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[۱]، ملیحه رنجبران[۱]، محمد مهدی طهرانچی[۱و۲]

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 پایه‌ی 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. به‌منظور 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[1], Maliheh Ranjbaran[1], Mohammad Mehdi Tehranchi[1&2]

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.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

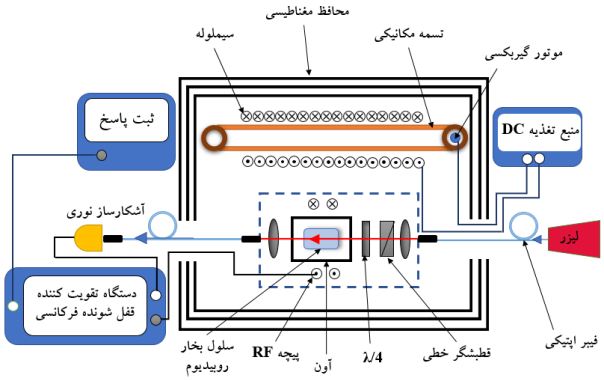
ردیابی ماده‌ی مغناطیسی، یکی از موضوعاتی است که امروزه توجهات بسیاری را در تصویربرداری پزشکی و ردیابی خودرو به خود جلب کرده است [۱ و ۲]. مؤلفه‌های وابسته به این ردیابی شامل مکان، جهت و سرعت، براساس اندازه‌گیری دو خاصیت میدان مغناطیسی و گرادیان آن بدست می‌آید. در بسیاری از ردیاب‌های مغناطیسی عمدتاً از پیچه‌های 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 $\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ 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. علی‌رقم 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

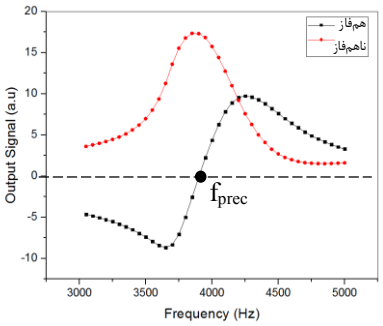
اساس کار این حسگر، بر پایه‌ی ایجاد قطبش اسپینی در سلول اتمی گاز روبیدیوم با قطر ۲/۵ سانتی‌متر و طول ۵ سانتی‌متر است. نور لیزر با قطبش دایروی و طول موج ۷۹٤/۸ نانومتر (طول موج منطبق بر خط جذبی D_1 اتم روبیدیم) وارد سلول شده منجر به قطبش اسپینی می‌شود. اسپین‌های قطبیده، حول میدان بایاس B_0 و طبق رابطه‌ی لارمور حرکت تقدیمی انجام می‌دهند.

از طرفی با اعمال یک میدان مغناطیسی ضیف 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

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

طول مشخص و قطر ۲۲۰ میکرومتر است که بر روی یک تسمه با سرعت یکنواخت در فاصله‌ی مشخص از سلول روبیدیم حرکت داده می‌شود. سیم فرومغناطیس به طور همزمان با یک سیملوله به طول ۳۶ سانتی‌متر و میدان ٤ میلی‌تسلا مغناطیده می‌شود. سیملوله، میدان نشتی معادل ۲ میکروتسلا در مکان سلول روبیدیم تولید می‌کند که بعنوان میدان بایاس B_0 سامانه درنظر گرفته شد. تحت این میدان، پاسخ حسگر اتمی بدست آمده و مؤلفه‌های هم‌فاز وناهم فاز منحنی تشدید مربوط به آن، مطابق با شکل ۲ استخراج شدند.



شکل ۲: پاسخ حسگر شامل مؤلفه‌های هم‌فاز وناهم‌فاز

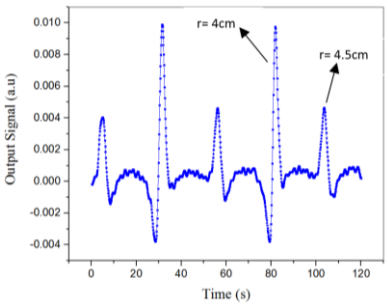
سپس پاسخ حسگر، با استفاده از دستگاه تقویت‌کننده‌ی قفل شونده‌ی بسامدی، در بسامد تشدید $f_{prec} = \gamma_F |\vec{B}_0|$ (نقطه عطف مؤلفه هم‌فاز منطبق بر بیشینه مؤلفه ناهم‌فاز) قفل شد. به‌طوری‌که حضور یک ماده مغناطیسی، میدان بایاس و در نتیجه بسامد تشدید را طبق رابطه‌ی،

$$f_{prec} = \gamma_F |\vec{B}_0 + \delta\vec{B}_M| \equiv f_0 + \delta f_M \qquad (۱)$$

جابجا می‌کند. با استفاده از تقویت کننده‌ی بسامدی، هر نوع انحرافی از بسامد f_0 بصورت δf_M ثبت خواهد شد. تغییرات بسامد δf_M متناسب با تغییرات میدان مغناطیسی ماده $\delta\vec{B}_M$ در راستای میدان بایاس $\vec{B}_0$ است [۲]. به‌علاوه حضور ماده مغناطیسی، باعث ناهمگنی میدان در محل 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 پهنا و شیب پاسخ حسگر دارد [٤].

نتایج

شکل ۳ تغییرات شدت نور ثبت شده با آشکارساز را تحت تاثیر حرکت یک سیم مغناطیسی به طول ۱ سانتی‌متر و سرعت ۱/۳۷سانتی‌متر 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 ٤ سانتی‌متر (٤/٥ سانتی‌متر) نسبت به مرکز سلول روبیدیم است، به‌طوری‌که جهت حرکت آن موازی (خلاف جهت) با میدان بایاس B_0 است. بر اساس توضیحات بخش تجربی، تغییرات تغییر شدت نور در ناحیه‌ی خطی حول نقطه‌ی تشدید می‌تواند تحت تاثیر تغییرات همزمان میدان مغناطیسی و گرادیان میدان مربوط به سیم مغناطیسی متحرک باشد.



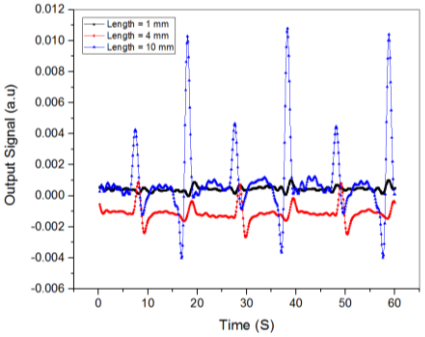
شکل ۳: تغییرات شدت نور تحت تاثیر حرکت سیم متحرک

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

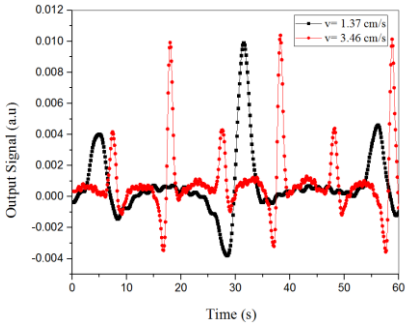
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

برای بررسی اثر اندازه ماده مغناطیسی متحرک بر پاسخ حسگر، سه عدد سیم مغناطیسی با طول‌های ۱، ٤ و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هر کدام از سیم‌ها با سرعت ثابت ۱/۳۷سانتی‌متر بر ثانیه از کنار سلول در فاصله‌ی زمانی ٦۰ ثانیه عبور کردند. در شکل ٤ 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 ٤/٤۰ سانتی‌متر بر ثانیه به‌دست 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 ۳/٤٦ سانتی متر بر ثانیه (۱/۳۷ سانتی متر بر ثانیه) برابر با ٤/۲۲٤ سانتی‌متر (٤/۲۸ سانتی‌متر) است که تقریبا 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



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

نتیجه‌گیری

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. به‌علاوه، 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" I*nternational 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 Mx با تکیه بر خواص غیرخطی دینامیک اسپین"، دانشگاه شهید بهشتی، رساله دکتری، ۱۳۹۶.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]