فصلنامه علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال پنجم، شماره دو، تابستان 1400

ارتقای سامانه فرماندهی و کنترل جهت مقابله با تهدیدات آینده با استفاده از رادارهای کوانتومی

حمید رضا البرزنیا[1] محسن رحیمی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۰/۰۷/۱۵

چکیده

در این کنکاش بر مبنای دانش اطلاعات و محاسبات کوانتومی، حسگر های کوانتومی و به طور خاص رادارهای کوانتومی بعنوان یکی از فن آ وری های نوین در این حوزه مورد بررسی قرار گرفته است . بکارگیری این فن آوری را می توان به عنوان یکی از عوامل برتر ساز در راستای ارتقاء چشمگیر سامانه های فرماندهی و کنترل محسوب نمود. مفهوم درهمتنیدگی کوانتومی و کاربرد آن در فن آوری پرتو افکنی کوانتومی در این رادارها، به عنوان یک استاندارد کوانتومی برای ارتقاء سامانه های فرماندهی و کنترل نوین در حوزه کشف ، جمع آوری اطلاعات و کاهش محدودیت ابزارهای سنجش از راه دور متداول و رایج مد نظر و مورد بحث قرار گرفته است. همچنین به عنوان یک پژوهش نوین برای نخستین بار عملکرد رادار های کوانتومی و احتمال ردگیری با سیگنالهای غیردرهمتنیده و درهمتنیده در رادار های کوانتومی با قابلیت های رادار های کلاسیک بر مبنای تابع چگالی حالات و استفاده از کدهای محاسباتی و نرم افزار های شبیه سازی مقایسه و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد و نتایج حاصله بیانگر افزایش چندین برابری قدرت کشف و تفکیک پذیری اهداف راداری با فن آوری پرتو افکنی کوانتومی می باشد و در صورت بکارگیری از این برتری و مزیت نوین، می توان زمینه های ایجاد ابراز های کشف و جمع آوری اطلاعات سامانه های فرماندهی و کنترل پیشرفته را جهت مقابله با تهدیدات آینده در حوزه مختلف به ویژه تهدیدات هوافضایی را فراهم نمود.

واژگان کلیدی: حسگر کوانتومی ، سامانه فرماندهی و کنترل ، رادار کوانتومی، پرتو افکنی کوانتومی، درهمتنیدگی

[1] مدرس دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا،(ص) alborznia_ham@yahoo.com

[2] استاد یار دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص) aa.romao@yahoo.com

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

1-مقدمه و هدف

ترقی دانش اطلاعات کوانتومی موجب توسعه و پیشرفت در حوزه فن آوری و پیش یابی حسگرهای کوانتومی در راستای جمع آوری اطلاعات و سنجش از راه دور گردیده است . و می توان بیان نمود که نظریه اطلاعات کوانتومی یک دانش میان رشته ای است که ترکیبی از مکانیک کوانتومی، نظریه اطلاعات ، مخابرات و علوم رایانه ای می باشد. اطلاعات به خاطر ماهیت فیزیکی که دارند ، معمولاً در یک محیط فیزیکی (محلی)ذخیره می شوند و توسط فرایند های فیزیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند. لذا طراحی رایانه ها و وسایل مخابراتی رایج بر مبنای فیزیک کلاسیک استوار است ولی همان طور که می دانیم در اکثر موارد قوانین فیزیک کلاسیک ناقص و غلط می باشد. وباید قوانین جامع فیزیک کوانتومی را جایگزین آنها نمود. هدف اصلی تئوری اطلاعات کوانتومی تحقیقات در این زمینه و درک نقش قوانین کوانتومی در پردازش اطلاعات کوانتومی است . تفاوت های اصلی اطلاعات کلاسیکی با اطلاعات کوانتومی همان تفاوتهای اساسی در فیزیک کلاسیکی با فیزیک کوانتومی است از قبیل: تداخل یا اصل برهم نهشتی، اصل عدم قطعیت و مهم تراز همه اصل درهم تنیدگی ، که در این کنکاش با استفاده از قوانین بنیادی اطلاعات کوانتومی به بیان یکی از کاربرد های مهم اطلاعات کوانتومی و درهم تنیدگی کوانتومی یعنی پرتو افکنی کوانتومی در راستای طراحی حسگر های کوانتومی جهت کاربرد در رادارهای کوانتومی، در راستای ارتقاء فن آوری تبادل ، سنجش و رمزنگاری اطلاعات می پردازیم. که امروزه بعنوان یکی از فاکتور های موثر در ارتقاء سامانه های فرماندهی و کنترل نوین می باشند و به عنوان یکی از عوامل برتر ساز در حوزه ابزار های جمع آوری اطلاعات و کاهش محدودیت ابزارهای سنجش از راه دور در سامانه های فرماندهی و کنترل پیشرفته جهت مقابله با تهدیدات متنوع و پیچیده امروزه و آینده مطرح می باشد. در واقع فن آوری طراحی سنسورهای کوانتومی ارتباط تنگاتنگ و وابستگی شدیدی با دانش اطلاعات کوانتومی دارد. به عبارت دیگر هرچقدر بتوانیم با تکنیک های پردازش و محاسبات کوانتومی آشنا شویم ، توانایی بالاتری در فرآوری و ساخت حسگرهای کوانتومی و ارتقاء دقت و حساسیت آنها به ویژه در زمینه طراحی سیستم های نوین جمع آوری اطلاعات و سنجش از راه دور با امنیت بالای تبادل اطلاعات و دور از استراق سمع بدون کوچکترین نشت اطلاعاتی بعنوان یکی از نیازمندی های ضروری و امنیتی در یک سامانه فرماندهی و کنترل پیشرفته و هوشمند خواهیم داشت. نیاز جامع بشری به رایانه های که قادر به اجرای الگوریتم های در راستای تحلیل رمز نگاری و رمزگشایی، منجر به ظهور دانش اطلاعات کوانتومی بر پایه قوانین مکانیک کوانتومی گردیده است (M.A.Nielsen & I.L. Chuang, 2000). مکانیک کوانتومی یک تئوری غیر کلاسیک است و نمایش نتایج بسیاری از اثرات آن غیرشهودی می باشد و این دلیلی است که ما در زندگی روزمره خود یک جهان کلاسیکی(ماکروسکوپیک) را تجربه می کنیم که این به چیزی بر می گردد که ما از آن بعنوان « حس عام » یا عقل سلیم یاد می کنیم .یک اصل مبهم و ناسازگار در مکانیک کلاسیکی اصل انطباق است که در عمل این اصل هنوز در فیزیک کلاسیک بطور مثال در الکترودینامیک کلاسیک، قابل درک نمی باشد. ، به هر حال برخلاف نظریهٔ کلاسیک، اصل انطباق در مکانیک کوانتومی خاصیت ویژه ای را برمی انگیزد که در هم تنیدگی بین سیستم های کوانتومی نامیده می شود . که این موضوع منجر به ساختار فضای هیلبرت در فضای حالت مکانیک کوانتومی می شود . در مکانیک کلاسیکی ذرات می توانند در فواصل طولانی به سادگی به هم مرتبط و هم بسته باشند زیرا یک ناظر می تواند سیستمی در حالت خاص را فراهم سازد و سپس به ناظر دیگری فراهم کردن حالتی مشابه حالت خود را بیاموزد. به هر حال تمام این هم بستگی های که از این روش بوجود می آیند می تواند کاملا قابل درک و استفاده در توزیع احتمال کلاسیکی و شهود کلاسیکی باشد . این وضعیت به طور مهیجی زمانی تغییر می کند که ما سیستم های هم بسته در مکانیک کوانتومی را بررسی می نماییم در مکانیک کوانتومی ما می توانیم دو ذره از چنین راهی فراهم کنیم که هم بستگی بین آنها را نمی توان بطور کلاسیکی توضیح داد . چنین حالت های را حالت های در هم تنیده می نامند. این موفقیت برای تشخیص این واقعیت بود و همچنین به قالب ریاضی درآوردن این اصل که اجازه می دهد تا این آزمایش در مکانیک کوانتومی

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

بر خلاف نظریه های واقع گرایانه رایج باشد . امروزه چنین تست ها و آزمایش های انجام پذیرفته است و پیش بینی های مکانیک کوانتومی را تایید نموده است. اگرچه باید ملاحظه داشت که تا کنون تجربه ای که بدون هیچ ایراد باشد ،صورت نگرفته است ، با بیان ریاضی و اثبات تجربی به نظر می رسد به تناقض های این سوال از مکانیک کوانتوم غیر موضعی به یکباره پاسخ داده شده است. به هر حال در سال های اخیر این نتایج علمی حاصل گردیده است که بیانگر این موضوع است که در واقع در هم تنیدگی در حالت های خالص را می توان را بعنوان یک درک و شهود خوب مشاهده کرد .

در مورد در هم تنیدگی در حالت های آمیخته هنوز بسیاری از خواص و ویژگی مبهم اند و در واقع مسائل جدیدی مانند مسائلی که در این مقاله به عنوان کاربرد در همتنیدگی در پرتو افکنی کوانتومی در راستای ارتقاء سنجش اطلاعات از راه دور در رادار های کوانتومی با امنیت بالای تبادل اطلاعات و دور از استراق سمع با عدم نشت اطلاعات سیگنالی، که از ویژگی های در هم تنیدگی به عنوان یک پدیده کوانتومی نو ظهور در حسگر های این سامانه ها به عنوان ابراز های کشف و جمع آوری اطلاعات با امنیت بالا در سامانه های فرماندهی و کنترل پیشرفته جهت مقابله با تهدیدات آینده در حوزه های مختلف به ویژه تهدیدات هوافضایی ظاهر می شود . این استدلال در مورد مسائلی با حالت های آمیخته در بر گیرنده این حقیقت است که محتوای کوانتومی در هم بستگی ها، در پشت هم بستگی های کلاسیکی در یک حالت آمیخته پنهان شده است. شاید بتوان انتظارداشت که بدست آوردن دوبارهٔ مضمون کوانتومی در مورد هم بسته ها غیر ممکن باشد. اما این نتیجه اشتباه خواهد بود . روش های ویژه ای بدست آمده است که به ما اجازه می دهد مضمون کوانتومی در مورد هم بستگی ها در یک حالت کوانتومی آمیخته را استخراج کنیم، در واقع این روش ها نشان می دهند که یک حالت آمیخته می تواند هم بستگی های مکانیک کوانتومی را نشان دهد .می توان حالات در هم تنیده ی کاملا خالصی را بدست آورد که مسائل بنیادی جالب زیادی را درباره ماهیت در هم تنیدگی که ما در مورد آن بحث خواهیم کرد، مطرح می شود .

این قوانین و مسائل بنیادی تبدیلات در هم تنیدگی را منتج می شود، که می تواند پلی بین قوانین بنیادی و ترمودینامیک هم باشند که در مجال این تحقیق نمی گنجد . از طرف دیگر نتایج جدید در مورد در هم تنیدگی کوانتومی به وسیله این کشف حاصل می شود که به ما این اجازه را می دهد که یک حالت کوانتومی ناشناخته از یک سیستم دو ترازهٔ متعلق به یک ذره را به ذره دیگر بدون دخالت فاصله و هیچ گونه ارسال حقیقی ذره، انتقال داد (Bennett, 1987). در این روش انتقال اطلاعات کوانتومی، ذره خودش را ارسال نخواهد کرد .این روشی از انتقال ایمن اطلاعات از فرستنده به گیرنده را نشان می دهد در حالیکه استراق سمع از اطلاعات و نشت اطلاعات در مسیر غیر ممکن است . این روش می تواند کلید و راهگشای علمی بسیار موثری برای انتقال از راه دور و سنجش اطلاعات از راه دور با امنیت فوق العاده بالا را ایجاد نماید که به طور خاص می تواند انقلابی درحوزه انتقال اطلاعات در شبکه های ارتباطی و جمع آوری اطلاعات صحیح و کامل با پروتکل‌های پیشرفته جهت تصمیم گیری و اقدام مناسب و متناسب با تهدیدات آتی با بستر های امن در شبکه یکپارچه فرماندهی و کنترل را ایجاد نماید. که بطور معمول با اشتراک گذاری حالات کوانتومی صورت می گیرد که نشان دهنده حالت در هم تنیده بین آنها است. برای بوجود آوردن چنین حالت در هم تنیده ای از یک مدار کوانتومی مربوط به حالت کوانتومی استفاده می کنیم ، که در ا دامه مبحث به آن اشاره می گردد و در بخش های آتی آن را بررسی و با نمونه های کلاسیک رایج کنونی مورد مقایسه قرار می دهیم

برای نخستین بار پروتکل انتقال از راه دور کوانتومی با استفاده از فوتون های منفرد در لابراتوار هایی در آینسبروگ (Bouwmeester,1997) رم (Boschi, 1998) تکمیل شده است که تحریک شگرفی در زمینهٔ به وجودآوردن اطلاعات کوانتومی ایجاد نموده است ، اما ممکن است بیشترین کاربرد تماشایی از درهم تنیدگی کوانتومی باشد ، که می تواند باعث افزایش نمایی و چشمگیری در سرعت پردازش برای مسائل

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

ویژه ای مانند فاکتور گیری از اعداد بزرگ بصورت اولیه را تحقق بخشد (Vedral,1998) .

ایده اصلی کامپیوتر های کوانتومی مخالف اصول در هم تنیدگی است. این پیشنهاد ها ممکن است شباهت زیادی به سیستم های کوانتومی بعنوان مکانیک کوانتومی که n تعداد سیستم کوانتومی می توان بطور همزمان به صورت 2n عدد نمایش داده شود. تاثیر در هم گسیختگی محیط در فهم محاسبات کوانتومی را بشدت دشوار نماید و ایده های زیادی را برای مقابله با نویز در کامپیوتر های کوانتومی بوجود می آورد. بدین خاطر بطور مجدد در هم تنیدگی مورد استفاده قرار می گیرد. بسیاری از دیگر کاربرد های در هم تنیدگی امروزه کشف و پایه گذاری شده است ، برای مثال در : استاندارد های فرکانس (Huelga,1997) ، محاسبات کوانتوم توزیع شده ، مبادله درهم تنیدگی چند ذره ای (Bose,1998) و خالص سازی درهم تنیدگی چند ذره ای (البرزنیا، 1388 : 23) . و به ویژه پرتو افکنی کوانتومی(DG England, 2019) که موضوع اصلی این مقاله در راستای طراحی رادارهای نسل جدید بر پایه حسگر های کوانتومی در جهت ارتقاء بهره وری جمع آوری اطلاعات و سنجش از راه دور با امنیت بالای تبادل اطلاعات و دور از استراق سمع، با کمترین نشت اطلاعات سیگنالی نسبت به رادارهای کلاسیک رایج امروزه می باشد که می تواند در آینده به عنوان یکی از ابزار های موثر سامانه های فرماندهی و کنترل پیشرفته در حوزه کشف ، جمع آوری اطلاعات و کاهش محدودیت سنجش از راه دور نسبت به ابزارهای متداول و کلاسیک امروزه محسوب نمود.

می توان به جرات قرن آتی را عصر اطلاعات کوانتومی نامید که صنایع و تکنولوژی ها بر این پایه بنا نهاده خواهند شد. با پیشرفت دانش اطلاعات و محاسبات کوانتومی ، جنبه های دیگری از قبیل جمع آوری و سنجش اطلاعات از راه دور کوانتومی مطرح گردید که برتری فزاینده ای نسبت به جمع آوری و سنجش اطلاعات از راه دور با استفاده از روش ها و سامانه های رایج امروزه دارد (فرجی راد، 1398). راهبرد اصلی در این حسگر های کوانتومی، بکارگیری محاسبات و پردازش کوانتومی جهت ساخت سیستم های دقیق مانند حسگرهای الکترومغناطیسی ، آشکارسازهای اپتیکی و سنجنده های گرانشی می باشد. و به عبارت دیگر می توان بیان نمود که در واقع حسگرهای کوانتومی در سامانه های مانند رادار های کوانتومی از همان الگوریتم های ریاضی کانال های نویزدار کوانتومی که منجر به مطرح شدن مفهوم در همتنیدگی میشوند، بهره می گیرند. که این مفهوم کوانتومی بسیاری از کاربرد های کوانتومی از قبیل انتقال از راه دور ، رمزنگاری، پرتوافکنی کوانتومی و... را توجیه می نماید ، همچنین تکنیک محاسبات و پردازش کوانتومی در این حسگرها قابل بهره برداری می باشند. در ضمن می توان از فن آوری حسگر های کوانتومی در کاربرد های فراوان در زمینه های متنوع از قبیل کاربرد های نظامی مانند سامانه ها جمع آوری اطلاعات و رادارهای پسیو و اکتیو ، نقشه برداری و.... بعنوان ابزار های سامانه های فرماندهی و کنترل نوین برای رویارویی با تهدیدات متنوع و پیشرفته آتی استفاده نمود. همچنین می توان این فن آوری را در زمینه های غیرنظامی، در صنایع هوایی، دریایی، هواشناسی، کشاورزی و.... به کار برد. و سوالات پیش رو در این پژوهش، این است که علاوه بر تبین مبانی ، روش ها و پروتکل های انتقال و ارسال اطلاعات در رادارهای کوانتومی بر مبنای پرتوافکنی کوانتومی چگونه می باشد ؟ و مزیت های بکارگیری و جایگزینی این روش ها بجای پروتکل های کلاسیک، بویژه در حسگر ها و رادار ها کنونی چه خواهد بود و چگونه منجر به ارتقاء در سامانه های فرماندهی و کنترل به ویژه در حوزه مقابله با تهدیدات هوافضایی آینده می گردد؟

2-پیشینه پژوهش

ساختار و فن آوری رادار های کوانتومی

یکی از سامانه های جمع آوری و سنجش اطلاعات از راه دور کوانتومی ، رادار های کوانتومی پسیو و اکتیو می باشند که وظیفه کشف و شناسایی اشیاء و پرنده های پنهانکار را برعهده دارند و مزیت اصلی آنها نسبت به رادار های کلاسیک رایج را می توان دقت تفکیک پذیری و حساسیت بسیار بالای این سامانه ها که از فن آوری پرتوافکنی کوانتومی بهره می برند را دانست که با توجه به اهمیت دستیابی به اطلاعات دقیق و کامل در مورد

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

تهدیدات هوایی جهت تصمیم گیری مناسب و سریع و اقدام متناسب با تهدیدات متنوع و پیچیده آتی استفاده از این فن آوری به عنوان یکی از ابزار موثر در ارتقاء **سامانه های فرماندهی و کنترل پیشرفته در سال ها و دهه های آتی بسیار ضروری به نظر می رسد**. به نحوی که طبق بررسی و نتایج بدست آمده ، حساسیت و دقت حسگر های کوانتومی که با تکنیک درهم تنیدگی فوتون ها کار می کنند ، بازدهی برابر بیش از توان چهارم بهره سامانه های سنجش از راه دور کلاسیک و رایج را دارند . با توجه به محدوده فرکانس کاری رادارهای کوانتومی که در باند ایکس می باشد (8 تا 12 گیگاهرتز)، می تواند کاربردهای مختلفی در زمینه هدایت موشک ها ، رادارهای دریایی ، جمع آوری و سنجش اطلاعات هوایی و زمینی و کنترل ترافیک هوایی داشته باشند(M.L. Skolnik,2008) . لازم به ذکر است برای نخستین بار تیمی متشکل از چهار محقق انستیتو علم و تکنولوژی اتریش با سرپرستی یک محقق ایرانی «شبیر برزنجه» ، با استفاده از امواج مایکروویو در هم تنیده موفق به ساخت اولین رادار کوانتومی جهان شدند.این سامانه راداری که در ابعاد آزمایشگاهی ارائه شده، از تعدادی عکس برای تشخیص اشیاء اطرافش استفاده کرده و تنها مقادیر کمی تابش الکترومغناطیسی از خود ساطع می‌کند. رادار مذکور با این روش می‌تواند سیگنال خود را در نویز پس‌زمینه امواج پنهان کرده و همین مساله شناسایی آن را بسیار سخت می‌کند.

3-روش تحقیق یا اصول و تئوری مقاله

در این تحقیق با روش توصیفی و تحلیلی مسائل و ایده های اصلی در هم تنیدگی را تشریح کنیم و پس از معرفی و بررسی این فن آوری و بیان قابلیت آن به طور نمونه در ارتقاء چشمگیر عملکرد رادارها و سامانه های سیگنالی جمع آوری اطلاعات و سنجش از راه دور بدون نشت اطلاعات سیگنالی بعنوان ابزار و عامل برتر ساز در ارتقاء سامانه های فرماندهی و کنترل نوین ، ضمن مقایسه انواع روش های عملکرد پرتوافکنی کوانتومی در فن آوری حسگر های کوانتومی به کار رفته در رادار های کوانتومی با استفاده از اصل در هم تنیدگی برای زمانی که فوتون های سیگنالی ارسالی از فرستنده این رادارها غیر در همتنیده و در همتنیده هستند، عملکرد حسگر های کوانتومی با سیگنالهای درهمتنیده در رادار های کوانتومی را با رادار های کلاسیک را به عنوان یک پژوهش نوین برای نخستین بار بر مبنای تابع چگالی حالات و استفاده از کدهای محاسباتی و نرم افزار های شبیه سازی مقایسه و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد و نتایج حاصله در قالب نمودار به عنوان زمینه های ایجاد ابراز های کشف و جمع آوری اطلاعات مدرن در بهبود و ارتقاء سامانه های فرماندهی و کنترل پیشرفته جهت مقابله با تهدیدات آینده در حوزه مختلف به ویژه تهدیدات هوافضایی بیان گردیده است روش گردآوری داده‌ها به روش کتابخانه ای و محاسباتی با استفاده از نرم افزار های محاسباتی (البرزنیا، 91:1398) می باشد.

اصول و مبانی **این رادار بر اساس قوانین در هم تنیدگی کوانتومی عمل می‌کند، پدیده‌ای که در آن دو ذره کوانتومی در هم تنیده بدون توجه به مجزا بودنشان از یکدیگر، نوعی همبستگی آنی در برخی از خصوصیات فیزیکی ذاتی‌شان نشان می‌دهند. برای ساخت یک رادار کوانتومی، محققان با استفاده از دستگاه ابررسانایی که «مبدل پارامتری جوزفسون» نام دارد، جفت‌های در هم تنیده‌ای از فوتون‌های مایکروویو (فوتون‌های کم انرژی) را تولید کردند. سپس توسط یک فرستنده ،اولین فوتون یا همان فوتون سیگنال را به سمت شیء مورد نظر فرستادند و بازتاب آن را مورد بررسی قرار دادند. در قدم بعدی فوتون دوم یا همان فوتون ساکن را با بازتاب فوتون اول تداخل داده تا مسافتی که فوتون سیگنال طی می‌کند مشخص شود و به این ترتیب مکان شیء مذکور را شناسایی نمودند .چنین روشی به تیم تحقیق اجازه داد تا با استفاده از تعداد اندکی فوتون، اشیا درون یک اتاق کوچک را شناسایی کند. از آنجایی که رادارهای متداول برای عملکردشان نیاز به ساطع کردن امواج الکترومغناطیسی رادیویی قدرتمندی دارند، با چند فوتون نمی‌توان چنین کاری را انجام داد.علاوه بر برآورده کردن الزامات انتشار کم امواج، رادارهای کوانتومی از مزیت پنهان**

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

شدن در امواج مایکروویو یک محیط کوچک هم بهره می‌برند که همین مسأله کار شناسایی و ردگیری آن‌ها را سخت‌تر می‌کند.با توجه به ذات غیر تهاجمی این ابزار، تیم تحقیق به دنبال پتانسیل عملی رادار کوانتومی در کاربردهای پزشکی و امنیتی هستند این فن آوری به خاطر ماهیت غیر تهاجمی و بی‌ضرری که دارد می‌تواند در کاربردهای پزشکی از جمله عکس‌برداری بافت‌های انسان و یا اسپکتروسکوپی غیر مخرب پروتئین‌ها مورد استفاده قرار بگیرد.چنین سامانه ها و سیستم های راداری در صورت توسعه آنها در ابعاد و فضای گسترده ، با ساطع کردن امواج الکترومغناطیسی رادیویی قدرتمندو همچنین وضوح و دقت بسیار بالا در کاربردهای نظامی می تواند ماهیت جنگ های آینده را تغییر دهند (قوام ملکی،1390). نتیجه این پیشرفت راداری و ساخت رادارهای کوانتومی است که یک سیستم شناسایی با وضوح بالا بوده و جزییات تصویری بسیار بیشتر و بهتری از هدف را فراهم ساخته و همزمان خود دور از چشم باقی می ماند و قابل رهگیری توسط سامانه های شنود و جمع آوری اطلاعات نمی باشد. رادار کوانتومی به ویژه در کاربرد های نظامی می تواند جزییات کاملتر و دقیق تری را برای شناسایی هواپیماها، موشک ها و دیگر اهداف هوایی با مدل خاص در اختیار استفاده کنندگان قرار دهد. همان طور که ذکر گردید محققان موسسه علم و تکنولوژی اتریش از امواج مایکروویو در هم تنیده شده برای خلق اولین سیستم راداری کوانتومی بر اساس اصل شناخته شده در هم تنیدگی کوانتومی ، که بیانگر این موضوع است که دو ذره می توانند بدون در نظر گرفتن فاصله شان از هم نیز با یکدیگر مرتبط شوند. وقتی که اتفاقی برای یک ذره می افتد این اتفاق در دیگر ذرات نیز حس خواهد شد و بدین ترتیب پدیده ای شکل می گیرد که محققان از آن با عنوان جفت در هم تنیده کوانتومی یاد می کنند. ادامه این پدیده به فرآیندی به نام پرتوافکنی کوانتومی منتهی می شود، جایی که اطلاعات در مورد محیط یک ذره را می توان با مطالعه دیگر ذرات درک کرد .رادارهای کوانتومی با جفت سازی ذرات فوتونی، پرتاب یکی به سمت هدف و همزمان در بند نگه داشتن دیگری برای مطالعه بیشتر کار می کنند. ذره ای که به سمت هدف پرتاب شده در برخورد با یک شیء ، در بازگشت به شکلی خاص عمل می کند، رفتاری که می توان آن را در ذره زندانی شده مشاهده کرد .نتیجه این امر نیز اطلاعات پرجزییات بسیار بیشتری در مورد هدف نسبت به چیزی است که در رادارهای متداول امروزی دیده می شود. رادارهای امروزی می توانند اهداف را خیلی خوب شناسایی کنند اما جزییات بسیار کمی در مورد ماهیت و کیفیت آن ها دارند. این رادارها پس از شناسایی یک شیء خاص، ارتفاع، مختصات و فاصله آن را خواهند گفت اما آن شیء از دیدگاه رادارهای امروزی تنها یک لکه بزرگ و بدون شکل است. سیستم های دفاع هوایی به عنوان ابزار های اقدام گر در سامانه فرماندهی و کنترل پدافند هوایی برای تشخیص اینکه آیا این لکه یک جنگنده، بمب افکن یا حتی هواپیمای مسافربری است باید به دیگر ابزارها مانند چنین رادارهای شناسایی کننده پیشرفته و دیگر سیگنال های الکترومغناطیسی ایجاد شده توسط هدف متوسل شوند. رادار کوانتومی اما می تواند جزییات کافی را برای سیستم های راداری به منظور شناسایی آن شیء بر اساس شاخصه های فیزیکی اش فراهم کند تا بتواند اطلاعات دقیق و کامل‌تری در مورد تهدیدات هوایی جهت تصمیم گیری مناسب و سریع و اقدام متناسب با تهدیدات متنوع و پیچیده به شبکه فرماندهی و کنترل ارائه دهد. برای مثال یک جنگنده سوخوی- ۳۵را می توان با این رادار و با توجه به شیب بالها، شکل دماغه و تعداد موتورهایش از دیگر پرنده های نظامی متمایز ساخت. دیگر مزیت رادار کوانتومی این است که این رادارها مقدار بسیار کمی انرژی از خود ساطع کرده و به همین دلیل شناسایی آن ها برای دشمن دشوارتر است. تمامی رادارهای امروزی از خود اشعه های الکترومغناطیسی ساطع می کنند تا بتوانند اشیاء را شناسایی نمایند. این اشعه ها در حالی که خود قابل شناسایی هستند، رادارها را نیز در معرض شناسایی شدن قرار

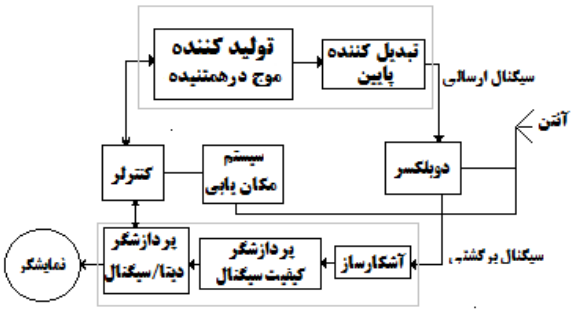
فصلنامهٔ علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال پنجم، شمارهٔ دو، تابستان 1400

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

می دهند. چنین چیزی مانند این است که تعداد افراد زیادی در یک اتاق تاریک چراغ قوه دست گرفته اند: روشن کردن چراغ قوه باعث می شود که دیگران را پیدا کنید اما امواج چراغ قوه به خود شما باز می گردند و حضور و مکان شما را نیز برای دیگران مشخص می سازند. غیرقابل شناسایی بودن یک برتری تاکتیکی متفاوت را در جنگ ها ایجاد می کند. یک رادار کوانتومی می تواند پرواز هواپیمای دشمن را بدون نشان دادن حضور و موقعیت خود شناسایی کند. این موضوع می تواند باعث شود که هواپیماهای دشمن سیستم های دفاعی اختلال در رادارهای محلی و امواج رادیویی که خود برای دفاع کنندگان قابل شناسایی هستند را نیز کنار بگذارند. با کنار گذاشتن این سپر دفاعی، این هواپیماها که اکنون به نحوی خلع سلاح شده اند ممکن است مورد شبیخون موشک های سیستم های دفاع هوایی یا هواپیماهایی قرار بگیرند که انتظار آنان را می کشند. رادارهای کوانتومی به عنوان ابزار شناسایی هواپیماهای پنهانکار شناخته می شوند که این موضوع باعث می شود تلاش ها برای غیرقابل شناسایی کردن هواپیماهای برای رادارها بی اثر شود. با این وجود، کارشناسان بر این باورند که ادعای قابلیت ضد پنهانکاری این رادارها تنها یک ساده انگاری ناشیانه بوده و مزیت اصلی این سیستم های راداری کوانتومی جنبه شفافیت و کیفیت بصری جزییات ارائه شده توسط آن است. و یکی دیگر از مزایایی با اهمیت رادار های که از این فن آوری کوانتومی بهره می برند، را می توان به خاطر ماهیت غیر تهاجمی و بی‌ضرری ، عدم تاثیر سوء و مخرب بروی سلامت کاربران و اپراتور های این سامانه های راداری برخلاف رادار های کلاسیکی را دانست. که این مزیت از نظر بهداشت و سلامت حرفه ای بسیار با اهمیت جلوه می نماید. در ادامه می خواهیم یک طرح کلی از رادار کوانتومی که در بالا معرفی نموده ایم با کاربرد های متنوع ، بویژه استفاده نظامی جهت افزایش بهره‌وری سامانه های فرماندهی و کنترل در راستای کشف ، شناسایی ، ردگیری و سنجش از راه دور اطلاعات در ابعاد و فضای گسترده با ساطع کردن امواج الکترومغناطیسی رادیویی قدرتمند را پیشنهاد کنیم. به کمک این دستگاه پیشنهادی می توان یک آرایش درهم تنیدگی کوانتومی را که قبلا برای فوتون های مرئی به کار می رفت، برای طیف امواج مایکروویو گسترش داده و محقق ساخت. این امر می تواند کارایی رادارهای رایج و متداول را بالا ببرد ، میتوان از اثرات مکانیک کوانتومی برای بهبود حساسیت فناوری مایکروویو از جمله رادار ها استفاده کرد می توان مفهوم "پرتوافکنی کوانتومی" که پیش تر به آن اشاره شد ، را توصیف کرد. با بسط وگسترش این مفهوم از طول موج های مرئی به طیف امواج ماکروویو، می توان آشکارسازی هدف های کم بازتاب در یک پس زمینه ی نویزی را امکان پذیر ساخت. ساختار شماتیک یک رادار کوانتومی مطابق تصویر(1)، می باشد که مهم ترین بخش و وجه تمایز عمده آن با انواع رادارهای کلاسیک در بخش فرستنده ، مدار درهمتنیدگی کوانتومی تولید کننده شکل موج حفره اتمی است که منجر به پدیده پرتو افکنی کوانتومی می شود و در قسمت گیرنده این رادار، مدارکوانتومی مربوط به بخش پردازش و محاسبات اطلاعات کوانتومی می باشد.که در ادامه مطلب به تشریح این حسگرهای کوانتومی و برتری های آن نسبت به انواع کلاسیک آن می پردازیم.

تصویر(1) : ساختار رادار کوانتومی

ارتقای بهره وری سامانه های فرماندهی و کنترل در حوزه کشف، جمع آوری و سنجش اطلاعات با اثرات کوانتومی:



[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

با طراحی و پیشنهاد یک سامانه حسگر کوانتومی و ایجاد یک آرایش درهم تنیدگی کوانتومی ،که تا کنون به طور تنها برای فوتون های مرئی به کار رفته است، می توان برای دامنه گسترده ی از طیف الکترومغناطیس و به ویژه دامنه فرکانسی امواج مایکروویو، در راستای پیش یابی و طراحی سامانه های جمع آوری و سنجش اطلاعات کوانتومی به ویژه رادار کوانتومی به عنوان یکی از ابزار های مطمعن و قابل اعتماد در سامانه های قرماندهی و کنترل پیشرفته در جهت کشف و جمع آوری اطلاعات پیشنهاد داد. بکارگیری اثرات مکانیک کوانتومی باعث بهبود دقت و حساسیت فناوری مایکروویو در رادار ها می شود و کارایی این رادار ها را نسبت به رادارهای رایج که از این فن آوری استفاده نمی نمایند، به طور فزاینده ای بالا می برد. بسط و گسترش اثر و مفهوم پرتوافکنی کوانتومی از طیف اپتیکی و مرئی به طیف امواج ماکروویو، کشف وآشکارسازی اهدافی با سطح مقطع راداری بسیار محدود و کم بازتاب با حداقل نشت سیگنالی مانند ریز پرنده ها ، پرنده های رادار گریز و پنهان کار، تحت شرایط شدید نویزمحیطی و حتی ایجاد نویز و پارازیت عمدی با تکنیک های جنگ و الکترونیک در ابعاد مکانی وسیع و فضای گسترده را امکان پذیر خواهد نمود.

فن آوری حسگر های کوانتومی در رادارهای کوانتومی

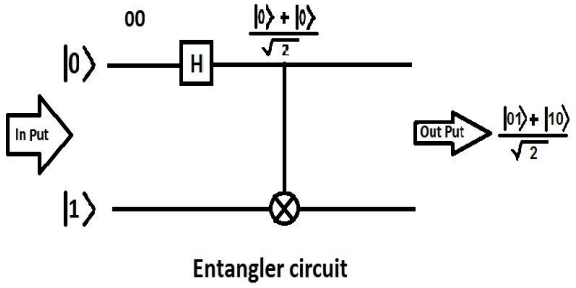
فن آوری و تکنولوژی ساختار حسگر های جمع آوری و سنجش از راه دور اطلاعات کوانتومی به ویژه در رادارهای کوانتومی را می توان در سه گروه اصلی دسته بندی نمود (Harris,2009) .**دسته اول** : حسگر کوانتومی با تکنولوژی فوتون مجزا می باشند ، در این روش فرستنده حسگر کوانتومی حالت های مجزا و کوانتومی اپتیکی با فوتون های غیر درهمتنیده را به فضا ارسال می کند. که اینگونه حسگر ها را می توان به عنوان یک رادار کوانتومی تک فوتونی در نظر گرفت که مشابه رادار کلاسیک متداول کار می کنند. به نحوی که در فرستنده رادار کوانتومی، پالس بدون تشکیل شکل موج فوتونی در هم تنیده بصورت تک فوتون مجزا و کوانتومی در فضا ارسال می شود و پس از برخورد به هدف همان تک فوتون کوانتومی توسط هدف بازتاب می شود و توسط گیرنده رادار پردازش و آشکار سازی می گردد. مزیت اصلی این دسته از رادارهای کوانتومی که ساده ترین فن آوری حسگر های کوانتومی می باشد نسبت به رادارهای کلاسیک را می توان قابلیت کشف اهداف با سطح مقطع راداری بسیار کم نسبت به رادارهای کلاسیک دانست (S.Barzanjeh,2015). **دسته دوم**: در این نوع فن آوری حسگرهای کوانتومی توسط فرستنده رادار همان حالتهای کلاسیکی امواج ارسال می گردد با این تفاوت نسبت به انواع کلاسیکی که جهت افزایش عملکرد و بهره وری از سنسور های اپتیکی کوانتومی استفاده می گردد. مزیت اصلی این دسته از رادارهای کوانتومی نسبت به رادار کلاسیکی را می توان امکان آشکار سازی اطلاعات کامل و دقیق تری با جزئیات بیشتر از هدف در طول موج های کوچکتر را دانست (A.D. McAula,,2011) .**دسته سوم**: حسگر کوانتومی با فن آوری فوتون های در همتنیده می باشد، که در این دسته از حسگرهای کوانتومی بخشی از سیگنال حالت های اپتیکی کوانتومی درهمتنیده در فضا ارسال شده و بخشی از این حالت های اپتیکی کوانتومی درهمتنیده در حسگر نگاه داشته می شود، که مبحث اصلی این مقاله می باشد که بر مبنای این فن آوری نوین اطلاعات کوانتومی و بر پایه مفاهیم در همتنیدگی که موجب پرتوافکنی به روش کوانتومی می شود می توان بهره وری سامانه های جمع آوری اطلاعات را به طور خیره کننده ای افزایش داد. قبل از تشریح فن آوری این نوع سامانه های جمع آوری اطلاعات که در آینده می تواند انقلابی در طراحی این سامانه ها که دارای ابعاد فیزیکی و سخت افزاری بسیار کوچک و با دقت وکارایی فوق العاده بالاتری از انواع کلاسیک و رایج خود ایجاد می نمایند و هر کشوری که بتواند این تکنولوژی نوین که در

فصلنامهٔ علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال پنجم، شمارهٔ دو، تابستان 1400

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

دنیا پیشرفته امروز هنوز در مرحله نظری و آزمایشگاهی می باشد، را در ابعاد تجربی و صنعتی ارتقاء دهد ،به طور یقین می تواند معادلات جهانی و توازن قوا را به ویژه در زمینه نظامی و امنیتی را تغییر و برتری و قدرت بازدارندگی خود را در این زمینه بر دیگران دیکته نماید به طور ویژه در کاربرد های نظامی استفاده از این فن آوریی به عنوان ابزاری مدرن در یک سامانه فرماندهی کنترل پیشرفته می تواند عامل برتری سازی در مدیریت صحنه نبرد با ارائه اطلاعات دقیق تر در بستر ارتباطی با امنیت بالا برای تصمیم گیری مطمعن تر در مقابله با تهدیدات پیچیده و متنوع دشمن را برای فرماندهان صحنه نبرد فراهم نماید. ضروری است که مختصری در خصوص مفهوم در همتنیدگی کوانتومی که مبنا این فن آوری که منجر به پرتو افکنی در رادار های کوانتومی می باشد توضیح داده شود CWS) (Chang,2019، در تعریف مفهوم در همتنیدگی کوانتومی می توان گفت ، اگر دو یا چند سیستم کوانتومی داشته باشیم که یکی از خصوصیات فیزیکی آنها به گونه ای باشد که اندازه گیری آن کمیت فیزیکی برای یکی از سیستم ها ، نتیجه اندازه گیری همان کمیت را برای دیگر سیستم ها تحت تاثیر قرار دهد، می گوییم این دو یا چند سیستم باهم در همتنیده می باشند.

تصویر(2)، نشان دهنده یک مدار کوانتومی در همتنیدگی می باشد که متشکل از یک مدار Hadamard و Control-Not می باشد که ورودی مدار بیت های کوانتومی مجزا و خروجی مدار حالت های درهمتنیده است. که این دقیقا همان مداری است که با اضافه کردن به فرستنده یک رادار عادی به عنوان مدار کوانتومی می توان فوتون های مجزا ورودی را در خروجی درهمتنیده و ارسال نمود.



تصویر(2) مدار کوانتومی درهمتنیدگی

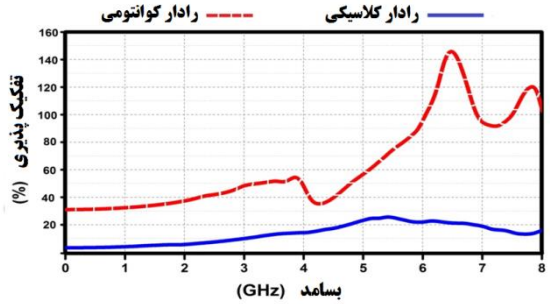
بسته سیگنالی ارسالی می تواند با استفاده از روش درهمتنیدگی فوتون ها قابلیت کشف با دقت بسیار بالا را فراهم سازد . این سامانه ها بر پایه ترازهای کوانتومی اپتیکی که در یک برهمنهی مثبت درهمتنیده شده اند، طراحی می شوند . با این روش نیمی از بسته سیگنالی درهمتنیده ترازها در این رادارها به سمت هدف پرتاب می شوند و بقیه بسته سیگنالی درهمتنیده در داخل رادار باقی می مانند. سیستم آشکارساز سیگنال به این صورت عمل می کند که بسته سیگنالی بازگشتی از هدف را با سیگنال ها باقی مانده در داخل رادار که باهم درهمتنیده می باشند در یک مدارکوانتومی طراحی شده در گیرنده رادار مقایسه می نماید و به وسیله ثبت تغییرات قادر به پردازش و استخراج اطلاعات با جزییات بسیار بالا و همچنین کشف اهداف پنهانکار و تعیین هویت اهداف می گردد . علاوه بر دقت رادارهای کوانتومی که نسبت آن در حدود توان چهارم دقت رادارهای کلاسیک امروزی است ، در صورتی که از رادارهای کوانتومی استفاده شود ، قابلیت کشف نیز افزایش می یابد.

تجزیه و تحلیل یافته های پژوهش

نمودار تصویر(3)، عملکرد دقت پرتو افکنی کوانتومی در حسگر های کوانتومی در رادار های کوانتومی را با رادار های متداول

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

را در بخشی از امواج ماکروویو (8- 2 گیگا هرتز) از طیف امواج الکترومغناطیس، تقریبا در محدوده باند ایکس، را مقایسه گردیده است. که بیانگر افزایش چشمگیر دقت تفکیک پذیری نسبت به دقت رادارهای معمولی می باشد. تصویر(3)، به وضوح مشخص می کند که با بهره برداری و بکارگیری فن آوری کوانتومی می توان کارایی سامانه های جمع آوری اطلاعات و سنجش از راه دور به ویژه در رادارهای کوانتومی بالاخص در محدوده باند ایکس از طیف امواج ماکروویو ، را ارتقاء داد.



تصویر(3) مقایسه قدرت و دقت تفکیک پذیری رادار کوانتومی وکلاسیکی

همان طور که از تجزیه و تحلیل تصویر(3)، نمایان است عملکرد دقت و تفکیک پذیری اهداف و استخراج اطلاعات به ویژه در فرکانس های بالای (طول موج های کوچکتر) طیف امواج ماکرویو در فن آوری پیشنهادی پرتو افکنی کوانتومی حسگر های کوانتومی در رادار های کوانتومی به طور چشمگیری نسبت به رادار های معمولی افزایش دارد.

در ادامه دو روش عملکرد پرتو افکنی کوانتومی در حسگر های کوانتومی در رادار های کوانتومی زمانی که فوتون های سیگنالی غیر در همتنیده و در همتنیده هستند، آنالیز و مقایسه می کنیم.

فوتون های غیر در همتنیده

در این بخش احتمال ردیابی هدف را دو حالت ممکن برای رادار های کوانتومی با فن آوری حسگر های با فوتون مجزا را بررسی و تج ،: حالت اول هدف داخل برد نیست ،و حالت دوم هدف درون برد حسگر ی باشد و این احتمال وجود دارد که قادر به ردیابی آن باشد،جهت آنالیز عملکرد پرتو افکنی کوانتومی نیاز به محاسبه احتمالات برای این رویدادها داریم

حالت (1) هدف داخل برد نباشد: در این حالت سیگنال فوتون از بین می رود و تنها فوتون های نویز محیطی توسط سیستم ردیابی می شود که می شود آن را به این صورت توصیف کرد:

(1)

$$\rho_1 = \underbrace{\rho_b \otimes \rho_b \otimes \ldots . \rho_b}_{d \to steates}$$

که در آن ρ_1 چگالی فوتون و b تعداد فوتون در تعداد حالات d می باشد که می توان ρ_1 را به شکل زیر برای حالت k بازنویسی کرد:

(2)

$$\rho_1 = \bigotimes_{k=1}^{d} \rho_b^{(k)}$$

که در آن

(3)

$$\rho_b^{(k)} = |k\rangle\langle k|$$

عملکرد ρ_b چگالی یک فوتون نویز مستقر در حالت k می باشد. از آنجایی که متوسط تعداد فوتون ها به ازای هر بازتاب ردیابی شده کوچک است ($db<<1$) می توان ρ_1 به صورت زیر تخمین زد:

فصلنامهٔ علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال پنجم، شمارهٔ دو، تابستان 1400

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

(4)

$$\rho_1 = (1-db)|0\rangle\langle 0| + b\sum_{k=1}^{d}|k\rangle\langle k|$$

که در آن $|k\rangle$ حالت فوتون منفرد در وضعیت k می باشد و $|0\rangle$ نشان دهنده حالت خلاء می باشد. احتمال(1-db) نشان دهنده این است که نمی توانیم این سیگنال را اندازه گیری کنیم و احتمال b نشان دهنده این است که می توان یک فوتون نویز را از میان فوتون های نویز ممکن محاسبه کرد. بنابراین معادله تخمینی مادامی که در پایین ترین رده b بمانیم صحیح است.

حالت (2) هدف داخل برد باشد : در این حالت هدف درون برد سیستم پرتو افکنی کوانتومی می باشد، آنگاه یک احتمال η وجود دارد که سیگنال فوتون برگشتی از هدف را محاسبه کرد. ρ_1 نیز از معادله (4) محاسبه می شود و در نتیجه چگالی کل ρ_2 به شکل زیر است:

(5)

$$\rho_2 \approx (1-\eta)\rho_1 + \eta\rho$$

احتمال ردیابی مثبت هدف (NTR+) به شکل زیر می باشد:

(6)

$$p(+|NTR) = b$$

و به طور مشابه احتمال ردیابی منفی (NTR-) به شکل زیر است:

(7)

$$p(-|NTR) = 1-b$$

پس می توان به طور خلاصه در خصوص فن آوری پرتو افکنی با فوتون های غیر در همتنیده این گونه بیان نمود:

حالت (1) هدف داخل برد نباشد: در این حالت سیگنال فوتون از بین می رود و تنها فوتون های نویز محیطی توسط سیستم ردیابی می شود ،با توجه به عملکرد چگالی یک فوتون نویز، از آنجایی که متوسط تعداد فوتون ها به ازای هر بازتاب ردیابی شده، مقدار بسیارکوچکی می باشد (db<<1) ، می توان تخمین زد که احتمال ردیابی مسیر در این شرایط بسیار پایین می باشد و نشان دهنده این است که نمی توانیم این سیگنال را اندازه گیری کنیم .

حالت (2) هدف داخل برد باشد : در این حالت هدف درون برد سیستم پرتو افکنی کوانتومی می باشد، آنگاه یک احتمال مطابق فرمول (5)، وجود دارد که سیگنال فوتون برگشتی از هدف را محاسبه کرد. و در نتیجه هدف را ردیابی نمود.

فوتون های در همتنیده

در پرتو افکنی با استفاده از فوتون های در همتنیده نیاز به تولید سیگنال فوتون در همتنیده می باشد که ابتدا نیاز به تعریف و بیان ریاضی تابع حالت دو سیستم فوتونی در همتنیده بر مبنای مدار درهمتنیدگی در تصویر (2)، می باشد. که بیان ریاضی این درهمتنیده شامل تمام مد های ممکن در همتنیدگی در درجات آزادی لحظه ای، حالت فوتون های در همتنیده ارسالی و حالت فوتون های در همتنیده نگه داشته شده می باشد.تابع حالت دو سیستم فوتونی در همتنیده به شکل زیر تعریف می شود:

(8)

$$|\Psi\rangle^{(e)} = \frac{1}{\sqrt{d}}\sum_{k=1}^{d}|k\rangle_S|k\rangle_A$$

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

که در آن d بیانگر تمام مد های ممکن در همتنیدگی در درجات آزادی لحظه ای است. و $|k\rangle_S$ حالت فوتون های در همتنیده ارسالی و $|k\rangle_A$ حالت فوتون های در همتنیده نگه داشته شده است،

برای بررسی در هم تنیدگی که حالت جفت فوتون در همتنیده را تشکیل می دهند ماتریس چگالی اسپین – فضایی دو ذره فرمیونی را در کوانتش دوم معرفی می کنیم .

(9)

$$\rho^{(2)}(x_1,x_2;x_1',x_2') = -\frac{1}{2}G(x_1t_1,x_2t_2;x_1't_1^+,x_2't_2^+)$$

که در آن تابع گرین دو ذره ای برای حالت جفت فوتون در همتنیده به صورت زیر به تابع گرین تک ذره ای مرتبط می شود [4,5]

(10)

$$G(1,2;1',2') = G(1,1')G(2,2') - G(1,2')G(2,1') - F(1,2)F^+(1',2').$$

تعاریف زیر نیز برای تابع گرین وجود دارد

(11)

$$G(1,1') = -i\left\langle T[\psi_H(x_1t_1)\psi_H^+(x_1't_1')]\right\rangle = \delta_{s_1s_1'}G(r_1t_1,r_1't_1')$$

با استفاده از معادله های (5) ، (6) و (7) ماتریس چگالی اسپین فضایی دوذره ای در معادله (2) را می توان به این شکل نوشت :

$$\rho^{(2)}_{s_1s_2,s_1's_2'}(r_1,r_2,r_1',r_2') = \frac{1}{2}\left[\delta_{s_1s_2}\delta_{s_1's_2'}G(r_1-r_1')G(r_2-r_2') - \delta_{s_1s_2'}\delta_{s_2s_1'}G(r_1-r_2')G(r_2-r_1')\right]$$

ماتریس چگالی مرتبط با حالت در همتنیده به صورت زیر است:

اگر $r_1 = r', r_2 = r_2'$ باشدوباتعریف $g(r) = \frac{G(r)}{G(0)} = 2iG(r)/n$ می توان نوشت:

$$\rho^{(2)}(r) = \frac{n^2N}{8}\rho_{12}$$

که n چگالی الکترون $\left(n = \frac{N}{V}\right)$ می باشد که می تواند توسط $iG(0) = \frac{n}{2}$ بدست آید . در نتیجه

$$\rho_{12} = \frac{1}{N}\begin{bmatrix} 1-g^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -g^2 & 0 \\ 0 & -g^2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-g^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

فاکتور بهنجارش N که با اعمال آن رد ماتریس چگالی یک می شود $(Tr(\rho_{12})=1)$، برابر است با : $N = 4-2g^2$

با در نظر گرفتن یک حالت وارنری، وجود یا عدم وجود در هم تنیدگی را در این حالت با تعریف پارامتر p مشخص می گردد [6,7]. که $(0 \le p \le 1)$. بنابر این ρ_{12} به شکل زیر می باشد:

$$\rho_{12} = (1-p)\frac{I}{4} + p\left|\psi^{(-)}\right\rangle\left\langle\psi^{(-)}\right| \quad (13)$$

که I یک ماتریس یکانی 4×4 می باشد . و

پارامتر در همتنیدگی p برحسب تابع g بدست می آید .

$$p = \frac{g^2}{2-g^2} \quad (14)$$

فصلنامهٔ علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال پنجم ، شمارهٔ دو، تابستان 1400

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

(9)

$$\rho^e = |\Psi\rangle^{(e)(e)}\langle\Psi|$$

همان طور که در مورد فوتون های غیر در همتنیده داشتیم حالت (1) وقتی هدف داخل برد نباشد چگالی فوتون در همتنیده به شکل زیر می باشد:

(10)

$$\rho_1^e \approx \rho_1 \otimes \frac{I_A}{d}$$

که در آن I_A تانسور عملگر فوتون های در همتنیده نگه داشته شده است.

و در مورد حالت (2) وقتی هدف داخل برد باشد چگالی فوتون در همتنیده به شکل زیر می باشد:

(11)

$$\rho_2^e = (1-\eta)\rho_1^e + \eta\rho^e$$

احتمال ردیابی مثبت هدف (NTR+) از ρ_1^e به عنوان چگالی در همتنیدگی خارج از برد و ρ_2^e به عنوان چگالی در همتنیدگی داخل برد به صورت زیر محاسبه می شود:

(12)

$$p_e(+|NTR) = \frac{b}{d}$$

و به طور مشابه احتمال ردیابی منفی (NTR-) به شکل زیر است:

(13)

$$p_e(-|NTR) = 1-\frac{b}{d}$$

این دو معادله به وضوح اثر در همتنیدگی فوتون ها را نشان می دهند زیرا برای فوتون های غیر در همتنیده یکسان هستند اما ایجاد جایگزینی می کنند:

$$b \to \frac{b}{d} \qquad (14)$$

به عبارت دیگر نویز b به طور کارآمد توسط فاکتور d کاهش می یابد. و احتمال ردیابی مثبت هدف $(+TR)$ و ردیابی منفی هدف $(-TR)$ وقتی هدف داخل برد باشد به صورت زیر می باشد:

(15)

$$p_e(-|TR) = \left(1-\frac{b}{d}\right)(1-\eta)$$

(16)

$$p_e(+|TR) = \frac{b}{d}(1-\eta)+\eta$$

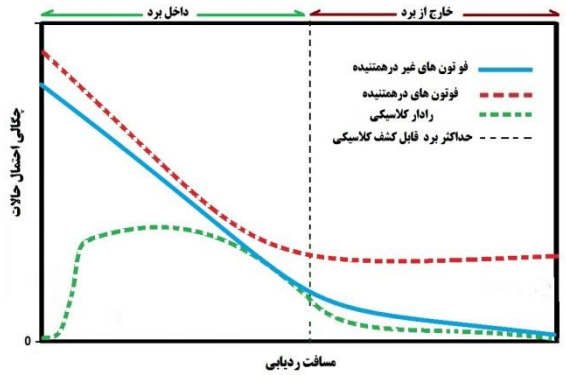
با مقایسه حالت های در همتنیده و غیر در همتنیده می توان استنباط کرد که استفاده از وضعیت های درهمتنیده از طریق یک فاکتور d نسبت سیگنال به نویز را افزایش می دهد، که تاثیر آن بر تعداد فوتون های لازم برای تعیین حضور یا عدم حضور یک هدف در ناحیه ای مشخص در فضا می باشد.

به طور خلاصه در خصوص فن آوری پرتو افکنی با فوتون های در همتنیده این گونه بیان نمود که طبق ماتریس چگالی حالات مرتبط با حالت در همتنیده ، همان طور که در مورد فوتون های غیر در همتنیده داشتیم حالت اول وقتی هدف داخل

فصلنامهٔ علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال پنجم ، شمارهٔ دو، تابستان 1400

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

برد نباشد طبق محاسبات کوانتومی چگالی فوتون در همتنیده احتمال ردیابی اهداف در خارج برد به دلیل وجود فوتون های در همتنیده نگه داشته شده صفر نمی شود و احتمال کشف و ردیابی اهداف را برخلاف فوتون های غیر در همتنیده در این حالت را امکان پذیر می سازد.که در مورد حالت دوم وقتی هدف داخل برد باشد با توجه به محاسبات احتمال کشف مطابق نمودار تصویر(4) و ردیابی اهداف از چگالی فوتون های در همتنیده با درصد بسیار بالاتری از احتمال ردیابی اهداف در داخل برد برای حالت فوتون های غیر در همتنیده بدست می آید وضوح اثر در همتنیدگی فوتون ها را در افزایش و ارتقاء ، احتمال و ردیابی اهداف در رادار های کوانتومی را نشان می دهد. که در نمودار تصویر(4)، چگالی احتمال کشف و ردیابی اهداف با فن آوری های فوتون های در همتنیده و غیر در همتنیده در دو حالت (برد منفی و مثبت) و بیان و مقایسه گردیده است:



تصویر(4) مقایسه چگالی احتمال ردیابی اهداف در رادار های کوانتومی با فوتون های در همتنیده و غیر در همتنیده

بعلاوه ،این مطلب نیز قابل ذکر می باشد که با مقایسه حالت های فوتون های در همتنیده و غیر در همتنیده می توان استنباط کرد که استفاده از وضعیت فوتون های درهمتنیده در رادارهای کوانتومی مقدار فاکتور نسبت سیگنال به نویز را نسبت حالت فوتون های غیر در همتنیده افزایش می دهد، که تاثیر آن بر تعداد فوتون های لازم برای تعیین حضور یا عدم حضور یک هدف در ناحیه ای مشخص در فضا می باشد. و به عبارت ساده تر کارایی و بهره وری رادار های کوانتومی را در کشف و تشخیص اهداف، افزایش چشمگیری می دهد. و نکته مهم و با اهمیت که با توجه به نمودار تصویر(4)، باید به آن اشاره کرد، احتمال کشف، جمع آوری اطلاعات و سنجش از راه دور در خارج از برد در رادار های کوانتومی می باشد که در رادار های کلاسیک وجود ندارد که به عنوان مزیت برجسته استفاده از فن آوری پرتو افکنی کوانتومی می باشد. که کشف، جمع آوری اطلاعات و سنجش از راه دور را به عنوان یکی از فاکتور های اصلی در ساختار سامانه های فرماندهی و کنترل به ویژه حوزه پدافند هوایی را به نوعی مستقل از فاصله اهداف می کند که در صورت عملی نمودن این مزیت کوانتومی می توان انقلابی در این حوزه کشف، جمع آوری اطلاعات و سنجش از راه دور در جهت ارتقاء سامانه های فرماندهی و کنترل برداشت.

نتیجه گیری و پیشنهادات

به طور خلاصه ، با ذکر این نکته که در دنیای امروز با توجه به پیشرفت روز افزون دانش و دشوار شدن دستیابی به اطلاعات به علت الگوریتم های پیچیده رمز نگاری ، کاهش نشت سیگنالی و تکنولوژی پیشرفته ریز پرنده ها و پرنده های پنهانکار.داشتن قدرت دستیابی به اطلاعات دقیق وکامل از راه دور بدون صرف هزینه های هنگفت جهت بهره برداری از این اطلاعات در تصمیم گیری های مناسب و متناسب در رویارویی با تهدیدات نوین در شبکه یکپارچه فرماندهی و کنترل، توسط حسگر های کوانتومی به ویژه در رادار های کوانتومی ضروری به نظر می رسد. هدف این مقاله پس از معرفی و بررسی این فن آوری، بیان قابلیت این فن آوری به طور نمونه در ارتقاء چشمگیر عملکرد و بهره وری رادارها و سامانه های سیگنالی جمع آوری اطلاعات توام با عدم نشت اطلاعات سیگنالی با یک بستر امن به عنوان یکی از فاکتور های ضروری ارتقاء سامانه های فرماندهی و کنترل به ویژه در حوزه پدافند هوایی و تهدیدات

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

نوین هوا پایه می باشد. تجزیه و تحلیل انجام شده در این پژوهش با استفاده از فن آوری پیشنهادی پرتو افکنی کوانتومی بیاتگر قابلیت کشف و تفکیک پذیری بسیار بالای اهداف در رادار های کوانتومی نسبت به رادار های معمولی و کلاسیکی می باشد.و بررسی و تجزیه تحلیل نموداری و پروتکل ها کوانتومی از قبیل استفاده از حالت های فوتون های در همتنیده و غیر در همتنیده درمقایسه با روش ها و سامانه ها کلاسیکی موید این امر می باشد. بیان مقایسه های تخصصی این فناوری جدید اطلاعات کوانتومی با تکنولوژی های متداول کنونی، می تواند جنبه های نوین دانش را با توجه به پتانسیل های علمی موجود در کشور عزیزمان، در راستای معرفی و سرمایه گذاری این فناوری به عنوان یک راهبرد در حوزه های مختلف بالاخص جنبه های دفاعی و امنیتی با دستیابی عملی و بکارگیری فن آوری رادار های کوانتومی یه عنوان یک ویژگی و عامل برتر ساز در راستای ارتقاء ابزارهای جمع آوری اطلاعات سیگنالی در سامانه های فرماندهی و کنترل پیشرفته مطرح نمود . و خود را جزء طلایه داران وپیشگامان این فن آوری نوین در زمینه های نظری و تجربی در سطح جهان معرفی نماییم. ان شاا...

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]

مراجع (References)

-فرجی راد، عبدالرضا، صوفی، اصغر (1398)، تحولات استراتژیک، تکنولوژی اطلاعاتی و انقلاب در امور نظامی آمریکا، www.sid.ir

-قوام ملکی، حمیدرضا (1390)، تقش موشک ها در راهبرد بازدارندگی ج.ا.ا، فصلنامه ره نامه سیاستگذاری، شماره سوم، سال دوم.

-البرزنیا، حمید رضا، (1388)، *اطلاعات کوانتومی و درهم تنیدگی کوانتومی در سیستم های هم بسته قوی الکترونی* ،

پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.

-البرزنیا، حمید رضا . (1398). *بررسی خواص اپتیکی و الکترونیکی نانوساختارهای آلتروپ های کربن به روش تابع چگالی*، پایان نامه رساله دکتری ، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه.

-M.A.Nielsen and I.L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press,(2000).

-Bennett, C.H., Brassard, G., Crepeau, C., Jozsa, R., Peres, A., and Wootters, W.K., Phys. Rev. Lett. **70,** 1895 (1987).

-Bouwmeester, D., Pan J.W., Mattle, K., Eibl, M., Weinfurter, H., and Zeilinger, A., Nature **390,** 575 (1997).

- Boschi, C.H., Branca, S., DeMartini, F., Hardy, L., and Popescu, S., Phys. Rev. Lett. **80,** 1121 (1998).

-Vedral, V., Plenio, M.B., invited review to appear in Prog. Quant. Electe. (1998).

-Huelga, S.F., Macchiavello, C., Pellizzari, T., Ekert, A.K., Plenio, M.B., and Cirac, J.I., Phys. Rev. Lett. 79, 3865 (1997).

-Bose, S., Vedral, V., and Knight, P. L., Phys. Rev. A 57, 822 (1998).

-DG England, B Balaji, BJ Sussman Physical Review A 99 (2), 023828 (2019)

-M.L. Skolnik, *Radar Handbook*, Third Edition, McGraw Hill, (2008).

-Harris,*Quantum SensorsProgram*,FinalTechnical Report,AFRL-RI-RS-TR-2009-208,(2009).

-S Barzanjeh, S Guha, C Weedbrook, D Vitali, JH Shapiro, S Pirandola Phy. Rev. Lett. 114, 080503 (2015).

-A.D. McAulay, *Military Laser Technology for Defense*,Wiley, (2011).

-CWS Chang, AM Vadiraj, J Bourassa, B Balaji, CM Wilson, Quantum-enhanced noise radar Applied Physics Letters 114 (11), 112601, (2019).

-Fetter, A. L., and Waleka, J. D., Quantum Theory of Many-Particle Systems (McGraw-Hill, New York, 1971).

- Abrikosov, A. A., Gorkov, L. P., and Dzyaloshinski, I. E., Methods of Quantum Field Theory in Statistical Physics

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-17]