

به کارگیری فیلتر کالمن توسعه یافته جهت کاهش نویز غیرایستادن چرخشی در آشکارسازی هوایی پرتوی گاما

محسن رضایی*، منصور عاشور و لیلا سرخوش

گروه پژوهشی تصویربرداری و دستگاه وری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

*سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کدپستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵

پست الکترونیکی: rezaei@iran.ir

چکیده

آشکارسازی پرتو گاما نقش مهمی در افزایش ایمنی هسته‌ای و بستری مناسب برای استفاده بهینه از پرتوهای هسته‌ای فراهم می‌کند. برای آشکارسازی با ریسک پرتوگیری پایین، به دلیل فاصله محل آشکارسازی از منبع پرتویی معمولاً از روش پایش هوایی گاما استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین مسائل در پایش هوایی گاما، کاهش نویز آشکارسازی است. روش‌های مختلفی برای کاهش نویز آشکارساز هوایی گاما ارائه شده که از میان آن‌ها در این مقاله، استفاده از خواص ایستادن گردشی، به دلیل قابلیت‌های آن در آشکارسازی شمارش‌های کم‌پرتویی، که ناشی از منابع ضعیف گامای دور از محل آشکارساز است، پیشنهاد و به منظور افزایش دقت نتایج آشکارسازی پرتو گاما و کاهش خطای ناشی از محدودیت‌های فیزیکی و پروازی با سایر روش‌های پردازش سری‌های زمانی و تخمین‌های طیفی مقایسه شده است. مهم‌ترین مشکل چنین روش‌هایی پیچیدگی محاسباتی بالا است، که استفاده از آن را با چالش روبه‌رو می‌کند. در این مقاله روش‌های کاهش نویز آشکارساز هوایی گاما مبتنی بر خواص ایستادن گردشی در فیلترهای توسعه یافته کالمن معرفی می‌شوند. فیلتر کالمن با استفاده از ادغام داده‌ها، بر اساس یک مدل دینامیکی، تغییرات در شمارش فوتون‌های دریافتی عناصر پرتوزا را در زمان واقعی برآورد می‌کند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که فیلتر کالمن توسعه یافته با توجه به ویژگی حذف اعواج‌های غیرخطی نسبت به سایر فیلترها برتری دارد. تمرکز مقاله بر مدل‌سازی، تطبیق و جنبه‌های محاسباتی اعمال فیلتر کالمن بر داده‌های واقعی حاصل از پایش هوایی گاما است. معیار کوواریانس خطا و زمان مورد نیاز محاسبات برای پردازش در واقع‌نگاری آشکارسازی پرتوی گاما با روش‌های تخمین مبتنی بر چگالی طیف توان و تخمین طیفی چند کاهنده و کالمن توسعه یافته ارزیابی شده است. نتایج بیانگر آن است که استفاده از روش کالمن توسعه یافته علاوه بر این که آشکارساز را برای مقابله با نویزها و اختلال‌های غیرخطی آماده می‌کند، هم‌گرایی سامانه پایش هوایی را نیز به صورت محسوسی افزایش می‌دهد.

کلیدواژه‌گان: پایش هوایی پرتو گاما، فیلتر کالمن توسعه یافته، نویز غیرایستادن چرخشی، ایمنی هسته‌ای.

۱. مقدمه

با توجه به مسائل، مخاطرات و هزینه‌های مترتب بر به کارگیری سیستم‌های متداول و سنگین وزن پایش هوایی گاما، به کوچک‌سازی بخش آشکارساز توجه بیشتری شده است. این رویکرد به‌ویژه با استفاده از تکنیک‌های کاهش نویز آشکارساز

یافته، به پردازش داده‌های واقعی تعداد فوتون دریافتی از منابع شناخته شده پرتوزا می‌پردازد و مدل استخراج شده از طریق توابع ارزیابی اعتبار سنجی شده برای پایش هوایی گاما مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای سیستم های خطی، فیلترهای کالمن تخمینگرهای بهینه را در تشخیص حداقل مربعات فراهم می‌کنند.

تعداد فوتون دریافتی از جمله سری‌های زمانی ناپایدار و تخمین تعداد فوتون دریافتی عموماً یک کار پیچیده با شرایط غیرمطمئن و همراه با ضعف در پایگاه داده است. تاکنون برای این منظور مدل کننده واحدی که از نظر همگان به عنوان بهترین روش شناخته شود، توسعه نیافته است. یکی از این روش‌ها، روش کالمن است که به عنوان تخمین خطی مرتبه دوم نیز شناخته می‌شود، این روش یک سامانه پویا را با استفاده از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های شامل خطا در طول زمان برآورد می‌کند. فیلتر کالمن معمولاً تخمین دقیق تری را نسبت به تخمین های بر بر مبنای استنباط بیزی و تخمین توزیع احتمال مشترکی ارائه می‌کند.

مفهوم فیلتر کالمن می‌تواند برای تولید فیلتر نویز دیجیتال بهینه در سیستم آشکارساز هوایی پرتوهای گاما به کار رود. از آنجا که خطاهای تخمین متغیرهای سیستم با کمترین مربعات حداقل می‌شود، فیلتر بهینه در نظر گرفته می‌شود. این مقاله با پیشنهاد استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته جهت کاهش نویز، به پیاده سازی این فیلتر بهینه، جهت حذف نویز آشکارساز هوایی پرتوهای گاما پرداخته و نتایج آنرا گزارش می‌کند. با توجه به ویژگی های استاتیک نویز اندازه گرفته شده، عملکرد فیلتر موجب بهبود دقت آشکارساز می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، هنگامیکه مفاهیم فیلتر کالمن استفاده می‌شود عملکرد پایش هوایی پرتوهای گاما به طور قابل توجهی بهبود پیدا می‌کند.

هوایی گاما و روش‌های مختلف کاهش خطا و نویز، به افزایش دقت اندازه‌گیری سیستم‌های کوچک‌تر و سبک‌وزن‌تر منجر خواهد شد. این روش‌ها مشتمل بر انواع روش‌های کاهش نویز آماری، کالیبراسیون تجهیزات و پنجره‌های انرژی و این قبیل اقدامات است [۱].

روش‌های مختلفی برای تخمین دقیق و بهنگام تعداد فوتون دریافتی در پایش هوایی پرتو گاما به کار گرفته می‌شود [۲]. از جمله مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش استفاده از فیلتر منطبق (Matched filter)، روش مبتنی بر انرژی (Energy detection)، و استفاده از ویژگی‌های حاصل از فرض ایستادن گردشی بودن (Cyclostationarity) اشاره کرد. روش فیلتر منطبق در شمارش های کم پرتوی گاما بسیار خوب عمل می‌کند ولی به اطلاعات زیادی از منبع پرتوی نیازمند است. بنابراین، این روش در آشکارساز هوایی گاما قابل استفاده نیست. روش آشکارسازی پرتو گاما با استفاده از انرژی، روش ساده و سریعی است اما این اشکال را دارد که در شمارش های کم پرتوی گاما عملکردش به شدت افت می‌کند. روش مبتنی بر فرض ایستادن گردشی بودن شمارش پرتو گاما، که در اکثر مواقع فرض قابل قبولی است، به دلیل عملکرد مناسب در شمارش های کم پرتو گاما و همچنین استحکام (Robustness) در برابر عدم قطعیت میزان توان نویز مورد توجه این مقاله است. در این روش، بر خلاف روش آشکارسازی پرتو گاما بر اساس انرژی، با توجه به این که تداخل و نویز ایستادن گردشی نیستند، شمارش پرتو گاما از این دو جدا می‌شود.

در این مقاله تخمین دقیق و بهنگام تعداد فوتون دریافتی به عنوان یکی از اجزای اصلی پایش هوایی فوتون‌های گاما مطرح می‌شود. در پژوهش حاضر، از فیلتر کالمن برای تخمین تعداد فوتون‌های شمارش شده و کاهش نویز اندازه‌گیری هوایی استفاده شده است. این روش با به کارگیری فیلتر کالمن توسعه

در ادامه، ابتدا در بخش ۲ مفاهیم اولیه پایش هوایی پرتوهای گاما و متعاقباً پس از بیان مختصر مفاهیم مرتبط ایستان گردشی سیگنال شمارش فوتون گاما، در بخش ۳ روش آشکارسازی پرتو گاما به کمک خواص ایستان گردشی توضیح داده می شود و سپس پیاده سازی این روش به وسیله فیلتر کالمن پیشرفته در بخش ۴ تشریح می شود. پس از آن روش پیشنهادی با سایر روش های پیشرفته با استفاده از داده های واقعی پایش گاما پیاده سازی شده و نتایج با معیارهای مختلف ارزیابی در بخش ۵ ارائه شده است. در آخر و در بخش ۶ نتیجه گیری انجام می شود.

۲. پایش هوایی پرتوهای گاما

پایش هوایی، اقتصادی ترین، سریع ترین و مناسب ترین روش برای جمع آوری اطلاعات پرتویی سطح زمین به منظور تهیه نقشه پرتوزایی مناطق مختلف کشور مخصوصاً در شرایط بحران است. علاوه بر پرتوزایی طبیعی، برخی اقدامات بشری و یا بروز سوانح هسته ای منجر به آزادسازی مواد پرتوزا در محیط می شوند. اقدامات ایمنی و حفاظتی دقیق و هدفمند، اولین واکنش های ضروری در مواجهه با چنین رویدادهایی است، این دقت و هدفمندی تنها میتواند با شناخت نوع و میزان مواد پرتوزا محقق شود. ایمن ترین روش برای بررسی مقدار و نوع عناصر پرتوزای پراکنده شده در پی یک سانحه هسته ای و یا نشت مواد پرتوزا، استفاده از روش "پایش هوایی گاما" است [۴]. با توجه به برد پرتوی گاما در هوا این امکان وجود دارد تا ضمن حفظ فاصله مناسب و ایمن از پرتوها و ذرات پرتوزا، که می توانند به افراد و حتی تجهیزات اندازه گیری آسیب جدی وارد کنند، با دقت مناسبی تخمین قابل اعتمادی از "نوع" و "میزان" مواد پرتوزا و آلودگی پرتوی محیط به دست آورد. جمع آوری و تخمین اطلاعات مربوط به وضعیت پرتوزایی و سطوح تشعشعات در محیط آلوده و نیز

تشعشعات خارج از سایت، از ابزارهای اولیه و ضروری برای تصمیم گیری مناسب در چنین مواقعی است. این گونه تصمیمات، باید به کمک مدل های پیش آگاهی و اندازه گیری های جامع محیطی که به صورت اضطراری و در شرایط بحران انجام می شوند اتخاذ، و به طور مستمر مورد اصلاح و بازنگری قرار گیرند. عادی شدن وضعیت و بازگشت از حالت فوق العاده به شرایط طبیعی هم، به کمک نتایج اندازه گیری های پی در پی مشخص و به افراد در معرض پرتو و یا محدوده سانحه یا منطقه آلوده اطلاع داده می شود.

کاهش نويز آشکارساز هوایی گاما با قابلیت تحرک زیاد، همراه با جمع آوری داده ها و نمونه برداری محیط، نقش مهمی در واکنش سریع و اقدام مناسب و به موقع در سوانحی که آزاد شدن عناصر پرتوزا را در پی دارند ایفا می کند. پایش وضعیت یسد فعال آزادشده (I131) در پی سوانح هسته ای [۴]، جستجوی چشمه های دزدیده یا مفقودشده، یافتن باقیمانده ماهواره ها یا سایر پرتابه هایی که به زمین اصابت کرده اند، میزان آب معادل بارش برف [۵]، وضعیت سطح و ارتفاع آب دریاچه ها [۶]، تغییرات در وضعیت خاک مناطق با پوشش سبز [۷] مثال هایی مختلف از کاربردهای گسترده، جالب و متنوع، آشکارسازهای هوایی گاما هستند که به کمک تشخیص آنومالی ها یا تغییرات پرتوی محیط میسر می شوند.

مدل های پیش آگاهی در مورد پدیده هایی که طبیعت آماری دارند، با استفاده از روش های آماری و استفاده از شاخص هایی که بروز و وقوع پدیده مورد نظر، در پی ظهور یا تغییر مقدار آن شاخص ها با قطعیت زیادی اتفاق می افتد، بکار می روند. این مدل های پیش آگاهی، در مورد سوانح پرتویی که اقدامات حفاظتی و رفع آلودگی پس از سانحه باید با زمان بندی، ترتیب اجرایی و دقت به انجام برسند، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در به کارگیری مدل های مناسب پیش آگاهی در پدافند پرتویی، شناخت نوع و میزان پرتوهای

محیطی و تغییرات آن‌ها، چگونگی و سرعت تفکیک و تشخیص منابع طبیعی و غیرطبیعی، و تغییرات آن‌ها در مراحل اندازه گیری، تفکیک و تشخیص نوع و مقدار آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

پرتوی گاما یکی از بهترین انتخاب‌ها برای سنجش از راه دور پرتوزایی سطح زمین است. اگر هدف از آشکار سازی پرتوی گاما، طیف سنجی باشد و امکان این کار وجود داشته باشد، به دلیل اینکه هر پرتوی گاما انرژی مشخصی دارد و این انرژی که امضای گاما نامیده می‌شود، مشخصه ایزوتوپ مربوط به آن پرتوی گاما است، به کمک آن، نوع و میزان آن ایزوتوپ قابل تخمین است [۸]، در این مقاله تخمین مقادیر عناصر مختلف پرتوزا با استفاده از فیلتر کالمن در کاهش نویز آشکار ساز مورد استفاده در پایش هوایی گاما برای پرتوزایی طبیعی یا با بکارگیری توام روش‌های پایش آگاهی پس از یک سانحه هسته ای پیشنهاد ده است.

در حوزه ایمنی هسته ای یکی از مباحث مهم، آشکار سازی هوایی پرتوهای گاما است. در این مقاله آشکار ساز هوایی گاما مبتنی بر فیلتر کالمن مورد واکاوی قرار می‌گیرد. در این آشکار ساز، الزامات هدایت پرنده حامل آشکار ساز و تعیین موقعیت و وضعیت آشکار ساز با استفاده از داده های حاصل از حسگرهای متفاوت، شامل سه اندازه گیری برای هر محور توسط شتاب سنج، ژيروسکوپ و گوس متر و همچنین با لحاظ نمودن دو بارومتر در مجموع شش درجه آزادی در فضا ایجاد و این درجات آزادی را مقید و به صورت متغیرهای وابسته تعریف می‌کند. این الزامات نهایتاً با کمک روش های آماری به تخمین فرآیندهای تصادفی کمک کرده و منجر به کاهش واریانس خطای تخمین از واریانس خطای تک تک اندازه گیری های مستقل می‌شود.

در پایش هوایی از الگوریتم های تخمین استفاده می‌شود. علاوه بر بکارگیری تخمین های مبتنی بر متغیرهای وابسته،

استفاده همزمان از چندین اندازه گیری به صورت موازی یا تکراری، نیز به کاهش خطای آشکار سازی پرتو گاما می‌انجامد. بدین معنا که اگر اندازه گیری های هوایی که خطا دارند در کنار سایر اندازه گیری غیردقیق قرار داده شوند، تخمین گر کالمن می‌تواند تخمینی ارائه دهد که از هر دو اندازه گیری دقیق تر باشد. البته این بهبود، به صورت ریاضی، صرفاً در حالتی که نویز ایستا و تابع چگالی احتمال آن، گوسی باشد صادق است که در مورد آشکار سازی پرتو گاما هوایی گاما چنین شرایطی برقرار است. تخمین بهینه فیلتر کالمن برای ترکیب تخمین ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فیلتر، به تخمینی که در آن توان نویز بیشتر باشد، وزن کمتری اختصاص می‌دهد. در فیلتر کالمن در هر بار تخمین، ملاک را تخمین قبلی قرار داده و تخمین قبلی را با وزن هایی که به دست آمده و حالت سامانه بهنگام می‌کند.

هدف آشکار ساز هوایی گاما محاسبه تعداد فوتون گامای دریافتی در جهت و موقعیت خاص به صورت بلادرنگ و با تجمع داده های دریافتی از سایر حسگرها، با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته و نهایتاً ایجاد نقشه آگاهی از وضعیت پرتوزایی محیط است. در آشکار ساز هوایی گاما، یک مجموعه از حسگرها با شش درجه آزادی در مجموعه محموله پروازی نصب می‌شوند.

۳. آشکار سازی پرتو گاما به کمک فرض ایستان

گردشی بودن

در این بخش روش کلی برای آشکار سازی پرتو گاما شمارش پرتو گاما برای تصمیم به حضور یا عدم حضور منبع پرتو گاما با استفاده از آزمون فرضیه (Hypothesis test) تشریح می‌شود. در ساده ترین حالت و برای یک محیط پایشگر با نویز جمع شونده سفید گوسی، اگر X بردار فوتون-های شمارش شده باشد، در این صورت:

$$\hat{R}_x^\alpha = [Re\{\hat{R}_x^\alpha(\tau_1)\}, \dots, Re\{\hat{R}_x^\alpha(\tau_N)\}] \\ Im\{\hat{R}_x^\alpha(\tau_1)\}, \dots, Im\{\hat{R}_x^\alpha(\tau_N)\}] \quad (3)$$

با در نظر گرفتن تعریفی مشابه فوق برای بردار R_x^α روی مقادیر واقعی $R_x^\alpha(\tau_i)$ ها داریم:

$$\hat{R}_x^\alpha = R_x^\alpha + \varepsilon_x^\alpha \quad (4)$$

بنابراین آزمون فرضیه را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$H_0: \forall \tau_i, i = 1, \dots, N \Rightarrow \hat{R}_x^\alpha = \varepsilon_x^\alpha (\alpha \notin A) \quad (5)$$

$$H_1: \exists \tau_i, i = 1, \dots, N: \Rightarrow \hat{R}_x^\alpha = R_x^\alpha + \varepsilon_x^\alpha (\alpha \in A) \quad (6)$$

بنابراین اگر مقدار تخمین کواریانس سیگنال شمارش پرتو گاما از آستانه تعیین شده گذشت، پایش پرتو گاما x_t ایستاد گردشی است و در غیر این صورت ایستاد گردشی نیست. محاسبه آستانه مناسب بر اساس میزان خطای آشکارسازی پرتو گاما قابل قبول انجام می شود. در پایش هوایی پرتو گاما بسیار مهم است که میزان آژیر غلط کنترل شده باشد که این مهم توسط تعیین مناسب محاسبه آستانه انجام می پذیرد. (لازم به ذکر است که منظور از خطای آژیر غلط در آشکارسازی پرتو گاما، عدم وجود منبع پرتو گاما و تصمیم به برقراری فرض H_1 است.)

برای دستیابی به آمارگان مورد نظر، نیاز به تخمین از طیف گردشی شمارش پرتو گاما است. برای تخمین طیف گردشی می توان از روش های پردازش سری های زمانی و تخمین های طیفی استفاده نمود. با توجه به پیچیدگی کمتر و کارایی بهتر، در این مقاله روش فیلتر کالمن توسعه یافته، پیشنهاد شده است که در آن بنا بر این مصالحه ای (Trade off) میان کارایی و بازده سیستم وجود دارد. برای تخمین طیف گردشی به فیلتر کالمن توسعه یافته می توان از پنجره های مختلفی مانند پنجره مستطیلی، همینگ، Blackman و Kaiser

$$H_0: x = n \quad (1)$$

$$H_1: x = s + n$$

که در آن s بردار شمارش پرتو گاما ارسالی از منبع قابل دریافت در ارتفاع خاص و n بردار نویز سفید گوسی است. پس فرض H_0 بیانگر عدم حضور منبع گاما و فرض H_1 بیانگر حضور منبع پرتو گاما است. برای تشخیص این که کدام فرض صحیح است نیاز به یک آمارگان مناسب است که با در نظر گرفتن یک آستانه تصمیم گرفته شود که کدام فرض صحیح است.

از آنجا که سیگنال شمارش پرتو گاما، تابع خودهمبستگی گردشی مخالف صفر دارد که این به معنای ایستاد گردشی بودن شمارش پرتو گاما است، بنابراین ابتدا به ازای نمونه های در دسترس از شمارش پرتو گاما x_t و به ازای زوج های (α, τ) ($\alpha \neq 0$) تخمینی از $R_x^\alpha(\tau)$ محاسبه می گردد. در پایش هوایی پرتو گاما، حضور منبع گاما منجر به مقدار غیر صفر $R_x^\alpha(\tau)$ می شود، که خود موییدی بر ایستاد گردشی شمارش پرتو گاما x_t است. بر این اساس با در اختیار داشتن T نمونه از شمارش پرتو گاما x_t و به ازای گردش α داریم:

$$\hat{R}_x^\alpha(\tau) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} x_t \cdot x_{t+\tau} e^{-j\pi \alpha t} = R_x^\alpha(\tau) + \varepsilon_x^\alpha(\tau) \quad (2)$$

مقداری است که بر اساس تخمین به دست آمده و با مقدار واقعی به اندازه $\varepsilon_x^\alpha(\tau)$ فاصله دارد، این مقدار کاملاً صفر نخواهد شد. بنابراین با به کارگیری آزمون فرضیه و یک آستانه مناسب، می توان در مورد ایستاد گردشی بودن یا نبودن x_t تصمیم گرفت. در عمل به ازای هر گردش در نظر گرفته شده، برای N تاخیر τ_1, \dots, τ_N مقدار فوق محاسبه شده و مجموعه آن با هم در نظر گرفته می شود. بر این اساس بردار $1*2N$ بعدی \hat{R}_x^α به صورت زیر تعریف می شود:

شده و نتیجه که به صورت مجموعه ای از معادلات غیر خطی است، توسط تخمینگر بهینه کالمن جهت آشکارسازی پرتو گاما موقعیت، نوع و میزان دقیق مواد پرتوزای گاما بکارگرفته می شود. در تجمیع حسگرهای آشکارساز بسته به محدوده زمان مورد تخمین، سرعت پردازش، سرعت تغییرات محیطی و موارد دیگر، آشکارساز پرتو به عنوان مرجع اصلی و دیگر حسگرها به صورت ابزار کمک آشکارسازی پرتو گاما مورد استفاده قرارخواهند گرفت. در طراحی مورد نظر حسگرهای IMU شامل سه ژيروسکوپ متعامد و دو شتاب سنج به همراه یک حسگر حرارتی در کنار آشکارسازی پرتو گاما با استفاده از NaI در یک محموله جانمایی می شوند.

خروجی کالیبره شده ژيروسکوپ ها ($Y_{w,t}$) از محاسبه سرعت زاویه ای در مختصات آشکارساز ($W_{eb,t}^b$) انتقال یافته به مختصات زمینی با در نظر گرفتن بایاس ناشی از اثر تغییرات دمایی ($\delta_{w,t}^b$) و نویز گوسی با میانگین صفر ($e_{w,t}^b$) به صورت زیر است:

$$Y_{w,t} = W_{eb,t}^b + \delta_{w,t}^b + e_{w,t}^b \quad (7)$$

خروجی کالیبره شده شتاب سنج ها ($Y_{a,t}$) از محاسبه شتاب (\ddot{b}_t^b) و گرانش در مختصات بدنی (g^b) و نیز با در نظر گرفتن بایاس ناشی از اثر تغییرات دمایی ($\delta_{a,t}^b$) و نویز گوسی با میانگین صفر ($e_{a,t}^b$) به صورت زیر است:

$$Y_{a,t} = \ddot{b}_t^b - g^b + \delta_{a,t}^b + e_{a,t}^b \quad (8)$$

با دو بار انتگرال گیری از رابطه بالا موقعیت مکانی بدست می آید. آشکارساز پرتوی گاما یک آشکار ساز سه اینچ از نوع NaI است. هدف کلی از تجمیع اطلاعات دریافتی از حسگرها تخمین حالت ها در معادله بازگشتی زیر است:

استفاده کرد که در این مقاله از پنجره Kaiser استفاده شده است.

4. به کارگیری فیلتر کالمن توسعه یافته در تخمین شمارش ایستان گردشی پرتو گاما

در روش پیشنهادی این مقاله با استفاده از آشکارساز پرتوی و اندازه گیری انجام شده ی قبلی توسط دیگران و با توجه به نقشه های محیطی سه بعدی که پیشتر تهیه شده اند (اصطلاحاً داده های روی میز (Table top) اطلاعات مکانی شامل موقعیت و جهت، منابع پرتوزای گاما استخراج و با داده های حاصل از اندازه گیری حسگرها ترکیب و حاصل که به صورت مجموعه ای از معادلات غیرخطی است، توسط تخمینگر بهینه کالمن جهت آشکارسازی پرتو گاما موقعیت، نوع و میزان دقیق مواد پرتوزای گاما بکارگیری می شود.

آشکارساز هوایی پرتوهای گاما یک یا چند محور حساس دارد که نیرو (در شتاب سنج) یا سرعت زاویه ای (در ژيروسکوپ) نسبت به آن سنجیده شده و به یک کمیت الکتریکی (مانند ولتاژ) تبدیل می شود. رابطه بین کمیت اندازه گیری شده توسط حسگر (y)، ولتاژ معادل با آن کمیت (u) با توجه به آفست (b) به صورت زیر است:

$$u_t = GRY_t + b \quad (9)$$

در رابطه بالا G ماتریس قطری مربوط به بهره ها و R ماتریس تراز کردن محور حساس حسگرها نسبت به محل نصب است. در عمل کالیبراسیون یک حسگر IMU یافتن مقادیر ماتریس های G ، R و b است.

در این مقاله با استفاده از داده های روی میز، اطلاعات مکانی شامل موقعیت و جهت منابع پرتوزای گاما استخراج و با داده های حاصل از اندازه گیری حسگرهای IMU ترکیب

به صورت وفقی و با محاسبات برگشتی، قادر است حالت های درونی سیستم را که به صورت مستقیم قابل اندازه گیری نیستند، تخمین بزند. اخیراً فعالیت های گسترده ای در استفاده از فیلترهای کالمن در کاهش نویز کاربردهای مشابه آشکارساز هوایی گاما انجام شده است [۵]. توصیفی از کاربری فیلترهای وفقی کالمن در تخمین مواد پرتوزای گاما در سطح قبلا انجام شده است [۵]. انواع فیلترهای تخمین گر می توانند در آشکارسازی پرتو گاما هوایی پرتوهای گاما مورد استفاده قرار گیرند. فیلتر کالمن، به خاطر ماهیتش در تخمین حالت سیستم، برای پردازش های بلادرنگ مناسب است. تنها مساله فیلتر کالمن این است که نیاز به محاسبات زمانبر ماتریسی دارد که در مقابل روش های سریعتری مانند چگالی طیفی توان آن را ناکارآمد جلوه می دهد. در این مقاله با استفاده از روشی برای پردازش همزمان مولفه های سیگنال این مشکل به طور کامل برطرف و به حالت توسعه یافته ارائه شده است. در روش کالمن توسعه یافته، برای رسیدن به زمان همگرایی و دقت مطلوب برای هر مولفه، می توان پارامترهای خاصی را تنظیم نمود. روش پیشنهاد شده به ما امکان می دهد که از فیلتر کالمن برای پایش هوایی پرتو گاما استفاده کنیم که پیش از این با ساختار اصلی این فیلتر از نظر عملی غیرممکن بود.

در سیستم های متداول پایش هوایی و طیف نگاری، معمولاً از طیف نگار چند آشکارساز که دامنه انرژی از صفر تا سه مگا الکترون ولت را در ۲۵۶ کانال یا بالاتر پوشش می دهد استفاده می کنند. در واقع نگاری این مقاله از داده های روی میز قبلی که به وسیله کریستال یدورسیدیم بدست آمده، استفاده شده است.

معمولاً در سامانه های پایش هوایی برای آشکارسازی پرتو گاما از آشکارسازهای سنتیلاتور و در بیشتر موارد از آشکارساز با کریستال یدورسیدیم که به آن ناخالصی TL اضافه شده استفاده می شود. نتیجه پراکندگی یا جذب پرتوی گامای ورودی در کریستال آشکارساز، تولید یک یا چند الکترون

$$x_{t+1} = f_t(x_t, u_t, v_t) \quad (9)$$

$$y_t = h_t(x_t, u_t, e_t)$$

در رابطه بالا x_t حالت ها (states)، y_t مقادیر اندازه گیری شده توسط حسگرها (measurements)، v_t و e_t نویز های اتفاقی ورودی و محاسباتی هستند. مدل فوق معمولاً به صورت زیر ساده سازی می شود:

$$x_{t+1} = f_t(x_t) + v_t \quad (10)$$

$$y_t = h_t(x_t) + e_t$$

بردار حالت برای آشکارساز گاما به صورت زیر بیان می شود:

$$x_t = (b_t^e \ b_t^e \ \ddot{b}_t^e \ q_t^{be} \ w_{eb,t}^b \ \delta_{w,t}^b \ \delta_{a,t}^b \ G_t) \quad (11)$$

در رابطه فوق b_t^e ، \ddot{b}_t^e ، q_t^{be} به ترتیب شتاب، موقعیت و سرعت در مختصات زمینی، جهت در مختصات زمینی، $w_{eb,t}^b$ سرعت زاویه ای، $\delta_{w,t}^b$ ، $\delta_{a,t}^b$ مقادیر بایاس در شتاب سنج و ژيروسکوپ و G_t تعداد فوتون دریافتی توسط آشکارساز NaI می باشند.

بنابراین آزمون فرضیه برای آشکارساز هوایی پرتور گاما با استفاده از فیلتر کالمن توسعه به صورت زیر تعریف می شود:

$$\hat{R}_x^\alpha(x) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} (b_t^e \ b_t^e \ \ddot{b}_t^e \ q_t^{be} \ w_{eb,t}^b \ \delta_{w,t}^b \ \delta_{a,t}^b \ G_t) * (b_{t+\tau}^e \ b_{t+\tau}^e \ \ddot{b}_{t+\tau}^e \ q_{t+\tau}^{be} \ w_{eb,t+\tau}^b \ \delta_{w,t+\tau}^b \ \delta_{a,t+\tau}^b \ G_{t+\tau}) * e^{-j\alpha \pi a t}$$

$H_0: \forall \tau_i, i = 1, \dots, N \Rightarrow \hat{R}_x^\alpha = \varepsilon_x^\alpha$ (عدم حضور منبع گاما $\alpha \notin$)
 $H_1: \exists \tau_i, i = 1, \dots, N \Rightarrow \hat{R}_x^\alpha = R_x^\alpha + \varepsilon_x^\alpha$ (حضور منبع گاما $\alpha \in$)

(۱۳)

۴. پیاده سازی، نتایج و بحث

فیلتر کالمن یکی از الگوریتم های موفق تخمین است که بر اساس مدل گسسته فضای حالت سیستم های دینامیکی،

- ۱۹۸۴ پرانرژی است. کریستال سنتیلاتور انرژی داده شده به الکترون را به یک فلاش نوری تبدیل می کند. فرآیند فیزیکی این تبدیل، پیچیدگی خاص خود را دارد، به هر حال آشکارسازی پرتو گاما با استفاده از اثر این تبدیل انجام می شود. معمولاً یک فوتون گامای ورودی، قبل از جذب چندین مرتبه پراکندگی کامپتون را تجربه می کند. مجموع فوتون های نور قابل مشاهده که در کریستال آزاد می شوند، متناسب با انرژی پرتوی گامای ورودی به کریستال است. در بسیاری از آشکارسازهای سنتیلاتور فعلی، یک لامپ فوتومالیتی پلیمر که وظیفه آشکارسازی پرتو گاما و تقویت پرتوی نوری را دارد به کریستال متصل می شود. فوتون نوری پس از انعکاس، تقویت و با تشدید الکترون های ایجاد شده توسط فوتوکاتد به کمک داینودها در نهایت یک سیگنال الکتریکی در خروجی لامپ به دست می دهد.
- آشکارسازهای NaI(Tl) در جذب فوتون های کم انرژی نسبت به فوتون های پرانرژی، بازده بالاتری دارند و از این رو نرخ شمارش فوتون های کم انرژی در این نوع آشکارساز بالاتر است. همچنین چیدمان جانب به جانب ورقه های کریستال، سطح مقطع وسیع تری برای برخورد فوتون های وارده از سمت پائین وسیله پرنده، نسبت به فوتون های وارده از وجوه جانبی ایجاد کرده و بنابراین حساسیت جهتی برای آشکارساز ایجاد می کند.
- اندازه گیری ها به وسیله آشکارساز یدورسیدیم سه اینچی با مشخصات یکسان ولتاژ فوتومالیتی پلیمر ۶۵۰ ولت، بهره ۸۰ و بازده ۰/۹ که چشمه ها در موقعیت یکسان نسبت به آشکارساز قرار گرفته اند انجام شده است. اندازه گیری ها در تاریخ سوم ژوئن ۱۹۹۸ و شمارش ها به مدت پنج دقیقه انجام شده است. چشمه های پایشگر هوایی اکتیو عبارت بودند از:
- ۱- چشمه Na22 با اکتیویته ۱/۱۶ میکروکوری در ۱۱ دسامبر
- ۲- چشمه Mn 54 با اکتیویته ۱/۰۷ میکروکوری در ۵ آوریل ۱۹۹۱
- ۳- چشمه Co60 با اکتیویته ۰/۸۴ میکروکوری در ۱۳ مارس ۱۹۸۵
- ۴- چشمه Cs137 با اکتیویته ۱/۱۲ میکروکوری در ۳۰ آوریل ۱۹۸۵ (شمارش این چشمه در ۱۲۰ ثانیه انجام شده است)
- ۵- چشمه Co57 با اکتیویته ۱/۱۹ میکروکوری در ۲۶ مارس ۱۹۹۱ [۹].
- داده های موجود صرفاً خروجی آشکارساز گاما در ارتفاع ثابت هستند و بنابراین خروجی های حاصل از اعمال فیلتر کالمن و فیلتر کالمن توسعه یافته بطور شهودی تفاوتی نشان نمی دهند و اندازه گیری نیز مربوط به حالت استقرار پرنده در یک نقطه ثابت است. در شکل ۱ نمونه داده حاصل از چنین سیستمی به همراه خروجی های مربوط به تخمین کالمن و تخمین مبتنی بر چگالی طیف توان (Power Spectral Density) و همچنین خروجی تخمین طیفی چندکاهنده (Multi Taper Method) [۱۰] نشان داده شده است.
- معیار کواریانس خطا و زمان مورد نیاز محاسبات برای پردازش در واقع نگاری آشکارسازی پرتو گاما با روش های تخمین مبتنی بر چگالی طیف توان و تخمین طیفی چندکاهنده و کالمن توسعه یافته و خواص روش پیشنهادی در جداول ۱ و ۲ ذکر شده است. این جداول بیانگر آن است که استفاده از روش کالمن توسعه یافته علاوه بر این که آشکارساز را برای مقابله با نویزها و اختلال های غیرخطی آماده می کند، همگرایی سامانه پایش هوایی را نیز به صورت محسوسی افزایش می دهد.

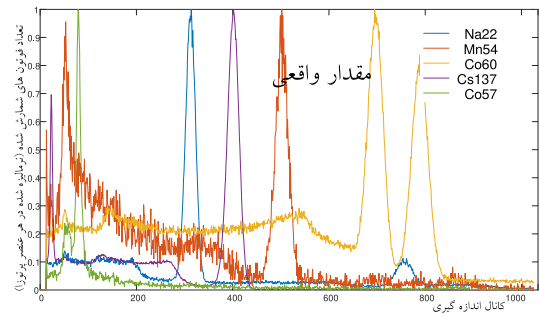
فیلتر کالمن توسعه یافته	روش تخمین طیفی چندکاهنده	روش تخمین چگالی طیف توان	قبل از فیلتر کردن (داده) اندازه گیری (شده)	کواریانس خطا
۰/۴۱۳۸	۰/۴۱۴۲	۰/۶۲۳۱	۱/۰۰۶۱	
۰/۵۱۶۱	۲/۶۹۸۰	۰/۴۳۶۲	زمان مورد نیاز عملیات فیلترینگ (ثانیه)	

جدول (۲): عملکرد آشکارساز هوایی گاما در روش تخمین چگالی طیف توان و تخمین طیفی چندکاهنده با روش پیشنهادی

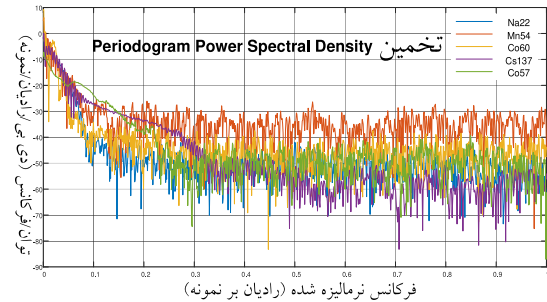
روش تخمین معیار	چگالی طیف توان	طیفی چندکاهنده	کالمن توسعه یافته
قابلیت اعمال به سیستم های غیر خطی	غیر قابل اعمال	عملکرد ضعیف	قابل اعمال
حساسیت			
نسبت به نویز و اغتشاش	دارد	دارد	ندارد
همگرایی	نسبت به ورودی ناشناخته	در سیستم های خطی به سادگی به دست می آید	با انتخاب مناسب شرایط اولیه به دست می آید
دقت	خوب	در سیستم های خطی خوب	بسیار خوب

۶. نتیجه گیری

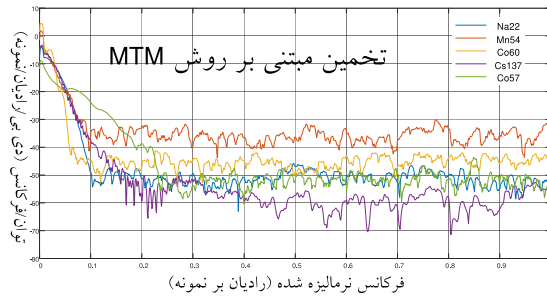
در این مقاله مدلی دینامیک مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته برای شرایط خطی و غیرخطی پیشنهاد شد که می تواند در شمارش فوتون های دریافتی عناصر پرتوزای گاما به صورت بلادرنگ عملکرد مناسب داشته باشد. با طراحی نوین



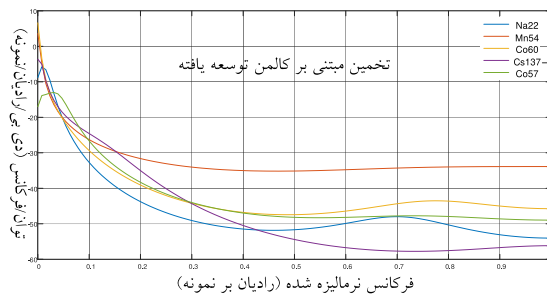
الف



ب



ج



د

شکل (۱): نمونه داده حاصل از اندازه گیری (الف)، تخمین مبتنی بر چگالی طیف توان (ب)، تخمین طیفی چندکاهنده (ج) و تخمین کالمن توسعه یافته (د).

جدول (۱): مقایسه خطا و زمان مورد نیاز محاسبات آشکارسازی پرتو گاما در روش های تخمین چگالی طیف توان، تخمین طیفی چندکاهنده و کالمن توسعه یافته.

در این مقاله، روش آشکارسازی پرتو گاما بر اساس خواص ایستان گردشی بودن شمارش پرتو گاما، به عنوان یک روش مورد توجه در کاهش نویز آشکارساز هوایی گاما پیشنهاد و در بستر فیلتر کالمن توسعه یافته پیاده سازی شد. این روش علاوه بر حفظ کارایی در شمارش های کم پرتوی، که در محیط به کارگیری پایش هوایی پرتو گاما در بسیاری مواقع اجتناب ناپذیر است، قابلیت تشخیص نوع و مقدار منبع گاما را مهیا می نماید. با توجه به ویژگی های استاتیک نویز اندازه گرفته شده و استفاده از خاصیت غیرایستان چرخشی، عملکرد فیلتر کالمن توسعه یافته موجب بهبود دقت آشکارسازی پرتو گاما می شود. نتایج تجربی به دست آمده از روش های مختلف شامل تخمین مبتنی بر چگالی طیف توان، تخمین طیفی چندکاهنده و تخمین کالمن توسعه یافته نشان داد، استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته منجر به بهبود قابل توجه عملکرد پایش هوایی پرتوهای گاما می شود.

آشکارساز هوایی گاما به نتایج دقیق تر و تشخیص مناسب در موقعیت، نوع و اندازه مواد پرتوزا خواهیم رسید. کاهش خطای آشکارسازی پرتو گاما هوایی گاما با استفاده از ادغام داده ها به وسیله فیلتر کالمن انجام شد و نتایج به دست آمده موید دقت بسیار خوب تخمین کالمن توسعه یافته است. نتایج با واقع نگاری در نویزهای اندازه گیری خطی برای روش کالمن توسعه یافته یکسان و بهتر از تخمین چگالی طیف توان و تخمین طیفی چند کاهنده است. بر اساس ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از تخمین کالمن توسعه یافته و تخمین مبتنی بر چگالی طیف توان و همچنین خروجی تخمین طیفی چندکاهنده برای منابع پرتوزای گاما، مشخص گردید که نتایج حاصل از روش پیشنهادی کالمن توسعه یافته، علاوه بر قابلیت اعمال به سیستم های غیرخطی، نسبت به نویز و اغتشاش نیز مقام تر است. همچنین فیلتر کالمن توسعه یافته در پایش هوایی پرتو گاما با انتخاب مناسب شرایط اولیه به سرعت همگرا می گردد و دقت بسیار خوبی را ارائه می کند.

۷. مراجع

- [1] A. A. Emadzadeh, J. L. Speyer, "Navigation in Space by X-ray Pulsars", Springer Science & Business Media, 2011
- [2] رضایی، محسن. عاشور، مسعود. سرخوش، لیلا. بهبود طیف سنجی گاما در پایش هوایی پرتویی با استفاده از الگوی میانگین متحرک خود همبسته یکپارچه. مجله سنجش و ایمنی پرتو، دوره ۲۲، شماره ۴، (۱۳۹۷) ۱-۱۱.
- [3] ACSL Autonomous Aerial Drone. Available: <https://www.xsens.com/customer-cases/acsl-autonomous-aerial-drone-leading-the-industrial-revolution-of-the-skies/> 21 October 2017
- [4] A. Barwicz, D. Massicotte, Y. Savaria, M. A. Santerre and R. Z. Morawski, "An integrated structure for Kalman-filter-based measure and reconstruction" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, No. 3, Vol. 43, 403-410, 1994
- [5] G. Ruckebusch, "A Kalman filtering approach to natural gamma ray spectroscopy in well logging", IEEE Transactions on Automatic Control, No. 3, Vol. 28, 372-380, 1983
- [6] G. Qian, R. Chellappa, and Q. Zheng, "Robust structure from motion estimation using inertial data", Journal of the Optical Society of America A, 18(12): 2982-2997, 2001
- [7] D. Strelow, "Motion Est. from Image and Inertial Meas. PhD thesis", Carnegie-Mellon, 2004
- [8] L. Armesto, S. Chroust, M. Vincze and J. Tornero, "Multi-rate fusion with vision and inertial sensors", Proc. of International conference on robotics and automation, 193-199, 2004
- [9] Gamma Detector Data Files, Available: <http://www.cpp.edu/~pbsiegel/nuclear.html> Accessed 21 October 2017
- [10] B. Percival and A. T. Walden, "Spectral Analysis for Physical Applications: Multi taper and Conventional Univariate Techniques", Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1993