



A Novel Antenna Radiation Pattern Measurement Method Using Dual Cylindrical Near-Field Scanning Without Phase Measurement

Mojtaba Mighani^{1*}, Hossein Javartani²

1. Associate Prof., Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University, Tehran, Iran

2. M.Sc. Student, Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University, Tehran, Iran

Key words:

*Antenna Testing
Near-Field
Measurement
Phase-Less
Measurement
Cylindrical
Scanning*

Abstract

In this paper, a novel method for far-field reconstruction based solely on near-field amplitude measurements is presented. The proposed approach combines interferometric techniques with functional reconstruction methods to retrieve the radiation pattern of the antenna without requiring phase information. Using this technique, the far-field radiation pattern of a conical horn antenna at 10 GHz has been successfully reconstructed from amplitude-only near-field data. The near-field measurements were performed on two cylindrical scanning surfaces using an amplitude-only acquisition scheme. A cylindrical sampling grid consisting of 22×6 points was employed, and all measurements were carried out inside an antenna test chamber using two open-ended waveguide probes. Eliminating the need for phase measurements significantly reduces both the cost and the complexity of the measurement setup. To validate the proposed method, the far-field radiation pattern of the antenna under test was also measured directly. A comparison between the direct measurement and the reconstructed pattern shows good agreement, demonstrating the accuracy and effectiveness of the proposed amplitude-only near-field to far-field transformation technique.

* Corresponding author's E-mail: microwave@ssau.ac.ir



ارائه روشی نوین در آزمون الگوی تشعشعی آنتن با فرآیند میدان نزدیک با استفاده از دو سطح اسکن استوانه‌ای و بدون اندازه‌گیری فاز

مجتبی میقانی^{۱*}، حسین جاورتنی^۲

۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲. کارشناسی ارشد، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

واژگان کلیدی

آزمون آنتن

اندازه‌گیری میدان نزدیک

اندازه‌گیری بدون فاز

پویش استوانه‌ای

در این مقاله، یک روش نوین برای بازسازی میدان دور از اندازه‌گیری دامنه میدان نزدیک ارائه شده است. بوسیله این روش، که شامل تداخل سنجی و روش‌های عملکردی می‌باشد، و با استفاده از اطلاعات دامنه میدان نزدیک، الگوی تشعشعی یک نمونه آنتن اندازه‌گیری گردیده است. در این آزمون از پویش دو سطح استوانه‌ای در ناحیه نزدیک آنتن بدون اندازه‌گیری فاز، الگوی تشعشعی میدان دور یک آنتن شیپوری مخروطی بدست آمده است. این الگو در فرکانس ۱۰ GHz استخراج شده و اندازه‌گیری‌های میدان نزدیک بدون فاز در یک شبکه استوانه‌ای با تعداد نقاط 22×6 انجام گردیده است. آزمون در اتاق آنتن و بوسیله دو پروب موجبری با دهانه باز انجام گردیده است. عدم اندازه‌گیری فاز هزینه و پیچیدگی آزمون را به شدت کاهش خواهد داد. به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، الگوی تشعشعی میدان دور آنتن نمونه بطور مستقیم اندازه‌گیری گردیده و با نتایج روش ارائه شده مقایسه شده است. این مقایسه تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

و هوا و همچنین هزینه‌های بسیار بالای پیاده‌سازی، نمی‌تواند انتخاب نخست باشد [۲-۳].

یکی از روش‌های که چالش‌های اشاره شده در بالا را تا حدی مرتفع می‌سازد، روش اندازه‌گیری میدان نزدیک/میدان دور می‌باشد [۴-۱۴]. از طرفی با پیشرفت‌های زیادی که در ساخت انواع آنتن‌های فرکانس بالا، آنتن‌های با کاربردهای خاص در صنایع نظامی و علوم فضایی، آنتن‌های با ساختار خاص و غیرهم‌پاسخ صورت گرفته نیاز به استفاده از روش میدان نزدیک/میدان دور بیشتر احساس شده است به طوری که در سال‌های اخیر اقدامات زیادی جهت بهبود روش‌های اندازه‌گیری میدان نزدیک و تجهیزات این حوزه صورت گرفته است. ولی یک مشکل اساسی که در اندازه‌گیری میدان‌ها وجود دارد این است که بلید علاوه بر دامنه، فاز میدان مختلط اندازه‌گیری

در چند دهه اخیر روش‌های اندازه‌گیری آنتن‌ها شاهد تحولات زیادی بوده است. ساده‌ترین روش آزمون آنتن که در آزمایشگاه انجام می‌گردد، آزمون‌های میدان دور آنتن است که می‌تواند [۱] در محفظه‌های آنتن فضای داخلی و یا خارجی انجام شود. اندازه‌گیری به روش میدان دور دارای مشکلاتی از قبیل بزرگی شعاع میدان دور در برخی از فرکانس‌ها و ابعاد خاص آنتن است که عملاً انجام این آزمون‌ها را در برخی حالت‌ها غیر ممکن یا بسیار هزینه‌بر می‌نماید. همچنین انجام آزمون‌ها در روش‌های اندازه‌گیری بیرونی، به دلیل کنترل نشده بودن محیط، عدم وجود قابلیت کار در هر آب

محدود است. موریس و فشباه نشان می دهند [۱] که استخراج میدان برداری ناحیه دور از میدان نزدیک به توابع موج برداری بستگی دارد که بر آن سطح عمود است.

در این مقاله با ایده گرفتن از روش تداخل سنجی و روش های عملکردی با استفاده از اطلاعات دامنه میدان نزدیک [۱۸]، طراحی یک مدار ریزنویاری و استفاده از دو پروب موجبری، یک راه حل مناسب برای مسئله بازیابی فاز میدان نزدیک و بازسازی میدان دور از اندازه گیری دامنه میدان نزدیک ارائه شده است. این روش اندازه گیری بر روی یک نمونه آنتن شیبوری مخروطی پیاده سازی شده است. پویش روی دو سطح استوانه ای در ناحیه نزدیک آنتن بدون اندازه گیری فاز الگوی تشعشعی میدان دور در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز بوسیله دو پروب موجبری با دهانه باز انجام شده و با اندازه گیری میدان دور استاندارد مقایسه گردیده است. این مقایسه تطابق بسیار خوبی را نشان داده و عدم اندازه گیری فاز، هزینه و پیچیدگی آزمون را کاهش خواهد داد.

۲- انتخاب سطوح پویش

یک مجموعه کامل از اندازه گیری های میدان نزدیک روی یک سطح استوانه ای شامل اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه الگوهای افقی کامل برای تمام زوایای عمودی به جز نواحی مخروطی در بالا و پایین محور استوانه است. از آنجایی که انتگرال های عددی را می توان با روش تبدیل فوریه انجام داد، تبدیل استوانه ای، بازدهی عددی و زمان محاسباتی نسبی مشابه با تبدیل صفحه ای را نتیجه می دهد. اگرچه بسط مدی زاویه ای بر حسب توابع هنکل نوشته می شود که محاسبه آن به ویژه برای مرتبه های بالاتر دشوارتر است. بیشترین فاصله نمونه برداری زاویه ای و عمودی برابر است با:

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{2(a+\lambda)} \quad (1)$$

$$\Delta z = \lambda/2 \quad (2)$$

که λ طول موج و a شعاع کوچکترین استوانه ای است که آنتن را احاطه می کند. یک سیستم پویش استوانه ای معمولی در [۲] ارائه داده شده است. مکان افقی آنتن ثابت نگه داشته می شود در حالی که پروب در محل های گسسته در جهت عمودی و در یک فاصله ثابت از آنتن حرکت داده می شود. بعد از تکمیل هر پویش عمودی، آنتن آزمون در جهت موقعیت زاویه ای بعدی چرخانده می شود.

جهت گیری پروب بعد از تکمیل هر پویش عمودی، آنتن آزمون در جهت موقعیت زاویه ای بعدی چرخانده می شود. جهت گیری پروب متناسب با آنتن آزمون تغییر می کند همچنان که موقعیت عمودی پروب تغییر می کند. از این رو مانند حالت صفحه ای، معمولاً یک تصحیح پروب نیاز است. علاوه بر آنتن های جهتی، الگوهای تشعشعی آنتن های پارتی باریک در امتداد

شود. گرچه اندازه گیری دامنه می تواند بسیار دقیق صورت بگیرد، ولی اندازه گیری فاز میدان بسیار مشکل است [۱۵-۱۸]. مسلماً وجود میزان زیادی خطا در فاز میدان نزدیک، باعث ایجاد خطای زیادی در محاسبه میدان دور خواهد شد و صحت نتایج را به طور اساسی زیر سوال خواهد برد.

بنابراین باید به دنبال روش هایی باشیم که بدون داشتن فاز میدان نزدیک و تنها با استفاده از اطلاعات دامنه آن، میدان دور را به طور کامل مشخص کنیم. با توجه به اینکه اغلب از توزیع مختلط میدان نزدیک تنها دامنه در دسترس است، مسئله ای که با آن روبرو هستیم در واقع یافتن توزیع فاز متناظر با دامنه میدان نزدیک اندازه گیری شده است. از این دیدگاه مسئله را به نام مسئله بازیابی فاز می شناسند که در زمینه های مختلفی از جمله اپتیک، نجوم، میکروسکپ الکترونی و سنجش از راه دور مطرح بوده و کوشش های مختلفی برای حل آن صورت گرفته است [۱۰].

اما روش های که برای بازیابی فاز در زمینه های فوق پیشنهاد شده اند، با توجه به شرایط موجود در هر زمینه خاص مطرح گردیده اند و لذا ممکن است که برای مسائل مربوط به اندازه گیری میدان در آنتن ها مناسب نباشند. با توجه به اینکه از توزیع مختلط میدان نزدیک تنها دامنه در دسترس است، مسئله ای که با آن روبرو هستیم در واقع یافتن توزیع فاز متناظر با دامنه میدان نزدیک اندازه گیری شده است. از این دیدگاه موضوع را به نام مسئله بازیابی فاز می شناسند. روش های تفرق بین دو صفحه پویش [۱۴]، تداخل سنجی [۱۰] و هلوگرافی [۱۵] از جمله روش های مناسب برای مسائل آنتنی می باشند.

داده های اندازه گیری شده میدان نزدیک (به طور معمول توزیع دامنه و فاز) توسط یک پروب پویش کننده میدان روی یک سطح از پیش انتخاب شده که می تواند یک صفحه، یک استوانه یا یک کره باشد، اندازه گیری می شوند. سپس داده اندازه گیری شده با استفاده از تبدیل فوریه به داده میدان دور تبدیل می شود. برای بسیاری از آنتن ها، تجهیزات اندازه گیری، موقعیت یابی و پروب اندازه گیری استوانه ای ساده تر و ارزان تر است. به طور کلی، پیاده سازی روش های تبدیل میدان نزدیک به دور با اندازه گیری دامنه و فاز مولفه های میدان الکترومغناطیسی که توسط آنتن تحت آزمایش در فواصل زمانی منظم روی یک قطعه مشخص در میدان نزدیک تشعشع می گردد، شروع می شود. با استفاده اصل بسط مدی داده های میدان نمونه برداری شده، برای تعیین دامنه و فاز یک طیف زاویه ای امواج صفحه ای، استوانه ای یا کروی استفاده می شود. نوشتن میدان کل بر حسب بسط مدی، محاسبه میدان در هر فاصله ای از آنتن را میسر می کند. حل میدان ها در یک فاصله نامحدود، الگوی میدان دور را نتیجه می دهد. بررسی یک حالت عمومی پویش با پروب ایده آل روی یک صفحه دلخواه نشان می دهد که انتخاب سطوح پویش

در این حالت، تعیین میدان دور آنتن در عمل به یک مسئله تخمین غیرخطی ساده می‌شود.

روش های تداخل سنجی بر اساس الگوریتمی است که برای اولین بار توسط گابور [۱۷] پیشنهاد شده و نیاز به یک آنتن مرجع [۱۶] برای انتقال مرجع فاز به آنتن گیرنده دارد.

در این روش یک رویکرد اساساً تداخل سنجی اتخاذ شده است، اما از آنتن مرجع، مانند تداخل سنجی استاندارد استفاده نشده است. مرجع فاز مستقیماً از میدان تابش شده توسط آنتن تحت آزمون بدست می‌آید که توسط دو پروب در دو نقطه مختلف در امتداد منحنی پوشش جمع‌آوری می‌شود تا با استفاده از یک مدار ریز نوار ساده تداخل ایجاد کند. روش پیشنهادی در اصل منجر به ارزیابی فاز میدان نزدیک در سطح پوشش جدا از یک ثابت غیر ضروری می‌شود. اما برخی مشکلات در کاربرد عملی این روش به وجود می‌آید. در واقع هنگام تثبیت فاصله بین دو نقطه تداخل در امتداد منحنی اندازه‌گیری با مشکلاتی مواجه می‌شویم. الزامات شرط نایکویست فاصله را برابر با $\lambda/2$ در نظر می‌گیرد. فاصله بزرگتر یا مساوی λ یا $\frac{3\lambda}{4}$ در عمل برای کاهش اثرات تزویج متقابل بین پروب‌ها در سطح پوشش نیاز است. این دلالت بر تعداد معینی از مجموعه فاز میدان نزدیک ارزیابی شده دارد، که نتیجه روش تداخل سنجی پیشنهادی می‌باشد.

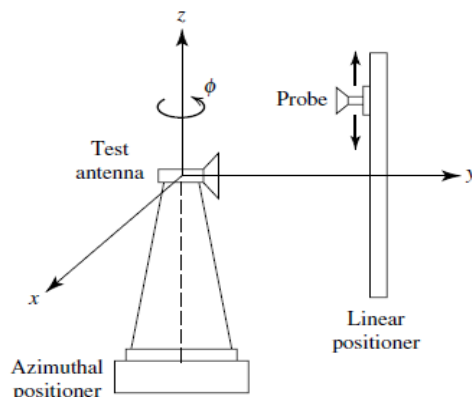
جدا از یک تغییر فاز ثابت که باید تعیین شود، هر مجموعه شامل مقادیر فاز در نقاط اندازه‌گیری مختلف است. اتحاد این مجموعه‌ها تمام اطلاعات فاز میدان نزدیک را در طول منحنی پوشش را می‌دهد.

به طور خاص، یک نمایندگی غیر زائد اتخاذ شده است که بر اساس معرفی میدان کاهش یافته [۱۵] که از میدان اصلی پس از استخراج تابع فاز مناسب و معرفی پارامترسازی مناسب در امتداد منحنی مشاهده به دست می‌آید. این روش در امتداد تعداد مناسبی از منحنی‌های مشاهده برای پوشش کل سطح اندازه‌گیری تکرار می‌شود. ارزیابی این تغییر ناشناخته برای برخی از هندسه‌های پوشش، مانند هندسه‌ی قطبی - صفحه [۱۵]، که در آن یک نقطه اندازه‌گیری مشترک برای همه خطوط شعاعی وجود دارد، ساده است. هنگام در نظر گرفتن سایر هندسه‌ها، مانند هندسه استوانه‌ای، که در این مقاله برای اعتبارسنجی تجربی اتخاذ شده است، جابه‌جایی‌های فاز را می‌توان با استفاده از روش پیشنهادی به منحنی متقاطع با سایر منحنی‌ها بازسازی کرد. روش کار به صورت مراحل زیر می‌باشد:

مرحله اول: جمع‌آوری تعداد معینی از داده‌های دامنه میدان نزدیک آنتن و محاسبه تغییر فازهای ثابت.

مرحله دوم: نمایش غیر زائد بر اساس معرفی میدان کاهش یافته برای ارزیابی تغییرات با همگرایی دقیق و سریع.

محور عمودی (برای مثال آنتن‌هایی با پرتو بادبزن افقی و دوقطبی‌های عمودی) را نیز می‌توان با روش تبدیل میدان نزدیک به دور استوانه‌ای محاسبه کرد. در شکل ۱ شماتیک سیستم‌های پوشش استوانه‌ای متعارف نمایش داده شده است.



شکل (۱): نمای شماتیک سیستم‌های پوشش استوانه‌ای متعارف [۱].

انتخاب پروب به ساختار هندسی روش میدان نزدیک بستگی دارد. بهترین دقت با استفاده از یک پروب که قطبش با مولفه هم قطبی شده، و یک پروب دوم که با قطبش متعامد مطابقت دارد، به دست می‌آید. پروب دوم می‌تواند همان پروب اول باشد که ۹۰ درجه چرخیده (برای یک پروب با قطبش خطی) یا یک پروب دو قطبشی باشد. یک پروب فیزیکی کوچک اختلال کمتری در میدان دور آنتن تحت آزمون، ایجاد می‌کند. در این مقله از دو عدد پروب موجبر WR-۹۰ استفاده شده است.

در واقع، اندازه‌گیری دقیق فاز در محدوده فرکانس میلیمتری و زیر میلیمتری بسیار دشوار است، مگر اینکه از امکانات گران قیمت مانند تحلیلگر شبکه برداری استفاده شود. برای غلبه بر این مشکل، اخیراً روش‌های پیشرفته جدیدی توسعه یافته‌اند که الگوی میدان دور را از دانش دامنه میدان نزدیک در یک یا چند سطح آزمایشی ارزیابی می‌کنند. در این روش به دلیل اندازه‌گیری نکردن دقیق فاز توسط پروب، در فرکانس‌های میکروویو، می‌توان از کابل‌های ارزان و گیرنده‌های ساده استفاده نمود. به طور کلی، دو دسته از روش‌های بدون فاز را می‌توان متمایز کرد، یکی بر اساس یک رابطه عملکردی در یک مجموعه مناسب از داده‌های فقط دامنه، و دیگری مبتنی بر روش‌های تداخل سنجی.

در مورد اولین دسته از روش‌ها، متداول‌ترین مجموعه داده‌ها توسط دامنه ولتاژ در خروجی پروب جمع‌آوری شده روی دو سطح ارائه می‌شود. اما مجموعه‌های دیگری نیز امکان‌پذیر است، مانند مجموعه‌هایی که شامل ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط دو پروب مختلف روی یک سطح آزمایش می‌شوند.

۴- بازیابی فاز میدان نزدیک

معادله زیر میدان تابش شده توسط آنتن تحت آزمون در منحنی اندازه گیری داده ها می باشد، که در آن پارامتر S نشان دهنده طول افقی منحنی در امتداد C است [۱۸].

$$E(s) = |E(s)| \cdot e^{j\phi(s)} \quad (۸)$$

برای سادگی، تنها یک مولفه برای میدان تابشی در نظر گرفته می شود، اما به راحتی می توان به مولفه های بیشتری دست یافت. اگر فرض کنیم $2N+1$ نقطه اندازه گیری (N عدد زوج) پوشش می شوند. در این صورت:

$$E(s_1) \quad (۹)$$

$$E(s_2) = E(s_1) \cdot e^{j\Delta\phi_1}$$

$$E(s_3) = E(s_2) \cdot e^{j\Delta\phi_2}$$

$$E(s_i) = E(s_{i-1}) \cdot e^{j\Delta\phi_{i-1}}$$

که در آن

$$\begin{aligned} S_{(1)} &= \left[-N\frac{\lambda}{\varphi}, (-N+i)\frac{\lambda}{\varphi}, (-N+2i)\frac{\lambda}{\varphi}, \dots \right] \\ S_{(2)} &= \left[(-N+1)\frac{\lambda}{\varphi}, (-N+1+i)\frac{\lambda}{\varphi}, (-N+1+2i)\frac{\lambda}{\varphi}, \dots \right] \\ S_{(i)} &= \left[(-N+i-1)\frac{\lambda}{\varphi}, (-N+2i-1)\frac{\lambda}{\varphi}, (-N+3i-1)\frac{\lambda}{\varphi}, \dots \right] \end{aligned} \quad (۱۰)$$

$\varepsilon[(s_1)], \varepsilon[(s_2)], \dots, \varepsilon[(s_i)]$ کمیت های معلوم و شیفیت فازهای $\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_i$ مجهولاتی هستند که باید تعیین شوند.

به عنوان نمونه $\Delta\Phi_1 = \varphi(s_1) - \varphi(s_2)$ و $\Delta\Phi_2 = \varphi(s_2) - \varphi(s_3)$ جایی که $\varphi(s_i)$ به مقدار فاز در موقعیت داده شده توسط عنصر j مجموعه s_i اشاره دارد. میدان برداری معادله (۹) در نقاط نمونه برداری با فرض ایده آل بودن پروب ها نوشته شده است که باعث می شود میدان متناسب با ولتاژ خروجی در پروب ها باشد.

اگر $\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_{i-1} \in [-\pi, \pi]$ تغییر دهیم، از معادله (۱۰) مجموعه S_m که در همه زمینه ها با داده های اندازه گیری شده سازگار می باشد، بدست می آید.

$$S_m = \{r_m(\Delta\phi_1, \dots, \Delta\phi_{i-1}); \Delta\phi_1, \dots, \Delta\phi_{i-1} \in [-\pi, \pi]\} \quad (۱۱)$$

r_m داده های اندازه گیری شده ممکن را نشان می دهند.

به منظور حل معادله (۸) با توجه به تغییر فاز $\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_i$ که مجهول می باشد، مدلی بر اساس یک نمایش میدان غیرزائد در نظر گرفته شده است. این رویکرد میدان اصلی معادله (۸) را با میدان تغییر یافته زیر جایگزین می کند.

$$F(\xi) = E(\xi) \cdot e^{j\psi(\xi)} \quad (۱۲)$$

که معادله (۱۲) بعد از استخراج تابع فاز مناسب $\psi(\xi(s))$ و معرفی پارامتر مناسب $\xi(s)$ در امتداد منحنی مشاهده بدست می آید. این میدان کاهش

مرحله سوم: اعتبار سنجی روش پیشنهادی با آزمایش یک نمونه آنتن باند X توسط دو پروب موجبری WR-۹۰ در سطح پوشش استوانه ای.

۳- اندازه گیری داده های میدان و فرمول تداخل سنجی

اجازه دهید یک منحنی مشاهده C را روی یک هندسه پوشش دلخواه (در این مقاله پوشش استوانه ای) با فاصله نمونه برداری $\Delta S = \lambda/2$ و فاصله جداسازی $d = i\lambda/2$ بین دو نقطه تداخل مجاور که i یک عدد صحیح بزرگتر از یک می باشد را در نظر بگیریم. دو پروب یکسان که به طور همزمان در امتداد منحنی اندازه گیری حرکت می کنند برای به دست آوردن چهار اطلاعات دامنه استفاده می شوند [۱۸].

$$|V_1|^2, |V_2|^2, |V_1+V_2|^2, |V_1+jV_2|^2 \quad (۳)$$

که به ترتیب با اندازه گیری توان میدان نزدیک توسط دو پروب WR-۹۰ مشابه، توان خروجی قطعه ترکیب کننده توان دو پروب و ترکیب کننده توان مربعی دو پروب با اختلاف فاز ۹۰ درجه پروب دوم در هر مرحله به دست می آید. این داده ها با تغییر ارتفاع پروب ها، z، در نقاط پوشش و چرخش میز موقعیت دهنده چرخان اتاق آنتن، به منظور تغییر زاویه ϕ تکرار می گردد.

$$V_1 = |V_1| \cdot e^{j\phi_1} \quad (۴)$$

$$V_2 = |V_2| \cdot e^{j\phi_2} \quad (۵)$$

که سیگنال های مختلط روی یک جفت نقطه تداخل در امتداد مسیر پوشش هستند. داده های اندازه گیری شده در معادله (۳) برای محاسبه تغییر فاز بکار می روند.

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (۶)$$

با استفاده از فرمول تداخل سنجی [۱۸] که به شکل زیر است:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left[\frac{|V_1+jV_2|^2 - |V_1|^2 - |V_2|^2}{|V_1+V_2|^2 - |V_1|^2 - |V_2|^2} \right] \quad (۷)$$

شکل ۲ نحوه اندازه گیری داده های میدان نزدیک را نشان می دهد و با استفاده از اطلاعات دامنه میدان نزدیک که توسط پروب جمع آوری شده است، مقادیر اختلاف فازهای $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2, \Delta\phi_3, \dots$ محاسبه می شوند.



شکل (۲): نحوه اندازه گیری داده های میدان نزدیک.

که $\underline{S} = [E(\xi_n)] \in C^{N'}$ و $1 \leq n \leq N'$ آرایه‌ای از مقادیر میدان در موقعیت‌های نمونه برداری غیرزائد می‌باشد، $\underline{r} = [E(\xi_m)] \in C^{M'}$ و $1 \leq m \leq M'$ آرایه‌ای از مقادیر میدان در نقاط اندازه‌گیری و $\underline{A} \in C^{M' \times N'}$ ماتریسی است که عناصر A_{mn} آن بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$A_{mn} = \Phi[\omega(\xi_m - \xi_n)] \cdot e^{j[\psi(\xi_n) - \psi(\xi_m)]} \quad (15)$$

رنج $\underline{A}$ در مجموعه $S_A^{N'}$ می‌باشد، که مجموعه‌ای از مقادیر تمام میدان کاهش یافته است که می‌تواند توسط منبعی با ابعاد کلی تابش شود و در نقاط اندازه‌گیری M ارزیابی می‌شوند. به دلیل خطای نمایش و وجود نویز که معمولاً اندازه‌گیری‌ها را خراب می‌کند، داده‌ها بطور کلی به محدوده ماتریس $\underline{A}$ یا بطور معادل به اشتراک $S_m \cap S_A^{N'}$ تعلق ندارند. در نتیجه راه حل کلی زیر باید اتخاذ شود.

$$\inf_{\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_{i-1}} d(S_m, S_A^{N'})$$

اصطلاح «inf» به عنوان مخفف بزرگترین کران پایین^۱ استفاده شده است. و $d(S_m, S_A^{N'})$ فاصله بین دو مجموعه است. راه حل پیشنهادی تقریب حداقل مربعات است که با وارد کردن پروژکتور به مجموعه $S_A^{N'}$ به راحتی قابل ارزیابی است. یک راه متداول برای محاسبه محدوده ماتریس $\underline{A}$ استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد ماتریس (SVD) است. بطور خلاصه می‌توان گفت که روش تجزیه مقادیر منفرد یک ماتریس را به سه ماتریس دیگر تجزیه می‌کند. برای مثال: ماتریس A را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\underline{A} = \underline{U} \underline{\Sigma} \underline{V}^H \quad (16)$$

$m \times n$ یک ماتریس	A
$m \times m$ یک ماتریس متعامد	U
$m \times n$ یک ماتریس قطری	Σ
$n \times n$ یک ماتریس متعامد	V

پروژکتور $P \in C^{M' \times N'}$ بر روی محدوده A به صورت زیر تعریف شده است.

$$P = AA^+ \quad (17)$$

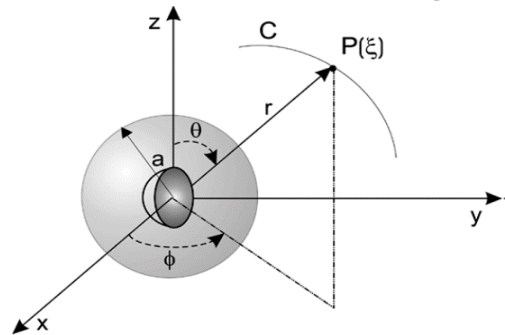
و مقدار $A^+ = V \Sigma^{-1} U^H$ شبه معکوس A است و Σ^{-1} معکوس ماتریس Σ است که عناصر غیر صفر آن مقادیر زیر هستند.

به عنوان یک نتیجه از روش مشخص شده، بازیابی فاز میدان نزدیک شامل یافتن مقدار زیر است.

$$\min_{\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_{i-1}} \left| r_m(\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_{i-1}) - \Pr_m(\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_{i-1}) \right|^2 \quad (18)$$

که به راحتی روی رایانه قابل اجراست.

یافته یک میدان باند محدود است که دارای پهنای باند $\omega = \chi \cdot W$ می‌باشد. W پهنای باند میدان موثر و ضریب χ کمی بزرگتر از یک در نظر گرفته می‌شود، خطای نمایش را بر طرف می‌کند. انتخاب مناسب پارامتر منجر به تقریب میدان کاهش یافته توسط یک تابع ساده $\sin(x)/x$ که اساس امتداد منحنی باز و یا تابع دریکله که اساس منحنی بسته است با انتخاب کمترین مقدار نمونه‌ها (N')، می‌شود. شکل ۳ منحنی مشاهده C برای منبعی در کره‌ای به شعاع a را نشان می‌دهد. در نتیجه مجموعه تمام میدان‌های ممکن تابش شده توسط آنتن تحت آزمون را می‌توان با یک مجموعه ابعاد محدود تقریب زد. $S_A^{N'}$ اجازه می‌دهد بعد N' تقریباً برابر با بعد مبنا باشد. به عنوان مثال، پایه دارای حداقل تعداد ابعاد با خطا نمایش داده شده است. پارامترهای تضمین کننده حداقل نمایش اضافی در [۱۵] برای رایج ترین سطوح پوشش و هندسه منبع گزارش شده است. منبع توسط کره‌ای به شعاع a محدود شده است، اما سطوح محدب عمومی تری که آنتن تحت آزمون را در بر می‌گیرند می‌توانند در نظر گرفته شوند [۱۵].



شکل (۳): منحنی مشاهده C برای منبعی در کره‌ای به شعاع a .

میدان کاهش یافته معادله (۱۲) را می‌توان در امتداد منحنی مشاهده C با یک سری اصلی از نوع زیر نشان داد.

$$F(\xi) = \sum_{n=1}^{N'} F(\xi_n) \Phi[\omega(\xi - \xi_n)] = F(\xi) = \quad (13)$$

$\Phi(x)$ یک تابع $\sin(x)/x$ یا تابع دریکله می‌باشد.

$(\xi_n) = (n\pi)/(\chi \cdot W)$, $1 \leq n \leq N'$ نقاط نمونه برداری غیرزائد هستند و N' تعداد نقاط نمونه برداری غیر زائد را که در فاصله اندازه‌گیری قرار دارد نشان می‌دهد. رابطه بالا به صورت گسسته شده در $M = 2N + 1$ نقطه اندازه‌گیری نشان می‌دهد که می‌توان (ξ_m) به شکل ماتریسی زیر نوشت ($1 \leq m \leq M$).

$$\underline{r} = \underline{A} \cdot \underline{s} \quad (14)$$

^۱ Infimum

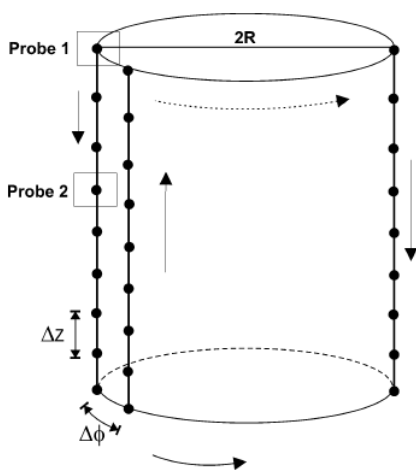
شکل (۴): ست آپ اندازه گیری داخل اتاق آنتن.



شکل (۵): نحوه اندازه گیری دامنه میدان نزدیک.

۶- نتایج اندازه گیری

این آزمایش بر روی یک آنتن شیپوری بلند X به عنوان آنتن تحت آزمون صورت گرفته است. از دو موجبر مستطیلی با ابعاد $1/0.16 \text{ cm} \times 2/2.86 \text{ cm}$ به عنوان پروب پویش کمک گرفته شده است. فقط اندازه گیری های دامنه میدان نزدیک بر روی یک سطح استوانه ای به شعاع $R = 15 \text{ cm}$ به دنبال حرکات پویش در امتداد محور Z و ϕ که در شکل ۶ نشان داده شده اند، انجام گردیده است.



شکل (۶): حرکات پویش در امتداد محور Z و ϕ .

برای این هندسه پویش، تابع فاز $\psi(\xi)$ پارامتر ξ و پهنای باند موثر w میدان کاهش یافته در امتداد منحنی مشاهده (یک استوانه) به صورت زیر ارائه شده است [۱۵].

$$\xi = \theta, \quad -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

$$\psi(\xi) = \beta \sqrt{r^2 - a^2} - \beta a \cos^{-1} \left(\frac{a}{r} \right) \quad (20)$$

$$w = \beta a \quad (21)$$

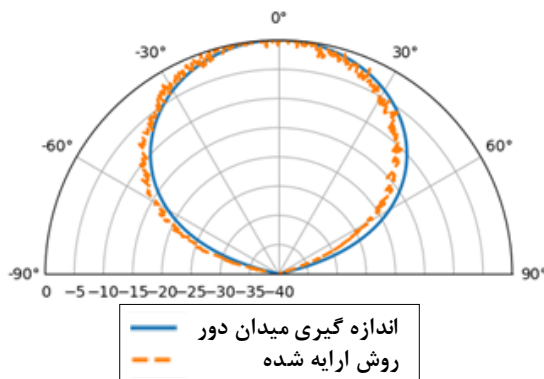
۵- اعتبار سنجی روش پیشنهادی

به منظور اعتبار سنجی روش پیشنهادی، یک نمونه اولیه که شامل دو موجبر $WR-90$ باند X است در فاصله $d = 3\lambda/2$ در امتداد هر خط پویش اندازه گیری میدان نزدیک قرار گرفته اند. فاصله فوق بین پروب ها حداقل فاصله ای است که تزویج متقابل را در یک سطح ناچیز کاهش می دهد، در حالی که تعداد محدودی از مجهولات را در طرح کمینه سازی معرفی می کند. یک آنتن شیپوری باند X با مشخصات معلوم بر روی یک پایه متحرک در مرکز استوانه ای به شعاع R قرار گرفته است. آنتن توسط استپ موتور با ولتاژ مستقیم در جهت زاویه ای Φ با آزادی 360° درجه به وسیله برد آردیونو و یک کلید از بیرون اتاق آنتن کنترل می شود. محل قرار گرفتن پروب ها بر روی محور Z بعد از هر جاروب داده های اندازه گیری در جهت Φ به اندازه $\frac{\lambda}{2}$ در جهت $+Z$ بصورت دستی جابجا می گردد. برای تغذیه آنتن از یک منبع سیگنال مدل 1004 R&S-SFM استفاده شده است. شکل ۴ نشان دهنده ست آپ اندازه گیری در داخل اتاق آنتن می باشد.

به دلیل محدودیت مکانیکی فلنچ ها، از استفاده فاصله های کوتاه تر جلوگیری شده است. در مرحله اول خروجی های موجبر مستقیماً توسط وات متر دیجیتال اندازه گیری می شوند. سپس مقادیر خروجی هر دو پروب توسط یک مدار جمع کننده توان $1166VA$ HP با پهنای باند $1-18 \text{ GHz}$ رفته و بعد اندازه آن توسط وات متر نشان داده می شود. در مرحله آخر خروجی پروب دوم از یک برد ریزنواری با زیرلایه $FR4$ با ثابت دی الکتریک $\epsilon_r = 4/6$ و با ضخامت $t = 1/6$ میلی متر با اختلاف فاز 90° درجه مشخص شده است، عبور کرده و سپس به داخل مدار جمع کننده توان رفته و با مقدار اندازه دامنه میدان پروب اول جمع و نمایش داده می شود. شکل ۵ ست آپ اندازه گیری داده های دامنه میدان نزدیک را نشان می دهد.



بهره‌گیری از داده‌های حاصل از پویش دو سطح استوانه‌ای پیرامون آنتن و بدون نیاز به اندازه‌گیری فاز، الگوی تشعشعی میدان دور یک آنتن شیپوری مخروطی در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز استخراج شد. حذف مرحله اندازه‌گیری فاز، به‌طور قابل توجهی موجب کاهش هزینه‌ها، ساده‌سازی فرایند آزمون و افزایش سرعت انجام آزمایش‌ها می‌شود. برای ارزیابی دقت و کارایی الگوریتم ارائه‌شده، الگوی میدان دور آنتن نمونه به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری و با نتایج بازسازی‌شده مقایسه شد. نتایج این مقایسه تطابق خوبی را نشان می‌دهد که بیانگر صحت، قابلیت اعتماد و کارآمدی روش پیشنهادی در بازسازی میدان دور بدون اطلاعات فازی است.



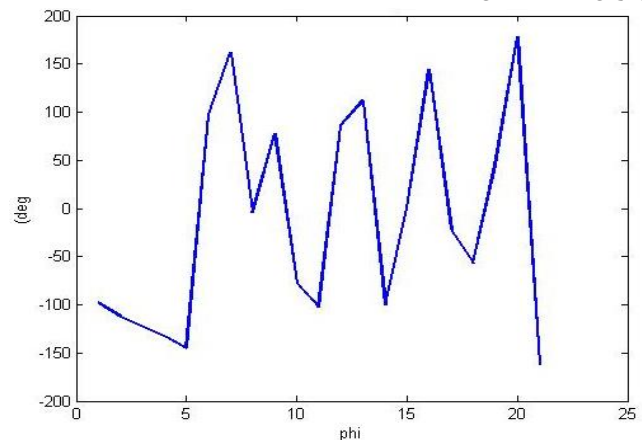
شکل (۸): نمودار الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده با روش ارایه شده و میدان دور.

مراجع

- [1] C. A. Balanis, Antenna theory analysis and design, 2005.
- [2] C. A. Balanis, Modern antenna handbook, 2008.
- [3] A. Ghorbani, "Antenna chamber, quiet zone," in Amirkabir University of Technology, Tehran.
- [4] "Antenna measurements—1978," Proceedings of the IEEE, vol. 66, no. 4, p. 483–507, Apr. 1978.A.
- [5] D. Yaghjian, "An overview of near-field antenna measurements," IEEE transactions on antennas and propagation, Vols. AP-34, no. 1, January 1986.
- [6] م. ج. منشادی، "شبیه سازی میدان ناحیه نزدیک آنتن به میدان ناحیه دور در دستگاه استوانه‌ای"، ۱۳۷۵.
- [7] D. Yaghjian, Near-field antenna measurements on a cylindrical surface, 1977.
- [8] D. Yaghjian, "Near-field antenna measurement on a cylindrical surface: A source scattering matrix formulation," National Bureau of Standards Technical Note 696, Sept. 1977 .
- [9] Leach, W. M., and Paris, D. T, "Probe compensated near-field measurements on a cylinder," IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 21, no. 4, p. 435–445, July, 1973.

که در آن r فاصله شعاعی نقطه مشاهده P در یک سیستم مختصات کروی با مرکز کره شعاع a و β ثابت انتشار فضای آزاد است. کره‌ای که آنتن تحت آزمون را در بر می‌گیرد به $a = 2/7 \text{ cm}$ ثابت فرض شده و یک ضریب بزرگ شدن $\chi = 1/15$ در نظر گرفته شده است. فاصله $d = 3\lambda/2$ بین دو پروب در نظر گرفته شده و مقدار $i = 3$ می‌باشد. مطابق رابطه (۷) شیفت فازهای $\Delta\Phi_1$ و $\Delta\Phi_2$ تعیین خواهد شد.

به منظور اعتبارسنجی، آزمون در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز انجام شده است. اندازه‌گیری‌های میدان نزدیک بدون فاز در این فرکانس و در یک شبکه استوانه‌ای با تعداد نقاط 22×6 در امتداد z و ϕ با فاصله $\Delta z = \left(\frac{\lambda}{2}\right) = 1/5 \text{ cm}$ و $\Delta\phi = 4/23^\circ$ انجام شده است. از رابطه تداخل سنجی (۷) و روش کمینه‌سازی دو متغیر برای بدست آوردن فاز میدان نزدیک استفاده شده است. در شکل ۷ فاز استخراج شده برای سطح استوانه در برش $z = 0$ نشان داده شده است.



شکل (۷): فاز بازیابی شده سطح استوانه برحسب زاویه در $z = 0$.

پس از بازیابی اطلاعات فاز میدان نزدیک، داده‌های مختلط برای به دست آوردن میدان دور تابشی پردازش شده است. روش تبدیل استوانه‌ای میدان نزدیک به دور بر اساس گسترش موج استوانه‌ای با استفاده روش کارآمد تبدیل فوریه سریع اجرا شده است. نتایج نرمالیز شده در محدوده زاویه عمودی 90° درجه از بیم اصلی متقارن در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین در این شکل الگوی تشعشعی استخراج شده با الگوهای تشعشعی آنتن تحت آزمون در یک اتاق آنتن میدان دور مقایسه گردیده است. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج از تطابق خوبی برخوردارند.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رویکردی نوآورانه برای بازسازی میدان دور بر پایه اندازه‌گیری دامنه در ناحیه میدان نزدیک ارائه گردید. در روش پیشنهادی، با

- [10] S. COSTANZO, G. DI MASSA, "Wideband phase retrieval technique from amplitude-only near-field data," *Radioengineering*, vol. 17, no. 4, December 2008.
- [11] "Recommended practice for near-field antenna measurements," IEEE, New York, 2012.
- [12] G.MUR, "Absorbing boundary condition for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations," *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, vol. 23, pp. 377-382, Nov, 1981.
- [13] W.H. Emerson, "Electromagnetic wave absorbers and anechoic chambers," *IEEE transactions on antennas and propagation*, Vols. AP-21, pp. 484-490, July 1973.
- [14] T. Isernia, "New approach to antenna testing from near field phaseless data : the cylindrical scanning," *IEE proceedings*, vol. 139, no. 4, August 1992.
- [15] O. M. Bucci, C. Gennarelli, C. Savarese, "Representation of electromagnetic fields over arbitrary surfaces by a finite and nonredundant number of samples," *IEEE transactions Antennas Propagation* vol. 46, p. 351–359, 1998.
- [16] J. C. Bennet, A. P. Anderson, P. A. McInnes, A. J. T. Whitaker, "Microwave holographic metrology of large reflector antennas," *IEEE transactions Antennas Propagation*, vol. 24, p. 295–303, May 1976.
- [17] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefronts," in *Proc. Royal Soc*, vol. 197, p. 454–487, 1949.
- [18] Sandra Costanzo, Giuseppe Di Massa, Marco Donald Migliore, "A novel hybrid approach for far-field characterization from near-field amplitude-only measurements on arbitrary scanning surfaces," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 53, no. 6, June 2005.