الگوریتمهای پردازش سیگنال ماوراصوت برای تعیین خواص چندلایه‌ای های نازک

صابر شربتی، استاد، دانشگاه هوایی شهید ستاری
Comunicate_engineer@yahoo.com
امین اکبری، دانشجوی کارشناسی، دانشگاه هوایی شهید ستاری
Amin123313313@gmail.com
میلاد جلیلیان، دانشجوی کارشناسی، دانشگاه هوایی شهید ستاری
Avmilad.jalilian@gmail.com
قاسم عزیزی، دانشجوی کارشناسی، دانشگاه هوایی شهید ستاری
Ghasem13760612@gmail.com

Archive of SID

مقدمه

کاربرد مواد چندلایه‌ای در دهه گذشته، به دلیل ویژگیهای مهندسی عالی آنها، افزایش یافته است. در بسیاری از موارد، ضخامت لایه‌ها باید کاملا صحیح، اندازه‌گیری و کنترل شوند. به همین منظور روشهای مختلفی برای اندازه‌گیری ضخامت چندلایه‌ای‌های نازک، گسترش یافته است. برخی از این روشها عبارتند از: اشعه ایکس، میکروسکوپ نوری، القا مغناطیسی و جریان فوکو. اندازه‌گیری ضخامت بوسیله تکنیک "زمان صعود" ماوراصوت، در محیطهای کنترل فرایند بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.انتشار موج بین دو مرز لایه دارای یک تاخیر زمانی است که می‌تواند برای تخمین ضخامت لایه مورد استفاده قرار گیرد. بدبختانه، همینکه ضخامت لایه کاهش می‌یابد، اکوی دوم بر روی قسمتی از اکوی اول قرار می‌گیرد.

برای کاهش این روی‌هم افتادگی، ماوراصوت با فرکانس بالاتر، مورد استفاده قرار گرفته است. به هر حال، برای یک اندازه‌گیری خاص بالاترین فرکانس ماوراصوت دارای محدودیت است. این محدودیت به خاطر فاکتورهای متعددی است که برخی از آنها در زیر آورده شده‌اند:

الف) ماکزیمم فرکانسی که توسط پالسرهای ماوراصوت[1] می‌تواند تولید شود.

ب) پهنای باند دریافت کننده ماوراصوت[1]

[1] Ultrasonic Pulser

www.SID.ir

پ) پاسخ فرکانسی مبدل[2]

ت) خواص انتشاری ماده به مانند تضعیف بالاتر و فرکانسهای بالاتر که می‌تواند محتوای فرکانسی سیگنال ماوراصوت را محدود کند.

از آنجا که تکنیکهای ماوراصوت TOF استاندارد، محدود شده هستند، الگوریتمهای پردازش سیگنال دیگری برای جداکردن اکوهای رویهم افتاده گسترش یافته‌اند. برای مثال، در چند لایه‌ای‌هایی که در داخل مواد با تضعیف بالا مانند مخزن سوخت پلاستیکی، جاسازی شده‌اند، سیگنال ماوراصوت h(t) به فرکانسهای پایین‌تر شیفت داده می‌شود. اینکار بدین علت انجام می‌شود که در فرکانسهای بالا، تضعیف زیاد است. یک تخمین بر پایه مدل، اخیرا پیشنهاد شده است که از الگوریتم SAGE[3] برای مدلسازی بهره می‌گیرد.

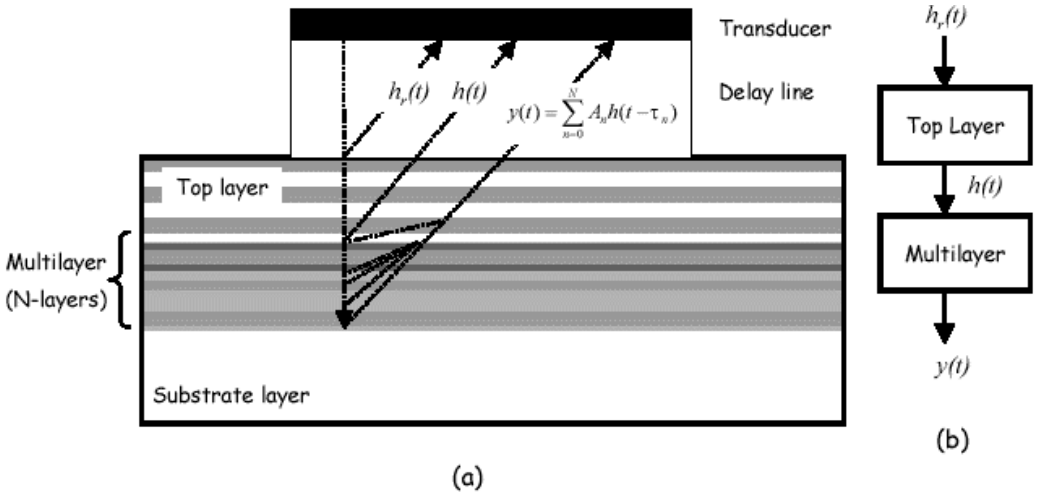
سیگنالهای اکوی ماوراصوت با استفاده از این الگوریتم مدل می‌شوند و ضخامت لایه‌های نازک با دقت و صحت و محاسبات کارآمد، بدست می‌آید. این روش ماوراصوت را بصورت جمع موجک‌های گوسی[4] مدل می‌کند. در نتیجه سیگنال مربوط به چند لایه‌ای می‌تواند بصورت جمع اکوهای گوسی با دامنه مدوله شده و دارای تاخیر زمانی بیان شود. مزیت این روش در این است که تخمین N اکویی پیچیده قبلی به یک سری تخمین تک اکویی تبدیل می‌شود و بنابراین محاسبات انعطاف‌پذیرتری خواهیم داشت. ما الگوریتم و نتایج آنرا بر روی ضخامت یک بازدارنده نازک نشان خواهیم داد. این بازدارنده در داخل یک مخزن سوخت پلاستیکی چند لایه قرار گرفته است.

1 -مدل ریاضی سیگنال ماوراصوت

با گسترش ابزارآلات دیجیتالی ماوراصوت، تلاشها بر روی گسترش قابلیت اندازه‌گیری این ابزارآلات بوسیله پردازش سیگنالهای دیجیتالی[5] و الگوریتمها، متمرکز شد. سیگنالهای ماوراصوت دیجیتالی می‌شوند و سیگنال منتجه بصورت بلادرنگ مورد پردازش قرار می‌گیرد تا نتایج اندازه‌گیری بدست آید. بنابراین، اندازه‌گیری ماوراصوت با استفاده از تکنیکهای مهندسی سیستم، می‌تواند بصورت ریاضی بیان شود. سیگنال ماوراصوت که از میان یک چند لایه‌ای عبور می‌کند، می‌تواند با استفاده از یکسری ضربه‌ها مدل شود. ضریب انعکاس واسطها و موقعیت زمانی آنها، TOF بین واسطها است. شکل (1)

[1] Ultrasonic Receiver
[2] Transducer
[3] Space-Alternating Generalized Expectation -Maximization
[4] Gaussian Wavelet
[5] Digital Signal Processing

Archive of SID
www.SID.ir



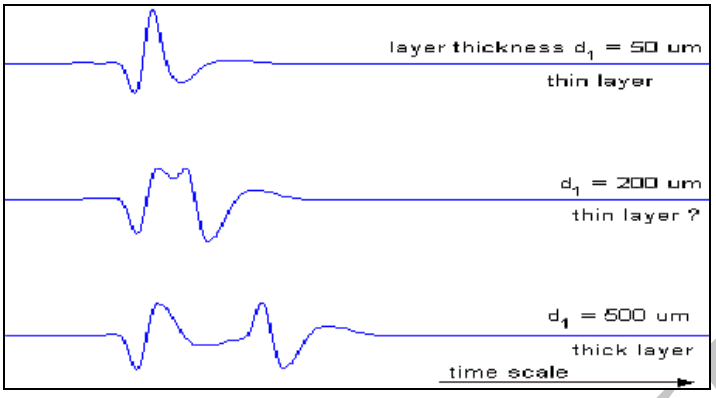
شکل1: (**a**) بلوک دیاگرام مربوط به سنجش ماوراصوت یک نمونه چند لایه‌ای (**b**) مدل معادل.

در تکنیک پالس- اکوی ماوراصوت، یک مبدل منفرد، هم برای ارسال و هم برای دریافت استفاده می‌شود و ما می‌توانیم پاسخ ماده را بصورت بلوک دیاگرام شکل(1) مدل کنیم. تکنیکهای سنجش از یک مبدل با "خط تاخیر"[1] استفاده می‌کنند و در بسیاری از موارد چندلایه‌ای در داخل یک ماده قرار داده می‌شود.

اکویی که توسط مبدل تولید می‌شود از میان خط تاخیر عبور کرده و قسمتی از آن از مرز بین خط تاخیر-ماده منعکس می‌شود. ما این اکو را بصورت $h_r(t)$ با گذشتن از "لایه بالایی"[2] می‌رسد. این سیگنال را با عنوان $h(t)$ می‌شناسیم. لایه بالایی بصورت یک ماده با تلفات می‌شناسیم که تاخیر زمانی و تضعیف آن تابعی از فرکانس است. به همین دلیل اکو در طی عبور از لایه بالایی دچار تغییر در شکل و دامنه می‌شود. پدیده انتشار می‌تواند بصورت سیستم خطی نشان داده شده در شکل $(1b)$ مدل شود.

[1] Delay Line
[2] Top Layer

www.SID.ir



شکل 2 : سیگنالهای مدل دو اکو را که از لایه بازدارنده داخل مخزن سوخت منعکس شده‌اند را نشان می‌دهند، ضخامت بازدارنده به ترتیب 50، 200و 500 میکرومتر است.

پاسخ فرکانسی لایه بالایی بوسیله $M(w)$ و فرمول زیر بیان می‌شود.

$$M(w)=e^{-a(w)x}e^{-j\frac{xw}{V_p(w)}} \qquad (1)$$

در این فرمول x فاصله انتشاری ($x=2d$ ، d ضخامت لایه بالایی است.)، $a(w)$ تضعیف ماده و $V_p(w)$ سرعت فازی ماده است. اگر d برابر صفر باشد، چند لایه‌ای، لایه جلویی نمونه خواهد بود و $h(t)$ برابر $h_r(t)$ خواهد شد.

در مورد پلی‌تیلن با چگالی بالا (HPDE)، وابستگی فرکانس تضعیف بصورت $0/5\,db/mm/MHz$ گزارش شده است، بنابراین کل تضعیفی که در فرکانس $12\,MHz$ برای یک لایه بالایی معمولی با ضخامت 6mm رخ می‌دهد، در حدود $50\,db$ خواهد بود. ضخامت لایه‌ها بوسیله رشته TOFهای مربوط به اکوهای ایجاد شده در واسطها $t_N,...,t_2,t_1$ مشخص می‌شود. برای لایه‌های ضخیم، سیگنالهای اکو در حوزه زمان از هم جدا هستند و بنابراین ما می‌توانیم TOF را با تشخیص مکان هر کدام از آنها در محور زمان، تعیین کنیم. برای لایه‌های نازک، اکوها همپوشانی داشته و بنابراین TOF با روش استاندارد قابل آشکارسازی نیست. ما فرض می‌کنیم که در چند لایه‌ای‌های نازک تلفات انتشاری و تفرق قابل چشم‌پوشی است.

شکل(2) شبیه‌سازی سیگنال اکوی مربوط به یک بازدارنده اتیلن وینیل الکل (EVOH) با ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد که در زیر یک لایه پلی‌تیلن با چگالی بالا قرار داده شده است. این لایه‌ها در یک مخزن سوخت پلاستیکی چند لایه‌ای قرار دارند. بالاترین سیگنال (شکل2)، اکوهای

Archive of SID
www.SID.ir

دو تایی در حوزه زمان از هم قابل تشخیص نیستند و این اتفاق در لایه‌های نازک روی می‌دهد. همینکه ضخامت لایه افزایش می‌یابد، برای مثال بالاتر از $200\,mm$ ، دو اکو در حوزه زمان از هم جدا می‌شوند. این اتفاق همیشه در لایه‌های ضخیم روی می‌دهد. با استفاده از ضرایب انعکاسی، سیگنال پخشی برگشتی از N لایه با نام $y(t)$ بصورت جمع‌آثار N+1 اکو نشان داده شده می‌شود.

$$y(t)=\sum_{n=0}^{N}A_n h(t-t_n) \qquad (2)$$

2 -الگوریتم مدلسازی سیگنال برای تعیین خواص چند لایه‌ها

معادله‌ی (2) رابطه بین سیگنال ورودی $h(t)$ و سیگنال خروجی $y(t)$ را در شکل $1b$ نشان می‌دهد. فرض کنید که ما سیگنال ورودی $h(t)$ را داریم، می‌توان ضرایب A_n و t_n را با استفاده از الگوریتمهای Inversion-Deconvolution مانند فیلترینگ Wiener بدست آورد. راهکار دیگری که برای محاسبه ضرایب $A_n, t_n (n=0,...,N)$ مورد استفاده قرار می‌گیرد، "الگوریتم جستجوی مینیمم حداقل مربعات"[1] است که خطای مدل در معادله (2) را مینیمم می‌کند. این یک مساله بهینه‌سازی چندبعدی با بار محاسباتی سنگین و پتانسیل همگرایی پایین است. در این بخش، ما به ارایه یک راه حل بر پایه الگوریتمهای "تخمین مدل"[2] می‌پردازیم. راهکاری که در اینجا بیان می‌شود بر پایه تجزیه اکوی حاصل از چند لایه‌ای با نام $y(t)$ بر حسب موجک‌های گوسی است. نتایج این روش با سرعت و همگرایی بیشتر بدست می‌آیند. اکوی $h(t)$ بصورت جمع آثار M موجک گوسی مدل می‌شود.

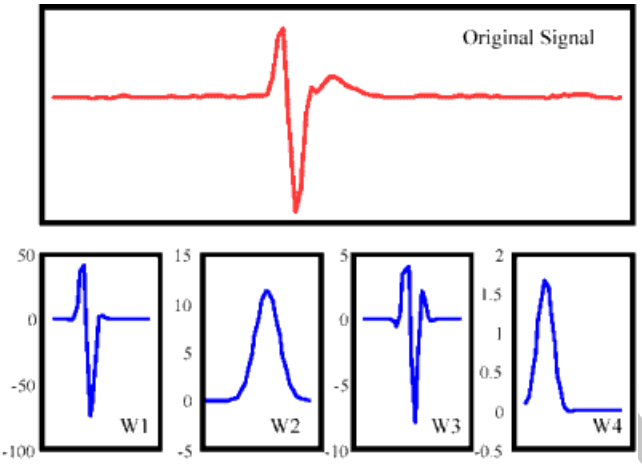
$$h(t)=\sum_{m=1}^{M}C_m e^{-a_m(t-l_m)^2}\cos(2pf_m(t-l_m)+\Phi_m) \qquad (3)$$

که f_m فرکانس مرکزی، a_m ضریب پهنای باند، C_mدامنه، Φ_m فاز، l_m تاخیر زمانی موجک اکوی گوسی m و M درجه مدل است. بنابراین هرموجک بصورت برداری بر حسب پنج پارامتر بیان می‌شود، $q_m=[f_m a_m C_m \Phi_m l_m]$، و ما می‌توانیم معادله (2) را بصورت جمع و جورتر زیر بنویسیم:

$$h(t)=\sum_{m=1}^{M}f(q_m;t) \qquad (4)$$

[1] Least Square Minimization Search Algorithm
[2] Model Estimation

Archive of SID
www.SID.ir



شکل 3 : (a)سیگنال تابع بدست آمده(منحنی بالایی). (b)موجکهای گوسی محاسبه شده به عنوان پایه‌ای برای توصیف تابع.

بهینه‌ترین انتخاب برای تعداد موجکها (M) با استفاده از قاعده MDL یا "مینیمم طول توصیف"[1] بدست می‌آید. همینکه پارامتر q_m تعریف شد، می‌توانیم معادله‌ی (2) را بر حسب موجکهای گوسی بازنویسی کنیم:

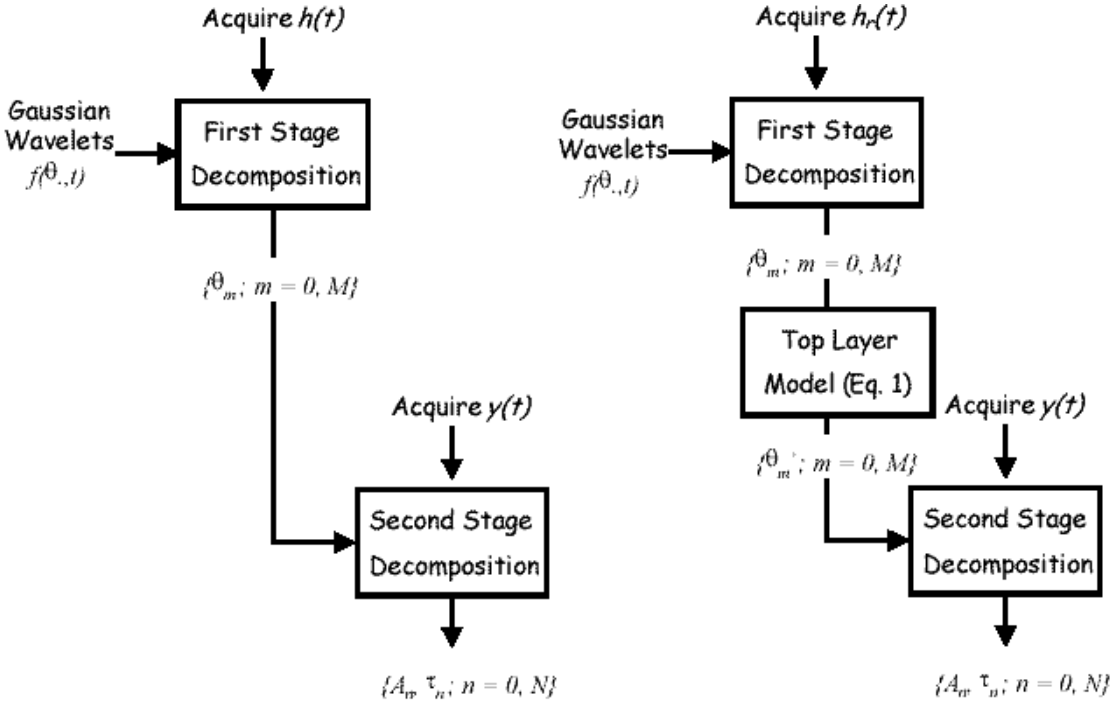
$$y(t)=\sum_{n=0}^{N} A_n \sum_{m=1}^{M} f(q_m;t-t_n) \qquad (5)$$

که $q_m(m=1,2,...,M)$ دانسته فرض می‌شود، و A_n ، t_n برای $n=0,1,...,N$ متغیرهای مجهول ما هستند.

مزیت اصلی معادله‌ی (5) این است که توابع پایه موجکهای گوسی $\{f(q_m;t)\}$ خوشرفتار و بدون نویز هستند. بنابراین الگوریتم پیشنهادی را می‌توان با استفاده از شکل(3) توضیح داد.

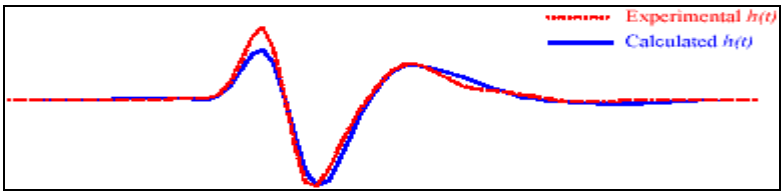
[1] Minimum Description Length:MDL

Archive of SID
www.SID.ir



شکل 4 : بلوک دیاگرام الگوریتم "مدلسازی سیگنال" برای تعیین ضخامت **N** لایه‌ای. **(a)** با استفاده از تابع **(b)** با استفاده از تابع .

سیگنال ماوراصوت $h(t)$ که برای تعیین خواص چندلایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، به یک سری موجکهای گوسی تجزیه می‌شود. بنابراین خروجی اولین مرحله پارامترهای موجک می‌باشد. سپس این پارامترها ثابت نگه داشته شده و برای آنالیز اکوی بدست آمده از چندلایه‌ای یا $y(t)$ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تجزیه ثانویه، تنها پارامترهای متغیر، دامنه و تاخیر زمانی مربوط به $N+1$ اکوی بدست آمده از چند لایه‌ای می‌باشد.



شکل 5 : مقایسه تابع تعیین شده توسط محاسبه و تابع تجربی.

Archive

www.SID.ir

بنابراین الگوریتم نیاز به جمع‌آوری در سیگنال دارد، $h(t)$ و $y(t)$.شکل(1) را به یاد بیاورید، کاملا واضح است که وقتی لایه بالایی وجود نداشته باشد، $h(t)$ با $h_r(t)$ معادل است و بنابراین می‌تواند بوسیله اندازه‌گیری اکوی حاصل از انعکاس انتهای خط تاخیر بدست آید.

در حالی که چندلایه‌ای در داخل یک ماده جاسازی شده است ما می‌توانیم $h_r(t)$ را بدست آوریم و بوسیله معادله (1) سیگنال $h(t)$ را تخمین بزنیم. بنابراین در مورد چندلایه‌ای جاسازی شده، الگوریتم تعریف شده در شکل (3b) مناسب است که در آن یک مرحله اضافی استفاده از معادله یک وجود دارد. لازم به ذکر است که تصحیح مربوط به تلفات انتشاری لایه بالایی به موجکهای گوسی اعمال می‌گردد نه به سیگنال $h_r(t)$ بدست آمده.

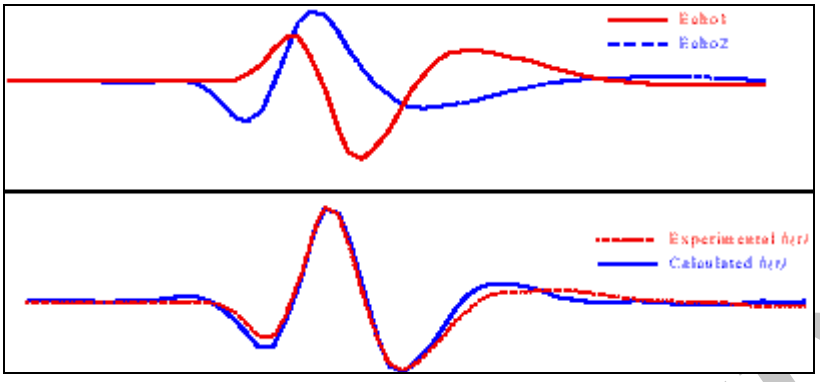
الگوریتمی که در اینجا ارایه و پیاده‌سازی شد برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های نگهدارنده‌ای که از اتیلن‌وینیل‌الکل (EVOH) ساخته شده و بین دو یا چند لایه HDPE ساندویچ شده‌اند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های تجربی بوسیله یک مبدل با خط تاخیر فرکانس بالا، با نام Panametric 25Multi Plus جمع‌آوری می‌شود. سیگنال بالایی در شکل (4) اکوی ماوراصوتی را نشان می‌دهد که از انتهای خط تاخیر منعکس می‌شود. سپس همان سیگنال به جمع چهار موجک گوسی، تجزیه می‌شود، که در قسمت پایینی شکل(4) بصورت W1 تا W4 نشان داده شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود نسبت دامنه موجک اولی به چهارمی 25:1 (-28db) است.

سیگنالی که با استفاده از این چهار موجک بازسازی می‌شود، در شکل نشان داده شده است ولی همپوشانی تقریبا کامل است. برای بررسی صحت مدل انتشاری تلفات، ما اکوی $h(t)$ حاصل از یک نمونه HDPE با ضخامت 6mm را بدست آورده و منحنی تجربی حاصل را با منحنی حاصل از محاسبه موجکهای $h_r(t)$ و معادله یک مقایسه کردیم. مقایسه این دو منحنی در شکل(5) نشان داده شده است. منحنی نقطه‌چین، سیگنال تجربی را نشان می‌دهد و خط پیوسته، تخمینی است که با استفاده از موجکهای شکل(4) و معادله یک بدست آمده است.

توافقی که بین آنها وجود دارد نسبتا خوب بوده و برای آنالیز ضخامت لایه‌های نگهدارنده قابل قبول است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل 6 : سیگنالهای تجربی و محاسباتی مربوط به بازدارنده های **EVOH** با ضخامت **70** و **205** میکرومتر که در داخل یک لایه بالایی از **HDPE** با ضخامت **6mm** محاط شده‌اند.

مرحله بعدی این است که ضخامت لایه بازدارنده‌ای را محاسبه کنیم که در یک HDPE با ضخامت 6mm جاسازی شده است. ضخامت لایه بالایی در حدود 4/5mm است. ما ابتدا سیگنال تجربی مربوط به لایه بازدارنده با ضخامت $70\ mM$ را بدست آوردیم.

این سیگنال در پایین شکل(6) به صورت نقطه‌چین نشان داده شده است. با استفاده از موجکهای W1 تا W4، الگوریتم تضمینی از دو الگوی مربوط به دو طرف لایه بازدارنده برمی‌گرداند. این دو اکو در بالای شکل(6) با نامهای ECHO1 و ECHO2 نشان داده شده‌اند.

ECHO1 اکوی حاصل از انعکاس مرز بین لایه بالایی و بازدارنده را نشان می‌دهد، در حالیکه ECHO2 مربوط به مرز بین بازدارنده و زیرلایه[1] می‌باشد. در بسیاری از کاربردهای عملی این چندلایه‌ای‌ها در مخزنهای سوخت، زیرلایه از جنس لایه بالایی می‌باشد. برای مثال HDPE. به همین دلیل ECHO1 و ECHO2 سیگنالهای با دامنه شبیه هم می‌باشند که نسبت به هم تاخیر و 180 درجه اختلاف فاز دارند.

3 - سیگنالهای بازسازی شده با استفاده از ECHO1 و ECHO2

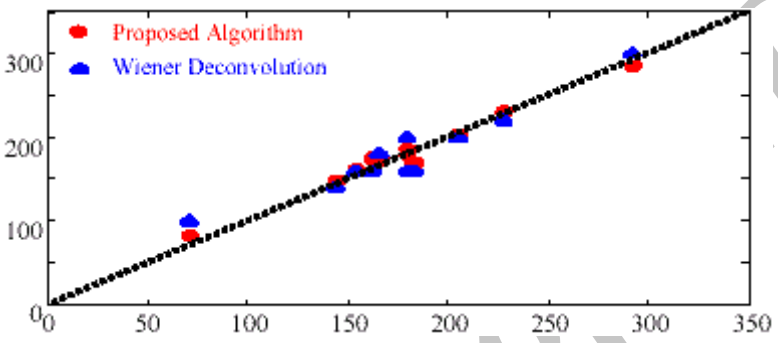
در پایین شکل(6) بصورت یک خط پیوسته نشان و با سیگنالهای تجربی مقایسه شده است. بازهم دیده می‌شود که سازگاری نسبتا خوب و برای تعیین ضخامت بازدارنده قابل قبول است.

[1] Substrate Layer

Archive of SID
www.SID.ir

صحت اندازه‌گیری ضخامت، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، بوسیله سیگنالهای تجربی و سیگنالهای بدست آمده از شبیه‌سازی تایید شده است. نتایج مربوط به الگوریتم پیشنهادی در شکل (7) نشان داده شده و با نتایج Wiener Deconvolution مقایسه شده‌اند.

انحراف معیار مربوط به الگوریتم پیشنهادی در حدود $8\,mM$ است. برای مقایسه می‌توان الگوریتم Wiener را در نظر گرفت که دارای صحتی حدود $12\,mM$ است.



شکل 7 : مقایسه بین سنجش ضخامت تخمینی و واقعی یک بازدارنده نازک EVOH که در داخل یک HDPE جاسازی شده است.

نتیجه گیری

یک الگوریتم بر پایه تخمین مدلی سیگنالهای ماوراصوت ارایه شد. این متد بر پایه مدلسازی ماوراصوت به صورت جمع آثار چندین موجک گوسی می‌باشد. بنابراین سیگنال چندلایه‌ای می‌تواند به صورت جمع اکوهای گوسی با تاخیر زمانی و با دامنه مدوله شده بیان شود.

در ضمن ما به ارایه الگوریتم و نتایج تجربی حاصل از آن در سنجش ضخامت یک بازدارنده نازک پرداختیم که در داخل یک مخزن سوخت پلاستیکی جاسازی شده‌بود.

مراجع

[1] M. Knights, “On-line PET Bottle Thickness Gauging Brings Responsive Process Control,” Plastic Technology, 2001, pp. 32-33.

[2] N. Nulman, G. Mozarkewich, B. Khaykin, “Ultrasonic Thickness Gauge for Multi- layer Plastic Fuel Tanks,” Proc. ANTEC ’99, 1999, pp. 1017-1019.

[3] R. Croce, P. Calmon and L. Paradis, “Modeling of propagation and echo formation in a multilayered structure,” Ultrasonics, vol. 38, 2000, pp. 537-541.

Archive of SID
www.SID.ir

[4] R. Demirli and J. Saniie, “Model-Based Estimation of Ultrasonic Echoes Part I: Analysis and Algorithms,” IEEE Trans. Ultras., Ferroel. Freq. Control, vol. 48, n. 3, 2001, pp. 787-811.

[5] R. Demirli and J. Saniie, “Model-Based Estimation of Ultrasonic Echoes Part I: Analysis and Algorithms,” IEEE Trans. Ultras., Ferroel. Freq. Control, vol. 48, n. 3, 2001, pp. 787-811.

[6] Stanullo J., Bojinski S., Gold N., Shapiro S., Busse G. Ultrasonic signal analysis to monitor damage development in short fiber-reinforced polymers. Ultrasonics. , 1998. Vol.36. P.455-460.

[7] Wooh S.C., Wei C. A homomorphic deconvolution technique for improved ultrasonic imaging of thin composite laminates. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. Plenum Press. New York. 1998. Vol.17. P.807-814.

Archive of SID

www.SID.ir