



A new method for radar stealth through creation of an analog black hole

Hamid Bigdeli^{1✉} | **Akbar Asgharzadeh-Bonab**² | **Moslem Shafiee**³

1. Corresponding Author, Department of Science and Technology, AJA Command and Staff University, Tehran, Iran.

E-mail: h.bigdeli@casu.ac.ir

2. Department of Science and Technology, AJA Command and Staff University, Tehran, Iran.

E-mail: akbar.asgharzadeh@casu.ac.ir

3. Department of Mathematics, Faculty of Mathematics and Computer, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

E-mail: m.shafiee@math.uk.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

26 April 2023

Received in revised form

08 May 2023

Accepted

05 February 2024

Published online

13 September 2024

Keywords:

Analog Black Holes,

Radar Stealth, Bose-

Einstein Condensate,

Vortex Flow

ABSTRACT

Objective: Introducing a new and efficient method for radar stealth through utilizing analog black holes.

Method: Analog black holes have always received plenty of attention and research in recent years due to their unique and astonishing properties, so that they have been designed and implemented in the form of different hydrodynamic, solid state, Bose-Einstein condensate, and optical systems. The most outstanding feature of these types of systems is the ability to trap all kinds of sonic and electromagnetic waves. Noting that detection systems and radars operate based on the transmitting of waves and their reflection from external bodies, analog black holes have the ability to entirely neutralize and disrupt the performance of radars, and practically, even the most sophisticated types of radars are also unable to identify them. Therefore, if these systems are applied in the country's military and defense industries, we will witness tremendous progress in this regard.

Findings: In this paper, we introduce analog black holes as a new alternative in the scope of stealth technology, and by presenting a novel way to produce an analog black hole by creating a vortex flow in the fluid, we show how this system can trap waves.

Conclusion: Examining other stealth methods, we will see that the use of analog black holes does not have any of the limitations of these procedures and they can appear much more effective in this field.

Cite this article: Bigdeli, H., Asgharzadeh-Bonab, A., & Shafiee, M. (2024). A new method for radar stealth through creation of an analog black. *Military Science and Tactics*, 20 (68), 69-89.

DOI: <http://doi.org/10.22034/qjmst.2024.2000942.1880>



Publisher: AJA Command and Staff University

DOI: [10.22034/qjmst.2024.2000942.1880](https://doi.org/10.22034/qjmst.2024.2000942.1880)



روش نوین رادارگریزی از طریق ایجاد یک سیاهچاله آنالوگ

حمید بیگدلی^۱ | اکبر اصغرزاده بناب^۲ | مسلم شفیعی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مطالعات علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران.

رایانامه: h.bigdeli@casu.ac.ir

۲. گروه مطالعات علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران. رایانامه:

Akbar.asgharzadeh@casu.ac.ir

۳. گروه ریاضی، دانشکده ریاضی و کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

رایانامه: m.shafiee@math.uk.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۲۳

هدف: معرفی روشی جدید و کارآمد در زمینه رادارگریزی با استفاده از

سیاهچاله‌های آنالوگ.

روش: سیاهچاله‌های آنالوگ به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و عجیب‌شان در طی سالیان اخیر همواره مورد توجه و تحقیق فراوان گرفته‌اند، به طوری که در قالب سامانه‌های هیدرودینامیکی مختلف، حالت جامد، چگالش بوز-اینشتین و اپتیکی طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند. برجسته‌ترین خاصیت این نوع سامانه‌ها توانایی به دام انداختن انواع امواج صوتی و الکترومغناطیسی است. با توجه به اینکه سیستم‌های شناسایی و رادارها بر اساس ارسال موج و انعکاس آن از جسم خارجی عمل می‌کنند، سیاهچاله‌های آنالوگ توانایی خنثی‌سازی و اختلال در عملکرد رادارها را کاملاً دارا هستند، بنابراین در صورت به کارگیری این سامانه‌ها در صنایع نظامی و دفاعی کشور شاهد پیشرفت شگرفی در این رابطه خواهیم بود.

یافته‌ها: در این مقاله، سیاهچاله‌های آنالوگ را به عنوان روشی نوین در زمینه

فناوری رادارگریزی معرفی می‌کنیم و با ارائه شیوه‌ای جدید برای تولید یک

سیاهچاله آنالوگ از طریق ایجاد یک حرکت گردابی در سیال، نشان می‌دهیم که این

سامانه چگونه قادر در به دام انداختن امواج است.

نتیجه‌گیری: با بررسی سایر روش‌های رادارگریزی ملاحظه خواهیم کرد که به

کارگیری سیاهچاله‌های آنالوگ هیچکدام از محدودیت‌های این روش‌ها را ندارد و

آنها می‌توانند در این زمینه بسیار مؤثرتر ظاهر شوند.

کلیدواژه‌ها:

سیاهچاله‌های آنالوگ، رادار،

گریزی، چگالش بوز-اینشتین،

حرکت گردابی.

استناد: بیگدلی، حمید؛ اصغرزاده بناب، اکبر؛ و شفیعی، مسلم. (۱۴۰۳). روش نوین رادارگریزی از طریق ایجاد یک سیاهچاله

آنالوگ. *علوم و فنون نظامی*، ۲۰ (۶۸)، ۸۹-۶۹.

DOI: <http://doi.org/10.22034/qjms.2024.2000942.1880>



ناشر: دانشگاه فرماندهی و ستاد ارتش جمهوری اسلامی ایران

DOI: 10.22034/qjms.2024.2000942.1880

مقدمه

سیاه‌چاله‌ها اولین بار در سال ۱۹۱۶ به عنوان اولین جواب معادلات نظریه نسبیت انیشتین توسط کارل شوارتزشیلد معرفی شدند. در ابتدا تصور بر این بود که این جواب صرفاً ریاضیاتی است و در دنیا واقعی بیانگر چیزی نمی‌باشد، اما بعدها بررسی‌های بیشتر نشان داد که این جواب‌ها می‌توانند مرحله پایانی یک ستاره سنگین را توصیف کنند. جواب شوارتزشیلد دارای دو ویژگی بارز است: یکی تکینگی گرانشی و دیگری افق رویداد. تکینگی که در مرکز سیاه‌چاله قرار دارد زمانی ایجاد می‌شود که تمامی اجزای تشکیل دهنده‌ی ستاره طی فرآیند رمبش گرانشی در یک نقطه جمع می‌شود. سطح افق رویداد نشان دهنده‌ی مرز سیاه‌چاله است که تکینگی گرانشی را احاطه کرده است. سرعت فرار بر روی افق رویداد برابر با سرعت نور است و از آنجایی که سرعت نور حد نهایی برای سرعت می‌باشد، بنابراین هیچ چیزی امکان فرار از آن را نخواهد داشت. به عبارتی دیگر، افق رویداد که درون سیاه‌چاله را از بیرون آن جدا می‌کند همانند یک دروازه یک طرفه است که در صورت ورود چیزی به داخل آن، امکان بازگشت به بیرون وجود ندارد و سرنوشت جسم سقوط کننده پیوستن به تکینگی است. این ویژگی‌های شگفت‌انگیز سیاه‌چاله‌ها سبب شده است که محققان برای مطالعه و بهره‌برداری از این خاصیت‌ها به فکر شبیه‌سازی و تولید سامانه‌هایی مشابه با آنها بر روی زمین باشند. این نوع از سیاه‌چاله‌ها که به سیاه‌چاله‌های آنالوگ یا آزمایشگاهی معروف هستند در طی سالیان اخیر در ساختارهای فیزیکی متعددی طراحی و تولید شده‌اند (Patrick, 2021; Barcelo, 2019; de Nova, 2019; Steinhauer, 2016; Steinhauer, 2014; Lahav, 2010; Unruh, 2003). این سامانه‌ها بسته به این که از طریق چه چارچوب فیزیکی‌ای برپا شده‌اند به دو نوع آکوستیک یا صوتی و نوری تقسیم می‌شوند. سیاه‌چاله‌های آکوستیک فیلتر کننده امواج صوتی و سیاه‌چاله‌های نوری جذب کننده امواج الکترومغناطیسی هستند.

در سیاه‌چاله‌های آنالوگ، نحوه انتشار امواج کاملاً مشابه با انتشار میدان‌های کوانتومی در حضور سیاه‌چاله‌های گرانشی است. در این سامانه‌ها، سیال خود همانند فضازمانی است که امواج در دل آن حرکت می‌کنند. ویژگی‌های فیزیکی سیال از جمله چگالی و مقدار سرعت جریان در این رابطه نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند. با کمک این ویژگی‌ها می‌توان شرایطی را فراهم آورد که سیال همانند سیاه‌چاله‌های گرانشی دارای افق رویداد شود.

در بخش دوم، ساختار و چگونگی عملکرد سیاه‌چاله‌های آنالوگ با بررسی برخی از سامانه‌های طراحی شده در این زمینه مطالعه می‌شود. در حالت کلی، در سیاه‌چاله‌های

آکوستیک جریان ایجاد شده سیال را به دو ناحیه فروصوتی و فراصوتی تقسیم می‌کند که این نواحی به وسیله یک افق رویداد که در آن سرعت جریان برابر با سرعت صوت است از یکدیگر جدا شده‌اند. با توجه به این که امواج با سرعت صوت حرکت می‌کنند، بنابراین در ناحیه فراصوت که سیال با سرعتی بیش از سرعت صوت جریان دارد، امواج نمی‌توانند در خلاف جهت جریان منتشر شوند.

یک روش پرکاربرد برای ایجاد سیاه‌چاله‌های صوتی و نوری استفاده از حالت چگالش بوز-نیشیتین است. این حالت با کاهش زیاد دمای یک سیال حاوی ذرات بوزونی قابل دست‌یابی است که در این صورت قدرت مکش به وجود آمده توسط چگالش بوز-نیشیتین باعث جلوگیری از انتشار هرگونه موج در اطراف آن می‌شود. البته جذب هر موج سبب بالاتر رفتن دمای چگالش بوز-نیشیتین می‌شود که این خود باعث از بین رفتن حالت ایجاد شده می‌شود، لذا در این روش باید از روش‌های سرد سازی نیز در کنار آن استفاده کرد.

در بخش سوم، روشی ساده اما جدید و بسیار مؤثر در تولید یک سیاه‌چاله آکوستیک را معرفی می‌کنیم. در صورتی که سیال دارای ویژگی‌های فیزیکی معینی باشد، آنگاه ثابت می‌شود که چنین سیالی با یک حرکت گردابی شکل تبدیل به یک سیاه‌چاله صوتی می‌شود. در این حالت همانند سیاه‌چاله‌های گرانشی یک افق رویداد صوتی به وجود خواهد آمد، به طوری که در صورت ورود یک موج صوتی به درون آن، موج امکان خارج شدن از ناحیه محصور شده به وسیله افق رویداد را نخواهد داشت. با بررسی معادلات مربوطه مشاهده می‌شود که جریان حرکت سیال در درون افق رویداد بیشتر از سرعت صوت است و بنابراین هر نوع موج صوتی راه گریزی به بیرون ندارد.

در بخش چهارم، روش‌های گوناگون مقابله با رادارها و سامانه‌های پدافندی را بررسی می‌کنیم و از سیاه‌چاله‌های آنالوگ به عنوان راهکاری جدید در این زمینه نام خواهیم برد. از آنجایی که ارسال امواج اساس کار سامانه‌های شناسایی و راداری است، بنابراین این پدیده‌ها در صورت مواجهه با رادارها از نظر مخفی خواهند ماند. همچنین وجود چنین سامانه‌هایی در محدوده یک رادار مسلماً امکان شناسایی اجسام دیگر را که در پشت سیاه‌چاله قرار دارند ناممکن می‌سازد. لذا استفاده از این پدیده‌ها به عنوان سامانه‌های رادار گریز می‌تواند بسیار مؤثر و راه گشا باشد. از طرفی دیگر، سایر روش‌های رادار گریزی دارای ایراداتی هستند که مانع از عملیاتی شدن آنها در حالت کلی می‌شوند، در حالی که در روش سیاه‌چاله‌های آنالوگ هیچکدام از این محدودیت‌ها وجود ندارند و در مورد تمامی سامانه‌های راداری با هر نوع

ساختار قابلیت به کارگیری دارند. همچنین می‌توان از سیاه‌چاله‌های آنالوگ به عنوان راهکاری مناسب برای حفاظت الکترونیک نام برد که این موضوع گستردگی کاربرد این سامانه‌ها را دو چندان می‌کند.

ساختار سیاه‌چاله‌های آنالوگ

یک سیاه‌چاله گرانشی غیر باردار و غیر چرخان با متریک زیر توصیف می‌شود

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (1)$$

که (t, r, θ, ϕ) و M به ترتیب مختصات فضازمان در دستگاه کروی و جرم سیاه‌چاله هستند. متریک فوق در دو نقطه $r = 0$ و $r = 2M$ تکین است. با محاسبه تانسور انحنای (تانسور ریمن) فضازمان بدست می‌آید (Hobson, 2006)

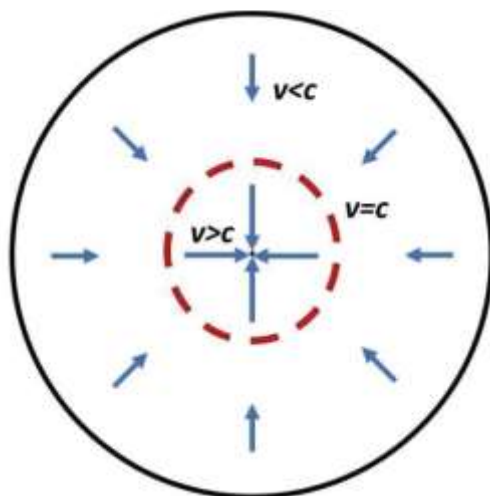
$$R_{\alpha\beta\gamma\delta}R^{\alpha\beta\gamma\delta} = -\frac{48M^2}{r^6}, \quad \alpha, \beta, \gamma, \delta = 0, 1, 2, 3. \quad (2)$$

ملاحظه می‌شود که انحنای $r = 2M$ مقداری محدود و معین دارد و این موضوع نشان می‌دهد که این ناحیه صرفاً یک تکینگی مختصاتی است و با یک تبدیل مختصات قابل رفع شدن است. در حالی که مقدار انحنای $r = 0$ بی‌نهایت است، لذا این یک تکینگی واقعی است که در هر دستگاه مختصاتی وجود خواهد داشت.

بررسی ژئودزی‌های نورگونه در این فضازمان نشان می‌دهد که سطح $r = 2M$ همانند یک دروازه یک طرفه عمل می‌کند به طوری که اگر ذره‌ای در $r < 2M$ قرار داشته باشد، برای رسیدن به مکانی در $r > 2M$ باید سرعتی بیش از سرعت نور داشته باشد، که این امکان وجود ندارد. بنابراین اگر چیزی به داخل این ناحیه سقوط کند، دیگر امکان خارج شدن از آن را نخواهد داشت. سطح $r = 2M$ نشان دهنده مرز سیاه‌چاله است و درون و برون آن را از یکدیگر جدا می‌کند، افق رویداد نام دارد. نقطه $r = 0$ که در آن انحنای فضازمان مقدار نامحدودی دارد تکینگی نامیده می‌شود و بیانگر مرکز سیاه‌چاله است. هر چیزی که به داخل سیاه‌چاله سقوط کند سرانجام به تکینگی می‌رسد و جزئی از آن می‌شود. این اتفاق باعث افزایش جرم و بزرگتر شدن سیاه‌چاله و در نتیجه افزایش مساحت سطح افق رویداد می‌شود.

در سال ۱۹۸۱ نشان داده شد (Unruh, 1981) که معادلات مربوط به حرکت امواج صوتی در یک سیال کاملاً مشابه معادلات مربوط به انتشار میدان‌های کوانتومی در فضازمان است. در این حالت، یک متریک آکوستیک وابسته به سیال وجود دارد که می‌توان حرکت امواج صوتی را از طریق آن بررسی کرد. بنابراین در صورتی که بتوان شرایط را به نحوی تعیین کرد

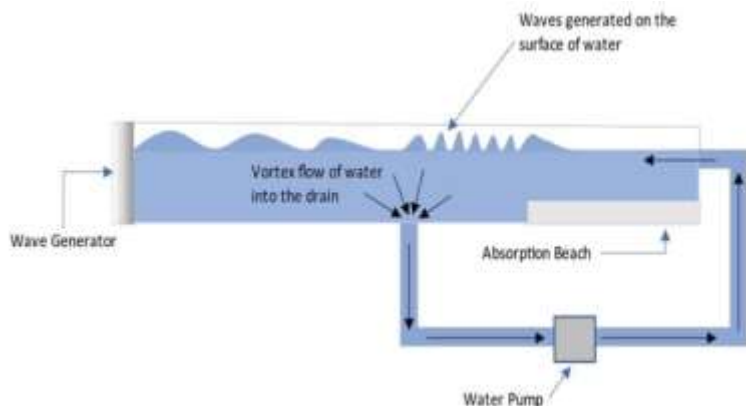
که امواج در سیالی با متریکی مشابه با متریک (۱) حرکت کنند، آنگاه امکان ایجاد یک سیاه‌چاله آکوستیک و یک افق رویداد که امواج را به دام می‌اندازد فراهم خواهد شد. در اینجا نیز همانند سیاه‌چاله‌های گرانشی، سطح سیال مطابق با شکل (۱) به دو بخش فروصوتی و فراصوتی تقسیم می‌شود که به وسیله یک افق رویداد از یکدیگر جدا شده‌اند. با توجه به اینکه امواج نمی‌توانند با سرعتی بیشتر از سرعت صوت منتشر شوند، بنابراین قابلیت خروج از ناحیه فراصوتی را نخواهند داشت. به عبارتی دیگر، ناحیه فراصوتی بیانگر داخل سیاه‌چاله و ناحیه فروصوتی بیانگر خارج آن است.



شکل (۱) بردارهای آبی رنگ نشان دهنده جهت حرکت سیال هستند که به سمت مرکز نشانه می‌روند. هر چقدر که به مرکز نزدیک‌تر می‌شویم، سیال با سرعت بیشتری جریان دارد، به عبارتی دیگر با گذر بیشتر به سمت مرکز، اندازه بردار سرعت افزایش می‌یابد. در افق رویداد که با دایره قرمز رنگ نشان داده شده است، سرعت جریان برابر سرعت صوت می‌شود.

یک روش ساده برای طراحی یک سیاه‌چاله صوتی استفاده از آب به عنوان سیال است (Patrick, 2018). مطابق شکل (۲)، مقداری آب در یک محفظه وجود دارد به طوری که در یک طرف آن یک تولید کننده امواج وجود دارد. در کف این محفظه یک سوراخ کوچک وجود دارد به طوری که از طریق لوله‌ای که به آن متصل شده است آب را به سمت یک پمپ هدایت می‌کند. پمپ دوباره آب را با فشار از طرف دیگر محفظه خارج می‌سازد. بسته به قدرت و توان پمپ استفاده شده و فشار آب وارد شده به محفظه، سرعت امواج تولید شده به

مرور کوچکتر شده تا در نهایت در نقطه‌ای از سطح آب متوقف می‌شوند و به این ترتیب از ادامه انتشار آنها جلوگیری می‌شود.



شکل (۲) نمونه‌ای ساده از طراحی یک سیاه‌چاله آکوستیک. از سمت چپ امواجی بر روی سطح آب تولید می‌شوند. به کمک مکانیزم تعبیه شده، آب از سمت راست با سرعتی اولیه شروع به جریان می‌یابد. به دلیل انتشار امواج در جهت خلاف جریان آب از سرعت انتشار امواج کاسته می‌شود. اگر سرعت جریان آب از سرعت امواج بزرگتر شود، انتشار امواج متوقف می‌شود (Patrick, 2018). روش دیگر برای ایجاد یک سیاه‌چاله آکوستیک استفاده از حالت چگالش بوز-انیشترین است (Lahav, 2010). این حالت زمانی به وجود می‌آید که دمای یک سیال متشکل از ذرات بوزونی بسیار سرد شود. با کاهش دما، ذرات از ترازهای انرژی بالاتر به ترازهای پایین‌تر کوچ می‌کنند و در نتیجه با ادامه این فرآیند نهایتاً اکثر ذرات به پایین‌ترین تراز انرژی یعنی تراز پایه سقوط می‌کنند.

در سال ۲۰۱۴ نشان داده شد (Steinhauer, 2014) که با کاهش دمای یک سیال حاوی اتم‌های روبیدیوم ۸۷ می‌توان به حالت چگالش بوز-انیشترین و در نتیجه به تولید یک افق رویداد صوتی دست یافت. در این حالت، برای جلوگیری از افزایش دما و کاهش بازده سامانه ممکن است که برای سردسازی به تابش لیزر نیز نیاز باشد. از این روش می‌توان برای تولید سیاه‌چاله‌های نوری و جذب امواج الکترومغناطیسی نیز استفاده کرد. با توجه به این که فوتون‌ها به عنوان کوانتوم‌های امواج الکترومغناطیسی ذراتی بوزونی محسوب می‌شوند، بنابراین چگالش بوز-انیشترین به صورت یک جذاب این ذرات خواهد بود. شکل (۳) شرایط

مختلف مواجهه امواج الکترومغناطیسی را با چگالش بوز-انیشترین نشان می‌دهد. لذا با فراهم آوردن شرایط لازم از این طریق می‌توان یک سیاه‌چاله نوری تولید کرد.



شکل (۳) جذب امواج توسط یک سیاه‌چاله تولید شده بر پایه‌ی چگالش بوز-انیشترین در حالت‌های مختلف. عکس سمت چپ، موج در راستای مرکز سیاه‌چاله حرکت می‌کند، لذا بدون تغییر مسیر در سیاه‌چاله جذب می‌شود. در عکس وسط، تمامی موج تابش شده به صورت مایل با سیاه‌چاله برخورد می‌کند، در نتیجه موج طی یک حرکت منحنی شکل به مرکز سیاه‌چاله می‌رسد. در عکس سمت راست، فقط بخشی از موج به داخل سیاه‌چاله فرو می‌رود که در نهایت این بخش از موج با یک حرکت مارپیچی شکل جذب می‌شود و بخش دیگر به مسیر خود ادامه می‌دهد (Lahav, 2010).

در حالت کلی متریک آکوستیک مربوط به یک سیال به صورت زیر نوشته می‌شود

$$ds^2 = \frac{\rho}{c} [-c^2 dt^2 + (dx^i - v^i dt)(dx^j - v^j dt)\delta_{ij}] \quad (3)$$

که ρ ، c ، v و δ_{ij} به ترتیب بیانگر چگالی سیال، سرعت صوت، سرعت جریان سیال و دلتای کرونکر هستند. اندیس‌های i و j که مقادیر ۱ تا ۳ را اختیار می‌کنند نشان دهنده مؤلفه‌های بردار هستند. در صورتی که بتوان یک سیال را بر اساس ویژگی‌های فیزیکی‌اش در حالتی قرار داد که شکل متریک آن مشابه با متریک (۱) باشد، آنگاه یک سیاه‌چاله آکوستیک با یک افق رویداد صوتی به وجود می‌آید. در بخش بعد با ارائه روشی جدید به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود.

حرکت گردابی به عنوان سیاه‌چاله آکوستیک

حرکت گردابی از جریان‌های بسیار شناخته شده در سیالات است که مطالعات و تحقیقات زیادی در رابطه با آن صورت گرفته است. آبی که درون یک وان از طریق چاه کف آن شروع به تخلیه شدن می‌کند دارای یک حرکت گردابی خواهد بود. اگر سیال دارای ویژگی‌های معین باشد، آنگاه جریان سیال به صورت گردابی منجر به ایجاد یک افق رویداد صوتی

می‌شود. به عبارتی دیگر، متریک (۳) با ایجاد شرایط برای یک حرکت گردابی به متریک یک سیاه‌چاله آکوستیک تبدیل خواهد شد.

اکنون، یک سیستم (۱+۲) بعدی را که حاوی یک سیال با جریان گردابی و سوراخی که در مرکز آن قرار دارد را در نظر بگیرید. اگر چگالی سیال وابسته به زمان نباشد (در بیشتر مایعات این شرط برقرار است)، آنگاه معادله پیوستگی برای سامانه مذکور به شکل زیر در می‌آید

$$\partial_r(\rho r v^r) = 0 \Rightarrow \rho v^r = \frac{cte}{r}, \quad (4)$$

که ρ چگالی مایع و v^r مؤلفه شعاعی سرعت جریان مایع است. اگر سیال غیرچرخان باشد، آن وقت بدست می‌آید

$$\vec{\nabla} \times \vec{v} = \frac{1}{r} (\partial_r(rv^\theta) - \partial_\theta v^r) = \partial_r(rv^\theta) = 0 \Rightarrow v^\theta = \frac{cte}{r}. \quad (5)$$

از طرفی دیگر، تکانه زاویه‌ای سیال عبارت است از

$$L = \rho V r v^\theta, \quad (6)$$

که V بیانگر حجم محفظه است که ثابت در نظر گرفته می‌شود. با به کارگیری رابطه اخیر در معادله (۵) خواهیم داشت

$$\frac{1}{r} \partial_r(rv^\theta) = \frac{1}{r} \partial_r\left(\frac{L}{\rho V}\right) = 0 \Rightarrow \frac{L}{\rho} = cte. \quad (7)$$

بنابراین پایستگی تکانه زاویه‌ای، ثابت بودن چگالی را ایجاب می‌کند. لذا سرعت جریان برابر است با

$$\vec{v} = \frac{A}{r} \hat{r} + \frac{B}{r} \hat{\theta}. \quad (8)$$

که A و B ثوابتی هستند که به شرایط اولیه بستگی دارند. با جایگذاری این رابطه در متریک (۳)، متریک مربوط به سیال به شکل زیر بدست می‌آید (چون چگالی و سرعت صوت هر دو مقداری ثابت دارند، بدون لطمه‌ای به کلیت موضوع، نسبت آن دو برابر واحد در نظر گرفته شده است)

$$\begin{aligned} ds^2 &= -c^2 dt^2 + \left(dr - \frac{A}{r} dt\right)^2 + \left(r d\theta - \frac{B}{r} dt\right)^2 \\ &= -\left(c^2 - \frac{A^2 + B^2}{r^2}\right) dt^2 - 2\frac{A}{r} dr dt - 2B d\theta dt \\ &\quad + dr^2 + r^2 d\theta^2, \end{aligned} \quad (9)$$

که با کمک تبدیل‌های

$$dt \rightarrow dt + \frac{Ar}{r^2 c^2 - A^2} dr, \quad (10)$$

$$d\theta \rightarrow d\theta + \frac{AB}{r(r^2 c^2 - A^2)} dr,$$

متریک به شکل زیر در خواهد آمد

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{A^2 + B^2}{c^2 r^2} \right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{A^2}{c^2 r^2} \right)^{-1} dr^2 - 2Bd\theta dt + r^2 d\theta^2. \quad (11)$$

همان گونه که ملاحظه می شود، این متریک دارای یک افق رویداد به صورت زیر است

$$r_H = \frac{|A|}{c}. \quad (12)$$

همچنین این سامانه دارای یک ارگوسفر^۱ است که با رابطه زیر مشخص می شود

$$r_{ergo} = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{c}, \quad (13)$$

که این ناحیه بیانگر شدت گرفتن آثار چرخشی در سیاه چاله است. بنابراین حرکت گردابی یک سیال غیرچرخان با چگالی ثابت به صورت یک سیاه چاله آکوستیک رفتار می کند و امواج صوتی در مکان هایی با $r < r_H$ در درون سیاه چاله به دام می افتند و امکان خارج شدن از این محدوده را نخواهند داشت.

حال به بررسی چگونگی حرکت فونون ها به عنوان واحدهای تشکیل دهنده امواج صوتی

می پردازیم. لاگرانژی مربوط به متریک (۱۱) برابر است با

$$L = - \left(c^2 - \frac{A^2 + B^2}{r^2} \right) \dot{t}^2 + \left(1 - \frac{A^2}{c^2 r^2} \right)^{-1} \dot{r}^2 - 2B\dot{t}\dot{\theta} + r^2 \dot{\theta}^2, \quad (14)$$

که علامت نقطه بیانگر مشتق نسبت به زمان ویژه است. چون لاگرانژی به طور صریح بستگی به t و θ ندارد، بنابراین انرژی E و تکانه زاویه ای L سامانه پایسته خواهند بود.

با استفاده از معادلات اوپلر-لاگرانژ، معادلات ژئودزی برای متریک آکوستیک (۱۱) بدست

می آیند

^۱ ergosphere

$$\dot{r}^2 = \frac{L^2(A^2 + B^2)}{c^2 r^4} - \frac{L^2}{c^2 r^2} \left(\frac{2BE}{L} + c^2 \right) + \frac{E^2}{c^2} \quad (15)$$

$$\dot{\theta} = \frac{Lc^2}{c^2 r^2 - A^2} - \frac{L(A^2 + B^2)}{r^2(c^2 r^2 - A^2)} + \frac{BE}{c^2 r^2 - A^2} \quad (16)$$

$$\dot{t} = \frac{Er^2}{c^2 r^2 - A^2} - \frac{LB}{c^2 r^2 - A^2}. \quad (17)$$

اگر معادله (۱۶) را برای فاصله‌های بزرگ یعنی $r \rightarrow +\infty$ در نظر بگیریم، بدست می‌آید

$$r^2 \dot{\theta} = L + \frac{EB}{c^2}. \quad (18)$$

این معادله نشان می‌دهد که تکانه زاویه‌ای فونون برابر است با

$$L_{tot} = r^2 \dot{\theta} = L + \frac{EB}{c^2}, \quad (19)$$

لذا تکانه زاویه‌ای کل فونون از مجموع تکانه زاویه‌ای سیال و تکانه زاویه‌ای خود فونون تشکیل شده است. بنابراین در صورتی که فونون از ابتدا دارای تکانه زاویه‌ای نباشد، حرکت گردابی مایع باعث می‌شود که یک تکانه زاویه‌ای در فونون به وجود بیاید. البته در صورتی که فونون دارای تکانه زاویه‌ای $-\frac{EB}{c^2}$ باشد، آن وقت تکانه زاویه‌ای کل برابر صفر است. به عبارت دیگر، برای صفر شدن تکانه زاویه‌ای کل، باید فونون دارای یک تکانه زاویه‌ای به اندازه و در خلاف جهت تکانه زاویه‌ای سیال داشته باشد.

در حالت $L = 0$ ، معادلات ژئودزی (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) به صورت در می‌آیند

$$\dot{r}^2 = \frac{E^2}{c^2} \quad (20)$$

$$\dot{\theta} = \frac{EB}{c^2 r^2 - A^2} \quad (21)$$

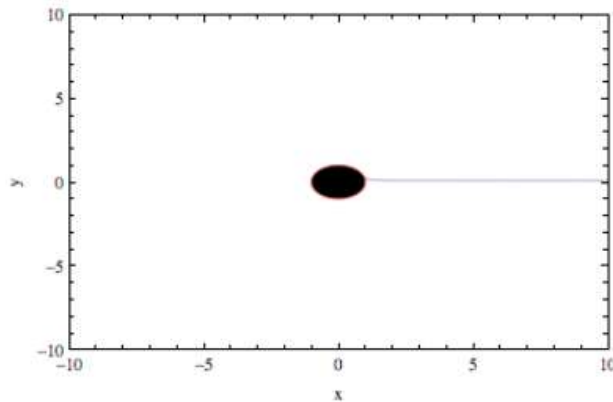
$$\dot{t} = \frac{Er^2}{c^2 r^2 - A^2}. \quad (22)$$

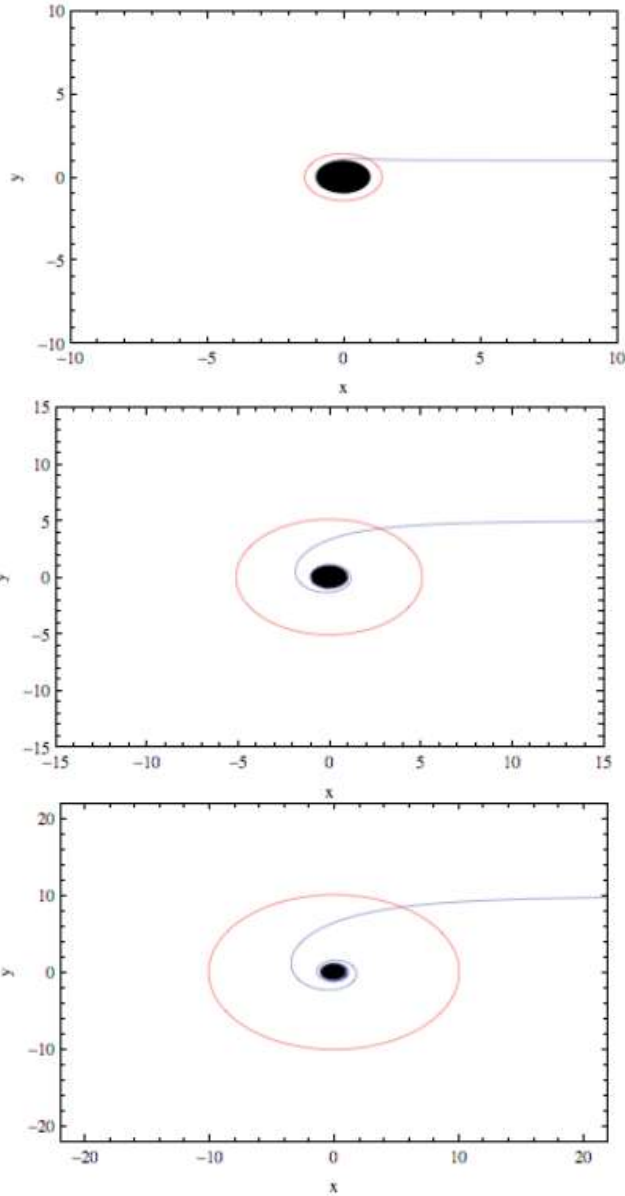
با تقسیم جذر معادله (۲۰) بر (۲۲) و همچنین (۲۰) بر (۲۱) معادلات حرکت فونون تعیین می‌شوند

$$\frac{dr}{dt} = \pm \left(c - \frac{A^2}{cr^2} \right), \quad (23)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{B}{r^2}. \quad (24)$$

در شکل (۴) حرکت امواج صوتی که از بی‌نهایت وارد یک سیال با حرکت گردابی می‌شوند با استفاده از معادلات بدست آمده نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، امواج وقتی که وارد ناحیه ارگوسفر می‌شوند، مسیر آنها به سمت مرکز سیاه‌چاله بیشتر پیچ می‌خورد تا در نهایت با افق رویداد برخورد و سرانجام جذب می‌شوند. بنابراین امواجی که از یک سمت وارد می‌شوند، بعد از مواجهه با سیاه‌چاله نه دیگر می‌توانند به مسیر قبلی خود ادامه دهند و نه دیگر امکان بازگشت به عقب را دارند. به عبارتی دیگر، موج در ناحیه ایجاد شده به دام می‌افتند و این موضوع نشان می‌دهد که حضور یک سیاه‌چاله آنالوگ در حوالی یک رادار عملکرد آن را به شدت مختل و تحت شرایطی به طور کامل خنثی می‌کند، زیرا هیچ‌گونه موجی در جهتی که سیاه‌چاله قرار دارد امکان رسیدن به رادار را ندارد تا رادار از طریق آن جسمی را شناسایی کند.



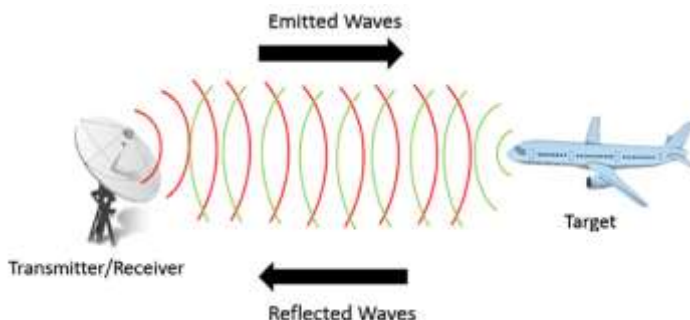


شکل (۴) چگونگی به دام افتادن امواج صوتی در یک سیاهچاله آکوستیک به ترتیب از بالا به پایین به ازای $B = 0.1, 1, 5, 10$ و با فرض برابر واحد بودن بقیه ثوابت. ثابت B تعیین کننده اندازه ناحیه ارگوسفر است که با یک دایره قرمز رنگ مشخص شده است. موج بعد از ورود به این ناحیه به سمت مرکز متمایل می شود و در صورت برخورد با افق رویداد که مرز ناحیه سیاه رنگ است، موج توسط سیاهچاله جذب می شود. در صورتی که این موج یک موج ارسالی از رادار باشد ملاحظه

می‌شود که در صورت وجود یک جسم در سمت دیگر سیاه‌چاله امکان شناسایی آن برای رادار وجود ندارد چرا که موج قبل از رسیدن به جسم و انعکاس از سطح آن توسط سیاه‌چاله جذب شده است.

رادار گریزی و سیاه‌چاله‌های آنالوگ

برای ارائه یک روش رادار گریزی، ابتدا باید عملکرد رادارها و دستگاه‌های شناسایی مورد ارزیابی قرار بگیرد. اساساً تمامی این سامانه‌ها از طریق ارسال پالس و برخورد آن با یک جسم اقدام به شناسایی آن می‌کنند. با برخورد پالس با جسم، مقداری از آن توسط سطح جسم جذب و مابقی آن منعکس می‌شود (شکل ۵).



شکل (۵) نحوه شناسایی یک جسم توسط رادار. امواج ارسالی به رنگ قرمز و امواج انعکاسی با رنگ سبز مشخص شده‌اند.

بخش انعکاس یافته دوباره از طریق گیرنده رادار دریافت و با پردازش اطلاعات آن توسط سیستم مرکزی مختصات مکانی و سرعت جسم با کمک رابطه زیر مشخص می‌شود

$$R = \frac{ct}{2}, \quad (25)$$

که t مدت زمان ما بین ارسال و دریافت پالس و c سرعت نور است. همچنین سرعت جسم از طریق محاسبه اختلاف فرکانس یا طول موج بین پالس‌های ورودی و خروجی به کمک رابطه دوپلر تعیین می‌شود. در حالت کلی عملکرد یک رادار به وسیله‌ی معادله زیر توصیف می‌شود

$$P_r = \frac{P_t G_t}{(4\pi R^2)^2} \sigma A_{eff}, \quad (26)$$

که P_t و P_r به ترتیب توان پالس‌های ارسالی و دریافتی، σ بیانگر سطح مقطع رادار، G_t و A_{eff} به ترتیب بهره و سطح مؤثر آنتن گیرنده رادار هستند. تمامی روش‌های مقابله با رادارها

سعی بر کوچکتر کردن مقدار انرژی پالس ورودی به عنوان منبع قدرت شناسایی رادار را دارند.

همان طور که در معادله (۲۶) ملاحظه می‌شود، عوامل متعددی همچون اندازه و جنس ماده‌ای که هدف از آن ساخته شده، زوایای برخورد و بازگشت و میزان قطبش امواج ارسالی و دریافتی در توان تشخیصی یک رادار نقش دارند. هر چقدر که توان موج دریافتی کمتر باشد، شناسایی جسم در فاصله‌ای دورتر برای رادار مشکل‌تر خواهد بود. لذا در روش‌های رادار گریزی سعی می‌شود تا حد امکان انرژی سیگنال ورودی کوچک شود.

در حال حاضر، دو روش برای رادارگریزی از طریق کاهش توان موج بازتابی وجود دارد (Husnain, 2019; Binayak, 2021): ۱- استفاده از مواد دی‌الکتریک شفاف و ۲- استفاده از مواد جاذب امواج (RAM). در حالت اول، موج الکترومغناطیسی ارسالی بعد از برخورد با ماده از آن عبور می‌کند و قسمت بسیار کمی از آن بازتاب می‌شود. یک مثال بارز در این زمینه شیشه است که مقدار انعکاس امواج از سطح آن بسیار کوچک است. این روش دارای این ایراد است که استفاده از مواد یاد شده برای اجسامی مانند هواپیما اصلاً مناسب نیست به خصوص که در صورت حرکت با سرعت زیاد این اجسام (که معمولاً نیز این چنین است)، دمای آن‌ها بسیار بالا خواهد رفت که این موضوع آسیب‌پذیری هواپیما و جنگنده‌ها را افزایش خواهد داد. در روش دوم، سطح جسم از موادی همچون ذرات کربنی سیاه رنگ ساخته می‌شود که قسمت اعظم موج ورودی را جذب می‌کنند. البته این روش کاملاً بستگی به محدود فرکانس امواج ارسالی از رادار دارد، چرا که ماده جاذبی وجود ندارد که تمامی فرکانس‌ها را پوشش دهد. به عنوان مثال، رنگ سیاه جاذب امواج نوری است که در محدوده طول موج ۳۰۰ الی ۷۰۰ نانومتر قرار دارند. در صورتی که از یک موج الکترومغناطیسی خارج از این طیف مثل گستره فرسرخ و یا فرابنفش استفاده شود، جسم قابلیت شناسایی توسط رادار را خواهد داشت. بنابراین ملاحظه می‌شود که این روش کاملاً به فرکانس تولید شده توسط رادار بستگی دارد و از این رو در حالت کلی توانایی مقابله با سامانه‌های راداری گوناگون را ندارد.

دیگر راهکار برای رادار گریزی استفاده از روش‌هایی برای کاهش سطح مقطع راداری است (Phillip, 2021). با توجه به اینکه زاویه انعکاس موج از سطح یک جسم به شکل و هندسه آن بستگی دارد، بنابراین می‌توان با تغییراتی در این رابطه موج بازتابی را به نحوی منحرف کرد که به جهتی غیر از جهت قرارگیری رادار ارسال شود. این روش دارای این اشکال است که تغییر شکل باعث محدودیت شدید بر آیرودینامیک هواپیماها و اجسام خواهد

شد. روش دیگر در این خصوص، استفاده از یک لایه پلاسمای یونیزه است که باعث پراکندگی موج بازتابی از سطح جسم می‌شود که در نتیجه باعث کاهش برد تشخیص رادار خواهد شد (Zhmoginov, 2012).

به غیر از روش‌های رادار گریزی اشاره شده می‌توان از عملیات اختلال در عملکرد و فریب رادارها نیز استفاده کرد. در حالت کلی این شیوه از دو طریق صورت می‌پذیرد: روش اول به صورت فیزیکی با بمب‌ها و موشک‌های دور ایستا (Hard Kill) و روش دوم به صورت الکترونیکی و سایبری است (Soft Kill). حمله الکترونیکی نیز خود به دو نوع تقسیم می‌شود (Zhu, 2022). نوع اول، حمله الکترونیکی و سایبری به به شبکه راداری و پدافندی است. در این نوع حمله، سرورها و کامپیوترهای مرکزی شبکه پدافند و یا به عبارتی قلب شبکه راداری مورد حمله سایبری قرار می‌گیرد. در این حالت با ارسال کدهای حامل ویروس و بدافزار بر روی گیرنده‌های راداری، کامپیوتر و پردازنده‌های سیستم پدافندی موقتاً از کار می‌افتد و سپس با هجوم گسترده به سیستم پدافندی غیر فعال شده، آن را نابود می‌کنند. نوع دوم نیز از طریق ایجاد اختلال و کاستن توان رادارها می‌باشد. در این نوع حمله، هواپیماهای اختلال‌گر اقدام به اختلال در رادارها می‌کنند و با ضعیف کردن سیگنال‌های راداری، راه را برای حمله باز می‌کنند. اصلی‌ترین نمونه از این اختلال‌گرها، هواپیماهای جنگ سنگین الکترونیک EC-130H Compass Hall ساخت آمریکا می‌باشد. این اختلال‌گرها هواپیماهایی هستند که بر روی هواپیمای دیگری مانند C-130 قرار می‌گیرند و در وهله اول ویژه حمله به رادارهای پیش‌خطا دوربرد هستند. نوع حمله این هواپیماها به گونه‌ای است که باعث کاهش برد شناسایی رادارها می‌شود که این موضوع باعث مخفی شدن جنگنده‌های حمله‌کننده از دید رادارها می‌گردد. بدین ترتیب راداری که دارای ۶۰۰ کیلومتر برد می‌باشد، در اثر حمله این هواپیما بردش به ۲۰۰ کیلومتر یعنی یک سوم برد اولیه کاهش می‌یابد.

در حمله فیزیکی از طریق ایجاد نویز، عملکرد رادارها مختل و یا به عبارتی دیگر فریب رادار اتفاق می‌افتد (Martin, 2021). در اینجا با استفاده از ایجاد سیگنال‌هایی خاص که به آن‌ها سیگنال‌های گیج‌کننده می‌گویند و فرستادن آن‌ها به سمت گیرنده رادارها باعث مختل شدن در عملکرد آن‌ها می‌شوند و در نتیجه رادارها توانایی شناسایی و رهگیری صحیح اشیاء را نخواهند داشت. نویزها به طریق مختلفی ایجاد می‌شوند که هر کدام روش مخصوص به خود را دارد. در برخی مواقع این نویزها باعث می‌شوند که رادار به اشتباه اجسامی در آسمان را شناسایی کند که در حقیقت وجود ندارند که به آن‌ها اهداف دروغین نیز گفته می‌شود.

نمونه دیگری از این روش، بمب‌های الکترومغناطیسی یا همان EMP هاست که با ایجاد پالس‌های بسیار بزرگ باعث از کار افتادن هر گونه تجهیزات الکتریکی از جمله رادارها می‌شوند.

با توجه به عملکرد سیاه‌چاله‌ها و این موضوع که هیچ‌گونه موجی الکترومغناطیسی از آن‌ها منتشر نمی‌شود و هر تابش الکترومغناطیسی که به آن‌ها نزدیک شود را به دام می‌اندازند، ملاحظه می‌شود که استفاده از سیاه‌چاله‌های آنالوگ در زمینه رادارگریزی می‌تواند نسبت به روش‌هایی که هم‌اکنون از آن‌ها برای این منظور استفاده می‌شوند بسیار مؤثر واقع شود. از آنجایی که موج ورودی به طور کامل توسط سیاه‌چاله جذب می‌شود، عملاً موج انعکاسی وجود نخواهد داشت تا به رادار برگردد. از مقایسه آن با روش‌های رادارگریزی فعلی مشاهده می‌کنیم که این روش به هیچ‌عنوان نیاز به تغییر شکل و هندسه اجسام ندارد تا باعث بروز مشکلات آیرودینامیکی شود، و به علاوه در خصوص تمامی انواع رادارها و سیستم‌های شناسایی کارساز است، زیرا سیاه‌چاله‌ها قادر به جذب هر نوع موج با هر مقدار فرکانس هستند. این موضوع گستره فعالیت سیاه‌چاله‌های آنالوگ به دیگر روش‌های رادارگریزی را نشان می‌دهد و بنابراین نیازی به اختصاصی سازی بر اساس کاربرد ندارد و در حالت کلی قابلیت اثرگذاری دارد.

همچنین در رابطه با شیوه‌های اخلاص و فریب رادار، از جمله در روش سایبری، فلج شدن سامانه پدافندی موقتی است و از طرفی برای ایجاد چنین امکانی باید زیرساخت‌های نرم‌افزاری پیشرفته مهیا باشد، در حالی که در روش سیاه‌چاله‌ای این موارد وجود ندارد. در حالت هواپیمای اخلاص گر نیز به منظور کاهش برد رادارها باید از یک هواپیمای دیگر استفاده کرد که این به معنای هزینه گزاف استفاده از این روش است. همچنین در شیوه ایجاد نویز ایراد اساسی که وجود دارد این است که نویزها خود موج الکترومغناطیس هستند و لذا از این طریق قابل شناسایی و مقابله هستند، در حالی که روش سیاه‌چاله‌ای در صورت پیاده‌سازی و عملیاتی شدن فاقد هر یک از اشکالات فوق‌الذکر است. لذا ملاحظه می‌شود که راهکار استفاده از سیاه‌چاله‌ها روشی نوین است که نسبت به روش‌های کنونی بسیار قدرتمند و پربازده‌تر است که در صورت عملیاتی شدن آن، احتمالاً دیگر روش‌ها کنار گذاشته خواهند شد.

کاربردی دیگر که سیاه‌چاله‌های آنالوگ می‌توانند داشته باشند، مبحث حفاظت الکترونیک (EP) است. در صورتی که دشمن قصد داشته باشد تا با ارسال سیگنال‌هایی

موجب اختلال در دستگاه‌های الکترونیکی شود، با به کارگیری سیاه‌چاله‌ها می‌توان از بروز چنین اقداماتی جلوگیری کرد. در این حالت، سیاه‌چاله‌های آنالوگ همانند یک سپر محافظ عمل خواهند کرد و مانع از ورود هرگونه سیگنال مزاحم به منطقه مورد نظر می‌شوند. سیاه‌چاله‌های آنالوگ در این مورد هم دارای کاربردی وسیع هستند و در تمامی انواع حفاظت الکترونیک می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند (Riihonen, 2020). این موضوع علاوه بر سهولت کار می‌تواند هزینه‌های مربوطه را نیز کاهش دهد، زیرا یک سامانه به تنهایی کارکرد چندین سامانه را بر عهده می‌گیرد. همچنین با توجه به ساختار این سامانه‌ها می‌توان از آنها در شبکه‌های بی‌سیم سه بعدی (اصغرزاده بناب، ۱۴۰۱)، کنترل توان ارسالی شبکه (اصغرزاده، ۱۴۰۲) و مقابله با حساسه‌های اطلاعات الکترونیکی دشمن (موسوی، ۱۳۹۶) استفاده کرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، ساختار و چگونگی کارکرد سیاه‌چاله‌های آنالوگ مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت و از این پدیده‌ها به عنوان روشی نوین برای فناوری رادار گریزی نام برده شد. در ابتدا ملاحظه شد که سیاه‌چاله‌های آنالوگ فارغ از چارچوب به کار گرفته شده برای تولید آنها همگی دارای ویژگی‌ای به نام افق رویداد هستند. افق رویداد مرز ناحیه درونی سیاه‌چاله را مشخص می‌کند به طوری که تمامی امواج وارد شده به داخل سیاه‌چاله در آنجا به دام می‌افتند و امکان خروج از ناحیه بیان شده را ندارند.

افق رویداد از طرق گوناگونی قابل دستیابی است. در ساده‌ترین روش‌ها می‌توان از آب دارای جریان استفاده کرد. در این حالت کافی است در ناحیه‌ای سرعت جریان آب بیش از سرعت صوت شود، که در این صورت موج صوتی قادر به انتشار در خلاف جهت جریان آب نخواهد بود. البته باید توجه داشت که ایجاد جریانی با سرعتی بیش از سرعت صوت نیازمند فرآهم آوردن شرایطی خاص است.

یکی از روش‌های مرسوم در تولید سیاه‌چاله‌های آنالوگ استفاده از حالت چگالش بوز-انیشترین است. با توجه به این که این حالت از تجمع ذرات بوزونی در پایین‌ترین تراز انرژی ممکن تشکیل می‌شود، بنابراین در این روش باید دمای سامانه را تا حد بسیار زیادی پایین آورد. در این حالت واحدهای تشکیل دهنده امواج صوتی و الکترومغناطیسی یعنی فونون‌ها و

فوتون‌ها خود ذرات بوزونی هستند، لذا با عبور این ذرات از نزدیکی یک چگالش بوز-انیشتمین جذب می‌شوند و دیگر به حرکت در مسیر قبلی خود ادامه نمی‌دهند.

در این پژوهش یک روش جدید و ساده‌تر و قابل در دسترس‌تر و البته توانمند را برای تولید یک سیاه‌چاله آکوستیک معرفی کردیم. ملاحظه شد که در صورت استفاده از یک سیال غیرچرخان با چگالی ثابت و با حرکتی گردابی شکل یک افق رویداد صوتی به وجود خواهد آمد. در فاصله‌های دور از مرکز حرکت گردابی، سیال با سرعتی کمتر از سرعت صوت جریان دارد، اما با نزدیک شدن به آن، این سرعت نیز به مرور افزایش پیدا کرده تا در نهایت در ناحیه‌ای مقدار آن به سرعت صوت می‌رسد. این ناحیه همان افق رویداد است که در درون آن سیال با سرعتی بیش از سرعت صوت جریان دارد. این موضوع حاکی از آن است که امواج صوتی قادر به انتشار در خلاف جهت جریان سیال در درون افق نیستند و امکان خروج از ناحیه محصور شده به وسیله‌ی افق رویداد را ندارند. لذا در این حالت یک سیاه‌چاله آکوستیک تشکیل شده است که امواج صوتی را به دام می‌اندازد.

این ویژگی مهم سیاه‌چاله‌های آنالوگ می‌تواند به عنوان یک فناوری رادارگریزی مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گیرد. از آنجایی که رادارها بر اساس ارسال سیگنال و سپس انعکاس آن پس از برخورد با جسم خارجی عمل می‌کنند، که در صورت قرار گرفتن یک سیاه‌چاله آنالوگ در مقابل آن، موج ارسالی از رادار توسط سیاه‌چاله به دام می‌افتد و عملاً دیگر موج انعکاسی وجود ندارد تا سامانه راداری از طریق پردازش آن سیاه‌چاله را شناسایی کند. همچنین سیاه‌چاله این قابلیت را دارد تا اجسام دیگر را نیز از دید رادار مخفی نگه دارد. در این حالت، سیاه‌چاله بین رادار و جسم مورد نظر قرار داشته باشد، آنگاه موج ارسالی از رادار توسط سیاه‌چاله جذب می‌شود و دیگر امکان رسیدن به جسم را نخواهد داشت.

ملاحظه شد که به کارگیری سیاه‌چاله‌های آنالوگ نسبت به دیگر روش‌های رادارگریزی دارای مزیت‌های ویژه‌ای است. در شیوه‌های حال حاضر به منظور کاهش قدرت تشخیص رادار از موادی استفاده می‌شود که فقط در فرکانسی مشخص امکان کورسازی دارند و از طرفی دیگر برای پراکنده کردن امواج ارسالی نیز نیاز به تغییرات در شکل و هندسه ادوات است، در حالی که در صورت استفاده از سیاه‌چاله‌های آنالوگ با توجه به عملکرد آنها هیچکدام از این محدودیت‌ها وجود نخواهند داشت.

البته برای به کارگیری سیاهچاله‌های آنالوگ در صنایع نظامی و هوایی نیازمند تحقیقات بیشتر در این خصوص است که پژوهش حاضر به منظور یک تحقیق اولیه در راستای تحقق این هدف انجام گرفته است.

قدردانی

نویسندگان از سردبیر محترم نشریه و داوارن گرامی که با مطالعه مقاله و ذکر نکاتی به بهبود کیفیت این اثر کمک نمودند تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- اصغرزاده بناب، اکبر. و کلب خانی، هاشم. (۱۴۰۱). تعادل بار در شبکه‌های بی سیم سه بعدی مبتنی بر پهباد. علوم و فنون نظامی. ۱۹(۶۵): ۸۵-۶۹.
- اصغرزاده بناب، اکبر. و کلب خانی، هاشم. (۱۴۰۲). انتخاب رله و کنترل توان ارسالی برای بیشینه کردن بهره وری انرژی در شبکه رله دوطرفه با کدگذاری شبکه و دسترسی چندگانه غیرمتعامد. آینده پژوهی دفاعی. ۸(۲۸).
- موسوی، سید عبدالرحیم. و سپهری، محمد. (۱۳۹۶). راهبردهای پدافند غیرعامل الکترونیک راداری در برابر تهدیدات آتی حساسه‌های اطلاعات الکترونیکی دشمن در افق چشم انداز ۱۴۰۴. آینده پژوهی دفاعی. ۲(۵): ۲۵-۷.
- Barceló, C. (2019). Analogue black-hole horizons, *Nat. Phys.* 15, pp. 210–213.
- Binayak, P. & Chauhan, A. (2021). A study of stealth technology, *Materials Today: Proceedings*.
- de Nova, M., Golubkov, J. R., Kolobov, K., V.I. et al (2019). Observation of thermal Hawking radiation and its temperature in an analogue black hole, *Nature* 569, pp. 688–691.
- Hobson, M., Efstathiou, G. & Lasenby, A. (2006). *General Relativity: An Introduction for Physicists*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Husnain, A., et al (2019). Stealth technology: methods and composite materials—a review, *Polymer Composites* 40.12, pp. 4457-4472.
- Lahav, O., Itah, A., Blumkin, A., Gordon, C., Rinott, S., Zayats, A. & Steinhauer, J. (2010). Realization of a Sonic Black Hole Analog in a Bose-Einstein Condensate, *Phys. Rev. Lett.* 105, 240401.
- Martin, G. (2021). Active protection: An active market for hard kill vehicle protection systems, *Asia-Pacific Defence Reporter* 47.4.

- Patrick, S., Coutant, A., Richartz, M. & Weinfurtner, S. E. (2018). Black Hole Quasibound States from a Draining Bathtub Vortex Flow, *Physical review letters*, 121 6, 061101.
- Patrick, S., Goodhew, H., Gooding, C. & Weinfurtne, S. (2021). Backreaction in an Analogue Black Hole Experiment, *Phys. Rev. Lett.* 126.
- Philip, B. (2021). New lessons for stealth technology, *Nature Materials* 20.1.
- Riihonen, T., et al (2020). Full-duplex operation for electronic protection by detecting communication jamming at transmitter, 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE.
- Steinhauer, J. (2014). Observation of self-amplifying Hawking radiation in an analogue black-hole laser, *Nature Phys* 10, pp. 864–869.
- Steinhauer, J. (2016). Observation of quantum Hawking radiation and its entanglement in an analogue black hole, *Nature Phys* 12, pp. 959–965.
- Unruh, W. G. & Schützhold, R. (2003). On slow light as a black hole analogue, *Phys. Rev. D* 68, 024008.
- Unruh, W. G. (1981). Experimental Black-Hole Evaporation?, *Phys. Rev. Lett.* 46, 1351.
- Zhmoginov, A. I. & Fisch, N. J. (2012). Applying alpha-channeling to mirror machines, *Physics of Plasmas* 19.5.
- Zhu, R., et al (2022). Radar Signal Pre-sorting Based on Mean-Shift Algorithm, 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), IEEE.