

بررسی جامع رادار کوانتومی با تاکید بر سناریوی تشخیص

مین‌های دریایی در آب‌های کم‌عمق

سیدرضا شرفی نژاد

هیئت علمی و مربی گروه مخابرات دریایی، دانشگاه امام خامنه‌ای (مدظله‌العالی)

چکیده:

رادار کوانتومی به عنوان یکی از نوآورانه‌ترین دستاوردهای فناوری‌های نوین، مرزهای آشکارسازی و شناسایی اهداف را در صنایع دفاعی جابه‌جا کرده است. این فناوری با بهره‌گیری از ویژگی‌هایی همچون درهم‌تنیدگی کوانتومی و اصول فیزیک کوانتوم، توانسته است محدودیت‌های رادارهای کلاسیک را پشت سر بگذارد و امکان شناسایی اهداف رادارگریز و کم‌سطح مقطع را حتی در محیط‌های نویزی و پرتداخل فراهم کند. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی عملکرد، مزایا و چالش‌های رادار کوانتومی پرداخته و نشان داده‌اند که این فناوری نه تنها از دقت و حساسیت بالایی برخوردار است، بلکه در برابر تهدیدات جنگ الکترونیک و اختلالات سایبری نیز مقاومت قابل توجهی دارد. به‌طور خاص، در این پژوهش به بررسی کاربرد رادار کوانتومی در آشکارسازی مین‌های دریایی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که رادار کوانتومی می‌تواند با نرخ آشکارسازی ۹۷٪ و نرخ مثبت کاذب ۱.۲٪، به طور مؤثری مین‌های دریایی را شناسایی کند. در این مقاله، با مطالعه جدیدترین پیشرفت‌ها و تحلیل سناریوهای عملیاتی رادار کوانتومی در محیط‌های واقعی، نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که ادغام این فناوری با شبکه‌های حسگر هوشمند و سامانه‌های دفاعی، می‌تواند نقش اساسی در ارتقای امنیت زیرساخت‌های حیاتی کشور و کاهش آسیب‌پذیری در برابر تهدیدات نوین ایفا کند. شبیه‌سازی‌ها و مطالعات موردی انجام‌شده در این پژوهش، مؤید اثربخشی رادار کوانتومی در شناسایی مین‌های دریایی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های دفاعی هستند و آینده‌ای روشن برای کاربرد گسترده این فناوری در صنایع دفاعی ترسیم می‌کنند.

واژه‌های کلیدی:

رادار کوانتومی، فیزیک کوانتوم، درهم‌تنیدگی، مین‌های دریایی

A Comprehensive Study of Quantum Radar with Emphasis on the Scenario of Detecting Naval Mines in Shallow Waters

Seyyed Reza Sharafinejad

Faculty Member and Lecturer, Department of Maritime Telecommunications, Imam Khamenei University, Iran

Abstract

Quantum radar, as one of the most innovative achievements of modern technologies, has redefined the boundaries of target detection and identification in defense industries. By leveraging features such as quantum entanglement, this advanced technology has overcome the limitations of classical radars, enabling the detection of stealth and low-profile targets even in noisy and highly interfered environments. In recent years, numerous studies have examined the performance, advantages, and challenges of quantum radar, demonstrating that this technology not only offers exceptional precision and sensitivity but also exhibits significant resilience against electronic warfare threats and cyber disruptions. This article explores the latest advancements and analyzes operational scenarios of quantum radar in real-world environments. The findings indicate that integrating this technology with intelligent sensor networks and defense systems can play a pivotal role in enhancing the security of critical infrastructure and reducing vulnerabilities to emerging threats. Simulations and case studies conducted in this research confirm the effectiveness of quantum radar in detecting complex targets and improving the reliability of defense systems, painting a promising picture for the widespread application of this technology in defense industries in the future.

Keywords

Quantum Radar, Quantum Physics, Entanglement, Naval Mines

۱- مقدمه

در دنیایی که فناوری با شتابی خیره‌کننده مرزهای ناشناخته را درمی‌نوردد، رادار کوانتومی یکی از همان دستاوردهای شگفت‌انگیزی است که تا همین چند سال پیش، بیشتر شبیه یک رؤیای علمی به نظر می‌رسید تا واقعیتی در دسترس. شاید اگر چند دهه پیش، درباره آشکارسازی اهداف پنهان یا رادارگریز با کمک ذرات نور درهم‌تنیده صحبت می‌شد، بسیاری آن را تخیل محض می‌دانستند. اما امروز، این فناوری دیگر فقط در صفحات مقالات نظری یا آزمایشگاه‌های پیشرفته محدود نشده و حالا نامش در محافل صنعتی، نظامی و حتی شهری شنیده می‌شود.

رادارهای کلاسیک سال‌ها ستون اصلی امنیت هوایی، دریایی و زمینی بوده‌اند؛ اما با پیشرفت ابزارهای اختفا و ظهور تهدیدات مدرن، نیاز به سامانه‌هایی با دقت و حساسیت بسیار بالاتر بیش از پیش احساس شد. درست در همین نقطه بود که پای مفاهیم کوانتومی به میان آمد. دانشمندان با الهام گرفتن از شگفتی‌های فیزیک کوانتومی، تلاش کردند محدودیت‌های قدیمی رادار را پشت سر بگذارند و افق‌های تازه‌ای را برای کشف و شناسایی اهداف، حتی در شرایط فوق‌العاده نویزی و پرتداخل، بگشایند.

در دهه‌های اخیر فناوری‌های نوین مبتنی بر اصول مکانیک کوانتومی، چشم‌انداز تازه‌ای را پیش روی علوم مهندسی، به‌ویژه در حوزه سنجش و آشکارسازی گشوده‌اند. یکی از شاخص‌ترین دستاوردهای این رویکرد، توسعه رادارهای کوانتومی است؛ سامانه‌هایی که با بهره‌گیری از پدیده‌هایی همچون درهم‌تنیدگی^۱ و فشردگی کوانتومی^۲ قادرند عملکردی فراتر از رادارهای کلاسیک ارائه دهند. این رادارها با استفاده از نور درهم‌تنیده یا حالت‌های فشرده، امکان تشخیص اهداف در شرایط نویزی، محیط‌های شلوغ و حتی در حضور اقدامات مقابله الکترونیک را فراهم می‌کنند [۱، ۲، ۳]. فناوری رادار کوانتومی حاصل سال‌ها پژوهش، همفکری و آزمون و خطا در مرز میان فیزیک، مهندسی و ریاضیات است؛ حوزه‌ای که نه‌تنها دانشمندان،

بلکه مدیران صنایع و سیاست‌گذاران امنیتی را نیز مجذوب خود کرده است. امروزه، این فناوری نه فقط یک ابزار علمی، بلکه به تدریج به یک نیاز راهبردی برای حفاظت از زیرساخت‌ها و مقابله با تهدیدات نوظهور بدل شده است.

اهمیت رادارهای کوانتومی تنها به برتری آن‌ها در برابر تداخل و نویز محدود نمی‌شود. این فناوری می‌تواند سطح مقطع راداری^۳ اهداف را تا حد چشمگیری کاهش داده و امکان شناسایی اهداف پنهان یا مخفی را فراهم آورد. چنین قابلیت به‌ویژه در سناریوهای نظامی و امنیتی بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند تهدیدات نوین را به شیوه‌ای کارآمد شناسایی کند [۴، ۵، ۶].

سیر پیشرفت فناوری‌های کوانتومی و دستاوردهای اخیر در زمینه منابع نوری خاص، آشکارسازهای پیشرفته و الگوریتم‌های پردازش سیگنال کوانتومی، چشم‌انداز توسعه عملیاتی این رادارها را روشن‌تر ساخته است. با این حال، توسعه این فناوری‌ها با چالش‌های متعددی از جمله هزینه بالا، پیچیدگی فنی و نیاز به زیرساخت‌های ویژه همراه است [۷، ۸، ۹].

کاربردهای بالقوه رادارهای کوانتومی از مرزهای نظامی فراتر رفته و حوزه‌هایی چون پزشکی، ناوبری، محیط‌زیست و صنعت را نیز دربرگرفته است. به عنوان مثال، در تصویربرداری پزشکی، این رادارها می‌توانند بدون تابش پرتوهای پرانرژی و آسیب‌زا به بافت‌ها، تصاویر با وضوح بالا فراهم کنند [۲، ۴، ۱۰]. شاید هنوز راه زیادی تا فراگیر شدن رادار کوانتومی در همه ابعاد زندگی روزمره باقی مانده باشد؛ اما آنچه مسلم است، این فناوری آغازگر عصری تازه در حوزه آشکارسازی و امنیت است. عصری که در آن، مرز میان ناممکن‌ها و واقعیت، هر روز نازک‌تر می‌شود.

در این مقاله، با تکیه بر منابع معتبر داخلی و بین‌المللی، ابتدا به بررسی تاریخچه و پیشینه پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه رادار کوانتومی پرداخته می‌شود. سپس در بخش ۳، اصول و عملکرد این فناوری نوین تشریح می‌گردد و مزایای آن نسبت به رادارهای سنتی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در ادامه در بخش ۴، بخش‌های اصلی رادار

^۳ RCS

^۱ Entanglement

^۲ Quantum Squeezing

کوانتومی بررسی خواهد شد. همچنین در بخش ۶، یک سناریوی پیشنهادی برای استفاده از رادار کوانتومی در تشخیص مین دریایی در آب‌های کم‌عمق ارائه می‌شود تا قابلیت‌های عملی این سامانه‌ها به صورت عینی‌تر مورد توجه قرار گیرد. در پایان نیز، جمع‌بندی نتایج و چشم‌انداز آینده این فناوری ارائه خواهد شد.

۲- تاریخچه رادار کوانتومی

تاریخچه فیزیک کوانتومی به اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم بازمی‌گردد؛ زمانی که دانشمندی چون پلانک و اینشتین با معرفی نظریه‌های جدید، نخستین گام‌ها را در مسیر درک رفتار نور و ماده در ابعاد زیراتمی برداشتند. در دهه‌های بعد، توسعه مفاهیمی مانند اصل عدم قطعیت و معادله شرودینگر، باعث شد فیزیک کوانتومی به عنوان یکی از ارکان اصلی علم مدرن تثبیت شود. این دستاوردها زمینه‌ساز رشد فناوری‌های متعددی در قرن بیستم شدند که امروزه در حوزه‌هایی چون الکترونیک، لیزر و ارتباطات نقش کلیدی دارند [۲، ۳، ۴].

با ورود به قرن بیست‌ویکم، توجه پژوهشگران به قابلیت‌های ویژه مکانیک کوانتومی، همچون درهم‌تنیدگی و فشردگی کوانتومی، برای حل چالش‌های آشکارسازی و سنجش جلب شد. این توجه، سرآغاز شکل‌گیری ایده رادار کوانتومی بود؛ ایده‌ای که در ابتدا بیشتر یک فرضیه نظری به شمار می‌رفت. نخستین بررسی‌ها و مقالات مرتبط، به پژوهشگرانی چون بوید^۴ و لوید^۵ بازمی‌گردد. در اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی، این پژوهشگران نشان دادند که استفاده از پدیده‌هایی مانند درهم‌تنیدگی فوتون‌ها می‌تواند محدودیت‌های رادارهای سنتی را تا حد زیادی کاهش دهد و آشکارسازی اهداف را در محیط‌های نویزی بهبود بخشد [۵، ۱].

نقطه عطف مهمی در این مسیر، ارائه "نظریه روشنایی کوانتومی"^۶ توسط لوید بود که در سال ۲۰۰۸ مطرح شد. طبق این نظریه، استفاده از نور درهم‌تنیده می‌تواند حساسیت آشکارسازها را حتی در حضور نویز و تداخل بالا به طور قابل توجهی افزایش دهد [۵، ۶]. پس از آن، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی رادارهای کوانتومی انجام شد که بسیاری از

آن‌ها به بررسی مزایا، محدودیت‌ها و شرایط عملیاتی این فناوری اختصاص داشتند [۷، ۸، ۹، ۱۰].

در دهه‌ی ۲۰۲۰، پیشرفت‌های فناورانه در تولید منابع نوری خاص، توسعه آشکارسازهای پیشرفته و ارائه الگوریتم‌های جدید پردازش سیگنال کوانتومی، امکان پیاده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و عملیاتی رادار کوانتومی را فراهم ساخت [۶، ۷، ۸]. پژوهشگران در این بازه زمانی، نه تنها به بهبود حساسیت و دقت آشکارسازی پرداختند، بلکه تلاش کردند تا این فناوری را از محیط آزمایشگاهی به کاربردهای واقعی و میدانی نزدیک کنند [۱۱، ۱۲]. برخی از مطالعات، استفاده از رادار کوانتومی در سنجش‌های صنعتی، نظامی و حتی محیط‌زیستی را به صورت عملی مورد بررسی قرار دادند [۱۱، ۱۲].

تا سال ۲۰۲۵، رادار کوانتومی به عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته و راهبردی در حوزه امنیت، شناسایی و آشکارسازی اهداف پنهان مطرح شده است. مقالات و پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که علی‌رغم چالش‌هایی چون پیچیدگی فنی، هزینه بالا و نیاز به زیرساخت‌های خاص، روند توسعه این فناوری همچنان شتابان است و افق‌های تازه‌ای برای کاربردهای عملی آن در سطح جهانی گشوده شده است [۱۳]. این مسیر پرفراز و نشیب، رادار کوانتومی را از یک ایده نظری به نقطه‌ای رسانده که می‌تواند نقش کلیدی در آینده فناوری‌های دفاعی و صنعتی ایفا کند.

در ایران نیز، همگام با موج جهانی، پژوهشگران دانشگاهی و صنعتگران تلاش کردند تا دانش فنی و فناوری رادار کوانتومی را بومی‌سازی کنند. شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی‌های عددی، مطالعه کاربردها و سنجش چالش‌های پیاده‌سازی در شرایط اقلیمی و عملیاتی کشور، محور فعالیت‌های این سال‌ها بود. اکنون رادار کوانتومی از یک رؤیای علمی به ابزاری کاربردی در مدیریت تهدیدات مدرن بدل شده است؛ ابزاری که آینده‌ای روشن‌تر و امن‌تر را نوید می‌دهد [۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲].

۳- اصول و عملکرد رادار کوانتومی

در این بخش به بررسی اصول و عملکرد رادار کوانتومی پرداخته می‌شود. تمرکز اصلی بر مفاهیمی است

^۶ Quantum Illumination theorem

^۴ Boyd

^۵ Lloyd

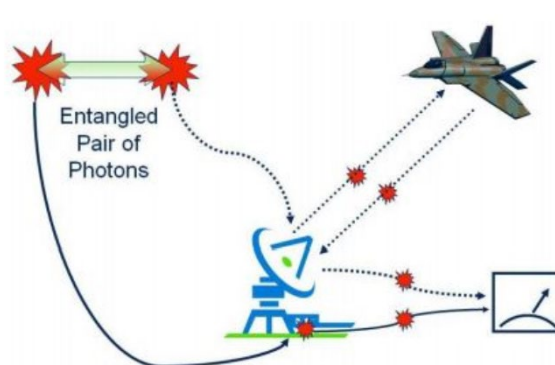
تک‌فوتونی با نویز زمینه پایین، زمان‌بندی دقیق و الگوریتم‌های پردازش داده پیشرفته است تا شناسایی هدف با احتمال خطای بسیار کم صورت گیرد [۵، ۹، ۱۱].

در شکل ۱-الف، عملکرد رادار کلاسیک نمایش داده شده است. در این روش، سیگنال‌های معمولی (مانند فوتون‌های غیر درهم‌تنیده) به سمت هدف ارسال و پس از بازتاب به گیرنده بازمی‌گردند. در رادار کلاسیک، امکان تمایز دقیق بین سیگنال بازگشتی و نویز محیط کمتر است و حساسیت آشکارسازی پایین‌تر از رادار کوانتومی خواهد بود. به همین دلیل، رادار کوانتومی در محیط‌های با نویز بالا عملکرد بهتری دارد.

در شکل ۱-ب، عملکرد یک رادار کوانتومی مبتنی بر فوتون‌های درهم‌تنیده نشان داده شده است. در این سیستم، یک جفت فوتون درهم‌تنیده تولید می‌شود؛ یکی از فوتون‌ها به سمت هدف (مانند یک هواپیما) فرستاده می‌شود و پس از بازتاب، به گیرنده بازمی‌گردد. فوتون دیگر به عنوان مرجع در نزد گیرنده باقی می‌ماند. با مقایسه حالت کوانتومی فوتون بازگشتی و فوتون مرجع، رادار می‌تواند وجود هدف را حتی در شرایط نویزی و با دقت بالاتری نسبت به رادارهای معمولی تشخیص دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱- تفاوت رادارهای کوانتومی و کلاسیک

سامانه‌های هشدار دهنده را افزایش می‌دهد؛ اما سیگنال رادار کوانتومی اغلب در سطح نویز زمینه قرار دارد و ساختار آماری ویژه‌ای دارد که توسط گیرنده‌های معمولی قابل تشخیص نیست [۱، ۵]. همچنین، اگر دشمن بخواهد سیگنال کوانتومی را شنود یا رهگیری کند، طبق اصول مکانیک کوانتومی (اصل عدم قطعیت)، این مداخله ماهیت

که رادار کوانتومی را از رادارهای سنتی متمایز می‌کند. از جمله این اصول، تولید و استفاده از فوتون‌های درهم‌تنیده است که اساس بسیاری از قابلیت‌های ویژه این فناوری را تشکیل می‌دهد. در ابتدا نحوه تولید فوتون‌های درهم‌تنیده و ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس فرآیند ارسال و دریافت سیگنال‌های کوانتومی، نحوه برهم‌کنش این فوتون‌ها با هدف و نقش آن‌ها در افزایش حساسیت و مقاومت در برابر نویز و تداخل توضیح داده خواهد شد.

همچنین فرآیندهای آشکارسازی سیگنال‌های بازگشتی، تفاوت‌های کلیدی عملکرد رادار کوانتومی با رادارهای کلاسیک، و شیوه‌های پردازش سیگنال در این سامانه‌ها تشریح می‌شود. در ادامه به نقش پدیده‌هایی مانند فشردگی کوانتومی و مزیت آن‌ها در بهبود دقت آشکارسازی در شرایط محیطی دشوار نیز اشاره خواهد شد. هدف این بخش آن است که به زبانی روشن و مستند، زیربنا و منطق علمی عملکرد رادار کوانتومی را برای مخاطب تبیین کند و نشان دهد چگونه این فناوری می‌تواند مرزهای فعلی آشکارسازی و شناسایی را جابه‌جا کند. از لحاظ عملی، تحقق چنین سیستمی مستلزم آشکارسازهای

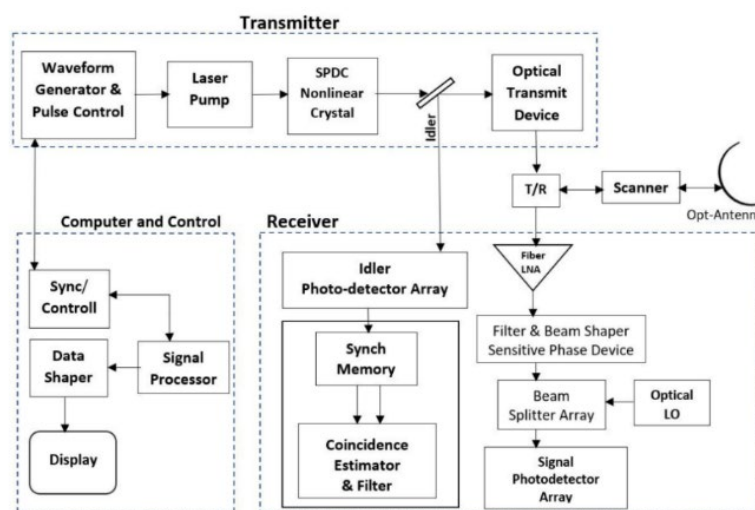
در سناریوهای نظامی و امنیتی، پنهان بودن^۷ یک مزیت استراتژیک مهم است. رادارهای کوانتومی به علت توان ارسالی بسیار پایین، فرمت خاص سیگنال و ماهیت کوانتومی، به سختی توسط گیرنده‌های دشمن قابل شناسایی هستند [۳، ۴، ۵]. در رادارهای کلاسیک، هرگونه انتشار سیگنال با توان بالا احتمال شناسایی توسط

^۷ Low Probability of Intercept (LPI)

نمی‌تواند بدون تغییر ماهیت سیگنال، آن را شنود کند. این ویژگی، رادار کوانتومی را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای امنیتی و حفاظتی تبدیل می‌کند [۶، ۱۳]. در برخی معماری‌ها، از پروتکل‌های رمزنگاری کوانتومی^۹ برای رمزگذاری سیگنال‌ها استفاده می‌شود که امنیت ارتباطات را حتی در برابر حملات رایانه‌های کوانتومی نیز تضمین می‌کند [۱۴]. در کاربردهای نظامی و امنیتی، این سطح از امنیت اطلاعات می‌تواند تفاوت حیاتی میان موفقیت و شکست عملیات باشد [۸، ۹]. در نهایت، امنیت ذاتی اطلاعات در رادارهای کوانتومی، نقطه تمایز مهمی نسبت به همه سامانه‌های سنجش و آشکارسازی کلاسیک به شمار می‌رود [۶، ۱۴].

۴- بخش‌های اساسی رادار کوانتومی

بلوک دیاگرام یک رادار کوانتومی همانند شکل ۲ است که سه بخش اصلی فرستنده^{۱۰}، گیرنده^{۱۱} و واحد کنترل و پردازش مرکزی^{۱۲} را به صورت ماژولار و منسجم نشان می‌دهد. در ادامه، هر بخش و اجزای داخلی آن به تفصیل شرح داده می‌شود تا نقش و کارکرد هر جزء در عملکرد کلی رادار کوانتومی مشخص شود.



شکل ۲- بلوک دیاگرام رادار کوانتومی

از تولید موج و کنترل پالس آغاز می‌شود. در این مرحله، مدولاسیون و زمان‌بندی دقیق پالس‌های لیزری توسط مولد شکل موج صورت می‌گیرد تا پالس‌هایی با ویژگی‌های دلخواه برای تحریک پمپ لیزر ایجاد شود. این بخش

سیگنال را تغییر داده و قابل شناسایی خواهد بود. این ویژگی باعث می‌شود هرگونه تلاش برای شنود یا اختلال، به راحتی آشکار شود [۶، ۷].

در رادارهای کوانتومی، حتی می‌توان از تکنیک‌های رمزنگاری کوانتومی برای رمزگذاری سیگنال ارسالی استفاده کرد تا امنیت ارتباطات بیشتر شود [۶، ۱۴]. این مزیت‌ها، رادار کوانتومی را به یک گزینه ایده‌آل برای عملیات شناسایی مخفی، پایش مرزی و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی تبدیل کرده است [۸، ۹].

در مجموع، کاهش احتمال کشف توسط دشمن، یک تحول اساسی در دکترین‌های نظامی و امنیتی محسوب می‌شود و می‌تواند برتری اطلاعاتی قابل توجهی ایجاد کند [۵، ۱۰].

یکی از جذاب‌ترین ویژگی‌های سامانه‌های کوانتومی، امنیت ذاتی اطلاعات است. بر اساس اصول مکانیک کوانتومی، هرگونه تلاش برای شنود یا تداخل در کانال کوانتومی، باعث ایجاد اختلال در حالت کوانتومی سیگنال می‌شود و این اختلال بلافاصله قابل شناسایی است^۸ [۱، ۶، ۱۴]. در نتیجه، داده‌های راداری ارسال شده و دریافتی از امنیت بسیار بالایی برخوردارند و هیچ فرد یا دستگاهی

۴-۱- فرستنده

فرستنده در رادار کوانتومی وظیفه تولید و ارسال سیگنال‌های کوانتومی به محیط را بر عهده دارد. فرایند کار

^{۱۱} Receiver
^{۱۲} Computer and Control

^۸ No-Cloning and Measurement Disturbance
^۹ Quantum Key Distribution (QKD)
^{۱۰} Transmitter

اهمیت زیادی دارد، چرا که کیفیت و پایداری پالس‌های تولیدشده تأثیر مستقیم بر خروجی سامانه و کیفیت داده‌های دریافتی دارد.

خروجی مولد پالس به پمپ لیزر منتقل می‌شود. پمپ لیزر به عنوان قلب تولید فوتون در رادار کوانتومی عمل می‌کند و انرژی لازم را برای ایجاد جفت فوتون‌های درهم‌تنیده فراهم می‌آورد. این فوتون‌ها در کریستال غیرخطی SPDC تولید می‌شوند؛ جایی که یک فوتون پرنرژی به صورت خودبه‌خودی به دو فوتون کم‌انرژی‌تر با ویژگی‌های کوانتومی به هم مرتبط تقسیم می‌شود. یکی از این فوتون‌ها (سیگنال) برای ارسال به محیط هدف انتخاب شده و دیگری که فوتون بیکار^{۱۳} است به عنوان فوتون مرجع در سیستم باقی می‌ماند.

در ادامه، فوتون سیگنال پس از عبور از دستگاه انتقال نوری و ماژول ارسال/دریافت، آماده ارسال به سمت هدف می‌شود. این سیگنال از طریق اسکتر و آنتن اپتیکی به بیرون تابیده می‌شود تا پس از برخورد با اهداف احتمالی، بازتاب آن مجدداً به سمت گیرنده بازگردد. طراحی دقیق این مسیر برای به حداقل رساندن تلفات و افزایش بازدهی بسیار مهم است. در نهایت، بخش فرستنده باید اطمینان حاصل کند که فوتون سیگنال با بیشترین کارایی و کمترین نویز به محیط ارسال می‌شود تا احتمال شناسایی هدف به حداکثر برسد. [۱۳]

۲-۴- گیرنده

گیرنده رادار کوانتومی مسئول دریافت، تقویت و پردازش فوتون‌های بازگشتی از محیط است. این بخش با استفاده از آنتن اپتیکی، سیگنال‌های برگشتی را دریافت کرده و آن‌ها را به تقویت‌کننده کم‌نویز فیبری^{۱۴} منتقل می‌کند تا حتی ضعیف‌ترین سیگنال‌ها نیز قابل آشکارسازی باشند. سپس سیگنال بازگشتی وارد فیلتر و دستگاه شکل‌دهی پرتو حساس به فاز می‌شود که نقش مهمی در حذف نویز محیطی و بهبود نسبت سیگنال به نویز ایفا می‌کند. این فیلترها می‌توانند سیگنال اصلی را از سیگنال‌های ناخواسته جدا کنند و کیفیت داده‌های ورودی را افزایش دهند.

یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد گیرنده رادار کوانتومی، استفاده از آرایه‌های آشکارساز برای فوتون^{۱۵} سیگنال و فوتون بیکار است. آرایه آشکارساز فوتون سیگنال پس از تقسیم پرتو توسط آرایه تقسیم‌کننده پرتو، فوتون‌های بازگشتی را شناسایی می‌کند. همزمان، آرایه آشکارساز فوتون بیکار فوتون‌های مرجع را که مستقیماً از کریستال غیرخطی دریافت شده‌اند، ثبت می‌کند. داده‌های فوتون بیکار در حافظه همزمانی ذخیره شده و برای مقایسه با فوتون‌های دریافتی از محیط استفاده می‌شوند.

در نهایت، ماژول تخمین‌زن و فیلتر همزمانی نقش کلیدی در حذف نویز و استخراج اطلاعات هدف ایفا می‌کند. این بخش با مقایسه زمان و ویژگی‌های فوتون سیگنال و فوتون بیکار، وجود همزمانی را بررسی می‌کند که نشانه عبور فوتون از مسیر صحیح و شناسایی هدف است. اگر همزمانی بین این دو فوتون تأیید شود، سیستم مطمئن می‌شود که سیگنال دریافتی واقعاً متعلق به هدف بوده و نه حاصل نویز محیطی. این فرایند، مقاومت رادار کوانتومی را در محیط‌های پرنویز به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. [۱۳، ۱۴]. شکل ۳ بخشی از ساختار آشکارسازی در یک رادار کوانتومی را نمایش می‌دهد که به منظور استخراج اطلاعات مختلف از سیگنال دریافتی هدف طراحی شده است. سیگنالی که از هدف بازتاب یافته، ابتدا وارد یک آرایه تقسیم‌کننده پرتو^{۱۶} می‌شود. این آرایه وظیفه دارد سیگنال نوری را به چند شاخه مجزا تقسیم کند تا بتوان هر شاخه را به صورت همزمان به آشکارسازهای مختلف ارسال کرد. این کار موجب می‌شود که اطلاعات متنوعی مانند فاصله، زاویه، ارتفاع، سرعت و حتی تصویر هدف به طور مستقل اما همزمان به دست آید.

¹⁶ Beam Splitter Array

¹³ Idler

¹⁴ Fiber LNA

¹⁵ Photodetector array

بخش شکل‌دهی داده می‌شوند تا برای نمایش یا انتقال به بخش‌های دیگر آماده شوند. در این مرحله، داده‌ها مرتب‌سازی، فشرده‌سازی و قابل فهم برای اپراتور می‌شوند [۱۵].

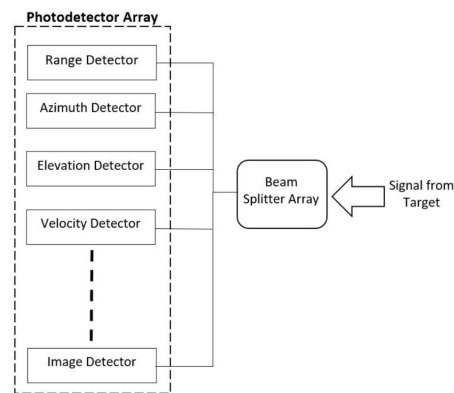
در پایان، نتایج نهایی بر روی نمایشگر ارائه می‌شوند تا کاربر بتواند به راحتی وضعیت اهداف، نویز محیطی و سایر اطلاعات ضروری را مشاهده و تحلیل کند. این بخش با فراهم کردن یک رابط کاربری مناسب، نقش کلیدی در تصمیم‌گیری‌های عملیاتی و بهبود کارایی سامانه دارد. به طور کلی، واحد کنترل و پردازش رایانه‌ای با مدیریت هوشمند و پردازش دقیق داده‌ها، امکان بهره‌برداری حداکثری از ظرفیت‌های رادار کوانتومی را فراهم می‌آورد.

۵- سناریوی عملیاتی جامع: شناسایی مین‌های دریایی با رادار کوانتومی بر روی رزم‌ناو

در عملیات‌های دریایی، عبور شناورهای نظامی و پشتیبانی از مناطق کم‌عمق و مشکوک به مین‌گذاری، از حیاتی‌ترین و پرریسک‌ترین مراحل محسوب می‌شود. مین‌های دریایی، به‌ویژه انواع کم‌بازتاب و نیمه‌مدفون، تهدیدی جدی برای رزم‌ناوها و ناوگان همراه آن‌ها به‌شمار می‌آید. روش‌های سنتی مین‌یابی (مانند سونار) در برخی شرایط به دلیل نویز محیطی، تلاطم آب، گل‌ولای و یا ماهیت کم‌بازتاب مین‌ها با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند. استفاده از رادار کوانتومی به‌عنوان فناوری نسل جدید می‌تواند این محدودیت‌ها را تا حد زیادی رفع کند و لایه‌ای جدید از امنیت و اطمینان عملیاتی فراهم سازد.

۵-۱- عملکرد و شرح جزئیات عملیاتی

در این سناریو، رادار کوانتومی روی عرشه رزم‌ناو نصب شده است و به‌صورت پیوسته یا برنامه‌ریزی‌شده، محیط پیرامون شناور (سطح و لایه‌های بالایی آب) را اسکن می‌کند. سیستم فرستنده، پالس‌های فوتون درهم‌تنیده یا حالت‌های کوانتومی فشرده را از طریق آنتن اپتیکی به شعاعی از سطح آب مقابل رزم‌ناو می‌تاباند. این اسکن می‌تواند در یک زاویه مشخص و با نرخ زمانی قابل تنظیم انجام شود تا محدوده‌های مختلف و مسیر حرکت کشتی به‌طور کامل پوشش داده شود.



شکل ۳- آشکارساز آرایه‌ای برای بدست آوردن اطلاعات درباره پارامترهای هدف

پس از تقسیم سیگنال، هر بخش به یک آشکارساز اختصاصی منتقل می‌شود که در قالب یک آرایه آشکارساز فوتونی^{۱۷} قرار دارند. این آرایه شامل چندین آشکارساز است: آشکارساز برد^{۱۸} که فاصله هدف تا رادار را اندازه‌گیری می‌کند، آشکارساز سمت^{۱۹} که موقعیت افقی هدف را تعیین می‌کند، آشکارساز ارتفاع^{۲۰} که موقعیت عمودی یا ارتفاع هدف را مشخص می‌کند و آشکارساز سرعت^{۲۱} که با تحلیل تغییرات فرکانسی سیگنال، سرعت نسبی هدف را می‌سنجد. همچنین، آشکارساز تصویر^{۲۲} نیز وجود دارد که اطلاعات تصویری از هدف را ثبت و پردازش می‌کند.

این معماری ماژولار به رادار کوانتومی اجازه می‌دهد تا به طور همزمان و با دقت بالا، اطلاعات چندگانه از هدف را به دست آورد. به کمک این تقسیم‌بندی و پردازش موازی، سامانه می‌تواند در شرایط نویزی و با سرعت بالا، پارامترهای مختلف هدف را آشکارسازی کند و کاربردهایی همچون ردیابی دقیق، شناسایی تصویری و اندازه‌گیری سرعت را به شکل بهینه انجام دهد. این روش باعث افزایش کارایی و چندکاره بودن رادار کوانتومی در مقایسه با رادارهای معمولی می‌شود. [۱۴]

۳-۴- واحد کنترل و پردازش رایانه‌ای

پس از جمع‌آوری داده‌های خام از گیرنده، پردازشگر سیگنال وارد عمل می‌شود. این بخش با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده، داده‌های دریافتی را تجزیه و تحلیل می‌کند تا اطلاعات مرتبط با هدف مانند فاصله، سرعت و موقعیت استخراج شود. داده‌ها پس از پردازش اولیه، وارد

²⁰ Elevation Detector

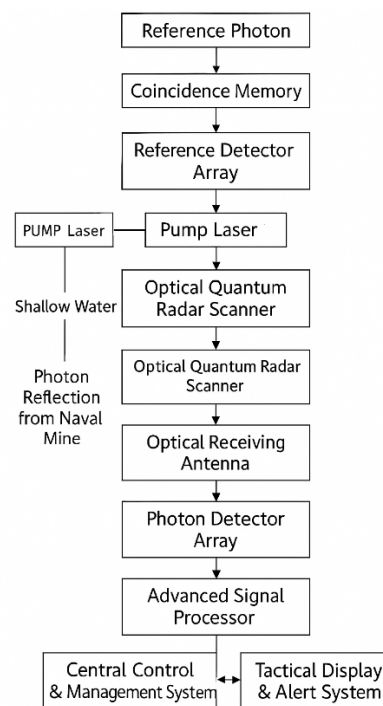
²¹ Velocity Detector

²² Image Detector

¹⁷ Photodetector Array

¹⁸ Range Detector

¹⁹ Azimuth Detector



شکل ۴- بلوک دیاگرام سناریوی پیشنهادی برای تشخیص مین‌های دریایی توسط رادار کوانتومی

فوتون‌های بازتابی از هر شیء غیرعادی (به‌ویژه مین‌های دریایی با بازتاب الکترومغناطیسی کم) به گیرنده اپتیکی بازمی‌گردند. در این مرحله، گیرنده با بهره‌گیری از تقویت‌کننده‌های کم‌نویز و آرایه آشکارساز فوتونی، سیگنال دریافتی را ثبت و تقویت می‌کند. همزمان، فوتون مرجع که در سامانه باقی مانده است، در حافظه همزمانی ذخیره می‌شود. با مقایسه دقیق زمان و ویژگی‌های فوتون مرجع و بازگشتی^{۲۳}، سامانه می‌تواند با اطمینان بالا، وجود یک هدف واقعی را از نویز محیطی، بازتاب امواج از امواج آب یا تابش نور خورشید متمایز کند. در این حالت، حتی اگر مین در گل‌ولای مدفون یا بخشی از آن در زیر آب باشد، به‌دلیل بهره‌گیری از خواص همبستگی کوانتومی، احتمال تشخیص به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد.

۵-۲- تحلیل داده و واکنش عملیاتی

داده‌های آشکارسازی‌شده، بلافاصله وارد واحد پردازش مرکزی می‌شود. پردازشگر با الگوریتم‌های پیشرفته، داده‌ها را تحلیل و ویژگی‌های هدف را استخراج می‌کند: فاصله، موقعیت دقیق جغرافیایی، بازتاب نسبی و حتی سرعت احتمالی هدف (در صورت حرکت مین یا جریان‌های آب). نتیجه تحلیل به صورت گرافیکی و عددی

روی نمایشگر تاکتیکی در اتاق فرماندهی یا پل کشتی نمایش داده می‌شود. علاوه بر هشدار فوری، مختصات مین کشف‌شده برای سایر سامانه‌های دفاعی (مانند مین‌روب‌های خودکار، پهپادهای سطحی یا زیرسطحی) ارسال می‌شود تا واکنش سریع و موثر صورت پذیرد.

در این فرآیند، سامانه می‌تواند به صورت هوشمند، پارامترهای اسکن را متناسب با وضعیت آب، تلاطم سطح، شرایط نوری و نویز محیطی تنظیم کند. این تطبیق‌پذیری باعث می‌شود حتی در شرایط بحرانی، کمترین خطای مثبت یا منفی رخ دهد. همچنین، داده‌های رادار کوانتومی می‌تواند با داده‌های سایر سنسورها (مانند لیدار یا سونار) ادغام شود تا اطمینان و دقت شناسایی مین‌ها به حداکثر برسد و خطرات ناشی از کم‌دور آب یا محدودیت‌های هر سنسور به‌تنهایی، جبران شود.

۵-۳- مزایا و نوآوری‌ها

سامانه رادار کوانتومی به دلیل ماهیت همبستگی فوتون‌ها، می‌تواند سیگنال هدف را حتی در حضور شدیدترین نویز پس‌زمینه (مثل تابش خورشید، بازتاب امواج سطحی، تلاطم یا نویز حرارتی) به‌درستی تشخیص دهد. این قابلیت ناشی از استفاده از جفت فوتون‌های درهم‌تنیده و بهره‌برداری از ویژگی‌های منحصربه‌فرد کوانتومی است که به رادار اجازه می‌دهد فوتون‌های برگشتی مرتبط با هدف را از میان حجم انبوهی از نویزهای غیرهمبسته جدا کند. در محیط‌های دریایی، وجود عوامل مزاحمی مانند نور شدید خورشید، انعکاس امواج روی سطح آب و حتی اغتشاشات ناشی از تلاطم یا تغییرات دمایی، معمولاً منجر به کاهش دقت و کارایی سامانه‌های آشکارسازی کلاسیک می‌شود. اما در رادار کوانتومی، چون نویز محیطی فاقد همبستگی با فوتون مرجع است، طی فرآیند آشکارسازی مشترک^{۲۴} بخش اعظم نویز حذف شده و تنها سیگنال‌هایی که واقعاً به فوتون‌های ارسال‌شده تعلق دارند، شناسایی می‌شوند. این ویژگی باعث می‌شود سامانه حتی در بدترین شرایط محیطی، پایداری و دقت خود را حفظ کند و نرخ هشدارهای غلط به شدت کاهش یابد.

به کمک پردازش همزمانی کوانتومی، حتی مین‌هایی با سطح مقطع راداری بسیار پایین یا مدفون در گل‌ولای کف آب‌های کم‌عمق قابل آشکارسازی هستند. این فناوری

²⁴ Joint Detection

²³ Coincidence Detection

داده‌های رادار کوانتومی می‌تواند با لیدار، سونار و سامانه‌های اپتیکی ترکیب شود تا یک دیدگاه جامع و چندلایه از محیط زیرسطحی به دست آید. این تلفیق داده‌ها، که به عنوان “فیوژن سنسوری” شناخته می‌شود، به اپراتورها و سامانه‌های خودکار این امکان را می‌دهد که نقاط ضعف هر سامانه منفرد را جبران کرده و نقاط قوت آن‌ها را تقویت کنند. برای مثال، سونار با قدرت نفوذ بالا در آب‌های کدر و عمق زیاد به خوبی عمل می‌کند، در حالی که رادار کوانتومی در محیط‌های پرنویز و روی اهداف با سطح مقطع کوچک عملکرد خارق‌العاده‌ای دارد و لیدار یا سامانه‌های اپتیکی قادر به تصویرسازی با وضوح بالا در آب‌های شفاف هستند. با ادغام این داده‌ها در یک سامانه پردازش مرکزی، می‌توان اطلاعات سه‌بعدی و بسیار دقیقی از محیط زیرسطحی به دست آورد، دقت موقعیت‌یابی اهداف را افزایش داد و میزان هشدارهای غلط را به حداقل رساند. این راهبرد، آینده امنیت دریایی و عملیات مین‌یابی را به سمت سامانه‌های هوشمند، چندمنظوره و واکنش سریع سوق می‌دهد.

۶- نتایج و شبیه سازی

در این پروژه، عملکرد رادار کوانتومی برای شناسایی مین‌های دریایی در آب‌های کم‌عمق و نویزی مورد ارزیابی عددی و شبیه‌سازی قرار گرفت. جدول ۱ به منظور بررسی جامع مشخصات فنی و عوامل مؤثر در ارزیابی عملکرد رادار کوانتومی برای شناسایی مین‌های دریایی و مقایسه آن با رادار کلاسیک پالسی ارائه شده است. هر یک از این مشخصات به نحوی بر دقت و کارایی رادار تأثیر می‌گذارد و درک آن‌ها برای بهبود فرآیند شناسایی و کاهش خطاها ضروری است. با توجه به این اطلاعات، می‌توان به‌طور مؤثری عملکرد سیستم را بهینه‌سازی کرده و به نتایج بهتری در شناسایی مین‌های دریایی دست یافت.

با بررسی دقیق زمان رسیدن فوتون‌های بازگشتی و تطبیق آن‌ها با فوتون‌های مرجع، می‌تواند ردپای ضعیف‌ترین اهداف را نیز در میان نویز پس‌زمینه بیابد. مین‌های دریایی به‌طور معمول به گونه‌ای طراحی می‌شوند که بازتاب الکترومغناطیسی کمی داشته باشند یا در زیر گل‌ولای و رسوبات کف آب پنهان شوند تا از چشم سامانه‌های شناسایی کلاسیک مخفی بمانند. اما پردازش همزمانی کوانتومی به دلیل حساسیت فوق‌العاده بالا و توانایی تفکیک سیگنال‌های همبسته، حتی بازتاب اندک ناشی از این مین‌ها را تشخیص می‌دهد. این دقت بالا نه تنها موجب افزایش احتمال کشف مین‌های پنهان یا استتار شده می‌شود، بلکه امکان تعیین موقعیت دقیق آن‌ها را نیز فراهم می‌آورد و نقش کلیدی در ایمنی عملیات دریایی ایفا می‌کند.

شناسایی سریع و دقیق مین‌های دریایی، به فرماندهان این امکان را می‌دهد که پیش از ورود به منطقه خطر، مسیر ایمن را انتخاب کرده یا اقدامات دفاعی را فعال کنند. با اطلاع به‌موقع از وجود مین در مسیر حرکت شناورها، فرماندهان می‌توانند با تغییر مسیر، کاهش سرعت، یا فعال‌سازی سامانه‌های مین‌روب و دفاعی، از وقوع خسارات سنگین و تهدید جان خدمه جلوگیری کنند. این قابلیت، نه تنها باعث افزایش ایمنی و کارایی عملیات نظامی و دریایی می‌شود، بلکه امکان مدیریت بهتر زمان و منابع را نیز فراهم می‌آورد. اهمیت سرعت و دقت در این فرآیند به‌ویژه زمانی دوچندان می‌شود که شناورها در مأموریت‌های اضطراری یا در مناطق با تهدید بالا قرار دارند، زیرا هر گونه تأخیر یا خطای شناسایی می‌تواند تبعات جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد. رادار کوانتومی با ارائه اطلاعات فوری و قابل اعتماد، به شکل مؤثری ریسک عملیاتی را کاهش می‌دهد و فرماندهان را در اتخاذ تصمیمات راهبردی یاری می‌کند.

جدول ۱- مشخصات و شرایط رادار کوانتومی و کلاسیک

عنوان	رادار کلاسیک	رادار کوانتومی	توضیحات
نوع رادار	رادار پالسی یا رادار FMCW	رادار کوانتومی	فناوری پیشرفته‌ای که از اصول کوانتوم برای شناسایی استفاده می‌کند.
فرکانس کاری	10 GHz	10 GHz	فرکانس عملیاتی که رادار برای ارسال و دریافت سیگنال‌ها استفاده می‌کند.
قدرت سیگنال	20 dBm	20 dBm	توان سیگنال خروجی رادار که بر قابلیت شناسایی تأثیر دارد.

نسبت سیگنال به نویز (SNR) ورودی رادار	15 dB	15 dB	معیاری برای ارزیابی کیفیت سیگنال در برابر نویز محیطی.
زاویه دید	۶۰ درجه	۶۰ درجه	زاویه‌ای که رادار قادر به پوشش آن است.
ابعاد مین	قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر	قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر	اندازه و شکل فیزیکی مین‌های دریایی.
وزن مین	۵ کیلوگرم	۵ کیلوگرم	وزن کلی مین که بر قابلیت شناسایی تأثیر می‌گذارد.
نوع مین	مین مغناطیسی	مین مغناطیسی	نوع مین‌هایی که رادار برای شناسایی آنها طراحی شده است.
میزان دفن شدگی	۵۰ سانتی‌متر	۵۰ سانتی‌متر	عمق دفن مین‌ها در بستر دریا.
عمق آب	۲ متر	۲ متر	عمق آبی که رادار در آن عمل می‌کند.
شدت نویز پس‌زمینه	30 dB	30 dB	مقدار نویز محیطی که می‌تواند بر عملکرد رادار تأثیر بگذارد.
شرایط جوی	آفتابی	آفتابی	وضعیت جوی که ممکن است تأثیری بر عملکرد رادار داشته باشد.
مدل‌سازی و شبیه‌سازی	استفاده از نرم‌افزار Python Spyder 6	استفاده از نرم‌افزار Python Spyder 6	نرم‌افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد رادار.

الگوریتم‌های سنتی پردازش سیگنال و عدم توانایی در تفکیک دقیق سیگنال‌های هدف از نویز، به ۱۲٪ می‌رسد. در مقابل، رادار کوانتومی با بهره‌گیری از اصول همبستگی کوانتومی و تکنیک‌های پیشرفته پردازش داده، موفق به کاهش نرخ هشدار غلط به ۱.۲٪ می‌شود، که نشان‌دهنده دقت بالاتر و توانایی بهتر در شناسایی واقعی اهداف است. این بدان معناست که سامانه کوانتومی، هم در تشخیص درست مین و هم در جلوگیری از هشدارهای کاذب، برتری محسوسی نسبت به رادار کلاسیک دارد. علاوه بر این، حداقل ابعاد مین قابل شناسایی در رادار کوانتومی بسیار کوچکتر است و این سامانه حتی مین‌های نیمه‌مدفون یا با سطح مقطع پایین را بهتر شناسایی می‌کند.

جدول ۲- جدول مقایسه عملکرد رادار کلاسیک و کوانتومی در سناریوی شناسایی مین دریایی

پارامتر	رادار کلاسیک	رادار کوانتومی
نسبت سیگنال به نویز (SNR) خروجی رادار	2 dB	9 dB
نرخ آشکارسازی صحیح (TPR)	75%	97%
نرخ هشدار غلط (FAR)	12%	1.2%
حداقل سطح مقطع قابل شناسایی	5 cm ²	0.5 cm ²
تأثیر نویز پس‌زمینه	بسیار بالا	بسیار پایین

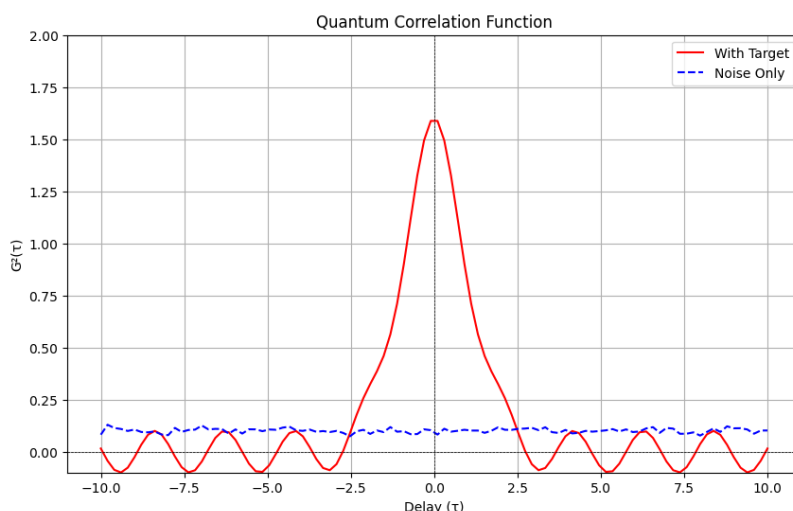
²⁶ False Alarm Rate

²⁵ True Positive Rate

شکل ۶ نمودار نرخ آشکارسازی صحیح بر حسب درصد دفن‌شدگی مین را در دو رادار کوانتومی و کلاسیک نشان می‌دهد. در این نمودار، هر چه درصد دفن‌شدگی مین بیشتر می‌شود، توانایی رادار کلاسیک برای تشخیص صحیح به سرعت کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در دفن‌شدگی‌های بالا تقریباً از کار می‌افتد. در مقابل، رادار کوانتومی حتی زمانی که بخش بزرگی از مین زیر گل و لای مدفون شده است، همچنان بخش زیادی از اهداف را با موفقیت شناسایی می‌کند. این نتیجه به خوبی بیانگر برتری فناوری کوانتومی در شرایط دشوار عملیاتی است.

شکل ۵ نمودار تابع همبستگی مرتبه دوم $G^{(2)}(\tau)$

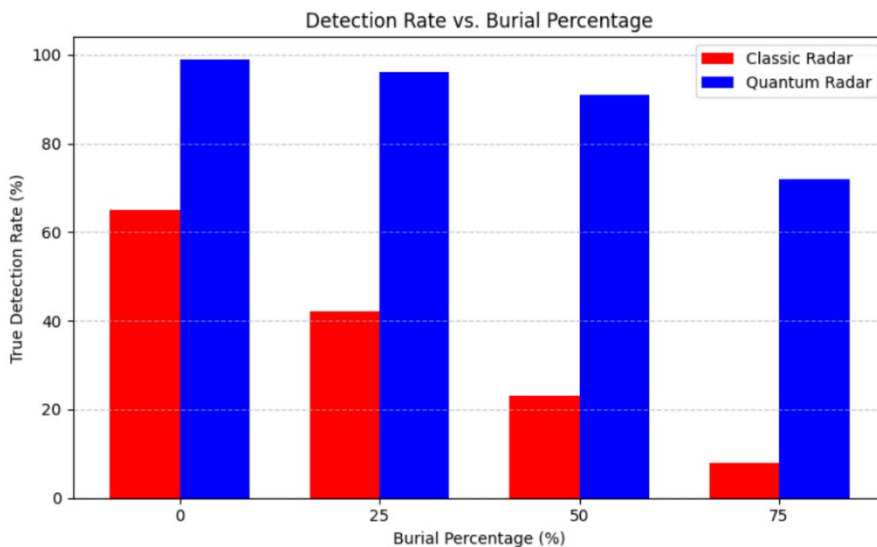
تصویری گویای قدرت رادار کوانتومی در حذف نویز و شناسایی دقیق اهداف است. در این نمودار، محور افقی تاخیر زمانی بین دو فوتون (سیگنال و مرجع) و محور عمودی مقدار همبستگی را نشان می‌دهد. وقتی هدف (مین) در میدان دید رادار وجود دارد، یک قله باریک و واضح درست در مرکز نمودار ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده همزمانی دقیق فوتون‌ها و در نتیجه وجود هدف است. اما اگر هیچ هدفی وجود نداشته باشد و فقط نویز دریافت شود، نمودار هیچ قله‌ای ندارد و کاملاً تخت و پراکنده است. این ویژگی باعث می‌شود رادار کوانتومی با قطعیت بسیار بالایی بین هدف واقعی و نویز محیطی تمایز قائل شود.



شکل ۵- نمودار تابع همبستگی مرتبه دوم

بر دقت آشکارسازی اهداف داشته باشند. خط آبی نقطه‌چین، نشان‌دهنده همبستگی مربوط به "نویز تنها" است که به‌طور یکنواخت در سطح پایین‌تری قرار دارد و تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که سایدلوب‌ها در این حالت نسبتاً ضعیف هستند و به همین دلیل اثرات منفی چند هدفی را به وضوح نشان نمی‌دهند.

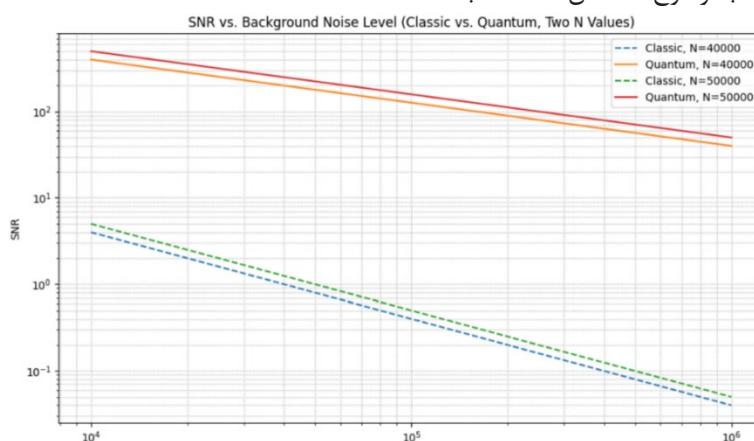
در این نمودار که تابع همبستگی کوانتومی را نشان می‌دهد، دو خط مختلف ترسیم شده است. خط قرمز، مربوط به حالت "هدف" است که دارای یک پیک بزرگ در نقطه صفر (مرکز) می‌باشد و سایدلوب‌های قابل توجهی در اطراف آن دیده نمی‌شود. این سایدلوب‌های کوچک نشان‌دهنده وجود همبستگی‌های ضعیفی در مقادیر تأخیر غیر صفر هستند که می‌توانند به‌طور بالقوه تأثیر منفی کمی



شکل ۶- نمودار نرخ آشکارسازی صحیح در رادار کوانتومی در مقایسه با رادار کلاسیک

افزایش شدت نویز محیطی، کارایی رادار کلاسیک به سرعت افت می‌کند و تقریباً غیرقابل استفاده می‌شود. اما رادار کوانتومی در همین شرایط، همچنان سطح بالایی از SNR را حفظ می‌کند و قادر است سیگنال هدف را از میان نویز تشخیص دهد و با شیب ملایمی افت می‌کند. این نمودار به خوبی اثبات می‌کند که چرا فناوری کوانتومی می‌تواند در محیط‌های نویزی و چالش‌برانگیز، تحولی بزرگ در حوزه کشف مین دریایی و امنیت عملیات نظامی ایجاد کند.

در نهایت، شکل ۷ نمودار نسبت سیگنال به نویز (SNR) بر حسب شدت نویز پس‌زمینه را نشان می‌دهد. در این نمودار محور افقی (شدت نویز پس‌زمینه) به صورت لگاریتمی رسم شده تا تغییرات در گستره بزرگتر نویز مشهود شود. محور عمودی (SNR) هم لگاریتمی است تا تفاوت افت دو مدل بهتر دیده شود. خطوط نقطه‌چین مربوط به رادار کلاسیک هستند و خطوط پیوسته مربوط به رادار کوانتومی است. برای هر N (۴۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰)، دو منحنی وجود دارد و مشاهده می‌شود که با افزایش N ، هر دو منحنی بالاتر می‌روند. به وضوح مشخص است که با



شکل ۷- میزان SNR در رادار کوانتومی و رادار کلاسیک

محور افقی نمودار نرخ هشدار غلط^{۲۸} و محور عمودی نرخ آشکارسازی صحیح^{۲۹} را نشان می‌دهد. منحنی آبی که به رادار کوانتومی اختصاص دارد، در سراسر بازه نرخ هشدار

شکل ۸ مقایسه‌ای بین منحنی ویژگی عملکرد گیرنده^{۲۷} رادار کوانتومی و دو حالت از رادار کلاسیک در فرآیند تشخیص مین دریایی به تصویر کشیده شده است.

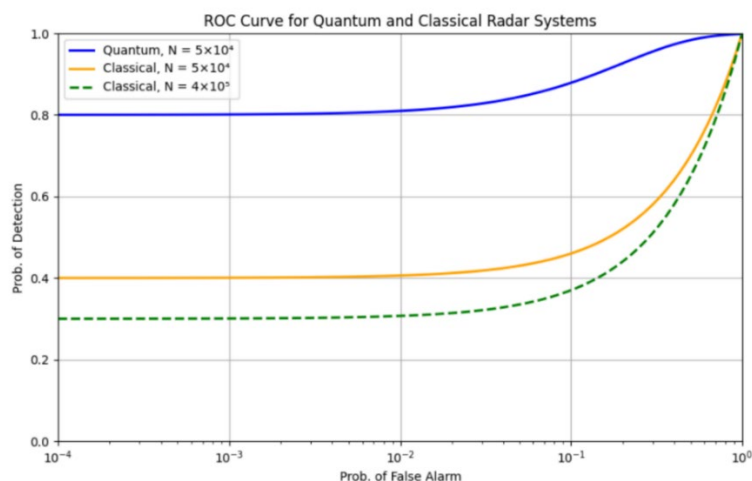
^{۲۹} True Detection Rate

^{۲۷} Receiver Operating Characteristic curve (ROC)

^{۲۸} False Alarm Rate

رادار کوانتومی نرخ آشکارسازی پایین‌تری دارند. این تفاوت‌ها به خوبی نشان می‌دهد که رادار کوانتومی در تمامی شرایط، برای هر مقدار نرخ هشدار غلط، آشکارسازی مطمئن‌تر و دقیق‌تری ارائه می‌دهد و این امر برتری فنی و عملی این فناوری را نسبت به رادارهای سنتی نمایان می‌سازد.

غلط، بالاتر از منحنی‌های متعلق به رادار کلاسیک قرار می‌گیرد و بیانگر توانایی بیشتر این سامانه در تشخیص صحیح هدف حتی در حضور نویز و خطا است. منحنی نارنجی عملکرد رادار کلاسیک را در شرایط معمولی و منحنی سبز خط‌چین همان سامانه را در شرایط سخت‌تر یا با حساسیت کمتر نمایش می‌دهد که هر دو نسبت به



شکل ۸- مقایسه ROC بین رادار کوانتومی و رادار کلاسیک

قابل توجهی در گل و لای مدفون شده، عملکردی به مراتب برتر نسبت به رادار کلاسیک ارائه می‌دهد. نمودارهای همبستگی مرتبه دوم، جداول مقایسه‌ای و نمودار نرخ آشکارسازی صحیح به وضوح بیانگر آن بودند که رادار کوانتومی حتی در حضور نویز پس‌زمینه بسیار شدید، موفق به شناسایی اهداف با دقت و قابلیت اطمینان بالا می‌شود، در حالی که رادار کلاسیک عملاً کارایی خود را از دست می‌دهد. به ویژه در سناریوی شناسایی مین مدفون، نرخ آشکارسازی صحیح در رادار کوانتومی چندین برابر سامانه‌های سنتی باقی می‌ماند و نسبت سیگنال به نویز (SNR) آن با افزایش نویز محیطی افت چندانی پیدا نمی‌کند.

در مجموع، پژوهش حاضر اثبات می‌کند که فناوری رادار کوانتومی نه تنها محدودیت‌های اساسی رادارهای کلاسیک در محیط‌های نویزی و چالش‌برانگیز را برطرف می‌کند، بلکه با بهره‌گیری از ویژگی‌های منحصر به فرد فوتون‌های درهم‌تنیده و پردازش همزمان کوانتومی، افق جدیدی را برای کاربردهای امنیتی، نظامی و صنعتی گشوده است. این موفقیت‌ها، رادار کوانتومی را به ابزاری بی‌رقیب برای شناسایی اهداف پنهان، کوچک و یا مدفون

این مجموعه جداول و نمودارها، هرکدام بخشی از مزایا و توانایی‌های رادار کوانتومی را به زبان عدد و تصویر نمایش می‌دهند و با نگاه تحلیلی و مقایسه‌ای، برتری این فناوری را نسبت به روش‌های سنتی به طور عینی و قابل دفاع به نمایش می‌گذارند.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، با مروری جامع بر رادارهای کوانتومی، ابتدا زمینه تاریخی و روند تکامل این فناوری نوین بررسی شد و تفاوت‌های بنیادی آن با رادارهای کلاسیک از منظر اصول عملکرد و مبانی نظری تبیین گردید. ساختار اجزای اصلی یک سامانه رادار کوانتومی، نحوه تولید و آشکارسازی فوتون‌های درهم‌تنیده اهمیت همبستگی کوانتومی در افزایش حساسیت و دقت شناسایی اهداف، به تفصیل مورد بحث قرار گرفت. همچنین، با طرح یک سناریوی عملی مهم در حوزه امنیت دریایی، یعنی تشخیص مین‌های دریایی در آب‌های کم‌عمق و محیط‌های پرنویز، کاربرد عملی رادار کوانتومی به صورت گام‌به‌گام شرح داده شد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل‌های آماری نشان داد که رادار کوانتومی به‌ویژه در شرایطی که سطح مقطع راداری هدف بسیار کوچک است یا مین تا حد

در محیط‌های سخت بدل می‌کند و زمینه را برای توسعه و پیاده‌سازی عملی آن در آینده‌ای نزدیک، فراهم می‌سازد.

۸- منابع و مراجع

12. Luong, D., et al. (2025). Field demonstration of quantum radar in a maritime environment. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 61(2), 512-522.
13. Mathews, M. (2022). A Study on Quantum Radar Technology Developments and Design Consideration for its integration. *arXiv preprint arXiv:2205.14000*.
14. D. Latypov, "From Atom-Based RF Metrology to Quantum RF Receivers and Emitters," *NAECON 2024 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, Dayton, OH, USA, 2024, pp. 80-82.
15. M. Alalili, M. B. Ali, Q. Nasir and M. A. Talib, "Quantum Radar: Overview on Technology, Limitations and Opportunities," *2024 17th International Conference on Development in eSystem Engineering (DeSE)*, Khorfakkan, United Arab Emirates, 2024, pp. 180-186.
۱۶. احمدزاده، ن.، شیبانی، ا. بررسی و امکان‌سنجی کاربرد رادار کوانتومی در سیستم‌های ایوینیکی هواپیما، هشتمین کنفرانس بین‌المللی توسعه فناوری در مهندسی مکانیک و هوافضا. ۱۴۰۳.
۱۷. حسینی، س. م.، نوروزی، م.، سیدی‌یزدی، ج.، و ایران‌نژاد، ف. (۱۴۰۱). بررسی رفتار کیفی چلاندگی و درهم‌تنیدگی در رادار چلاندیده دومی کوانتومی. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، دانشگاه پیام نور، ۱۴(۴)، ۲۳-۳۵.
۱۸. حسینی، س. م.، نوروزی، م.، سیدی‌یزدی، ج.، و ایران‌نژاد، ف. (۱۴۰۲). آنتروپی و اثرات واهمدوسی در رادار چلاندیده دومی کوانتومی. فصلنامه علمی پژوهشی فیزیک، دانشگاه پیام نور، ۱۵(۲)، ۷۱-۸۵.
۱۹. جعفری، م.، احمدی، س.، و رضایی، ن. (۱۴۰۲). رادار کوانتومی در باند میکروویو مبتنی بر آشکارساز اپتیکی و کاواک مگنونی. هشتمین کنفرانس ملی رادار و سامانه‌های مراقبتی ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ری، ایران.
۲۰. علیزاده، ح.، محمدی، س.، و رضوی، م. (۱۴۰۱). ساختاری کارآمد برای منبع رادار کوانتومی مبتنی بر فناوری ابررسانایی. نهمین کنفرانس ملی مهندسی برق و الکترونیک ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
1. Lloyd, S. (2008). Enhanced sensitivity of photodetection via quantum illumination. *Science*, 321(5895), 1463-1465.
2. Shapiro, J. H., & Lloyd, S. (2009). Quantum illumination versus coherent-state target detection. *New Journal of Physics*, 11(6), 063045.
3. Zhang, Z., Zhuang, Q., Shapiro, J. H., & Lloyd, S. (2015). Quantum illumination with photon-subtracted states. *Physical Review Letters*, 115(2), 020502.
4. Barzanjeh, S., Guha, S., Weedbrook, C., Vitali, D., Shapiro, J. H., & Pirandola, S. (2015). Microwave quantum illumination. *Physical Review Letters*, 114(8), 080503.
5. Pirandola, S., Bardhan, B. R., Gehring, T., Weedbrook, C., & Lloyd, S. (2018). Advances in photonic quantum sensing. *Nature Photonics*, 12(12), 724-733.
6. Luong, D., et al. (2020). Entanglement-Based Quantum Radar: From Myth to Reality. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 35(10), 22-35.
7. England, D. G., Balaji, B., & Sussman, B. J. (2019). Quantum-enhanced standoff detection using correlated photon pairs. *Physical Review A*, 99(2), 023828.
8. Wenye, J., Chang, J. and et al. (2023). Recent advances in metasurface design and quantum optics applications with machine learning, *Light: Science & Applications*, 12(169), 1-16.
9. Slepian, G., Vlasenko, S. and et al. (2022). Quantum Radars and Lidars: Concepts, realizations, and perspectives. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 64(1), 16-26.
10. Lopaeva, E. D., et al. (2013). Experimental realization of quantum illumination. *Physical Review Letters*, 110(15), 153603.
11. Weichman, P. (2020). Quantum-enhanced detection of objects in complex environments. *Colrnel University: Quantum Physics*, 103(4), 1-31.

۲۱. جباررشیدی، ع.، پورسجادی، س.، و خوشه‌مهری، آ. (۱۳۹۹). تحلیل ساختار، فناوری‌ها و عملکرد رادار کوانتومی در ناحیه مایکروویو. هفتمین کنفرانس رادار و سیستم‌های مراقبتی، تهران، ایران.
۲۲. جباررشیدی، ع.، خوشه‌مهری، آ.، و سادات‌موسوی، م. (۱۳۹۹). طراحی و تحقق رادار برتابندگی کوانتومی: رویکردها و چالش‌های علمی و فناوری. دهمین کنفرانس بین‌المللی فناوری‌های نوین اطلاعات، کامپیوتر و مخابرات، تهران، ایران.