



Doctoral Thesis

Hardware and Algorithmic Advances in B_0 Shimming for High and Ultra-High Field MRI and MRS

Author(s):

Fillmer, Ariane

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010421805> →

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](#).

Hardware and Algorithmic Advances in B_0 Shimming for High and Ultra-High Field MRI and MRS

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Ariane Fillmer
Dipl. Phys., Technische Universität Dortmund

born on 12.05.1984

citizen of
Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Markus Rudin
Dr. Anke Henning
Prof. Dr. Dennis W.J. Klomp

SUMMARY

To achieve optimal data quality in magnetic resonance imaging (MRI) and magnetic resonance spectroscopy (MRS) examinations, a good homogeneity of the main magnetic field (B_0) is crucial. However, introducing a subject into a previously perfectly homogeneous magnetic field will lead to field distortions, due to susceptibility effects. These distortions are subject dependent and their amplitude scales linearly with the main magnetic field strength. Since these inhomogeneities are detrimental to data quality, advantages associated with higher field strengths, like higher signal-to-noise ratios as well as increased spatial and spectral resolution, can be exploited only when the induced B_0 inhomogeneities can be compensated for. To this end different strategies for compensating B_0 inhomogeneities, so-called B_0 shim strategies, have been developed. B_0 shimming commonly involves the superposition of additional, typically spherical harmonic shaped magnetic fields onto the existing inhomogeneous field, by utilization of a set of additional dedicated shim coils. In this thesis, the main focus is on two main aspects of B_0 shimming: 1) the optimization of the shim field amplitudes for achieving the best possible B_0 homogeneity using the existing shim coils; and 2) the calibration and application of dynamic shim updating (DSU) during the sequence that are optimized according to the current sampling region, by utilization of a hardware extension. Moreover, data

quality from spectra acquired in the myocardium was improved by application of retrospective frequency stabilization.

The optimization of the shim field amplitudes is typically done by approximation of the prevailing field distribution through spherical harmonics functions and application of spherical harmonic correction fields with the same respective amplitudes but opposite sign. Shim optimization procedures differ e.g. in the mapping techniques for the prevailing field, the choice of the shim volume, and the optimization approach. Localized B_0 shimming approaches have been shown to be beneficial for MRI examinations with focus on a specific region of interest (ROI). Nevertheless, uncontrollably large inhomogeneities in the vicinity of the ROI may induce artifacts within the ROI itself. Furthermore, the spherical harmonic shim fields exhibit non-orthogonalities, whenever the ROI is not isocentered. This gives rise to multiple minima within the optimization function and may, thus, lead to suboptimal shim results. This problem is aggravated by artificial local minima induced by hardware limitations, constraining the optimization parameter space. In this thesis, a previously implemented image-based shim algorithm was enhanced by the introduction of a region of less interest (ROLI) surrounding the region of interest (ROI), and the application of multiple starting values (MSV) for the fitting procedure. The application of a ROLI, which can be down-weighted against the ROI, allows for more flexible control over field inhomogeneities in the vicinity of the ROI, and hence, enables the mitigation of problems arising from these areas without substantially compromising the homogeneity within the ROI itself. The utilization of MSV increases the probability of finding the globally optimal shim settings for a problem at hand. The performance of the proposed B_0 shim technique in different types of B_0 shimming problems in the head and the body compares favorably with a commonly used projection-based technique, as well as the original algorithm, that served as a basis for the proposed alterations. By the application of a combined

MSV-ROLI approach to an magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) examination of the brain, the frequency shift of the fat signal, stemming from the subcutaneous regions outside the brain, could be reduced and the overlap of the fat signal and the signal from brain metabolites could be mitigated. Hence, a more robust quantification of brain metabolites is enabled. MRS measurements in the intraventricular septum of the human heart benefit from the application of the proposed shim algorithm in conjunction with prospective motion correction and retrospective phase correction and frequency alignment, to compensate for dynamic B_0 fluctuations induced by physiological movement like breathing. The signals of intramyocellular and extramyocellular lipids can, thus, be resolved in the resulting spectrum.

Since localized B_0 shimming yields improved results compared to global shim approaches, a promising shim technique for improved shim performance in large examination volumes is dynamic shim updating (DSU), in which shim settings are updated throughout the sequence, according to the current sampling region. This involves fast switching of the shim currents, which gives rise to eddy currents within the shim coils themselves and the surrounding conducting structures. The resulting time dependent field distortions may exceed the B_0 inhomogeneities induced by the subject, and hence, a careful pre-emphasis calibration to counteract the eddy current effects is required. Spatiotemporal field monitoring with a third-order field camera constitutes a fast and accurate technique to simultaneously characterize the temporal field evolution of all up to third order spherical harmonics, after switching the current within each coil individually. A pre-emphasis calibrated in this manner is shown to enable the application of slice-wise DSU to functional MRI (fMRI) acquisitions without notable extension of scan times or reduction of temporal resolution. Pre-emphasis, however, involves a brief “overshoot” of the nominal shim current and consequently the achievable maximum shim currents have to be reduced in order to obey hardware limitations.

This imposes severe restrictions on possible homogeneity gains achieved by DSU compared to global static B_0 shim approaches. Hence, the possible homogeneity gains for different B_0 shimming problems are investigated, and hardware requirements for different DSU applications are examined. Whenever global static shim approaches consider identical shim field amplitude restrictions as DSU, slice-wise shim updating yields the bigger homogeneity gain, which increases for larger volumes of interest. Depending on the severity of the imposed shim amplitude restrictions this homogeneity gain is decreased compared to static B_0 shimming without additional restrictions. However, when shim currents are updated e.g. between different spectroscopy voxels, instead of in a slice-wise manner, DSU clearly outperforms global B_0 shimming, even if achievable shim field amplitudes are substantially higher for global shimming.

Improved B_0 shim performance leads to better and more robust data quality for MRI and MRS, allowing for a more reliable interpretation of the data, and thus constitutes an important step towards routine clinical application of MRS.

ZUSAMMENFASSUNG

Um in der Magnetresonanzbildgebung (magnetic resonance imaging, MRI) und Magnetresonanzspektroskopie (magnetic resonance spectroscopy, MRS) eine gute Datenqualität zu erreichen, ist ein möglichst homogenes statisches Magnetfeld (B_0) von entscheidender Bedeutung. Die Plazierung eines Untersuchungsobjektes oder eines Menschen in einem zuvor perfekt homogenem Magnetfeld resultiert jedoch in Verzerrungen des Feldes. Diese Verzerrungen sind abhängig vom Objekt oder Probanden und ihre Amplitude skaliert linear mit der Stärke des Magnetfeldes. Da diese Inhomogenitäten der Datenqualität abträglich sind, können Vorteile die mit höheren Magnetfeldstärken assoziiert werden, wie höhere Signal-zu-Rausch Verhältnisse, sowie erhöhte räumliche und spektrale Auflösung, nur ausgeschöpft werden, wenn die induzierten B_0 Inhomogenitäten kompensiert werden können. Um dies zu erreichen wurden verschiedene Strategien zur Kompensation von B_0 Inhomogenitäten, so genannte B_0 Shim Strategien, entwickelt. Im Allgemeinen involviert B_0 Shimming die Überlagerung von zusätzlichen, typischerweise sphärischen harmonischen Magnetfeldern mit dem vorhandenen inhomogenen Feld, durch die Verwendung eines Satzes zusätzlicher, dedizierter Shimspulen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf zwei Hauptaspekten von B_0 Shimming: 1) Die Optimierung der Shimfeldamplituden um die bestmögliche B_0 Homogenität unter Benutzung der vorhandenen Shimspulen

zu erhalten, und 2) die Kalibration und Anwendung von während der Sequenz dynamisch aktualisierten Shiminstellungen (dynamic shim updating, DSU), die entsprechend der aktuellen Aufnahme-region optimiert wurden, mit Hilfe einer Hardwareerweiterung. Des Weiteren wurde die Datenqualität von Spektren, welche im Herzen aufgenommen wurden, durch die Anwendung von retrospektiver Frequenzstabilisierung verbessert.

Die Optimierung der Shimfeldamplituden wird typischerweise durch die Approximierung der vorliegenden Feldverteilung durch sphärisch harmonische Funktionen und die Anwendung von sphärisch harmonischen Korrekturfeldern mit den gleichen jeweiligen Amplituden aber umgekehrten Vorzeichen erreicht. Verschiedene Shimoptimierungsprozeduren unterscheiden sich, zum Beispiel durch die verwendete Aufnahmetechnik der vorliegenden Feldverteilung, die Auswahlmöglichkeiten für das Shimvolumen, sowie den Optimierungsansatz. Es wurde gezeigt, dass lokalisierte B_0 Shimansätze von Vorteil für MRI Untersuchungen mit Fokus auf eine spezifische Zielregion (region of interest, ROI) ist. Nichtsdestotrotz können unkontrollierbar große Inhomogenitäten in der Nähe der ROI Artefakte innerhalb der ROI verursachen. Des Weiteren weisen die sphärisch harmonischen Funktionen Nichtorthogonalitäten auf, wann immer die ROI nicht im Isozentrum liegt. Dies verursacht multiple Minima innerhalb der Optimierungsfunktion und kann daher zu suboptimalen Shimresultaten führen. Dieses Problem wird verschärft durch künstliche lokale Minima, die Hardware Limitationen induziert werden, welche den Optimierungsparameterraum beschränken. In dieser Arbeit wurde ein im Vorfeld implementierter bildbasierter Shimalgorithmus durch die Einführung einer zweiten Zielregion von geringerer Wichtigkeit (region of less interest, ROLI), die die ROI umschließt, und die Anwendung von mehreren Startwerten (multiple starting values, MSV) für die Fitroutine erweitert. Die Anwendung einer ROLI, die gegenüber der ROI herabgewichtet werden kann, erlaubt eine flexiblere Kontrolle der Inhomogenitäten in der Nachbarschaft der ROI, und

ermöglicht daher die Reduktion von Problemen deren Ursprung in diesen Regionen liegen, ohne die Homogenität in der ROI selbst schwer zu beeinträchtigen. Die Verwendung von MSV erhöht die Wahrscheinlichkeit die bestmöglichen Shimeinstellungen für ein vorliegendes Problem zu finden. Verglichen mit einer gebräuchlichen projektionsbasierten Shimtechnik, sowie dem ursprünglichen Algorithmus, der als Basis für die vorgeschlagenen Änderungen diente, erzielt die vorgeschlagene B_0 Shimtechnik verbesserte Resultate in verschiedenen B_0 Shimproblemen innerhalb von Kopf und Körper. Durch die Anwendung eines kombinierten MSV-ROLI Ansatzes auf spektroskopische Magnetresonanzbildgebungsuntersuchungen (magnetic resonance spectroscopic imaging, MRSI) des Gehirns, konnte die Frequenzverschiebung des Fettsignals, welches von subkutanen Regionen außerhalb des Gehirns stammt, reduziert werden und die Überlagerung des Fettsignals mit den Signalen von Hirnmetaboliten konnte abgeschwächt werden. Dadurch wird eine robustere Quantifikation der Hirnmetaboliten ermöglicht. MRS Messungen im intraventrikulären Septum des menschlichen Herzens profitieren von der Anwendung des vorgestellten Shimalgorithmus in Verbindung mit prospektiver Bewegungskorrektur und retrospektiver Phasenkorrektur und Frequenzangleichung, um dynamische B_0 Fluktuationen auszugleichen, die durch physiologische Bewegungen wie Atmung hervorgerufen werden. Die Signale von intramyozellulärem und extramyozellulärem Fett können auf diese Weise in den resultierenden Spektren aufgelöst werden.

Da lokalisiertes B_0 Shimming, verglichen mit globalen Shimansätzen, zu verbesserten Ergebnissen führt, ist die dynamische Shimaktualisierung (dynamic shim updating, DSU), in der während der Sequenz die Shimeinstellungen entsprechend der aktuellen Aufnahme-region angepasst werden, eine vielversprechende Technik zur Verbesserung des Shimresultats in grossen Untersuchungsvolumen. Diese involviert das schnelle Schalten von Shimströmen, was wiederum Wirbelströme in den Shimspulen selbst und den die Shimspulen umgebenden leitenden Strukturen verursacht. Die

daraus resultierenden zeitabhängigen Feldverzerrungen können größer sein als die B_0 Inhomogenitäten, die durch das Mesobjekt bzw. den Probanden verursacht werden, und daher ist eine sorgfältige Vorverzerrungskalibration notwendig, um den Wirbelstromeffekten entgegenzuwirken. Räumlich-zeitliche Feldmessungen mit Hilfe einer dritte-Ordnung Feldkamera stellt eine schnelle und akurate Methode zur gleichzeitigen Charakterisierung der zeitlichen Feldentwicklung aller sphärischen harmonischen Shimterme bis zur dritten Ordnung dar, nachdem der Strom in jeder Spule individuell verändert wurde. Es wurde gezeigt, dass eine auf diese Weise durchgeführte Vorverzerrungskalibration die Anwendung von schichtweiser DSU für funktionelle MRI (fMRI) Messungen ermöglicht, ohne merkliche Verlängerung der Messzeiten oder Reduzierung der zeitlichen Auflösung zu verursachen. Die Anwendung einer Vorverzerrung involviert ein kurzzeitiges "Überschwingen" des nominellen Shimstroms, und infolgedessen müssen die maximal erreichbaren Shimströme beschränkt werden, um Hardwarelimitationen einzuhalten. Dies führt zu schwerwiegenden Einschränkungen der möglichen Homogenitätssteigerung die durch DSU, gegenüber von statischen B_0 Shimansätzen, erreicht werden kann. Daher werden die möglichen Homogenitätssteigerungen für verschiedene Shimprobleme analysiert und die Hardwarevoraussetzungen für unterschiedliche DSU Anwendungen untersucht. Immer wenn für globale, statische Shimansätze die gleichen Shimamplitudenlimitationen gelten wie für DSU, kann mit schichtweiser Aktualisierung der Shimeinstellungen eine größere Homogenitätssteigerung erreicht werden. Dieser Effekt verstärkt sich bei Betrachtung von größeren Shimvolumen. Abhängig von der Schwere der Shimamplitudenbeschränkungen, verringert sich die erreichbare Homogenitätssteigerung gegenüber statischem B_0 Shimming ohne zusätzliche Limitationen. Wenn die Shimströme jedoch zum Beispiel zwischen zwei verschiedenen Spektroskopievoxeln aktualisiert werden, anstelle von schichtweiser Aktualisierung, übertrifft DSU eindeutig globales B_0 Shimming, sogar wenn die

erreichbaren Shimfeldamplituden für globales Shimming erheblich größer sind.

Verbessertes B_0 Shimming führt zu besserer und robusterer Datenqualität für MRI und MRS, was eine verlässlichere Interpretation der Daten erlaubt, und daher einen wichtigen Schritt für MRS, auf dem Weg zur alltäglichen klinischen Anwendung, darstellt.