

مدل سازی و محاسبه تزویج بین آنتن‌ها روی بدنه هواپیما با استفاده از محاسبه مسیر ژئودزیک

سیدمحمد جواد رضوی^{۱*}، ناصر یوسف زاده^۲، سیدحسین محسنی ارمکی^۳

۱- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، ایران، ۲- دانشجوی دکتری دانشگاه امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۵/۰۶/۰۴، پذیرش: ۹۵/۰۷/۲۵)

چکیده: آنتن‌هایی که بر روی هواپیما نصب می‌شوند، لازم است حداقل تزویج متقابل را داشته باشند تا عملکرد فرستنده و گیرنده‌های مرتبط، مختل نشود به عبارت بهتر، سازگاری الکترومغناطیسی داشته باشند. برای محاسبه تزویج، بایستی مسیر امواج از آنتن فرستنده تا گیرنده را به دست آورد. در حالتی که آنتن‌ها در دید هم هستند، این مسیر، یک خط مستقیم است. ولی در حالتی که آنتن‌ها در دید هم نیستند، نوعی از امواج سطحی، باعث تزویج متقابل می‌شوند. بهترین روش برای محاسبه تزویج، به دست آوردن کوتاه‌ترین مسیر بین آنتن‌ها یا ژئودزیک می‌باشد. سپس با محاسبه تلفات سطحی مربوط به این مسیر، میزان تزویج به دست می‌آید. در حالتی که هواپیما با یک استوانه مدل می‌شود، محاسبه این مسیر و نیز تلفات سطحی، آسان و عملی می‌باشد. مزیت این تقریب، سادگی و تعمیم‌پذیری آن برای هر هواپیما با بدنه استوانه‌ای است. در این تقریب، اثر موانع و نیز تفرق در لبه‌ها، در نظر گرفته نمی‌شود. در این مقاله، نتایج محاسبه تزویج میان آنتن‌ها و نیز نتایج شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل تقریبی هواپیما مقایسه شده است. نشان داده خواهد شد که تحلیل محاسبات بر اساس کوتاه‌ترین مسیر در سخته‌گیرانه‌ترین حالت تزویج، از ۱۵ dB بیشتر نخواهد شد.

کلید واژه‌ها: پترن تشعشی آنتن، پارمترهای اسکترینگ، امواج خزشی، سازگاری الکترومغناطیسی، تئوری تفرق هندسی

۱- مقدمه

مانند روش المان محدود، روش ممان‌ها و... منجر به تعداد بسیار زیاد مش در مش‌بندی مساله، خواهد شد که نیاز به پردازنده‌های پر قدرت خواهد داشت. این مساله زمانی حادتر می‌شود که بخواهیم جزئیات داخل کابین، جزئیات موتور مانند پره‌ها و نیز سطوح با جنس غیر فلز (مثلاً کامپوزیت) را نیز مدل نماییم.

در خصوص شبیه‌سازی هواپیما و آنتن‌های نصب شده بر روی آن، سعی می‌شود که سازه تا حد امکان، ساده‌تر باشد [۱]. بنابراین دیگر لزومی به شبیه‌سازی پره‌ها و یا اجزاء داخل کابین نمی‌باشد. همچنین در بحث تحلیل تئوری تزویج بین آنتن‌ها، هواپیما با یک استوانه بی‌نهایت مدل می‌شود. بنابراین از اثرات انعکاس‌های مرتبه اول و دوم و نیز پدیده تفرق و شکست، صرف نظر می‌شود. بنابراین، نتایج تحلیل نظری تزویج بین آنتن‌ها با آنچه که از شبیه‌سازی رایانه‌ای و نیز آنچه که با اندازه‌گیری بدست می‌آید، مقداری تفاوت خواهد داشت. ولی ثابت شده است که مدل کردن هواپیما با یک استوانه طویل، نتایج قابل قبولی از نظر میزان تزویج می‌دهد [۳].

در این مقاله ابتدا مختصری از امواج خزشی و نیز محاسبه کوتاه‌ترین مسیر می‌آید. سپس بر اساس کوتاه‌ترین مسیر بین

الگوی تشعشی آنتن‌های نصب شده بر روی هواپیما به علت محدود بودن و مسطح نبودن صفحه زمین، با الگوی تشعشی آنتن‌هایی که بر روی صفحه زمین استاندارد نصب می‌شوند، تفاوت دارند [۱] همچنین به علت استوانه‌ای بودن بدنه هواپیما، نوع خاصی از امواج سطحی بنام امواج خزشی^۱ ایجاد می‌شوند [۲]. به همین خاطر، تحلیل میزان تزویج بین آنتن‌ها با تزویج بین آنتن‌ها در فضای آزاد و یا بر روی صفحه زمین استاندارد، متفاوت است. تحلیل میدانی آنتن‌هایی که روی هواپیما نصب می‌شوند به چند دلیل پیچیده است. اول آنکه هواپیما از نظر ساختار فیزیکی، یک سازه پیچیده‌ای است و علت آن وجود موانعی مانند بال‌ها، دم افقی و پایدارکننده عمودی^۲، همچنین ایده‌آل نبودن جنس بدنه (یعنی هادی کامل نبودن آن)، می‌باشد. دلیل دوم آن است که با توجه به فرکانس کاری آنتن‌های هواپیما که عمدتاً در باند UHF و SHF هستند، شبیه‌سازی کل سازه هواپیما با روش‌های متداول تحلیل میدانی

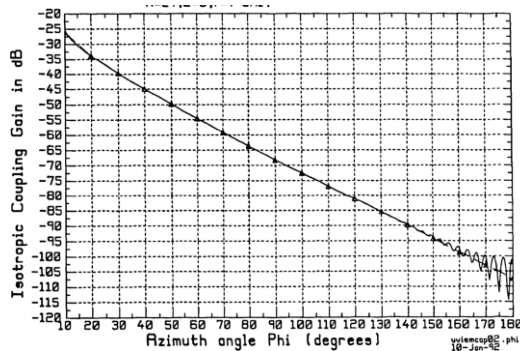
*نویسنده پاسخگو: razavismj@mut.ac.ir

1. Creeping Wave
2. Stabilizer

منعکس شده از سطح کره با امواجی که روی سطح کره و رو به جلو حرکت کرده و به سمت منبع بر می‌گردند، ترکیب می‌شوند. چنانچه امواج با هم هم فاز باشند، اثر همدیگر را تقویت و چنانچه در فاز مقابل باشند، اثر موج انعکاسی، تضعیف می‌شود [۱].

این امواج، بر روی بدنه هواپیما هم دیده می‌شود. برای مثال در گزارش هریس [۲]، آنتن‌هایی که در روی محیط استوانه و در زاویه‌های مختلف نسبت به هم نصب شده بودند، اثر مشابهی دیده شد. که در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، چنانچه دو آنتن تقریباً روبروی همدیگر قرار داشته باشند، ترکیب امواج خزشی باعث ایجاد نوسان در نمودار تزویج بین آنتن‌ها می‌شود.

تاکنون افرادی زیادی مانند لوی^۴، کلر^۵، پاتهاک^۶، وانگ^۷ و ... بر روی نظریه امواج خزشی که حالت خاصی از نظریه تفرق بود، کار کرده‌اند. نتیجه کار آنها فرمول‌هایی بود که برای تزویج امواج بین آنتن‌ها بر روی سطوح خمیده به دست آمد که در ادامه خواهد آمد. ذکر این نکته لازم است که برای محاسبه تزویج بین آنتن‌ها، برای سادگی، هواپیما به صورت یک استوانه گرد با طول بی‌نهایت در نظر گرفته شده است. همچنین آنتن‌ها در فرکانس کاری خود قرار دارند. یعنی هر آنتن به طول یک چهارم طول موج است. چنانچه آنتن‌ها در فرکانس تشدید خود نباشند، باید تصحیحی در بهره آنتن‌ها اعمال شود [۱۳]. همچنین، فرض می‌شود که آنتن‌ها از نظر قطبش یکسان هستند. وگرنه اثر عدم تطابق قطبش نیز باید اعمال شود [۱۴].



شکل (۳): نمودار تزویج بین آنتن‌های نصب‌شده روی استوانه بر حسب موقعیت مختلف آنتن‌ها

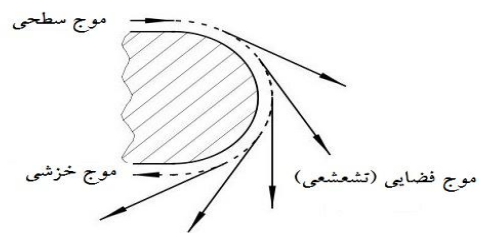
۳- محاسبه تزویج بین آنتن‌ها

به صورت کلی، روش محاسبه تزویج بین آنتن‌ها نیازمند حل

آنتن‌ها، تلفات سطحی^۱ امواج و در نتیجه تزویج بین آنها محاسبه می‌شود. فرمول‌های تجربی نیز که بر اساس داده‌های اندازه‌گیری و محاسباتی به دست آمده‌اند، معرفی می‌شوند. در انتها، نتایج محاسباتی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌شوند. در ابتدا لازم است مقدمه‌ای از امواج خزشی گفته شود.

۲- مبانی تئوری تزویج بین آنتن‌ها

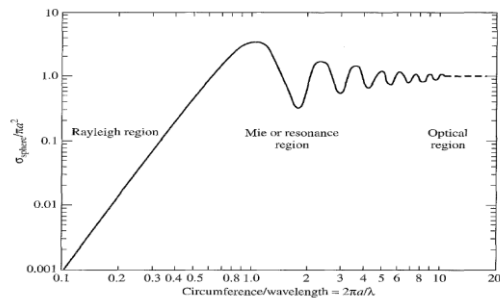
طبق تئوری تفرق، امواجی که روی سطوح خمیده می‌تابند، هم‌زمان که در راستای مماس بر سطوح به بیرون تفرق می‌یابند، بخشی نیز در امتداد سطوح خمیده، حرکت می‌کنند که به این نوع امواج سطحی، امواج خزشی گفته می‌شود [۸-۴].



شکل (۱): نمایی ساده از امواج خزشی

تحلیل این امواج، نیازمند شناخت تئوری تفرق هندسی^۲ و تئوری تفرق یکنواخت^۳ است [۹-۱۱].

از آنجایی که بدنه هواپیما نیز یک سطح خمیده است، بنابراین، این نوع از امواج روی آن منتشر شوند. هرچند سطح (دامنه) این امواج در مقایسه با امواج مستقیم و نیز امواج انعکاس یافته، پایین‌تر است، ولی در مواردی می‌تواند باعث ایجاد مزاحمت در سیستم‌های هواپیما گردد. در اندازه‌گیری سطح مقطع راداری، اثر این امواج به خوبی دیده می‌شود. برای مثال چنانچه سطح مقطع راداری یک کره اندازه‌گیری شود نمودار شکل (۲) به دست می‌آید [۱۲].



شکل (۲): نمودار سطح مقطع راداری یک کره بر حسب فرکانس نوساناتی که در نمودار سطح مقطع راداری در ناحیه تشدید دیده می‌شود، به علت وجود امواج خزشی است. به عبارت دیگر، امواج

4. Levy
5. Keller
6. Pathak
7. Wang

1. Shading
2. GTD
3. UTD

که در این رابطه، P_r توان دریافتی در گیرنده، P_t توان ارسالی فرستنده، G_t بهره آنتن فرستنده در جهت گیرنده، G_r بهره آنتن گیرنده در جهت فرستنده و λ طول موج ارسال شده است. چنانچه این فرمول به صورت dB بیان شود، با فرض آن که فرکانس بر حسب مگاهرتز و R بر حسب متر بیان شود با نوشتن λ بر حسب فرکانس، به فرمول (۲) می‌رسیم.

$$P_r(\text{dB}) = P_t(\text{dB}) + G(\text{dBi}) - 20 \log(R) - 20 \log(f) + 27.56 \quad (2)$$

که در این فرمول، G مجموع بهره دو آنتن در جهت یکدیگر است. همچنین می‌توان نسبت $\frac{P_r}{P_t}$ را با پارامتر S_{21} نیز بیان کرد. بنابراین، فرمول فریز به سادگی به فرمول (۳) تبدیل می‌شود:

$$S_{21}(\text{dB}) = G(\text{dB}) - 20 \log(R(\text{m})) - 20 \log(f(\text{MHz})) + 27.56 \quad (3)$$

این پارامتر S_{21} همان پارامتری است که در شبیه‌سازی آنتن‌ها به دست می‌آید. بهره آنتن دیپل در فضای آزاد برابر dBi ۲/۱۶ است. چنانچه صفحه زمین آنتن‌ها هادی مسطح بی‌نهایت باشد، بهره دو برابر شده و برابر ۵/۱۶ dBi خواهد بود. ولی در هواپیما، چون صفحه زمین مسطح و بی‌نهایت نیست، مقداری از این عدد کمتر خواهد شد. بنابراین برای محاسبه دقیق تزویج بین آنتن‌های در دید هم، لازم است که بهره جهتی آنتن‌های نصب شده روی بدنه را داشته باشیم.

۳-۲- تزویج بین آنتن‌های خلاف دید هم و روی بدنه یا در ارتفاع کم از بدنه

برای آنتن‌هایی که در دید هم نیستند، امواج سطحی که روی بدنه هواپیما جاری می‌شود، باعث تزویج ناخواسته می‌شود. مسیرهای مختلفی برای امواج خزشی روی سطح وجود دارد. ولی از این میان کوتاه‌ترین مسیر حرکت امواج روی سطح یا همان مسیر ژئودزیک^۴، حائز اهمیت است [۱۵ و ۱۷]. زیرا امواج در غیر از مسیرهای ژئودزیک، دارای تلفات زیادی بوده و نقش چندانی در محاسبه تزویج نخواهند داشت. در حالت کلی محاسبه کوتاه‌ترین مسیر برای یک شکل دلخواه، مستلزم حل معادلات دیفرانسیل جزئی است اما برای اشکال هندسی ساده مانند استوانه گرد یا مخروط، این مسیرها، ساده خواهند بود.

پس از آن که مسیر حرکت امواج خزشی روی بدنه هواپیما مشخص شد، لازم است میزان تضعیف امواج را روی سطح به دست آوریم. اساس کار برای محاسبه تزویج بین آنتن‌هایی که در دید هم نیستند، بر مبنای آنتن‌های سطحی فوک می‌باشد. برای به دست آوردن میزان تضعیف راه متداول آنست که آنتن‌های سطحی فوک تقریب زده شوند [۲ و ۱۵] آنتن‌های

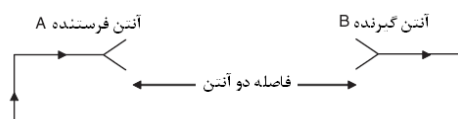
آنتن‌های فوک^۱ می‌باشد. آنتن‌های فوک به دو نوع نرم^۲ و سخت^۳ تقسیم می‌شوند که ثابت می‌شود برای کاربردهایی مانند هواپیما که شعاع بدنه (استوانه) بزرگ است، تنها آنتن‌های نوع سخت اثر غالب دارند [۲ و ۱۵]. آنتن‌های فوک، با توجه به مسیر حرکت موج سطحی (میزان انحناء و طول مسیر) که میزان تلفات موج را نشان می‌دهد و نیز با توجه به ارتفاع آنتن، می‌توانند با تقریب بیان شوند. بنابراین، با دقت خوبی می‌توان این آنتن‌های پیچیده را با توابع یا چندجمله‌ای‌هایی تقریب زد. همچنین لازم به ذکر است که تقریب آنتن‌های فوک برای حالتی که ارتفاع آنتن‌ها از سطح بدنه کم است با حالتی که ارتفاع آنتن‌ها زیاد است، بسیار متفاوت است که نشان می‌دهد نمی‌توان یک تقریب واحدی را برای کلیه حالت‌های نصب آنتن استفاده کرد [۲].

به منظور بررسی منظم تزویج بین آنتن‌ها در هواپیما، ۳ حالت مختلف در نظر گرفته می‌شود:

- ۱- تزویج بین آنتن‌های در دید هم
- ۲- تزویج بین آنتن‌های خلاف دید هم و روی بدنه یا ارتفاع کم از بدنه
- ۳- تزویج بین آنتن‌های خلاف دید هم و با ارتفاع بالا از بدنه که در ادامه هر حالت خواهد آمد.

۳-۱- تزویج بین آنتن‌های در دید هم

زمانی که آنتن‌های هواپیما در دید هم قرار دارند، میزان تزویج، با استفاده از فرمول فریز، به دست می‌آید [۱]. اصولاً فرمول تزویج فریز برای تزویج بین دو آنتن در فضای آزاد است. ولی اثر بدنه را می‌توان با افزایش بهره آنتن‌های فرستنده و گیرنده در نظر گرفت. در شکل (۴) نمایی از آنتن‌های در دید هم نشان داده شده است.



شکل (۴): نمایی ساده از تزویج بین آنتن‌ها در فضای آزاد

به صورت خلاصه، فرمول فریز بیان می‌کند که میزان توان دریافتی آنتن گیرنده که به فاصله R از آنتن فرستنده قرار دارد عبارتست از [۱ و ۱۶]:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (1)$$

1. Fock
2. Soft
3. hard

4. geodesic

این تقریب‌ها از نظر ماهوی با هم متفاوتند. یعنی نقطه اشتراکی ندارند. بنابراین لازم است دقت نمود که در یک مساله خاص، از چه نوع تقریبی استفاده می‌کنیم.

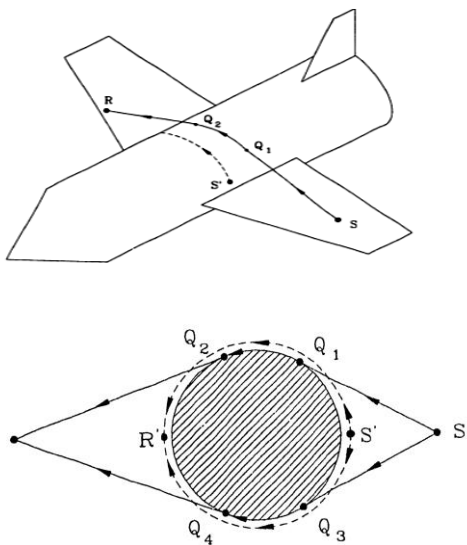
چنانچه برای ساختار مورد نظر بتوانیم، انتگرال‌های فوک را محاسبه کنیم، می‌توانیم میزان تضعیف امواج سطحی روی مسیر را به دست آوریم. به عبارت بهتر، میزان تضعیف روی مسیر برابر این تابع در واحد dB خواهد بود.

انتگرال‌های فوک در نگاه اول، شاید برای محاسبه توزیع خیلی مناسب نباشند، ولی با توجه به آن‌که هواپیما را با استوانه دایروی تقریب می‌زنند، می‌توان این انتگرال‌های به ظاهر پیچیده را ساده‌تر کرد. در نتیجه، انتگرال‌های سطحی فوک به توابع انتگرال‌های سطحی سخت و نرم ختم می‌شود. که در ادامه خواهد آمد.

۳-۲-۱- محاسبه کوتاه‌ترین مسیر بین دو آنتن روی استوانه

از آنجایی که بدنه هواپیما استوانه گرد است، بنابراین لازم است که کوتاه‌ترین مسیر حرکت امواج را روی استوانه محاسبه کنیم.

در شکل (۵) یک نمایی از دو حالت آنتن‌های نصب‌شده روی هواپیما نشان داده شده است. در موقعیت‌های S و R آنتن‌ها خارج از بدنه هستند و در حالت دوم آنتن‌ها در موقعیت S' و R' قرار دارند (که موقعیت R' نشان داده نشده است). در هر دو حالت، مسیر حرکت امواج روی استوانه، کوتاه‌ترین مسیر یا ژئودزیک است. این مسیرها عبارتند از Q₁Q₂ و Q₃Q₄.



شکل (۵): نمایی از آنتن‌های نصب‌شده و در غیر دید هم در هواپیما - شکل بالا (نمای سه بعدی) و شکل پایین (نما از بغل)

سطحی فوک در دو نوع سخت و نرم دسته‌بندی می‌شوند. به طور کلی هر دو انتگرال سطحی فوک در توزیع بین آنتن‌هایی که در دید هم نیستند، نقش دارند. ولی ثابت می‌شود، چنانچه انحنای سطح کم باشد یعنی در حالتی که سطح استوانه گرد بوده و شعاع استوانه در مقایسه با طول موج بسیار بزرگ باشد، تنها انتگرال‌های سطحی از نوع سخت در میزان توزیع آنتن‌ها موثر هستند.

انتگرال سطحی فوک از نوع سخت را با نماد $F_h(\xi, \gamma_1, \gamma_2)$ و انتگرال سطحی فوک از نوع نرم را با نماد $F_s(\xi, \gamma_1, \gamma_2)$ نمایش می‌دهند. در این توابع پارامتر ξ ، از روی شعاع سطح، مسیر ژئودزیک روی سطح و فرکانس مشخص می‌شود. پارامترهای γ_1 و γ_2 نیز از روی ارتفاع فیزیکی آنتن‌ها، شعاع سطح و فرکانس، به دست می‌آیند. که چنانچه آنتن‌ها روی سطح باشند پارامترهای γ_1 و γ_2 صفر می‌شوند.

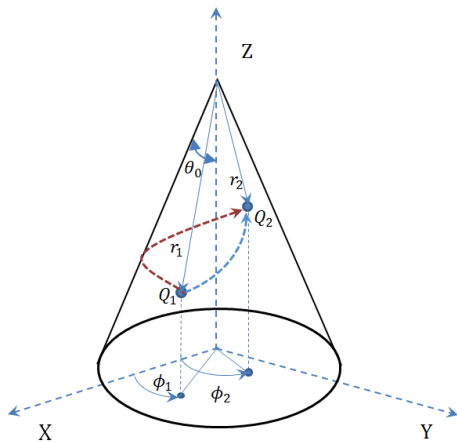
همچنین زمانی که ارتفاع آنتن‌ها بسیار کم و یا صفر است، انتگرال‌های سطحی فوک به تابع فوک مرتبه صفر یا V یا V₀ و تابع فوک مرتبه اول یا V₁ کاهش پیدا می‌کنند. در حالت خاص که هر دو آنتن روی سطح قرار دارند تنها تابع فوک مرتبه صفر نقش دارد [۲].

همچنین زمانی که پارامتر ξ خیلی کوچک و یا خیلی بزرگ باشد، توابع فوک مرتبه اول و مرتبه دوم، به صورت سری تقریب زده می‌شوند.

اما زمانی که ارتفاع آنتن‌ها از سطح، بسیار بزرگ باشد، دیگر نمی‌توان انتگرال‌های سطحی فوک را با توابع مرتبه صفر یا یک تقریب زد. ثابت شده است که در این حالت، انتگرال‌های فوک به توابعی مرسوم به توابع فرنل^۱ و پکریس-کاروت^۲ میل می‌کنند. بنابراین فرمول‌هایی که برای توزیع آنتن‌ها در ارتفاع بسیار کم به کار می‌روند، دقت خود را برای آنتن‌هایی که در ارتفاع بسیار قرار دارند از دست می‌دهند و نیز فرمول‌هایی که برای آنتن‌ها در ارتفاع بسیار زیاد به کار می‌رود، در حالتی که آنتن‌ها در ارتفاع کم از سطح قرار دارند، مقدار توزیع خلاف واقعی نشان می‌دهند.

در تقریب اول یعنی حالتی که آنتن‌ها نزدیک سطح قرار دارند، فرمول‌های پیچیده فوک به فرمول‌های توزیع سطحی U و V یا تقریب توزیع تئوری پراکندگی عمومی یا UTD^۳ ختم می‌شوند [۱۳]. در تقریب دوم یعنی حالتی که آنتن‌ها در فاصله زیادی از سطح قرار دارند، این انتگرال‌ها به فرمول‌های p و q یا تقریب پراکندگی تئوری پراکندگی عمومی یا UTD منجر می‌شوند [۱۸ و ۲].

1. Fresnel
2. Pekeris
3. Uniform theory of diffraction

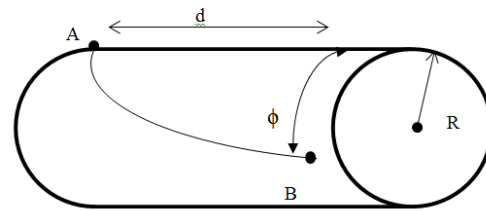


همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، در هر دو حالت، تمام یا قسمتی از مسیر حرکت امواج روی بدنه استوانه است. در این بین کوتاه‌ترین مسیر روی استوانه مد نظر است. در حالت کلی برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین دو آنتن باید تابع فاصله بین دو آنتن حداقل شود. با کمک نرم افزارهایی مانند متلب، می‌توان این تابع حداقل را پیدا نمود.

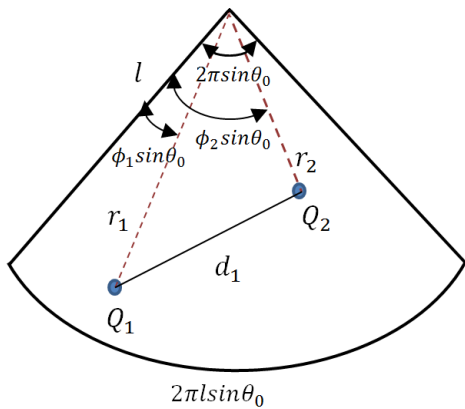
برای سادگی بحث، حالتی را در نظر می‌گیریم که هر دو آنتن روی بدنه هواپیما نصب هستند. و نیز برای سادگی، بدنه هواپیما با استوانه مدل شده است. در شکل (۶) دو آنتن A و B بر روی استوانه قرار دارند. چنانچه استوانه مورد اشاره گستره شود، کوتاه‌ترین مسیر بین دو آنتن عبارت است از حداقل مقدار S_1 و S_2 .

$$S_1 = (d^2 + (R\phi)^2)^{.5} \tag{۴}$$

$$S_2 = (d^2 + (R(2\pi - \phi))^2)^{.5} \tag{۵}$$



شکل (۶): آنتن‌های نصب شده روی استوانه



شکل (۷): نمایی از آنتن‌های نصب شده در قسمت دماغه در هواپیما - شکل بالا (نمای سه بعدی)، شکل وسط (گسترده شده آنتن‌ها)

۳-۲-۲- محاسبه کوتاه‌ترین مسیر بین دو آنتن روی مخروط

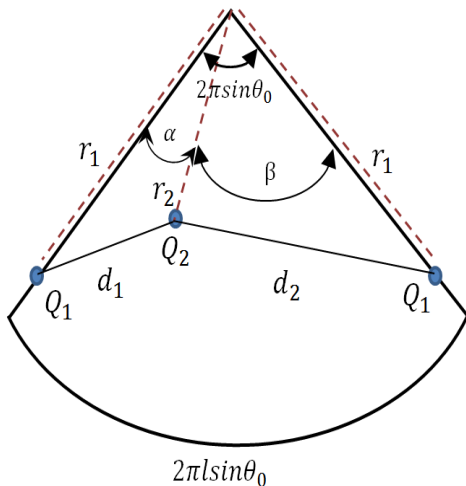
در حالت‌هایی هم ممکن است آنتن‌ها در دماغه هواپیما نصب شوند. در این حالت، می‌توان دماغه را با مخروط، شبیه‌سازی نمود [۱۷]. در این حالت هم چنانچه مخروط را به صورت دوبعدی گسترش دهیم به شکل (۷) می‌رسیم.

همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، کوتاه‌ترین مسیر روی مخروط، به صورت باز شده یک خط مستقیم است. چنانچه زاویه مخروط θ_0 بوده، و مختصات نقطه Q_1 به صورت (r_1, ϕ_1, θ_0) و مختصات نقطه Q_2 به صورت (r_2, ϕ_2, θ_0) باشد، کوتاه‌ترین مسیر بین دو نقطه عبارت است از:

$$d_1 = \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\alpha))} \tag{۶}$$

$$\alpha = (\phi_1 - \phi_2) \sin(\theta_0) \tag{۷}$$

$$d_2 = \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\beta))}$$



شکل (۸): دو مسیر ژئودزیک d_1 و d_2 روی مخروط

در شکل (۸) دو مسیر d_1 و d_2 نشان داده شده است.

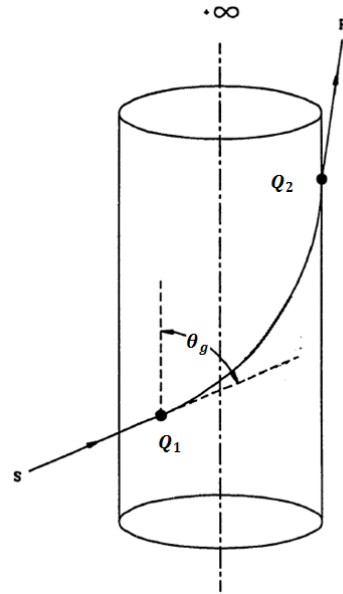
در حالتی که آنتن‌ها روی استوانه قرار دارند انتگرال سطحی فوک از نوع سخت، به صورت زیر تقریب زده می‌شود [۲]:

$$F_h(\xi, 0, 0) = V(\xi) \tag{۸}$$

پارامتر ξ از رابطه زیر به دست می آید:

$$\xi = \left(\frac{k a \sin \theta_g}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \phi \quad (9)$$

در این رابطه، k عدد موج، a شعاع استوانه، θ_g زاویه مسیر ژئودزیک با محور طولی استوانه و ϕ زاویه فی بین دو آنتن در مختصات استوانه‌ای است. در شکل (۹)، زاویه θ_g نشان داده شده است.



شکل (۹): زاویه θ_g استفاده شده در فرمول تلفات سطحی

برای مثال، دو آنتن که در بالا و پایین بدنه قرار دارند، θ_g برابر 90° و ϕ برابر 180° خواهد بود که این حالت، بیشترین مقدار برای ξ بوده و آنتن‌ها در ناحیه سایه دار عمیق قرار دارند. (به زوایای ϕ بیشتر از 150° درجه، ناحیه سایه دار عمیق گفته می‌شود).

تابع $V(\xi)$ هم، تابع انتگرال فوک سطحی سخت از مرتبه صفرام می‌باشد.

بسته به مقدار ξ دو تقریب برای $V(\xi)$ وجود دارد. بنابراین برای آنتن‌های روی سطح، میزان تضعیف امواج روی سطح به سادگی با تابع $V(\xi)$ مشخص می‌شود. تقریب انتگرال‌های فوک در این حالت به فرمول‌های U و V معروف هستند.

برای در حالتی که ارتفاع آنتن‌ها از سطح استوانه کم است، نیز می‌توان انتگرال فوک سخت را تقریب زد. به صورت خلاصه در این حالت، انتگرال سطحی فوک به صورت زیر در می‌آید [۲]:

$$F_h(\xi, y_1, y_2) = V(\xi) - \frac{j}{4} \xi^{-1} V_1(\xi) [y_1^2 + y_2^2] \quad (10)$$

در این رابطه، پارامترهای y_1 و y_2 از روی ارتفاع آنتن‌ها به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$y_{1,2} = \frac{k h_{s,r}}{m(S', R')} \quad (11)$$

در این رابطه، پارامتر $m(Q)$ در روی هر نقطه مسیر ژئودزیک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m(Q) = \left(\frac{k a}{2 \sin^2 \theta_g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

در حالتی که مسیر روی استوانه است، زاویه θ_g ثابت می‌باشد و بنابراین، $m(Q)$ برای آنتن‌های ۱ و ۲ یکی است. S' و R' هم نقاط تصویر آنتن‌های ۱ و ۲ روی استوانه است. تابع $V_1(\xi)$ نیز انتگرال سطحی فوک سخت از نوع دوم بوده و مانند $V(\xi)$ می‌توان آن را تقریب زد.

۳-۳- محاسبه تزویج برای آنتن‌های بیرون سطح و

غیر دید هم و در ارتفاع زیاد

زمانی که ارتفاع آنتن‌ها از سطح استوانه در مقایسه با طول موج بزرگ است (به عنوان یک قانون سر انگشتی بیشتر از یک طول موج)، تقریبات انتگرال‌های فوک به توابعی به نام انتگرال‌های فرنل و توابع پکرینس- کاروت ختم می‌شود [۲، ۱۷ و ۱۸]. ماهیت این توابع طوری است که چنانچه ارتفاع آنتن‌ها کم شده و آنتن‌ها نزدیک سطح استوانه باشند، تقریب انتگرال‌های فوک، نادرست بوده و اندازه آن، بسیار بزرگ می‌شود. بنابراین یک محدودیت اساسی استفاده از این تقریب‌ها، ارتفاع زیاد آنتن‌ها نسبت به سطح استوانه است. این فرمول‌ها به فرمول‌های p و q معروف هستند.

به چند دلیل برای محاسبه تزویج آنتن‌ها در هواپیما از فرمول‌های p و q استفاده نمی‌شود:

۱- فرمول‌های پراکندگی، شکل پیچیده‌ای دارند و جز در حالت ارتفاع زیاد آنتن‌ها، به آسانی قابل محاسبه نیستند.

۲- این فرمول‌ها برای ارتفاع کم آنتن‌ها مقدار تزویج خیلی زیاد و در برخی حالت‌ها به جای تضعیف امواج، حتی تقویت نشان می‌دهند.

۳- با توجه به فرکانس کاری آنتن‌ها، چنین حالتی که ارتفاع الکتریکی آنتن‌ها از سطح استوانه خیلی زیاد باشد، وجود ندارد.

۴- پیدا کردن ارتفاعی که در آن فرمول‌های p و q درست باشد مشکل است.

۵- فرمول‌های U و V برای ارتفاع زیاد هم درست هستند. هرچند، این فرمول‌ها تزویج زیادتری برای آنتن‌ها نشان می‌دهند،

بنابراین با در نظر گرفتن تلفات مسیر میزان کوپلینگ آنتن‌ها از رابطه ۱۸ به دست می‌آید:

$$20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) + 10 \log G_1 + 10 \log G_2 + L_{CS} \quad (18)$$

لازم به ذکر است که در برخی منابع عامل L_{CS} را با نام SF یا ضریب تصحیح می‌شناسند.

با مقایسه فرمول انتگرال فوک برای آنتن‌های روی سطح بلافاصله می‌توان رابطه ۱۹ را استخراج کرد:

$$L_{CS}(\xi) = 20 \log_{10} |V_0(\xi)| \text{ dB} \quad (19)$$

نکته مهم در استفاده از فرمول بالا آن است که این فرمول برای $15.0 > \xi$ نمی‌تواند تقریب خوبی برای $V_0(\xi)$ باشد و در این حالت تضعیف کمتری را برای امواج خزنده محاسبه می‌کند. که البته از نقطه نظر EMC درست است. ولی برای مقادیر کوچک ξ انطباق خوبی بین دو فرمول وجود دارد. پس از محاسبه L_{CS} ، می‌توان از فرمول فریز اصلاح شده ۲۰، برای محاسبه تزویج بین آنتن‌ها استفاده کرد.

$$C = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) + 10 \log G_1 + 10 \log G_2 + L_{CS} \quad (20)$$

۲-۴- فرمول تجربی بال و اشمیتز برای محاسبه تزویج بین آنتن‌های روی سطح و خارج از دید هم

علتی که آقای بال و اشمیتز ترغیب شدند تا سراغ فرمولی تجربی برای محاسبه تزویج میان آنتن‌ها بروند به دلایل زیر بود:

الف- فرمول‌های ریاضی پیچیده بوده و اغلب برای محاسبه تزویج خارج از باند مناسب نیستند.

ب- معمولاً فرمول‌های ریاضی محدودیت‌هایی در ابعاد هندسی دارند که کاربرد آن‌ها را مقید می‌سازد.

بنا به دلایل بالا آقای بال و اشمیتز، پس از بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی آنتن‌های مختلف و در حالات گوناگون نصب شده در صفحات زمین و استوانه و نیز اندازه‌گیری‌ها در نمونه‌های مقیاس شده و نیز اصلی هواپیماها و بالگردهای مختلف، توانستند به فرمولی تجربی دست یابند که نه کاملاً دقیق، ولی با درصد بالایی، می‌توانست، تزویج میان آنتن‌ها را روی استوانه (تقریبی از بدنه هواپیما) محاسبه نماید [۱۳].

باند فرکانسی که اندازه‌گیری‌ها در آن انجام گرفت، بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز بود که محدوده سیستم‌های مخابراتی و ناوبری هواپیماهای نظامی بود. روش کار ایشان مفصل بود و در اینجا به نتیجه آزمایشات و فرمول ارائه شده بسنده می‌کنیم.

در شکل (۱۰) استوانه استفاده شده نشان داده شده است. این استوانه از جنس آلومینیم بود که بر پایه چوبی قرار داشت. آنتن‌های استفاده شده هم آنتن‌های مونوپل بودند.

از دیدگاه سازگاری الکترومغناطیسی^۱ حالت سخت‌گیرانه‌ای را نشان می‌دهند و نادرست نیستند. البته میزان اختلاف فرمول‌های U و V با فرمول‌های پراکندگی p و q کمتر از ۱۵ dB برای ارتفاع زیاد آنتن‌ها است که با کاهش ارتفاع آنتن‌ها این مقدار کمتر هم می‌شود [۲]. بنابراین می‌توان با اطمینان در ارتفاعات ۲ تا ۳ برابر طول موج نیز فرمول‌های U و V را برای محاسبه تزویج آنتن‌ها به کار برد.

در هر صورت، چنانچه ارتفاع آنتن‌ها از سطح بدنه خیلی زیاد باشد، دقت فرمول‌های p و q از فرمول‌های U و V بیشتر است.

۴- فرمول‌های تجربی

۴-۱- فرمول تجربی تلفات سطحی بر اساس برازش منحنی‌های تزویج

برای محاسبه تزویج بین آنتن‌ها از یک روش جایگزین دیگر نیز استفاده می‌شود. بدین صورت که عامل تلفات انحنای سطح یا L_{CS} در میزان تزویج بین آنتن‌ها در هوای آزاد ضرب می‌شود [۲ و ۱۷]. نکته مهم آنست که بایستی مسیر ژئودزیک روی استوانه را در نظر بگیریم و تلفات گفته شده تنها برای این مسیر محاسبه می‌شود.

فرمول تلفات انحنای مسیر یا تلفات Shading با رابطه زیر داده می‌شود:

$$L_{CS} = - \frac{A}{\eta A + \mu} \quad (13)$$

در این رابطه، پارامتر A بهره‌ای است که برحسب پارامتر فوک یعنی ξ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A = \sqrt{2.0 \xi^2} \quad (14)$$

و همان‌طور که قبلاً هم گفته شد، پارامتر فوک با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\xi = \left(\frac{k a \sin \theta_g}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \phi \quad (15)$$

است و طول مسیر ژئودزیک برابر $t = \frac{a \phi}{\sin \theta_g}$ می‌باشد. در فرمول بالا:

$$\eta = \begin{cases} 0.005478 & A < 26 \\ 0.003340 & A > 26 \end{cases} \quad (16)$$

و

$$\mu = \begin{cases} 0.5083 & A < 26 \\ 0.5621 & A > 26 \end{cases} \quad (17)$$

f فرکانس بر حسب مگاهرتز است.

D فاصله دو آنتن در امتداد محیط استوانه بر حسب متر است.

L فاصله دو آنتن در امتداد طول استوانه بر حسب متر است.

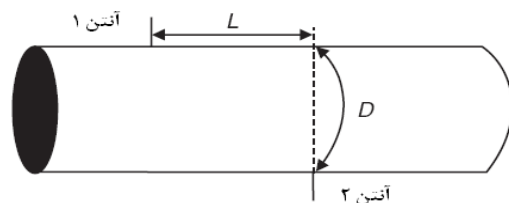
n و k ثابت های بدون بعد هستند. چنانچه k و n برابر ۱ باشند، به فرمول تلفات معمولی فریز در فضای آزاد تبدیل می شود. این فرمول:

$$k = 3.7 \times 10^{-2} \quad (22)$$

و

$$n = 1.75 \quad (23)$$

بود. چون شعاع استوانه ای که آنها استفاده کردند برابر ۰/۵۶ متر بود برای آن که این فرمول کلی شود، به جای k از ضریب $\frac{a}{15}$ استفاده کردند که در آن a شعاع استوانه است. فرمول بالا برای نواحی سایه دار (یعنی زاویه عرضی بین آنتن ها بیشتر از ۱۵۰ درجه)، اختلاف بیشتری با مقادیر اندازه گیری شده نشان می داد ولی برای زوایای کمتر از ۹۰، همبستگی داده ها خیلی بهتر بود. در شکل (۱۲) این پارامترها نشان داده شده است.



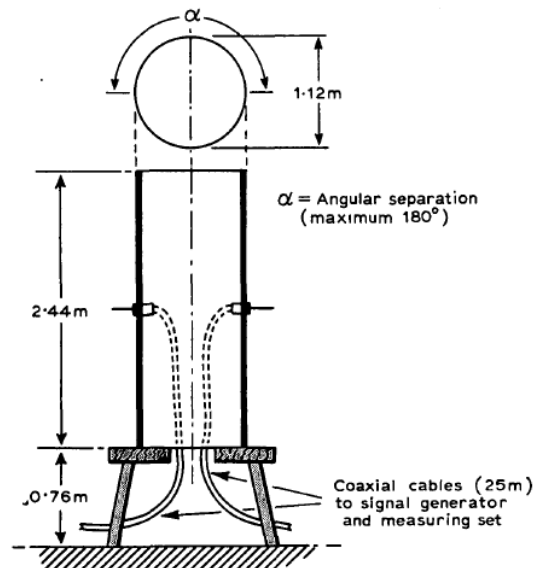
شکل (۱۲): پارامترهای فرمول بال و اشمیتر برای تزویج بین دو آنتن در وجوه مقابل

از آنجایی که آنتن های به کار رفته در مدل مقیاس بندی شده، مقیاس آنتن های مونوپل یک چهارم هستند، هیچ ضریب تصحیحی برای محاسبات نیاز نیست.

در ادامه کار برای آن که فرمول بتواند محاسبات خارج از باند را نیز شامل شود عبارت SA که با نام فاکتور طول آنتن خوانده شد، را به فرمول گفته شده افزودند. این عبارت که در نتیجه تلاش آقای Siarkiewicz و Adam به دست آمد، یک فاکتور اصلاح بود. آنها چنین توضیح دادند که برای محاسبه ایزولاسیون (یا تزویج) بین آنتن هایی که خارج از باند قرار دارند باید در فرمول تصحیحاتی صورت بگیرد.

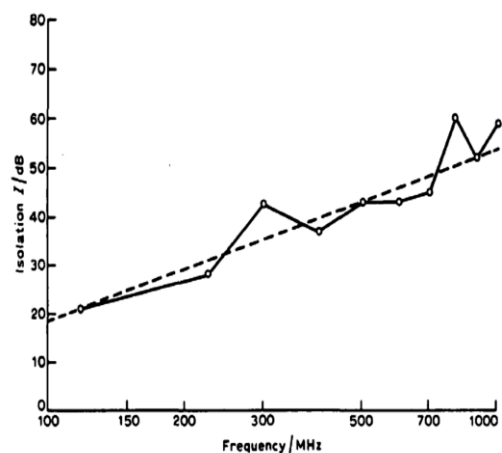
$$I = 20 \log(kf^n) + 20 \log(D + L) - 28 + SA \quad (24)$$

از نمودار نشان داده شده در شکل (۱۳) برای پیدا کردن SA استفاده می شود. یعنی در طول مورد نظر مقدار SA منفی میزان تصحیح است.



شکل (۱۰): استوانه استفاده شده توسط بال و اشمیتر برای اندازه گیری تزویج بین آنتن ها

آنها با مقایسه فرمول فریز و برازش منحنی بر نمونه های اندازه گیری شده در نمودار شکل (۱۱) توانستند به یک فرمول تجربی برسند. نکته قابل ذکر آن است که آنها از ایزولاسیون برای نمودارهای خود استفاده کردند. ایزولاسیون آنتن به آنتن، عکس تزویج می باشد. بدین معنی که ایزولاسیون بیشتر به معنی تزویج کمتر است و بالعکس.

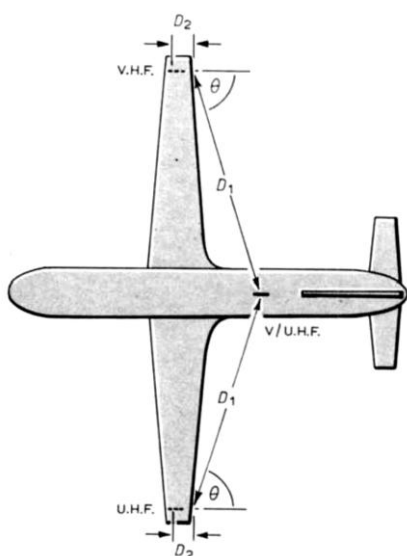


شکل (۱۱): نمودار ایزولاسیون آنتن های روی استوانه بر حسب فرکانس فرمول اولی که ایزولاسیون بین دو آنتن که هر دو در فرکانس داخل باند^۱ و در دو وجه مقابل یک استوانه با فرمول ۲۱ داده می شود:

$$I = 20 \log(kf^n) + 20 \log(D + L) - 28 \quad (21)$$

در این فرمول:

k برابر $\frac{a}{15}$ بوده و a شعاع استوانه بر حسب متر است.



شکل (۱۴): آنتن ها در هواپیما که بال مسیر مستقیم آنتن ها را مسدود کرده است

همان طور که مشخص است یک آنتن در بالای بدنه بوده و آنتن های دیگر زیر بال هواپیما قرار دارند. بال دید مستقیم آنتن ها را سد کرده است و فرمولی که برای این حالت ارائه شد به صورت زیر است:

$$I = 20 \log f + \sec \frac{\theta}{4} \times [20 \log(D_1 + D_2)] - 28 + SA \quad (27)$$

که زاویه θ ، D_1 و D_2 در شکل (۱۴) نشان داده شده اند. آقای بال و اشمیتر برای اعتبارسنجی فرمول های خود با ترکیب ۸۳ آنتن در ۲ بالگرد و ۲ هواپیما، صحت آن ها را تایید کردند و افزودند میزان خطا بین +۹ و -۱۶ دسی بل می باشد. و توضیح دادند که به خاطر تجربی بودن این فرمول برای به دست آوردن دقت می توان به فرمول های دیگری هم دست یافت. ولی از آنجایی که در مساله محاسبه تزویج میان آنتن ها حاشیه ایمنی تعریف می شود، به نظر نمی رسد از اعتبار این فرمول ها کاسته شود.

برای مثال می خواهیم تزویج بین آنتن ۱ و ۴ را در مثال فوق محاسبه کنیم. مقادیر زیر را در فرمول جایگزین می نماییم:

$$L=0$$

$$D=\pi \times 0.203m$$

$$F=121.5 \times 12 \text{ MHz}$$

$$a=.0203$$

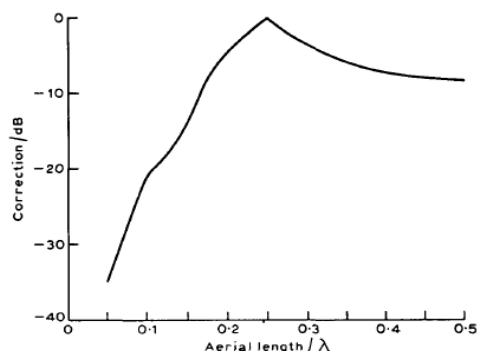
$$SA=0$$

$$K=0.203/15$$

در این صورت مقدار تزویج برای دو آنتن از فرمول ذکر شده

چنین به دست می آید:

$$C = -20 \log_{10}^{(kF^{1.75})} - 20 \log_{10}^{(D+L)} + 28 + SA = -41.45$$



شکل (۱۳): نمودار تصحیح طول آنتن در فرمول ایزولاسیون

در این نمودار تنها برای طول تا ۰/۵ لاندا نشان داده شده است. آنها توضیح دادند که برای طول های بیشتر، نمودار به صورت نیم دایره های تکراری در می آید که از ۰/۲۵ شروع و دوره تناوب آنها ۰/۵ می باشد. بنابراین، برای طول ۰/۷۵ لاندا، مقدار SA صفر، برای ۰/۸ مقدار SA، ۳ و برای طول ۱ لاندا برابر ۸ خواهد شد.

برای محاسبه طول موثر، فرض می کنیم آنتن مونوپل در باند ۲۲۵ تا ۴۰۰ مگاهرتز کار می کند. ولی فرکانس خارج از باند ۵۰ و ۸۰۰ مگاهرتز است. برای فرکانس های گفته شده:

الف- زمانی که آنتن در فرکانسی پایین تر از فرکانس کاریش کار می کند. در این حالت برای پیدا کردن طول موثر از رابطه زیر استفاده می شود:

$$l = \frac{\lambda}{4} \times \frac{50}{225} \quad (25)$$

یعنی صورت فرکانس خارج از باند و مخرج حد پایین فرکانس کاری است.

ب- زمانی که آنتن در فرکانسی بالاتر از فرکانس کاریش کار می کند. در این حالت برای پیدا کردن طول موثر از رابطه زیر استفاده می شود:

$$l = \frac{\lambda}{4} \times \frac{800}{312.5} \quad (26)$$

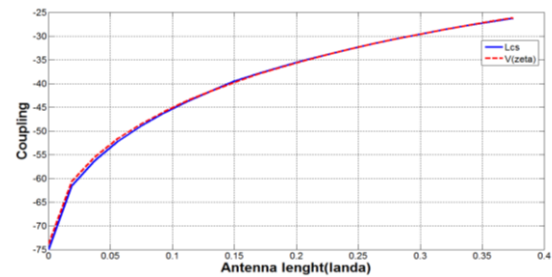
که صورت فرکانس خارج از باند و مخرج فرکانس مرکزی باند فرکانسی است.

بنابراین، در حالت های خارج از باند نیز طبق موارد گفته شده می توان جمله تصحیح SA را به فرمول تجربی افزود.

حالت دیگر در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

۵- نتایج محاسباتی و شبیه‌سازی

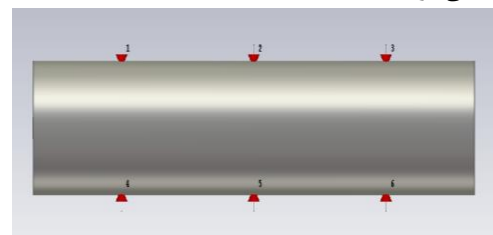
با استفاده از نرم‌افزار متلب کدی نوشته شد که کوتاه‌ترین مسیر بین آنتن‌ها روی استوانه محاسبه شد. مشاهده گردید که بین مقادیر محاسبه‌شده برای تلفات سطحی از طریق انتگرال‌های سطحی فوک، با تلفات سطحی تجربی همبستگی بسیار خوبی وجود دارد. بنابراین به شرط به‌دست آوردن پارامتر ξ ، می‌توان از فرمول تجربی تلفات سطحی استفاده نمود.



شکل (۱۵): نمودار تزویج با محاسبه L_{CS} و محاسبه $V(\xi)$

برای شروع اعتبارسنجی شبیه‌سازی نرم‌افزار، همانند پروژه IPAS [۱۹]، یک استوانه با همان ابعاد و همان آنتن‌های مونوپل بر روی آن، شبیه‌سازی گردید. لازم است ذکر شود که این استوانه مدل، مقیاس $\frac{1}{11}$ از بدنه یک هواپیمای مسافربری است. بنابراین فرکانس‌های کاری هواپیما هم باید ۱۲ برابر شود. ابعاد استوانه، ۲۰۳ میلی‌متر شعاع و ۲۵۰۰ میلی‌متر طولش است. تمامی شبیه‌سازی‌ها با تحلیل گر حوزه زمانی یا گذرا انجام گرفته اند.

در شکل (۱۶) این استوانه به همراه پورت‌های تغذیه آنتن‌ها دیده می‌شود.



شکل (۱۶): استوانه استفاده شده جهت شبیه‌سازی

در این نمودارها اعداد ۱ تا ۹ بیانگر تزویج‌های زیر هستند:

۱ و ۴	۱
۱ و ۵	۲
۱ و ۶	۳
۲ و ۴	۴
۲ و ۵	۵
۲ و ۶	۶
۳ و ۴	۷
۳ و ۵	۸
۳ و ۶	۹

با توجه به نمودارهای شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی همبستگی قابل قبولی وجود دارد. لازم به توضیح است به خاطر محدودیت‌های شبیه‌سازی و با توجه به بزرگ بودن هندسه مساله، لازم است در مش‌بندی سازه تجدید نظر شود. به عبارت دیگر در حالت مش‌بندی عادی تعداد این مش‌ها فوق‌العاده زیاد است. برای مثال با حالت‌های پیش فرض نرم‌افزار، برای فرکانس ۱۳۰۸۰ مگاهرتز، تعداد مش‌ها به ده‌ها میلیارد می‌رسد که عملاً انجام شبیه‌سازی را غیرممکن می‌سازد. بنابراین چاره‌ای که می‌توان اندیشید آن است که از قابلیت مش‌بندی محلی استفاده کنیم. بدین منظور چگالی مش‌ها را در نواحی آنتن زیاد کرده و برای بقیه مساله از حالت مش‌بندی کمتر استفاده می‌کنیم. بنابراین، پس از بررسی‌های بسیار و مقایسه نتایج مش‌بندی برای حالت پیش فرض نرم‌افزار و حالت کاهش‌یافته برای حالت‌های ساده، مشخص شد که همبستگی قابل قبولی بین نتایج وجود دارد.

از طرف دیگر، در فرمول‌های بال و اشمیتز و نیز پراکندگی، فرض بر آن است که استوانه تست، بی‌نهایت است. در صورتی که مقادیر اندازه‌گیری‌شده بر روی استوانه با طول محدود انجام یافته است. بنابراین، اثرات تفرق و انکسار در لبه‌ها، می‌تواند باعث اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده توسط فرمول‌ها شود. مساله دیگر، گین آنتن‌ها در فرمول‌های استفاده شده است. مشخص نیست که در پروژه IPAS کدام گین در فرمول پراکندگی، مد نظر بوده است. ولی با توجه به مقدار استفاده شده، به نظر می‌رسد، گین در جهت مسیر ژئودزیک یا همان کوتاه‌ترین مسیر، مد نظر است.

با توجه به موارد گفته شده و از آنجایی که بایستی حاشیه اطمینان در طراحی سازگاری الکترومغناطیسی در نظر گرفت، وجود اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده، قابل پذیرش می‌نماید.

همچنین مشخص شد که اختلاف بین فرمول بال و اشمیتز و مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر از اختلاف بین فرمول پراکندگی و مقادیر اندازه‌گیری شده است. ولی نکته مهم آن است که نمودار مقادیر فرمول پراکندگی و مقادیر اندازه‌گیری شده هم‌نوا ولی با اختلاف هستند و بنابراین در تخمین مقادیر نامشخص، بهتر از فرمول بال و اشمیتز می‌باشند.

در حالتی هم که آنتن‌ها بیرون از سطح قرار دارند، نتایج زیر گرفته شده است.

جدول (۲): مقایسه نتایج فرمول های تزویج و پراکندگی با نتایج

شبیه سازی برای ارتفاع آنتن های دی بل با مضاربی از طول موج

تلفات شبیه سازی شده	تلفات کل با استفاده از فرمول پراکندگی	تلفات کل محاسبه شده با Lsc	فاصله آنتن ها (mm)
-۶۸/۴۶	-۳۳/۹۶	-۴۴/۰۷	۱۵۰
-۶۱/۸۴	-۳۷/۰۴	-۴۳/۴۵	۲۰۰
-۵۸/۵۶	-۴۰/۱۶	-۴۳/۳۶	۲۵۰
-۵۷/۷۲	-۴۲/۸۶	-۴۳/۲۸	۳۰۰
-۵۷/۴۸	-۴۵/۴۳	-۴۳/۴۱	۳۵۰
-۵۷/۸۳	-۶۷/۷۸	-۴۳/۶۰	۴۰۰
-۵۷/۸۶	-۵۰/۰۲	-۴۳/۹۰	۴۵۰
-۵۷/۸۱	-۵۲/۰۴	-۴۴/۱۶	۵۰۰
-۵۸/۰۶	-۵۴/۰۰	-۴۴/۵	۵۵۰
-۵۹/۰۲	-۵۵/۸۱	-۴۴/۸۳	۶۰۰
-۶۰/۰۵	-۵۷/۴۸	-۴۵/۱۱	۶۵۰

با توجه به جدول های (۱ و ۲) می توان به موارد زیر اشاره کرد:
 ۱- مهمترین نکته در محاسبه گین تزویج آنست که در هر دو فرمول محاسباتی، گین آنتن ها وارد نشده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد با افزایش ارتفاع آنتن، گین آنتن ها در جهت کوتاه ترین مسیر بین دو آنتن کاهش می یابد. بنابراین باید کاهش گین آنتن ها را در نظر گرفت. از دیدگاه سازگاری الکترومغناطیسی، محاسبات بر مبنای بدترین حالت ها یعنی گین صفر دسی بل، به دست آمده است.

۲- هر قدر ارتفاع آنتن ها کمتر شود، دقت محاسبات بر مبنای تلفات Lsc بیشتر می شود.

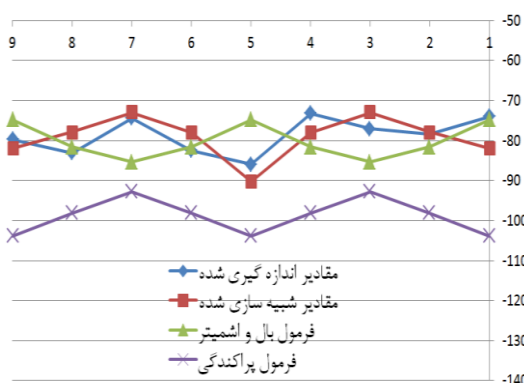
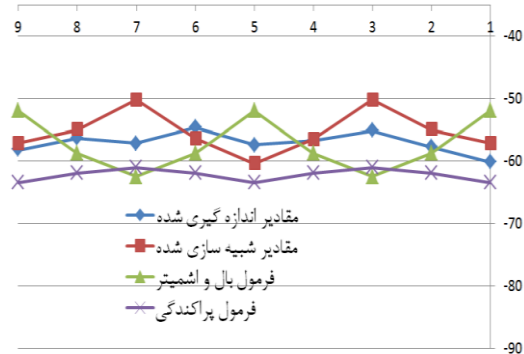
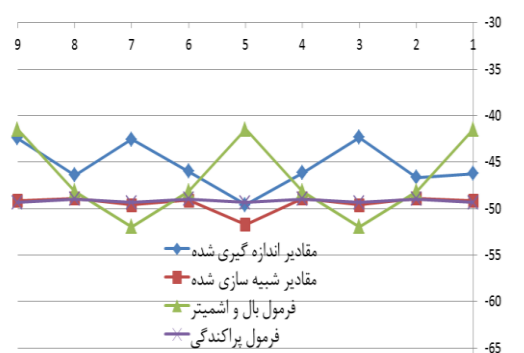
۳- با کاهش ارتفاع، تقریب فرمول های p و q نادرست است. زیرا اساساً فرمول های p و q با ارتفاع آنتن ها نسبت عکس دارند. بنابراین، با کاهش ارتفاع، آنتن ها مقدار نامعقولی به دست می دهند و مقادیر محاسبه شده، بی اعتبار می شوند.

۴- همان طور که در جدول (۲) دیده می شود، با افزایش ارتفاع آنتن، نتایج فرمول های پراکندگی (p و q) بهتر از فرمول های تزویج (U و V) است. این مساله قابل انتظار هم می باشد زیرا اساساً فرمول های U و V برای آنتن های نزدیک سطح و فرمول های p و q برای آنتن های بسیار بالاتر از سطح، نتایج معقولی می دهند.

۵- نتایج دو فرمول نشان می دهد که بعد از حدود ۲ طول موج، نتایج فرمول های پراکندگی بهتر از فرمول های تزویج است.

۶- اختلاف بین دو فرمول در ارتفاعات بالا بیشتر از ۱۵ dB نیست.

۷- می توان چنین نتیجه گرفت که تا حدود ۲ طول موج، فرمول های تزویج یا U و V عملکرد خوبی دارند. و بعد از دو طول موج فرمول های پراکندگی، دقیق تر جواب می دهند. هر چند استفاده از فرمول های U و V برای ارتفاعات بالای آنتن ها غیر دقیق است، ولی از نظر EMC، نادرست نیست.



شکل (۱۶): نمودار میزان تزویج برای فرکانس های ۱۴۵۸ (شکل بالا)، ۲۹۱۶ (شکل وسط) و ۱۳۰۸۰ (شکل پایین) مگاهرتز

جدول (۱): مقایسه نتایج فرمول های تزویج و پراکندگی با نتایج شبیه سازی برای ارتفاع کم آنتن های مونوپل

تلفات شبیه سازی شده	تلفات کل با استفاده از فرمول پراکندگی	تلفات کل محاسبه شده با Lsc	فاصله آنتن ها (mm)
-۴۹/۸۷	-۶۰/۹۴	-۶۰/۹۹	۰
-۵۵/۳۶	-۵۶/۱۵	-۵۶/۱۸	۵
-۵۸/۳	-۵۴/۳۰	-۵۴/۳۱	۱۰
-۵۹/۵۹	-۵۲/۹۵	-۵۲/۹۵	۱۵
-۶۰/۳۶	-۵۱/۸۷	-۵۱/۸۶	۲۰
-۶۰/۷۹	-۵۰/۹۷	-۵۰/۹۵	۲۵
-۶۱/۱۲	-۵۰/۱۹	-۵۰/۱۷	۳۰
-۶۱/۰۷	-۴۲/۵۲	-۴۹/۴۹	۳۵
-۶۱/۰۳	-۴۸/۹۲	-۴۸/۹	۴۰
-۶۰/۷۶	-۴۸/۳۹	-۴۸/۳۶	۴۵
-۶۰/۵۹	-۴۷/۹۱	-۴۷/۸۸	۵۰

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، میزان تزویج بین آنتن‌های هواپیما بررسی شد. برای سادگی محاسبات، هواپیما با یک استوانه طویل مدل گردید. در حالتی که آنتن‌ها در دید هم بودند، میزان تزویج ناخواسته با استفاده از فرمول فریز محاسبه می‌شوند. ولی زمانی که آنتن‌ها در دید هم قرار ندارند، مساله قدری پیچیده بوده و محاسبه تزویج مستلزم محاسبه میزان تلفات موج سطحی می‌باشد. نشان داده شد که برای آنتن‌هایی که روی سطح و یا اندکی بالاتر از سطح قرار دارند، فرمول‌های داده شده، به خوبی تخمین درستی از میزان تزویج بین آنتن‌ها را نشان می‌دهند. ولی زمانی که آنتن‌ها در ارتفاع بالایی از بدنه قرار دارند، لازم است از فرمول‌های پراکندگی استفاده کرد. ولی به دلیل پیچیدگی فرمول‌های پراکندگی، استفاده از فرمول‌های تزویج که برای ارتفاع کم درست هستند، نیز می‌تواند در این حالت استفاده شود ولی میزان تزویج بالاتری از مقدار واقعی نشان می‌دهد که از نظر سازگاری الکترومغناطیسی، حالت سختگیرانه‌ای بوده و نادرست نیست.

۷- مراجع

- [10] G. L. James, "Geometrical theory of Diffraction for electromagnetic waves," Peter Peregrinus LTD, 1976.
- [11] H.-T. Chou, P. H. Pathak, and M. Hsu, "Extended uniform geometrical theory of diffraction solution for the radiation by antennas located close to an arbitrary smooth perfectly conducting convex surface," Radio Science, vol. 32, no. 4, pp. 1297-1317, July-August 1997.
- [12] M. I. Skolnik, "Introduction To Radar Systems," third edition, McGraw-Hill, 2001.
- [13] D. A. Bull and B. W. Smithers, "Aerial isolation : a study of the interaction between co-sited aerials," Radio and Electronic Engineer, vol. 49, Issue 6, 1979.
- [14] D. A. Weston, "Electromagnetic compatibility: principles and applications," Marcel Dekker Inc., 2000.
- [15] P. H. Pathak and N. N. Wang, "An Analysis Of The Mutual Coupling Between Antennas On A Smooth Convex Surface," Department of the Navy Naval Air development Center, 1978.
- [16] A. Ghasemi, A. Abedi, and F. Ghasemi, "Propagation Engineering in Radio Links Design," Springer, 2013.
- [17] M. J. L. Drolet, "Advances in Path Loss Algorithm in the antenna to antenna propagation with AAPG EMC analysis program," A thesis in the department of Electrical and computer engineering, Concordia University, 1989.
- [18] F. cisco and S. D. Adana, "Practical Applications of Asymptotic Techniques in Electromagnetics," Artech House, 2011.
- [19] "IPAS Installed Performance of Antennas on AeroStructures," Contract No AST3-CT-2003-503611, Start date of project: 1st November 2003 Duration: 39 months, 2003.
- [1] M. Thereza and B. Macnamara, "Introduction To Antenna Placement And Installation," John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [2] D. Chatterjee, "Evaluation of a class of creeping wave formulation with applications to practical modeling of aircraft antenna EMI coupling problems," A thesis in the department of Electrical and computer engineering, Concordia University, 1992.
- [3] M. Donald Siegel, "Aircraft Antenna-coupled Interference Analysis," Electromagnetic Compatibility Symposium Record, IEEE, 1969.
- [4] China owns everything, <http://defence.pk/threads/russian-fifth-generation-fighter-to-exceed-rivals.69760/page-13>
- [5] A. J. Polo, T. G. Mackay, and A. Lakhtakia, "Electromagnetic Surface Waves," Elsevier Inc., 2013.
- [6] L. Barclay and L. Barclay, "Propagation of Radio waves," 3rd Edition, The Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [7] I. A. Kotelnikov, "Electromagnetic surface waves on a conducting cylinder," Elsevier, vol. 379, Issues 16-17, pp. 1187-1195, 19 June 2015.
- [8] W. L. Stutzman, "Antenna Theory and Design," Third Edition, Wiley, 2013.
- [9] N. A. Logan, "General Research In Diffraction Theory," Lockheed Aircraft corporation, 1959.

Modeling and Calculation of Coupling Between Antenna on Aircraft by Calculation of Geodesic

S. M. J. Razavi*, N. Yosefzadeh, S. H. Mohseni Armaki

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 25/08/2016, Accepted: 16/10/2016)

Abstract

Antennas that are installed on the aircraft, must have minimum mutual coupling so that the function of the transmitter and receiver will not be interfered. For coupling calculation, we must obtain wave pass from transmitter antenna to receiver antenna. In case that antennas are LOS, this pass is a direct pass. But in case that antennas are NLOS, a kind of surface wave causes mutual coupling. The best way for calculation of coupling is through obtaining geodesics. Then by calculation of surface loss, we can get the amount of coupling. if the aircraft is modeled with a cylinder, calculation of geodesics is easy and practical. the advantage of this approximation is that we can extend it for any aircrafts with cylindrical fuselages. in this approximation, the effect of obstacles and diffraction in edges is not considered. in this paper, results of mutual coupling calculation, results of simulation as well as the measured data is compared in approximated model of the aircraft. It will finally be shown that in the worst case, calculation results are not greater than 15db.

Keywords: antenna pattern, scattering parameters, creeping wave, emc, UTD

* Corresponding author E-mail: razavismj@mut.ac.ir