

DISS. ETH NO. 16951

ACCURATE 3-D VECTOR-IMAGING OF
GROUND-PENETRATING RADAR DATA BASED ON
EXACT-FIELD RADIATION PATTERNS

A dissertation submitted to

ETH ZURICH
(Swiss Federal Institute of Technology)

for the degree of

Doctor of Natural Sciences

presented by

RITA STREICH

Dipl.-Geophys., University of Potsdam, Germany
born December 22, 1977
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Alan G. Green, examiner
Dr. Jan van der Kruk, co-examiner
Dr. Nigel Cassidy, co-examiner

2007

Zusammenfassung

Das Georadar (Ground penetrating radar – GPR) hat sich in den letzten Jahren zu einer wichtigen Methode für die zerstörungsfreie Untersuchung des flachen Untergrundes entwickelt. Viele GPR-Untersuchungen konzentrieren sich darauf, die Geometrie von Diskontinuitäten des Untergrundes zu bestimmen. GPR-Daten enthalten jedoch auch Informationen über die Materialeigenschaften. Die Amplituden und Phasen der GPR-Signale sind charakteristisch für die Dielektrizitätskonstanten und elektrischen Leitfähigkeiten an den Diskontinuitäten, wo Reflexionen oder Diffraktionen erzeugt werden. Um quantitative Information über die Untergrundeigenschaften aus GPR-Daten zu extrahieren, werden quantitative Migrations- (Imaging-) Techniken benötigt. Diese sollten die vektoriellen Effekte der Antennen-Abstrahlcharakteristiken und elektromagnetischen Wellenausbreitung sowie mögliche richtungsabhängige Streueffekte berücksichtigen. Wenn solche Effekte durch die Migration aus den GPR-Daten entfernt werden, sollten die Amplituden in den migrierten Daten in direkter Beziehung zu den Materialeigenschaften stehen.

Im Bestreben nach quantitativer Migration konzentriere ich mich darauf, die Effekte der Antennen-Abstrahlcharakteristiken und Wellenausbreitung aus den GPR-Daten zu eliminieren. Viele existierende GPR-Migrationsalgorithmen enthalten Korrekturen für den Fernfeld-Anteil der Abstrahlcharakteristiken, obwohl die meisten GPR-Reflexionen nicht im Fernfeld der Antennen geschehen. Ich zeige an synthetischen und Felddaten, dass Fernfeld-Migration nicht genügt, um die Effekte der Abstrahlcharakteristiken zu eliminieren. Tatsächlich kann Fernfeld-Migration auch Artefakte verursachen, was auf die scharfen Minima und Maxima zurückzuführen ist, die in den E- und H-Flächen (parallel und senkrecht zur Antennenachse) von Fernfeld-Abstrahlcharakteristiken vorkommen.

Daher ist es wünschenswert, in GPR-Migrationsalgorithmen exakte Abstrahlcharakteristiken einzubinden, die die Fernfeld-, Nahfeld- und intermediären Feldanteile umfassen. Dies ist bisher für zu rechenaufwändig erachtet worden, denn Berechnungen der exakten Abstrahlcharakteristiken erfordern numerische Evaluationen von Integralen für jeden Bildpunkt. Ich entwickle eine Methode, mit der praktisch exakte Abstrahlcharakteristiken schnell berechnet werden können und die eine hohe Genauigkeit erreicht in den Tiefenbereichen, die für die meisten Georadar-Untersuchungen von Interesse sind. Die neue Methode basiert auf inversen schnellen Fouriertransformationen (inverse Fast Fourier Transforms – IFFT) der Abstrahlcharakteristiken vom Wellenzahl-Bereich, in dem sie explizit bekannt sind, in den Ortsbereich. Um einen guten Kompromiss zu erzielen zwischen ausreichender Genauigkeit und vernünftigen Rechenzeiten, muss vor Anwendung der IFFT die Samplingrate im Wellenzahlbereich sorgfältig gewählt werden.

Die neue schnelle Technik ermöglicht es, praktisch exakte Abstrahlcharakteristiken

in dreidimensionale GPR-Migrationsalgorithmen einzubinden. Ich zeige zwei Realisationen solcher Exaktfeld-Migrationsalgorithmen. Zuerst füge ich die exakten Abstrahlcharakteristiken in einen bestehenden Multikomponenten-Algorithmus ein, der Images berechnet aus Kombinationen von Datensätzen, die mit parallelen und gekreuzten Antennen aufgenommen wurden. Die Multikomponenten-Migration erzeugt Bildmatrizen mit 2×2 Elementen, in denen die beiden Diagonalelemente zwei unabhängige migrierte Images enthalten. Der Multikomponenten-Algorithmus wird an synthetischen und Felddaten von ebenen und nahezu ebenen geneigten Reflektoren getestet. In allen Multikomponenten-Images sind die Amplituden und Phasen der Reflexionen weitgehend unabhängig von der Ausrichtung der Antennen relativ zu den Reflektoren. Das zeigt, dass mit meiner Exaktfeld-Migrationstechnik die Abstrahlcharakteristiken fast vollständig aus den Testdaten entfernt werden können.

Weiterhin formuliere ich einen Einkomponenten-Migrationsalgorithmus, der mathematisch analog ist zum Multikomponenten-Schema, jedoch auf einzelne Datensätze angewendet werden kann, die im Standard-Modus mit nur einem Paar paralleler Antennen aufgenommen wurden. Der Einkomponenten-Algorithmus ist numerisch ebenso stabil, dabei aber weitaus effizienter als der Multikomponenten-Algorithmus, denn zu seiner Anwendung müssen die Abstrahlcharakteristiken nur für eine Antennenorientierung berechnet werden, und es müssen nur Daten für eine Antennenkonfiguration gemessen und prozessiert werden. Die Multi- und Einkomponenten-Exaktfeld-Migrationen führen äquivalente Korrekturen für die Abstrahlcharakteristiken und elektromagnetische Wellenausbreitung durch. Folglich produziert die Einkomponenten-Migration bei synthetischen und Felddaten von geneigten Schichten Images, in denen die Reflexionsamplituden praktisch identisch zu denjenigen in den Multikomponenten-Images und weitgehend unabhängig von der Antennenausrichtung sind.

In beiden Exaktfeld-Vektormigrationsalgorithmen werden die Antennen näherungsweise als infinitesimale Dipole beschrieben. Da die Objekte für GPR-Untersuchungen oft nur wenige Antennenlängen von den Antennen entfernt sind, sollte die Genauigkeit der Images weiter erhöht werden, indem realistischere Modelle von realen Antennen mit endlicher Ausdehnung benutzt werden. Dementsprechend erstelle ich ein realistisches Modell für die widerstandsbedämpften Antennen, die ich in den meisten meiner Feldmessungen eingesetzt habe. Die Widerstandsprofile auf diesen Antennen sind verallgemeinerte Wu-King-Profile. Ich entwickle ein zweistufiges Inversionschema, das aus wenigen Messungen des elektrischen Feldes direkt neben der Antenne das Eingangs-Wavelet und die charakteristischen Parameter bestimmt, die die Stromverteilung entlang der Antenne definieren. Aus der bekannten Stromverteilung können dann Abstrahlcharakteristiken für diese realen Antennen berechnet werden. Die gute Übereinstimmung von aus der Inversion bestimmten und direkt gemessenen Wavelets und von modellierten und gemessenen Daten des elektrischen Feldes zeigt, dass mein Modell die untersuchten Antennen gut charakterisiert. In Zukunft könnte solch ein Modell realer Antennen das Modell von infinitesimalen Dipolen in den Exaktfeld-Migrationsalgorithmen ersetzen. Durch Modifizieren der Parametrisierung

der Stromverteilung könnte das Modell auch auf andere Antennentypen angepasst werden.

Das Einbinden von Exaktfeld-Abstrahlcharakteristiken in 3-D GPR-Migrationsalgorithmen stellt einen wichtigen Schritt dar in Richtung quantitative GPR-Migration. Zahlreiche weitere Schritte sind jedoch nötig, um GPR-Images zu erhalten, die direkt die physikalischen Eigenschaften des Untergrundes anzeigen.

Summary

In recent years, ground-penetrating radar (GPR) has become an important technique for non-destructive investigations of the shallow subsurface. Many GPR studies focus on resolving the geometries of subsurface discontinuities. However, GPR data also contain information on the material properties; the amplitudes and phases of reflected signals are characteristic of the dielectric permittivities and electric conductivities at the causative subsurface discontinuities. To extract quantitative information on subsurface properties from GPR data, we require quantitative imaging (migration) techniques that account for the effects of the vectorial antenna radiation patterns and electromagnetic wave propagation and possible effects of preferential scattering. After removing these effects from GPR data in the migration process, the resulting image amplitudes should be directly related to the material properties.

In working toward true quantitative imaging, I focus on eliminating the effects of the antenna radiation patterns and wave propagation from GPR data. Many imaging algorithms include corrections for far-field approximations of the radiation patterns, although most GPR reflections do not occur in the far field of the antennas. I demonstrate on synthetic and field data that far-field imaging does not suffice for eliminating the radiation pattern effects. In fact, far-field imaging may cause artifacts due to the sharp nulls and peaks contained in the E- and H-planes of far-field radiation patterns, respectively.

Therefore, it is highly desirable to include in GPR imaging schemes exact radiation patterns that encompass the far-, intermediate- and near-field contributions. This has hitherto been considered computationally impractical, because computations of the exact-field radiation patterns require the numerical evaluation of integrals for every image point. I develop a method for rapidly computing practically exact-field radiation patterns that are sufficiently accurate throughout the volumes of interest for most GPR investigations. The novel method is based on inverse fast Fourier transforms (IFFT) of the explicitly known wavenumber-domain expressions for exact-field radiation patterns. To balance the trade-off between sufficient accuracy and reasonable computation times, the method requires that the wavenumber sample rate be chosen carefully prior to executing the IFFT.

The novel rapid computation technique enables corrections for practically exact-field radiation patterns to be included in three-dimensional (3-D) GPR imaging schemes. I show two realizations of exact-field imaging algorithms. First, exact-field radiation patterns are included in a previously developed multicomponent imaging scheme that supplies subsurface images from combinations of data volumes collected with co- and cross-polarized antennas. Multicomponent imaging results in 2×2 image matrices in which the diagonal elements contain two independent versions of the subsurface image. Applying the multicomponent scheme to synthetic and field data of

planar and near-planar reflectors yields images in which the reflection amplitudes and phases are nearly independent of the relative antenna-to-reflector orientations. This indicates that my exact-field imaging approach is able to eliminate most radiation pattern effects from the data.

Second, I formulate a single-component imaging algorithm that is mathematically analogous to the multicomponent scheme, but is applicable to single standard data volumes recorded using a single co-polarized antenna pair. The single-component algorithm is numerically equally stable, yet significantly more efficient than the multicomponent one, since it requires the computation of radiation patterns for only one antenna orientation and the recording and processing of only a single data volume. Multi- and single-component exact-field imaging accomplish equivalent corrections for the antenna radiation patterns and electromagnetic wave propagation. Consequently, single-component imaging of synthetic and field data of dipping planar reflectors produces images in which the reflection amplitudes are practically identical to those in the corresponding multicomponent images and nearly independent of the antenna-to-reflector orientations.

In both exact-field vector-migration schemes, the GPR antennas are approximated as infinitesimal dipoles. Since GPR investigations are typically carried out at distances that are small multiples of the antenna size, the image accuracy should be improved further by using more realistic models that account for antennas of finite size. Accordingly, I derive a model that faithfully represents the resistively loaded, generalized Wu-King type antennas used in most of my field surveys. I develop a cascaded inversion method that determines from sparse electric field data measured near the antennas the input voltage wavelet and characteristic parameters that define the current distribution along the antennas. Based on knowledge of the current distribution, the radiation patterns of finite-length antennas can then be computed. Reasonably good fits between inverted and directly measured input wavelets and between modeled and measured electric field data show that my antenna model describes well the tested antennas. In the future, the finite-length antenna model may replace the infinitesimal dipole model in the exact-field imaging schemes. By modifying the parameterization of the current distribution, the model may be adapted for other antenna types.

The accommodation of exact-field radiation patterns in 3-D GPR migration algorithms represents an important step towards quantitative GPR imaging. Nevertheless, extensive further work is required to obtain GPR images that directly show the sub-surface physical properties.