AIN SHAMS UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
Electronics and Communications Engineering Department

Compact Microstrip Antenna Analysis and Design for Satellite Communications

A Thesis
Submitted in Partial Fulfillment for the Requirements
of the Degree of Master of Science in Electrical Engineering
(Electronics and Communications Engineering)

Submitted By: Eng. Ahmed Hassan Abdelaziz Abdelrahman
B.Sc. of Electrical Engineering
(Electronics and Communications Engineering)
Ain Shams University, 2001

Supervised By

Prof. Dr. Salwa H. Elramly

Prof. Dr. Fatma M. Elhefnawi Prof. Dr. Moataza A. Hendi

CAIRO – 2010

AIN SHAMS UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
Electronics and Communications Engineering Department

Examiners Committee

Name: Ahmed Hassan Abdelaziz Abdelrahman

Thesis: Compact Microstrip Antenna Analysis and Design for Satellite Communications

Degree: Master of Science in Electrical Engineering – Communication

Name, Title and Affiliation **Signature**

1) Prof. Dr. Ibrahim A. Salem
   Professor at Technical Military College.

2) Prof. Dr. Nagda M. H. Elmenyawi
   Electronics and Communications Dept.
   Faculty of Engineering, Ain Shams University.

3) Prof. Dr. Salwa H. Elramly
   Electronics and Communications Dept.
   Faculty of Engineering, Ain Shams University.

4) Prof. Dr. Fatma M. Elhefnawi
   Microwave Engineering Dept.
   Electronic Research Institute.

جامعة عين شمس - كلية الهندسة
قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

تحليل وتصميم الهوائيات الشريطية المدمجة لإتصالات الأقمار الصناعية

رسالـــــة
مقدمة للحصول على درجة الماجستير فى الهندسة الكهربائية
(هندسة الإلكترونيات و الإتصالات)

مقدمة من
أحمد حسن عبد العزيز عبد الرحمن
بكالوريوس الهندسة الكهربائية
هندسة الإلكترونيات والإتصالات
جامعة عين شمس - 2001

تحت إشراف

الأستاذ الدكتور/ سلوى حسين الرملى

الأستاذ الدكتور/ فاطمة محمود الحفناوى الأستاذ الدكتور/ معتزة عبد الحميد هندى

القاهرة – 2010

جامعة عين شمس - كلية الهندسة

قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

لجنة التحكيم

الاســـــــــم: أحمد حسن عبد العزيز عبد الرحمن

عنوان الرسالة: تحليل وتصميم الهوائيات الشريطية المدمجة لإتصالات الأقمار الصناعية

الدرجـــــــة: ماجستير الهندسة الكهربائية
(هندسة الإكترونيات والإتصالات)

الاســـم **التوقيع**

1) الأستاذ الدكتور/ إبراهيم أحمد سالم
أستاذ بالكلية الفنية العسكرية سابقاً

2) الأستاذ الدكتور/ ناجدة محمد حلمى المنياوى
أستاذ بقسم هندسة الإتصالات والإكترونيات – كلية الهندسة – جامعة عين شمس

3) الأستاذ الدكتور/ سلوى حسين الرملى
أستاذ بقسم هندسة الإتصالات والإكترونيات – كلية الهندسة – جامعة عين شمس

4) الأستاذ الدكتور/ فاطمة محمود الحفناوى
أستاذ متفرغ بمعهد بحوث الإكترونيات

جامعة عين شمس - كلية الهندسة

قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

رسالة ماجستير

الاســـــــــم: أحمد حسن عبد العزيز عبد الرحمن

عنوان الرسالة: تحليل وتصميم الهوائيات الشريطية المدمجة لإتصالات الأقمار الصناعية

الدرجـــــــة: ماجستير الهندسة الكهربائية
(هندسة الإلكترونيات والإتصالات)

لجنة الإشراف

1- الاسم/ سلوى حسين الرملى	أستاذ بقسم هندسة الإتصالات والإلكترونيات – كلية الهندسة – جامعة عين شمس
2- الاسم/ فاطمة حسين الحفناوى	أستاذ متفرغ بمعهد بحوث الإلكترونيات
3- الاسم/ معتزة عبد الحميد هندى	أستاذ متفرغ بمعهد بحوث الإلكترونيات

تاريخ البحث: / /

الدراســات العليــا

ختم الإجازة: أجيزت الرسالة بتاريخ / /

موافقة مجلس الكلية / /

موافقة مجلس الجامعة / /

Acknowledgment

All gratitude and thanks to “ALLAH” who guides me to bring forth this thesis.

I greatly appreciate Prof. Dr. Salwa Elramly for her assistance, guidance and encouragement throughout this thesis.

I am greatly indebted to Prof. Dr. Fatma Elhefnawi, for her efforts and patience in leading me through my research to light this thesis.

I am also grateful to Prof. Dr. Moataza Hendi, for her assistance in manufacturing, testing and guidance through out this thesis.

Special acknowledgment to Prof. Dr. Atef Elsherbeni for his great efforts and guidance which have great improvement in tackling the new designs. I appreciate very much his support by providing the FDTD software package.

I also want to thank Prof. Dr. Ayman Eldesouki, chairman of NARSS for his support and encouragement in using NARSS facilities.

Finally, I would like to thank my family and friends. I owe all my achievement to my parent, wife and daughter for their encouragements and supports during my life, and share all my joy and bitterness every day and night.

الفضل الأول لنجاحاتى دائماً وأبداً هو الله سبحانه وتعالى على ما أنعم علي بنعمة العلم.

بسم الله الرحمن الرحيم

"قالوا سبحانك لا علم لنا إلا ما علمتنا إنك أنت العليم الحكيم"

صدق الله العظيم

ABSTRACT

Microstrip antennas MSAs have several advantages, such as its low cost, lightweight and small-volume. They are manufactured using printed-circuit technology, so that mass production can be achieved at a low cost. Microstrip antennas are used in defense and commercial applications replacing many conventional antennas, especially in satellite communication systems. Moreover, its use in present-day satellite communication systems requires smaller antenna size to meet the miniaturization requirements of the satellite communication systems.

The main purpose of this dissertation is to study the different configurations to significantly reduce the antenna size. The scope of this work is to design and fabricate compact MSAs by embedding slots on the radiating patch using dual-feed polarized antenna. The addition of the feed network under the ground plane and connecting to the antenna through via holes gives circularly-polarized antenna suitable for GPS applications. The effect of the embedded slots on antenna size reduction is studied and analyzed. FR4 substrate is used and the antenna is fabricated and its resonant frequency is adjusted for the GPS applications at 1575.42 MHz. Another antenna is designed using high permittivity substrate in order to obtain more size reduction.

Circularly-polarized array antenna is designed using four compact patches with embedded slots and a feed network placed under the array antenna ground plane using the FR4 substrate where the feed network feeds the array patches with phase shift of 90° between each patch and the adjacent patches. Another antenna array is designed using the high permittivity substrate to obtain more size reduction.

Different methods of analysis are discussed. FDTD method is demonstrated in more details.

ملخص

الهوائيات الشريطية لها مزايا كثيرة، مثل خفة الوزن وصغر الحجم. وهى تصنع بتكنولوجيا الدوائر المطبوعة، ولذا يمكن تحقيق إنتاج كمى بسعر رخيص. الهوائيات الشريطية تستخدم فى التطبيقات العسكرية والتجارية وتحل محل كثير من الهوائيات التقليدية وبخاصة فى أجهزة الاتصالات عبر الأقمار الصناعية. ومن ناحية أخرى، فإن تطبيقات أنظمة الاتصالات بالأقمار الصناعية فى يومنا هذا تتطلب هوائيات صغيرة الحجم لكى تتوافق مع متطلباتها.

الهدف الرئيسى لهذه الرسالة هو دراسة أشكال مختلفة لخفض حجم الهوائيات الشريطية. ومجال البحث هو تصميم وتصنيع هوائيات شريطية مدمجة عن طريق وضع شقوق على سطح الرقيقة الشريطية باستخدام هوائى مستقطب ثنائى التغذية. وعن طريقة إضافة شبكة تغذية أسفل المستوى الأرضى ويتم توصيلها بالهوائى عبر فتحات يعطى هوائى دائرى الأستقطاب مناسب لتطبيقات الGPS. تم دراسة وتحليل تأثير الشقوق الموضوعة على خفض حجم الهوائى. تم استخدام قاعدة FR4 وتم التصنيع عند التردد الخاص بتطبيقات الGPS وهو 1575.42 ميجاهرتز. تم عمل تصميم آخر باستخدام قاعدة ذات سماحية كهربية كبيرة وذلك للحصول على خفض أكبر لحجم الشريحة.

تم تصميم مصفوفة هوائيات ذات إستقطاب دائرى وبأربع هوائيات شريطية ذات شقوق ، وتوضع شبكة تغذية أسفل المستوى الأرضى باستخدام قاعدة FR4، حيث تقوم شبكة التغذية بتغذية الأربع شرائح بفارق زاوية 90 درجة بين كل شريحة والشريحة المجاورة لها. تم عمل تصميم آخر باستخدام قاعدة ذات سماحية كهربية كبيرة وذلك للحصول على خفض أكبر لحجم الشريحة.

تم مناقشة طرق تحليل مختلفة، وتم عرض طريقة الفروق المحدودة فى المدى الزمنى بشكل تفصيلى.

مستخلص

تعتبر الهوائيات عنصر أساسى من مكونات الأقمار الصناعية وتستخدم فى كثير من تطبيقات الإتصالات عبر تلك الأقمار. ونتيجة للتقدم التكنولوجى فى مجال الإتصالات والحاجة إلى تصغير حجم الأقمار الصناعية لكى تتناسب مع التطبيقات المختلفة والتكلفة المتاحة، فقد تطلب ذلك البحث عن طرق مختلفة لتصغير حجم الهوائى لكى يتناسب مع صغر حجم تلك الأقمار وأجهزة الإتصالات المختلفة. فالهدف الرئيسى لهذه الرسالة هو دراسة تصميمات مختلفة لتصغير حجم الهوائيات الشريطية المستخدمة فى تطبيقات الأقمار الصناعية.

تتكون الرسالة من سبعة فصول ويعرض الفصل الأول مقدمة عن الهوائيات الشريطية ومميزاتها. كما يعرض الهدف من هذه الدراسة وهو البحث عن طرق مختلفة لتصغير حجم الهوائيات الشريطية لكى تتناسب مع تطبيقات الأقمار الصناعية. ويعرض أيضاً تعريف بالمشكلة وهى تصميم وتصنيع هوائيات صغيرة الحجم تستخدم فى تطبيقات نظام الملاحة وتحديد المواقع GPS. كما يعرض الدوريات العلمية التى تم نشرها خلال تلك الدراسة، و نظرة عامة عن فصول الرسالة.

ويعرض الفصل الثانى هيكل الهوائيات الشريطية التقليدية موضحاً ذلك على الهوائيات الشريطية المستطيلة الشكل، ومبيناً المجال الكهربائى و توزيعات الجهد والتيار الكهربائى على سطح الرقيقة. كما يعرض أشكال مختلفة للهوائيات الشريطية موضحاً المميزات والعيوب لتلك الهوائيات. ويعرض أيضاً التقنيات المختلفة لتغذية الهوائيات الشريطية وطرق التحليل المختلفة والمستخدمة للهوائيات الشريطية. يعتبر هذا الفصل بحث عام عن الهوائيات الشريطية.

ويقدم الفصل الثالث طريقة التحليل باستخدام الفروق المحدودة فى المدى الزمنى بشكل تفصيلى، بدايةً من معادلات ماكسويل للمجال الكهربائى والمجال المغناطيسى، موضحاً المعادلات المحدثة للفروق المحدودة فى المدى الزمنى لمشاكل ثلاثية الأبعاد. ووصولاً إلى كيفية تقسيم المشكلة ثلاثية الأبعاد إلى عدة خلايا متساوية موضحاً عليها إتجاهات وقيم المجالات الكهربائية والمغناطيسية لتسهيل عملية الحسابات.

ويقدم الفصل الرابع تصميمات مختلفة للهوائيات الشريطية المدمجة، موضحاً الطرق المختلفة لتصغير حجم الهوائيات الشريطية. يعتبر إستخدام قاعدة ذات سماحية كهربية كبيرة من أهم هذه الطرق. كذلك تحميل شريحة الرقيقة بوصلة أرضية من الطرق الفعالة. وتعتبر طريقة تعريج

اتجاه التيار الكهربى على سطح الرقيقة أو على السطح الأرضى للهوائى من أهم تلك الطرق المستخدمة لتصغير حجم الهوائيات الشريطية.

يعرض الفصل الخامس تصميم هوائى مستقطب مدمج مربع الشكل وثنائى التغذية. ويتم تصغير حجم الهوائى عن طريق وضع شقوق على سطح الشريحة والتى تؤدى إلى إطالة مسار التيار الكهربى. وعن طريق إضافة شبكة تغذية أسفل المستوى الأرضى ويتم توصيلها بالهوائى عبر فتحات يعطى هوائى دائرى الاستقطاب مناسب لتطبيقات ال GPS. وقد تم دراسة وتحليل تأثير تلك الشقوق الموضوعة على تصغير حجم الهوائى. تم التصميم باستخدام قاعدة FR4 التقليدية وتم عمل تصميم آخر باستخدام قاعدة بسماحية كبيرة وذلك للحصول على تصغير أكبر لحجم الشريحة. وقد تم عمل قياسات عن طريق المحاكاة على الحاسب الآلى ومطابقتها مع القياسات المعملية التى تظهر جودة التصميم والتنفيذ.

يعرض الفصل السادس تصميم مصفوفة هوائيات بأربع شرائح بشقوق ذات استقطاب دائرى، وتوضع شبكة تغذية أسفل المستوى الأرضى باستخدام قاعدة FR4، حيث تقوم شبكة التغذية بتغذية الأربع شرائح بفارق زاوية 90 درجة بين كل شريحة والشريحة المجاورة لها. وتم عمل تصميم آخر باستخدام قاعدة بسماحية كبيرة وذلك للحصول على تصغير أكبر لحجم الشريحة. وقد تم عمل قياسات عن طريق المحاكاة على الحاسب الآلى ومطابقتها مع القياسات المعملية التى تظهر جودة التصميم والتنفيذ.

يقدم الفصل السابع الاستنتاجات الكلية عن البحث والمقترحات لأعمال مستقبلية.

وقد بلغ عدد صفحات الرسالة 142 صفحة وقد احتوت الرسالة على ملخص وسبعة فصول وقائمة للمراجع التى استخدمت فى البحث والتى بلغت 59 بحثاً حديثاً.

Table of Contents

List of Figures **1**

List of Tables **5**

List of Abbreviations **6**

List of Symbols **7**

1. Introduction **9**

1.1 Introduction 9
1.2 Objectives 9
1.3 Problem Definition 10
1.4 Publications 10
1.5 Outline of the Thesis 11

2. Microstrip Patch Antenna **12**

2.1 Introduction 12
2.2 Characteristics of Microstrip Antennas 17
2.2.1 Advantages of MSAs 18
2.2.2 Disadvantages of MSAs 18
2.3 Feeding Techniques 19
2.3.1 Microstrip line feed 19
2.3.2 Coaxial probe feed 20
2.3.3 Electromagnetic coupled feed 21
2.3.4 Aperture coupled feed 22
2.3.5 Coplanar waveguide feed 23
2.4 Basic Antenna Parameters 24
2.4.1 Radiation pattern 24
2.4.2 Directivity and gain 26
2.4.3 Antenna efficiency factor 27
2.4.4 Reflection coefficient 27
2.4.5 Voltage standing wave ratio 28
2.4.6 Return loss 28
2.4.7 S-parameters 29
2.4.8 Bandwidth 31
2.4.9 Polarization 32
2.5 Methods of Analysis 34
2.5.1 Transmission line model 35
2.5.2 Cavity model 35
2.5.3 Multiport network model 36
2.5.4 Method of moments 37
2.5.5 Finite element method 38
2.5.6 Spectral domain technique 38
2.5.7 Finite difference time domain 39
2.6 Conclusion 40

3. Finite Difference Time Domain Method **41**

3.1 Introduction 41
3.2 The FDTD Basic Equations 43

3.3 Approximation of Derivatives by Finite Differences 46
3.4 FDTD Updating Equations for Three-Dimensional Problems 52
3.5 Conclusion 59

4. Compact Microstrip Antennas 62

4.1 Introduction 62
4.2 Use of a High Permittivity Substrate 63
4.3 Use of a Shorted Patch 65
4.4 Use of a Meandered Patch 68
4.5 Use of a Meandered Ground Plane 70
4.6 Use of a Planar Inverted-L Patch 72
4.7 Use of an Inverted U-Shaped or Folded Patch 72
4.8 Compact Dual-Polarized Microstrip Antenna 74
4.9 Compact Circularly-Polarized Microstrip Antenna 75
4.10 Conclusion 79

5. Single Patch MSA Design, Simulation and Measurement Results 81

5.1 Introduction 81
5.2 Expressions for Various Parameters of Conventional Microstrip Antenna 83
5.2.1 Effective width and effective dielectric constant 83
5.2.2 Input impedance of the probe feed MSA 86
5.2.3 Characteristics impedance of the microstrip transmission line 88
5.2.4 Extension due to fringing field 90
5.2.5 Attenuation constant 91
5.3 Wilkinson Power Divider 92
5.3.1 Even-odd mode analysis 93
5.4 Compact Dual-Polarized Microstrip Antenna 99
5.4.1 Design using FR4 substrate 100
5.4.2 Design using high permittivity substrate 106
5.5 Compact Circularly-Polarized Microstrip Antenna 109
5.5.1 Design using FR4 substrate 111
5.5.2 Design using high permittivity substrate 115
5.6 Conclusion 120

6. MSA Array Design, Simulation and Measurement Results 121

6.1 Introduction 121
6.2 Design using FR4 Substrate 124
6.3 Design using high permittivity Substrate 129
6.4 Conclusion 132

7. Conclusion and Future Work 133

7.1 Conclusion 133
7.2 Suggestions for Future Work 134

References 135

LIST OF FIGURES

Figure 2.1 – Structure of microstrip patch antenna 13
Figure 2.2 – Microstrip patch antenna configuration 13
Figure 2.3 – Fundamental TM_{10} mode of RMSA [4]: (a) E-field distribution, (b) voltage and current distribution, (c) two radiating slots, (d) equivalent transmission line model. 15
Figure 2.4 – Different shapes of microstrip patches [4] 17
Figure 2.5 – Microstrip line feed [4] 20
Figure 2.6 – Electromagnetic coupled feed [4] 21
Figure 2.7 – Aperture coupled feed [4] 23
Figure 2.8 – Coplanar waveguide feed [4] 23
Figure 2.9 – Radiation pattern of an antenna [7] 25
Figure 2.10 – An arbitrary N-port microwave network 30
Figure 2.11 – A linearly polarized wave 33
Figure 2.12 – Commonly used polarization schemes 33
Figure 3.1 – Approximation of the derivative of *f(x)* at *x* by finite differences: forward difference [3] 47
Figure 3.2 – Approximation of the derivative of *f(x)* at *x* by finite differences: backward difference [3] 48
Figure 3.3 – Approximation of the derivative of *f(x)* at *x* by finite differences: central difference [3] 49
Figure 3.4 – A three dimensional FDTD computational space composed of (N_x x N_y x N_z) [3]. 52
Figure 3.5 – Arrangement of field components on a Yee cell indexed as (i, j, k) [3]. 53
Figure 3.6 – Material parameters indexed on a Yee cell [3]. 55
Figure 3.7 – Field components around $E_x(i, j, k)$ [3]. 56
Figure 3.8 – Field components around $H_x(i, j, k)$ [3]. 58
Figure 3.9 – Explicit FDTD procedure [3]. 60
Figure 4.1 – Circularly polarized corner-truncated square microstrip antennas for GPS application at 1575 GHz. (a) Design with a microwave substrate (ε_r = 3.0, h = 1.524 mm), (b) Design with a ceramic substrate (ε_r = 28.2, h = 4.75 mm) [1]. 64
Figure 4.2 – Geometries of a rectangular patch antenna with (a) a shorting wall, (b) a shorting plate or partial shorting wall, and (c) a shorting pin. The feeds are not shown [1]. 65
Figure 4.3 – Geometries of compact (a) rectangular, (b) circular, and (c) triangular microstrip antennas with shorting-pin loaded [1]. 66
Figure 4.4 – Surface current distributions for meandered rectangular microstrip patch with meandering slits [1]. 68
Figure 4.5 – Some reported slotted patches suitable for the design of MSAs [1]. 70
Figure 4.6 – Geometry of a compact microstrip antenna with a meandered ground plane [1]. 71
Figure 4.7 – Geometry of a microstrip-line-fed planar inverted-L patch antenna [1]. 72
Figure 4.8 – Compact microstrip antenna with (a) an inverted U-shaped patch, (b) a folded patch and (c) a double-folded patch for achieving lengthening of the excited patch surface current path at a fixed patch projection area. The feeds are not shown [1]. 73
Figure 4.9 – Geometry of a probe-fed compact MSA with four bent slots for generating ±45° slanted dual linear polarizations [1]. 74