به نام خدا

گزارش نهایی پروژه درس آنتن 1

امپدانس دایپل، آرایه خطی و آرایه مربعی دوقطبی های موازی

پریسا محمدی

شماره دانشجویی : 810101509

پروژه اول درس انتن 1

نیمسال دوم 1404-1405

فهرست مطالب

1 مقدمه و هدف گزارش 2

2 بخش اول: امپدانس خودی و متقابل دو آنتن نیم موج 2

1.2 صورت مسئله 2

2.2 تعریف دقیق پارامترهای امپدانس 2

3.2 مدل فیزیکی دایپل نیم موج 3

4.2 تابع گرین و رابطه کلی کوپلینگ 3

5.2 روابط استفاده شده در محاسبه تقریبی 4

6.2 نتایج محاسبه تقریبی 4

7.2 روش ممان برای دایپل های نازک 6

8.2 نتایج روش ممان و تفسیر آن 8

9.2 جمع بندی بخش امپدانس 9

3 بخش دوم: آرایه خطی از دایپل های موازی 10

1.3 صورت مسئله 10

2.3 آرایه فاکتور 10

3.3 حالت Broadside 10

4.3 حالت End-fire 11

5.3 اثر فاصله بین عناصر 11

6.3 اثر تعداد عناصر 12

7.3 اثر دامنه جریان تحریک 12

8.3 اثر فاز جریان تحریک 13

9.3 مشخصات هندسی و تنظیمات شبیه سازی موجود 13

10.3 همگرایی حل عددی 14

11.3 تحریک و مود پورت 15

12.3 پارامتر S_{11} و پهنای باند 15

13.3 گین تک دایپل و الگوی آرایه 16

14.3 پارامترهای توان و سمت گرایی 18

15.3 توان تابشی 18

16.3 تکمیل نظری خواسته های پروژه جدید 19

17.3 جمع بندی بخش آرایه 20

4 بخش سوم: آرایه مربعی از دوقطبی های موازی 21

1.4 ساختار فیزیکی آرایه مربعی 21
2.4 بردار مشاهده و فاز مکانی 21
3.4 هدایت پرتو با انتخاب فاز تحریک 22
4.4 محاسبه راستاوری آرایه مربعی 22
5.4 نقش پارامترهای اصلی 22
6.4 نتایج الگوی تشعشعی با تغییر تعداد عناصر 23
7.4 نتایج الگوی تشعشعی با تغییر فاصله عناصر 26
8.4 نتایج راستاوری 29
9.4 تکمیل بخش دامنه جریان تحریک 30
10.4 جمع بندی بخش آرایه مربعی 30

5 نتیجه گیری نهایی 32

1 مقدمه و هدف گزارش

هدف این گزارش، مرتب سازی و تکمیل چند بخش از پروژه درس آنتن 1 در نیمسال 1404-1405 است. در این نسخه، علاوه بر دو بخش قبلی، پروژه آرایه مربعی از دوقطبی های موازی نیز به گزارش اضافه شده است. بنابراین گزارش نهایی شامل سه بخش اصلی است:

- محاسبه و تحلیل امپدانس خودی و متقابل دو دایپل نیم موج بر حسب فاصله نرمال شده d/λ؛
- تحلیل آرایه خطی از دایپل های موازی و بررسی اثر فاصله عناصر، تعداد عناصر، دامنه و فاز جریان تحریک؛
- تحلیل آرایه مربعی از دوقطبی های موازی با استفاده از روابط Array Factor، نتایج دستی متلب، و مقایسه با تابع آماده متلب.

در توضیح پروژه 1404-1405 تأکید شده است که برای آرایه ها باید الگوی تابشی و راستاوری بر حسب پارامترهای مختلف مانند فاصله عناصر، جریان و فاز تحریک، و تعداد عناصر بررسی شود. چون برای بعضی از حالت ها امکان انجام شبیه سازی جدید وجود نداشته است، در این گزارش نتایج موجود حفظ شده اند و بخش های نظری لازم برای تکمیل خواسته پروژه با جزئیات اضافه شده اند. در نتیجه، هر جا خروجی عددی موجود نبوده، رفتار مورد انتظار بر اساس روابط صحیح آرایه فاکتور توضیح داده شده است.

> در این گزارش تلاش شده است نتایج پراکنده قبلی به یک گزارش واحد، منظم و قابل ارائه تبدیل شوند. همه روابط اصلی بازنویسی شده اند، تفسیر فیزیکی نتایج اضافه شده است، و شکل های موجود از گزارش های اولیه در جای مناسب قرار گرفته اند.

2 بخش اول: امپدانس خودی و متقابل دو آنتن نیم موج

1.2 صورت مسئله

در این بخش دو آنتن دایپل نیم موج موازی در فضای آزاد در نظر گرفته می شوند. هدف، محاسبه امپدانس خودی Z_{11} و امپدانس متقابل Z_{12} بر حسب فاصله نرمال شده d/λ است. خروجی اصلی باید شامل نمودارهای زیر باشد:

$$\Re\{Z_{11}\}, \qquad \Im\{Z_{11}\}, \qquad \Re\{Z_{12}\}, \qquad \Im\{Z_{12}\}.$$

امپدانس خودی نشان می دهد اگر آنتن اول به تنهایی تحریک شود، نسبت ولتاژ ترمینال به جریان ترمینال آن چقدر است. امپدانس متقابل نشان می دهد جریان روی یک آنتن چه ولتاژی در آنتن دیگر القا می کند. این کمیت در طراحی آرایه ها مهم است، چون کوپلینگ متقابل می تواند تطبیق، بهره، و الگوی تابشی را تغییر دهد.

2.2 تعریف دقیق پارامترهای امپدانس

برای یک سیستم دو پورتی آنتنی، رابطه ولتاژ و جریان به شکل زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} V_1 & V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 & I_2 \end{bmatrix}.$$

پس تعریف استاندارد پارامترها برابر است با:

$$Z_{11} = \left.\frac{V_1}{I_1}\right|_{I_2=0}, \qquad Z_{12} = \left.\frac{V_1}{I_2}\right|_{I_1=0}.$$

برای دو آنتن مشابه و محیط متقارن، معمولا داریم:

$$Z_{11} = Z_{22}, \qquad Z_{12} = Z_{21}.$$

نکته مهم این است که شرط $I_2 = 0$ با «قرار دادن منبع ولتاژ صفر روی آنتن دوم» یکسان نیست. اگر آنتن دوم اتصال کوتاه شود یا به صورت پارازیتی در مدار باقی بماند، مقدار به دست آمده دیگر دقیقا پارامتر Z_{12} استاندارد نیست. بنابراین در تفسیر نتایج عددی باید نوع تحریک و شرط مرزی هر آنتن مشخص باشد.

3.2 مدل فیزیکی دایپل نیم موج

برای دایپل نازک نیم موج، طول آنتن تقریبا برابر است با:

$$L \simeq \frac{\lambda}{2}.$$

اگر محور دایپل را محور z در نظر بگیریم، جریان تقریبی روی سیم را می توان با توزیع سینوسی مدل کرد:

$$I(z) = I_0 \sin\left(k\left(\frac{L}{2} - |z|\right)\right), \qquad -\frac{L}{2} \le z \le \frac{L}{2},$$

که در آن

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

این مدل برای فهم فیزیکی مناسب است، اما برای محاسبه دقیق امپدانس، به خصوص بخش راکتیو، باید از حل عددی معادله انتگرالی استفاده کرد.

4.2 تابع گرین و رابطه کلی کوپلینگ

در فضای آزاد، تابع گرین اسکالر برابر است با:

$$G(R) = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R},$$

که R فاصله بین نقطه منبع و نقطه مشاهده است. اگر دو دایپل موازی باشند و فاصله افقی آنها d باشد، فاصله بین نقطه z_1 روی آنتن اول و نقطه z_2 روی آنتن دوم برابر است با:

$$R = \sqrt{d^2 + (z_1 - z_2)^2}.$$

بنابراین امپدانس متقابل به صورت کیفی از انتگرال دوگانه زیر به دست می آید:

$$Z_{12} \propto \int_{-L/2}^{L/2}\int_{-L/2}^{L/2} I_1(z_1) I_2(z_2) G\left(\sqrt{d^2 + (z_1 - z_2)^2}\right)\, dz_1 dz_2.$$

از این رابطه انتظار داریم با افزایش فاصله، اندازه کوپلینگ کاهش یابد؛ زیرا $G(R)$ تقریبا با $1/R$ تضعیف می شود و عامل فازی e^{-jkR} نیز باعث نوسان علامت و فاز می شود.

5.2 روابط استفاده شده در محاسبه تقریبی

در گزارش اولیه، ابتدا از مدل جریان سینوسی و تقریب انتگرال عددی استفاده شده است. شکل های زیر روابط استفاده شده برای امپدانس خودی و متقابل را نشان می دهند.

$$Z_{11}^{\text{num}} = \frac{j\eta_0 k}{2\pi} \cdot \frac{\iint I(z_1)I(z_2)G(|z_1 - z_2|)\, dz_1 dz_2}{\int |I(z)|^2\, dz}$$

شکل 1: رابطه عددی استفاده شده برای تقریب امپدانس خودی Z_{11} با مدل جریان معلوم.

$$Z_{12}^{\text{num}} = \frac{j\eta_0 k}{2\pi} \cdot \frac{\iint I(z_1)I(z_2)G(\sqrt{d^2 + (z_1 - z_2)^2})\, dz_1 dz_2}{\int |I(z)|^2\, dz}$$

شکل 2: رابطه عددی استفاده شده برای تقریب امپدانس متقابل Z_{12} بر حسب فاصله d.

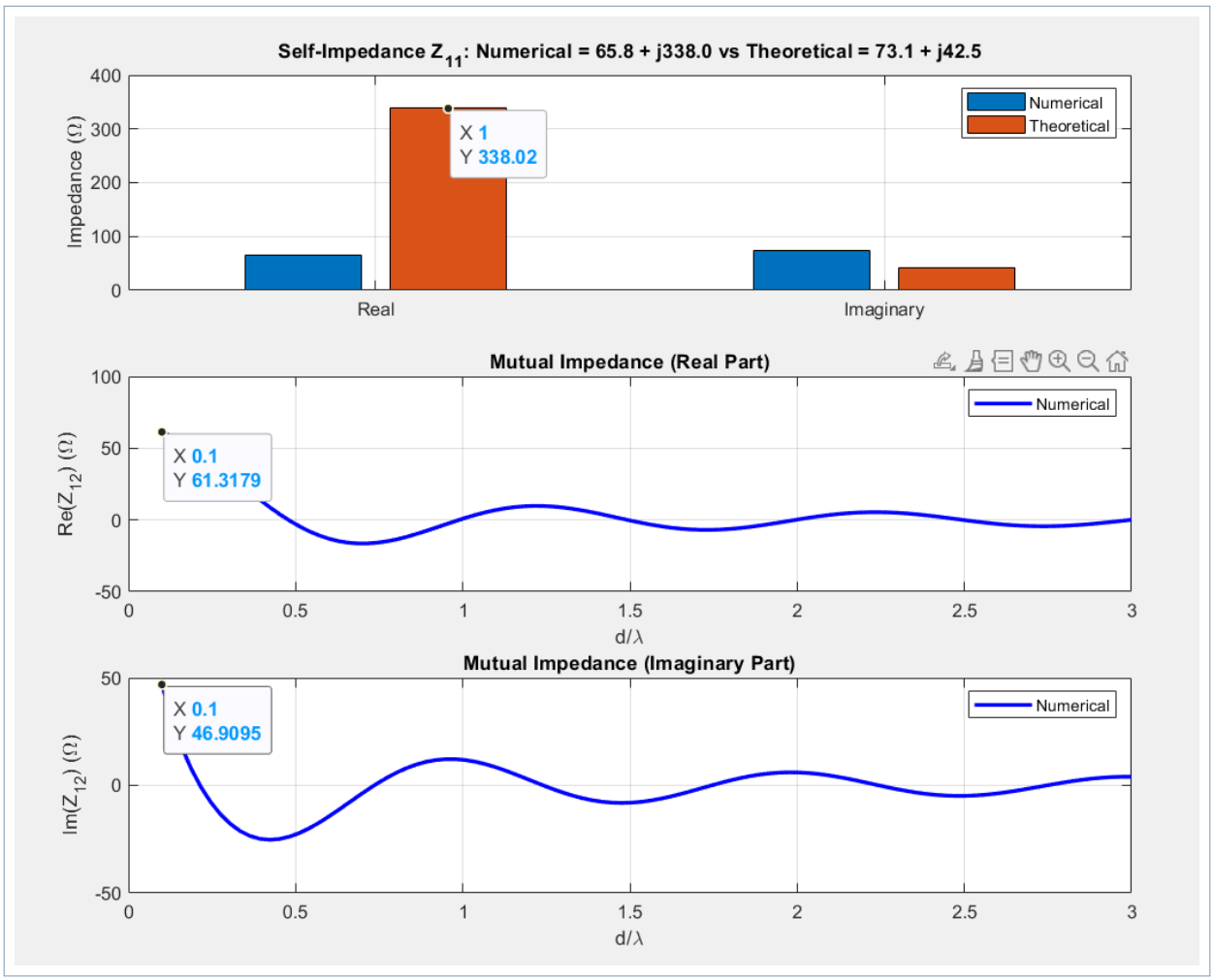
در محاسبه امپدانس خودی، ترم های تکین باید با دقت بیشتری مدل شوند. اگر برای فاصله هر قطعه با خودش فقط یک شعاع مؤثر ثابت قرار داده شود، بخش موهومی امپدانس می تواند خطای زیادی پیدا کند. به همین دلیل، روش ممان برای نتیجه نهایی مناسب تر است.

6.2 نتایج محاسبه تقریبی

در شکل زیر، مقدار تقریبی امپدانس خودی و امپدانس متقابل نشان داده شده است. در این خروجی، مقدار تئوری مرجع برای دایپل نیم موج نازک تقریبا

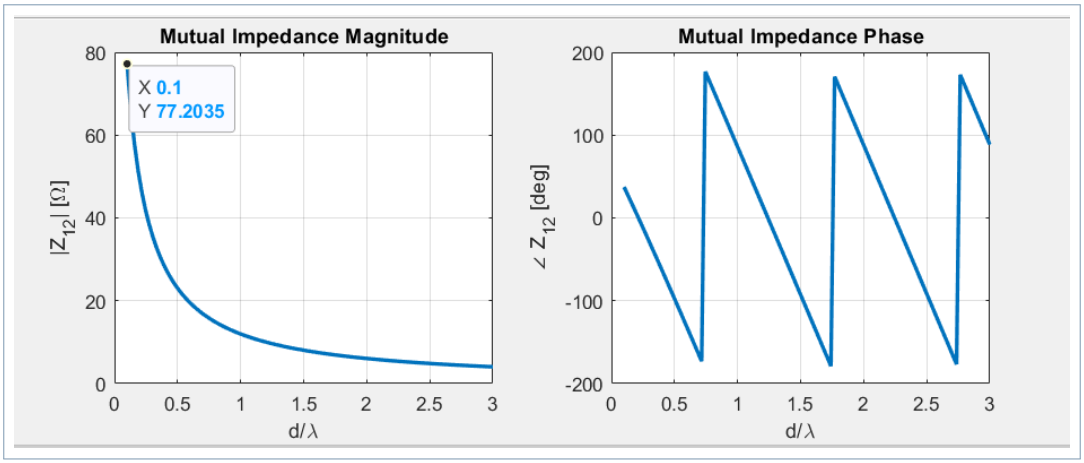
$$Z_{\text{dipole}} \approx 73.1 + j42.5\ \Omega$$

در نظر گرفته شده است.



شکل 3: نتایج اولیه محاسبه تقریبی: مقایسه Z_{11} با مقدار مرجع و تغییرات بخش حقیقی و موهومی Z_{12} نسبت به d/λ.

در نمودار بالا، مقدار حقیقی امپدانس متقابل در فاصله کوچک حدود $61\ \Omega$ و مقدار موهومی آن حدود $46\ \Omega$ دیده می شود. با افزایش d/λ، کوپلینگ متقابل نوسان می کند و دامنه آن کم می شود. این رفتار از نظر فیزیکی قابل انتظار است؛ زیرا دو آنتن هرچه از هم دورتر شوند، میدان القاشده ضعیف تر می شود.



شکل 4: اندازه و فاز امپدانس متقابل. کاهش اندازه $|Z_{12}|$ با افزایش فاصله، رفتار فیزیکی مورد انتظار را نشان می دهد.

از نظر تئوری، برای فاصله های بزرگ باید داشته باشیم:

$$|Z_{12}(d)| \to 0 \qquad \text{وقتی} \qquad d/\lambda \to \infty.$$

همچنین فاز Z_{12} به دلیل عبارت e^{-jkd} با فاصله تغییر می کند و به صورت نوسانی دیده می شود.

7.2 روش ممان برای دایپل های نازک

در روش ممان، جریان روی آنتن دیگر از پیش فرض نمی شود، بلکه با گسسته سازی سیم و حل یک دستگاه خطی به دست می آید. اگر دایپل به N قطعه تقسیم شود، می توان جریان را به صورت ترکیب توابع پایه نوشت:

$$I(z) = \sum_{n=1}^{N} I_n p_n(z),$$

که در آن $p_n(z)$ تابع پایه پالس روی قطعه n است. در روش نقطه تطبیق، معادله میدان روی مرکز هر قطعه ارضا می شود.

در گزارش اولیه پارامترهای عددی زیر استفاده شده اند:

کمیت	مقدار
طول موج نرمال شده	$\lambda = 1$
طول دایپل	$L = \lambda/2$
شعاع دایپل	$a = 0.001\lambda$
تعداد قطعات در نیم دایپل	$N = 50$
امپدانس فضای آزاد	$\eta = 377\ \Omega$
بازه فاصله بین دو دایپل	$d \in [0.1\lambda, 5\lambda]$

طول موج: $\lambda = 1$

طول دی‌پل: $l = \frac{\lambda}{2}$

شعاع دی‌پل: $a = 0.001\lambda$

تعداد سگمنت‌ها در نیمه دی‌پل: $N = 50$

طول هر سگمنت: $dz = \frac{l}{2(N-0.5)}$

موقعیت نقاط مشاهده: $z_m = dz/2 : dz : N \cdot dz$

امپدانس فضای آزاد: $\eta = 377$

ولتاژ تحریک: $V_{\text{impressed}} = -1$

فاصله بین دی‌پل‌ها: $\delta \in [0.1\lambda, 5\lambda]$

شکل 5: پارامترهای فیزیکی و عددی استفاده شده در پیاده سازی روش ممان.

$$\sum_{n=1}^{N} I_n p_n(z) : p_n(z) = \begin{cases} 1 & \text{برای } z \in [z_n - dz/2, z_n + dz/2] \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

شکل 6: نمایش تابع پایه پالس برای گسسته سازی جریان در روش ممان.

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & -\cos(kz) & 0 \\ G_{21} & G_{22} & 0 & -\cos(kz) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

شکل 7: ساختار بلوکی دستگاه خطی حاصل از گسسته سازی دو دایپل.

جریان در مرکز دی‌پل اول: $I_1 = I(1)$

جریان در مرکز دی‌پل دوم: $I_2 = I(N+1)$

شکل 8: تعریف جریان ترمینال دایپل اول و دوم در پیاده سازی عددی.

$$Z_{11} = \frac{V_{\text{impressed}}}{I_1} \Big| Z_{12} = \frac{V_{\text{impressed}}}{I_2}$$

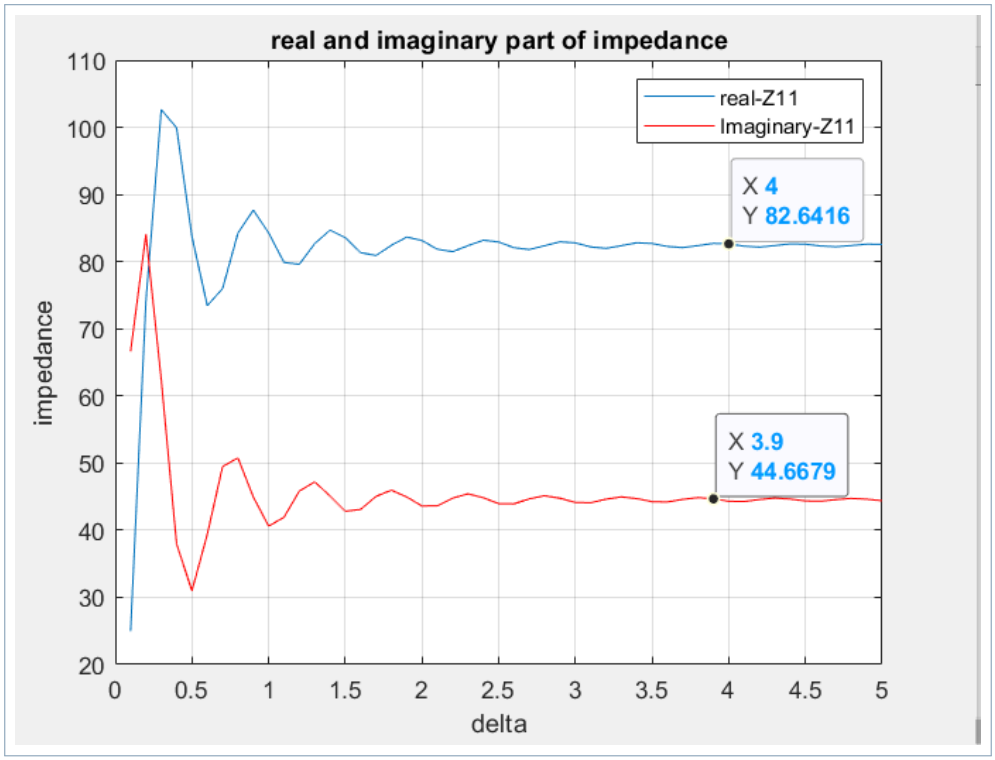
شکل 9: فرمول استخراج امپدانس ها از ولتاژ تحریک و جریان ترمینال.

8.2 نتایج روش ممان و تفسیر آن

شکل زیر بخش حقیقی و موهومی امپدانس خودی را در روش ممان نشان می دهد. مقدار پایدار شده در فاصله های بزرگ تقریبا در محدوده

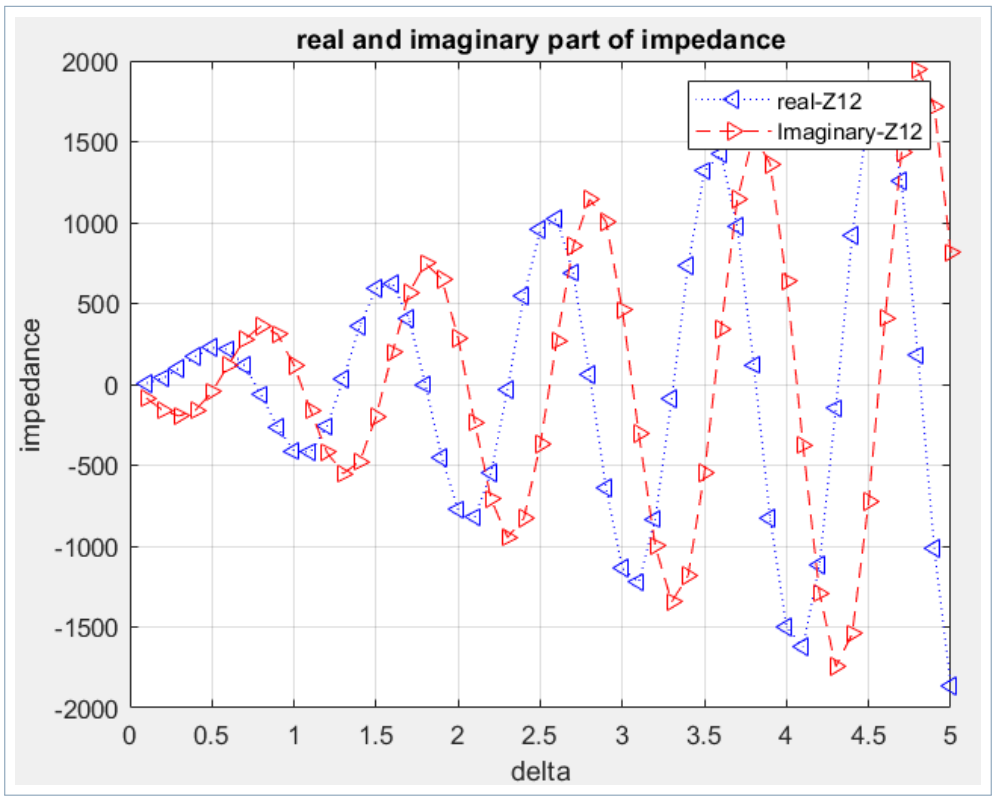
$$Z_{11} \approx 82.6 + j44.7\ \Omega$$

قرار می گیرد. این عدد از نظر بخش موهومی به مقدار مرجع $73.1 + j42.5\ \Omega$ نزدیک است، اما بخش حقیقی کمی بزرگ تر است. این اختلاف می تواند از نوع گسسته سازی، مدل شعاع سیم، طول دقیق دایپل و شرایط تحریک ناشی شود.



شکل 10: بخش حقیقی و موهومی امپدانس خودی در روش ممان. مقدار به سمت یک مقدار تقریبا ثابت میل می کند.

شکل بعدی خروجی نهایی گزارش اولیه برای امپدانس متقابل در روش ممان را نشان می دهد.



شکل 11: خروجی نهایی گزارش اولیه برای بخش حقیقی و موهومی امپدانس متقابل در روش ممان.

برای تفسیر این شکل باید دقت کرد که از نظر فیزیکی، امپدانس متقابل نباید با افزایش فاصله به طور نامحدود بزرگ شود. روند صحیح این است که Z_{12} با فاصله نوسان کند، اما اندازه آن به طور کلی کاهش یابد. بنابراین اگر در خروجی عددی نوسان های بزرگ یا رشد غیرطبیعی دیده شود، محتمل ترین علت یکی از موارد زیر است:

- تعریف نادرست شرط پورت دوم هنگام محاسبه Z_{12}؛
- استخراج امپدانس از جریان نادرست، مثلا استفاده از جریان یک قطعه به جای جریان ترمینال؛
- خطا در علامت یا نرمال سازی دستگاه ماتریسی؛
- ناکافی بودن مدل تکینگی خودی یا خطای گسسته سازی.

با وجود این، نتیجه کیفی قابل اتکا همان نتیجه شکل های قبلی است: امپدانس متقابل در فواصل کوچک بزرگ تر است و با افزایش فاصله، به علت کاهش کوپلینگ میدان، به سمت صفر میل می کند.

9.2 جمع بندی بخش امپدانس

نتیجه اصلی این بخش این است که:

- امپدانس خودی دایپل نیم موج باید در نزدیکی مقدار مرجع $73 + j42.5\ \Omega$ قرار گیرد، البته بسته به شعاع و طول دقیق سیم تغییر می کند.
- امپدانس متقابل Z_{12} تابعی نوسانی از d/λ است.
- اندازه Z_{12} در فاصله های کوچک بزرگ است و با افزایش فاصله کاهش می یابد.
- روش ممان روش مناسب تری از فرض جریان سینوسی ثابت است، اما فقط وقتی نتیجه معتبر است که شرط تحریک و استخراج جریان به درستی تعریف شده باشد.

3 بخش دوم: آرایه خطی از دایپل های موازی

1.3 صورت مسئله

در بخش آرایه ها، هدف بررسی اثر پارامترهای آرایه روی الگوی تابشی و سمت گرایی است. برای آرایه خطی از دایپل های موازی، پارامترهای اصلی عبارت اند از:

- فاصله بین عناصر d؛
- تعداد عناصر N؛
- دامنه جریان هر عنصر I_n؛
- اختلاف فاز تحریک بین عناصر β؛
- الگوی تابشی تک عنصر.

در شبیه سازی موجود، یک آرایه 8 عنصری از دایپل های موازی در فرکانس تقریبی 2.6 GHz بررسی شده است. خروجی های موجود شامل هندسه، همگرایی، S_{11}، گین، الگوی دو بعدی و سه بعدی و توان تابشی هستند. برای تکمیل خواسته پروژه جدید، اثر پارامترهای دیگر نیز به صورت نظری تحلیل می شود.

2.3 آرایه فاکتور

اگر N عنصر روی یک خط با فاصله d قرار بگیرند و جریان عنصر n برابر $I_n = a_n e^{jn\beta}$ باشد، آرایه فاکتور به شکل زیر است:

$$AF(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn(kd\cos\theta+\beta)}.$$

در حالت تحریک یکنواخت، یعنی $a_n = 1$، داریم:

$$AF(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}, \qquad \psi = kd\cos\theta + \beta.$$

الگوی کل تقریبا برابر است با حاصل ضرب الگوی تک عنصر و آرایه فاکتور:

$$F_{\text{total}}(\theta,\phi) = F_{\text{element}}(\theta,\phi)AF(\theta).$$

بنابراین جهت پرتو اصلی از شرط زیر به دست می آید:

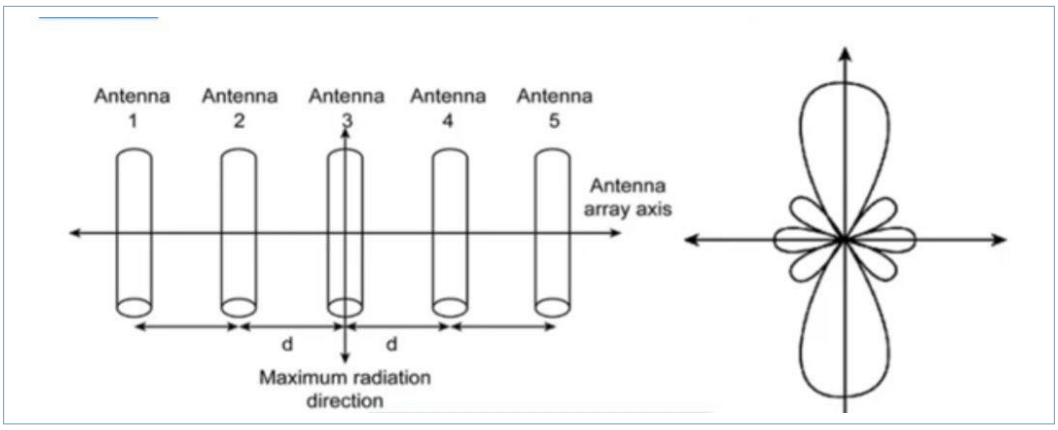
$$\psi = 0 \quad \Rightarrow \quad kd\cos\theta_0 + \beta = 0.$$

3.3 حالت Broadside

در آرایه Broadside، پرتو اصلی عمود بر محور آرایه است. اگر محور آرایه را افقی بگیریم، جهت اصلی معمولا در $\theta = 90^\circ$ قرار دارد. چون $\cos 90^\circ = 0$، باید داشته باشیم:

$$\beta = 0.$$

پس در حالت Broadside همه عناصر با فاز یکسان تحریک می شوند.



شکل 12: نمای مفهومی آرایه Broadside: بیشینه تابش عمود بر محور آرایه تشکیل می شود.

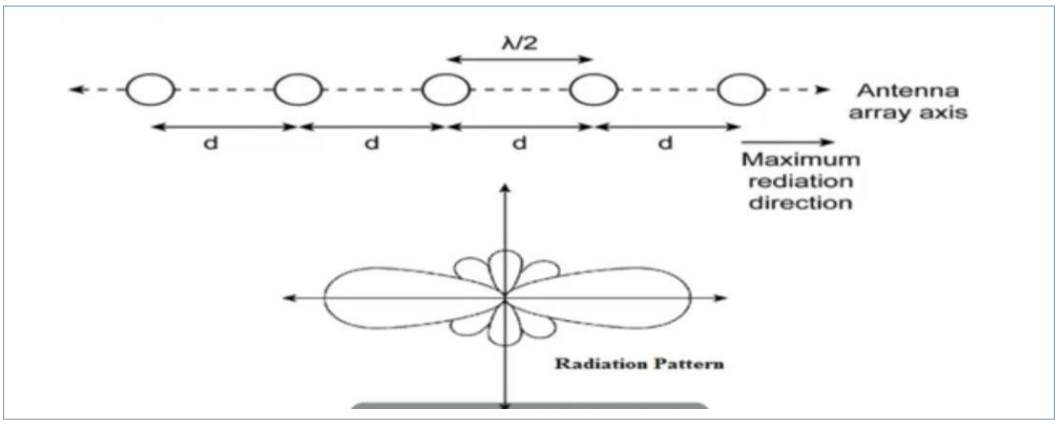
در این حالت با افزایش تعداد عناصر، پهنای پرتو اصلی کاهش می یابد و سمت گرایی افزایش پیدا می کند. اگر فاصله عناصر بیش از حد زیاد شود، لوب های فرعی یا حتی Grating Lobes ظاهر می شوند.

4.3 حالت End-fire

در آرایه End-fire، پرتو اصلی تقریبا در راستای محور آرایه قرار می گیرد. اگر بخواهیم بیشینه تابش در $\theta = 0^\circ$ باشد، چون $\cos 0^\circ = 1$، شرط تقریبی می شود:

$$kd + \beta = 0 \quad \Rightarrow \quad \beta = -kd.$$

یعنی هر عنصر نسبت به عنصر قبلی با فاز منفی تحریک می شود.



شکل 13: نمای مفهومی آرایه End-fire: بیشینه تابش در راستای محور آرایه تشکیل می شود.

5.3 اثر فاصله بین عناصر

فاصله d یکی از مهم ترین پارامترهای آرایه است. اگر d کوچک باشد، طول کل آرایه کم می شود و پرتو اصلی پهن تر خواهد بود. اگر d زیاد شود، پرتو اصلی باریک تر می شود، اما خطر ایجاد لوب های ناخواسته افزایش می یابد.

برای یک آرایه خطی یکنواخت، انتخاب رایج این است:

$$d \approx \frac{\lambda}{2}.$$

این انتخاب معمولا تعادل خوبی بین سمت گرایی، کوپلینگ متقابل و جلوگیری از لوب های تناوبی ایجاد می کند. اگر $d > \lambda$ شود، امکان ایجاد لوب هایی با بزرگی نزدیک به پرتو اصلی وجود دارد.

از نظر تئوری، انتظار می رود برای مقادیر زیر چنین رفتاری دیده شود:

فاصله	رفتار مورد انتظار
$d = 0.25\lambda$	کوپلینگ بیشتر، آرایه کوتاه تر، پرتو پهن تر، سمت گرایی کمتر
$d = 0.5\lambda$	حالت متعادل و رایج، پرتو مناسب بدون لوب تناوبی جدی
$d = 0.75\lambda$	پرتو باریک تر، لوب های فرعی قوی تر
$d \geq \lambda$	احتمال تشکیل Grating Lobes و کاهش کیفیت الگو

6.3 اثر تعداد عناصر

اگر تحریک یکنواخت باشد و کوپلینگ متقابل را نادیده بگیریم، افزایش تعداد عناصر باعث افزایش طول مؤثر آرایه و در نتیجه افزایش سمت گرایی می شود. برای عناصر مشابه، تخمین ساده سمت گرایی این است:

$$D_{\text{array}} \approx N D_{\text{element}}.$$

برای دایپل نیم موج، سمت گرایی تک عنصر تقریبا برابر است با:

$$D_{\text{element}} \approx 1.64 \quad \text{یا} \quad 2.15 \text{ dBi}.$$

پس برای $N = 8$، تخمین ساده می دهد:

$$D_{\text{array,dBi}} \approx 2.15 + 10\log_{10}(8) \approx 11.2 \text{ dBi}.$$

این مقدار یک تخمین ایده آل است و در شبیه سازی واقعی، به علت کوپلینگ، تلفات، تعریف منبع ها و نرمال سازی توان، مقدار گزارش شده می تواند متفاوت باشد.

اثر تعداد عناصر به صورت کیفی چنین است:

تعداد عناصر	رفتار مورد انتظار
$N = 2$	پرتو نسبتا پهن و سمت گرایی محدود
$N = 4$	پرتو باریک تر و لوب های فرعی قابل مشاهده تر
$N = 8$	سمت گرایی بالاتر، پرتو اصلی باریک تر و حساسیت بیشتر به خطای فاز

7.3 اثر دامنه جریان تحریک

اگر همه عناصر با دامنه یکسان تحریک شوند، آرایه بیشترین سمت گرایی را در حالت ساده می دهد، اما لوب های فرعی ممکن است بزرگ باشند. اگر دامنه جریان عناصر کناری کاهش یابد، مثلا با یک توزیع غیر یکنواخت یا Tapering، لوب های فرعی کاهش می یابند، اما پرتو اصلی پهن تر می شود و گاهی سمت گرایی ماکزیمم کاهش پیدا می کند.

بنابراین رابطه کلی چنین است:

پرتوی اصلی پهن تر و سمت گرایی کمتر $\iff$ کاهش لوب فرعی.

8.3 اثر فاز جریان تحریک

اختلاف فاز بین عناصر، جهت پرتو اصلی را کنترل می کند. از رابطه

$$kd\cos\theta_0 + \beta = 0$$

داریم:

$$\cos\theta_0 = -\frac{\beta}{kd}.$$

پس با تغییر β می توان پرتو را اسکن کرد. برای مثال:

- اگر $\beta = 0$ باشد، آرایه Broadside است.
- اگر $\beta = -kd$ باشد، پرتو به سمت $\theta = 0^\circ$ می رود.
- اگر β بین این دو مقدار باشد، پرتو بین حالت عمود و حالت محوری قرار می گیرد.

9.3 مشخصات هندسی و تنظیمات شبیه سازی موجود

در شبیه سازی موجود، فرکانس کاری برابر 2.6 GHz در نظر گرفته شده است. بنابراین طول موج فضای آزاد برابر است با:

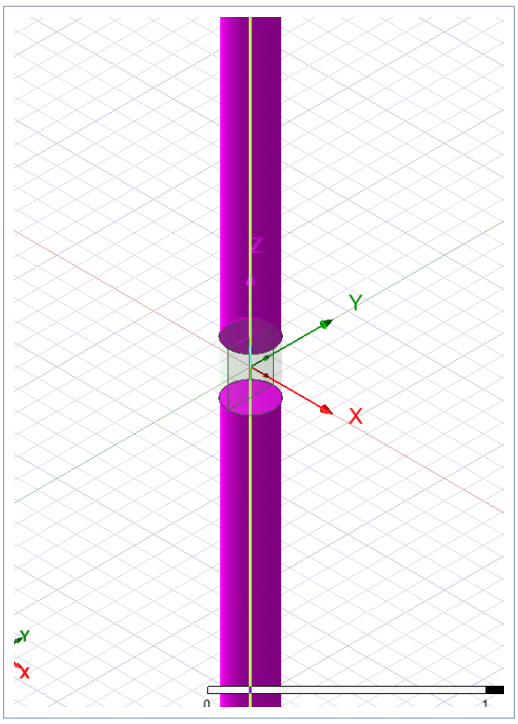
$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3\times10^8}{2.6\times10^9} \approx 115.38 \text{ mm}.$$

پس نصف طول موج تقریبا برابر است با:

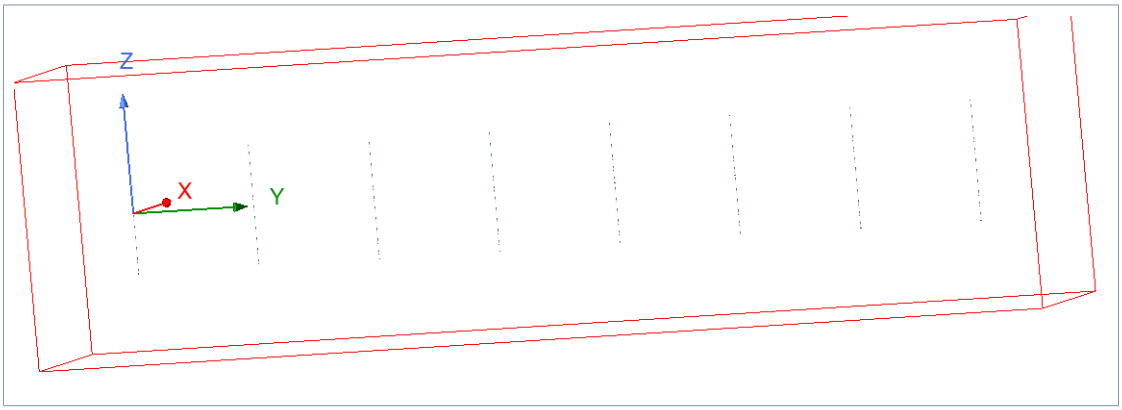
$$\frac{\lambda_0}{2} \approx 57.69 \text{ mm}.$$

در گزارش اولیه عدد 57.65 mm به عنوان فاصله نیم موج استفاده شده است. طول هر دایپل نیز 55 mm در نظر گرفته شده، که نزدیک به دایپل نیم موج در فرکانس 2.6 GHz است.

کمیت	مقدار استفاده شده
فرکانس	2.6 GHz
طول موج فضای آزاد	115.38 mm
فاصله تقریبی نیم موج	57.65 mm
طول هر دایپل	55 mm
فاصله شکاف تغذیه	0.275 mm
شعاع دایپل	0.1154 mm
تعداد عناصر	8
نوع پورت	Lumped Port
امپدانس پورت	73 Ω



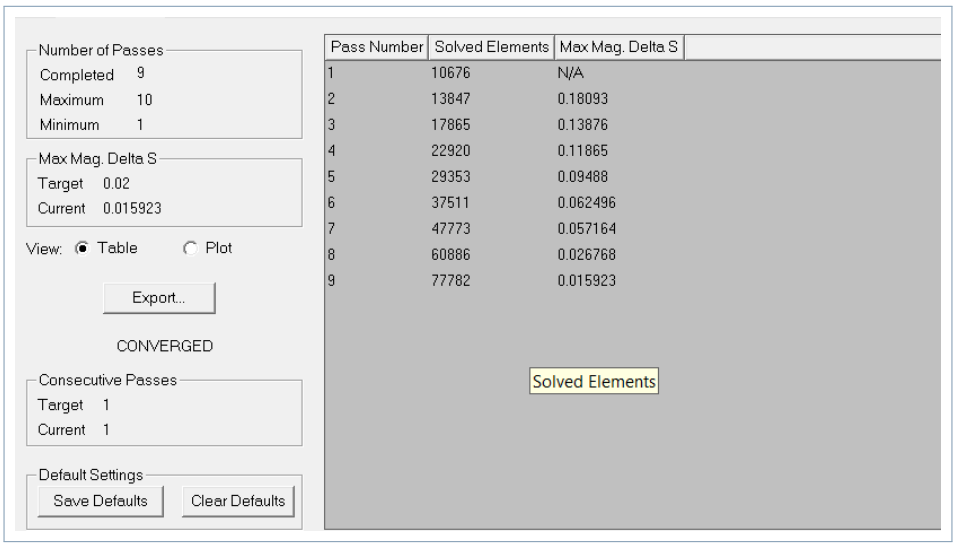
شکل 14: هندسه یک دایپل در محیط HFSS و محل شکاف تغذیه.



شکل 15: آرایه نهایی شامل 8 دایپل موازی داخل مرز تابشی.

10.3 همگرایی حل عددی

در شبیه سازی میدان کامل، همگرایی مش و مقدار Max Delta S اهمیت زیادی دارد. شکل زیر نشان می دهد که حل پس از چند گذر به همگرایی رسیده است.

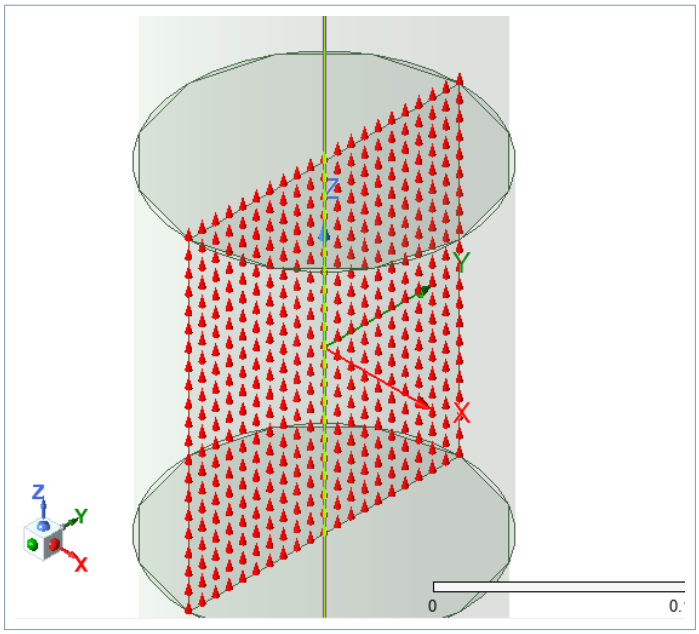


شکل 16: جدول همگرایی حل در HFSS. مقدار Max Delta S به کمتر از مقدار هدف رسیده است.

همگرایی عددی به این معناست که با ریزتر شدن مش، پاسخ S دیگر تغییر جدی نمی کند. البته همگرایی عددی به تنهایی کافی نیست؛ باید اندازه جعبه تابشی، نوع پورت، و نرمال سازی توان نیز درست باشند.

11.3 تحریک و مود پورت

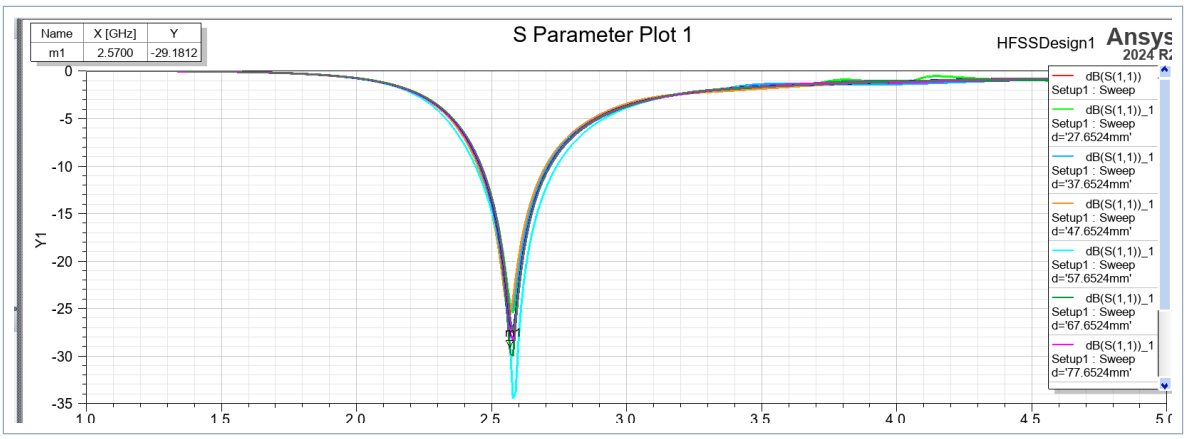
در این شبیه سازی از Lumped Port برای تحریک هر دایپل استفاده شده است. این انتخاب برای آنتن سیمی نازک و شکاف کوچک تغذیه مناسب است. جهت میدان در مود پورت باید با جهت شکاف تغذیه سازگار باشد.



شکل 17: مود میدان الکتریکی روی پورت تغذیه دایپل.

12.3 پارامتر S_{11} و پهنای باند

در گزارش اولیه، ابتدا اثر چند فاصله مختلف بین دایپل ها روی S_{11} بررسی شده است. در شکل زیر دیده می شود که فاصله نزدیک به نیم موج عملکرد مناسبی ایجاد کرده است.



شکل 18: مقایسه S_{11} برای چند مقدار مختلف فاصله بین دایپل ها.

برای یک آنتن، پهنای باند معمولا از شرط زیر به دست می آید:

$$S_{11} < -10 \text{ dB}.$$

در نمودار بازگشت زیر، فرکانس های تقریبی دو طرف ناحیه -10 dB برابر با 2.392 GHz و 2.711 GHz نشان داده شده اند. بنابراین پهنای باند تقریبی برابر است با:

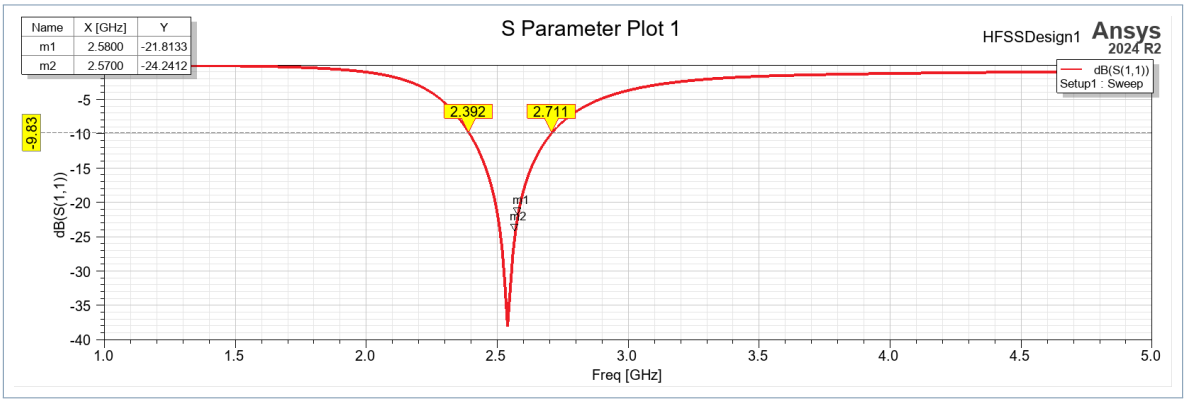
$$BW \approx 2.711 - 2.392 = 0.319 \text{ GHz}.$$

فرکانس مرکزی تقریبی نیز:

$$f_c \approx \frac{2.711 + 2.392}{2} = 2.5515 \text{ GHz}.$$

پس پهنای باند نسبی تقریبا:

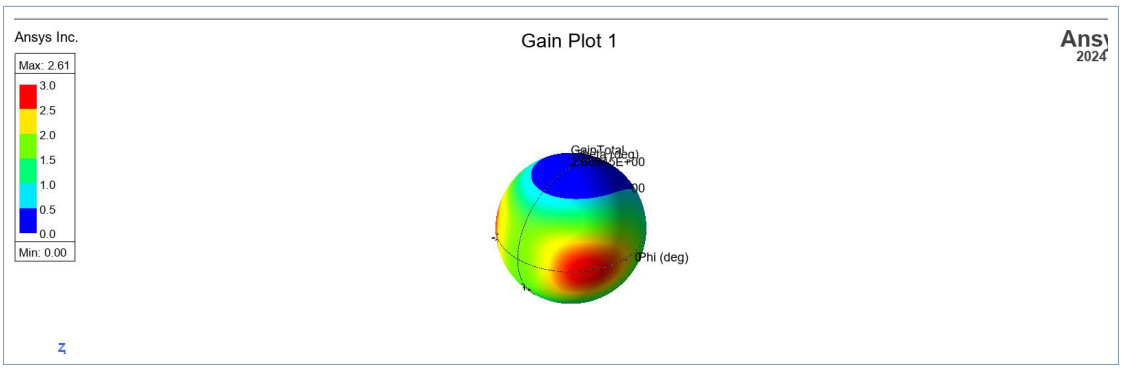
$$\frac{BW}{f_c} \times 100 \approx \frac{0.319}{2.5515} \times 100 \approx 12.5\%.$$



شکل 19: نمودار S_{11} و تعیین بازه تقریبی پهنای باند بر اساس معیار -10 dB.

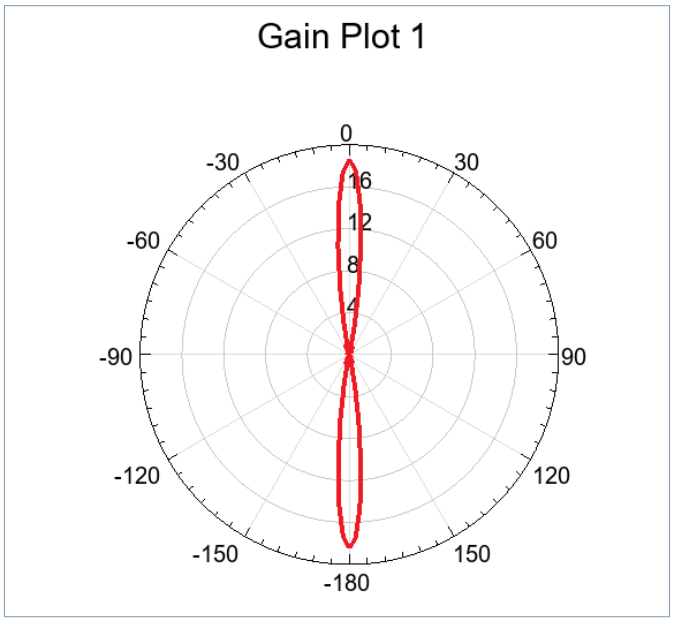
13.3 گین تک دایپل و الگوی آرایه

گین یک دایپل منفرد در شبیه سازی به صورت سه بعدی در شکل زیر نشان داده شده است. مقدار بیشینه نزدیک به 2.61 گزارش شده که با انتظار فیزیکی از دایپل نیم موج سازگار است.

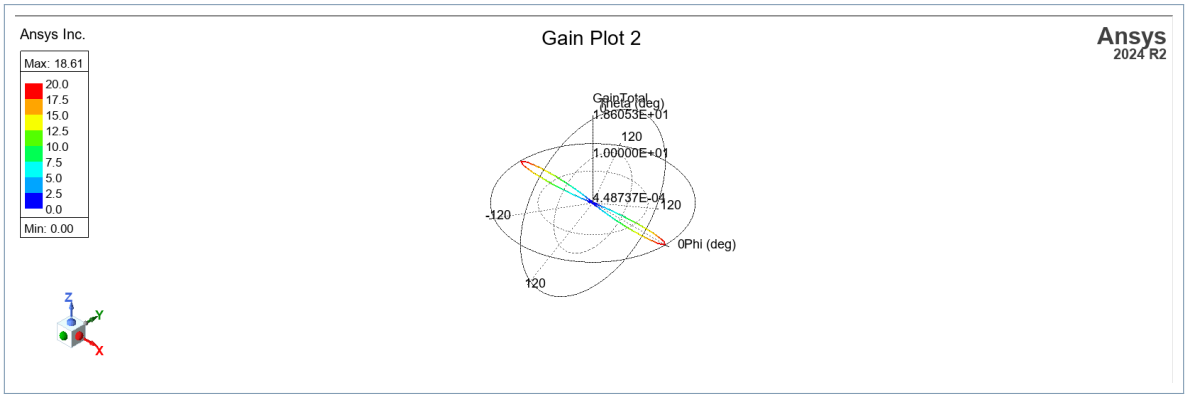


شکل 20: گین سه بعدی یک دایپل منفرد. مقدار بیشینه در حدود 2.61 دیده می شود.

پس از تحریک همه پورت های آرایه، الگوی میدان دور به صورت دوبعدی و سه بعدی محاسبه شده است.



شکل 21: برش دوبعدی الگوی گین آرایه. پرتو اصلی باریک تر از تک عنصر است.

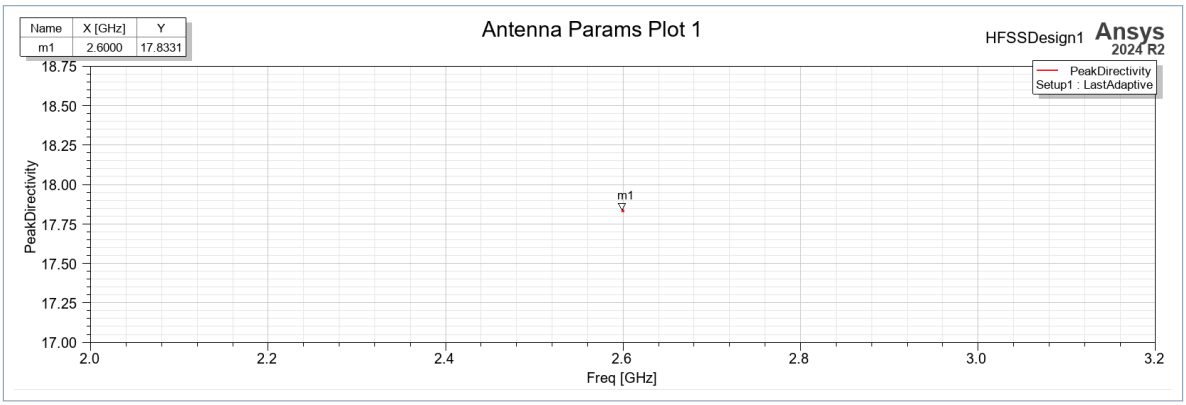


شکل 22: الگوی سه بعدی گین آرایه در میدان دور.

در شکل دوبعدی، بیشینه تابش در جهت های اصلی آرایه دیده می شود و پرتو نسبت به تک دایپل باریک تر است. این نتیجه با رابطه آرایه فاکتور سازگار است: ترکیب هم فاز چند عنصر باعث تقویت میدان در جهت پرتو اصلی و تضعیف نسبی در برخی جهت های دیگر می شود.

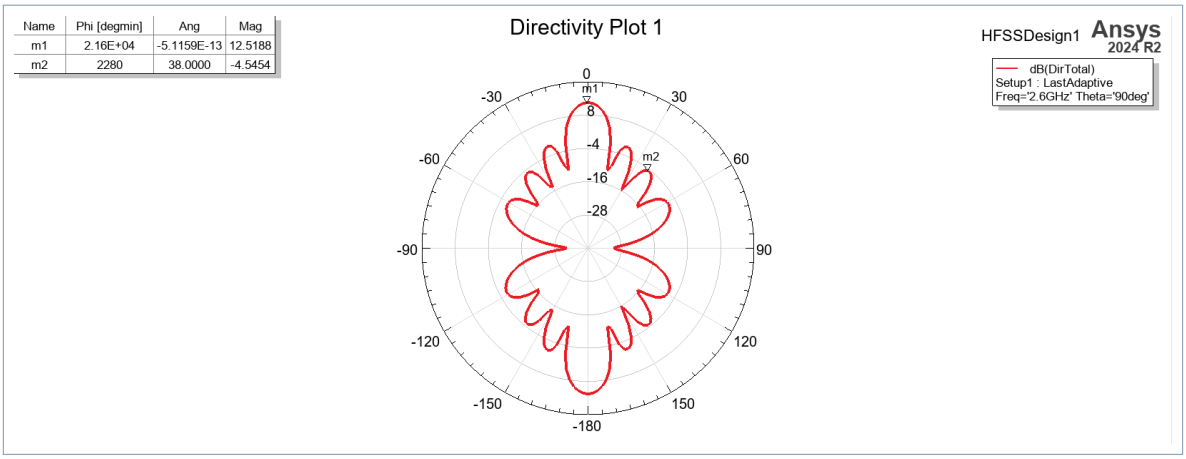
14.3 پارامترهای توان و سمت گرایی

شکل زیر یکی از خروجی های پارامتری آنتن را در فرکانس کاری نشان می دهد.



شکل 23: خروجی پارامتری آنتن در فرکانس کاری.

در گزارش اولیه یک نمودار سمت گرایی نیز آورده شده است. برای تفسیر آن باید توجه کرد که مقدار سمت گرایی و گین به نرمال سازی توان کل ورودی وابسته است. وقتی هر یک از 8 پورت به طور جداگانه تحریک می شود، اگر توان کل ورودی درست نرمال نشود، مقدار گین گزارش شده می تواند بزرگ تر از تخمین ساده تئوری به نظر برسد.



شکل 24: نمودار سمت گرایی گزارش شده برای آرایه. تفسیر مقدار عددی باید با توجه به نرمال سازی توان انجام شود.

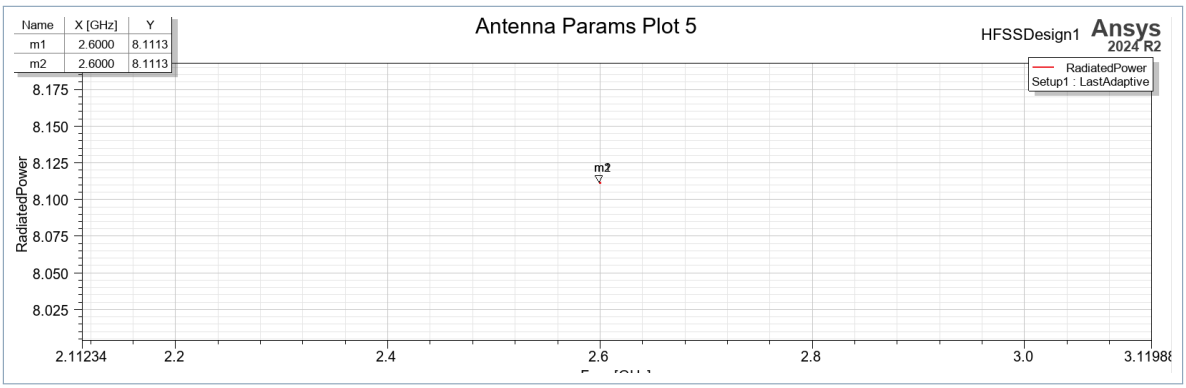
برای مقایسه نظری، اگر یک دایپل نیم موج دارای سمت گرایی حدود 2.15 dBi باشد، آرایه ایده آل 8 عنصری تقریبا مقدار زیر را می دهد:

$$D_{\text{ideal}} \approx 2.15 + 10\log_{10}(8) = 11.2 \text{ dBi}.$$

اگر خروجی نرم افزار عدد بزرگ تری نشان دهد، باید بررسی شود که آیا گین نسبت به توان کل پذیرفته شده محاسبه شده یا نسبت به توان یک پورت. بنابراین، در گزارش نهایی بهتر است همواره بین Gain، Realized Gain و Directivity تفاوت گذاشته شود.

15.3 توان تابشی

توان تابشی نشان می دهد چه مقدار از توان ورودی واقعا توسط آنتن به فضا تابیده شده است. شکل زیر مقدار توان تابشی را در فرکانس کاری نشان می دهد.



شکل 25: توان تابشی آرایه در فرکانس کاری.

اگر توان تابشی زیاد باشد اما S_{11} نیز زیاد باشد، یعنی آنتن در صورت دریافت توان خوب تابش می کند، ولی بخشی از توان در ورودی بازتاب می شود. اگر S_{11} کوچک، توان تابشی زیاد و الگوی تابشی مطلوب باشد، طراحی از نظر آنتنی مناسب است.

16.3 تکمیل نظری خواسته های پروژه جدید

در توضیح پروژه جدید، برای آرایه ها خواسته شده است که اثر فاصله عناصر، جریان و فاز تحریک، و تعداد عناصر بررسی شود. چون خروجی عددی موجود فقط بخشی از این موارد را پوشش می دهد، این قسمت جمع بندی نظری کامل آن هاست.

تغییر فاصله عناصر

با افزایش d از 0.25λ تا 0.5λ، پرتو اصلی باریک تر و سمت گرایی بیشتر می شود. با افزایش بیشتر به 0.75λ، لوب های فرعی قوی تر می شوند. اگر فاصله به حدود λ یا بیشتر برسد، ممکن است لوب های تناوبی ظاهر شوند. بنابراین بهترین انتخاب عمومی برای آرایه خطی ساده، همان $d \approx 0.5\lambda$ است.

تغییر تعداد عناصر

برای $N = 2$ الگو هنوز پهن است. برای $N = 4$ پرتو اصلی باریک تر می شود. برای $N = 8$ سمت گرایی افزایش قابل توجهی پیدا می کند، اما حساسیت به خطای فاز، کوپلینگ و عدم تطبیق نیز بیشتر می شود. پس افزایش تعداد عناصر همیشه از نظر الگو مفید است، ولی هزینه پیاده سازی و حساسیت سیستم را بیشتر می کند.

تغییر فاز تحریک

اختلاف فاز صفر، آرایه را در حالت Broadside قرار می دهد. اختلاف فاز $\beta = -kd$، پرتو را به حالت End-fire نزدیک می کند. فازهای میانی برای اسکن پرتو استفاده می شوند. اگر فازها دقیق تنظیم نشوند، پرتو اصلی در جهت ناخواسته تشکیل می شود یا سطح لوب های فرعی افزایش می یابد.

تغییر دامنه جریان تحریک

تحریک یکنواخت، سمت گرایی بالایی ایجاد می کند ولی لوب های فرعی آن ممکن است زیاد باشند. تحریک غیر یکنواخت، مثلا کاهش جریان عناصر کناری، لوب های فرعی را کم می کند اما پهنای پرتو اصلی را زیاد می کند. این همان مصالحه کلاسیک بین Sidelobe Level و Beamwidth است.

17.3 جمع بندی بخش آرایه

نتیجه اصلی بخش آرایه این است که آرایه خطی دایپل های موازی می تواند نسبت به تک دایپل پرتو باریک تر و سمت گرایی بالاتری ایجاد کند. در شبیه سازی موجود، عملکرد تشدیدی نزدیک به 2.6 GHz، مقدار مناسب S_{11}، و تشکیل الگوی جهت دار مشاهده شده است. از نظر تئوری، برای تکمیل کامل پروژه باید چند مقدار مختلف از d، N، دامنه جریان و فاز تحریک با هم مقایسه شوند؛ اما جهت تغییرات مورد انتظار از رابطه آرایه فاکتور به طور روشن قابل پیش بینی است.

4 بخش سوم: آرایه مربعی از دوقطبی های موازی

در این بخش، پروژه آرایه مربعی نیز به گزارش اضافه شده است. در این پروژه، آرایه ای به صورت شبکه $M \times M$ از دوقطبی های موازی بررسی می شود. هدف اصلی، محاسبه و تحلیل الگوی تشعشعی و راستاوری آرایه بر حسب فاصله عناصر، تعداد عناصر، فاز تحریک و دامنه جریان تحریک است. نتایج موجود با دو روش به دست آمده اند: محاسبه دستی Array Factor در متلب و مقایسه با تابع آماده MATLAB Phased Array Toolbox.

1.4 ساختار فیزیکی آرایه مربعی

آرایه مربعی را می توان به صورت یک شبکه منظم از آنتن ها روی صفحه xy در نظر گرفت. اگر تعداد عناصر در هر راستا M باشد، تعداد کل عناصر برابر است با:

$$N_{\text{total}} = M^2.$$

مختصات عنصر واقع در سطر m و ستون n را به شکل زیر می نویسیم:

$$x_m = \left(m - \frac{M-1}{2}\right) d_x, \qquad y_n = \left(n - \frac{M-1}{2}\right) d_y,$$

که در آن d_x و d_y فاصله بین عناصر در دو راستای x و y هستند. در حالت مربعی و یکنواخت معمولا داریم:

$$d_x = d_y = d.$$

اگر همه دوقطبی ها موازی با محور z باشند، عامل المانی دوقطبی کوتاه در میدان دور به صورت زیر است:

$$F_e(\theta) = \sin\theta.$$

بنابراین دوقطبی در راستای z در جهت $\theta = 0$ و $\theta = \pi$ نول دارد و بیشترین تابش آن در صفحه xy، یعنی حوالی $\theta = \pi/2$، رخ می دهد. به همین دلیل، در تفسیر نتایج باید بین جهت هندسی آرایه و جهت مجاز تابش دوقطبی تمایز گذاشت.

2.4 بردار مشاهده و فاز مکانی

بردار واحد مشاهده در مختصات کروی برابر است با:

$$\hat{r} = \sin\theta\cos\phi\,\hat{x} + \sin\theta\sin\phi\,\hat{y} + \cos\theta\,\hat{z}.$$

برای عنصری که در مکان $\mathbf{r}_{mn} = x_m\hat{x} + y_n\hat{y}$ قرار دارد، فاز مکانی در راستای مشاهده برابر است با:

$$k\mathbf{r}_{mn}\cdot\hat{r} = k\left(x_m\sin\theta\cos\phi + y_n\sin\theta\sin\phi\right),$$

که در آن $k = 2\pi/\lambda$ است. اگر جریان عنصر (m,n) برابر باشد با:

$$I_{mn} = a_{mn}e^{j\alpha_{mn}},$$

آرایه فاکتور کلی برابر می شود با:

$$AF(\theta,\phi) = \sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{M-1} a_{mn}\exp\left\{j\left[k\left(x_m\sin\theta\cos\phi + y_n\sin\theta\sin\phi\right) + \alpha_{mn}\right]\right\}.$$

پس الگوی کل، با لحاظ کردن الگوی دوقطبی موازی با z، به شکل زیر نوشته می شود:

$$F(\theta,\phi) = F_e(\theta)AF(\theta,\phi) = \sin\theta\,AF(\theta,\phi).$$

چگالی توان تابشی متناسب است با:

$$U(\theta,\phi) \propto |F(\theta,\phi)|^2 = \sin^2\theta\,|AF(\theta,\phi)|^2.$$

3.4 هدایت پرتو با انتخاب فاز تحریک

اگر بخواهیم پرتو اصلی در راستای (θ_0, ϕ_0) تشکیل شود، باید فاز تحریک هر عنصر طوری انتخاب شود که همه جملات آرایه در آن جهت هم فاز شوند. شرط هم فاز شدن برابر است با:

$$\alpha_{mn} = -k\left(x_m \sin\theta_0 \cos\phi_0 + y_n \sin\theta_0 \sin\phi_0\right).$$

با این انتخاب، در جهت مطلوب داریم:

$$k\left(x_m \sin\theta_0 \cos\phi_0 + y_n \sin\theta_0 \sin\phi_0\right) + \alpha_{mn} = 0,$$

و بنابراین تمام عناصر در آن جهت به صورت سازنده جمع می شوند. این همان اصل beam steering است.

اگر آرایه یکنواخت باشد، یعنی $a_{mn} = 1$، و فاصله ها نیز برابر باشند، آرایه فاکتور را می توان به صورت حاصل ضرب دو آرایه خطی نوشت:

$$AF(\theta, \phi) = AF_x(\theta, \phi) AF_y(\theta, \phi),$$

که در آن:

$$AF_x = \frac{\sin(M\psi_x/2)}{\sin(\psi_x/2)}, \qquad AF_y = \frac{\sin(M\psi_y/2)}{\sin(\psi_y/2)},$$

و

$$\psi_x = kd\left(\sin\theta\cos\phi - \sin\theta_0\cos\phi_0\right), \qquad \psi_y = kd\left(\sin\theta\sin\phi - \sin\theta_0\sin\phi_0\right).$$

این رابطه نشان می دهد که آرایه مربعی در واقع کنترل دو بعدی روی الگوی تابشی دارد و می تواند پرتو را هم در صفحه x و هم در صفحه y متمرکز کند.

4.4 محاسبه راستاوری آرایه مربعی

راستاوری از نسبت بیشینه شدت تابش به مقدار متوسط شدت تابش به دست می آید:

$$D_0 = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}},$$

که در آن توان کل تابشی برابر است با:

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} U(\theta, \phi)\sin\theta\, d\theta\, d\phi.$$

بنابراین برای آرایه مربعی باید $U(\theta, \phi)$ در کل کره انتگرال گیری شود. در کد دستی متلب، این کار با نمونه برداری از θ و ϕ انجام شده است. رابطه صحیح عددی به شکل زیر است:

$$D_0 \simeq \frac{4\pi \max_{\theta,\phi} U(\theta, \phi)}{\sum_i \sum_j U(\theta_i, \phi_j)\sin\theta_i\, \Delta\theta\, \Delta\phi}.$$

در این فرمول، وجود عامل $\sin\theta$ در انتگرال ضروری است، چون عنصر سطح روی کره برابر $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ است.

5.4 نقش پارامترهای اصلی

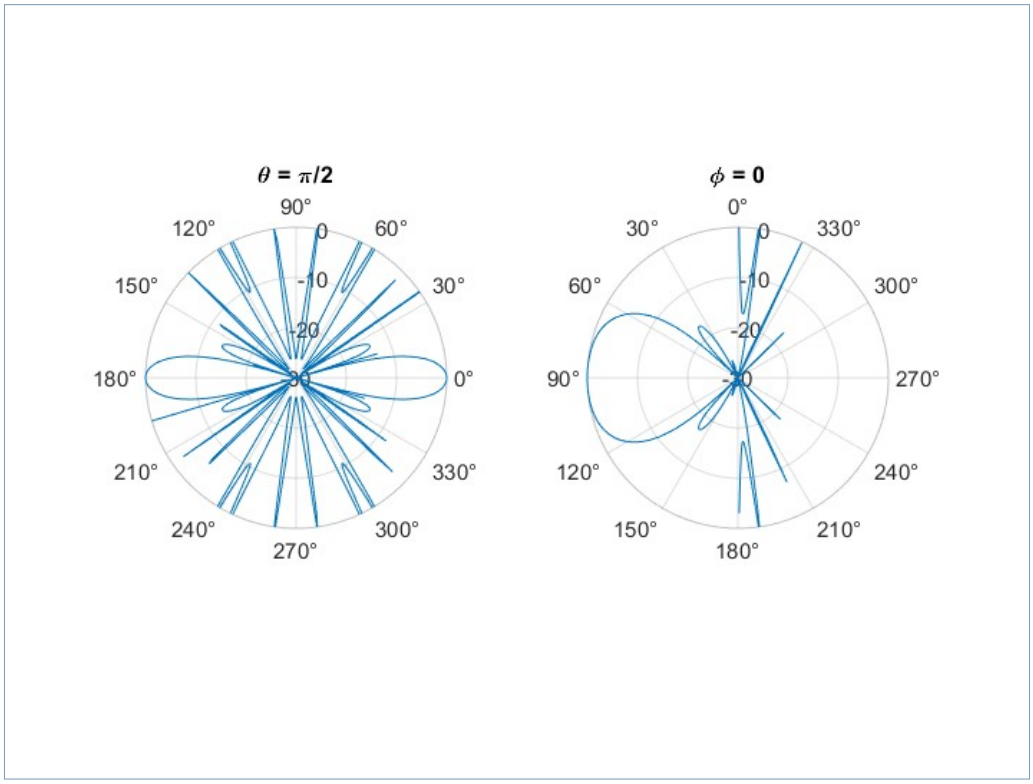
اثر پارامترهای آرایه مربعی را می توان به صورت زیر خلاصه کرد.

پارامتر	اثر فیزیکی مورد انتظار
تعداد عناصر M	با افزایش M، دهانه مؤثر آرایه بزرگ تر می شود، پهنای لوب اصلی کاهش می یابد و راستاوری افزایش پیدا می کند.
فاصله d/λ	افزایش فاصله تا حدود مناسب می تواند راستاوری را زیاد کند، اما برای فاصله های بزرگ، grating lobe ایجاد می شود.
فاز α_{mn}	فاز تحریک جهت پرتو اصلی را تعیین می کند و برای اسکن پرتو استفاده می شود.
دامنه a_{mn}	تغییر دامنه جریان یا tapering می تواند لوب های جانبی را کاهش دهد، ولی معمولا لوب اصلی را پهن تر می کند.

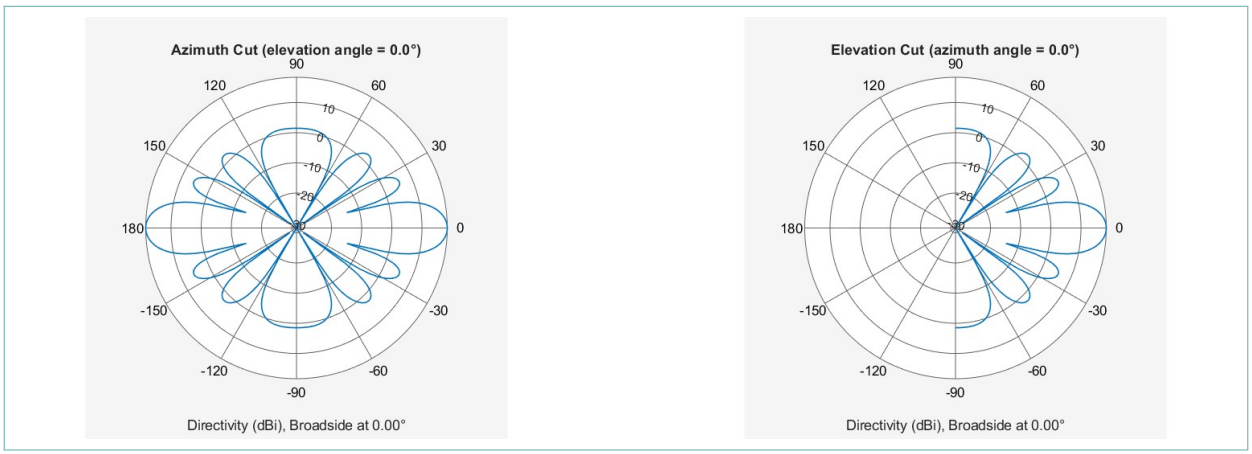
نکته مهم در تفسیر نتایج این پروژه این است که تابع آماده متلب در فایل Matlab_Function.m از phased.IsotropicAntennaElement استفاده می کند. بنابراین آن بخش، آرایه فاکتور را برای المان های ایزوتروپیک مقایسه می کند، نه الگوی دقیق دوقطبی. در مقابل، کد دستی با ضرب کردن در عامل $\sin\theta$ اثر اصلی دوقطبی موازی با محور z را بهتر وارد می کند.

6.4 نتایج الگوی تشعشعی با تغییر تعداد عناصر

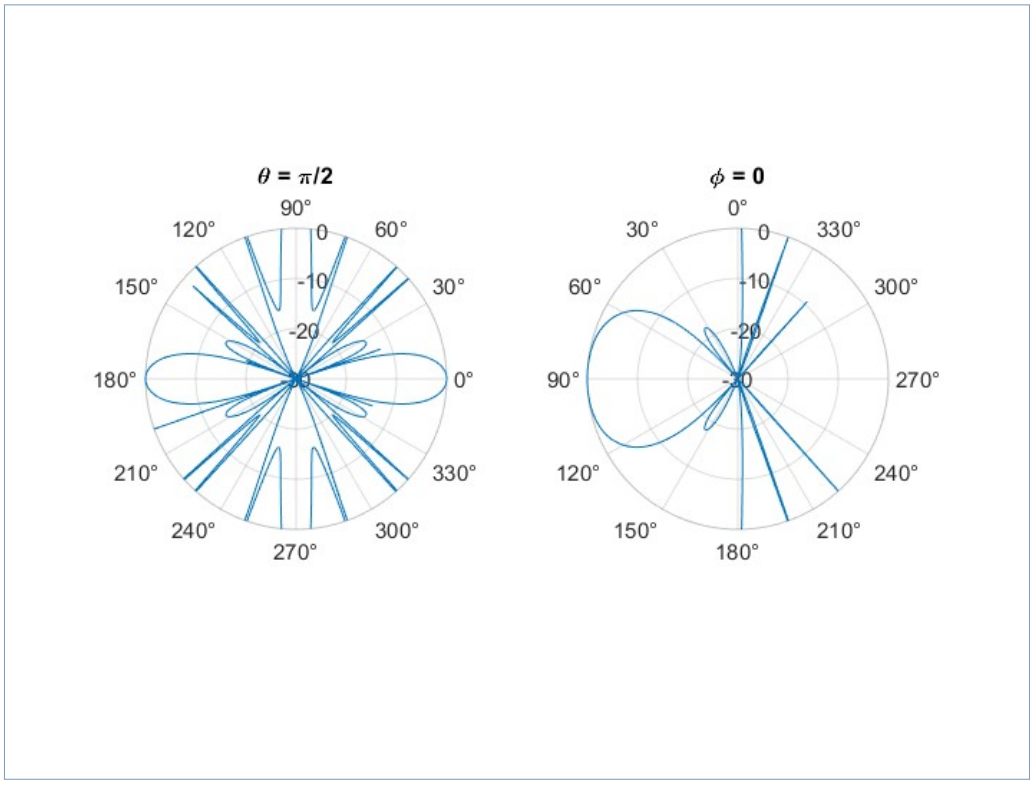
در مجموعه شکل های زیر، اثر افزایش تعداد عناصر در آرایه مربعی نشان داده شده است. برای حالت های مختلف، برش های $\theta = \pi/2$ و $\phi = 0$ رسم شده اند و سپس نتیجه با تابع آماده متلب مقایسه شده است.



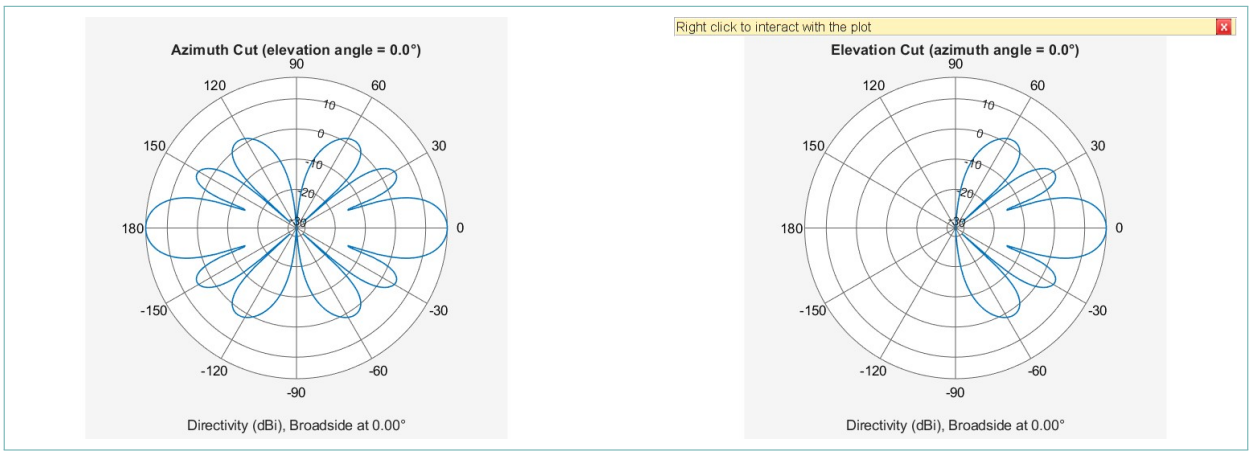
شکل 26: الگوی تشعشعی محاسبه شده با روش دستی برای آرایه مربعی با $d = 0.5\lambda$ و تعداد عناصر کمتر.



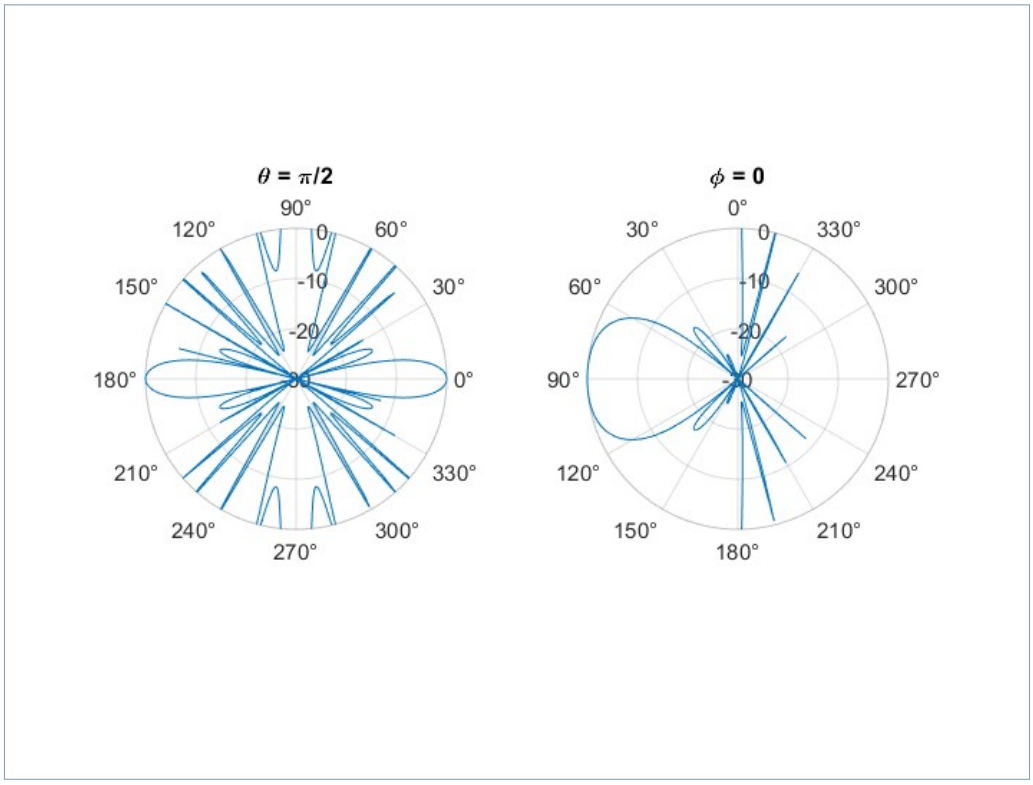
شکل 27: مقایسه همان حالت با تابع آماده متلب: برش ارتفاع و برش سمت برای آرایه مربعی.



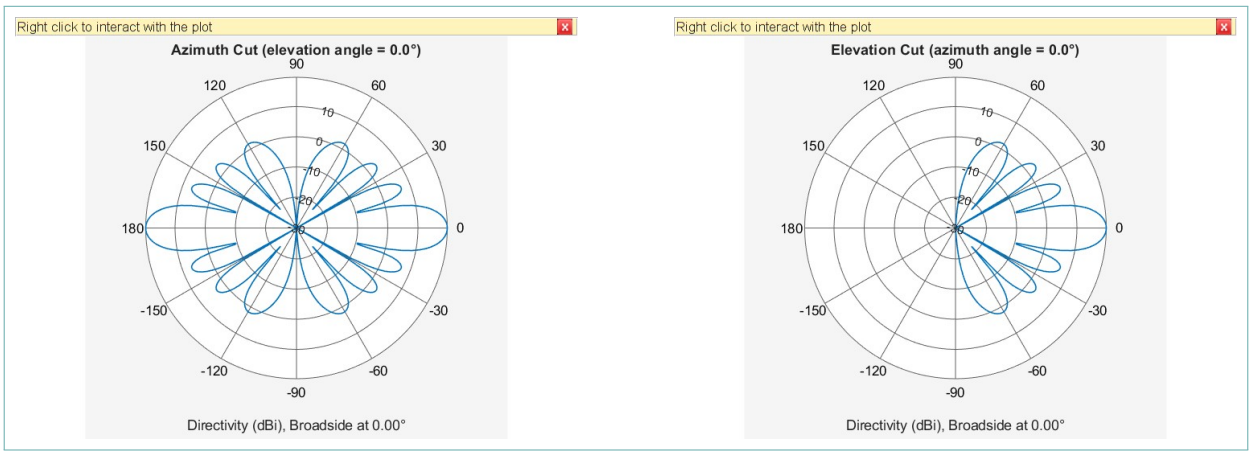
شکل 28: الگوی تشعشعی محاسبه شده با روش دستی برای حالت بعدی افزایش تعداد عناصر، با $d = 0.5\lambda$.



شکل 29: نتایج تابع آماده متلب برای همان حالت: با افزایش تعداد عناصر، لوب اصلی باریک تر می شود.



شکل 30: الگوی تشعشعی دستی برای تعداد عناصر بیشتر. تراکم نول ها و لوب های فرعی افزایش یافته است.

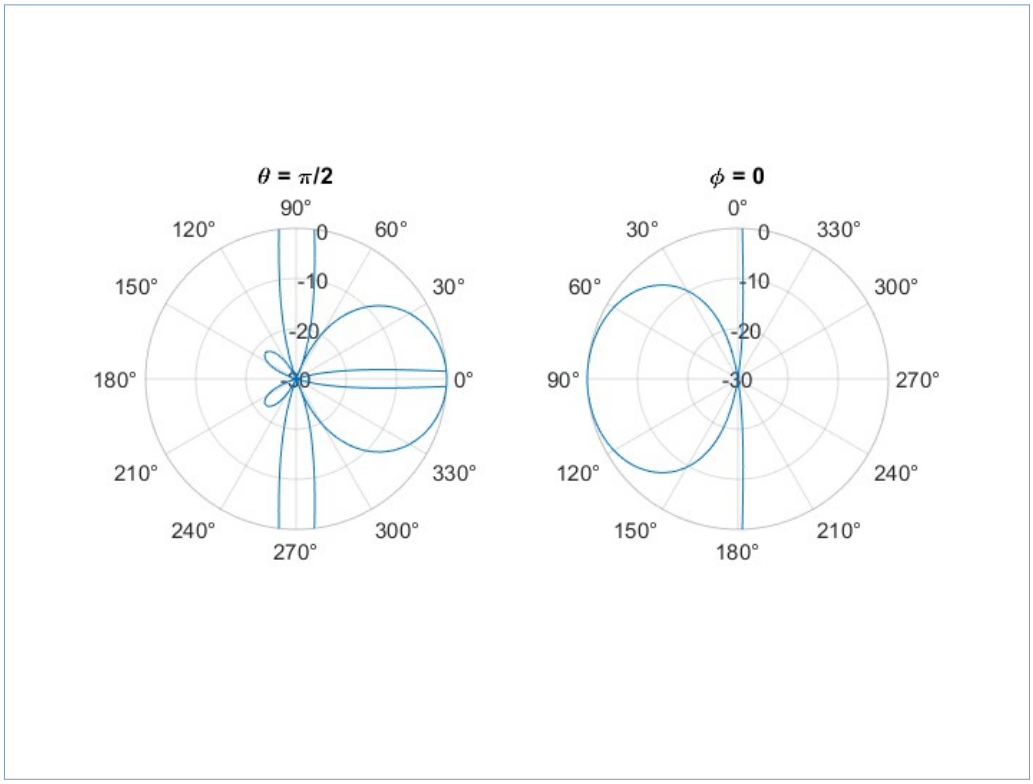


شکل 31: نتایج تابع آماده متلب برای تعداد عناصر بیشتر. باریک شدن لوب اصلی و افزایش جزئیات الگو دیده می شود.

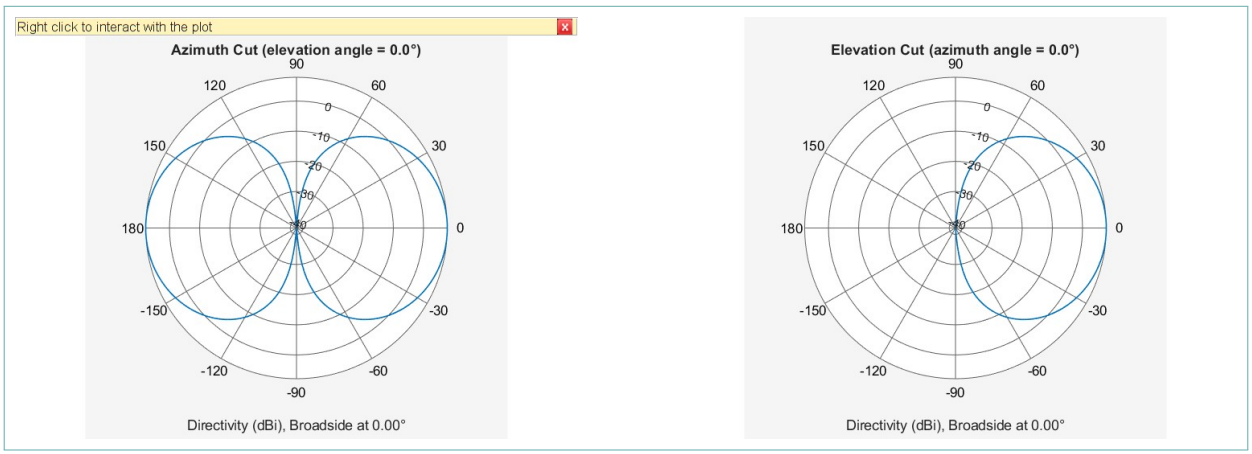
از این نتایج می توان دید که با زیاد شدن تعداد عناصر، لوب اصلی باریک تر می شود و راستاوری افزایش می یابد. علت فیزیکی این است که طول مؤثر دهانه آرایه زیادتر می شود و جمع سازنده میدان ها در جهت اصلی قوی تر از جهت های دیگر رخ می دهد. البته در آرایه واقعی، کوپلینگ متقابل و خطای فاز ممکن است سطح لوب های جانبی را تغییر دهد.

7.4 نتایج الگوی تشعشعی با تغییر فاصله عناصر

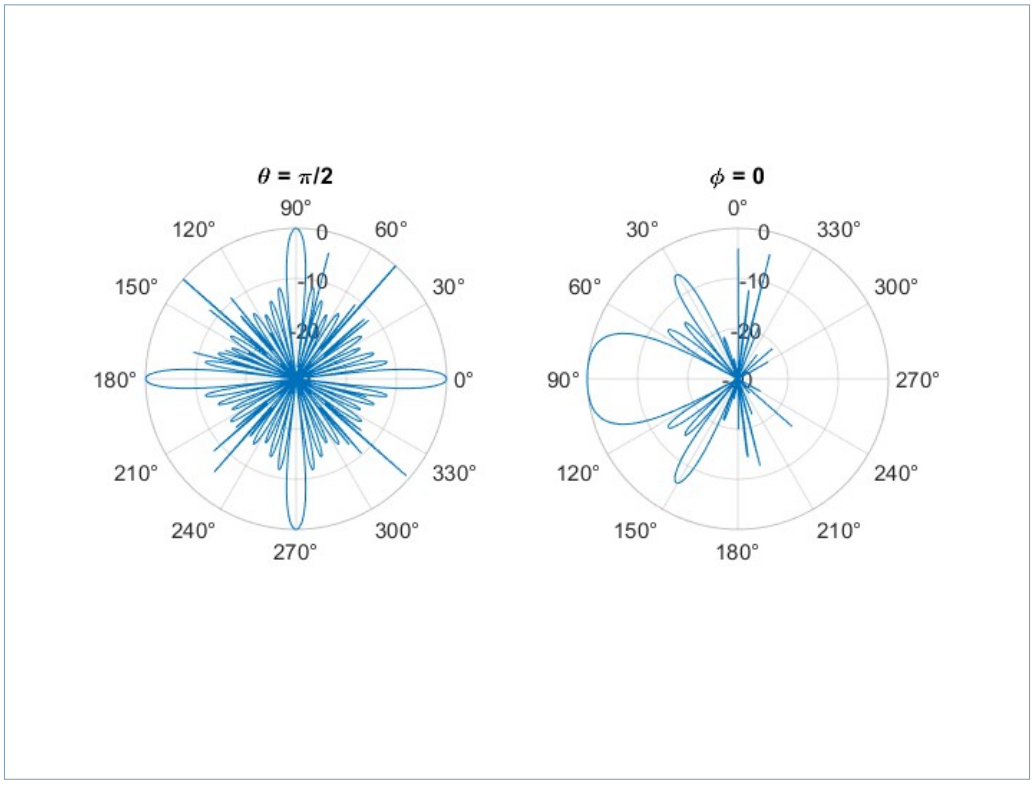
در این قسمت اثر فاصله بین عناصر بررسی شده است. فاصله کوچک باعث الگوی نرم تر و لوب های کمتر می شود، ولی فاصله زیاد باعث ایجاد صفرها و لوب های متعدد می شود.



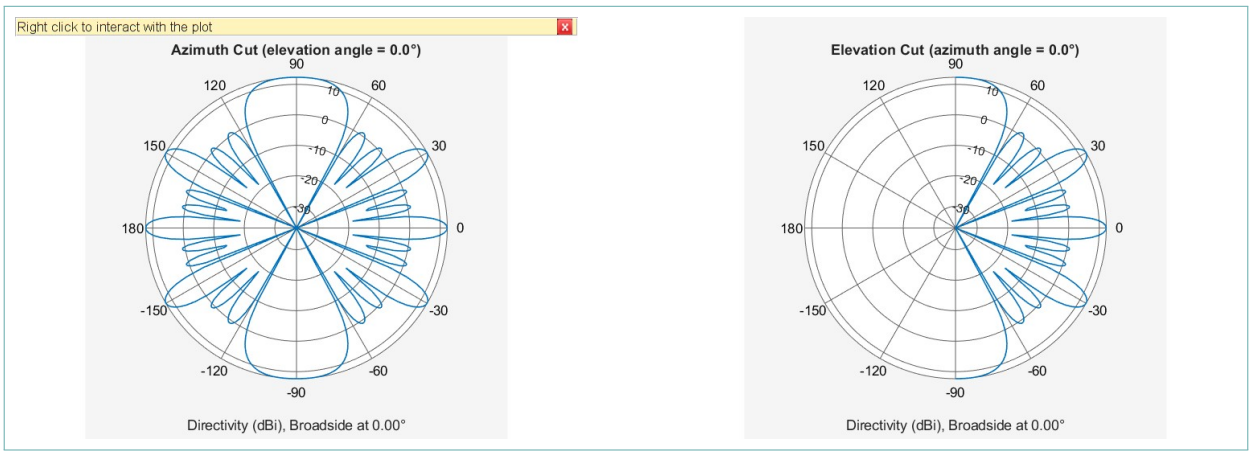
شکل 32: الگوی دستی برای حالت فاصله کوچک، تقریبا $d = 0.25\lambda$، در آرایه مربعی.



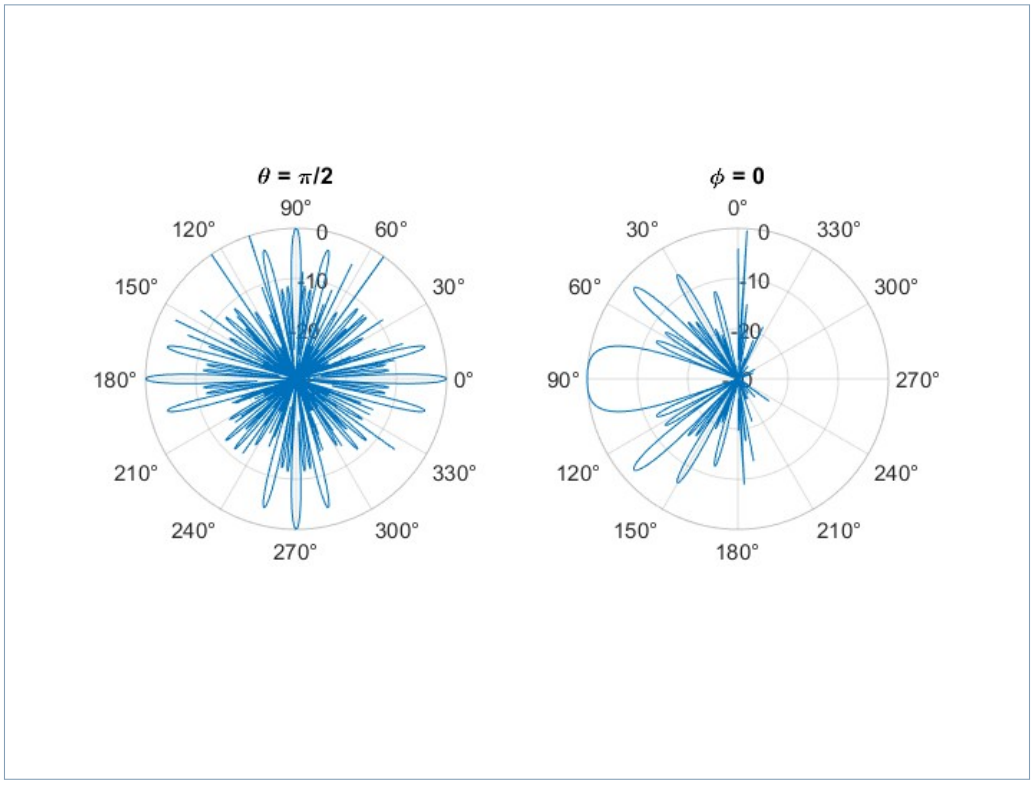
شکل 33: نتایج تابع آماده متلب برای فاصله کوچک. در این حالت الگو نسبت به فاصله های بزرگ لوب های کمتری دارد.



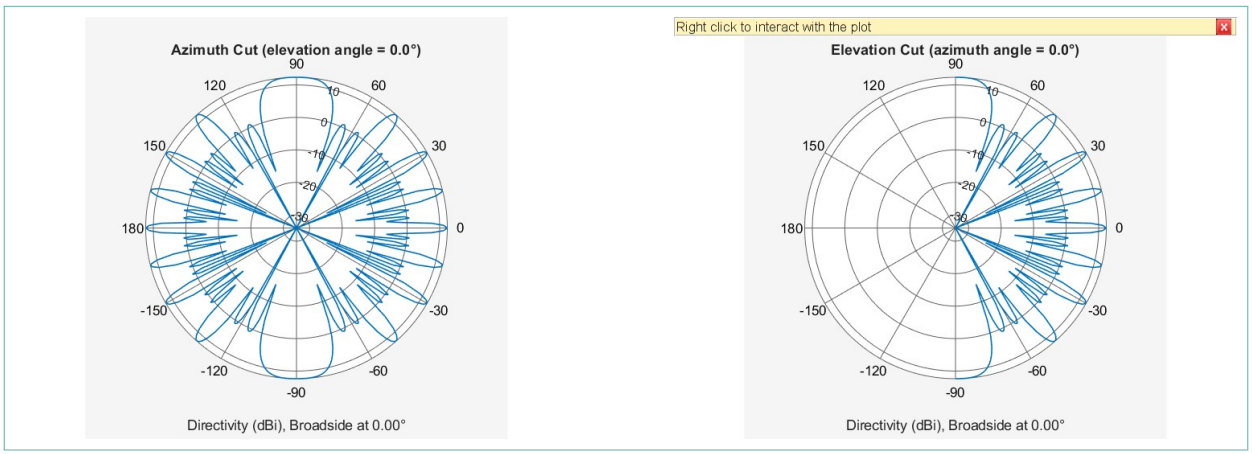
شکل 34: الگوی دستی برای فاصله بزرگ تر، تقریبا $d = 2\lambda$. تعداد نول ها و لوب های فرعی بیشتر شده است.



شکل 35: نتایج تابع آماده متلب برای فاصله بزرگ تر. چندلوبی شدن الگو به وضوح دیده می شود.



شکل 36: الگوی دستی برای فاصله بسیار بزرگ، تقریبا $d = 4\lambda$. در این حالت grating lobes بسیار قوی ظاهر می شوند.

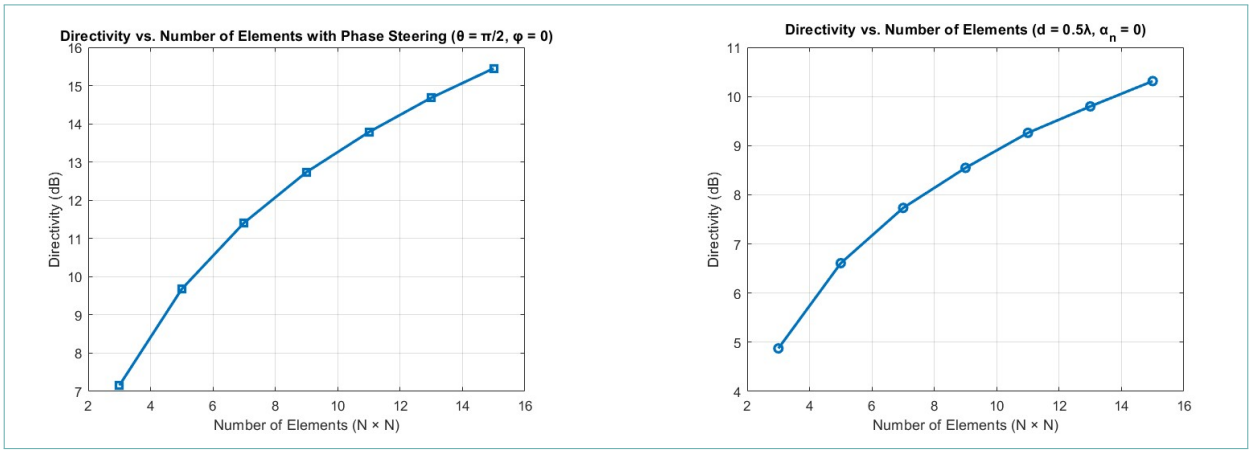


شکل 37: نتایج تابع آماده متلب برای فاصله بسیار بزرگ. الگو دارای لوب های متعدد و جهت های تشعشعی رقیب است.

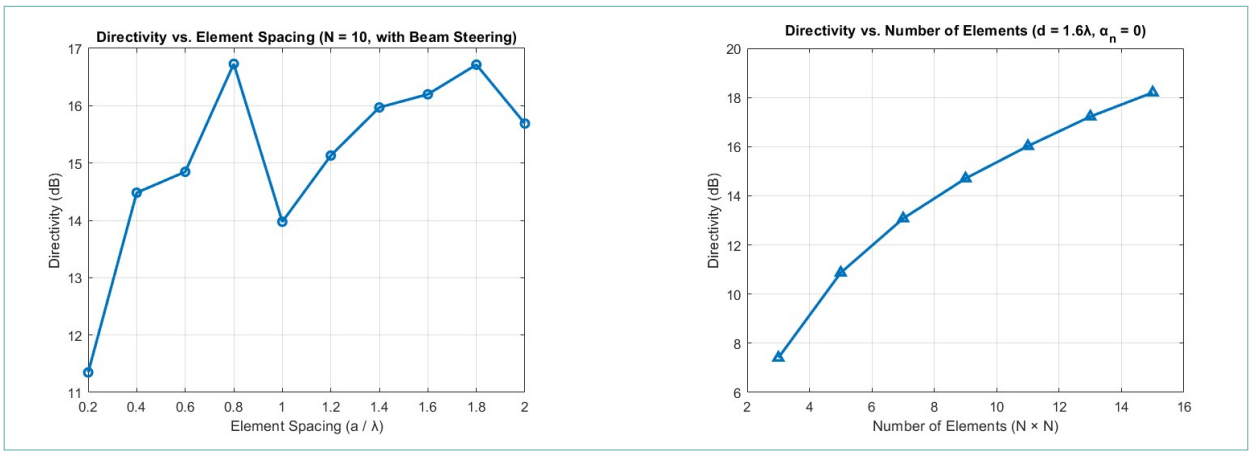
تفسیر این بخش این است که افزایش فاصله، دهانه فیزیکی آرایه را بزرگ تر می کند و در ابتدا می تواند راستاوری را افزایش دهد. اما وقتی فاصله از حدود $\lambda/2$ بیشتر شود، به ویژه در فاصله های چند برابر طول موج، چندین جهت با جمع سازنده به وجود می آید. این جهت های اضافی همان grating lobes هستند و باعث می شوند انرژی فقط در یک پرتو اصلی متمرکز نشود.

8.4 نتایج راستاوری

در گزارش اولیه، راستاوری به ازای چند حالت رسم شده است. شکل های زیر نشان می دهند که با افزایش تعداد عناصر، راستاوری به طور کلی افزایش می یابد. همچنین با تغییر فاز تحریک و فاصله بین عناصر، مقدار راستاوری می تواند تغییر قابل توجهی داشته باشد.



شکل 38: راستاوری بر حسب تعداد عناصر: سمت چپ برای حالت بدون فازدهی خاص و سمت راست برای حالت دارای هدایت پرتو.



شکل 39: راستاوری برای فاصله بزرگ تر و همچنین تغییر راستاوری بر حسب فاصله عناصر.

از نظر تئوری، اگر عناصر ایزوتروپیک و بدون کوپلینگ فرض شوند، افزایش تعداد کل عناصر M^2 باعث افزایش راستاوری تقریبی به اندازه $10\log_{10}(M^2)$ دسی بل می شود. اما در نتایج واقعی یا عددی، این افزایش کاملا خطی و یکنواخت نیست، چون:

- عامل المانی دوقطبی، تابش در بعضی جهت ها را تضعیف می کند؛
- برای فاصله های بزرگ، لوب های تناوبی ایجاد می شوند و توان بین چند جهت تقسیم می شود؛
- در آرایه واقعی، کوپلینگ متقابل بین عناصر باعث تغییر جریان واقعی هر عنصر می شود؛
- نرمال سازی توان در تابع آماده متلب و کد دستی ممکن است دقیقا یکسان نباشد.

9.4 تکمیل بخش دامنه جریان تحریک

در نتایج موجود، تمرکز اصلی روی تعداد عناصر، فاصله و فاز تحریک است. برای کامل شدن خواسته پروژه، اثر دامنه جریان تحریک نیز از نظر تئوری بررسی می شود. اگر همه عناصر جریان یکسان داشته باشند، داریم:

$$a_{mn} = 1.$$

این حالت معمولا بیشترین راستاوری را برای آرایه یکنواخت ایجاد می کند، اما لوب های جانبی آن می توانند قابل توجه باشند. اگر دامنه جریان در عناصر کناری کم شود، مثلا:

$$a_{mn} = w_m w_n,$$

که w_m و w_n وزن های یک پنجره دامنه ای مانند binomial یا Taylor هستند، لوب های جانبی کاهش می یابند. نتیجه کیفی چنین است:

کاهش دامنه عناصر کناری ⇐ کاهش راستاوری بیشینه، افزایش پهنای لوب اصلی، و گاهی کاهش لوب جانبی.

بنابراین اگر هدف بیشینه کردن سمت گرایی باشد، تحریک یکنواخت مناسب است؛ اما اگر هدف کاهش تداخل در جهت های جانبی باشد، تحریک دامنه ای غیر یکنواخت بهتر است.

10.4 جمع بندی بخش آرایه مربعی

نتیجه این بخش این است که آرایه مربعی، نسخه دو بعدی آرایه خطی است و کنترل بیشتری روی الگوی تابشی ایجاد می کند. روابط آرایه فاکتور نشان می دهند که تعداد عناصر، فاصله، دامنه و فاز تحریک همگی مستقیما روی پهنای لوب

اصلی، سطح لوب های جانبی، نول ها و راستاوری اثر می گذارند. نتایج موجود نشان می دهند که افزایش تعداد عناصر باعث باریک شدن لوب اصلی و افزایش راستاوری می شود، در حالی که افزایش بیش از حد فاصله، باعث ایجاد لوب های اضافی و چندجهتی شدن تابش می گردد. مقایسه روش دستی با تابع آماده متلب نیز از نظر کیفی سازگار است، با این تفاوت که تابع آماده در این فایل از المان ایزوتروپیک استفاده کرده و اثر کامل دوقطبی را نشان نمی دهد.

5 نتیجه گیری نهایی

در این گزارش سه موضوع مکمل از پروژه درس آنتن 1 بررسی شد: امپدانس خودی و متقابل دو دایپل نیم موج، آرایه خطی از دایپل های موازی، و آرایه مربعی از دوقطبی های موازی.

در بخش امپدانس، نتیجه کلیدی این بود که امپدانس خودی دایپل نیم موج باید نزدیک مقدار مرجع $73 + j42.5\ \Omega$ باشد و امپدانس متقابل با افزایش فاصله بین آنتن ها کاهش یابد. محاسبه تقریبی با جریان سینوسی، رفتار کیفی درستی برای کاهش کوپلینگ نشان می دهد. روش ممان از نظر تئوری دقیق تر است، اما صحت آن به تعریف درست پورت ها، گسسته سازی و استخراج جریان ترمینال وابسته است.

در بخش آرایه خطی، رابطه آرایه فاکتور نشان داد که فاصله عناصر، تعداد عناصر، دامنه جریان و فاز تحریک مستقیما شکل الگو را تعیین می کنند. حالت Broadside با تحریک هم فاز و حالت End-fire با اختلاف فاز مناسب ایجاد می شود. افزایش تعداد عناصر و فاصله تا حد مناسب باعث افزایش سمت گرایی می شود، اما لوب های فرعی و حساسیت طراحی را نیز افزایش می دهد. نتایج HFSS موجود نیز تشکیل الگوی جهت دار، تطبیق مناسب در حوالی $2.6\ \mathrm{GHz}$ و باریک شدن پرتو نسبت به تک عنصر را نشان می دهند.

در بخش آرایه مربعی، نشان داده شد که همان ایده آرایه فاکتور به صورت دو بعدی گسترش می یابد. برای آرایه $M \times M$، آرایه فاکتور تابع هر دو زاویه θ و ϕ است و امکان کنترل دو بعدی پرتو را فراهم می کند. نتایج موجود نشان می دهند که افزایش تعداد عناصر باعث باریک شدن لوب اصلی و افزایش راستاوری می شود، اما افزایش زیاد فاصله بین عناصر باعث ظاهر شدن لوب های تناوبی و چندجهتی شدن الگو می گردد. همچنین توضیح داده شد که مقایسه با تابع آماده متلب، به دلیل استفاده از المان ایزوتروپیک، بیشتر برای بررسی سازه آرایه معتبر است و نه برای مدل کامل دوقطبی.

بنابراین، گزارش حاضر هم نتایج شبیه سازی و کدنویسی موجود را حفظ کرده و هم بخش های تئوری لازم را برای پاسخ دادن به خواسته های پروژه 1405-1404 تکمیل کرده است.

منابع

1. C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley.
2. جزوه و صورت پروژه درس آنتن 1، نیمسال دوم 1405-1404.
3. خروجی های شبیه سازی و گزارش های اولیه MATLAB/HFSS مربوط به دایپل ها، آرایه خطی و آرایه مربعی.
4. کدهای متلب Manual.m و Matlab_Function.m برای محاسبه آرایه فاکتور و مقایسه با تابع آماده متلب.