



การวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด

ANALYSIS OF FINITE DIAMETER WIRE ANTENNAS



นางสาวคณินนิตย์ สุวรรณแสง รหัส 50364478

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 1.1 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 15733522
เลขเรียกหนังสือ..... ๗๕.
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ๐๑๔๑

2553

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปีการศึกษา 2553



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด  
ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวคณินนิตย์ สุวรรณแสง รหัส 50364478  
ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ชัยรัตน์ พินทอง  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....*พินทอง*.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ดร.ชัยรัตน์ พินทอง)

.....*SR*.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา)

.....*70*.....กรรมการ  
(ดร. อัครพันธ์ วงศ์กั้งแห)

ชื่อหัวข้อโครงการ การวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด  
ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวคณินนิตย์ สุวรรณแสง รหัส 50364478  
ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ชัยรัตน์ พินทอง  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา 2553

---

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดแบบเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด โดยสายอากาศถูกวางอยู่ในอากาศว่างและมีแหล่งกำเนิดทั้งสองแบบคือแหล่งกำเนิดแบบพริวด์แม่เหล็กและแบบช่องว่างเคลตา การวิเคราะห์จะใช้หลักเกณฑ์ของซิมป์สันร่วมกับสมการที่ออกถึงตันเพื่อหาการแจกแจงกระแสบนสายอากาศ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงการแจกแจงของกระแสในสายอากาศซึ่งกระแสจะมีค่าสูงสุดที่ตรงกลางสายและมีค่าต่ำสุดที่ปลายทั้งสองข้าง โดยที่กระแสจะลดลงจากตรงกลางไปยังปลายทั้งสองข้าง สำหรับกรณีรัศมีของสายอากาศมีขนาดเพิ่มขึ้น กระแสจะมีค่าสูงขึ้นด้วย ในกรณีที่ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นการกระจายของกระแสใกล้เคียงกับคลื่นรูปไซน์

**Project title**            Analysis of Finite Diameter Wire Antenna

**Name**                    Miss. Kanuengnit    Suwanasaeng    ID. 50364478

**Project advisor**        Mr. Chairat Pinthong, Ph.D.

**Major**                    Electrical Engineering

**Department**            Electrical and Computer Engineering

**Academic year**         2010

---

### **Abstract**

This project is the study and analysis of the finite diameter wire antenna. The antennas are in free space and driven by two types of sources, i.e. magnetic frill and delta gap generators. Pocklington integral equation and Simpson's rule are used to find current distribution on the conducting wires. The results show that the current distribution has a maximum magnitude value at the center and lowest value at the both ends of the antenna. A larger radius of antenna leads to increase the maximum current on the antenna. It is shown that when antenna length is increased the current distribution on the antenna approaches sine wave.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด สำเร็จได้ด้วยความสามารถของ ดร.ชัชรัตน์ พินทอง อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้ความกรุณาเอาใจใส่ดูแลและให้คำแนะนำปรึกษาโครงการอย่างสม่ำเสมอ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา และดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ผู้เป็นกรรมการคุมสอบโครงการซึ่งเสียสละเวลาในการคุมสอบ โครงการและได้กรุณาชี้แนะสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณครุบาอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และอบรมสั่งสอนผู้จัดทำมาโดยตลอด

สำหรับบุคคลที่สำคัญยิ่งและจะขาดเสียมิได้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ นายคำตัน และนางสมภาร สุวรรณแสง บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดที่ได้อบรมเลี้ยงดูสั่งสอนผู้จัดทำมาโดยตลอด ทั้งยังเป็นแบบอย่างที่ดีให้ผู้จัดทำได้ทำในสิ่งที่ถูกต้องและดีงามและยังคอยเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำเสมอมาอันเป็นแนวทางไปสู่ความสำเร็จของผู้จัดทำ

สุดท้ายขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลและเป็นที่ปรึกษาในการทำปริญญาโทฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

นางสาวกนิงนิตย์ สุวรรณแสง

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท..... ก	
บทคัดย่อภาษาไทย..... ข	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ค	
กิตติกรรมประกาศ..... ง	
สารบัญ..... จ	
สารบัญตาราง..... ช	
สารบัญรูป..... ซ	
บทที่ 1 บทนำ..... 1	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ..... 1	
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... 1	
1.3 ขอบเขตของโครงการ..... 1	
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน..... 2	
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ..... 2	
1.6 งบประมาณ..... 2	
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี..... 3	
2.1 สายอากาศเส้นลวด..... 3	
2.2 สมการปริพันธ์ของฟ็อกลิงตัน..... 3	
2.3 รูปแบบของแหล่งกำเนิดพลังงาน..... 11	
2.3.1 แบบช่องว่างเคลตา..... 11	
2.3.2 แบบฟริวส์แม่เหล็ก..... 12	
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด..... 14	
3.1 แรงดันและกระแสบนสายอากาศเส้นลวด..... 14	
3.2 การแจกแจงของกระแสบนสายอากาศ..... 17	
3.2.1 แหล่งกำเนิดฟริวส์แม่เหล็ก..... 17	
3.2.2 แหล่งกำเนิดช่องว่างเคลตา..... 18	

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การแจกแจงของกระแสนสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมี .....	19
3.3.1 แหล่งกำเนิดฟริวล์แม่เหล็ก .....	19
3.3.2 แหล่งกำเนิดช่องว่างเคลตา .....	21
3.4 การแจกแจงกระแสนสายอากาศเมื่อเปลี่ยนความยาวของสายอากาศ.....	22
บทที่ 4 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	24
4.1 สรุปผลการวิเคราะห์ .....	24
4.2 ข้อเสนอแนะ .....	24
เอกสารอ้างอิง .....	25
ภาคผนวก ก การอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยใช้กฎซิมป์สัน .....	26
ภาคผนวก ข การแจกแจงกระแสนสายอากาศ.....	27
ภาคผนวก ค สัตย์เชิงเวกเตอร์ A สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า J.....	28
ภาคผนวก ง โปรแกรมวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดแบบเส้นตรง.....	30
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ .....	41

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 กระแสที่ได้จากแหล่งกำเนิดแบบฟริวล์แม่เหล็กและแบบช่องว่างเคลตา .....	16
3.2 ค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดจากแหล่งกำเนิดแบบฟริวล์แม่เหล็กเมื่อเปลี่ยนจำนวนท่อน .....	18
3.3 ค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดจากแหล่งกำเนิดแบบเคลตาเมื่อเปลี่ยนจำนวนท่อน .....	19
3.4 ค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดจากแหล่งกำเนิดแบบฟริวล์แม่เหล็กเมื่อเปลี่ยนรัศมี .....	20
3.5 ค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดจากแหล่งกำเนิดแบบเคลตาเมื่อเปลี่ยนรัศมี .....	22
3.6 ค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น .....	23





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 คลื่นระนาบตกกระทบบนสายอากาศเส้นลวด.....	4
2.2 การแบ่งเป็นส่วนของสายอากาศไดโพลและเส้นกระแสสมมูล.....	5
2.3 เส้นกระแสสมมูลที่วางอยู่ ณ ตำแหน่ง $\rho = a$ .....	6
2.4 สายอากาศถูกแบ่งออกเป็น $N$ ส่วน.....	9
2.5 กราฟแสดงประมาณการแจกแจงกระแส.....	10
2.6 การป้อนแรงดันในช่องว่าง.....	11
2.7 แหล่งกำเนิดแบบฟิวล์แม่เหล็ก.....	13
3.1 สายอากาศเส้นตรงได้รับการแบ่งออกเป็นห้าท่อน.....	14
3.2 การแจกแจงกระแสบนสายอากาศแบบฟิวล์แม่เหล็ก.....	17
3.3 การแจกแจงกระแสบนสายอากาศแบบช่องว่างเคลตา.....	18
3.4 การแจกแจงกระแสบนสายอากาศแบบสนามแม่เหล็กเมื่อเพิ่มขนาดรัศมี.....	20
3.5 การแจกแจงกระแสบนสายอากาศแบบช่องว่างเคลตาเมื่อเพิ่มขนาดของรัศมี.....	21
3.6 การแจกแจงกระแสบนสายอากาศเมื่อเปลี่ยนความยาวของสายอากาศ.....	22
ก.1 การแบ่งช่วงการอินทิเกรตแบบซิมป์สัน.....	26
ข.1 การแจกแจงกระแสตามความยาวของสายอากาศเส้นลวด.....	27

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

สายอากาศเส้นลวดเป็นสายอากาศที่พบเห็นได้ทั่วไป มีใช้งานในทุกรูปแบบ เช่น บนอาคาร, รถยนต์, เรือ, เครื่องบิน, ยานอวกาศ และอื่น ๆ รูปร่างของสายอากาศยังแยกย่อยได้อีกเช่น แบบเส้นตรง (ไดโพล), บ่วง (วนเป็นรอบ) และแบบที่เป็นเกลียว (คล้ายสปริง) สายอากาศแบบบ่วงไม่จำเป็นต้องเป็นวงกลมอาจจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือลักษณะอื่น ๆ ส่วนรูปชนิดวงกลมนั้นจัดว่ามีใช้งานมากที่สุดเพราะง่ายในการสร้าง

โครงการฉบับนี้จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะของสายอากาศเส้นลวดแบบเส้นตรงโดยใช้หลักการของพ็อกลิงตัน (Pocklington) โดยจะมุ่งเน้นที่การศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดแบบเส้นตรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด การวิเคราะห์วิธีนี้สามารถนำมาประยุกต์กับการใช้งานจริงได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศทั่วไป
- 2) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศเส้นลวด
- 3) เพื่อศึกษารูปแบบแหล่งกำเนิดพลังงาน
- 4) เพื่อศึกษาหลักการพ็อกลิงตัน
- 5) เพื่อสามารถนำสายอากาศเส้นลวดไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) ศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเส้นลวดแบบเส้นตรง
- 2) ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวด

## 1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2553							ปี 2554		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาหลักการพื้นฐานและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเส้นลวด										
2. ศึกษาและพัฒนาโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวด										
3. รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวด										
4. สรุปคุณสมบัติและคุณลักษณะของสายอากาศเส้นลวด										
5. สรุปผลและจัดทำรูปเล่มปริญาานิพนธ์										

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

- 1) วิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเส้นลวดแบบเส้นตรง
- 2) สามารถนำความรู้ทางคณิตศาสตร์ มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์สายอากาศได้
- 3) ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวด

## 1.6 งบประมาณ

1) ค่าเอกสารในการค้นคว้าทำโครงการและค่าเช่าเล่มโครงการ	800	บาท
2) ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์	200	บาท
รวม (หนึ่งพันบาทถ้วน)	1,000	บาท

หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

## บทที่ 2

### หักการและทฤษฎี

การวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดจะพิจารณาการแจกแจงของกระแสที่เกิดขึ้นบนเส้นลวด เริ่มด้วยการสร้างสมการปริพันธ์เชิงสนามไฟฟ้า แล้วใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ช่วยในการหาคำตอบ ซึ่งเป็นการแจกแจงกระแสบนเส้นลวดที่ใช้เป็นสายอากาศ ในบทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด ซึ่งมีการใช้งานอยู่ทั่วไป

วิธีที่มีการนำเสนอไว้แล้ว และเป็นที่ยอมรับ สำหรับวิเคราะห์สายอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด ได้แก่ วิธีของฮาลเลน (Hallen) และวิธีของพ็อกลิงตัน (Pocklington)

วิธีของฮาลเลนสามารถใช้วิเคราะห์สายอากาศที่ป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแบบช่องว่างเคลตา (delta gap) สำหรับวิธีที่เสนอโดยพ็อกลิงตันเป็นวิธีที่ใช้ได้ทั่วไป และสามารถประยุกต์ได้กับแหล่งกำเนิดหลายลักษณะ ด้วยข้อดีที่ว่านี้ ในที่นี้จึงนำวิธีพ็อกลิงตันมาวิเคราะห์สายอากาศ

#### 2.1 สายอากาศเส้นลวด

สายอากาศเส้นลวดเป็นสายอากาศที่พบเห็นได้ทั่วไปและสามารถมีโครงสร้างได้หลายรูปแบบ สายอากาศเส้นลวดมีหลายรูปแบบแต่ส่วนใหญ่จะเป็นแบบเส้นตรงซึ่งได้แก่ โมโนโพลหรือไดโพล การวิเคราะห์สายอากาศที่ว่านี้ โดยทั่วไปแล้วจะไม่คำนึงถึงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อเทียบกับขนาดของความยาวคลื่นจะมีขนาดเล็กมาก กระแสจึงได้รับการสมมติให้เป็นกระแสเชิงเส้น แต่ในทางปฏิบัติ เพื่อให้โครงสร้างของสายอากาศมีความแข็งแรงต่อสภาวะแวดล้อม สายอากาศจึงต้องมีโครงสร้างตามแนวขวางที่ไม่สามารถละเลยได้

#### 2.2 สมการปริพันธ์ของพ็อกลิงตัน

สมการพ็อกลิงตัน (Pocklington) เป็นสมการที่ใช้ในการหากระแสที่อยู่บนสายอากาศเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด เพื่อที่จะได้มาซึ่งสมการนี้จะสมมติให้สนามไฟฟ้าตกกระทบพื้นผิวตัวนำของเส้นลวดคือ  $E'(r)$  และสำหรับสายอากาศเส้นลวดจะกำเนิดจากแหล่งกำเนิดที่ป้อน ณ ช่องว่างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบจะเหนี่ยวนำให้เกิดความหนาแน่นของกระแสเชิงพื้นผิว  $J_s$  ในหน่วย (A/m) จะมีกระแสไฟฟ้าการเหนี่ยวนำต่อการแผ่พลังงานกลับออกไปทำให้ได้สนามไฟฟ้าที่มีชื่อเรียกว่าการกระเจิงของสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง

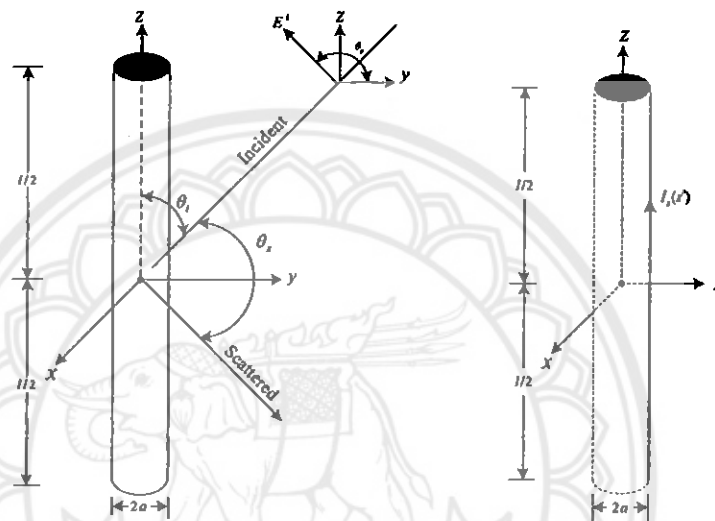
ใดๆในบริเวณรอบๆสายอากาศ ผลรวมของสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบบวกกับสนามไฟฟ้าที่กระเจิง ตามสมการ

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) \quad (2.1)$$

โดยที่  $\mathbf{E}'(\mathbf{r})$  คือ สนามไฟฟ้าทั้งหมด

$\mathbf{E}^i(\mathbf{r})$  คือ สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ

$\mathbf{E}^s(\mathbf{r})$  คือ การกระเจิงของสนามไฟฟ้า



(ก) สายอากาศเส้นลวดทรงกระบอก

(ข) กระแสสมมูลบนเส้นลวดตัวนำ

รูปที่ 2.1 คลื่นระนาบตกกระทบบนสายอากาศเส้นลวด

พิจารณารูปที่ 2.1 สายอากาศมีความยาว  $l$  มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดมีค่าเป็น  $2a$  และ  $I_z(z')$  เป็นกระแสที่ไหลตามแนวแกน  $z$  ของลวดตัวนำ เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาจะสมมติเส้นลวดที่เป็นสายอากาศต้องมีขนาดเล็กและความหนาแน่นน้อยมาก ซึ่งแยกได้เป็นสองกรณีคือ ความยาวของสายอากาศต้องยาวกว่ารัศมีของเส้นลวดและรัศมีของเส้นลวดที่ใช้เป็นสายอากาศต้องมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น จากข้อสมมติดังกล่าวสามารถละเว้นการพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากผิวที่ปลายทั้งสองข้างทำให้  $I_z(z')$  เป็นศูนย์ที่  $z = \pm l/2$  เมื่อจุดสังเกตเคลื่อนไปตามผิวของเส้นลวด ( $r = r_s$ ) และเกิดการเหนี่ยวนำที่สมบูรณ์ทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ และในองค์ประกอบ  $Z$  สมการ (2.1) จะลดรูปเป็น

$$E_z'(r = r_s) = E_z^i(r = r_s) + E_z^s(r = r_s) = 0 \quad (2.2)$$

หรือ

$$E_z^s(r = r_s) = -E_z^i(r = r_s) \tag{2.3}$$

โดยทั่วไปแล้วกระเจิงของสนามไฟฟ้าจะเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแส  $J_z$  และเมื่อนำองค์ประกอบของศักย์เวกเตอร์มาพิจารณาจะได้ตามสมการ

$$\begin{aligned} E^s(r) &= j\omega A - j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot A) \\ &= -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} [k^2 A + \nabla(\nabla \cdot A)] \end{aligned} \tag{2.4}$$

เนื่องจากจุดสังเกตอยู่บนพื้นผิวของเส้นลวด จึงพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบ  $Z$  เท่านั้น จากสมการ (2.4) สามารถเขียนใหม่เป็น

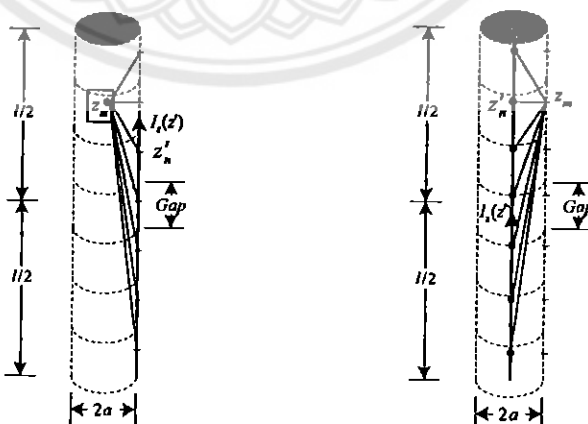
$$E_z^s(r) = -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left( k^2 A_z + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \right) \tag{2.5}$$

เมื่อไม่พิจารณาผลกระทบที่เกิดจากปลายทั้งสองด้านของเส้นลวดจะได้ศักย์ไฟฟ้าเวกเตอร์  $A_z$  เป็น

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S J_z \frac{e^{-jkR}}{R} ds' = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^{2\pi} J_z \frac{e^{-jkR}}{R} a d\phi' dz' \tag{2.6}$$

สำหรับเส้นลวดที่พอมมาก ๆ ความหนาแน่นของกระแส  $J_z$  จะไม่ขึ้นอยู่กับรัศมีของมุมอะซิมุท ( $\phi$ ) ยังผลให้ได้

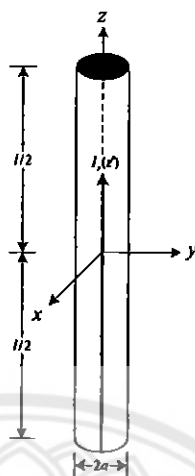
$$2\pi a J_z = I_z(z') \rightarrow J_z = \frac{1}{2\pi a} I_z(z') \tag{2.7}$$



(ก) เส้นกระแสสมมูลบนพื้นผิว (ข) เส้นกระแสสมมูล ณ จุดศูนย์กลาง

รูปที่ 2.2 การแบ่งเป็นส่วนของสายอากาศไดโพลและเส้นกระแสสมมูล

เมื่อ  $I_z(z')$  ได้รับการการสมมติให้เป็นเส้นกระแสสมมูลที่วางอยู่ ณ ตำแหน่ง  $\rho = a$  จากแกน  $x$  ในรูปที่ 2.3 ดังนั้นสมการ (2.6) จะเขียนใหม่เป็น



รูปที่ 2.3 เส้นกระแสสมมูลที่วางอยู่ ณ ตำแหน่ง  $\rho = a$

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l/2}^{+l/2} \left[ \frac{1}{2\pi a} \int_0^{2\pi} I_z(z') \frac{e^{-jKR}}{R} a d\phi' \right] dz \quad (2.8)$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \\ = \sqrt{\rho^2 + a^2 - 2\rho a \cos(\phi - \phi') + (z-z')^2} \quad (2.9)$$

$\rho$  คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงจุดสังเกต

$a$  คือ รัศมี

เนื่องจากการกระเจิงเป็นแบบสมมาตร จุดสังเกตจึงไม่เป็นฟังก์ชันของ  $\phi$  และเพื่อความง่ายจะเลือก  $\phi = 0$  สำหรับจุดสังเกตที่อยู่บนพื้นผิว  $\rho = a$  สมการการกระเจิงใน (2.6) และ (2.8) จะเปลี่ยนเป็น

$$A_z(\rho = a) = \mu \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') \left( \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jKR}}{4\pi R} d\phi' \right) dz' \\ = \mu \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') G(z, z') dz' \quad (2.10)$$

$$G(z, z') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} d\phi' \quad (2.11)$$

$$R(\rho = a) = \sqrt{4a^2 \sin^2\left(\frac{\phi'}{2}\right) + (z - z')^2} \quad (2.12)$$

เมื่อจุดสังเกตที่อยู่บนพื้นผิวกำหนดโดย  $\rho = a$  สนามไฟฟ้าในองค์ประกอบ  $z$  ได้เป็น

$$E_z^s(\rho = a) = -j \frac{1}{\omega\epsilon} \left( k^2 + \frac{d^2}{dz^2} \right) \int_{-1/2}^{+1/2} I_z(z') G(z, z') dz' \quad (2.13)$$

แทน (2.2) ลงใน (2.13) จะได้เป็น

$$-j \frac{1}{\omega\epsilon} \left( \frac{d^2}{dz^2} + k^2 \right) \int_{-1/2}^{+1/2} I_z(z') G(z, z') dz' = E_z^i(\rho = a) \quad (2.14)$$

หรือ

$$\left( \frac{d^2}{dz^2} + k^2 \right) \int_{-1/2}^{+1/2} I_z(z') G(z, z') dz' = -j\omega\epsilon E_z^i(\rho = a) \quad (2.15)$$

เมื่อสลับการปริพันธ์และการอนุพันธ์ จะทำให้สมการ (2.14) เปลี่ยนไปเป็น

$$\int_{-1/2}^{+1/2} I_z(z') \left[ \left( \frac{d^2}{dz^2} + k^2 \right) G(z, z') \right] dz' = -j\omega\epsilon E_z^i(\rho = a) \quad (2.16)$$

ซึ่ง  $G(z, z')$  ได้มาจาก (2.11)

สมการ (2.16) คือสมการปริพันธ์เชิงอนุพันธ์ของพ็อกลิงตัน (Pocklington's integrodifferential equation) ซึ่งใช้สำหรับหาเส้นกระแสสมมูลและสามารถนำไปหากระแสเชิงเส้นต่อได้ โดยรู้สนามที่ภาคกระแทกที่ผิว

ถ้าเราสมมติให้สายอากาศที่ห่อมมากๆ ( $a \ll \lambda$ ) สมการ (2.11) ก็จะเป็น

$$G(z, z') = G(R) = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \quad (2.17)$$

เมื่อหาอนุพันธ์และจัดรูปของสมการ (2.16) ใหม่จะเป็น

$$\int_{-1/2}^{+1/2} I_z(z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R^5} \left[ (1 + jkR)(2R^2 - 3a^2) + (kaR)^2 \right] dz' = -j\omega\epsilon E_z^i(\rho = a) \quad (2.18)$$



$$E'_z = -\frac{1}{4\pi j \omega \epsilon} \int_{-1/2}^{+1/2} \frac{e^{-jkR}}{R^3} \left\{ (1 + jkR) \left[ 2 - 3 \left( \frac{a}{R} \right)^2 \right] + k^2 a^2 \right\} I_z(z') dz' \quad (2.19)$$

สมการ (2.19) เขียนให้อยู่ในรูปที่รัดกุมได้ดังนี้

$$E'_z = - \int_{-1/2}^{+1/2} I_z(z') G(z, z') dz' \quad (2.20)$$

โดยที่

$$G(z, z') = -\frac{1}{4\pi j \omega \epsilon} \left( \frac{e^{-jkR}}{R^3} \right) \left\{ (1 + jkR) \left[ 2 - 3 \left( \frac{a}{R} \right)^2 \right] + k^2 a^2 \right\} \quad (2.21)$$

สำหรับจุดสังเกตที่อยู่ตรงกลางสาย ( $\rho = a$ )

$$R = \sqrt{a^2 + (z - z')^2} \quad (2.22)$$

$z$  คือ จุดสังเกต และ  $z'$  คือ จุดแหล่งกำเนิด

สมการ (2.16) หรือ (2.18)  $I_z(z')$  จะแทนเส้นกระแสสมมูลบนพื้นผิวของเส้นลวด กระแสที่ว่ามีสามารถหาได้เมื่อทราบสนามที่ผาดกระทบบนพื้นผิวได้โดยใช้เทคนิค point-matching

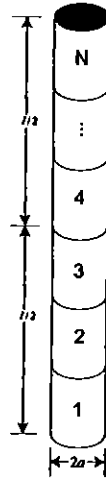
สมการปริพันธ์ (2.18) สามารถพิจารณาเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_m \quad ; m = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.23)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนที่ไม่ทราบค่าในระบบสมการเขียน (2.18) จะได้รับการเขียนในรูปแบบของ

$$- \int_{-1/2}^{+1/2} I_z(z') G(z, z') dz' = E'_z \quad (2.24)$$

เพื่อที่จะหาผลเฉลยของ (2.24) สายอากาศจะได้รับการแบ่งออกเป็น  $N$  ส่วน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สายอากาศถูกแบ่งออกเป็น  $N$  ส่วน

ประมาณกระแส ณ ตำแหน่งต่างๆบนเส้นลวดด้วยอนุกรมดังต่อไปนี้

$$I_z(z') = \sum_{n=1}^N I_n F_n(z') \quad (2.25)$$

โดยที่  $I_n$  เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่ไม่ทราบค่า และ  $F_n(z')$  เป็นฟังก์ชันเอ็กซ์แพนชัน (expansion function) ซึ่งฟังก์ชันเอ็กซ์แพนชันจะสอดคล้องกับออร์ทोगอนัล (orthogonal relation) ดังนี้

$$F_n(z') = \begin{cases} 1 & \text{for } z' \text{ in } \Delta z'_n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.26)$$

ในเทอมของ pulse function เป็นการประมาณแบบขั้นบันไดในการแจกแจงกระแสบนสายโดยแบ่งความยาว  $\Delta z'_n$  เป็นจำนวน  $N$  ส่วน ในรูปที่ 2.3

แทน (2.25) ใน (2.14) จะได้

$$-\int_{-l/2}^{+l/2} \sum_{n=1}^N I_n F_n(z') G(z_m, z') dz' \approx E_z^i(z_m) \quad (2.27)$$

การเขียน  $m$  บน  $z_m$  ทำให้รู้สมการของการปริพันธ์โดยเริ่มที่ส่วน  $m$  ซึ่งจะประมาณด้านซ้ายให้เท่ากับด้านขวา เพราะว่าการแจกแจงกระแสจริงๆกับการแจกแจงแบบประมาณ  $F_n(z')$  เป็นฟังก์ชันฐานที่เป็นฟังก์ชันคลื่นสี่เหลี่ยมสำหรับช่วงความยาว  $\Delta z'$  ดังนั้นสำหรับช่วงความยาวช่วงที่  $m$  จะได้

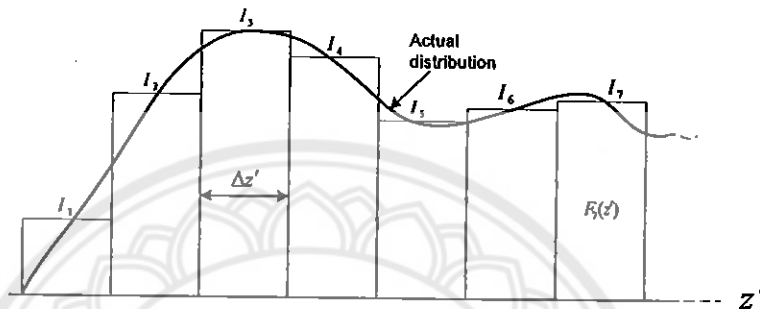
$$-\sum_{n=1}^N I_n \int_{\Delta z'_n} G(z_m, z') dz' \approx E_z^i(z_m) \quad (2.28)$$

กำหนดให้

$$f(z_m, z'_n) = - \int_{\Delta z'_n} G(z_m, z') dz' \quad (2.29)$$

เมื่อรวมสมการ (2.25) และ (2.26) แล้วแทนใน (2.24) ได้

$$- \int_{-l/2}^{l/2} I_z(z') = I_1 f(z_m, z'_1) + I_2 f(z_m, z'_2) + \dots + I_n f(z_m, z'_n) + \dots + I_N f(z_m, z'_N) \approx E'_z(z_m) \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการประมาณการแจกแจงกระแส

จากรูปที่ 2.5 เป็นการแบ่งสายออกเป็น  $N$  ส่วนของแต่ละความยาว  $\Delta z'_n = \Delta z'$  กับจำนวนคงที่ของกระแสที่เริ่มต้นจากจุดศูนย์กลาง ผลรวมของการกระเจิงสนามมาจาก  $N$  ทั้งหมด เป็นการกำหนดสนามตกกระทบบให้เท่ากันที่จุด  $z_m$  สนามตกกระทบบสามารถรู้ได้จากสนามที่มาจากแหล่งกำเนิดบนสายหรือมาจากแหล่งกำเนิดสนามระยะไกล

สมการ (2.30) เขียนเป็น

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_m \quad (2.31)$$

ที่

$$Z_{mn} = f(z_m, z'_n) \quad (2.32)$$

$$V_m = E'_z(z_m) \quad (2.33)$$

เราต้องการผลบวกสมการ  $N-1$  ถึงการแก้ปัญหาสำหรับ  $N$  ที่ไม่ทราบ เราจะเลือก  $z_m$  ที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละสมการและจะการใช้การปริพันธ์ที่จุด  $N$  บนจุดกึ่งกลางของสาย ซึ่งเราเรียกขั้นตอนนี้ว่า point-matching

กรณี que แบ่งความยาวของสายอากาศออกเป็น  $N$  ส่วนจะได้ระบบสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} I_1 f(z_1, z'_1) + I_2 f(z_1, z'_2) + \dots + I_N f(z_1, z'_N) &= E'_z(z_1) \\ I_1 f(z_2, z'_1) + I_2 f(z_2, z'_2) + \dots + I_N f(z_2, z'_N) &= E'_z(z_2) \\ \vdots & \\ I_1 f(z_N, z'_1) + I_2 f(z_N, z'_2) + \dots + I_N f(z_N, z'_N) &= E'_z(z_N) \end{aligned} \quad (2.34)$$

และสามารถเขียน (2.34) ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 f(z_1, z'_1) & I_1 f(z_1, z'_2) & \dots & I_N f(z_1, z'_N) \\ I_1 f(z_2, z'_1) & I_1 f(z_2, z'_2) & \dots & I_N f(z_2, z'_N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ I_1 f(z_N, z'_1) & I_1 f(z_N, z'_2) & \dots & I_N f(z_N, z'_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_N \\ I_N \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_z(z_1) \\ E'_z(z_2) \\ \vdots \\ E'_z(z_N) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

หรือสามารถเขียนให้รัดกุมขึ้นเป็น

$$[Z_{mn}] [I_n] = [V_m] \quad (2.36)$$

โดย  $m = 1, 2, 3, \dots, N$

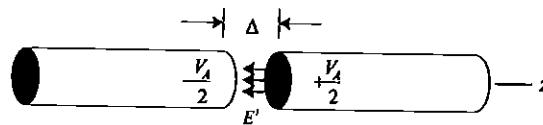
$n = 1, 2, 3, \dots, N$

และเราสามารถเขียน (2.36) ได้เป็น

$$[I_n] = [Z_{mn}]^{-1} [V_m] \quad (2.37)$$

## 2.3 รูปแบบของแหล่งกำเนิดพลังงาน

### 2.3.1 แบบช่องว่างแคบ



รูปที่ 2.6 การป้อนแรงดันในช่องว่าง

จากรูปที่ 2.6 แหล่งกำเนิดแบบช่องว่างเคลตาเป็นการกระตุ้นแรงดันที่ป้อนให้กับข้อต่อด้วยค่าคงที่  $V_A$  และที่อื่นๆ สำหรับสนามไฟฟ้าตกกระทบ  $E_z^i = V_A / \Delta$  โดยที่  $\Delta$  เป็นระยะห่างของช่องว่าง และสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานแบบช่องว่างเคลตา เมื่อใช้เทคนิค point matching จะทำให้ได้

$$V_m = E_z^i = V_A / \Delta \quad (2.38)$$

### 2.3.2 แบบฟริวส์แม่เหล็ก

แหล่งกำเนิดฟริวส์แม่เหล็ก (magnetic frill) นำไปสู่การคำนวณบริเวณสนามใกล้ตลอดจนสนามไกลจากช่องเปิดโคเอ็กซ์เซียลตัวป้อนตรงช่องว่างจะถูกแทนที่เส้นรอบวงด้วยความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กอยู่เหนือบริเวณช่องเปิดวงกลมที่มีรัศมีภายในคือ  $a$  และรัศมีภายนอกคือ  $b$  ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เพราะว่าไดโพลมักจะใช้เป็นตัวป้อนของสายส่ง รัศมีภายนอกสมมูลของช่องเปิดของตัวกำเนิดฟริวส์แม่เหล็กหาได้จากคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

เหนือช่องเปิดวงกลมของแหล่งกำเนิดฟริวส์แม่เหล็ก สนามไฟฟ้าจะถูกแสดงในโหมด TEM ซึ่งการแพร่กระจายของสายโคเอ็กซ์เซียลสามารถหาได้จาก

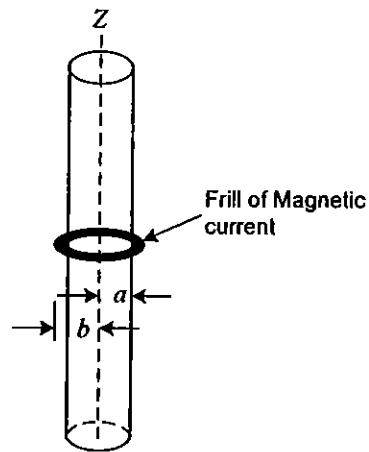
$$E_{\rho'}(\rho') = \frac{1}{2\rho' \ln(b/a)} \quad (2.39)$$

ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลจะถูกแสดงด้วย  $M = 2\hat{n} \times E$  และสำหรับแหล่งกำเนิดฟริวส์แม่เหล็กจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$M_{\phi'} = 2E_{\rho'} = \frac{-1}{\rho' \ln(b/a)} \quad (2.40)$$

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงสนามไฟฟ้าบนแกนของโมโนโพลคือ

$$E_z^i(0, z) = \frac{1}{2 \ln(b/a)} \left( \frac{e^{-j\beta R_1}}{R_1} - \frac{e^{-j\beta R_2}}{R_2} \right) \quad (2.41)$$



รูปที่ 2.7 แหล่งกำเนิดแบบฟริลส์แม่เหล็ก (Magnetic Frill)

เมื่อ

$$R_1 = \sqrt{z^2 + a^2} \quad (2.42)$$

$$R_2 = \sqrt{z^2 + a^2} \quad (2.43)$$



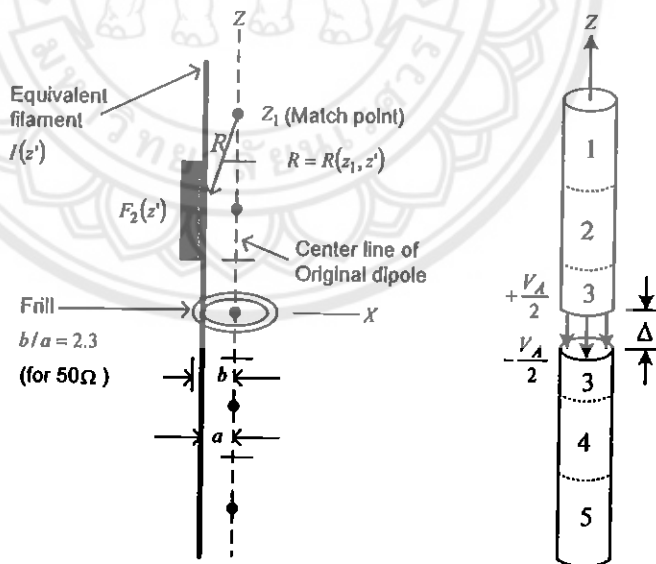
### บทที่ 3

## ผลการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดแบบเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด ซึ่งอาศัยหลักการและทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยจะศึกษาแรงดันและกระแส พร้อมกับการเปลี่ยนแปลงขนาดทางกายภาพของสายอากาศมีรายละเอียดดังนี้

### 3.1 แรงดันและกระแสบนสายอากาศเส้นลวด

พิจารณาสายอากาศเส้นลวดแบบเส้นตรงที่มีความยาว  $0.1\lambda$  และมีรัศมี  $0.005\lambda$  โดยที่สายอากาศทอดตัวในทิศของแกน  $z$  และจุดศูนย์กลางของสายอากาศอยู่ ณ จุดเริ่มแกน สายอากาศได้รับการแบ่งออกเป็นห้าท่อน โดยท่อนแรกอยู่ด้านบนสุดดังแสดงในรูปที่ 3.1 และแหล่งกำเนิดจะได้รับการป้อนให้กับสายอากาศ แหล่งกำเนิดแบ่งได้เป็นแหล่งกำเนิดแบบฟริลล์แม่เหล็ก (Magnetic frill) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) และแหล่งกำเนิดแบบช่องว่างเดลตา (Delta gap) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข)



(ก) แหล่งกำเนิดแบบฟริลล์แม่เหล็ก

(ข) แหล่งกำเนิดแบบช่องว่างเดลตา

รูปที่ 3.1 สายอากาศเส้นตรงได้รับการแบ่งออกเป็นห้าท่อน

เมื่อป้อนแหล่งกำเนิดแบบช่องว่างเคลตาตั้งที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1(ข) และใช้สมการ (2.38) วิเคราะห์หาแรงดัน พร้อมกับให้แรงดันเท่ากับ 1 โวลต์ ที่ช่องว่างในสายอากาศ ทำให้ได้  $V_3 = 1/\Delta z = 1/0.02 = 50 \angle 0^\circ$  และเมตริกซ์ของ  $[V_m]$  มีค่าดังนี้

$$[V_m] = \begin{bmatrix} 0 & \angle 0^\circ \\ 0 & \angle 0^\circ \\ 50 & \angle 0^\circ \\ 0 & \angle 0^\circ \\ 0 & \angle 0^\circ \end{bmatrix}$$

สำหรับองค์ประกอบของ  $[Z_{mn}]$  สามารถหาได้จากสมการ (2.26) และ (2.35) ร่วมกับหลักเกณฑ์ของซิมปีตัน โดยสายอากาศจะได้รับการแบ่งออกเป็นห้าท่อน ซึ่งส่วนแรกจะอยู่ที่ท่อนบนสุดของสายอากาศและในแต่ละท่อนจะมีส่วนย่อย (subinterval) จำนวนหนึ่งร้อย ซึ่งให้ความยาว 0.1λ และรัศมี 0.005λ เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วจะทำให้ได้เมตริกซ์  $[Z_{mn}]$  มีค่าเป็น

$$[Z_{mn}] = 10^2 \begin{bmatrix} 679.1 \angle -89.99^\circ & 2924 \angle 89.97^\circ & 33.01 \angle 89.73^\circ & 9.747 \angle 89.09^\circ & 4.245 \angle 87.92^\circ \\ 2924 \angle 89.97^\circ & 679.1 \angle -89.99^\circ & 2924 \angle 89.97^\circ & 33.01 \angle 89.73^\circ & 9.747 \angle 89.09^\circ \\ 33.01 \angle 89.73^\circ & 2924 \angle 89.97^\circ & 679.1 \angle -89.99^\circ & 2924 \angle 89.97^\circ & 33.01 \angle 89.73^\circ \\ 9.747 \angle 89.09^\circ & 33.01 \angle 89.73^\circ & 2924 \angle 89.97^\circ & 679.1 \angle -89.99^\circ & 2924 \angle 89.97^\circ \\ 4.245 \angle 87.92^\circ & 9.747 \angle 89.09^\circ & 33.01 \angle 89.73^\circ & 2924 \angle 89.97^\circ & 679.1 \angle -89.99^\circ \end{bmatrix}$$

จากนั้นสามารถหาค่ากระแสโดยป้อนแหล่งกำเนิดแบบช่องว่างเคลตาได้จากสมการ  $[I_n] = [Z_{mn}]^{-1} [V_m]$  ทำให้ได้เมตริกซ์ของกระแสมีค่าเป็น

$$[I_n] = 10^{-3} \begin{bmatrix} 0.52 \angle 89.54^\circ \\ 0.98 \angle 89.64^\circ \\ 1.63 \angle 89.76^\circ \\ 0.98 \angle 89.64^\circ \\ 0.52 \angle 89.54^\circ \end{bmatrix}$$



เมื่อป้อนแหล่งกำเนิดแบบฟริวล์แม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) โดยให้  $b/a = 2.3$  ซึ่งเมตริกซ์ของแรงดัน  $[V_m]$  ที่ได้จากการ (2.41) มีค่าดังนี้

$$[V_m] = \begin{bmatrix} 0.4836 & \angle -0.31^\circ \\ 3.1276 & \angle -0.05^\circ \\ 67.9376 & \angle -0.002^\circ \\ 3.1276 & \angle -0.05^\circ \\ 0.4836 & \angle -0.31^\circ \end{bmatrix}$$

และสามารถหากระแสจาก  $[I_n] = [Z_{mn}]^{-1} [V_m]$  เมื่อป้อนแหล่งกำเนิดแบบฟริวล์แม่เหล็กทำให้ได้เมตริกซ์ของกระแสมีค่าเป็น

$$[I_n] = 10^{-3} \begin{bmatrix} 0.78 & \angle 89.56^\circ \\ 1.48 & \angle 89.65^\circ \\ 2.35 & \angle 89.76^\circ \\ 1.48 & \angle 89.65^\circ \\ 0.78 & \angle 89.56^\circ \end{bmatrix}$$

ตารางที่ 3.1 กระแสที่ได้จากแหล่งกำเนิดแบบฟริวล์แม่เหล็กและแบบช่องว่างเคลตา

จำนวนท่อน ( $N$ ) และ จำนวนส่วนย่อย ( $M$ )	ขนาดของกระแส $\times 10^{-3}$	
	แหล่งกำเนิดฟริวล์แม่เหล็ก	แหล่งกำเนิดช่องว่างเคลตา
$N = 5$ $M = 100$	0.78 $\angle 89.54^\circ$	0.52 $\angle 89.54^\circ$
	1.48 $\angle 89.65^\circ$	0.98 $\angle 89.64^\circ$
	2.35 $\angle 89.76^\circ$	1.63 $\angle 89.76^\circ$
	1.48 $\angle 89.65^\circ$	0.98 $\angle 89.64^\circ$
	0.78 $\angle 89.54^\circ$	0.52 $\angle 89.54^\circ$

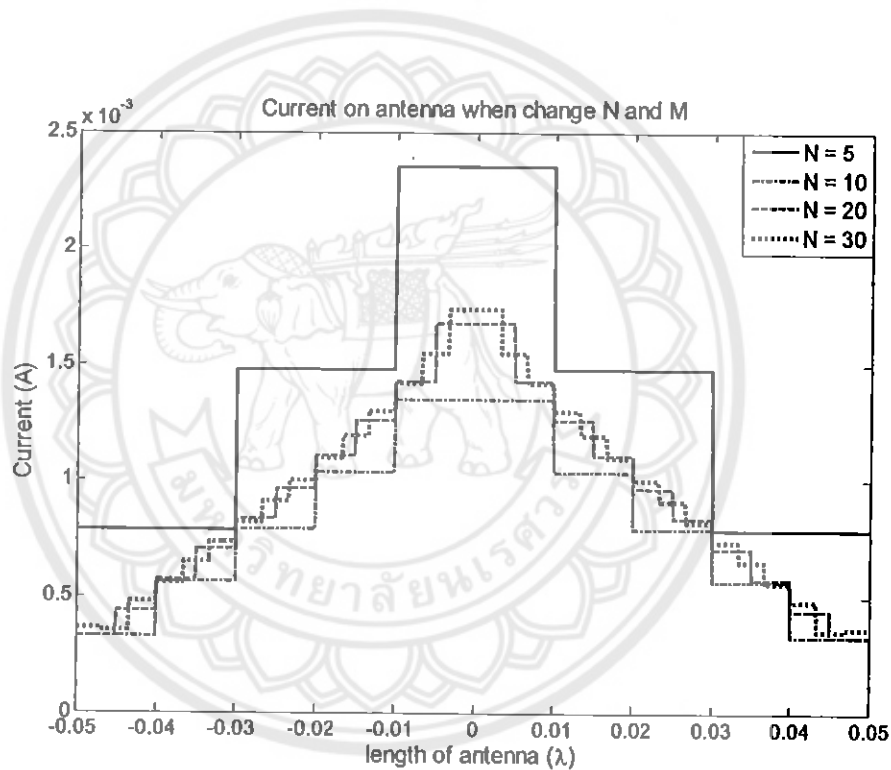
จากตารางที่ 3.1 พบว่าขนาดของกระแสจากแหล่งกำเนิดทั้งสองจะมีขนาดสูงสุดที่กลางสายอากาศและมีค่าน้อยที่สุดที่ปลายสายอากาศทั้งสองข้าง ซึ่งการลดลงของกระแสเริ่มลดจากตรงกลางไปหาปลายสายอากาศทั้งสองข้าง เมื่อพิจารณาขนาดของกระแสจากแหล่งกำเนิดทั้งสองแบบจะพบว่าอัตราการลดลงของกระแสจากตรงกลางสายไปยังปลายทั้งสองข้างของสายอากาศระหว่างแหล่งกำเนิดแบบฟริวล์แม่เหล็กและแหล่งกำเนิดแบบช่องว่างเคลตาที่อยู่ในระดับเดียวกันเป็นอัตราส่วนประมาณ 1.5:1

### 3.2 การแจกแจงของกระแสบนสายอากาศ

การวิเคราะห์สายอากาศจะใช้แหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศจากแหล่งกำเนิดสองรูปแบบดังนี้

#### 3.2.1 แหล่งกำเนิดฟริวด์แม่เหล็ก

พิจารณาสายอากาศที่มีความยาว  $l = 0.1\lambda$  และรัศมี  $a = 0.005\lambda$  สายอากาศได้รับการป้อนแหล่งกำเนิดแบบฟริวด์แม่เหล็ก โดยให้  $N = 5, 10, 20$  และ  $30$  เมื่อ  $M = 200, 100, 50$  และ  $32$  ตามลำดับ วิเคราะห์ตามสมการ (2.18) จะได้กระแสจากสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การแจกแจงของกระแสบนสายอากาศแบบฟริวด์แม่เหล็ก

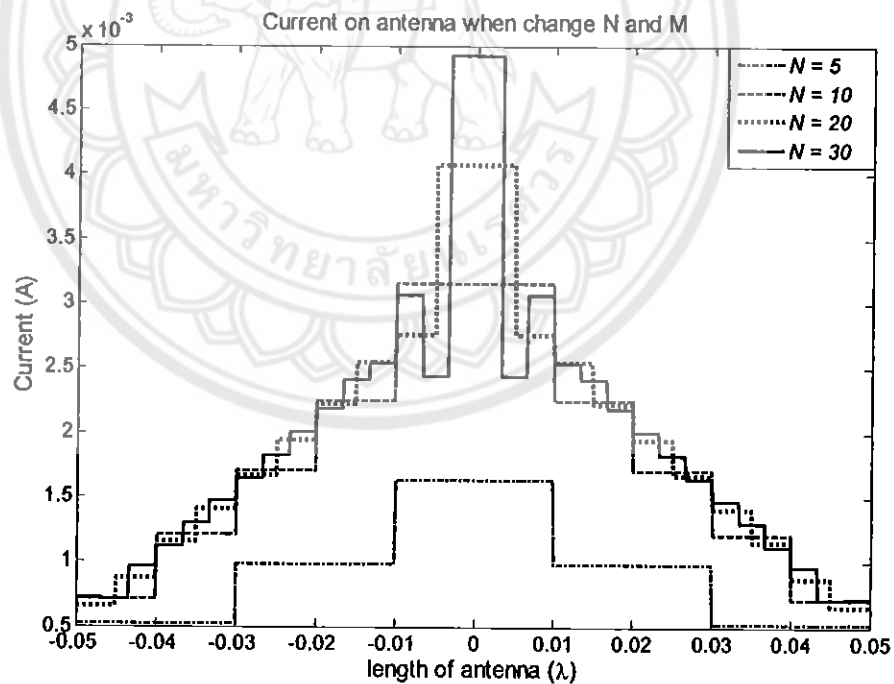
จากรูปที่ 3.2 จะพบว่าเมื่อเปลี่ยนจำนวนท่อนของสายอากาศ ( $N$ ) โดยที่จำนวนส่วนย่อยทั้งหมดในแต่ละท่อนของสายอากาศให้มีจำนวนที่ใกล้เคียงกัน พบว่าขนาดของกระแสจะสูงสุดอยู่ที่ตรงกลางสายและจะมีค่าต่ำสุดที่ปลายของสายอากาศทั้งสองข้าง ซึ่งขนาดของกระแสจะมีการลดลงจากตรงกลางสายไปสู่ปลายทั้งสองข้างของสายอากาศ เมื่อสายอากาศได้รับการแบ่งออกเป็นท่อน โดยที่จำนวนท่อนของสายอากาศมีค่าตั้งแต่  $N = 5$  จนถึง  $N = 30$  จะได้ค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุด ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดจากแหล่งกำเนิดพริวล์แม่เหล็ก

จำนวนท่อนสายอากาศ ( $N$ )	แหล่งกำเนิดพริวล์แม่เหล็ก	
	กระแสสูงสุด (แอมป์)	กระแสต่ำสุด (แอมป์)
$N = 5$	$2.4 \times 10^{-3}$	$7.84 \times 10^{-4}$
$N = 10$	$1.3 \times 10^{-3}$	$3.31 \times 10^{-4}$
$N = 20$	$1.7 \times 10^{-3}$	$3.26 \times 10^{-4}$
$N = 30$	$1.7 \times 10^{-3}$	$3.55 \times 10^{-4}$

### 3.2.2 แหล่งกำเนิดช่องว่างเคลตา

พิจารณาสายอากาศที่มีความยาว  $l = 0.1\lambda$  และรัศมี  $a = 0.005\lambda$  สายอากาศได้รับการป้อนแหล่งกำเนิดแบบช่องว่างเคลตา โดยให้  $N = 5, 10, 20$  และ  $30$  เมื่อ  $M = 200, 100, 50$  และ  $32$  ตามลำดับ วิเคราะห์ตามสมการ (2.38) จะได้กระแสจากสายอากาศดังแสดงในรูป 3.3



รูปที่ 3.3 การแจกแจงของกระแสบนสายอากาศแบบช่องว่างเคลตา

จากรูป 3.3 จะพบว่าเมื่อเปลี่ยนจำนวนท่อนของสายอากาศ ( $N$ ) โดยที่จำนวนส่วนย่อยทั้งหมดในแต่ละท่อนของสายอากาศให้มีจำนวนที่ใกล้เคียงกัน จะพบว่าขนาดของกระแสจะมีค่าสูงสุดที่ตรงกลางสายและจะมีค่าต่ำสุดที่ปลายทั้งสองข้างของสายอากาศทั้งสองข้างเช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดแบบสนามแม่เหล็ก ซึ่งขนาดของกระแสจะมีการลดลงจากตรงกลางสายไปสู่ปลายทั้งสองข้างของสายอากาศซึ่งสอดคล้องสมการ (2.38) เมื่อสายอากาศได้รับการแบ่งออกเป็นท่อนโดยที่จำนวนท่อนของสายอากาศมีค่าตั้งแต่  $N = 5$  จนถึง  $N = 30$  จะได้ค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดดังตารางที่ 3.3

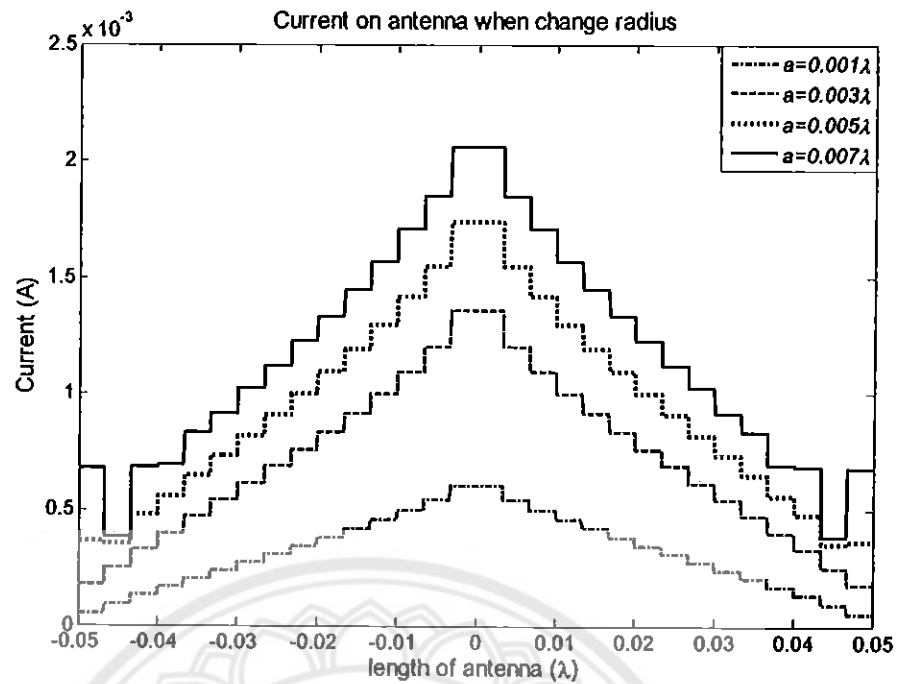
**ตารางที่ 3.3** แสดงค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดจากแหล่งกำเนิดช่องว่างเคลตา

จำนวนท่อนสายอากาศ ( $N$ )	แหล่งกำเนิดช่องว่างเคลตา	
	กระแสสูงสุด (แอมป์)	กระแสต่ำสุด (แอมป์)
$N = 5$	$1.6 \times 10^{-3}$	$5.19 \times 10^{-4}$
$N = 10$	$3.1 \times 10^{-3}$	$7.11 \times 10^{-4}$
$N = 20$	$4.1 \times 10^{-3}$	$6.54 \times 10^{-4}$
$N = 30$	$4.9 \times 10^{-3}$	$7.10 \times 10^{-4}$

### 3.3 การแจกแจงของกระแสบนสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมี

#### 3.3.1 แหล่งกำเนิดฟริลล์แม่เหล็ก

พิจารณาสายอากาศที่มีความยาว  $l = 0.1\lambda$  สายอากาศได้รับการแบ่งออกเป็นท่อนจำนวน 30 ท่อน ( $N = 30$ ) ถูกป้อนด้วยแหล่งกำเนิดฟริลล์แม่เหล็ก (Magnetic frill) เมื่อให้รัศมีมีค่าเป็น  $a = 0.001\lambda, 0.003\lambda, 0.005\lambda, 0.007\lambda$  และ  $0.009\lambda$  ซึ่งการแจกแจงกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การแจกแจงกระแสบนสายอากาศแบบฟิวล์แม่เหล็กเมื่อเพิ่มขนาดของรัศมี

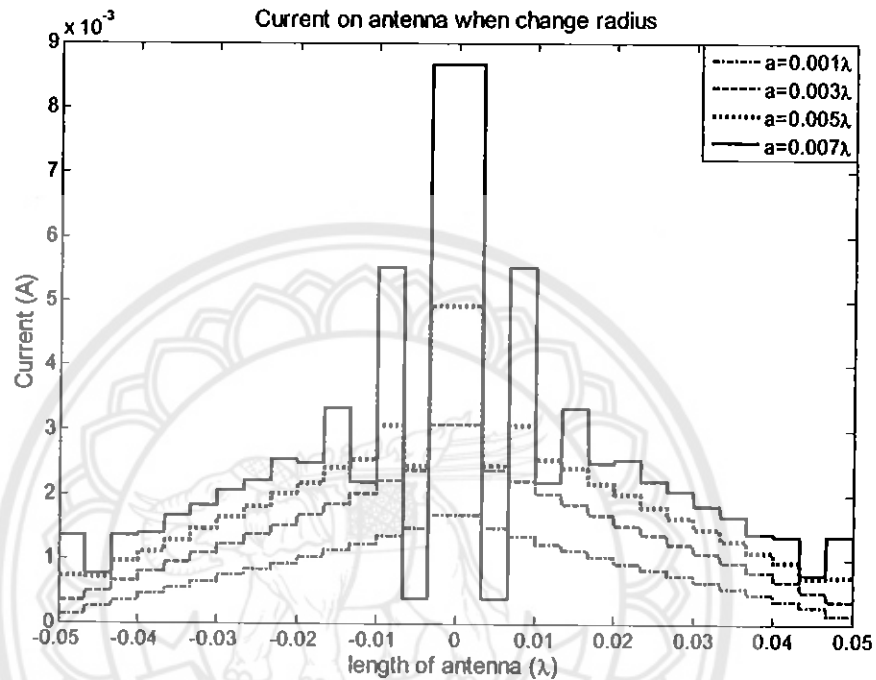
จากรูปที่ 3.4 จะพบว่าเมื่อรัศมีของสายอากาศมีขนาดเพิ่มขึ้นกระแสจะมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยที่กระแสจะมีค่าสูงสุดที่ตรงกลางสายและจะมีค่าต่ำสุดที่ปลายทั้งสองข้างของสายอากาศ ซึ่งค่าของกระแสจะลดลงจากตรงกลางสายไปสู่ปลายทั้งสองข้าง เมื่อพิจารณาขนาดของรัศมีสายอากาศมีขนาดเพิ่มขึ้นแล้วยังมีค่าของกระแสสูงสุดและต่ำสุดที่ขนาดรัศมีต่างกันดังที่แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดจากแหล่งกำเนิดฟิวล์แม่เหล็ก

ขนาดของรัศมี ( $a$ )	แหล่งกำเนิดฟิวล์แม่เหล็ก	
	กระแสสูงสุด (แอมป์)	กระแสต่ำสุด (แอมป์)
$a = 0.001\lambda$	$1.7 \times 10^{-3}$	$5.24 \times 10^{-5}$
$a = 0.003\lambda$	$3.1 \times 10^{-3}$	$1.78 \times 10^{-4}$
$a = 0.005\lambda$	$4.9 \times 10^{-3}$	$3.55 \times 10^{-4}$
$a = 0.007\lambda$	$8.7 \times 10^{-3}$	$3.86 \times 10^{-4}$

### 3.3.2 แหล่งกำเนิดช่องว่างเดลตา

พิจารณาสายอากาศที่มีความยาว  $l = 0.1\lambda$  สายอากาศได้รับการแบ่งออกเป็นท่อนจำนวน 30 ท่อน ( $N = 30$ ) ถูกป้อนด้วยแหล่งกำเนิดช่องว่าง (Delta gap) เมื่อให้รัศมีมีค่าเป็น  $a = 0.001\lambda, 0.003\lambda, 0.005\lambda, 0.007\lambda$  และ  $0.009\lambda$  ซึ่งการแจกแจงกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การแจกแจงกระแสบนสายอากาศแบบช่องว่างเดลตาเมื่อเพิ่มขนาดรัศมี

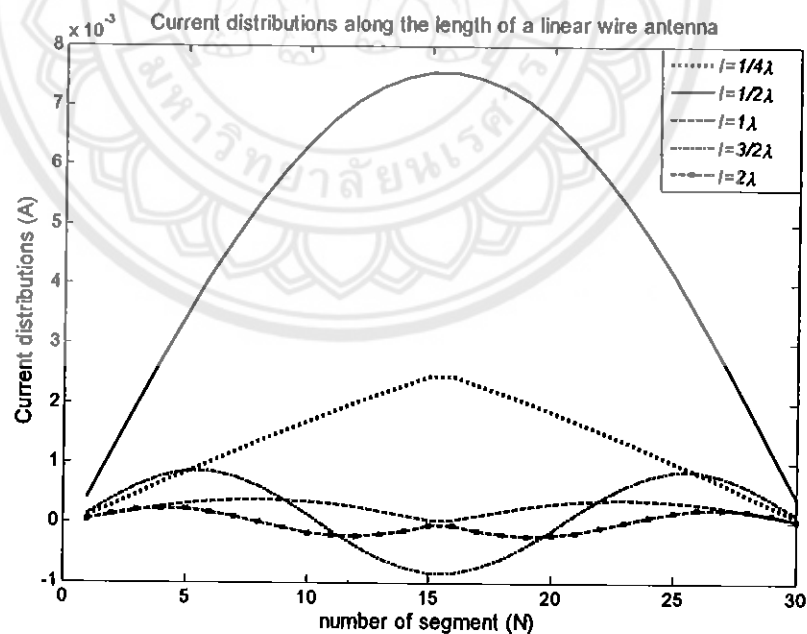
จากรูปที่ 3.5 จะพบว่าเมื่อรัศมีของสายอากาศมีขนาดเพิ่มขึ้นจะพบว่ากระแสจะมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยที่กระแสจะมีค่าสูงสุดที่ตรงกลางสายและจะมีค่าต่ำสุดที่ปลายทั้งสองข้างของสายอากาศ ซึ่งค่าของกระแสจะลดลงจากตรงกลางสายไปสู่ปลายทั้งสองข้างในลักษณะเดียวกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก เมื่อพิจารณาขนาดของรัศมีสายอากาศมีขนาดเพิ่มขึ้นแล้วยังมีค่าของกระแสสูงสุดและต่ำสุดที่ขนาดรัศมีต่างกันดังที่แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดจากแหล่งกำเนิดช่องว่างเคลตา

ขนาดของรัศมี ( $a$ )	แหล่งกำเนิดช่องว่างเคลตา	
	กระแสสูงสุด (แอมป์)	กระแสต่ำสุด (แอมป์)
$a = 0.001\lambda$	$6.05 \times 10^{-4}$	$5.24 \times 10^{-5}$
$a = 0.003\lambda$	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.78 \times 10^{-4}$
$a = 0.005\lambda$	$1.7 \times 10^{-3}$	$3.55 \times 10^{-4}$
$a = 0.007\lambda$	$2.1 \times 10^{-3}$	$3.86 \times 10^{-4}$

### 3.4 การแจกแจงกระแสบนสายอากาศเมื่อเปลี่ยนความยาวของสายอากาศ

พิจารณาสายอากาศที่มีรัศมี  $a = 0.005\lambda$  และสายอากาศได้รับการแบ่งเป็นท่อนจำนวน 30 ท่อน ( $N = 30$ ) เมื่อเปลี่ยนความยาวของสายอากาศเป็น  $l = 1/4\lambda, 1/2\lambda, 1\lambda, 3/2\lambda$  และ  $2\lambda$  เมื่อ  $M = 100, 200, 400, 600$  และ  $800$  ตามลำดับ วิเคราะห์ตามสมการ (ค.1) จะได้การแจกแจงกระแสดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การแจกแจงกระแสบนสายอากาศเมื่อเปลี่ยนความยาวของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.6 จะพบว่าที่  $l=1/4\lambda$  จะได้รูปออกมาคล้ายรูปสามเหลี่ยมและ ณ  $l=1/2\lambda$  จะได้รูปออกมาเป็นรูปพลาโบลาคว่า และตั้งแต่  $l=\lambda$  ขึ้นไปจะพบว่าการแจกแจง กระแสนสายอากาศใกล้เคียงกับคลื่นรูปไซน์แต่จะพบว่าที่  $l=3\lambda/2$  และ  $l=2\lambda$  การแจกแจง กระแสจะมีการตัดผ่านค่าศูนย์ที่ตรงกลางสาย ซึ่งการกระจายของกระแสจะสอดคล้องกับ สายอากาศในอุดมคติที่มีรัศมีเป็นศูนย์ในภาคผนวก (ข) ส่วนค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของการแจก แจงกระแสเมื่อเปลี่ยนความยาวของสายอากาศจะแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดเมื่อเปลี่ยนความยาวของสายอากาศ

ความยาวคลื่น	กระแสนสายอากาศ	
	กระแสสูงสุด (แอมป์)	กระแสต่ำสุด (แอมป์)
$l = \lambda/4$	$3.5 \times 10^{-3}$	$4.35 \times 10^{-4}$
$l = \lambda/2$	$7.6 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$
$l = \lambda$	$7.53 \times 10^{-4}$	$2.04 \times 10^{-4}$
$l = 3\lambda/2$	$9.0 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^{-4}$
$l = 2\lambda$	$3.13 \times 10^{-4}$	$6.1 \times 10^{-5}$



## บทที่ 4

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการวิเคราะห์โครงการและพร้อมให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

#### 4.1 สรุปผลการวิเคราะห์

ในโครงการนี้ได้มีการศึกษากระแสและแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดทางกายภาพของสายอากาศเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัด โดยมีการเพิ่มจำนวนท่อน (segment) และขนาดรัศมีของสายอากาศ ซึ่งสายอากาศจะได้รับการป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแบบสนามแม่เหล็กและแบบช่องว่างเคลตา และศึกษาการแจกแจงกระแสในอุดมคติของสายอากาศที่ความยาวคลื่นต่างกัน

จากผลการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดแบบเส้นผ่านศูนย์กลางจำกัดจะเห็นว่า การแจกแจงกระแสบนสายอากาศจะมีค่าสูงสุดที่ตรงกลางสายและมีค่าต่ำสุดที่ปลายสายอากาศทั้งสองข้าง ซึ่ง การลดลงของกระแสจะเริ่มลดจากตรงกลางไปหาปลายสายอากาศทั้งสองข้าง เมื่อพิจารณาขนาดของกระแสจากแหล่งกำเนิดทั้งสองแบบจะพบว่า อัตราการลดลงของกระแสจากตรงกลางสายไปยังปลายทั้งสองข้างของสายอากาศระหว่างแหล่งกำเนิดแบบสนามแม่เหล็กและแหล่งกำเนิดแบบช่องว่างเคลตาที่อยู่ในระดับเดียวกันเป็นอัตราส่วนประมาณ 1.5:1 โดยที่ขนาดรัศมีเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสเพิ่มสูงขึ้น เมื่อสายอากาศมีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้การแจกแจงกระแสบนสายอากาศใกล้เคียงรูปไซน์

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดที่ได้นำเสนอนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นการจำลองทางทฤษฎีเท่านั้น ในการใช้งานจริงอาจมีปัจจัยภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น ภูมิอากาศ สภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆที่อาจทำให้ผลการวิเคราะห์นี้มีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง หากต้องการที่จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมรรถนะขณะปฏิบัติงานได้ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ก็สามารถทำได้โดยการวัดและทดสอบกับอุปกรณ์จริง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Warren L. Stutzman and Gary A. Thiele. (1998). **Antenna Theory Analysis and Design**. (Second edition). United States of America : John Wiley & Sons.
- [2] Constantine A. Balanis. (2005). **Antenna Theory Analysis and Design**. (3<sup>rd</sup> Ed). United States of America : John Wiley & Sons.
- [3] John H. Mathews and Kurtis D. Fink. (2004). **NUMERICAL METHODS USING MATLAB**. (Fourth Edition). United States of America : Pearson Prentice Hall.
- [4] ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร. (2547). **การวิเคราะห์สายอากาศ**. (พิมพ์ครั้งที่1). กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ และคณะ. (2551). **การใช้งานโปรแกรม MATLAB เบื้องต้น**. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] พรชัย พุกอุต. (2550). **การวิเคราะห์กลุ่มสายอากาศเส้นตรงระยะห่างคงรูปและแอมพลิจูดไม่คงรูป**. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

16733522

๒๕.

๑1449

2553

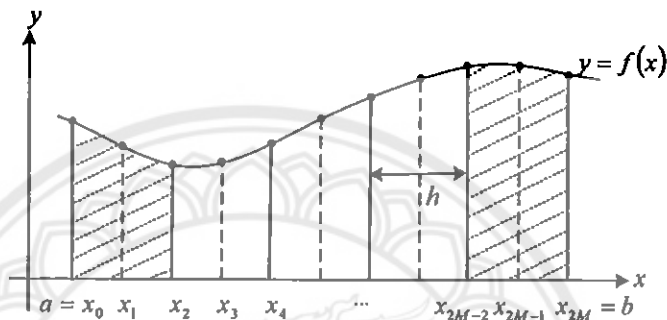


## การอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยใช้กฎซิมป์สัน

พิจารณาการอินทิเกรตฟังก์ชัน  $f(x)$  ช่วง  $[a, b]$  ตามสมการข้างล่างนี้

$$\int_a^b f(x) dx \approx s(f, h) \quad (\text{ก.1})$$

เพื่อหาค่าของการอินทิเกรตสมมติให้  $[a, b]$  แบ่งย่อยออกเป็น  $2M$  ในส่วนย่อย  $[x_k, x_{k+1}]$  ด้วยความกว้างเท่ากันที่  $h = (b-a)/2M$  โดยใช้  $x_k = a + kh$  สำหรับ  $k = 0, 1, \dots, 2M$  แสดงได้ดังรูปที่ ก.1



รูป ก.1 การแบ่งช่วงของการอินทิเกรตแบบซิมป์สัน

ดังนั้นค่าของการอินทิเกรตจากส่วนประกอบของซิมป์สันตั้งแต่ช่วง  $a$  ถึง  $b$  สามารถประมาณได้จาก

$$S(f, h) = \frac{h}{3} \sum_{k=1}^M (f(x_{2k-2}) + 4f(x_{2k-1}) + f(x_{2k})) \quad (\text{ก.2})$$

หรือ

$$S(f, h) = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + \dots + 2f_{2M-2} + 4f_{2M-1} + f_{2M}) \quad (\text{ก.3})$$

หรือ

$$S(f, h) = \frac{h}{3} (f(a) + f(b)) + \frac{2h}{3} \sum_{k=1}^{M-1} f(x_{2k}) + \frac{4h}{3} \sum_{k=1}^M f(x_{2k-1}) \quad (\text{ก.4})$$

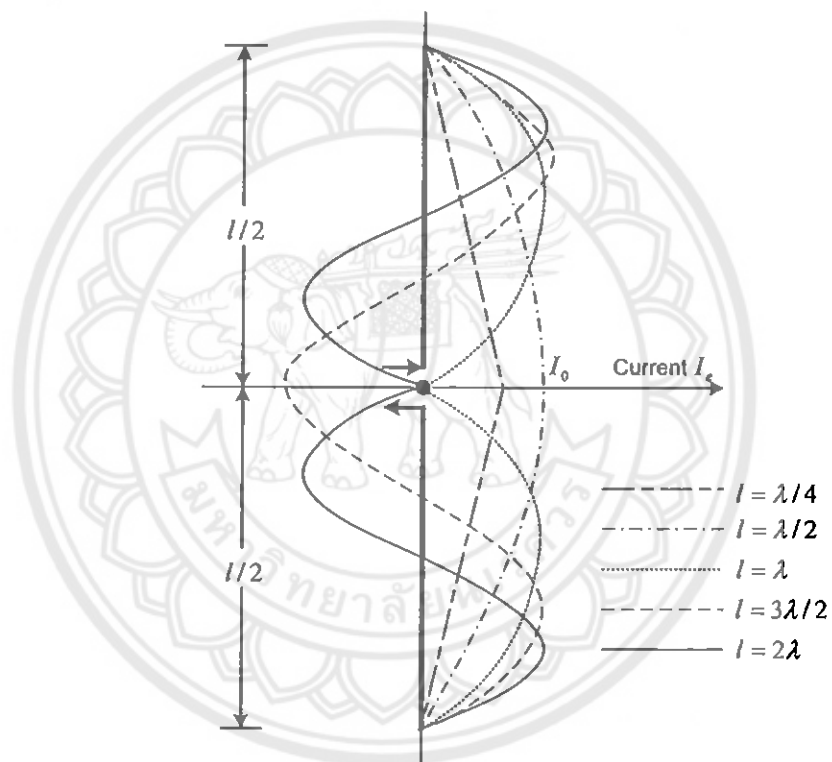


### การแจกแจงกระแสบนสายอากาศ

สำหรับสายอากาศไดโพลที่บางมากๆ การกระจายของกระแสสามารถเขียนได้เป็น

$$I_e(x'=0, y'=0, z') = \begin{cases} \hat{a}_z I_0 \sin \left[ k \left( \frac{l}{2} - z' \right) \right], & 0 \leq z' \leq l/2 \\ \hat{a}_z I_0 \sin \left[ k \left( \frac{l}{2} + z' \right) \right], & -l/2 \leq z' \leq 0 \end{cases} \quad (\text{ข.1})$$

การแจกแจงของกระแสในสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การแจกแจงกระแสตามความยาวของสายอากาศเส้นลวด



ภาคผนวก ก

ตักยเชิงเวกเตอร์ A สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า J

## ศักย์เชิงเวกเตอร์ $\mathbf{A}$ สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า $\mathbf{J}$

ศักย์เชิงเวกเตอร์  $\mathbf{A}$  ถูกสมมติว่าเกิดมาจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $\mathbf{J}$  ในทางกายภาพ ความหนาแน่นฟลักซ์จะมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{ก.1})$$

การหมุนวนของฟลักซ์สามารถแทน  $\mathbf{B}$  เวกเตอร์อีกตัวหนึ่ง ทำให้ได้สมการต่อไปนี้

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0 \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ  $\mathbf{A}$  คือศักย์เชิงเวกเตอร์ดังนั้นจะกำหนดให้

$$\mathbf{B}_A = \mu \mathbf{H}_A = \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{ก.3})$$

หรือ

$$\mathbf{H}_A = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{ก.4})$$

แทน (ก.4) ลงในสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \mathbf{E}_A = -j\omega\mu \mathbf{H}_A \quad (\text{ก.5})$$

จะได้

$$\nabla \times \mathbf{E}_A = -j\omega\mu \mathbf{H}_A = -j\omega \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{ก.6})$$

สมการ (ก.6) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\nabla \times [\mathbf{E}_A + j\omega \mathbf{A}] = 0 \quad (\text{ก.7})$$

สำหรับการหมุนวนของเวกเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$\nabla \times (-\nabla \phi_e) = 0 \quad (\text{ก.8})$$

ทำให้สมการ (ก.7) เปลี่ยนเป็น

$$\mathbf{E}_A + j\omega \mathbf{A} = -\nabla \phi_e \quad (\text{ก.9})$$

หรือนำสมการ (ก.9) มาเขียนใหม่เป็น

$$\mathbf{E}_A = -\nabla \phi_e - j\omega \mathbf{A} \quad (\text{ก.10})$$

$\phi_e$  คือ ศักย์ไฟฟ้าเชิงสเกลลาร์ (electric scalar potential) ซึ่งเป็นฟังก์ชันในแต่ละตำแหน่ง



เมื่อนำสมการ (ค.4) มาคูณเข้าทั้งสองข้างของสมการ (ค.10) โดยใช้เอกลักษณ์การคูณเวกเตอร์จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (\text{ค.11})$$

แทน  $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}_A$  ลงในสมการ (ค.9) ได้

$$\nabla \times (\mu \mathbf{H}_A) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (\text{ค.12})$$

นำ  $\mu$  มาหารตลอดสมการ (ค.12) จะได้เป็น

$$\nabla \times \mathbf{H}_A = \frac{1}{\mu} [\nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}] \quad (\text{ค.13})$$

จะพบว่า  $\nabla \times \mathbf{H}$  มีความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิด  $\mathbf{J}$  และ  $\mathbf{E}$  ตามสมการของแมกซ์เวลล์ คือ

$$\nabla \times \mathbf{H}_A = \mathbf{J} + j\omega \epsilon \mathbf{E}_A \quad (\text{ค.14})$$

แทนสมการ (ค.14) ลงในสมการ (ค.13) พร้อมจัดรูปสมการได้

$$\mu \mathbf{J} + j\omega \mu \epsilon \mathbf{E}_A = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (\text{ค.15})$$

เมื่อแทนสมการ (ค.10) ลงในสมการ (ค.15) จะได้

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} &= -\mu \mathbf{J} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) + \nabla(j\omega \mu \epsilon \phi_e) \\ &= -\mu \mathbf{J} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A} + j\omega \mu \epsilon \phi_e) \end{aligned} \quad (\text{ค.16})$$

เมื่อ  $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$

เพื่อความง่ายจะกำหนดให้สมการ (ค.16) มีค่าเป็น

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = -j\omega \mu \epsilon \phi_e \Rightarrow \phi_e = \frac{-1}{j\omega \mu \epsilon} \nabla \cdot \mathbf{A} \quad (\text{ค.17})$$

สมการ (ค.17) มีชื่อเรียกว่า เงื่อนไขลอเรนซ์ (Lorentz condition)

แทนสมการ (ค.17) ลงใน (ค.16) จะสมการดังนี้

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (\text{ค.18})$$

เมื่อได้ค่า  $\mathbf{A}$  จากสมการ (ค.18) แล้ว จะสามารถหา  $\mathbf{E}$  ได้จาก

$$\mathbf{E}_A = -\nabla \phi_e - j\omega \mathbf{A} = -j\omega \mathbf{A} - \frac{-1}{j\omega \mu \epsilon} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) \quad (\text{ค.19})$$

สมการ (ค.19) จะได้รับการนำไปใช้ในพิจารณาการกระเจิงของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแส  $\mathbf{J}_s$  ในบทที่ 2



ภาคผนวก ง

โปรแกรมวิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดแบบเส้นตรง

มหาวิทยาลัยนเรศวร

## โปรแกรมวิเคราะห์สายอากาศเส้นทวดแบบเส้นตรง

### โปรแกรมหาค่าส่วนประกอบ (element Zmn)

การหาค่าส่วนประกอบของ [Zmn] จะใช้จากสมการ (2.18) ร่วมกับหลักเกณฑ์ของซิมป์สันในสมการที่ (ก.3) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

\*\*\*\*\*

```
clear all
clc

%*****
%constant
%*****
c=299792458;
w=2*pi*c;

%*****
%Initialization
%*****
N=5;           %number of segments
M=100;
l=0.1;        %length of antenna
a=0.005;      %radius of wire
b=2.3*a;
e0=8.854*1e-12; %free space permittivity
beta=(2*pi);  %wave number
Dz=l/N;       %length of a segment

zmn=zeros(N,N);
for ii=1:N
    z(ii)=(ii-((N+1)/2))*Dz; %position of each segment
    upper(ii)=z(ii)+(Dz/2);
    lower(ii)=z(ii)-(Dz/2);
    step(ii)=(upper(ii)-lower(ii))/(2*M);
    for kk=1:(2*M)+1
        z1(ii,kk)=lower(ii)+(kk-1)*step(ii); %position of z'
    end
end

for xx=1:N

    for yy=1:N
        temp99=0;
        for zz=1:(2*M)+1
            h=(upper(yy)-lower(yy))/(2*M);
            temp1(xx)=z(xx); %position of z
            temp2(yy,zz)=z1(yy,zz); %position of z'
            temp3(yy,zz)=temp1(xx)-temp2(yy,zz);
            big_r2(yy,zz)=sqrt(temp3(yy,zz)*temp3(yy,zz)+a*a);

            temp4(yy,zz)=1+j*beta*big_r2(yy,zz);
            temp5(yy,zz)=2*big_r2(yy,zz)*big_r2(yy,zz)-3*a*a;
            temp6(yy,zz)=temp4(yy,zz)*temp5(yy,zz);
```







## โปรแกรมการแจกแจงของกระแสเมื่อเปลี่ยนจำนวนท่อน (Segment)

การแจกแจงกระแสบนสายอากาศโดยเปลี่ยนจำนวนท่อนหาได้จากการนำค่าของกระแสที่ได้จากโปรแกรมข้างต้นมาวาดกราฟ ซึ่งจะมีเปลี่ยนจำนวนท่อนให้มากขึ้นเพื่อดูการแจกแจงกระแสบนสายอากาศ ซึ่งเขียน โปรแกรม ได้ดังนี้

\*\*\*\*\*

```
clear all
```

```
clc
```

```
%*****
```

```
%constant
```

```
%*****
```

```
c=299792458;
```

```
w=2*pi*c;
```

```
%*****
```

```
%Initialization
```

```
%*****
```

```
N=input('Enter of N = '); %number of segments
```

```
M=input('Enter of M = '); %number of subinterval
```

```
l=0.1; %length of antenna
```

```
a=0.005; %radius of wire
```

```
b=2.3*a;
```

```
e0=8.854*1e-12; %free space permittivity
```

```
beta=(2*pi); %wave number
```

```
Dz=l/N; %length of a segment
```

```
zmn=zeros(N,N);
```

```
for ii=1:N
```

```
z(ii)=(ii-((N+1)/2))*Dz; %position of each segment
```

```
upper(ii)=z(ii)+(Dz/2);
```

```
lower(ii)=z(ii)-(Dz/2);
```

```
step(ii)=(upper(ii)-lower(ii))/(2*M);
```

```
for kk=1:(2*M)+1
```

```
z1(ii,kk)=lower(ii)+(kk-1)*step(ii);%position of z'
```

```
end
```

```
end
```

```
for xx=1:N
```

```
for yy=1:N
```

```
temp99=0;
```

```
for zz=1:(2*M)+1
```

```
h=(upper(yy)-lower(yy))/(2*M);
```

```
temp1(xx)=z(xx); %position of z
```

```
temp2(yy,zz)=z1(yy,zz); %position of z'
```

```
temp3(yy,zz)=temp1(xx)-temp2(yy,zz);
```

```
big_r2(yy,zz)=sqrt(temp3(yy,zz)*temp3(yy,zz)+a*a);
```

```
temp4(yy,zz)=1+j*beta*big_r2(yy,zz);
```

```
temp5(yy,zz)=2*big_r2(yy,zz)*big_r2(yy,zz)-3*a*a;
```

```
temp6(yy,zz)=temp4(yy,zz)*temp5(yy,zz);
```





## โปรแกรมการแจกแจงกระแสบนสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมี

โปรแกรมนี้นี้เขียนเช่นเดียวกับการแจกแจงกระแสเมื่อเปลี่ยนจำนวนท่อน เพียงแต่เปลี่ยนจากจำนวนท่อนเป็นขนาดรัศมีเท่านั้น เขียน โปรแกรม ได้ดังนี้

\*\*\*\*\*

```
clear all
clc
```

```
%*****
```

```
%constant
```

```
%*****
```

```
c=299792458;
```

```
w=2*pi*c;
```

```
%*****
```

```
%Initialization
```

```
%*****
```

```
N=30; %number of segments
```

```
M=100;
```

```
l=0.1;
```

```
%length of antenna
```

```
a=input('Enter radius of wire antenna a = '); %radius of wire
```

```
antenna
```

```
b=2.3*a;
```

```
e0=8.854*1e-12; %free space permittivity
```

```
beta=(2*pi); %wave number
```

```
Dz=l/N; %length of a segment
```

```
zmn=zeros(N,N);
```

```
for ii=1:N
```

```
z(ii)=(ii-(N+1)/2)*Dz; %position of each segment
```

```
upper(ii)=z(ii)+(Dz/2);
```

```
lower(ii)=z(ii)-(Dz/2);
```

```
step(ii)=(upper(ii)-lower(ii))/(2*M);
```

```
for kk=1:(2*M)+1
```

```
z1(ii, kk)=lower(ii)+(kk-1)*step(ii); %position of z'
```

```
end
```

```
end
```

```
for xx=1:N
```

```
for yy=1:N
```

```
temp99=0;
```

```
for zz=1:(2*M)+1
```

```
h=(upper(yy)-lower(yy))/(2*M);
```

```
temp1(xx)=z(xx); %position of z
```

```
temp2(yy, zz)=z1(yy, zz); %position of z'
```

```
temp3(yy, zz)=temp1(xx)-temp2(yy, zz);
```

```
big_r2(yy, zz)=sqrt(temp3(yy, zz)*temp3(yy, zz)+a*a);
```

```
temp4(yy, zz)=1+j*beta*big_r2(yy, zz);
```

```
temp5(yy, zz)=2*big_r2(yy, zz)*big_r2(yy, zz)-3*a*a;
```

```
temp6(yy, zz)=temp4(yy, zz)*temp5(yy, zz);
```



## โปรแกรมการแจกแจงกระแสบนสายอากาศเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น

โปรแกรมนี้นี้เขียนเช่นเดียวกับการแจกแจงกระแสเมื่อเปลี่ยนจำนวนท่อน เพียงแต่เปลี่ยนจากจำนวนท่อนเป็นความยาวคลื่น เขียนโปรแกรมได้ดังนี้

\*\*\*\*\*

```
clear all
clc

%*****
%constant
%*****
c=299792458;
w=2*pi*c;

%*****
%Initialization
%*****

N=30;%number of segments

M=input('Enter number of subinterval M = ');

l=input('Enter wavelength l = '); %length of antenna
a=0.005; %radius of wire
b=2.3*a;
e0=8.854*1e-12; %free space permittivity
beta=(2*pi); %wave number
Dz=1/N; %length of a segment

zmn=zeros(N,N);
for ii=1:N
    z(ii)=(ii-((N+1)/2))*Dz; %position of each segment
    upper(ii)=z(ii)+(Dz/2);
    lower(ii)=z(ii)-(Dz/2);
    step(ii)=(upper(ii)-lower(ii))/(2*M);
    for kk=1:(2*M)+1
        z1(ii,kk)=lower(ii)+(kk-1)*step(ii);%position of z'
    end
end

for xx=1:N

    for yy=1:N
        temp99=0;
        for zz=1:(2*M)+1
            h=(upper(yy)-lower(yy))/(2*M);
            temp1(xx)=z(xx); %position of z
            temp2(yy,zz)=z1(yy,zz);%position of z'
            temp3(yy,zz)=temp1(xx)-temp2(yy,zz);
            big_r2(yy,zz)=sqrt(temp3(yy,zz)*temp3(yy,zz)+a*a);

            temp4(yy,zz)=1+j*beta*big_r2(yy,zz);
            temp5(yy,zz)=2*big_r2(yy,zz)*big_r2(yy,zz)-3*a*a;
            temp6(yy,zz)=temp4(yy,zz)*temp5(yy,zz);

            temp7(yy,zz)=beta*beta*a*a*big_r2(yy,zz)*big_r2(yy,zz);
            temp8(yy,zz)=temp6(yy,zz)+temp7(yy,zz); %
```





## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวกนิงนิตย์ สุวรรณแสง  
ภูมิลำเนา 107 หมู่ 3 ต.ท่าสะแก อ.ชาติตระการ จ.พิษณุโลก  
ประวัติการศึกษา

- จบระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา ภาคเหนือ จังหวัดพิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: [k\\_suwanasaeng@hotmail.co.th](mailto:k_suwanasaeng@hotmail.co.th)

