

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์โปรแกรมจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยใช้วิธี FDTD

Analysis the Simulator Antenna Pattern Programming by using FDTD Method



โดย

นาย สาวิช อ้นยาวาทพานิชย์ 40013387

น.ส. หัสนา พูลบุญโรจน์ 40013395

เลขหน้.....
เลขทะเบียน.....36847
วัน, เดือน, ปี..... 29 ส.ค. 2543

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การวิเคราะห์โปรแกรมจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น
ของสายอากาศโดยใช้วิธี FDTD

จัดทำโดย

นาย สาวิช อ้นยวาทพานิชย์
น.ส. หัสนา พูลบุญโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. นภพินท์ อนันตรศิริชัย

รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช

ภาควิชา

เทคนิคอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2542

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตร
บัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

ประธานกรรมการ
(ผศ. ประดิษฐ์ วัชรพิบูลย์)
กรรมการ
(ผศ. วิชัย สุรพัฒน์)
กรรมการ
(ผศ. ไพศาล สิทธิโยภาสกุล)
กรรมการ
(อ. มนต์ชัย แซ่มะฮ้อย)
กรรมการ
(อ. พิชญ์ สุพรรณกุล)
กรรมการ
(อ. สุธีรา พันธุ์ธีรารักษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์โปรแกรมจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยใช้วิธี FDTD

โดย นาย สาวิช อੰนยาวาทพานิชย์ 40013387
น.ส.หัสนา พูลบุญโรจน์ 40013395

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.นภพินท์ อนันตรศิริชัย
รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช

ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

ในปฏิญานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์โปรแกรมจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยใช้วิธี FD-TD (Finite difference time domain) โดยในที่นี้เราจะเน้นวิเคราะห์เพียงสายอากาศไดโพลเท่านั้น โปรแกรมนี้เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรนตามขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ FD-TD ดังนั้นผลที่ได้จากโปรแกรมจะเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขซึ่งสามารถนำมาสร้างภาพแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ โดยแบ่งส่วนที่วิเคราะห์เป็นสามส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1: โปรแกรมหลักที่ใช้ในการคำนวณวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลข

ส่วนที่ 2: ไฟล์กำหนดข้อมูลอินพุท ซึ่งใช้ร่วมกับ โปรแกรมหลักในส่วนที่ 1

ส่วนที่ 3: ไฟล์ข้อมูลเชิงตัวเลข ซึ่งได้จากการรัน โปรแกรมหลักซึ่งจะนำไปแสดงกราฟ

**ANALYSIS THE SIMULATOR ANTENNA PATTERN PROGRAMMING
BY USING FDTD METHOD**

BY MR. SAWICH UNYAVATPANICH 40013387

MISS HUSSANA POONBUNROJ 40013395

ADVISOR MISS NOPPIN ANANTRASICHAJ

ASSOC.PROF.DR. KNOK JANCHITRAPONGVEJ

ACADEMIC YEAR 1999

ABSTRACT

This thesis analyzed the antenna pattern programming simulator by using FD-TD (Finite-difference time domain) method. Herein, we scope to the analyze of dipole antenna. In order to meet the FD-TD algorithm, the programming language is written in FORTRAN. From there numerical data, then graphic pictures of propagation characteristic are created.

The thesis contents consist of 3 major parts

Part1: The main program, which use to calculating the numerical solution

Part2: The input data file for FD-TD simulation program in part 1

Part3: The numerical data file, which is the output solution of program in part1

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ นภพินท์ อนันตรศิริรัช และ รศ.ดร. กนก เจนจิระพงศ์
เวช ที่ให้คำแนะนำในการทำโครงการชิ้นนี้ และให้คำปรึกษาเพื่อเป็นแนวทางทางในการแก้ไขและ
ดูแลตรวจสอบจนโครงการวิศวกรรมฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้อง
กับโครงการนี้ทุกท่านรวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ด้วย หากโครงการนี้ มีข้อผิดพลาดประการ
ใด ทางคณะผู้จัดทำต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณอย่างสูง
คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

บทคัดย่ออังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

สารบัญรูป

บทที่ 1 บทนำ

- | | |
|-------------------------------------|-----|
| 1.1 แนวความคิดในการทำปริยุฏฐานิพนธ์ | 1-1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของปริยุฏฐานิพนธ์ | 1-1 |
| 1.3 ขอบเขตของปริยุฏฐานิพนธ์ | 1-1 |

บทที่ 2 ทฤษฎีสายอากาศ

- | | |
|-----------------------------------|------|
| 2.1 พื้นฐานสายอากาศ | 2-4 |
| 2.2 สายอากาศเส้นลวดตรง | 4-9 |
| 2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ | 9-25 |

บทที่ 3 Finite Differenct Time Domain Method

- | | |
|---|-------|
| 3.1 ตัวแปรพื้นฐาน FD-TD | 26-27 |
| 3.2 สมการแมกซ์เวลล์และขั้นตอนวิธีของยี่ | 27-36 |
| 3.3 รูปแบบการแยกสนามออกจากกัน | 36-39 |
| 3.4 สูตรทาง FDTD ในตัวนำสมบูรณ์ | 39-40 |

บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานและผลการดำเนินงาน 41-52

บทสรุป

อุปสรรคและปัญหา

บรรณานุกรม

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. โปรแกรมหลัก (QFDTD.๓)

ภาคผนวก ข. โปรแกรมกำหนดข้อมูลอินพุทของโปรแกรมหลัก

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ	3
รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	3
รูปที่ 2.3 แสดงแหล่งกำเนิดสายส่งสัญญาณสายอากาศและการคืนเส้นสนามไฟฟ้าออกไป	5
รูปที่ 2.4 แสดงเส้นสนามไฟฟ้าของคลื่นในอากาศของสายอากาศที่ยาว $\lambda/2$ ที่เวลา $t = 0, T/8, T/4, 3T/8$	6
รูปที่ 2.5 แสดงการแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าบนลวดตัวนำขนาด $\lambda/2$	7
รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแวนอน $\lambda/2$	7
รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบและการคืนของเส้นสนามไฟฟ้าของไดโพลขนาดสั้น ($T = \text{period}$)	8
รูปที่ 2.8 แสดงการแจกกระจายของสายอากาศไดโพลที่ความยาวต่างๆ	9
รูปที่ 2.9 แสดงระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	10
รูปที่ 2.10 แสดงระบบพิกัดสำหรับพล็อตแพทเทิร์นสายอากาศวงกลมแต่ละวงกลมแต่ ละวงจะมีจุดศูนย์กลางร่วมกันและถูกแบ่งในหน่วยเดซิเบล โดยขนาดนอกสุดมีค่า 0 เดซิเบล	10
รูปที่ 2.11 แสดงแพทเทิร์นหลักของสนาม E และ H ของสายอากาศปากแตร	11
รูปที่ 2.12 Plane directive diagram (E-plane) ของสายอากาศครึ่งความยาวคลื่น	12
รูปที่ 2.13 Directive diagram ของไดโพลในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนขดลวด (H-plane)	12
รูปที่ 2.14 (A) Directive diagram เบื้องต้นในระนาบที่บรรจุแกนลวด ความยาวแต่ละ เส้นประ ลูกศรแสดงความแรงสนามในทิศทางนั้น อ้างอิงกับทิศทาง การแพร่กระจายสูงสุด (B) Solid Pattern ของสนามอันเดียวกัน ไดอะแกรมนี้ประยุกต์สำหรับ สายอากาศทุกอันที่ความยาวน้อยกว่าครึ่งความยาวคลื่นมากๆ	13
รูปที่ 2.15 แพทเทิร์นของสายอากาศชี้ทิศทาง (Omnidirectional Antenna)	14
รูปที่ 2.16 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบและวงรีโพลาริเซชันที่เป็นฟังก์ชัน ของเวลาในระนาบ $Z=0$	14
รูปที่ 2.17 แสดงโพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ	17
รูปที่ 2.18 เวกเตอร์หน่วยโพลาริเซชันของคลื่นตกกระทบ (\bar{p}_w) และสายอากาศ (\bar{p}_a) และ Polarization loss factor (PLF)	17
รูปที่ 2.19 แสดงแพทเทิร์นสายอากาศไดโพล ที่มีการแจกกระจายรูปแบบเป็นแบบไซนู	20

	ชอยคอด $\ell = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4, \lambda$	
รูปที่ 2.20	แสดงแพทเทิร์นของสายอากาศไดโพลยาว 1.25λ ที่มีการแรงแบบรูปกระแสบางแบบไซนูซอยคอด	21
รูปที่ 2.21	แสดงการแรงแบบรูปกระแสดำเนินตามไดโพลที่มีความยาวต่างๆ	21
รูปที่ 2.22	แสดงความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นและไดเรคทีวิตีของสายอากาศไดโพลที่มีการแรงแบบรูปกระแสบางแบบไซนูซอยคอด	22
รูปที่ 2.23	แสดงการแรงแบบรูปกระแสดำเนินของสายอากาศเมื่อค่ากระแสสูงสุดไม่ได้อยู่ที่ขั้วสายอากาศ	24
รูปที่ 3.1	แสดงตำแหน่งของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของเซลล์สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ของอี	30
รูปที่ 3.2	แสดงตำแหน่งและชั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณหา \bar{E} และ \bar{H}	31
รูปที่ 4.1	FLOW CHART แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	43
รูปที่ 4.2	แสดงลักษณะของบล็อกที่กำหนดโดยไฟล์ DIM.INC	44
รูปที่ 4.3	แสดงลักษณะการแบ่งชั้นเพื่อวิเคราะห์ในโปรแกรม QFDTD	45
รูปที่ 4.4	แสดงลักษณะการวางสายอากาศและจุดป้อนสัญญาณ	45
รูปที่ 4.5	แสดงลักษณะของเกาส์เซียนพัลส์ที่จุดป้อนสัญญาณ	46
รูปที่ 4.6	แสดงลักษณะกระแสที่จุดป้อนสัญญาณ	46
รูปที่ 4.7	แสดงสนามไฟฟ้าในเชิงขนาดที่จุดป้อนตามแนวแกน x,y,z ที่ชั้นเวลาที่ 5	47
รูปที่ 4.8	แสดงสนามไฟฟ้าในเชิงขนาดที่จุดป้อนตามแนวแกน x,y,z ที่ชั้นเวลาที่ 7	48
รูปที่ 4.9	แสดงสนามไฟฟ้าในเชิงขนาดที่จุดป้อนตามแนวแกน x,y,z ที่ชั้นเวลาที่ 8	49
รูปที่ 4.10	แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลขนาด $\lambda/2$ ในระนาบ XY	50
รูปที่ 4.11	แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลขนาด $\lambda/2$ ในระนาบ XZ	51
รูปที่ 4.12	แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลขนาด $\lambda/2$ ในระนาบ YZ	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดในการทำปริยุฎาณิพนธ์

ในการศึกษาเรื่องสายอากาศ ความสามารถในการรับและส่งคลื่นเป็นหัวใจหลักในการออกแบบและทดสอบ แต่เนื่องจากในทางทฤษฎี การศึกษารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในอากาศเป็นเรื่องที่เราไม่สามารถมองเห็นด้วยตาได้ จึงมีความคิดที่จะนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการแสดงภาพเพื่อสร้างความเข้าใจให้ชัดเจนขึ้น

วิธี FD-TD (The Finite-Difference Time-Domain Method) เป็นวิธีประมวลผลเชิงตัวเลขในโดเมนเวลา นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการแก้ปัญหาอนุพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งนิยมใช้กันแพร่หลาย และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์น้อยลง จึงเป็นที่ยอมรับได้มาก

1.2 วัตถุประสงค์ของปริยุฎาณิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเส้นลวดตรงขนาดครึ่งความยาวคลื่น โดยนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ และแสดงรูปภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศให้เห็นได้ชัดเจน และเปรียบเทียบผลที่ได้กับทฤษฎี
- 2) เพื่อศึกษาภาษาฟอร์แทรน(FORTRAN) เข้าใจคำสั่ง,การทำงาน และสามารถแก้ไขโปรแกรมที่นำมาใช้งานให้สมบูรณ์ได้
- 3) เพื่อสร้างเสริมนิสัยการค้นคว้าและฝึกหัดการทำงานวิจัยและวิเคราะห์

1.3 ขอบเขตของปริยุฎาณิพนธ์

ในโครงการนี้จะเป็นการวิเคราะห์,ศึกษา และแก้ไขโปรแกรมวิเคราะห์คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยวิธี FD-TD ซึ่งเขียนโดยภาษาฟอร์แทรนให้สามารถใช้งานได้ โดยผลที่ได้จากโปรแกรมจะเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข เพื่อนำไปสร้างภาพกราฟฟิกแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโคโพล โดยในโครงการนี้จะไม่เข้าไปลึกถึงวิธีการของ FD-TD มากนัก แต่จะศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไข โปรแกรมภาษาฟอร์แทรนให้สามารถแสดงแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นออกมาได้ผลที่สมบูรณ์

บทที่ 2

ทฤษฎีสายอากาศ

2.1 พื้นฐานสายอากาศ

สายอากาศคือ ตัวเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(คลื่นวิทยุ) หรือ คือตัวเปลี่ยนคลื่นวิทยุให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเข้าเครื่องรับ

ในระบบสื่อสารใดๆ เราต้องการให้สัญญาณที่ปลายทางมีความแรงมากๆ อย่างน้อยที่สุดก็ต้องเอาชนะสัญญาณรบกวนได้ และอยู่ในเกณฑ์ความไวของเครื่องจะทำงานได้

นอกจากนี้สายอากาศส่งต้องมีคุณสมบัติ คือ แมตซ์กับสายนำสัญญาณเพื่อให้กำลังงานมากที่สุดผ่านเข้าสายอากาศ ส่วนสายอากาศรับต้องมีค่าอัตรายายให้มากที่สุด(รวมทั้งค่าไคเร็คติวิตี) และมีไซด์โลบน้อยที่สุดด้วย

การแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศ

เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กจะมีทิศทางเปลี่ยนตามไปด้วย สนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจะไปสร้างสนามไฟฟ้าให้มีขึ้นมาตามสมการ

MAXWELL'S EQUATIONS

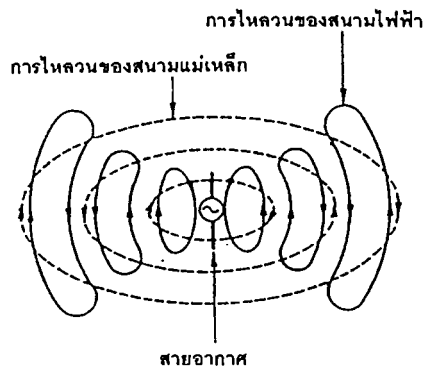
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

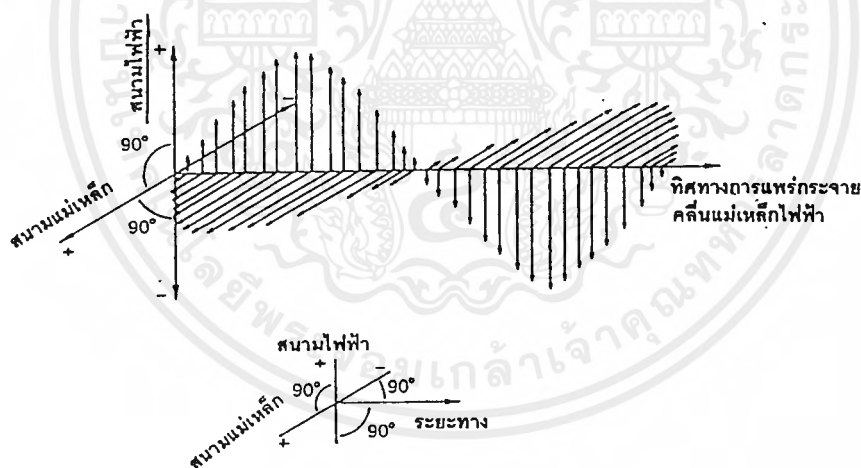
ทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ดังนั้นถ้าป้อนกระแสไฟสลับ (A.C.) ผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กขึ้น โดยทั้งสองสนามแพร่ออกจากลวดตัวนำด้วยความเร็วแสง (3×10^8 m/s)



รูปที่ 2.1 แสดงการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ

พลังงานที่แพร่กระจายคลื่น ไปมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มในค่าความถี่ เราเรียกพลังงานส่วนนี้ว่าสนามพลังงานที่แพร่กระจายซึ่งอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าทำมุมฉากซึ่งกันและกันรวมทั้งยังตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ด้วยดังรูปที่

2.2



รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อวิเคราะห์ภายในสายอากาศพบว่าพลังงานสนามเกิดขึ้น 2 อย่าง

- สนามพลังเหนี่ยวนำ แทนพลังงานส่วนที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศและไม่แพร่กระจายออกไป
- สนามพลังที่แพร่กระจาย แทนส่วนที่แพร่จากสายอากาศไป ที่มีปริมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่น และเป็นสัดส่วนกลับกันของระยะทางที่ไกลจากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของสายอากาศ

ในวงจรไฟฟ้าธรรมดา ขนาดของขดลวด, ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์อื่นๆ จะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวของคลื่นของค่าความถี่ที่ใช้งานและพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ก็ยังคงอยู่ภายในวงจร เพื่อนำไปใช้งานให้มีประสิทธิภาพหรือแปลงออกมาในรูปความร้อน

แต่ถ้าขนาดของตัวนำหรืออุปกรณ์มีขนาดพอเหมาะเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นพบว่ามีพลังงานบางส่วนออกไปจากวงจรในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และถ้าวงจรนั้นถูกออกแบบให้พลังงานส่วนใหญ่ของวงจรถูกแพร่ออกไป เราแทนวงจรชนิดนี้ว่า สายอากาศ (antenna)

โดยทั่วไปสายอากาศประกอบด้วยตัวนำในหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่แล้วมักใช้ลวดตัวนำ (wire) มีบางแบบที่ใช้แท่งตัวนำ (rod) หรือท่อตัวนำ (tube)

ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากลวดตัวนำมีค่าขึ้นกับความยาวของลวดตัวนำกับขนาดของกระแสที่ไหลอยู่ภายในและยังขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมลวดตัวนำด้วย แต่สะดวกที่จะวัดในรูปกระแสมากกว่า

ดังนั้นกล่าวได้ว่าความเข้มสนามเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของกระแส

ในวงจรทั่วไปจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ ถ้าค่ารีแอกแตนซ์น้อยลงจนหมดไป ทำให้กระแสในวงจรมีค่ามากที่สุด คือเรียกว่า วงจรรีโซแนนซ์ (resonant) ที่ความถี่ใช้งาน ดังนั้นเกิดการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด นั่นคือสายอากาศดูรีโซแนนซ์

2.2 สายอากาศเส้นลวดตรง (LINEAR WIRE ANTENNA)

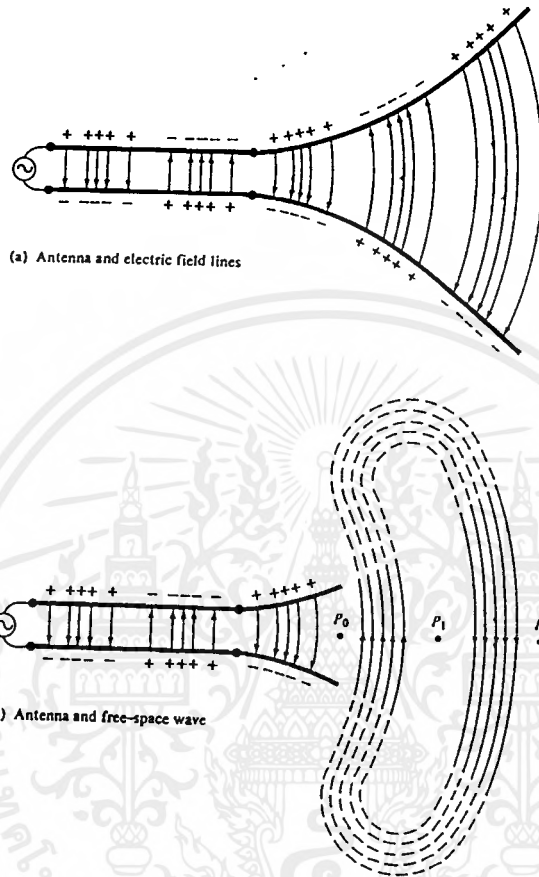
ลวดตัวนำ “wire” หมายถึงตัวนำชนิดที่มีขนาดของภาคตัดขวางเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวของมัน สายอากาศเส้นลวดตรงเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่มีจะถูกนำมาใช้อธิบายเป็นเบื้องต้นในการพิจารณาคำนวณค่าต่างๆอยู่เสมอ หากเรานำสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าเส้นลวด(สายอากาศ) ถ้าลวดตัวนำมีขนาดยาวมากๆจะพบว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกระแส มีค่าน้อยลงเรื่อยๆตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการจางหายของพลังงาน จากการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งเปลี่ยนเป็นความร้อนภายในลวดตัวนำ เนื่องจากความต้านทานภายในลวดตัวนำ แต่ถ้าลวดตัวนำมีขนาดสั้นมากๆ จะพบว่าคลื่นมีการสะท้อนกลับที่ปลายแต่ละข้างเราจึงต้องมีการพิจารณาถึงขนาดของสายอากาศเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมกับความต้องการ

การแพร่กระจายคลื่นจากเส้นลวดสองเส้น

ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากลวดตัวนำมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวของลวดตัวนำ กับขนาดของกระแสที่ไหลอยู่ภายใน และยังขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมลวดตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย เมื่อเราต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับสายสัญญาณชนิดตัวนำสองเส้นซึ่งต่อกับสายอากาศดัง รูปที่ 2.3(a) แรงดันไฟฟ้าจะตกคร่อมลวดทั้งสอง จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำขึ้น



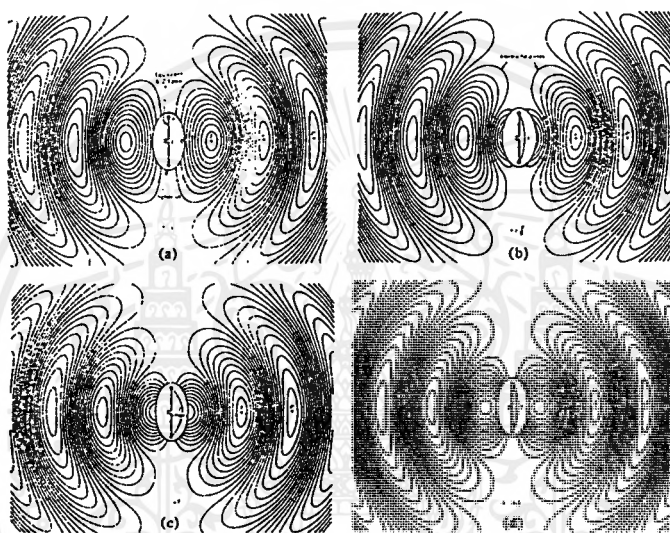
รูปที่ 2.3 แสดงแหล่งกำเนิด สายส่งสัญญาณ สายอากาศ และการคลื่นสนามไฟฟ้าออกไป

สนามไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับเส้นแรงไฟฟ้า ความแรงของสนามไฟฟ้าก็จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มสนามไฟฟ้า เส้นแรงไฟฟ้าจะมีผลตามพฤติกรรมของอิเล็กตรอนอิสระ ในแต่ละตัวนำและผลัดกันทำให้เกิดการแทนที่ขึ้นนั่นคือการเคลื่อนที่ของประจุ จะไปทำให้เกิดกระแส เป็นผลให้เกิดความเข้มสนามแม่เหล็ก สิ่งที่สัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็กคือ เส้นแรงแม่เหล็กซึ่งสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก กล่าวได้ว่าความเข้มของสนามเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของกระแส ดังนั้นจึงต้องพยายามให้มีกระแสมีขนาดมากเท่าที่เป็นไปได้ผ่านลวดตัวนำเพื่อให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด

เส้นแรงไฟฟ้าที่วาดอยู่ระหว่างตัวนำสองตัว เป็นการอธิบายถึง การกระจายของประจุ สมมติว่าแหล่งจ่ายแรงดันของเราเป็น Sinusoidal ก็จะได้ว่าสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำก็จะเป็น Sinusoidal ที่มีช่วงเวลา(period) เท่ากับของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้ ถ้าเราเปลี่ยนแปลงส่วนของโครง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างสายอากาศในรูปที่ 2.3(a) คลื่นในอากาศก็จะอยู่ในรูปของการ ต่อปลายเปิดของเส้นไฟฟ้า (แสดงด้วยเส้นประ) คลื่นจะออกเป็นระยะๆ แต่ phase คงที่และเคลื่อนที่ออกมาด้วยความเร็วแสง และเดินทางในระยะทาง $\lambda/2$ (จาก P_0 ถึง P_1) ในเวลาครึ่ง period ดัง รูปที่ 2.4 แสดง ให้เห็นภาพการ สร้างและการเดินทางของคลื่นในอากาศที่มีรูปทรงเป็น วงกลมรีที่มีจุดศูนย์กลางภายในเป็นระยะ ทาง $\lambda/2$ ซึ่ง λ ก็คือความยาวคลื่น คลื่นในอากาศของสายอากาศไดโพลที่ยาว $\lambda/2$ ซึ่งมีจุดป้อนอยู่ ตรงกลางของสายอากาศจะเป็นที่ยอมรับกัน



รูปที่ 2.4 แสดงเส้นสนามไฟฟ้าของคลื่นในอากาศของสายอากาศ ที่ยาว $\lambda/2$ ที่เวลา $t = 0, T/8, T/4, 3T/8$

ในวงจรถั่วไปจะประกอบด้วยพารามิเตอร์สองตัวคือค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ เราพบว่าถ้าค่ารีแอ็กแตนซ์ หดไป จะทำให้กระแสในวงจรมุ่งสูงขึ้น หรือที่เราเรียกว่าวงจรรีโซแนนซ์ ที่ความถี่ใช้งาน จึงทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด

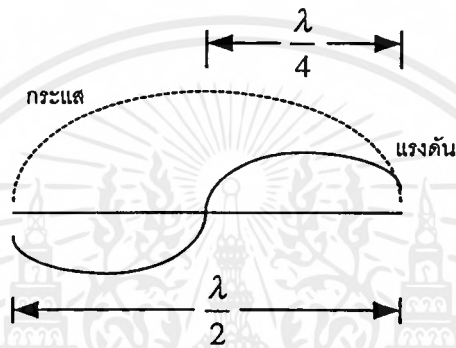
ขนาดที่สั้นที่สุดของลวดตัวนำที่รีโซแนนซ์ ที่ความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับ $\lambda/2$ (ให้สนามไฟฟ้าเดินทางจากปลายหนึ่ง ไปปลายอีกด้านหนึ่งและต้องกลับมาภายในเวลาหนึ่งไซเคิล) เรามีการ เลือกพิจารณา 2 แบบคือ

- ปรับค่าความถี่ให้เข้ากับความยาวลวดที่กำหนดมา
- ปรับค่าความยาวลวดให้เข้ากับความถี่ (ในทางปฏิบัติจะเลือกใช้วิธีนี้)

เราลองพิจารณาป้อนคลื่นวิทยุในสายอากาศเส้นลวดแบบ $\lambda/2$ โดยป้อนสัญญาณไซน์นี้ให้เรา วิเคราะห์ได้ว่า

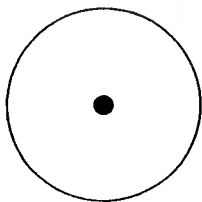
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อคลื่นลูกแรกเดินทางถึงปลายข้างหนึ่ง ก็จะสะท้อนกลับ ทำให้ทิศทางการไหลของกระแสเปลี่ยนไปในทิศทางตรงกันข้าม ขณะเดียวกันที่คลื่นลูกต่อมาเดินทางมาถึงที่ปลายลวดตัวนำพอดี ทำให้เกิดกระแสของคลื่นทั้งสอง หักล้างกัน ดังนั้นกระแสที่จุดปลายลวดตัวนำเท่ากับศูนย์
- เมื่อพิจารณาตำแหน่งถัดมา พบว่าที่ตำแหน่ง $\lambda/4$ จากปลายลวดตัวนำจะมีกระแสมากที่สุด

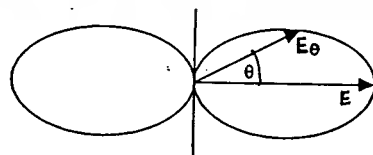


รูปที่ 2.5 แสดงการแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าบนลวดตัวนำขนาด $\lambda/2$ (ครึ่งความยาวคลื่น)

สายอากาศไดโพล (2 ขั้ว) ชนิดแนวตั้งจะแพร่หรือรับคลื่นได้เท่ากันในทุกทิศทางระนาบพื้นดิน ทำให้มีรูปการแพร่เป็นวงกลมดัง รูปที่ 2.6(a) ส่วนระนาบแนวตั้งของสายอากาศจะไม่แพร่หรือรับคลื่นตลอดตามแนวสายอากาศทำให้รูปการแพร่เป็น รูปที่ 2.6(b)



(a)

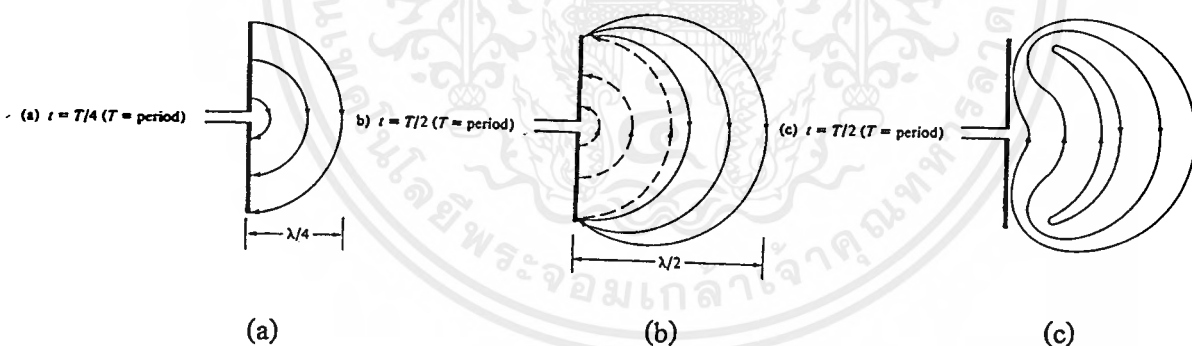


(b)

รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแนวขนาน $\lambda/2$

การแพร่กระจายคลื่นจากไดโพล

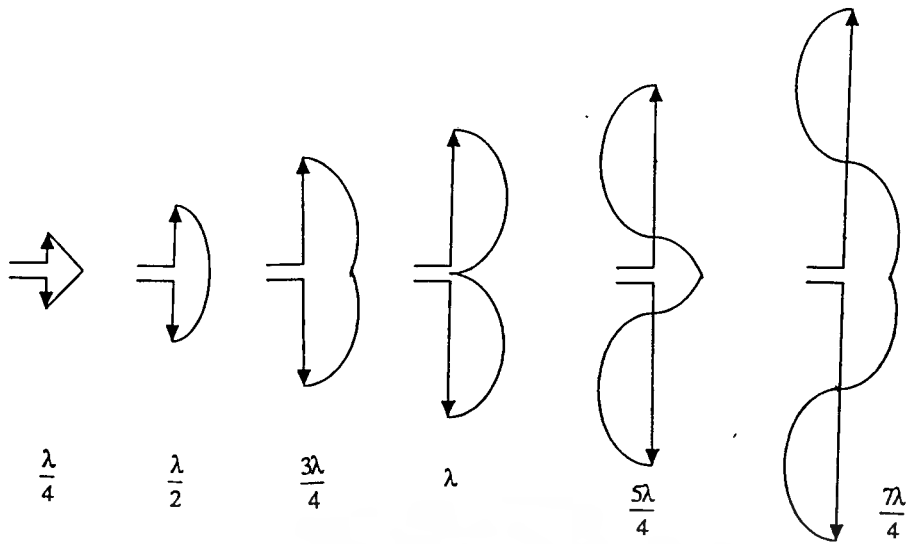
เราจะอาศัยตัวอย่างของสายอากาศไดโพลเล็กๆที่ไม่นำเอาเวลาในการเดินทางของคลื่นมาคิด เพราะเวลาที่ใช้นั้นเป็นเพียงการแสดงให้เห็นการเกิดซ้ำๆ กันของการปล่อยเส้นแรงออกมา วิธีคิดง่ายก็คือยอมให้ลูบหนึ่งออกไปในอากาศก่อนดัง รูปที่ 2.7(a) ซึ่งแสดงเส้นแรงที่ถูกสร้างระหว่างแกนของไดโพลเล็กๆ เกิดขึ้นในช่วง $1/4$ period (ให้เป็นการเปลี่ยนแปลงของ sinusoidal time) และเกิดขึ้นในระหว่างที่ประจุไปถึงค่าสูงสุด และเส้นมีการเดินทางออกมาข้างหน้าในรัศมีระยะ $\lambda/4$ สำหรับตัวอย่างนี้ สมมติจำนวนเส้นที่แสดงมีสามเส้นระหว่าง $1/4$ คาบ ต่อไปเส้นเดิมทั้ง สามเส้นจะเดินทางไปในระยะบวกอีก $\lambda/4$ (รวมเป็น $\lambda/2$ จากจุดเริ่มต้น) และความหนาแน่นของประจุบนตัวนำจะเริ่มน้อยลงนั่นคือจะเกิดประจุตรงกันข้ามขึ้นซึ่งที่ปลายของ $1/2$ คาบแรกมีการลบลงประจุบนตัวนำ ในระหว่าง $1/4$ คาบที่สอง เส้นแรงถูกสร้างโดยประจุตรงข้าม มีสามเส้นและเดินทางเป็นระยะ $\lambda/4$ ซึ่งแสดงดังเส้นประ รูปที่ 2.7(b) เราจะเห็นว่าสามเส้นแรงที่อยู่ข้างหน้าในระยะทาง $\lambda/4$ แรกและอีกสามเส้นในทิศทางตรงกันข้าม ถัดมาระยะ $\lambda/4$ ที่สองและจะเป็นแรงที่ดันตัวเองออกจากตัวนำ และเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันในรูป closed loop (c) ซึ่งก็จะเกิดซ้ำๆ กันไปซึ่งก็คือแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าคล้ายกับรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบและการดันของเส้นสนามไฟฟ้า ของไดโพลขนาดสั้น ($T = \text{period}$)

ดังรูปที่ 2.8 แสดงการแจกแจงกระแสของสายอากาศไดโพล ชนิดผสมบางที่มีความยาวต่างๆ โดยมีจุดป้อนอยู่ตรงกลางสายอากาศ

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าสายอากาศที่มีความยาว $\lambda/2$ จะมีกระแสสูงสุดที่ตรงจุดป้อน ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการ เพราะเป็นการแสดงให้เห็นว่าจะทำให้ได้ Gain สูงสุด หรืออีกนัยหนึ่งก็จะทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นได้สูงสุดซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ด้วย รูปแบบของการแพร่กระจายคลื่น โดยที่เราจะต้องรู้สนามที่แพร่กระจายคลื่น ในการวิเคราะห์สายอากาศนั้นขั้นตอนง่ายๆที่จะทำให้



รูปที่ 2.8 แสดงการแจกแจงรูปกระแสในสายอากาศ ใด โพล ที่ความยาวต่างๆ

เข้าใจหลักการเบื้องต้น จะเริ่มด้วยการวิเคราะห์สายอากาศจากขนาดเล็กที่สุด และค่อยๆ ใหญ่ขึ้นมา จนถึงขนาดที่ใช้งานจริง ดังนั้นวิธีที่ง่ายที่สุดคือวิเคราะห์สายอากาศชนิดเส้นลวดตรง เช่น สายอากาศใด โพล ซึ่งจะแบ่งการวิเคราะห์ ตามความยาวเป็น 3 ขนาด คือ ใด โพล จิว ใด โพล ขนาดเล็ก ใด โพล ความยาวจำกัด และเราแบ่งตามระยะทางในการพิจารณาออกอีก 3 ระยะเป็น ระยะใกล้ ระยะปานกลาง ระยะไกล

2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

ในส่วนนี้จะแนะนำตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นต้องรู้เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์และสังเคราะห์สายอากาศ

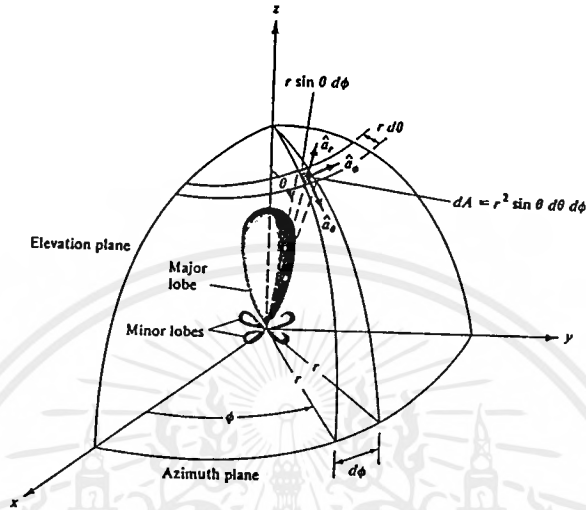
แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น

แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Space Coordinate ส่วนใหญ่แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล

การอธิบายคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือ โพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่รัศมีคงที่

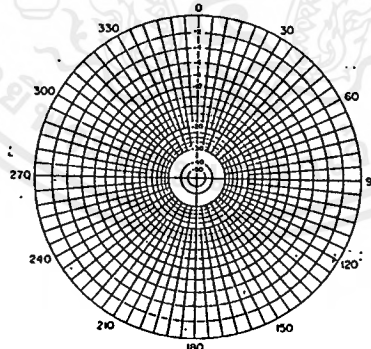
รูปที่ 2.9 แสดงระบบพิกัด 3 มิติที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์น

กำลังงาน (Power pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆมีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์นสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.9 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

ส่วนแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระบบสองมิตินิยมพล็อตบนระบบ polar coordinate ซึ่งแสดงเป็นเดซิเบล ตามรูปที่ 2.10 Non-linear



รูปที่ 2.10 ระบบพิกัดสำหรับพล็อตแพทเทิร์นสายอากาศ วงกลมแต่ละวงมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน และถูกแบ่งในหน่วยเดซิเบล โดยขนาดนอกสุดมีค่า 0 เดซิเบล ,อาซิมุทสเกล (Azimuth scale) ขอบนอกจะแสดงเป็นค่าองศา (degree)

ระบบ log periodic ถูกนำมาใช้เป็นระบบพิกัด ซึ่งแบ่งระยะการเปลี่ยนแปลงเป็นค่าลอการิทึมของความเข้มสนามในหน่วยโวลต์ ค่าคงที่ของระยะทางคือ 0.89 อธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะของสเกล คือส่วนเพิ่ม 2 dB จากขอบนอกสุด, 0 ถึง -2 dB คือ ความยาวเฉพาะ (Particular length) ซึ่งใกล้เคียง 1/10 ของรัศมีของไดอะแกรม, ระยะสเกล 2dB ถัดไป มีค่า 89% ของช่วงความยาวเฉพาะและ ระยะสเกลอีก 2dB ถัดไป มีค่า 89% ของช่วงความยาวที่ 2 เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ดังนั้นแต่ละ 2dB ที่เพิ่มขึ้นจะเข้าไปใกล้จุดศูนย์กลางของไดอะแกรมขึ้นทีละนิด และมาจบที่ -100 dB ที่จุดศูนย์กลางของ ไดอะแกรม

ในการทดลอง สัญญาณ 50 หรือ 60 dB และต่ำกว่าระดับอ้างอิงโดยทั่วไป จะอ่อนมากไม่สำคัญ ดังนั้นขนาดเล็กๆของ -50dB วงกลมในสุดไม่สำคัญเช่นกัน

อาซิมุสสเกล แสดงในหน่วยองศารอบๆขอบนอกของไดอะแกรม โดยแสดงมุมเริ่มต้นที่ 0 องศา

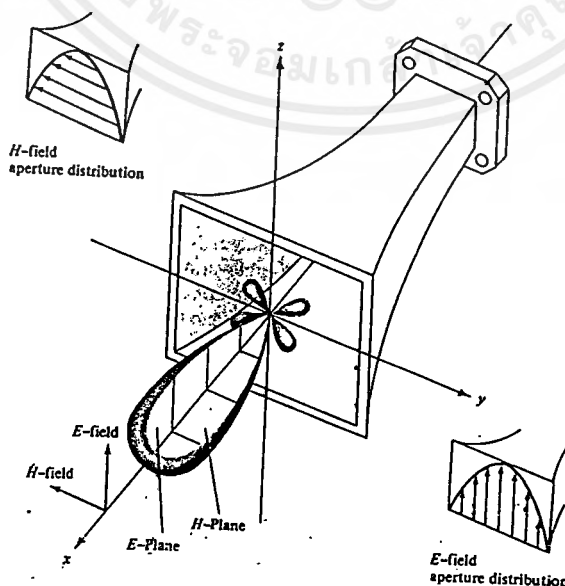
- แพทเทิร์นหลัก

เรามักอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแพทเทิร์นหลัก (Principal Pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศโพลาไรเซชัน (Linear Polarization)

-แพทเทิร์นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด

-แพทเทิร์นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด

ตัวอย่างการแสดงแพทเทิร์นหลักมีดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเลเวชัน; $\phi = 0$) เป็นระนาบ E หลัก และมีระนาบ XY (ระนาบอาซิมุส, $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบ H หลัก

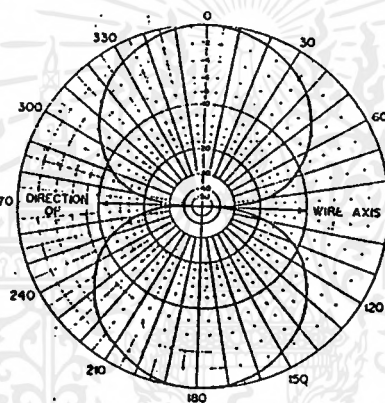


รูปที่ 2.11 แสดงแพทเทิร์นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร

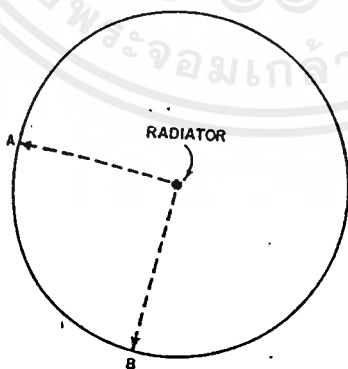
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก Solid Pattern ของสายอากาศไม่พอที่จะแสดงข้อมูลความเข้มสนามบนแผ่นกระดาษแบนราบ สำหรับจุดประสงค์นี้ Correctional หรือ plane diagram มีประโยชน์มาก ทั้งสองไดอะแกรมนี้อยู่ในรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 โดยรูปที่ 2.12 แสดงระนาบที่บรรจุแกนของสายอากาศเรียกว่า E-plane Pattern และรูปที่ 2.13 แสดงระนาบที่ตั้งฉากกับแกน H-plane Pattern, ไดอะแกรมนี้สามารถให้ข้อมูลจำนวนมาก และต้องนำมาใช้แสดงระนาบเส้นพลังงานสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H ตามลำดับ และเส้น E ยังถูกนำมาใช้แสดงในการโพลาริเซชันของสายอากาศ

การจินตนาการภาพ Solid Pattern ที่ถูกต้องสมบูรณ์ ทำได้จากการตรวจ 2 ไดอะแกรมนี้ Plane diagram จะพล็อตบนกระดาษ Polar coordinate จุดที่แพทเทิร์นการแพร่กระจายเป็น 0 จะเรียกว่า null ส่วนโค้งที่ลากจาก null หนึ่งไปอีก null ถัดไปบน Plane diagram บน Solid Pattern จะเรียกว่า โลบ



รูปที่ 2.12 Plane directive diagram (E-plane) ของสายอากาศครึ่งความยาวคลื่นเส้นตัน แสดงทิศทางของลวด แม้ว่ามันจะถูกพิจารณาเป็นแค่จุดที่ศูนย์กลางของไดอะแกรม



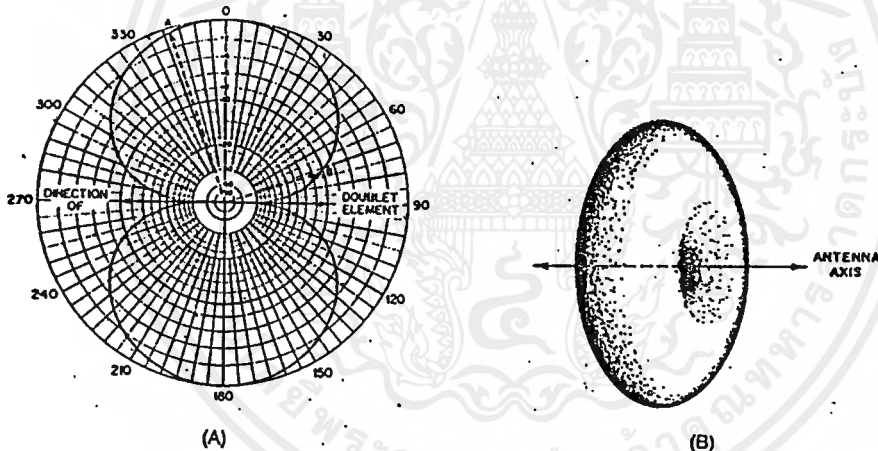
รูปที่ 2.13 Directive diagram ของไดโพลในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนขลวด(H-plane)

- แพทเทิร์นแบบไอโซทรอปิก, ไดเรกชันแนลและออมนิไดเรกชันแนล

ตัวแพร่คลื่นไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง เช่น Point source เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริงแต่ มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ

Solid Pattern ของตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก จะเป็นทรงกลมเพราะความเข้มสนามเท่ากันทุกทิศทางในระนาบที่บรรจุสายอากาศไอโซทรอปิก (ซึ่งถูกพิจารณาเป็นจุดในสเปซหรือ point source) แพทเทอร์นจะเป็นวงกลมซึ่งมีสายอากาศอยู่ตรงกลางจาก directive pattern จะเห็นว่าสายอากาศไอโซทรอปิกไม่มีไดเรกทิวิตี

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น เช่น สายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนล (Omnidirectional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.15

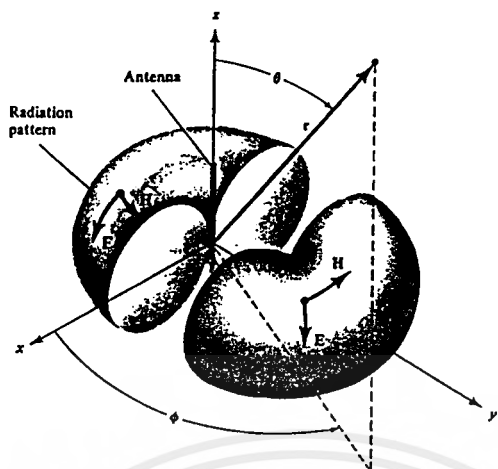


รูปที่ 2.14 (a) Directive diagram เบื้องต้นในระนาบที่บรรจุแกนลวดความยาวแต่ละเส้น ประสิทธิภาพแสดงความแรงสนามในทิศทางนั้น อ้างอิงกับทิศทางของการแพร่กระจายสูงสุด

(b) Solid Pattern ของสายอากาศอันเดียวกัน โคอะแกรมนี้ ประยุกต์สำหรับสายอากาศทุกอันที่ยาวน้อยกว่าครึ่งความยาวคลื่นมาก

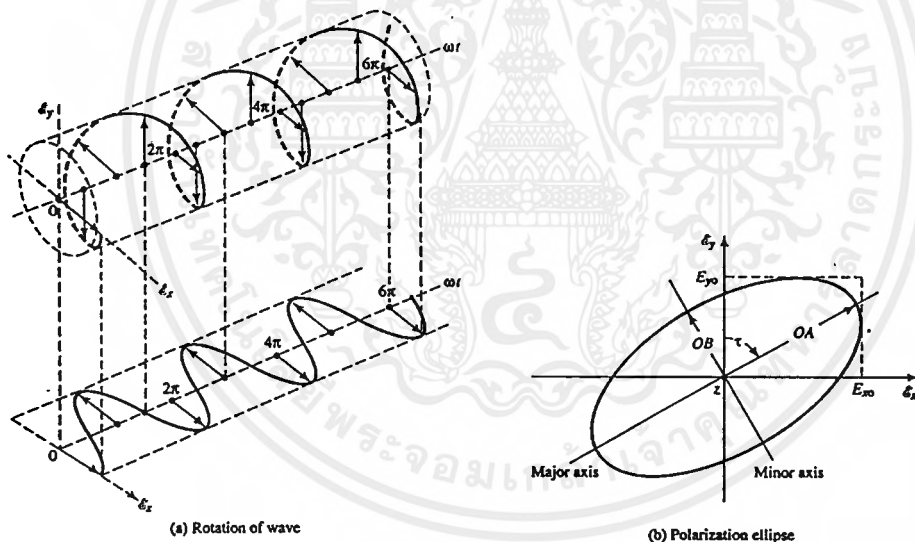
คามรูปจะเห็นว่าแพทเทอร์นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (Azimuth Plane) $[f(\phi), \theta = \text{ค่าคงที่}]$ แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (Elevation Plane) $[g(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}]$ แพทเทอร์นแบบออมนิไดเรกชันแนลนี้เป็นกรณีพิเศษของแพทเทอร์นแบบชี้ทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แพทเทิร์นของสายอากาศทิศทาง (Omnidirectional Antenna)

โพลาริเซชัน



รูปที่ 2.16 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบและวงรีโพลาริเซชัน
ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $Z=0$

รูปแสดงโพลาริเซชันเป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ซึ่งแสดงทิศทางการกวาดของยอดเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกต ซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป (ดูรูปที่ 2.16 ประกอบ)

โพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่เข้าของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีเกนมากที่สุด ดังนั้น โพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะแตกต่างกัน

การแบ่งชนิดของโพลาริเซชัน

แบ่งตามลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์สนามไฟฟ้าได้ดังนี้

- แบบลิเนียร์ลิโพลาริเซชัน (Linearly Polarization) เวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ใน space ซึ่งเป็นเส้นตรงเสมอ
- โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circularly Polarization)
- โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptically Polarization)

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (เมื่อมองตามหลังคลื่น) จะเรียกว่าโพลาริเซชันมือขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนทวนเข็มนาฬิกา จะเป็น โพลาริเซชันมือซ้าย

ลิเนียร์ลิโพลาริเซชัน, โพลาริเซชันแบบวงกลม และ โพลาริเซชันแบบวงรี

จะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง $-z$ ได้ว่า

$$E(z; t) = \hat{a}_x E_x(z; t) + \hat{a}_y E_y(z; t) \quad (2.1)$$

จาก $E = \text{Re}(E(x, y, z) e^{j\omega t})$ ส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$\begin{aligned} E_x(z; t) &= R_e[E_x e^{-j(\omega t + kz)}] = R_e[E_x e^{j(\omega t + kz + \phi_x)}] \\ &= E_x \cos(\omega t + kz + \phi_x) \\ E_y(z; t) &= R_e[E_y e^{-j(\omega t + kz)}] = R_e[E_y e^{j(\omega t + kz + \phi_y)}] \\ &= E_y \cos(\omega t + kz + \phi_y) \end{aligned}$$

เมื่อ E_x และ E_y เป็นขนาดของสนามค่าสูงสุดในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

ก. ลิเนียร์ลิโพลาริเซชัน

คลื่นซึ่งเป็นลิเนียร์ลิโพลาริเซชัน ความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนามจะมีค่าดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi \quad , \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (2.2)$$

ข. โพลาริเซชันแบบวงกลม

จะเกิดโพลาริเซชันแบบวงกลมได้ก็ต่อเมื่อขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากัน และความต่างเฟส ระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง เป็นจำนวนคี่เท่าของ $\pi/2$ นั่นคือ

$$|E_x| = |E_y| \quad \Rightarrow \quad E_x = E_y \quad (2.3)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0,1 & (2.4) \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0,1,2,\dots,cw & (2.5) \end{cases}$$

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม (คือทิศทาง +z) เฟสใน (2.4) และ (2.5) ที่ทำให้เกิด cw (clockwise) และ ccw (counter Clockwise) จะต้องสลับกัน

ก. โพลาริเซชันแบบวงรี

โพลาริเซชันแบบวงรีจะเกิดขึ้นเมื่อความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ $\pi/2$ แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน หรือความต่างเฟสไม่เป็นจำนวนคี่ของ $\pi/2$ นั่นคือ

$$|E_x| \neq |E_y| \Rightarrow E_{x_0} \neq E_{y_0}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & cw & (2.6) \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & ccw & (2.7) \end{cases}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n\pi}{2} \begin{cases} > 0 & cw & (2.8) \\ < 0 & ccw & (2.9) \end{cases}$$

$$n=0,1,2,\dots$$

ในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรี รูปแสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ จะเป็นวงรีเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.16(b) อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อยจะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio: AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{\text{แกนหลัก}}{\text{แกนย่อย}} = \frac{OA}{OB} \quad 1 \leq AR \leq \infty$$

$$\text{เมื่อ} \quad OA = \sqrt{\frac{1}{2} \left[E_{x_0}^2 + E_{y_0}^2 + \sqrt{E_{x_0}^4 + E_{y_0}^4 + 2E_{x_0}^2 E_{y_0}^2 \cos(2\Delta\phi)} \right]} \quad (2.10)$$

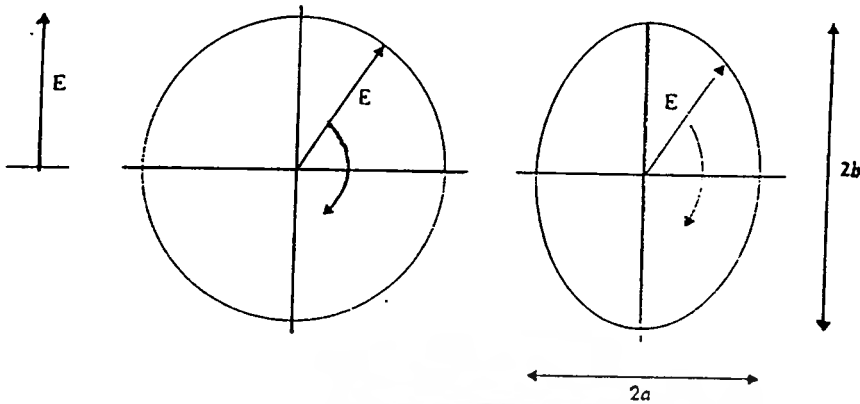
$$OB = \sqrt{\frac{1}{2} \left[E_{x_0}^2 + E_{y_0}^2 - \sqrt{E_{x_0}^4 + E_{y_0}^4 + 2E_{x_0}^2 E_{y_0}^2 \cos(2\Delta\phi)} \right]} \quad (2.11)$$

การเอียงของวงรีเทียบกับแกน y สามารถแสดงด้วยมุมเอียง ดังนี้คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_{x_0} E_{y_0}}{E_{x_0}^2 - E_{y_0}^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2.12)$$

เมื่อวงรีวางตามแนวแกนหลัก ($\tau = n\pi/2, n=0,1,2,\dots$) แกนหลัก (ย่อย) เท่ากับ $E_x(E_y)$

$E_y(E_x)$ และอัตราส่วนของแกนมีค่าเท่ากับ E_x/E_y หรือ E_y/E_x



รูปที่ 2.17 แสดงโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กทั้ง 3 แบบ

โพลาไรเซชันลอสแฟกเตอร์ (PLF)

โดยทั่วไปแล้วโพลาไรเซชันของสายอากาศอาจไม่เหมือนกับโพลาไรเซชันของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่าเกิดโพลาไรเซชันมismatch (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกมาจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาไรเซชัน (Polarization Loss) สมมติว่าสนามไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเข้ามายังสายอากาศเขียนได้ดังนี้

$$E_i = \hat{\rho}_w E_i$$

เมื่อ $\hat{\rho}_w$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของคลื่นและโพลาไรเซชันของสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับมีค่าดังนี้คือ

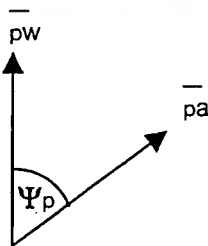
$$E_a = \hat{\rho}_a E_a$$

เมื่อ $\hat{\rho}_a$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ

จะกำหนดให้โพลาไรเซชันลอสแฟกเตอร์ (Polarization Loss Factor: PLF) มีค่าดังนี้

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (\text{ไม่มีหน่วย})$$

เมื่อ ψ_p เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 หน่วยเวกเตอร์โพลาไรเซชันของคลื่นตกกระทบ ($\hat{\rho}_w$)

และสายอากาศ ($\hat{\rho}_a$) และ Polarization loss factor (PLF).

ถ้าเกิดโพลาไรเซชัน mismatch ค่า PLF จะเป็น 1 และสายอากาศจะรับกำลังงานได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัด (Finite Length Dipole)

เทคนิคในการพัฒนาแต่เดิม สามารถการวิเคราะห์คุณสมบัติของการแพร่กระจายของ linear dipole ที่หลายๆความยาว เราจะลดความยุ่งยากของสมการคณิตศาสตร์ โดยจะใช้การสมมุติเมื่อไดโพลถูกละเลยถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง(เป็น 0 ในอุดมคติ)

การแจกแจงกระแส (Current Distribution)

สายอากาศไดโพลที่กำหนดให้เส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 0 จะมีการแจกแจงกระแสดังนี้

$$I_c'(x', y', z') = \begin{cases} \hat{a}_z I_0 \sin \left[k \frac{(1-z')}{2} \right], & 0 \leq z' \leq \frac{1}{2} \\ \hat{a}_z I_0 \sin \left[k \frac{(1+z')}{2} \right], & -\frac{1}{2} \leq z' \leq 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

ในที่นี้จะสมมุติว่ามีการป้อนกระแสตรงกึ่งกลางของไดโพล และกระแสจะต้องเป็นศูนย์ที่ปลายสายอากาศ จากการทดลองได้ยืนยันว่ากระแสในสายอากาศเส้นลวดที่ป้อนตรงกลางจะมีการแจกแจงเป็นแบบไซน์ซอซอดอล

สนามที่แพร่กระจาย เอเลเมนต์แฟคเตอร์ สเปซแฟคเตอร์ และการคูณแพทเทิร์น (Radiated Fields : Element Factor, Space Factor, and Pattern Multiplication)

เนื่องจากหาคำตอบศักย์ค่าแวกเตอร์ A ได้ยาก เพื่อให้ง่ายในการพิจารณาในที่นี้จะสนใจเฉพาะสนามระยะไกล

สายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัด ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 2.8 สายอากาศดังกล่าวถูกแบ่งถูกแบ่งเป็นไดโพลจิวจำนวนมากที่มีความยาว $\Delta z'$ ยิ่งแบ่งเป็นส่วนย่อยมากขึ้นความยาวจะลดลงเป็น dz' จะแสดงสนามที่แพร่จากไดโพลจิวซึ่งเป็นส่วนย่อยของไดโพลที่มีความยาวจำกัดได้ดังนี้

$$dE_\theta \cong j\eta \frac{kI_c(x', y', z')e^{-jkR}}{4\pi R} \sin \theta dz' \quad (2.14)$$

$$dE_r \cong dE_\phi = dH_r = dH_\phi = 0 \quad (2.15)$$

$$dH_\phi \cong j \frac{kI_c(x', y', z')e^{-jkR}}{4\pi R} \sin \theta dz' \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$R = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2) + (-2zz' + z'^2)} = \sqrt{r^2 + (-2zz' + z'^2)}$$

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2, Z = r \cos \theta$$

เมื่อเป็นสนามระยะไกล จะประมาณได้ว่า $R = r' - z' \cos \theta$ สำหรับเทอมเฟส และ $R = r$ สำหรับเทอมขนาดซึ่งทำให้เขียน(2.14) ได้ใหม่ว่า

$$dE_\theta \equiv j\eta \frac{kI_c(x', y', z')e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta dz' \quad (2.17)$$

$$E_\theta = \int_{-l/2}^{+l/2} dE_\theta = j\eta \frac{ke^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \left[\int_{-l/2}^{+l/2} I_c(x', y', z')e^{-jkz' \cos \theta} dz' \right] \quad (2.18)$$

เรียกเวกเตอร์นอกวงเล็บว่าเอเลเมนต์แฟคเตอร์ และแฟคเตอร์ภายในวงเล็บเป็นสเปซแฟคเตอร์ ในกรณีนี้เอเลเมนต์แฟคเตอร์ มีค่าเท่ากับสนามของไดโพลจิวหนึ่งหน่วยความยาวที่วางอยู่ที่จุดเปรียบเทียบ(จุดกำเนิด)โดยทั่วไปเอเลเมนต์แฟคเตอร์มีค่าขึ้นอยู่กับชนิดและทิศทางการไหลของกระแสในขณะที่สเปซแฟคเตอร์เป็นฟังก์ชันของการแฉงรูปกระแสในสายอากาศ

สนามรวมของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับผลคูณของเอเลเมนต์แฟคเตอร์กับสเปซแฟคเตอร์ วิธีนี้เรียกว่าการคูณแพทเทิร์นสำหรับค้นกำเนิดที่มีการแฉงรูปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเขียนได้ว่า

สนามรวม = (เอเลเมนต์แฟคเตอร์) x (สเปซแฟคเตอร์)

สุดท้ายเราจะได้

$$E_\theta = j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin \theta} \right] \quad (2.19)$$

$$H_\phi = \frac{E_\theta}{\eta} = j \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin \theta} \right] \quad (2.20)$$

ความหนาแน่นของกำลังงาน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น
และความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น

(Power Density, Radiation Intensity, and Radiation Resistance)

สำหรับสายไดโพลที่มีความยาวจำกัด วิธีคำนวณหาความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น ก็ยังคงเหมือนกับวิธีการที่ใช้กับสายอากาศไดโพลจิวและไดโพลขนาดเล็ก โดยเริ่มจากการหาพอยดิงเวกเตอร์เฉลี่ยมีค่าดังนี้

$$\bar{W}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = \frac{1}{2} \text{Re}[\hat{a}_\theta E_\theta \times \hat{a}_\phi H_\phi] = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\hat{a}_\theta E_\theta \times \hat{a}_\phi \frac{E_\theta^*}{\eta} \right] \quad (2.21)$$

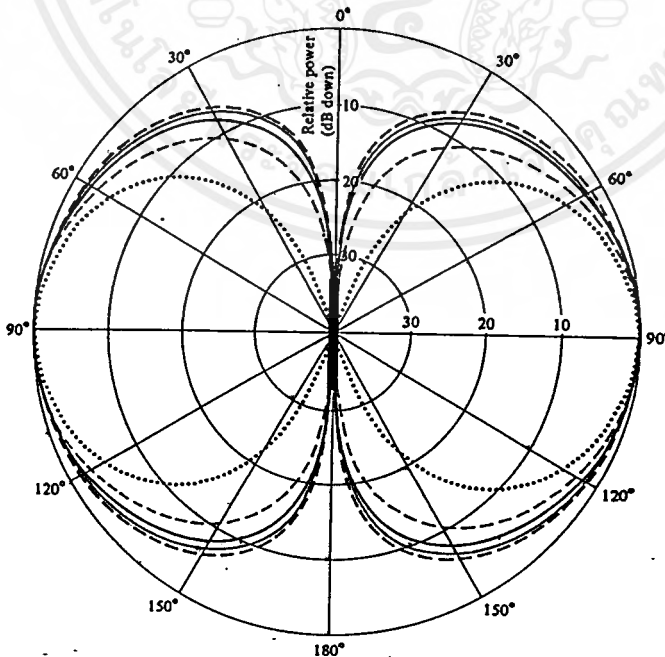
$$\bar{W}_{av} = \hat{a}_r W_{av} = \hat{a}_r \frac{1}{2\eta} |E_0|^2 = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2 r^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin \theta} \right]^2 \quad (2.22)$$

จากนั้นหาความเข้มของการแพร่กระจาย

$$U = r^2 W_{av} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin \theta} \right]^2 \quad (2.23)$$

คำนวณออมอลไลท์(0 dB) elevation power patterns ทำได้โดย (2.23) สำหรับ $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$ และ λ ดังแสดงรูปแบบใน รูปที่ 2.14 การแจกแจงของแต่ละแบบแสดงโดยสมการ(2.13) รูปแบบกำลังสำหรับไดโพลจิว $l \ll \lambda$ ($U \sim \sin^2 \theta$) เป็นส่วนประกอบในการเปรียบเทียบ เมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น บีมก็แคบลง เนื่องจากว่า ไครคตวิตีจะเพิ่มขึ้นด้วยความยาวของสาย มันสามารถหาได้ที่บีมวิดที่ 3-dB โดยบีมวิดแต่ละจุดจะเท่ากับ

$l \ll \lambda$	3-dB beamwidth = 90°
$l = \lambda/4$	3-dB beamwidth = 87°
$l = \lambda/2$	3-dB beamwidth = 78°
$l = 3\lambda/4$	3-dB beamwidth = 64°
$l = \lambda$	3-dB beamwidth = 47.8°



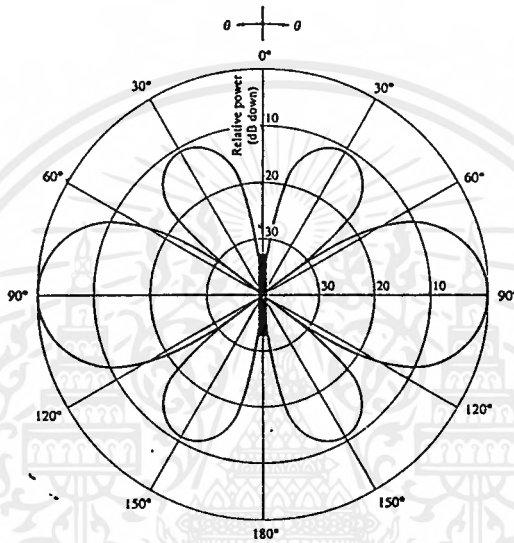
รูปที่ 2.19 แสดงแพทเทิร์นสายอากาศไดโพลที่มีการแจกแจง

เป็นแบบไซน์ซอชอคอล $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4, \lambda$

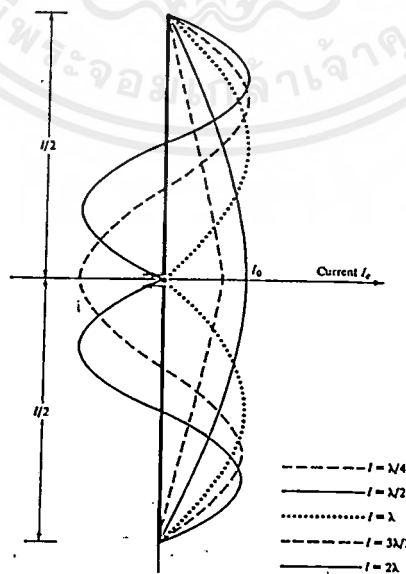
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไดโพลเพิ่มขึ้นเกิน 1 ความยาวคลื่น ($l > \lambda$) จะเริ่มมีlobจำนวนหนึ่งเพิ่มขึ้น การอมอลไลท์รูปแบบกำลังของไดโพลที่ $l = 1.25 \lambda$ จะแสดงใน รูปที่ 2.20 เป็นภาพ 2มิติ(elevation pattern)สำหรับภาพสามมิติที่แสดงให้เห็นที่มุม 90° การแจกกระแสดำหรับไดโพลที่มี $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/2, 2\lambda$ ให้ใช้ (2.13) และแสดงการแจกกระแสดที่ความยาวต่างๆดัง รูปที่ 2.21

ในการหาค่ากำลังแพร่กระจายรวม ค่าเฉลี่ยพอยดิงเวกเตอร์ ด้วยการอินทิเกรตตลอดรูปทรงของรัศมี r ดังนี้



รูปที่ 2.20 แสดงแพทเทิร์นของสายอากาศไดโพลยาว 1.25λ ที่มีการแจกกระแสแบบไซน์ชอยดอล



รูปที่ 2.21 แสดงการแจกกระแสตามไดโพลที่ความยาวต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{\text{rad}} = \iint_s \mathbf{W}_{\text{av}} \cdot d\mathbf{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \hat{\mathbf{a}}_r W_{\text{av}} \cdot \hat{\mathbf{a}}_r r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.24)$$

ใช้(2.21)เราสามารถเขียน(2.24)ใหม่ได้ว่า

$$P_{\text{rad}} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ C + \ln(kl) - C_i(kl) + \frac{1}{2} \sin(kl) [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cos(kl) [C + \ln(kl/2) + C_i(2kl) - 2C_i(kl)] \right\} \quad (2.25)$$

เมื่อ $C=0.5772$ (ค่าคงที่ของ Euler's) และ $C_i(x)$ และ $S_i(x)$ คือค่าโคซายน์ และซายน์อิน

ทิกรัลให้ว่า

$$C_i(x) = -\int_x^\infty \frac{\cos y}{y} dy = \int_x^\infty \frac{\cos y}{y} dy \quad (2.26)$$

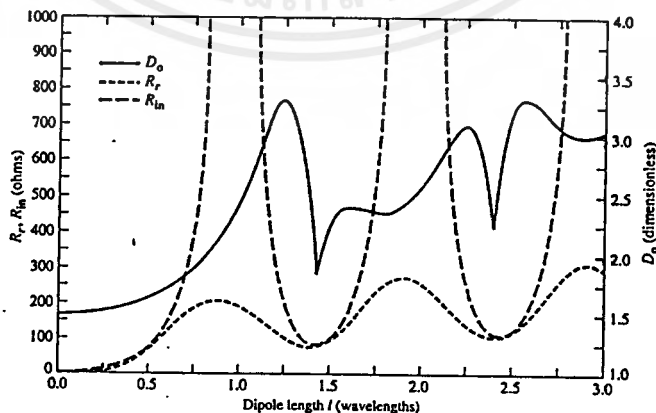
$$S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin y}{y} dy$$

ค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้โดยใช้ $P_{\text{rad}} = \eta \left(\frac{\pi}{3} \right) \frac{|I_0 l|^2}{\lambda}$ และ(2.25)

เราสามารถเขียนได้เป็น

$$R_r = \frac{2P_{\text{rad}}}{|I_0|^2} = \frac{\eta}{2\pi} \left\{ C + \ln(kl) - C_i(kl) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sin(kl) \times [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cos(kl) \times [C + \ln(kl/2) + C_i(2kl) - 2C_i(kl)] \right\} \quad (2.27)$$

ในรูปที่ 2.22 แสดงการวาดค่า R_r ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ l (ในหน่วยความยาวคลื่น) เมื่อสายอากาศแพร่กระจายไปในสูญญากาศ ($\eta \cong 120\pi$)



รูปที่ 2.22 แสดงความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น

และไดเรกทิวิตีของสายอากาศไดโพลที่มีการแรงแบบไซนูซอยดอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดเรกทิวิตี(Directivity)

จากที่แสดงใน รูปที่ 2.19 รูปแบบการแพร่กระจายของไดโพลจะมีการชี้ทิศทางที่ตีมากขึ้น เมื่อความยาวเพิ่มขึ้น และเมื่อลดความยาวยาวกว่า หนึ่งความยาวคลื่น ($l > \lambda$) จะมีจำนวนโสมมากขึ้น และคุณสมบัติในการชี้ทิศทางจะเสียไป

ไดเรกทิวิตีมีสมการเป็นดังนี้

$$D_o = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)_{max}}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.28)$$

เมื่อ $F(\theta, \phi)$ สัมพันธ์กับความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นด้วยสมการ $U = U_o F(\theta, \phi)$

จาก (2.23) สายอากาศไดโพลยาว l จะมี

$$F(\theta, \phi) = F(\theta) = \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin \theta} \right]^2 \quad (2.29)$$

$$\text{และ } U_o = \eta |I_o|^2 / 8\pi^2$$

เนื่องจากแพทเทอร์น ไม่เป็นฟังก์ชันของ ϕ (2.28) จะกลายเป็น

$$D_o = \frac{2F(\theta)_{max}}{\int_0^\pi F(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (2.30)$$

สมการ (2.30) สามารถเขียนได้เป็น

$$D_o = \frac{2F(\theta)_{max}}{Q} \quad (2.31)$$

เมื่อ Q คือ

$$Q = \{C + \ln(kl) - C_i(kl) + \frac{1}{2} \sin(kl)[S_i(2kl) - 2S_i(kl)] \\ + \frac{1}{2} \cos(kl)[C + \ln(kl/2) + C_i(2kl) - 2C_i(kl)]\}$$

จะเห็นว่า $F(\theta)$ ค่าสูงสุดขึ้นอยู่กับความยาวของสายอากาศและ แอพเฟคทีฟอะเพอร์เจอร์ค่าสูงสุดจะมีค่า

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_o \quad (2.32)$$

ความต้านทานอินพุท (Input Resistance)

ในส่วนของเรื่องอินพุทอิมพีแดนซ์ ที่ผ่านมากถูกกำหนดด้วย “อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อกระแสที่จับมาเข้ากับจุดต่อหรือ อัตราส่วนของส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุด” ค่าส่วนจริงของอินพุทอิมพีแดนซ์จะชัดเจนเช่นเดียวกับค่าความต้านทานอินพุทซึ่งสูญเสีย้อย
มากในสายอากาศ สรุปลำสำหรับการแพร่กระจาย เป็นผลของการแพร่กระจายเนื่องจากกำลังจริง

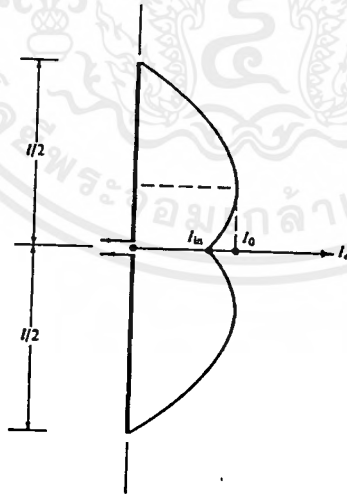
ความต้านทานที่การแพร่กระจายคลื่นที่มีความยาว l ที่มีการแรงแสดงด้วย sinusoidal จาก
รูปแบบของสมการ(2.13)แสดงโดย (2.23) โดยคำจำกัดความนี้ ความต้านทานการแพร่กระจายเป็น
ค่า \Re ค่าหนึ่งที่มีค่ากระแสสูงสุด ซึ่งสำหรับความยาวบางความยาว ($l=\lambda/4, 3\lambda/4, \lambda$ เป็นต้น)มันไม่
ได้เกิดขึ้นที่จุดต่อ อินพุทของสายอากาศดูจากรูปที่ 2.21 จะส่งผลเกี่ยวข้องกับความต้านทานการ
แพร่กระจายคลื่นกับ ที่จุดต่ออินพุทของสายอากาศ ตัวสายอากาศเองหากสมมติให้ไม่มีการสูญเสีย
($R_L = 0$) ดังนั้นกำลังที่จุดต่ออินพุทจะเท่ากับกำลัง \Re จุดที่กระแสสูงสุด

แสดงดัง รูปที่2.23 เราสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{|I_o|^2}{2} R_{in} = \frac{|I_o|^2}{2} R_r$$

$$R_{in} = \left[\frac{I_o}{I_{in}} \right]^2 R_r \quad (2.33)$$

เมื่อ R_{in} = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่อินพุท(จุดป้อนกระแส)
 R_r = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่กระแสมีค่าสูงสุด (159)
 I_o = ค่ากระแสสูงสุด
 I_{in} = กระแสที่เข้าอินพุท



รูปที่ 2.23 แสดงการแรงแจกรูปกระแสของสายอากาศเมื่อค่ากระแสสูงสุดไม่ได้อยู่ที่ขั้วสายอากาศ

สำหรับไดโพลที่ยาว l กระแสที่จุดป้อนอินพุท(I_{in}) จะสัมพันธ์กับ I_o ตามรูปที่ 2.23

$$I_{in} = I_o \sin\left(\frac{kl}{2}\right) \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ความต้านทานอินพุทมีค่าเป็น

$$R_{in} = \frac{R_r}{\sin^2\left(\frac{kl}{2}\right)} \quad (2.35)$$

ไดโพลความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น (Half - Wavelength Dipole)

พบว่าใช้ไดโพลความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเป็นส่วนมาก เพราะมีความต้านทาน 73 โอห์ม ซึ่งมีความใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ คุณสมบัติของสายส่ง 75 โอห์ม ซึ่งทำให้แมทซ์กันได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อเกิดรีโซแนนซ์

$$E_\theta \equiv j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right] \quad (2.36.1)$$

$$H_\phi \equiv j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right] \quad (2.36.2)$$

$$W_{av} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2 r^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]^2 \equiv \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2 r^2} \sin^3\theta \quad (2.37)$$

$$U = r^2 W_{av} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]^2 \equiv \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2} \sin^3\theta \quad (2.38)$$

$$P_{rad} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^\pi \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} d\theta \quad (2.39)$$

$$= \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1 - \cos y}{y} \right) dy = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi} C_{in}(2\pi)$$

$$C_{in}(2\pi) = 0.577 + \ln(2\pi) - Ci(2\pi) = 0.577 + 1.838 - (-0.02) = 2.435$$

$$D_o = 4\pi \frac{U_{max}}{P_{rad}} = 4\pi \frac{U_{\theta=\pi/2}}{P_{rad}} = \frac{4}{C_{in}(2\pi)} = 1.643$$

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_o = \frac{\lambda^2}{4\pi} (1.643) = 0.13\lambda^2$$

$$R_r = \frac{2P_{rad}}{|I_0|^2} = \frac{\eta}{4\pi} C_{in}(2\pi) = 30(2.435) = 73$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

The Finite-Difference Time-Domain Method

การวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนของเวลา ต้องศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ในแต่ละความถี่ คือต้องคำนวณแต่ละเทอมของเมทริกซ์ใหม่ทุกครั้งเมื่อความถี่เปลี่ยนไป ซึ่งทำให้เสียเวลาในการคำนวณมากในการวิเคราะห์ที่มีแถบความถี่ที่กว้าง ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวิธีการคำนวณในโดเมนเวลาขึ้น ซึ่งทำให้รู้การแพร่กระจายของคลื่นในแต่ละชั้นเวลา ซึ่งวิธี FD-TD เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้การวิเคราะห์ในโดเมนของเวลา

วิธี FD-TD เป็นวิธีประมวลผลเชิงตัวเลขในโดเมนของเวลา นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรกโดยยี่ (Yee) ในปี ค.ศ. 1966 ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกในการแก้ปัญหาอนุพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ต่อมาได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น ใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์น้อยลง และเป็นที่ยอมรับได้มาก

3.1 ตัวแปรพื้นฐานของ FD-TD

ก่อนที่ชั้นเวลาจะเริ่ม ต้องกำหนดพื้นที่ที่จะคำนวณ (problem space) และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ไม่ต้องการการคำนวณที่แต่ละชั้นเวลา ซึ่งสามารถคำนวณและเก็บก่อนที่ชั้นเวลาจะเริ่ม เช่น ขนาดของเซลล์, ชั้นเวลา และสนามตกกระทบ ถ้าคิดที่สนามระยะไกลต้องกำหนดทิศทางของสนามระยะไกลด้วย หลังจากชั้นเวลาทำงาน เราจะได้ข้อมูลเอาต์พุต

- ขนาดของเซลล์ (cell size)

ขนาดของเซลล์ขึ้นอยู่กับวัสดุ, ค่าเพอร์มิตติวิตี, ค่าความนำ และความยาวคลื่น ซึ่งควรมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดมากๆ เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้อง ที่ใช้กันมากคือ 10 เซลล์ต่อหนึ่งความยาวคลื่น ดังนั้นแต่ละด้านของแต่ละเซลล์มีขนาด 0.1λ ที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งาน ในบางกรณีที่ต้องการความแม่นยำมากๆ เช่น เรดาร์ อาจใช้ 20 เซลล์ต่อหนึ่งความยาวคลื่นหรือมากกว่านี้ถ้าจำเป็น

- ชั้นเวลา (Time Step, Δt)

ชั้นเวลาที่ใหญ่ จะให้ผลไม่ดีต่อเสถียรภาพ แต่ก็ต้องมีขนาดใหญ่พอตามคุณสมบัติของวัสดุ (full characteristic) ของวัสดุและสนามที่มีปฏิริยาต่อกัน สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ คุณสมบัติเรโซแนนซ์ ซึ่งจะถูกวิเคราะห์จากจำนวนชั้นเวลาและจำนวนเซลล์

การหาค่าขั้นเวลาสูงสุดต้องเข้าใจ Courant condition เสียก่อน โดยพิจารณาคลื่นระนาบที่แพร่กระจายออกมาจาก FD-TD grid โดยทิศทางของคลื่นระนาบตั้งฉากกับระนาบของ FD-TD grid (การแพร่กระจายคลื่นระนาบจะไวที่สุดระหว่างจุดสองจุดทิศทางต้องตั้งฉาก), ใน 1 ขั้นเวลา ทุกๆจุดบนคลื่นนี้จะไม่ผ่านไปมากกว่า 1 เซลล์เพราะระหว่าง 1 ขั้นเวลา FD-TD สามารถแพร่กระจายคลื่นจาก 1 เซลล์ ไปยังบริเวณที่ใกล้ที่สุดเท่านั้น ดังนั้นขั้นเวลาที่มากที่สุดถูกจำกัดโดย Courant Stability condition คือ

$$v\Delta t = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}}$$

โดย v = ความเร็วสูงสุดของการแพร่กระจายในตัวกลางใดๆในบริเวณที่เราพิจารณา โดยปกติจะเท่ากับความเร็วแสงใน free space

3.2 สมการแมกซ์เวลล์และขั้นตอนวิธีของยี่ (Maxwell's equations and the Yee Algorithm)

- สมการแมกซ์เวลล์ใน 3 มิติ

พิจารณาบริเวณที่ไม่มีแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กหรือกระแสไฟฟ้า แต่อาจจะมีวัสดุที่ดูดกลืนพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานแม่เหล็ก สมการแมกซ์เวลล์เทียบเวลาในรูปอนุพันธ์และอินทิเกรตคือกฎของฟาราเดย์

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = -\nabla \times \bar{E} - \bar{J}_m \quad (3.1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_s \bar{B} \cdot d\hat{s} = -\oint_c \bar{E} \cdot d\hat{l} - \iint_s \bar{J}_m \cdot d\hat{s} \quad (3.1b)$$

กฎของแอมแปร์

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = \nabla \times \bar{H} - \bar{J}_e \quad (3.2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_s \bar{D} \cdot d\hat{s} = \oint_c \bar{H} \cdot d\hat{l} - \iint_s \bar{J}_e \cdot d\hat{s} \quad (3.2b)$$

กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า

$$\nabla \cdot \bar{D} = 0 \quad (3.3a)$$

$$\oiint_s \bar{D} \cdot d\hat{s} = 0 \quad (3.3b)$$

กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (3.4a)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (3.4b)$$

ในที่นี้ \vec{E} คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้า (v/m), \vec{D} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (c/m), \vec{H} คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก(A/m), \vec{B} คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า(wb/m²), S คือ พื้นผิวที่กำหนดเอง โดยมีเวกเตอร์หน่วยที่ตั้งฉากคือ \vec{ds} , c คือ รอบๆพื้นผิว S เวกเตอร์หนึ่งหน่วยความยาวคือ \vec{dl}

ในเชิงเส้น, วัสดุที่ไม่กระจัดกระจายไอโซทรอปิก (เช่น วัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กแบบสนามอิสระ ทิศทางอิสระและความถี่อิสระ) เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ \vec{B} กับ \vec{H} และ \vec{D} กับ \vec{E} ได้โดยสัดส่วนง่ายๆคือ

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.6)$$

μ คือ เพอร์มิบิลิตีแม่เหล็ก (เฮนรี/เมตร), ϵ คือ เพอร์มิตีวิตีไฟฟ้า (ฟารัด/เมตร)

ต่อไปพูดถึงความสูญเสียทางไฟฟ้าและแม่เหล็กที่สามารถแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุโดยกลายเป็นพลังงานความร้อน เรากำหนดกระแสแม่เหล็กสำหรับกลไกการสูญเสียทางแม่เหล็ก

$$\vec{J}_m = \rho' \vec{H} \quad (3.7)$$

และกระแสไฟฟ้าสำหรับกลไกการสูญเสียทางไฟฟ้า

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (3.8)$$

ρ' คือ ความต้านทานแม่เหล็ก(โอห์ม/เมตร), σ คือ ค่าความนำไฟฟ้า(ซีเมนส์/เมตร)

รวม(3.5) ถึง (3.8) และแทนในสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์(3.1a) และ (3.2a) เราจะได้

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} - \frac{\rho'}{\mu} \vec{H} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{H} - \frac{\sigma}{\epsilon} \vec{E} \quad (3.10)$$

ขณะนี้เราเขียนส่วนประกอบเวกเตอร์ของ(3.9)และ(3.10) ทำให้ได้สมการสเกลาร์ 6 สมการเป็นสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ใน 3 มิติระบบพิกัดมุมฉาก (x,y,z)

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho' H_x \right) \quad (3.11a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \rho' H_y \right) \quad (3.11b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho' H_z \right) \quad (3.11c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (3.12b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (3.12c)$$

สมการอนุพันธ์ย่อย 6 สมการ(3.11) และ (3.12) เป็นรูปแบบพื้นฐานของวิธี FD-TD เซิงตัวเลข สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลกับวัสดุ 3 มิติทั่วไป วิธี FD-TD ไม่ต้องการความสัมพันธ์ของเกาส์มาแสดงว่าประจุไฟฟ้าอิสระ,ประจุแม่เหล็กเป็น0 (3.3) และ (3.4) เพราะความสัมพันธ์นี้ตามทฤษฎีจะเป็นผลมาจากสมการเคิร์ล อย่างไรก็ตามต้องสร้าง FD-TD space grid ขึ้นเพื่อความสัมพันธ์ของเกาส์คือ อยู่ในตำแหน่งของส่วนประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในกริด และการทำอนุพันธ์สเปซเซิงตัวเลข(numerical space derivative)บนส่วนประกอบเวกเตอร์เหล่านี้ ซึ่งจำลองการทำงานของตัวดำเนินการเคิร์ล

● ขั้นตอนวิธีการของยี (The Yee Algorithm)

ในปี 1966, Kane Yee เป็นผู้เริ่มต้นใช้สมการไฟไนท์-ดิฟเฟอเรนซ์ ซึ่งเป็นสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์เทียบกับเวลา(3.11) และ(3.12) สำหรับกรณีวัสดุไม่มีการสูญเสีย $\rho' = \sigma = 0$

ทฤษฎีของยีมีเนื้อหา ดังนี้คือ

1. ทฤษฎีของยีจะหาคำตอบทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในเวลาและระยะทางโดยใช้สมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์มากกว่าที่จะหาสนามไฟฟ้า (หรือสนามแม่เหล็ก) อย่างเดียว

- จะคล้ายกับการรวมสนามของทฤษฎี MM, ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตทั้ง \bar{E} และ \bar{H} จะถูกบังคับให้อยู่บนพื้นผิวของโครงสร้างวัสดุ

- สามารถสร้างแบบจำลองสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าได้เพราะมีทั้ง \bar{E} และ \bar{H}

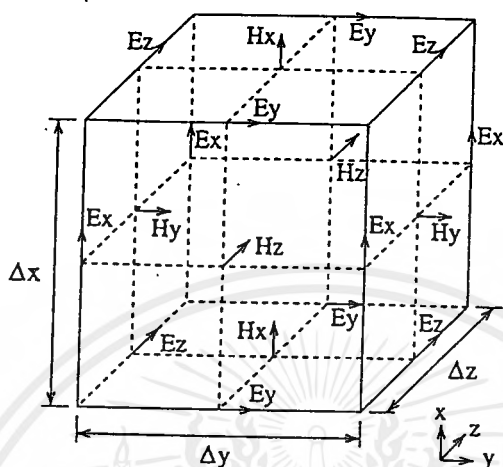
- ลักษณะพิเศษของทุกๆสนาม เช่น สนาม \bar{H} ไกล่กับขอบและมุม รูปอาซิมีทริกของสนาม \bar{H} ไกล่กับลวด และรัศมีของสนาม \bar{E} ไกล่จุด,ขอบและเส้นลวด สามารถใช้เป็นแบบเฉพาะรายได้ ถ้าทั้งสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กหาค่าได้

2. อธิบายจากรูปที่ 3.1 หัวใจสำคัญของทฤษฎีของยี คือ ทิศทางของ \bar{E} และ \bar{H} ในสเปซ 3 มิติ ทุกๆทิศทางของ \bar{E} รอบๆจะถูกล้อมรอบด้วยสนาม \bar{H} 4 ตัว และทุกๆสนาม \bar{H} จะล้อมรอบด้วยส่วนประกอบ \bar{E} 4 ตัว

- ทำให้ได้รูปอย่างง่ายที่สวยงามของสเปซ 3 มิติที่มีการเชื่อมต่อภายในแถวลำดับของกฎฟาราเดย์และกฎของแอมแปร์แบบคอนทัวร์ ตัวอย่างเช่น สามารถจะกำหนดให้ส่วนประกอบ \bar{E} ประกอบด้วยฟลักซ์กระแสที่เชื่อมต่อวรอบ \bar{H} และกำหนดส่วนประกอบ \bar{H} ด้วยฟลักซ์แม่เหล็กที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมต่อกับตัววงรอบ \vec{E} ผลที่ได้แนวความคิดของยี่ สามารถจำลองการทำงานรูปแบบอนุพันธ์ และรูปแบบอินทิกรัลของสมการแมกซ์เวลล์พร้อมกัน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการกำหนดขอบเขตสนาม



รูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของเซลล์สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ของยี่

- ผลที่ได้จากนิพจน์ไฟไนท์-ดิฟเฟอเรนซ์ สำหรับอนุพันธ์สเปซ ที่ใช้ในตัวดำเนินการเกร็ดเป็นแบบตรงกลางและมีความเที่ยงตรงอันดับ 2

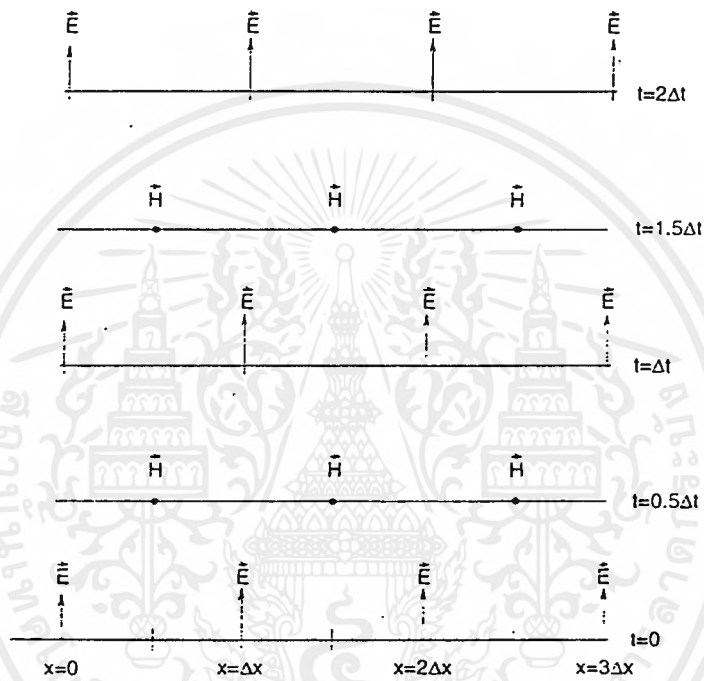
- ความต่อเนื่องของ \vec{E} และ \vec{H} ที่ข้ามรอยต่อวัสดุที่ไม่เหมือนกัน ถ้ารอยต่อขนานกันใน 1 แกนพิกัดกริด ในกรณีนี้จะได้ผลเฉลยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต้องการเงื่อนไขขอบเขตพิเศษ ในการแมทซ์สนามที่รอยต่อ ในการเริ่มต้นของปัญหาเราเพียงกำหนดเพอร์มิตติวิตีของวัสดุและเพอร์มิบิลิตีของสารที่แต่ละตำแหน่งของส่วนประกอบสนาม สำหรับสี่เหลี่ยมมุมฉากของยี่จะได้การประมาณแบบขั้นบันไดของพื้นผิวและรูปทรงเลขาคณิตของโครงสร้างที่สนใจกับสเปซที่จะหา จะกำหนดโดยขนาดของหน่วยเซลล์

- ตำแหน่งส่วนประกอบ \vec{E} และ \vec{H} ในกริดของยี่ และตัวดำเนินการไฟไนท์-ดิฟเฟอเรนซ์แบบตรงกลางบนส่วนประกอบเหล่านี้ จะถือว่าอยู่ในความสัมพันธ์กฏของเกาส์ ดังนั้น สี่เหลี่ยมมุมฉากของยี่ คือ ไคเวอร์เจนท์อิสระ เมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าและ จะไม่มีประจุไฟฟ้าที่ประจุแม่เหล็กอิสระ ในแหล่งกำเนิดอิสระที่เป็นแบบจำลอง

3. จากรูปที่ 3.2 ขั้นตอนวิธีของยี่จะวางส่วนประกอบ \vec{E} และ \vec{H} ในเวลาที่จัดแบบ leapfrog การคำนวณ \vec{E} ทั้งหมดในสเปซ 3 มิติที่สนใจจะสมบูรณ์และเก็บในหน่วยความจำที่จุดเวลาเฉพาะ โดยใช้ข้อมูลของ \vec{H} ที่เก็บอยู่ในหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ก่อนหน้านี้ ดังนั้นการคำนวณ \vec{H} ทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมดในสเปซจำลองจะสมบูรณ์และเก็บในหน่วยความจำโดยใช้ข้อมูล \vec{E} ที่คำนวณไปเมื่อครั้ง วิถี
จักรการทำงานจะเกิดขึ้นอีกครั้งโดยการคำนวณส่วนประกอบ \vec{E} ใหม่ โดยใช้ส่วนประกอบ \vec{H}
ใหม่ ขบวนการนี้จะต่อเนื่องจนกระทั่งจบชั้นเวลา



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งและชั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณหา \vec{E} และ \vec{H}

- ชั้นเวลา leapfrog จะมีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นจึงสามารถหลีกเลี่ยงการหา,การแก้สมการและ
การทำอินเวอร์สมatricซ์ได้อย่างสมบูรณ์

-ผลที่ได้จากนิพจน์ไฟไนท์-ดิฟเฟอเรนซ์ สำหรับอนุพันธ์เวลาที่ใช้ในสมการเคิร์ล ความ
สัมพันธ์จะเป็นแบบตรงกลาง และมีความเที่ยงตรงอันดับ 2

-ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำชั้นเวลาจะได้กระจัดกระจาย นั่นคือ โหมดคลื่นที่แพร่กระจายเชิงตัว
เลขใน mesh จะไม่ลดลงเนื่องจากการทำชั้นเวลา

สมการไฟไนต์-ดิฟเฟอเรนซ์และเครื่องหมาย

แทนจุดในสเปซด้วยรูปแบบ

$$(i,j,k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (3.13a)$$

ในที่นี้ $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ คือระยะทางที่เพิ่มขึ้นในทิศทาง x,y,z ตามลำดับ และ i,j,k เป็นจำนวนเต็ม เราจะแทนฟังก์ชันของสเปซและเวลาที่หาค่าที่จุดในกริดและในเวลาเป็น

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{i,j,k}^n \quad (3.13b)$$

ซึ่งให้ Δt เป็นเวลาที่เพิ่มขึ้น สมมติให้เป็นรูปแบบบนช่วงเวลาที่สังเกต, n เป็น จำนวนเต็ม ยี่จะใช้สมการไฟไนต์-ดิฟเฟอเรนซ์แบบตรงกลาง แสดงอนุพันธ์ของสเปซและเวลา ซึ่งทั้งสองแบบง่ายต่อการโปรแกรม ในสเปซและเวลาที่เพิ่มขึ้น พิจารณานิพจน์อนุพันธ์ของสเปซ อันดับ 1 ในทิศทาง x , หาค่าที่ $t_n = n\Delta t$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (3.14a)$$

เราเขียนส่วนที่เพิ่ม $\pm 1/2$ ในตัวห้อย i (พิกัด x) ของ u แทนระยะทางไฟไนต์-ดิฟเฟอเรนซ์ $\pm(1/2)\Delta x$ จุดหมายของยี่คือ สมการไฟไนต์-ดิฟเฟอเรนซ์แบบตรงกลางที่มีความเที่ยงตรงอันดับสอง แต่ปรากฏว่าเราต้องการข้อมูลสำหรับไฟไนต์-ดิฟเฟอเรนซ์จากทางขวาและซ้าย สำหรับจุดสังเกต $\Delta x/2$ ที่ระยะทั้งหมดคือ Δx

ยี่เลือกที่จะบันทึกแบบนี้เพราะต้องการแทรกส่วนประกอบ \bar{E} และ \bar{H} ในสเปซระหว่าง $\Delta x/2$ ตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบ \bar{E} ที่ติดกันถูกแยกโดย Δx และถูกตั้งที่ $\pm(1/2)\Delta x$ ของทั้งสองข้างของส่วนประกอบ \bar{H} ซึ่งถูกใช้หาค่าประมาณเชิงตัวเลขสำหรับ $\partial E/\partial X$ ตามขั้นเวลาของส่วนประกอบ \bar{H} สำหรับรูปแบบที่สมบูรณ์เราต้องเพิ่มปริมาณเชิงตัวเลขลงในสมการ (3.14a) สำหรับ $\partial u/\partial y$ และ $\partial u/\partial z$ สามารถเขียนให้ง่ายโดยการเพิ่มตัวห้อย j หรือ k ของ u ด้วย $\pm(1/2)\Delta y$ หรือ $\pm(1/2)\Delta z$ เข้าไป

นิพจน์ของยี่ สำหรับอนุพันธ์ย่อยเวลาอันดับ 1 ของ u ที่จุดคงที่ (i,j,k) คือ

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i,j,k}^{n+1/2} - u_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad (3.14b)$$

ตอนนี้ $\pm 1/2$ เพิ่มขึ้นในตัวยก n (พิกัดเวลา) ของ u แทนไฟไนต์-ดิฟเฟอเรนซ์ของเวลา $\pm(1/2)\Delta t$ ยี่เลือกบันทึกแบบนี้เพราะต้องการจะแทรกส่วนประกอบ \bar{E} และ \bar{H} ในช่วงเวลา $(1/2)\Delta t$ ตามวิธีการทำ leapfrog

สมการไฟน์ทิตเพอร์เรนซ์สำหรับสมการแมกซ์เวลล์ใน 3 มิติ

ตอนนี้เราจะประยุกต์ใช้ตามแนวความคิดข้างต้นและบันทึกผลสำเร็จเชิงตัวเลขจากสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ใน 3 มิติ โดยสมการ (3.11) และ (3.12) ตัวอย่างเช่น พิจารณาสมการ(3.11a) คือ

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho' H_x \right) \quad (3.11a)$$

แทนอนุพันธ์ของเวลาและสเปซที่ขั้นเวลา n และที่จุด (i,j,k) ของสเปซ จะได้ค่าเริ่มต้นคือ

$$\frac{H_x|_{i,j,k}^{n+1/2} - H_x|_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}} \left(\frac{E_y|_{i,j,k+1/2}^n - E_y|_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} - \frac{E_z|_{i,j+1/2,k}^n - E_z|_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} - \rho'_{i,j,k} \cdot H_x|_{i,j,k}^n \right) \quad (3.15a)$$

สมการของสนามทางขวามือ หาที่ขั้นเวลา n ประกอบด้วยสนามแม่เหล็ก เทอม H_x ที่แสดงไว้คือ การสูญเสียทางแม่เหล็ก ρ' เนื่องจาก H_x ที่ขั้นเวลา n ไม่ถูกสมมติให้เก็บไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ (มีเพียงค่า H_x ก่อนหน้านี้ที่ขั้นเวลา $n-1/2$ ถูกสมมติให้อยู่ในหน่วยความจำ) เราต้องการหาทางคำนวณในเทอมนี้ ซึ่งวิธีที่คิดมากคือ วิธี Semi-implicit approximation

$$H_x|_{i,j,k}^n = \frac{H_x|_{i,j,k}^{n+1/2} + H_x|_{i,j,k}^{n-1/2}}{2} \quad (3.15b)$$

H_x ที่ขั้นเวลา n จะสมมติให้เป็นค่าเฉลี่ยของ H_x ที่เก็บไว้ที่ขั้นเวลา $n-1/2$ และ H_x ใหม่ที่ขั้นเวลา $n+1/2$ แทนในสมการ(3.15a) หลังจากที่ถูกทั้งทั้งสองข้างด้วย Δt แล้วจะได้

$$H_x|_{i,j,k}^{n+1/2} - H_x|_{i,j,k}^{n-1/2} = \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}} \left(\frac{E_y|_{i,j,k+1/2}^n - E_y|_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} - \frac{E_z|_{i,j+1/2,k}^n - E_z|_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} - \rho'_{i,j,k} \left(\frac{H_x|_{i,j,k}^{n+1/2} + H_x|_{i,j,k}^{n-1/2}}{2} \right) \right) \quad (3.15c)$$

จะมี $H_x|_{i,j,k}^{n+1/2}$ และ $H_x|_{i,j,k}^{n-1/2}$ อยู่ทั้งสองข้างของสมการ(3.15c) ให้ทำการแยก $H_x|_{i,j,k}^{n+1/2}$ ไขว้ทางซ้ายมือ จะได้

$$\left(1 + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}} \cdot \frac{\rho'_{i,j,k}}{2} \right) H_x|_{i,j,k}^{n+1/2} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}} \cdot \frac{\rho'_{i,j,k}}{2} \right) H_x|_{i,j,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}} \left(\frac{E_y|_{i,j,k+1/2}^n - E_y|_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} - \frac{E_z|_{i,j+1/2,k}^n - E_z|_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} \right) \quad (3.15d)$$

หารทั้งสองข้างด้วย $(1 + \rho'_{i,j,k} \Delta t / 2\mu_{i,j,k})$ เพื่อหาขั้นเวลาที่แน่นอนสำหรับ $H_x|_{i,j,k}^{n+1/2}$

$$H_x|_{i,j,k}^{n+1/2} = \left(\frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) H_x|_{i,j,k}^{n-1/2} + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \cdot \begin{pmatrix} \frac{E_y|_{i,j,k+1/2}^n - E_y|_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} \\ - \frac{E_z|_{i,j+1/2,k}^n - E_z|_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} \end{pmatrix} \quad (3.16a)$$

ข้อสมมติ Semi-implicit ของสมการ(3.15b) จะพบว่ามีความเสถียรภาพเชิงตัวเลข และผลลัพธ์ที่แน่นอนของปริมาณการสูญเสียของแม่เหล็ก ρ' จาก 0 ถึงอนันต์ สำหรับ $H_x|_{i,j,k}^{n+1/2}$ จะอยู่ทางขวามือของสมการ(3.15c) สามารถเอามารวมกับเทอมที่เหมือนกันทางด้านซ้ายมือและหาค่าออกมา

ในลักษณะที่คล้ายกัน เราสามารถหานิพจน์ไฟไนท์-ดิฟเฟอเรนซ์ตามขั้นตอนวิธีของยี่สำหรับส่วนประกอบสนาม H_y และ H_z โดยใช้สมการแมกซ์เวลล์(3.11b) และ (3.11c) จะได้

$$H_y|_{i,j,k}^{n+1/2} = \left(\frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) H_y|_{i,j,k}^{n-1/2} + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \cdot \begin{pmatrix} \frac{E_z|_{i+1/2,j,k}^n - E_z|_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} \\ - \frac{E_x|_{i,j,k+1/2}^n - E_x|_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} \end{pmatrix} \quad (3.16b)$$

$$H_z|_{i,j,k}^{n+1/2} = \left(\frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) H_z|_{i,j,k}^{n-1/2} + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \cdot \begin{pmatrix} \frac{E_x|_{i,j+1/2,k}^n - E_x|_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} \\ - \frac{E_y|_{i+1/2,j,k}^n - E_y|_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} \end{pmatrix} \quad (3.16c)$$

เช่นเดียวกันเราสามารถที่จะหานิพจน์ไฟไนท์-ดิฟเฟอเรนซ์ โดยใช้วิธีของยี่สำหรับส่วนประกอบสนาม E_x , E_y และ E_z โดยใช้สมการแมกซ์เวลล์(3.12a) ถึง (3.12c) ตอนนี้ $\sigma E^{n+1/2}$ แสดงเทอมของค่าสูญเสียทางขวามือของแต่ละสมการ เราจะคำนวณโดยใช้ Semi-implicit ทำตามหลักการของสมการ (3.15b) ผลลัพธ์ของ 3 สมการที่ได้ จะมีรูปแบบเหมือนกับสมการ H

$$E_x|_{i,j,k}^{n+1} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) E_x|_{i,j,k}^n + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \cdot \begin{pmatrix} \frac{H_z|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ - \frac{H_y|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \end{pmatrix} \quad (3.17a)$$

$$E_y|_{i,j,k}^{n+1} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) E_y|_{i,j,k}^n + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \cdot \begin{pmatrix} \frac{H_x|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ - \frac{H_z|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_z|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} \end{pmatrix} \quad (3.17b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_z|_{i,j,k}^{n+1} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) E_z|_{i,j,k}^n + \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}} \right) \left(\frac{H_y|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{H_x|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_x|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \right) \quad (3.17c)$$

ด้วยสมการที่ (3.16) และ (3.17) ค่าเวกเตอร์สนามที่แต่ละจุดขึ้นกับค่าก่อนหน้า และค่าก่อนหน้าของส่วนประกอบของเวกเตอร์สนามอื่นๆที่จุดติดกัน

บริเวณสเปซที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุอย่างต่อเนื่อง

เพิ่มเติมสมการ (3.16) และ(3.17) สำหรับบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุอย่างต่อเนื่องกับตำแหน่งของอวกาศ มันควรจะกำหนดและเก็บค่าสัมประสิทธิ์การปรับปรุงข้อมูลคงที่(constant updating coefficient) เหล่านี้ สำหรับแต่ละเวกเตอร์ส่วนประกอบสนามก่อนที่ขึ้นเวลาจะเริ่ม

สัมประสิทธิ์การปรับปรุงข้อมูลของสนามไฟฟ้าที่จุด (i,j,k)

$$C_a|_{i,j,k} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \quad (3.18a)$$

$$C_{b_1}|_{i,j,k} = \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k} \Delta_1} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \quad (3.18b)$$

$$C_{b_2}|_{i,j,k} = \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k} \Delta_2} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \quad (3.18c)$$

สัมประสิทธิ์การปรับปรุงข้อมูลของสนามแม่เหล็กที่จุด (i,j,k)

$$D_a|_{i,j,k} = \left(\frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \quad (3.19a)$$

$$D_{b_1}|_{i,j,k} = \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k} \Delta_1} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \quad (3.19b)$$

$$D_{b_2}|_{i,j,k} = \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k} \Delta_2} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \right) \quad (3.19c)$$

ในสมการ(3.18) และ(3.19) Δ_1 และ Δ_2 แทนระยะทางระหว่าง 2 ตำแหน่งที่เพิ่มขึ้น ใช้สำหรับไฟไนท์-ดิฟเฟอเรนซ์ ในการคำนวณแต่ละส่วนประกอบสนาม สำหรับสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ ดังนั้น $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$ สำหรับกรณีนี้ C_{b_1}, C_{b_2} และ $D_{b_1} = D_{b_2}$ ลดความต้องการหน่วยความจำเหลือสัมประสิทธิ์การปรับปรุง 2 ตัวต่อเวกเตอร์สนาม สำหรับกรณีนี้ หน่วยความจำทั้งหมดโดยประมาณที่คอมพิวเตอร์ต้องการคือ $18N$ ซึ่ง N คือ จำนวนเซลล์ใน FD-TD สมการไฟไนท์-ดิฟเฟอเรนซ์(3.16) และ(3.17) สามารถเขียนใหม่ให้ง่ายขึ้นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_x|_{i,j,k}^{n+1/2} = D_{a,H_x}|_{i,j,k} H_x|_{i,j,k}^{n-1/2} + D_{b,H_x}|_{i,j,k} \begin{pmatrix} E_y|_{i,j,k+1/2}^n - E_y|_{i,j,k-1/2}^n \\ + E_z|_{i,j-1/2,k}^n - E_z|_{i,j+1/2,k}^n \end{pmatrix} \quad (3.20a)$$

$$H_y|_{i,j,k}^{n+1/2} = D_{a,H_y}|_{i,j,k} H_y|_{i,j,k}^{n-1/2} + D_{b,H_y}|_{i,j,k} \begin{pmatrix} E_z|_{i+1/2,j,k}^n - E_z|_{i-1/2,j,k}^n \\ + E_x|_{i,j,k-1/2}^n - E_x|_{i,j,k+1/2}^n \end{pmatrix} \quad (3.20b)$$

$$H_z|_{i,j,k}^{n+1/2} = D_{a,H_z}|_{i,j,k} H_z|_{i,j,k}^{n-1/2} + D_{b,H_z}|_{i,j,k} \begin{pmatrix} E_x|_{i,j+1/2,k}^n - E_x|_{i,j-1/2,k}^n \\ + E_y|_{i-1/2,j,k}^n - E_y|_{i+1/2,j,k}^n \end{pmatrix} \quad (3.20c)$$

$$E_x|_{i,j,k}^{n+1} = C_{a,E_x}|_{i,j,k} E_x|_{i,j,k}^n + C_{b,E_x}|_{i,j,k} \begin{pmatrix} H_z|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2} \\ + H_y|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} \end{pmatrix} \quad (3.21a)$$

$$E_y|_{i,j,k}^{n+1} = C_{a,E_y}|_{i,j,k} E_y|_{i,j,k}^n + C_{b,E_y}|_{i,j,k} \begin{pmatrix} H_x|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2} \\ + H_z|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \end{pmatrix} \quad (3.21b)$$

$$E_z|_{i,j,k}^{n+1} = C_{a,E_z}|_{i,j,k} E_z|_{i,j,k}^n + C_{b,E_z}|_{i,j,k} \begin{pmatrix} H_y|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2} \\ + H_x|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2} - H_x|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} \end{pmatrix} \quad (3.21c)$$

3.3 รูปแบบการแยกสนามออกจากกัน

สมการเคิร์ล(3.9 และ 3.10) สามารถใช้ในการหาสนามรวมที่เป็น FDTD เทคนิคได้ การสลับสนามจะสามารถแสดงออกมาได้ดังนี้

$$E = E^{\text{total}} \equiv E^{\text{incident}} + E^{\text{scattered}} \quad (3.22)$$

$$H = H^{\text{total}} \equiv H^{\text{incident}} + H^{\text{scattered}} \quad (3.23)$$

การแยกสนามก็เพื่อนำส่วนประกอบของสนามตกกระทบมาวิเคราะห์ ขณะที่สนามที่กระจัดกระจายจะถูกนำมาคำนวณ และจะมีเพียงสนามที่กระจัดกระจายเท่านั้นที่ต้องการให้มีการกลืนหายไปที่ problem space ตรงบริเวณนอก boundary ซึ่งตัวนำสมบูรณต้องการให้ $E^{\text{scat}} = -E^{\text{inc}}$ สำหรับวัตถุอื่นๆที่ต่างไปจากตัวนำสมบูรณ์จะมีสนามที่กระจัดกระจายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของตัวแปรของวัตถุ สำหรับตัวกลางนี้สนามที่กระจัดกระจายในตัวกลางจะอยู่ภายใต้สมการแมกซ์เวลล์ ในขณะที่ภายนอกตัวกลางมันจะเป็นไปตามสมการแมกซ์เวลล์ใน free space และสนามตกกระทบมักจะแผ่กระจายออกไปใน free space และถูกกำหนดเหมือนเป็นสนามที่แสดงอยู่ในตัวกระจัดกระจายที่อยู่ห่างออกไป

เรามักจะรวมเอาสนามตกกระทบเข้ากับสนามที่กระจัดกระจายเพื่อให้ได้เป็นสนามรวมตามที่ต้องการ ถ้าต้องการสมการ FD-TD ที่เป็นสนามรวมก็ต้องหาจากสมการสนามที่กระจัดกระจายโดยการกำหนดให้สนามที่ตกกระทบเป็นศูนย์และทำการป้อนเงื่อนไขเริ่มต้นให้กับสนามที่กระจัดกระจาย

สนามตกกระทบและสนามที่กระจัดกระจายต้องเป็นไปตามสมการแมกซ์เวลล์ โดยที่เราสมมุติให้วัตถุนั้นเป็นเส้นตรง สนามตกกระทบจะถูกทำให้แพร่กระจายคลื่นออกไปใน free space อย่างไม่ก็ติเพื่อให้ง่ายเข้า เราจะสมมุติ free space ขึ้นมา ขณะที่สนามตกกระทบจะเดินทางผ่าน free space ไปยัง problem space ซึ่งในตัวของกลางของตัวกระจายสนามรวมจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E}^{\text{total}} = -\frac{\mu \partial \mathbf{H}^{\text{total}}}{\partial t} - \rho' \mathbf{H}^{\text{total}} \quad (3.24)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^{\text{total}} = -\frac{\epsilon \partial \mathbf{E}^{\text{total}}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}^{\text{total}} \quad (3.25)$$

เมื่อ สนามตกกระทบมาถึงตัวกลางก็จะเป็นไปตาม free space

$$\nabla \times \mathbf{E}^{\text{inc}} = -\frac{\mu_0 \partial \mathbf{H}^{\text{inc}}}{\partial t} \quad (3.26)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^{\text{inc}} = \frac{\epsilon_0 \partial \mathbf{E}^{\text{inc}}}{\partial t} \quad (3.27)$$

ทำการเขียนสนามรวมใหม่ได้ดังนี้

$$\nabla \times (\mathbf{E}^{\text{inc}} + \mathbf{E}^{\text{scat}}) = \frac{-\mu \partial (\mathbf{H}^{\text{inc}} + \mathbf{H}^{\text{scat}})}{\partial t} - \rho' (\mathbf{H}^{\text{inc}} + \mathbf{H}^{\text{scat}}) \quad (3.28)$$

$$\nabla \times (\mathbf{H}^{\text{inc}} + \mathbf{H}^{\text{scat}}) = \frac{\epsilon \partial (\mathbf{E}^{\text{inc}} + \mathbf{E}^{\text{scat}})}{\partial t} + \rho' (\mathbf{E}^{\text{inc}} + \mathbf{E}^{\text{scat}}) \quad (3.29)$$

เราสามารถหกลบสมการข้างต้นเพื่อหาสมการที่ครอบคลุมสนามที่กระจัดกระจายในตัวกลาง ได้ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E}^{\text{total}} = \frac{-\mu \partial \mathbf{H}^{\text{scat}}}{\partial t} - \rho' \mathbf{H}^{\text{scat}} - \left[\frac{(\mu - \mu_0) \partial \mathbf{H}^{\text{inc}}}{\partial t} - \rho' \mathbf{H}^{\text{inc}} \right] \quad (3.30)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^{\text{total}} = \frac{\epsilon \partial \mathbf{E}^{\text{scat}}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}^{\text{scat}} - \left[\frac{(\epsilon - \epsilon_0) \partial \mathbf{E}^{\text{inc}}}{\partial t} - \sigma \mathbf{E}^{\text{inc}} \right] \quad (3.31)$$

ที่ภายนอกตัวกระจายใน free space สนามรวมทั้งหมดจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E}^{\text{total}} = -\frac{\mu_0 \partial \mathbf{H}^{\text{total}}}{\partial t} \quad (3.32)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^{\text{total}} = \frac{\epsilon_0 \partial \mathbf{E}^{\text{total}}}{\partial t} \quad (3.33)$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นดังนี้

$$\nabla \times (\mathbf{E}^{inc} + \mathbf{E}^{scat}) = \frac{-\mu_0 \partial (\mathbf{H}^{inc} + \mathbf{H}^{scat})}{\partial t} \quad (3.34)$$

$$\nabla \times (\mathbf{H}^{inc} + \mathbf{H}^{scat}) = \frac{\epsilon_0 \partial (\mathbf{E}^{inc} + \mathbf{E}^{scat})}{\partial t} \quad (3.35)$$

ต่อไปก็ทำการหกลบสนามที่ตกกระทบแรกก็จะได้สมการที่ครอบคลุมสนามที่กระจัดกระจายใน free space

$$\nabla \times \mathbf{E}^{scat} = -\frac{\mu_0 \partial \mathbf{H}^{scat}}{\partial t} \quad (3.36)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^{scat} = \frac{\epsilon_0 \partial \mathbf{E}^{scat}}{\partial t} \quad (3.37)$$

เหมือนดังที่คาดหมายไว้ จะเห็นได้ว่าสมการเหล่านี้สามารถพบได้จากสมการที่เป็นสนามกระจัดกระจายในตัวกลางโดยให้ตัวกลางกลายเป็น free space ดังเช่น สมการ 3.30 และ 3.31 จะกลายเป็นสมการ 3.36 และ 3.37 เมื่อให้

$$\mu \rightarrow \mu_0$$

$$\epsilon \rightarrow \epsilon_0$$

$$\sigma \rightarrow 0$$

$$\rho' \rightarrow 0$$

เพื่อรวบรัด ก็จะมีเพียงสมการ 1 กลุ่มเท่านั้นที่ต้องการนำมาเป็นแบบแผนการแยกสนามออกจากกัน สมการสำหรับสนามที่ตกกระทบ 3.26 และ 3.27 จะเป็นดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E}^{inc} = -\frac{\mu_0 \partial \mathbf{H}^{inc}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^{inc} = \frac{\epsilon_0 \partial \mathbf{E}^{inc}}{\partial t}$$

ให้ระลึกไว้ว่าสนามตกกระทบที่นำมาวิเคราะห์ต้องเป็นแมกซ์เวลล์ดังนั้นสมการสนามที่กระจัดกระจายในสมการ 3.30 และ 3.31 ก็จะเป็นดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E}^{total} = \frac{-\mu_0 \partial \mathbf{H}^{scat}}{\partial t} - \rho' \mathbf{H}^{scat} - \left[\frac{(\mu - \mu_0) \partial \mathbf{H}^{inc}}{\partial t} - \rho' \mathbf{H}^{inc} \right]$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^{total} = \frac{\epsilon_0 \partial \mathbf{E}^{scat}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}^{scat} - \left[\frac{(\epsilon - \epsilon_0) \partial \mathbf{E}^{inc}}{\partial t} - \sigma \mathbf{E}^{inc} \right]$$

$\rho', \mu, \epsilon,$ และ σ จะมีอยู่ภายในตัวกระจาย และด้วยค่า $\rho' = \sigma = 0, \mu = \mu_0$ และ $\epsilon = \epsilon_0$ จะอยู่ภายนอกตัวกระจาย ซึ่งต้องกำหนดมาเพื่อการคำนวณ

สมการสนามที่กระจัดกระจายสามารถนำมาเรียงแถวใหม่เพื่อว่าอนุพันธ์เวลาของสนามจะได้ถูกแทนลงไปให้เป็นเหมือนฟังก์ชันของเทอมที่มีเหลืออยู่ ซึ่งก็จะทำให้สะดวกต่อการสร้างสมการที่มีความแตกต่างกันอย่างพอเหมาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial H^{scat}}{\partial t} = -\frac{\rho'}{\mu} H^{scat} - \frac{\rho'}{\mu} H^{inc} - \frac{(\mu - \mu_0)}{\mu} \frac{\partial H^{inc}}{\partial t} - \frac{1}{\mu} (\nabla \times E^{scat}) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial E^{scat}}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\mu} E^{scat} - \frac{\sigma}{\mu} E^{inc} - \frac{(\epsilon - \epsilon_0)}{\mu} \frac{\partial E^{inc}}{\partial t} - \frac{1}{\epsilon} (\nabla \times H^{scat}) \quad (3.39)$$

เราจะทำให้กลุ่มของสมการสนามที่กระจัดกระจายแตกต่างกันไป แต่ก็จะเป็นเพียงแนะนำการทำให้สมการเหล่านี้แตกต่างกันในขีดจำกัดของตัวนำสมบูรณ์อันแรกสุด

3.4 สูตรทาง FDTD ในตัวนำสมบูรณ์

ที่ด้านนอกของตัวกระจาย สนามที่กระจัดกระจายจะเป็นไปตามเงื่อนไขใน free space ซึ่ง $\rho' = \sigma = 0$, $\mu = \mu_0$ และ $\epsilon = \epsilon_0$ ดังนั้นสมการ (3.38) และ (3.39) จะลดรูปเป็นดังนี้

$$\frac{\partial H^{scat}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} (\nabla \times E^{scat}) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial E^{scat}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} (\nabla \times H^{scat}) \quad (3.41)$$

ในตัวนำสมบูรณ์ สมการ (3.39) ที่ครอบคลุมสนามที่กระจัดกระจายอาจเขียนเป็น

$$\frac{\epsilon}{\sigma} \frac{\partial E^{scat}}{\partial t} = E^{scat} - E^{inc} - \frac{(\epsilon - \epsilon_0)}{\sigma} \frac{\partial E^{inc}}{\partial t} - \frac{1}{\sigma} (\nabla \times H^{scat}) \quad (3.42)$$

สำหรับตัวนำสมบูรณ์ที่ $\sigma = \infty$ และเพื่อความเหมาะสมสมการ 3.29 จะลดรูปเป็น

$$E^{scat} = -E^{inc} \quad (3.43)$$

ภายในตัวนำสมบูรณ์ เราจะใช้สมการ (3.43) มากกว่าที่จะใช้ (3.39) โดยที่ $\sigma = \infty$ ฉะนั้นถ้าแสดงตัวนำสมบูรณ์ใน free space เพียงอย่างเดียว และเจาะจงไปที่สนามตกกระทบเพียงอย่างเดียว ก็ต้องใช้ สมการใน free space (3.40) และ (3.41) ซึ่งใช้สำหรับสนามที่กระจัดกระจาย แต่เมื่อนำมาใช้กับ FDTD ก็ต้องบวกความสัมพันธ์ของสมการ (3.43) เข้าไป การทำให้ง่าย ๆ ก็โดยการใส่สมการ (3.43) กับผิวของตัวนำสมบูรณ์ สำหรับในส่วนที่เป็นภายในของตัวนำสมบูรณ์ ถ้าจะใช้ก็ต้องไม่คิดใน problem space

ต่อไปทำให้เกิดความแตกต่างในสมการของสนามที่กระจัดกระจายใน free space ซึ่งในจุดสำคัญของไฟไนท์-ดิฟเฟอเรนซ์ก็คือการใส่อนุพันธ์ที่แสดงให้เห็นความแตกต่าง ดังนี้

$$\frac{\partial f}{\partial t} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(x, t_2) - f(x, t_1)}{\Delta t} \approx \frac{f(x, t_2) - f(x, t_1)}{\Delta t} \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \equiv \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_2, t_2) - f(x_1, t_1)}{\Delta x} \approx \frac{f(x_2, t) - f(x_1, t)}{\Delta x} \quad (3.45)$$

ซึ่งสมการข้างบนนี้จะประมาณให้ Δt และ Δx เป็นปริมาณที่มีขนาดจำกัดมากกว่าที่จะเป็นขนาดจิ๋ว โดยที่ $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{C\sqrt{3}}$ เมื่อเป็นเซลล์สี่เหลี่ยมลูกบาศก์

โดยการแยกเวกเตอร์ในสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ ที่เป็นของสนามที่ระจัดกระจายออกเป็นส่วนๆ ให้เป็นส่วนประกอบที่เป็นสเกลาร์ซึ่งหาได้ดังนี้

$$\frac{\partial E_x^{\text{scat}}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \left(\frac{\partial H_z^{\text{scat}}}{\partial y} - \frac{\partial H_y^{\text{scat}}}{\partial z} \right) \quad (3.46a)$$

$$\frac{\partial E_y^{\text{scat}}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \left(\frac{\partial H_x^{\text{scat}}}{\partial z} - \frac{\partial H_z^{\text{scat}}}{\partial x} \right) \quad (3.46b)$$

$$\frac{\partial E_z^{\text{scat}}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \left(\frac{\partial H_y^{\text{scat}}}{\partial x} - \frac{\partial H_x^{\text{scat}}}{\partial y} \right) \quad (3.46c)$$

$$\frac{\partial H_x^{\text{scat}}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial E_y^{\text{scat}}}{\partial z} - \frac{\partial E_z^{\text{scat}}}{\partial y} \right) \quad (3.46d)$$

$$\frac{\partial H_y^{\text{scat}}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial E_z^{\text{scat}}}{\partial x} - \frac{\partial E_x^{\text{scat}}}{\partial z} \right) \quad (3.46e)$$

$$\frac{\partial H_z^{\text{scat}}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial E_x^{\text{scat}}}{\partial y} - \frac{\partial E_y^{\text{scat}}}{\partial x} \right) \quad (3.46f)$$

เพื่อให้่ายเข้าเราจะกระทำให้เฉพาะคู่ของ E_x^{scat} และ H_y^{scat} ซึ่งส่วนประกอบอื่น ๆ ก็จะเป็นไปตามนี้เหมือนกัน

โดยการแทนอนุพันธ์ที่มีความแตกต่างลงไป จะได้ผลดังนี้

$$\frac{E_x^{\text{scat},n} - E_x^{\text{scat},n-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_0} \left[\frac{\Delta H_z^{\text{scat},n-\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{\Delta H_y^{\text{scat},n-\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right] \quad (3.47)$$

$$\frac{H_y^{\text{scat},n+\frac{1}{2}} - H_y^{\text{scat},n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{\Delta E_z^{\text{scat},n}}{\Delta x} - \frac{\Delta E_x^{\text{scat},n}}{\Delta z} \right] \quad (3.48)$$

สมการทั้งสองที่ได้นี้ก็จะเป็นสูตรที่สมบูรณ์ของสนามที่แยกออกจากกันของตัวนำสมบูรณ์ ขั้นตอนต่อไปต้องพิจารณาว่าจะสามารถนำสูตรที่ได้นี้ไปใช้กับคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาฟอร์แทรนได้อย่างไร

บทที่ 4

ขั้นตอนการดำเนินงานและผลการดำเนินงาน

โครงการนี้เป็นกรนำโปรแกรมภาษาฟอร์แทรนสำหรับ FD-TD Simulation มาวิเคราะห์ และแก้ไขปรับปรุงให้สามารถทำงานได้ โดยต้องทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูล ต่างๆ เพื่อผลการดำเนินงานที่ถูกต้องและสมบูรณ์ และบรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงการ โดยมี ขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม FD-TD Simulation
3. สร้างเพิ่มข้อมูลกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทำ FD-TD Simulation
4. วิเคราะห์และปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม FD-TD Simulation
5. นำข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากการ Run โปรแกรม FD-TD Simulation ไปแสดงผลโดย โปรแกรมที่สามารถแสดงภาพกราฟฟิค 2 มิติและ 3 มิติได้
6. ทดลองเปลี่ยนขนาดสายอากาศในเพิ่มข้อมูลกำหนดพารามิเตอร์ แล้วเปรียบเทียบผลที่ ได้ กับทฤษฎี
7. ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องทั้งหมด
8. จัดทำปริญญานิพนธ์

1. การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์และแก้ไขปรับปรุงโปรแกรม ต้องศึกษาทฤษฎีและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องหลายเรื่องด้วยกัน ดังนี้

- ศึกษาทฤษฎีสายอากาศ

เกี่ยวกับคุณลักษณะที่ติของสายอากาศ, พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ, การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ, รูปแบบการแผ่กระจายการแพร่กระจายคลื่นแบบต่างๆ โดยเฉพาะทฤษฎีเกี่ยวกับสายอากาศเส้นลวดตรงครึ่งความยาวคลื่น ที่เราจะทำการ Simulate

- ศึกษาวิธีการเขียน โปรแกรมและรูปแบบคำสั่งในโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน

โดยใช้โปรแกรม Fortran PowerStation 4.0 ในการเขียน, คอมไพล์, และรันภาษาฟอร์แทรน

- ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงภาพ 2 มิติ และ 3 มิติได้

ในโครงการนี้เลือกใช้ Microsoft Excell 97 ในการแสดงรูปแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

- ศึกษาวิธีการ FD-TD

เกี่ยวกับทฤษฎีขั้นพื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้ในการทำความเข้าใจ โปรแกรม ช่วยให้สามารถปรับปรุงแก้ไขโปรแกรมได้ถูกต้อง และตรงปัญหามากขึ้น

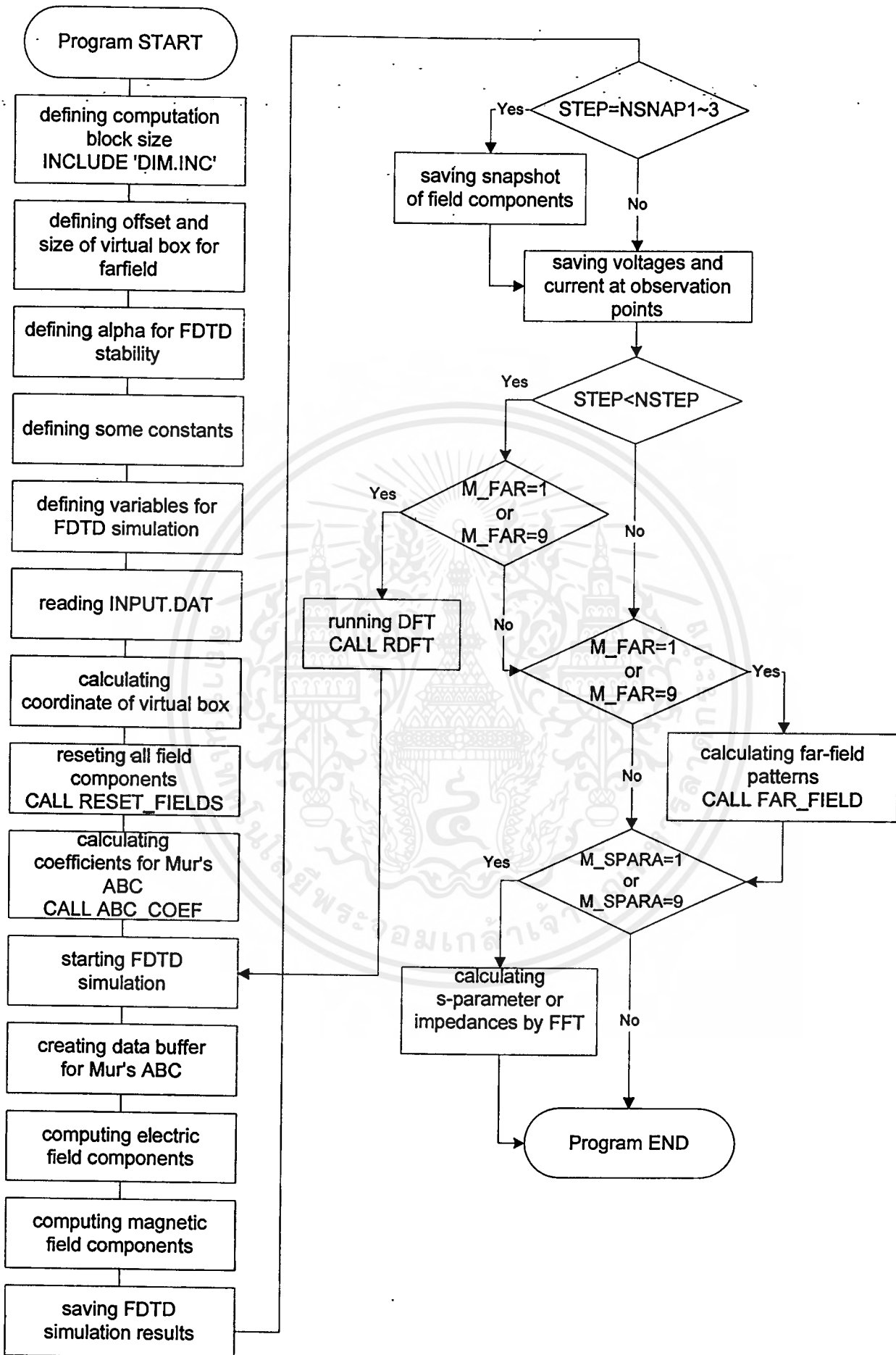
2. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม FD-TD Simulation

- ทำการศึกษาขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรมและในแต่ละส่วนย่อยของโปรแกรมว่าทำงานอย่างไร น่าจะได้ผลมาอย่างไร และเพื่ออะไรแล้วนำมาเขียน FLOW CHAT แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมห่างแสดงในรูปที่ 4.1

3. สร้างเพิ่มข้อมูลกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆในการทำ FD-TD Simulation

โปรแกรม QFDTD (ภาคผนวก ก) นี้เป็นโปรแกรมภาษาฟอร์แทรนสำหรับ FD-TD Simulation และการวิเคราะห์ห้วงจรไมโครเวฟและสายอากาศ โดยเฉพาะ PLANAR STRUCTURE ON MULTILAYERED DIELECTRIC SUBSTRATES ซึ่งมีลักษณะเด่นและความสามารถดังนี้

- ใช้ได้ทั้งโครงสร้างแบบแพคเกจและแบบเปิด
- ใช้ได้ทั้งไมโครสตริปและโครงสร้างแบบ CPW FEEDING
- ใช้การกระตุ้นโดยเกาส์เซียนพัลส์ สำหรับการตอบสนองแบบบรอดแบนด์
- ใช้กับโครงสร้าง 3 มิติ
- แบ่งเป็น 5 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 4.1 FLOW CHART แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมรั้งที่มีการนำไปใช้

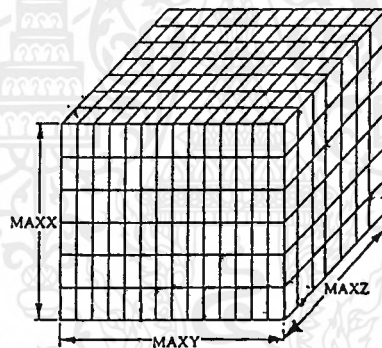
- แสดงกราฟฟิสิกของส่วนประกอบสนาม ที่ทุกๆชั้นเวลาของ FD-TD Simulation
- แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นแบบสนามระยะไกลของสายอากาศ

เราสามารถจะนำโปรแกรมนี้มาประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ โดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆที่เราต้องการวิเคราะห์อะไร ค่าตัวแปรต่างๆที่ต้องใช้เป็นเท่าไร ซึ่งตามวัตถุประสงค์ของโครงการนี้เป็นกรวิเคราะห์แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล ซึ่งใช้งานที่ความถี่ 10GHz ,ขนาดเซลล์ 0.484 มิลลิเมตร ชั้นเวลา 0.93146 ps

ไฟล์ที่เก็บข้อมูลและพารามิเตอร์ต่างๆเกี่ยวกับสายอากาศที่เราจะนำมาใช้ร่วมกับ โปรแกรมหลักมี 2 ไฟล์(ภาคผนวก ข) คือ

1. DIM.INC

เป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของบล็อก ซึ่งครอบคลุมสิ่งที่เราต้องการวิเคราะห์ (สายอากาศ) โดยมีค่าความยาวสูงสุดตามแนว X,Y และ Z



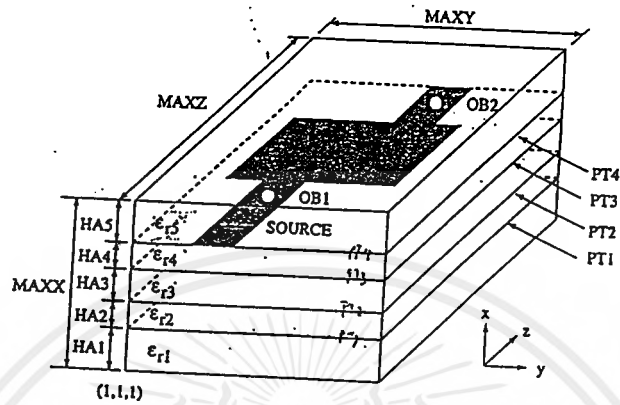
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของบล็อกที่กำหนดโดยไฟล์ DIM.INC

2. INPUT.DAT

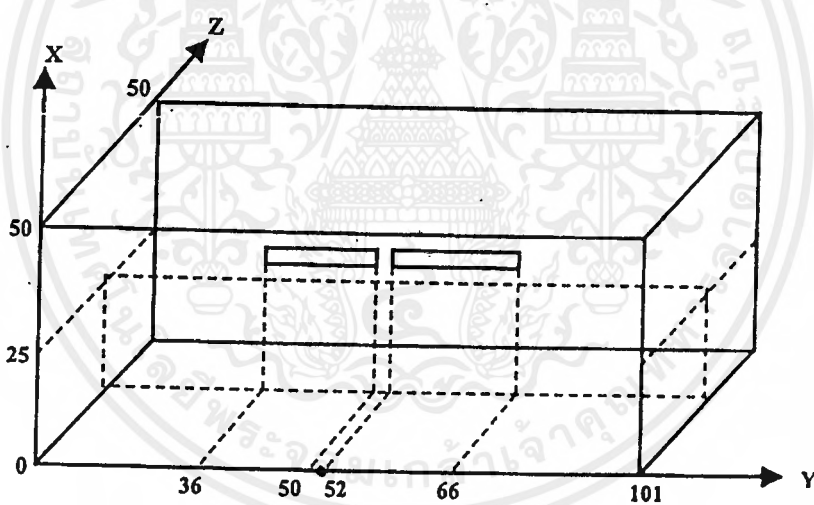
เป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศที่ต้องนำมาคำนวณในโปรแกรมหลัก โดยรายละเอียดมีดังนี้

- แบ่งออกเป็น 5 ชั้น แต่ละชั้นกำหนดความหนาชั้นและค่าคงที่ฉนวนของวัสดุที่อยู่ในชั้นนั้นๆ ซึ่งในที่นี้เป็น 1 ทุกชั้น หมายถึง ทุกชั้นเป็นอากาศ
- ขนาดเซลล์ตามแกน X,Y และ Z
- ค่าความถี่ที่ใช้งาน
- ชนิดและตำแหน่งของเกาส์เซียนพัลส์ซึ่งเป็นตัวกระตุ้น
- ขนาดของชั้นเวลา, ชั้นการ simulate และเวลาที่บันทึกส่วนประกอบสนาม
- ตำแหน่งของจุดสังเกตและจุดป้อนสัญญาณเข้า

- ข้อมูลกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการคิดที่สนามระยะไกล
- ข้อมูลกำหนดจำนวนแพทเทอร์นที่ต้องการให้แสดงบนพื้นผิวของแต่ละชั้น
- ข้อมูลกำหนดขนาดและตำแหน่งของสายอากาศที่ทำการ simulate



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการแบ่งชั้นเพื่อวิเคราะห์ใน โปรแกรม QFDTD



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการวางสายอากาศและจุดป้อนสัญญาณ

4. วิเคราะห์และปรับปรุงแก้ไข โปรแกรม FD-TD Simulation

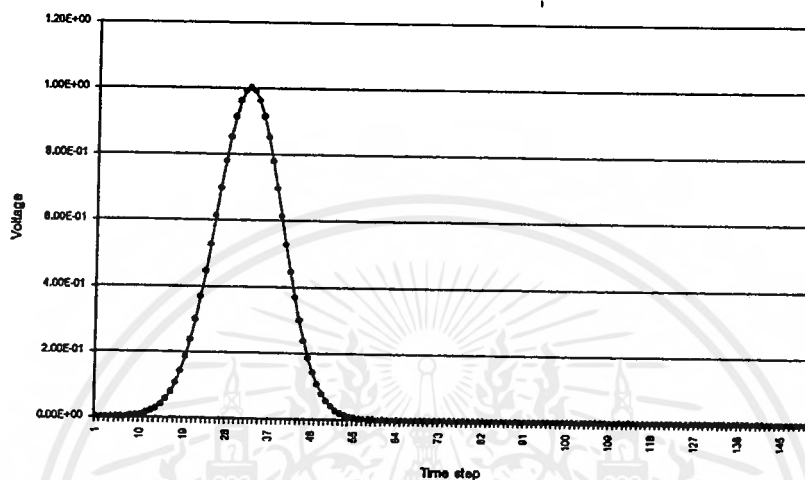
เนื่องจากโปรแกรมนี้ยังไม่สมบูรณ์มีความผิดพลาด เช่น การส่งรับค่าตัวแปรระหว่างฟังก์ชัน, การเปิดไฟล์ต่างๆมาบันทึกข้อมูลซึ่งเมื่อตรวจสอบข้อมูลในไฟล์ พบว่าข้อมูลที่ได้ผิดจากที่ควรเป็น หรือไม่มีข้อมูล ต้องตรวจสอบคำสั่งและการทำงานในส่วนนั้นๆแล้วแก้ไขให้ถูกต้อง

ทำให้โปรแกรมเรียกไฟล์ DIM.INC และ INPUT.DAT ได้ คอมไพล์ผ่านและรันออกมาได้ ไฟล์เอาร์ททุกที่มีข้อมูลถูกต้อง

5. นำข้อมูลเชิงตัวเลขจากไฟล์เอาต์พุตต่างๆมาสร้างภาพกราฟฟิค

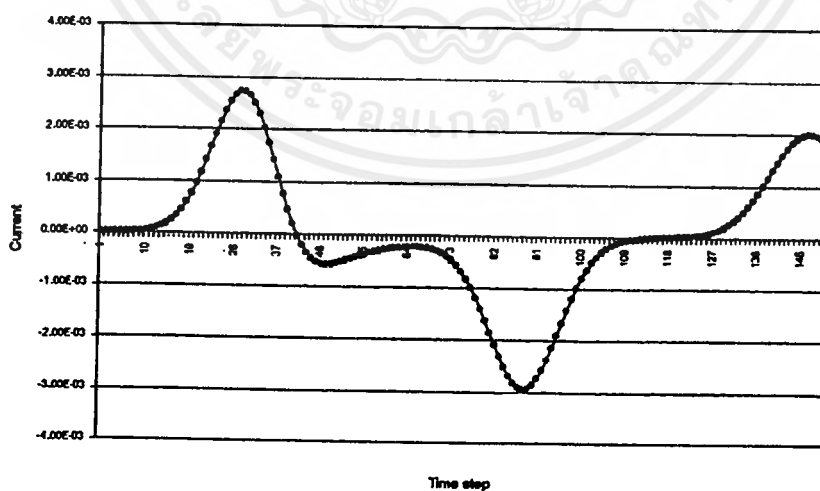
ไฟล์เอาต์พุตที่ได้จากการรันโปรแกรมมีดังนี้

- Pulse_1 บันทึกค่าแรงดันแก๊สเขียนพล็อตที่จุดป้อนสัญญาณ



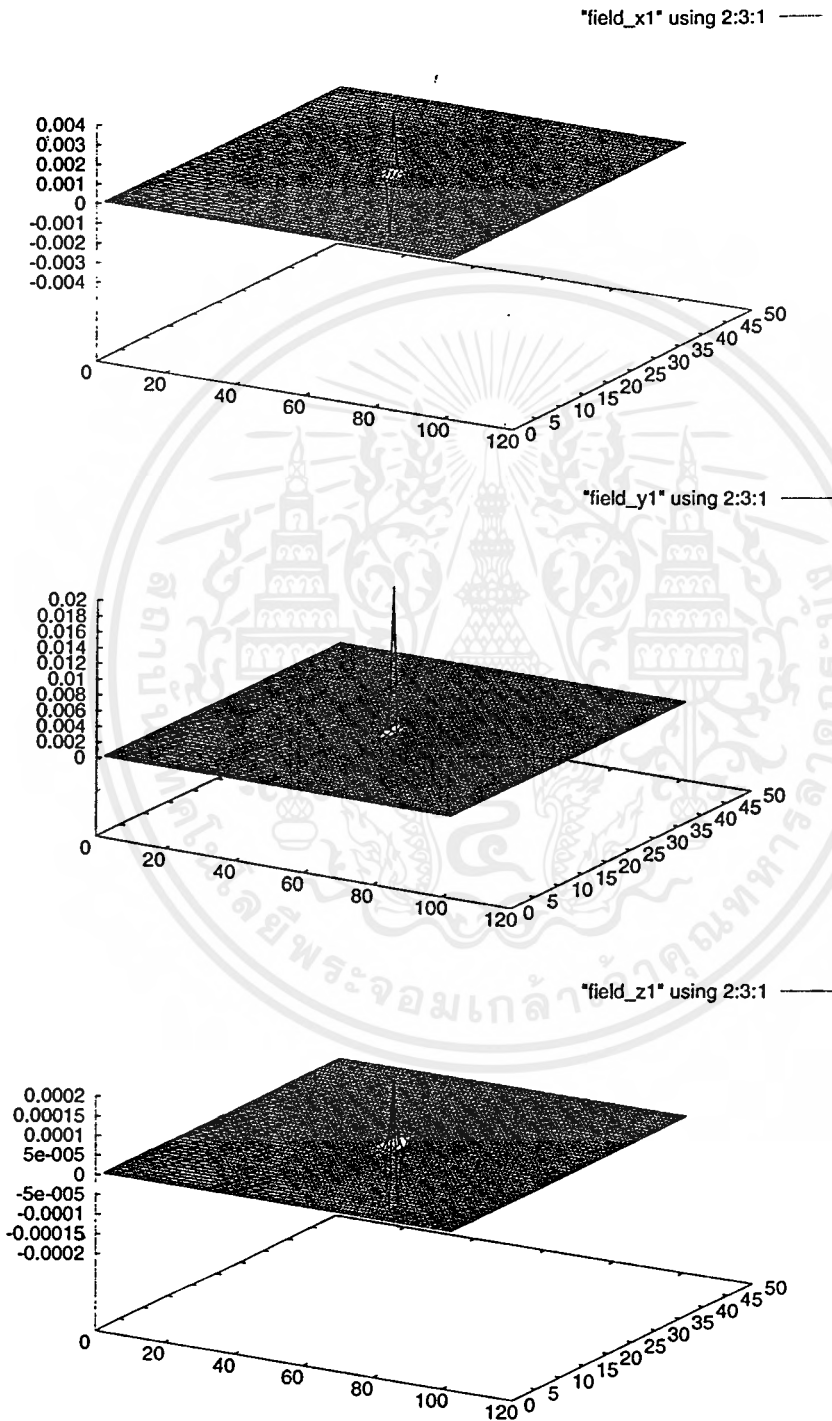
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของแก๊สเขียนพล็อตที่จุดป้อนสัญญาณ

- Current บันทึกค่ากระแสที่จุดป้อนสัญญาณ



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะกระแสที่จุดป้อนสัญญาณ

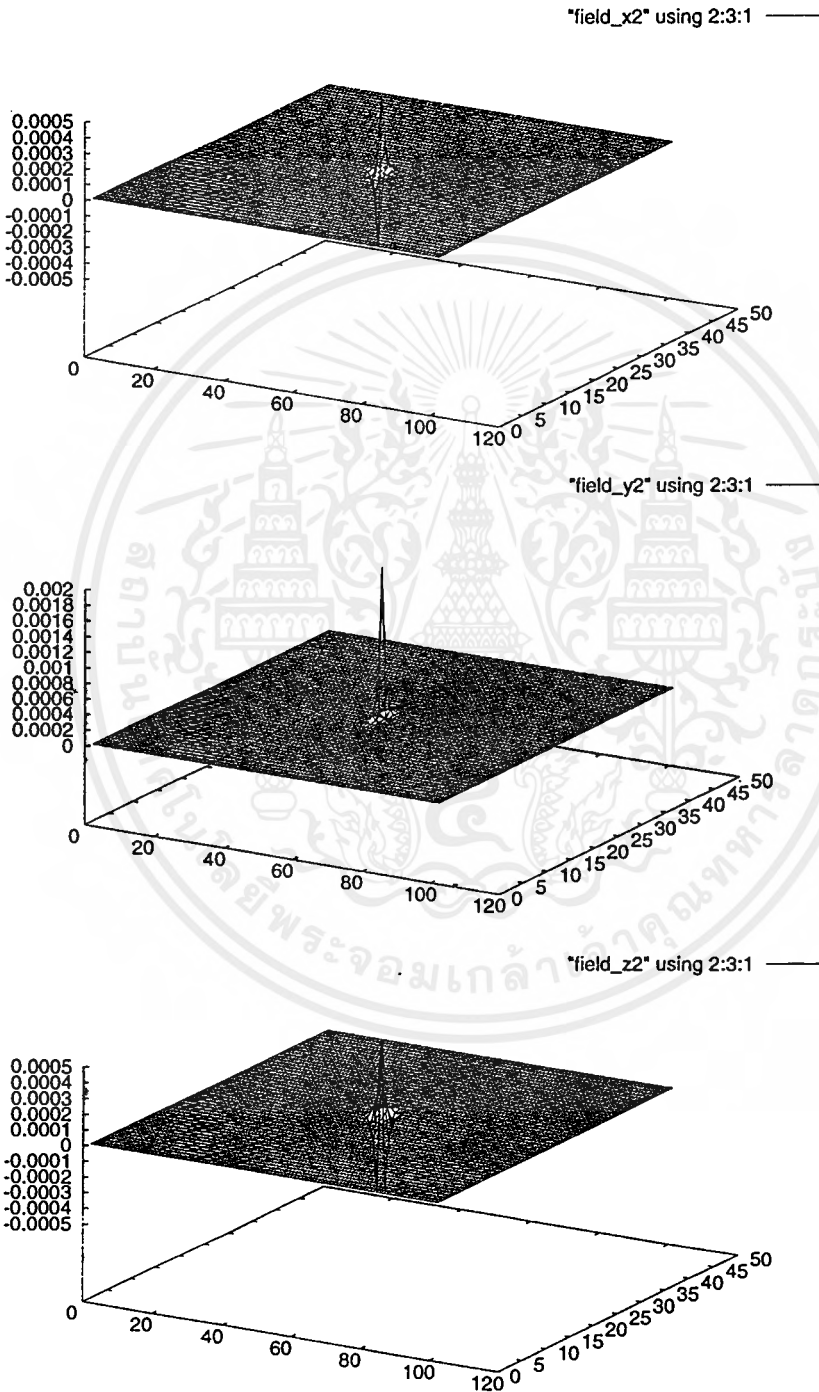
- Field_x1,Field_y1,Field_z1 บันทึกค่าสนามไฟฟ้าชั้นเวลาที่ 5,7,8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 แสดงสนามไฟฟ้าในเชิงขนาดที่จุดป้อนตามแนวแกน x,y,z ที่ชั้นเวลาที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

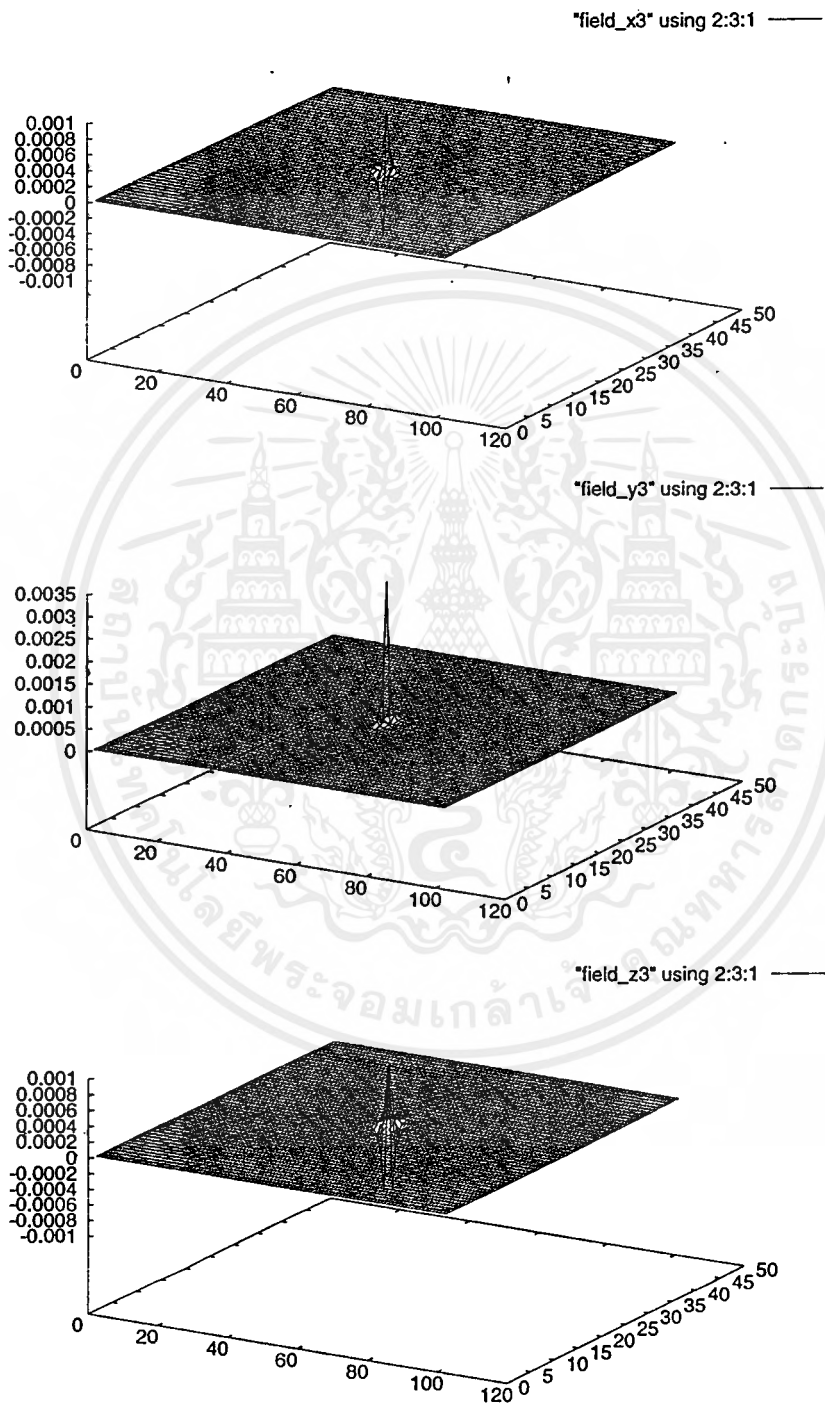
- Field_x2,Field_y2,Field_z2 บันทึกค่าสนามไฟฟ้าชั้นเวลาที่ 5,7,8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 แสดงสนามไฟฟ้าในเชิงขนาดที่จุดป้อนตามแนวแกน x,y,z ที่ชั้นเวลาที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Field_x3,Field_y3,Field_z3 บันทึกค่าสนามไฟฟ้าขึ้นเวลาที่ 5,7,8 ตามลำดับ

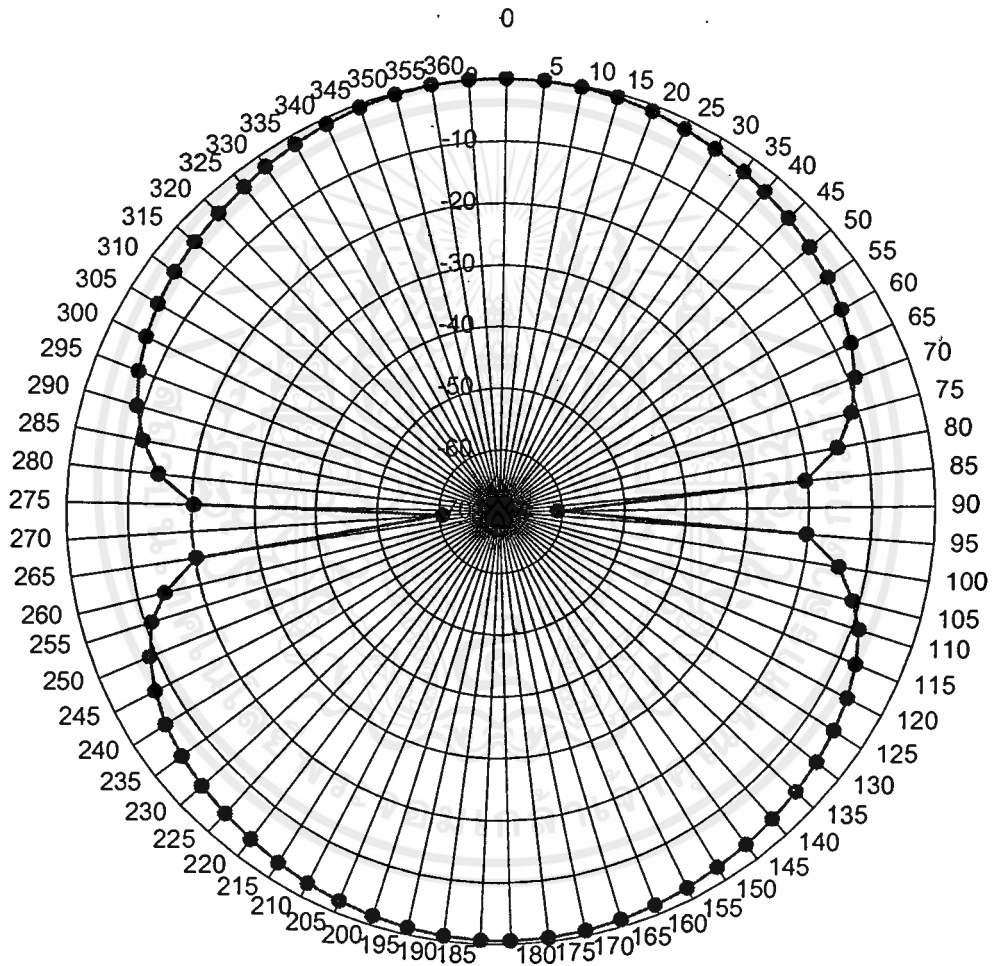


รูปที่ 4.9 แสดงสนามไฟฟ้าในเชิงขนาดที่จุดป้อนตามแนวแกน x,y,z ที่ขึ้นเวลาที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- XY_PL บันทึกข้อมูลสำหรับพล็อตรูปแพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลในระนาบ XY

XY

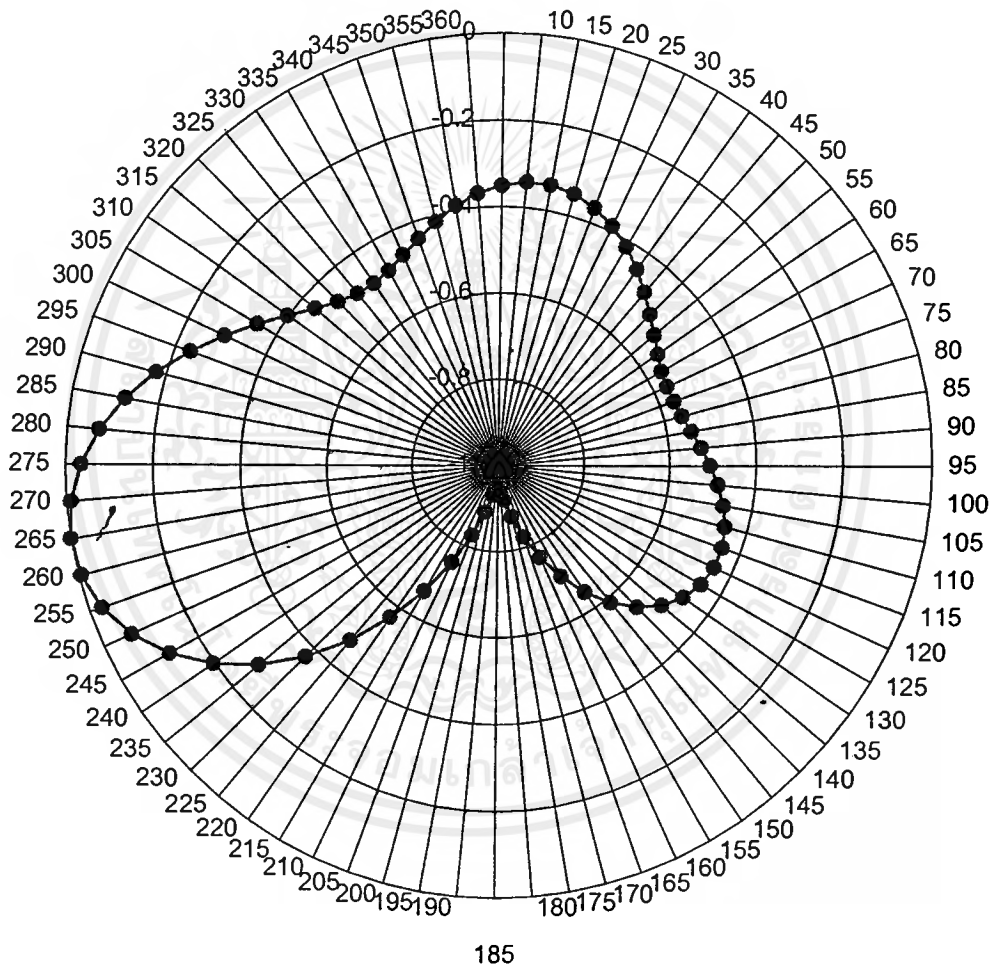


รูปที่ 4.10 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลขนาด $\lambda/2$
ในระนาบแกน XY

- XZ_PL บันทึกข้อมูลสำหรับพล็อตรูปแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลในระนาบ XZ

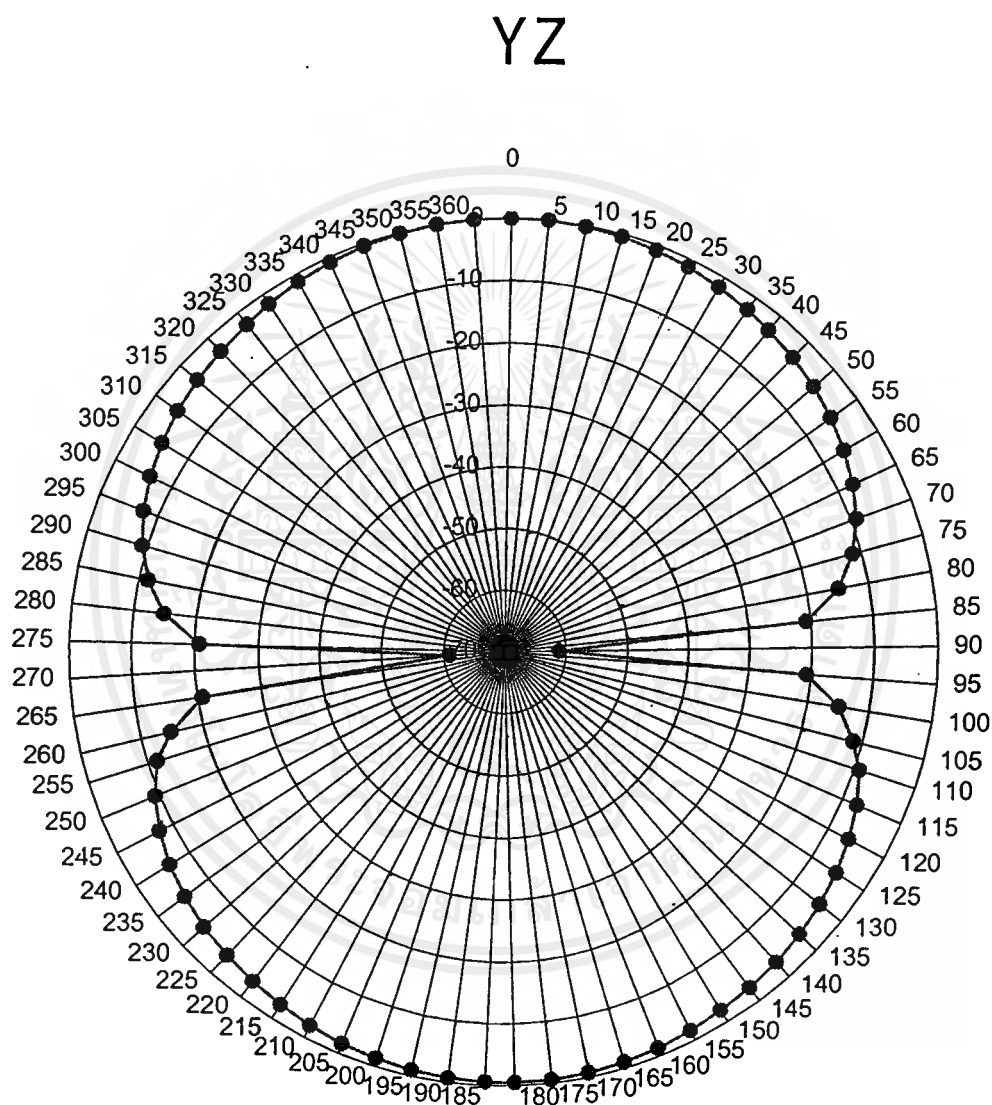
XZ

5



รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลขนาด $\lambda/2$
ในระนาบแกน XZ

- YZ_PL บันทึกข้อมูลสำหรับพล็อตรูปแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลในระนาบ YZ



รูปที่ 4.12 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลขนาด $\lambda/2$
ในระนาบแกนYZ

บทสรุป

- 1). สามารถเข้าใจหลักการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ
- 2). สามารถเข้าใจหลักการเขียนภาษาฟอร์แทรน และแก้ไขจุดที่บกพร่องได้
- 3). สามารถนำข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมหลักมาแสดงภาพได้
- 4). ทำให้ทราบพารามิเตอร์พื้นฐานที่ต้องใช้ในการ Simulate แบบ FD-TD
- 5). สามารถนำโปรแกรมไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆต่อไปในอนาคตได้

อุปสรรคและปัญหา

- การใช้งานบนระบบปฏิบัติการ UNIX บน SUPER COMPUTTOR ประสบกับปัญหาในการติดต่อบ่อยครั้ง ทำให้ขาดความต่อเนื่องในการทำงาน ซึ่งสามารถแก้ไขโดยเปลี่ยนมาใช้โปรแกรม Fortran Powerstation 4.0 ซึ่งทำงานบนพีซี การทำงานช้ากว่า แต่ก็ใช้งานง่ายและความสามารถสูงเพียงพอต่อความต้องการ
- ในการแก้โปรแกรมที่ผู้อื่นเขียนขึ้นยากกว่าการเขียนโปรแกรมขึ้นเอง เพราะต้องเข้าใจว่าผู้เขียน มีขั้นตอนในการคิดคำนวณและวิธีการเขียนโปรแกรมอย่างไร เพื่อที่จะแก้ไขในส่วนที่ผิดให้โปรแกรมทำงานได้ผลถูกต้อง
- ทฤษฎี FD-TD เป็นวิธีที่ยากที่จะทำความเข้าใจสำหรับผู้เริ่มต้นเนื่องจากไม่มีหนังสือภาษาไทยและ ในปัจจุบันมีผู้รู้ทฤษฎีนี้เฉพาะกลุ่ม

บรรณานุกรม

- [1] วิสันต์ อาชาเดโชพล และ Advamced Engineering Group , “สายอากาศและเทคนิคการติดตั้ง” ,กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, หน้า 43-49,66,72-75.
- [2] อ. โมไนย ไกรฤกษ์,อ.วิวัฒน์ กิรานนท์, “ทฤษฎีสายอากาศ” , 2535, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 5, หน้า 6-42,95,100-108,110-112.
- [3] John Griffiths, “Radio wave propagation and antennas”,Prentice-Hall International (uk) Ltd.,1987
- [4] The AmericanRadio Reby League,Inc. Newington,cr 06111, “The ARRL Antenna Book”. 14th ed.,3rd printing
- [5] KARL S.KUNZ,RAYMOND J.LUEBBERS, “Finite-Difference Time Domain Method For Electromagnetics”
- [6] Allen Taflove, “Computational Electrodynamics The Finite-Difference Time-Domain Method”,Artech House Boston. London,1995,pp.51-54,58-68.
- [7] CONSTANTINE A.BALANIS Arizona state University, “ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN”,2nd ed.,Printed in the United States of America,1997, pp.1-2,12-15,19-20,28-47,58-70,73-78,133,151-156,162-164.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรม QFDTD.f

```
C ----- MAIN PROGRAM START -----
C
C DEFINING COMPUTATION BLOCK SIZE BY INCLUDING DIM.INC
  INCLUDE'DIM.INC'
C DEFINING OFFSET AND SIZE OF VIRTUAL BOX FOR FAR_FIELDS
  PARAMETER(NXOFF=3,NYOFF=3,NZOFF=3)
  PARAMETER(MVBX=MAXX-6,MVBY=MAXY-6,MVBZ=MAXZ-6)
C
C DEFINING ALPHA FOR FDTD STABILITY
C
  PARAMETER(ALPHA=1.0)
C
C DEFINING SOME CONSTANTS USED IN CALCULATIONS
C
  PARAMETER(E0=8.854185E-12,U0=1.2566371E-6)
  PARAMETER(C=2.997925E+8,PI=3.14159265359)
C
C DEFINING VARIABLES FOR FDTD SIMULATION
C
  INTEGER HA1,HA2,HA3,HA4,HA5,T0,TW,TG,STEP
  INTEGER X,Y,Z,EXCX1,EXCX2,EXCY1,EXCY2,EXCZ1, EXCX,
  & EXCYL1,EXCYL2,EXCYR1,EXCYR2,EXCZ2,OBZ(3),OBZ(3),
  & MOB(3),X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,PT1(MAXY,MAXZ),
  & PT2(MAXY,MAXZ),PT3(MAXY,MAXZ),PT4(MAXY,MAXZ),
  & XXS,XXE,YYs,YYE,ZZS,ZZE,BLOC(MAXX,MAXY,MAXZ),
  & LXS,LXE,LYS,LYE,LZS,LZE,
  & PLATEY(MAXX,MAXY,MAXZ),PLATEZ(MAXX,MAXY,MAXZ)
  INTEGER CXANT,CYANT,CZANT
  REAL DX,DY,DZ,DT,ER1,ER2,ER3,ER4,ER5,DD(3)
  REAL EA1X,EA2X,EA3X,EA4X,EA5X,EA1Y,EA2Y,EA3Y,EA4Y,EA5Y,
  & EA1Z,EA2Z,EA3Z,EA4Z,EA5Z,EB1X,EB2X,EB3X,EB4X,EB5X,
  & EB1Y,EB2Y,EB3Y,EB4Y,EB5Y,EB1Z,EB2Z,EB3Z,EB4Z,EB5Z,
  & EC1XY,EC1XZ,EC1YX,EC1YZ,EC1ZX,EC1ZY,
  & EC2XY,EC2XZ,EC2YX,EC2YZ,EC2ZX,EC2ZY,
  & EC3XY,EC3XZ,EC3YX,EC3YZ,EC3ZX,EC3ZY,
  & EC4XY,EC4XZ,EC4YX,EC4YZ,EC4ZX,EC4ZY,
  & EC5XY,EC5XZ,EC5YX,EC5YZ,EC5ZX,EC5ZY
  REAL E(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),H(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),
  & EXF(0:MAXX,0:MAXY,2,2), EXE(0:MAXX,0:MAXY,2,2),
  & EXS1(0:MAXX,0:MAXZ,2,2), EXS2(0:MAXX,0:MAXZ,2,2),
  & EYF(0:MAXX,0:MAXY,2,2), EYE(0:MAXX,0:MAXY,2,2),
  & EYS1(0:MAXY,0:MAXZ,2,2), EYS2(0:MAXY,0:MAXZ,2,2),
```

```

& EZS1(0:MAXX,0:MAXZ,2,2), EZS2(0:MAXX,0:MAXZ,2,2),
& EZT(0:MAXY,0:MAXZ,2,2), EZB(0:MAXY,0:MAXZ,2,2)
COMPLEX EYMIFX(MVBY,MVBZ),EZMIFX(MVBY,MVBZ),
& HYMIFX(MVBY,MVBZ),HZMIFX(MVBY,MVBZ),
& EYMAFX(MVBY,MVBZ),EZMAFX(MVBY,MVBZ),
& HYMAFX(MVBY,MVBZ),HZMAFX(MVBY,MVBZ),
& EXMIFY(MVBX,MVBZ),EZMIFY(MVBX,MVBZ),
& HXMIFY(MVBX,MVBZ),HZMIFY(MVBX,MVBZ),
& EXMAFY(MVBX,MVBZ),EZMAFY(MVBX,MVBZ),
& HXMAFY(MVBX,MVBZ),HZMAFY(MVBX,MVBZ),
& EXMIFZ(MVBX,MVBY),EYMIFZ(MVBX,MVBY),
& HXMIFZ(MVBX,MVBY),HYMIFZ(MVBX,MVBY),
& EXMAFZ(MVBX,MVBY),EYMAFZ(MVBX,MVBY),
& HXMAFZ(MVBX,MVBY),HYMAFZ(MVBX,MVBY)
COMMON/EH/E,H,DX,DY,DZ,DT
COMMON/ABC/EXF,EXE,EXS1,EXS2,EYF,EYE,EYT,EYB,
& EZS1,EZS2,EZT,EZB
COMMON/COEF/ER1,ER2,ER3,ER4,ER5,
& EA1X,EA2X,EA3X,EA4X,EA5X,EA1Y,EA2Y,EA3Y,EA4Y,EA5Y,
& EA1Z,EA2Z,EA3Z,EA4Z,EA5Z,EB1X,EB2X,EB3X,EB4X,EB5X,
& EB1Y,EB2Y,EB3Y,EB4Y,EB5Y,EB1Z,EB2Z,EB3Z,EB4Z,EB5Z,
& EC1XY,EC1XZ,EC1YX,EC1YZ,EC1ZX,EC1ZY,
& EC2XY,EC2XZ,EC2YX,EC2YZ,EC2ZX,EC2ZY,
& EC3XY,EC3XZ,EC3YX,EC3YZ,EC3ZX,EC3ZY,
& EC4XY,EC4XZ,EC4YX,EC4YZ,EC4ZX,EC4ZY,
& EC5XY,EC5XZ,EC5YX,EC5YZ,EC5ZX,EC5ZY
COMMON/DFT/EYMIFX,EZMIFX,HYMIFX,HZMIFX,EYMAFX,EZMAFX,
& HYMAFX,HZMAFX,EXMIFY,EZMIFY,HXMIFY,HZMIFY,
& EXMAFY,EZMAFY,HXMAFY,HZMAFY,EXMIFZ,EYMIFZ,
& HXMIFZ,HYMIFZ,EXMAFZ,EYMAFZ,HXMAFZ,HYMAFZ
COMMON/ANT1/M_FAR,CXANT,CYANT,CZANT
COMMON/ANT2/OMEGA,NANGINC
COMMON/VB/MIFX,MAFX,MIFY,MAFY,MIFZ,MAFZ,MFX,MFY,MFZ

```

C

C ----- READING INPUT.DAT-----

C

OPEN(1,FILE='INPUT.DAT')

C

C DIFINING LAYER THICKNESS AND DIELECTRIC CONSTANT

C

READ(1,*)

READ(1,*)HA1,HA2,HA3,HA4,HA5,ER1,ER2,ER3,ER4,ER5

C

C DIFINING CELL SIZE AND EXCITATION GAUSSIAN PULSE

C

READ(1,*)

READ(1,*)DX,DY,DZ,T1,T2

DT = ALPHA*(C*SQRT((1/DX)**2 + (1/DY)**2 + (1/DZ)**2))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TW = (T1*1.E-12)/DT

T0 = (T2*1.E-12)/DT

TG = T0+4*TW

C

C DEFINING STEP NUMBER FOR SIMULATION AND TIME TO RECORD

C FIELD COMPONENT AS SPECIFIED

READ(1,*)

READ(1,*)NSTEP,NSNAP1,NSNAP2,NSNAP3,MCOMPX,MCOMPY,MCOMPZ,ASTEP

C

C DEFINING TYPE AND LOCATION OF PULSE EXCITATION

C

READ(1,*)

READ(1,*)MEXC_MS,EXCX1,EXCX2,EXCY1,EXCY2,EXCZ1

READ(1,*)

READ(1,*)MEXC_CPW,EXCX,EXCYL1,EXCYL2,

& EXCYR1,EXCYR2,EXCZ2,PMODE

C

C DEFINING NUMBER AND LOCATION OF OBSERVATION POINTS

C

READ(1,*)

READ(1,*)NOBSERVE

READ(1,*)

DO I=1,NOBSERVE

READ(1,*)OBY(I),OBZ(I),MOB(I)

ENDDO

C

C DEFINING STATUS OF POST-PROCESSINGS

C

READ(1,*)

READ(1,*)M_SPARA

READ(1,*)

IF((M_SPARA.EQ.1).OR.(M_SPARA.EQ.9))THEN

READ(1,*)FST,FEN,ZZ0,LL,RB_FST,RB_FEN

AL = LL*DY

ELSE

READ(1,*)

ENDIF

C

C DEFINING PARAMETERS FOR FAR-FIELD CALCULATION

C

READ(1,*)

READ(1,*)M_FAR

READ(1,*)

IF((M_FAR.EQ.1).OR.(M_FAR.EQ.9)) THEN

READ(1,*)CXANT,CYANT,CZANT,FREQ,NANGINC

OMEGA = 2.*PI*FREQ*1.E+9

ELSE

READ(1,*)

```

ENDIF
C
C DEFINING PATTERN PT1
C
READ(1,*)
READ(1,*)NPATTERN
READ(1,*)
DO I =1 ,NPATTERN
  READ(1,*)YYS,YYE,ZZS,ZZE,MORDP
  CALL PATTERN(PT1,YYS,YYE,ZZS,ZZE,MORDP)
ENDDO
C
C DEFINING PATTERN PT2
C
READ(1,*)
READ(1,*)NPATTERN
READ(1,*)
DO I =1 ,NPATTERN
  READ(1,*)YYS,YYE,ZZS,ZZE,MORDP
  CALL PATTERN(PT2,YYS,YYE,ZZS,ZZE,MORDP)
ENDDO
C
C DEFINING PATTERN PT3
C
READ(1,*)
READ(1,*)NPATTERN
READ(1,*)
DO I =1 ,NPATTERN
  READ(1,*)YYS,YYE,ZZS,ZZE,MORDP
  CALL PATTERN(PT3,YYS,YYE,ZZS,ZZE,MORDP)
ENDDO
C
C DEFINING PATTERN PT4
C
READ(1,*)
READ(1,*)NPATTERN
READ(1,*)
DO I =1 ,NPATTERN
  READ(1,*)YYS,YYE,ZZS,ZZE,MORDP
  CALL PATTERN(PT4,YYS,YYE,ZZS,ZZE,MORDP)
ENDDO
C
C DEFINING NORMAL-TO-Y CONDUCTOR PLATES
C
READ(1,*)
READ(1,*)NPLATEY
READ(1,*)
IF(NPLATEY.GE.1) THEN

```

```

DO I=1,NPLATEY
  READ(1,*)XXS,XXE, YYS,ZZS,ZZE
  CALL CONPLATEY(PLATEY,XXS,XXE, YYS,ZZS,ZZE)
ENDDO
ELSE
  READ(1,*)
ENDIF
C
C DEFINING NORMAL-TO-Z CONDUCTOR PLATES
C
  READ(1,*)
  READ(1,*)NPLATEZ
  READ(1,*)
  IF(NPLATEZ.GE.1) THEN
    DO I=1,NPLATEZ
      READ(1,*)XXS,XXE, YYS,YYE,ZZS
      CALL CONPLATEZ(PLATEZ,XXS,XXE, YYS,YYE,ZZS)
    ENDDO
  ELSE
    READ(1,*)
  ENDIF
C
C DEFINING CONDUCTOR BLOCKS
C
  READ(1,*)
  READ(1,*)NBLOCK
  READ(1,*)
  IF(NBLOCK.GE.1) THEN
    DO I=1,NBLOCK
      READ(1,*)XXS,XXE, YYS,YYE,ZZS,ZZE
      CALL CONBLOCK(BLOC,XXS,XXE, YYS,YYE,ZZS,ZZE)
    ENDDO
  ELSE
    READ(1,*)
  ENDIF
C
C DEFINING CONDUCTOR LBLOCKS
C
  READ(1,*)
  READ(1,*)LBLOCK
  READ(1,*)
  IF(LBLOCK.GE.1) THEN
    DO I=1,LBLOCK
      READ(1,*)LXXS,LXXE,L YYS,LYYE,LZZS,LZZE
      CALL CONBLOCK(BLOC,LXXS,LXXE,L YYS,LYYE,LZZS,LZZE)
    ENDDO
  ELSE
    READ(1,*)
  
```

```

ENDIF
CLOSE(1)
C
C ----- END OF READING INPUT.DAT -----
C
C ----- CALCULATING COORDINATES OF VIRTUAL BOX -----
C
MIFX = NXOFF
MAFX = MAXX - NXOFF
IF(M_FAR.EQ.9) THEN
  MIFX = 1
  MAFX = CXANT
ENDIF
MIFY = NYOFF
MAFY = MAXY - NYOFF
MIFZ = NZOFF
MAFZ = MAXZ - NZOFF
MFX = MAFX - MIFX
MFY = MAFY - MIFY
MFZ = MAFZ - MIFZ
C
C ----- RESETTING ALL FIELD COMPONENTS -----
C
CALL RESET_FIELDS
C
C ----- CALCULATING COEFFICIENTS FOR MUR'S ABC -----
C
CALL ABC_COEF
C
C FOR THE CASE OF POST-PROCESSING(FFT) ONLY
C
IF(M_SPARA.EQ.9) GOTO 8888
C
C ----- STARTING FDTD SIMULATION -----
C
OPEN(11,FILE='PULSE_1')
OPEN(12,FILE='PULSE_2')
OPEN(13,FILE='PULSE_3')
OPEN(16,FILE='CURRENT')
STEP = 0
CURNT = 0
1000 STEP=STEP+1
WRITE(6,*)STEP
C
C ----- CREATING DATA BUFFER FOR MUR'S ABC -----
C
EX AT Z=0 AND Z=MAXZ
C
DO Y=0,MAXY

```

```

DO X=1,MAXX
  EXF(X,Y,1,2) = EXF(X,Y,1,1)
  EXF(X,Y,1,1) = E(X,Y,0,1)
  EXF(X,Y,2,2) = EXF(X,Y,2,1)
  EXF(X,Y,2,1) = E(X,Y,1,1)
  EXE(X,Y,1,2) = EXE(X,Y,1,1)
  EXE(X,Y,1,1) = E(X,Y,MAXZ,1)
  EXE(X,Y,2,2) = EXE(X,Y,2,1)
  EXE(X,Y,2,1) = E(X,Y,MAXZ-1,1)

```

```
ENDDO
```

```
ENDDO
```

```
C
```

```
C EX AT Y=0 AND Y=MAXY
```

```
C
```

```
DO Z=0,MAXZ
```

```
DO X=1,MAXX
```

```

EXS1(X,Z,1,2) = EXS1(X,Z,1,1)
EXS1(X,Z,1,1) = E(X,0,Z,1)
EXS1(X,Z,2,2) = EXS1(X,Z,2,1)
EXS1(X,Z,2,1) = E(X,1,Z,1)
EXS2(X,Z,1,2) = EXS2(X,Z,1,1)
EXS2(X,Z,1,1) = E(X,MAXY,Z,1)
EXS2(X,Z,2,2) = EXS2(X,Z,2,1)
EXS2(X,Z,2,1) = E(X,MAXY-1,Z,1)

```

```
ENDDO
```

```
ENDDO
```

```
C
```

```
C EY AT Z=0 AND Z=MAXZ
```

```
C
```

```
DO X=0,MAXX
```

```
DO Y=1,MAXY
```

```

EYF(X,Y,1,2) = EYF(X,Y,1,1)
EYF(X,Y,1,1) = E(X,Y,0,2)
EYF(X,Y,2,2) = EYF(X,Y,2,1)
EYF(X,Y,2,1) = E(X,Y,1,2)
EYE(X,Y,1,2) = EYE(X,Y,1,1)
EYE(X,Y,1,1) = E(X,Y,MAXZ,2)
EYE(X,Y,2,2) = EYE(X,Y,2,1)
EYE(X,Y,2,1) = E(X,Y,MAXZ-1,2)

```

```
ENDDO
```

```
ENDDO
```

```
C
```

```
C EY AT X=0 AND X=MAXX
```

```
C
```

```
DO Z=0,MAXZ
```

```
DO Y=1,MAXY
```

```

EYB(Y,Z,1,2) = EYB(Y,Z,1,1)
EYB(Y,Z,1,1) = E(0,Y,Z,2)

```

```

EYB(Y,Z,2,2) = EYB(Y,Z,2,1)
EYB(Y,Z,2,1) = E(1,Y,Z,2)
EYT(Y,Z,1,2) = EYT(Y,Z,1,1)
EYT(Y,Z,1,1) = E(MAXX,Y,Z,2)
EYT(Y,Z,2,2) = EYT(Y,Z,2,1)
EYT(Y,Z,2,1) = E(MAXX-1,Y,Z,2)
ENDDO
ENDDO
C
C  EZ AT Y=0 AND Y=MAXY
C
DO X=0,MAXX
DO Z=1,MAXZ
EYS1(X,Z,1,2) = EYS1(X,Z,1,1)
EYS1(X,Z,1,1) = E(X,0,Z,3)
EYS1(X,Z,2,2) = EYS1(X,Z,2,1)
EYS1(X,Z,2,1) = E(X,1,Z,3)
EYS2(X,Z,1,2) = EYS2(X,Z,1,1)
EYS2(X,Z,1,1) = E(X,MAXY,Z,3)
EYS2(X,Z,2,2) = EYS2(X,Z,2,1)
EYS2(X,Z,2,1) = E(X,MAXY-1,Z,3)
ENDDO
ENDDO
C
C  EZ AT X=0 AND X=MAXX
C
DO Y=0,MAXY
DO Z=1,MAXZ
EYB(Y,Z,1,2) = EYB(Y,Z,1,1)
EYB(Y,Z,1,1) = E(0,Y,Z,3)
EYB(Y,Z,2,2) = EYB(Y,Z,2,1)
EYB(Y,Z,2,1) = E(1,Y,Z,3)
EYT(Y,Z,1,2) = EYT(Y,Z,1,1)
EYT(Y,Z,1,1) = E(MAXX,Y,Z,3)
EYT(Y,Z,2,2) = EYT(Y,Z,2,1)
EYT(Y,Z,2,1) = E(MAXX-1,Y,Z,3)
ENDDO
ENDDO
C
C  ----- COMPUTING ELECTRIC FIELD COMPONENTS -----
C
C  ----- COMPUTING EX COMPONENT -----
C
C  EX IN REGION #1
C
EE = ER1*E0
DD(1) = DT/EE/DX
DD(2) = DT/EE/DDY

```

DD(3) = DT/EE/DZ

X1 = 1

X2 = HA1

Y1 = 1

Y2 = MAXY-1

Z1 = 1

Z2 = MAXZ-1

CALL ECAL(1,3,2,0,1,0,0,0,1,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EX IN REGION #2

C

EE = ER2*E0

DD(1) = DT/EE/DX

DD(2) = DT/EE/DY

DD(3) = DT/EE/DZ

X1 = HA1+1

X2 = HA1+HA2

Y1 = 1

Y2 = MAXY-1

Z1 = 1

Z2 = MAXZ-1

CALL ECAL(1,3,2,0,1,0,0,0,1,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EX IN REGION #3

C

EE = ER3*E0

DD(1) = DT/EE/DX

DD(2) = DT/EE/DY

DD(3) = DT/EE/DZ

X1 = HA1+HA2+1

X2 = HA1+HA2+HA3

Y1 = 1

Y2 = MAXY-1

Z1 = 1

Z2 = MAXZ-1

CALL ECAL(1,3,2,0,1,0,0,0,1,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EX IN REGION #4

C

EE = ER4*E0

DD(1) = DT/EE/DX

DD(2) = DT/EE/DY

DD(3) = DT/EE/DZ

X1 = HA1+HA2+HA3+1

X2 = HA1+HA2+HA3+HA4

Y1 = 1

Y2 = MAXY-1

Z1 = 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Z2 = MAXZ-1
CALL ECAL(1,3,2,0,1,0,0,0,1,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)
C
C   EX IN REGION #5
C
EE = ER5*E0
DD(1) = DT/EE/DX
DD(2) = DT/EE/DY
DD(3) = DT/EE/DZ
X1 = HA1+HA2+HA3+HA4+1
X2 = MAXX
Y1 = 1
Y2 = MAXY-1
Z1 = 1
Z2 = MAXZ-1
CALL ECAL(1,3,2,0,1,0,0,0,1,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)
C
C   TREATMENT OF THE FOUR VERTICAL CORNER LINES
C   (Y,Z)=(0,0),(MAXY,0),(0,MAXZ) AND (MAXY,MAXZ)
C
DO X=1,HA1
  E(X,0,0,1)=EXF(X,0,2,1)
  & +EA1Z*(E(X,0,1,1)-EXF(X,0,1,1))
  E(X,MAXY,0,1)=EXF(X,MAXY,2,1)
  & +EA1Z*(E(X,MAXY,1,1)-EXF(X,MAXY,1,1))
  E(X,0,MAXZ,1)=EXE(X,0,2,1)
  & +EA1Z*(E(X,0,MAXZ-1,1)-EXE(X,0,1,1))
  E(X,MAXY,MAXZ,1)=EXE(X,MAXY,2,1)
  & +EA1Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,1)-EXE(X,MAXY,1,1))
ENDDO
C
DO X=HA1+1,HA1+HA2
  E(X,0,0,1)=EXF(X,0,2,1)
  & +EA2Z*(E(X,0,1,1)-EXF(X,0,1,1))
  E(X,MAXY,0,1)=EXF(X,MAXY,2,1)
  & +EA2Z*(E(X,MAXY,1,1)-EXF(X,MAXY,1,1))
  E(X,0,MAXZ,1)=EXE(X,0,2,1)
  & +EA2Z*(E(X,0,MAXZ-1,1)-EXE(X,0,1,1))
  E(X,MAXY,MAXZ,1)=EXE(X,MAXY,2,1)
  & +EA2Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,1)-EXE(X,MAXY,1,1))
ENDDO
C
DO X=HA1+HA2+1,HA1+HA2+HA3
  E(X,0,0,1)=EXF(X,0,2,1)
  & +EA3Z*(E(X,0,1,1)-EXF(X,0,1,1))
  E(X,MAXY,0,1)=EXF(X,MAXY,2,1)
  & +EA3Z*(E(X,MAXY,1,1)-EXF(X,MAXY,1,1))
  E(X,0,MAXZ,1)=EXE(X,0,2,1)

```

```

& +EA3Z*(E(X,0,MAXZ-1,1)-EXE(X,0,1,1))
E(X,MAXY,MAXZ,1)=EXE(X,MAXY,2,1)
& +EA3Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,1)-EXE(X,MAXY,1,1))
ENDDO

```

C

```

DO X=HA1+HA2+HA3+1,HA1+HA2+HA3+HA4
E(X,0,0,1)=EXF(X,0,2,1)
& +EA4Z*(E(X,0,1,1)-EXF(X,0,1,1))
E(X,MAXY,0,1)=EXF(X,MAXY,2,1)
& +EA4Z*(E(X,MAXY,1,1)-EXF(X,MAXY,1,1))
E(X,0,MAXZ,1)=EXE(X,0,2,1)
& +EA4Z*(E(X,0,MAXZ-1,1)-EXE(X,0,1,1))
E(X,MAXY,MAXZ,1)=EXE(X,MAXY,2,1)
& +EA4Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,1)-EXE(X,MAXY,1,1))
ENDDO

```

C

```

DO X=HA1+HA2+HA3+HA4+1,MAXX
E(X,0,0,1)=EXF(X,0,2,1)
& +EA5Z*(E(X,0,1,1)-EXF(X,0,1,1))
E(X,MAXY,0,1)=EXF(X,MAXY,2,1)
& +EA5Z*(E(X,MAXY,1,1)-EXF(X,MAXY,1,1))
E(X,0,MAXZ,1)=EXE(X,0,2,1)
& +EA5Z*(E(X,0,MAXZ-1,1)-EXE(X,0,1,1))
E(X,MAXY,MAXZ,1)=EXE(X,MAXY,2,1)
& +EA5Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,1)-EXE(X,MAXY,1,1))
ENDDO

```

C

C TREATMENT OF ABC AT Z=0 AND Z=MAXZ

C

```

DO Y=1,MAXY-1
DO X=2,HA1-1
E(X,Y,0,1)=-EXF(X,Y,2,2)
& +EA1Z*(E(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,1,2))
& +EB1Z*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1))
& +EC1ZX*(EXF(X+1,Y,1,1)+EXF(X-1,Y,1,1)
& +EXF(X+1,Y,2,1)+EXF(X-1,Y,2,1)
& -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))
& +EC1ZY*(EXF(X,Y+1,1,1)+EXF(X,Y-1,1,1)
& +EXF(X,Y+1,2,1)+EXF(X,Y-1,2,1)
& -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))
E(X,Y,MAXZ,1)=-EXE(X,Y,2,2)
& +EA1Z*(E(X,Y,MAXZ-1,1)+EXE(X,Y,1,2))
& +EB1Z*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1))
& +EC1ZX*(EXE(X+1,Y,1,1)+EXE(X-1,Y,1,1)
& +EXE(X+1,Y,2,1)+EXE(X-1,Y,2,1)
& -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))
& +EC1ZY*(EXE(X,Y+1,1,1)+EXE(X,Y-1,1,1)
& +EXE(X,Y+1,2,1)+EXE(X,Y-1,2,1)
& -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))

```

```

& -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))
ENDDO
E(1,Y,0,1)=EXF(1,Y,2,1)
& +EA1Z*(E(1,Y,1,1)-EXF(1,Y,1,1))
E(1,Y,MAXZ,1)=EXE(1,Y,2,1)
& +EA1Z*(E(1,Y,MAXZ-1,1)-EXE(1,Y,1,1))
E(HA1,Y,0,1)=EXF(HA1,Y,2,1)
& +EA1Z*(E(HA1,Y,1,1)-EXF(HA1,Y,1,1))
E(HA1,Y,MAXZ,1)=EXE(HA1,Y,2,1)
& +EA1Z*(E(HA1,Y,MAXZ-1,1)-EXE(HA1,Y,1,1))
ENDDO

```

C

```

DO Y=1,MAXY-1
DO X=HA1+2,HA1+HA2-1
E(X,Y,0,1)=-EXF(X,Y,2,2)
& +EA2Z*(E(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,1,2))
& +EB2Z*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1))
& +EC2ZX*(EXF(X+1,Y,1,1)+EXF(X-1,Y,1,1))
& +EXF(X+1,Y,2,1)+EXF(X-1,Y,2,1)
& -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))
& +EC2ZY*(EXF(X,Y+1,1,1)+EXF(X,Y-1,1,1))
& +EXF(X,Y+1,2,1)+EXF(X,Y-1,2,1)
& -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))
E(X,Y,MAXZ,1)=EXE(X,Y,2,2)
& +EA2Z*(E(X,Y,MAXZ-1,1)+EXE(X,Y,1,2))
& +EB2Z*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1))
& +EC2ZX*(EXE(X+1,Y,1,1)+EXE(X-1,Y,1,1))
& +EXE(X+1,Y,2,1)+EXE(X-1,Y,2,1)
& -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))
& +EC2ZY*(EXE(X,Y+1,1,1)+EXE(X,Y-1,1,1))
& +EXE(X,Y+1,2,1)+EXE(X,Y-1,2,1)
& -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))
ENDDO
E(HA1+1,Y,0,1)=EXF(HA1+1,Y,2,1)
& +EA2Z*(E(HA1+1,Y,1,1)-EXF(HA1+1,Y,1,1))
E(HA1+1,Y,MAXZ,1)=EXE(HA1+1,Y,2,1)
& +EA2Z*(E(HA1+1,Y,MAXZ-1,1)-EXE(HA1+1,Y,1,1))
E(HA1+HA2,Y,0,1)=EXF(HA1+HA2,Y,2,1)
& +EA2Z*(E(HA1+HA2,Y,1,1)-EXF(HA1+HA2,Y,1,1))
E(HA1+HA2,Y,MAXZ,1)=EXE(HA1+HA2,Y,2,1)
& +EA2Z*(E(HA1+HA2,Y,MAXZ-1,1)-EXE(HA1+HA2,Y,1,1))
ENDDO

```

C

```

DO Y=1,MAXY-1
DO X=HA1+HA2+2,HA1+HA2+HA3-1
E(X,Y,0,1)=-EXF(X,Y,2,2)
& +EA3Z*(E(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,1,2))
& +EB3Z*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1))

```

& +EC3ZX*(EXE(X+1,Y,1,1)+EXF(X-1,Y,1,1))
 & +EXF(X+1,Y,2,1)+EXF(X-1,Y,2,1)
 & -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))
 & +EC3ZY*(EXF(X,Y+1,1,1)+EXF(X,Y-1,1,1))
 & +EXF(X,Y+1,2,1)+EXF(X,Y-1,2,1)
 & -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))
 E(X,Y,MAXZ,1)=-EXE(X,Y,2,2)

& +EA3Z*(E(X,Y,MAXZ-1,1)+EXE(X,Y,1,2))
 & +EB3Z*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1))
 & +EC3ZX*(EXE(X+1,Y,1,1)+EXE(X-1,Y,1,1))
 & +EXE(X+1,Y,2,1)+EXE(X-1,Y,2,1)
 & -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))
 & +EC3ZY*(EXE(X,Y+1,1,1)+EXE(X,Y-1,1,1))
 & +EXE(X,Y+1,2,1)+EXE(X,Y-1,2,1)
 & -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))

ENDDO

E(HA1+HA2+1,Y,0,1)=EXF(HA1+HA2+1,Y,2,1)
 & +EA3Z*(E(HA1+HA2+1,Y,1,1)-EXF(HA1+HA2+1,Y,1,1))
 E(HA1+HA2+1,Y,MAXZ,1)=EXE(HA1+HA2+1,Y,2,1)
 & +EA3Z*(E(HA1+HA2+1,Y,MAXZ-1,1)-EXE(HA1+HA2+1,Y,1,1))
 E(HA1+HA2+HA3,Y,0,1)=EXF(HA1+HA2+HA3,Y,2,1)
 & +EA3Z*(E(HA1+HA2+HA3,Y,1,1)-EXF(HA1+HA2+HA3,Y,1,1))
 E(HA1+HA2+HA3,Y,MAXZ,1)=EXE(HA1+HA2+HA3,Y,2,1)
 & +EA3Z*(E(HA1+HA2+HA3,Y,MAXZ-1,1)-EXE(HA1+HA2+HA3,Y,1,1))

ENDDO

C

DO Y=1,MAXY-1

DO X=HA1+HA2+HA3+2,HA1+HA2+HA3+HA4-1

E(X,Y,0,1)=-EXF(X,Y,2,2)
 & +EA4Z*(E(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,1,2))
 & +EB4Z*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1))
 & +EC4ZX*(EXF(X+1,Y,1,1)+EXF(X-1,Y,1,1))
 & +EXF(X+1,Y,2,1)+EXF(X-1,Y,2,1)
 & -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))
 & +EC4ZY*(EXF(X,Y+1,1,1)+EXF(X,Y-1,1,1))
 & +EXF(X,Y+1,2,1)+EXF(X,Y-1,2,1)
 & -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))

E(X,Y,MAXZ,1)=-EXE(X,Y,2,2)

& +EA4Z*(E(X,Y,MAXZ-1,1)+EXE(X,Y,1,2))
 & +EB4Z*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1))
 & +EC4ZX*(EXE(X+1,Y,1,1)+EXE(X-1,Y,1,1))
 & +EXE(X+1,Y,2,1)+EXE(X-1,Y,2,1)
 & -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))
 & +EC4ZY*(EXE(X,Y+1,1,1)+EXE(X,Y-1,1,1))
 & +EXE(X,Y+1,2,1)+EXE(X,Y-1,2,1)
 & -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))

ENDDO

E(HA1+HA2+HA3+1,Y,0,1)=EXF(HA1+HA2+HA3+1,Y,2,1)

```

& +EA4Z*(E(HA1+HA2+HA3+1,Y,1,1)-EXF(HA1+HA2+HA3+1,Y,1,1))
E(HA1+HA2+HA3+1,Y,MAXZ,1)=EXE(HA1+HA2+HA3+1,Y,2,1)
& +EA4Z*(E(HA1+HA2+HA3+1,Y,MAXZ-1,1)
& -EXE(HA1+HA2+HA3+1,Y,1,1))
E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,0,1)=EXF(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,2,1)
& +EA4Z*(E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,1,1)
& -EXF(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,1,1))
E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,MAXZ,1)=EXE(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,2,1)
& +EA4Z*(E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,MAXZ-1,1)
& -EXE(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,1,1))
ENDDO

```

C

```

DO Y=1,MAXY-1
DO X=HA1+HA2+HA3+HA4+2,MAXX-1
E(X,Y,0,1)=-EXF(X,Y,2,2)
& +EA5Z*(E(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,1,2))
& +EB5Z*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1))
& +EC5ZX*(EXF(X+1,Y,1,1)+EXF(X-1,Y,1,1)
& +EXF(X+1,Y,2,1)+EXF(X-1,Y,2,1)
& -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))
& +EC5ZY*(EXF(X,Y+1,1,1)+EXF(X,Y-1,1,1)
& +EXF(X,Y+1,2,1)+EXF(X,Y-1,2,1)
& -2*(EXF(X,Y,1,1)+EXF(X,Y,2,1)))
E(X,Y,MAXZ,1)=EXE(X,Y,2,2)
& +EA5Z*(E(X,Y,MAXZ-1,1)+EXE(X,Y,1,2))
& +EB5Z*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1))
& +EC5ZX*(EXE(X+1,Y,1,1)+EXE(X-1,Y,1,1)
& +EXE(X+1,Y,2,1)+EXE(X-1,Y,2,1)
& -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))
& +EC5ZY*(EXE(X,Y+1,1,1)+EXE(X,Y-1,1,1)
& +EXE(X,Y+1,2,1)+EXE(X,Y-1,2,1)
& -2*(EXE(X,Y,1,1)+EXE(X,Y,2,1)))
ENDDO

```

```

E(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Y,0,1)=
& EXF(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Y,2,1)
& +EA5Z*(E(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Y,1,1)
& -EXF(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Y,1,1))
E(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Y,MAXZ,1)=
& EXE(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Y,2,1)
& +EA5Z*(E(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Y,MAXZ-1,1)
& -EXE(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Y,1,1))
E(MAXX,Y,0,1)=EXF(MAXX,Y,2,1)
& +EA5Z*(E(MAXX,Y,1,1)-EXF(MAXX,Y,1,1))
E(MAXX,Y,MAXZ,1)=EXE(MAXX,Y,2,1)
& +EA5Z*(E(MAXX,Y,MAXZ-1,1)-EXE(MAXX,Y,1,1))
ENDDO

```

C

C TREATMENT OF ABC AT Y=0 AND Y=MAXY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C

```

DO Z=1,MAXZ-1
DO X=2,HA1-1
E(X,0,Z,1)=-EXS1(X,Z,2,2)
& +EA1Y*(E(X,1,Z,1)+EXS1(X,Z,1,2))
& +EB1Y*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1))
& +EC1YX*(EXS1(X+1,Z,1,1)+EXS1(X-1,Z,1,1)
& +EXS1(X+1,Z,2,1)+EXS1(X-1,Z,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1)))
& +EC1YZ*(EXS1(X,Z+1,1,1)+EXS1(X,Z-1,1,1)
& +EXS1(X,Z+1,2,1)+EXS1(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1)))
E(X,MAXY,Z,1)=-EXS2(X,Z,2,2)
& +EA1Y*(E(X,MAXY-1,Z,1)+EXS2(X,Z,1,2))
& +EB1Y*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1))
& +EC1YX*(EXS2(X+1,Z,1,1)+EXS2(X-1,Z,1,1)
& +EXS2(X+1,Z,2,1)+EXS2(X-1,Z,2,1)
& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1)))
& +EC1YZ*(EXS2(X,Z+1,1,1)+EXS2(X,Z-1,1,1)
& +EXS2(X,Z+1,2,1)+EXS2(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1)))
ENDDO
E(1,0,Z,1)=EXS1(1,Z,2,1)
& +EA1Y*(E(1,1,Z,1)-EXS1(1,Z,1,1))
E(1,MAXY,Z,1)=EXS2(1,Z,2,1)
& +EA1Y*(E(1,MAXY-1,Z,1)-EXS2(1,Z,1,1))
E(HA1,0,Z,1)=EXS1(HA1,Z,2,1)
& +EA1Y*(E(HA1,1,Z,1)-EXS1(HA1,Z,1,1))
E(HA1,MAXY,Z,1)=EXS2(HA1,Z,2,1)
& +EA1Y*(E(HA1,MAXY-1,Z,1)-EXS2(HA1,Z,1,1))
ENDDO

```

C

```

DO Z=1,MAXZ-1
DO X=HA1+2,HA1+HA2-1
E(X,0,Z,1)=-EXS1(X,Z,2,2)
& +EA2Y*(E(X,1,Z,1)+EXS1(X,Z,1,2))
& +EB2Y*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1))
& +EC2YX*(EXS1(X+1,Z,1,1)+EXS1(X-1,Z,1,1)
& +EXS1(X+1,Z,2,1)+EXS1(X-1,Z,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1)))
& +EC2YZ*(EXS1(X,Z+1,1,1)+EXS1(X,Z-1,1,1)
& +EXS1(X,Z+1,2,1)+EXS1(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1)))
E(X,MAXY,Z,1)=-EXS2(X,Z,2,2)
& +EA2Y*(E(X,MAXY-1,Z,1)+EXS2(X,Z,1,2))
& +EB2Y*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1))
& +EC2YX*(EXS2(X+1,Z,1,1)+EXS2(X-1,Z,1,1)
& +EXS2(X+1,Z,2,1)+EXS2(X-1,Z,2,1))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันเวลาที่รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1)))
& +EC2YZ*(EXS2(X,Z+1,1,1)+EXS2(X,Z-1,1,1)
& +EXS2(X,Z+1,2,1)+EXS2(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1)))
ENDDO
E(HA1+1,0,Z,1)=EXS1(HA1+1,Z,2,1)
& +EA2Y*(E(HA1+1,1,Z,1)-EXS1(HA1+1,Z,1,1))
E(HA1+1,MAXY,Z,1)=EXS2(HA1+1,Z,2,1)
& +EA2Y*(E(HA1+1,MAXY-1,Z,1)-EXS2(HA1+1,Z,1,1))
E(HA1+HA2,0,Z,1)=EXS1(HA1+HA2,Z,2,1)
& +EA2Y*(E(HA1+HA2,1,Z,1)-EXS1(HA1+HA2,Z,1,1))
E(HA1+HA2,MAXY,Z,1)=EXS2(HA1+HA2,Z,2,1)
& +EA2Y*(E(HA1+HA2,MAXY-1,Z,1)-EXS2(HA1+HA2,Z,1,1))
ENDDO

```

C

```

DO Z=1,MAXZ-1
DO X=HA1+HA2+2,HA1+HA2+HA3-1
E(X,0,Z,1)=-EXS1(X,Z,2,2)
& +EA3Y*(E(X,1,Z,1)+EXS1(X,Z,1,2))
& +EB3Y*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1))
& +EC3YX*(EXS1(X+1,Z,1,1)+EXS1(X-1,Z,1,1)
& +EXS1(X+1,Z,2,1)+EXS1(X-1,Z,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1)))
& +EC3YZ*(EXS1(X,Z+1,1,1)+EXS1(X,Z-1,1,1)
& +EXS1(X,Z+1,2,1)+EXS1(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1)))
E(X,MAXY,Z,1)=-EXS2(X,Z,2,2)
& +EA3Y*(E(X,MAXY-1,Z,1)+EXS2(X,Z,1,2))
& +EB3Y*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1))
& +EC3YX*(EXS2(X+1,Z,1,1)+EXS2(X-1,Z,1,1)
& +EXS2(X+1,Z,2,1)+EXS2(X-1,Z,2,1)
& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1)))
& +EC3YZ*(EXS2(X,Z+1,1,1)+EXS2(X,Z-1,1,1)
& +EXS2(X,Z+1,2,1)+EXS2(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1)))
ENDDO
E(HA1+HA2+1,0,Z,1)=EXS1(HA1+HA2+1,Z,2,1)
& +EA3Y*(E(HA1+HA2+1,1,Z,1)-EXS1(HA1+HA2+1,Z,1,1))
E(HA1+HA2+1,MAXY,Z,1)=EXS2(HA1+HA2+1,Z,2,1)
& +EA3Y*(E(HA1+HA2+1,MAXY-1,Z,1)-EXS2(HA1+HA2+1,Z,1,1))
E(HA1+HA2+HA3,0,Z,1)=EXS1(HA1+HA2+HA3,Z,2,1)
& +EA3Y*(E(HA1+HA2+HA3,1,Z,1)-EXS1(HA1+HA2+HA3,Z,1,1))
E(HA1+HA2+HA3,MAXY,Z,1)=EXS2(HA1+HA2+HA3,Z,2,1)
& +EA3Y*(E(HA1+HA2+HA3,MAXY-1,Z,1)
& -EXS2(HA1+HA2+HA3,Z,1,1))
ENDDO

```

C

DO Z=1,MAXZ-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DO X=HA1+HA2+HA3+2,HA1+HA2+HA3+HA4-1

```
E(X,0,Z,1)=-EXS1(X,Z,2,2)
& +EA4Y*(E(X,1,Z,1)+EXS1(X,Z,1,2))
& +EB4Y*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1))
& +EC4YX*(EXS1(X+1,Z,1,1)+EXS1(X-1,Z,1,1))
& +EXS1(X+1,Z,2,1)+EXS1(X-1,Z,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1))
& +EC4YZ*(EXS1(X,Z+1,1,1)+EXS1(X,Z-1,1,1))
& +EXS1(X,Z+1,2,1)+EXS1(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1))
```

E(X,MAXY,Z,1)=-EXS2(X,Z,2,2)

```
& +EA4Y*(E(X,MAXY-1,Z,1)+EXS2(X,Z,1,2))
& +EB4Y*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1))
& +EC4YX*(EXS2(X+1,Z,1,1)+EXS2(X-1,Z,1,1))
& +EXS2(X+1,Z,2,1)+EXS2(X-1,Z,2,1)
& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1))
& +EC4YZ*(EXS2(X,Z+1,1,1)+EXS2(X,Z-1,1,1))
& +EXS2(X,Z+1,2,1)+EXS2(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1))
```

ENDDO

E(HA1+HA2+HA3+1,0,Z,1)=EXS1(HA1+HA2+HA3+1,Z,2,1)

```
& +EA4Y*(E(HA1+HA2+HA3+1,1,Z,1)
& -EXS1(HA1+HA2+HA3+1,Z,1,1))
```

E(HA1+HA2+HA3+1,MAXY,Z,1)=EXS2(HA1+HA2+HA3+1,Z,2,1)

```
& +EA4Y*(E(HA1+HA2+HA3+1,MAXY-1,Z,1)
& -EXS2(HA1+HA2+HA3+1,Z,1,1))
```

E(HA1+HA2+HA3+HA4,0,Z,1)=EXS1(HA1+HA2+HA3+HA4,Z,2,1)

```
& +EA4Y*(E(HA1+HA2+HA3+HA4,1,Z,1)
& -EXS1(HA1+HA2+HA3+HA4,Z,1,1))
```

E(HA1+HA2+HA3+HA4,MAXY,Z,1)=EXS2(HA1+HA2+HA3+HA4,Z,2,1)

```
& +EA4Y*(E(HA1+HA2+HA3+HA4,MAXY-1,Z,1)
& -EXS2(HA1+HA2+HA3+HA4,Z,1,1))
```

ENDDO

C

DO Z=1,MAXZ-1

DO X=HA1+HA2+HA3+HA4+2,MAXX-1

E(X,0,Z,1)=-EXS1(X,Z,2,2)

```
& +EA5Y*(E(X,1,Z,1)+EXS1(X,Z,1,2))
& +EB5Y*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1))
& +EC5YX*(EXS1(X+1,Z,1,1)-EXS1(X-1,Z,1,1))
& +EXS1(X+1,Z,2,1)+EXS1(X-1,Z,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1))
& +EC5YZ*(EXS1(X,Z+1,1,1)+EXS1(X,Z-1,1,1))
& +EXS1(X,Z+1,2,1)+EXS1(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS1(X,Z,1,1)+EXS1(X,Z,2,1))
```

E(X,MAXY,Z,1)=-EXS2(X,Z,2,2)

```
& +EA5Y*(E(X,MAXY-1,Z,1)+EXS2(X,Z,1,2))
& +EB5Y*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1))
```

```

& +EC5YX*(EXS2(X+1,Z,1,1)+EXS2(X-1,Z,1,1)
& +EXS2(X+1,Z,2,1)+EXS2(X-1,Z,2,1)
& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1)))
& +EC5YZ*(EXS2(X,Z+1,1,1)+EXS2(X,Z-1,1,1)
& +EXS2(X,Z+1,2,1)+EXS2(X,Z-1,2,1)
& -2*(EXS2(X,Z,1,1)+EXS2(X,Z,2,1)))
ENDDO
E(HA1+HA2+HA3+HA4+1,0,Z,1)=
& EXS1(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Z,2,1)
& +EA5Y*(E(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Z,1)
& -EXS1(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Z,1,1))
E(HA1+HA2+HA3+HA4+1,MAXY,Z,1)=
& EXS2(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Z,2,1)
& +EA5Y*(E(HA1+HA2+HA3+HA4+1,MAXY-1,Z,1)
& -EXS2(HA1+HA2+HA3+HA4+1,Z,1,1))
E(MAXX,0,Z,1)=EXS1(MAXX,Z,2,1)
& +EA5Y*(E(MAXX,1,Z,1)-EXS1(MAXX,Z,1,1))
E(MAXX,MAXY,Z,1)=EXS2(MAXX,Z,2,1)
& +EA5Y*(E(MAXX,MAXY-1,Z,1)-EXS2(MAXX,Z,1,1))
ENDDO
C
C INCLUDING GAUSSIAN PULSE FOR MICROSTRIP EXCITATION
C
IF(MEXC_MS.EQ.1) THEN
C IF(STEP.LT.TG) THEN
DEXC=EXP(-(REAL(STEP-T0))**2/(REAL(TW))**2)/
& (EXCX2-EXCX1+1)
DO Y=EXCY1-1,EXCY2
DO X=EXCX1,EXCX2
E(X,Y,EXCZ1,1)=DEXC
E(X,Y-1,EXCZ1,1)=DEXC
E(X,Y,EXCZ1-1,1)=DEXC
E(X,Y-1,EXCZ1-1,1)=DEXC
C
E(X,Y,EXCZ1,1)=DEXC+E(X,Y,EXCZ1,1)
ENDDO
ENDDO
C ENDIF
ENDIF
C
C ----- COMPUTING EY COMPONENTS -----
C
C EY IN REGION #1
C
EE=ER1*E0
DD(1)=DT/EE/DX
DD(2)=DT/EE/DY
DD(3)=DT/EE/DZ

```

X1=1
 X2=HA1-1
 Y1=1
 Y2=MAXY
 Z1=1
 Z2=MAXZ-1
 CALL ECAL(2,1,3,0,0,1,1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EY ON BOUNDARY OF #1 AND #2

C

EE=(ER1+ER2)*E0/2
 DD(1)=DT/EE/DX
 DD(2)=DT/EE/DY
 DD(3)=DT/EE/DZ
 X1=HA1
 X2=HA1
 Y1=1
 Y2=MAXY
 Z1=1
 Z2=MAXZ-1
 CALL ECAL(2,1,3,0,0,1,1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EY IN REGION #2

C

EE=ER2*E0
 DD(1)=DT/EE/DX
 DD(2)=DT/EE/DY
 DD(3)=DT/EE/DZ
 X1=HA1+1
 X2=HA1+HA2-1
 Y1=1
 Y2=MAXY
 Z1=1
 Z2=MAXZ-1
 CALL ECAL(2,1,3,0,0,1,1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EY ON BOUNDARY OF #2 AND #3

C

EE=(ER2+ER3)*E0/2
 DD(1)=DT/EE/DX
 DD(2)=DT/EE/DY
 DD(3)=DT/EE/DZ
 X1=HA1+HA2
 X2=HA1+HA2
 Y1=1
 Y2=MAXY
 Z1=1
 Z2=MAXZ-1

CALL ECAL(2,1,3,0,0,1,1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EY IN REGION #3

C

EE=ER3*E0

DD(1)=DT/EE/DX

DD(2)=DT/EE/DY

DD(3)=DT/EE/DZ

X1=HA1+HA2+1

X2=HA1+HA2+HA3-1

Y1=1

Y2=MAXY

Z1=1

Z2=MAXZ-1

CALL ECAL(2,1,3,0,0,1,1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EY ON BOUNDARY OF #3 AND #4

C

EE=(ER3+ER4)*E0/2

DD(1)=DT/EE/DX

DD(2)=DT/EE/DY

DD(3)=DT/EE/DZ

X1=HA1+HA2+HA3

X2=HA1+HA2+HA3

Y1=1

Y2=MAXY

Z1=1

Z2=MAXZ-1

CALL ECAL(2,1,3,0,0,1,1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EY IN REGION #4

C

EE=ER4*E0

DD(1)=DT/EE/DX

DD(2)=DT/EE/DY

DD(3)=DT/EE/DZ

X1=HA1+HA2+HA3+1

X2=HA1+HA2+HA3+HA4-1

Y1=1

Y2=MAXY

Z1=1

Z2=MAXZ-1

CALL ECAL(2,1,3,0,0,1,1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EY ON BOUNDARY OF #4 AND #5

C

EE=(ER4+ER5)*E0/2

DD(1)=DT/EE/DX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DD(2)=DT/EE/DY
DD(3)=DT/EE/DZ
X1=HA1+HA2+HA3+HA4
X2=HA1+HA2+HA3+HA4
Y1=1
Y2=MAXY
Z1=1
Z2=MAXZ-1
CALL ECAL(2,1,3,0,0,1,1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

```

```

C
C EY IN REGION #5

```

```

C
EE=ER5*E0
DD(1)=DT/EE/DX
DD(2)=DT/EE/DY
DD(3)=DT/EE/DZ
X1=HA1+HA2+HA3+HA4+1
X2=MAXX-1
Y1=1
Y2=MAXY
Z1=1
Z2=MAXZ-1
CALL ECAL(2,1,3,0,0,1,1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

```

```

C
C TREATMENT OF ABC AT X=0 AND X=MAXX

```

```

C
DO Z=0,MAXZ
DO Y=1,MAXY
E(0,Y,Z,2)=EYB(Y,Z,2,1)
& +EA1X*(E(1,Y,Z,2)-EYB(Y,Z,1,1))
E(MAXX,Y,Z,2)=EYT(Y,Z,2,1)
& +EA5X*(E(MAXX-1,Y,Z,2)-EYT(Y,Z,1,1))
ENDDO
ENDDO

```

```

C
C TREATMENT OF ABC AT Z=0 AND Z=MAXZ

```

```

C
DO X=1,HA1-1
DO Y=2,MAXY-1
E(X,Y,0,2)=-EYF(X,Y,2,2)
& +EA1Z*(E(X,Y,1,2)+EYF(X,Y,1,2))
& +EB1Z*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1))
& +EC1ZX*(EYF(X+1,Y,1,1)+EYF(X-1,Y,1,1)
& +EYF(X+1,Y,2,1)+EYF(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))
& +EC1ZY*(EYF(X,Y+1,1,1)+EYF(X,Y-1,1,1)
& +EYF(X,Y+1,2,1)+EYF(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))

```

```

E(X,Y,MAXZ,2)=-EYE(X,Y,2,2)
& +EA1Z*(E(X,Y,MAXZ-1,2)+EYE(X,Y,1,2))
& +EB1Z*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1))
& +EC1ZX*(EYE(X+1,Y,1,1)+EYE(X-1,Y,1,1)
& +EYE(X+1,Y,2,1)+EYE(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
& +EC1ZY*(EYE(X,Y+1,1,1)+EYE(X,Y-1,1,1)
& +EYE(X,Y+1,2,1)+EYE(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
ENDDO
E(X,1,0,2)=EYF(X,1,2,1)
& +EA1Z*(E(X,1,1,2)-EYF(X,1,1,1))
E(X,1,MAXZ,2)=EYE(X,1,2,1)
& +EA1Z*(E(X,1,MAXZ-1,2)-EYE(X,1,1,1))
E(X,MAXY,0,2)=EYF(X,MAXY,2,1)
& +EA1Z*(E(X,MAXY,1,2)-EYF(X,MAXY,1,1))
E(X,MAXY,MAXZ,2)=EYE(X,MAXY,2,1)
& +EA1Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,2)-EYE(X,MAXY,1,1))
ENDDO
D=(C/SQRT((ER1+ER2)/2)*DT-DZ)/(C/SQRT((ER1+ER2)/2)*DT+DZ)
DO Y=1,MAXY
E(HA1,Y,0,2)=EYF(HA1,Y,2,1)
& +D*(E(HA1,Y,1,2)-EYF(HA1,Y,1,1))
E(HA1,Y,MAXZ,2)=EYE(HA1,Y,2,1)
& +D*(E(HA1,Y,MAXZ-1,2)-EYE(HA1,Y,1,1))
ENDDO
C
DO X=HA1+1,HA1+HA2-1
DO Y=2,MAXY-1
E(X,Y,0,2)=-EYF(X,Y,2,2)
& +EA2Z*(E(X,Y,1,2)+EYF(X,Y,1,2))
& +EB2Z*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1))
& +EC2ZX*(EYF(X+1,Y,1,1)+EYF(X-1,Y,1,1)
& +EYF(X+1,Y,2,1)+EYF(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))
& +EC2ZY*(EYF(X,Y+1,1,1)+EYF(X,Y-1,1,1)
& +EYF(X,Y+1,2,1)+EYF(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))
E(X,Y,MAXZ,2)=-EYE(X,Y,2,2)
& +EA2Z*(E(X,Y,MAXZ-1,2)+EYE(X,Y,1,2))
& +EB2Z*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1))
& +EC2ZX*(EYE(X+1,Y,1,1)+EYE(X-1,Y,1,1)
& +EYE(X+1,Y,2,1)+EYE(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
& +EC2ZY*(EYE(X,Y+1,1,1)+EYE(X,Y-1,1,1)
& +EYE(X,Y+1,2,1)+EYE(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
ENDDO

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

E(X,1,0,2)=EYF(X,1,2,1)
& +EA2Z*(E(X,1,1,2)-EYF(X,1,1,1))
E(X,1,MAXZ,2)=EYE(X,1,2,1)
& +EA2Z*(E(X,1,MAXZ-1,2)-EYE(X,1,1,1))
E(X,MAXY,0,2)=EYF(X,MAXY,2,1)
& +EA2Z*(E(X,MAXY,1,2)-EYF(X,MAXY,1,1))
E(X,MAXY,MAXZ,2)=EYE(X,MAXY,2,1)
& +EA2Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,2)-EYE(X,MAXY,1,1))
ENDDO
D=(C/SQRT((ER2+ER3)/2)*DT-DZY(C/SQRT((ER2+ER3)/2)*DT+DZ)
DO Y=1,MAXY
E(HA1+HA2,Y,0,2)=EYF(HA1+HA2,Y,2,1)
& +D*(E(HA1+HA2,Y,1,2)-EYF(HA1+HA2,Y,1,1))
E(HA1+HA2,Y,MAXZ,2)=EYE(HA1+HA2,Y,2,1)
& +D*(E(HA1+HA2,Y,MAXZ-1,2)-EYE(HA1+HA2,Y,1,1))
ENDDO
C
DO X=HA1+HA2+1,HA1+HA2+HA3-1
DO Y=2,MAXY-1
E(X,Y,0,2)=-EYF(X,Y,2,2)
& +EA3Z*(E(X,Y,1,2)+EYF(X,Y,1,2))
& +EB3Z*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1))
& +EC3ZX*(EYF(X+1,Y,1,1)+EYF(X-1,Y,1,1))
& +EYF(X+1,Y,2,1)+EYF(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))
& +EC3ZY*(EYF(X,Y+1,1,1)+EYF(X,Y-1,1,1))
& +EYF(X,Y+1,2,1)+EYF(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))
E(X,Y,MAXZ,2)=-EYE(X,Y,2,2)
& +EA3Z*(E(X,Y,MAXZ-1,2)+EYE(X,Y,1,2))
& +EB3Z*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1))
& +EC3ZX*(EYE(X+1,Y,1,1)+EYE(X-1,Y,1,1))
& +EYE(X+1,Y,2,1)+EYE(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
& +EC3ZY*(EYE(X,Y+1,1,1)+EYE(X,Y-1,1,1))
& +EYE(X,Y+1,2,1)+EYE(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
ENDDO
E(X,1,0,2)=EYF(X,1,2,1)
& +EA3Z*(E(X,1,1,2)-EYF(X,1,1,1))
E(X,1,MAXZ,2)=EYE(X,1,2,1)
& +EA3Z*(E(X,1,MAXZ-1,2)-EYE(X,1,1,1))
E(X,MAXY,0,2)=EYF(X,MAXY,2,1)
& +EA3Z*(E(X,MAXY,1,2)-EYF(X,MAXY,1,1))
E(X,MAXY,MAXZ,2)=EYE(X,MAXY,2,1)
& +EA3Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,2)-EYE(X,MAXY,1,1))
ENDDO
D=(C/SQRT((ER3+ER4)/2)*DT-DZY(C/SQRT((ER3+ER4)/2)*DT+DZ)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DO Y=1,MAXY
E(HA1+HA2+HA3,Y,0,2)=EYF(HA1+HA2+HA3,Y,2,1)
& +D*(E(HA1+HA2+HA3,Y,1,2)-EYF(HA1+HA2+HA3,Y,1,1))
E(HA1+HA2+HA3,Y,MAXZ,2)=EYE(HA1+HA2+HA3,Y,2,1)
& +D*(E(HA1+HA2+HA3,Y,MAXZ-1,2)-EYE(HA1+HA2+HA3,Y,1,1))
ENDDO

```

C

```

DO X=HA1+HA2+HA3+1,HA1+HA2+HA3+HA4-1
DO Y=2,MAXY-1
E(X,Y,0,2)=-EYF(X,Y,2,2)
& +EA4Z*(E(X,Y,1,2)+EYF(X,Y,1,2))
& +EB4Z*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1))
& +EC4ZX*(EYF(X+1,Y,1,1)+EYF(X-1,Y,1,1))
& +EYF(X+1,Y,2,1)+EYF(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))
& +EC4ZY*(EYF(X,Y+1,1,1)+EYF(X,Y-1,1,1))
& +EYF(X,Y+1,2,1)+EYF(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))
E(X,Y,MAXZ,2)=-EYE(X,Y,2,2)
& +EA4Z*(E(X,Y,MAXZ-1,2)+EYE(X,Y,1,2))
& +EB4Z*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1))
& +EC4ZX*(EYE(X+1,Y,1,1)+EYE(X-1,Y,1,1))
& +EYE(X+1,Y,2,1)+EYE(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
& +EC4ZY*(EYE(X,Y+1,1,1)+EYE(X,Y-1,1,1))
& +EYE(X,Y+1,2,1)+EYE(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
ENDDO
E(X,1,0,2)=EYF(X,1,2,1)
& +EA4Z*(E(X,1,1,2)-EYF(X,1,1,1))
E(X,1,MAXZ,2)=EYE(X,1,2,1)
& +EA4Z*(E(X,1,MAXZ-1,2)-EYE(X,1,1,1))
E(X,MAXY,0,2)=EYF(X,MAXY,2,1)
& +EA4Z*(E(X,MAXY,1,2)-EYF(X,MAXY,1,1))
E(X,MAXY,MAXZ,2)=EYE(X,MAXY,2,1)
& +EA4Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,2)-EYE(X,MAXY,1,1))
ENDDO

```

$$D=(C/\text{SQRT}((ER4+ER5)/2)*DT-DZ)/(C/\text{SQRT}((ER4+ER5)/2)*DT+DZ)$$

DO Y=1,MAXY

```

E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,0,2)=EYF(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,2,1)
& +D*(E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,1,2)
& -EYF(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,1,1))
E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,MAXZ,2)=EYE(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,2,1)
& +D*(E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,MAXZ-1,2)
& -EYE(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,1,1))
ENDDO

```

C

DO X=HA1+HA2+HA3+HA4+1,MAXX-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DO Y=2,MAXY-1
  E(X,Y,0,2)=-EYF(X,Y,2,2)
& +EA5Z*(E(X,Y,1,2)+EYF(X,Y,1,2))
& +EB5Z*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1))
& +EC5ZX*(EYF(X+1,Y,1,1)+EYF(X-1,Y,1,1)
& +EYF(X+1,Y,2,1)+EYF(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))
& +EC5ZY*(EYF(X,Y+1,1,1)+EYF(X,Y-1,1,1)
& +EYF(X,Y+1,2,1)+EYF(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYF(X,Y,1,1)+EYF(X,Y,2,1)))
  E(X,Y,MAXZ,2)=-EYE(X,Y,2,2)
& +EA5Z*(E(X,Y,MAXZ-1,2)+EYE(X,Y,1,2))
& +EB5Z*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1))
& +EC5ZX*(EYE(X+1,Y,1,1)+EYE(X-1,Y,1,1)
& +EYE(X+1,Y,2,1)+EYE(X-1,Y,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
& +EC5ZY*(EYE(X,Y+1,1,1)+EYE(X,Y-1,1,1)
& +EYE(X,Y+1,2,1)+EYE(X,Y-1,2,1)
& -2*(EYE(X,Y,1,1)+EYE(X,Y,2,1)))
ENDDO
  E(X,1,0,2)=EYF(X,1,2,1)
& +EA5Z*(E(X,1,1,2)-EYF(X,1,1,1))
  E(X,1,MAXZ,2)=EYE(X,1,2,1)
& +EA5Z*(E(X,1,MAXZ-1,2)-EYE(X,1,1,1))
  E(X,MAXY,0,2)=EYF(X,MAXY,2,1)
& +EA5Z*(E(X,MAXY,1,2)-EYF(X,MAXY,1,1))
  E(X,MAXY,MAXZ,2)=EYE(X,MAXY,2,1)
& +EA5Z*(E(X,MAXY,MAXZ-1,2)-EYE(X,MAXY,1,1))
ENDDO
C
C INCLUDING GAUSSIAN PULSE FOR CPW EXCITATION
C
IF(MEXC_CPW.EQ.1) THEN
C IF(STEP.LT.TG) THEN
C WRITE(6,*)T0*2
IF(STEP.LE.2*T0)THEN
  DEXC=EXP(-(REAL(STEP-T0))**2/(REAL(TW))**2)/
& (EXCYL2-EXCYL1+1)
ELSE
  DEXC=0.0
ENDIF
DO Y=EXCYL1,EXCYL2
  IF(PMODE.EQ.1)THEN
    E(EXCX,Y,EXCZ2,2)=DEXC
  ENDIF
  IF(PMODE.EQ.2)THEN
    E(EXCX,Y,EXCZ2,2)=DEXC
    E(EXCX,Y,EXCZ2-1,2)=DEXC

```

```

ENDIF
IF(PMODE.EQ.3)THEN
  E(EXCX,Y,EXCZ2,2)=DEXC
  E(EXCX,Y,EXCZ2-1,2)=DEXC
  E(EXCX-1,Y,EXCZ2,2)=DEXC
  E(EXCX-1,Y,EXCZ2-1,2)=DEXC
ENDIF
C      E(EXCX,Y,EXCZ2,2)=DEXC+E(EXCX,Y,EXCZ2,2)
ENDDO
DO Y=EXCYR1,EXCYR2
  E(EXCX,Y,EXCZ2,2)=-DEXC
C      E(EXCX,Y,EXCZ2,2)=-DEXC+E(EXCX,Y,EXCZ2,2)
ENDDO
C  ENDF
ENDIF
C
C
C ----- COMPUTING EZ COMPONENTS -----
C  EZ IN REGION #1
C
EE=ER1*E0
DD(1)=DT/EE/DX
DD(2)=DT/EE/DY
DD(3)=DT/EE/DZ
X1=1
X2=HA1-1
Y1=1
Y2=MAXY-1
Z1=1
Z2=MAXZ
CALL ECAL(3,2,1,1,0,0,0,1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)
C
C  EZ ON BOUNDARY OF #1 AND #2
C
EE=(ER1+ER2)*E0/2
DD(1)=DT/EE/DX
DD(2)=DT/EE/DY
DD(3)=DT/EE/DZ
X1=HA1
X2=HA1
Y1=1
Y2=MAXY-1
Z1=1
Z2=MAXZ
CALL ECAL(3,2,1,1,0,0,0,1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)
C
C  EZ IN REGION #2
C

```

$$EE=ER2*E0$$

$$DD(1)=DT/EE/DX$$

$$DD(2)=DT/EE/DY$$

$$DD(3)=DT/EE/DZ$$

$$X1=HA1+1$$

$$X2=HA1+HA2-1$$

$$Y1=1$$

$$Y2=MAXY-1$$

$$Z1=1$$

$$Z2=MAXZ$$

CALL ECAL(3,2,1,1,0,0,0,1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EZ ON BOUNDARY OF #2 AND #3

C

$$EE=(ER2+ER3)*E0/2$$

$$DD(1)=DT/EE/DX$$

$$DD(2)=DT/EE/DY$$

$$DD(3)=DT/EE/DZ$$

$$X1=HA1+HA2$$

$$X2=HA1+HA2$$

$$Y1=1$$

$$Y2=MAXY-1$$

$$Z1=1$$

$$Z2=MAXZ$$

CALL ECAL(3,2,1,1,0,0,0,1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EZ IN REGION #3

C

$$EE=ER3*E0$$

$$DD(1)=DT/EE/DX$$

$$DD(2)=DT/EE/DY$$

$$DD(3)=DT/EE/DZ$$

$$X1=HA1+HA2+1$$

$$X2=HA1+HA2+HA3-1$$

$$Y1=1$$

$$Y2=MAXY-1$$

$$Z1=1$$

$$Z2=MAXZ$$

CALL ECAL(3,2,1,1,0,0,0,1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EZ ON BOUNDARY OF #3 AND #4

C

$$EE=(ER3+ER4)*E0/2$$

$$DD(1)=DT/EE/DX$$

$$DD(2)=DT/EE/DY$$

$$DD(3)=DT/EE/DZ$$

$$X1=HA1+HA2+HA3$$

$$X2=HA1+HA2+HA3$$

Y1=1

Y2=MAXY-1

Z1=1

Z2=MAXZ

CALL ECAL(3,2,1,1,0,0,0,1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EZ IN REGION #4

C

EE=ER4*E0

DD(1)=DT/EE/DX

DD(2)=DT/EE/DY

DD(3)=DT/EE/DZ

X1=HA1+HA2+HA3+1

X2=HA1+HA2+HA3+HA4-1

Y1=1

Y2=MAXY-1

Z1=1

Z2=MAXZ

CALL ECAL(3,2,1,1,0,0,0,1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EZ ON BOUNDARY OF #4 AND #5

C

EE=(ER4+ER5)*E0/2

DD(1)=DT/EE/DX

DD(2)=DT/EE/DY

DD(3)=DT/EE/DZ

X1=HA1+HA2+HA3+HA4

X2=HA1+HA2+HA3+HA4

Y1=1

Y2=MAXY-1

Z1=1

Z2=MAXZ

CALL ECAL(3,2,1,1,0,0,0,1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C EZ IN REGION #5

C

EE=ER5*E0

DD(1)=DT/EE/DX

DD(2)=DT/EE/DY

DD(3)=DT/EE/DZ

X1=HA1+HA2+HA3+HA4+1

X2=MAXX-1

Y1=1

Y2=MAXY-1

Z1=1

Z2=MAXZ

CALL ECAL(3,2,1,1,0,0,0,1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C TREATMENT OF ABC AT X=0 AND X=MAXX

C

DO Y=0,MAXY

DO Z=1,MAXZ

E(0,Y,Z,3)=EZB(Y,Z,2,1)

& +EA1X*(E(1,Y,Z,3)-EZB(Y,Z,1,1))

E(MAXX,Y,Z,3)=EZT(Y,Z,2,1)

& +EA5X*(E(MAXX-1,Y,Z,3)-EZT(Y,Z,1,1))

ENDDO

ENDDO

C

C TREATMENT OF ABC AT Y=0 AND Y=MAXY

C

DO X=1,HA1-1

DO Z=2,MAXZ-1

E(X,0,Z,3)=-EVS1(X,Z,2,2)

& +EA1Y*(E(X,1,Z,3)+EVS1(X,Z,1,2))

& +EB1Y*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1))

& +EC1YX*(EVS1(X+1,Z,1,1)+EVS1(X-1,Z,1,1))

& +EVS1(X+1,Z,2,1)+EVS1(X-1,Z,2,1)

& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1)))

& +EC1YZ*(EVS1(X,Z+1,1,1)+EVS1(X,Z-1,1,1))

& +EVS1(X,Z+1,2,1)+EVS1(X,Z-1,2,1)

& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1)))

E(X,MAXY,Z,3)=-EVS2(X,Z,2,2)

& +EA1Y*(E(X,MAXY-1,Z,3)+EVS2(X,Z,1,2))

& +EB1Y*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1))

& +EC1YX*(EVS2(X+1,Z,1,1)+EVS2(X-1,Z,1,1))

& +EVS2(X+1,Z,2,1)+EVS2(X-1,Z,2,1)

& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1)))

& +EC1YZ*(EVS2(X,Z+1,1,1)+EVS2(X,Z-1,1,1))

& +EVS2(X,Z+1,2,1)+EVS2(X,Z-1,2,1)

& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1)))

ENDDO

E(X,0,1,3)=EVS1(X,1,2,1)

& +EA1Y*(E(X,1,1,3)-EVS1(X,1,1,1))

E(X,MAXY,1,3)=EVS2(X,1,2,1)

& +EA1Y*(E(X,MAXY-1,1,3)-EVS2(X,1,1,1))

E(X,0,MAXZ,3)=EVS1(X,MAXZ,2,1)

& +EA1Y*(E(X,1,MAXZ,3)-EVS1(X,MAXZ,1,1))

E(X,MAXY,MAXZ,3)=EVS2(X,MAXZ,2,1)

& +EA1Y*(E(X,MAXY-1,MAXZ,3)-EVS2(X,MAXZ,1,1))

ENDDO

D=(C/SQRT((ER1+ER2)/2)*DT-DY)/(C/SQRT((ER1+ER2)/2)*DT+DY)

DO Z=1,MAXZ

E(HA1,0,Z,3)=EVS1(HA1,Z,2,1)

& +D*(E(HA1,1,Z,3)-EVS1(HA1,Z,1,1))

E(HA1,MAXY,Z,3)=EVS2(HA1,Z,2,1)

& +D*(E(HA1,MAXY-1,Z,3)-EVS2(HA1,Z,1,1))

ENDDO

C

DO X=HA1+1,HA1+HA2-1

DO Z=2,MAXZ-1

E(X,0,Z,3)=-EVS1(X,Z,2,2)

& +EA2Y*(E(X,1,Z,3)+EVS1(X,Z,1,2))

& +EB2Y*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1))

& +EC2YX*(EVS1(X+1,Z,1,1)+EVS1(X-1,Z,1,1))

& +EVS1(X+1,Z,2,1)+EVS1(X-1,Z,2,1)

& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1))

& +EC2YZ*(EVS1(X,Z+1,1,1)+EVS1(X,Z-1,1,1))

& +EVS1(X,Z+1,2,1)+EVS1(X,Z-1,2,1)

& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1))

E(X,MAXY,Z,3)=-EVS2(X,Z,2,2)

& +EA2Y*(E(X,MAXY-1,Z,3)+EVS2(X,Z,1,2))

& +EB2Y*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1))

& +EC2YX*(EVS2(X+1,Z,1,1)+EVS2(X-1,Z,1,1))

& +EVS2(X+1,Z,2,1)+EVS2(X-1,Z,2,1)

& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1))

& +EC2YZ*(EVS2(X,Z+1,1,1)+EVS2(X,Z-1,1,1))

& +EVS2(X,Z+1,2,1)+EVS2(X,Z-1,2,1)

& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1))

ENDDO

E(X,0,1,3)=EVS1(X,1,2,1)

& +EA2Y*(E(X,1,1,3)-EVS1(X,1,1,1))

E(X,MAXY,1,3)=EVS2(X,1,2,1)

& +EA2Y*(E(X,MAXY-1,1,3)-EVS2(X,1,1,1))

E(X,0,MAXZ,3)=EVS1(X,MAXZ,2,1)

& +EA2Y*(E(X,1,MAXZ,3)-EVS1(X,MAXZ,1,1))

E(X,MAXY,MAXZ,3)=EVS2(X,MAXZ,2,1)

& +EA2Y*(E(X,MAXY-1,MAXZ,3)-EVS2(X,MAXZ,1,1))

ENDDO

D=(C/SQRT((ER2+ER3)/2)*DT-DY)/(C/SQRT((ER2+ER3)/2)*DT+DY)

DO Z=1,MAXZ

E(HA1+HA2,0,Z,3)=EVS1(HA1+HA2,Z,2,1)

& +D*(E(HA1+HA2,1,Z,3)-EVS1(HA1+HA2,Z,1,1))

E(HA1+HA2,MAXY,Z,3)=EVS2(HA1+HA2,Z,2,1)

& +D*(E(HA1+HA2,MAXY-1,Z,3)-EVS2(HA1+HA2,Z,1,1))

ENDDO

C

DO X=HA1+HA2+1,HA1+HA2+HA3-1

DO Z=2,MAXZ-1

E(X,0,Z,3)=-EVS1(X,Z,2,2)

& +EA3Y*(E(X,1,Z,3)+EVS1(X,Z,1,2))

& +EB3Y*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1))

& +EC3YX*(EVS1(X+1,Z,1,1)+EVS1(X-1,Z,1,1))

& +EVS1(X+1,Z,2,1)+EVS1(X-1,Z,2,1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1)))
& +EC3YZ*(EVS1(X,Z+1,1,1)+EVS1(X,Z-1,1,1)
& +EVS1(X,Z+1,2,1)+EVS1(X,Z-1,2,1)
& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1)))
E(X,MAXY,Z,3)=-EVS2(X,Z,2,2)
& +EA3Y*(E(X,MAXY-1,Z,3)+EVS2(X,Z,1,2))
& +EB3Y*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1))
& +EC3YX*(EVS2(X+1,Z,1,1)+EVS2(X-1,Z,1,1)
& +EVS2(X+1,Z,2,1)+EVS2(X-1,Z,2,1)
& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1)))
& +EC3YZ*(EVS2(X,Z+1,1,1)+EVS2(X,Z-1,1,1)
& +EVS2(X,Z+1,2,1)+EVS2(X,Z-1,2,1)
& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1)))
ENDDO
E(X,0,1,3)=EVS1(X,1,2,1)
& +EA3Y*(E(X,1,1,3)-EVS1(X,1,1,1))
E(X,MAXY,1,3)=EVS2(X,1,2,1)
& +EA3Y*(E(X,MAXY-1,1,3)-EVS2(X,1,1,1))
E(X,0,MAXZ,3)=EVS1(X,MAXZ,2,1)
& +EA3Y*(E(X,1,MAXZ,3)-EVS1(X,MAXZ,1,1))
E(X,MAXY,MAXZ,3)=EVS2(X,MAXZ,2,1)
& +EA3Y*(E(X,MAXY-1,MAXZ,3)-EVS2(X,MAXZ,1,1))
ENDDO
D=(C/SQRT((ER3+ER4)/2)*DT-DY)/(C/SQRT((ER3+ER4)/2)*DT+DY)
DO Z=1,MAXZ
E(HA1+HA2+HA3,0,Z,3)=EVS1(HA1+HA2+HA3,Z,2,1)
& +D*(E(HA1+HA2+HA3,1,Z,3)-EVS1(HA1+HA2+HA3,Z,1,1))
E(HA1+HA2+HA3,MAXY,Z,3)=EVS2(HA1+HA2+HA3,Z,2,1)
& +D*(E(HA1+HA2+HA3,MAXY-1,Z,3)-EVS2(HA1+HA2+HA3,Z,1,1))
ENDDO

```

C

```

DO X=HA1+HA2+HA3+1,HA1+HA2+HA3+HA4-1
DO Z=2,MAXZ-1
E(X,0,Z,3)=-EVS1(X,Z,2,2)
& +EA4Y*(E(X,1,Z,3)+EVS1(X,Z,1,2))
& +EB4Y*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1))
& +EC4YX*(EVS1(X+1,Z,1,1)+EVS1(X-1,Z,1,1)
& +EVS1(X+1,Z,2,1)+EVS1(X-1,Z,2,1)
& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1)))
& +EC4YZ*(EVS1(X,Z+1,1,1)+EVS1(X,Z-1,1,1)
& +EVS1(X,Z+1,2,1)+EVS1(X,Z-1,2,1)
& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1)))
E(X,MAXY,Z,3)=-EVS2(X,Z,2,2)
& +EA4Y*(E(X,MAXY-1,Z,3)+EVS2(X,Z,1,2))
& +EB4Y*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1))
& +EC4YX*(EVS2(X+1,Z,1,1)+EVS2(X-1,Z,1,1)
& +EVS2(X+1,Z,2,1)+EVS2(X-1,Z,2,1)
& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1)))

```

```

& +EC4YZ*(EVS2(X,Z+1,1,1)+EVS2(X,Z-1,1,1)
& +EVS2(X,Z+1,2,1)+EVS2(X,Z-1,2,1)
& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1)))

```

ENDDO

E(X,0,1,3)=EVS1(X,1,2,1)

```

& +EA4Y*(E(X,1,1,3)-EVS1(X,1,1,1))

```

E(X,MAXY,1,3)=EVS2(X,1,2,1)

```

& +EA4Y*(E(X,MAXY-1,1,3)-EVS2(X,1,1,1))

```

E(X,0,MAXZ,3)=EVS1(X,MAXZ,2,1)

```

& +EA4Y*(E(X,1,MAXZ,3)-EVS1(X,MAXZ,1,1))

```

E(X,MAXY,MAXZ,3)=EVS2(X,MAXZ,2,1)

```

& +EA4Y*(E(X,MAXY-1,MAXZ,3)-EVS2(X,MAXZ,1,1))

```

ENDDO

D=(C/SQRT((ER4+ER5)/2)*DT-DY)/(C/SQRT((ER4+ER5)/2)*DT+DY)

DO Z=1,MAXZ

E(HA1+HA2+HA3+HA4,0,Z,3)=EVS1(HA1+HA2+HA3+HA4,Z,2,1)

```

& +D*(E(HA1+HA2+HA3+HA4,1,Z,3)

```

```

& -EVS1(HA1+HA2+HA3+HA4,Z,1,1))

```

E(HA1+HA2+HA3+HA4,MAXY,Z,3)=

```

& EVS2(HA1+HA2+HA3+HA4,Z,2,1)

```

```

& +D*(E(HA1+HA2+HA3+HA4,MAXY-1,Z,3)

```

```

& -EVS2(HA1+HA2+HA3+HA4,Z,1,1))

```

ENDDO

C

DO X=HA1+HA2+HA3+HA4+1,MAXX-1

DO Z=2,MAXZ-1

E(X,0,Z,3)=-EVS1(X,Z,2,2)

```

& +EA5Y*(E(X,1,Z,3)+EVS1(X,Z,1,2))

```

```

& +EB5Y*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1))

```

```

& +EC5YX*(EVS1(X+1,Z,1,1)+EVS1(X-1,Z,1,1)

```

```

& +EVS1(X+1,Z,2,1)+EVS1(X-1,Z,2,1)

```

```

& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1)))

```

```

& +EC5YZ*(EVS1(X,Z+1,1,1)+EVS1(X,Z-1,1,1)

```

```

& +EVS1(X,Z+1,2,1)+EVS1(X,Z-1,2,1)

```

```

& -2*(EVS1(X,Z,1,1)+EVS1(X,Z,2,1)))

```

E(X,MAXY,Z,3)=-EVS2(X,Z,2,2)

```

& +EA5Y*(E(X,MAXY-1,Z,3)+EVS2(X,Z,1,2))

```

```

& +EB5Y*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1))

```

```

& +EC5YX*(EVS2(X+1,Z,1,1)+EVS2(X-1,Z,1,1)

```

```

& +EVS2(X+1,Z,2,1)+EVS2(X-1,Z,2,1)

```

```

& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1)))

```

```

& +EC5YZ*(EVS2(X,Z+1,1,1)+EVS2(X,Z-1,1,1)

```

```

& +EVS2(X,Z+1,2,1)+EVS2(X,Z-1,2,1)

```

```

& -2*(EVS2(X,Z,1,1)+EVS2(X,Z,2,1)))

```

ENDDO

E(X,0,1,3)=EVS1(X,1,2,1)

```

& +EA5Y*(E(X,1,1,3)-EVS1(X,1,1,1))

```

E(X,MAXY,1,3)=EVS2(X,1,2,1)

```

& +EA5Y*(E(X,MAXY-1,1,3)-EVS2(X,1,1,1))
E(X,0,MAXZ,3)=EVS1(X,MAXZ,2,1)
& +EA5Y*(E(X,1,MAXZ,3)-EVS1(X,MAXZ,1,1))
E(X,MAXY,MAXZ,3)=EVS2(X,MAXZ,2,1)
& +EA5Y*(E(X,MAXY-1,MAXZ,3)-EVS2(X,MAXZ,1,1))

```

ENDDO

C

C ----- SET E COMPONENTS ON CONDUCTORS -----

C

C TREATMENT OF PT1

C

DO Z=1,MAXZ

DO Y=1,MAXY

IF(PT1(Y,Z).EQ.1)THEN

E(HA1,Y,Z-1,2)=0.0

E(HA1,Y,Z,2)=0.0

E(HA1,Y-1,Z,3)=0.0

E(HA1,Y,Z,3)=0.0

ENDIF

ENDDO

ENDDO

C

C TREATMENT OF PT2

C

DO Z=1,MAXZ

DO Y=1,MAXY

IF(PT2(Y,Z).EQ.1)THEN

E(HA1+HA2,Y,Z-1,2)=0.0

E(HA1+HA2,Y,Z,2)=0.0

E(HA1+HA2,Y-1,Z,3)=0.0

E(HA1+HA2,Y,Z,3)=0.0

ENDIF

ENDDO

ENDDO

C

C TREATMENT OF PT3

C

DO Z=1,MAXZ

DO Y=1,MAXY

IF(PT3(Y,Z).EQ.1)THEN

E(HA1+HA2+HA3,Y,Z-1,2)=0.0

E(HA1+HA2+HA3,Y,Z,2)=0.0

E(HA1+HA2+HA3,Y-1,Z,3)=0.0

E(HA1+HA2+HA3,Y,Z,3)=0.0

ENDIF

ENDDO

ENDDO

C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C TREATMENT OF PT4

C

```
DO Z=1,MAXZ
DO Y=1,MAXY
IF(PT4(Y,Z).EQ.1)THEN
E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,Z-1,2)=0.0
E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,Z,2)=0.0
E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y-1,Z,3)=0.0
E(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,Z,3)=0.0
ENDIF
ENDDO
ENDDO
```

C

C TREATMENT OF NORMAL-TO-Y CONDUCTOR PLATES

C

```
IF(NPLATEY.GE.1)THEN
DO Z=1,MAXZ
DO Y=1,MAXY
DO X=1,MAXX
IF(PLATEY(X,Y,Z).EQ.1)THEN
E(X,Y-1,Z-1,1)=0.0
E(X,Y-1,Z,1)=0.0
E(X,Y-1,Z,3)=0.0
E(X-1,Y-1,Z,3)=0.0
ENDIF
ENDDO
ENDDO
ENDDO
ENDIF
```

C

C TREATMENT OF NORMAL-TO-Z CONDUCTOR PLATES

C

```
IF(NPLATEZ.GE.1)THEN
DO Z=1,MAXZ
DO Y=1,MAXY
DO X=1,MAXX
IF(PLATEZ(X,Y,Z).EQ.1)THEN
E(X,Y-1,Z-1,1)=0.0
E(X,Y,Z-1,1)=0.0
E(X,Y,Z-1,2)=0.0
E(X-1,Y,Z-1,2)=0.0
ENDIF
ENDDO
ENDDO
ENDDO
ENDIF
```

C

C TREATMENT OF CONDUCTOR BLOCKS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C
IF(NBLOCK.GE.1)THEN
  DO Z=1,MAXZ
    DO Y=1,MAXY
      DO X=1,MAXX
        IF(BLOC(X,Y,Z).EQ.1)THEN
          E(X,Y-1,Z-1,1)=0.0
          E(X,Y,Z-1,1)=0.0
          E(X,Y-1,Z,1)=0.0
          E(X,Y,Z,1)=0.0
          E(X-1,Y,Z-1,2)=0.0
          E(X,Y,Z-1,2)=0.0
          E(X-1,Y,Z,2)=0.0
          E(X,Y,Z,2)=0.0
          E(X-1,Y-1,Z,3)=0.0
          E(X,Y-1,Z,3)=0.0
          E(X-1,Y,Z,3)=0.0
          E(X,Y,Z,3)=0.0
        ENDIF
      ENDDO
    ENDDO
  ENDDO
ENDIF

```

C
C TREATMENT OF CONDUCTOR LBLOCKS
C

```

IF(LBLOCK.GE.1)THEN
  DO Z=1,MAXZ
    DO Y=1,MAXY
      DO X=1,MAXX
        IF(BLOC(X,Y,Z).EQ.1)THEN
          E(X,Y,Z,2)=0.0
        ENDIF
      ENDDO
    ENDDO
  ENDDO
ENDIF

```

C
C ----- COMPUTING MAGNETIC FIELD COMPONENTS -----
C
C ----- COMPUTING HX (WHOLE REGION) -----
C

```

DD(1)=DT/U0/DX
DD(2)=DT/U0/DY
DD(3)=DT/U0/DZ
X1=0
X2=MAXX
Y1=1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y2=MAXY

Z1=1

Z2=MAXZ

CALL HCAL(1,3,2,0,-1,0,0,0,-1,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C ----- COMPUTING HY (WHOLE REGION) -----

C

DD(1)=DT/U0/DX

DD(2)=DT/U0/DY

DD(3)=DT/U0/DZ

X1=1

X2=MAXX

Y1=0

Y2=MAXY

Z1=1

Z2=MAXZ

CALL HCAL(2,1,3,0,0,-1,-1,0,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C ----- COMPUTING HZ (WHOLE REGION) -----

C

DD(1)=DT/U0/DX

DD(2)=DT/U0/DY

DD(3)=DT/U0/DZ

X1=1

X2=MAXX

Y1=1

Y2=MAXY

Z1=0

Z2=MAXZ

CALL HCAL(3,2,1,-1,0,0,0,-1,0,X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,DD)

C

C ----- SET H COMPONENTS ON CONDUCTORS -----

C

C TREATMENT OF PT1

C

DO Z=1,MAXZ

DO Y=1,MAXY

IF(PT1(Y,Z).EQ.1)THEN

H(HA1,Y,Z,1)=0.0

ENDIF

ENDDO

ENDDO

C

C TREATMENT OF PT2

C

DO Z=1,MAXZ

DO Y=1,MAXY

IF(PT2(Y,Z).EQ.1)THEN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

      H(HA1+HA2,Y,Z,1)=0.0
    ENDIF
  ENDDO
ENDDO
C
C TREATMENT OF PT3
C
DO Z=1,MAXZ
DO Y=1,MAXY
IF(PT3(Y,Z).EQ.1)THEN
  H(HA1+HA2+HA3,Y,Z,1)=0.0
ENDIF
ENDDO
ENDDO
C
C TREATMENT OF PT4
C
DO Z=1,MAXZ
DO Y=1,MAXY
IF(PT4(Y,Z).EQ.1)THEN
  H(HA1+HA2+HA3+HA4,Y,Z,1)=0.0
ENDIF
ENDDO
ENDDO
C
C TREATMENT OF NORMAL-TO-Y CONDUCTOR PLATES
C
IF(NPLATEY.GE.1)THEN
DO Z=1,MAXZ
DO Y=1,MAXY
DO X=1,MAXX
IF(PLATEY(X,Y,Z).EQ.1)THEN
  H(X,Y-1,Z,2)=0.0
ENDIF
ENDDO
ENDDO
ENDDO
ENDIF
C
C TREATMENT OF NORMAL-TO-Z CONDUCTOR PLATES
C
IF(NPLATEZ.GE.1)THEN
DO Z=1,MAXZ
DO Y=1,MAXY
DO X=1,MAXX
IF(PLATEZ(X,Y,Z).EQ.1)THEN
  H(X,Y,Z-1,3)=0.0
ENDIF

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

      ENDDO
    ENDDO
  ENDDO
ENDIF
C
C TREATMENT OF CONDUCTOR BLOCKS
C
IF(NBLOCK.GE.1)THEN
  DO Z=1,MAXZ
    DO Y=1,MAXY
      DO X=1,MAXX
        IF(BLOC(X,Y,Z).EQ.1)THEN
          H(X-1,Y,Z,1)=0.0
          H(X,Y,Z,1)=0.0
          H(X,Y-1,Z,2)=0.0
          H(X,Y,Z,2)=0.0
          H(X,Y,Z-1,3)=0.0
          H(X,Y,Z,3)=0.0
        ENDIF
      ENDDO
    ENDDO
  ENDDO
ENDIF
C
C ----- SAVING FDTD SIMULATION RESULTS -----
C
C SAVING 'SNAPSHOTS' OF FIELD COMPONENTS
C
IF((STEP.EQ.NSNAP1).OR.(STEP.EQ.NSNAP2).OR.
& (STEP.EQ.NSNAP3))THEN
  IF((STEP.EQ.NSNAP1).AND.(MCOMPX.EQ.1))THEN
    OPEN(9,FILE='FIELD_X1')
  ENDIF
  IF((STEP.EQ.NSNAP2).AND.(MCOMPX.EQ.1))THEN
    OPEN(9,FILE='FIELD_X2')
  ENDIF
  IF((STEP.EQ.NSNAP3).AND.(MCOMPX.EQ.1))THEN
    OPEN(9,FILE='FIELD_X3')
  ENDIF
  IF(MCOMPX.EQ.1)THEN
    DO J=1,MAXZ
      DO I=1,MAXY
        IF(MEXC_MS.EQ.1)THEN
          WRITE(9,900)E(EXCX2,I,J,1),I,J
        ENDIF
        IF(MEXC_CPW.EQ.1)THEN
          WRITE(9,900)E(EXCX,I,J,1),I,J
        ENDIF
      ENDDO
    ENDDO
  ENDIF
ENDIF

```

```

IF(I.EQ.MAXY)THEN
  WRITE(9,900)
ENDIF
ENDDO
ENDDO
ENDIF
CLOSE(9)
IF((STEP.EQ.NSNAP1).AND.(MCOMPY.EQ.1))THEN
  OPEN(9,FILE='FIELD_Y1')
ENDIF
IF((STEP.EQ.NSNAP2).AND.(MCOMPY.EQ.1))THEN
  OPEN(9,FILE='FIELD_Y2')
ENDIF
IF((STEP.EQ.NSNAP3).AND.(MCOMPY.EQ.1))THEN
  OPEN(9,FILE='FIELD_Y3')
ENDIF
IF(MCOMPY.EQ.1)THEN
DO J=1,MAXZ
DO I=1,MAXY
  IF(MEXC_MS.EQ.1)THEN
    WRITE(9,900)E(EXCX2,I,J,2),I,J
  ENDIF
  IF(MEXC_CPW.EQ.1)THEN
    WRITE(9,900)E(EXCX,I,J,2),I,J
  ENDIF
  IF(I.EQ.MAXY)THEN
    WRITE(9,900)
  ENDIF
ENDIF
ENDDO
ENDDO
CLOSE(9)
ENDIF
IF((STEP.EQ.NSNAP1).AND.(MCOMPZ.EQ.1))THEN
  OPEN(9,FILE='FIELD_Z1')
ENDIF
IF((STEP.EQ.NSNAP2).AND.(MCOMPZ.EQ.1))THEN
  OPEN(9,FILE='FIELD_Z2')
ENDIF
IF((STEP.EQ.NSNAP3).AND.(MCOMPZ.EQ.1))THEN
  OPEN(9,FILE='FIELD_Z3')
ENDIF
IF(MCOMPZ.EQ.1)THEN
DO J=1,MAXZ
DO I=1,MAXY
  IF(MEXC_MS.EQ.1)THEN
    WRITE(9,900)E(EXCX2,I,J,3),I,J
  ENDIF
  IF(MEXC_CPW.EQ.1)THEN

```

```

        WRITE(9,900)E(EXCX,I,J,3),I,J
    ENDIF
    IF(I.EQ.MAXY)THEN
        WRITE(9,900)
    ENDIF
ENDDO
ENDDO
ENDIF
CLOSE(9)
ENDIF
900 FORMAT(F20.10,2X,I3,2X,I3)
C
C *****
C
C OPEN(14,FILE='DEXC_14')
C WRITE(14,*)DEXC
C CLOSE(14)
C
C SAVING VOLTAGES AT OBSERVATION POINTS
C
DO I=1,NOBSERVE
    VOLT=0.
    IF(MEXC_MS.EQ.1)THEN
        NCOUNT=EXCX2-EXCX1
        DO J=0,NCOUNT
            VOLT=VOLT+E(EXCX1+J,OBZ(I),MOB(I))*(EXCX2-EXCX1+1)
        ENDDO
    ENDIF
    IF(MEXC_CPW.EQ.1)THEN
        NCOUNT=EXCYL2-EXCYL1
        DO J=0,NCOUNT
C            VOLT=VOLT+E(25,51,OBZ(I),MOB(I))*(EXCYL2-EXCYL1+1)
            VOLT=VOLT+E(EXCX,EXCYL1+J,OBZ(I),MOB(I))
        ENDDO
    ENDIF
    WRITE(10+I,*)VOLT
ENDDO
C
C *****
C
C IF(ASTEP.EQ.STEP)THEN
C DO I=EXCYL2,LYYE
C CURNT=(H(EXCX,I,LZZE+1,1)-H(EXCX,I,LZZE,1))
C & +(H(EXCX,I,LZZE,3)-H(EXCX+1,I,LZZE,3))*(EXCYL2-EXCYL1+1)
C WRITE(15,*)',',CURNT
C ENDDO
C WRITE(15,*)
C
C ENDF

```

```

C
C .....
C
CURNT=0
IF(PMODE.EQ.1)THEN
  CURNT=-H(EXCX,EXCYL2,EXCZ2+1,1)+H(EXCX,EXCYL2,EXCZ2,1)
  & -H(EXCX,EXCYL2,EXCZ2,3)+H(EXCX+1,EXCYL2,EXCZ2,3)
C & +CURNT
  WRITE(16,*)CURNT
ENDIF
C IF(PMODE.EQ.2)THEN
C
C ENDIF
IF(PMODE.EQ.3)THEN
  CURNT=(H(EXCX,EXCYL2,EXCZ2+1,1)+H(EXCX-1,EXCYL2,EXCZ2+1,1)
  & -H(EXCX,EXCYL2,EXCZ2-1,1)-H(EXCX-1,EXCYL2,EXCZ2-1,1))*2
  & +(H(EXCX-1,EXCYL2,EXCZ2,3)+H(EXCX-1,EXCYL2,EXCZ2-1,3)
  & -H(EXCX+1,EXCYL2,EXCZ2,3)-H(EXCX+1,EXCYL2,EXCZ2-1,3))*2
  WRITE(16,*)CURNT
ENDIF
C
C ---- RUNNING DFT AND CONTINUING FDTD SIMULATION ----
C
777 IF(STEP.LT.NSTEP)THEN
  IF((M_FAR.EQ.1).OR.(M_FAR.EQ.9))CALL RDFT(STEP)
  GOTO 1000
ELSE
  GOTO 9999
ENDIF
C
C ----- TERMINATING FDTD SIMULATION -----
C
9999 DO I=1,NOBSERVE
  CLOSE(10+I)
ENDDO
CLOSE(16)
C
C ----- CALCULATING FAR-FIELD PATTERNS -----
C
IF((M_FAR.EQ.1).OR.(M_FAR.EQ.9))CALL FAR_FIELD(DX,DY,DZ)
C
C ---- CALCULATING S-PARAMETERS OR IMPEDANCES BY FFT ----
C
8888 IF((M_SPARA.EQ.1).OR.(M_SPARA.EQ.9))THEN
C CALL SPARA(NSTEP,DT,FST,FEN,ZZ0,AL,RB_FST,RB_FEN)
C CALL ZIN(NSTEP,DT,FST,FEN)

```

```

ENDIF
999 STOP
END
C
C ***** END OF MAIN PROGRAM *****
C
C
C *** SUBROUTINE FOR DEFINING COEFFICIENTS FOR MUR'S ABC ***
C
C

```

```

SUBROUTINE ABC_COEF
INCLUDE 'DIM.INC'
PARAMETER(C=2.997925E+8,PI=3.14159265359)
REAL DX,DY,DZ,DT,ER1,ER2,ER3,ER4,ER5
REAL E(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),H(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3)
REAL EA1X,EA2X,EA3X,EA4X,EA5X,EA1Y,EA2Y,EA3Y,EA4Y,EA5Y,
& EA1Z,EA2Z,EA3Z,EA4Z,EA5Z,EB1X,EB2X,EB3X,EB4X,EB5X,
& EB1Y,EB2Y,EB3Y,EB4Y,EB5Y,EB1Z,EB2Z,EB3Z,EB4Z,EB5Z,
& EC1XY,EC1XZ,EC1YX,EC1YZ,EC1ZX,EC1ZY,
& EC2XY,EC2XZ,EC2YX,EC2YZ,EC2ZX,EC2ZY,
& EC3XY,EC3XZ,EC3YX,EC3YZ,EC3ZX,EC3ZY,
& EC4XY,EC4XZ,EC4YX,EC4YZ,EC4ZX,EC4ZY,
& EC5XY,EC5XZ,EC5YX,EC5YZ,EC5ZX,EC5ZY
COMMON/EH/E,H,DX,DY,DZ,DT
COMMON/COEF/ER1,ER2,ER3,ER4,ER5,
& EA1X,EA2X,EA3X,EA4X,EA5X,EA1Y,EA2Y,EA3Y,EA4Y,EA5Y,
& EA1Z,EA2Z,EA3Z,EA4Z,EA5Z,EB1X,EB2X,EB3X,EB4X,EB5X,
& EB1Y,EB2Y,EB3Y,EB4Y,EB5Y,EB1Z,EB2Z,EB3Z,EB4Z,EB5Z,
& EC1XY,EC1XZ,EC1YX,EC1YZ,EC1ZX,EC1ZY,
& EC2XY,EC2XZ,EC2YX,EC2YZ,EC2ZX,EC2ZY,
& EC3XY,EC3XZ,EC3YX,EC3YZ,EC3ZX,EC3ZY,
& EC4XY,EC4XZ,EC4YX,EC4YZ,EC4ZX,EC4ZY,
& EC5XY,EC5XZ,EC5YX,EC5YZ,EC5ZX,EC5ZY

```

```

C
EA1X=(C/SQRT(ER1)*DT-DX)/(C/SQRT(ER1)*DT+DX)
EA2X=(C/SQRT(ER2)*DT-DX)/(C/SQRT(ER2)*DT+DX)
EA3X=(C/SQRT(ER3)*DT-DX)/(C/SQRT(ER3)*DT+DX)
EA4X=(C/SQRT(ER4)*DT-DX)/(C/SQRT(ER4)*DT+DX)
EA5X=(C/SQRT(ER5)*DT-DX)/(C/SQRT(ER5)*DT+DX)
EA1Y=(C/SQRT(ER1)*DT-DY)/(C/SQRT(ER1)*DT+DY)
EA2Y=(C/SQRT(ER2)*DT-DY)/(C/SQRT(ER2)*DT+DY)
EA3Y=(C/SQRT(ER3)*DT-DY)/(C/SQRT(ER3)*DT+DY)
EA4Y=(C/SQRT(ER4)*DT-DY)/(C/SQRT(ER4)*DT+DY)
EA5Y=(C/SQRT(ER5)*DT-DY)/(C/SQRT(ER5)*DT+DY)
EA1Z=(C/SQRT(ER1)*DT-DZ)/(C/SQRT(ER1)*DT+DZ)
EA2Z=(C/SQRT(ER2)*DT-DZ)/(C/SQRT(ER2)*DT+DZ)
EA3Z=(C/SQRT(ER3)*DT-DZ)/(C/SQRT(ER3)*DT+DZ)
EA4Z=(C/SQRT(ER4)*DT-DZ)/(C/SQRT(ER4)*DT+DZ)

```

```

EA5Z=(C/SQRT(ER5)*DT-DZ)/(C/SQRT(ER5)*DT+DZ)
EB1X=2*DX/(C/SQRT(ER1)*DT+DX)
EB2X=2*DX/(C/SQRT(ER2)*DT+DX)
EB3X=2*DX/(C/SQRT(ER3)*DT+DX)
EB4X=2*DX/(C/SQRT(ER4)*DT+DX)
EB5X=2*DX/(C/SQRT(ER5)*DT+DX)
EB1Y=2*DY/(C/SQRT(ER1)*DT+DY)
EB2Y=2*DY/(C/SQRT(ER2)*DT+DY)
EB3Y=2*DY/(C/SQRT(ER3)*DT+DY)
EB4Y=2*DY/(C/SQRT(ER4)*DT+DY)
EB5Y=2*DY/(C/SQRT(ER5)*DT+DY)
EB1Z=2*DZ/(C/SQRT(ER1)*DT+DZ)
EB2Z=2*DZ/(C/SQRT(ER2)*DT+DZ)
EB3Z=2*DZ/(C/SQRT(ER3)*DT+DZ)
EB4Z=2*DZ/(C/SQRT(ER4)*DT+DZ)
EB5Z=2*DZ/(C/SQRT(ER5)*DT+DZ)
EC1XY=DX*(DT*C/SQRT(ER1))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER1)*DT+DX))
EC2XY=DX*(DT*C/SQRT(ER2))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER2)*DT+DX))
EC3XY=DX*(DT*C/SQRT(ER3))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER3)*DT+DX))
EC4XY=DX*(DT*C/SQRT(ER4))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER4)*DT+DX))
EC5XY=DX*(DT*C/SQRT(ER5))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER5)*DT+DX))
EC1XZ=DX*(DT*C/SQRT(ER1))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER1)*DT+DX))
EC2XZ=DX*(DT*C/SQRT(ER2))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER2)*DT+DX))
EC3XZ=DX*(DT*C/SQRT(ER3))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER3)*DT+DX))
EC4XZ=DX*(DT*C/SQRT(ER4))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER4)*DT+DX))
EC5XZ=DX*(DT*C/SQRT(ER5))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER5)*DT+DX))
EC1YX=DY*(DT*C/SQRT(ER1))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER1)*DT+DY))
EC2YX=DY*(DT*C/SQRT(ER2))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER2)*DT+DY))
EC3YX=DY*(DT*C/SQRT(ER3))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER3)*DT+DY))
EC4YX=DY*(DT*C/SQRT(ER4))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER4)*DT+DY))
EC5YX=DY*(DT*C/SQRT(ER5))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER5)*DT+DY))
EC1YZ=DY*(DT*C/SQRT(ER1))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER1)*DT+DY))
EC2YZ=DY*(DT*C/SQRT(ER2))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER2)*DT+DY))
EC3YZ=DY*(DT*C/SQRT(ER3))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER3)*DT+DY))
EC4YZ=DY*(DT*C/SQRT(ER4))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER4)*DT+DY))
EC5YZ=DY*(DT*C/SQRT(ER5))**2/(2*DZ*DZ*(C/SQRT(ER5)*DT+DY))
EC1ZX=DZ*(DT*C/SQRT(ER1))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER1)*DT+DZ))
EC2ZX=DZ*(DT*C/SQRT(ER2))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER2)*DT+DZ))
EC3ZX=DZ*(DT*C/SQRT(ER3))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER3)*DT+DZ))
EC4ZX=DZ*(DT*C/SQRT(ER4))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER4)*DT+DZ))
EC5ZX=DZ*(DT*C/SQRT(ER5))**2/(2*DX*DX*(C/SQRT(ER5)*DT+DZ))
EC1ZY=DZ*(DT*C/SQRT(ER1))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER1)*DT+DZ))
EC2ZY=DZ*(DT*C/SQRT(ER2))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER2)*DT+DZ))
EC3ZY=DZ*(DT*C/SQRT(ER3))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER3)*DT+DZ))
EC4ZY=DZ*(DT*C/SQRT(ER4))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER4)*DT+DZ))
EC5ZY=DZ*(DT*C/SQRT(ER5))**2/(2*DY*DY*(C/SQRT(ER5)*DT+DZ))
RETURN

```

END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
C
C *** SUBROUTINE FOR RESETTING ALL FIELD COMPONENTS ***
C
```

```
  SUBROUTINE RESET_FIELDS
```

```
  INCLUDE 'DIM.INC'
```

```
  PARAMETER (MVBX=MAXX-6,MVBY=MAXY-6,MVBZ=MAXZ-6)
```

```
  REAL E(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),H(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),
```

```
  & EXF(0:MAXX,0:MAXY,2,2),EXE(0:MAXX,0:MAXY,2,2),
```

```
  & EXS1(0:MAXX,0:MAXZ,2,2),EXS2(0:MAXX,0:MAXZ,2,2),
```

```
  & EYF(0:MAXX,0:MAXY,2,2),EYE(0:MAXX,0:MAXY,2,2),
```

```
  & EYT(0:MAXY,0:MAXZ,2,2),EYB(0:MAXY,0:MAXZ,2,2),
```

```
  & EZS1(0:MAXX,0:MAXZ,2,2),EZS2(0:MAXX,0:MAXZ,2,2),
```

```
  & EZT(0:MAXY,0:MAXZ,2,2),EZB(0:MAXY,0:MAXZ,2,2)
```

```
  COMPLEX EYMIFX(MVBY,MVBZ),EZMIFX(MVBY,MVBZ),
```

```
  & HYMIFX(MVBY,MVBZ),HZMIFX(MVBY,MVBZ),
```

```
  & EYMAFX(MVBY,MVBZ),EZMAFX(MVBY,MVBZ),
```

```
  & HYMAFX(MVBY,MVBZ),HZMAFX(MVBY,MVBZ),
```

```
  & EXMIFY(MVBX,MVBZ),EZMIFY(MVBX,MVBZ),
```

```
  & HXMIFY(MVBX,MVBZ),HZMIFY(MVBX,MVBZ),
```

```
  & EXMAFY(MVBX,MVBZ),EZMAFY(MVBX,MVBZ),
```

```
  & HXMAFY(MVBX,MVBZ),HZMAFY(MVBX,MVBZ),
```

```
  & EXMIFZ(MVBX,MVBY),EYMIFZ(MVBX,MVBY),
```

```
  & HXMIFZ(MVBX,MVBY),HYMIFZ(MVBX,MVBY),
```

```
  & EXMAFZ(MVBX,MVBY),EYMAFZ(MVBX,MVBY),
```

```
  & HXMAFZ(MVBX,MVBY),HYMAFZ(MVBX,MVBY)
```

```
  COMMON/EH/E,H,DX,DY,DZ,DT
```

```
  COMMON/ABC/EXF,EXE,EXS1,EXS2,EYF,EYE,EYT,EYB,
```

```
  & EZS1,EZS2,EZT,EZB
```

```
  COMMON/DFT/EYMIFX,EZMIFX,HYMIFX,HZMIFX,EYMAFX,EZMAFX,
```

```
  & HYMAFX,HZMAFX,EXMIFY,EZMIFY,HXMIFY,HZMIFY,
```

```
  & EXMAFY,EZMAFY,HXMAFY,HZMAFY,EXMIFZ,EYMIFZ,
```

```
  & HXMIFZ,HYMIFZ,EXMAFZ,EYMAFZ,HXMAFZ,HYMAFZ
```

```
  COMMON/VB/MIFX,MAFX,MIFY,MAFY,MIFZ,MAFZ,MFX,MFY,MFZ
```

```
C
C RESET FIELD COMPONENTS FOR STARTING FDTD SIMULATION
```

```
C
  DO I=0,MAXX
    DO J=0,MAXY
      DO K=0,MAXZ
        DO L=1,3
          E(I,J,K,L)=0.0
          H(I,J,K,L)=0.0
        ENDDO
      ENDDO
    ENDDO
  ENDDO
```

```
C
C RESET FIELD COMPONENTS FOR ABC
```

C

```

DO I=0,MAXX
DO J=0,MAXY
DO K=1,2
DO L=1,2
EXF(I,J,K,L)=0.0
EXE(I,J,K,L)=0.0
EYF(I,J,K,L)=0.0
EYE(I,J,K,L)=0.0
ENDDO
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=0,MAXX
DO J=0,MAXZ
DO K=1,2
DO L=1,2
EXS1(I,J,K,L)=0.0
EXS2(I,J,K,L)=0.0
EZS1(I,J,K,L)=0.0
EZS2(I,J,K,L)=0.0
ENDDO
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=0,MAXY
DO J=0,MAXZ
DO K=1,2
DO L=1,2
EYT(I,J,K,L)=0.0
EYB(I,J,K,L)=0.0
EZT(I,J,K,L)=0.0
EZB(I,J,K,L)=0.0
ENDDO
ENDDO
ENDDO
ENDDO

```



C

C RESET FIELD COMPONENTS FOR FAR-FIELDS

C

C --- FOR X=MIFX,MAFX

C

```

DO I=1,MFY
DO J=1,MFZ
EYMIFX(I,J)=(0.,0.)
EZMIFX(I,J)=(0.,0.)
HYMIFX(I,J)=(0.,0.)
HZMIFX(I,J)=(0.,0.)

```

```

EYMAFX(I,J)=(0.,0.)
EZMAFX(I,J)=(0.,0.)
HYMAFX(I,J)=(0.,0.)
HZMAFX(I,J)=(0.,0.)
ENDDO
ENDDO
C
C --- FOR Y=MIFY,MAFY
C
DO I=1,MFX
DO J=1,MFZ
EXMIFY(I,J)=(0.,0.)
EZMIFY(I,J)=(0.,0.)
HXMIFY(I,J)=(0.,0.)
HZMIFY(I,J)=(0.,0.)
EXMAFY(I,J)=(0.,0.)
EZMAFY(I,J)=(0.,0.)
HXMAFY(I,J)=(0.,0.)
HZMAFY(I,J)=(0.,0.)
ENDDO
ENDDO
C
C --- FOR Z=MIFZ,MAFZ
C
DO I=1,MFX
DO J=1,MFY
EXMIFZ(I,J)=(0.,0.)
EYMIFZ(I,J)=(0.,0.)
HXMIFZ(I,J)=(0.,0.)
HYMIFZ(I,J)=(0.,0.)
EXMAFZ(I,J)=(0.,0.)
EYMAFZ(I,J)=(0.,0.)
HXMAFZ(I,J)=(0.,0.)
HYMAFZ(I,J)=(0.,0.)
ENDDO
ENDDO
RETURN
END
C
C *** SUBROUTINE FOR COMPUTING E COMPONENTS ***
C
SUBROUTINE ECAL(SE1,SE2,SE3,P1,P2,P3,P4,P5,P6,
& XS,XE,YS,YE,ZS,ZE,DD)
INCLUDE 'DIM.INC'
INTEGER SE1,SE2,SE3,P1,P2,P3,P4,P5,P6,XS,XE,YS,YE,ZS,ZE
REAL EH1(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),
& EH2(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),DD(3)
COMMON/EH/EH1,EH2,DX,DY,DZ,DT

```



```

DO K=ZS,ZE
DO J=YS,YE
DO I=XS,XE
EH1(I,J,K,SE1)=EH1(I,J,K,SE1)
& +DD(SE3)*(EH2(I+P1,J+P2,K+P3,SE2)-EH2(I,J,K,SE2))
& -DD(SE2)*(EH2(I+P4,J+P5,K+P6,SE3)-EH2(I,J,K,SE3))
ENDDO
ENDDO
ENDDO
RETURN
END

```

```

C
C *** SUBROUTINE FOR COMPUTING H COMPONENTS ***
C

```

```

SUBROUTINE HCAL(SE1,SE2,SE3,P1,P2,P3,P4,P5,P6,
& XS,XE,YS,YE,ZS,ZE,DD)
INCLUDE 'DIM.INC'
INTEGER SE1,SE2,SE3,P1,P2,P3,P4,P5,P6,XS,XE,YS,YE,ZS,ZE
REAL EH1(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),
& EH2(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),DD(3)
COMMON/EH/EH2,EH1,DX,DY,DZ,DT
DO K=ZS,ZE
DO J=YS,YE
DO I=XS,XE
EH1(I,J,K,SE1)=EH1(I,J,K,SE1)
& -DD(SE3)*(EH2(I,J,K,SE2)-EH2(I+P1,J+P2,K+P3,SE2))
& +DD(SE2)*(EH2(I,J,K,SE3)-EH2(I+P4,J+P5,K+P6,SE3))
ENDDO
ENDDO
ENDDO
RETURN
END

```

```

C
C *** SUBROUTINE TO DEFINE PATTERNS ON SUBSTRATE ***
C

```

```

SUBROUTINE PATTERN(PT,YS,YE,ZS,ZE,MORD)
INCLUDE 'DIM.INC'
INTEGER YS,YE,ZS,ZE,MORD
INTEGER PT(MAXY,MAXZ)
DO I=YS,YE
DO J=ZS,ZE
PT(I,J)=MORD
ENDDO
ENDDO
RETURN
END

```

```

C
C *** SUBROUTINE TO DEFINE NORMAL-TO-Y CONDUCTOR PLATE ***

```

```

C
SUBROUTINE CONPLATEY(PLATEY,XS,XE,Y,ZS,ZE)
INCLUDE 'DIM.INC'
INTEGER XS,XE,Y,ZS,ZE
INTEGER PLATEY(MAXX,MAXY,MAXZ)
DO I=XS,XE
  DO K=ZS,ZE
    PLATEY(I,Y,K)=1
  ENDDO
ENDDO
RETURN
END

```

```

C
C *** SUBROUTINE TO DEFINE NORMAL-TO-Z CONDUCTOR PLATES ***
C

```

```

SUBROUTINE CONPLATEZ(PLATEZ,XS,XE,YS,YE,Z)
INCLUDE 'DIM.INC'
INTEGER XS,XE,YS,YE,Z
INTEGER PLATEZ(MAXX,MAXY,MAXZ)
DO I=XS,XE
  DO J=YS,YE
    PLATEZ(I,J,Z)=1
  ENDDO
ENDDO
RETURN
END

```

```

C
C *** SUBROUTINE FOR DEFINING CONDUCTOR BLOCKS ***
C

```

```

SUBROUTINE CONBLOCK(BLOC,XS,XE,YS,YE,ZS,ZE)
INCLUDE 'DIM.INC'
INTEGER XS,XE,YS,YE,ZS,ZE
INTEGER BLOC(MAXX,MAXY,MAXZ)
DO I=XS,XE
  DO J=YS,YE
    DO K=ZS,ZE
      BLOC(I,J,K)=1
    ENDDO
  ENDDO
ENDDO
RETURN
END

```

```

C
C *** SUBROUTINE FOR CALCULATING S PARAMETERS ***
C

```

```

SUBROUTINE SPARA(NSTEP,DT,FST,FEN,ZO,AL,RB_FST,RB_FEN)
INCLUDE 'DIM.INC'

```

```

PARAMETER(MAXSTEP=10000)

```

```

PARAMETER(M_INDEX=17,MAXM=131072)
PARAMETER(C=2.997925E+8,PI=3.14159265359)
REAL DATA1(0:MAXSTEP),DATA2(0:MAXSTEP),DATA3(0:MAXSTEP),
& DT,DF,F,FST,FEN,Z0,AL,RB_FST,RB_FEN,RBETA
COMPLEX FOUR1(0:MAXM),FOUR2(0:MAXM),FOUR3(0:MAXM),
& S11,S21,ZIN

```

C

C DATA CONVERSION

C

```

OPEN(1,FILE='PULSE_0')
DO I=0,NSTEP-1
  READ(1,*)DATA1(I)
ENDDO
CLOSE(1)
OPEN(1,FILE='PULSE_1')
DO I=0,NSTEP-1
  READ(1,*)DATA2(I)
ENDDO
CLOSE(1)
OPEN(1,FILE='PULSE_1_1')
DO I=0,NSTEP-1
  WRITE(1,*)DATA2(I)-DATA1(I)
ENDDO
CLOSE(1)

```

C

C CALCULATING S PARAMETERS

C

```

MM=2**M_INDEX
OPEN(1,FILE='PULSE_0')
DO I=0,NSTEP-1
  READ(1,*)DATA1(I)
  FOUR1(I)=DATA1(I)
ENDDO
CLOSE(1)
OPEN(1,FILE='PULSE_1_1')
DO I=0,NSTEP-1
  READ(1,*)DATA2(I)
  FOUR2(I)=DATA2(I)
ENDDO
CLOSE(1)
OPEN(1,FILE='PULSE_2')
DO I=0,NSTEP-1
  READ(1,*)DATA3(I)
  FOUR3(I)=DATA3(I)
ENDDO
CLOSE(1)
DO I=NSTEP,MM

```

```

  FOUR1(I)=(0,0,0,0)

```

```

FOUR2(I)=(0.0,0.0)
FOUR3(I)=(0.0,0.0)
ENDDO
OPEN(10,FILE='S11.AMP')
OPEN(20,FILE='S11.PHA')
OPEN(30,FILE='S21.AMP')
OPEN(40,FILE='S21.PHA')
OPEN(50,FILE='ZIN.REAL')
OPEN(60,FILE='ZIN.IMAG')
INV=0
CALL FFT(FOUR1,M_INDEX,INV)
CALL FFT(FOUR2,M_INDEX,INV)
CALL FFT(FOUR3,M_INDEX,INV)
DF=1./(DT*MM)
I=1
100 F=I*DF
S11=FOUR2(I)/FOUR1(I)
RBETA=RB_FST+(RB_FEN-RB_FST)*(F*(1.E-9)-FST)/(FEN-FST)
S11=S11*CMPLX(COS(41.8879E-9*AL*RBETA*F),
& SIN(41.8879E-9*AL*RBETA*F))
S21=FOUR3(I)/FOUR1(I)
ZIN=Z0*(1+S11)/(1-S11)
IF((F.GT.(FST*1.E+9)).AND.(F.LT.(FEN*1.E+9)))THEN
WRITE(10,800)F*1.E-9,20.*ALOG10(CABS(S11))
WRITE(20,800)F*1.E-9,(ATAN2(AIMAG(S11),REAL(S11)))
& 180./PI
WRITE(30,800)F*1.E-9,20.*ALOG10(CABS(S21))
WRITE(40,800)F*1.E-9,(ATAN2(AIMAG(S21),REAL(S21)))
& 180./PI
WRITE(50,800)F*1.E-9,REAL(ZIN)
WRITE(60,800)F*1.E-9,AIMAG(ZIN)
800 FORMAT(F10.5,2X,F10.5)
ENDIF
I=I+1
IF(F.LT.(FEN*1.E+9))GOTO 100
CLOSE(10)
CLOSE(20)
CLOSE(30)
CLOSE(40)
CLOSE(50)
CLOSE(60)
RETURN
END
C
C *** SUBROUTINE FOR ZIN ***
C
SUBROUTINE ZIN(NSTEP,DT,FST,FEN,ZZ0,AL)
INCLUDE 'DIM.INC'

```

```

PARAMETER(MAXSTEP=10000)
PARAMETER(M_INDEX=17,MAXM=131072)
PARAMETER(C=2.997925E+8,PI=3.14159265359)
REAL DATA1(0:MAXSTEP),DATA2(0:MAXSTEP),
& DT,DF,F,FST,FEN
COMPLEX FOUR1(0:MAXM),FOUR2(0:MAXM),FOUR3(0:MAXM),
& S

```

```

C
C *****

```

```

C
C OPEN(1,FILE='fort.16')
C DO I=0,NSTEP-1
C READ(1,*)DATA1(I)
C ENDDO
C CLOSE(1)
C OPEN(1,FILE='PULSE_1')
C DO I=0,NSTEP-1
C READ(1,*)DATA2(I)
C ENDDO
C CLOSE(1)

```

```

C
C *****

```

```

C
MM=2**M_INDEX
OPEN(1,FILE='CURRENT')
DO I=0,NSTEP-1
READ(1,*)DATA1(I)
FOUR1(I)=DATA1(I)
ENDDO
CLOSE(1)
OPEN(1,FILE='PULSE_1')
DO I=0,NSTEP-1
READ(1,*)DATA2(I)
FOUR2(I)=DATA2(I)
ENDDO
CLOSE(1)
DO I=NSTEP,MM
FOUR1(I)=(0.0,0.0)
FOUR2(I)=(0.0,0.0)
ENDDO
OPEN(10,FILE='ZIN.REAL')
OPEN(20,FILE='ZIN.IMAG')
OPEN(30,FILE='ZIN')
OPEN(40,FILE='Y11')
INV=0
CALL FFT(FOUR1,M_INDEX,INV)
CALL FFT(FOUR2,M_INDEX,INV)

```

```

DF=1./(DT*MM)

```

```

I=1
100 F=I*DF
S=FOUR2(I)/FOUR1(I)
C RBETA=RB_FST+(RB_FEN-RB_FST)*(F*(1.E-9)-FST)/(FEN-FST)
C S11=S11*CMPLX(COS(41.8879E-9*AL*RBETA*F),
C & SIN(41.8879E-9*AL*RBETA*F))
C S21=FOUR3(I)/FOUR1(I)
C ZIN=Z0*(1+S11)/(1-S11)
IF((F.GT.(FST*1.E+9)).AND.(F.LT.(FEN*1.E+9)))THEN
WRITE(10,800)F*1.E-9,REAL(S)
WRITE(20,800)F*1.E-9,AIMAG(S)
C WRITE(30,800)F*1.E-9,SQRT(REAL(FOUR2(I)/FOUR1(I))**2+AIMAG(FOUR2(I)/FOUR1(I))**2)
WRITE(40,* )F*1.E-9,REAL(FOUR1(I)/FOUR2(I)),
& AIMAG(FOUR1(I)/FOUR2(I)),
& SQRT(REAL(FOUR1(I)/FOUR2(I))**2+AIMAG(FOUR1(I)/FOUR2(I))**2)
800 FORMAT(F10.5,2X,F10.5)
ENDIF
I=I+1
IF(F.LT.(FEN*1.E+9))GOTO 100
CLOSE(10)
CLOSE(20)
CLOSE(30)
CLOSE(40)
RETURN
END

C
C *** SUBROUTINE FOR FFT ***
C
SUBROUTINE FFT(A,M,INV)
PARAMETER(MAXM=131072)
PARAMETER(PI=3.14159265359)
COMPLEX A(MAXM),U,W,T
N=2**M
NV2=N/2
NM1=N-1
J=1
DO 7 I=1,NM1
IF(I.GE.J) GOTO 5
T=A(J)
A(J)=A(I)
A(I)=T
5 K=NV2
6 IF(K.GE.J)GOTO 7
J=J-K
K=K/2
GOTO 6
7 J=J+K

```

```

DO 20 L=1,M
  LE=2**L
  LE1=LE/2
  U=CMPLX(1.0,0.0)
  IF(INV.EQ.0)THEN
    W=CMPLX(COS(PI/LE1),-SIN(PI/LE1))
  ELSE
    W=CMPLX(COS(PI/LE1),SIN(PI/LE1))
  ENDIF
DO 20 J=1,LE1
  DO 10 I=J,N,LE
    IP=I+LE1
    T=A(IP)*U
    A(IP)=A(I)-T
10   A(I)=A(I)+T
20   U=U*W
    IF(INV.EQ.0)GOTO 30
    DO 40 I=1,N
40     A(I)=A(I)/N
30   RETURN
END
C
C *** SUBROUTINE FOR RUNNING DFT ***
C
      SUBROUTINE RDFT(STEP)
      INCLUDE 'DIM.INC'
      PARAMETER (NXOFF=3,NYOFF=3,NZOFF=3)
      PARAMETER (MVBX=MAXX-6,MVBY=MAXY-6,MVBZ=MAXZ-6)
      PARAMETER (C=2.997925E+8,PI=3.14159265359)
      INTEGER STEP,X,Y,Z,CXANT,CYANT,CZANT
      REAL E(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3),H(0:MAXX,0:MAXY,0:MAXZ,3)
      COMPLEX FACTOR,
& EYMIFX(MVBY,MVBZ),EZMIFX(MVBY,MVBZ),
& HYMIFX(MVBY,MVBZ),HZMIFX(MVBY,MVBZ),
& EYMAFX(MVBY,MVBZ),EZMAFX(MVBY,MVBZ),
& HYMAFX(MVBY,MVBZ),HZMAFX(MVBY,MVBZ),
& EXMIFY(MVBX,MVBZ),EZMIFY(MVBX,MVBZ),
& HXMIFY(MVBX,MVBZ),HZMIFY(MVBX,MVBZ),
& EXMAFY(MVBX,MVBZ),EZMAFY(MVBX,MVBZ),
& HXMAFY(MVBX,MVBZ),HZMAFY(MVBX,MVBZ),
& EXMIFZ(MVBX,MVBY),EYMIFZ(MVBX,MVBY),
& HXMIFZ(MVBX,MVBY),HYMIFZ(MVBX,MVBY),
& EXMAFZ(MVBX,MVBY),EYMAFZ(MVBX,MVBY),
& HXMAFZ(MVBX,MVBY),HYMAFZ(MVBX,MVBY)
      COMMON/EH/E,H,DX,DY,DZ,DT
      COMMON/DFT/EYMIFX,EZMIFX,HYMIFX,HZMIFX,EYMAFX,EZMAFX,
& HYMAFX,HZMAFX,EXMIFY,EZMIFY,HXMIFY,HZMIFY,
& EXMAFY,EZMAFY,HXMAFY,HZMAFY,EXMIFZ,EYMIFZ,

```

```

& HXMIFZ,HYMIFZ,EXMAFZ,EYMAFZ,HXMAFZ,HYMAFZ
COMMON/ANT1/M_FAR,CXANT,CYANT,CZANT
COMMON/ANT2/OMEGA,NANGINC
COMMON/VB/MIFX,MAFX,MIFY,MAFY,MIFZ,MAFZ,MFX,MFY,MFZ

```

C

```

FACTOR=CMLX(COS(OMEGA*STEP*DT),
& -SIN(OMEGA*STEP*DT))*DT

```

C

C ---FOR X=MIFX SURFACE

C

```

X=MIFX
DO Y=1,MFY
DO Z=1,MFZ
EYMIFX(Y,Z)=EYMIFX(Y,Z)+FACTOR*.5*
& (E(X,Y+MIFY,Z+MIFZ,2)+E(X,Y+MIFY,Z+MIFZ-1,2))
EZMIFX(Y,Z)=EZMIFX(Y,Z)+FACTOR*.5*
& (E(X,Y+MIFY,Z+MIFZ,3)+E(X,Y+MIFY-1,Z+MIFZ,3))
HYMIFX(Y,Z)=HYMIFX(Y,Z)+FACTOR*.25*
& (H(X,Y+MIFY,Z+MIFZ,2)+H(X+1,Y+MIFY,Z+MIFZ,2)+
& H(X,Y+MIFY-1,Z+MIFZ,2)+H(X+1,Y+MIFY-1,Z+MIFZ,2))
HZMIFX(Y,Z)=HZMIFX(Y,Z)+FACTOR*.25*
& (H(X,Y+MIFY,Z+MIFZ,3)+H(X+1,Y+MIFY,Z+MIFZ,3)+
& H(X,Y+MIFY,Z+MIFZ-1,3)+H(X+1,Y+MIFY,Z+MIFZ-1,3))
ENDDO
ENDDO

```

C

C ---FOR X=MAFX SURFACE

C

```

X=MAFX
DO Y=1,MFY
DO Z=1,MFZ
EYMAFX(Y,Z)=EYMAFX(Y,Z)+FACTOR*.5*
& (E(X,Y+MIFY,Z+MIFZ,2)+E(X,Y+MIFY,Z+MIFZ-1,2))
EZMAFX(Y,Z)=EZMAFX(Y,Z)+FACTOR*.5*
& (E(X,Y+MIFY,Z+MIFZ,3)+E(X,Y+MIFY-1,Z+MIFZ,3))
HYMAFX(Y,Z)=HYMAFX(Y,Z)+FACTOR*.25*
& (H(X,Y+MIFY,Z+MIFZ,2)+H(X+1,Y+MIFY,Z+MIFZ,2)+
& H(X,Y+MIFY-1,Z+MIFZ,2)-H(X+1,Y+MIFY-1,Z+MIFZ,2))
HZMAFX(Y,Z)=HZMAFX(Y,Z)+FACTOR*.25*
& (H(X,Y+MIFY,Z+MIFZ,3)+H(X+1,Y+MIFY,Z+MIFZ,3)+
& H(X,Y+MIFY,Z+MIFZ-1,3)-H(X+1,Y+MIFY,Z+MIFZ-1,3))
ENDDO
ENDDO

```

C

C ---FOR Y=MIFX SURFACE

C

```

DO X=1,MFX

```

```

Y=MIFY

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DO Z=1,MFZ
  EXMIFY(X,Z)=EXMIFY(X,Z)+FACTOR*.5*
& (E(X+MIFX,Y,Z+MIFZ,1)+E(X+MIFX,Y,Z+MIFZ-1,1))
  EZMIFY(X,Z)=EZMIFY(X,Z)+FACTOR*.5*
& (E(X+MIFX,Y,Z+MIFZ,3)+E(X+MIFX-1,Y,Z+MIFZ,3))
  HXMIFY(X,Z)=HXMIFY(X,Z)+FACTOR*.25*
& (H(X+MIFX,Y,Z+MIFZ,1)+H(X+MIFX,Y+1,Z+MIFZ,1)+
& H(X+MIFX-1,Y,Z+MIFZ,1)+H(X+MIFX-1,Y+1,Z+MIFZ,1))
  HZMIFY(X,Z)=HZMIFY(X,Z)+FACTOR*.25*
& (H(X+MIFX,Y,Z+MIFZ,3)+H(X+MIFX,Y+1,Z+MIFZ,3)+
& H(X+MIFX,Y,Z+MIFZ-1,3)+H(X+MIFX,Y+1,Z+MIFZ-1,3))
ENDDO
ENDDO

```

C

C --FOR Y=MAFX SURFACE

C

```

DO X=1,MFX
  Y=MAFY
  DO Z=1,MFZ
    EXMAFY(X,Z)=EXMAFY(X,Z)+FACTOR*.5*
& (E(X+MIFX,Y,Z+MIFZ,1)+E(X+MIFX,Y,Z+MIFZ-1,1))
    EZMAFY(X,Z)=EZMAFY(X,Z)+FACTOR*.5*
& (E(X+MIFX,Y,Z+MIFZ,3)+E(X+MIFX-1,Y,Z+MIFZ,3))
    HXMAFY(X,Z)=HXMAFY(X,Z)+FACTOR*.25*
& (H(X+MIFX,Y,Z+MIFZ,1)+H(X+MIFX,Y+1,Z+MIFZ,1)+
& H(X+MIFX-1,Y,Z+MIFZ,1)+H(X+MIFX-1,Y+1,Z+MIFZ,1))
    HZMAFY(X,Z)=HZMAFY(X,Z)+FACTOR*.25*
& (H(X+MIFX,Y,Z+MIFZ,3)+H(X+MIFX,Y+1,Z+MIFZ,3)+
& H(X+MIFX,Y,Z+MIFZ-1,3)+H(X+MIFX,Y+1,Z+MIFZ-1,3))

```

ENDDO

ENDDO

C

C ---FOR Z=MIFZ SURFACE

C

```

DO X=1,MFX
  DO Y=1,MFY
    Z=MIFZ
    EXMIFZ(X,Y)=EXMIFZ(X,Y)+FACTOR*.5*
& (E(X+MIFX,Y+MIFY,Z,1)+E(X+MIFX,Y+MIFY-1,Z,1))
    EYMIFZ(X,Y)=EYMIFZ(X,Y)+FACTOR*.5*
& (E(X+MIFX,Y+MIFY,Z,2)+E(X+MIFX-1,Y+MIFY,Z,2))
    HXMIFZ(X,Y)=HXMIFZ(X,Y)+FACTOR*.25*
& (H(X+MIFX,Y+MIFY,Z,1)+H(X+MIFX,Y+MIFY,Z+1,1)+
& H(X+MIFX-1,Y+MIFY,Z,1)+H(X+MIFX-1,Y+MIFY,Z+1,1))
    HYMIFZ(X,Y)=HYMIFZ(X,Y)+FACTOR*.25*
& (H(X+MIFX,Y+MIFY,Z,2)+H(X+MIFX,Y+MIFY,Z+1,2)+
& H(X+MIFX,Y+MIFY-1,Z,2)+H(X+MIFX,Y+MIFY-1,Z+1,2))

```

ENDDO

```

ENDDO
C
C ---FOR Z=MAFZ SURFACE
C
DO X=1,MFX
  DO Y=1,MFY
    Z=MAFZ
    EXMAFZ(X,Y)=EXMAFZ(X,Y)+FACTOR*.5*
    & (E(X+MIFX,Y+MIFY,Z,1)+E(X+MIFX,Y+MIFY-1,Z,1))
    EYMAFZ(X,Y)=EYMAFZ(X,Y)+FACTOR*.5*
    & (E(X+MIFX,Y+MIFY,Z,2)+E(X+MIFX-1,Y+MIFY,Z,2))
    HXMAFZ(X,Y)=HXMAFZ(X,Y)+FACTOR*.25*
    & (H(X+MIFX,Y+MIFY,Z,1)+H(X+MIFX,Y+MIFY,Z+1,1)+
    & H(X+MIFX-1,Y+MIFY,Z,1)+H(X+MIFX-1,Y+MIFY,Z+1,1))
    HYMAFZ(X,Y)=HYMAFZ(X,Y)+FACTOR*.25*
    & (H(X+MIFX,Y+MIFY,Z,2)+H(X+MIFX,Y+MIFY,Z+1,2)+
    & H(X+MIFX,Y+MIFY-1,Z,2)+H(X+MIFX,Y+MIFY-1,Z+1,2))
  ENDDO
ENDDO
RETURN
END
C
C *** SUBROUTINE FOR CALCULATING FAR-FIELD PATTERNS ***
C
SUBROUTINE FAR_FIELD(DX,DY,DZ)
INCLUDE 'DIM.INC'
PARAMETER (NXOFF=3,NYOFF=3,NZOFF=3)
PARAMETER (MVBX=MAXX-6,MVBY=MAXY-6,MVBZ=MAXZ-6)
PARAMETER (E0=8.854185E-12,U0=1.2566371E-6)
PARAMETER (C=2.997925E+8,PI=3.14159265359)
INTEGER X,Y,Z,CXANT,CYANT,CZANT
REAL XF,YF,ZF,K,KRCOSPSI,TH,PH
COMPLEX FACTOR
REAL RADINTXY(0:360),RADINTXZ(0:360),RADINTYZ(0:360)
COMPLEX EYMIFX(MVBY,MVBZ),EZMIFX(MVBY,MVBZ),
& HYMIFX(MVBY,MVBZ),HZMIFX(MVBY,MVBZ),
& EYMAFX(MVBY,MVBZ),EZMAFX(MVBY,MVBZ),
& HYMAFX(MVBY,MVBZ),HZMAFX(MVBY,MVBZ),
& EXMIFY(MVBX,MVBZ),EZMIFY(MVBX,MVBZ),
& HXMIFY(MVBX,MVBZ),HZMIFY(MVBX,MVBZ),
& EXMAFY(MVBX,MVBZ),EZMAFY(MVBX,MVBZ),
& HXMAFY(MVBX,MVBZ),HZMAFY(MVBX,MVBZ),
& EXMIFZ(MVBX,MVBY),EYMIFZ(MVBX,MVBY),
& HXMIFZ(MVBX,MVBY),HYMIFZ(MVBX,MVBY),
& EXMAFZ(MVBX,MVBY),EYMAFZ(MVBX,MVBY),
& HXMAFZ(MVBX,MVBY),HYMAFZ(MVBX,MVBY)
COMPLEX MZMIFX(MVBY,MVBZ),MYMIFX(MVBY,MVBZ),
& JZMIFX(MVBY,MVBZ),JYMIFX(MVBY,MVBZ),

```

```

& MZMAFX(MVBY,MVBZ),MYMAFX(MVBY,MVBZ),
& JZMAFX(MVBY,MVBZ),JYMAFX(MVBY,MVBZ),
& MZMIFY(MVBX,MVBZ),MXMIFY(MVBX,MVBZ),
& JXMIFY(MVBX,MVBZ),JZMIFY(MVBX,MVBZ),
& MZMAFY(MVBX,MVBZ),MXMAFY(MVBX,MVBZ),
& JXMAFY(MVBX,MVBZ),JZMAFY(MVBX,MVBZ),
& MYMIFZ(MVBX,MVBY),MXMIFZ(MVBX,MVBY),
& JYMIFZ(MVBX,MVBY),JXMIFZ(MVBX,MVBY),
& MYMAFZ(MVBX,MVBY),MXMAFZ(MVBX,MVBY),
& JYMAFZ(MVBX,MVBY),JXMAFZ(MVBX,MVBY)
COMMON NTH(3,0:360),NPH(3,0:360),
& LTH(3,0:360),LPH(3,0:360)
COMMON/DFT/EYMIFX,EZMIFX,HYMIFX,HZMIFX,EYMAFX,EZMAFX,
& HYMAFX,HZMAFX,EXMIFY,EZMIFY,HXMIFY,HZMIFY,
& EXMAFY,EZMAFY,HXMAFY,HZMAFY,EXMIFZ,EYMIFZ,
& HXMIFZ,HYMIFZ,EXMAFZ,EYMAFZ,HXMAFZ,HYMAFZ
COMMON/ANT1/M_FAR,CXANT,CYANT,CZANT
COMMON/ANT2/OMEGA,NANGINC
COMMON/VB/MIFX,MAFX,MIFY,MAFY,MIFZ,MAFZ,MFX,MFY,MFZ
C
C ----- CONVERTING E,H TO M,J -----
C
C X=MIFX SURFACE
C
DO Y=1,MFY
DO Z=1,MFZ
MZMIFX(Y,Z)=EYMIFX(Y,Z)
MYMIFX(Y,Z)=EZMIFX(Y,Z)
JZMIFX(Y,Z)=-HYMIFX(Y,Z)
JYMIFX(Y,Z)=HZMIFX(Y,Z)
ENDDO
ENDDO
C
C X=MAFX SURFACE
C
DO Y=1,MFY
DO Z=1,MFZ
MZMAFX(Y,Z)=-EYMAFX(Y,Z)
MYMAFX(Y,Z)=EZMAFX(Y,Z)
JZMAFX(Y,Z)=HYMAFX(Y,Z)
JYMAFX(Y,Z)=-HZMAFX(Y,Z)
ENDDO
ENDDO
C
C Y=MIFY SURFACE
C
DO X=1,MFX
DO Z=1,MFZ

```

```

MZMIFY(X,Z)=-EXMIFY(X,Z)
MXMIFY(X,Z)=EZMIFY(X,Z)
JZMIFY(X,Z)=HXMIFY(X,Z)
JXMIFY(X,Z)=-HZMIFY(X,Z)
ENDDO
ENDDO
C
C Y=MAFY SURFACE
C
DO X=1,MFX
DO Z=1,MFZ
MZMAFY(X,Z)=EXMAFY(X,Z)
MXMAFY(X,Z)=-EZMAFY(X,Z)
JZMAFY(X,Z)=-HXMAFY(X,Z)
JXMAFY(X,Z)=HZMAFY(X,Z)
ENDDO
ENDDO
C
C Z=MIFZ SURFACE
C
DO X=1,MFX
DO Y=1,MFY
MYMIFZ(X,Y)=EXMIFZ(X,Y)
MXMIFZ(X,Y)=-EYMIFZ(X,Y)
JYMIFZ(X,Y)=-HXMIFZ(X,Y)
JXMIFZ(X,Y)=HYMIFZ(X,Y)
ENDDO
ENDDO
C
C Z=MAFZ SURFACE
C
DO X=1,MFX
DO Y=1,MFY
MYMAFZ(X,Y)=-EXMAFZ(X,Y)
MXMAFZ(X,Y)=EYMAFZ(X,Y)
JYMAFZ(X,Y)=HXMAFZ(X,Y)
JXMAFZ(X,Y)=-HYMAFZ(X,Y)
ENDDO
ENDDO
C
C ----- NEAR-TO-FAR TRANSFORMATION -----
C
K=OMEGA/C
C
C -- I=1 FOR XY-PLANE, I=2 FOR XZ-PLANE --
C
I=1

```

```

IF(I.EQ.1)THEN
  PH=J*PI/180.
  TH=PI/2.
ELSE
IF(I.EQ.2)THEN
  PH=0.
  TH=J*PI/180.
ELSE
  PH=PI/2
  TH=J*PI/180.
ENDIF
ENDIF
C
C FAR FIELD CARTESIAN COORDINATES
C
XF=SIN(TH)*COS(PH)
YF=SIN(TH)*SIN(PH)
ZF=COS(TH)
C
C INTEGRATION ON X=MIFX SURFACE
C
IF(M_FAR.EQ.9) GOTO 200
100 X=MIFX
DO Y=1,MFY
DO Z=1,MFZ
  KRCOSPSI=K*((X-CXANT)*DX*XF+(Y-CYANT+MIFY)*DY*YF+
& (Z-CZANT+MIFZ)*DZ*ZF)
  FACTOR=CMPLX(COS(KRCOSPSI),SIN(KRCOSPSI))*DY*DZ
  NTH(I,J)=NTH(I,J)+FACTOR*
& (JYMIFX(Y,Z)*COS(TH)*SIN(PH)-JZMIFX(Y,Z)*SIN(TH))
  NPH(I,J)=NPH(I,J)+FACTOR*
& (JYMIFX(Y,Z)*COS(PH))
  LTH(I,J)=LTH(I,J)+FACTOR*
& (MYMIFX(Y,Z)*COS(TH)*SIN(PH)-MZMIFX(Y,Z)*SIN(TH))
  LPH(I,J)=LPH(I,J)+FACTOR*
& (MYMIFX(Y,Z)*COS(PH))
ENDDO
ENDDO
C
C INTEGRATION ON X=MAFX SURFACE
C
200 X=MAFX
DO Y=1,MFY
DO Z=1,MFZ
  KRCOSPSI=K*((X-CXANT)*DX*XF+(Y-CYANT+MIFY)*DY*YF+
& (Z-CZANT+MIFZ)*DZ*ZF)
  FACTOR=CMPLX(COS(KRCOSPSI),SIN(KRCOSPSI))*DY*DZ
  NTH(I,J)=NTH(I,J)+FACTOR*

```

```

& (JYMAFX(Y,Z)*COS(TH)*SIN(PH)-JZMAFX(Y,Z)*SIN(TH))
NPH(I,J)=NPH(I,J)+FACTOR*
& (JYMAFX(Y,Z)*COS(PH))
LTH(I,J)=LTH(I,J)+FACTOR*
& (MYMAFX(Y,Z)*COS(TH)*SIN(PH)-MZMAFX(Y,Z)*SIN(TH))
LPH(I,J)=LPH(I,J)+FACTOR*
& (MYMAFX(Y,Z)*COS(PH))
ENDDO
ENDDO

```

```

C
C INTEGRATION ON Y=MIFY SURFACE
C

```

```

IF(M_FAR.EQ.9) GOTO 700
300 DO X=1,MFX
Y=MIFY
DO Z=1,MFZ
KRCOSPSI=K*((X-CXANT+MIFX)*DX*XF+(Y-CYANT)*DY*YF+
& (Z-CZANT+MIFZ)*DZ*ZF)
FACTOR=CMPLX(COS(KRCOSPSI),SIN(KRCOSPSI))*DX*DZ
NTH(I,J)=NTH(I,J)+FACTOR*
& (JXMIFY(X,Z)*COS(TH)*COS(PH)-JZMIFY(X,Z)*SIN(TH))
NPH(I,J)=NPH(I,J)+FACTOR*
& (-JXMIFY(X,Z)*SIN(PH))
LTH(I,J)=LTH(I,J)+FACTOR*
& (MXMIFY(X,Z)*COS(TH)*COS(PH)-MZMIFY(X,Z)*SIN(TH))
LPH(I,J)=LPH(I,J)+FACTOR*
& (-MXMIFY(X,Z)*SIN(PH))
ENDDO
ENDDO

```

```

C
C INTEGRATION ON Y=MAFY SURFACE
C

```

```

400 DO X=1,MFX
Y=MAFY
DO Z=1,MFZ
KRCOSPSI=K*((X-CXANT+MIFX)*DX*XF+(Y-CYANT)*DY*YF+
& (Z-CZANT+MIFZ)*DZ*ZF)
FACTOR=CMPLX(COS(KRCOSPSI),SIN(KRCOSPSI))*DX*DZ
NTH(I,J)=NTH(I,J)+FACTOR*
& (JXMAFY(X,Z)*COS(TH)*COS(PH)-JZMAFY(X,Z)*SIN(TH))
NPH(I,J)=NPH(I,J)+FACTOR*
& (-JXMAFY(X,Z)*SIN(PH))
LTH(I,J)=LTH(I,J)+FACTOR*
& (MXMAFY(X,Z)*COS(TH)*COS(PH)-MZMAFY(X,Z)*SIN(TH))
LPH(I,J)=LPH(I,J)+FACTOR*
& (-MXMAFY(X,Z)*SIN(PH))
ENDDO
ENDDO

```

```

C
C  INTEGRATION ON Z=MIFZ SURFACE
C
500 DO X=1,MFX
    DO Y=1,MFY
        Z=MIFZ
        KRCOSPSI=K*((X-CXANT+MIFX)*DX*XF+
&   (Y-CYANT+MIFY)*DY*YF+(Z-CZANT)*DZ*ZF)
        FACTOR=CMPLX(COS(KRCOSPSI),SIN(KRCOSPSI))*DX*DY
        NTH(I,J)=NTH(I,J)+FACTOR*
&   (JXMIFZ(X,Y)*COS(TH)*COS(PH)+
&   JYMIFZ(X,Y)*COS(TH)*SIN(PH))
        NPH(I,J)=NPH(I,J)+FACTOR*
&   (-JXMIFZ(X,Y)*SIN(PH)+JYMIFZ(X,Y)*COS(PH))
        LTH(I,J)=LTH(I,J)+FACTOR*
&   (MXMIFZ(X,Y)*COS(TH)*COS(PH)+
&   MYMIFZ(X,Y)*COS(TH)*SIN(PH))
        LPH(I,J)=LPH(I,J)+FACTOR*
&   (-MXMIFZ(X,Y)*SIN(PH)+MYMIFZ(X,Y)*COS(PH))
    ENDDO
ENDDO

```

```

C
C  INTEGRATION ON Z=MAFZ SURFACE
C
600 DO X=1,MFX
    DO Y=1,MFY
        Z=MAFZ
        KRCOSPSI=K*((X-CXANT+MIFX)*DX*XF+
&   (Y-CYANT+MIFY)*DY*YF+(Z-CZANT)*DZ*ZF)
        FACTOR=CMPLX(COS(KRCOSPSI),SIN(KRCOSPSI))*DX*DY
        NTH(I,J)=NTH(I,J)+FACTOR*
&   (JXMAFZ(X,Y)*COS(TH)*COS(PH)+
&   JYMAFZ(X,Y)*COS(TH)*SIN(PH))
        NPH(I,J)=NPH(I,J)+FACTOR*
&   (-JXMAFZ(X,Y)*SIN(PH)+JYMAFZ(X,Y)*COS(PH))
        LTH(I,J)=LTH(I,J)+FACTOR*
&   (MXMAFZ(X,Y)*COS(TH)*COS(PH)+
&   MYMAFZ(X,Y)*COS(TH)*SIN(PH))
        LPH(I,J)=LPH(I,J)+FACTOR*
&   (-MXMAFZ(X,Y)*SIN(PH)+MYMAFZ(X,Y)*COS(PH))
    ENDDO
ENDDO

```

```

700 CONTINUE
ENDDO
IF(I.EQ.1)THEN
    I=2
    GOTO 111
ENDIF

```

```

IF(I.EQ.2)THEN
  I=3
  GOTO 111
ENDIF
C
C ----- CALCULATING FAR-FIELD PATTERNS -----
C
ETA=120.*PI
CONST=OMEGA*OMEGA/(32.*C*C*PI*PI)
RADINTMAX1=0.
RADINTMAX2=0.
RADINTMAX3=0.
C
C RADIATION INTENSITY IN XY AND XZ PLANES
C
      DO J=0,360,NANGINC
      RADINTXY(J)=CONST*(ABS((ETA*NTH(1,J)+LPH(1,J)))**2+
& ABS((ETA*NPH(1,J)-LTH(1,J)))**2)
      RADINTXZ(J)=CONST*(ABS((ETA*NTH(2,J)+LPH(2,J)))**2+
& ABS((ETA*NPH(2,J)-LTH(2,J)))**2)
      RADINTYZ(J)=CONST*(ABS((ETA*NTH(3,J)+LPH(3,J)))**2+
& ABS((ETA*NPH(3,J)-LTH(3,J)))**2)
      IF(RADINTMAX1.LT.RADINTXY(J))RADINTMAX1=RADINTXY(J)
      IF(RADINTMAX2.LT.RADINTXZ(J))RADINTMAX2=RADINTXZ(J)
      IF(RADINTMAX3.LT.RADINTYZ(J))RADINTMAX3=RADINTYZ(J)
ENDDO
C
C NORMALIZING AND SAVING RADIATION PATTERNS
C
OPEN(16,FILE='XY_PL.dat')
OPEN(17,FILE='XZ_PL.dat')
OPEN(18,FILE='YZ_PL.dat')
DO J=0,360,NANGINC
  WRITE(16,900)J,10.*ALOG10(RADINTXY(J)/RADINTMAX1)
ENDDO
DO J=90,360,NANGINC
  WRITE(17,900)J-90,10.*ALOG10(RADINTXZ(J)/RADINTMAX2)
ENDDO
DO J=NANGINC,90,NANGINC
  WRITE(17,900)J+270,10.*ALOG10(RADINTXZ(J)/RADINTMAX2)
ENDDO
DO J=0,360,NANGINC
  WRITE(18,900)J,10.*ALOG10(RADINTYZ(J)/RADINTMAX3)
ENDDO
CLOSE(16)
CLOSE(17)
CLOSE(18)

```

ภาคผนวก ข

1. ไฟล์ DIM.INC

```
C ##### dipole #####  
PARAMETER(MAXX=50,MAXY=101,MAXZ=50)
```

2. ไฟล์ INPUT.DAT

```
HA1 HA2 HA3 HA4 HA5 ER1 ER2 ER3 ER4 ER5  
0 0 0 0 50 1. 1. 1. 1. 1.  
DX DY DZ T(PS) T0(APPR. 3xT)  
0.484E-3 0.484E-3 0.484E-3 10. 30.  
NSTEP NSNAP1 NSNAP2 NSNAP3 MCOMPX MCOMPY MCOMPZ ASTEP  
150 5 7 8 1 1 1 0  
MS-FEED?(Y-1,N-0) EXCX1 EXCX2 EXCY1 EXCY2 EXCZ1  
0 0 0 0 0 0  
CPW-FEED?(Y-1,N-0) EXCX EXCYL1 EXCYL2 EXCYR1 EXCYR2 EXCZ2 PMODE  
1 25 51 51 0 0 25 1  
NUMBER OF OBSERAVATION POINTS  
1  
OBY(I) OBZ(I) MOB(I)  
51 25 2  
CALCULATING S PARAMETERS?(YES-1,NO-0,FFT ONLY-9)  
1  
FST(GHZ) FENGHZ Z0(OHM) LL(IN DZ'S) RBETA_FST RBETA_FEN  
5 25 0 0 0 0  
CALCULATE FAR FIELD PATTERNS?(YES-1,NO-0)  
1  
CXANT CYANT CZANT FREQ.(GHZ) INCREM.(DEG.)  
25 51 25 10. 1  
NUMBER OF PATTERNS ON SURFACE PT1  
1  
YSTART YEND ZSTART ZEND MODE(1-CONDUCTOR,0-DIELECTRIC)  
1 101 1 50 0  
NUMBER OF PATTERNS ON SURFACE PT2  
1  
YSTART YEND ZSTART ZEND MODE(1-CONDUCTOR,0-DIELECTRIC)  
1 101 1 50 0  
NUMBER OF PATTERNS ON SURFACE PT3  
1  
YSTART YEND ZSTART ZEND MODE(1-CONDUCTOR,0-DIELECTRIC)  
1 101 1 50 0  
NUMBER OF PATTERNS ON SURFACE PT4  
1  
YSTART YEND ZSTART ZEND MODE(1-CONDUCTOR,0-DIELECTRIC)
```

900. FORMAT(15,3X,F20.10)

9999 RETURN

C ***** END OF SUBROUTINES *****

END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 101 1 50 0
NUMBER OF NORMAL-TO-Y PLATES
0
XSTART XEND YCORD ZSTART ZEND
0 0 0 0 0
NUMBER OF NORMAL-TO-Z PLATES
0
XSTART XEND YSTART YEND ZCORD
0 0 0 0 0
NUMBER OF CONDUCTOR BLOCKS
0
XSTART XEND YSTART YEND ZSTART ZEND
0 0 0 0 0 0
NUMBER OF INFINITESIMAL THICKNESS CONDUCTOR BLOCKS
2
XSTART XEND YSTART YEND ZSTART ZEND
25 25 29 50 25 25
25 25 52 73 25 25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้