



۲۷ دی ۱۳۹۶



الگوریتمهای پردازش سیگنال ماوراصوت برای تعیین خواص چندلایهای های نازک

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

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، اندازه گیری و کنترل شوند. به همین منظور روشهای مختلفی برای اندازه گیری ضخامت چندلایهای های نازک، گسترش یافته است. برخی از این روشها عبارتند از: اشعه ایکس، میکروسکوپ نوری، القا مغناطیسی و جریان فوکو. اندازه گیری ضخامت بوسیله تکنیک "زمان صعود" ماوراصوت، در محیطهای کنترل فرایند بطور گستردهای مورد استفاده قرار می گیردانتشار 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

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 ماوراصوت¹ میتواند تولید شود. ب) یهنای باند دریافت کننده ماوراصوت¹

¹ Ultrasonic Pulser



مهندسی برق و کامپیوتر

کنفرانس ملی فناوری های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر



مورش عالی جهاد دانشگاهی استان امنفهان

پ) پاسخ فرکانسی مبدل²

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 می شود. اینکار بدین علت انجام می شود که در فرکانسهای بالا، تضعیف زیاد است. یک تخمین بر پایه مدل، اخیرا پیشنهاد شده است که از الگوریتم SAGE

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 گوسی⁴ 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 انعطاف پذیرتری 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 رياضي سيگنال ماوراصوت

با گسترش ابزار آلات دیجیتالی ماوراصوت، تلاشها بر روی گسترش قابلیت اندازه گیری این ابزار آلات بوسیله پردازش سیگنالهای دیجیتالی⁵ و الگوریتمها، متمرکز شد. سیگنالهای ماوراصوت دیجیتالی میشوند و سیگنال منتجه بصورت بلادرنگ مورد پردازش قرار می گیرد تا نتایج اندازه گیری بدست آید. بنابراین، اندازه گیری ماوراصوت با استفاده از تکنیکهای مهندسی سیستم، می تواند بصورت ریاضی بیان شود. سیگنال ماوراصوت که از میان یک چند لایه ای عبور می کند، می تواند با استفاده از یکسری ضربه ها 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

. آموز ش عالی جهاد دانشگاهی

استان اصفهان

کنفرانس ملی فناوری های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر



۲۷ دی ۱۳۹۶



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 می شود و ما می توانیم پاسخ ماده را بصورت بلوک دیا گرام شکل(1) مدل کنیم. تکنیکهای سنجش از یک مبدل با "خط تاخیر"¹ استفاده می کنند و در بسیاری از موارد چندلایه ای در داخل یک ماده قرار داده می شود.

¹ Delay Line

² Top Layer



. سه آموزش عالی جهاد دانشگاهی

(1)

استان اصفهان

کنفرانس ملی فناوری های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر



۲۷ دی ۱۳۹۶



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

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

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

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

 $0/5 \, db / mm / MHz$ در مورد پلی تیلن با چگالی بالا (HPDE)، وابستگی فرکانس تضعیف بصورت 22MHz برای یک لایه بالایی معمولی با گزارش شده است، بنابراین کل تضعیفی که در فرکانس 12MHz برای یک لایه بالایی معمولی با ضخامت 6mm رخ می دهد، در حدود $50 \, db$ خواهد بود. ضخامت لایهها بوسیله رشته TOFهای مربوط به اکوهای ایجاد شده در واسطها $t_x, ..., t_z, t_1$ مشخص می شود. برای لایههای ضخیم، سیگنالهای اکو در حوزه زمان از هم جدا هستند و بنابراین ما می توانیم 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 می کنیم که در چند لایه ایهای نازک تلفات

شکل(2) شبیه سازی سیگنال اکوی مربوط به یک بازدارنده اتیلن وینیل الکل (EVOH) با ضخامت های مختلف را نشان می دهد که در زیر یک لایه پلی تیلن با چگالی بالا قرار داده شده است. این لایه ها در یک مخزن سوخت پلاستیکی چند لایه ای قرار دارند. بالاترین سیگنال (شکل2)، اکوهای کنفرانس ملی فناوری های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر





۲۷ دی ۱۳۹۶

دو تایی در حوزه زمان از هم قابل تشخیص نیستند و این اتفاق در لایههای نازک روی می دهد. همینکه ضخامت لایه افزایش می یابد، برای مثال بالاتر از mn 200 ، دو اکو در حوزه زمان از هم جدا می شوند. این اتفاق همیشه در لایه های ضخیم روی می دهد. با استفاده از ضرایب انعکاسی، سیگنال پخشی برگشتی از N لایه با نام y(t) بصورت جمع آثار N+1 اکو نشان داده شده می شود.

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

2 -الگوريتم مدلسازي سيگنال براي تعيين خواص چند لايهها

معادلهی (2) رابطه بین سیگنال ورودی h(t) و سیگنال خروجی (t) را در شکل h 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 (t) بر حسب موجکهای گوسی است. نتایج این روش با سرعت و همگرایی بیشتر بدست میآیند. اکوی h(t) میورت جمع آثار M موجک گوسی مدل میشود.

$$h(t) = \sum_{m=1}^{M} C_m e^{-a_m (t - I_m)^2} \cos(2p f_m (t - I_m) + \Phi_m)$$
(3)

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

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

¹ Least Square Minimization Search Algorithm

² Model Estimation



کنفرانس ملی فناوری های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر



مورش عالی جهاد دانشگاهی استان اصفهان

۲۷ دی ۱۳۹۶



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

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

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

که $q_m(m=1,2,...,M)$ دانسته فرض می شود، و t_n ، A_n برای $q_m(m=1,2,...,M)$ 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



 $\{A_m, t_n; n = 0, N\}$ $\{A_m, t_n; n = 0, N\}$ (a) (b) 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 1+Nاکوی بدست آمده از چند لایهای میباشد.



شكل 5 : مقايسه تابع تعيين شده توسط محاسبه و تابع تجربي.

کنفرانس ملی فناوری های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر



۲۷ دی ۱۳۹۶

مورش عالی جهاد دانشگاهی استان اصفهان

بنابراین الگوریتم نیاز به جمع آوری 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 می تواند بوسیله اندازه گیری 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 می گردد نه به سیگنال $h_r(t)$ بدست آمده.

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

سیگنالی که با استفاده از این چهار موجک بازسازی می شود، 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 (t) و معادله یک مقایسه کردیم. مقایسه این دو منحنی در شکل(5) نشان داده شده است. منحنی نقطه چین، سیگنال تجربی را نشان می دهد 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.

استان اصفهان

آمور ش عالی جهاد دانشگاهی

کنفرانس ملی فناوری های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر



۲۷ دی ۱۳۹۶



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 برمی گرداند. این دو اکو در بالای شکل(6) با نامهای ECHO1 و ECHO2 نشان داده شدهاند.

ECH01 اکوی حاصل از انعکاس مرز بین لایه بالایی و بازدارنده را نشان میدهد، در حالیکه ECH02 مربوط به مرز بین بازدارنده و زیرلایه¹ میباشد. در بسیاری از کاربردهای عملی این چندلایهایها در مخزنهای سوخت، زیرلایه از جنس لایه بالایی میباشد. برای مثال HDPE. به همین دلیل ECH01 و ECH02 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

استان اصفهان





۲۷ دی ۱۳۹۶

صحت اندازه گیری ضخامت، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، بوسیله سیگنالهای تجربی و سیگنالهای بدست آمده از شبیه سازی 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 می توان الگوریتم Wiener را در نظر گرفت که دارای صحتی حدود 12 mM است.



نتيجه گيري

یک الگوریتم بر پایه تخمین مدلی سیگنالهای ماوراصوت آرایه 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**

 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.



کنفرانس ملی فناوری های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر

۲۷ دی ۱۳۹۶



[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.