

DISS. ETH No. 14577

**LOCAL MESH REFINEMENT
ALGORITHMS FOR ENHANCED
MODELING CAPABILITIES IN THE
FDTD METHOD**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
NICOLAS PIERRE CHAVANNES
Dipl. El.-Ing. ETH, Switzerland
born April 25, 1972
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. W. Fichtner, examiner
Prof. Dr. N. Kuster, Prof. Dr. L. Martens, co-examiners

2002

Summary

The trend to mobility and miniaturization in communication, computing and medicine is clearly heading toward a fusion of these subsystems in *per-vasive computing* - interconnected intelligent subsystems providing numerous services embedded within human surrounding environments - a vision rapidly becoming reality within everyday life. Additional increasing consumer demand for attractive performance/price ratios as well as international mandatory safety guidelines addressing radio-frequency (RF) related possible health effects confront engineers with the development of highly efficient devices.

The exponential growth of computational power within recent decades has established a significant position for numerical simulation techniques, efficiently supporting product research and development (R&D) processes. The Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method in particular has been chosen by many research institutions as the leading technique due to its general applicability.

Although activities in this area had a late start at ETH Zurich, the project EMSIM conducted within the Swiss research priority program MINAST as well as the currently running project SEMCAD++ supported by the Swiss Commission for Technology and Innovation (KTI) enabled IIS and IT'IS together with two local industry partners to form a widely recognized competence center in EM simulation methodology and near-field analysis within only a few years. Some of my research and development work conducted as a team member for these projects is condensed within this thesis.

The objectives of my thesis were derived from the obvious major drawbacks of the current implementations of FDTD. These are restricted spatial resolution and poorly realized computer aided design (CAD) environments, in addition to unknown uncertainties in the computation results obtained by the method. The development of novel robust FDTD local grid refinement schemes combined with and integrated into user-friendly electromag-

netic (EM) simulation environments became the main focus of this research work, whereby my colleagues concentrated more on algorithms improving the FDTD method's accuracy.

Part I of this thesis is attributed toward providing the scientific and theoretical background which underlies the numerical algorithms developed within the framework of this thesis. In chapter 3, a special focus is assigned to investigations related to the limitations of the FDTD method with respect to spatial grid resolution, i.e., *staircasing* errors. Conclusions reveal the significant contribution of errors caused by stair-stepped perfectly electric conductors (PEC) over dielectric material. Furthermore, the type of polarization applied to EM excitation and incidence on a PEC scatterer plays a major role, leading to large global effects in the entire computational domain, e.g., due to virtually excited non-physical EM waves. Chapter 4 provides a review of schemes proposed for improving the spatial resolution in the FDTD method. Particular attention is thereby drawn to methods which are related to this thesis, i.e., subcell and subgrid techniques.

The development of two novel algorithms for FDTD local grid refinement is documented in the second part of this thesis. Both methods have been chosen for development and implementation based on the findings from the literature survey. In chapter 5, a novel 3-D subcell technique is presented which enables improved representation of grid non-conformally aligned transmitter structures, further enhanced by a new source model adapted to such configurations. Whereas the literature heavily discusses scattering problems from mainly 2-D objects, a study dealing with subcell modeled active antenna structures had not been addressed thus far. A number of examples demonstrate the capabilities of the technique, benchmarked against stair-cased examples and validated by experimental data from the DASY4 near-field scanning system. In the appendix of the chapter, an extension of the method to dielectric structures is briefly discussed.

Chapter 6 presents a novel 3-D subgrid algorithm based on enhanced spatial interpolation as well as a new temporal scheme especially developed for this kind of multi-grid technique. Compared to existing algorithms it provides superior performance with respect to refinement by grid nesting, low reflections, robustness and general applicability, in particular when embedded within the SEMCAD solid modeling and automated grid generation environment. A rigorous validation of the scheme was carried out on the basis of benchmark examples with increasing modeling complexity, continuously cross-validated against highly resolved FDTD reference solutions, other numerical methods as well as measurements by examination of parameters from the near- and far-field, leading to excellent agreement between

the applied assessment techniques.

In the third part, the subgridding scheme - since already implemented into the SEMCAD simulation environment - is applied for the analysis of a broad variety of highly non-homogeneous near-field configurations related to mobile communications. Chapter 7 presents multiple examples of antenna simulations, namely helical antennas, which have often been poorly represented in previous studies. The novel techniques enable the detailed modeling of such structures and demonstrate the clear necessity of an appropriate spatial resolution to achieve improved accuracy for sensitive near-field parameters such as the feedpoint impedance. Furthermore, the definite advantages of local refinement techniques for reduced computational requirements are shown. All obtained results are benchmarked against experimental data.

The objective of Chapter 8 was to demonstrate that these improvements enable the easy and efficient application of FDTD beyond generic setups, e.g., metal boxes with wire antennas. For this reason, one of the latest commercial multi-mode handsets was thoroughly electromagnetically analyzed based on the electro-mechanical CAD file of the phone. The performance was analyzed in free-space as well as in the vicinity of various biological scatterers. All data was compared to measurements obtained by the DASY4 near-field scanner. The simulations could accurately predict all performance parameters, even the smallest changes in the grounding of elements. To our knowledge, this was the most detailed analysis of a real-world handset scenario ever conducted and clearly demonstrated the power of the implementation for industrial R&D departments, especially since the simulation could be completed within a few days.

Readers should note that this thesis consists of independent journal papers, resulting in unavoidable repetitions, mainly in the introductory sections of the chapters. Furthermore, a large amount of coding conducted in the framework of this thesis is not documented here. This became necessary to prepare the SEMCAD platform for implementation of these algorithms and their resulting visualizations.

Zusammenfassung

In den Bereichen Kommunikation, EDV sowie Medizin ist eine deutliche Tendenz hinsichtlich Mobilität und Miniaturisierung feststellbar, was schliesslich zur Verschmelzung der einzelnen Untersysteme führen wird. Die Vision des *Pervasive Computing* - intelligente, in unsere Umgebung eingebettete und miteinander verbundene Untersysteme, welche eine Vielzahl unterschiedlicher Dienste anbieten - werden schnell zum wesentlichen Bestandteil des Alltags. Die zudem stetig steigende Nachfrage nach ansprechendem Preis/Leistungs Verhältnis sowie internationale Richtlinien hinsichtlich möglicher Gesundheitsrisiken im Zusammenhang mit Mobilfunk erfordern die Entwicklung immer effizienterer Geräte.

Aufgrund des exponentiellen Wachstums der Leistungsfähigkeit von Computersystemen innerhalb der letzten Jahrzehnte etablierten sich numerische Simulationsmethoden im Forschungs- und Entwicklungsbereich neuer Produkte. Besonders die Finite-Differenzen Methode im Zeitbereich (FDTD) wird aufgrund ihrer allgemeinen Anwendbarkeit innerhalb vieler Forschungseinrichtungen eingesetzt.

Obleich diesbezügliche Forschungsaktivitäten im Umfeld der ETH Zürich erst innerhalb der letzten Jahre eine Intensivierung erfuhren, etablierten sich die der ETH angegliederten Institutionen IIS und IT'IS in Zusammenarbeit mit zwei schweizer Industriepartnern innerhalb weniger Jahre zu einem angesehenen Kompetenz-Zentrum im Bereich der elektromagnetischen (EM) Simulations- und Nahfeld-Messtechnik. Dies wurde insbesondere im Rahmen des schweizerischen Schwerpunktprogramms MINAST EM-SIM und dem momentan durchgeführten Projekt SEMCAD++ ermöglicht, welches von der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) finanziell unterstützt wird. Ein Teil meiner Forschungs- und Entwicklungstätigkeit welcher in diese Arbeit eingebettet ist, wurde im Rahmen der erwähnten Projekte durchgeführt.

Die Zielsetzung meiner Doktorarbeit gründet auf den Hauptnachteilen

der FDTD Methode, welche sich gegenwärtig in den meisten kommerziellen sowie forschungsbedingten Implementationen wiederfinden: eine durch die herkömmliche Methode vorgegebene eingeschränkte räumliche Auflösung des Modells sowie bloss ungenügend ausgearbeitete computergestützte Design (CAD) Programme. Zudem beeinflusst eine Vielzahl von nur spärlich erforschten, durch die Methode vorgegebenen Unsicherheiten, die Genauigkeit der berechneten Resultate. Aufgrund dieser Vorgaben konzentrierte sich die hier vorgestellte Forschungsarbeit hauptsächlich auf die Entwicklung von neuartigen und robusten Methoden zur lokalen Verfeinerung der räumlichen Auflösung und deren Integration in benutzerfreundliche auf graphische Eingabe basierte EM Simulationsprogramme. Die Arbeit meiner Kollegen konzentrierte sich stärker auf die Entwicklung von Algorithmen zur spezifischen Verbesserung der allgemeinen Genauigkeit in der FDTD Methode.

Der erste Teil der hier vorgestellten Arbeit beschäftigt sich mit den wissenschaftlichen und theoretischen Grundlagen auf welchen die im Rahmen dieser Dissertation entwickelten numerischen Algorithmen aufbauen. Der Schwerpunkt des dritten Kapitels liegt in der Untersuchung der durch die FDTD-Methode vorgegebenen Einschränkungen hinsichtlich räumlicher Gitterauflösung, den sogenannten *Staircasing*-Fehlern. Zusammenfassend ist ein deutlich überwiegender Einfluss des auftretenden Fehlers aufgrund von diskretisierten metallischen Strukturen im Vergleich zu dielektrischen Materialien feststellbar. Desweiteren zeigt die Art der Polarisierung einer elektromagnetischen Welle in Bezug zum Einfall auf ein metallisches Objekt eine grosse Wirkung auf bestimmte, sich im ganzen Rechenbereich manifestierende Fehler, z.B. durch virtuelle, aufgrund des *Staircasings* erzeugte EM Moden. Kapitel 4 fasst verschiedene numerische Algorithmen zur Verbesserung der lokalen räumlichen Auflösung in der FDTD Methode zusammen, wobei den Algorithmen, welche in direktem Zusammenhang mit dieser Dissertation stehen, vertieftes Augenmerk zukommt. Dies sind insbesondere *Subgitter*- und *Subzellen*-Methoden.

Die Entwicklung zweier neuartiger Algorithmen zur Verbesserung der lokalen räumlichen Auflösung in FDTD ist im zweiten Teil dieser Arbeit beschrieben. Anhand der in Kapitel 4 durchgeführten umfangreichen Literaturstudie erfolgte die Wahl zur Entwicklung und Implementierung derartiger Algorithmen auf *Subgitter* und *Subzellen* Methoden. Kapitel 5 beinhaltet die Herleitung eines neuen dreidimensionalen (3-D) *Subzellen*-Algorithmus, welcher eine genauere Simulation von Antennenstrukturen erlaubt, deren Geometrie nicht dem FDTD Gitter entsprechend orientiert ist. Um eine an diese Struktur angepasste Anregung zu realisieren, wurde zu-

dem ein neuartiges, verbessertes Quellenmodell entwickelt und implementiert. Zwar werden - im Allgemeinen zweidimensionale - Streuprobleme ausgiebig in der einschlägigen Literatur untersucht, jedoch wurden bisher keine Studien über Subzellenmodelle aktiver Antennen durchgeführt. Die neu entwickelten Methoden wurden schlussendlich an einer Vielzahl von Beispielen validiert und mit experimentellen Daten des DASY4 Nahfeld-Messsystems verglichen, wobei die deutliche Überlegenheit dieses Ansatzes gegenüber herkömmlicher *Staircase*-Modellierung gezeigt werden konnte. Im Anhang des 4. Kapitels findet sich in zusammengefasster Form eine Erweiterung der vorgestellten Methode, angewendet auf dielektrische Strukturen.

In Kapitel 6 wird ein neuartiger dreidimensionaler *Subgitter* Algorithmus vorgestellt. Die verwendete Methode basiert auf einer verbesserten räumlichen sowie einer neu entwickelten, speziell auf derartige Gitterkonfigurationen zugeschnittenen zeitlichen Interpolation. Im Vergleich mit bestehenden Lösungsansätzen bietet die hier beschriebene Methode aufgrund verschiedener Eigenschaften eine deutlich verbesserte Leistungsfähigkeit. Dies beinhaltet unter anderem die Möglichkeit, Gitter zu verschachteln, niedrige Reflexionen am Gitterübergang sowie eine hohe Stabilität und generelle Anwendbarkeit. Eingebettet in die SEMCAD Modellierungsumgebung welche mit einer automatischen Gittererzeugung ausgestattet ist, werden die Vorzüge der Methode unterstrichen. Unter Zuhilfenahme von verschiedenen Beispielen, welche sich durch eine stetig zunehmende Komplexität unterscheiden, konnte eine umfangreiche Validierung des Algorithmus durchgeführt werden. Hierbei wurden elektromagnetische Nah- und Fernfeld-Größen mit Referenzwerten aus hochaufgelösten Simulationen, anderen numerischen Methoden sowie Messdaten verglichen.

Im dritten Teil dieser Dissertation findet der *Subgitter* Algorithmus - da er bereits im SEMCAD Simulationsprogramm implementiert war - Anwendung auf die Nah- und Fernfeld Analyse einer Vielzahl von räumlich stark inhomogenen Simulationsbeispielen aus dem Bereich der Mobilkommunikation. Kapitel 7 konzentriert sich auf die Simulation von Antennenstrukturen, insbesondere von Helixantennen, welche in zahlreichen vorhergehenden Studien unzureichend simuliert wurden. Die Verwendung der hier vorgestellten Algorithmen ermöglicht die detaillierte Modellierung derartiger Geometrien und zeigt anhand unterschiedlicher Resultate die klare Notwendigkeit einer räumlich genügend feinen Auflösung in FDTD Simulationen. Dies gilt im Speziellen für die genaue Berechnung sensitiver Parameter wie z.B. der Fusspunktimpedanz. Insbesondere die durch Verwendung räumlich lokaler Verfeinerungsmechanismen erzielte drastische Reduktion benötigter Computerressourcen wird anhand zweier Beispiele aufgezeigt. Sämtliche Simu-

lationsresultate wurden zudem mit Messdaten validiert.

Das Ziel des achten Kapitels war zu zeigen, dass die neu entwickelten Algorithmen den Anwendungsbereich von FDTD auf einfache und effiziente Weise über einfache Beispiele, z.B. metallische Quader mit Drahtantennen, hinaus erweitern. Hierzu wurde, basierend auf dem CAD Datensatz eines der neusten handelsüblichen *Multiband*-Mobiltelefone, eine gründliche elektromagnetische Analyse durchgeführt. Diese erfolgte im Freiraum sowie in der unmittelbaren Umgebung verschiedener biologischer Streuobjekte, wobei die erhaltenen Simulationsresultate mit Messdaten des DASY4 Nahfeld-Messsystems verglichen wurden. Es gelang, mit Hilfe der Simulation jegliches EM Feldverhalten vorauszuberechnen, sogar Effekte die von kleinen Veränderungen der Masseverbindung einzelner Elemente herrührten. Unserer Kenntnis nach handelt es sich bei dieser Studie um die bisher detaillierteste Untersuchung eines realen Mobiltelefons. Besonders aufgrund der relativ problemlosen und schnellen Modellierung und Simulation innerhalb weniger Tage konnte die Leistungsfähigkeit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansätze und deren Anwendung im Forschungs- und Entwicklungsbereich aufgezeigt werden.

Der Leser sei darauf aufmerksam gemacht, dass die hier vorgestellte Doktorarbeit aus einigen voneinander unabhängigen Veröffentlichungen zusammengesetzt ist. Dies führt hauptsächlich innerhalb der die Kapitel einleitenden Abschnitten zu unvermeidbaren Wiederholungen. Einen wesentlichen Teil dieser Dissertation nahm zudem die Entwicklung und Implementierung von Algorithmen zur Simulation und anschließenden Visualisierung im Rahmen des SEMCAD++ Projekts in Anspruch, die nicht weiter in der vorliegenden Arbeit dokumentiert sind.