



Doctoral Thesis

Low frequency magnetic metamaterials and wireless control of forces and torques

Author(s):

Boyvat, Mustafa

Publication Date:

2014

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010265283> →

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. 22155

**LOW FREQUENCY MAGNETIC
METAMATERIALS AND WIRELESS CONTROL
OF FORCES AND TORQUES**

A dissertation submitted to

ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

MUSTAFA BOYVAT

M.Sc. ETH Zurich, Switzerland

born on February 9, 1985

citizen of Turkey

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Christian Hafner, examiner
Prof. Dr. Juerg Leuthold, co-examiner
Prof. Dr. Bradley Nelson, co-examiner

2014

ABSTRACT

Metamaterials are artificial materials which offer a wide range of electromagnetic properties extending out of the natural borders. They are composed of so-called meta-atoms similar to atoms in natural materials but these meta-atoms are much larger, designable, man-made structures. Metamaterials have attracted significant scientific attention with the introduction of two extreme applications, namely, the perfect lens and the invisibility cloak. Since then, a large amount of research has been performed on metamaterials, but almost all of the research has aimed at high frequencies. However, recent work on metamaterials at frequencies going down to DC proved that the very low frequency end of the electromagnetic spectrum is also highly interesting for metamaterials.

In this dissertation, it is shown that metamaterials at low frequencies can be used to manipulate magnetic fields, taking low frequency magnetic field shielding as the main application. The reason to focus on shielding is that shielding of low frequency magnetic fields is an important issue due to the related regulations and because conventional shielding techniques can be undesirably costly. This also covers the magnetic fields produced by power distribution systems which are almost everywhere,

It is numerically demonstrated that metamaterials composed of lossless meta-atoms can shield magnetic fields and it is shown that the shielding can be improved considerably by inhomogeneous metamaterials, designed by a constrained linear least squares optimization. After the numerical demonstrations, it is shown experimentally that low frequency metamaterials made of simple LC resonators formed by coils and capacitors can indeed reduce magnetic fields, but in a limited amount due to the losses in the resonators. Using resonators with higher quality factors can reduce these losses but this increases the costs, reduces the bandwidth and causes high currents and voltages. Another way to compensate these losses is to use active circuits. However, active loss compensation also has serious problems because active circuits may be bulky, expensive, and they have stability problems, need external power sources and cooling of the active components. In order to overcome these problems, an advanced purely passive meta-atom is designed based on a phase shifting concept. This new meta-atom consists of a small network of six capacitors and two rather small coils. Despite its high shielding

performance, the new meta-atom is neither bulky nor costly, does not lead to high currents and voltages. Furthermore, the bandwidth is comparable to that of LC resonators with low quality factors. The significant shielding improvement by the new metamaterial is also shown experimentally.

LC resonators sense mechanical effects due to the induced currents in their coils. Resonance enhances these currents and thereby the forces and torques acting on the resonators. The question of whether it is possible to obtain self-adaptive meta-atoms to increase the shielding performance in arbitrary external fields leads to the detailed study of these mechanical effects. Since the analysis of mechanical interactions in numerous coupled resonators is extremely complicated and demanding, simple configurations are studied to improve the understanding of these mechanical effects. Namely, the forces and torques on a single resonator are studied in detail. The direction of the forces and torques on the resonator can be changed and different stable orientations can be obtained by tuning the frequency of the external field. The analysis of systems of two and more coupled resonators is already very challenging because of the coupling between the resonators. But, such systems offer much stronger and more advanced mechanical effects. A highly attractive outcome of these mechanical effects is a 'wireless motor' obtained from a system of two coupled resonators. The interaction of two resonators causes one of the resonators to sense a torque that always points in the same direction. From this, continuous rotation is obtained. The basic effects of a single resonator and of a system of two resonators, including the 'wireless motor', are also demonstrated experimentally.

These interesting mechanical effects lead to fascinating ideas going beyond metamaterial area. The resonators are proposed for wirelessly powered actuator/agent systems consisting of independently controllable elements and even a single resonator is considered as a functional device. The strong frequency selectivity of LC resonators makes them attractive for multiple element systems with individually addressable elements, which is important in numerous areas.

ZUSAMMENFASSUNG

Metamaterialien sind künstliche Materialien, welche ein breites Spektrum von elektromagnetischen Eigenschaften anbieten, welche über die natürlichen Grenzen hinausreichen. Sie bestehen aus sogenannten Meta-Atomen ähnlich den Atomen in natürlichen Materialien. Meta-Atome sind aber wesentlich grössere, designbare, künstlich hergestellte Strukturen. Metamaterialien haben durch die Einführung zweier aussergewöhnlicher Anwendungen, nämlich der perfekten Linse und des perfekten Tarnmantels, grosse wissenschaftliche Aufmerksamkeit erlangt. Seither wurde sehr viel Forschung über Metamaterialien durchgeführt. Dabei wurden fast ausschliesslich hohe Frequenzen untersucht. Die jüngsten Arbeiten an Metamaterialien, welche bei Frequenzen bis hinunter zu Gleichstrom reichen, zeigen jedoch, dass der sehr niedrige Frequenzbereich des elektromagnetischen Spektrums auch äusserst interessant für Metamaterialien ist.

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass Metamaterialien bei niedrigen Frequenzen verwendet werden können um magnetische Felder zu manipulieren. Die Niederfrequenz-Magnetfeldabschirmung dient hierbei als Hauptanwendung. Der Grund sich auf die Abschirmung von niederfrequenten Magnetfeldern zu konzentrieren liegt in deren Wichtigkeit bezüglich der damit verbundenen Vorschriften und in den unerwünscht hohen Kosten herkömmlicher Abschirmungsmethoden. Dies betrifft auch die erzeugten Magnetfelder von Energieverteilungssystemen, welche fast überall anzutreffen sind.

Es wird numerisch gezeigt, dass die Metamaterialien, welche aus verlustfreien Meta-Atomen bestehen, Magnetfelder abschirmen können, und dass die Abschirmung durch geschickt gewählte inhomogene Metamaterialien verbessert werden kann. Diese werden mit Hilfe einer beschränkten linearen Least-Squares-Optimierung gefunden. Nach den numerischen Untersuchungen wird auch experimentell gezeigt, dass niederfrequente Metamaterialien, bestehend aus einfachen, aus Spulen und Kondensatoren gebildeten LC-Resonatoren die Magnetfelder tatsächlich verringern können. Aufgrund der Verluste in den Resonatoren ist dies aber nur in begrenztem Masse möglich. Die Anwendung von Resonatoren mit höheren Qualitätsfaktoren können diese Verluste reduzieren. Diese Resonatoren

erhöhen jedoch die Kosten, reduzieren die Bandbreite und verursachen hohe Ströme und Spannungen. Ein weiterer Weg diese Verluste zu kompensieren ist die Verwendung von aktiven Schaltungen. Allerdings verursacht aktiver Verlustausgleich auch ernsthafte Probleme, weil aktive Schaltungen sperrig und teuer sein können. Ausserdem haben sie Stabilitätsprobleme und brauchen externe Leistungsquellen und eine Kühlung der aktiven Komponenten. Um diese Probleme zu überwinden wird ein hochentwickeltes rein passives Meta-Atom verwendet. Dieses basiert auf dem Konzept einer geeigneten Phasenverschiebung. Es besteht aus einem kleinen Netzwerk von sechs Kondensatoren und zwei ziemlich kleinen Spulen. Trotz seiner hohen Abschirmungsleistung ist das neue Meta-Atom weder sperrig noch teuer und führt auch keine hohen Ströme oder Spannungen. Ausserdem ist die Bandbreite vergleichbar mit derjenigen der LC-Resonatoren mit tiefen Qualitätsfaktoren. Die signifikante Verbesserung der Abschirmung durch das neue Metamaterial wird auch experimentell gezeigt.

LC-Resonatoren verspüren mechanische Effekte aufgrund der induzierten Ströme in den Spulen. Resonanzeffekte erhöhen diese Ströme und die damit verbundenen Kräfte und Drehmomente, welche auf die Resonatoren wirken. Die Frage, ob es möglich ist, sich selbst anpassende Meta-Atome zu erhalten um die Abschirmung in beliebigen externen Feldern zu erhöhen, führt zu der detaillierten Untersuchung der mechanischen Effekte. Da die Analyse der mechanischen Wechselwirkungen bei zahlreichen gekoppelten Resonatoren äusserst kompliziert und anspruchsvoll ist, werden relativ einfache Konfigurationen untersucht um das Verständnis der mechanischen Effekte zu vertiefen. Konkret werden die wirkenden Kräfte und Drehmomente auf einem einzelnen Resonator im Detail untersucht. Durch das Abstimmen der Frequenz des externen Feldes können die Richtungen der Kräfte und Momente verändert und verschiedene stabile Orientierungen erreicht werden. Die Analyse von Systemen bestehend aus zwei und mehr Resonatoren ist aufgrund der Kopplung zwischen den Resonatoren bereits sehr herausfordernd. Aber solche Systeme bieten viel stärkere und komplexere mechanische Effekte. Ein sehr attraktives Ergebnis dieser mechanischen Effekte ist der "drahtlose Motor", welcher aus einem System zweier gekoppelter Resonatoren besteht. Die Wechselwirkung der beiden Resonatoren bewirkt, dass einer der Resonatoren ein Drehmoment verspürt, welches stets in die gleiche Richtung zeigt. Dies erzeugt dann eine kontinuierliche Drehung. Die grundlegenden Auswirkungen eines einzelnen

Resonators und die des Systems aus zwei Resonatoren, einschliesslich dem "drahtlosen Motor“, werden auch experimentell gezeigt.

Diese interessanten mechanischen Effekte führen zu faszinierenden Ideen über den Metamaterial-Bereich hinaus. Resonatoren werden für drahtlos betriebene Antriebssysteme, bestehend aus unabhängig steuerbaren Elementen, vorgeschlagen. Sogar ein einzelner Resonator wird als funktionierendes Bauteil betrachtet. Die starke Frequenzselektivität der LC-Resonatoren macht sie für Mehrelementsysteme mit individuell adressierbaren Elementen besonders attraktiv. Solche Systeme sind in vielen Anwendungsbereichen von grossem Interesse.