$$

$$\tan(\theta) = \tan[\phi_1 + (-\phi_2)] \quad (4.26)$$

$$\tan(\theta) = \frac{[\tan(\phi_1) + \tan(-\phi_2)]}{[1 - \tan(\phi_1)\tan(-\phi_2)]} \quad (4.27)$$

$$\tan(\theta) = \frac{[\tan(\phi_1) - \tan(\phi_2)]}{[1 + \tan(\phi_1)\tan(\phi_2)]} \quad (4.28)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{[\tan(\phi_1) - \tan(\phi_2)]}{[1 + \tan(\phi_1)\tan(\phi_2)]} \right\} \quad (4.29)$$

$$m_1 = \tan(\phi_1) \quad (4.30)$$

$$m_2 = \tan(\phi_2) \quad (4.31)$$

จากรูปที่ 4.3 ถ้าให้รังสีเดินทางจากจุดกำเนิด  $r$  มายังจุดตกกระทบ  $o$  และสะท้อนเส้นประ  $pq$  (ในที่นี้คือพื้นผิวตกกระทบซึ่งเป็นส่วนของเส้นตรงเส้นส่วนหนึ่งของพื้นน้ำทะเลที่มีความชันตามข้อ 1) ไปยังจุด  $t$  มุม  $\theta$  คือมุมตกกระทบ หาได้จากความแตกต่างระหว่างมุม  $\phi_1$  กับ  $\phi_2$  หรือ

$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{[\tan(\phi_1) - \tan(\phi_2)]}{[1 + \tan(\phi_1)\tan(\phi_2)]} \right\}$  ตามสมการ (4.29) จะเห็นได้ว่ามุม  $\theta$  ขึ้นอยู่กับตัวแปร  $m_1$  และ

$m_2$

ดังนั้นถ้าให้  $Slope_{source}$  เป็นความชันของรังสีพุ่งที่ออกจากจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดตกกระทบ  $o$   $Slope_{source}$  หาได้จาก

$$Slope_{source} = \frac{(H_1 - H(x))}{X(x)} \quad (4.32)$$

$H_1$  ความสูงของเสาอากาศส่ง มีหน่วยเป็นเมตร

$H(x)$  ความสูงของคลื่นทะเล ณ ตำแหน่ง  $x$  โดยที่  $x = 0$  ถึง  $N-1$  และ  $N$  เป็นจำนวนจุดทั้งหมดของการเกิดคลื่นทะเลแบบสุ่ม

$X(x)$  ระยะทางแนวนอนระหว่างเสาอากาศกับจุดตกกระทบที่  $x$  มีหน่วยเป็นเมตร

$m_1$  สามารถหาได้จาก

$$m_1 = -Slope_{source} \quad (4.33)$$

$m_2$  เป็นความชันที่ตั้งฉากกับความชันของพื้นผิวตกกระทบของพื้นน้ำทะเล หรือ  $Slope_{normal}$  มีค่าเท่ากับ

$$m_2 = -\frac{1}{Slope_{tangent}} = Slope_{normal} \quad (4.34)$$

โดยที่  $Slope_{\text{tangent}}$  เป็นความชันของพื้นผิวตกกระทบของพื้นน้ำทะเล  
ดังนั้น

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{[m_1 - m_2]}{[1 + m_1 m_2]}\right) \quad (4.35)$$

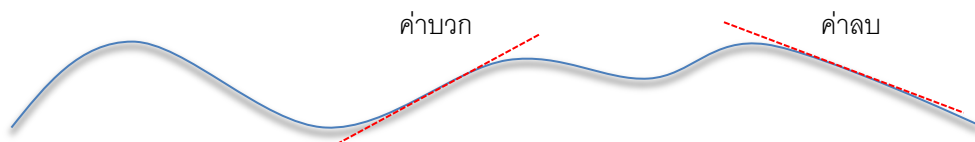
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{[-Slope_{\text{source}} - Slope_{\text{normal}}]}{[1 + Slope_{\text{source}} Slope_{\text{normal}}]}\right) \quad (4.36)$$

เนื่องจากมุม  $\theta$  มีค่าเท่ากับมุม  $\phi_2$  ดังนั้นมุมสะท้อนจึงมีค่าเท่ากับมุม  $\theta$  ด้วย

3 หลังจากได้จุดตกกระทบ มุมตกกระทบ และมุมสะท้อนของแต่ละรังสี รวมถึงค่าความชันของพื้นผิวตกกระทบของพื้นน้ำทะเลแล้ว ต่อไปเป็นขั้นตอนการพิจารณาถึงความเป็นไปได้ทั้งหมดของเส้นทางการเดินทางของรังสี โดยอาศัยปัจจัยหลัก 3 ประการ ได้แก่ มุมตกกระทบ (ค่าบวก หรือค่าลบ) ความชันของพื้นผิวตกกระทบ (ค่าบวก หรือค่าลบ) และความชันของรังสีสะท้อน (ค่าบวก หรือค่าลบ) ตามรูปที่ 4.4 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ค่าแสดงความเป็นบวก หรือลบของมุมตกกระทบ



รูปที่ 4.5 ค่าแสดงความเป็นบวก หรือลบของพื้นผิวตกกระทบ



รูปที่ 4.6 ค่าแสดงความเป็นบวก หรือลบของมุมตกสะท้อน

ทั้งนี้งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้รังสีสามารถสะท้อนได้สูงสุดที่จำนวน 2 ครั้ง ทำให้ความเป็นไปได้ของจำนวนเส้นทางทั้งหมดที่รังสีสามารถเดินทางได้เป็น  $(2 \times 2 \times 2) + (2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2) = 72$  เส้นทาง ซึ่งประกอบด้วยการสะท้อนจำนวน 1 ครั้ง จำนวน 8 เส้นทาง และการสะท้อนจำนวน 2 ครั้ง จำนวน 64 เส้นทาง สำหรับการสะท้อนจำนวน 2 ครั้งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ความเป็นไปได้ทั้งหมดของเส้นทางที่รังสีเดินทางออกจากจุดกำเนิดไปยังจุดรับสัญญาณ โดยมีจำนวนการสะท้อนมากที่สุดที่จำนวน 2 ครั้ง

ลำดับ ที่	การสะท้อนครั้งที่ 1			การสะท้อนครั้งที่ 2			หมายเหตุ
	มุมตก กระทบ	$Slope_{\text{tangent}}^{1st}$	$Slope_{\text{reflect}}^{1st}$	มุมตก กระทบ	$Slope_{\text{tangent}}^{2nd}$	$Slope_{\text{reflect}}^{2nd}$	
1	บวก	บวก	บวก	บวก	บวก	บวก	
2	บวก	บวก	บวก	บวก	บวก	ลบ	
3	บวก	บวก	บวก	บวก	ลบ	บวก	
4	บวก	บวก	บวก	บวก	ลบ	ลบ	
5	บวก	บวก	บวก	ลบ	บวก	บวก	
6	บวก	บวก	บวก	ลบ	บวก	ลบ	
7	บวก	บวก	บวก	ลบ	ลบ	บวก	
8	บวก	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	
9	บวก	บวก	ลบ	บวก	บวก	บวก	
10	บวก	บวก	ลบ	บวก	บวก	ลบ	
11	บวก	บวก	ลบ	บวก	ลบ	บวก	
12	บวก	บวก	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	
13	บวก	บวก	ลบ	ลบ	บวก	บวก	

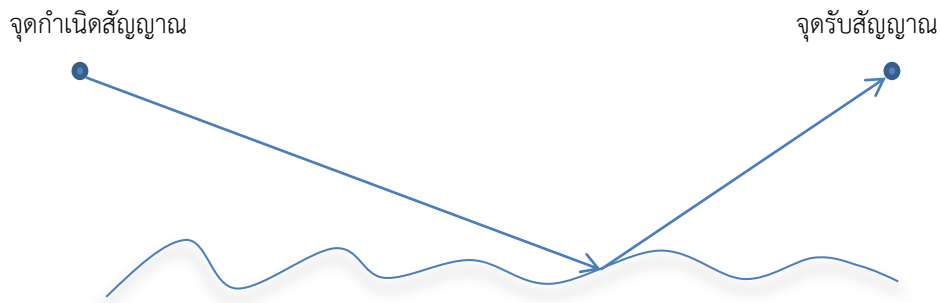
14	บวก	บวก	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	
<b>15</b>	<b>บวก</b>	<b>บวก</b>	<b>ลบ</b>	<b>ลบ</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	
16	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	
<b>17</b>	<b>บวก</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	<b>บวก</b>	<b>บวก</b>	<b>บวก</b>	
18	บวก	ลบ	บวก	บวก	บวก	ลบ	
19	บวก	ลบ	บวก	บวก	ลบ	บวก	
20	บวก	ลบ	บวก	บวก	ลบ	ลบ	
21	บวก	ลบ	บวก	ลบ	บวก	บวก	
22	บวก	ลบ	บวก	ลบ	บวก	ลบ	
23	บวก	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	บวก	
24	บวก	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	
<b>25</b>	<b>บวก</b>	<b>ลบ</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	<b>บวก</b>	<b>บวก</b>	
26	บวก	ลบ	ลบ	บวก	บวก	ลบ	
<b>27</b>	<b>บวก</b>	<b>ลบ</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	
28	บวก	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	
29	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก	
30	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	
31	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	
32	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	
33	ลบ	บวก	บวก	บวก	บวก	บวก	
34	ลบ	บวก	บวก	บวก	บวก	ลบ	
<b>35</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	<b>บวก</b>	<b>บวก</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	
36	ลบ	บวก	บวก	บวก	ลบ	ลบ	
37	ลบ	บวก	บวก	ลบ	บวก	บวก	
38	ลบ	บวก	บวก	ลบ	บวก	ลบ	
<b>39</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	<b>บวก</b>	<b>ลบ</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	
40	ลบ	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	
41	ลบ	บวก	ลบ	บวก	บวก	บวก	
42	ลบ	บวก	ลบ	บวก	บวก	ลบ	
43	ลบ	บวก	ลบ	บวก	ลบ	บวก	

44	ลบ	บวก	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	
45	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	บวก	บวก	
46	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	
<b>47</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	<b>ลบ</b>	<b>ลบ</b>	<b>ลบ</b>	<b>บวก</b>	
48	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	
49	ลบ	ลบ	บวก	บวก	บวก	บวก	
50	ลบ	ลบ	บวก	บวก	บวก	ลบ	
51	ลบ	ลบ	บวก	บวก	ลบ	บวก	
52	ลบ	ลบ	บวก	บวก	ลบ	ลบ	
53	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	บวก	บวก	
54	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	บวก	ลบ	
55	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	บวก	
56	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	
57	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก	บวก	
58	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก	ลบ	
59	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	บวก	
60	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	ลบ	
61	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก	
62	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	ลบ	
63	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	
64	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	

การเดินทางของรังสีสามารถแยกออก 2 กรณีได้ดังนี้คือ

1 กรณีรังสีพุ่งตกกระทบพื้นน้ำทะเลจำนวน 1 ครั้งแล้วสะท้อนไปยังเครื่องรับ ตามรูปที่ 4.7

กรณีนี้รังสีต้องมีมุมตกกระทบเป็นค่าบวก ความชันของพื้นผิวตกกระทบจะเป็นค่าบวก หรือลบก็ได้ แต่รังสีสะท้อนจะต่อทิศทางไปข้างหน้า และเป็นบวกเท่านั้นรังสีจึงจะสามารถเดินทางไปยังเครื่องรับได้ กรณีนี้มีเพียง 2 เส้นทางเท่านั้นที่เป็นไปได้จากทั้งหมด 8 เส้นทาง



รูปที่ 4.7 รังสีสะท้อนน้ำทะเล 1 ครั้งแล้วเดินทางไปยังเครื่องรับ  
2 กรณีรังสีพุ่งตกกระทบพื้นน้ำทะเลจำนวน 2 ครั้งแล้วสะท้อนไปยังเครื่องรับ

ทั้งนี้จากตาราง 4.1 มีเพียง 8 เส้นทางที่เป็นไปได้จากทั้งหมด 64 เส้นทาง ได้แก่ ลำดับที่ 1, 15, 17, 25, 27, 35, 39 และ 47 ที่รังสีสามารถเดินทางออกจากจุดกำเนิดสะท้อนพื้นน้ำทะเลไปยังจุดรับสัญญาณ กรณีนี้จะต่างจากกรณีที่ 1 ตรงที่จะมีระยะทางระหว่างจุดตกกระทบที่ 1 และจุดตกกระทบที่ 2 ที่เพิ่มขึ้นมา ตามเส้นประในรูปที่ 4.8

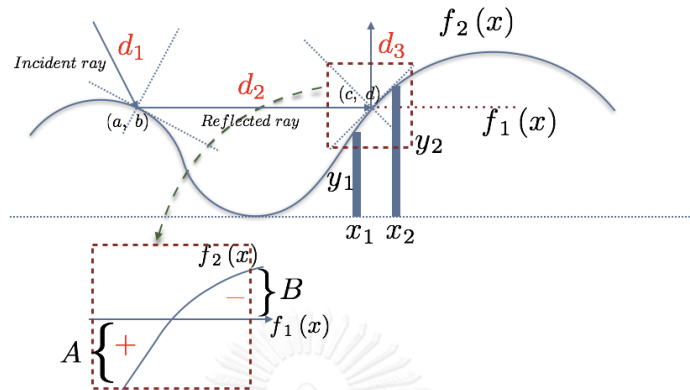


รูปที่ 4.8 เส้นทางที่ระหว่างจุดตกกระทบที่ 1 และ 2

การหาระยะทางระหว่างจุดตกกระทบที่ 1 กับจุดตกกระทบที่ 2 นั้นจำเป็นต้องหาจุดตกกระทบที่ 2 ให้ได้ก่อน โดยการติดตามรังสีหลังจากสะท้อนพื้นผิวน้ำทะเลครั้งแรกว่าไปตกกระทบกับพื้นผิวน้ำทะเลที่จุดใด หรืออีกนัยหนึ่งคือการหาจุดตัดระหว่างฟังก์ชันของเส้นตรง (รังสี) กับฟังก์ชันของพื้นผิวน้ำทะเล โดยมีขั้นตอนเริ่มต้นจากหาค่าความต่างระหว่าง 2 ฟังก์ชัน ถ้ากำหนดให้ฟังก์ชัน  $f_1(x)$  เป็นฟังก์ชันของรังสีสะท้อน และฟังก์ชัน  $f_2(x)$  เป็นฟังก์ชันความสูงของคลื่นทะเล เมื่อหาค่าความต่างของทั้งสองฟังก์ชันจะได้ค่าบวก และค่าลบ ตามรูป 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงความต่างระหว่างฟังก์ชันรังสีสะท้อน กับฟังก์ชันความสูงของคลื่นทะเล



รูปที่ 4.10 แสดงการหาจุดตกกระทบที่ 2 ของรังสีสะท้อน

จากรูปที่ 4.10 แสดงการหาจุดตกกระทบที่ 2 ซึ่งเริ่มต้นจากการหาจุด  $(x_1, y_1)$  และ  $(x_2, y_2)$  ซึ่งเป็นค่าก่อน และหลังค่าจุดตัดระหว่างฟังก์ชัน  $f_1(x)$  กับ  $f_2(x)$  เมื่อได้ค่าจุดก่อน และหลังค่าจุดตัดแล้วจึงสามารถหาค่าจุดตัดได้จากอัตราส่วนระยะทางของจุดตัด ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนระยะทางของจุดตัด} = \frac{[f_1(x_1) - f_2(x_1)]}{[(f_1(x_1) - f_2(x_1)) + (f_2(x_2) - f_1(x_2))]} \quad (4.37)$$

$(x_1, f_1(x_1))$  และ  $(x_2, f_2(x_2))$  เป็นจุดก่อน และหลังจุดตัดของฟังก์ชันรังสี

$(x_1, f_2(x_1))$  และ  $(x_2, f_2(x_2))$  เป็นจุดก่อน และหลังจุดตัดของฟังก์ชันพื้นผิวน้ำทะเล

ถ้ากำหนดให้จุดตัดมีพิกัดเป็น  $(c, d)$  ระยะทางในแนวนอนจากจุดกำเนิดมาถึงตำแหน่งของจุดตัด  $c$  สามารถหาได้จากค่าระยะทางในแนวนอนจากจุดกำเนิดมายังจุดก่อนจุดตัดบวกด้วยอัตราส่วนของจุดตัดคูณกับระยะทางระหว่างจุด 2 จุดของการเกิดคลื่นทะเล ดังนี้

$$c = x_1 + \frac{[f_1(x_1) - f_2(x_1)]}{[(f_1(x_1) - f_2(x_2)) + (f_2(x_2) - f_1(x_2))]} \Delta x \quad (4.38)$$

$c$  ระยะทางในแนวนอนจากจุดกำเนิดมายังจุดตัด หรือจุดตกกระทบที่ 2

$x_1$  ระยะทางในแนวนอนจากจุดกำเนิดมายังจุดก่อนจุดตัด หรือจุดตกกระทบที่ 2

$\Delta x$  ระยะทางระหว่างจุด 2 จุดของการเกิดคลื่นทะเล

และตำแหน่ง  $d$  ที่เป็นความสูงของพื้นน้ำทะเลของจุดตกกระทบที่ 2 หาได้จาก

$$d = f_1(x_1) + \frac{[f_1(x_1) - f_2(x_1)]}{[(f_1(x_1) - f_2(x_2)) + (f_2(x_2) - f_1(x_2))] \Delta y} \quad (4.39)$$

$\Delta y$  ระยะห่างระหว่างความสูงของคลื่นทะเล ณ จุดก่อนและหลังจุดตกกระทบบที่สอง

เมื่อหาจุดตกกระทบบที่ 2 ได้แล้ว สามารถหาระยะทางระหว่างจุดตกกระทบบที่ 1 และจุดตกกระทบบที่ 2 ได้ดังนี้ กำหนดให้  $(a, b)$  และ  $(c, d)$  เป็นจุดตกกระทบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$d_2 = \sqrt{(d-b)^2 + (c-a)^2} \quad (4.40)$$

$d_2$  ระยะทางระหว่างจุดตกกระทบบที่ 1 และ 2

หลังจากได้ระยะทาง  $d_2$  แล้ว ค่าสนามไฟฟ้าในแนวสะท้อนพื้นน้ำทะเล กรณีรังสีสะท้อนพื้นน้ำทะเลจำนวน 2 ครั้ง สามารถหาได้ ดังนี้

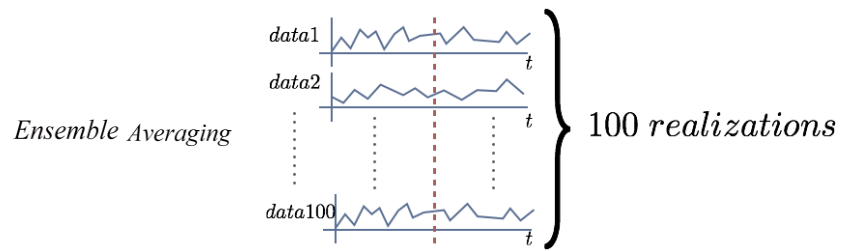
$$\bar{E}_s = \frac{\bar{a}_x \cos^n(\theta) \exp[-jk(d_1 + d_2 + d_3)]}{(d_1 + d_2 + d_3)} \quad (4.41)$$

เมื่อได้สนามไฟฟ้าในแนวสะท้อนพื้นน้ำทะเล กรณีรังสีสะท้อนพื้นน้ำทะเลจำนวน 2 ครั้งแล้ว ขั้นตอนการคำนวณความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ สามารถดำเนินการได้เหมือนกับสมการ 4.16 ถึง 4.20 ในหัวข้อ 4.1

จากที่อธิบายมาทั้งหมดเป็นการคำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณที่เครื่องรับ ณ เวลา  $t$  ใด ๆ แต่เนื่องจากวิจัยนี้ต้องการเห็นผลกระทบที่เกิดจากการโคลงของเรือว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อประสิทธิภาพการสื่อสาร จึงกำหนดช่วงเวลาการจำลองสถานการณ์จำนวน 10 วินาทีเพื่อใช้ในการจำลองการเกิดคลื่น และการโคลงของเรือ ซึ่งเวลาดังกล่าวเพียงพอที่จะแสดงให้เห็นอาการโคลงของเรือมากกว่า 1 รอบ โดยให้มีการคำนวณทุก 0.05 วินาที เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องทั้งอาการโคลงของเรือ และค่าของความเข้มสัญญาณที่ได้รับ

การคำนวณที่กล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อ 4.4 เป็นการคำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการจำลองการเกิดคลื่นทะเลเพียง 1 เรียลไรซ์เซชัน (Realization) หรือ 1 ชุดข้อมูลเท่านั้น จึงไม่สามารถใช้เป็นข้อมูลทางสถิติที่เชื่อถือได้ จำเป็นต้องจำลองการเกิดคลื่นทะเลทั้งหมดอย่างน้อย 100 ชุดข้อมูลตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และคำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณในแต่ละชุดข้อมูลของการเกิดคลื่นทะเล หลังจากนั้นจึงสามารถหาค่าเฉลี่ยเอนเซมเบิล (Ensemble average) หรือการหาค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ได้รับ ณ เวลา  $t$  ใด ๆ เดียวกันในแต่ละชุดข้อมูลของข้อมูลทั้งหมดจำนวน 100 ชุดข้อมูล ตลอดช่วงเวลาการจำลองเหตุการณ์  $t$  วินาที ตามรูปที่ 4.11 data1 คือข้อมูลความเข้มสนามไฟฟ้ารวมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา  $t$  ใด ๆ





รูปที่ 4.11 การหาค่าเฉลี่ยเอนซิมเบิลของความเข้มสนามไฟฟ้ารวม

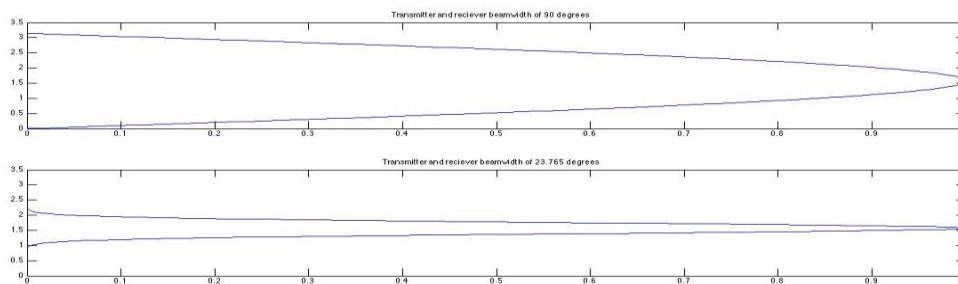


## บทที่ 5 ผลการทดลองเบื้องต้น

เนื่องจากความซับซ้อนของสภาพแวดล้อมในทะเล และสถานการณ์ที่ใช้ในการจำลองเกี่ยวข้องกับตัวแปรหลายตัว งานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นบางตัวเพื่อใช้เป็นขอบเขต และลดความซับซ้อนของงานวิจัย เมื่อทำการกำหนดข้อมูลตัวแปรเบื้องต้นเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองข้อมูลทั้งกรณีเรือนิ่ง และเรือโคลง หลังจากนั้นเป็นการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากคลื่นลมในทะเล รวมถึงความกว้างปมวิดิธของการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเสาอากาศรับส่งว่ามีผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างเรืออยู่นิ่งกับเรือโคลง

### 5.1 การกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีตัวแปรหลายตัวที่จำเป็นต้องกำหนด โดยเริ่มต้นจากความถี่ของเครื่องรับส่งวิทยุที่สามารถรองรับการส่งข้อมูลความเร็วสูง และมีใช้งานอยู่บนเรือ เป็นความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างเรือกับสถานีฝั่งกำหนดให้ใช้ความถี่ 156 เมกกะเฮิร์ต ที่ความยาวคลื่น 1.923 เมตร นอกจากนี้กำหนดให้ความสูงของเสาอากาศส่งบนเรือมีความสูง 10 เมตร ขณะที่เสาอากาศรับบนฝั่งมีความสูง 125 เมตร โดยความสูงของเสาอากาศทั้ง 2 ต้นเป็นความสูงที่วัดจากระดับน้ำทะเล ความแรงลมซึ่งมีผลต่อสภาพพื้นทะเลกำหนดให้มีความแรงลมเป็น 10 เมตรต่อวินาที ที่ความสูง 19.5 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล จำนวนการสุ่มตัวอย่างข้อมูลของการเกิดคลื่นจากสเปกตรัม Pierson Moskowitz กำหนดให้มีการสุ่มตัวอย่างคลื่นทะเลที่ 32,768 จุด ซึ่งการสุ่มตัวอย่างดังกล่าวจะทำให้มีระยะห่างระหว่างจุดของการเกิดคลื่นทะเลที่ 0.1202 เมตร ระยะทางดังกล่าวเป็นระยะห่างที่น้อยกว่าระยะหนึ่งส่วนสี่ ( $\lambda/4$  หรือ 0.4808 เมตร) ของความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการสื่อสาร ส่วนเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์อยู่ที่ 10 วินาที โดยมีการคำนวณ และเก็บข้อมูลทุก 0.05 วินาที ส่วนค่า  $n$  ที่ใช้ในการกำหนดความกว้างปมวิดิธของการแพร่คลื่นสัญญาณของเสาอากาศรับส่งนั้น กำหนดให้  $n$  เท่ากับ 1 ซึ่งจะได้ปมวิดิธที่มีฮาล์ฟเพาเวอร์ปมวิดิธ (Half power beamwidth-HPBW) ที่ขนาดกว้าง 90 องศา และ  $n$  เท่ากับ 16 สำหรับปมวิดิธที่มีขนาดแคบ ซึ่งจะได้ปมวิดิธที่มีฮาล์ฟเพาเวอร์ปมวิดิธ ที่ขนาดกว้าง 23.765 องศา ตามรูปที่ 5.1 ทั้งหมดเป็นตัวแปรเบื้องต้นที่กำหนดเพื่อใช้ในการจำลองครั้งนี้



รูปที่ 5.1 ความกว้างปมวิดิธของการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตั้งขนาด 90 และ 23.765 องศา  
5.2 ผลการจำลองค่าขนาดความเข้มของสัญญาณกรณีเรืออยู่นิ่ง กับกรณีเรือโคลง

### กรณีเรืออยู่นิ่ง และพื้นทะเลเรียบ

ในกรณีเรืออยู่นิ่งทำให้มีรังสีเพียง 2 เส้นทางเท่านั้นที่เดินทางถึงเครื่องรับ คือ  $\vec{E}_d$  และ  $\vec{E}_s$  ซึ่งในแต่ละเส้นทางมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเพียงค่าเพียงค่าเดียวเท่านั้น และเป็นค่าคงที่ตลอดเวลา ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเรืออยู่นิ่ง และพื้นทะเลเรียบจึงไม่มีผลกระทบจากคลื่นทะเลที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของรังสีที่พุ่งออกจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดรับสัญญาณและพื้นผิวดกกระทบความเข้มสัญญาณกรณีเรือนิ่งเมื่อปมวิดิธของเสาอากาศส่ง และเสาอากาศรับมีขนาด 90 และ 23.765 องศา มีข้อมูลดังนี้

#### ปมวิดิธของเสาอากาศส่ง และเสาอากาศรับมีขนาดกว้าง 90 องศา

ค่าขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนวตรง ( $|\vec{E}_d|$ ) มีขนาด  $2.5358 \times 10^{-4}$  V/m (-41.918 dBmV/m) และมีค่าเฟส 0.7989 เรเดียน และค่าขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนวสะท้อนพื้นน้ำทะเล ( $|\vec{E}_s|$ ) ที่  $2.5346 \times 10^{-4}$  V/m (-41.922 dBmV/m) และมีค่าเฟส 1.8676 เรเดียน ถ้าให้  $|\vec{E}_{d,best}|$  เป็นค่าความเข้มของสัญญาณที่ดีที่สุดและมีค่าเท่ากับ  $|\vec{E}_d|$  ดังนั้นสัญญาณที่แรงที่สุดที่สามารถเป็นไปได้คือสัญญาณในแนวตรงกับแนวสะท้อนพื้นน้ำมีเฟสตรงกัน หรือ  $2|\vec{E}_{d,best}|$  หรือ  $|\vec{E}_{t,ref}|$  มีค่าเท่ากับ  $5.0716 \times 10^{-4}$  V/m (-35.897 dBmV/m) โดยมีค่าอัตราส่วนความเข้มของสนามไฟฟ้าอยู่ที่ 0.8604 (-1.306 dB)

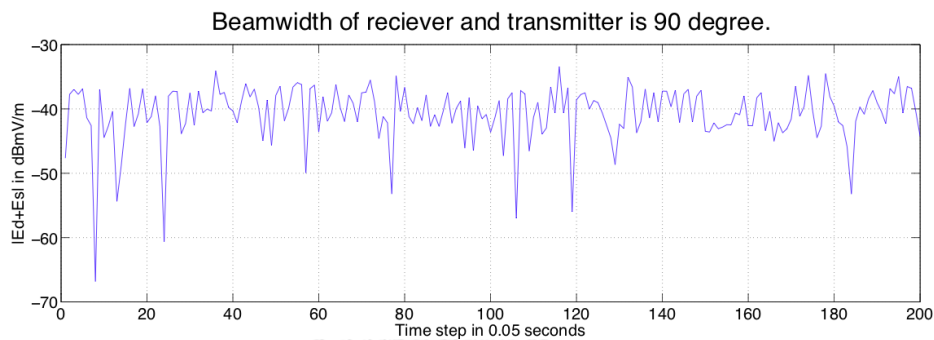
#### ปมวิดิธของเสาอากาศส่ง และเสาอากาศรับมีขนาดกว้าง 23.765 องศา

ค่าขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนวตรง ( $|\vec{E}_d|$ ) มีค่า  $2.5036 \times 10^{-4}$  V/m (-42.029 dBmV/m) และมีค่าเฟส 0.7989 เรเดียน และมีค่าขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนวสะท้อนพื้นน้ำทะเล ( $|\vec{E}_s|$ ) ที่  $2.4903 \times 10^{-4}$  V/m (-42.075 dBmV/m) และมีเฟส 1.8676 มีค่าสัญญาณที่แรงที่สุดที่สามารถเป็นไปได้เท่ากับ  $5.002 \times 10^{-4}$  V/m (-36.017 dBmV/m) โดยมีค่าอัตราส่วนความเข้มของสนามไฟฟ้าอยู่ที่ 0.85832 (-1.327dB)

### กรณีเรือโคลง และพื้นน้ำทะเลไม่เรียบ

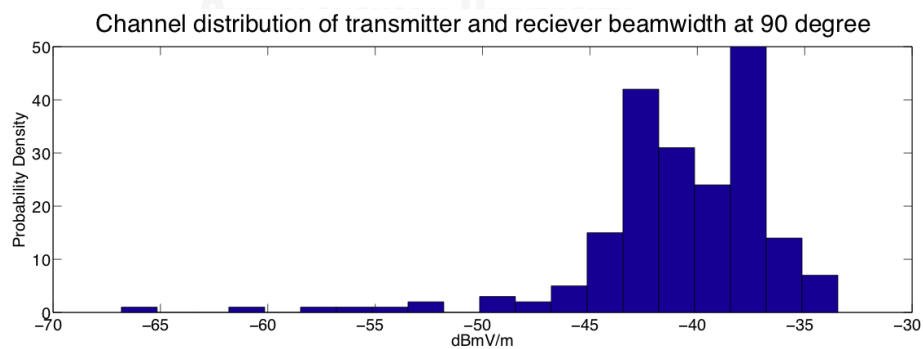
ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ากรณีเรือโคลง และพื้นน้ำทะเลไม่เรียบจะแตกต่างจากกรณีเรือนิ่ง และพื้นน้ำทะเลเรียบ ซึ่งเป็นค่าคงที่ค่าเดียวไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ากรณีเรือโคลงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยมีรายละเอียดค่าขนาด  $|\vec{E}_d + \vec{E}_s|$  ของความกว้างบีมวิดท์ที่ 90 องศา และ 23.765 องศาตามรูปที่ 5.2 และ 5.3

### บีมวิดท์ของเสาอากาศส่ง และเสาอากาศรับมีขนาดกว้าง 90 องศา



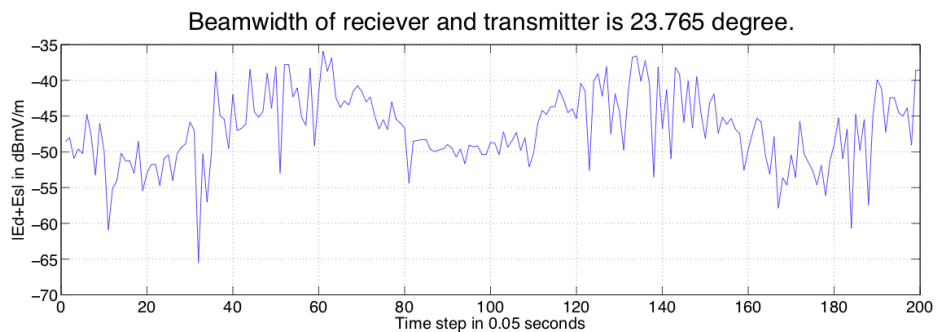
รูปที่ 5.2 ค่าขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ารวม  $|\vec{E}_d + \vec{E}_s|$  กรณีเรือโคลง และบีมวิดท์ของเสาอากาศรับ และส่งมีขนาด 90 องศา

จากรูป 5.2 ค่า Ensemble Averaging ของขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ารวม  $|\vec{E}_d + \vec{E}_s|$  มีค่าเฉลี่ยทางเวลา (Time averaging) ตลอดระยะเวลาการโคลง 10 วินาทีที่  $-40.764$  dBmV/m ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่  $4.455$  โดยมีค่าสูงสุดที่  $-33.454$  dBmV/m และต่ำสุดที่  $-66.82$  dBmV/m และมีค่าการกระจายความเข้มสนามไฟฟ้ารวม ณ เครื่องรับ ดังรูปที่ 5.3



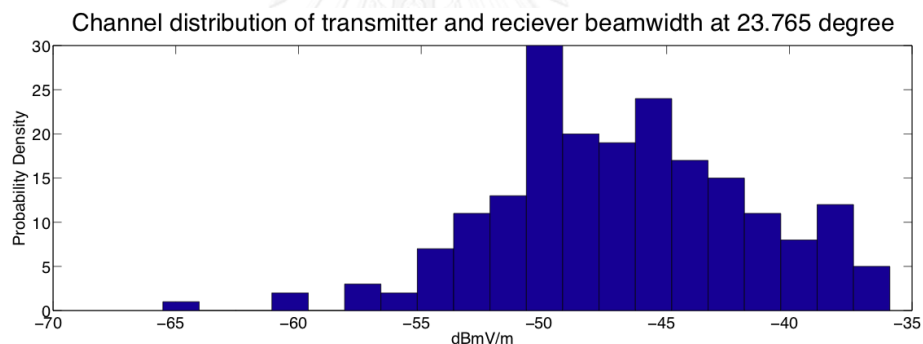
รูปที่ 5.3 รูปการกระจายความเข้มสนามไฟฟ้ารวมของช่องสัญญาณที่บีมวิดท์ 90 องศา

บีมวิดธ์ของเสาอากาศส่ง และเสาอากาศรับมีขนาดกว้าง 23.765 องศา



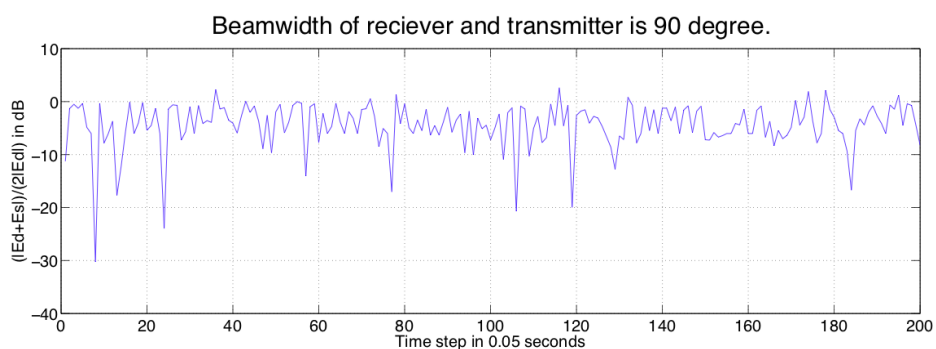
รูปที่ 5.4 ค่าขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ารวม  $|\vec{E}_d + \vec{E}_s|$  กรณีเรือโคลง และบีมวิดธ์ของเสาอากาศรับ และส่งมีขนาด 23.765 องศา

จากรูป 5.4 ค่า Ensemble Averaging ของขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ารวม  $|\vec{E}_d + \vec{E}_s|$  มีค่าเฉลี่ยทางเวลา (Time averaging) ตลอดระยะเวลาการโคลง 10 วินาทีที่  $-46.806$  dBmV/m ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 5.1838 โดยมีค่าสูงสุดที่  $-35.906$  dBmV/m และต่ำสุดที่  $-65.527$  dBmV/m และมีค่าการกระจายความเข้มสนามไฟฟ้ารวม ณ เครื่องรับ ดังรูปที่ 5.5



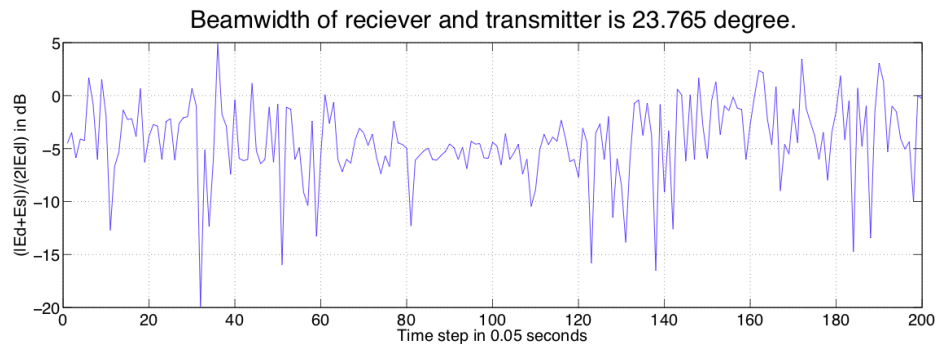
รูปที่ 5.5 รูปการกระจายความเข้มสนามไฟฟ้ารวมของช่องสัญญาณที่บีมวิดธ์ 23.765 องศา

ค่าอัตราส่วนความเข้มสนามไฟฟ้าของความกว้างบีมวิดธ์ที่ 90 องศา และ 23.765 องศาตามรูปที่ 5.6 และ 5.7



รูปที่ 5.6 ค่าอัตราส่วนความเข้มสนามไฟฟ้าของความกว้างบีมวิดธ์ที่ 90 องศา

จากรูปที่ 5.6 ค่าอัตราส่วนความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยทางเวลา (Time averaging) ตลอดระยะเวลาการโคลง 10 วินาทีที่  $-4.4672$  dB ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่  $4.4177$  โดยมีค่าสูงสุดที่  $2.6277$  dB และต่ำสุดที่  $-30.229$  dB



รูปที่ 5.7 ค่าอัตราส่วนความเข้มสนามไฟฟ้าของความกว้างบีมวิดธ์ที่ 23.765 องศา

จากรูปที่ 5.7 ค่าอัตราส่วนความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยทางเวลา (Time averaging) ตลอดระยะเวลาการโคลง 10 วินาทีที่  $-4.3419$  dB ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่  $3.8361$  โดยมีค่าสูงสุดที่  $4.8895$  dB และต่ำสุดที่  $-19.922$  dB

### 5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างกรณีเรืออยู่นิ่ง กับกรณีเรือโคลง

หลังจากที่ได้ค่าสนามไฟฟ้าทั้งกรณีเรืออยู่นิ่ง และกรณีเรือโคลงแล้ว ต่อไปเป็นการนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่าง 2 กรณี สำหรับค่าความเข้มสนามไฟฟ้ารวม ณ เครื่องรับ กรณีเรืออยู่นิ่ง เป็นการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้ารวมที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้  $|\vec{E}_{t,ref}|$  ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ที่เรืออยู่ กับค่าความเข้มสนามไฟฟ้ารวมเฉลี่ยทางเวลา (Time averaging)  $|\vec{E}_d + \vec{E}_s|$  เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากการโคลงของเรือที่เกิดขึ้นจากคลื่นทะเลและการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวดกกระทบ โดยสามารถสรุปค่าต่าง ๆ ตามตาราง 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปค่าต่าง ๆ จากการจำลองทั้ง 2 กรณี

HPBW of RX	กรณีเรืออยู่นิ่ง		กรณีเรือโคลง	
	$ \vec{E}_{t,ref} $ (dBmV/m)	Gain (dB)	Time averaging of $ \vec{E}_d + \vec{E}_s $ for 10s (dBmV/m)	Time averaging Gain for 10s (dB)
90	-35.897	-1.306	-40.764	-4.4672
23.765	-36.017	-1.327	-46.806	-4.3419

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้ารวมของกรณีเรือโคลงลดลงจากกรณีเรืออยู่นิ่งที่  $-4.867$  และ  $-10.789$  dBmV/m สำหรับความกว้างบีมวิดธ์ที่ 90 และ 23.765 องศา ตามลำดับ ส่วนค่าอัตราส่วนสนามไฟฟ้านั้นกรณีนี้น้อยกว่ากรณีเรืออยู่ที่ประมาณ 3 dB ทั้งบีมวิดธ์ที่มีขนาดกว้าง

และแคบ แสดงให้เห็นว่าคลื่นทะเลที่ส่งผลต่อการโคลงของเรือ และการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวน้ำทะเลมีผลกระทบต่อความเข้มสนามไฟฟ้ารวม ทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ารวมลดลง โดยบีมวิดิธ์ที่แคบจะได้รับผลกระทบมากกว่า นอกจากนั้นแล้วจากรูปที่ 5.3 และ 5.5 ที่แสดงการกระจายความเข้มสนามไฟฟ้ารวมของช่องสัญญาณที่บีมวิดิธ์ 90 องศา ที่แคบกว่าบีมวิดิธ์ 23.765 องศา โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 4.455 และ 5.1838 สำหรับบีมวิดิธ์ที่ 90 และ 23.765 องศา ตามลำดับ แสดงว่าบีมวิดิธ์ที่กว้างมีการเปลี่ยนความเข้มของสนามไฟฟ้ารวมในช่วงที่น้อยกว่าบีมวิดิธ์ที่แคบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดังกล่าวถือว่าเป็นข้อดีเนื่องจากง่ายต่อการออกแบบการสื่อสาร

#### 5.4 สรุปข้อมูลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการโคลงของเรือ และขนาดความกว้างของบีมวิดิธ์เสาอากาศส่ง และเสาอากาศรับ

จากข้อมูลการจำลองสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

1 การโคลงของเรือ และการเปลี่ยนแปลงของพื้นน้ำทะเลมีผลกระทบต่อความเข้มสนามไฟฟ้ารวม ณ เครื่องรับ โดยทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ารวมลดลง ซึ่งเสาอากาศที่มีบีมวิดิธ์ที่แคบจะมีความเข้มสนามไฟฟ้ารวมที่น้อยกว่าเสาอากาศที่มีบีมวิดิธ์ที่กว้าง

2 การขึ้นลงของสัญญาณ (Signal fluctuation) จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าเรือโคลงส่งผลให้เสาอากาศที่มีบีมวิดิธ์แคบมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขึ้นลงมากกว่าบีมวิดิธ์ที่กว้าง

## บทที่ 6

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

เอกสารวิจัยฉบับนี้ได้เริ่มต้นอธิบายถึงความสำคัญ และความจำเป็นของการสื่อสารข้อมูล ความเร็วสูง ไร้สาย ในทะเล โดยเฉพาะการสื่อสารระหว่างเรือกับฝั่ง รวมถึงอธิบายถึงปัญหา และผลกระทบของการสื่อสารที่เกิดจากการโคลงของเรือ หลังจากนั้นในบทที่ 2 เป็นการทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ส่วนบทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยพอสังเขป ในบทที่ 4 ได้อธิบายถึงวิธีการ และขั้นตอนต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การคำนวณความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ กรณีเรืออยู่นิ่ง การสร้างแบบจำลองการเกิดคลื่นในทะเล จนกระทั่งถึงการคำนวณความเข้มของสัญญาณ ณ เครื่องรับ กรณีเรือโคลง ต่อจากนั้นในบทที่ 5 เป็นการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองทั้งจากกรณีเรืออยู่นิ่ง และกรณีเรือโคลง จากนั้นทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาผลกระทบที่เกิดขึ้น และสุดท้ายในบทที่ 6 เป็นการสรุปผลของงานวิจัย รวมถึงแนวความคิดที่สามารถนำไปปรับปรุงสำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต

งานวิจัยนี้ศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสัญญาณที่เกิดจากแบบจำลองการสื่อสารเครือข่ายแบบแอดฮอค ไร้สาย ความเร็วสูง (Hi speed wireless ad hoc network) กรณีเรือโคลงเพื่อเปรียบเทียบกับกรณีเรืออยู่นิ่ง ด้วยระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเชิงรังสี พบว่ากรณีเรือโคลงมีความเข้มสนามไฟฟ้ารวมที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเรืออยู่นิ่ง โดยขนาดบีมวิดิธของเสาอากาศที่แคบจะมีผลกระทบมากกว่าขนาดบีมวิดิธที่กว้าง โดยมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่น้อยกว่าทกว่า นอกจากนั้นแล้วการโคลงของเรือยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการขึ้นลงของสัญญาณที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสื่อสารซึ่งเสาอากาศที่มีบีมวิดิธแคบมีผลกระทบต่อการขึ้นลงสัญญาณที่มากกว่าบีมวิดิธที่กว้าง ดังนั้นเสาอากาศที่บีมวิดิธกว้างจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการใช้งานสำหรับการสื่อสารระหว่างเรือกับสถานีฝั่ง

เนื่องจากสถานการณ์ในการจำลองนี้เกี่ยวข้องกับตัวแปร และเงื่อนไขหลายอย่างที่ต้องถูกกำหนดในเบื้องต้น จึงไม่สามารถอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ครอบคลุมกับทุกสถานการณ์ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ของตัวแปรให้เหมาะสม หรือสร้างแบบจำลองให้มีความใกล้เคียงกับสถานการณ์ที่ต้องการจะทดสอบให้ได้มากที่สุด นอกเหนือจากนั้นแล้วอาจจำเป็นต้องหาวิธีการคำนวณที่เร็วขึ้นกว่านี้ เนื่องจากวิธีการที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นการหาค่าความเข้มของสัญญาณแบบแม่นยำเพราะทำการคำนวณทุกจุดของรังสีตกกระทบพื้นน้ำทะเล จึงใช้ระยะเวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน



## รายการอ้างอิง

- [1] T. M. S. Committee, "Adoption of Amendments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 as Amended," in *Annex 2*, ed, 2006.
- [2] *Maritime broadband wireless mesh networks*, I. T. Union, 2011.
- [3] S. Iqbal, B. H. Qureshi, and N. Khan, "Effect of directional antennas at both ends of the link on fading statistics," in *2012 International Conference on Future Communication Networks*, 2012, pp. 58-62.
- [4] T. Kontogiannis, "AD-HOC SENSOR NETWORKS FOR MARITIME INTERDICTION OPERATIONS AND REGIONAL SECURITY," MASTER OF SCIENCE IN ELECTRONIC WARFARE SYSTEMS ENGINEERING, Department of Information Sciences, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, 2012.
- [5] W. Hubert, Y.-M. Le Roux, M. Ney, and A. Flamand, "Impact of Ship Motions on Maritime Radio Links," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, p. 6, 2012.
- [6] R. I.-R. P.526-12, "Propagation by diffraction," ed. Geneva, Switzerland: ITU, 2012.
- [7] A. Chee-Wei and W. Su, "Signal strength sensitivity and its effects on routing in maritime wireless networks," in *2008 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 2008, pp. 192-199.
- [8] N. Mehrnia and M. K. Ozdemir, "Novel maritime channel models for millimeter radiowaves," in *2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2016, pp. 1-6.
- [9] I. B. Mabrouk, J. C. Reyes-Guerrero, and M. Nedil, "Radio-channel characterization of an over-sea communication," in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015, pp. 1-4.
- [10] W. Wang, G. Hoerack, T. Jost, R. Raulefs, M. Walter, and U. C. Fiebig, "Propagation channel at 5.2 GHz in baltic sea with focus on scattering

- phenomena," in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015, pp. 1-5.
- [11] J. H. Lee, J. Choi, W. H. Lee, J. W. Choi, and S. C. Kim, "Measurement and Analysis on Land-to-Ship Offshore Wireless Channel in 2.4 GHz," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, pp. 222-225, 2017.
- [12] K. Jamil and R. J. Burkholder, "Radar Scattering From a Rolling Target Floating on a Time-Evolving Rough Sea Surface," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 44, pp. 3330-3337, 2006.
- [13] D. Jiang, X. Xu, and X. Li, "Multi-path EM scattering calculation for ships over time-varying sea surface," in *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2010, pp. 1-4.
- [14] J. T. Johnson, J. V. Toporkov, and G. S. Brown, "A numerical study of backscattering from time-evolving sea surfaces: comparison of hydrodynamic models," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, pp. 2411-2420, 2001.
- [15] M. Conti and S. Giordano, "Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 52, pp. 85-96, 2014.
- [16] L. H. N. Panagiotis (Panos) Chatzigiannis (STUDENT), John H Gibson, Dr. Gurminder Singh, "Connecting Land-Based Networks to Ships," presented at the ICCRTS, Alexandria, VA, 2013.
- [17] R. J. Burkholder, M. R. Pino, and F. Obelleiro, "A Monte Carlo study of the rough-sea-surface influence on the radar scattering from two-dimensional ships," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 43, pp. 25-33, 2001.
- [18] C. D. Mobley, "Modeling Sea Surfaces A Tutorial on Fourier Transform Techniques," Sequoia Scientific, Inc. September 18, 2014.
- [19] C. A. Balanis, *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN*, Third ed. The United States of America: WILEY INTERSCIENCE, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2005.
- [20] G. A. T. Warren L. Stutzman, *Antenna Theory and Design*, Third ed. United States of America: Wiley, John Wiley and Sons, Inc., 2012.

- [21] Available: <http://designpatternslibrary.ludug.com/pattern-beamwidth/>
- [22] (2014, 09/06/2017). *Antenna Polarisation*. Available: <http://www.air-stream.org.au/technical-references/antenna-polarisation>



## ภาคผนวก



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาวาโทอรรถสิทธิ์ ดิงสุวาทิตย์ ได้รับทุนการศึกษาจากกองทัพเรือไปศึกษาต่อต่างประเทศ ณ ประเทศสหรัฐอเมริกา จนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัย Texas A&M University ในปี 2543 และรับราชการอยู่ในกองทัพเรือเป็นระยะเวลา 14 ปี จึงได้ขออนุญาตลาศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระหว่างการศึกษาได้นำเสนอผลงานทางวิชาการในงานประชุมความก้าวหน้าด้านงานวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (The 38th PIERS in St.Petersburg, Russia) ณ เมืองเซนต์ปีเตอร์เบิร์ก ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย และสำเร็จการศึกษาในปี 2560

