

## به کارگیری فیلتر کالمن توسعه یافته جهت کاهش نويز غيرايستان چرخشي 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 نويز آشکارسازی است. روش‌های مختلفی برای کاهش نويز آشکارساز هوایی گاما ارائه شده که از میان آن‌ها در این مقاله، استفاده از خواص ایستان 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 نويز آشکارساز هوایی گاما مبتنی بر خواص ایستان 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 موردنیاز 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 محسوس افزایش می‌دهد.

کلیدواژه‌گان: پایش هوایی پرتو گاما، فیلتر کالمن توسعه یافته، نويز غيرايستان چرخشي، ایمنی هسته‌ای.

در این مقاله تخمین دقیق و بهنگام تعداد فوتون دریافتی به‌عنوان یکی از اجزای اصلی پایش هوایی فوتون‌های گاما مطرح می‌شود. در پژوهش حاضر، از فیلتر کالمن برای تخمین تعداد فوتون‌های شمارش‌شده و کاهش نویز اندازه‌گیری هوایی استفاده شده است. این روش با به‌کارگیری فیلتر کالمن توسعه یافته، به پردازش داده‌های واقعی تعداد فوتون دریافتی از منابع شناخته‌شده پرتوزا می‌پردازد و مدل استخراج‌شده از طریق توابع ارزیابی اعتبار سنجی شده برای پایش هوایی گاما مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای سیستم‌های 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 مدل‌کننده واحدی که از نظر همگان به‌عنوان بهترین روش شناخته شود، توسعه نیافته است. یکی از این روش‌ها، روش کالمن است که به‌عنوان 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 دقیق‌تری را نسبت به تخمین‌های 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 آنجاکه 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 پیاده‌سازی این فیلتر بهینه، جهت حذف نویز آشکارساز هوایی پرتوهای گاما پرداخته و نتایج آنرا گزارش می‌کند. با توجه به ویژگی‌های استاتیک نویز اندازه گرفته شده، عملکرد

با توجه به مسائل، مخاطرات و هزینه‌های مترتب بر به‌کارگیری سیستم‌های متداول و سنگین وزن پایش هوایی گاما، به‌کارگیری بخش آشکارساز توجه بیشتری شده است. این رویکرد به‌ویژه با استفاده از تکنیک‌های کاهش نویز آشکارساز 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 شمارش‌های 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 شمارش‌های 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 شمارش‌های کم پرتو گاما و همچنین استحکام (Robustness) در برابر عدم قطعیت میزان 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.

ذرات پرتوزا، که می‌توانند به افراد و حتی تجهیزات اندازه‌گیری آسیب جدی وارد کنند، با دقت مناسبی تخمین قابل‌اعتمادی از "نوع" و "میزان" مواد پرتوزا و آلودگی پرتوی محیط به دست آورد. جمع‌آوری 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 تصمیم‌گیری مناسب در چنین مواقعی است. این‌گونه تصمیمات، باید به کمک مدل‌های پیش‌آگاهی و اندازه‌گیری‌های جامع محیطی که به صورت اضطراری و در شرایط بحران انجام می‌شوند اتخاذ، و به‌طور مستمر مورد اصلاح و بازنگری قرار گیرند. عادی شدن وضعیت و بازگشت از حالت فوق‌العاده به شرایط طبیعی هم، به کمک نتایج اندازه‌گیری‌های پی در پی مشخص و به افراد در معرض پرتو و یا محدوده سانحه یا منطقه آلوده اطلاع داده می‌شود.

کاهش نوبت آشکارساز هوایی گاما با قابلیت تحرک زیاد، همراه با جمع‌آوری داده‌ها و نمونه برداری محیط، نقش مهمی در واکنش سریع و اقدام مناسب و به‌موقع در سوانحی که آزاد شدن عناصر پرتوزا را در پی دارند ایفا می‌کند. پایش وضعیت یید فعال آزادشده (131I) در پی سوانح هسته‌ای [۴]، جستجوی چشمه‌های دزدیده یا مفقودشده، یافتن باقیمانده ماهواره‌ها یا سایر پرتابه‌هایی که به زمین اصابت کرده‌اند، میزان آب معادل بارش برف [۵]، وضعیت سطح و ارتفاع آب دریاچه‌ها [۶]، تغییرات در وضعیت خاک مناطق با پوشش سبز [۷] مثال‌هایی مختلف از کاربردهای گسترده، جالب و متنوع، آشکارسازهای هوایی گاما هستند که به کمک تشخیص آنومالی‌ها یا تغییرات پرتوی محیط میسر می‌شوند.

مدل‌های پیش‌آگاهی در مورد پدیده‌هایی که طبیعت آماری دارند، با استفاده از روش‌های آماری و استفاده از شاخص‌هایی که بروز و وقوع پدیده موردنظر، در پی ظهور یا

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 قابل‌توجهی بهبود پیدا می‌کند.

در ادامه، ابتدا در بخش ۲ مفاهیم اولیه پایش هوایی پرتوهای گاما و متعاقباً پس از بیان مختصر مفاهیم مرتبط ایستان‌گردشی سیگنال شمارش فوتون گاما، در بخش ۳ روش آشکارسازی پرتو گاما به کمک خواص ایستان‌گردشی توضیح داده می‌شود و سپس پیاده‌سازی این روش به وسیله فیلتر کالمن پیشرفته در بخش ۴ تشریح می‌شود. پس از آن روش پیشنهادی با سایر روش‌های پیشرفته با استفاده از داده‌های واقعی پایش گاما پیاده‌سازی شده و نتایج با معیارهای مختلف ارزیابی در بخش ۵ ارائه شده است. در آخر و در بخش ۶ نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

## ۲. پایش هوایی پرتوهای گاما

پایش هوایی، اقتصادی‌ترین، سریع‌ترین و مناسب‌ترین روش برای جمع‌آوری اطلاعات پرتویی سطح زمین به‌منظور تهیه نقشه پرتوزایی مناطق مختلف کشور مخصوصاً در شرایط بحران است. علاوه بر پرتوزایی طبیعی، برخی اقدامات بشری و یا بروز سوانح هسته‌ای منجر به آزادسازی مواد پرتوزا در محیط می‌شوند. اقدامات ایمنی و حفاظتی دقیق و هدفمند، اولین واکنش‌های ضروری در مواجهه با چنین رویدادهایی است، این دقت و هدفمندی تنها می‌تواند با شناخت نوع و میزان مواد پرتوزا محقق شود. ایمن‌ترین روش برای بررسی مقدار و نوع عناصر پرتوزای پراکنده‌شده در پی یک سانحه هسته‌ای 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

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 تخمین‌های مبتنی بر متغیرهای وابسته، استفاده همزمان از چندین اندازه گیری به صورت موازی یا تکراری، نیز به کاهش خطای آشکارسازی 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 آشکارسازی 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 آشکارساز 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 پرتو زایی محیط است. در آشکارساز هوایی گاما، یک مجموعه از حسگرها با شش درجه آزادی در مجموعه محموله پروازی نصب می‌شوند.

تغییر مقدار آن شاخص ها با قطعیت زیادی اتفاق می‌افتد، بکار می‌روند. 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 پرتو زایی سطح زمین است. اگر هدف از آشکارسازی 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 آشکارساز مورد استفاده در پایش هوایی گاما برای پرتو زایی طبیعی یا با بکارگیری توام روش های پیش آگاهی پس از یک سانحه هسته ای پیشنهاد ده است.

در حوزه ایمنی هسته ای یکی از مباحث مهم، آشکارسازی هوایی پرتوهای گاما است. در این مقاله آشکارساز هوایی گاما مبتنی بر فیلتر کالمن مورد واکاوی قرار می‌گیرد. در این آشکارساز، الزامات هدایت پرنده حامل آشکارساز و تعیین موقعیت و وضعیت آشکارساز 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

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

در این بخش روش کلی برای آشکارسازی پرتو گاما شمارش پرتو گاما برای تصمیم به حضور یا عدم حضور منبع پرتو گاما با استفاده از آزمون فرضیه (Hypothesis test) تشریح می شود. 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:

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 ایستادن گردشی بودن یا نبودن  $x_t$  تصمیم گرفت. در عمل به ازای هر گردش در نظر گرفته شده، برای  $N$  تاخیر  $\tau_1, \dots, \tau_N$  مقدار فوق محاسبه شده و مجموعه آن با هم در نظر گرفته می شود. بر این اساس بردار  $1*2N$  بعدی  $\hat{R}_x^\alpha$  به صورت زیر تعریف می شود:

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

با در نظر گرفتن تعریفی مشابه فوق برای بردار  $R_x^\alpha$  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  $x_t$  ایستادن گردشی است و در غیر این صورت ایستادن 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

### ۳. آشکارسازی پرتو گاما به کمک فرض ایستادن گردشی بودن

در این بخش روش کلی برای آشکارسازی پرتو گاما شمارش پرتو گاما برای تصمیم به حضور یا عدم حضور منبع پرتو گاما با استفاده از آزمون فرضیه (Hypothesis test) تشریح می شود. 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:

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

$$H_1: x = s + n$$

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 ایستادن 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  $(\alpha, \tau)$  ( $\alpha \neq 0$ ) 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 ایستادن 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  $\alpha$  داریم:

گیری شده توسط حسگر  $(y)$ ، ولتاژ معادل با آن کمیت  $(u)$  با توجه به آفت  $(b)$  به صورت زیر است:

$$u_t = GRy_t + b \quad (6)$$

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

در این مقاله با استفاده از داده‌های روی میز، اطلاعات مکانی شامل موقعیت و جهت منابع پرتوهای گاما استخراج و با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری حسگرهای IMU ترکیب

گاما، عدم وجود منبع پرتو گاما و تصمیم به برقراری فرض  $H_1$  است).

برای دستیابی به آمارگان مورد نظر، نیاز به تخمینی از طیف گردشی شمارش پرتو گاما است. برای تخمین طیف گردشی می‌توان از روش‌های پردازش سری‌های زمانی و تخمین‌های 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 بنابراین مصالحه‌ای (Trade off) میان کارایی و بازده سیستم وجود دارد. برای تخمین طیف گردشی به فیلتر کالمن توسعه یافته می‌توان از پنجره‌های مختلفی مانند پنجره مستطیلی، همپینگ، Blackman و Kaiser استفاده کرد که در این مقاله از پنجره Kaiser استفاده شده است.

#### ۴. به‌کارگیری فیلتر کالمن توسعه یافته در تخمین

##### شمارش ایستادن گردشی پرتو گاما

در روش پیشنهادی این مقاله با استفاده از آشکارساز پرتوی و اندازه‌گیری انجام شده‌ی قبلی توسط دیگران و با توجه به نقشه‌های محیطی سه بعدی که پیشتر تهیه شده‌اند (اصطلاحاً داده‌های روی میز (Table top) اطلاعات مکانی شامل موقعیت و جهت، منابع پرتوهای گاما استخراج و با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری حسگرها ترکیب و حاصل که به صورت مجموعه‌ای از معادلات غیرخطی است، توسط تخمینگر بهینه کالمن جهت آشکارسازی پرتو گاما موقعیت، نوع و میزان دقیق مواد پرتوهای گاما بکارگیری می‌شود.

آشکارساز هوایی پرتوهای گاما یک یا چند محور حساس دارد که نیرو (در شتاب سنج) یا سرعت زاویه‌ای (در ژيروسکوپ) نسبت به آن سنجیده شده و به یک کمیت الکتریکی (مانند ولتاژ) تبدیل می‌شود. رابطه بین کمیت اندازه

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

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

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:

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

در رابطه فوق  $b_t^e$ ،  $b_t^{\dot{e}}$ ،  $\ddot{b}_t^e$  به ترتیب شتاب، موقعیت و سرعت در مختصات زمینی،  $q_t^{be}$  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:

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

$$H_1: \forall \tau_i, i = 1, \dots, N \Rightarrow \hat{R}_x^\alpha = \varepsilon_x^\alpha \ (\alpha \notin \text{گاما})$$

$$H_0: \exists \tau_i, i = 1, \dots, N: \Rightarrow \hat{R}_x^\alpha = R_x^\alpha + \varepsilon_x^\alpha \ (\alpha \in \text{گاما})$$

(۱۳)

#### ۴. پیاده سازی، نتایج و بحث

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 می‌شود. نتیجه پراکندگی یا جذب پرتوی گامای ورودی در کریستال آشکارساز، تولید یک یا چند الکترون پرنرژی است. کریستال سنتیلاتور انرژی داده‌شده به الکترون را به یک فلاش نوری تبدیل می‌کند. فرآیند فیزیکی این تبدیل، پیچیدگی خاص خود را دارد، به‌هرحال آشکارسازی پرتو گاما با استفاده از اثر این تبدیل انجام می‌شود. معمولاً یک فوتون گامای ورودی، قبل از جذب چندین مرتبه پراکندگی کامپتون را تجربه می‌کند. مجموع فوتون‌های نور قابل مشاهده که در کریستال آزاد می‌شوند، متناسب با انرژی پرتوی گامای ورودی به کریستال است. در بسیاری از آشکارسازهای سنتیلاتور فعلی، یک لامپ فوتومالٹی پلیرکه وظیفه آشکارسازی پرتو گاما و تقویت پرتوی نوری را دارد به کریستال متصل می‌شود. فوتون نوری پس از انعکاس، تقویت و با تشدید الکترون‌های ایجادشده توسط فتوکاتد به کمک داینودها در نهایت یک سیگنال الکتریکی در خروجی لامپ به دست می‌دهد.

آشکارسازهای NaI(Tl) در جذب فوتون‌های کم انرژی نسبت به فوتون‌های پرنرژی، بازده بالاتری دارند و از این‌رو نرخ شمارش فوتون‌های کم انرژی در این نوع آشکارساز بالاتر است. همچنین چیدمان جانب به‌جانب ورقه‌های کریستال، سطح مقطع وسیع‌تری برای برخورد فوتون‌های وارده از سمت پائین وسیله پرنده، نسبت به فوتون‌های وارده از وجوه جانبی ایجاد کرده و بنابراین حساسیت جهتی برای آشکارساز ایجاد می‌کند.

اندازه‌گیری‌ها به‌وسیله آشکارساز یدورسدیم سه اینچی با مشخصات یکسان ولتاژ فتومالٹی پلیر ۶۵۰ ولت، بهره ۸۰ و بازده ۰/۹ که چشمه‌ها در موقعیت یکسان نسبت به آشکارساز قرار گرفته‌اند انجام شده‌است. اندازه‌گیری‌ها در تاریخ سوم ژوئن ۱۹۹۸ و شمارش‌ها به مدت پنج دقیقه انجام شده‌است.

چشمه‌های پایشگر هوایی اکتیو عبارت بودند از:

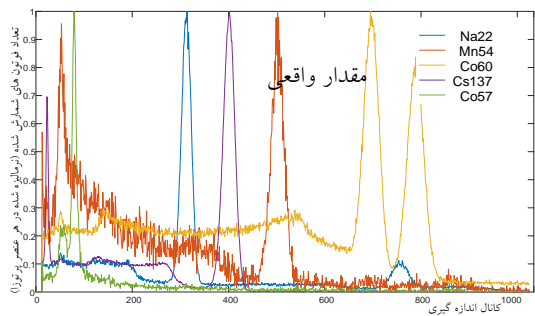
۱- چشمه  $Na^{22}$  با اکتیویته ۱/۱۶ میکروکوری در ۱۱ دسامبر

فیلترکالمن یکی از الگوریتم‌های موفق تخمین است که براساس مدل گسسته فضای حالت سیستم‌های دینامیکی، به صورت وقتی و با محاسبات برگشتی، قادر است حالت‌های درونی سیستم را که به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند، تخمین بزند. اخیراً فعالیت‌های گسترده‌ای در استفاده از فیلترهای کالمن در کاهش نویز کاربردهای مشابه آشکارساز هوایی گاما انجام شده‌است [۵]. توصیفی از کاربری فیلترهای وقتی کالمن در تخمین مواد پرتوزای گاما در سطح قبلا انجام شده‌است [۵]. انواع فیلترهای تخمین‌گر می‌توانند در آشکارسازی پرتو گاما هوایی پرتوهای گاما مورد استفاده قرار گیرند. فیلترکالمن، به خاطر ماهیتش در تخمین حالت سیستم، برای پردازش‌های بلادرنگ مناسب است. تنها مساله فیلتر کالمن این است که نیاز به محاسبات زمانبر ماتریسی دارد که در مقابل روش‌های سریعتری مانند چگالی طیفی توان آن را ناکارآمد جلوه می‌دهد. در این مقاله با استفاده از روشی برای پردازش همزمان مولفه‌های سیگنال این مشکل به طور کامل برطرف و به حالت توسعه‌یافته ارائه شده است. در روش کالمن توسعه‌یافته، برای رسیدن به زمان همگرایی و دقت مطلوب برای هر مولفه، می‌توان پارامترهای خاصی را تنظیم نمود. روش پیشنهادشده به ما امکان می‌دهد 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.

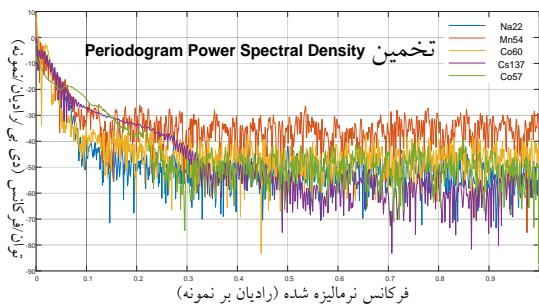
در سیستم‌های متداول پایش هوایی و طیف‌نگاری، معمولاً از طیف‌نگار چندآشکارسازه که دامنه انرژی از صفر تا سه مگا الکترون‌ولت را در ۲۵۶ کانال یا بالاتر پوشش می‌دهد استفاده می‌کنند. در واقع‌نگاری این مقاله از داده‌های روی میز قبلی که به‌وسیله کریستال یدورسدیم بدست آمده، استفاده شده است.

معمولاً در سامانه‌های پایش هوایی برای آشکارسازی پرتو گاما از آشکارسازهای سنتیلاتور و در بیشتر موارد از آشکارساز با کریستال یدورسدیم که به آن ناخالصی TL اضافه‌شده

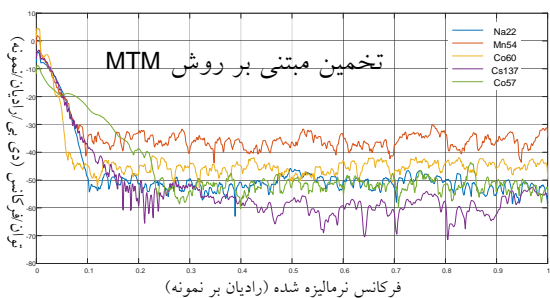




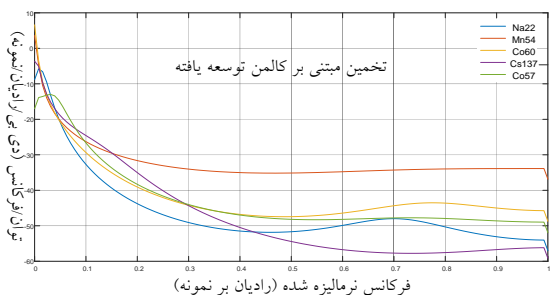
الف



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.

۱۹۸۴

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 کوواریانس 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 فیلترکردن (داده اندازه‌گیری شده)	کوواریانس خطا
۰/۴۱۳۸	۰/۴۱۴۲	۰/۶۲۳۱	۱/۰۰۶۱	
۰/۵۱۶۱	۲/۶۹۸۰	۰/۴۳۶۲	زمان موردنیاز عملیات فیلترینگ (ثانیه)	

آشکارساز هوایی گاما به نتایج دقیق‌تر و تشخیص مناسب در موقعیت، نوع و اندازه مواد پرتوزا خواهیم رسید. کاهش خطای آشکارسازی پرتو گاما هوایی گاما با استفاده از ادغام داده‌ها به-وسیله فیلتر کالمن انجام شد و نتایج به‌دست‌آمده موید دقت بسیارخوب تخمین کالمن توسعه‌یافته است. نتایج با واقع-نگاری در نویزهای اندازه‌گیری خطی برای روش کالمن توسعه‌یافته یکسان و بهتر از تخمین چگالی طیف توان و تخمین طیفی چندکاهنده 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 سیستم‌های 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 می‌گردد و دقت بسیار خوبی را ارائه می‌کند.

در این مقاله، روش آشکارسازی پرتو گاما بر اساس خواص ایستان‌گردشی 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 اجتناب‌ناپذیر است، قابلیت تشخیص نوع و مقدار منبع گاما را مهیا می‌نماید. 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 می‌شود. 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

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 سیستم‌های غیرخطی	غیرقابل اعمال	عملکرد ضعیف	قابل اعمال
حساسیت نسبت به نویز و اغتشاش	دارد	دارد	ندارد
همگرایی	حساس نسبت به ورودی ناشناخته	در سیستم‌های خطی به سادگی به دست می‌آید	با انتخاب مناسب شرایط اولیه به دست می‌آید
دقت	خوب	در سیستم‌های 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 می‌تواند در شمارش فوتون‌های دریافتی عناصر پرتوزای گاما به‌صورت بلادرنگ عملکرد مناسب داشته باشد. با طراحی نوین

توجه عملکرد پایش هوایی پرتوهای گاما می شود.

داد، استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته منجر به بهبود قابل

## ۷. مراجع

- [1] A. A. Emadzadeh, J. L. Speyer, "Navigation in Space by X-ray Pulsars", Springer Science & Business Media, 2011
- [۲] رضایی، محسن. عاشور، مسعود. سرخوش، لیلا. بهبود طیف‌سنجی 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