

سیستم اندازه‌گیری پراکندگی راداری AMPV

احد توکلی
استادیار

حمید حیدر
دانشجوی کارشناسی ارشد

هرمز بوذری
محقق

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله یک سیستم اندازه‌گیری مایکروویو را مطرح خواهیم کرد که می‌تواند سطح مقطع راداری اجسام را در باند X، در تمامی زوایای مشاهده و با پلاریزاسیون‌های متفاوت ارسال و دریافت، به صورت خودکار اندازه‌گیری کرده و با فرمت‌های گوناگون نمایش دهد. در این سیستم از یک تحلیلگر شبکه ۱ به عنوان گیرنده استفاده شده است که همراه با یک جاروبگر فرکانسی و یک مجموعه آزمایش بخش اصلی سیستم را تشکیل می‌دهند. این تجهیزات توسط یک سخت‌افزار واسطه ابتکاری به کامپیوتر متصل شده‌اند. تمامی اندازه‌گیری‌ها در داخل یک اتاقک بدون انعکاس انجام می‌شود. کالیبراسیون این سیستم اندازه‌گیری نیز براساس یک مدل خطای دقیق شامل ۳۰ جمله خطا صورت می‌پذیرد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری بر روی صفحات فلزی با ابعاد گوناگون به خوبی با نتایج محاسبات نظری مطابقت دارند.

AMPV Measuring System for Radar Scattering

H. Heydar
M.Sc Student

A. Tavakoli
Assistant Professor

H. Bouzari
Researcher

Electrical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

In this paper a microwave measuring system observing the radar cross-section of objects in X band from all angles and through different polarizations is described. In this system a network analyzer is used and all measurements are performed within a non-reflective chamber. The results of measurements on metal sheets with different dimensions are well compatible with numerical calculations.

سطح مقطع راداری ((Radar Cross Section (RCS)، یک جهتی (Monostatic)، هدف (Target)، مجموعه آزمایش (Test Set)، سیستم اندازه‌گیری قطبی (Polarimetric Measurement System)، تحلیلگر شبکه (Network Analyzer)

مقدمه

امروزه رادارها در سیستم‌های مخابرات نظامی و سنجش از دور، نقش کلیدی را برعهده دارند و کاربرد آنها که در گذشته تنها محدود به تشخیص هدف و تعیین فاصله آن می‌شد، اکنون ابعاد بسیار گسترده‌تری یافته است. شایان ذکر است که بکارگیری یک سیستم اندازه‌گیری میکروویو برای پشتیبانی هر نوع سیستم راداری عملیاتی، امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد و در این بین، اندازه‌گیری سطح مقطع راداری به عنوان کمیتی مهم جهت تعیین پرتو انعکاسی اجسام و مواد گوناگون در باند فرکانسی مورد نظر از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

این کمیت در حالت کلی به پارامترهای گوناگونی بستگی دارد از جمله: جنس و نوع جسم، ابعاد و شکل جسم، فرکانس یا طول موج ورودی، پلاریزاسیون موج ورودی و زاویه تابش یا امتداد دید [2], [3]. اندازه‌گیری این کمیت که در فرکانس‌های متفاوت و با پلاریزاسیون‌های مختلف انجام می‌شود، اطلاعات لازم در مورد وضعیت موج بازتابیده شده از جسم را به دست می‌دهد که بکارگیری آنها در سیستم‌های راداری، اهمیت بسیار زیادی دارد.

برای تعیین سطح مقطع راداری اجسام دو روش کلی وجود دارد که مکمل یکدیگر هستند [۱]:

(۱) محاسبه و تخمین بر پایه نظریه‌های موجود.

(۲) اندازه‌گیری مستقیم بر روی نمونه‌های واقعی.

البته هنگامی که اندازه‌گیری بر روی نمونه واقعی امکان‌پذیر نباشد، اندازه‌گیری بر روی مدل آن انجام می‌شود که بر پایه اشل بندی فرکانس^۱ صورت می‌پذیرد. در این پروژه روش دوم مورد نظر ماست و برای تعیین سطح مقطع راداری اجسام، یک سیستم اندازه‌گیری میکروویو را مطرح خواهیم کرد که در آن از یک تحلیلگر شبکه برداری دو کاناله در باند فرکانسی L تا X به عنوان گیرنده استفاده شده است.

در این سیستم یک ترکیب OMT و آنتن معمولی به

کار گرفته می‌شود که با اتصال پایانه‌های تحریک H و V از OMT به پایانه‌های ۱ و ۲ مجموعه آزمایش امکان ارسال و دریافت امواج میکروویو با پلاریزاسیون‌های خطی افقی "H" و عمودی "V" فراهم می‌گردد. بدین ترتیب امکان انجام و اندازه‌گیری‌های قطبی سطح مقطع راداری اجسام در باند X به وجود می‌آید.

به منظور تسهیل در امر اندازه‌گیری، از یک سیستم جاروب در باند فرکانسی C تا X استفاده شده است که دارای توان RF خروجی مناسب می‌باشد. اندازه‌گیری در میدان راه دور اجسام و به صورت یک جهتی و به ازای ۴ وضعیت متفاوت پلاریزاسیون خطی ارسال و دریافت (VV, VH, HV, HH) و در تمامی زوایای مشاهده هدف انجام می‌شود. تمامی مراحل اندازه‌گیری به صورت خودکار انجام شده و توسط کامپیوتر کنترل می‌شود.

در این پروژه برای کالیبره کردن سیستم، یک مدل خطای ۲۰ جمله‌ای را مطرح می‌کنیم که بر پایه آن می‌توان سیستم اندازه‌گیری را طی ۲ مرحله اصلی کالیبره کرد. در مرحله نخست، سیستم اندازه‌گیری از محل گیرنده تا پایانه‌های اندازه‌گیری شماره ۱ و ۲ با ۱۲ جمله خطا کالیبره می‌شود. در مرحله دوم سیستم اندازه‌گیری را با بکارگیری ۱۸ جمله خطا از پایانه‌های تحریک H و V (متصل شده به پایانه‌های اندازه‌گیری) تا محل قرارگیری هدف، کالیبره می‌کنیم.

اندازه‌گیری در داخل یک اتاقک بدون انعکاس صورت می‌پذیرد که در مدل خطای سیستم، اثر انعکاس‌های ناخواسته آن با ۴ جمله خطا در نظر گرفته شده است. در این سیستم اندازه‌گیری به دلیل استفاده از یک تحلیلگر شبکه برداری، علاوه بر اطلاعات دامنه، اطلاعات فاز را نیز داریم که امکان گسترش بعدی سیستم را جهت انجام اندازه‌گیری‌های دیگر فراهم می‌کند.

سیستم اندازه‌گیری انعکاس راداری

اساس کار همه سیستم‌های اندازه‌گیری انعکاس راداری یکی است و آن هم اینکه: یک سیگنال رادیویی یا موج RF به طرف جسم ارسال می‌گردد و سیگنال برگشت داده شده از جانب جسم در گیرنده دریافت شده و تغییرات اعمال شده بر روی آن، اندازه‌گیری می‌شود. این تغییرات در ۴ پارامتر سیگنال اصلی بوجود می‌آید: دامنه، فاز، پلاریزاسیون، و فرکانس. بنابراین وظیفه

اطلاعات فاز را در بر نخواهد داشت. به طور کیفی سطح مقطع راداری یک جسم معیاری از اندازه جسم در یک طول موج و پلاریزاسیون مشخص می‌باشد و به طور معمول با واحد dBm^2 در نظر گرفته می‌شود [۲]:

$$\sigma (\text{dBm}^2) = 10 \log_{10} [\sigma (\text{m}^2)] \quad (1-2)$$

از جدیدترین دست آوردهای سیستم‌های اندازه‌گیری انعکاس می‌توان به صنعت پنهان سازی اشاره کرد که در آن تشخیص یک هدف مورد نظر نیست، بلکه پنهان کردن آن از دید رادار دشمن مورد نظر است که شامل بکارگیری روش‌های گوناگون جهت کاهش انعکاس موج RF از اجسام می‌باشد و امروزه در هواپیماهای جنگی، کشتی‌ها، خودروهای نظامی و ... کاربرد پیدا کرده است و یکی از مهمترین طرح‌های استراتژیک هر کشور محسوب می‌شود.

روش اندازه‌گیری RCS بر مبنای پارامترهای پراکنندگی

در حالت کلی موج تشعشعی از آنتن فرستنده و همچنین موج پراکنده شده از جسم، دارای هر دو مؤلفه پلاریزاسیون خطی H و V می‌باشند [۷]. شکل زیر را در نظر بگیرید که در آن فرض بر آن است که آنتن و هدف در فاصله‌ای به حد کافی دور ($r \rightarrow \infty$) نسبت به طول موج، ابعاد هدف و ابعاد دهانه آنتن قرار گرفته‌اند، به گونه‌ای که بتوان موج ورودی در محل هدف E_i و موج پراکنندگی از آن در محل آنتن E_s را با تقریب خوبی صفحه‌ای فرض کرد:

اصلی سیستم عبارتست از: استخراج اطلاعات لازم مربوط به هدف با اندازه‌گیری و پردازش تغییرات حاصله در موج RF برگشت داده شده از جانب هدف به طرف گیرنده و نیز حذف موج RF برگشتی از محیط پیرامون.

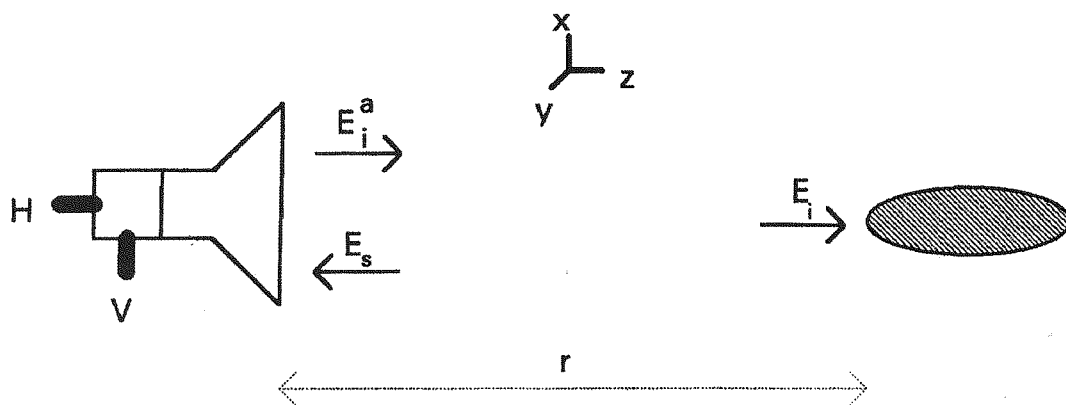
توان پراکنده شده از یک جسم را می‌توان به صورت حاصلضرب چگالی توان ورودی و یک سطح مؤثر^۲ در نظر گرفت. این سطح را مقطع پراکنندگی^۲ جسم گوئیم. در حالتی که جهت پراکنندگی مورد نظر ما هم جهت با توان ورودی باشد، این پارامتر سطح مقطع راداری نامیده می‌شود [۴]، [۲].

با فرض اینکه گیرنده و هدف در میدان راه دور یکدیگر قرار دارند، هدف را یک پراکننده نقطه‌ای در نظر می‌گیریم. حال می‌توانیم فرض کنیم که این پراکننده نقطه‌ای، انرژی ورودی را به شکل یکسانگرد^۳ پراکنده می‌کند. تعریف سطح مقطع راداری براساس همین پراکنندگی یکسانگرد و با فرض اینکه موج ورودی صفحه‌ای می‌باشد صورت می‌پذیرد. براساس تعریف RCS این کمیت برابر است با نسبت توان برگشتی از هدف به توان ورودی، به شرطی که آنتن و هدف در میدان راه دور یکدیگر قرار داشته باشند، پس می‌توانیم بنویسیم:

$$\text{RCS: } \sigma (\text{m}^2) = 4\pi r^2 \frac{|\bar{E}_s|^2}{|\bar{E}_i|^2} \quad (1)$$

$$r \rightarrow \infty$$

اندازه‌گیری براین اساس، مشخصه پراکنندگی هدف را به ازای یک زاویه دید خاص، یک فرکانس خاص و یک پلاریزاسیون خاص، به دست می‌دهد و هیچگونه



شکل (۱) پارامترهای پراکنندگی و سطح مقطع راداری قطبی

$$m, n = H \text{ or } V \quad (5)$$

اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی هدف مطابق با رابطه (۵) متناظر است با اندازه‌گیری پارامترهای سطح مقطع راداری قطبی آن [۸]. شکل زیر نمای کلی یک سیستم اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی یک جسم (سطح مقطع راداری) ساختاردهی شده است:

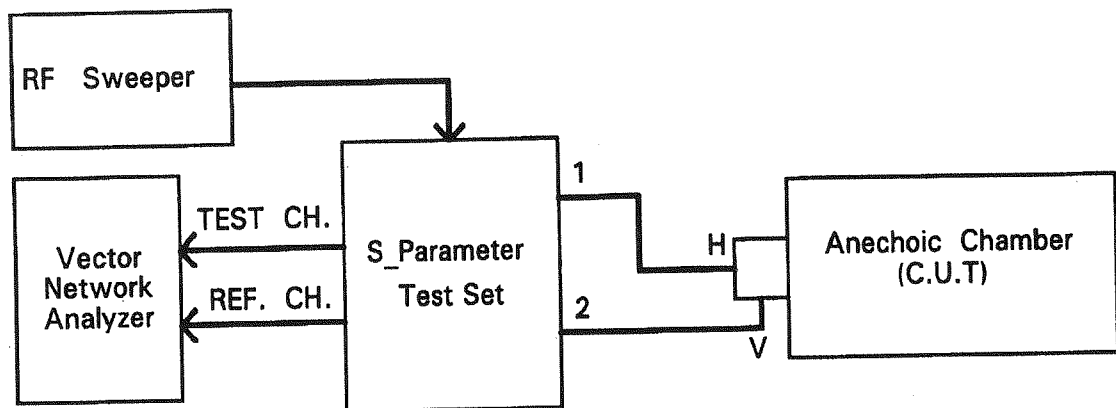
$$\sigma_{HH} = 4\pi |S_{11}|^2; \quad \sigma_{VH} = 4\pi |S_{21}|^2$$

$$\sigma_{HV} = 4\pi |S_{12}|^2; \quad \sigma_{VV} = 4\pi |S_{22}|^2 \quad (6)$$

ولی به هر حال باید به این نکته توجه داشت که منابع خطای بسیاری وجود دارند که چه در داخل سیستم اندازه‌گیری (از جمله خود مجموعه آزمایش) و چه در محیط پیرامون (از جمله اتاقک) نتایج اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار می‌دهند و باید اثر آنها را در محاسبات وارد نمود.

معرفی سیستم اندازه‌گیری پراکندگی راداری AMPV

شکل زیر ساختار کلی این سیستم را نشان می‌دهد که در آن یک تحلیلگر شبکه برداری از نوع 8410 هسته مرکزی را تشکیل می‌دهد:



شکل (۲) سیستم اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی.

$$\vec{E}_i = \vec{E}_H^i + \vec{E}_V^i (E^i_H \hat{X} + E^i_V \hat{Y}) e^{-j\vec{K} \cdot \vec{r}}$$

$$\vec{E}_S = \vec{E}_H^S + \vec{E}_V^S (E^S_H \hat{X} + E^S_V \hat{Y}) \frac{e^{j\vec{K} \cdot \vec{r}}}{r} \quad (2)$$

در رابطه (۲) کمیت \vec{K} و \vec{r} به ترتیب عدد موج و بردار مکان می‌باشند که با روابط زیر مشخص می‌شوند:

$$\vec{K} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z}$$

$$\vec{r} = r_x \hat{x} + r_y \hat{y} + r_z \hat{z} \quad (3)$$

به ازای نوع پلاریزاسیون خطی ارسال و دریافت، هدف مزبور می‌تواند ۴ پاسخ مختلف داشته باشد که مشخصه انعکاسی آن را تعیین می‌کند [۸]:

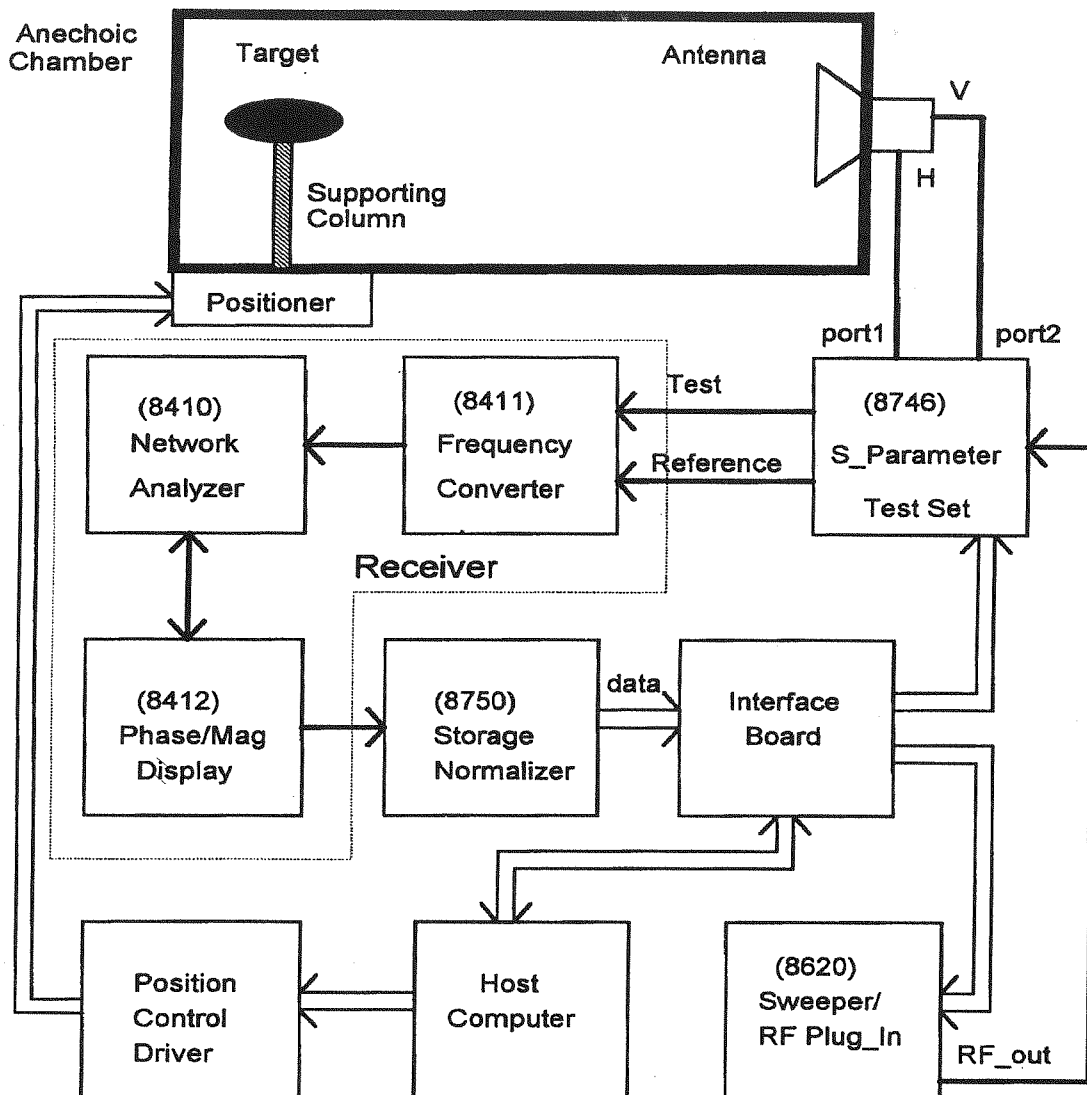
$$E_H^S = (\Gamma_{HH} E_H^i + \Gamma_{HV} E_V^i) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

$$E_V^S = (\Gamma_{VH} E_H^i + \Gamma_{VV} E_V^i) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (4)$$

در روابط بالا پارامترهای Γ_{mn} کمیت‌های مختلط (شامل دامنه و فاز) بوده و بیانگر ضرایب انعکاس جسم می‌باشند که اندیس m پلاریزاسیون موج دریافتی و اندیس n پلاریزاسیون موج ارسالی را نشان می‌دهد.

$$\sigma = 4\pi \left(\frac{r |E_S|}{|E_i|} \right)^2 = 4\pi |\Gamma|^2$$

$$\sigma_{mn} = 4\pi |\Gamma_{mn}|^2$$



شکل (۳) نمودار بلوکی سیستم اندازه‌گیری RCS بر مبنای تحلیلگر شبکه برداری hp8410A.

از آنها استخراج می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده در این سیستم نیز به گونه‌ای طراحی شده که کاربر به راحتی می‌تواند توسط آن سیستم اندازه‌گیری را برای پهنای باند مورد نظر برنامه‌ریزی کرده و نتایج حاصله را با فرمت‌های گوناگون دریافت نماید. ابتدا براساس مدل خطای موجود، سیستم اندازه‌گیری کالیبره شده و تمامی ضرایب خطا محاسبه می‌شوند، سپس اندازه‌گیری اصلی آغاز شده و نتایج حاصله براساس ضرایب مربوطه کالیبره می‌شوند. این محاسبات در تمامی نقاط پهنای باند فرکانسی که مورد نظر است (پهنای جاروب) صورت می‌پذیرد.

آنچه که در این سیستم اندازه‌گیری می‌شود، نسبت سیگنال آزمایش به سیگنال مرجع می‌باشد که در اینجا (بعد از کالیبراسیون) متناسب با توان موج پراکنندگی از هدف به توان موج ورودی و یا همین سطح مقطع راداری هدف خواهد بود. در این طرح یک مورد واسطه طراحی و ساخته شد که از راه پایانه سریال کامپیوتر دستورات لازم را دریافت نموده و بر پایه آن جاروبگر فرکانس و مجموعه آزمایش را برنامه‌ریزی می‌کند و همچنین اطلاعات دامنه و فاز اندازه‌گیری شده طی هر جاروب فرکانسی را از دستگاه نرمالیزه کننده داده‌ها دریافت کرده و برای کامپیوتر ارسال می‌کند. این اطلاعات در برنامه اصلی مورد استفاده قرار گرفته و اطلاعات RCS

مدل خطا و کالیبراسیون سیستم اندازه گیری الف) مجموعه آزمایش:

مدل خطای مورد استفاده برای مجموعه آزمایش به شکل زیر است که در برگیرنده ۱۲ جمله خطا بوده و جزو مدل های متداول در تحلیلهای پیشرفته امروزی از جمله 8510 می باشد و براساس ساختار داخلی مجموعه آزمایش مطرح می گردد [۵]:

جملات خطا در این مدل به شرح زیر می باشند:

- خطای دایرکتیویته EDF, EDR

- خطای ایزولاسیون EXF, EXR

- خطای تطبیق منبع ESF, ESR

- خطای تطبیق بار ELF, ELR

کالیبراسیون مجموعه آزمایش براساس الگوریتم

ساده زیر در ۳ بخش کلی زیر انجام می پذیرد:

(۱) کالیبراسیون انعکاس.

استانداردها: OPEN, SHORT, PERFECT LOAD

اندازه گیری: S11, S22

محاسبه: EDF, ESF, ERF; EDR, ESR, ERR

(۲) کالیبراسیون انتقال.

استاندارد: THROUGH CONNECTION

اندازه گیری: S11, S21, S22, S12

محاسبه: ELF, ETF, ELR, ETR

(۳) کالیبراسیون ایزولاسیون.

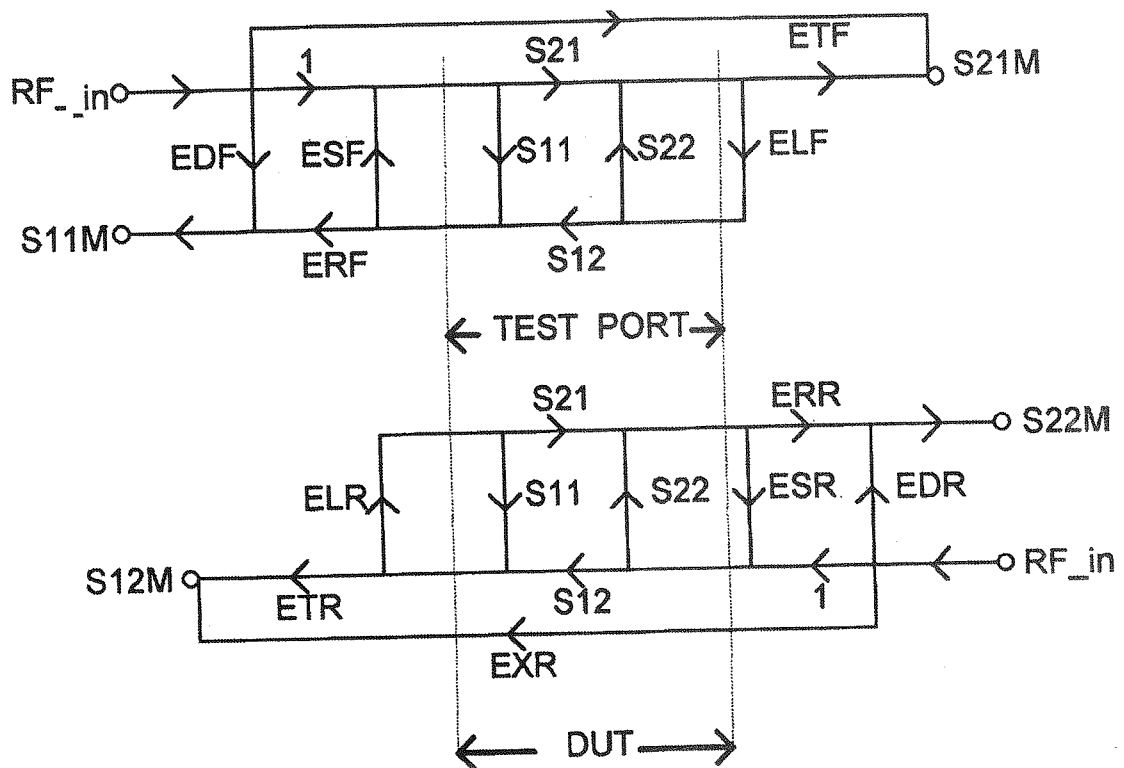
استاندارد: PERFECT LOAD

اندازه گیری: S12, S21

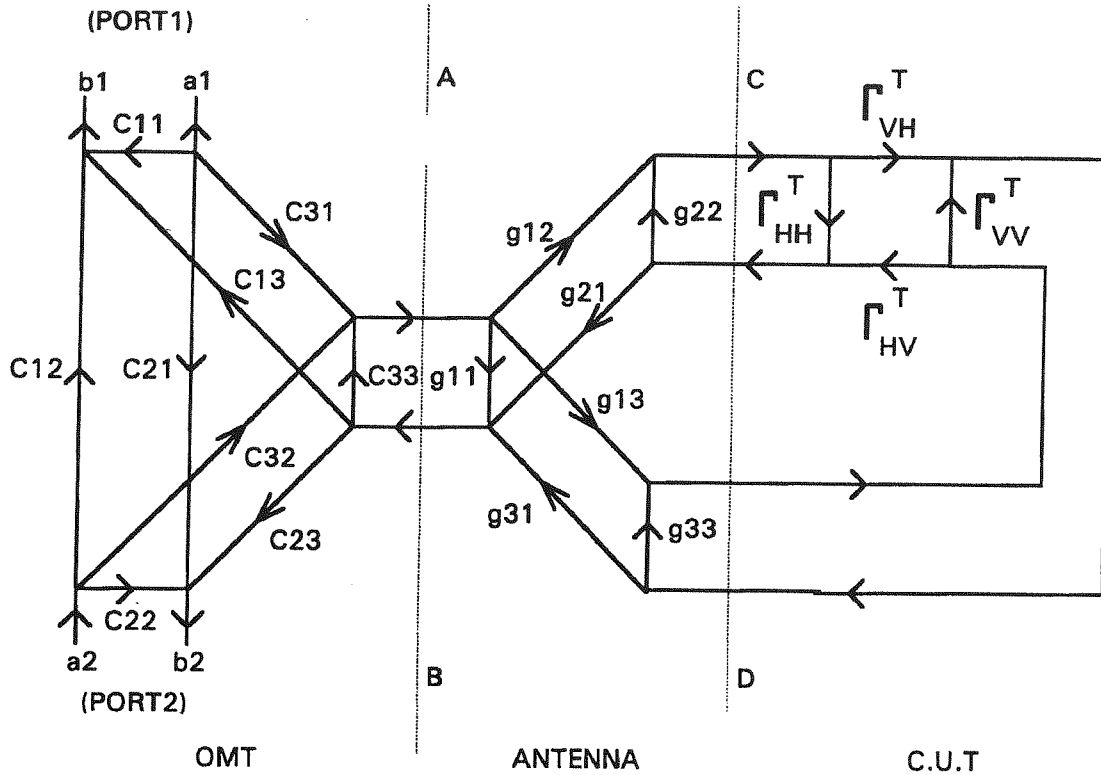
محاسبه: EXF, EXR

ب) مجموعه اتاقت:

مدل خطای پیشنهادی در این مقاله برای مجموعه اتاقت (شامل اتاقت خالی، آنتن و OMT) به شکل زیر می باشد که در برگیرنده ۱۸ جمله خطا بوده و سیستم اندازه گیری را از پایانه های تحریک آنتن تا محل قرارگیری هدف مدل می کند [۱۰]:



شکل (۲) مدل خطای ۱۲ جمله ای مجموعه آزمایش.



شکل (۵) مدل خطای ۱۸ جمله‌ای اتاقک، آنتن و OMT

اندازه گیری: $S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$
 محاسبه: ۹ جمله خطا (E_1, \dots, E_9)
 - کالیبراسیون آنتن:

استانداردها: FITTED ABSORBER, TRIHEDRAL,
 DIHEDRAL

اندازه گیری: S_{11}, S_{22}
 محاسبه: ۵ جمله خطا (E_{10}, \dots, E_{14})
 - کالیبراسیون اتاقک خالی:

اندازه گیری: $S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$
 محاسبه: ۴ جمله خطا ($\Gamma_{HH}^w, \Gamma_{VH}^w, \Gamma_{HV}^w, \Gamma_{VV}^w$)

روش دیگری که در این سیستم برای کالیبره کردن مجموعه اتاقک مورد استفاده قرار گرفت، نرمالیزاسیون اسکالر بود. در این روش تمامی نتایج حاصل از اندازه گیری نسبت به نتایج اندازه گیری اتاقک خالی نرمالیزه می شوند.

نتایج اندازه گیری و مقایسه با محاسبات نظری

سطح مقطع راداری صفحات فلزی به ابعاد

منابع خطای در نظر گرفته شده در این مدل که در قالب ۱۸ جمله خطا در محاسبات وارد می شوند، عبارتند از:

(۱) عدم تطبیق امپدانس بین پایانه های اندازه گیری و پایانه های تحریک H و V از OMT، عدم تطبیق امپدانس بین OMT و آنتن، عدم تطبیق امپدانس آنتن و اتاقک.

(۲) وجود انعکاس های ناخواسته مرتبه اول و بالاتر داخل اتاقک به دلیل آرمانی نبودن جاذب های به کار رفته در آن.

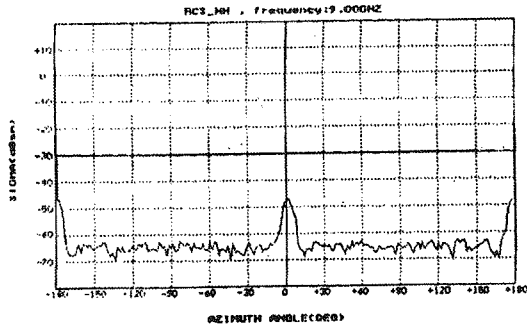
(۳) اثر دیپلریزاسیون خود آنتن و نیز عدم تقارن پرتو آنتن در صفحات پلاریزاسیون V و H.

(۴) عدم ایزولاسیون کامل بین کانال های H و V در OMT.

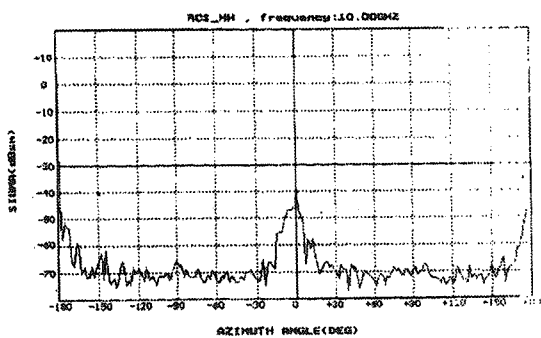
کالیبراسیون مجموعه اتاقک نیز در ۳ بخش اصلی انجام می شود و طی آن تمامی ۱۸ جمله خطا که ۴ جمله آن مربوط به اتاقک خالی می شود، محاسبه می گردند:

- کالیبراسیون OMT.

استانداردها: OPEN, SHORT, PERFECT LOAD

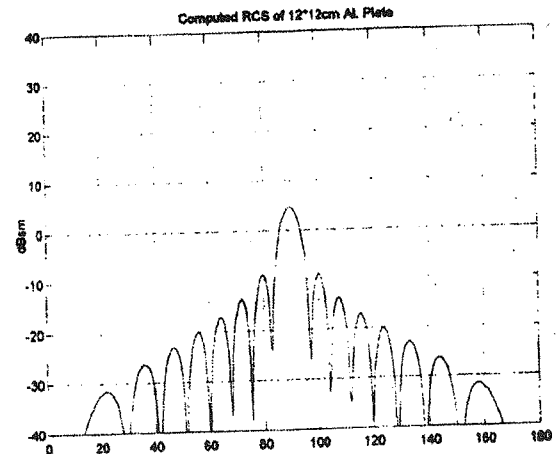


شکل (۸)

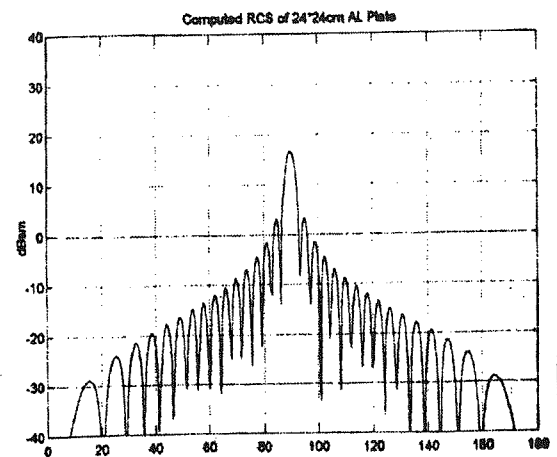


شکل (۹)

12*12cm و 24*24cm محاسبه شده به روش Physical Optics و همچنین نتایج اندازه گیری بر روی نمونه های واقعی در صفحات بعدی آورده شده است. شایان ذکر است که تمامی مقادیر اندازه گیری شده در این سیستم با اعمال ضریب اشل 50dBsm نمایش داده می شوند. حال با در نظر گرفتن این اشل بندی و مقایسه نسبی نتایج محاسبات با مقادیر اندازه گیری شده مشاهده می شود که اختلاف آنها بسیار ناچیز (کمتر از 2dBsm) می باشد.



شکل (۶) سطح مقطع راداری صفحه هادی 12*12cm.



شکل (۷) سطح مقطع راداری صفحه هادی 24*24cm

ضمیمه

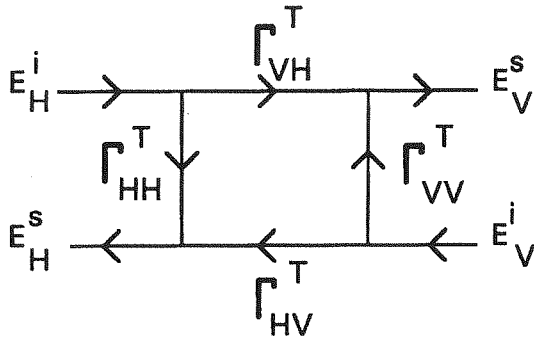
مدلسازی مجموعه اتاقک

مجموعه اتاقک شامل ۳ بخش: اتاقک خالی، آنتن و OMT می باشد که در سیستم اندازه گیری مورد بحث در این مقاله با یک مدل خطای ۱۸ جمله ای (شکل ۵) در نظر گرفته شده است و در این ضمیمه نحوه مدلسازی و فرمول های مربوطه را آورده ایم.

(۱) مدلسازی اتاقک مورد آزمایش:

$$\begin{bmatrix} E_H^s \\ E_V^s \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{\infty} \begin{bmatrix} \Gamma_k^{Wk_{HH}} & \Gamma_k^{Wk_{HV}} \\ \Gamma_k^{Wk_{VH}} & \Gamma_k^{Wk_{VV}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} e^{-\Gamma_{RK}^+}$$

$$\begin{bmatrix} \Gamma^t_{HH} & \Gamma^t_{HV} \\ \Gamma^t_{VH} & \Gamma^t_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} e^{-\Gamma^R}$$



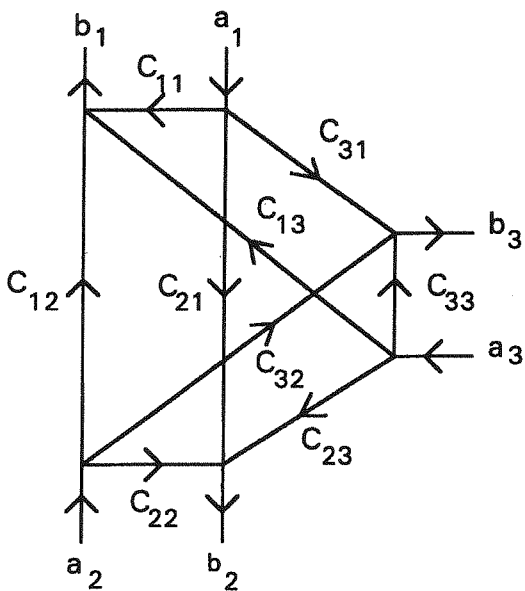
شکل (ب) مدل خطای اتافک بدون انعکاس و جسم موجود در آن

نکات کلیدی

- (۱) اتافک به عنوان بخشی از سیستم اندازه گیری مایکروویو در نظر گرفته شده است.
- (۲) در مدل، کانال های تحریک با پلاریزاسیون H, V در نظر گرفته شده است.
- (۳) کانال های اندازه گیری سیستم تا محل هدف امتداد داده شده است.

(۲) مدلسازی OMT به عنوان یک قطعه ۳ پایانه ای:

$$\begin{cases} b_1 = S_{11} a_1 + C_{12} a_2 + C_{13} a_3 \\ b_2 = S_{21} a_1 + C_{22} a_2 + C_{23} a_3 \\ b_3 = S_{31} a_1 + C_{32} a_2 + C_{33} a_3 \end{cases}$$



شکل (ج) مدل خطای OMT

$$E_H^s = \left[\sum_{k=1}^{\infty} (\Gamma^{Wk} HH e^{-\gamma R_k}) + \Gamma^t HH e^{-\gamma R} \right] E_H^i + \left[\sum_{k=1}^{\infty} (\Gamma^{Wk} HV e^{-\gamma R_k}) + \Gamma^t HV e^{-\gamma R} \right] E_V^i$$

$$E_V^s = \left[\sum_{k=1}^{\infty} (\Gamma^{Wk} VH e^{-\gamma R_k}) + \Gamma^t VH e^{-\gamma R} \right] E_H^i + \left[\sum_{k=1}^{\infty} (\Gamma^{Wk} VV e^{-\gamma R_k}) + \Gamma^t VV e^{-\gamma R} \right] E_V^i$$

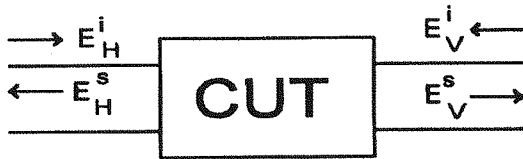
$$\begin{bmatrix} E_H^s \\ E_V^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma^T_{HH} & \Gamma^T_{HV} \\ \Gamma^T_{VH} & \Gamma^T_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} \quad R = 2r; r > \frac{2D^2}{\lambda}$$

$$\Gamma_{mn}^T = \Gamma_{mn}^W + \Gamma_{mn}^t; \quad m, n = H \text{ or } V$$

- Γ^T : Total reflection
- Γ^W : Wall reflection
- Γ^t : target reflection

$$\begin{cases} b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2 \\ b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_H^s = \Gamma_{HH}^T E_H^i + \Gamma_{HV}^T E_V^i \\ E_V^s = \Gamma_{VH}^T E_H^i + \Gamma_{VV}^T E_V^i \end{cases}$$



شکل (الف) تشابه پارامترهای پراکندگی S و مشخصه های انعکاسی \$\Gamma\$ در مدلسازی جسم مورد آزمایش (DUT) و اتافک مورد آزمایش (CUT).

معادلات اساسی مدل

$$\left[E_{11} + \rho_H \left(\frac{S_{11M} - E_1}{E_2} - E_{10} \right) \right] \Gamma_{HH}^T + E_{12} \Gamma_{VH}^T = \frac{S_{11M} - E_1}{E_2} - E_{10}$$

(a) PORT 1: H-EXCITATION

(a)

$$\left\{ \begin{aligned} S_{11M} &= E_1 + E_2 \Gamma_H \\ S_{21M} &= E_3 + \frac{E_4 \Gamma_H}{C_1 - E_5 \Gamma_H} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left[E_{11} + \rho_H \left(\frac{S_{21M} - E_3}{E_4 + E_5 (S_{21M} - E_3)} - E_{10} \right) \right] \Gamma_{HH}^T + E_{12} \Gamma_{VH}^T = \frac{S_{21M} - E_3}{E_4 + E_5 (S_{21M} - E_3)} - E_{10}$$

(b)

$$\Gamma_H \approx g_{11} + \frac{g_{12} g_{21} \Gamma_{HH}^T + g_{12} g_{31} \Gamma_{VH}^T}{1 - g_{22} \Gamma_{HH}^T} \Rightarrow$$

$$\Gamma_H \approx E_{10} + \frac{E_{11} \Gamma_{HH}^T + E_{12} \Gamma_{VH}^T}{1 - \rho_H \Gamma_{HH}^T} \quad (2)$$

$$\left[E_{13} + \rho_V \left(\frac{S_{22M} - E_6}{E_7} - E_{10} \right) \right] \Gamma_{VV}^T + E_{14} \Gamma_{HV}^T = \frac{S_{22M} - E_6}{E_7} - E_{10}$$

(c)

(b) PORT 2 : V - EXCITATION

$$\left[E_{13} + \rho_V \left(\frac{S_{12M} - E_8}{E_9 + E_5 (S_{12M} - E_8)} - E_{10} \right) \right] \Gamma_{VV}^T + E_{14} \Gamma_{HV}^T = \frac{S_{12M} - E_8}{E_9 + E_5 (S_{12M} - E_8)} - E_{10}$$

(d)

$$\left\{ \begin{aligned} S_{22M} &= E_6 + E_7 \Gamma_V \\ S_{12M} &= E_8 + \frac{E_9 \Gamma_V}{(1 - E_5 \Gamma_V)} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} S_{12M} &= E_8 + \frac{E_9 \Gamma_V}{(1 - E_5 \Gamma_V)} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\Gamma_{mn}^T = \Gamma_{mn}^w + \Gamma_{mn}^l ; m, n = H \text{ or } V$$

زیر نویس ها

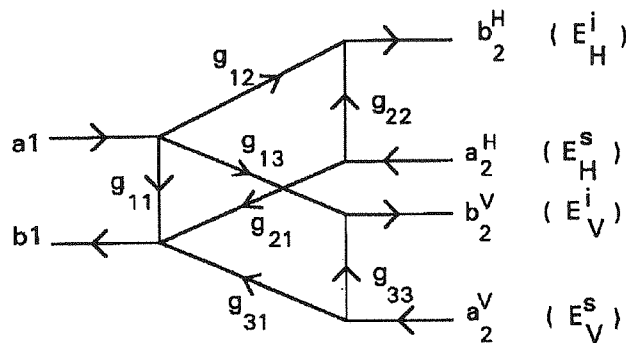
1 - Frequency Scaling

2 - Scattering Cross Section

3 - Isotropic

$$\Gamma_V \approx g_{11} + \frac{g_{13} g_{31} \Gamma_{VV}^T + g_{13} g_{21} \Gamma_{HV}^T}{1 - g_{33} \Gamma_{VV}^T} \Rightarrow$$

$$\Gamma_V \approx E_{10} + \frac{E_{13} \Gamma_{VV}^T + E_{14} \Gamma_{HV}^T}{1 - \rho_V \Gamma_{VV}^T} \quad (6)$$



شکل (د) مدل خطای آنتن.

- [1] N.C. Currie, "Radar Reflectivity Measurement, Techniques & Applications", Artech House, Norwood, MA, 1989.
- [2] E.F. Knott, M.T. Tuley, and J.F. Schaeffer, "Radar Cross Section", Artech House, Norwood, MA, 1985.
- [3] G. T. Ruck, "Radar Cross Section Handbook", Vols I & II, Plenum Press, New York, 1970.
- [4] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", Mc Graw-Hill, New York, 1980.
- [5] G. H. Bryant, "Principles of Microwave Measurements", Peter Peregrinus, London, 1988.
- [6] A. E. Baily, "Microwave Measurements", Peter Peregrinus Ltd., London, 1989.
- [7] A. Ishimant, "Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering", Prentice-Hall, 1980.
- [8] M. Ali Tassoudji, K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "Design Consideration and Implementation of the LCX Polarimetric Scatterometer (POLAR-SCAT)", Radiation Laboratory Department of Electrical Engineering and Computer Science, The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, June 1989.
- [9] Kamal Sarabandi, Yisok Oh, "RCS Measurement of Polarimetric Active Radar Calibrators", Radiation Laboratory Department of Electrical Engineering and Computer Science, June 1990.
- [10] Hormoz Bouzari, Ahad Tavakoli, Hamid Hehdar, "A Comprehensive Error Model For Polarimetric Measurement Systems", in Proc. 1996 IEEE/AP-S International Symposium, Baltimore, Maryland, pp. 208-211, 1996.