

Diss. ETH No. 15057

Analysis and Improvement of the Numerical Properties of the FDTD Algorithm

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

ANDREAS CHRIST

Dipl.-Ing. Technische Hochschule Darmstadt
born 21. 10. 1968
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. W. Fichtner, examiner
Prof. Dr. N. Kuster, Prof. Dr. P.-S. Kildal, co-examiners

2003

Summary

Recent years have seen a steady miniaturization of electronic devices, together with the opening of frequency ranges in the Gigahertz domain to the consumer electronics market. The number of wireless applications has been continuously increasing, and wireless local area networks as well as on- and in-body mounted devices for communications or life support point out the latest trends. The development of these devices stringently requires the application of numerical simulation tools to determine high frequency characteristics and interaction with the user in order to optimize performance and minimize exposure. Among the many different numerical electromagnetics solvers, the finite-difference time-domain (FDTD) method has attracted the most interest among researchers and application engineers both for development and compliance testing purposes.

In spite of the prominent role of FDTD, several aspects of its numerical properties have not yet rigorously been studied. The influences of nonuniform mesh spacing, which is indispensable for the treatment of real-world problems, have so far only been assessed experimentally, and guidelines for the generation of nonuniform meshes merely exist as rules of thumb. Therefore, one of the main objectives of this work is to rigorously analyze the numerical properties of the nonuniform FDTD algorithm and to propose efficient methods for its optimization.

The introductory part of this thesis gives a brief overview of the FDTD theory and the current state of research regarding the numerical properties of the algorithm is reviewed. In Chapters 2 and 3, different - classical and novel - mesh discretization techniques are compared and discussed, and open issues are identified. As a basis for

further studies of the FDTD algorithm, a nonuniform mesh generator is developed in Chapter 4. The mesh generator is interfaced to the CAD environment of the integrated simulation platform SEMCAD.

The theoretical part presents a detailed analysis of the dispersion properties of the nonuniform FDTD algorithm in Chapters 5 and 6. The mesh grading not only leads to increased phase velocity errors but also to spurious attenuation or amplification. Further, it is shown that the grid dispersion errors affect the reflection at planar material interfaces. In this connection, it is shown that the FDTD algorithm does not implicitly fulfill the boundary conditions for the continuity of the electric and magnetic fields. The error of the numerical reflection coefficient is calculated, and discretization influences on total reflection, Brewster angle and SAR assessment are discussed. Approximations of the discretization errors are given such that they can be easily considered when generating the grid for a numerical model.

Based on these theoretical findings, Chapters 7 and 8 propose novel methods to correct the numerical phase velocity errors introduced by the mesh grading and to minimize the inaccuracies for the modelling of material interfaces. These methods use update equations with split coefficients for the finite difference terms, but retain the original structure of the FDTD grid. They allow the accurate compensation of the numerical errors of the FDTD algorithm for a frequency and direction of optimization and improve its properties over a large bandwidth.

The application part presents several examples from the area of antenna design, optics and numerical dosimetry which demonstrate the developments achieved within the framework of this thesis. All results were validated with measurements or different numerical techniques. In Chapter 9, a commercial mobile phone base station antenna is analyzed experimentally and numerically, considering the influences of the mesh grading.

The capabilities of the correction techniques introduced in Chapters 7 and 8 are demonstrated by the full-wave analysis of a vertical-cavity surface-emitting laser in a three-dimensional cartesian mesh in Chapter 10. Using these new techniques, the grid resolution can be significantly increased, while keeping the grid dispersion errors in sufficiently small. This reduces the problem size to such an extent that the laser characteristics can be calculated on a 32 bit computer.

In Chapter 11, a numerical model of a dosimetric nearfield probe

is developed and used to assess the interaction between the probe material and the fields to be measured. The accuracy of the model proves to be high enough to apply the simulations for the assessment of the change of the probe calibration factor when used in media different from tissue simulating liquid.

This thesis concludes with an extensive study about anatomical and homogeneous head phantoms for the compliance testing of mobile telecommunications equipment (Chapter 12). The recently proposed Specific Anthropomorphic Mannequin (SAM) is benchmarked against several high-resolution anatomical head models. The results confirm that the liquid-filled phantom model as proposed in the standards represents a conservative approach for the compliance testing of mobile telephone equipment for the phone models and testing positions under investigation. Further studies will be necessary for different telephone designs and enhanced frequency ranges.

Zusammenfassung

Die ständige Miniaturisierung elektronischer Geräte in den letzten Jahren erschloß der Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik neue Frequenzen im Gigahertz-Bereich. Die Anzahl drahtloser Geräte steigt fortlaufend, und drahtlose lokale Netzwerke sowie Systeme zur Telekommunikation und Lebenserhaltung, die im oder auf dem Körper getragen werden, stellen die neuesten Tendenzen dar. Der Einsatz numerischer Simulationswerkzeuge ist bei der Entwicklung dieser Geräte zwingend nötig, um das Hochfrequenzverhalten und Einflüsse des Benutzers zu untersuchen, wodurch die Leistungsfähigkeit verbessert und die Strahlenbelastung minimiert werden. Unter den vielen verschiedenen Verfahren zur Lösung elektromagnetischer Probleme hat die Methode der finiten Differenzen im Zeitbereich (finite-difference time-domain, FDTD) das meiste Interesse im Forschungs- und Anwendungsbereich auf sich gezogen - sowohl für Entwicklung als auch zur Typenprüfung.

Trotz der herausragenden Rolle des FDTD-Algorithmus' wurden etliche Aspekte seiner numerischen Eigenschaften noch nicht genau untersucht. Die Einflüsse nichtuniformer Gitter, deren Verwendung zur Untersuchung realistischer Probleme unverzichtbar ist, wurden bisher nur experimentell abgeschätzt. Richtlinien zur Erzeugung nichtuniformer Gitter sind lediglich in Form von Faustregeln bekannt. Deshalb ist es eines der Hauptziele dieser Arbeit, die exakten numerischen Eigenschaften des nichtuniformen FDTD-Algorithmus' zu analysieren und effiziente Methoden zu ihrer Optimierung zu entwickeln.

In der Einführung dieser Arbeit wird ein kurzer Überblick über die FDTD-Theorie und den derzeitigen Stand der Forschung zu den

numerischen Eigenschaften des Algorithmus' gegeben. Die Kapitel 2 und 3 diskutieren und vergleichen verschiedene - klassische wie neue - Diskretisierungstechniken und zeigen offene Fragen auf. Zur weitergehenden Untersuchung des FDTD-Algorithmus' wird in Kapitel 4 ein nichtuniformer Gittergenerator entwickelt. Dieser Gittergenerator wird mit der CAD-Umgebung der Simulationsplattform SEMCAD verbunden.

In den Kapiteln 5 und 6 im theoretischen Teil wird das Dispersionsverhalten des nichtuniformen FDTD-Algorithmus' im Detail untersucht. Das Verändern der Gitterschrittweite führt nicht nur zu erhöhten Phasengeschwindigkeitsfehlern, sondern auch zu fehlerhafter numerischer Dämpfung oder Verstärkung. Weiterhin wird gezeigt, daß die Dispersionsfehler des Gitters auch die Reflexion an ebenen Grenzflächen beeinträchtigen. In diesem Zusammenhang wird gezeigt, daß der FDTD-Algorithmus die Stetigkeitsbedingungen für elektrische und magnetische Felder nicht implizit erfüllt. Der Fehler des numerischen Reflexionsfaktors wird berechnet, und Diskretisierungseinflüsse auf Totalreflexion, Brewster-Winkel und SAR werden diskutiert. Für die Diskretisierungsfehler werden geeignete Näherungen hergeleitet, so daß diese bei der Gittererzeugung für ein numerisches Modell leicht berücksichtigt werden können.

Auf Grund dieser theoretischen Ergebnisse werden in den Kapiteln 7 und 8 neue Verfahren vorgestellt, mit denen die numerischen Phasengeschwindigkeitsfehler, die durch die veränderliche Gitterschrittweite entstehen, korrigiert und die Fehler bei der Modellierung von Materialgrenzen minimiert werden können. Diese Verfahren benutzen Update-Gleichungen mit getrennten Koeffizienten für die finiten Differenzen, erhalten aber die ursprüngliche Struktur des FDTD-Gitters. Dadurch können die numerischen Fehler des FDTD-Algorithmus' für eine Optimierungsfrequenz und Ausbreitungsrichtung vollständig kompensiert werden, und die numerischen Eigenschaften des Algorithmus werden über eine große Bandbreite verbessert.

Der Anwendungsteil beinhaltet zahlreiche Beispiele aus den Bereichen der Antennenentwicklung, Optik und der numerischen Dosimetrie, die die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Verfahren veranschaulichen. Alle Ergebnisse wurden mit Messungen oder alternativen numerischen Methoden bestätigt. In Kapitel 9 wird eine Basisstationsantenne für Mobilfunk experimentell und numerisch untersucht,

wobei die Einflüsse der Diskretisierung berücksichtigt werden.

Die Leistungsfähigkeit der in den Kapiteln 7 und 8 vorgestellten Verfahren wird in Kapitel 10 an Hand der Analyse eines Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSEL) in einem dreidimensionalen kartesischen Gitter demonstriert. Mit den neuen Methoden kann die Gitterschrittweite stark vergrößert werden, ohne das Dispersionsverhalten des Gitters zu verschlechtern. Dies verringert die Größe des Problems so sehr, daß die Eigenschaften des Lasers auf einem 32-Bit Computer berechnet werden können.

In Kapitel 11 wird ein numerisches Modell einer E -Feldsonde für Dosimetrie entwickelt und zur Bestimmung der Einflüsse des Sondenmaterials auf das zu messende Feld verwendet. Es zeigt sich, daß die Genauigkeit des Modells so hoch ist, daß es zur Bestimmung des Kalibrationsfaktors der Sonde in verschiedenen Materialien verwendet werden kann.

Diese Arbeit schließt mit einer ausführlichen Studie über anatomische und homogene Kopfmodelle zur Typenprüfung von Mobilfunkgeräten (Kapitel 12). Das vor kurzem vorgeschlagene Specific Anthropomorphic Mannequin (SAM) wird mit verschiedenen hochauflösenden anatomischen Modellen verglichen. Die Ergebnisse bestätigen, daß das flüssigkeitsgefüllte Kopfmodell, das in den Standards vorgeschlagen wurde, ein konservatives Verfahren zur Typenprüfung von Mobilfunkgeräten für die untersuchten Telefonmodelle und Testpositionen darstellt. Weitergehende Studien für Telefone anderer Bauform und für neu erschlossene Frequenzbereiche sind erforderlich.