دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

بهبود روش فراصوتی زمان پرواز پراش با استفاده از دیکانولوشن متغیر با زمان

رساله برای دریافت درجه دکتری

در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

امین یاقوتیان

استاد راهنما:

دکتر فرهنگ هنرور

شهریورماه ۱۳۹۱

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

با بزرگداشت یاد و خاطره

"مادرم"

این اثر تقدیم می‌شود به:

"پدر فداکار"

و

"همسر مهربانم"

تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

تائیدیه هیأت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت درجلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

"بهبود آزمون فراصوتی زمان پرواز پراش با استفاده از دیکانولوشن متغیر با زمان"

توسط آقای **امین یاقوتیان** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی با رتبه بسیار خوب مورد تائید قرار می‌دهند.

۱ - استاد راهنما	آقای دکتر فرهنگ هنرور	امضاء .....
۲ - ممتحن داخلی	آقای دکتر امیررضا شاهانی	امضاء .....
۳ - ممتحن داخلی	آقای دکتر مجید قریشی	امضاء .....
۳ - ممتحن خارجی	آقای دکتر حمید احمدیان	امضاء .....
۳ - ممتحن خارجی	آقای دکتر حمید ابریشمی مقدم	امضاء .....
٤ - نماینده تحصیلات تکمیلی	آقای دکتر محمدرضا خلیلی	امضاء .....

اظهارنامه‌ی دانشجو

موضوع پایان نامه :
بهبود آزمون فراصوتی زمان پرواز پراش با استفاده از دیکانولوشن متغیر با زمان
استاد راهنما: آقای دکتر فرهنگ هنرور
نام دانشجو: آقای امین یاقوتیان
شماره دانشجوئی: ٨٤١١٥٨٦

اینجانب امین یاقوتیان دانشجوی دوره دکتری مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می‌باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

فرم حق چاپ، نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تشکر و قدردانی:

پس از شکر و سپاس خداوند منان بر خود لازم می‌دانم که از زحمات و راهنمایی‌های استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر فرهنگ هنرور قدردانی کرده و از ایده‌پردازی‌ها و تلاش فراوانی که در فراهم آوردن امکانات مناسب تحقیقاتی و آزمایشگاهی کشیده‌اند تشکر کنم. همچنین، از دوستان و همکاران بسیار خوبم در آزمایشگاه تست غیر مخرب، خصوصاً آقایان دکتر سینا سوداگر و مهندس مهدی ضیغمی به خاطر همفکری و همیاری‌های بی‌دریغشان در انجام این رساله کمال سپاس را دارم. از دوستان و کارمندان دلسوز و تلاشگر کتابخانه دانشکده، سرکار خانم حسینی‌زاده، آقای عباس‌نژاد، خانم کریمی، خانم رفعتی‌نژاد و آقای صفری که در تهیه منابع و مراجع مورد نیاز نقش بسزایی داشته‌اند و همچنین، از پیگیری‌ها و زحمات سرکار خانم عسگری در بخش آموزش دانشکده، بسیار ممنونم.

بی‌شک به سرانجام رسیدن این رساله بدون حمایت‌ها و تشویق‌های بی‌انتهای پدر، مادر، خواهر و برادرانم و آرامش، صبر و همراهی‌های بی‌شائبه همسرم امکان‌پذیر نبوده است.

برای تمامی این عزیزان آرزوی سلامتی و توفیق روزافزون دارم.

چکیده

با گسترش کاربرد آزمونهای غیر مخرب فراصوتی در تشخیص و تخمین اندازه عیوب در قطعات صنعتی، استفاده از روشهای مختلف پردازش سیگنال به منظور افزایش دقت این آزمونها رونق یافته است. از جمله روشهای متداول پردازش سیگنالهای فراصوتی می‌توان به دیکانولوشن فیلتر وینر به همراه روش برونیابی طیفی اتورگرسیو اشاره کرد. در این روش‌ها که بر مبنای نامتغیر بودن (نسبت به زمان) و یا ایستا بودن سیگنالهای فراصوتی صورت می‌گیرد، با انتخاب قسمتی از سیگنال به عنوان اکوی مرجع (موجک) تمام سیگنال پردازش می‌شود که نتیجه آن افزایش نسبت سیگنال به نویز و نیز افزایش تفکیک‌پذیری سیگنال است. در این رساله، بهبود سیگنالهای متغیر با زمان آزمون فراصوتی زمان پرواز پراش (ToFD) مورد توجه قرار گرفته است. بدلیل متغیر با زمان بودن سیگنال‌های ToFD انتخاب یک اکوی مرجع برای پردازش تمامی سیگنال نتیجه مطلوبی را به همراه ندارد و در بعضی از موارد نه تنها افزایش تفکیک‌پذیری سیگنال را باعث نمی‌شود، بلکه باعث حذف برخی اکوها نیز می‌گردد. برای رفع این کاستی، در این پژوهش روش دیکانولوشن تکه‌ای (PWD) برای پردازش سیگنالهای ToFD پیشنهاد شده است. در این روش با تقسیم‌بندی سیگنال متغیر با زمان به بخش‌های شبه ایستا و انتخاب اکوی مرجع مناسب برای هر بخش، پردازش سیگنال انجام می‌شود. با توجه به اینکه یافتن اکوی مرجع متناظر با هر بخش با انجام آزمایش ناممکن است، در این رساله برای اولین بار پیشنهاد انتخاب اکوهای مرجع مدلسازی شده ارائه می‌شود. مدلسازی با تعمیم مدل انتشار پرتو گوسی چندگانه غیر شبه محوری (NMGB)، برپایه خواص مکانیکی محیط انتشار و مشخصات هندسی و فرکانسی تراگذارهای فراصوتی، انجام گرفته است. برای رفع مشکلات مربوط به اندازه پنجره متناظر با هر بخش، استفاده از تابع همبستگی متغیر با زمان (TVC) سیگنال آزمون و اکوهای مدل شده پیشنهاد شده است. نتایج مدلسازی برای انتشار عمودی و زاویه‌ای امواج با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و تأثیر و مزایای روش PWD برای پردازش سیگنال‌های متغیر با زمان بر روی سیگنال‌های مدل شده و آزمایشگاهی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: آزمون فراصوتی ToFD، مدل پرتو گوسی چندگانه غیر شبه محوری، دیکانولوشن تکه‌ای، همبستگی متغیر با زمان.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- موضوع و اهداف پایان‌نامه ۳

۱-۳- فرضیات ۶

۱-۴- محتوای پایان‌نامه ۷

فصل ۲: پیشینه تحقیق ۸

۲-۱- مقدمه ۹

۲-۲- پردازش سیگنالهای فراصوتی ۱۰

۲-۳- پردازش سیگنال‌های متغیر با زمان ۱۷

۲-۴- آزمون فراصوتی ۱۹

۲-۵- آزمون فراصوتی زمان پرواز پراش (ToFD) ۲۱

فصل ۳: مدلسازی امواج فراصوتی ۲۵

۳-۱- مقدمه ۲۶

۳-۲- مدلسازی پرتوهای گوسی ۲۹

۳-۲-۱- معادلات انتشار پرتو گوسی ۳۰

۳-۲-۲- مدلسازی عبور و بازتاب پرتوهای گوسی از سطح مشترک ۳۹

۳-۳- مدل پرتو چند-گوسی ۵۱

فصل ۴: بهبود مدل پرتو چند گوسی ۵۴

۴-۱- مقدمه ۵۵

۴-۲- مدل پرتو چند گوسی غیر شبه محوری در حالت تابش عمودی ۵۵

۴-۳- مدل پرتو چند گوسی غیر شبه محوری در عبور زاویه‌ای ۶۱

۴-۴- نتایج شبیه‌سازی ۶۴

۴-۴-۱- تابش عمودی ۶۴

۴-۴-۲- تابش زاویه‌ای ۷۴

۴-۵- مدلسازی آزمون ToFD ۸۳

فصل ۵: روش نوین پردازش سیگنالهای فراصوتی متغیر با زمان ۸۷

۵-۱- مقدمه ۸۸

۵-۲- مدل سیگنال و سیستم فراصوتی ۸۹
۵-۳- فیلتر وینر ۹۰
۵-۴- روش برونیابی طیفی اتورگرسیو ۹٤
۵-۵- دیکانولوشن تکه‌ای ۹٦

فصل ۶: آزمایشات و تحلیل نتایج **۱۰۷**

۶-۱- مقدمه ۱۰۸
۶-۱-۲- ضریب کارایی سیستم ۱۱۰
۶-۱-۳- مدل انتشار موج ۱۱۰
۶-۲- مقایسه نتایج مدلسازی و آزمایشگاهی ۱۱٤
۶-۲-۱- مقایسه میدان در تابش عمودی ۱۱۵
۶-۲-۲- تغییرات طیف فرکانسی در زوایای مختلف در تابش عمودی ۱۱۹
۶-۲-۳- تغییرات طیف فرکانسی در زوایای مختلف در تابش زاویه‌ای ۱۲٦
۶-۳- نتایج پردازش سیگنال ۱۲۹
۶-۳-۱- بازتاب از زوایای مختلف ۱۲۹
۶-۳-۲- دیکانولوشن متغیر با زمان سیگنال‌های ToFD ۱۳۵

فصل ۷: جمع‌بندی و پیشنهادات **۱٤۵**

۷-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱٤٦
۷-۲- ارائه پیشنهادات ۱٤۸

مراجع **۱۵۰**

فهرست اشکال

شکل (۲-۱) - روش بازتابی ۱۹
شکل (۲-۲) - روش عبوری ۲۰
شکل (۲-۳) - شماتیک آزمون ToFD ۲۲
شکل (۲-۴) - تغییر طیف پالس در پروب زاویه‌ای ۲۳
شکل (۳-۱) - مختصات سطح تراگذار ۳۳
شکل (۳-۲) - شکل پرتوگوسی متقارن با شعاع انحناء $R(x_3)$ و عرض $w(x_3)$ ۳۸
شکل (۳-۳) - شماتیک برخورد یک پرتو گوسی به یک سطح مشترک انحنادار ٤٠
شکل (۳-۴) - راستای پلاریزاسیون امواج برخوردی، بازتابی و عبوری ٤۳
شکل (۳-۵) - بازتاب و یا عبور پرتو گوسی از چند سطح مشترک متوالی ٤۷
شکل (۴-۱) - مختصات استفاده شده در تراگذار تماسی ٥٦
شکل (۴-۲) - تغییرات تابع $K_p(\theta)$ نسبت به تغییرات زاویه برای نسبت سرعت موج عرضی به طولی برابر با ۲ ..... ٥۹
شکل (۴-۳) - هندسه عبور امواج از کفشک به قطعه ٦۳
شکل (۴-۴) - شبیه‌سازی میدان امواج انتشار یافته در محیط جامد: (a) انتگرال ریلی - سامرفلد، (b) مدل پرتو چندگوسی شبه محوری، (c) مدل پرتو چندگوسی غیر شبه محوری ٦٦
شکل (۴-۵) - مقایسه دامنه بی بعد شده میدان سرعت یک بعدی در فواصل مختلف از سطح تراگذار ٦۸
شکل (۴-۶) - اثر فرکانس در توزیع پروفیل اندازه سرعت در زوایای مختلف ۷۲
شکل (۴-۷) - تغییرات اندازه سرعت با فرکانس در زوایای مختلف ۷٥
شکل (۴-۸) - میدان موج انتشار یافته از پلکسی گلاس به فولاد در تابش عمودی، (a) مدل MGB و (b) مدل NMGB ۷۸
شکل (۴-۹) - میدان موج انتشار یافته از پلکسی گلاس به فولاد در تابش زاویه‌ای، (a) مدل MGB و (b) مدل NMGB ۷۹
شکل (۴-۱۰) - مقایسه تغییرات میدان در عمق‌های مختلف نسبت به سطح مشترک دو محیط در تابش زاویه‌ای، (a) z = 10 mm، (b) z = 20 mm، (c) z = 50 mm و (d) z = 100 mm ۸۰

شکل (۴-۱۱) - الگوی تغییر طیف فرکانسی در نقاط مختلف میدان تحت تابش زاویه‌ای، x = 50 mm، z = 0 mm (a)، z = 20 mm (b)، z = 50 mm (c) و z = 80 mm (d) ۸۲
شکل (۴-۱۲) - شرایط انتشار موج در آزمون ToFD ۸۳
شکل (۵-۱) - مدل سیستم فراصوتی ۸۹
شکل (۵-۲) - مدل فیلتر وینر ۹۰
شکل (۵-۳) - پردازش سیگنال با استفاده از فیلتر وینر: (a) سیگنال خام ، (b) سیگنال مرجع ، (c) سیگنال پردازش شده، (d) طیف فرکانسی سیگنال خام ، (e) طیف فرکانسی سیگنال مرجع ، (f) طیف فرکانسی سیگنال پردازش شده ۹۳
شکل (۵-۴) - مقایسه نتایج فیلتر وینر و روش برونیابی طیفی اتورگرسیو بر سیگنال مدلسازی شده حاوی سه پالس گوسی: (a) سیگنال خام، (b) سیگنال پردازش شده براساس فیلتر وینر، (c) سیگنال پردازش شده با استفاده از فیلتر وینر و روش برونیابی طیفی اتورگرسیو ۹۶
شکل (۵-۵) - شماتیک کانولوشن پاسخ عیب در پاسخ سیستم متغیر با زمان ۹۸
شکل (۵-۶) - پاسخ عیب، ورودی سیستم متغیر با زمان ۹۹
شکل (۵-۷) - پاسخ سیستم گوسی متغیر با زمان مدلسازی شده ۹۹
شکل (۵-۸) - مدلی از سیگنال متغیر با زمان اندازه‌گیری شده در آزمون فراصوتی ۱۰۰
شکل (۵-۹) - تغییرات تابع همبستگی متغیر با زمان در طول سیگنال ۱۰۲
شکل (۵-۱۰) - پردازش شده سیگنال شکل (۵-۸) با استفاده از (a) اکوی اول به عنوان سیگنال مرجع، (b) اکوی آخر به عنوان سیگنال مرجع و (c) دیکانولوشن تکه‌ای ۱۰۳
شکل (۵-۱۱) - یکسو شده سیگنالها، (a) قبل از پردازش و (b) بعد از PWD ۱۰۴
شکل (۵-۱۲) - مقایسه اثر پردازش سیگنال در سیگنال مدلسازی شده با نسبت سیگنال به نویز بالا، (a) سیگنال مطلوب، (b) سیگنال متغیر با زمان مدل شده از حاصل از سیگنال مطلوب، (c) پردازش با استفاده از اکوی اول به عنوان مرجع، (d) پردازش با استفاده از اکوی آخر به عنوان مرجع و (e) پردازش با استفاده از PWD ۱۰۵
شکل (۵-۱۳) - مقایسه نسبت سیگنال به نویز قبل و بعد از پردازش با استفاده از PWD ۱۰۶
شکل (۶-۱) - شماتیک سیستم اندازه‌گیری ارسال-دریافت ۱۰۹
شکل (۶-۲) - آزمون مرجع برای بدست آوردن ضریب کارایی سیستم، (a) بازتاب از سطح هموار در حالت غوطه‌وری، (b) بازتاب از دیواره پشتی، (c) بازتاب از سوراخ جانبی روی محور تقارن

تراگذار، (d) دو تراگذار هم محور با مشخصات متفاوت، (e) بازتاب از سطح منحنی برای تراگذار تماسی و (f) بازتاب از بلوک استاندارد در برخورد زاویه‌ای ۱۱۱
شکل (۶-۳) – شماتیک آزمایش تعیین میدان موج ۱۱۵
شکل (۶-۴) – میدان موج انتشار یافته در آب حاصل از آزمون شکل (۶-۳)..... ۱۱۶
شکل (۶-۵) – سیگنال مرجع تراگذار با فرکانس ۲/۲۵ مگاهرتز..... ۱۱۷
شکل (۶-۶) – طیف فرکانسی سیگنال مرجع تراگذار با فرکانس مرکزی ۲/۲۵ مگاهرتز ۱۱۷
شکل (۶-۷) – میدان موج مدلسازی شده با استفاده از طیف فرکانسی (a) مدل MGB و (b) مدل NMGB..... ۱۱۸
شکل (۶-۸) – شماتیک آزمون تغییرات طیف فرکانسی در زوایای مختلف. تراگذار فرستنده در مرکز نیم استوانه ثابت شده و تراگذار گیرنده می‌تواند در روی منحنی حرکت کند. ۱۱۹
شکل (۶-۹) – مقایسه طیف فرکانسی آزمایشگاهی و مدلسازی در زوایای مختلف، خط پر: نتایج آزمایشگاهی، نقطه‌چین: مدل MGB و خط‌چین: مدل NMGB ۱۲۰
شکل (۶-۱۰) – مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی در زوایای مختلف در حوزه زمان، خط پر: نتایج آزمایشگاهی، نقطه‌چین: مدل MGB، خط‌چین: مدل NMGB..... ۱۲۴
شکل (۶-۱۱) – شماتیک آزمون بررسی تغییرات طیف فرکانسی در تابش زاویه‌ای..... ۱۲۶
شکل (۶-۱۲) – تغییر طیف فرکانسی در زوایای مختلف در آزمون زاویه‌ای ۱۲۷
شکل (۶-۱۳) – بلوک فولادی با دو سوراخ جانبی ۱۲۹
شکل (۶-۱۴) – سیگنال بدست آمده از آزمون بلوک فولادی با دو سوراخ جانبی ۱۳۰
شکل (۶-۱۵) – طیف فرکانسی اکوهای بازتابیده شده از (a) سوراخ روی محور تراگذار و (b) سوراخ خارج محور..... ۱۳۱
شکل (۶-۱۶) – پردازش سیگنال متغیر با زمان با استفاده از (a) اکوی سوراخ روی محور تراگذار، (b) اکوی سوراخ خارج محور تراگذار و (c) دیکانولوشن متغیر با زمان PWD..... ۱۳۳
شکل (۶-۱۷) – همبستگی متغیر با زمان سیگنال اندازه‌گیری شده و مدل NMGB..... ۱۳۳
شکل (۶-۱۸) – سیگنال‌های یکسو شده، (a) سیگنال خام اندازه‌گیری شده، (b) دیکانولوشن با استفاده از اکوی سوراخ روی محور و (c) دیکانولوشن متغیر با زمان PWD..... ۱۳۴
شکل (۶-۱۹) – تغییرات طیف فرکانسی اکوهای زیر سطحی و دیواره پشتی نسبت به فاصله تراگذارها در آزمون ToFD، (a) 2S =100 ، (b) 2S =90 ، (c) 2S =80 و (d) 2S =70 میلیمتر..... ۱۳۶
شکل (۶-۲۰) – شماتیک آزمون ToFD برای مقایسه نتایج پردازش سیگنال..... ۱۳۸

شکل (۶-۲۱) - سیگنال بدست آمده از آزمون ToFD با فاصله بین شاخص پروبها برابر ۱۲۰ میلیمتر ۱۳۹
شکل (۶-۲۲) - مقایسه اکوهای آزمون ToFD و مدل NMGB، خط پر: سیگنال حاصل از آزمایش، خط‌چین: مدل NMGB، (a) اکوی موج زیر پوستی، (b) اکوی سطح بالای سوراخ، (c) اکوی سطح پایین سوراخ و (d) اکوی دیواره پشتی..... ۱۳۹
شکل (۶-۲۳) - (a) سیگنال ToFD از بلوک فولادی شکل (۶-۲۰)، S = 40 mm، h = 16.5 mm، d = 5 mm، (b) سیگنال پردازش شده با استفاده از اکوی موج زیرسطحی، (c) سیگنال پردازش شده با استفاده از اکوی دیواره پشتی و (d) PWD..... ۱۴۰
شکل (۶-۲۴) - همبستگی متغیر با زمان سیگنال ToFD شکل a(۶-۲۱) و مدلسازی NMGB..... ۱۴۱
شکل (۶-۲۵) - (a) سیگنال ToFD از بلوک فولادی شکل (۶-۲۰)، S = 40 mm، h = 18 mm، d = 2 mm، (b) سیگنال پردازش شده با استفاده از اکوی موج زیرسطحی، (c) سیگنال پردازش شده با استفاده از اکوی دیواره پشتی و (d) PWD..... ۱۴۲
شکل (۶-۲۶) - همبستگی متغیر با زمان سیگنال ToFD شکل a(۶-۲۳) و مدلسازی NMGB..... ۱۴۳
شکل (۶-۲۷) - (a) سیگنال ToFD بدست آمده از بلوک فولادی شکل (۶-۲۰) بدون میانگین گیری و با نویز بالا، S = 40 mm، h = 18 mm، d = 2 mm، (b) سیگنال پردازش شده با استفاده از اکوی موج زیرسطحی، (c) سیگنال پردازش شده با استفاده از اکوی دیواره پشتی و (d) PWD..... ۱۴۴

فهرست جداول

جدول (۳-۱) - ضرایب ون و بریزیل برای تراگذارهای دایره‌ای مسطح ۵۳
جدول (۶-۱) - ضریب همبستگی بین اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و نتایج مدلسازی در زوایای مختلف ۱۲۵

فهرست علائم و نمادها:

a	شعاع تراگذار
a_i	ضرایب اتورگرسیو
a_i^*	مزدوج مختلط ضرایب اتورگرسیو
A_n و B_n	ضرایب مختلط ون و بریزیل
adj( )	ترانهاده ماتریس کوفاکتورهای یک ماتریس
$C_1(\omega)$	پراش موج برخوردی به عیب
$C_2(\omega)$	فاکتور ترکیبی از اثرات پراش عیب، گیرنده و میانگین‌گیری امواج رسیده به سطح تراگذار گیرنده
c_p	سرعت موج طولی
c_s	سرعت موج عرضی
$\mathbf{d}$	بردار یکه پلاریزاسیون امواج
D_R	فاصله ریلی
$E(\omega)$	تابع خطا در حوزه فرکانس
$\hat{\mathrm{E}}[\cdot]$	تابع امید
FWHM	پهنای نیم بیشینه اکو
$\hat{\mathbf{G}}$	ماتریس دوران
$h(t)$	پاسخ ایمپالس سیستم
اندیس‌های I و J	مقادیر ۱و ۲
K	مرتبه فیلتر
k_p	عدد موج طولی
$M(\omega)$	اثر استهلاک ماده و محیط انتشار
NSNR	نسبت سیگنال به نویز نرمالیزه شده

$n(t)$	نویز
اندیس p	بیانگر موج طولی
P_{XX}	تابع چگالی طیف توان سیگنال $X(\omega)$
P_{YY}	تابع چگالی طیف توان سیگنال $Y(\omega)$
P_{XY}	تابع چگالی طیف توان سیگنال $X(\omega)$ و سیگنال $Y(\omega)$
$P_1(\omega)$	انتشار امواج از فرستنده به عیب
$P_2(\omega)$	انتشار از عیب به گیرنده
PWD	دیکانولوشن تکه‌ای
Q^2	ضریب حذف نویز
r	فاصله هر نقطه از محیط نسبت به مرکز تراگذار
R_0	شعاع انحنای یک پرتو گوسی
اندیس s	بیانگر موج عرضی
S_0	مساحت تراگذار
S_m	مسافت پیموده شده توسط پرتو گوسی در محیط m-ام و در راستای محور مرکزی موج
$tr(\ )$	مجموع عناصر روی قطر اصلی
$T_1(\omega)$ و $T_2(\omega)$	ضرایب عبور موج از مرز محیط‌های مختلف
$T_{m,m+1}^{\beta;\alpha}$	ضریب عبور (و یا بازتاب) موج صفحه‌ای از سطح مشترک بین محیط m و $m+1$ برای هر نوع موج عبوری یا بازتابی β و موج برخوردی α
TVC	تابع همبستگی متغیر با زمان
u_i	مولفه‌های بردار جابجایی
V_0	توزیع سرعت روی سطح تراگذار
$\mathbf{v}_\alpha$	سرعت انتشار امواج طولی یا عرضی

$V_{ref}(\omega)$	سیگنال مرجع بدست آمده از آزمون
$[v(\omega)/v_0]_{ref}$	سیگنال مدلسازی شده در شرایط آزمون
w_0	پهنای یک پرتو گوسی در مبداء
$W(\omega)$	فیلتر وینر
$W_j(t)$	پنجره انتخاب زمانی سیگنال
x_j	دامنه سیگنال
$x(t)$	پاسخ ایمپالس عیب
X_p	نقاط برون‌یابی شده قبل از پنجره
X_q	نقاط برون‌یابی شده بعد از پنجره
$y(t)$	سیگنـــال اندازه‌گیـری شده
$\beta(\omega)$	ضریب کارایی سیـستم
γ_m	نوع پرتو انتشار یافته در محیط m
δ	تابع دلتا
δ_{ij}	تابع دلتای کرونیکر
ε_{ij}	مولفه‌های تانسور کرنش بینهایت کوچک
κ	نسبت سرعت موج طولی به موج عرضی در محیط جامد
λ	ثوابت الاستیک لامه و طول موج
μ	ثوابت الاستیک لامه
ρ	چـگالی
σ_{ij}	مولفـه‌های تانسـور تنش
Φ	تابع همبستگی
ω	فرکانس زاویه‌ای

∇^2	اپراتور لاپلاسین
∇	اپراتور گرادیان
$\nabla.$	اپراتور دیورژانس
*	اپراتور کانولوشن خطی

فصل ۱:

مقدمه