

การวิเคราะห์สายอากาศแบบท่อนำคลื่นที่มีช่องเปิดตามสันขอบด้านข้างด้วยวิธีผสมระหว่าง  
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับวิธีโมเมนต์



นายอิสวานติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4429-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ANALYSIS OF AN EDGE SLOT WAVEGUIDE ANTENNA  
USING A COMBINED FINITE ELEMENT AND MOMENT METHODS**

**Mr. Iswandi**

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

**Department of Electrical Engineering**

**Faculty of Engineering**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 2005**

**ISBN 974-17-4429-3**

**481695**

Thesis title: ANALYSIS OF AN EDGE SLOT WAVEGUIDE ANTENNA  
USING A COMBINED FINITE ELEMENT AND MOMENT  
METHODS


By: Mr. ISWANDI

Field of study: ELECTRICAL ENGINEERING

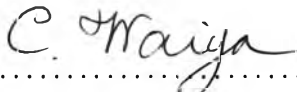
Thesis Advisor: ASSISTANT PROFESSOR TUPTIM ANGKAEW, D. Eng.


---


Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial  
Fulfillment of the Requirement for the Master's Degree

  
..... Dean of the Faculty of Engineering  
Professor Direk Lavansiri, Ph.D.

THESIS COMMITTEE:

  
..... Chairman  
Associate Professor Chatchai Waiyapattanakorn, Ph.D.

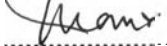
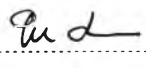
  
..... Thesis Advisor  
Assistant Professor Tuptim Angkaew, D. Eng.

  
..... Member  
Professor Monai Krairiksh, D. Eng.

อิสวานดิ : การวิเคราะห์สายอากาศแบบท่อนำคลื่นที่มีช่องเปิดตามสันขอบด้านข้างด้วยวิธีผสมระหว่างระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับวิธีโมเมนต์ (ANALYSIS OF AN EDGE SLOT WAVEGUIDE ANTENNA USING A COMBINED FINITE ELEMENT AND MOMENT METHODS) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ทับทิม อ่างแก้ว , 73 หน้า, ISBN 974-17-4429-3.

งานวิทยานิพนธ์นำเสนอระเบียบวิธีเชิงเลขเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของการแผ่กระจายคลื่นจากช่องเปิดตามสันขอบด้านข้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมด้วยวิธีผสมระหว่างระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับวิธีโมเมนต์ เพื่อให้การคำนวณได้ผลดีจึงได้เลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการประมาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องเปิดเนื่องจากต้องนำผลของความหนาของตัวนำที่เป็นผนังของท่อนำคลื่นมาพิจารณาด้วย อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีข้อด้อยในการวิเคราะห์บริเวณสนามที่เปิดโล่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีโมเมนต์ ดังนั้นจึงได้มีการนำวิธีทั้งสองมาผสมกันเพื่อนำข้อดีของวิธีแต่ละวิธีมาใช้ร่วมกัน นอกจากนี้งานวิทยานิพนธ์ยังได้ศึกษาการนำเอลิเมนต์เอกฐานมาใช้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีของวิธีผสมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ด้วย

เพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ผู้เขียนได้จัดสร้างขึ้นตามระเบียบวิธีที่นำเสนอ จึงได้นำโปรแกรมไปคำนวณในกรณีตัวอย่างและเปรียบเทียบผลการคำนวณ ผลการเปรียบเทียบการกระจายสนามไฟฟ้าตามความยาวของช่องเปิดพบว่าตรงกับผลการคำนวณที่มีผู้นำเสนอไว้ก่อนแล้ว นอกจากนี้ยังได้คำนวณพารามิเตอร์ต่างๆที่สามารถวัดได้เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ผลที่ได้พบว่าสอดคล้องกันดี งานวิทยานิพนธ์ยังได้เสนอผลเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบสายอากาศ เช่น กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าสัมพันธ์กับมุมเอียงของช่องเปิด และรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในส่วนผลของการศึกษาเรื่องการใช้อิเล็กตรอนเอกฐานในวิธีผสมระหว่างไฟไนต์เอลิเมนต์กับวิธีโมเมนต์นั้นพบว่าได้ผลไม่ถูกต้อง จึงสรุปได้ว่าไม่สามารถนำมาใช้ร่วมกันได้ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากธรรมชาติของฟังก์ชันการประมาณของระเบียบวิธีทั้งสองนั้นแตกต่างกัน

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่อนิสิต .....   
 สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....   
 ปีการศึกษา ..... 2548 .....

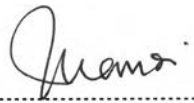
##46706472 MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

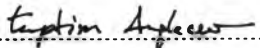
KEY WORD : EDGE SLOT / SLOTTED WAVEGUIDE ANTENNA / HYBRID METHOD/ FINITE ELEMENT METHOD / MOMENT METHOD

ISWANDI: ANALYSIS OF AN EDGE SLOT WAVEGUIDE ANTENNA USING A COMBINED FINITE ELEMENT AND MOMENT METHODS, THESIS ADVISOR: ASSISTANT PROFESSOR TUPTIM ANGKAEW, D. Eng., 73 pp., ISBN 974-17-4429-3

A numerical analysis method for analyzing radiation characteristic of an edge slot waveguide antenna by using combined finite element and moment methods is presented in this thesis. The finite element method has been used to find the approximate solution of the electric field in the cavity of the slot in order to incorporate the wall thickness of slot into the numerical modeling. As the finite element method is less efficient than the moment method for the case of open region, the moment method is employed in free space outside the slot cavity which includes region in rectangular waveguide and free space region outside the radiation slot. Thus, the combined finite element method and moment method has been proposed in this thesis in order to combined the merit of both methods. In addition, the concept of using singular element has been firstly investigated in this thesis for improving the accuracy of approximation of electric field at the corners of the edge slot.

The numerical examples have been carried out to validate the program written by the author. The computed results of electric field distribution along the slot and resonant length agree well with other published results. The proposed method has been employed to find other parameters which are useful for designing antenna such as normalized conductance versus slot inclination angle and radiation patterns. By investigating the use of singular element, it is found that the singular element cannot be used in this case of combined finite element and moment method because of the conflict nature of interpolation functions using in finite element and moment methods.

Department ..... Electrical Engineering ..... Student's signature .....  .....

Field of study ..... Electrical Engineering ..... Advisor's signature .....  .....

Academic year ..... 2005 .....

## ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my great gratitude and deep appreciation to my advisor, Assist. Prof. Dr. Tuptim Angkaew, for her supports, her guidance and her friendship during completing my thesis. I would like to thank my thesis committee members, Assoc. Prof. Dr. Chatchai Waiyapattanakorn and Prof. Dr. Monai Krairiksh for any encouragements and suggestions for completing my thesis.

I would like to express my sincere gratitude AUN/SEED-Net - JICA for granting me a full scholarship without which my study at Chulalongkorn University would not be possible.

I would like to thank many other students in the electromagnetic wave group, from whom I benefited a lot through stimulating discussions. My thanks also for all my colleagues in PERMITHA (The Association of Indonesian Students in Thailand) that have experienced me with the nice friendship, discussions and various knowledge.

Lastly, I would like to thank my family. I am very grateful to my father, Samat, my mother, Sugiyah and my sister, Lilis Surawandayanti, who always encourage and support me to realize all my dreams even though they have to sustain the long time separation from their beloved son.

# Contents

<b>Abstract in Thai</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract in English</b> .....	<b>v</b>
<b>Acknowledgements</b> .....	<b>vi</b>
<b>Contents</b> .....	<b>vii</b>
<b>List of Tables</b> .....	<b>ix</b>
<b>List of Figures</b> .....	<b>x</b>
<b>CHAPTER I INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
1.1 Background . . . . .	1
1.2 Research Motivation . . . . .	3
1.3 Objectives of the Research . . . . .	5
1.4 Chapter Organization . . . . .	6
<b>CHAPTER II COMBINED FINITE ELEMENT AND MOMENT ME-</b> <b>THODS</b> .....	<b>7</b>
2.1 Geometry of an Edge Slot . . . . .	8
2.2 Equivalent Network Representation of an Edge Slot . . . . .	8
2.3 Formulation of Combined Finite Element and Moment Method . . . .	10
2.3.1 Field Equivalent Principle . . . . .	10
2.3.2 Reaction Variational Equation . . . . .	12
2.3.3 The formulation of fields in cavity region . . . . .	15
2.3.4 The formulation of fields on the inner surfaces . . . . .	18
2.3.5 The formulation of fields on the outer surfaces . . . . .	29
2.3.6 Matrix Assembly and Finalization . . . . .	33
2.4 Admittance properties of edge slot . . . . .	34

2.5	Radiation pattern of edge slot . . . . .	35
<b>CHAPTER III SINGULAR ELEMENT SHAPE FUNCTION . . . . .</b>		<b>37</b>
3.1	Finite element on singular point . . . . .	37
3.2	Formulation of singular element shape function . . . . .	38
3.3	Elaborating the singular element on the analysis of edge slot . . . . .	40
3.3.1	Singular element on the cavity integral . . . . .	40
3.3.2	Singular element on the internal surface integrals . . . . .	44
<b>CHAPTER IV RESULT AND DISCUSSION . . . . .</b>		<b>47</b>
4.1	Electric Field Distribution . . . . .	47
4.2	Evaluation of Numerical Convergency . . . . .	49
4.3	Singular Element Implementation . . . . .	50
4.4	Calculation of Equivalent Network Parameter . . . . .	56
4.5	Radiation Pattern . . . . .	59
4.6	Practical Design Considerations . . . . .	61
<b>CHAPTER V CONCLUSION AND RECOMMENDATION . . . . .</b>		<b>64</b>
5.1	Conclusion . . . . .	64
5.2	Recommendation . . . . .	65
<b>References . . . . .</b>		<b>66</b>
<b>Appendix . . . . .</b>		<b>69</b>
<b>Biography . . . . .</b>		<b>73</b>



## List of Tables

2.1	Vector multiplication for all combination of slot part . . . . .	24
2.2	Vector multiplications for all combination of slot part . . . . .	33
3.1	Comparison of the first integral calculations . . . . .	43
3.2	Comparison of the second integral calculations . . . . .	44
3.3	Comparison of $H_i$ calculations . . . . .	45
3.4	Comparison of the $Y_{ij}$ calculations . . . . .	45
1	Sample point of Gauss quadrature integral approximation with 4 points . . . . .	71
2	Sample point of Gauss quadrature integral approximation with 9 points . . . . .	72

## List of Figures

1.1 (a) Edge slot cuts the waveguide wall current lines, (b) resonant edge slot. . . . .	1
2.1 The coordinate system and geometrical parameters of the edge slot . . . . .	7
2.2 Transmission line equivalence of edge slot . . . . .	9
2.3 The field equivalence on the edge slot . . . . .	11
2.4 The domain of the problem . . . . .	13
2.5 The domain is divided into elements . . . . .	16
2.6 The linear characteristic of the area coordinate shape function . . . . .	17
2.7 Convergent value of integral calculation on the internal surface. . . . .	29
2.8 Modeling the field caused by magnetic current on the external surfaces of slot. . . . .	31
2.9 Example of source and field point in the coordinates system used in wedge Green's function calculation. . . . .	32
2.10 Coordinate transformation for the calculation of radiation patterns . . . . .	36
3.1 The singular element shape function. . . . .	38
3.2 The adjoining of singular element and standard element shape functions . . . . .	39
3.3 The configuration of singular element on the cavity's corner . . . . .	40
4.1 Magnitude of electric field on inner, center and outer slot surface for the first case. . . . .	48
4.2 Phase of electric field on the inner, center and outer slot surface for the first case. . . . .	48
4.3 The comparison of calculation result with various number of layer and element. . . . .	50

4.4	The magnitude of electric field along the inner surface for various number of $\rho$ . . . . .	51
4.5	The argument of electric field along the inner surface for various number of $\rho$ . . . . .	51
4.6	The magnitude of electric field along the outer surface for various number of $\rho$ . . . . .	52
4.7	The argument of electric field along the outer surface for various number of $\rho$ . . . . .	52
4.8	The variation of field distribution on the inner surface with various number of layer with $\rho = 0.5$ . . . . .	54
4.9	The variation of field distribution on the outer surface with various number of layer with $\rho = 0.5$ . . . . .	54
4.10	The variation of field distribution on the inner surface with various number of elements with $\rho = 0.5$ . . . . .	55
4.11	The variation of field distribution on the outer surface with various number of elements with $\rho = 0.5$ . . . . .	55
4.12	Normalized conductance and susceptance of edge slot versus the slot length $L$ and its comparison to some references. . . . .	57
4.13	Normalized conductance versus slot inclination angle $\theta$ and its comparison to other calculation and measurement. . . . .	58
4.14	Normalized conductance and susceptance of edge slot versus the frequency $f$ and its comparison to other calculation and measurement. . . . .	58
4.15	Radiation pattern of a single edge slot on the $y'' - z''$ plane. . . . .	60
4.16	Radiation pattern of a single edge slot on the $x'' - z''$ plane. . . . .	60
4.17	A pair of edge slot with the inclination angle is opposite each other. . . . .	61
4.18	Equivalent network parameter of the edge slot array. . . . .	62
1	Geometrical transformation of triangular area . . . . .	70
2	The sample point of gaussian integral approximation for $n = 3$ (a) and $n = 9$ (b). . . . .	71