

DISS. ETH NO. 17105

**2-D FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN
FULL-WAVEFORM INVERSION
OF CROSSHOLE GEORADAR DATA**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of

Doctor of Natural Sciences

presented by
JACQUES ROBERT ERNST

Dipl. Natw. ETH (M.Sc.)
Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland
born January 10, 1973
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Alan G. Green, examiner
Prof. Dr. Hansruedi Maurer, co-examiner
Prof. Dr. Klaus Holliger, co-examiner
Prof. Dr. Gerhard Pratt, co-examiner

(2007)

ZUSAMMENFASSUNG

Bohrloch-Georadar ist mittlerweile eine geophysikalischen Methoden, welche immer häufiger bei der Erkundung des oberflächennahen Untergrundes angewendet wird. Eine typische „Crosshole“-Messanordnung besteht aus zwei Antennen, wobei der Sender im einen Bohrloch und der Empfänger im anderen platziert wird. Die Abstrahlcharakteristik von solchen Antennen ist im Allgemeinen mit jener von analytischen Dipolen vergleichbar. Die im Sender erzeugte elektromagnetische Welle kann durch die Zentral- oder Nominalfrequenz charakterisiert werden und liegt üblicherweise im Bereich von ~ 20 und ~ 250 MHz. Dieser Frequenzbereich entspricht im zu erkundenden Untergrund in etwa Wellenlängen zwischen ~ 5 und ~ 0.4 m. Auf Grund der komplexen Vorgänge die stattfinden, wenn eine elektromagnetische Welle in der Antenne erzeugt und anschliessend ins benachbarte Medium abgestrahlt wird, bietet es sich an, diese Effekte genau zu untersuchen, bevor man sich an die eigentliche Wellenfeldinversion wagt. Dementsprechend habe ich als Erstes ein Tool entwickelt, welches mir erlaubt, die Abstrahlcharakteristik von beliebig komplexen Bohrloch-Antennen zu studieren. Dieses Tool verwendet eine Finite-Differenzen-Approximation der Maxwell-Gleichungen im Zeitbereich (Finite-Differenzen Time-Domain = FDTD), um die elektromagnetische Wellenausbreitung in einem beliebigen Medium zu simulieren. Die Approximationen werden in einem Gitter berechnet, das auf einem zylindersymmetrischen Koordinatensystem beruht. Dieses Koordinatensystem bietet den Vorteil, dass die Energieabstrahlung der Senderantenne eine korrekte 3-D-Charakteristik aufweist, dabei aber nur ein 2-D-Medium benötigt. Eine lokale Gitterverfeinerungstechnik erlaubt eine Untersuchung von sehr kleinen Antennenstrukturen, realistischen Bohrlöchern und Materialien mit hohen Dielektrizitätszahlen (z.B. Wasser). Numerische Experimente zur Untersuchung unterschiedlicher Antennen und deren Energieabstrahlungen in luft- und wassergefüllten Bohrlöchern haben gezeigt, dass die Abstrahlcharakteristik von Wu-King-Antennen mit finiter Länge in etwa jener von infinitesimalen Dipole-Antennen entspricht. Dies ist insofern ein wichtiges Resultat, als dass die infinitesimalen Dipole oft als Approximationen für reale Antennen verwendet werden (z.B. bei Strahlinversionen). Werden dagegen Antennen in wassergefüllten Bohrlöchern zum Vergleich hinzugezogen, so habe ich festgestellt, dass sich die Abstrahlcharakteristik deutlich verändert. Untersuchungen mit realen Daten, gemessen in trockenem Gestein (Grimsel-Felslabor, Schweiz) und in

wassergesättigten Sedimenten (Hydrogeophysikalisches Untersuchungsgebiet, Boise, USA) zeigen, dass bei numerischen Simulationen mit realistischen Wu-King-Antennen und finiten Bohrlöchern die synthetischen Daten deutlich besser mit den beobachteten übereinstimmen, als wenn nur infinitesimale Dipol-Antennen verwendet werden.

Tomographische Inversionen von „Crosshole“-Georadardaten werden üblicherweise mit strahlenbasierten Verfahren berechnet. Diese Verfahren berücksichtigen jedoch nur einen sehr geringen Anteil vom Nutzsignal (z.B. Ersteinsatzzeiten und Maximalamplituden vom ersten Wellenzug), wodurch die resultierenden Geschwindigkeits- und Dämpfungs-Tomogramme nur die relativ groben Eigenheiten des Untergrundes zeigen. Bezieht man allerdings einen Grossteil des Wellenfeldes oder sogar das gesamte aufgezeichnete Feld mit in eine entsprechende Inversion ein, so darf angenommen werden, dass die entsprechende Auflösung der resultierenden Tomogramme um bis zu einer Grössenordnung besser sein kann. Solche Auflösungen sind üblicherweise nur mit teuren und sehr lokalen 1-D-Messungen möglich (z.B. Bohrkernmessungen und Direct-Push-Techniken). Trotz des grossen Potentials von Vollwellenfeldinversionen, angewendet auf Georadardaten, gibt es nur sehr wenige entsprechende Veröffentlichungen. Im Gegensatz dazu sind seismische Vollwellenfeldinversionen weit verbreitet. Der Modellierungsteil solcher Inversionen basiert häufig auf FDTD-Approximationen der Wellengleichungen und berücksichtigt automatisch alle möglichen Wellenausbreitungsphänomene (z.B. diffraktierte und gestreute Wellen).

In dieser Dissertation stelle ich eine Vollwellenfeldinversion für „Crosshole“-Georadardaten vor. Die Inversion basiert auf der FDTD-Approximation der Maxwell-Gleichungen in einem 2-D-Kartesischen Koordinatensystem. Diese Wahl, anstelle eines zylindrischen Systems, lässt sich mit der grösseren Flexibilität im Bezug auf die Positionierung von Sendern und Empfängern begründen. Ferner erlaubt ein kartesisches System das Einbinden von sehr effizienten „Generalized Perfectly Matched Layer“ (GPML) absorbierenden Rändern. Das Ziel meines Wellenfeldinversionsalgorithmus ist die detaillierte Rekonstruktion der dielektrischen Permittivität und der elektrischen Leitfähigkeit. Numerische Experimente unter Einbezug von relativ einfachen homogenen Modellen mit einzelnen Anomalien zeigen, dass meine Wellenfeldinversion in der Lage ist, auch sehr kleinen Anomalien zu lokalisieren und deren Form und die Grössenordnung der Materialparameter gut zu rekonstruieren. Verwende ich allerdings kompliziertere Modelle mit stochastischen Verteilungen der Mediumparametern und einzelnen deterministische

Anomalien, so stellt sich heraus, dass diese Anomalien in den Permittivitätstomogrammen nur unwesentlich besser dargestellt werden können, verglichen mit den strahlenbasierten Inversionsresultaten. Dagegen werden die entsprechenden Leitfähigkeitsanomalien mittels der Wellenfeldinversion deutlich besser aufgelöst. Neben diesen relativ einfachen numerischen 2-D-Beispielen habe ich auch 3-D-Experimente durchgeführt. Dabei habe ich zuerst ein Transformationsschema hergeleitet, welches mir die 3-D-Daten zu 2-D-Daten umwandelt. Im Allgemeinen ist das Quellsignal, welches das Aussenden elektromagnetischer Wellen in den Untergrund initiiert, unbekannt und muss entsprechend ermittelt werden. Um dieses Quellsignal zu bestimmen, habe ich ein Tool entwickelt, das auf dem Prinzip der Dekonvolution aufbaut. Dieselben Felddaten, welche ich bereits für die erste Studie über die Abstrahlcharakteristik typischer Antennen verwendet habe, sind für die Vollwellenfeldinversion eingesetzt worden. Dabei stellt man fest, dass die resultierenden Tomogramme, verglichen mit jenen von strahlenbasierten Inversionen, deutlich mehr Details zeigen und die Grenzen zwischen geologischen Einheiten und einzelnen Heterogenitäten klar abbilden. Diese Untersuchungen mit realen Daten zeigen deutlich, dass die Vollwellenfeldinversion gute Resultate liefern kann, welche deutlich mehr Informationen über den untersuchten Untergrund enthalten.

ABSTRACT

Borehole georadar is an increasingly popular method for probing the shallow subsurface. A typical setup for a crosshole georadar experiment consists of an emitting dipole-type antenna located in a borehole and a corresponding receiver antenna located in a neighboring borehole. The nominal center frequencies of commonly used antennas range from ~ 20 to ~ 250 MHz, which correspond to dominant wavelengths of ~ 5 to ~ 0.4 m, in the subsurface. Prior to developing a full-waveform inversion algorithm it is therefore essential to improve our understanding of the complex electromagnetic wave propagation. To study the radiative properties of borehole georadar antenna systems, I developed a modeling tool based on finite-difference time-domain (FDTD) solutions of Maxwell's equations in cylindrical coordinates. To minimize reflections from the model boundaries, efficient uniaxial perfectly matched layer (UPLM) absorbing boundary conditions are implemented along the top, bottom and right model edges and symmetrical conditions along the cylindrical axis. Using an accurate local refinement technique allows to account for the detailed aspects of borehole radar systems, slim boreholes and materials with very high permittivities (e.g., water). Numerical experiments were conducted to benchmark the modeling tool and to analyze different antenna geometries. Results of these studies reveal that radiation characteristics of finite length Wu-King-type antennas correspond well with typically employed dipole-type approximations as long as they are placed in same environments. In contrast, substantial differences in the radiation characteristics are found when placing antennas in water-filled boreholes. I further studied effects of antennas placed in air- or water-filled boreholes on two real data sets acquired in dry crystalline rock (Grimsel Rock Laboratory in Switzerland) and in water-saturated sediments (Boise Hydrogeophysical Research Site in the USA). Both experiments using realistic transmitter antennas provide better agreements between observed and modeled data than simulations based on infinitesimal dipole transmitters and receivers.

Tomographic inversions of crosshole georadar data have typically been based on ray methods, which typically consider only a very limited portion of the recorded georadar signal, namely the onset time of the first arriving wave trains and the peak amplitudes of the first cycles. The inversion of these data allows the determination of the electromagnetic velocity and attenuation structures of the probed regions, which then can be used to derive dielectric

permittivity and electrical conductivity distributions. As a consequence of using only a limited portion of the recorded data, these methods suffer from a number of inherent limitations. In particular, they can only resolve structures that are relatively large and smooth with respect to the dominant wavelength of the signal. By considering however waveforms of recorded georadar signals and correctly accounting for wave propagation effects in the inversion process, it can therefore be expected to improve the resolution by nearly an order-of-magnitude. The expected sub-meter resolution is comparable to that of expensive and inherently 1-D borehole-based studies (e.g., geophysical logging, core sampling and direct-push techniques). However, full-waveform inversion approaches applied to georadar data are almost unknown so far. In contrast, waveform inversion strategies for seismic data have been available for almost two decades. Many seismic waveform inversion schemes are based on finite-difference solutions of the wave equation. These forward modeling schemes are accurate, can accommodate strongly heterogeneous media and automatically include all wave types of the considered wave propagation regime, such as diffracted or multiply scattered waves.

In my thesis, I present a full-waveform inversion scheme for crosshole georadar data based on FDTD solutions of Maxwell's equations in a 2-D Cartesian coordinate system. Using a Cartesian coordinate system rather than a cylindrical system offers more freedom with respect to placing transmitters and receivers in the model space and allows the implementation of highly accurate and fast generalized perfectly match layers as absorbing boundary conditions. My waveform inversion approach directly considers permittivity and conductivity distributions and has the potential to resolve not only the coarse but also the fine scale features of the probed subsurface. The scheme requires a stepped or cascaded inversion approach in which the first step consists of a permittivity inversion that mainly accounts for the phase information of the data, followed by a conductivity inversion, which focuses on the remaining amplitude information. Numerical experiments demonstrate that my 2-D inversion scheme is capable of adequately resolving, the locations, the shapes and the magnitudes of bodies with spatial extent considerably smaller than a dominant wavelength embedded in homogeneous background media. Similar good results are reported for band-limited Gaussian noise contaminated data. More realistic synthetic experiments consisting of layers and artificial objects (pipes and tunnels) embedded in stochastic background media suggested that dielectric permittivity distributions are only slightly improved compared to corresponding

ray-based results. Generally, the waveform inversion of the electrical conductivity clearly resolves more details of the artificial objects.

In order to invert field data, I developed a 3-D to 2-D transformation scheme that accurately corrects for (i) 3-D geometrical spreading, (ii) a $\pi/4$ phase shift, and (iii) a frequency scaling effect of $1/\sqrt{\omega}$, where ω is the angular frequency. The unknown source wavelets are estimated with a scheme that accounts for permittivity and conductivity medium parameter distributions together with deconvolutions of the observed data. The same field data sets are used as for the initial study of the radiation characteristics of different antenna types. The resolution of all full-waveform tomograms is shown to be significantly higher than that of the relevant ray tomograms. Boundaries between distinct geological features and small heterogeneities are sharply imaged in the full-waveform tomograms. These studies demonstrate that waveform inversion is feasible and yields markedly more information about the probed subsurface. It thus may provide key constraints on engineering parameters, such as water content, salinity, porosity, clay fraction or ore grade.