

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی برق

عنوان:

آنتن های مکانیکی

استاد:

دکتر ابراهیم زاده

نگارش:

محمدرضا غلامی

بررسی مخابرات آنتن مکانیکی فرکانس ابر پایین از نوع آهنربای دائمی

در مخابرات پهنای فرکانس ابر پایین (۳۰-۳۰۰ هرتز) آنتن‌های سنتی منطقه بزرگی را پوشش می‌دهند و بازده تابشی پایینی دارند. برانگیختگی امواج الکترومغناطیسی توسط حرکت مکانیکی مگنت‌های (آهنرباهای) دائمی، فناوری مینیاتورسازی مخابرات فرکانس ابر پایین را ممکن می‌سازد. این مقاله برای تکنیک مینیاتورسازی، یک چارچوب معماری مخابراتی فرکانس ابر پایین را پیشنهاد می‌کند. بمنظور دستیابی به مخابرات با کیفیت بالا، آنالیزهای تئوری و تاییدات آزمایشی برای هر ماژول واحد در چارچوب ساختاری انجام می‌شود. برای واحد تابش، پارامترهای مغناطیس دائمی و فواصل مخابراتی بمنظور ایجاد مدل آنالیز توان تشعشی مغناطیسی دائم و مطالعه مشخصه‌های تابشی مگنت‌های دائمی دورانی معرفی می‌شوند. برای واحد رسیور، روش تعیین مشخصه نرمالیزاسیون حساسیت بر مبنای نسبت ولتاژ نویز حرارتی کوئل به ولتاژ القایی پیشنهاد می‌شود. بر مبنای مدل آنالیزی حساسیت، یک کوئل مربعی طراحی می‌شود که الزامات مخابرات آنتن مکانیکی را برآورده کرده و یک پلتفرم آزمایشی ساخته می‌شود. آزمایشاتی درباره عوامل موثر بر توان تشعشی و حساسیت کوئل انجام شده و آزمایشاتی درباره مخابرات مدولاسیون سیگنال 2FSK بمنظور اثبات امکان پذیر بودن چارچوب ساختار مخابراتی و مخابراتی انجام می‌شود. حجم مگنت‌های دائمی آنتن مکانیکی در آزمایشات همه زیر 10cm^3 است و فرکانس عملکرد بطور پیوسته از 0 تا 250 هرتز تغییر می‌کند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که توان تشعشی میدان در فاصله نزدیک مگنت دائمی دوار متناسب با مربع حجم مگنت دائمی دورانی است؛ حساسیت کوئل متناسب با تعداد دورها و مساحت کوئل است. با کنترل سرعت در وضعیت واقعی، می‌توان فرکانس سیگنال را کنترل کرده و آن را مدوله کرد.

۱- مقدمه

امواج الکترومغناطیسی فرکانس ابر پایین (SLF) قابلیت پراش و نفوذ در زیرآب مناسب، اتلاف کم در مسیر آبی یا خاکی، و قابلیت ضد تداخلی قدرتمندی دارد. بنابراین، امواج الکترومغناطیس فرکانس ابر پایین در عملیات زیردریایی، اورژانس معدن، پیش‌بینی زمین‌لرزه، و نفوذ کاربرد دارند. مخابرات و مخابرات زمینی و دیگر حوزه‌ها پتانسیل کاربردی عظیمی دارند [۱]. در سالهای اخیر، توجهات و نیز ابزارهای موثری برای تحقق مخابرات زیردریایی گسترش یافته است [۲].

در کاربردهای عملی، آنتن‌های فرستنده کنونی همگی آنتن‌های الکتریکی کوچکی (ESA) هستند که متکی بر جریان نوسانی رسانا برای تحریک امواج الکترومغناطیسی می‌باشند. ESA آنتنی است که ابعاد آن در مقایسه با طول موج امواج الکترومغناطیسی در پهنای فرکانسی عملکردی آن کوچک است و ابعاد آن در رابطه $(l/\lambda) \leq (1/2\pi)$ صدق می‌کند [۴۳]. امروزه، سه نوع آنتن الکتریکی کوچک اصلی وجود دارد: آنتن نوسانی الکتریکی، آنتن نوسانی مغناطیسی، و آنتن ترکیبی. این آنتن‌ها با استفاده ترکیبی از مواد ساختاری کامپوزیت، فیدهای چندنقطه‌ای، چوک‌های هم‌محور، و دیگر فناوری‌ها بدست می‌آیند [۶۵]. پهنای باند و بهره آنتن را می‌توان با این تکنیک‌ها افزایش داد.

بعلت اینکه طول آنتن کوچک بسیار کوچکتر از طول موج کاری است، مقاومت معادل آن اغلب بسیار کوچک است و بخش راکتانس آن در امپدانس غالب است و باعث می‌شود تغییر فرکانس تاثیر قابل توجهی بر امپدانس ورودی آنتن داشته باشد. چو و همکاران [۸۷] یک محدودیت تئوری برای ESA بر مبنای فاکتور کیفیت تابش Q_{rad} ایجاد کردند: سایز کوچکتر آنتن، منجر به Q_{rad} بزرگتر و توان تشعشعی و بازدهی تابشی کوچکتر آنتن تحت شرایط توان تشعشعی خاصی می‌شود. بعلت محدودیت‌های تئوری فوق‌الذکر، عملکرد تابشی ESA مستقیماً توسط ابعاد آنتن محدود می‌شود بطوری که سیستم‌های فرستنده الکترومغناطیسی فرکانس پایین کنونی مشکلاتی چون آنتن‌های حجیم، تجهیزات پیچیده، بازده تابشی پایین، توان انتقالی بسیار زیاد، و مصرف انرژی را دارا هستند.

برای برطرف کردن این مشکلات، در فوریه ۲۰۱۶، آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفته دفاعی (DARPA) ابتدا مفهوم و ایده پروژه "آنتن مکانیکی" (MA) برای جایگزین کردن ESA سنتی که متکی به برانگیختگی جریان نوسانی است، را پیشنهاد داد [۹ و ۱۰]. MA امواج الکترومغناطیسی فرکانس ابر پایین را با فعال کردن یک دوقطبی الکتریکی یا مغناطیسی برانگیخته و گسیل می‌کند. MA امکان جدیدی برای تابش امواج الکترومغناطیسی فرکانس ابر پایین فراهم می‌کند [۱۱ و ۱۲].

دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی متعددی در کشور و خارج از کشور، با الهام از این پروژه‌ها تحقیقات و آزمایشات اولیه آنتن‌های مکانیکی را آغاز کردند. تحت برخی شرایط، الکتریت‌ها بازده تابشی بیشتری نسبت به مگنت‌های دائمی دارند. با این وجود، برخی مشکلات فنی در تولید بار استاتیک با چگالی بالا، پیوسته، و پایدار در الکتریت‌ها وجود دارد. بنابراین، محققان بسیاری مگنت‌های دائمی دوار را بعنوان ماژول فرستنده آنتن مکانیکی انتخاب می‌کنند. تحقیق رفرنس [۱۳] طراحی یک آنتن نوین برای تولید امواج الکترومغناطیسی فرکانس پایین از مگنت‌های دائمی دوار را توصیف می‌کند. در سال ۲۰۱۷، مادانایاک سیستم مکان‌یابی زیردریایی متشکل از حداقل سه آنتن مکانیکی بعنوان نقاط مرجع و یک مگنتومتر برداری چند بعدی بر روی وسایل نقلیه زیردریایی بدون سرنشین (UUV) بعنوان رسیور را پیشنهاد داد. او و همکاران، فرض کردند میدان مغناطیسی تولید شده توسط دوقطبی متغیر با

زمان دارای توزیع فضایی یکسانی همانند میدانی که توسط دو قطبی‌های استاتیک تولید می‌شود، است و روابطی برای میدان مغناطیسی دوقطبی دورانی مکانیکی بدست آوردند اما آن را بطور عملی مطالعه نکردند [۱۴]. در سال ۲۰۱۷، هوگ دریافت که سیستم‌های مغناطیسی اسپینی تحت تاثیر محدودیت چو هارینگتون در مخابرات ULF قرار نمی‌گیرند و رابطه‌ای برای میدان مغناطیسی در میدان‌های دور بدست آورد [۱۵]. با این وجود، مگنت اسپینی دائمی، مانند واحد تابش آنتن مکانیکی ULF با طول موج بسیار بلند، برای میدان‌های نزدیک مناسب‌تر است. در سال ۲۰۱۸، گونگو همکاران رابطه‌ای برای میدان الکترومغناطیسی مگنت دائمی دوار در فضا پیدا کردند [۱۶]. چن و همکاران تابش دوقطبی الکتریکی را برای این حرکت خاص دوران یکنواخت، که از تئوری‌ها نتیجه شده بود، بررسی کردند [۱۷] اما بصورت عملی یا شبیه‌سازی مطالعه نکردند.

پروژه آنتن مکانیکی شامل دو میدان تکنیکی (TA1, TA2) است که به سه فاز (فاز یک تا سه) تقسیم می‌شوند تا مشکل پیاده کردن پروژه را کاهش دهند. شدت میدان مغناطیس متغیر با زمان در حین عملکرد یکنواخت سه فاز TA1 برابر 1~100 Ft@1km است و البته سیگنال شدت میدان مغناطیسی fT بسیار ضعیف است. برای دریافت سیگنال به سنسورهای مغناطیسی با حساسیت بالا نیاز است. امروزه، فناوری سنسور میدان مغناطیسی شامل کوپل‌های القایی، مگنتومترهای پمپی اپتیکی، مگنتومترهای اسپین پرتونوی (هسته‌ای)، و مگنتومترهای تداخلی کوانتومی ابر رسانایی با رزولوشن تا سطح pT است [۱۸ و ۱۹]. کوپل‌های القای مغناطیسی، بعلاوه ساختار ساده، مصرف برق پایین، عملکرد پایدار، و رزولوشن بالا در واحدهای دریافت آنتن مکانیکی استفاده می‌شوند [۲۰]. مقالات داخلی و بین‌المللی تحقیقات مفیدی درباره ایجاد یک مدل ریاضیاتی دقیق برای آنالیز مشخه‌های انتقالی کوپل‌های القای مغناطیسی در حوزه فرکانس ابر پایین انجام داده‌اند. این تحقیقات عمدتاً بر محاسبه دقیق پارامترهای مشخصه الکتریکی معادل (مقاومت معادل R، القای معادل L، و ظرفیت معادل C)، نسبت سیگنال به نویز کوپل، و امکان‌سنجی آن در میدان‌های فرکانس پایین تمرکز داشتند.

مقالات بسیاری بمنظور محاسبه دقیق ظرفیت، القای، و مقاومت معادل کوپل تحقیقات متعددی انجام داده‌اند. ژانگ تابع انتقال کوپل را بر مبنای مدل تئوریک مدار معادل کوپل ارائه داد که مدل محاسباتی ظرفیت معادل را بهبود بخشیده و مشخصه‌های کوپل همچون فرکانس رزونانس، تابع انتقال، و حساسیت را پیش‌بینی می‌کند و دقت مدل را از طریق آزمایشات تایید می‌کند [۲۱] اما مطالعه پارامترهای مشخصه‌های الکتریکی معادل عمدتاً بر پهنای باند فرکانس بالا تمرکز دارد و در حوزه فرکانس ابر پایین بطور مفصل بررسی نشده است. برای بررسی روش‌های بهبود نسبت سیگنال به نویز کوپل، اسلاومیر تومانسکی اصول و مشخصه روش‌های سیم پیچی کوپل را آنالیز کرده و روشی برای طراحی و بهبود پارامتری برای نسبت سیگنال به نویز و حساسیت ارائه داده است [۲۲]. بورش و همکاران، بمنظور امکان‌پذیری کوپلها در حوزه فرکانس پایین، رسیوری متشکل از کوپل متعامد سه محوری و کارت ثبت داده‌های فرکانسی اکوستیکی ۲۴ بیتی طراحی کرد و اثرات مکانیابی را بطور تئوری و آزمایشگاهی

آنالیز کرد و نشان داد که این کویلها در فرکانس زیر ۵۰۰ هرتز در فواصل بزرگتر از ۱۰۰ متر امکان پذیر و عملی است [۲۳].

در این مقاله، بر مبنای تولید سیگنال جدید و مکانیزم ارسال رادیویی، یک ساختار آنتن مکانیکی پیشنهاد می‌شود که عمدتاً شامل یک ماژول ارسال سیگنال و یک ماژول دریافت کننده سیگنال است. بر مبنای ماژول ارسال سیگنال، یک مدل تحلیلی برای توان تشعشعی مگنت دائمی دوار ارائه می‌شود. بر مبنای ماژول دریافت سیگنال، یک کویل بعنوان سنسور مغناطیسی انتخاب می‌شود تا سیگنال را بر اساس شدت تابش منبع میدان مغناطیسی دریافت کند. در سنسورهای مغناطیسی کویلی، روشی برای تعیین مشخصه نرمالیزه حساسیت بر مبنای نسبت نیروی پتانسیل الکتریکی القایی کویل به ولتاژ نویز حرارتی پیشنهاد می‌شود. در این مقاله، یک نمونه اولیه مخابراتی SLF بر اساس مدل حساسیت کویل و و مدل توان تشعشعی ارائه می‌شود. درستی مدل تحلیلی و امکان‌سنجی مخابرات 2fsk توسط انجام آزمایشات روی نمونه اولیه تایید می‌شود.

۲- سیستم مدل مخابراتی آنتن مکانیکی

۲-۱ ساختار آنتن مکانیکی

آنتن‌های مکانیکی فرکانس ابر پایین، سیگنال‌هایی از طریق نوسانات مکانیکی مگنت‌های دائمی یا الکتریت‌ها، بمنظور ارسال امواج رادیویی فرکانس ابر پایین، تولید می‌کنند. الکتریت‌ها یا مگنت‌های دائمی اجزای اصلی تابشی آنتن مکانیکی هستند. الکتریت‌ها و مگنت‌های دائمی را می‌توان بترتیب معادل دوقطبی الکتریکی و دوقطبی مغناطیسی در نظر گرفت. مطابق با قانون کولن، الکتریت معادل مجموعه‌ای از بارها است که می‌توان آن را معادل یک کویل جریان دار (تحریک شده) در نظر گرفت. مگنت دائمی معادل مجموعه‌ای از دوقطبی‌های مغناطیسی است که می‌توان آن را معادل دو صفحه باردار در نظر گرفت. مدل منبع میدان آنتن مکانیکی با مقایسه قابلیت دومدل معادل برای تولید شدت میدان مغناطیسی انتخاب می‌شود. پارامترهای مدل مگنت دائمی و کویل جریان دار در جدول ۱ نشان داده شده است.

مدل مگنت دائمی و کویل جریان دار در شکل ۱ نشان داده شده است. شدت مغناطیسی مگنت دائمی برابر $M=1.1 \times 10^6 \text{ A/m}$ است و رابطه شدت میدان مغناطیسی H برابر است با :

$$H = N \times \frac{I}{L} \quad (1)$$

که در آن N تعداد دورهای کویل تحریک و I جریان تحریک، و L طول مدار مغناطیسی موثر کویل تحریک است.

مطابق با رابطه ۱، کوپل تحریک با سیمی به قطر 12AWG و تعداد دورهای ۳۳۰ دور جریان تحریک ۱۰۰ آمپر اعمال می‌کند که می‌تواند میدان مغناطیسی به شدت $h=1.1 \times 10^6$ A/m را تابش کند. با این وجود، کوپل 12AWG می‌تواند ماکزیمم جریان ۱۴,۹ آمپر را تحمل کند. بنابراین، بمنظور تابش میدان مغناطیسی با شدت $h=1.1 \times 10^6$ A/m، نیاز به هشت کوپل جریان دار با ابعاد یکسان برای اعمال جریان ۱۲,۵ آمپری است. در نتیجه در این مقاله مگنت‌های دائمی بعنوان واحد تابش آنتن مکانیکی فرکانس ابر پایین انتخاب می‌شوند.

برای کنترل بهتر موتور محرک و دریافت بهتر سیگنال‌های مخابراتی، ساختار آنتن مکانیکی نشان داده شده در شکل ۲ پیشنهاد می‌شود که عمدتاً شامل ماژول ارسال سیگنال و ماژول دریافت سیگنال است. ماژول ارسال سیگنال متشکل از منبع میدان تابشی (مگنت دائمی)، موتور محرک، مبدل توان، کنترلر، و ژنراتور سیگنال است. ژنراتور سیگنال، سیگنال‌های موردنیاز برای مخابرات را به اینورتر و مبدل توان ارسال می‌کند. اینورتر سیگنال‌هایی برای کنترل سرعت موتور محرک می‌دهد. موتور محرک مگنت دائمی را فعال می‌کند تا میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید کند و این میدان امواج الکترومغناطیسی تابش می‌کند. ماژول دریافت سیگنال عمدتاً متشکل از سنسور مغناطیسی و پیش تقویت کننده است. سنسور مغناطیسی، سیگنال‌های میدان مغناطیسی متغیر با زمان را دریافت کرده و از طریق پیش تقویت کننده پرداز می‌کند تا سیگنال مخابراتی بدست آمده و مخابرات آنتن مکانیکی کامل شود.

۲-۲ ماژول بارگیری اطلاعات و روش کنترل سرعت آن

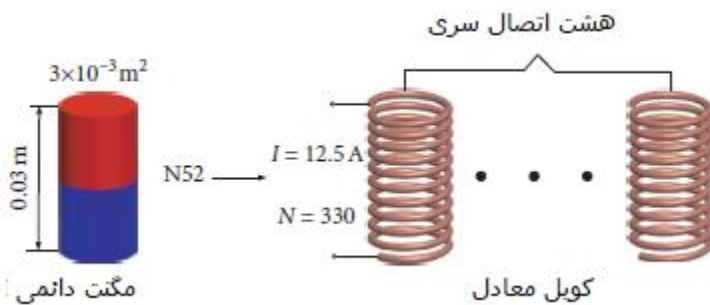
برخلاف سیستم‌های حامل فرکانس بالا، سیستم‌های مخابرات فرکانس ابر پایین نوعاً دارای پهنای باند باریک هستند اما حساسیت و آسیب‌پذیری کمتری در برابر تداخل‌های خارجی دارند. روش‌های مدولاسیون در سیستم ارسال ناوبری مخابرات فرکانس ابر پایین اغلب به سه دسته مدولاسیون دامنه‌ای و مدولاسیون فرکانسی و مدولاسیون فازی تقسیم می‌شوند. با وجود این، بعلاوه طول موج عملکردی بسیار بزرگ سیستم‌های مخابراتی SLF، که در محدوده میدان نه خیلی دور فعالیت می‌کنند، اطلاعات مدولاسیون دامنه پیچیده است و به آسانی مدوله نمی‌شود. مدولاسیون فازی نیاز به کنترل دقیق وضعیت دوران موتور در زمان‌های مختلف دارد. دستیابی به موتورهای فرکانس ابر پایین فعال در سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه یا بیشتر مشکل است. بنابراین، مدولاسیون فرکانسی برای مدولاسیون مخابرات آنتن مکانیکی SLF استفاده می‌شود.

امروزه مدولاسیون فرکانسی از روش‌های مدولاسیون با پوش ثابت مانند FSK و MSK استفاده می‌شود. آنتن‌های مکانیکی اطلاعات را با تغییر وضعیت حرکت دورانی منبع میدان بارگیری می‌کنند. بنابراین، پارامترهای فرکانسی باید به وضعیت دورانی منبع میدان نگاشت شوند تا پارامترهای ورودی سیستم دورانی سروو (خودکار) تولید شوند.

این مقاله بمنظور بارگیری اطلاعات FSK، روش بارگیری اطلاعات مبتنی بر کنترل N سرعت دوران منبع میدان را پیشنهاد می‌کند که مدولاسیون فرکانسی را به کنترل سرعت میانگین دوران \bar{n} نگاشت می‌کند. اگر 2FSK را به عنوان مثال در نظر بگیریم، شکل ۳ بر مبنای کنترل \bar{n} ، دیاگرام شماتیک تولید سیگنال‌های کنترل بر اساس داده‌های کد را نشان می‌دهد.

جدول ۱- جدول پارامتری مگنت دائمی و کوئل تحریک

Model name	مگنت دائمی	کوئل تحریک
مواد	N52	مس ($d = 2 \text{ mm}$)
بخش مداری	$3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	$3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
ارتفاع	0.03 m	0.03 m
شکل	استوانه ای	استوانه ای



شکل ۱- دیاگرام مدل مگنت دائمی و کوئل تحریک

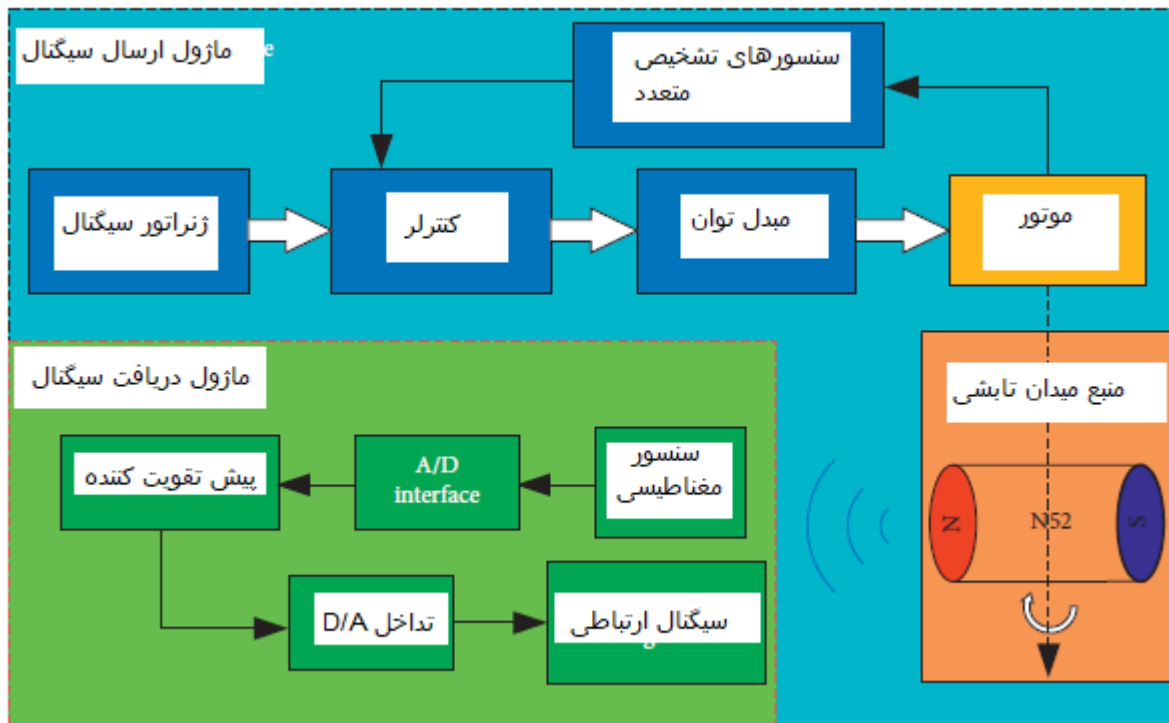
۲-۳ پایستگی انرژی در آنتن مکانیکی

سیستم سروو دوران آنتن مکانیکی، توان الکتریکی ورودی P_{in} را به گشتاور دورانی منبع میدان، انرژی الکترومغناطیسی تابش شده توسط منبع میدان، اتلاف توان بدون استفاده، اتلاف اصطکاک مکانیکی، و اتلاف دی‌الکتریک تبدیل می‌کند. اتلاف مقاومتی شامل اتلاف مسی موتور، اتلاف مبدل توان و کنترلر و غیره است. اتلاف اصطکاک مکانیکی انرژی موردنیاز برای غلبه بر اصطکاک ناشی از بلبرینگ، مقاومت سیم، و غیره است. اتلاف دی‌الکتریک شامل دو بخش است: (۱) جریان ادی و اتلاف هیترزیس هسته موتور و (۲) ذخیره انرژی میدان نزدیک

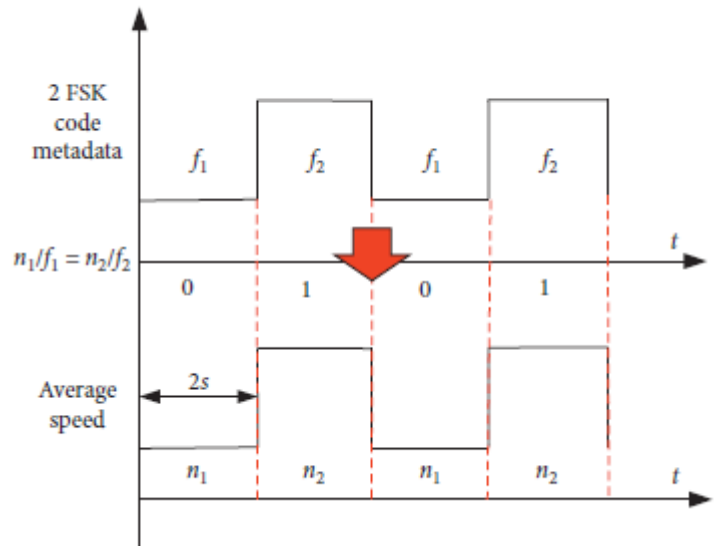
که در آن منبع میدان دورانی یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید می‌کند. بنابراین، خروجی توان مکانیکی موتور سنکرون مگنت دائمی را بصورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$P_M = P_{in} - P_R - P_{\Omega} - P_{m_1} = P_{m_2} + P_{rad}, \quad (2)$$

که در آن P_R اتلاف مقاومتی است؛ p_{Ω} اتلاف اصطکاک مکانیکی است؛ P_{m_1} اتلاف هیستریزس و جریان ادی هسته موتور است؛ P_{m_2} اتلاف دی الکتریک میدان الکترومغناطیسی متغیر با زمان است که توسط دوران منبع میدان تولید شده است؛ و P_{rad} توان تشعشعی است.



شکل ۲- دیاگرام شماتیک ساختار آنتن مکانیکی



شکل ۳- دیاگرام شماتیک تولید سیگنال کنترل سرعت در 2FSK

مطابق با رابطه پایستگی انرژی فوق، بازده تشعشی آنتن مکانیکی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{m_2} + P_{\text{rad}} + P_R + P_{\Omega} + P_{m_1}} \quad (3)$$

۳- تحقیق مشخصه توزیع میدان مغناطیسی و فناوری دریافت مغناطیسی

در حال حاضر، فناوری دریافت مغناطیسی برای مخابرات الکترومغناطیسی فرکانس ابر پایین استفاده می‌شود. ساخت نمونه اولیه آنتن مکانیکی برای برطرف کردن نیازهای مخابراتی کلید این تحقیق است. در این تحقیق نشان داده شد که شدت تابش مگنت‌های دائمی دوار و عملکرد دریافت سنسورهای مغناطیسی مستقیماً بر برد مخابراتی تاثیر می‌گذارد. بنابراین، مطالعه مشخصه میدان مغناطیسی متغیر با زمان تابش شده توسط مگنت‌های دائمی دوار و نیز حساسیت سنسور مغناطیسی بسیار مهم و حیاتی است. یک چارچوب تئوری برای ایجاد مدل مخابراتی آنتن مکانیکی با عملکرد بالا در این مقاله ارائه می‌شود.

۳-۱ توزیع میدان مغناطیسی و مشخصه میرایی مگنت‌های دائمی دوار

۳-۱-۱ مدل فیزیکی مگنت دائمی دوار

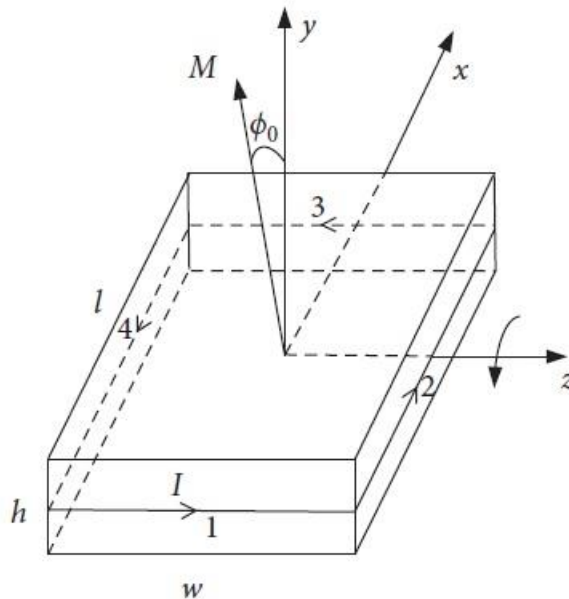
مدل فیزیکی مگنت دائمی دوار در شکل ۴ نشان داده شده است. فرض می‌کنیم که ابعاد مگنت l, w, h باشد. در محیط بی‌نهایت یکنواخت، آهنربای دائمی مرکز هندسی را به عنوان مبدأ می‌گیرد و با یک چرخش ثابت حول محور z با سرعت زاویه ای ω حرکت می‌کند. زاویه بین جهت مغناطش و محور y که دوران از آنجا شروع می‌شود، برابر ϕ_0 است.

مطابق با مدل جریان آمپر، مگنت دائمی که بطور یکنواخت مغناطیده شده است، معادل جریان آمپر سطح خود است. جهت جریان در جهت پیکان نشان داده شده در شکل ۴ است و چگالی جریان سطحی معادل برابر است با:

$$\alpha = M \times n, \quad (4)$$

که M ثابت چگالی جریان سطحی معادل و n بردار یکه در جهت مغناطش خود مگنت دائمی است.

در شکل ۴ جریان‌های سطحی بر سطوح مستطیلی قطبی موازی با جهت مغناطش توزیع می‌شوند (در شکل ۴، چهار وجه با برچسب‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ مشخص شده‌اند) و هیچ جریان سطحی روی دیگر سطوح وجود ندارد.



۳-۱-۲ توزیع میدان مغناطیسی و مشخصه‌های میرایی

جریان معادل مگنت دائمی دوار تنها در سطوح آن توزیع می‌شود و پتانسیل تاخیری $A(r,t)$ بصورت زیر بیان می‌شود:

$$A(r,t) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{\Omega(t)} \frac{J(r', t - (R/c))}{R} dV, \quad (5)$$

که μ تراوایی مغناطیسی محیط ارسالی است؛ R فاصله بین نقطه میدان r و نقطه منبع r' است؛ c سرعت نور است؛ $\Omega(t)$ محدوده انتگرالی است (چهار وجه ۱ و ۲ و ۳ و ۴ که در شکل ۴ مشخص شده‌اند)، و $J(r', t - R/c)$ چگالی جریان سطحی نقطه منبع r' در زمان $t' = t - R/c$ است.

برای مگنت‌های دائمی نشان داده شده در شکل ۴، پتانسیل تاخیری $A(r,t)$ را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$A(r,t) = B_0 V e^{-j\phi_0} \frac{e^{j(kr - \omega t)}}{4\pi r^3} [-z(x + jy) + (x + jy)z(1 - jkr)], \quad (6)$$

که $B_0 = \mu M$ و V مغناطش باقی‌مانده (بازماندگی) و حجم مگنت دائمی است؛ $k = \omega/c$ عدد موج است.

بر مبنای پتانسیل تاخیری $A(r,t)$ و مدل جریان آمپری، معادلات شدت القای مغناطیسی $B(r,t)$ و میدان الکتریکی $E(r,t)$ مگنت دائمی دوار در r بدست می‌آید:

$$B(r,t) = \nabla \times A(r,t) = \frac{B_0 V e^{j(kr - \omega t)}}{4\pi r^3} \left\{ -r(2j + kr)\sin\theta + \theta(j + 2kr - jk^2 r^2)\cos\theta + \phi[-1 + (2jkr + k^2 r^2)\cos^2\theta] \right\} e^{j(\phi - \phi_0)}, \quad (7)$$

$$E(r,t) = \frac{j}{\omega \epsilon \mu} \nabla \times B(r,t) = j \frac{\eta M V e^{j(kr - \omega t)}}{4\pi r^3} \left\{ r \frac{3}{2} (2 - jkr)\sin 2\theta + \theta(-2 + 2jkr + k^2 r^2)\cos^2\theta + \phi[-2j - (2kr - jk^2 r^2)\cos\theta] \right\} e^{j(\phi - \phi_0)}, \quad (8)$$

که θ زاویه قطبی است؛ زاویه بین خط متصل از مبدا به نقطه آزمایشی و جهت مثبت محور Z است. ϕ زاویه سمتی است، که زاویه بین خط متصل از مبدا به نقطه آزمایشی و جهت مثبت محور X است؛ $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ امپدانس موجی محیط انتقالی است. در میدان نزدیک، $kr \rightarrow 0$ است. از معادلات ۷ و ۸ می‌بینیم که شدت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در ناحیه میدان نزدیک را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$\mathbf{B}_{\text{near}} = \frac{B_0 V e^{-j\omega t}}{4\pi r^3} \{-r2j \sin \theta + \theta j \cos \theta - \varphi \cos^2 \theta\} e^{j(\phi - \phi_0)}, \quad (9)$$

$$\mathbf{E}_{\text{near}} = j \frac{\eta M V e^{-j\omega t}}{4\pi r^3} \{r3 \sin 2\theta - \theta 2 \cos^2 \theta - \varphi 2j \cos \theta\} e^{j(\phi - \phi_0)}. \quad (10)$$

در میدان نزدیک، شدت میدان مغناطیسی \mathbf{B}_{near} ایجاد شده توسط مگنت دائمی دوار سه مولفه همزمان r, θ, φ دارد. بزرگی شدت میدان مغناطیسی متناسب با مغناطش باقیمانده است و بصورت توان سوم فاصله مخابراتی r کاهش می‌یابد. اختلاف فاز بین شدت میدان مغناطیسی و شدت میدان الکتریکی در میدان ناحیه نزدیک برابر $\pi/2$ است و بنابراین میدان ناحیه نزدیک یک میدان شبه ایستا است.

در میدان دور $kr \gg 1$ ، از معادله‌های ۷ و ۸ می‌بینیم که شدت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بصورت زیر است:

$$\mathbf{B}_{\text{far}} = \frac{B_0 V e^{j(kr - \omega t)}}{4\pi r} \{-\theta j k^2 \cos \theta - \varphi \cos^2 \theta\} e^{j(\phi - \phi_0)},$$

$$\mathbf{E}_{\text{far}} = j \frac{\eta M V e^{j(kr - \omega t)}}{4\pi r} \{-\theta j k^2 \cos^2 \theta - \varphi k^2 \cos \theta\} e^{j(\phi - \phi_0)}. \quad (11)$$

در میدان دور، شدت میدان مغناطیسی \mathbf{B}_{far} تولید شده توسط مگنت دائمی دوار دو مولفه همزمان θ و φ دارد. در ناحیه میدان دور، دامنه هر دو میدان الکتریکی و مغناطیسی همفاز بوده و با نسبت $1/r$ کاهش می‌یابند. بنابراین، میدان دور یک موج کروی با تابش کامل انرژی است.

برای محیط‌های بدون اتلاف، شار انرژی تشعشی S مگنت دائمی دوار را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu} (\mathbf{E}_{\text{far}} \times \mathbf{B}_{\text{far}}) = -\frac{\eta B_0^2 V^2 e^{2j(kr - \omega t)}}{64\pi^2 \mu r^2} j k^2 \sin^2(2\theta) e^{2j(\phi - \phi_0)}. \quad (12)$$

بر حسب رابطه بین توان تشعشی و چگالی شار انرژی، توان تشعشی مگنت دائمی دوار را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$P_{\text{nradi}} = \int S ds = \oint |S| r^2 \sin \theta d\theta d\phi = \frac{\eta B_0^2 V^2}{32\pi^2 \mu_0 r^4}, \quad (13)$$

$$P_{\text{fradi}} = \int S ds = \oint |S| r^2 \sin \theta d\theta d\phi = \frac{7\eta B_0^2 V^2}{480\pi^2 \mu}. \quad (14)$$

معادله ۱۳ نشان می‌دهد که توان تشعشعی میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید شده توسط مگنت دائمی دوار در میدان نزدیک متناسب با مربع مغناطش باقیمانده و حجم مگنت دائمی، و بطور معکوس متناسب با یک چهارم فاصله مخابراتی است. از معادله ۱۴ می‌توان دید توان تشعشعی میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید شده توسط مگنت دائمی دوار در میدان دور متناسب با مربع مغناطش باقیمانده مگنت دائم و حجم مگنت دائم است و مستقل از فاصله مخابراتی است.

۲-۳ مطالعه حساسیت سنسور مغناطیسی

معادله ۹ نشان می‌دهد که یک مگنت دائمی از مواد NdFeB گرید N52 و مغناطش باقیمانده 1.38T به ابعاد 100×200mm، با حرکت دورانی، یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان با شدت 125fT در فاصله 1km تولید می‌کند. بنابراین، رزولوشن سنسور مغناطیسی در واحد دریافت مخابراتی آنتن مکانیکی باید برابر $125\text{fT}/\sqrt{Hz}$ باشد و بازه آشکارسازی و تشخیص میدان مغناطیسی باید کمتر از 125fT باشد.

۱-۲-۳ مدل سنسور مغناطیسی

بازه قابل آشکارسازی و رزولوشن سنسورهای مغناطیسی استاندارد در جدول ۲ نشان داده شده است. از جدول می‌بینیم که سنسورهای مغناطیسی بهینه برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی متغیر با زمان، تداخل‌سنج‌های کوانتومی ابررسانا و کوپل‌ها هستند. کوپل بعلا ساختار ساده، ساخت معمولی، و عملکرد پایدار نیاز کمی به محیط برای مخابرات SLF دارد. ساخت ساختار مخابراتی آنتن ساده است. بنابراین، در این تحقیق، از کوپل بعنوان ماژول دریافت سیگنال آنتن مکانیکی SLF استفاده می‌شود.

مطابق با قانون القای الکترومغناطیس، کوپل پتانسیل الکتریکی القایی با همان فرکانس میدان مغناطیسی متغیر با زمان آنتن فرستنده، تولید می‌کند. کوپل بعنوان یک سنسور مغناطیسی عمل می‌کند و حساسترین جهت آن در راستای عمود است. بنابراین، سیستم مخابراتی آنتن مکانیکی از کوپل مربعی متعامد سه محوره برای دریافت سیگنال استفاده می‌کند. میدان مغناطیسی متغیر با زمان در هر جهتی در فضا با آشکارسازی میدان مغناطیسی متغیر با زمان در جهت‌های X و Y و Z و با کوپل متعامد سه محوره تعیین می‌شود.

۲-۲-۳ مدل حساسیت نرمالیزه (بهنجار) برای حساسیت سنسور مغناطیسی

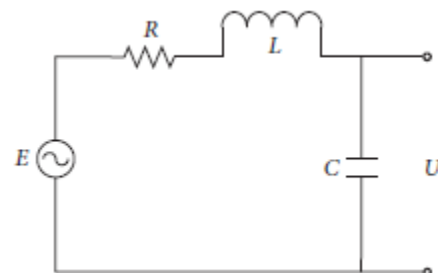
آنتن مکانیکی فرکانس ابر پایین از فناوری دریافت سیگنال مغناطیسی کوپل مربعی متعامد سه محوره استفاده می‌کند. توانایی ساخت یک کوپل که الزامات مخابراتی را برآورده کند، نکته کلیدی این تحقیق است. در میدان مغناطیسی متغیر با زمان، ولتاژ القایی کوپل نشان‌دهنده مقدار میانگین سیگنال تشخیص است و ولتاژ حرارتی نویز نشان‌دهنده مینیمم مقدار سیگنال تشخیص است. بنابراین در این تحقیق، حساسیت کوپل توسط نسبت معادل ولتاژ نویز حرارتی آنتن و ولتاژ القایی میدان مغناطیسی متغیر با زمان تعیین می‌شود. مدل نرمالیزه حساسیت برای ارائه مبنای تئوریک طراحی کوپل سنسور مغناطیسی با عملکرد بالا ایجاد شده است.

(۱) ولتاژ القایی میدان مغناطیسی متغیر با زمان

مطابق با اصل توزیع معادل پارامترهای مشخصه الکتریکی کوپل، مدل مدار رزونانس معادل کوپل هسته- هوا در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل، U ولتاژ القایی خروجی کوپل است، R مقاومت معادل سیم پیچ است، که در واقع مقاومت سیم سازنده کوپل است؛ I اندوکتانس معادل کوپل القایی است که نشان‌دهنده مشخصه ذاتی خود کوپل است و ربطی به جریان ندارد. C ظرفیت معادل است و معمولاً ظرفیت موجود بین دوره‌های کوپل است.

جدول ۲- بازه تشخیص و رزولوشن سنسور مغناطیسی نوعی

سنسور مغناطیسی	بازه میدان قابل تشخیص	رزولوشن
SQUID	100 fT~100 mT	~50 fT/Hz
Search coil	>50 fT	<100 fT/Hz
Flux-gate	1 nT~1 mT	~100 fT/Hz
Optical pump	500 fT~1 mT	~1 pT/Hz
GMR	>1 nT	~100 pT/Hz
Hall-effect	1 mT~50 T	~10 nT/Hz



شکل ۵- دیاگرام مدار معادل کویل هسته-هوا

میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید شده توسط مغنت دائمی دوار یک سیگنال سینوسی است که ولتاژ القایی خروجی آن را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$U = NA\omega B \cos(\omega t) = 2\pi f NAB \cos(\theta), \quad (15)$$

که N تعداد دورهای کویل است؛ A مساحت کویل تک دور است؛ ω سرعت زاویه‌ای دورانی مغنت دائمی است؛ f فرکانس عملکرد مغنت دائمی دوار است؛ θ زاویه بین جهت فرودی میدان مغناطیسی متغیر با زمان و محور افقی است. θ فقط مکان کویل رسیور را مشخص می‌کند و مقدار آن 0° است. بنابراین، از عبارت $\cos\theta$ در رابطه ۱۵ صرف‌نظر کرد.

از رابطه ۱۵ می‌توان دید که تعداد دورهای کویل N ، سطح کویل A ، و فرکانس کار f همگی متناسب با نیروی محرکه الکتریکی کویل هستند.

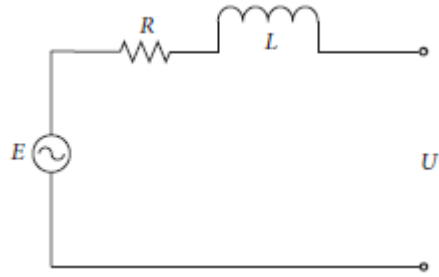
(۲) ولتاژ حرارتی نویز

در حوزه SLF، طول موج ($10^3\text{km} \sim 10^4\text{km}$) امواج الکترومغناطیسی بسیار بزرگتر از پهناي کویل است. بنابراین، از اثر پوسته سطحی و ظرفیت سیم‌پیچ می‌توان چشم‌پوشی کرد. کویل القایی مغناطیسی معادل با یک قطعه القایی متشکل از مقاومت و القاگر است. مدار معادل آن در شکل ۶ نشان داده شده است. این مدار شامل مقاومت معادل R و اندوکتانس معادل L است.

مطابق با تعریف مقاومت، مقاومت کویل بصورت زیر بیان می‌شود:

$$R = \frac{4\rho Nc_1\sqrt{A}}{\pi d^2}, \quad (16)$$

که ρ مقاومت ویژه کویل، d قطر سیم، N تعداد دورهای کویل، A سطح مقطع کویل است.



شکل ۶- دیاگرام مدار معادل کویل رسیور

مطابق با قانون بیوساوار، اندوکتانس L کویل‌ها با شکل‌های مختلف بصورت زیر بیان می‌کند:

$$L = 2 \times 10^{-7} N^2 c_1 \sqrt{A} \left[\ln \frac{c_1 \sqrt{A}}{\sqrt{N} d} - c_2 \right], \quad (17)$$

که c_1 و c_2 ضرایب شکلی هستند و ضرایب شکل‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

در حوزه فرکانس ابر پایین، طول موج امواج الکترومغناطیسی (4000km در 75Hz) بسیار بزرگتر از طول لبه کویل است پس مقاومت تابش کویل در مقایسه با مقاومت کویل قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین، مینیمم مقدار سیگنال تشخیص توسط نویز حرارتی ایجاد شده توسط مقاومت کویل R_a محدود می‌شود. ولتاژ نویز حرارتی RMS (ریشه مربعی میانگین) V_{Nt} در عرض مقاومت کویل R_a بصورت زیر است:

$$U_{Nt} = \sqrt{4KTR\Delta f}, \quad (18)$$

K ثابت بولتزمن $K=1.38 \times 10^{-23}$ ws/K؛ T دمای مطلق رسانا (بر حسب کلوین)؛ Δf پهنای باند نویز سیستم اندازه‌گیری است. واحد ولتاژ RMS حرارتی نویز $V \cdot \sqrt{Hz}$ است.

از رابطه ۱۸ می‌توان دید که عامل‌های اصلی موثر بر ولتاژ حرارتی نویز، مقاومت کویل R و پهنای باند نویز Δf است.

۳) حساسیت کویل القای مغناطیسی

حساسیت کویل القای مغناطیسی S بصورت میدان معادل چگالی نویز تعریف می‌شود که معادل نسبت نیروی محرکه الکتریکی القایی کویل به ولتاژ حرارتی نویز است. به عبارت دیگر، حساسیت کویل القای مغناطیسی میدان مغناطیسی معادل نویز حرارتی در پهنای باند ۱ هرتز است. ولتاژ RMS حرارتی نویز با پهنای باند ۱ هرتز را برابر

ولتاژ خروجی می‌گیریم که برای کسب شدت میدان مغناطیسی سیگنال اندازه‌گیری کویل القای مغناطیسی استفاده می‌شود. بنابراین، حساسیت کویل القای مغناطیسی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$S = \frac{\sqrt{4KTR}}{2\pi fNA} \quad (19)$$

معادله ۱۹ نشان می‌دهد که حساسیت آنتن گیرنده با افزایش فرکانس، افزایش می‌یابد. با این وجود، فرکانس، عامل خارجی موثر بر حساسیت آنتن گیرنده است. در مخابرات آنتن مکانیکی، حضور پهنای باند می‌تواند حساسیت کویل با همان ساختار را تغییر دهد. بمنظور مطالعه عوامل موثر بر تغییرات حساسیت کویل در ساختار یکسان آنتن در حین مخابرات، محاسبات حساسیت کویل با ضریب نرمالیزاسیون $1/f$ بهنجار شدند. بنابراین، رابطه نرمالیزاسیون حساسیت کویل بصورت رابطه ۲۰ نوشته می‌شود که یکای آن T/\sqrt{Hz} است:

$$\hat{S} = \frac{\sqrt{4KTR}}{2\pi NA} \quad (20)$$

از روابط ۱۹ و ۲۰ می‌بینیم که رابطه بین پارامترهای هندسی و حساسیت کویل القای مغناطیسی را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\hat{S} = \frac{\sqrt{4KT\rho c_1}}{\pi^{3/2} d \sqrt{NA}^{3/4}} \quad (21)$$

از رابطه ۲۱ دیده می‌شود که عوامل موثر بر حساسیت کویل القای مغناطیسی، پارامترهای خود کویل هستند. بین حساسیت کویل \hat{S} و دورهای آن N ، سطح مقطع A ، و قطر سیم d همبستگی دیده می‌شود. بنابراین، حساسیت کویل را می‌توان با افزایش تعداد دورها، سطح مقطع، و قطر سیم بهبود بخشید. طراحی دقیق پارامترهای هندسی کویل القای مغناطیسی مستقیماً به دقت حساسیت مدل کویل مرتبط است.

جدول ۳- ضرایب شکلی کویل برای شکل‌های مختلف

شکل کویل	c_1	c_2
مربع	4.000	1.217
مثلث متساوی الاضلاع	4.559	1.561
مثلث متساوی الساقین راستگوشه	4.828	1.696

۴- آنالیز شبیه‌سازی مشخصه‌های میرایی میدان تابشی

آنتن‌های مکانیکی فرکانس ابر پایین دستگاه‌های مخابراتی دوربرد هستند که محیط مخابراتی آنها عمدتاً هوا، خاک، و آب دریا است. به منظور مطالعه بهتر مشخصه‌های انتشار آن، این مقاله از نرم‌افزار شبیه‌سازی Ansoft برای شبیه‌سازی مشخصه‌های میرایی میدان تابشی در محیط‌های مختلف استفاده می‌کند. مدل شبیه‌سازی در شکل ۷ نشان داده شده است. پارامترهای مرتبط با محیط انتشار و مگنت دائمی در مدل شبیه‌سازی در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی پردازش می‌شود تا شدت تابش در نقاط تشخیص متناظر در محیط‌های مختلف انتشار بدست آید. همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود، از نتایج شبیه‌سازی برای استخراج منحنی‌های وابسته به مکان شدت القای مغناطیسی سه مگنت القایی، استفاده می‌شود. منحنی مشخصه انتشار برای محیط انتشار هوا، با استفاده از Matlab، برازش شد و نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است.

شکل ۸ نشان می‌دهد که سیگنال تابش مگنت دائمی دوار کمترین انتشار را در هوا و سپس خاک دارد و بیشترین اتلاف در آب دریا رخ می‌دهد. در هوا و خاک، میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید شده توسط مگنت‌های دائمی دوار یکسان است. فرض می‌شود که مینیمم شدت القای مغناطیسی که می‌تواند توسط آنتن گیرنده آشکار شود، برابر 1nT است. هنگامی که مگنت دائمی دوار در فرکانس 75 Hz عمل کند، ماکزیمم فاصله مخابراتی برابر 147.5 m در هوا، 145 m در خاک، و 73m در آب دریا است. در واقع، برخی رسیورهای SLF می‌توانند سیگنال‌های با تراوایی مغناطیسی کمتر از 1nT آشکار کنند. بنابراین، فاصله مخابراتی طولانی‌تر می‌شود. از منحنی برازش شده محیط انتشار هوا مشخص می‌شود که تراوایی مغناطیسی رابطه معکوس با مکعب فاصله انتشار دارد. اثبات می‌شود که مدل ریاضیاتی مگنت دائمی دوار درست است.

۵- ساخت نمونه اولیه و آزمایشات

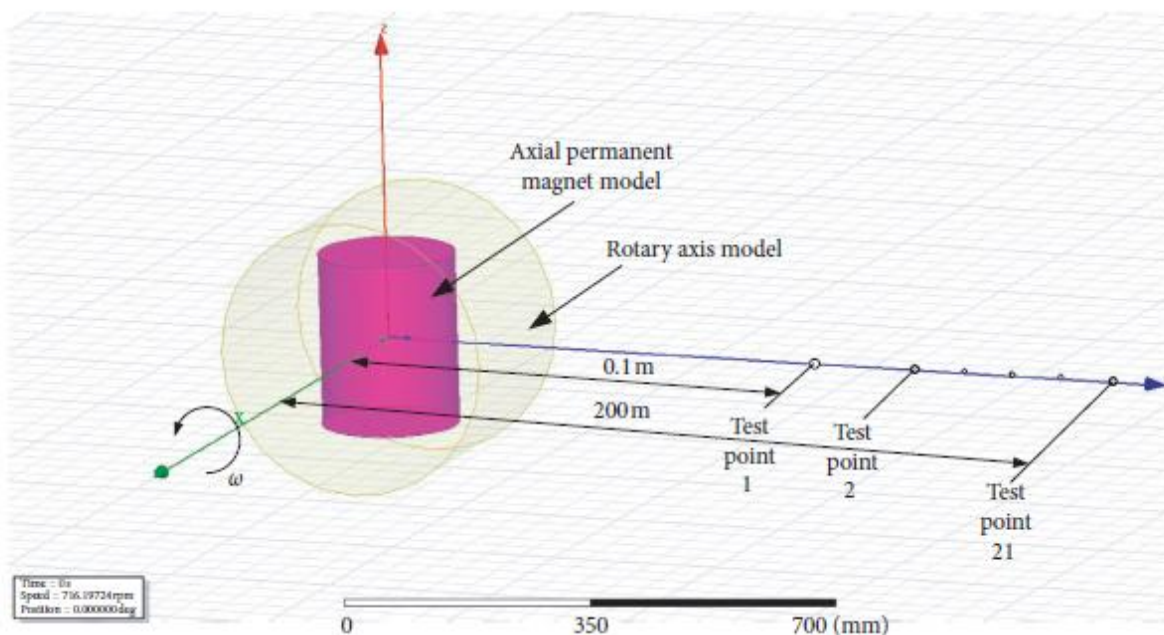
بر مبنای ساختار مخابرات آنتن مکانیکی و کوپل القای مغناطیسی، نمونه اولیه نشان داده شده در شکل ۹ ساخته شد. نمونه اولیه از سه بخش اصلی تشکیل شده است: واحد تابش، مسیر انتشار، و واحد دریافت. واحد تابش آنتن مکانیکی سیگنال را از طریق ژنراتور سیگنال تولید می‌کند. مبدل فرکانس سیگنال را از ژنراتور سیگنال دریافت می‌کند تا سرعت موتور را کنترل کند. موتور یک مگنت دائمی را راه می‌اندازد که باعث تولید میدان مغناطیسی متغیر با زمان شده و امواج الکترومغناطیسی تولید می‌کند. امواج الکترومغناطیسی در هوا یا روی زمین منتشر

شده و توسط سنسورهای مغناطیسی دریافت می‌شوند. واحد دریافت آنتن مکانیکی سیگنال را توسط کویل متعامد سه محوره دریافت می‌کند. کویل سیگنال را دریافت کرده و آن را به اسیلوسکوپ منتقل می‌کند. اسیلوسکوپ سیگنال آنالوگ را به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌کند. سپس، سیگنال دیجیتال به کامپیوتر بالایی ارسال شده و کامپیوتر بالایی با اعمال تبدیل فوریه روی سیگنال، اطلاعات سیگنال انتقال واحد تابش را بدست می‌آورد و بنابراین پروسه مخابرات تکمیل می‌شود.

بر مبنای نمونه اولیه مخابرات آنتن مکانیکی، آزمایشاتی درباره توان تابشی مگنت دائمی دوار، حساسیت کویل، و مخابرات 2FSK انجام می‌شود. یک کویل مربعی متعامد سه محوره با امپدانس $1\Omega-1Mh$ بعنوان واحد دریافت آنتن مکانیکی ساخته می‌شود. سرعت موتور محرک برابر $0-15000\text{ r/min}$ است که متناظر با موج الکترومغناطیسی گسیل شده برابر $0-250\text{Hz}$ و همواره قابل تنظیم است.

۵-۱ آزمایشات تاثیر توان تابشی

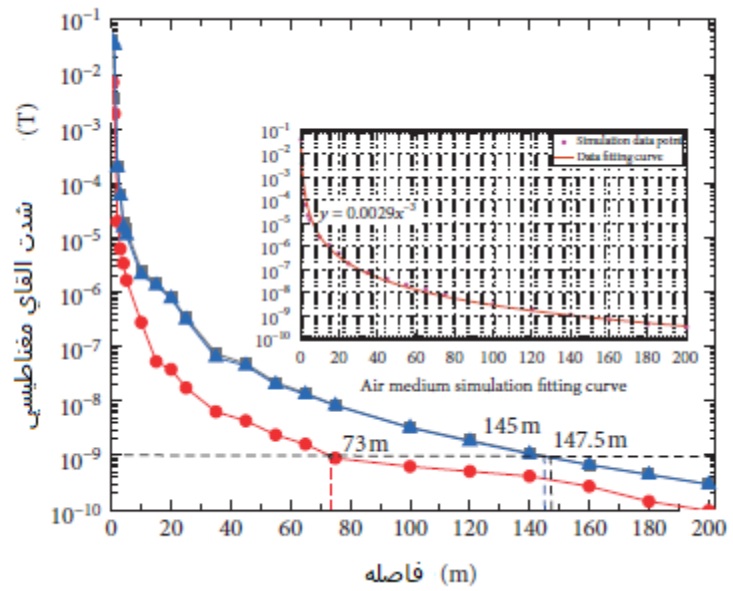
مطابق با نمودار مدل اصول مخابرات آنتن مکانیکی نشان داده شده در شکل ۹ و مدل توان تابشی (13)، پلتفرم آزمایشی آنتن مکانیکی فرکانس ابر پایین ساخته می‌شود. این پلتفرم در شکل ۱۰ نشان داده شده است و برای مطالعه تاثیر حجم مگنت دائمی بر توان تابشی استفاده می‌شود.



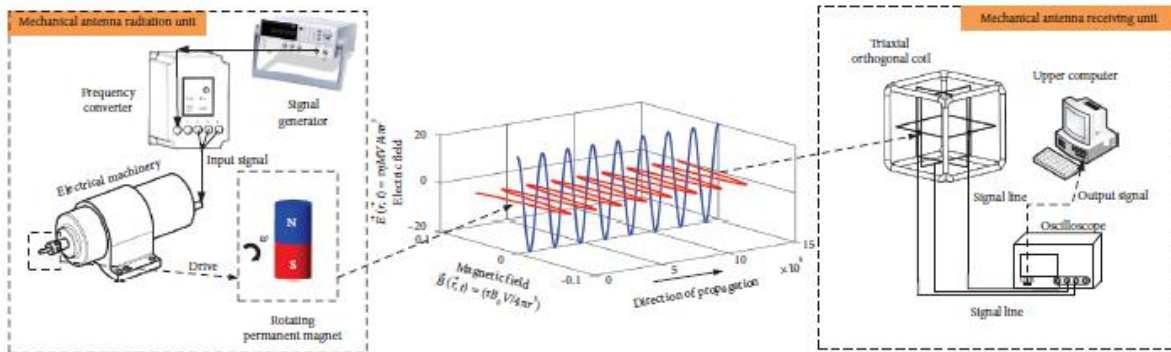
شکل ۷- مدل شبیه‌سازی مشخصه انتشار میدان تابشی مگنت‌های دائمی دوار

جدول ۴- پارامترهای شرایط شبیه سازی

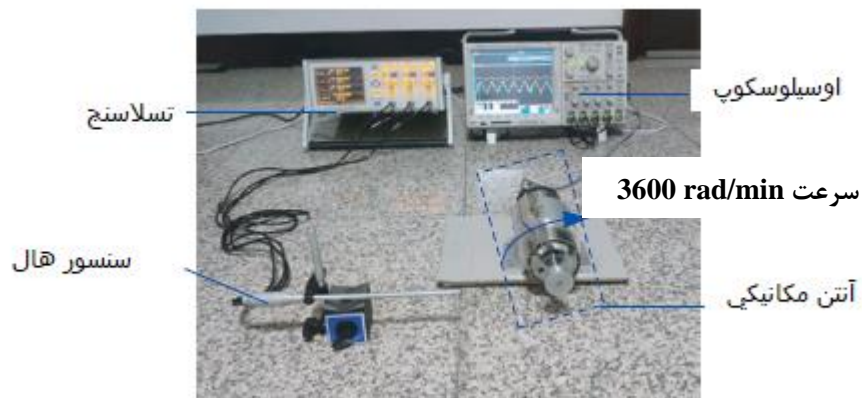
مقادیر پارامترها	نام پارامترهای شبیه سازی
1	ثابت دی الکتریک نسبی
0.0018	رسانندگی
13	ثابت دی الکتریک نسبی
0.001	رسانندگی
81	ثابت دی الکتریک نسبی
4	رسانندگی
1.05	تراوایی نسبی
7500	جگالی جرمی
1.1×10^6	بزرگی
$\phi 200 \times 250$ mm	ابعاد



شکل ۸- قانون تغییر شدت القای مغناطیسی مگنت دائمی دوار



شکل ۹- نمونه اولیه مخابرات آنتن مکانیکی



شکل ۱۰- نمونه اولیه آنتن مکانیکی فرکانس ابر پایین

سرعت موتور محرک برابر 3600 rad/min و فرکانس تابش موج الکترومغناطیسی متناظر آن برابر 60 Hz است. مگنت دائمی، از نوع مگنت دائمی مغناطیده شعاعی انتخاب شده است که در جدول ۵ نشان داده شده است و سیگنال‌های میدان مغناطیسی متغیر با زمان آنها اندازه‌گیری می‌شود. در این مقاله، سیگنال‌های میدان مغناطیسی متغیر با زمان چهار نوع مگنت دائمی آنالیز شد تا مقادیر شدت القای مغناطیسی میدان مغناطیسی متغیر با زمان و توان تابشی آنها از روابط ۷ و ۱۳ محاسبه شود. مدل مگنت دائمی، شدت القای مغناطیسی میدان مغناطیسی متغیر با زمان، و توان تابشی در جدول ۵ نشان داده شده است. توان تابشی تولید شده توسط مگنت دائمی دوار توسط MATLAB با داده‌های رابطه ۱۳ برازش می‌شود تا منحنی برازش تجربی و نقاط تجربی بدست آید که در شکل ۱۱ دیده می‌شود.

در این آزمایش، چهار مگنت دائمی دارای جنس یکسان و ظرفیت مغناطش یکسان هستند. در شکل ۱۱ می‌توان دید که منحنی برازش تجربی توسط برازش نقاط آزمایشی و تجربی حاصل می‌شود. معادله برازش منحنی یک تابع درجه دوم با جواب یکتا است که عرض از مبدا آن صفر نیست. خطای نسبی بین ضریب معادله منحنی برازش شده و مقدار تئوری برابر ۱۶,۴٪ است. علت غیر صفر بودن عرض از مبدا خطای بین حجم واقعی مگنت دائمی و حجم اندازه‌گیری شده تجربی است. معادله برازش منحنی تقریباً برابر مدل رزولوشن توان تابشی است که نشان می‌دهد توان تابشی یک مگنت دائمی دوار متناسب با مربع حجم آن است. بنابراین، مدل تحلیلی تئوری آن درست و مطمئن است. برخی عواملی که بر فاصله مخابراتی آنتن مکانیکی تاثیر می‌گذارند، عبارتند از: حجم و مغناطش باقیمانده مگنت دائمی.

۵-۲ آزمایش تاثیر حساسیت کویل

همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، این مقاله یک نمونه اولیه آزمایش حساسیت مبتنی بر مدل نمونه اولیه آنتن مکانیکی ارائه می‌دهد. در شکل ۱۲ می‌بینیم که a ژنراتور سیگنال و مبدل فرکانس و b موتور و مگنت دائمی است که واحد تابشی را تشکیل می‌دهند؛ c یک کویل متعامد سه محوره است و d اسپلوسکوپ است که واحد رسیور را تشکیل می‌دهند. در واحد تابش، میدان مغناطیسی متغیر با زمان توسط مگنت دائمی با موتور محرک تولید می‌شود که امواج الکترومغناطیسی را شکل می‌دهد. فرکانس امواج الکترومغناطیسی برابر 75Hz است. فاصله مخابراتی حدود 6m در نظر گرفته شده است. واحد تابشی، مگنت دائمی مغناطیده محوری را انتخاب می‌کند که از جنس N48 است و مغناطش باقیمانده آن 1.1T و ابعاد آن $90 \times \phi 8$ mm است. مطابق با رابطه ۶، مقدار تئوری شدت میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید شده در فاصله ۶ متر بر مگنت دائمی دوار برابر $1.03 \mu T$ است. واحد رسیور، سیم مسی به قطر ۱ میلی متر را انتخاب می‌کند.

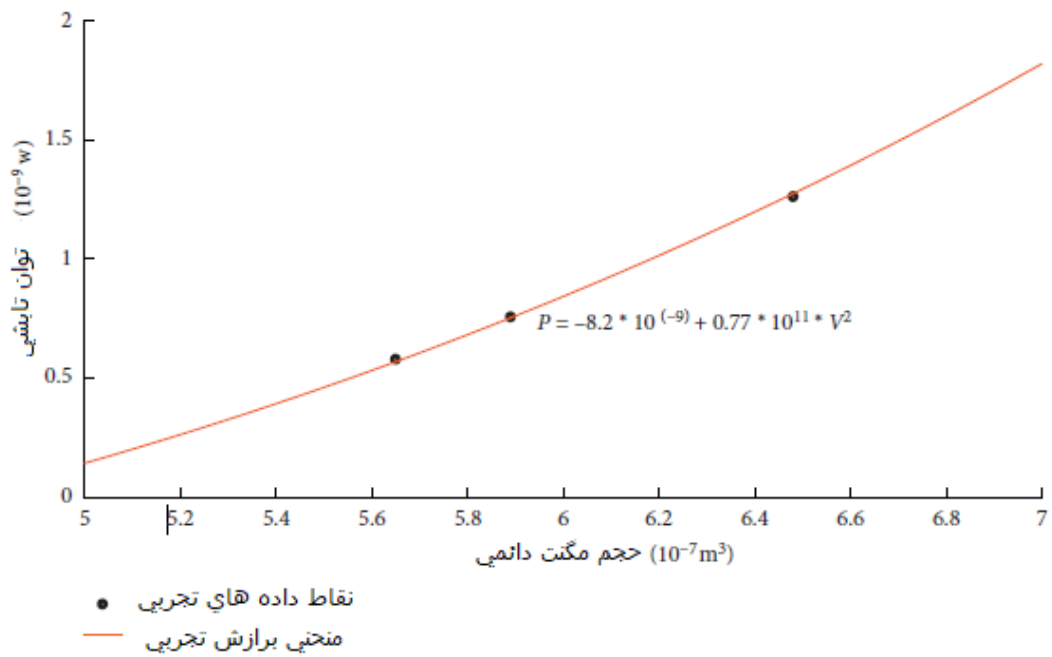
در این مقاله، تاثیر تعداد دورهای کویل و سطح مقطع بر حساسیت توسط روش تک عاملی آنالیز می‌شود. امیدانس کویل را $1 \Omega mH$ در نظر گرفته و کویل‌های ۱ و ۲ و ۳ را مطابق با روابط ۱۶ و ۱۷ طراحی می‌کنیم. برای مطالعه اثر سطح مقطع بر حساسیت کویل، کویل‌های ۱ و ۳ را انتخاب کرده و تنها سطح مقطع کویل A را تغییر می‌دهیم در حالی که دیگر پارامترها بدون تغییر باقی می‌مانند. برای بررسی اثر تعداد دورهای کویل بر حساسیت آن، از کویل ۲ و ۳ استفاده کرده و تعداد دورهای کویل N را تغییر می‌دهیم بدون آنکه دیگر پارامترها تغییر یابند. هندسه دقیق و با جزئیات کویل در جدول ۶ بیان شده است.

میدان مغناطیسی متغیر با زمان با استفاده از کویل ۱، ۲، و ۳ اندازه‌گیری شده و ولتاژ القایی در فاصله ۶ متری در بازه زمانی و در بازه فرکانسی با استفاده از تبدیل FFT بازه زمانی بدست می‌آید که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مقدار RMS ولتاژ القایی در دیاگرام بازه زمانی در جدول ۷ نشان داده شده است و دیاگرام بازه فرکانسی نشان می‌دهد که فرکانس عملکرد میدان مغناطیسی متغیر با زمان برابر 75Hz است که با فرکانس دوران موتور برابر است. از معادله ۱۵ می‌توان دید که مقدار RMS ولتاژ القایی هر کویل به مقدار RMS شدت میدان مغناطیسی وابسته به زمان تبدیل شده و با مقدار تئوری مقایسه می‌شود. نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است.

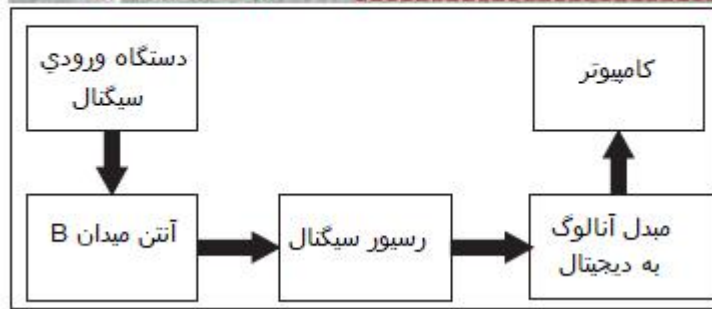
از مقایسه بین مقادیر تئوری و آزمایشگاهی کویل ۱ و کویل ۳ در جدول ۷، می‌توان دید که هنگامی که سطح مقطع کویل از 0.36m^2 به 2.82m^2 افزایش یابد، خطای اندازه‌گیری برای همان میدان مغناطیسی متغیر با زمان ۶،۸٪ کاهش می‌یابد. با مقایسه مقادیر تئوری و آزمایشگاهی کویل ۲ و ۳ می‌توان دید که با افزایش تعداد دورهای کویل از ۱۱ به ۲۱، خطای اندازه‌گیری برای میدان مغناطیسی متغیر با زمان در محیط یکسان تا ۳،۸۹٪ کاهش می‌یابد. بنابراین، حساسیت کویل را می‌توان با افزایش سطح مقطع و تعداد دورهای کویل بهبود بخشید. خطای اندازه‌گیری هر سه کویل کمتر از ۱۰٪ است که نشان می‌دهد مدل تحلیلی نرمالیزه حساسیت کویل درست است و می‌توان از آن در طراحی مدل‌های مختلف کویل‌های القای مغناطیسی برای آنتن‌های مکانیکی فرکانس ابر پایین استفاده کرد.

جدول ۵- توان و شدت تابشی مگنت‌های دائمی دوار

Size (mm)	Volume (mm ³)	Magnetization direction	Magnetic field strength (T)	Experimental radiation power (W)
5 × 5 × 20	500	Radial	4.173×10^{-5}	1.304×10^{-9}
20 × φ6	565		8.5×10^{-5}	6.107×10^{-9}
30 × φ5	589		9.25×10^{-5}	7.578×10^{-9}
30 × φ	648		1.14×10^{-4}	1.263×10^{-8}



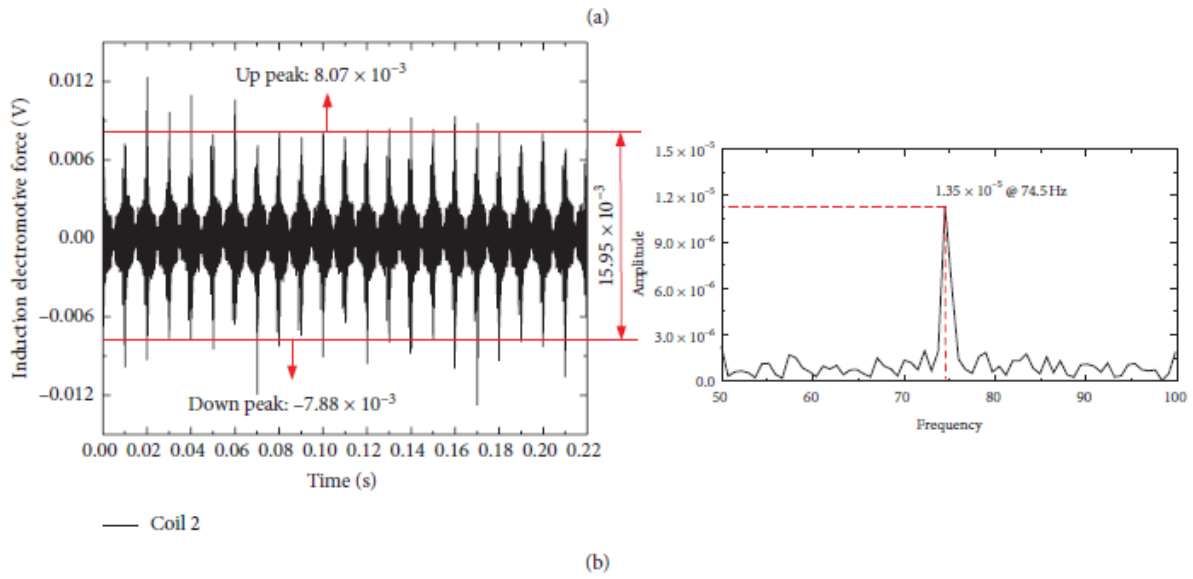
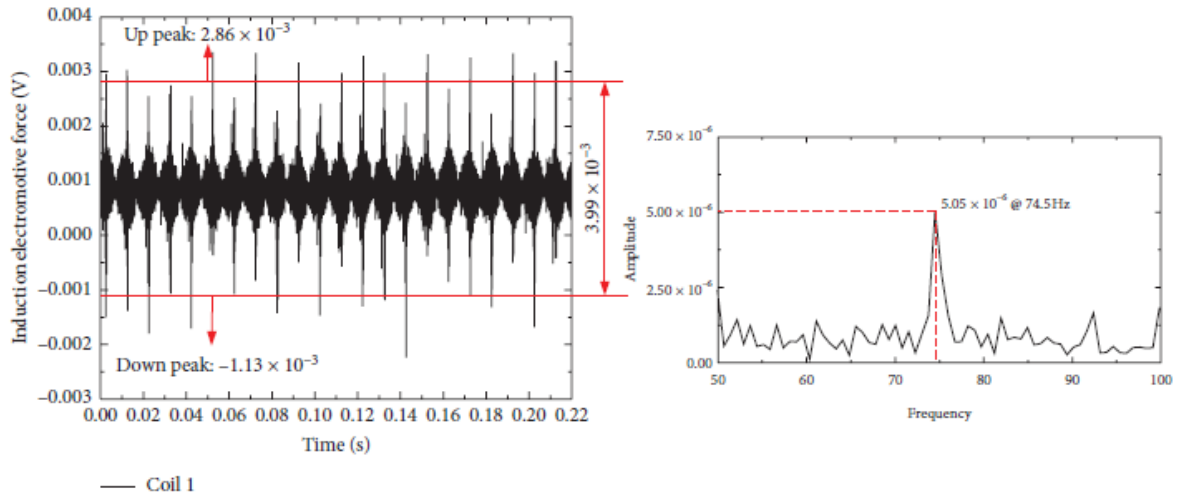
شکل ۱۱- دیاگرام منحنی رابطه بین حجم و توان تابش مگنت دائمی دوار

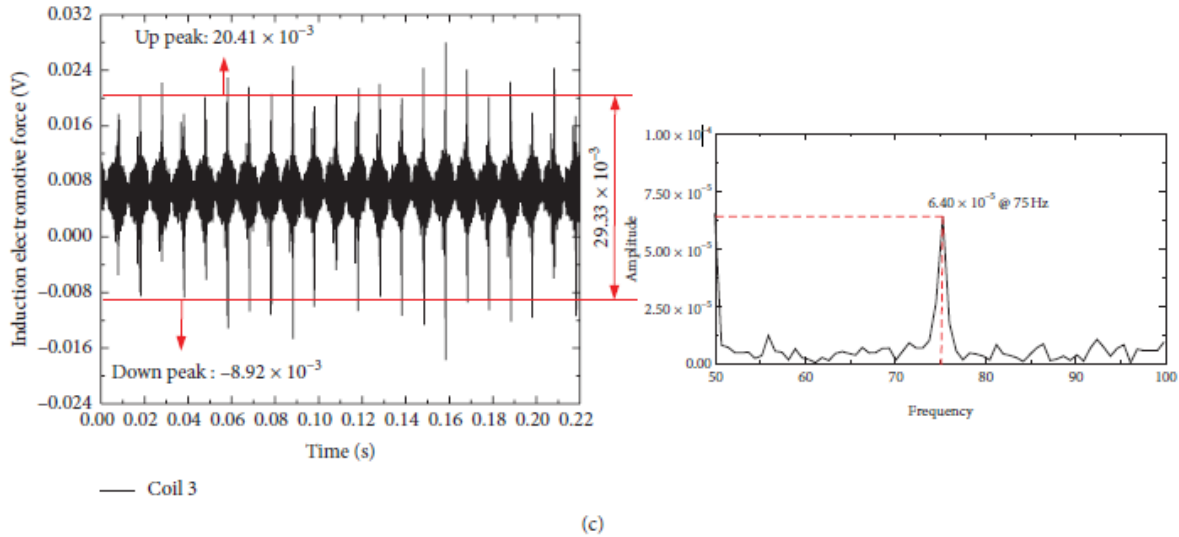


شکل ۱۲- نمودار تصویری دیاگرام بلوکی آنتن مکانیکی. (a) دستگاه ورودی سیگنال شامل ژنراتور سیگنال و مبدل فرکانس. (b) دستگاه میدان B شامل موتور، فیکسچر، و مغنت دائمی. (c) رسیور سیگنال متشکل از سه کویل مربعی (d) دستگاه مبدل آنالوگ به دیجیتال: اسیلوسکوپ

جدول ۶- پارامترهای آزمایشی کویل

Parameters	Coil turns N	Coil length (m)	Coil diameter (mm)	Coil shape	Coil Impedance (Ω mH)
Coil 1	21	0.6	1	Square	1.03
Coil 2	11	1.68	1	Square	1.16
Coil 3	21	1.68	1	Square	0.86





شکل ۱۳- دیاگرام FFT سیگنال کویل در فاصله ۶ متری آزمایش مخابرات

جدول ۷- RMS ولتاژ القایی کویل و شدت میدان مغناطیسی متغیر با زمان

Coils	مقدار موثر ولتاژ القایی (mV)	مقدار موثر شدت میدان مغناطیسی متغیر با زمان (μT)	مقدار تئوری شدت میدان مغناطیسی متغیر با زمان (μT)	خطای شدت میدان مغناطیسی (%)
Coil 1	3.99	1.12	1.03	8.74
Coil 2	15.95	1.09	1.03	5.83
Coil 3	29.33	1.05	1.03	1.94

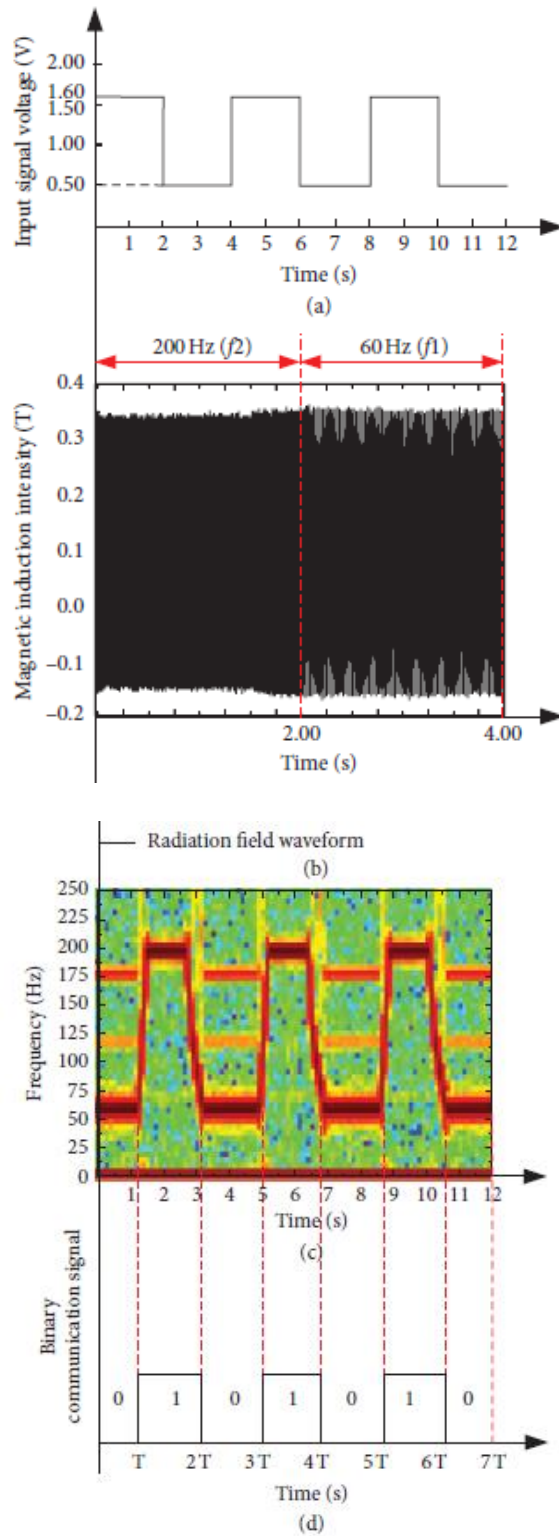
۵-۳ آزمایش مخابرات

مخابرات آنتن از طریق جفت شدگی بین آنتن فرستنده و آنتن گیرنده برای تکمیل تبادل و ارسال اطلاعات انجام می‌شود. مدولاسیون سیگنال ارسالی در هوا و محیط‌های دیگر نفوذ و پایداری خوبی دارد و سیگنال به آسانی دچار اعوجاج نمی‌شود. مدولاسیون 2FSK یک مدولاسیون فرکانسی دیجیتالی باینری است و روش مدولاسیون در شکل ۳ نشان داده شده است. این مقاله یک پلتفرم آزمایشی ارائه کرده است که در شکل ۱۲ نشان داده شده

است. از این پلتفرم برای شبیه‌سازی مدولاسیون سیگنال 2FSK را برای آزمایشات مخابرات بی‌سیم استفاده می‌شود.

سیگنال ارسالی بصورت سیگنال موج مربعی انتخاب می‌شود که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. فرکانس‌های دوران 60Hz و 200Hz متناظر با ولتاژهای ورودی 0.5V و 1.6V است. هنگامی که موتور سیگنال موج مربعی ورودی را دریافت می‌کند، باعث دوران مگنت دائم و ایجاد میدان دوار می‌شود. دیاگرام شکل موج در شکل 14b نشان داده شده است. از زمان ۰ تا ۲,۰۰ ثانیه، ولتاژ ورودی موتور برابر 1.6 V و فرکانس میدان تابشی مگنت دائمی برابر 60Hz است. بنابراین، نرخ مدولاسیون برابر 70Hz/s است. دو شکل موج متناظر با نمادهای ۱ و ۰ سیگنال مدوله شده هستند. شکل موج توسط تبدیل فوریه کوتاه مدت پردازش می‌شود تا دامنه فرکانس- زمان شکل 14c بدست آید.

همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، شکل موج سیگنال ورودی سیستم مخابراتی آنتن مکانیکی تقریباً برابر با دامنه فرکانس- زمان سیگنال خروجی است. از شکل 14c می‌توان دید هنگامی که فرکانس بطور ناگهانی تغییر می‌کند، گراف تبدیل فوریه کوتاه مدت دارای شیب معینی می‌شود. بعلاوه ماهیت گذرا و لحظه‌ای سرعت موتور محرک، در زمان برش، فرایند تغییر فرکانس در دیاگرام دامنه فرکانس- زمان رخ می‌دهد که باعث تغییر فرکانس در نقاط با خطوط بریده می‌شود. مدت زمان فرایند افزایش فرکانس 0.102s است و مدت زمان سقوط و کاهش فرکانس 0.205s است. مدت زمان کل این فرایند تغییر برابر $\Delta t=0.307s$ است بنابراین نرخ خطای بیت منبع در سیستم مخابراتی 2FSK برابر 7.68% است. نتایج آزمایشگاهی با روندها و مقادیر شرایط از پیش تعیین شده یکسان است که اثربخشی و امکان‌پذیری روش مخابراتی آنتن مکانیکی فرکانس ابر پایین مبتنی بر مگنت دائمی دوار، که در این مقاله از جنبه کاربرد عملی توصیف شده بود، را تایید می‌کند.



شکل ۱۴- شکل موج سیستم مخابراتی: (a) شکل موج سیگنال ورودی (b) کل موج سیگنال دریافتی متناظر با فرکانس شکل موج سیگنال ورودی (c) دیاگرام دامنه زمانی سیگنال دریافتی (d) شکل موج سیگنال ارسالی و f_1 و f_2 .

۶- نتیجه گیری

آنتن‌های SLF سنتی حجیم، پرمصرف، و ناکارآمد هستند. این مقاله یک آنتن مکانیکی با مگنت دائمی دوار را بعنوان عنصر تابشی و یک کوئل متعامد سه محوره را بعنوان عنصر رسیور معرفی می‌کند. برای واحد تابش، یک مدل ریاضیاتی مبتنی بر مگنت دائمی دوار و توان تابشی ارائه می‌شود. برای واحد دریافت کننده، یک مدل ریاضیاتی مبتنی بر پارامترهای ابعاد (هندسی) و حساسیت کوئل مربعی ارائه می‌شود. با استفاده از آنالیز این تئوری، شبیه‌سازی، و نتایج آزمایشگاهی برخی مشخصه‌های مکانیزم مخابرات آنتن مکانیکی حاصل شد که بصورت زیر است:

(۱) برای عنصر تابشی آنتن مکانیکی، توان تابشی میدان نزدیک متناسب با مربع حجم مگنت دائمی است. افزایش حجم مگنت دائمی می‌تواند توان تابشی را افزایش دهد و بنابراین باعث افزایش برد مخابرات شود.

(۲) برای واحد دریافت آنتن مکانیکی، حساسیت کوئل متناسب با تعداد دورها و سطح مقطع کوئل است. افزایش سطح کوئل و تعداد دورهای آن می‌تواند حساسیت آنتن رسیور را بهبود بخشد و در نتیجه باعث افزایش برد مخابرات شود.

(۳) آزمایشات مخابراتی آنتن مکانیکی نشان می‌دهد که آنتن مکانیکی را می‌توان برای مخابرات بی‌سیم استفاده کرد. بعلاوه، مدولاسیون سیگنال 2FSK را می‌توان با کنترل سرعت موتور در شرایط واقعی تحقق بخشید. نرخ مدولاسیون 70 Hz/s است و نرخ خطای بیت برابر 7.68% در حین مخابرات است.

از نتایج فوق می‌توان دید که آنتن مکانیکی برانگیختگی امواج الکترومغناطیسی فرکانس بسیار پایین را متوقف می‌کند. با این وجود، در مقایسه با فناوری ESA کنونی، آنتن مکانیکی نمی‌تواند توان تابشی موثر را تحت شرایط همان دوقطبی یکسان بطور قابل توجهی افزایش دهد. امروزه، جایگزین کردن فرستنده‌های توان بالای فعلی با آنتن مکانیکی مشکل است. در حال حاضر، عمده تحقیقات بر روی آنتن مکانیکی در کشور و خارج از کشور متمرکز بر برانگیختگی تابشی، روش تحقق، و تاییدات آزمایشگاهی است.