JSST
Journal of Space Science & Technology

Vol. 10/ No. 1/ 2017

Plasma Antenna Technology in Space Missions

F. Sadeghi-kia[1*]

Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology

[*]Postal Code: 1465774111, Tehran, IRAN

sadeghi_kia@ari.ac.ir

This study focuses on the characteristics of plasma antennas for their application in space communication systems. Structural and functional characteristics of plasma antenna are presented to evaluate their capability of being used in space missions. Numerical and experimental analysis results of the plasma antenna show that the resonant frequency of the antenna is controllable by changing the applied power, thus allowing different transmitting frequencies with a single element. This property leads to the reduction of the antenna elements in a limited area and the simplification in the layout of onboard communication systems as well as a decrease in the interferences of the electromagnetic waves. Analysis of the circular array of plasma antenna shows a novel beam forming mechanism with a high directivity in the space.

Keyword: Plasma antenna, Earth station, Spacecraft, Plasma array

1. Assistant Professor (Corresponding Author)

Received: 2017.04.09, Accepted: 2017.08.02

JSST
فصلنامهٔ علمی - پژوهشی علوم و فناوری فضایی

جلد ۱۰ / شمارهٔ ۱/ بهار ۱۳۹۶
ص. ص . ۳۴- ۲۷

آنتن پلاسما در مأموریت‌های فضایی

فاطمه صادقی‌کیا[۱]

پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

*تهران، کد پستی: ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

Sadeghi_kia@ari.ac.ir

در این مقاله، ویژگی‌های استفاده از فناوری پلاسما در آنتن سیستم‌های ارتباطی حوزهٔ فضایی مورد بررسی و پژوهش قرار می‌گیرد. در راستای بررسی قابلیت جایگزینی آنتن‌های فلزی با عناصر پلاسمایی معادل در سیستم‌های فضایی و ایستگاه زمینی، مشخصات ساختاری و عملکردی آنتن پلاسمای نمونه ارائه می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های نرم‌افزاری و اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی آنتن تحت تست درخصوص قابلیت تغییر فرکانس کاری در یک آنتن پلاسمایی، امکان استفادهٔ مشترک و غیرهمزمان از یک آنتن در چند سیستم ارتباطی فراهم است و این ویژگی سبب می‌شود علاوه بر کاهش تعداد آنتن‌ها در یک فضای محدود، تداخلات الکترومغناطیسی آن‌ها نیز کاهش یابند. بررسی نرم‌افزاری استفاده از عناصر پلاسمایی در آرایه‌ها، به‌ویژه آرایه‌های دایروی، از دیگر دستاوردهای این مقاله پژوهشی است. آرایه‌های پلاسمایی دایروی می‌توانند در جهت‌یاب‌های سیگنال‌های رادیویی، به‌ویژه در ایستگاه‌های زمینی سامانه‌های بازگشت‌پذیر، مورد استفاده قرار گیرند و قابلیت چرخش الگوی تشعشعی بسیار جهت‌دار و با دقت نشانه‌روی بالا را در فضای دایروی فراهم کنند.

واژه‌های کلیدی: آنتن پلاسما، ایستگاه زمینی، سامانه فضایی، آرایه پلاسمایی

علائم و اختصارات

حد پایین چگالی پلاسمای یونیزه شده در محفظه	n_D
حد بالای چگالی پلاسما درون محفظه	n_0
قابلیت گذردهی خلأ	$\boldsymbol{\varepsilon_0}$
قابلیت گذردهی محفظه	$\boldsymbol{\epsilon_g}$
ضریب ثابت	$\boldsymbol{A(p)}$
توان تحریک	$\boldsymbol{P_0}$
قابلیت هدایت الکتریکی	$\boldsymbol{\sigma}$
فرکانس زاویه‌ای پلاسما	$\boldsymbol{\omega_p}$
فرکانس برخورد الکترون خنثی در پلاسما	$\boldsymbol{\nu}$
فرکانس زاویه‌ای تحریک	$\boldsymbol{\omega}$
فرکانس تحریک	f

مقدمه

ضرورت برقراری ارتباطات رادیویی در سامانه‌های فضایی از آغاز فعالیت‌های فضایی، که بیش از هفت دهه از آن می‌گذرد، همواره وجود داشته است. سیستم‌های رادیویی مختلفی در یک سامانه وجود دارند که صرف‌نظر از تفاوت کاربرد، قالب یکسانی برای ایفای نقش آن‌ها وجود دارد. این قالب در حالت کلی عبارت است از اجزای فرستنده (شامل بخش باندپایه، بخش فرکانس رادیویی RF و آنتن) در یک‌سو و اجزای گیرنده (شامل آنتن، بخش RF و بخش باندپایه) در سوی دیگر. جانمایی اجزای فرستنده و گیرندهٔ یک سیستم رادیویی در مأموریت فضایی، شامل سامانه و ایستگاه زمینی، تابع نوع مأموریت است؛ لکن ماهیت اجزا، حتی با گذر زمان و تکامل سیستم‌های ارتباطی، همچنان یکسان بوده است. بنابراین، همواره اولین طبقه در یک سیستم گیرنده و آخرین طبقه در یک سیستم فرستندهٔ آنتن است.

ضرورت تناسب آنتن و نوع مأموریت برکسی پوشیده نیست.

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

دریافت مقاله: ۹۶/۰۱/۲۰ ، تأیید مقاله ۹۶/۰۵/۱۱

انواع متفاوتی از آنتن برای ایستگاه زمینی قابل استفاده هستند که عموماً استفاده از آن‌ها روی سامانهٔ فضایی امکان‌پذیر نیست و بالعکس. شرایط محیطی، پوشش الگوی تشعشعی، بهره، پلاریزاسیون، جرم و حجم، از مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در انتخاب آنتن مناسب برای یک مأموریت مشخص تأثیرگذار هستند [۱]. با پیشرفت فناوری، انواع جدیدی از آنتن‌های مناسب برای ایستگاه زمینی و نیز سامانهٔ فضایی توسعه یافته‌اند که در این میان، کاهش ابعاد، افزایش انطباق با شرایط محیطی (به‌طور ویژه روی سامانه) و نیز غلبه بر محدودیت‌های فیزیکی آنتن (نظیر سرعت تبادل اطلاعات و پهنای باند) پیشرفت زیادی داشته‌اند. استفاده از فناوری هوشمندسازی آنتن، یا کنترل‌پذیر بودن آنتن در سامانه‌های فضایی، بیش از سه دهه است که در حوزهٔ مخابرات فضایی کشورهای پیش‌رو مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲] و امروزه ضرورت استفاده از آن، بیش از پیش، احساس می‌شود. بررسی اسناد چشم‌انداز ناسا در حوزهٔ مخابرات نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس ارتباطات رادیویی در سامانهٔ فضایی، ضرورت استفاده از آنتن‌های با راندمان بیشتر[۲] و قابل جهت‌گیری به سمت مطلوب، بسیار مورد تأکید قرار گرفته است. همچنین در این سند تأکید شده است که در ایستگاه زمینی، به جای ساخت آنتنی سهموی با ابعاد بسیار بزرگ، لازم است از آرایه‌ای از آنتن‌ها استفاده شود که بتوانند مشخصات تشعشعی مطلوب‌تری داشته باشند. به‌علاوه، در سیستم‌های پروازی، بر استفاده از ساختارهای آنتنی قابل گسترش[۳] و آنتن‌هایی که بتوانند خود را در جهت شدت سیگنال تطبیق دهند تأکید شده است [۳].

بررسی مشخصات آنتن نوظهور پلاسما نشان می‌دهد که، آنتن پلاسما قابلیت‌های زیادی برای بهره‌برداری در سیستم‌های نوین ارتباط فضایی دارد. از مهم‌ترین ویژگی‌های آنتن پلاسما می‌توان به قابلیت شکل‌گیری مجدد[۴] در بازهٔ زمانی میکروثانیه، قابلیت تنظیم جهت الگوی تشعشعی و فرکانس کاری و نیز افزایش سرعت تبادل داده اشاره کرد [۴]. بررسی آزمایشگاهی رفلکتور پلاسمایی نمونه برای ارتباطات ماهواره‌ای، بیانگر توانمندی آن برای جایگزینی با عنصر معادل فلزی، و حتی با قابلیت‌های بسیار بیشتر از آن است. نتایج اندازه‌گیری مشخصات تشعشعی این رفلکتور نشان داده است که نمونه پلاسمایی، علاوه بر آن‌که از نظر الگوی تشعشعی پوشش مطلوبی دارد، بر محدودیت پهنای باند نیز غلبه می‌نماید [۴].

برای تشریح ویژگی‌های آنتن پلاسما و جایگاه آن در کاربردهای فضایی، در ادامه این مقاله، ابتدا مشخصات ساختاری یک آنتن پلاسما تشریح شده و سپس ویژگی‌های آن برای کاربرد در حوزه فضایی معرفی می‌شوند. برای این هدف، نتایج شبیه‌سازی یک نمونه آنتن پلاسمای تک‌قطبی و نیز آرایه دایروی پلاسمایی ارائه می‌شود و مشخصات و زمینه کاربرد آن‌ها تشریح خواهد شد. بررسی چالش‌های این حوزه از فناوری از دیگر گام‌های این پژوهش است و در پایان جمع‌بندی و نتیجه‌گیری انجام خواهد شد.

معرفی آنتن پلاسما

آنتن پلاسما، برخلاف آنتن‌های رایج فلزی، از هادی پلاسمایی به‌عنوان عنصر تشعشعی استفاده می‌کند. پلاسما، به گاز به‌شدت یونیزه شده‌ای گفته می‌شود که تعداد الکترون‌های آزاد آن تقریباً برابر با تعداد یون‌های مثبت آن باشد و عموماً از آن به‌عنوان حالت چهارم ماده یاد می‌شود. میزان هدایت الکتریکی محیط پلاسما تابع تعداد الکترون‌های آزاد آن است [۵]. ایدهٔ استفاده از محیط پلاسمایی به‌عنوان هادی الکتریکی در آنتن‌ها، به بیش از سی سال گذشته برمی‌گردد [۶]، لکن امکان‌سنجی در خصوص قابلیت بهره‌برداری از آن، چندسالی است که شروع شده است [۷، ۸] و همچنان ادامه دارد. دلیل این توجه جامعه علمی به آنتن پلاسما، مشخصات ویژه این آنتن است.

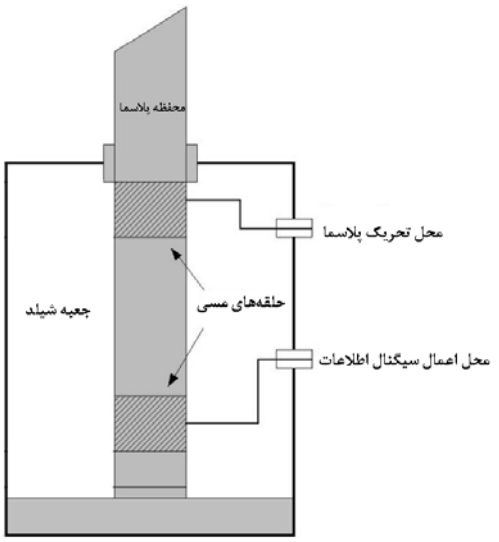
آنتن پلاسمای ستونی ساده، از اعمال توان الکتریکی به یک محفظه دی‌الکتریک، که با گاز کم فشار پر شده‌است، تشکیل می‌شود. توان الکتریکی برای یونیزاسیون گاز محصور در محفظه استفاده می‌شود. بنابراین، آنتن پلاسما نیازمند دو سیگنال متفاوت برای عملیاتی شدن است: سیگنال تحریک و سیگنال اطلاعات. تفاوت اصلی ساختار آنتن پلاسما و آنتن رایج فلزی نیز در همین ضرورت وجود سیگنال تحریک است. روش‌های مختلفی برای اعمال سیگنال تحریک به آنتن پلاسما معرفی شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به تحریک با موج سطحی، تخلیه DC و نیز استفاده از لیزر اشاره کرد. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که تحریک آنتن پلاسما از یک انتها و با استفاده از توان RF (تحریک موج سطحی) برای ارتباطات محدوده فرکانسی HF و VHF مؤثرتر و کم‌نویزتر خواهد بود [۷].

شکل (۱) ساختار کلی آنتن پلاسما با تحریک RF را نشان می‌دهد. محفظهٔ اصلی آنتن، عموماً از یک مادهٔ دی‌الکتریک مانند پیرکس، کوارتز یا مواد شفاف دیگری تشکیل می‌شود. ضخامت محفظه بسیار اندک (در حد کمتر از دو میلی‌متر) است و کاربر، به‌دلیل عدم دسترسی مستقیم به هادی پلاسمایی، برای اعمال سیگنال اطلاعات، ناگزیر به استفاده از حلقه‌ای مسی دور تا دور بدنهٔ آنتن است. از حلقه‌ای مشابه برای اعمال سیگنال تحریک به آنتن استفاده

2. Efficient
3. Deployable
4. Reconfigurahble

می‌شود. مشروح جزئیات این ساختار در [۹] بیان شده است. با توجه به شکنندگی مواد مذکور، پژوهشگران ماده‌ای آزمایشگاهی به‌عنوان سینفوم[5] ابداع کرده‌اند که مشخصات حرارتی، استحکامی، عملکردی و جرمی بسیار مطلوب‌تری نسبت به سایر مواد در این کاربرد دارد [۴] و برای کاربرد مورد نظر این پژوهش نیز تناسب بیشتری دارد.

از یک گاز بی‌اثر، مانند آرگون می‌توان به‌عنوان پلاسما استفاده کرد. پس از تزریق پلاسما با فشار مورد نظر در محفظه، و مسدودکردن انتهای محفظه، نوبت به اعمال توان تحریک فرا می‌رسد. میزان هدایت الکتریکی پلاسمای محصور در محفظه تابع عوامل تحریک و مشخصات فیزیکی گاز محصور است. به‌عبارت ساده‌تر، فشار و چگالی گاز، دو عامل اصلی تأثیرگذار بر میزان هدایت الکتریکی آنتن پلاسما هستند. مناسب‌ترین محدودهٔ فشار مجاز برای این کاربرد حدود کمتر از ۱mb تخمین زده شده است [۹]؛ حال‌آن‌که اطلاعات کاملی از تأثیر فشار گاز بر بهرهٔ آنتن هنوز گزارش نشده است و تنها رابطهٔ فشار پلاسما و طول آنتن پلاسما در [۱۰] بیان شده است.



شکل ۱- ساختار کلی آنتن پلاسما

چگالی پلاسما درون محفظه تابع عوامل تحریک پلاسما و نیز عوامل فیزیکی گاز است. فرکانس تحریک (f)، حد پایین چگالی پلاسمای یونیزه شده در محفظهٔ (n_D) را مطابق رابطهٔ (۱) تعریف می‌کند.

$$n_D = 1.2 \times 10^4 (1+\epsilon_g) f^2 (cm^{-3}) \qquad (۱)$$

که در آن ϵ_g قابلیت گذردهی محفظه و f برحسب مگاهرتز است [۱۰]. حد بالای چگالی پلاسما درون محفظه (n_0) نیز تابع توان تحریک (P_0) است و می‌توان نوشت:

$$n_0 \approx A(p)\sqrt{P_0} \qquad (۲)$$

که در آن $A(p)$ کمیتی است تابع فشار و پارامترهای فیزیکی گاز. طول آنتن پلاسمای ستونی تابع توان تحریک و مشخصات فیزیکی گاز و محفظه است [۹]. در [۹ و ۱۰] نتایج اندازه‌گیری تغییرات طول آنتن برحسب توان تحریک و فشار گاز ارائه شده است.

ویژگی‌های آنتن پلاسما برای کاربرد در حوزهٔ فضایی

انواع متفاوتی از آنتن‌های پلاسمایی تاکنون طراحی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در این میان می‌توان به آنتن‌های تک‌قطبی، آرایه‌ای، هلیکال، سهموی [۴] و آرایه بازتابی [۱۱] اشاره کرد. ویژگی‌هایی که در این فصل معرفی می‌شوند، عمدتاً به نوع آنتن محدود نمی‌شوند؛ ولی شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این پژوهش، جهت سهولت، بر مبنای عناصر تک‌قطبی هستند.

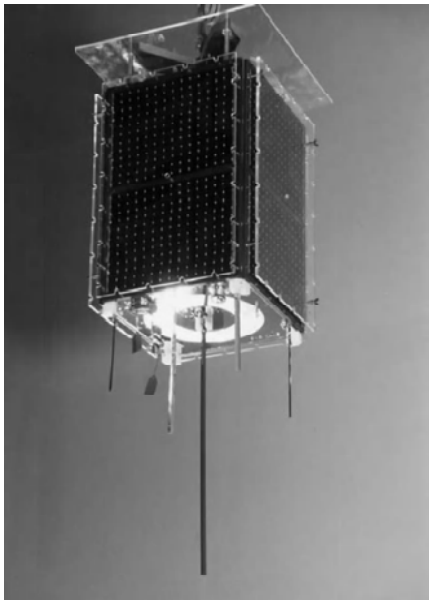
آنتن‌های سیمی[6]، نظیر دوقطبی[7]، تک‌قطبی[8] و نیز ترکیب آرایه‌ای آن‌ها، از ابتدایی‌ترین فعالیت‌های فضایی تا به امروز در مأموریت‌های مرتبط با اکتشافات فضایی، کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند. کاربرد آنتن‌های دوقطبی و تک‌قطبی در ارسال یا دریافت سیگنال‌های تله‌متری و تله‌کامند در مدت زمان مأموریت، به‌ویژه زمانی است که سیستم کنترل وضعیت فضاپیما فعال نیست یا شرایط مشابه دیگری حاکم است که نیازی به آنتن‌های با جهت‌داری بسیار بالا وجود ندارد؛ چراکه این آنتن‌ها مشخصات تشعشعی همه‌جهته دارند [۱۲]. ترکیب آرایه‌ای این آنتن‌ها سبب افزایش جهت‌داری آنتن می‌شود و استفاده از این نوع آنتن‌ها و نیز انواع متفاوت دیگری از ترکیبات آن‌ها، نظیر آرایه یاگی‌اودا، در ایستگاه‌های زمینی رواج زیادی دارد. در شکل (۲) تصاویری از کاربرد آرایهٔ آنتن‌های تک‌قطبی در سامانهٔ فضایی و نیز ایستگاه زمینی نشان داده شده است.

عملکرد مطلوب آنتن‌های سیمی و ترکیبات آن‌ها تابع طول آنتن است. این آنتن‌ها عموماً در فرکانس تشدید[9] مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴]. فرکانس تشدید، که عملاً بهترین نقطهٔ کاری آنتن محسوب می‌شود، فرکانسی است که در آن آنتن سیمی طول مشخصی دارد و برای عملیات در این فرکانس طراحی می‌شود؛ بنابراین، نمی‌تواند در سایر فرکانس‌ها عملکرد مناسبی داشته باشد. مشخصات تشعشعی آنتن (شامل الگوی تشعشعی و بهره) معمولاً در

5. SynFoam

6. Wire antennas
7. Dipole
8. Monopole
9. Resonant

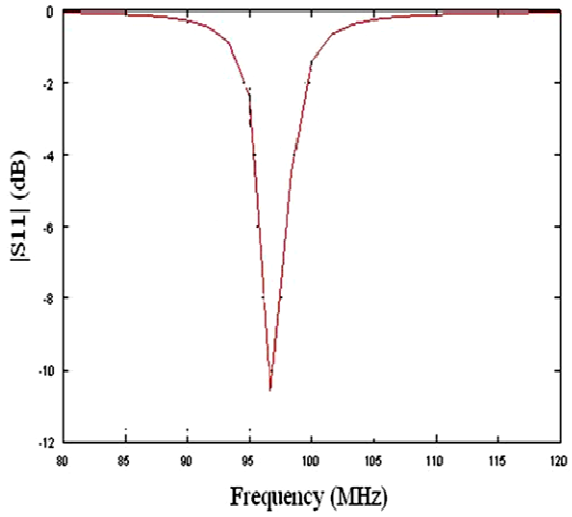
فرکانس تشدید مطلوب‌تر از سایر فرکانس‌هاست و هر نوع انحراف فرکانس کاری در چنین آنتنی سبب بروز تلفات توان و خروج آنتن از ناحیهٔ عملکرد مطلوب خواهد شد. در شکل (۳)، نمودار پارامتر S_{11} آنتن تک‌قطبی سیمی نمونه برحسب فرکانس نشان داده شده است که فرکانس تشدید آن ثابت و در محدودهٔ MHz ۹۶/۵ قرار دارد.



(الف)

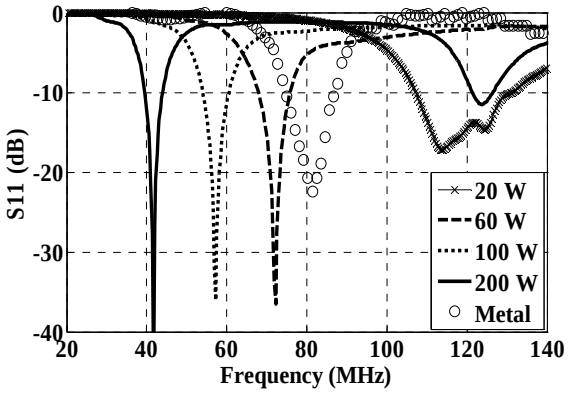
(ب)

شکل ۲- الف) نمونه‌ای از همجواری آنتن‌های تک‌قطبی UHF و VHF در ماهوارهٔ UoSAT [۱۲]، ب) نمونه‌ای از آرایه آنتن‌های تک‌قطبی در ایستگاه زمینی هوشمند ژاپن [۱۳]



شکل ۳- نمایش پارامتر S۱۱ آنتن سیمی معمولی نمونه در محدودهٔ فرکانس کاری

چنانچه ساختار آنتن سیمی مورد نظر از جنس پلاسمایی باشد، مشخصات عملکردی آن متفاوت خواهد شد؛ چراکه طول آنتن با تغییر توان تحریک قابل کنترل خواهد بود [۴، ۹-۱۰]. بنابراین با انتخاب توان تحریک مناسب، زمانی‌که سایر عوامل تحریک ثابت هستند، می‌توان فرکانس کاری آنتن را در محدودهٔ مورد نظر تغییر داد. به‌علاوه، با قطع توان تحریک، آنتن قابلیت هدایت الکتریکی خود را از دست خواهد داد. بنابراین، مقاومت سیستم، نسبت به سیگنال‌های نامطلوب توان بالا، افزایش خواهد یافت. در شکل (۴)، تغییرات پارامتر S_{11} آنتن پلاسمای تک‌قطبی برحسب فرکانس با تغییر میزان توان تحریک، در فرکانس تحریک ثابت ۵۰۰MHz و فشار پلاسمای ۰/۴mb درون محفظه‌ای به قطر ۲۵ mm، نشان داده شده است. این نتایج از شبیه‌سازی عددی آنتن پلاسما، با روشی که در [۱۵] تشریح شده، استخراج شده است. این شکل نشان می‌دهد که با تغییر توان تحریک بین ۲۰۰W تا ۲۰W، فرکانس کاری آنتن، بین ۴۱/۶۶ MHz تا ۱۱۶/۲ MHz، قابل کنترل است و این یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آنتن پلاسماست. این ویژگی در مخابرات فضایی و زمینی می‌تواند کاربرد گسترده‌ای داشته باشد؛ چراکه در صورت همجواری تعداد زیادی آنتن فلزی، که در زمان‌های متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند، اثر تداخلی نسبتاً بزرگی میان آنتن‌ها ایجاد می‌شود که علاوه‌بر ایجاد اشکال در ارسال و دریافت سیگنال‌های ارتباطی، سبب صرف هزینه بیشتر در ساخت و نگهداری آنتن‌ها می‌شود. درصورت استفادهٔ مشترک چند سیستم مخابراتی به‌صورت غیرهمزمان از یک آنتن پلاسمایی، علاوه بر کاهش تجهیزات در محیط، تداخلات الکترومغناطیسی نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۴- پارامتر S۱۱ آنتن پلاسمای شبیه‌سازی شده با تغییر توان تحریک و مقایسه با نمونهٔ فلزی

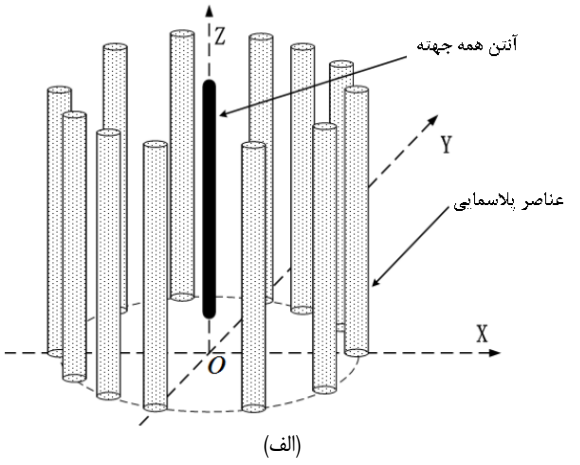
یکی دیگر از کاربردهای آنتن‌های سیمی، استفاده از آن‌ها در آرایه‌ها، به‌ویژه آرایه‌های خطی و دایروی است. تحلیل عددی یک آرایهٔ خطی پلاسمایی با عناصر تک‌قطبی برای کاربرد فضایی در [۱۶] ارائه شده است. این قبیل آرایه‌ها می‌توانند برای نصب روی بدنهٔ اجسام متحرک، نظیر سامانه‌های فضایی، و نیز ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده قرار گیرند. آرایه‌های دایروی می‌توانند برای کاربردهای مختلفی، نظیر جهت‌یاب سیگنال‌های رادیویی، مورد استفاده قرار گیرند [۱۴] و نمونه این آرایه در [۱۷] ارائه شده است. طراحی این آرایه‌ها با محدودیت فرکانسی مشخصی همراه نیست و می‌توانند در هر فرکانس دلخواهی طراحی شوند. در ساختار این آرایه از عناصر یکسان با شعاع R و طول L در فواصل یکسان d از آنتن همه‌جهته واقع در مبدأ دایره استفاده می‌شود که فواصل بین عناصر نیز باهم برابر است. نمونه این ساختار در شکل ۵-الف نشان داده شده است. چنانچه عناصر آرایه دایروی پلاسمایی باشند، تحریک یا عدم تحریک این عناصر سبب چرخش الگوی تشعشعی و در نتیجه حصول آرایه‌ای منحصر به‌فرد می‌شود که قابلیت پوشش کامل محدوده دایروی را دارد. شبیه‌سازی این آرایه با استفاده از روش‌های عددی برای آرایه‌ای که در فرکانس ۸/۱GHz طراحی شده است نشان می‌دهد که با تحریک هر عنصر پلاسمایی، الگوی تشعشعی در جهت آن عنصر، مطابق شکل ۵- ب جهت‌دار شده و با قطع تحریک آن عنصر، قابلیت چرخش الگوی تشعشعی برای دیگر عناصر پلاسمایی فراهم می‌شود. بدین‌ترتیب می‌توان الگوی تشعشعی را تا 360^{o} چرخاند. هرچه تعداد عناصر بیشتر باشد، دقت نشانه‌روی به سمت هدف مورد نظر بیشتر خواهد بود.

در شکل ۵- ج پوشش الگوی تشعشعی برای تعداد عناصر دوازده‌تایی از این آرایه نشان داده شده است. عناصر این آرایه با فاصله یکسان 30^{o} از یکدیگر روی دایره‌ای با شعاع ۰/۰۶۴۱ m قرار دارند. آرایه‌های دایروی در ایستگاه زمینی، برای مأموریت‌های فضایی بازگشت‌پذیر و پیداکردن سامانه بازیابی شده، کاربرد فراوانی دارند.

آرایه یاگی‌اودا یکی دیگر از انواع آرایه‌های پلاسمایی قابل تحقق است و نمونه شبیه‌سازی شده آن در [۱۸] تشریح شده است. این آرایه نیز کاربرد بسیاری در ایستگاه‌های زمینی دارد.

آنتن سهموی، که یکی از پرکاربردترین انواع آنتن‌ها در حوزهٔ فضایی است، با استفاده از فناوری پلاسمایی قابل تحقق است. در [۱۹، ۲۰] ساختار آنتن سهموی پلاسمایی، تحت عنوان آینه چابک[10] برای محدودهٔ فرکانسی باند X و بالاتر از آن تشریح شده است. این آنتن می‌تواند الگوی تشعشعی خود را به‌صورت الکترونیکی بچرخاند و جایگزین بسیار مطلوبی برای آرایه‌های فازی محسوب می‌شود. نتایج این بررسی نشان می‌دهند که این آرایه می‌تواند در محدودهٔ فرکانسی بسیار وسیع‌تری نسبت به معادل فلزی عملکرد قابل قبول داشته باشد.

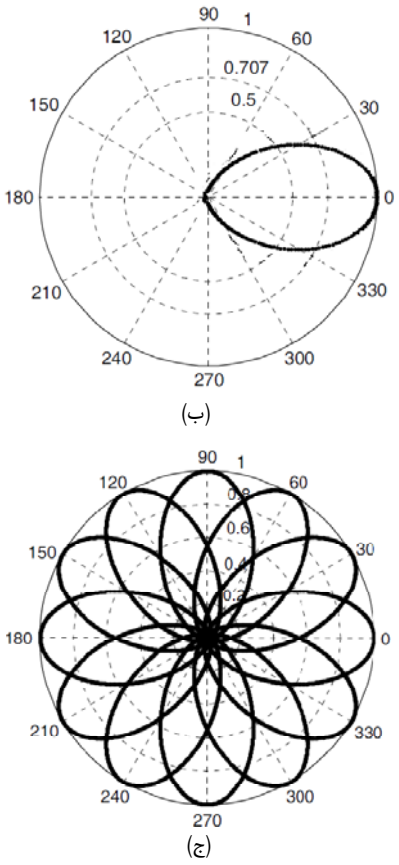
نتایج ارائه شده در [۴] نشان می‌دهند که تحت شرایط خاصی، نویز حرارتی آنتن پلاسما از نمونه معادل فلزی کمتر است و این شرایط خاص، تابع فرکانس برخورد الکترون خنثی در پلاسماست. نویز حرارتی (جانسون) از حرکت تصادفی الکترون‌ها ناشی می‌شود و با درجه حرارت الکترون چگالی طیف توان نویز شناخته می‌شود. در تحریک آنتن پلاسما با موج سطحی (که مورد توجه ما در این پژوهش قرار دارد)، نویز حرارتی یکی از مهم‌ترین منابع نویز آنتن محسوب می‌شود. کاهش نویز حرارتی سبب افزایش پهنای باند آنتن می‌شود و این یکی از مهم‌ترین مزایای آنتن پلاسما برای کاربرد در حوزهٔ فضایی است.



(الف)

شکل ۵- (الف) ساختار آرایه پلاسمایی دایروی ۱۲ عنصری؛

10. Agile mirror



ادامهٔ شکل ۵- (ب) الگوی تشعشعی تک پرتو، (ج) چرخش الگوی تشعشعی بین ۱۲ عنصر در فرکانس ۸ /۱GHz

در مجموع، باتوجه به ویژگی‌های معرفی شده از آنتن پلاسما، می‌توان مزایای استفاده از این فناوری نوین در کاربردهای فضایی را در دو دستهٔ کلی کاربرد آنتن روی سامانه‌های فضایی و ایستگاه زمینی به‌تفکیک بیان کرد. امکان کاهش تعداد آنتن‌ها روی سامانه، که بالطبع منجر به کاهش بودجه جرمی آنتن می‌شود، کاهش تداخلات آنتن‌های همجوار، کاهش نویز حرارتی، افزایش پهنای باند و نیز افزایش مقاومت گیرنده‌های سامانه نسبت به تشعشعات نامطلوب (نظیر سیگنال‌های جنگ الکترونیک) از مهم‌ترین مزایای استفاده از آنتن پلاسما در سامانه‌های فضایی محسوب می‌شوند. مزایای فوق به حوزهٔ ایستگاه زمینی نیز قابل تعمیم است؛ لکن استفاده از آرایه‌های جهتی و ایجاد قابلیت چرخش الگوی تشعشعی در جهت مورد نظر، از ویژگی‌های خاص آنتن پلاسما برای کاربرد در ایستگاه زمینی، به‌ویژه برای سامانه‌های بازگشت‌پذیر است.

چالش‌های آنتن پلاسما

گرچه استفاده از فناوری نوین پلاسمایی به‌عنوان آنتن می‌تواند دستاورد بزرگی در حوزهٔ مخابرات، به‌ویژه مخابرات فضایی، محسوب شود، لکن استفاده از آن در برخی کاربردها با ابهامات و تردیدهایی مواجه است. در این بخش، چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از فناوری آنتن پلاسما در فضا و نیز ایستگاه زمینی معرفی خواهند شد. یکی از شاخص‌ترین محدودیت‌ها، بودجه توانی، جرمی و حجمی در سامانه‌های فضایی است. وجود عناصر و مدارات تحریک برای تبدیل پلاسما به گاز یونیزان هادی ضروری است. بدون وجود تحریک، تقریباً هیچ‌گونه ساختار تشعشعی در محیط وجود ندارد. ابعاد عناصر تحریک به نوع و توان آن بستگی دارد. استفاده از مدارات تحریک پالسی می‌تواند در ساختارهای کم‌حجم‌تر و با مصرف توان کمتری نسبت به مدارات موج پیوسته محقق شود. به‌علاوه استفاده از منابع لیزری نیز در برخی مراجع پیشنهاد شده است [۴]. محدودیت بودجهٔ جرمی در سازه‌های متحرک، درصورت عدم وجود توجیه مناسب، می‌تواند استفاده از آنتن پلاسما را به اولویت‌های بعدی انتقال دهد؛ مگر آن‌که ابعاد ساختار آنتن، شامل مدارات تحریک و آنتن، به حد قابل قبولی نسبت به معادل فلزی کاهش یابد یا توجیه جرمی مطلوبی، نظیر کاهش تعداد آنتن‌ها روی سازه، وجود داشته باشد (مطابق آن‌چه در بخش قبل درخصوص مزایای آنتن پلاسما مطرح شد).

یکی دیگر از چالش‌های عمده در آنتن پلاسما، تابعیت قابلیت هدایت الکتریکی آنتن (σ) به عوامل مختلف فیزیکی و محیطی است. قابلیت هدایت الکتریکی پلاسما با رابطهٔ (۳) بیان می‌شود.

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 \omega_p^2 \nu}{\omega^2+\nu^2} - j\frac{\varepsilon_0 \omega_p^2 \omega}{\omega^2+\nu^2} \qquad (۳)$$

که در آن ω_p فرکانس زاویه‌ای نوسان چگالی بار آزاد پلاسما، ν فرکانس برخورد الکترون خنثی در پلاسما و ω فرکانس زاویه‌ای تحریک پلاسماست. تابعیت این کمیت به فشار و سایر شرایط محیطی، به‌صورت غیرمستقیم به همین پارامترها وابسته است. بنابراین، ثابت نگه‌داشتن کلیه پارامترها در حالات مختلف، کار چندان ساده‌ای نیست و نیازمند انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه است.

چنانچه استفاده از آنتن پلاسما در محیط فضا و روی سامانهٔ فضایی مورد توجه باشد، لازم است تأثیر شرایط آن محیط بر عملکرد آنتن پلاسمایی مورد توجه قرار گیرد. در فضا، بسته به نوع مأموریت و مدت زمان توقف سامانه در آن محیط و ارتفاع مأموریت، شرایط محیطی متفاوتی نسبت به زمین حاکم است که از آن جمله برای سامانه‌های با ماندگاری طولانی می‌توان به تشعشعات کیهانی، تشعشعات ثانویه، اثرات بی‌وزنی، تغییرات حرارتی زیاد، ساطع شدن گاز از ماده بیرونی آنتن و زباله‌های فضایی اشاره کرد. در مأموریت‌های کوتاه‌مدت و زیرمداری، عموماً شرایط غالب عبارتند از تنش‌های محیطی نظیر شوک، شتاب و ارتعاش و نظایر آن. برای بررسی قابلیت استفاده از این فناوری در سامانه‌های فضایی، این موارد باید مورد توجه و پژوهش قرار گیرند.

به‌دلیل نوظهور بودن فناوری آنتن پلاسمایی، برخی از مشخصات آن چندان مکشوف نیست و لازم است شناسایی شوند. یکی از تکنیک‌های بررسی مشخصات این آنتن، تحلیل مداری آن، برای استخراج مدار معادل آنتن، و به‌دنبال آن تعیین مدارات تطبیق در کاربرد مورد نظر است. دراین راستا، پژوهش‌هایی انجام شده است و تأثیر پارامترهای فیزیکی پلاسما بر مدار معادل آنتن تک-قطبی و دوقطبی پلاسمایی در [۲۱ و ۲۲] تشریح شده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده در این بخش، چالش‌هایی را که در خصوص این فناوری نوین در فضا مطرح است می‌توان به صورت کلی به ضرورت وجود عناصر تحریک در مجاورت آنتن، شناخت ناکافی از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد آنتن و شرایط محیطی پیچیده تقسیم‌بندی کرد. قابل ذکر است که محدودیت‌های فوق عمدتاً در کاربرد این فناوری در ایستگاه زمینی محلی از اعراب ندارند و مهمترین چالش مطرح از این آنتن در حوزه کاربری ایستگاه زمینی را می‌توان به بحث هزینه‌ها و استحکام مرتبط دانست. شایان ذکر است که، در انتخاب فناوری آنتن پلاسما نسبت به آنتن‌های رایج فلزی، باید مصالحه‌ای میان مزایا و چالش‌ها برقرار کرد.

در مجموع، به‌نظر می‌رسد زمینهٔ استفاده از آنتن پلاسما در ایستگاه‌های زمینی بسیار هموارتر از کاربرد آن در فضا باشد؛ هرچند درصورت غلبه بر محدودیت‌های ذکر شده از آنتن پلاسما در این بخش، می‌توان آن را جایگزینی ارزنده در سامانه‌های فضایی دانست.

نتیجه‌گیری

ساختار آنتن پلاسما، نحوهٔ تحریک آن و محدودهٔ مجاز پارامترهای فیزیکی پلاسما، شامل چگالی پلاسما در محل تحریک و نقطهٔ انتهایی آنتن و نیز عوامل تأثیرگذار بر این پارامترها، برای کاربرد به‌عنوان آنتن، در این مقاله تشریح شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که آنتن‌های پلاسمایی به شکل‌های مختلف و در فرکانس‌های کاری متفاوت قابل تحقق هستند.

بررسی قابلیت جایگزینی آنتن‌های سیمی تک‌عنصره و آرایه‌ای در مأموریت‌های فضایی نشان می‌دهد که عناصر پلاسمایی، به‌دلیل برخورداری از قابلیت تغییر فرکانس تشدید با عوامل تحریک، می‌توانند در محدودهٔ فرکانسی بسیار وسیع‌تری نسبت به آنتن‌های رایج فلزی کار کنند. امکان کاهش تعداد آنتن‌ها روی سامانه، که بالطبع منجر به کاهش بودجهٔ جرمی آنتن می‌شوند، کاهش تداخلات آنتن‌های همجوار، کاهش نویز حرارتی، افزایش پهنای باند و نیز افزایش مقاومت گیرنده‌های سامانه نسبت به تشعشعات نامطلوب (نظیر سیگنال‌های جنگ الکترونیک) از مهم‌ترین مزایای استفاده از آنتن پلاسما در سامانه‌های فضایی و ایستگاه زمینی محسوب می‌شوند. استفاده از آرایه‌های جهتی و ایجاد قابلیت چرخش الگوی تشعشعی در جهت مورد نظر، از ویژگی‌های خاص آنتن پلاسما برای کاربرد در ایستگاه زمینی، به‌ویژه برای سامانه‌های بازگشت‌پذیر است.

باوجود ویژگی‌های مطلوب عناصر پلاسمایی برای کاربرد در حوزهٔ فضا، ضرورت توجه به چالش‌های این آنتن، نظیر ضرورت وجود عناصر تحریک در مجاورت آنتن، شناخت ناکافی از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد آنتن، شرایط محیطی پیچیده، هزینه‌ها و استحکام، ایجاب می‌کند برای عملیاتی‌تر شدن آن در حوزهٔ پژوهش سرمایه‌گذاری بیشتری انجام شود.

مراجع

[1] MIL-STD-810G, Department of Defense Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, Oct. 2008.

[2] Kuhlman, E., "Space Shuttle Antenna Design and Development," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 10, 1972, pp. 181-184.

[3] Rush, J., Israel, D., Ramos, C. and et.al., *Communication and Navigation Systems Roadmap Technology Area 05*, National Aeronautics and Space Administration, April 2012.

[4] Anderson, T., *Plasma Antennas*, Artech House, 2011.

[5] Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J., *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, New York, Wiley, 1994.

[6] Dwyer, T. J., Greig, J. R., Murphy, D. P., Perin, J. M., Pechacek, R.E. and Raileigh, M., "On the Feasibility of using an Atmospheric Discharge Plasma as an RF Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 32, 1984, pp.141–146.

[7] Borg, G.G., Miljak, D.G. and Martin, N.M., "Application of Plasma Columns to Radiofrequency Antennas," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, Isuue 22, 1999, pp. 3272–3274.

[8] Alexeff, I., Anderson, T., Prameswaran, S. and et. al. "Experimental and Theoretical Results with Plasma Antennas," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 33, 2006, pp. 166–171.

[9] Rayner, J.P., Wichello, A.P. and Cheetham, A.D., "Physical Characteristics of Plasma Antennas," *IEEE Transaction on Plasma Science*, Vol. 32, No. 1, Februery, 2004, pp. 269-281.

[10] Sadeghikia, F., Noghani, M.T. and Simard, M. "Experimental Study on the Surface Wave Driven Plasma Antenna," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 70, No. 5, 2016, pp. 652-656.

[11] El-AzemMalhat, H., Badawy, M. M., HelmyZainud-Deen S. and Awadalla, K.H. "Dual-Mode Plasma Reflectarray/ Transmitarray Antennas," *IEEE Transactions on Plasma Science,* Vol. 43, No. 10, 2015, pp. 3582-3589.

[12] Imbriale, W.A., *Space Antenna Handbook*: Wiley, 2012.

[13] Available, [on line]: http://nautilus.org/napsnet/ napsnet-special-reports/japans-signals-intelligence-sigint-ground - stations-a-visual-guide.

[14] Balanis, C.A., *Antenna Theory, Analysis and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.

[15] Sadeghikia, F., Hodjat-Kashani, F., Rashed-Mohassel, J. Lotfi, A.A. and Ghayoomeh-Bozorgi, J. "Characterization of a Surface Wave Driven Plasma Monopole Antenna," *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol. 26, 2012, pp. 239–250.

[16] Sadeghikiya, F., Hojatkashani, F., Rashed Mohasel, J., and Ghiyome Bozorgi, S.J., "Space Application of a Linear Array of Plasma Antenna," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 5, No. 3, Fall 2012, pp. 59-66.

[17] Wu, X. P., Shi, J.M., Chen, Z. S. and Xu, B., "A New Plasma Antenna of Beam-Forming," *Progress In Electromagnetics Research,* Vol. 126, 2012, pp. 539-553.

[18] Sadeghikia, F., Hodjat-Kashani, F., Rashed-Mohassel, J., Lotfi, A.A. and Ghayoomeh-Bozorgi, J., "A Yagi-UDA Plasma Monopole Array," *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol. 26, 2012, pp. 885-894.

[19] Manheimer, W., "Plasma Reflectors for Electronic Beam Steering in Radar Systems," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 19, No. 6, 1993, p. 1228.

[20] Mathew, J. and et al., "Electronically Steerable Plasma Mirror for Radar Applications," *IEEE International Radar Conference*, June 1995, pp. 742.

[21] Sadeghikia, F., "Analysis of Plasma Monopole Antenna Using Numerical method and an Equivalent Circuit," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett*er, Vol. 99, 2017, pp. 1–1.

[22] Badawy, M. M., Malhat, H. A., Zainud-Deen, S. H. and Awadalla, K.H., "A Simple Equivalent Circuit Model for Plasma Dipole Antenna," *IEEE Trans. on Plasma Sci*, Vol. 43, No. 12, Dec. 2015, pp. 4092-4098.