بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق-مخابرات گرایش سیستم

عنوان پایان‌نامه:

مخابرات با استفاده از حس‌گری فشرده از دیدگاه‌های نویز و امنیت

استاد راهنما: دکتر بابک سیف

استاد مشاور: دکتر مسعود بابائی زاده

نگارش:

محمود رمضانی مِیّمی

بهار ۱۳۹۰

کلیه‌ی حقوق این اثر محفوظ و متعلق به

دانشگاه شاهد

است.

این رساله از طرح حمایت مرکز تحقیقات مخابرات ایران از اجرای پروژه‌های کارشناسی ارشد بر طبق قرارداد مورخ ۱۳۸۹/۰۴/۸ و شماره‌ی ۵۰۰/۴۸۰۰/ت بهره‌مند شده‌است.

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می رود ممد حیاتست و چون برمی آید مفرح ذات، پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکری واجب.

از دست و زبان که برآید کز عهده ی شکرش به درآید

باران رحمت بی حسابش همه را رسیده و خوان نعمت بی دریغش همه جا کشیده و ناموس بندگان به گناه فاحش ندرد و وظیفه ی روزی به خطای منکر نبرد. فراش باد صبا را گفته تا فرش زمردین بگستراند و دایه ی ابر بهاری را فرموده تا بنات نبات در مهد زمین بپروراند. درختان را به خلعت نوروزی قبای سبز ورق در بر گرفته و اطفال شاخ را به قدوم موسم ربیع کلاه شکوفه بر سر نهاده. عصاره ی نائی به قدرت او شهد فائق شده و تخم خرمائی به تربیتش نخل باسق گشته

ابر و باد و مه و خورشید و فلک در کارند تا تو نانی به کف آری و به غفلت نخوری

همه از بهر تو سرگشته و فرمان بردار شرط انصاف نباشد که تو فرمان نبری

و اما بعد:

لم یشکر المخلوق، لم یشکر الخالق

سپاس فراوان نثار یکایک اساتید و معلمانم، راهنمایانی که برای نشان دادن راه به این بنده ی گمراه و هدایت به صراط مستقیم، از هیچ کوششی فروگذار نکردند. نه چون شمع، بلکه سوزنده تر از آن، سوختند تا آینده ام را بسازند و چراغ راهم باشند و دکتر علی شریعتی چه زیبا می فرماید که: ظلم است معلم را به شمع تشبیه کردن، زیرا شمع را می سازند تا بسوزد، ولی معلم می سوزد تا بسازد.

و درود و سپاس بی کران به گل های سرسبد آموزگارانم:

پدر و مادر

که دست های صمیمی و قلب های مهربانشان، همواره سرچشمه ی جوشش الطاف و مواهب الهی بوده است.

چکیده

هدف اساسی این پایان‌نامه، پردازش سیگنال‌های تنک در حضور نویز غیرگوسی است. حس‌گری فشرده و نمایش تنک دو شاخه‌ی اصلی از پردازش سیگنال‌های تنک است که به تفصیل در این پایان‌نامه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. حس‌گری فشرده چگونگی جمع آوری و ذخیره‌ی بهتر و کم‌هزینه‌تر سیگنال‌های تنک را مورد بررسی قرار می‌دهد و نمایش تنک در مورد نشان دادن یک سیگنال با استفاده از بردار ضرایب تنک است. بر همین اساس و با دنبال کردن هدف بالا، سه دستاورد به‌دست آمده از این تحقیق به این قرار است: الف) یک آشکارساز نویز غیرگوسی با استفاده از ابزارهای حوزه‌ی حس‌گری فشرده طراحی و تحلیل شده است. آشکارسازی که برای تشخیص وجود و یا عدم وجود سیگنال در حضور نویز غیرگوسی پیشنهاد شده است، نه تنها خطی است، بلکه به تعداد نمونه‌ی کم‌تری از سیگنال دریافت شده برای آشکارسازی نیاز دارد. ب) از ماتریس اندازه‌گیری مورد استفاده در حس‌گری فشرده به‌عنوان ابزاری جهت کد کردن اطلاعات و دست‌یابی به امنیت در ارسال اطلاعات استفاده شده است. ج) در پایان نیز مسئله‌ی بهینه‌سازی جدیدی تحت عنوان نمایش ناپارامتری سیگنال تنک مطرح شده که با حل آن توانستیم بر مشکل نمایش تنک سیگنال در حضور نویز غیرگوسی ناشناخته با پارامترهای نامعلوم غلبه کنیم. هم‌چنین معیار جدیدی برای مقایسه‌ی کارایی روش‌های مختلف نمایش تنک پیشنهاد دادیم که با استفاده از آن می‌توان به‌صورت تحلیلی برتری روش پیشنهاد شده در این پایان‌نامه برای نمایش تنک سیگنال در حضور نویز غیرگوسی را نسبت به روش‌های موجود متداول اثبات کرد.

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه ۲

فصل ۲ مدل سیستم مخابراتی ۷

فصل ۳ حس‌گری فشرده ۱۲

۳-۱- مفهوم حس‌گری فشرده ۱۲

۳-۲- تجزیه و تحلیل سیگنال در حس‌گری فشرده ۱۳

فصل ۴ آشکارسازی سیگنال با استفاده از حس‌گری فشرده در حضور نویز غیرگوسی..... ۱۹

۴-۱- آشکارسازهای متداول کلاسیک در حضور نویز ۲۰

۴-۱-۱- آشکارساز بهینه در حضور نویز گوسی ۲۰

۴-۱-۲- آشکارساز زیربهینه در حضور نویز غیرگوسی ۲۳

۴-۲- آشکارساز فشرده ۲۴

۴-۲-۱- آشکارساز فشرده در حضور نویز گوسی ۲۵

۴-۲-۲- آشکارساز فشرده در نویز غیرگوسی با تعداد نمونه‌های نویز زیاد ($N \to \infty$) ۲۵

۴-۳- شبیه سازی ۲۹

۴-۴- نتیجه گیری ۳۰

فصل ۵ استفاده از حس‌گری فشرده در تبادل امن اطلاعات و دست‌یابی به امنیت کامل ... ۳۴

۵-۱- تعریف امنیت کامل ۳۷

۵-۲- دست‌یابی به امنیت کامل از طریق حس‌گری فشرده ۳۷

۵-۳- بررسی شباهت‌ها و تفاوت‌ها با کار قبلی ۳۹

۵-۴- محاسبه‌ی احتمال آشکارسازی ۴۰

۵-۵- روش مستقیم ۴۰

۵-۵-۱- کانال گوسی ۴۰

۵-۵-۲- کانال غیرگوسی ۴۱

۵-۶- روش غیر مستقیم ۴۱

۵-۶-۱- محاسبه‌ی احتمال آشکارسازی برای گیرنده‌ی مجاز ۴۱

۵-۶-۲- محاسبه‌ی احتمال آشکارسازی برای گیرنده‌ی غیر مجاز ۴۲

فصل ۶ نمایش تنک سیگنال در حضور نویز غیرگوسی ۴۵

۶-۱- ویژگی‌های شبه نرم رتبه ۴۷

۶-۲- نمایش تنک ناپارامتری ۴۸

۶-۳- ارائه‌ی یک معیار جدید برای تحلیل کارایی ۵۱

۶-۴- شبیه‌سازی ۵۴

۶-۵- نتیجه‌گیری ۵۵

فصل ۷ نتیجه گیری و پیشنهادهایی برای آینده ۵۸

۷-۱- استفاده از شبه نرم رتبه به‌جای نرم مرتبه‌ی یک در کمینه‌سازی نمایش تنک ۵۹

۷-۲- استفاده از روش‌های ناپارامتری در آشکارسازی سیگنال با استفاده از حس‌گری فشرده..... ۵۹

۷-۳- ارائه‌ی یک تعریف جدید برای کارایی در مقایسه‌ی روش‌های مختلف نمایش تنک ۵۹

۷-۴- نمایش تنک ناپارامتری هم‌زمان چند سیگنال در حضور نویز غیرگوسی..... ۶۰

پیوست الف ۶۱

پیوست ب ۶۶

مراجع ۶۹

فهرست اشکال

شکل ۲-۱- مدل نویز غیرگوسی با مقادیر $\boldsymbol{\kappa = 1000}$، $\boldsymbol{v = 2}$ و $\boldsymbol{\varepsilon = 0.007}$. ۸
شکل ۳-۱- فرآیند نمونه برداری از سیگنال اطلاعات و فشرده سازی و بازسازی آن. شکل بالا) به روش کلاسیک، شکل پایین) به روش حس‌گری فشرده..... ۱۳
شکل ۳-۲- فرآیند اندازه‌گیری با استفاده از ماتریس اندازه‌گیری تصادفی گوسی $\boldsymbol{\Phi}$ و ماتریس تبدیل کسینوسی گسسته‌ی $\boldsymbol{\Psi}$. ۱۵
شکل ۴-۱- بلوک دیاگرام آشکارساز بهینه‌ی محلی در حضور نویز غیرگوسی..... ۲۳
شکل ۴-۲- بلوک دیاگرام آشکارساز فشرده در حضور نویز غیرگوسی با تعداد نمونه‌ی زیاد. ۲۷
شکل ۴-۳- منحنی‌های مشخصه‌ی کارکرد گیرنده برای آشکارساز فشرده در نویز نمایی دو طرفه برای مقادیر مختلف نسبت تعداد اندازه‌گیری به تنکی (نسبت سیگنال به نویز در این منحنی‌ها ۱۵ دسی‌بل است). ۳۰
شکل ۴-۴- احتمال آشکارسازی آشکارساز فشرده در نویز نمایی دو طرفه در احتمال هشدار غلط ۰/۱ برای مقادیر مختلف نسبت سیگنال به نویز..... ۳۱
شکل ۴-۵- منحنی‌های مشخصه‌ی کارکرد گیرنده برای آشکارسازهای مجانبی، فشرده و محلی در $\boldsymbol{N = 10}$ و $\boldsymbol{100}$، $\boldsymbol{M = K = 0.2N}$، $\boldsymbol{SNR = 5\ dB}$ در حضور نویز نمایی دوطرفه با قدرت $\boldsymbol{110}$ ۳۲
شکل ۶-۱- بازسازی یک سیگنال تنک با $\boldsymbol{N = 1000}$، $\boldsymbol{M = 300}$ و $\boldsymbol{K = 20}$ که با نویز نمایی دوطرفه مخلوط شده است. (الف) سیگنال اصلی، (ب) بازسازی با MP، (پ) بازسازی با OMP، (ت) بازسازی با BCS، (ث) بازسازی با BP و (ج) بازسازی با NPSR ۵۱
شکل ۶-۲- مقایسه‌ی روش نمایش تنک ناپارامتری و روش‌های مبتنی بر کمینه‌سازی نرم مرتبه‌ی ۲ در حضور نویز نمایی دوطرفه. ۵۴
شکل ۶-۳- مقایسه‌ی روش نمایش تنک ناپارامتری و روش‌های مبتنی بر نرم مرتبه‌ی ۲ در حضور نویز میدلتون کلاس A با پارامترهای $\boldsymbol{\kappa = 1000}$ و $\boldsymbol{\varepsilon = 0.01}$. ۵۵
شکل ۶-۴- مقایسه‌ی روش نمایش تنک ناپارامتری و روش‌های مبتنی بر کمینه‌سازی نرم مرتبه‌ی ۲ در حضور نویز گوسی. ۵۶

فصل اوّل

فصل ۱

مقدمه

نویز، یکی از مشکلات مهم موجود در تحلیل سیستم‌های مخابراتی است که از یک دیدگاه به دو دسته‌ی نویز گوسی و نویز غیرگوسی تقسیم‌بندی می‌شود [1]. خواص نویز ناشی از وضعیت کانال است و بنابراین می‌توان بحث را بر روی کانال‌های گوسی و غیرگوسی، مستقل از این‌که در دو طرف این کانال از چه گیرنده و فرستنده‌ای استفاده می‌شود، متمرکز کرد.

پردازش مشاهدات نویزی با هدف کشف حضور یا عدم حضور یک سیگنال معمولا با استفاده از آزمون فرض های آماری صورت می‌گیرد. وظیفه‌ی یک آشکارساز در این مورد این است که با انجام یک آزمون آماری مشخص کند که کدام یک از فرض‌ها درست و کدام‌یک غلط است. یک فرض به نام «فرض خنثی»[1] یا H_0 حالتی از دریافت را بیان می‌کند که فقط شامل نویز است. «فرض دیگر»[2] یا H_1 نیز مدل دریافت سیگنال به همراه نویز را بیان می کند.

نویز گوسی منجر به طراحی گیرنده‌ی خطی می‌شود که شامل دو دسته‌ی «صافی منطبق»[3] و «آشکارساز همبسته‌ساز»[4] است [2]. زمانی‌که گیرنده‌های بهینه برای نویز گوسی (مثل سیستم‌های صافی منطبق) برای کشف سیگنال در محیط‌های با نویز غیرگوسی استفاده شوند، کارایی گیرنده به مقدار زیادی (۲۰ تا ۴۰ «دسی‌بل»[5]) در

[1] Null Hypothesis
[2] Alternative Hypothesis
[3] Matched Filter
[4] Correlator Detector
[5] Decibel

مقایسه با گیرنده‌های بهینه‌ی طراحی شده برای تداخل‌های الکترومغناطیسی، مثل مراجع [7]-[3]، کاهش می یابد [8].

طراحی گیرنده برای کانال غیرگوسی، بسته به نوع مدل نویز به‌کاررفته، منجر به پیدایش گیرنده‌های غیرخطی می‌شود، مثلا اگر نویز «نمائی دوطرفه»[6] باشد، به «آشکارساز همبسته‌ساز علامت»[7] می‌رسیم [9]. واضح است که در این نوع از گیرنده‌ها، اگر مدل نویز تغییر کند، «آماره‌ی آزمون»[8] تغییر خواهد کرد و بنابراین ساختار گیرنده‌ی طراحی شده نیز تغییر می‌کند. البته در آشکارسازی «ناپارامتری»[9]، آشکارساز، مستقل از مدل نویز طراحی شده و به این ترتیب برای دسته‌ی وسیعی از مدل‌های نویز، چه گوسی و چه غیرگوسی، کارایی مطلوبی دارد، مانند آن‌چه در مرجع [10] آمده است.

یکی از اهداف پایان‌نامه‌ی پیش رو، طراحی گیرنده در حضور نویز غیرگوسی با استفاده از روشی جدید است که در آن از ویژگی‌های کشف سیگنال با استفاده از روش «حس‌گری فشرده»[10] استفاده می‌شود. اخیرا حس‌گری فشرده در بعضی از مقالات برای آشکارسازی و تخمین سیگنال به‌کار رفته است، مانند [13]-[11].

«دائورت»[11] و همکارانش در [11] یک روش جدید برای آشکارسازی سیگنال تنک در حضور نویز گوسی و تداخل تنک با استفاده از حس‌گری فشرده پیشنهاد کردند. آن‌ها تعداد بسیار کمی اندازه‌گیری از سیگنال دریافتی را به‌جای تعداد نمونه‌های زیاد برای تصمیم‌گیری در مورد حضور و عدم حضور سیگنال به‌کار بردند.

در [12]، «داونپورت»[12] و دیگر همکارانش به روشی برای آشکارسازی سیگنال در حضور نویز گوسی در حالت کلی پرداختند و آن را «آشکارساز فشرده»[13] نام نهادند. در ورودی این آشکارساز، فرض بر آن است که به‌جای نمونه های سیگنال دریافتی، نمونه‌های فشرده شده‌ای از آن در دسترس است.

در تمام این آشکارسازها، مدل نویز گوسی درنظر گرفته شده است، چراکه در بیش‌تر کاربردهای مهندسی از مدل گوسی برای نویز استفاده می‌شود. این مدل در بسیاری از کاربردها و به‌ویژه در مخابرات به واقعیت نزدیک است و استفاده از آن در طراحی و تحلیل سیستم‌های مخابراتی رایج است. استفاده از مدل‌های غیرگوسی نیز سابقه‌ی زیادی در مهندسی مخابرات دارد. دلایل توجه به نویز غیرگوسی در سیستم‌های مخابراتی در مقالاتی از «میدلتون»[14] ذکر شده است. او نشان داد در محیط شهری علاوه بر نویز گوسی، نویزهای دیگری ناشی از فعالیت انسان نیز ایجاد می‌شوند که چنین نویزی در مجموع نمی‌تواند یک نویز گوسی باشد [14].

[6] Double Exponential
[7] Sign Correlator Detector
[8] Test Statistic
[9] Non Parametric
[10] Compressed Sensing
[11] Duarte
[12] Davenport
[13] Compressive Detector
[14] Middleton

او مدل‌های ریاضی را برای تحلیل این نویزها ارائه داد که به مدل‌های میدلتون نوع A، B و C مشهور هستند [15] و با عرض باند و نیز نحوه‌ی تشکیل نویزهای غیرگوسی رابطه دارند. همان‌طور که قبلا نیز ذکر کردیم، طراحی گیرنده‌ی بهینه در حضور نویز غیرگوسی منجر به گیرنده‌های غیرخطی می‌شوند که به‌صورت مجانبی رفتار بهینه دارند. هم‌چنین در این گیرنده‌ها بین مدل نویز و آماره‌ی آزمون طراحی شده وابستگی وجود دارد که این باعث می‌شود برای یک مدل نویز متفاوت با حالت قبل، نیاز به طراحی یک آماره‌ی آزمون جدید داشته باشیم.

روشی که در فصل چهارم این پایان‌نامه برای آشکارسازی در حضور نویز غیرگوسی ارائه شده است نیازی به دانستن مدل دقیق نویز غیرگوسی ندارد و تنها قدرت نویز را می‌داند. به‌همین دلیل می‌توان آن را به‌عنوان یک روش آشکارسازی ناپارامتری به حساب آورد. در فصل مذکور، از آشکارساز فشرده برای کانال غیرگوسی استفاده می شود.

در فصل پنجم به بحث راجع به امنیت کانال و ارائه‌ی یک روش جدید برای دست یافتن به امنیت کامل از دیدگاه «شانون»[15] که در [16] بیان شده است، خواهیم پرداخت. روش ارائه شده در این‌جا براساس ترکیب فشرده سازی و رمزگذاری هم‌زمان است که به نام «رمزگذاری بر مبنای حس‌گری فشرده»[16] معروف است. در [17]، «راچلین»[17] و «بارون»[18] بیان کرده‌اند که هیچ‌گاه رمزگذاری بر مبنای حس‌گری فشرده نمی‌تواند امنیت کامل را فراهم آورد. آن‌ها اثبات کرده‌اند که اگر از ماتریس اندازه‌گیری حس‌گری فشرده به‌عنوان کلید برای رمزگذاری برروی اطلاعات استفاده شود، برای یک گیرنده‌ی غیرخودی این کلید با حجم زیادی از محاسبات یافتنی است و بنابراین امنیت کامل را به‌دنبال نخواهد داشت. اما در فصل پنجم این پایان‌نامه نشان خواهیم داد که با فرض بعضی از شرایط خاص، می‌توانیم با استفاده از حس‌گری فشرده به امنیت کامل دست یابیم.

مسئله‌ی «نمایش تنک»[19] سیگنال در حضور نویز غیرگوسی، از دیگر موضوعاتی است که در ادامه‌ی این پایان نامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که گفتیم، در بررسی مسائل موجود در حوزه‌ی پردازش سیگنال در سیستم‌های مخابراتی، محققان در بررسی ابتدائی موضوع نویز کانال را گوسی در نظر می‌گیرند و سپس ممکن است به مسئله‌ی مورد نظر با فرض نویز غیرگوسی نیز توجه کنند. محققان حوزه‌ی نمایش تنک، تا به امروز به بررسی این مسئله در حضور نویز غیرگوسی و ضربه‌ای با پارامترهای ناشناخته نپرداخته‌اند. فصل ششم این پایان‌نامه با همین انگیزه نگاشته شده است.

در فصل ششم نمایش ناپارامتری سیگنال تنک را به عنوان یکی از دستاوردهای این پایان‌نامه در ابتدا معرفی می‌کنیم و سپس نشان خواهیم داد که با استفاده از این مسئله‌ی بهینه‌سازی جدید چگونه می‌توانیم بر مشکل

[15] Shannon
[16] Compressed Sensing Based Encryption
[17] Rachlin
[18] Baron
[19] Sparse Representation (SR)

حضور نویز غیرگوسی ناشناخته در تحلیل مسائل نمایش تنک در حالت کلی غلبه کنیم. موضوع اصلی این فصل چگونگی نمایش سیگنال آمیخته با نویز غیرگوسی ناشناخته با استفاده از بردار ضرایب تنک است. در فصل ششم ابتدا روش‌های موجود برای نمایش تنک در حضور نویز گوسی، که از دیرباز مطرح بوده است، معرفی می‌شود و سپس یک شاخه‌ی جدید با نام نمایش تنک ناپارامتری، معرفی خواهد شد.

در نگاهی اجمالی، این پایان‌نامه‌ی پیش رو به این‌صورت طبقه بندی شده است: در فصل دوم به ذکر مدل سیستم مخابراتی مورد نظر می‌پردازیم. فصل سوم به معرفی اجمالی مبحث حس‌گری فشرده پرداخته است. ایده‌ی جدید برای آشکارسازی سیگنال و طراحی گیرنده در حضور نویز غیرگوسی با استفاده از حس‌گری فشرده در فصل چهارم آمده است. فصل پنجم به استفاده از حس‌گری فشرده در تبادل امن اطلاعات اختصاص یافته است. در فصل ششم نیز نمایش تنک سیگنال در حالت کلی در حضور نویز غیرگوسی ناشناخته بررسی خواهد شد. فصل هفتم نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای فعالیت‌های آینده اختصاص داده شده است.

فصل دوم

فصل ۲
مدل سیستم مخابراتی

در سیستم‌های مخابراتی، منبع، سیگنال اطلاعاتی مورد نظر را تولید می‌کند. پس از کدبندی منبع و کدبندی کانال، «حامل‌گذار»[۲۰] عمل «حامل‌گذاری»[۲۱] سیگنال را انجام می‌دهد. سپس سیگنال حامل‌گذاری شده بر روی کانال فرستاده می‌شود که بسته به مشخصات کانال در سیگنال ارسالی تغییراتی ایجاد می‌شود. یکی از این تغییرات، اضافه شدن نویز به سیگنال اطلاعات ارسالی است که در خروجی کانال مدل می‌شود و به‌صورت رابطه‌ی (۲-۱) نشان داده می‌شود

$$r(t) = s(t) + w(t). \qquad (۱-۲)$$

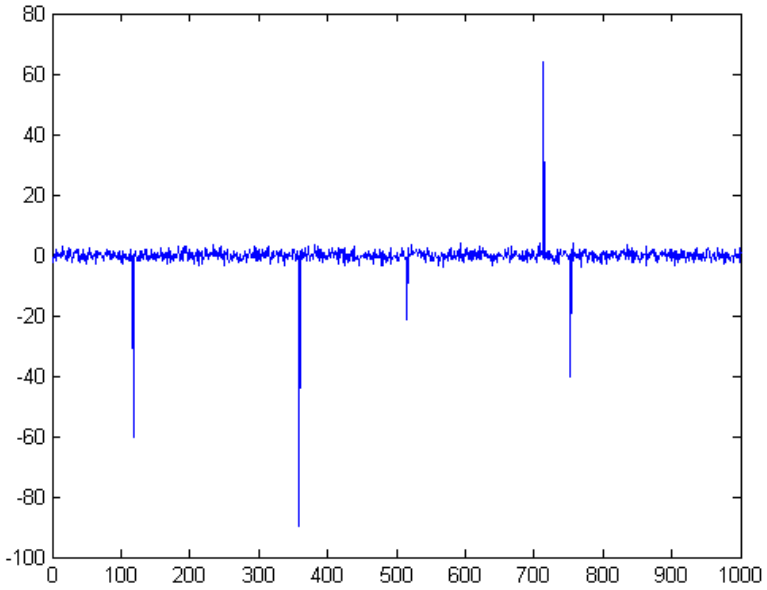
که در این رابطه $r(t)$ سیگنال دریافتی در ورودی گیرنده، $s(t)$ سیگنال ارسالی فرستنده و $w(t)$ نویز اضافه شده است. در بیش‌تر کاربردهای مهندسی از مدل گوسی برای نویز استفاده می‌شود. استفاده از مدل‌های غیرگوسی نیز سابقه‌ی زیادی در مهندسی مخابرات دارد. همان‌طور که قبلا بیان کردیم، میدلتون نشان داد در محیط‌های شهری علاوه بر نویز گوسی، نویزهای دیگری ناشی از فعالیت انسان نیز ایجاد می‌شوند که چنین نویزی در مجموع نمی تواند یک نویز گوسی باشد [14]. او مدل‌های ریاضی را برای تحلیل این نویزها ارائه داد که به مدل‌های میدلتون نوع

[20] Modulator
[21] Modulation

A، B و C مشهور هستند [15] و با عرض باند و نیز نحوه‌ی تشکیل نویزهای غیرگوسی رابطه دارند. در بین این سه مدل، نوع A بیش‌ترین کاربرد را داشته است [9]، و موارد تکمیلی در [20]-[18] مطرح شده‌اند. فعالیت‌های مربوط به اندازه‌گیری و مدل‌سازی نویزهای غیرگوسی تنها به مطالعات میدلتون ختم نمی‌شود و دیگران نیز در این زمینه تحقیقاتی کرده‌اند [21] و [22].

هم‌چنین مدل‌های مختلفی برای تداخل‌های «الکترومغناطیسی»[22] در مراجع [3]، [4] و [31]-[23] بیان شده که این مدل‌ها با استناد به خواص فیزیکی محیط استخراج شده است و نیز معمولا به‌صورت غیرگوسی هستند. میدلتون مدل‌های تداخل الکترومغناطیسی را به سه دسته تقسیم کرد که به‌ترتیب سه، شش و هشت پارامتر فیزیکی دارد که با مشاهده و اندازه‌گیری از دامنه (یا پوش) تداخل الکترومغناطیسی قابل دسترس است. علت اصلی تعریف این مدل‌های نویز، «سازگاری الکترومغناطیسی»[23] در مخابرات است. البته این مدل‌ها در زمینه‌های دیگر مثل «صوت‌شناسی زیرآبی»[24] در [35]-[32] و رادار و به‌طور کلی حس‌گری سیگنال از راه دور کاربرد دارد، زیرا در تمام این موارد نویزهای طبیعی و نویزهای با منشا انسانی نقش مهمی دارند [8].

یکی از مشخصه‌های نویزهای غیرگوسی وجود ضربه‌های نویزی با دامنه‌ی زیاد آن‌ها است (شکل ۲-۱). حرکت ماشین‌ها، وجود سیستم‌های الکترونیکی مختلف به تعداد فراوان در محیط، وجود تعداد زیادی از لامپ‌های نئون که در حال کلیدزنی دائم هستند و موارد دیگر، باعث ایجاد ضربه‌هایی با دامنه‌ی زیاد در نویز می‌شود.



شکل ۲-۱- مدل نویز غیرگوسی با مقادیر $\kappa = 1000$، $v = 2$ و $\varepsilon = 0.007$.

[22] ElectroMagnetic Interference (EMI)
[23] Electromagnetic Compatibility (EMC)
[24] Underwater Acoustic

میدلتون حضور نویز گوسی و نیز وجود ضربه‌های با دامنه‌ی زیاد را با هم در نظر گرفت. وی مدل زمانی (و نه آماری) نویز را به‌صورت رابطه‌ی (۲-۲) بیان کرد [1]

$$w(t) = w_N(t) + w_i(t). \tag{۲-۲}$$

که $w_N(t)$ فرآیند نویز تصادفی گوسی و $w_i(t)$ فرآیند تصادفی «نویز ضربه‌ای»[۲۵] است. اگر بخش ضربه‌ای نویز را به‌صورت ضربه‌هایی با دامنه‌ی تصادفی و در زمان‌های تصادفی نشان دهیم، در این‌صورت می‌توانیم $w_i(t)$ را به صورت (۲-۳) بنویسیم

$$w_i(t) = \sum_i a_i p(t - \tau_i). \tag{۲-۳}$$

که a_i رشته‌ی مستقل از متغیرهای تصادفی با توزیع یکسان و τ_i متغیر تصادفی با توزیع نقاط پوآسن است. شکل پالس‌های $p(.)$ توسط پاسخ فرکانسی صافی ورودی گیرنده مشخص می‌شود. اگر T_p عرض پالس و λ پارامتر فرآیند پوآسن باشد، و با فرض $\lambda T_p \ll 1$، در این‌صورت مدل میدلتون نوع A حاصل می‌شود. با توجه به این‌که نویز را به صورت فرآیند تصادفی «ایستان»[۲۶] در نظر می‌گیریم، در [9] نشان داده شده است که تابع چگالی احتمال بخش ضربه‌ای نویز به‌صورت (۲-۴) در می‌آید

$$f_I(x) = \left(1 - \lambda T_p\right)\delta(x) + \lambda T_p h_I(x). \tag{۲-۴}$$

که $h_I(.)$ تابعی از شکل پالس $p(.)$ بوده و $\delta(.)$ تابع ضربه‌ی دیراک است. میدلتون نشان داده است که تابع چگالی احتمال نویز ضربه‌ای را می‌توان به‌صورت (۲-۵) نیز بیان کرد

$$f(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-A}A^m}{m!} \frac{1}{\sigma_m\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_m^2}\right). \tag{۲-۵}$$

که $A = \lambda T_p$ است. هرچه مقدار A کوچک‌تر باشد، نویز خاصیت ضربه‌ای بیش‌تری به خود می‌گیرد. هم‌چنین طبق رابطه‌ی (۲-۶) داریم

$$\sigma_m^2 = \frac{{}^{m}/_{A} + \Gamma}{1 + \Gamma}. \tag{۲-۶}$$

[25] Impulsive Noise
[26] Stationary

که Γ نسبت قدرت مولفه‌ی گوسی به مولفه‌ی ناشی از نویز ضربه‌ای در فرآیند پوآسنی است. می‌بینیم که مدل میدلتون مجموع بی‌نهایت مولفه‌ی گوسی است. کار کردن با چنین مدلی به‌نظر پیچیده می‌رسد، اما برای حل این پیچیدگی راهی وجود دارد. میدلتون در [15] نشان داده است که می‌توان چنین مدلی را با تقریب خوبی تنها از دو مولفه‌ی گوسی در نظر گرفت که می‌تواند نقش مدل میدلتون را بازی کند.

برای این منظور می‌توان تابع چگالی احتمال نویز با ماهیت غیرگوسی را به‌صورت مجموع یک تابع چگالی احتمال گوسی با واریانس کم و یک تابع چگالی احتمال گوسی با واریانس زیاد بیان کرد. به‌عبارت دیگر تابع چگالی احتمال نویز غیرگوسی عبارت است از

$$f(x) = (1-\varepsilon)n_x(0,\upsilon^2) + \varepsilon n_x(0,\kappa\upsilon^2). \quad (۷-۲)$$

که $n_x(0,\upsilon^2)$ از رابطه‌ی (۲-۸) به‌دست می‌آید

$$n_x(0,\upsilon^2) = \frac{1}{\upsilon\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{x^2}{2\upsilon^2}\right). \quad (۸-۲)$$

و نیز κ یک عدد بزرگ (از رتبه‌ی ۱۰ یا ۱۰۰ و یا حتی بزرگ‌تر) بوده و ε احتمال وقوع ضربه در نویز غیرگوسی است. خاصیت ضربه‌ای بودن نویز در این مدل وابسته به احتمال وقوع آن (ε) و قدرت ضربه‌ای آن (κ)، نسبت به قسمت گوسی است. این مدل در مقالات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است [9]. یک نمونه ۱۰۰۰ تایی از نویز غیرگوسی میدلتون در شکل ۲-۱ به نمایش گذاشته شده است. برای به‌دست آوردن این شکل، $\kappa = 1000$، $\upsilon = 2$ و $\varepsilon = 0.007$ در نظر گرفته شده است.

فصل سوم

فصل ۳
حس‌گری فشرده

۳-۱- مفهوم حس‌گری فشرده

در قضیه‌ی نمونه‌برداری «نایکوئیست»[۲۷] بیان شده است که برای بازسازی سیگنال آنالوگ پایین گذر از روی نمونه‌های دیجیتال آن، لازم است که تعداد نمونه‌های گرفته شده، حداقل ۲ برابر پهنای باند سیگنال موردنظر باشد. روش‌های کلاسیک موجود در بازسازی سیگنال‌ها نیز با استناد بر این قضیه، در ابتدا تعداد نمونه‌های لازم را گرفته و سپس با انجام تبدیل مورد نظر (مثلا تبدیل «ویولت»[۲۸] برای تصویر و یا تبدیل فوریه برای سیگنال صوت)، ضرایب سیگنال را در فضای تبدیل یافته و ذخیره می‌کنند.

در بسیاری از کاربردها، روش بالا از نقطه‌نظر حجم محاسبات و زمان لازم برای یافتن تبدیل و عکس تبدیل مورد نظر مناسب نیست، زیرا در ابتدا نمونه‌های زیادی را از سیگنال می‌گیرند و پس از محاسبه‌ی ضرایب سیگنال در فضای تبدیل، بسیاری از ضرایب را – به‌دلیل داشتن انرژی ناچیز نسبت به انرژی کل- حذف می‌کنند. به‌طور خلاصه، در ابتدا نمونه‌برداری انجام شده (حس کردن سیگنال مورد نظر) و بعد از انجام محاسبات لازم، ضرایب بی اهمیت دور ریخته می‌شود (فشرده‌سازی).

[27] Nyquist
[28] Wavelet