هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

بررسی قابلیت اطمینان آنتن‌های هوشمند دارای توانایی هدایت پرتو مبتنی بر فناوری پلاسما

فاطمه صادقی‌کیا[1]

۱- دانشیار گروه سیستم‌های فضایی، پژوهشکده فضایی، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران، sadeghi_kia@ari.ac.ir

چکیده

سیستم‌های مخابراتی هوشمند امروزه جایگاه ویژه‌ای در حوزه فناوری پیدا کرده‌اند. آنتن‌های هوشمند، که دارای قابلیت بازپیکربندی یا هدایت پرتو هستند، می‌توانند جایگزین ارزشمندی برای آنتن‌های رایج محسوب شوند. قابلیت بازپیکربندی برای آنتن سبب می‌شود مشخصات تشعشعی مطلوب، متناسب با نیاز کاربر، با حداقل سخت افزار و پیچیدگی فراهم شود. هدایت پرتو نیز امروزه کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف ماهواره‌ای، راداری و امنیتی دارد و مکانیزم رایج برای تحقق چنین ساختاری، استفاده از سازه‌های مکانیکی برای چرخش پرتو بوده است. فناوری پلاسما، به‌عنوان حالت چهارم ماده، امروزه بستر ارزشمندی در زمینه توسعه آنتن های هوشمند فراهم نموده است. هدایت هوشمند پرتو تشعشعی آنتن مبتنی بر فناوری پلاسما در صفحات مختلف افقی و عمودی یا در فضای سه‌بعدی امکان پذیر است. با چنین فناوری ارزشمندی، ضرورت بکارگیری سازه‌های مکانیکی در چرخش پرتو می‌تواند مورد بازنگری قرار گیرد. هدف از این مقاله، علاوه بر معرفی و تبیین جایگاه فناوری نوین پلاسما در هدایت هوشمند پرتو تشعشعی آنتن، ارائه مقایسه میان عملکرد مکانیزم مکانیکی هدایت پرتو تشعشعی آنتن و نیز مکانیزم هدایت هوشمند پرتو مبتنی بر فناوری پلاسما در سیستم‌های مخابراتی است..

واژه‌های کلیدی: آنتن های هوشمند، هدایت پرتو، فناوری پلاسما، سیستم مخابراتی، قابلیت اطمینان

مقدمه

استفاده از آنتن‌ها در کلیه سیستم‌های ارتباطی، صرف نظر از نوع کاربرد آن، ضروری و اجتناب ناپذیر است. بر این مبنا، اولین نقطه ورودی همه گیرنده‌های مخابراتی و آخرین نقطه خروجی همه فرستنده‌های مخابراتی، آنتن است. آنتن ابزار مخابراتی است که میتواند سیگنال الکتریکی را به تشعشع و تشعشع را به سیگنال الکتریکی تبدیل کند. طراحی آنتن، متناسب با نوع سیستمی که از آن استفاده می‌کند و مشخصات سیگنالی که وظیفه ارسال یا دریافت آن را برعهده دارد، انجام می‌شود. بنابراین، ابعاد آن عموماً متناسب با فرکانس سیگنال اطلاعات است [۱].

برای بهره برداری از یک آنتن لازم است مشخصات تشعشعی آن تناسب قابل قبولی با کاربرد مورد نظر داشته باشد. از مهمترین مشخصات تشعشعی آنتن می توان به نوع قطبش، امپدانس ورودی، شکل الگوی تشعشعی و مقدار بهره آنتن اشاره نمود. عدم انطباق میان هرکدام از این مشخصات و کاربرد متناظر، سبب از دست رفتن تمام یا برخی از اطلاعات مورد نیاز برای ارسال می شود. به عنوان مثال، اگر بهره آنتن به اندازه ای کم باشد که توان دریافت شده از آستانه گیرندگی در گیرنده کمتر باشد، سیگنالی دریافت نخواهد شد؛ و یا اینکه اگر جهت پرتو آنتن فرستنده متفاوت از جهت الگوی تشعشعی آنتن گیرنده باشد، توان مناسبی به گیرنده نخواهد رسید. چنانچه یکی از دو آنتن فرستنده یا گیرنده و یا هردوی آنها درحال حرکت باشند، تنظیم جهت پرتو تشعشعی دو آنتن برای برقرار ماندن لینک مخابراتی، از اهمیت زیادی برخوردار است. ابزار رایج تنظیم جهت پرتو آنتن ها، استفاده از ادوات مکانیکی گرداننده آنتن است. این ابزار در کلاس های مختلف و با توانمندی های متنوع تولید می‌شوند. به عنوان نمونه، قابلیت چرخش در صفحات افقی، عمودی، سرعت حرکت، شتاب، نوع واسط کاربری و قابلیت تحمل جرم از جمله مشخصات گرداننده آنتن محسوب می‌شود. نمونه‌های مختلفی از این گرداننده‌ها امروزه به‌صورت تجاری در بازار با قیمت‌های مختلف،

متناسب با مشخصات یافت می‌شوند. این گردانندهها عموماً حجیم و سنگین هستند.

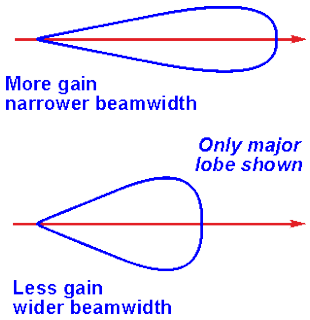
عموماً مشخصات تشعشعی آنتن‌های مخابراتی رایج ثابت هستند و تابع ابعاد و شکل آنتن می‌باشند. طی سال‌های اخیر، با توجه به گسترش روزافزون سیستمهای مخابراتی و تنوع کاربردها، دسته‌ی جدیدی از آنتن‌ها توسعه یافته‌اند که قابلیت بازپیکربندی دارند [۲ – ۴]. برخی از این نوع آنتن‌ها، می‌توانند بدون استفاده از گرداننده مکانیکی، پرتو تشعشعی خود را به جهات مختلف هدایت کنند. [۵ –۷]. فناوری‌های مختلفی برای تحقق این نوع آنتن‌ها تاکنون معرفی شده‌اند و هرکدام از این فناوری‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی دارند. هدایت پرتو تشعشعی آنتن، مبتنی بر فناوری پلاسما، یکی از انواع این فناوری‌ها محسوب می‌شود که تحقیقات قابل توجهی در این زمینه مشاهده می‌شود [۵ – ۱۳].

هدف از این پژوهش، مروری بر شاخص‌های عملکردی گردانندگان سنتی و نوین هدایت پرتو آنتن‌ها و مقایسه عملکرد آن‌ها از منظر قابلیت اطمینان است. در این راستا، در بخش دوم از این مقاله، مروری بر آنتن-های دارای قابلیت هدایت پرتو ارائه شده و انواع مکانیزم‌های تحقق این آنتن‌ها به اختصار معرفی می‌شوند. معرفی مشخصات محیط پلاسما، به‌عنوان بستر منتخب هدایت پرتو در این پژوهش در بخش سوم ارائه می‌شود. مقایسه و تحلیل عملکرد گرداننده مکانیکی آنتن و نیز هدایت هوشمند پرتو آنتن مبتنی بر فناور پلاسما از منظر قابلیت اطمینان در بخش چهارم ارائه شده و این پژوهش در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌شود.

معرفی آنتن‌های دارای قابلیت هدایت پرتو

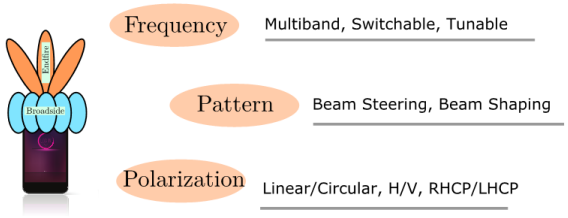
در این بخش، به اختصار آنتن‌های نوین دارای قابلیت بازپیکربندی معرفی شده و نحوه تحقق آنتن‌های دارای قابلیت هدایت پرتو، که یکی از انواع آنتن‌های دارای قابلیت بازپیکربندی محسوب می‌شوند، ارائه می‌شود. با توجه به اینکه فناوری منتخب در ایجاد آنتن دارای قابلیت هدایت پرتو، فناوری پلاسما است، این دسته از آنتن‌های پلاسمایی نیز اجمالا، معرفی خواهند شد.

در ابتدا، لازم است مقدمه‌ای در خصوص ضرورت هدایت پرتو در آنتن-های مخابراتی معرفی شود. مقدار بهره آنتن همواره با عرض پرتو آن نسبت معکوس دارد و هرچه مقدار بهره بیشتر باشد، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، عرض پرتو کوچکتر خواهد بود [۱]. در کاربردهایی که تلفات انتشار امواج الکترومغناطیسی در مسیر سیگنال تشعشعی زیاد است، همواره تلاش می‌شود تا از آنتن‌های با بهره بیشتر استفاده شود و بنابراین پهنای پرتو آنتن کاهش پیدا می‌کند. کاهش پهنای پرتو آنتن به منزله آن است پرتو آنتن بسیار باریک‌تر می‌شود و بنابراین، برای برقراری لینک مخابراتی در سیستم‌های متحرک یا سیستم‌هایی که به نوعی نیاز به نشانه روی دارند، باید مکانیزمی تعبیه شود تا جهت الگوی تشعشعی دو آنتن را روبروی هم نگه دارد. بنابراین، در چنین شرایطی، مکانیزم هدایت پرتو آنتن بسیار مورد توجه قرار دارد.



شکل ۱: تحلیلی بر تناسب عرض پرتو و مقدار بهره در آنتن

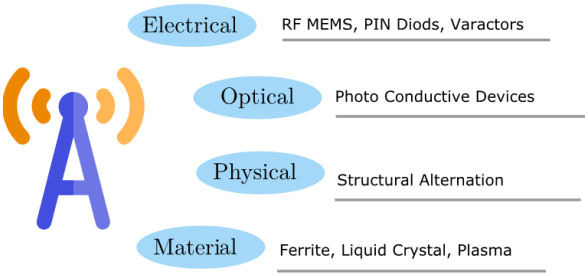
با توجه به اینکه هدف اصلی از این بخش، معرفی آنتن‌های دارای قابلیت هدایت پرتو است، ادامه بحث را به موضوع این نوع آنتن‌ها اختصاص می‌دهیم. بازپیکربندی در آنتن به معنای تغییر مشخصات تشعشعی، شامل قطبش، فرکانس یا الگوی تشعشعی آنتن است که جزئیات مربوط به آن در شکل ۲ تشریح شده است. تغییر در فرکانس کاری بدان معناست که مثلاً آنتن قابلیت پشتیبانی از چند فرکانس یا یک بازه فرکانسی را پیدا می‌کند. برخی از انواع آنتن‌های دارای قابلیت بازپیکربندی می‌توانند جهت پرتو را تغییر دهند یا الگوی تشعشعی خاصی را شکل‌دهی نمایند. این تغییرات می‌تواند در حوزه قطبش آنتن نیز تعریف شود. به طور مثال، آنتن امکان تغییر قطبش از خطی به دایروی یا بالعکس را فراهم می‌کند. این نوع توانمندی منحصر به آنتن-های دارای قابلیت بازپیکربندی است.



شکل ۲: انواع مشخصات تشعشعی دارای قابلیت بازپیکربندی در آنتن‌ها

تحقق آنتن های دارای قابلیت بازپیکربندی به واسطه استفاده از یک ساختاری برای آنتن فراهم می‌شود که برای آنتن ظرفیت تغییر و کنترل جریان الکتریکی و درنتیجه تغییر ابعاد الکتریکی یا فیزیکی ایجاد می-کند. طی سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای تولید آنتن‌های دارای قابلیت بازپیکربندی معرفی و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند که در این میان، می‌توان به روش‌های الکتریکی، مانند استفاده از یکسوسازها و ورکتورها، روش‌های نوری، استفاده از تغییرات فیزیکی در ساختار مواد و استفاده از موادی است که ماهیتاً قابلیت کنترل‌پذیری دارند اشاره نمود. بلوک دیاگرام این روش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. استفاده از مواد پلاسمایی، یکی از نوین‌ترین روش‌ها در تولید آنتن‌های

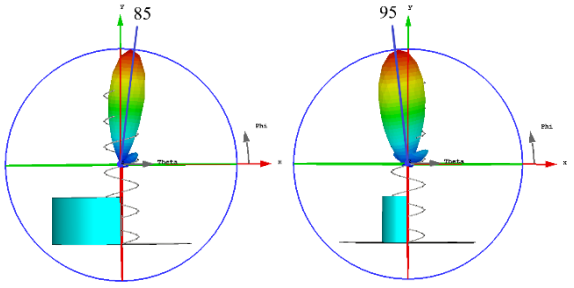
دارای قابلیت بازپیکربندی، به‌ویژه آنتن‌هایی است که توانایی دارند پرتو تشعشعی را به جهت دلخواه هدایت نمایند. این دستاورد علمی طی سال‌های اخیر توجه مجامع علمی را به خود جلب نموده است [۵، ۷، ۱۴ – ۱۷]. در این ساختارها، با استفاده از رسانا یا دی‌الکتریک‌های پلاسمایی در مجاورت تشعشع‌کننده‌های رایج فلزی، پرتو تشعشعی آنتن هدایت پذیر می‌شود.



شکل ۳: روش‌های تحقق آنتن‌های دارای قابلیت بازپیکربندی

در شکل ۴، تصویری از یک آنتن هلیکال هوشمند هدایت پذیر مبتنی بر فناوری پلاسما و تصویری از چرخش پرتو تشعشعی آن ارائه شده است. در این طرح از یک آنتن هلیکال مود محوری به‌عنوان تشعشع-کننده اصلی استفاده می‌شود که توسط بازتابنده‌های پلاسمایی، به-صورت استوانه‌های هم‌محور احاطه شده است. با توجه به نوع ساختار استوانه‌های پلاسمایی، امکان تحریک یک استوانه کامل یا بخشی از استوانه، به‌صورت هوشمند یا دستی و مبتنی بر موقعیت سیگنال هدف امکان پذیر است. انتخاب شعاع، ارتفاع و یا موقعیت بازتابنده‌های پلاسمایی همان عاملی است که می‌تواند الگوی تشعشعی آنتن هلیکال را در فضا هدایت‌پذیر نماید و مشخصات این آنتن مفصلاً در مراجع بحث شده‌اند [۷، ۱۷].

(الف)



(ب)

شکل ۴: تصویر نمونه ساخته شده از آنتن هلیکال هدایت پذیر مبتنی بر فناوری پلاسما، (ب) تصویری از هدایت پرتو تشعشعی آنتن به زوایای مختلف.

آنتن هلیکالی که مبتنی بر فناوری پلاسما قابلیت هدایت پرتو تشعشعی پیدا کرده است، در بازه زاویه‌ای سه‌بعدی، مستقل از هرگونه گرداننده مکانیکی، و تنها مبتنی بر کنترل الکتریکی روشن و خاموش شدن عناصر پلاسمایی می‌تواند پرتو تشعشعی خود را در فضا هدایت نماید. برای پیداکردن درک بهتری از نحوه عملکرد محیط پلاسما، در بخش بعدی، مشخصات اصلی پلاسما معرفی می‌شود.

مشخصات محیط پلاسما

از پلاسما به‌عنوان حالت چهارم ماده یاد می‌شود و به گاز یونیزه‌شده‌ای گفته می‌شود که همه یا بخش قابل توجهی از اتم‌های آن، یک یا چند الکترون از دست داده و به یون‌های مثبت تبدیل شده باشند. قابلیت گذردهی محیط پلاسما در حالت کم‌فشار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}=(1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2+\nu^2})-j(\frac{\omega_p^2\nu}{\omega(\omega^2+\nu^2)}) \qquad (۱)$$

که در آن، $\varepsilon_p=\varepsilon_r+j\varepsilon_i$ قابلیت گذردهی مختلط پلاسماست. در این رابطه، ε_0 قابلیت گذردهی خلأ، ω فرکانس زاویه‌ای موج الکترومغناطیس، ω_p فرکانس زاویه‌ای پلاسما و υ فرکانس برخورد است. فرکانس برخورد تابعی از فشار و نوع گاز است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nu(p)=k.p\times10^9 \ (\text{Torr}^{-1}.\text{Hz}), \qquad (۲)$$

که در آن مقدار k مبتنی بر نوع گاز تغییر می‌کند و p مبین مقدار فشار گاز است. در رابطه (۱)، مقدار فرکانس پلاسما تابعی از مجذور چگالی پلاسما و مقادیر جرم (m_e) و بار الکترون (e) است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\omega_p=\left[\frac{ne^2}{\varepsilon_0 m_e}\right]^{1/2} \qquad (۳)$$

که در آن n چگالی الکترون برحسب m^{-3} است. مقدار قابلیت هدایت الکتریکی مبتنی بر [۱۵] برابر است با:

$$\sigma = \left(\frac{\varepsilon_0 \upsilon_p \omega_p^2}{\upsilon_p{}^2 + \omega^2}\right) - j\left(\frac{\varepsilon_0 \omega \omega_p^2}{\upsilon_p{}^2 + \omega^2}\right) \quad (٤)$$

به اختصار می‌توان گفت این رابطه نشان می‌دهد که قابلیت هدایت الکتریکی پلاسما تابع فرکانس کاری و مشخصات فیزیکی پلاسما شامل مقدار فرکانس پلاسما و فرکانس برخورد آن است. نکته مهم در این خصوص آن است که چنانچه مقدار فرکانس پلاسما تاحد قابل توجهی بزرگتر از مقدار فرکانس کاری و فرکانس برخورد باشد، پلاسما رفتاری مشابه رسانای الکتریکی ارائه می‌کند و با کاهش مقدار فرکانس پلاسما نسبت به فرکانس کاری، خواص دی‌الکتریک در آن افزایش می‌یابد.
مهمترین ویژگی محیط پلاسما که آن را برای هدایت پرتو در آنتن‌ها مستعد می‌سازد برخورداری از قابلیت خاموش و روشن شدن است. خاموش شدن پلاسما در ساختار آنتن به منزل ناپدید شدن بخشی از آنتن است و با روشن شدن پلاسما، آن بخش مجدد ظاهر می‌شود. مبتنی بر همین خاصیت پلاسما می‌توان ترکیبات مختلفی از آن با آنتن-ها ایجاد نمود که قابلیت هدایت پرتو برای آنتن ایجاد می‌کند.

مقایسه هدایت مکانیکی و هدایت هوشمند پرتو آنتن مبتنی بر فناور پلاسما از منظر قابلیت اطمینان

همانطور که در مقدمه بیان شد، قدیمی‌ترین و شناخته‌شده‌ترین مکانیزم چرخش پرتو آنتن، استفاده از گرداننده مکانیکی است. این نوع از سیستم‌ها، مجهز به موتورهای مکانیکی هستند که می‌توانند آنتن را در صفحات مختلف افقی یا عمودی، یا هردو جهت، بچرخانند. متناسب با جرم آنتن، بازه زاویه‌ای هدایت، سرعت، دقت و شتاب مورد نظر برای چرخش پرتو، ابعاد و مشخصات فنی گردانندگان مکانیکی آنتن متفاوت است. با این وجود، بدیهی است که این سیستم‌ها جرم و حجم نسبتاً زیادی در مقایسه با آنتن‌ها و تجهیزات فرستنده یا گیرنده دارند و به‌دلیل ضرورت حرکت مکانیکی، استهلاک اجزای آن اجتناب ناپذیر است. علاوه بر استهلاک مکانیکی ناشی از حرکت، شرایط محیطی که از آنتن و گرداننده آن استفاده می‌شود روی طول عمر آن اثر گذار است. شرایط محیطی رطوبتی در مجاورت دریاها یا محیط‌هایی که بادهای شدید در آن می‌وزند و یا ذرات غبار محیطی زیاد است، می‌توانند عامل تسریع فرسایش سیستم مکانیکی هدایت پرتو آنتن محسوب شوند. در شکل ۵، تصویری از یک گرداننده آنتن هلیکال برای یک مأموریت فضایی ارائه شده است.
به‌طور خلاصه، در جمع‌بندی مشخصات مربوط به چرخاننده‌های مکانیکی آنتن‌ها می‌توان گفت که ادواتی حجیم، سنگین، گران‌قیمت و به لحاظ عملکردی پیچیده هستند و استهلاک ناشی از شرایط محیطی و اصطکاک می‌تواند سبب کاهش طول عمی آن‌ها شود. با وجود این معایب، به دلیل بلوغ کامل فناوری، اطمینان بالایی نسبت به عملکرد آن‌ها در مأموریت‌های محوله وجود دارد مشروط بر آن‌که سیستم کنترل آن، که نرم‌افزاری است، به درستی برنامه‌ریزی شده باشد.

شکل ۵: تصویری از یک بازتابنده سهموی و چرخاننده مکانیکی آنتن

در مقایسه با گرداننده‌های مکانیکی پرسابقه، امروزه فناوری‌های نوینی، همچون استفاده از فناوری پلاسما در ساختارآنتن برای هدایت پرتو درحال گسترش هستند که در مقایسه با ادوات مکانیکی قدیمی، بسیار سبک، کم‌حجم و ارزان‌قیمت محسوب می‌شوند. این نوع آنتن‌ها، توانایی مانور پذیری بالایی دارند و به دلیل آن‌که از حرکت فیزیکی برای چرخش پرتو استفاده نمی‌کنند، استهلاک ناشی از اصطکاک در ساختار آن‌ها مشاهده نمی‌شود. بخش نرم‌افزاری کنترل آنتن برای تحریک پلاسما همچنان در ساختار این نوع آنتن‌ها وجود دارد و بخش جدیدی که به ساختار آنتن در این حالت اضافه می‌شود، بخش تحریک پلاسما و همینطور بازتابنده‌های پلاسمایی است.
تحقق عناصر پلاسمایی مناسب و با طول عمر بالا برای استفاده در آنتن‌ها یکی از مواردی است که همچنان موضوع پژوهشی است و درصورت رفع موانع، می‌تواند رقابت بسیار جدی‌تری میان این هدایت پرتو مبتنی بر فناوری پلاسما و روش سنتی هدایت مکانیکی پرتو شکل گیرد. بنابراین، با توجه به نوین بودن استفاده از پلاسما در هدایت پرتو آنتن، این فناوری امتیاز کامل مربوط به بلوغ فناوری را کسب نخواهد کرد و راهکار رسیدن به بلوغ، استفاده از آن در کاربردهای بیشتر و گسترده‌تر است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پژوهش در زمینه استفاده از فناوری‌های نوین هدایت پرتو تشعشعی آنتن‌ها در سیستم‌های مخابراتی، برای رفع مشکلات مربوط به سیستم‌های سنتی چرخش مکانیکی آنتن، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. استهلاک مکانیکی، جرم و حجم زیاد و آسیب‌پذیری بالای ناشی از شرایط محیطی از جمله مشکلات اصلی این گردانندهای آنتن محسوب می‌شوند که می‌تواند عامل کاهش قابلیت اطمینان آن‌ها در سیستم‌های مخابراتی

محسوب شود؛ درحالیکه بزرگترین مزیت آن‌ها، بلوغ کامل فناوری است. در مقایسه با این سیستم‌ها، هدایت پرتو تشعشعی آنتن با استفاده از فناوری پلاسما، به‌دلیل برخورداری از مزایایی همچون سبک بودن، عدم تأثیرپذیری از محیط عملیاتی و نیز کاهش هزینه تولید، می‌تواند گزینه‌ی مطرحی در سیستم‌های مخابراتی شود و شرط سبقت آن نسبت به سیستم‌های سنتی، رسیدن به بلوغ فناوری و گذر از مرحله پژوهش است. سرمایه‌گذاری در این زمینه می‌تواند در بلندمدت، صرفه اقتصادی و قابلیت انعکاف و مانورپذیری بیشتری را برای سیستم‌های مخابراتی به‌همرا داشته باشد.

مراجع

[1] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4th Edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, Feb. 2016.

[2] H. Ja'afar, M. T. B. Ali, A. N. B. Dagang, H. M. Zali, N. A. Halili, "A reconfigurable monopole antenna with fluorescent tubes using plasma windowing concepts for 4.9-GHz application," *IEEE Transaction on Plasma Science*, vol. 43, no. 3, pp. 815-820, Mar. 2015.

[3] O. A. Barro, O. Lafond, H. Himdi, "Reconfigurable antennas radiations using plasma Faraday cage," in Proc. *Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Sep. 2015.

[4] Md. A. Towfiq, I. Bahceci, S. a. Blanch, J. Romeu, L. Jofre, B. A. Cetiner, "A Reconfigurable Antenna with Beam Steering and Beamwidth Variability for Wireless Communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 10, pp. 5052-5063, Jul. 2018.

[5] M. T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel, and M. Himdi, "Performance of a reconfigurable reflector antenna with scanning capability using low-cost plasma elements", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, no. 12, pp. 2869-2874, Dec. 2013.

[6] C. Wang, W. Shi, B. Yuan and J. Mao, "Pattern-Steerable Endfire Plasma Array Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 10, pp. 6994-6998, Oct. 2021.

[7] F. Sadeghikia, M. Valipour, M. T. Noghani, H. Ja'afar, and A. K. Horestani, "3D beam steering end-fire helical antenna with beamwidth control using plasma reflectors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 5, pp. 2507–2512, May 2021.

[8] S. H. Zainud-Deen, H. A. E. -A. Malhat, N. A. A. S. El-Shalaby, S. M. Gaber, "Circular Polarization Bandwidth Reconfigurable High Gain Planar Plasma Helical Antenna," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, no. 9, pp. 4274-4280, Sept. 2019, doi: 10.1109/TPS.2019.2931989.

[9] P. D. Carlo, M. Magarotto, G. Mansutti, S. Boscolo, A. -D. Capobianco, D. Pavarin, "Experimental Characterization of a Plasma Dipole in the UHF Band," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 9, pp. 1621-1625, Sept. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2021.3091739.

[10] X. Ye, Y. Wang, J. Yao, C. Yuan, Z. Zhou, A. M. Astafiev, A. A. Kudryavtsev, "Radiation pattern in a tunable plasma window antenna," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 55, no. 34, Jun. 2022.

[11] G. Mansutti, P. D. Carlo, M. A. Hannan, F. Boulos, P. Rocca, A. D. Capobianco, M. Magarotto, A. Tuozzi, "Modeling and design of a plasma-based transmit-array with beam scanning capabilities," *Results in Physics*, vol. 16, Mar. 2020.

[12] M. R. Dorbin, A. K. Horestani, F. Sadeghikia, M. T. Noghani and H. Jaafar, "Analytical Study on the Resonance Frequency of Tunable Surface-Wave-Excited Plasma Antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3184510.

[13] M. R. Dorbin, J. A. R. Mohassel, F. Sadeghikia, H. Ja'afar, "Analytical estimation of the efficiency of surface-wave-excited plasma monopole antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 4, pp. 3040-3045, Apr. 2022.

[14] M. Magarotto, L. Schenato, P. D. Carlo, A. D. Capobianco, "Feasibility of a Plasma-Based Intelligent Reflective Surface," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 97995-98003, 2022.

[15] T. Anderson, "Plasma Antennas", in Selected Topics in Plasma Physics. London, United Kingdom: IntechOpen, 2020 [Online].

[16] T. Anderson, "Antenna beam focusing and steering with refraction through a plasma," 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Pland, 2019.

[17] F. Sadeghikia, A. K. Horestani, and M. Himdi, "Reconfigurable Antennas Based on Plasma Reflectors and Cylindrical Slotted Waveguide", in Plasma Science - Recent Advances, New Perspectives and Applications, London, United Kingdom: IntechOpen, 2022 [Online]. Available: https://www.intechopen.com/online-first/84324 doi: 10.5772/intechopen.108017.