

اثرات امواج سطحی بر روی تشعشع آنتن‌های میکرواستریپ

دکتر روزه معینی مازندرانی

استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در حوزه فرکانسی، یک روش برای تجزیه و تحلیل آنتنهای میکرواستریپ با استفاده از تئوری محیط‌های لایه لایه معرفی و مورد بحث قرار گرفته شده است. با استفاده از روش فوق می‌توان اثرات امواج سطحی بر روی توان تشعشع شده به وسیله آنتنهای میکرواستریپ را کاملاً مشخص نمود. اهمیت امواج سطحی و در نتیجه گارآبی آنها بر حسب پارامترهای ورقه عایق (ثابت دی‌الکتریک، ضخامت) و فرکانس بررسی شده است.

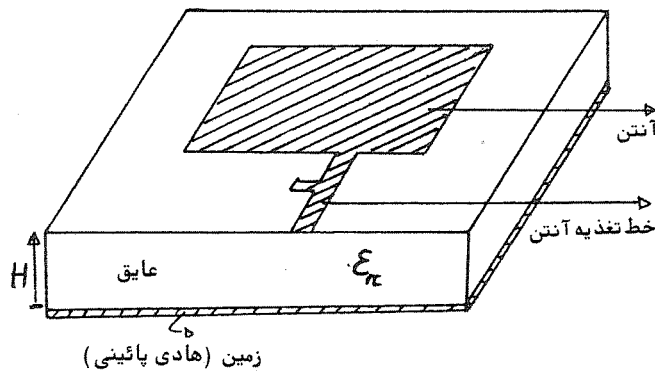
Surface Waves Effect on the Power Radiated by the Microstrip Antennas

R. Moini - Mazandarani, Ph.D.

Elect Eng. Dept. Amirkabir Univ. of Tech.

ABSTRACT:

A spectral domain approach of microstrip antennas, based on the theory of stratified mediums, is used to determine the influence of surface waves on power radiated by the structure. Their importance in function of substrate parameters and frequency is presented in different cases.



شکل ۱- ساختمان میکرواستریپ

تشعشع کند، یک قسمت از تشعشع به وسیله هادی پائینی (یا زمین) منعکس می‌شود و انعکاس آن به وسیله هادی بالایی (آنتن) دوباره منعکس می‌شود (الی آخر).

مقدمه:

تکنولوژی مدارات چاپی که نخست باعث یک دگرگونی در قلمرو الکترونیک شده اکنون جای خود را در حوزه ریز موج (باند GHz) نیز باز کرده است. از این تکنولوژی برای ساخت خطوط انتقال، مدارها و چندی پیش‌آنتنها استفاده می‌شود. یک مدار چاپی از یک ورقه عایق تشکیل شده، که بر روی آن نیز قطعات فلزی باریک چاپ شده است. در فرکانسهای خیلی بالا (ریزموج) متداول است که یک طرف ورقه عایق را کاملاً به وسیله یک لایه فلزی بیوشاند (زمین یا پتانسیل صفر) در حالی که بر روی طرف دیگر عایق، به صورت پراکنده، ورقه‌های فلزی قرار می‌دهند (هادی بالایی یا آنتن). چنین ساختمانی را ریز نوار یا میکرواستریپ گویند (شکل ۱).

برای محافظت آنتن و خط انتقال در مقابل خطرات طبیعی مانند زنگ‌خوردگی، برف، باران و غیره می‌توان یک ورقه عایق دیگر (مثلاً) یک نوع رنگ) بر روی ساختمان قبلی کار گذاشت. برای فهمیدن چگونگی کار یک آنتن میکرواستریپ باید به شکل ۲ مراجعه کرد. اگر در نقطه a در هادی بالایی یک جریان نقطه‌ای فرض کنیم که در تمام جهات

یک آنتن میکرواستریپ را با در نظر گرفتن امواج سطحی به دست آورد. بخش اول این گزارش شامل شرح اجمالی این روش جدید آنالیز آنتن میکرواستریپ می باشد. در قسمتهای دوم و سوم اثرات امواج سطحی به ترتیب در میدان نزدیک و دور برای چندین آنتن بررسی می شود.

بخش اول

شرح اجمالی آنالیز آنتنهای میکرواستریپ با استفاده از تابع گرین در محیطهای لایه لایه

میدان نزدیک :

بنا به تعریف تابع دیادیک گرین \vec{G} مشخص کننده یک رابطه بین یک عنصر جریان سطحی و میدان الکتریکی حاصل از این جریان می باشد و اگر \vec{J}_s توزیع کل جریان بر روی سطح یک آنتن باشد، با استفاده از رابطه جمع پذیری می توان میدان کل حاصل از جریان را به صورت زیر به دست آورد :

$$\vec{E}^T = \int_{\text{سطح آنتن}} \vec{G} \cdot \vec{J}_s ds \quad (1)$$

و اگر \vec{E}^e میدان نمایانگر منبع تحریک آنتن باشد، در آن صورت مؤلفه مماسی میدان الکتریکی کل بر روی سطح آنتن که یک هادی آرمانی فرض شده، مساوی صفر می باشد :

$$[\vec{E}^T + \vec{E}^e]_{\text{سطح آنتن}} = \vec{0} \quad (2)$$

چون منبع تحریک \vec{J}_s یعنی میدان \vec{E}^e شناخته شده فرض شده، مجهول معادله اخیر توزیع جریان بر روی سطح آنتن می باشد (\vec{J}_s). بنا به تعریف معادله بالا را معادله انتگرال توزیع جریان گویند. مشکل اساسی برای حل این معادله، محاسبه تابع دیادیک گرین (\vec{G}) می باشد. چگونگی محاسبه تابع \vec{G} از حوزه این بحث خارج است ولی با استفاده از منابع مختلف می توان نشان داد که مقدار تابع \vec{G} به صورت زیر می باشد [1,2,3,4]:

$$\vec{G} = \begin{bmatrix} \int_0^\infty \frac{f_1(\lambda) d\lambda}{D_e(\lambda)} & \int_0^\infty \frac{f_3(\lambda) d\lambda}{D_e(\lambda) D_m(\lambda)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \int_0^\infty \frac{f_2(\lambda) d\lambda}{D_e(\lambda) D_m(\lambda)} & \int_0^\infty \frac{f_4(\lambda) d\lambda}{D_e(\lambda) D_m(\lambda)} & 0 \end{bmatrix} \quad \vec{G} = (\vec{G}_0 + \Delta\Delta) \vec{G}^T \quad (3)$$

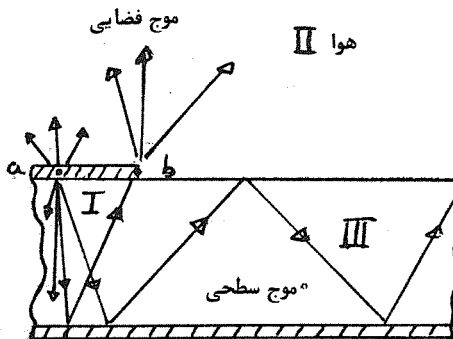
$$D_e(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 - k_0^2} + \sqrt{\lambda^2 - \epsilon_r k_0^2} \coth(H \sqrt{\lambda^2 - \epsilon_r k_0^2}) \quad (4)$$

$$D_m(\lambda) = \epsilon_r \sqrt{\lambda^2 - k_0^2} + \sqrt{\lambda^2 - \epsilon_r k_0^2} U_n(H \sqrt{\lambda^2 - \epsilon_r k_0^2}) \quad (5)$$

که در آن $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{c}{f}$ عدد موج در فضای آزاد می باشد.

اعضای تابع \vec{G} را پتانسیلهای هرتر از نوع انتگرال سامرفلد می نامند.

معادلات $D_m(\lambda) = 0$ و $D_e(\lambda) = 0$ به ترتیب معادلات توصیفی برای امواج سطحی از نوع TE و TM می باشند [5]. به سهولت می توان نشان داد که معادله $D_m(\lambda) = 0$ همیشه دارای یک صفر می باشد [6]. و در نتیجه



شکل ۲- مسیر پرتوها در یک آنتن میکرواستریپ

بعضی از پرتوها حاصل از انعکاسهای مکرر به لبه های آنتن رسیده (نقطه b) و به وسیله آنها در فضا پخش می شوند.

شکل ۲ را می توان به ۳ ناحیه مختلف تقسیم کرد :

ناحیه I: در فضای عایق بین دو هادی، پرتوها از همجا بیشتر متمرکز شده اند و میدان الکترومغناطیسی در این ناحیه انباشته شده است. از این خاصیت برای انتقال امواج در طول یک خط میکرواستریپ استفاده می شود.

ناحیه II: در فضای بالای عایق، موج به طور آزاد در هوا پراکنده می شود و باعث تشعشع آنتن می شود. چون جریان سطحی آنتن بر روی قسمت داخلی هادی بالایی (طرف عایق) در حال حرکت می باشد، به نظر می آید که تشعشع آنتن تنها از طرف کناره ها می باشد. بعضی این خاصیت را مورد استفاده قرار داده و با یک تئوری آسان تشعشع آنتن را تشعشع یک سری شکاف که در روی پیرامون آنتن قرار دارد، فرض می کنند.

ناحیه III: بعضی از اشعه ها بعد از چندین انعکاس در داخل عایق به تله افتاده و به انتشار خود در عایق ادامه می دهند. یک موج سطحی در نتیجه به وسیله عایق هدایت می شود و به تشعشع آنتن کمک نمی کند. در رشته آنتنهای میکرواستریپ، موج سطحی باعث کوپلاژ اضافی بین اعضای شبکه می شود و در نتیجه پیش بینی کار شبکه را یا اشکال مواجه می سازد. دیاگرام تشعشعی آنتن نیز می تواند به شدت تحت تاثیر این امواج قرار گیرد (خصوصاً گلبه های فرعی) با این وجود از این امواج می توان برای تغذیه اعضای یک رشته آنتن استفاده نمود.

از آنجایی که ساختمان آنتن میکرواستریپ غیر یکساخت می باشد (چند لایه مختلف) تجزیه تحلیل الکترومغناطیسی آن بسیار مشکل می باشد، از این رو پژوهشگران نخست به مدل های ساده تجزیه و تحلیل نظیر مدل کاویته (cavity) و یا رشته دهانه های باریک روی آوردند. ولی چون چنین مدلهایی تجزیه و تحلیل درستی از وجود امواج سطحی نمی کند، امیدانس ورودی و یا دیاگرام به دست آمده از این روشهای تقریبی در بعضی موارد دارای تفاوت بسیار با مقدار اندازه گیری شده در آزمایش می باشد.

تنها تئوری که امواج سطحی را نیز به صورت دقیق به همراه آنتن مورد بررسی قرار می دهد، تئوری محیطهای لایه لایه می باشد. برای این کار کافی است انتگرالهای تشعشع را بر حسب تابع گرین حاصل از تئوری محیطهای لایه لایه نوشت. بدین ترتیب با استفاده از تکنیکهای ریاضی جدید و با استفاده از کامپیوترهای با قدرت می توان مختصات

یک موج سطحی از نوع TM همیشه در داخل عایق تحریک می‌شود که این موج همان مود اصلی TM_0 با فرکانس قطع صفر است. از معادلات ۴ و ۵ می‌توان فرکانس قطع موجهای سطحی TE و TM که در داخل عایق می‌توانند تحریک شوند را به دست آورد:

$$f_{c_n} = \frac{nc}{4H\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (6)$$

سرعت نور در خلا: C

مودهای TM_n $n = 0, 2, 4, \dots$

مودهای TE_n $n = 1, 3, 5, \dots$

به طور مثال برای یک عایق به ارتفاع $H = 1\text{mm}$ و ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = 3$ فرکانس قطع اولین مود بالایی یعنی TE_1 برابر است با 52GHz تنها موج سطحی TM_0 تحریک می‌شود، و بعد از این فرکانس دو موج سطحی TE_1 و TM_0 تحریک می‌شوند. در آخر با استفاده از روش مومانت (method of moments) می‌توان معادله ۲ را به صورت ماتریس زیر درآورد:

$$[Z] \cdot [I] = [V] \quad (7)$$

که در آن ماتریس $[V]$ نمایانگر میدان محرک آنتن (یا منبع تغذیه) و ماتریس خطی $[Z]$ نمایانگر جریان بر روی آنتن می‌باشد (مجهول مساله) و اعضای ماتریس $[Z]$ وابسته به اعضای \vec{G} می‌باشند. پس کافی است ماتریس $[Z]$ را برعکس کرد تا توزیع جریان بر روی آنتن به دست بیاید:

$$[I] = [Z]^{-1} \cdot [V] \quad (8)$$

واضح است که با شناختن توزیع جریان بر روی آنتن به سهولت می‌توان امپدانس ورودی آنتن، امپدانس کوپلاژ (در صورت وجود چند آنتن) و نمودار تشعشی آن را به دست آورد.

میدان دور:

روش شرح داده شده در قسمتهای قبل را می‌توان مستقیماً برای محاسبه مقدار میدان دور استفاده کرد ولی واضح است که استفاده از روشهای تقریبی در میدان دور باعث سهولت بیش از اندازه برای

تخمین نمودار تشعشی آنتن می‌شود. روش تقریبی مورد نظر روش بزرگترین سرازیبی (Steepest descent path: SDP) نام دارد (۷) که برای محاسبه پتانسیلهای هرتز حاصل از یک عنصر جریان به کار می‌رود. به کمک این تقریبات میدان دور می‌توان نشان داد (۱) که میدان حاصل موجود، از یک موج فضایی کره‌ای و یک یا چند موج سطحی استوانه‌ای تشکیل می‌شود و تعداد این امواج سطحی به تعداد صفرهای معادلات ۴ و ۵ بستگی دارد. نتیجه حاصل از روش SDP را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

* موج فضایی کره‌ای:

در یک دستگاه مختصات کره‌ای، میدان تشعش شده به وسیله یک عنصر جریان $I \cdot dl$ که بر روی سطح یک عایق به ارتفاع H و ثابت دی‌الکتریک ϵ_r چاپ شده (شکل ۳) از روابط زیر به دست می‌آید:

$$E_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (9) \quad \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \quad (10)$$

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx (I \cdot dl) \exp(jk_0 H \cos \theta) \cos \phi \cdot \psi_1(\theta) \quad (10)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx (I \cdot dl) \exp(jk_0 H \cos \theta) \sin \phi \cdot \psi_2(\theta) \quad (11)$$

عبارات اخیر نمایانگر یک موج کره‌ای می‌باشد که نسبت معکوسی با فاصله r دارد. توان کل تشعش شده به وسیله عنصر جریان به وسیله انتگرال بردار پوینتینگ بر روی سطح یک نیم کره به شعاع r به دست می‌آید:

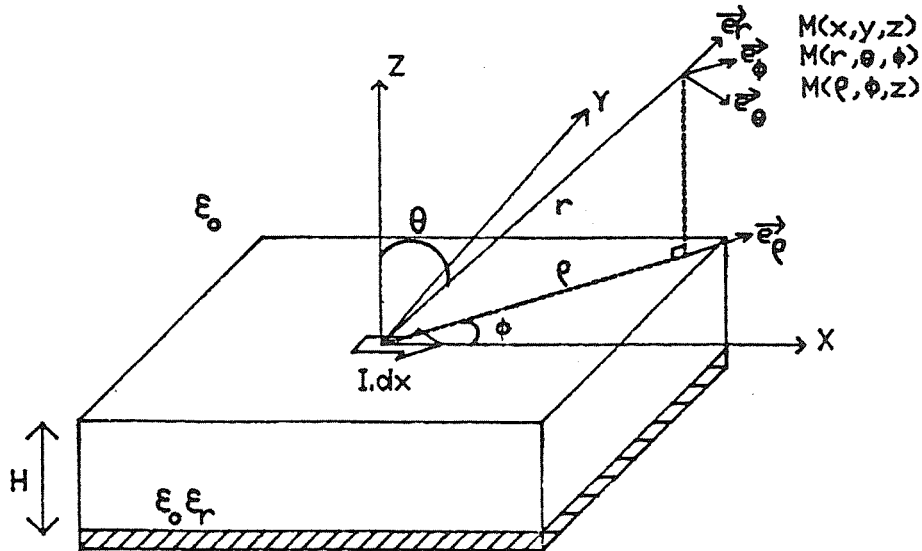
$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2Z_0} (|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2) r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (12)$$

$$Z_0 = 120\pi(\Omega) \quad (\text{امپدانس موج در خلا})$$

* موج سطحی استوانه‌ای:

همان طوری که گفته شد، برای آنتنهایی با یک ورقه عایق به ارتفاع H و ثابت دی‌الکتریک ϵ_r اگر:

$$H < \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (13)$$



شکل ۳- تشعش عنصر جریان که بر روی سطح عایق چاپ شده است.

اگر فقط یکی از دو آنتن به وسیله یک ژنراتور سری با ولتاژ U تحریک شده باشد، آنگاه امپدانس متقابل بین دو عنصر رشته می توان به صورت زیر نوشته شود:

$$Z_{12} = [U - Z_{11}I_1] / I_2 \quad (21)$$

I_1 و I_2 جریانهایی هستند که در محل ژنراتور عنصر تحریک شده و مدار کوتاه (short circuit) عنصر پارازیت به دست آمده اند (شکل ۴)، در حالی که:

$$Z_{11} = (U/I_1) | I_2 = 0 \quad (22)$$

این روش برای تحقیق در مورد اثرات نوع عایق (ارتفاع و ثابت دی الکتریک) بر روی امپدانس متقابل بین دو آنتن میکرواستریپ در اشکال پایه استفاده می شود (شکل ۴).

به طور کلی می توان گفت که نوع کوپلاژ بین دو عنصر به میدانی که بر روی سطح عایق وجود دارد بستگی دارد و این میدان الکترومغناطیسی از جمع میدانهای مختلف زیر به وجود آمده است. (۷):

- * موج فضایی با تغییرات $\frac{1}{\rho}$
- * موج درجه بالا با تغییرات $\frac{1}{\rho^2}$
- * موج سطحی با تغییرات $\frac{1}{\sqrt{\rho}}$
- * موج فرار با تغییرات $\frac{\exp(-\alpha\rho)}{\sqrt{\rho}}$

برای دو آنتن میکرواستریپ به طول $L = 37.5\text{mm}$ و عرض $W = 0.75\text{mm}$ که بر روی یک صفحه عایق به ارتفاع H و ثابت دی الکتریک ϵ_r چاپ شده اند، تغییرات فرکانس باعث ظاهر شدن مدهای بالایی امواج سطحی می شود و به این ترتیب می توان اثرات این نوع موج بر روی کوپلاژ بین دو عنصر را بررسی کرد.

برای آشکار کردن کامل اثر امواج سطحی خصوصا "TM₀" و "TE_r"، یک عایق به ارتفاع بزرگ $H = 7.62\text{mm}$ و ثابت دی الکتریک قابل توجه $\epsilon_r = 10$ در نظر گرفته شده است. در صورت نبودن ورقه عایق ($\epsilon_r = 1$)، کوپلاژ بین دو عنصر در سه شکل پایه به وسیله امواج فضایی و امواج درجه بالا تعیین می شود (شکل ۵). کوپلاژ قوی برای فواصل خیلی کم بین دو عنصر به وسیله امواج درجه بالا تعیین شده است و از دیاد

تنها یک موج سطحی از نوع TM₀ به وسیله عایق هدایت می شود. برای یک عنصر جریان، در یک دستگاه مختصات استوانه ای، میدان الکترومغناطیسی از نوع TM₀ دارای مولفه های زیر می باشد:

$$E_\rho(\rho, \phi, z) \approx A(z, \epsilon_r, H, f) (I d\ell) \cos\phi \frac{e^{-j\lambda_s \rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (14)$$

$$E_\phi(\rho, \phi, z) \approx 0 \quad (15)$$

$$E_z(\rho, \phi, z) \approx B(z, \epsilon_r, H, f) (I d\ell) \cos\phi \frac{e^{-j\lambda_s \rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (16)$$

$$H_\rho(\rho, \phi, z) \approx 0 \quad (17)$$

$$H_\phi(\rho, \phi, z) \approx C(z, \epsilon_r, H, f) (I d\ell) \cos\phi \frac{e^{-j\lambda_s \rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (18)$$

$$H_z(\rho, \phi, z) \approx 0 \quad (19)$$

λ_s نقطه ای است که: $D_m(\lambda) = 0$ می شود.

عبارت اخیر نمایانگر یک موج استوانه ای از نوع TM₀ که نسبت معکوسی با جذر فاصله دارد، می باشد. توان کل حمل شده به وسیله این موج، با انتگرال گیری بردار پوینتینگ بر روی سطح یک استوانه به شعاع ∞ به دست می آید:

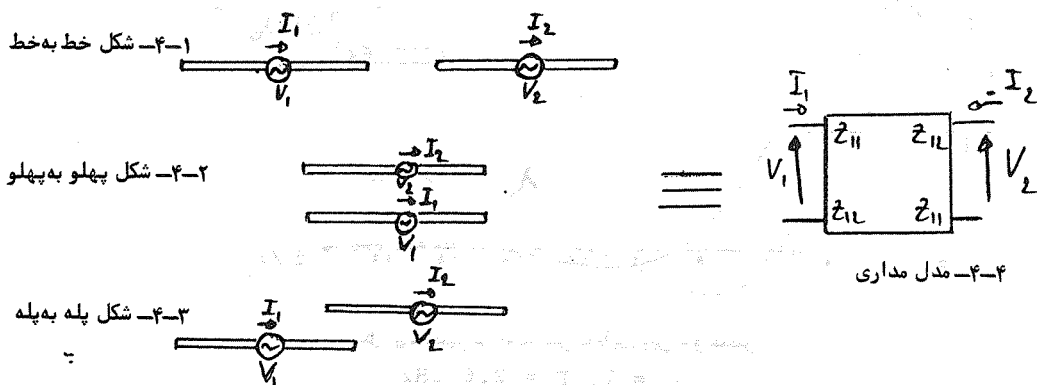
$$P_{TM_0} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} R_e(\vec{E}_{TM_0} \times \vec{H}_{TM_0}) \cdot \vec{e}_\rho \rho d\phi dz \quad (20)$$

بدیهی است که برای یک آنتن میکرواستریپ پس از محاسبه توزیع جریان بر روی آنتن، و با استفاده از خاصیت جمع پذیری و عبارات بالا به سهولت می توان شدت کل میدان الکترومغناطیسی در هر نقطه از فضای دور را به دست آورد.

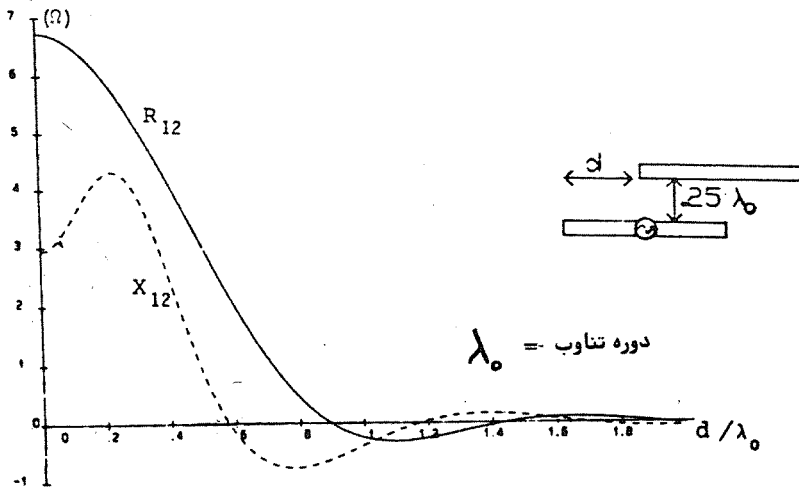
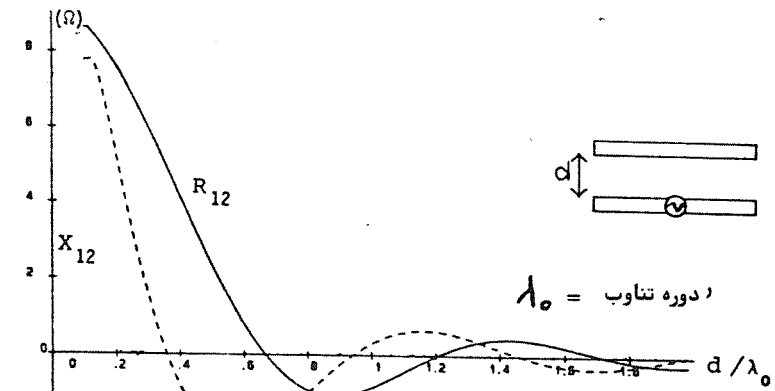
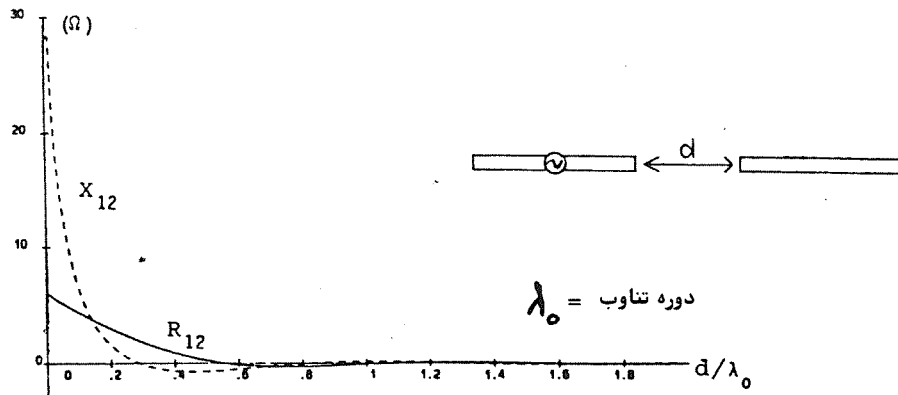
بخش دوم

اثر امواج سطحی بر روی امپدانس متقابل بین دو آنتن میکرواستریپ

ترکیب تئوری بسط داده شده در بخش اول و تئوری مدارها، اجازه می دهد تا امپدانس متقابل بین دو آنتن میکرواستریپ که نمایانگر ساده ترین نوع رشته آنتن می باشد را پیدا نمود (۸ و ۹).

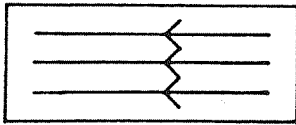


شکل ۴- اشکال پایه در رشته آنتن و مدل مداری



شکل ۵- تغییرات امپدانس متقابل بین دو عنصر
 $\epsilon_r = 1, F = 2.6 \text{ GHz}$

باید آنتن فرستنده را با ابعادی انتخاب نمود که در صورت تحریک در فرکانس کار، جریان در سمت طول آنتن بسیار بزرگتر از جریان در سمت عرض آنتن باشد (یا بالعکس).
حال اگر جریان در سمت طول آنتن بسیار بزرگتر بود، آنتن گیرنده باید مطابق شکل ۸ قرار گیرد:



آنتن فرستنده



آنتن گیرنده

شکل ۸- محل آنتن فرستنده و گیرنده برای کم کردن کوپلاژ

و اگر جریان در سمت عرض آنتن خیلی بزرگ بود، آنتن گیرنده باید مطابق شکل ۹ قرار بگیرد:



آنتن گیرنده



آنتن فرستنده

شکل ۹- محل آنتن گیرنده و فرستنده برای کم کردن کوپلاژ

بدیهی است در فرکانسهای که جریان طولی و عرضی دارای ابعادی مشابه باشند، اثر کوپلاژ بین دو آنتن را نمی توان کم کرد.

بخش سوم

اثر امواج سطحی بر روی توان تشعشع شده توسط یک آنتن میکرواستریپ:

شکل ۱۰ نمایانگر یک جمع بندی توان در یک آنتن میکرواستریپ به طول $L=37.5\text{mm}$ و عرض $W=0.375\text{mm}$ که بر روی یک لایه عایق به ارتفاع $H=7.62\text{mm}$ و $\epsilon_r=6.25$ چاپ شده، می باشد. همانطور که گفته شد یک موج سطحی از نوع TM_0 در همه حالات تحریک می شود و قسمتی از توان ورودی، به آنتن ρ_f را جذب می کند به طوری که $\rho_f + \rho_{T\pi} + \rho_{\pi} \cong \rho_f$ عبارات $\rho_{T\pi}$ و ρ_{π} در بخش اول بسط داده شده اند. لازم به توجه است که $\rho_{T\pi} + \rho_{\pi}$ کمی کوچکتر از ρ_f می باشد زیرا توان تشعشع شده توسط آنتن در داخل دی الکتریک در محاسبه ρ_{π} به کار گرفته نشده است.

با استفاده از این جمع بندی می توان قابلیت یک آنتن میکرواستریپ برای تشعشع را به این صورت تعریف کرد:

$$\eta = \frac{\rho_{\pi}}{\rho_f} \quad (23)$$

فاصله بین دو عنصر مترادف با افت سریع Z_{12} می باشد و کوپلاژ بین دو عنصر در این حالت به وسیله امواج فضایی (افت $\frac{1}{r}$) تعیین می شود قابل توجه است که در ۳ حالت پایه، تناوب Z_{12} برابر با λ_0 می باشد و این مساله به نوعی دیگر تاکید می کند که کوپلاژ بر اثر امواج فضایی می باشد. در صورت وجود ورقه عایق ($\epsilon_f = 10$)، کوپلاژ در فواصل زیاد بین دو عنصر به وسیله امواج سوامی تعیین می شود و چون این امواج دارای افت $\frac{1}{\sqrt{\rho r}}$ می باشند، افت Z_{12} نیز آرامتر از $\epsilon_f = 1$ می باشد (شکلهای ۶ و ۷).

در حالت پایه خط به خط کوپلاژ در اثر مود TM_0 می باشد، در حالی که اثر این مود در حالت پایه پهلو به پهلو هیچ می باشد (شکل ۶). یکی بودن دوره تناوب Z_{12} در حالت پایه خط به خط با عدد موج مود TM_0 یعنی λ_g [$D_m(\lambda_g) = 0$] مسئله بالا را تاکید می کند.

این نکته به وسیله تقریبات میدان دور تایید می شود زیرا که با استفاده از عبارات ۱۴ تا ۱۹ می توان گفت به علت وجود ϕ ، میدان الکترومغناطیسی از نوع TM_0 در جهت محور آنتن ماکزیمم و در جهت عمود بر محور آنتن صفر می باشد.

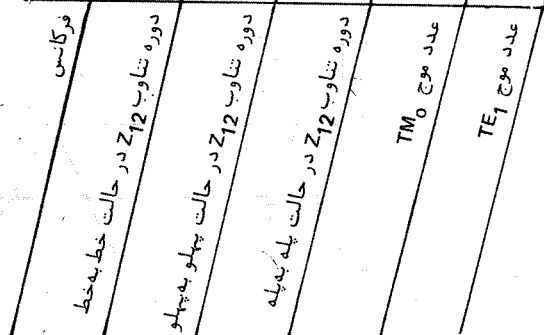
در شکل ۶ $f_c^{TE_1} = 3.27\text{GHz}$ پس موج سطحی TE_1 هنوز تحریک نشده و هیچ اثری بر روی کوپلاژ ندارد. در حالی که در شکل ۷ $f_c^{TE_1} = 3.27\text{GHz}$ و $f = 5\text{GHz} > f_c$ در نتیجه موج TE_1 کاملاً تحریک شده است و نکته قابل توجه این مساله می باشد که دوره تناوب Z_{12} با عدد موج TE_1 یعنی λ_g [$D_g(\lambda_g) = 0$] یکی می شود. پس موج TM_0 باعث ازدیاد کوپلاژ در شکل پایه خط به خط و موج TE_1 باعث ازدیاد کوپلاژ در شکل پایه پهلو به پهلو می باشد.

به علت تشابه دوره تناوب Z_{12} با λ_g در حالت پایه پهلو پهلو در شکلهای ۶ و ۷ می توان نتیجه گرفت که در این حالت نیز کوپلاژ به وسیله موج TM_0 تعیین می گردد.

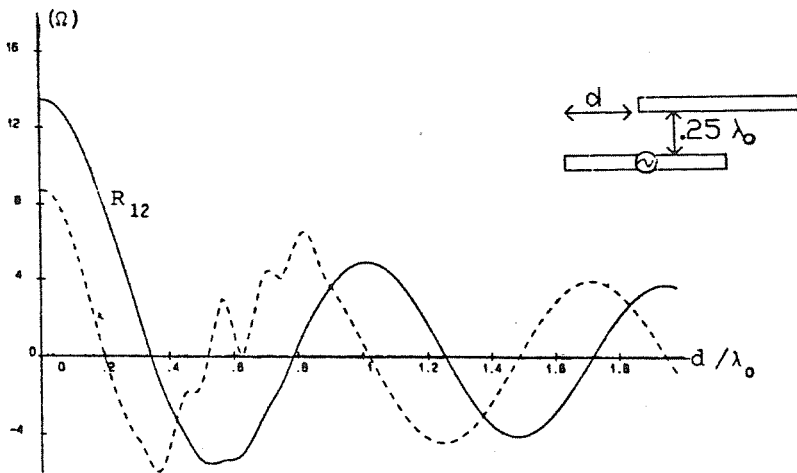
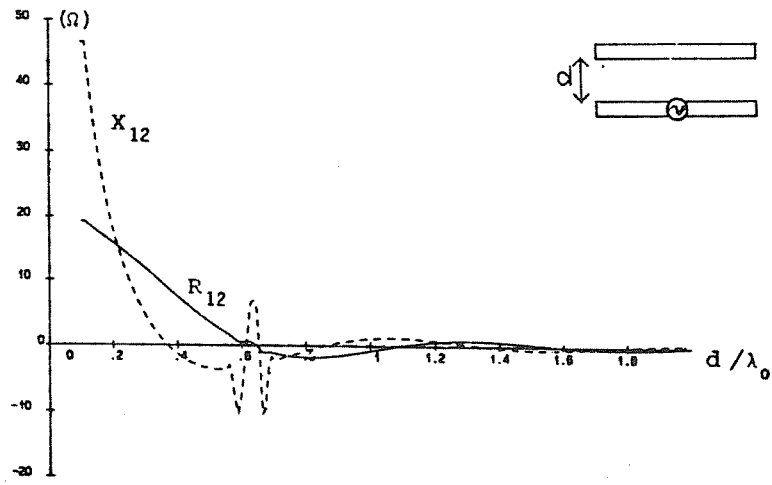
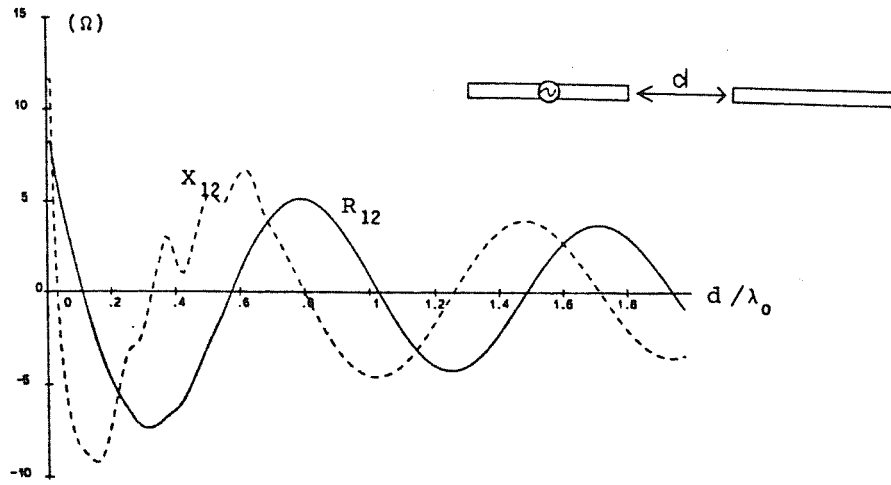
این مساله کاملاً طبیعی می باشد، زیرا با ازدیاد فاصله بین دو آنتن، می توان دو عنصر را خط به خط فرض کرد.

کل نتایج به دست آمده و تشابه بین دوره تناوب Z_{12} با عدد موج TM_0 یا TE_1 در جدول زیر خلاصه می شود:

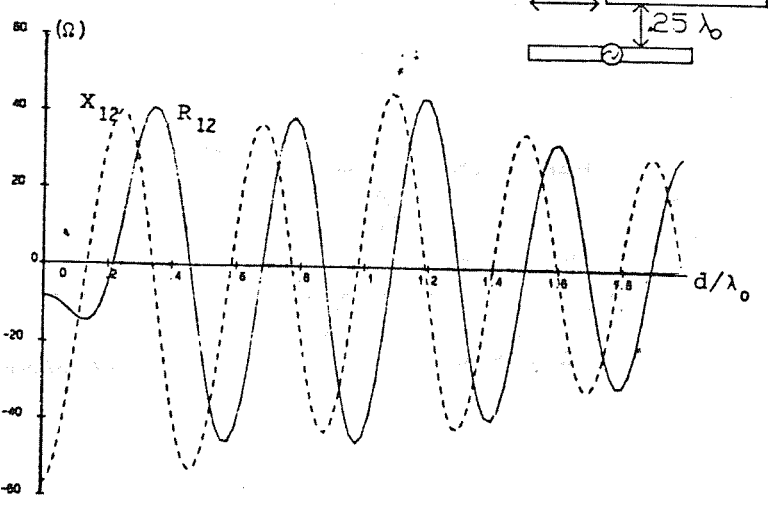
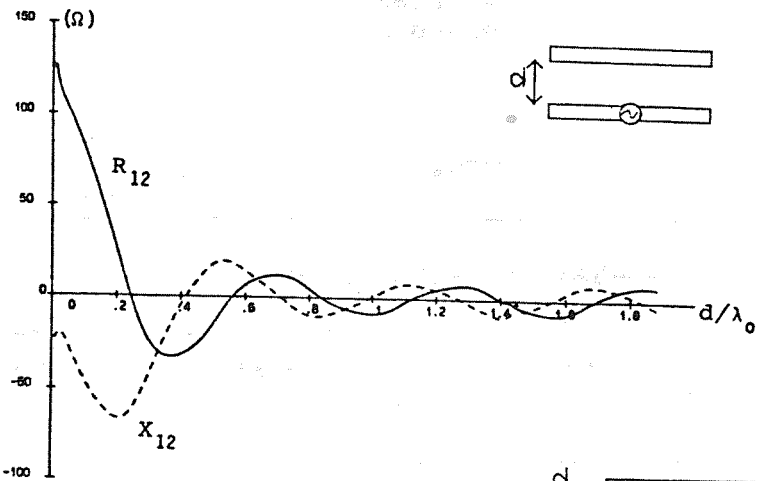
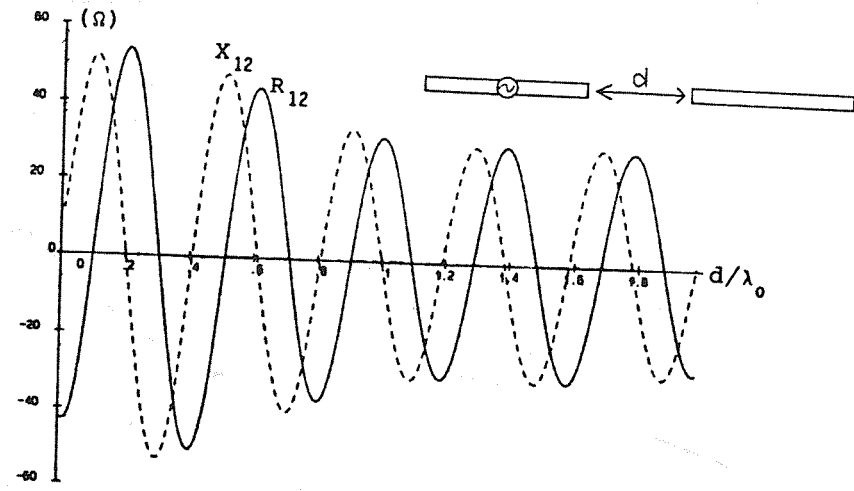
| | | | | | | |
|--------------|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| TM_0 | 2GHz | $0.933\lambda_0$ | $0.876\lambda_0$ | $0.935\lambda_0$ | $0.923\lambda_0$ | * |
| TM_0, TE_1 | 5GHz | $0.394\lambda_0$ | $0.571\lambda_0$ | $0.4\lambda_0$ | $0.391\lambda_0$ | $0.560\lambda_0$ |



پس به طور مثال اگر بخواهیم ارتفاع سنجی متشکل از دو آنتن میکرواستریپ طراحی کنیم به طوری که یکی فرستنده و دیگری گیرنده باشد و هر دو بر روی یک عایق چاپ شده باشند، برای کم کردن کوپلاژ بین دو آنتن به نکات زیر باید توجه کرد:

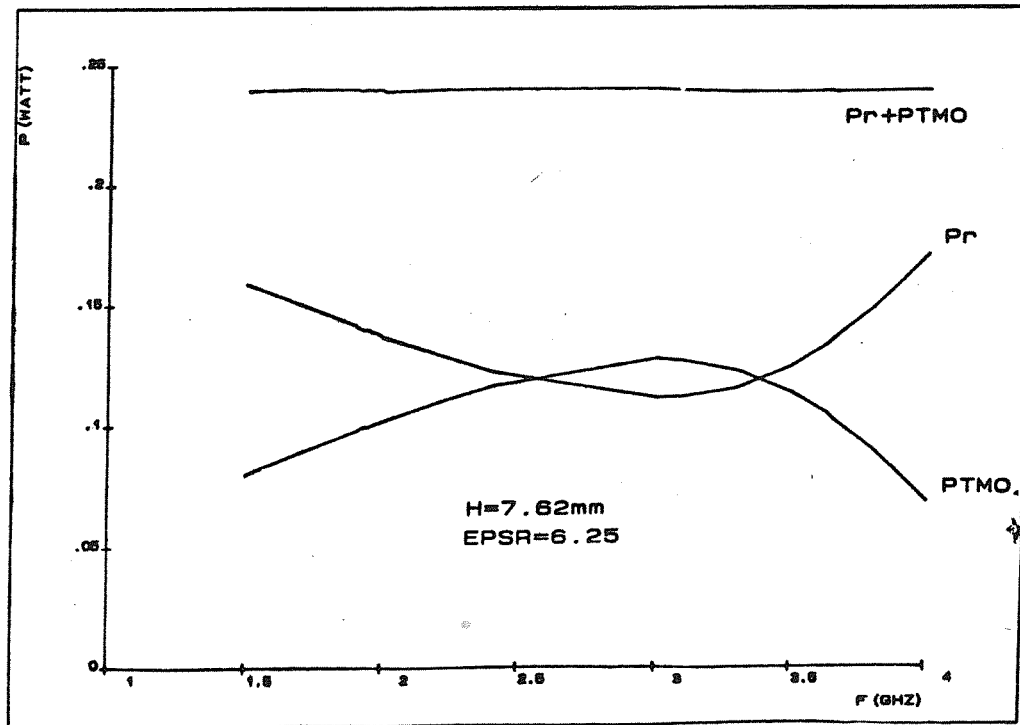


شکل ۶- تغییرات امپدانس متقابل بین دو عنصر
 $\epsilon_r = 10, F = 2 \text{ GHz}$



شکل ۷- تغییرات امپدانس متقابل بین دو عنصر

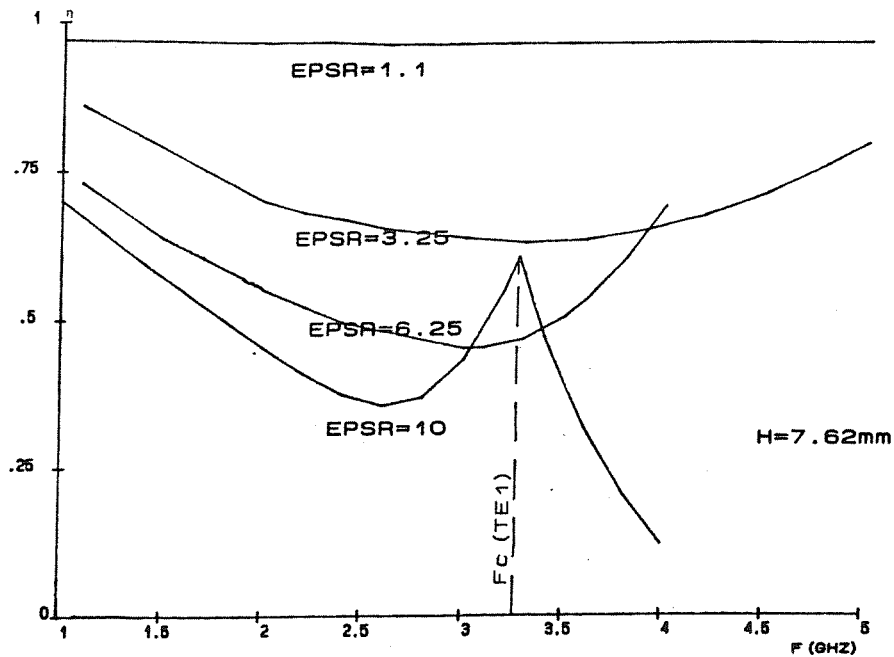
$\epsilon_r = 10, f = 5 \text{ GHz}$



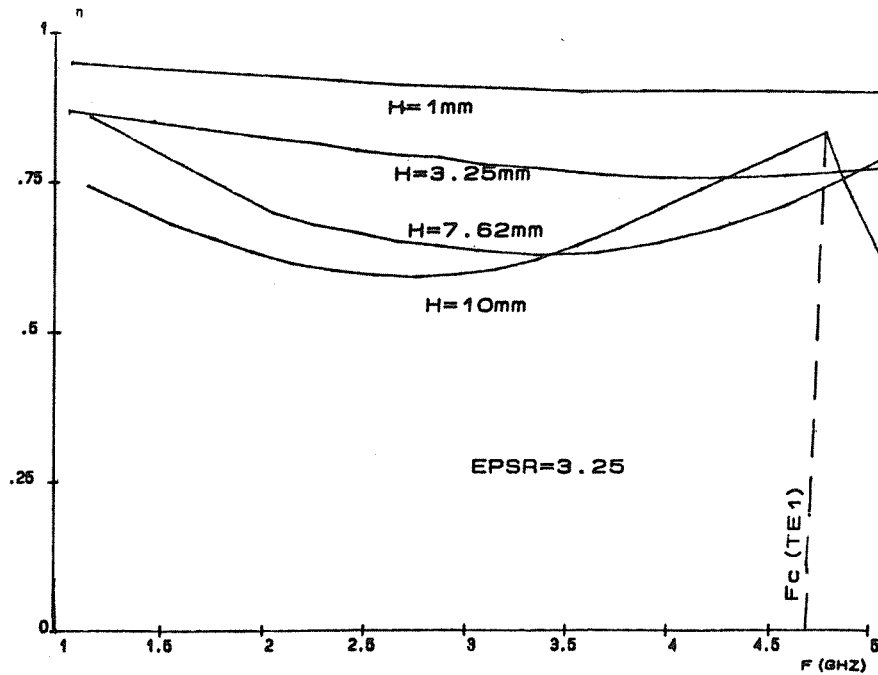
شکل ۱۰- جمع بندی توان در یک آنتن میکرواستریپ

دی الکتریک متغیر می باشد، در حالی که شکل ۱۲ نمایانگر تغییرات قابلیت تشعشع برای یک عایق با ثابت دی الکتریک $\epsilon_r = 3.25$ و ارتفاعهای مختلف می باشد. از آنجا که اثر امواج سطحی وقتی که ارتفاع یا ثابت

در نتیجه قابلیت تشعشع یک آنتن میکرواستریپ به طول $L = 37.5\text{mm}$ و عرض $W = 0.375\text{mm}$ برای عایقهای مختلف تحقیق شده است. شکل ۱۱ نمایانگر تغییرات آن برای یک عایق به ارتفاع $H = 7.62\text{mm}$ و ثابت



شکل ۱۱- قابلیت تشعشع آنتن برای ϵ_r مختلف



شکل ۱۲- قابلیت تشعشع آنتن برای ارتفاعهای مختلف

منابع :

1. MOINI R, "Analyse de L'influence des Ondes de Surface sur les Caracteristiques des Antennes Microruban", These de Doctroat n 12-88, Universite de Limoges, Mai 1988.
2. Alexopoulos N.G RANA I.E, "Current Distribution and Input Impedance of Printed Dipoles", IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. AP-29, n 1, pp 99-105 January 1981.
3. MOSIG J.R, GARDIOL F.E, "Numerical Methods for Current Analysis in Microstrip Planar Antennas", 2nd International Conference on Antennas and Propagation, York, UK, April 1981.
4. MOSIG - J.R, GARDIOL - F.E, "Techniques Analytiques et Numeriques Dans L'analyse des Antennes Microruban", Comptes Rendus des Journees Internationales de Nice Sur les Antennes, JINA 1984, Nice, 1984.
5. HARRINGTON R.F, "Time Harmonic Electromagnetic Fields", NEW-YORK USA: McGraw-Hill, 1961.
6. MOINI R, "Etude du Rayonnement en Regime Harmonique d'un Dipole Electrique Localise sur un Substrat Dielectrique Metallise", Universite de Limoges, Juillei 1985.
7. FELSEN L. B, Marcuvitz N., Radiation and Scattering of Waves, USA: Prentice Hall, 1973.
8. ALEXOPOULOS N.G, Rana I.E, "Mutual Impedance Computation Between Printed Dipoles", Ieee Trans. Antennas Propagation, Vol AP-29, n 1, January 1981.
9. TYRA G., "Radiation and Propagation of Electromagnetic Waves", New-York, USA: Academic Press, 1969.

دی الکتریک عایق کاهش می یابد، کم می شود، قابلیت تشعشع آنتن نیز در این حالات زیاد می شود. پیکهای مشاهده شده برای فرکانس مود بالای سطحی یعنی TE_1 می باشد (3.28GHz و $\epsilon_r = 3.25$ و $H = 7.62mm$) و $\epsilon_r = 10$ متعلق به $f_c(TE_1) = 4.7 GHz$ بعد از این فرکانس تنها یک موج سطحی دیگر تحریک شده و باعث افت ناگهانی توان تشعشعی آنتن می شود. بدین ترتیب با استفاده از دو شکل اخیر می توان نتیجه گرفت که برای بالا بردن قابلیت تشعشع آنتن یا باید در فرکانسهای پایین آنتن را تحریک کرد (1-2GHz) و یا درست قبل از فرکانس تحریک موج سطحی TE_1 .

نتیجه:

با مشاهده اثر امواج سطحی بر روی کوپلاژ بین دو آنتن میکرواستریپ که نمایانگر یک رشته ابتدایی می باشد می توان به این نتیجه رسید که اثر این امواج در طراحی رشته آنتنهای میکرواستریپ به هیچ وجه نباید فراموش شود. با این وضع اثر این امواج را می توان با انتخاب عایقی با ارتفاع بسیار کم در مقابل طول موج و ثابت دی الکتریک، بسیار کوچک کم کرد. از طرف دیگر به علت وجود این امواج، نمودار تشعشعی این آنتن در افق نیز دارای اختلالاتی می شود.

