



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



## ردیابی ماده مغناطیسی متحرک با استفاده از مگنتومتر اتمی

آسیه سهیلیان<sup>۱</sup>، ملیحه رنجبران<sup>۱</sup>، محمد مهدی طهرانچی<sup>۱ و ۲</sup>

۱. پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران

آدرس رایانامه: A\_Soheilian@sbu.ac.ir, M\_Ranjbaran@sbu.ac.ir, Teranchi@sbu.ac.ir

چکیده - ردیابی مواد مغناطیسی، یکی از موضوعات چالش برانگیز در زمینه‌های پزشکی، نظامی و حمل و نقل می‌باشد. در این پژوهش روشی برای ردیابی مواد مغناطیسی بر پایه حسگر اتمی ارائه شد. این حسگرها علاوه بر اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از حرکت ماده، قابلیت ثبت تغییرات گرادیان میدان ناشی از آن را دارند. به منظور بررسی رفتار جسم مغناطیسی متحرک با حسگر مگنتومتر اتمی، از میکروسیم‌های فرومغناطیسی با طول و سرعت‌های متفاوت استفاده شد. نتایج نشان داد که تغییر طول سیم، اثر مستقیمی بر تغییرات شدت نور خروجی دارد. اما با افزایش سرعت، تغییری در شدت نور خروجی مشاهده نشد.

کلید واژه - ردیابی ماده مغناطیسی، حسگر اتمی، ماده فرومغناطیس، میدان مغناطیسی و میدان گرادیانی.

## Tracking a Magnetic Target by Atomic Magnetometer

Asieh Soheilian<sup>1</sup>, Maliheh Ranjbaran<sup>1</sup>, Mohammad Mehdi Tehranchi<sup>1&2</sup>

1 Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2 Physics Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract- Tracking a magnetic target is a primary concern in clinical applications, military and transportation. We have studied the application of atomic magnetometers for magnetic tracking. These magnetometers could measure the magnetic field and its gradient simultaneously. Here, to trace a moving magnetic object by an atomic magnetometer, we used ferromagnetic micro-wires with different lengths and velocities. Our results showed that the variation in length of micro-wire could change the signal intensity. But, increasing in velocity has no influence on the signal intensity.

Keywords: Tracking Magnetic Target, atomic magnetometer, ferromagnetic material, magnetic field and gradient field.

## مقدمه

ردیابی ماده‌ی مغناطیسی، یکی از موضوعاتی است که امروزه توجهات بسیاری را در تصویربرداری پزشکی و ردیابی خودرو به خود جلب کرده است [۱ و ۲]. مؤلفه‌های وابسته به این ردیابی شامل مکان، جهت و سرعت، براساس اندازه‌گیری دو خاصیت میدان مغناطیسی و گرادیان آن بدست می‌آید. در بسیاری از ردیاب‌های مغناطیسی عمدتاً از پیچ‌های القایی به‌عنوان حسگر استفاده می‌شود که تنها بر اساس ثبت خاصیت میدان مغناطیسی کار می‌کنند. این در حالی است که ثبت گرادیان میدان، اطلاعات دقیق‌تری را از مؤلفه‌های حرکت بدست می‌دهد. در این مقاله، برای ثبت همزمان این دو خاصیت از حسگرهای اتمی استفاده شد [۲].

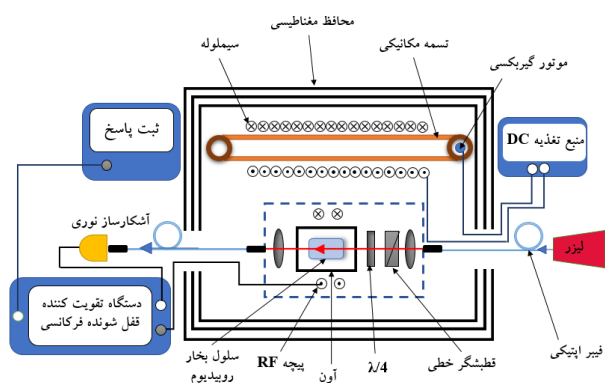
حسگرهای اتمی دارای حساست بالا از مرتبه‌ی  $fT/\sqrt{Hz}$  هستند. اما این حساسیت با عوامل واهلش اسپینی محدود می‌شود که با عنوان واهلش طولی و عرضی شناخته می‌شوند و به ترتیب عامل تغییر چشمداشتی مؤلفه‌ی اسپینی در راستای میدان مغناطیسی و ناهمفازی اسپین‌ها هستند. یکی از عوامل ناهمفازی اسپین‌ها در حرکت تقدیمی، گرادیان میدان است. علی‌رغم اینکه کاهش گرادیان میدان، باعث افزایش حساسیت حسگر می‌شود، اما اندازه‌گیری آن در بعضی از کاربردها مانند ردیابی ماده مغناطیسی ابزاری مفید است [۳].

در این مقاله، به منظور بررسی رفتار یک جسم مغناطیسی متحرک توسط حسگر اتمی از یک سیم فرومغناطیس متحرک استفاده شده است. اثر همزمان تغییرات میدان مغناطیسی و گرادیان آن ناشی از حرکت سیم مغناطیسی بر

پاسخ حسگر بررسی شد. از مؤلفه‌های مؤثر در این اندازه‌گیری، طول و سرعت جسم مغناطیسی متحرک می‌باشد، که تأثیر آن‌ها بر شدت نور خروجی حسگر مورد بررسی قرار گرفته است.

## چیدمان تجربی

شکل ۱، چیدمان حسگر اتمی  $M_x$  را نشان می‌دهد که در یک محافظ مغناطیسی سه لایه قرار داده شده است.



شکل ۱: چیدمان حسگر اتمی  $M_x$

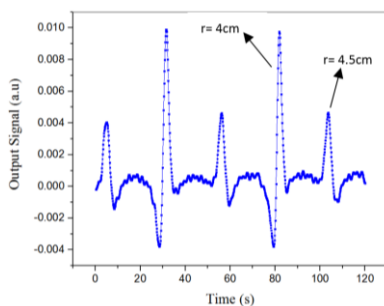
اساس کار این حسگر، بر پایه‌ی ایجاد قطبش اسپینی در سلول اتمی گاز رویدیوم با قطر  $2/5$  سانتی‌متر و طول  $5$  سانتی‌متر است. نور لیزر با قطبش دایروی و طول موج  $794/8$  نانومتر (طول موج منطبق بر خط جذبی  $D_1$  اتم رویدیم) وارد سلول شده منجر به قطبش اسپینی می‌شود. اسپین‌های قطبیده، حول میدان بایاس  $B_0$  و طبق رابطه‌ی لارمور حرکت تقدیمی انجام می‌دهند.

از طرفی با اعمال یک میدان مغناطیسی ضعیف با بسامد  $f_{rf}$ ، تغییرات شدت نور عبوری از سلول توسط آشکارساز نوری متصل به دستگاه تقویت‌کننده‌ی قفل شونده‌ی بسامدی ثبت می‌شود. ماده مغناطیسی مورد استفاده، یک میکروسیم فرومغناطیس با ترکیب شیمیایی  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ ، به

حسگر مغناطیسی می‌شود. در این حالت زمان واهلش عرضی سیستم که متناسب با گرادیان میدان است،  $(T_2 \sim R_{gr})$  دستخوش تغییر می‌شود. از طرفی می‌دانیم، پاسخ هم‌فاز و ناهم‌فاز سیستم به بسامد، به صورت لورنتسی رفتار می‌کند و پهنای آن متناسب با  $1/T_2$  است. بنابراین تغییر میدان گرادیان اثر مستقیمی بر پهنای و شیب پاسخ حسگر دارد [۴].

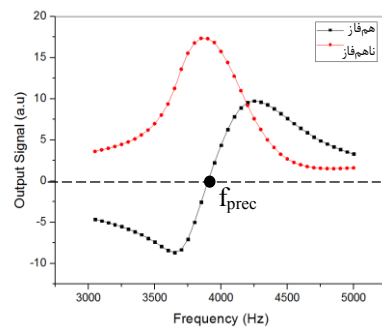
### نتایج

شکل ۳ تغییرات شدت نور ثبت شده با آشکارساز را تحت تاثیر حرکت یک سیم مغناطیسی به طول ۱ سانتی‌متر و سرعت ۱/۳۷ سانتی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهد. هر زمان که سیم مغناطیسی از کنار سلول عبور می‌کند پاسخی به شکل افزایش و کاهش شدت (به صورت قله و دره) مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، پاسخ با دامنه بلندتر (کوتاه‌تر) مربوط به عبور سیم از فاصله‌ی ۴ سانتی‌متر (۴/۵ سانتی‌متر) نسبت به مرکز سلول رویدیم است، به طوری که جهت حرکت آن موازی (خلاف جهت) با میدان بایاس  $B_0$  است. بر اساس توضیحات بخش تجربی، تغییرات شدت نور در ناحیه‌ی خطی حول نقطه‌ی تشدید می‌تواند تحت تاثیر تغییرات همزمان میدان مغناطیسی و گرادیان میدان مربوط به سیم مغناطیسی متحرک باشد.



شکل ۳: تغییرات شدت نور تحت تاثیر حرکت سیم متحرک

طول مشخص و قطر ۲۲۰ میکرومتر است که بر روی یک تسمه با سرعت یکنواخت در فاصله‌ی مشخص از سلول رویدیم حرکت داده می‌شود. سیم فرومغناطیس به طور همزمان با یک سیملوله به طول ۳۶ سانتی‌متر و میدان ۴ میلی‌تسلا مغناطیده می‌شود. سیملوله، میدان نشتی معادل ۲ میکروتسلا در مکان سلول رویدیم تولید می‌کند که بعنوان میدان بایاس  $B_0$  سامانه در نظر گرفته شد. تحت این میدان، پاسخ حسگر اتمی بدست آمده و مؤلفه‌های هم‌فاز و ناهم‌فاز منحنی تشدید مربوط به آن، مطابق با شکل ۲ استخراج شدند.

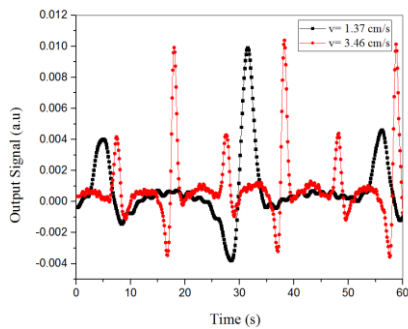


شکل ۲: پاسخ حسگر شامل مؤلفه‌های هم‌فاز و ناهم‌فاز

سپس پاسخ حسگر، با استفاده از دستگاه تقویت‌کننده‌ی قفل‌شونده‌ی بسامدی، در بسامد تشدید  $f_{\text{prec}} = \gamma_F |\vec{B}_0|$  (نقطه عطف مؤلفه هم‌فاز منطبق بر بیشینه مؤلفه ناهم‌فاز) قفل شد. به طوری که حضور یک ماده مغناطیسی، میدان بایاس و در نتیجه بسامد تشدید را طبق رابطه‌ی،

$$f_{\text{prec}} = \gamma_F |\vec{B}_0 + \delta \vec{B}_M| \equiv f_0 + \delta f_M \quad (1)$$

جایجا می‌کند. با استفاده از تقویت‌کننده‌ی بسامدی، هر نوع انحرافی از بسامد  $f_0$  بصورت  $\delta f_M$  ثبت خواهد شد. تغییرات بسامد  $\delta f_M$  متناسب با تغییرات میدان مغناطیسی ماده  $\delta \vec{B}_M$  در راستای میدان بایاس  $\vec{B}_0$  است [۲]. به علاوه حضور ماده مغناطیسی، باعث ناهمگنی میدان در محل



شکل ۵: تغییرات شدت نور تحت تاثیر حرکت سیم با سرعت مختلف

### نتیجه گیری

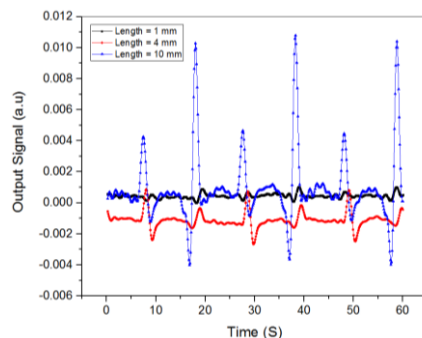
استفاده از حسگر اتمی، مسیری را برای ساخت سامانه‌ی ردیاب مغناطیسی در بسامد پایین فراهم می‌کند. از مؤلفه‌های مؤثر بر پاسخ این حسگر، میدان مغناطیسی و میدان گرادیانی است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با حرکت یک ماده مغناطیسی، بسامد تشدید و پهنای نمودار دچار تغییر شده و در نتیجه تغییراتی در نور خروجی مشاهده می‌شود. به علاوه، اثر طول و سرعت جسم مغناطیسی متحرک بر شدت نور خروجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شدت نور فقط تحت تاثیر تغییر طول ماده تغییر می‌کند.

### مرجع‌ها

1. T. Nara, S. Suzuki, and Sh. Ando, "A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, pp. 3291-3293, 2006.
2. S. Colombo, V. Lebedev, "M(H) dependence and size distribution of SPIONs measured by atomic magnetometry" *International Journal on Magnetic Particle Imaging*, Vol. 2, No. 1, pp 5, 2015.
3. S. Pustelny, D. F. Jackson Kimball, S. M. Rochester, V. V. Yashchuk, D. Budker, "Influence of magnetic-field inhomogeneity on nonlinear magneto-optical resonances," *Physical Review A*, p. 063406, 2006.

۴. ملیحه، رنجبران، "بهبود حساسیت مگنتومتر اتمی  $M_x$  با تکیه بر خواص غیرخطی دینامیک اسپین"، دانشگاه شهید بهشتی، رساله دکتری، ۱۳۹۶.

برای بررسی اثر اندازه ماده مغناطیسی متحرک بر پاسخ حسگر، سه عدد سیم مغناطیسی با طول‌های ۱، ۴ و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هر کدام از سیم‌ها با سرعت ثابت ۱/۳۷ سانتی‌متر بر ثانیه از کنار سلول در فاصله‌ی زمانی ۶۰ ثانیه عبور کردند. در شکل ۴ با کاهش طول سیم کاهش شدت نور خروجی بر حسب زمان مشاهده شد. علت آن کاهش میدان مغناطیسی ناشی از جسم در اثر کاهش مغناطش کل نمونه است. با توجه به شکل، حداقل طول سیم قابل مشاهده با حسگر، ۱ میلی‌متر است که این حساسیت، در اندازه‌گیری‌های آینده ارتقا داده خواهد شد. در اندازه‌گیری بعدی، تغییرات شدت نور تحت تاثیر حرکت سیم مغناطیسی به طول ۱ سانتی‌متر و سرعت‌های ۱/۳۷ و ۴/۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه به دست آمد (شکل ۵). با توجه به شکل با افزایش سرعت، تغییر چشم‌گیری در دامنه تغییرات شدت مشاهده نشده و تنها فاصله‌ی زمانی بین قله تا دره تغییر می‌کند. این فاصله در سرعت ۳/۴۶ سانتی‌متر بر ثانیه (۱/۳۷ سانتی‌متر بر ثانیه) برابر با ۴/۲۲۴ سانتی‌متر (۴/۲۸ سانتی‌متر) است که تقریباً هم اندازه هستند. بنابراین می‌توان گفت که فاصله مکانی قله تا دره هم به سرعت نمونه وابسته نیست و تنها معیاری از اندازه ماده مغناطیسی متحرک است.



شکل ۴: تغییرات شدت نور تحت تاثیر حرکت سیم با طول‌های مختلف