



Doctoral Thesis

Novel multi-response 3-D MT inverse solution: concept and development

Author(s):

Bakker, Jenneken Geertje

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010502753> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 22551

**Novel multi-response 3-D MT inverse solution:
concept and development**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

JENNEKEN GEERTJE BAKKER

Master of Science in Applied Geophysics

TU Delft, The Netherlands; ETH Zurich, Switzerland; RWTH Aachen, Germany

born on 24.01.1985

citizen of the Netherlands

accepted on the recommendation of

PD.	Dr. Alexey Kuvshinov	Examiner
Prof.	Dr. Andrew Jackson	Co-examiner
Prof.	Dr. Michael Becken	Co-examiner
	Dr. Naser Meqbel	Co-examiner

2015

Abstract

The exploration of natural resources requires a non-invasive investigation of the physical properties of the subsurface. Magnetotellurics (MT) is a geophysical method enabling to image the subsurface's electrical conductivity and is often used for the exploration of hydrocarbons, ore deposits or geothermal resources. The main advantage of the MT method is that no active source is required; instead the natural occurring time-varying electromagnetic (EM) fields are recorded and analyzed. Further advantages are the wide depth range of investigation, ranging from hundreds of meters till hundreds of kilometers, and the relative ease to cover large areas during a MT survey.

The EM field recordings are usually interpreted through the impedance tensor, which relates the electric and magnetic fields in the frequency domain. Interpretation of the impedance tensor can be challenging in the presence of local small-scale heterogeneities in the shallow subsurface. These heterogeneities, which are not the target of the MT survey, galvanically distort the electric field and thereby the impedance tensor. One of the remedies to overcome the problem of a galvanically distorted impedance tensor, is to derive the MT phase tensor from the impedance tensor. The MT phase tensor is free from galvanic distortion. Other response functions used to interpret MT data are the vertical magnetic transfer function and the inter-site quasi-electric, electric and magnetic tensors. The latter two relate the electric or magnetic field, respectively, the base and a field site, and the quasi-electric tensor links the magnetic field at the base site with the electric field at a field site.

A three-dimensional (3-D) image of the electrical conductivity of the subsurface can be obtained by an inversion of a two-dimensional array of any of the aforementioned responses. Several 3-D MT inverse solvers have been developed during the past two decades. With the aim of these inverse solvers being the same – *i.e.* reconstructing the 3-D electrical conductivity distribution of the subsurface – there are major differences between the individual inverse solvers. Differences lie in the way the forward problem is solved, which type of optimization is used to find the solution to the inverse problem, how the inverse problem is regularized, whether the code is parallelized and to which extent, the way the sensitivities are calculated and which response functions are used during inversion. It is important to note that the non-unique character of the solution of the MT inverse problem often complicates the interpretation of the obtained inverse results.

In this thesis, I first address the problem of galvanically distorted MT responses by introducing two new phase tensors that are (almost) resistant to galvanic distortion. I propose to derive phase tensors from the electric and quasi-electric tensor in a similar way as the MT phase tensor is derived from the impedance tensor. The electric phase tensor is only affected by galvanic distortion, if present, at the base site. The quasi-electric phase tensor is free from galvanic distortion. Using a synthetic data-set, I show that the sensitivity of the MT phase tensor, the quasi-electric phase tensor and the electric phase tensor is comparable for our model under consideration. Furthermore, I

demonstrate that stable (quasi-) electric phase tensors can be recovered from a real data-set with the use of existing processing software. In addition I provide a formalism to propagate the uncertainties from the estimated (quasi-) electric and impedance tensors to their respective phase tensors. The uncertainties of the (quasi-) electric phase tensors appeared to be of the same order of magnitude as the uncertainties of the MT phase tensor. Bearing in mind that electric field measurements are less cost intensive to perform than magnetic field measurements, I conclude that the (quasi-) electric phase tensors are an attractive complement to the standard MT response functions.

Second, I present a novel 3-D MT inverse solver *EMJoy*. The forward problem within *EMJoy* is tackled using a contracting integral equation technique and the inverse problem is solved with a limited memory quasi-Newton optimization method. The gradient of the data-misfit with respect to the model parameters is calculated by means of the adjoint approach. *EMJoy* has a modular structure, allowing for an easy inclusion of additional features. Further, *EMJoy* is parallelized both over frequency and source polarization. During inversion, the traditional MT responses can be utilized plus the newly introduced (quasi-) electric phase tensors. *EMJoy* was successfully tested using a number of synthetic data-sets.

Zusammenfassung

Die Suche nach natürlichen Rohstoffquellen erfordert eine nicht-invasive Erkundung der (geo-)physikalischen Eigenschaften des Untergrunds. Magnetotellurik (MT) ist eine geophysikalische Messmethode, die es ermöglicht, die elektrische Leitfähigkeitsverteilung des Untergrunds abzubilden. Sie findet Anwendung in der Exploration von Öl- und Gasvorkommen, von Erzlagerstätten sowie von geothermischen Lagerstätten. Ein bedeutender Vorteil der MT ist, dass sie ohne den Einsatz aktiver Signalquellen auskommt. Stattdessen basiert sie auf der Analyse von zeitlichen Variationen natürlicher elektromagnetischer (EM) Felder. Weitere Vorteile sind grosse mögliche Explorationstiefen von wenigen hundert Metern bis zu einigen hundert Kilometern, sowie die relative Einfachheit, auch grosse Messgebiete während einer MT Feldkampagne abzudecken.

Die im Feld gemessenen EM Zeitreihen werden meist in Form des Impedanztensors interpretiert, einer Übertragungsfunktion, die die elektrischen und magnetischen Felder im Frequenzbereich zueinander in Relation setzt. Die Interpretation des Impedanztensors kann durch kleinskalige lokale und oberflächennahe Leitfähigkeitsanomalien erschwert werden. Diese Heterogenitäten, die nicht das Ziel einer MT Messung sind, resultieren in einer galvanischen Verzerrung des elektrischen Feldes und damit des Impedanztensors. Eine Möglichkeit, das Problem eines durch galvanische Verzerrung beeinflussten Impedanztensors zu lösen, ist die Ableitung des MT Phasentensors aus dem Impedanztensor. Der Phasentensor ist frei von galvanischer Verzerrung. Weitere Übertragungsfunktionen zur Interpretation von MT Daten sind lokale vertikale magnetische Übertragungsfunktionen, und auf eine Referenzstation bezogene Übertragungsfunktionen wie quasi-elektrische, elektrische und magnetische Perturbationstensoren. Letztere beziehen das elektrische beziehungsweise das magnetische Feld am Messort auf das jeweilige Feld an einer Referenzstation. Quasi-elektrische Perturbationstensoren beziehen das elektrische Feld am Messort auf das magnetische Feld an der Referenzstation.

Aus einem Set der genannten Übertragungsfunktionen an verschiedenen Messorten lässt sich anhand eines Inversionschemas die dreidimensionale (3-D) Leitfähigkeitsverteilung des Untergrunds bestimmen. In den letzten 20 Jahren wurde mehrere solcher 3-D MT Inversionsalgorithmen entwickelt. Während das Ziel dieser Inversionsalgorithmen jeweils dasselbe ist, nämlich ein 3-D Modell der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung des Untergrunds zu finden, so unterscheiden sie sich untereinander doch erheblich. Unterschiede liegen in der Formulierung der Lösung des Vorwärtsproblems, darin welcher Optimierungsalgorithmus zur Lösung des Inversionsproblems gewählt wird, in der Regularisierung des Inversionsproblems, ob und zu welchem Grad der Algorithmus parallelisiert ist, in der Art wie die Sensitivitäten errechnet werden und welche Übertragungsfunktion invertiert werden. Es ist hierbei wichtig anzumerken, dass die Uneindeutigkeit der Lösung die Interpretation der Ergebnisse oftmals erschwert.

In dieser Arbeit werde ich zunächst das Problem galvanisch verzerrter MT Übertragungsfunktionen behandeln, indem ich zwei neue Phasentensoren einführe, die (nahezu) verzerrungsfrei sind. Hierfür schlage ich vor, Phasentensoren von elektrischen

und quasi-elektrischen Tensoren abzuleiten in Analogie zur Ableitung des Phasentensors aus dem Impedanztensor. Der elektrische Phasentensor ist im Falle einer vorliegenden galvanischen Verzerrung nur an der Referenzstation von Verzerrung betroffen. Der quasi-elektrische Phasentensor ist generell verzerrungsfrei. Anhand synthetischer Daten werde ich zeigen, dass die Sensitivität des MT, des quasi-elektrischen und des elektrischen Phasentensors für das gewählte Model vergleichbar ist. Weiterhin werde ich zeigen wie aus realen Messdaten unter Verwendung existierender Software zur Zeitreihenanalyse stabile (quasi-)elektrische Phasentensoren abgeschätzt werden können. Des Weiteren stelle ich einen Fehlerfortpflanzungsformalismus zur Abschätzung der Fehler von Phasentensoren aus den jeweiligen Fehlern der (quasi-)elektrischen- und Impedanztensoren vor. Die Fehler der (quasi-)elektrischen Phasentensoren bewegen sich in derselben Größenordnung wie die des MT Phasentensors. In Anbetracht der Tatsache, dass elektrische Feldmessungen kostengünstiger als magnetische durchzuführen sind, komme ich zu dem Schluss, dass die eingeführten (quasi-)elektrischen Phasentensoren eine attraktive Ergänzung zu den bisherigen MT Übertragungsfunktionen darstellen.

Des Weiteren werde ich den neuen 3-D Inversionsalgorithmus EMJoy vorstellen. Die Lösung des Vorwärtsproblems basiert hierbei auf einem kontrahierenden Integralgleichungsverfahren und das Inversionsproblem wird anhand eines quasi-Newtonschen Optimierungsalgorithmus mit reduziertem Rechenaufwand gelöst. Der Gradient der Diskrepanz zwischen den beobachteten und den vom Model vorhergesagten Daten wird mittels eines Adjungiertenverfahrens berechnet. EMJoy ist modular aufgebaut, was den Einbau weiterer Features erheblich vereinfacht. Weiterhin ist EMJoy bezüglich Frequenzen und Polarisationen parallelisiert. Neben den bekannten MT Übertragungsfunktionen können zusätzlich die neu eingeführten (quasi-)elektrischen Phasentensoren invertiert werden. EMJoy wurde erfolgreich an einigen synthetischen Datensätzen getestet.