

تحلیل و طراحی و شبیه سازی آنتن بوقی هم محور

محمد علی سبحانی
دانشگاه صنعتی مالک اشتر-تهران
cema.sobhany@gmail.com

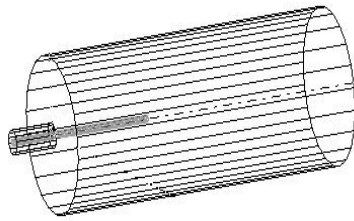
محمد رضا میرعرب
دانشگاه علم و صنعت ایران
mr_mirarab@ee.iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله به تحلیل و طراحی آنتن بوقی هم محور پرداخته می شود. برای این منظور ابتدا به تحلیل میدان یک نوع ساده از این نوع آنتن می پردازیم و با بدست آوردن امپدانس ورودی آن و رعایت چند نکته طراحی، اقدام به طراحی این آنتن کرده و سپس آنتن طراحی شده را توسط نرم افزار HFSS شبیه سازی کرده و از روی پترنهای بدست آمده به بررسی ویژگیها و کاربردهایی که این آنتن می تواند داشته باشد می پردازیم، این نوع آنتن می تواند در ساخت فیدر دیش و Tracking Radar مورد استفاده قرار گیرد.

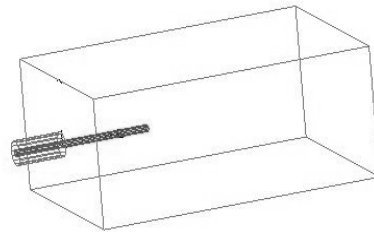
کلمات کلیدی: آنتن بوقی هم محور، عنصر جریان محوری، مبدل هم محور به موجبر

۱- مقدمه: آنتن بوقی هم محور در واقع یک نوع آنتن بوقی است که توسط سیم هم محور تغذیه می شود و نحوه تغذیه آن بدین طریق است که هادی بیرونی سیم هم محور به بدنه آنتن متصل می شود و هادی داخلی به درون آنتن امتداد می یابد و نقش یک عنصر جریان محوری را دارد و باعث تحریک میدان داخل آنتن می شود. این آنتن بوقی می تواند در نوع ساده یک موجبر مستطیلی یا دایروی انتها باز باشد. در شکل (۱) نمونه ای از این نوع آنتنها نشان داده شده است. این نوع از آنتنها نوعی مبدل هم محور به موجبر می باشند که باعث تبدیل مد TEM هم محور به TM_{11} برای موجبر مستطیلی و یا باعث تبدیل مد TEM به TM_{01} برای موجبر دایروی می شود [3].

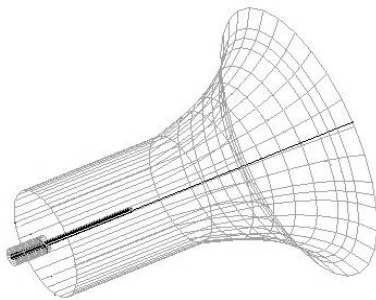
اغلب آنتنهای مرسوم که از سیم هم محور برای تغذیه استفاده می کنند، بگونه ای می باشند که هادی داخلی سیم هم محور نقش یک عنصر جریان عرضی را دارد و معمولاً سبب تحریک مد TE_{10} می شوند. تفاوت عمده ای که آنتن بوقی با این نوع آنتنها دارد این است که پترن آنتن بوقی بر خلاف اغلب آنتنها دارای یک شکاف در راستای محور مرکزی آنتن می باشد. در این مقاله با استفاده از قضیه هم پاسخی لرنتر به ارائه تحلیل میدان داخل یک موجبر بی نهایت انتها باز (یک نوع ساده از این نوع آنتنها) پرداخته می شود و سپس با استفاده از نتایج حاصل از این تحلیل به طراحی این نوع از آنتنها پرداخته و آنتن طراحی شده توسط نرم افزار HFSS شبیه سازی می شود.



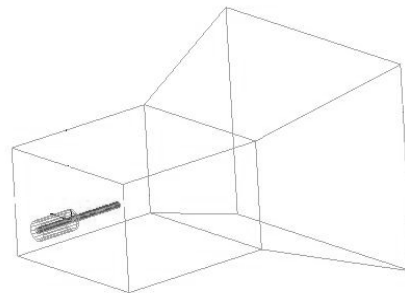
آنتن دایروی ساده مد TM_{01}



آنتن مستطیلی ساده مد TM_{11}



آنتن بوقی مد TM_{01}



آنتن شیبوری هرمی مد TM_{11}

شکل (۱)

۲- تحلیل میدان پیونیده در داخل موجبر مستطیلی و دایروی

همانطور که اشاره شد نحوه تغذیه موجبر توسط سیم هم محور بگونه ای است که هادی داخلی نقش یک عنصر جریان محوری را داشته و باعث تبدیل مد TEM هم محور به مد TM_{11} برای موجبر مستطیلی و تبدیل مد TEM هم محور به مد TM_{01} برای موجبر دایروی شود. در این قسمت به محاسبه میدان پیونیده داخل موجبر مستطیلی پرداخته و با محاسبه توان تشعشعی، امپدانس ورودی ساختار حاصله را بدست می آوریم. فرض می کنیم روی هادی داخلی که به داخل موجبر امتداد یافته یک جریان سینوسی به صورت

$$I = I_0 \sin K_0(L - Z) \quad 0 < Z < L \quad (1)$$

داشته باشیم. از طرفی اگر تصویر میله را نسبت به صفحه اتصال کوتاه ته موجبر که هادی خارجی سیم هم محور به آن متصل است در نظر بگیریم، جریان روی میله یک تابع زوج به صورت

$$I = I_0 \sin K_0(L - |Z|) \quad -L < Z < L \quad (2)$$

خواهد بود [5]. چون این جریان یک تابع زوج است و میله نقش یک عنصر جریان محوری را دارد پس از رابطه (۳) میتوان خصوصیات میدان پیونیده را حساب کرد [1].

$$C_n^+ = -C_n^- = \frac{1}{p_n} \int_{-l}^l \bar{J} \cdot e_{zn} \cos bZ dz \quad (3)$$

با فرض اینکه مد TM_{11} در داخل موجبر مستطیلی مد غالب باشد، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی این مد به صورت زیر خواهد بود:

$$H_z = 0, E_z = \sin\left(\frac{px}{a}\right) \sin\left(\frac{py}{b}\right) e^{-jb_{11}z}, E_x = \frac{-jb_{11}p}{aK_{c11}^2} \cos\left(\frac{px}{a}\right) \sin\left(\frac{py}{b}\right) e^{-jb_{11}z}, E_y = \frac{-jb_{11}p}{bK_{c11}^2} \sin\left(\frac{px}{a}\right) \cos\left(\frac{py}{b}\right) e^{-jb_{11}z}$$

اگر $A = \frac{jb_{11}p}{K_{c11}^2}$ باشد داریم:

$$e_{nz} = \sin\left(\frac{px}{a}\right) \sin\left(\frac{py}{b}\right), e_{nx} = \frac{-A}{a} \cos\left(\frac{px}{a}\right) \sin\left(\frac{py}{b}\right), e_{ny} = \frac{-A}{b} \sin\left(\frac{px}{a}\right) \cos\left(\frac{py}{b}\right)$$

$$E_z^+ = C^+ \sin\left(\frac{px}{a}\right) \sin\left(\frac{py}{b}\right) e^{-jb_{11}z}, E_x^+ = \frac{-C^+A}{a} \cos\left(\frac{px}{a}\right) \sin\left(\frac{py}{b}\right) e^{-jb_{11}z}, E_y^+ = \frac{-C^+A}{b} \sin\left(\frac{px}{a}\right) \cos\left(\frac{py}{b}\right) e^{-jb_{11}z}$$

$$H_x = -Y_{TM_{11}} E_y, H_y = Y_{TM_{11}} E_x$$

$$K_{c11} = \sqrt{\left(\frac{p}{a}\right)^2 + \left(\frac{p}{b}\right)^2}, b_{11} = \sqrt{K_0^2 - K_{c11}^2}, K_0 = w\sqrt{m_0 e_0}$$

حال با توجه به اطلاعات بالا ثابت بهنجار سازی P_n را محاسبه می کنیم.

$$P_n = 2 \int_{S_0} e_n \times h_n \cdot a_z ds = \frac{1}{2} Y_{TM_{11}} \frac{A^2}{ab} (a^2 + b^2) \quad (۴)$$

و C^+ می شود:

$$C^+ = \frac{1}{p_n} \int_{-l}^l J \cdot e_{zn} \cos b_{11} Z dz, J = I_0 \sin K_0 (L - |Z|), -L < Z < L, x = \frac{a}{2}, y = \frac{b}{2}$$

$$C^+ = \frac{2I_0}{p_n} \int_0^L \sin K_0 (L - Z) \cos b_{11} Z dz = \frac{2I_0}{p_n} \frac{K_0}{K_0^2 - b_{11}^2} (\cos b_{11} L - \cos K_0 L)$$

$$P = \frac{1}{2} \text{Re} \int E \times H^* ds = \frac{1}{2} \text{Re} \int Y_{TM_{11}} |E_t|^2 ds, |E_t|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 \Rightarrow P = \frac{Y_{TM_{11}}}{8} C^{+2} \frac{A^2 (a^2 + b^2)}{ab}$$

با جاگذاری مقدار C^+ در رابطه بالا داریم :

$$P = \frac{2I_0^2 K_0^2 ab Z_{TM_{11}} (\cos b_{11} L - \cos K_0 L)^2}{A^2 (a^2 + b^2) (K_0^2 - b_{11}^2)^2} \quad (۵)$$

در پایه آنتن میله ای ($Z=0$)، جریان خط هم محور به صورت $I = I_0 \sin K_0 L$ می باشد.
فرض کنید امپدانس ورودی در پایه که از خط هم محور دیده می شود بصورت $Z_{in} = R_0 + jX_0$ باشد آنگاه از قضیه بردار پوئین تینگ داریم:

$$Z_{in} = R_0 + jX_0 = \frac{P + j2w(W_m - W_e)}{\frac{1}{2} II^*}$$

P توان تشعشع شده به داخل موجبر و $(W_m - W_e)$ انرژی راکتیو ذخیره شده در اطراف میله ناشی از تحریک مودهای میرا است. از آنجائیکه P محاسبه شده است، مقاومت ورودی را می توان بدست آورد.

$$R_{in} = \frac{2P}{II^*} = \frac{2P}{I_0^2 \sin^2 K_0 L} = \frac{4Z_{TM_{11}} K_0^2 ab K_{c11}^4 (\cos b_{11} L - \cos K_0 L)^2}{b_{11}^2 (K_0^2 - b_{11}^2)^2 (a^2 + b^2) \sin^2 K_0 L} \quad (۶)$$

و به طور مشابه اگر محاسبات را برای مد TM_{01} موجبر دایروی انجام دهیم ، امپدانس ورودی ساختار حاصله به صورت رابطه ۷ می شود [6].

$$R_{in} = \frac{2P}{I_0^*} = \frac{2P}{I_0^2 \sin^2 K_0 L} = \frac{Z_{TM01}}{P} \frac{P_{01}^2 K_0^2 (\cos b_{01} L - \cos K_0 L)^2}{a^4 b_{01}^2 J_1^2(K_{C01} a) (K_0^2 - b_{01}^2)^2 \sin^2 K_0 L} \quad (7)$$

۳- نکات طراحی

در این قسمت به طراحی و تحلیل یک آنتن دایروی ساده مد TM_{01} پرداخته می شود. برای اینکه بتوان این آنتن ساده را طراحی کرد لازم است نکات زیر رعایت شود [6]:

الف) تطبیق در ورودی آنتن

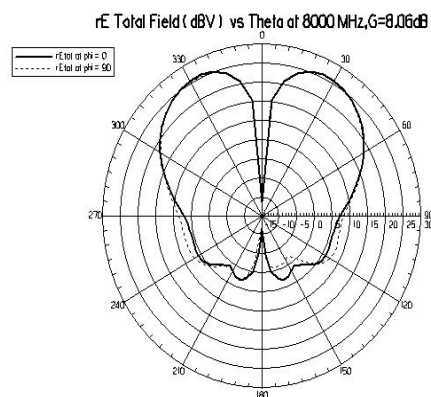
ب) تطبیق در خروجی آنتن

ج) طراحی برای مد غالب TM_{01}

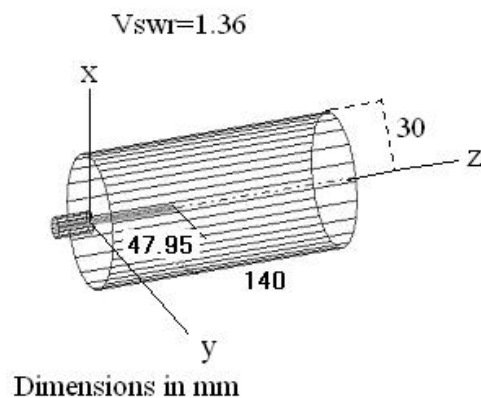
برای قسمت الف) کافی است از نتیجه قسمت ۲ استفاده کنیم و طول میله داخلی که وارد موجبر می شود را بگونه ای انتخاب کنیم که امپدانس ورودی ساختار حاصل (رابطه ۷) با امپدانس سیم هم محور که 50 یا 75 اهم است برابر باشد. اما برای قسمت ب) باید ابعاد موجبر و فرکانس کار آنتن بگونه ای انتخاب شود که Z_{TM01} تا حد امکان به امپدانس محیط یعنی $h = 120p$ نزدیک باشد و برای قسمت ج) بایستی فرکانس کار و ابعاد موجبر طوری طراحی شود که علاوه بر مد نظر داشتن قسمت ب) تا حد ممکن فقط مد TM_{01} امکان انتشار یابد. برای موجبر دایروی با شعاع $a=3cm$ فرکانس قطع TM_{01} برابر 3.82GHz می باشد و چون فرکانس قطع مدهای بالاتر قابل انتشار در این ساختار (برای نمونه $f_{CTM02} = 8.785GHz$) بالاتر از 8GHz می باشد می توان این فرکانس را فرکانس کار قرار داد. با این کار هم Z_{TM01} به h نزدیکتر و هم مد غالب مد TM_{01} باقی می ماند. اگر نمودار امپدانس ورودی بر حسب طول (رابطه ۷) در فرکانس 8GHz برای موجبر دایروی با شعاع $a=3cm$ رسم شود ، طول مناسب ۴۸ میلی متر بدست می آید. و برای موجبر انتها باز به طول ۱۴ سانتیمتر طول مناسب در حدود ۴۸ میلی متر می باشد و با تست کردن چندین اندازه در حدود این طول ، می توان طول مناسب را بدست آورد که برای موجبر مورد نظر طول مناسب برابر 47.95mm به دست می آید.

۴- نتایج حاصل از شبیه سازی با HFSS

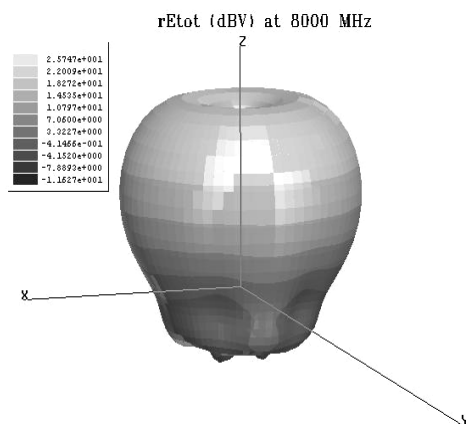
شکل (۲) را که ابعاد آن در قسمت ۳ بدست آمد، توسط نرم افزار HFSS شبیه سازی می کنیم . نتایج حاصل از شبیه سازی بدین قرار است که ، گین این آنتن حدود 8.06dB و $VSWR=1.36$ می باشد و شکلهای (۳) و (۴) و (۵) پترنهای این آنتن را نشان می دهد. همانگونه که در شکل (۳) به وضوح مشخص است ، پترن این آنتن دارای یک شکاف در راستای محور مرکزی اش می باشد که این یک ویژگی منحصر به فرد برای این آنتن می باشد.



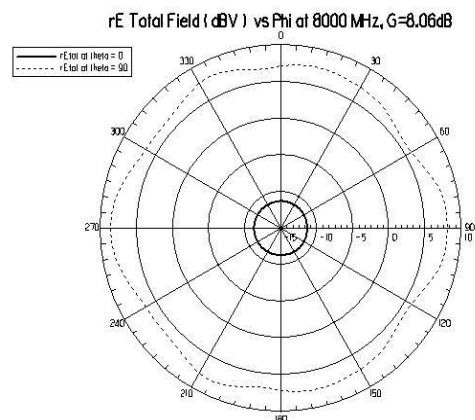
شکل (۳) پترن تشعشعی برحسب q به ازای $j = 0$ و $j = 90$ درجه



شکل (۲) ساختار آنتن دایروی ساده مد TM_{01}

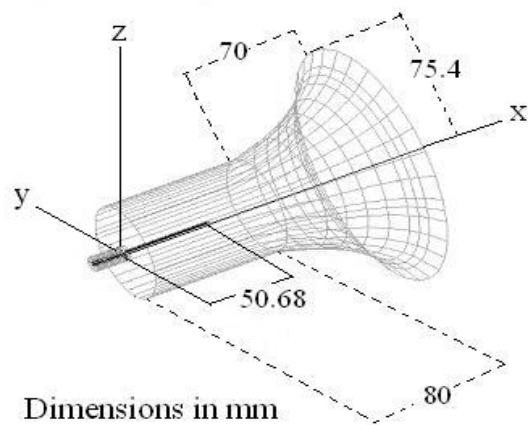


شکل (۵) پترن تشعشعی سه بعدی آنتن دایروی ساده مد TM_{01}



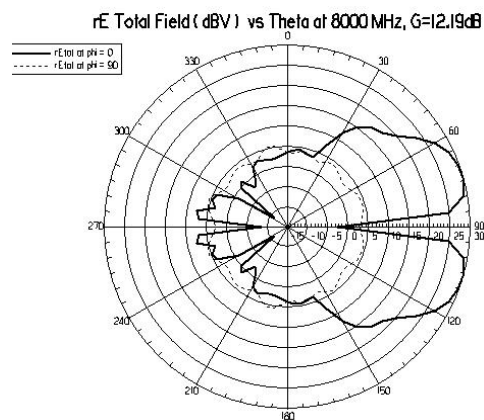
شکل (۴) پترن تشعشعی برحسب j به ازای $q = 0$ و $q = 90$ درجه

حال آنتن شکل (۲) را بصورت یک آنتن بوقی در می آوریم یعنی در واقع دهانه آن را بازتر می کنیم تا امکان تطبیق بهتر با محیط فراهم شود، زیرا هر چه ابعاد دهانه بزرگتر، $Z_{TM_{01}}$ به h نزدیک تر می شود. آنتن بوقی حاصل به شکل (۶) در می آید و آنرا در فرکانس 8GHz شبیه سازی می کنیم که طول میله داخلی حدود همان طول بدست آمده برای آنتن دایروی ساده یعنی ۴۸ میلی متر می باشد که با تست چند اندازه حول این طول به ازای 50.68 میلی متر، کمترین بدست می آید. $VSWR=1.26$

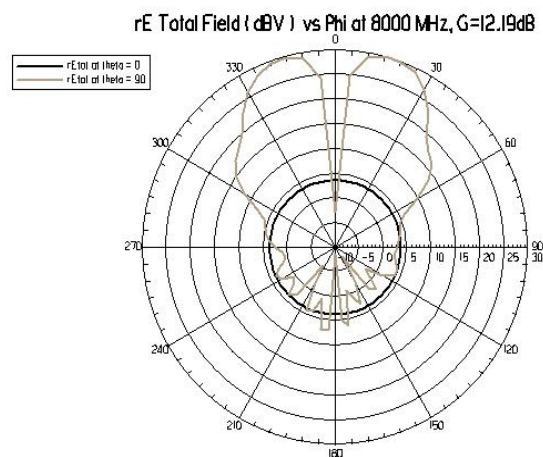
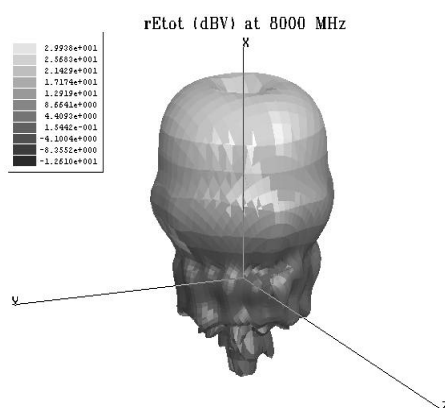


شکل ۶) آنتن بوقی هم محور مد TM_{01}

پس از شبیه سازی این آنتن ، نتایج بدین قرارند که گین این آنتن حدود 12.19dB و $VSWR=1.26$ می باشد و شکلهای (۷) و (۸) و (۹) پترنهای این آنتن می باشند . و همانطور که در این شکلها دیده می شود پترن این آنتن هم مثل آنتن قبلی دارای شکاف در راستای محور مرکزی اش می باشد . و این ویژگی بارز این نوع از آنتنها می باشد.



شکل ۷) پترن تشعشعی بر حسب q به ازای $j = 0$ و $j = 90$ درجه



شکل ۹) پترن تشعشعی سه بعدی آنتن بوقی مد TM_{01}

شکل ۸) پترن تشعشعی برحسب j به ازای $q = 0$ و $q = 90$ درجه

اگر این آنتن یک موجبر مستطیلی انتها باز باشد، می توان با استفاده از رابطه (۶) طول مناسب را بگونه ای انتخاب کرد که امپدانس ورودی ساختار حاصل با امپدانس سیم هم محور برابر شود. و سپس می توان دهانه این آنتن مستطیلی ساده مد TM_{11} را بازتر کرد (آنتن شیپوری هرمی مد TM_{11}) تا تطبیق بهتر شود، پترنهای این نوع آنتن هم دقیقاً مشابه همان آنتن بوقی مد TM_{01} می باشد و دارای یک شکاف در راستای محور مرکزی آنتن می باشد [6].

۵- نتیجه گیری

پس از بررسی و مطالعه خصوصیات و پترنهای آنتنهای شبیه سازی شده به این نتیجه می رسیم که این نوع آنتنها دارای تطبیق خوبی هستند ($VSWR < 2$)، گین این نوع آنتنها بر خلاف آنتنهای مشابه ای که توسط موجبر تغذیه می شوند خیلی زیاد نیست، براحتی توسط سیم هم محور تغذیه می شوند، نیاز به بالن برای انجام عمل تطبیق و بالانس ندارند، پترن این آنتن برخلاف آنتنهای دیگر دارای یک شکاف (به پهنای بیم 11.82 درجه) در راستای محور مرکزی آنتن می باشد و این خصوصیت باعث ایجاد کاربردهای جالبی برای این نوع از آنتنها می شود که دو نوع از این کاربردها بررسی می شود.

۵-۱ استفاده از این نوع آنتن به عنوان تغذیه دیش

چون آنتن بوقی که به عنوان تغذیه دیش به کار می رود در راستای محور مرکزی و در کانون دیش قرار می گیرد پس خود مانعی برای سیگنالهایی است که روی این خط بازتابش می شوند و اگر آنتن بوقی در این راستا داری گین زیادی باشد، فایده ای نخواهد داشت و چون آنتن ما دارای پترنی است که یک شکاف در راستای محور مرکزی اش می باشد، پس در این راستا کمترین گین را دارد و در عوض چند درجه که از این راستا دور شویم یکباره آنتن دارای بیشترین گین می شود و در نتیجه آنتن خود مانع سیگنالهایی که با بیشترین تقویت فرستاده می شوند، نخواهد شد (بر خلاف آنتنهای بوقی معمولی که دارای بیشترین گین در راستای محور مرکزی می باشند). در نتیجه این یک کاربرد قابل توجه برای این آنتن می باشد.

۵-۲ استفاده از این آنتن در ساخت Tracking Radar

وجود شکاف در پترن این نوع از آنتنها باعث می شود که بتوان از آن برای ساخت Tracking Radar استفاده کرد. روش کار بدین طریق است که اگر یک هدف در محدوده برد رادار باشد تا موقعی که در راستای حفره موجود در پترن قرار نگرفته باشد، سیگنالهای بازتابش از آن قابل در یافت توسط رادار می باشد. با برنامه ریزی دقیق رادار، می توان به آن فرمان داد که برای اینکه سیگنال بازتابش را در یافت نکند جهت آنتن را بگونه ای تغییر دهد تا هدف در موقعیتی قرار گیرد که گین آنتن خیلی کم است (در راستای حفره). در این صورت رادار می تواند روی هدف قفل کند.

۶- منابع و مراجع

[1].Robert E.collin, " foundations for microwave engineering ",1966

[2] میکروویو ۱، تالیف دکتر عریضی- تهران دانشگاه علم و صنعت

[3] مدارهای غیر فعال میکروویو / تالیف پیتر آ. ریزی، مترجمین دکتر فرخ حجت کاشانی و کامران خراسانی-

تهران دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۶

[4].Warren L.stutzman, GaryA.Thiele, "Antenna theory and Design", Second Edition

[5]. J.D.Kraus, " Antennas". Second Edition, 1988

[6]محمد رضا میرعرب، "طراحی و تحلیل آنتن بوقی هم محور"، پایان نامه دوره کارشناسی دانشکده برق دانشگاه علم

و صنعت ایران