



Journal of Aerospace Defense

Volume 4, Issue 4

Winter2025

P.P 60-73



Research Paper;

Concealment and enhancement of signal security in the audio-optical channel based on fractional Fourier amplitude and phase recovery (G-S)

Gohar Varamini^{1*}, Jalil Mazloum², Alireza Gholami³

1. Department of Electrical Engineering, Bey. C., Islamic Azad University, Beyza, Iran . Gohar.Varamini@iau.ac.ir

2. Department of Electrical Engineering Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology. j_mazloum@sbu.ac.ir

3. Department of Water Engineering, Shi. C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran. Ar.gholami2532@iau.ac.ir

Article Information

Abstract

Accepted:

2026/04/09

Received:

2025/12/22

Keywords:

Keywords: Phase recovery algorithm, Grachberg-Saxton, information security, secret information

Corresponding author:
Gohar Varamini
Gohar.Varamini@iau.ac.ir

Abstract

This paper examines an audio signal encoding method based on the Grachberg-Saxton phase recovery algorithm in the fractional Fourier transform domain and presents a hybrid model for providing security and data hiding in information channels. This algorithm first encodes the original audio signal into an image format and encrypts it. This algorithm first encodes the original audio signal into an image format and encrypts it. Subsequently, the G-S phase recovery algorithm in the fractional Fourier domain is used to extract the phase information of the audio signal. Accordingly, the original audio phase is replaced with a reference phase representing the hidden information to achieve information embedding. This technology includes the ability to generate two different types of keys according to the encryption requirements, which increases the difficulty of decryption and ensures information security. Finally, the encrypted image can be decrypted and restored to the original audio signal. This scheme realizes the effective embedding and extraction of hidden information in audio signals through the replacement and recovery of phase information. In this scheme, information security has been significantly increased by about 98%



فصلنامه علمی دفاع هو فضایی

دوره ۴ شماره ۴
زمستان ۱۴۰۴
صفحات ۷۳ - ۶۰



مقاله پژوهشی؛

پنهان سازی و افزایش امنیت سیگنال در کانال صوتی - نوری مبتنی بر دامنه فوریه کسری

و بازیابی فاز (G-S)

گوهر ورامینی^{۱*}، جلیل مظلوم^۲، علیرضا غلامی^۳

۱- گروه مهندسی برق، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران. Gohar.Varamini@iau.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری. j_mazloum@sbu.ac.ir

۳- گروه مهندسی آب، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران. Ar.gholami2532@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

چکیده:

در این مقاله به بررسی یک روش رمزگذاری سیگنال صوتی مبتنی بر الگوریتم بازیابی فاز گرچبرگ-ساکستون در حوزه تبدیل فوریه کسری پرداخته و یک مدل ترکیبی به منظور ایجاد امنیت و پنهان سازی داده ها در کانال های اطلاعاتی ارائه شده است. این الگوریتم ابتدا سیگنال صوتی اصلی را به فرمت تصویر کدگذاری و آن را رمزگذاری می کند. متعاقباً، الگوریتم بازیابی فاز G-S در حوزه فوریه کسری به منظور استخراج اطلاعات فاز سیگنال صوتی استفاده می شود. بر این اساس، فاز صوتی اصلی با یک فاز مرجع که نشان دهنده اطلاعات مخفی است جایگزین می گردد تا جاگذاری اطلاعات حاصل شود. این فناوری توانایی تولید دو نوع کلید مختلف را مطابق با الزامات رمزگذاری را شامل می شود که این امر دشواری رمزگشایی و تضمین امنیت اطلاعات را افزایش می دهد. در نهایت، تصویر رمزگذاری شده را می توان رمزگشایی و به سیگنال صوتی اصلی بازیابی کرد. این طرح از طریق جایگزینی و بازیابی اطلاعات فاز، جاسازی و استخراج موثر اطلاعات مخفی در سیگنال های صوتی را محقق می کند در این طرح امنیت اطلاعات تا حدود ۹۸ درصد افزایش چشم گیر داشته است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۱/۲۰

کلیدواژه ها:

کلیدواژه ها:

الگوریتم

بازیابی فاز،

گرچبرگ-

ساکستون،

امنیت

اطلاعات،

اطلاعات

مخفی

نویسنده مسئول:

گوهر ورامینی

Gohar.Varamini@iau.ac.ir

گوهر ورامینی، جلیل مظلوم، علیرضا غلامی (۱۴۰۵) پنهان سازی و افزایش امنیت سیگنال در کانال صوتی - نوری مبتنی بر دامنه فوریه کسری و بازیابی فاز (G-S)، فصل نامه علمی دفاع هو فضایی، دوره ۴ (شماره ۲)، صفحه ۷۳-۶۰.

۱- مقدمه

فناوری امنیت اطلاعات نوری به دلیل ویژگی‌های پردازش موازی با ابعاد بالا، توجه زیادی را به خود جلب کرده است و تحقیق در مورد پنهان‌سازی اطلاعات و الگوریتم رمزگذاری به عنوان موضوع اصلی در این زمینه تبدیل شده است [۱]. مطالعات در این زمینه با ارائه فناوری رمزگذاری فاز تصادفی دوگانه بر اساس سیستم f_4 روش رمزگذاری نوری از حوزه فوریه به حوزه کسری تکامل قابل توجهی یافته است. از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵، کانولوشن کسری تعمیم‌یافته و تبدیل فوریه چندفرکتالی را به رمزگذاری نوری معرفی شده است که توسعه این حوزه را در چین ارتقا داد [۲]. استراتژی رمزگذاری تکراری آبخاری که پیشنهاد شده بود، کارایی رمزگشایی را از طریق کدگذاری الگوی دو فازی بیشتر بهبود بخشید و محدودیت‌های رمزگذاری خطی سنتی را شکست و امنیت سیستم را به طور قابل توجهی بهبود بخشیدند [۳].

الگوریتم‌های فراابتکاری (Metaheuristic Algorithms) یکی از انواع روش‌های جستجو هستند که با عنوان روش‌های بهینه‌سازی نیز شناخته می‌شوند [۴]. این الگوریتم‌ها به منظور یافتن راه‌حلی مناسب برای مسائل بهینه‌سازی پیچیده و دشوار طراحی شده‌اند که با الگوریتم‌های سنتی قابل حل نیستند. به عبارتی، در دنیای واقعی ممکن است با مسائلی مواجه که برای حل آن‌ها منابع محدودی (مانند توان محاسباتی و زمان) در اختیار است [۵]. در این شرایط الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توانند به عنوان ابزاری مناسب تلقی شوند و راه‌حل‌های خوبی را با تلاش محاسباتی کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها پیدا کنند [۶].

الگوریتم‌های فراابتکاری را می‌توان به عنوان روش‌های جستجو محسوب کرد که به منظور یافتن راه‌حل مناسب در مسائل بهینه‌سازی پیچیده طراحی شده‌اند و از آن‌ها می‌توان به خوبی در شرایط حساس و حیاتی بهره گرفت که اطلاعات ناقص، ناکافی یا منابع محدود (مانند قدرت محاسباتی و زمان) در اختیار است [۷]. ظهور الگوریتم‌های فراابتکاری به منظور حل چنین مسائل بهینه‌سازی، به عنوان یکی از برجسته‌ترین دستاوردهای دو دهه اخیر در پژوهش‌های عملیاتی تلقی می‌شود. [۸].

چالش‌ها و مسائلی نیز وجود دارند که برای حل آن‌ها به توسعه راه‌حل‌های بهتری نیاز است و نمی‌توان از رویکردهای سنتی در حل چنین مسائلی استفاده کرد [۹]. الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توانند در حل این گونه مسائل کاربردی باشند و با رویکردهای مختلف به بهینه‌سازی مسائل غیرخطی بپردازند و عملکرد بهتری نسبت به «روش‌های تکراری (Iterative Methods) و اکتشافی ساده حریصانه Simple Greedy Heuristics» داشته باشند [۱۰].

همچنین، انواع مختلفی از مسائل وجود دارند که حل آن‌ها با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی ساده در رسیدن به بهینه سراسری غیرعملی است. برای مثال، ممکن است در یک مسئله بهینه‌سازی به دلیل وجود متغیرهای تصادفی در تابع هدف پیچیدگی‌هایی وجود داشته و امکان حل مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی (Stochastic Programming) نباشد [۱۱]. به علاوه، در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی با توابع چندهدفه با استفاده از متغیرهای غیرخطی و مسائل هوش مصنوعی و یادگیری ماشین با مجموعه داده‌های بزرگ، یافتن پاسخ بهینه بسیار دشوار است. در چنین مسائلی، الگوریتم‌های فراابتکاری نقش مهمی در حل مسائل ایفا می‌کنند و برتری چشم‌گیری نسبت به سایر روش‌ها دارند [۱۲].

از نظر فناوری بازایی فاز، الگوریتم گرچبرگ ساکستون در ابتدا برای حل مشکل بازسازی جبهه موج در میکروسکوپ الکترونی پیشنهاد شده است و بازایی تکرار شونده فاز با ترکیب اطلاعات شدت صفحه تصویر و صفحه پراش محقق می‌شود [۱۳]. این الگوریتم اساساً یک روش کاهش خطا است و یک الگوریتم ورودی-

خروجی ترکیبی (HIO) را برای حل مشکل رکود همگرایی پیشنهاد کرده است و پایه نظری را برای کاربردهای بعدی بنا نهاده است. از آنجایی که این الگوریتم‌ها می‌تواند به طور مؤثر همبستگی تصویر را پردازش کرده و نتایج بازسازی واضحی ایجاد کند، از سال ۱۹۹۶ به طور گسترده در رمزگذاری تصویر مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴].

در این مقاله به بررسی یک روش ترکیبی رمزگذاری سیگنال صوتی مبتنی بر الگوریتم بازیابی فاز گرچبرگ - ساکستون در حوزه تبدیل فوریه کسری پرداخته و یک مدل ترکیبی به منظور ایجاد امنیت و پنهان‌سازی داده‌ها در کانال‌های اطلاعاتی ارائه شده است. این الگوریتم ابتدا سیگنال صوتی اصلی را به فرمت تصویر کدگذاری و آن را رمزگذاری می‌کند. متعاقباً، الگوریتم بازیابی فاز G-S در حوزه فوریه کسری به منظور استخراج اطلاعات فاز سیگنال صوتی استفاده می‌شود. بر این اساس، فاز صوتی اصلی با یک فاز مرجع که نشان دهنده اطلاعات مخفی است جایگزین می‌گردد تا جاگذاری اطلاعات حاصل شود. این فناوری می‌تواند دو نوع کلید مختلف را مطابق با الزامات رمزگذاری انتخاب کند که این امر دشواری رمزگشایی و تضمین امنیت اطلاعات را افزایش می‌دهد. در نهایت، تصویر رمزگذاری شده را می‌توان رمزگشایی و به سیگنال صوتی اصلی بازیابی کرد. این طرح از طریق جایگزینی و بازیابی اطلاعات فاز، جاسازی و استخراج مؤثر اطلاعات مخفی در سیگنال‌های صوتی را محقق می‌کند [۲۵].

در مطالعه مطرح شده یک روش پنهان‌سازی سیگنال صوتی بر اساس الگوریتم گرچبرگ ساکستون حوزه فوریه کسری پیشنهاد شده است. در این طرح پنهان‌سازی و رمزگذاری سیگنال صوتی ابتدا به ساختار دو بعدی تصویر تبدیل و سپس در کانال‌های مختلف حامل رنگ جاسازی می‌شود. در طول این فرآیند، تصویر به دست آمده از تبدیل صدا که تبدیل سیگنال از حالت یک بعدی به دو بعدی به منظور افزایش اطلاعات است نیز رمزگذاری می‌شود و امنیت راه‌حل کلی را بیشتر افزایش می‌دهد. به طور خاص، این روش ابتدا سیگنال صوتی را به یک تصویر رمزگذاری می‌کند. بر این اساس، فاز صوتی اصلی با یک فاز مرجع که نشان دهنده اطلاعات مخفی است جایگزین می‌گردد تا جاگذاری اطلاعات حاصل شود. این فناوری می‌تواند دو نوع کلید مختلف را مطابق با الزامات رمزگذاری تولید و انتخاب کند که این امر دشواری رمزگشایی و تضمین امنیت اطلاعات را افزایش می‌دهد. در نهایت، تصویر رمزگذاری شده را می‌توان رمزگشایی و به سیگنال صوتی اصلی بازیابی کرد. این طرح از طریق جایگزینی و بازیابی اطلاعات فاز، جاسازی و استخراج مؤثر اطلاعات مخفی در سیگنال‌های صوتی را محقق می‌کند در این طرح امنیت اطلاعات تا حدود ۹۸ درصد افزایش چشم‌گیر داشته است.

۲- ویژگی الگوریتم‌های فراابتکاری

الگوریتم‌های فراابتکاری دارای مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی هستند که آن‌ها را از سایر روش‌های حل مسئله متمایز می‌کنند. از مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۵].

- **ارائه چارچوب در جهت بهینه‌سازی مسائل:** روش‌های فراابتکاری به خودی خود الگوریتم‌های خاصی نیستند، بلکه به عنوان یک رویکردی کلی به منظور حل مسائل بهینه‌سازی محسوب می‌شوند. به عبارتی، این الگوریتم‌ها چارچوبی ارائه می‌کنند که می‌توان با اعمال تغییراتی در آن، در حل مسائل مختلفی مورد استفاده قرار گیرد [۱۶].
- **جستجوی تصادفی (Stochastic):** برخلاف برخی از روش‌های قطعی که از مجموعه قوانین مشخصی به منظور یافتن راه‌حل‌های مناسب در حل مسائل پیروی می‌کنند، روش‌های

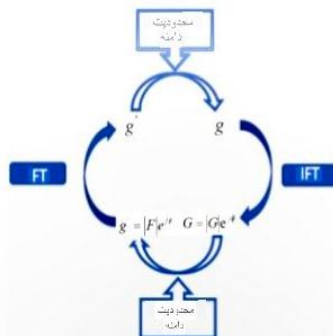
فراابتکاری بر پایه فرایندهای تصادفی شکل گرفته‌اند [۱۷]. استفاده از جستجوی تصادفی به این الگوریتم‌ها کمک می‌کند تا فضای جستجو را به طور موثرتری کاوش کنند و در نقاط بهینه محلی دچار چالش نشوند. مشخصه تصادفی بودن الگوریتم‌های فراابتکاری را می‌توان از طریق روش‌های مختلفی مانند جهش در الگوریتم‌های ژنتیکی یا انتخاب تصادفی نقاط شروع اعمال کرد [۱۸].

• **بهبود تدریجی**: روش‌های فراابتکاری به طور معمول به صورت تکراری عمل می‌کنند. این الگوریتم‌ها با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های اولیه شروع و سپس آن‌ها را در چندین مرحله بهبود می‌بخشند [۱۹]. در هر تکرار، راه‌حل‌ها با استفاده از یک تابع ارزیابی سنجیده می‌شوند، مناطق و مسیر امیدوارکننده (که منتج به هدف می‌شوند) را شناسایی و راه‌حل‌های جدیدی را بر اساس بهترین راه‌حل‌های یافت شده ایجاد می‌کنند. این فرآیند تکراری تا زمانی ادامه می‌یابد که معیار توقف برآورده شود [۲۰].

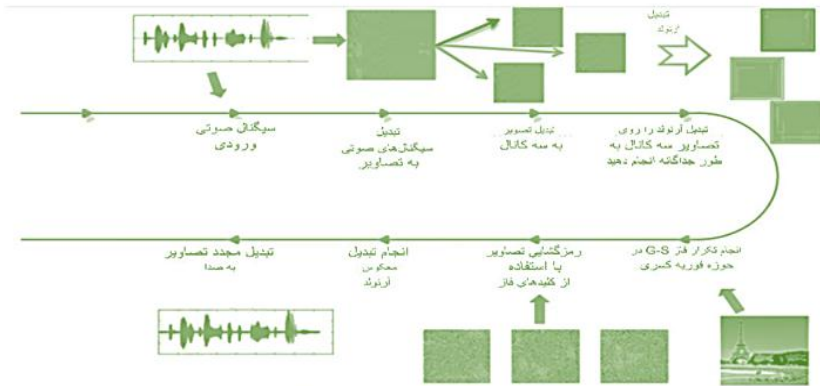
در برقراری تعادل بین کاوش و بهره‌برداری، روش‌های فراابتکاری می‌بایست بین دو جنبه کلیدی تعادل برقرار کنند. کاوش در واقع به توانایی جستجوی مناطق جدید فضای جستجو و کشف راه‌حل‌های بالقوه بهتر اشاره دارد [۲۱]. روش‌های فراابتکاری از طریق تکنیک‌هایی مانند جستجوی تصادفی یا ایجاد تنوع در جمعیت (Population) یا همان راه‌حل‌ها، به کاوش دست می‌یابند [۲۲]. مورد بعد بهره‌برداری از داده‌های استخراج شده است که به توانایی تمرکز بر روی مناطق امیدوارکننده در فضای جستجو و تصفیه راه‌حل‌های یافت شده در آنجا اشاره دارد [۲۳]. تکنیک‌هایی مانند انتخاب و جهش (در الگوریتم‌های ژنتیکی) به بهره‌برداری از مناطق امیدوارکننده کمک می‌کنند [۲۴]. انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری در واقع یکی از مزایای اصلی روش‌های فراابتکاری انعطاف‌پذیری آن‌هاست. این روش‌ها را می‌توان با تغییر عملگرهای خاص و توابع ارزیابی مورد استفاده در چارچوب، به طیف گسترده‌ای از مسائل اعمال کرد [۲۶].

۳- الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم گرچبرگ-ساکستون در واقع یک الگوریتم تکرارشونده جستجو گرانشی است که ابتدا، یک فاز اولیه به صورت دلخواه روی سطح ورودی ارائه داده می‌شود که می‌تواند یک فاز تصادفی را تولید کند. سپس با دامنه نور ترکیب شده تا یک تابع موج تشکیل شود. سپس تبدیل فوریه بر روی تابع موج انجام می‌شود تا تابع G به دست آید. بخش فاز جدید با تابع توزیع دامنه مورد انتظار روی سطح خروجی ترکیب می‌شود تا تابع جدید را تشکیل دهد. سپس تبدیل فوریه معکوس روی تابع G' انجام و فاز به دست آمده در این مرحله در تکرار دوم دوباره با دامنه نور فرودی ترکیب می‌شود. سپس مراحل فوق تکرار می‌شوند. جریان الگوریتم در زیر نشان داده شده است.

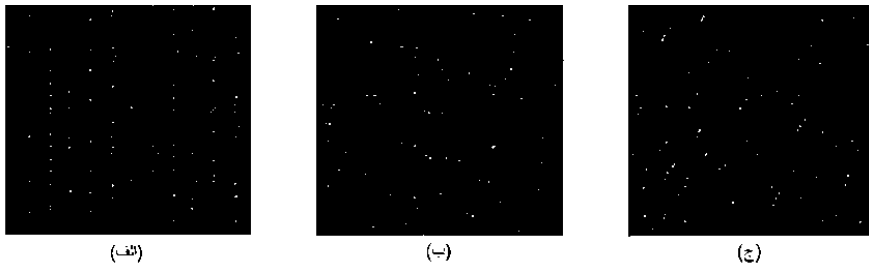


شکل ۱: فرآیند بازیابی سیگنال G-S

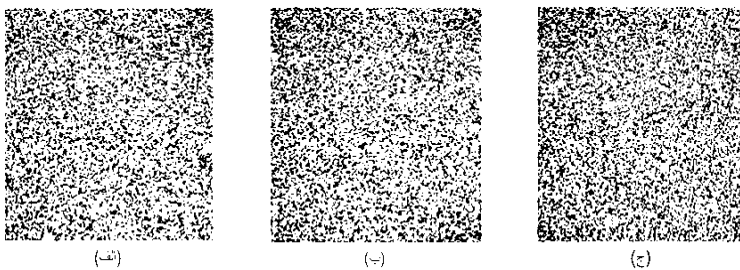


شکل ۲: فلوجارت الگوریتم رمزگذاری و بازیابی سیگنال صوتی

شکل ۳: فلوجارت طراحی پنهان سازی سیگنال و بازیابی فاز



شکل ۴: ترکیب الگوریتم بر روی دامنه



شکل ۵: ترکیب الگوریتم بر روی فاز

سپس، فرآیند تکرار الگوریتم بازیابی فاز G-S حوزه فوریه کسری بر روی هر یک از سه کانال تصویر انجام می‌شود. پس از تکرار، تصاویر کانال مربوطه با استفاده از تبدیل فوریه رمزگشایی می‌شوند و به دنبال آن تبدیل معکوس آرنولد برای به دست آوردن تصویر رمزگشایی شده نهایی انجام می‌شود.

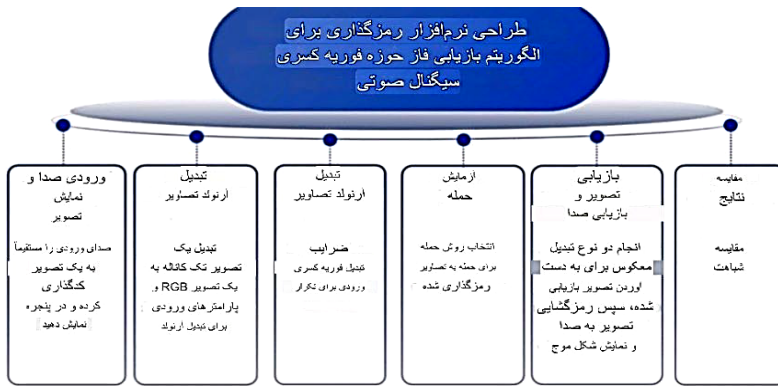
۴- فرآیند مرحله طراحی و بازیابی الگوریتم

تصویر آزمایشی از یک تصویر استاندارد ۵۱۲ پیکسلی استفاده می‌کند و سیگنال واترمارک صوتی از بخش گفتار فرآیند الگوریتمی این آزمایش را می‌توان به شرح زیر توصیف کرد. ابتدا، سیگنال صوتی پردازش شده به

تصویر تبدیل می‌شود. از دیدگاه ماتریسی، صدا بصورت تک کاناله است، در حالی که تصاویر با تصاویر RGB با سه کانال آزمایش می‌شوند. بنابراین، در این حالت، تصویر تک کاناله سه بار تکرار می‌شود تا یک تصویر سه کاناله به دست آید و سپس چالش رمزگشایی را افزایش می‌دهد. در تنظیمات آزمایشی اندازه صدا به تصویر تبدیل شده چالش رمزگشایی را افزایش می‌دهد. در تنظیمات آزمایشی مورد نظر اندازه صدا به تصویر تبدیل شده روی ۲۵۶ در ۲۵۶ پیکسل تنظیم شده است.

نتایج نشان می‌دهد که تصاویر می‌توانند پس از انجام تبدیل آرنولد و معکوس آن به طور کامل بازیابی شوند. شکل های پردازشی این فرآیند را نشان می‌دهد. طرح پیشنهادی با تقویت پیچیدگی کلید رمزگذاری، امنیت رمزگذاری تصویر را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. با محاسبه ضریب همبستگی متقابل، مشخص می‌شود که تفاوت قابل توجهی در تصویر قبل و بعد از تبدیل آرنولد وجود دارد. رمزگذاری این الگوریتم از دو بخش کلید تشکیل شده است. مرتبه a تبدیل فوریه کسری به عنوان بخش اول کلید استفاده می‌شود، در حالی که فاز تولید شده در طول تکرار، بخش دوم را تشکیل و پیاده سازی می‌کند. تنها با استفاده از فاز صحیح به دست آمده از طریق تکرار، می‌توان تصویر رمزگشایی شده صحیح را بدست آورد. در طول فرآیند تکرار الگوریتم $G-S$ ، انتخاب مقادیر مختلف مرتبه تبدیل a تبدیل فوریه کسری نیز می‌تواند نتایج متفاوتی در تصویر رمزگذاری شده ایجاد کند. در این آزمایش، a برابر با 0.8 انتخاب شده است تصاویر در این شبیه‌سازی‌ها، مرتبه اولیه تبدیل فوریه کسری را روی 0.8 تنظیم و از یک تصویر حامل با اندازه $256 \times 256 \times 3$ استفاده شده است. این روش خاص تبدیل صدا به تصویر شامل بازآرایی داده‌های صوتی یک بعدی به تصاویر مربعی دو بعدی و پر کردن هرگونه نقص با رنگ سیاه را شامل می‌گردد. با این حال، با توجه به اینکه داده‌های صوتی معمولاً در محدوده $(-1, 1)$ قرار می‌گیرند، مستعد تداخل نویز علی‌الخصوص نویز گوسی سفید هستند که ممکن است بر کیفیت تصویر و صدا تأثیر بسزایی بگذارد. به منظور کاهش مشکل و بهبود اثربخشی رمزگذاری و رمزگشایی، محدوده داده‌ها را در آزمایش به $(0-255)$ گسترش داده شده است و در نتیجه مقاومت آن در برابر نویز نیز افزایش یافته است. در مرحله بعد، از تبدیل آرنولد به منظور تقویت میزان امنیت رمزگذاری تصویر استفاده می‌گردد. به منظور تطبیق با ویژگی‌های کانال‌های تصویر حامل، تصویر رمزگذاری شده تک کاناله را به سه کانال گسترش و به طور مؤثر کلید تکرار تبدیل تک کاناله اصلی را با یک کلید ترکیبی متشکل از سه تکرار تبدیل آرنولد جایگزین شده است. هر کانال با استفاده از پارامترهای آرنولد متمایز (به طور خاص، ۴۴، ۵۴ و ۶۴) به عنوان کلید اصلی عمل می‌کنند و هر کدام مسولیت تبدیل‌های جداگانه را بر عهده دارند.

پس از وارد کردن کلید فاز و تصویر رمزگذاری شده، با استفاده از تبدیل معکوس فوریه کسری با همان مرتبه کسری فرآیند رمزگذاری، رمزگشایی و در نتیجه تصویر سه کاناله اصلی مورد بازیابی قرار گرفته می‌شود. با این حال، باید توجه داشت که تصویر رمزگشایی شده ممکن است به دلیل عدم وجود مراحل پس از پردازش مانند نرمال‌سازی، مستقیماً محتوای اصلی را نمایش ندهد. بنابراین، ابتدا تصویر را نرمال، سپس تبدیل معکوس آرنولد را به تصویر سه کاناله رمزگشایی شده اعمال تا تصویر رمزگشایی شده به دست آید. متعاقباً، این تصویر با استفاده از یک تابع به یک تصویر خاکستری تک کاناله تبدیل می‌شود.



شکل ۵: فلوچارت و مراحل طراحی نرم افزار رمزگذاری در الگوریتم بازیابی فاز

به منظور پیاده‌سازی فرآیند تبدیل فوریه کسری در فرآیند فوق، این آزمایش یک سیستم نوری مربوطه را ایجاد و اثربخشی الگوریتم را تأیید کرده است. در محیط‌های نوری، از لیزرها، مدولاتورهای نور فضایی، لنزهای فوریه و صفحات نمایش استفاده شد که در صورت نیاز می‌توانند با CCD جایگزین شوند. در طول آزمایش، تصویر تولید شده توسط کامپیوتر که قرار است رمزگذاری شود، از طریق رابط HDMI در مدولاتور نور فضایی بارگذاری می‌شود و مدولاتور، فاز پرتو لیزر را رمزگذاری و میدان نور مدوله شده از یک سیستم نوری تبدیل فوریه کسری متشکل از لنزهای دوگانه عبور می‌کند. توزیع شدت صفحه خروجی توسط CCD جمع‌آوری و به منظور پردازش تکراری به کامپیوتر منتقل می‌شود. در آزمایش تأیید رمزگذاری، تصویر ورودی از طریق یک سیستم نوری تحت تبدیل فوریه کسری قرار می‌گیرد و شدت نور خروجی جمع‌آوری شده به عنوان ورودی برای تکرار بازیابی فاز الگوریتم G-S استفاده می‌شود.



شکل ۶: مراحل حمله و رمزگشایی

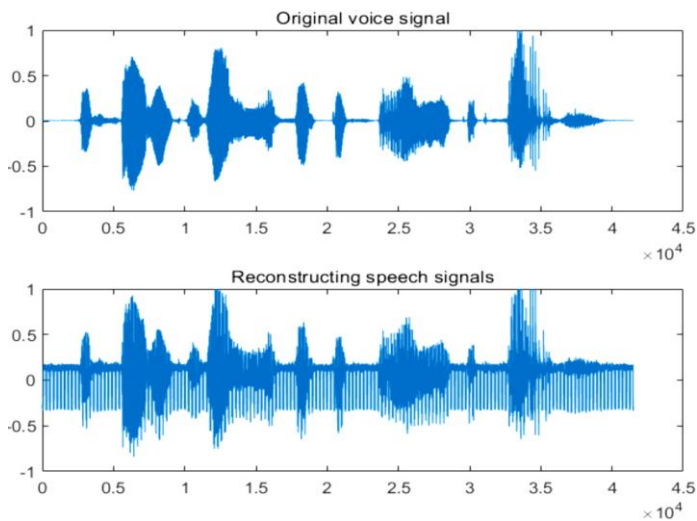


شکل ۷: مراحل تولید شکل موج

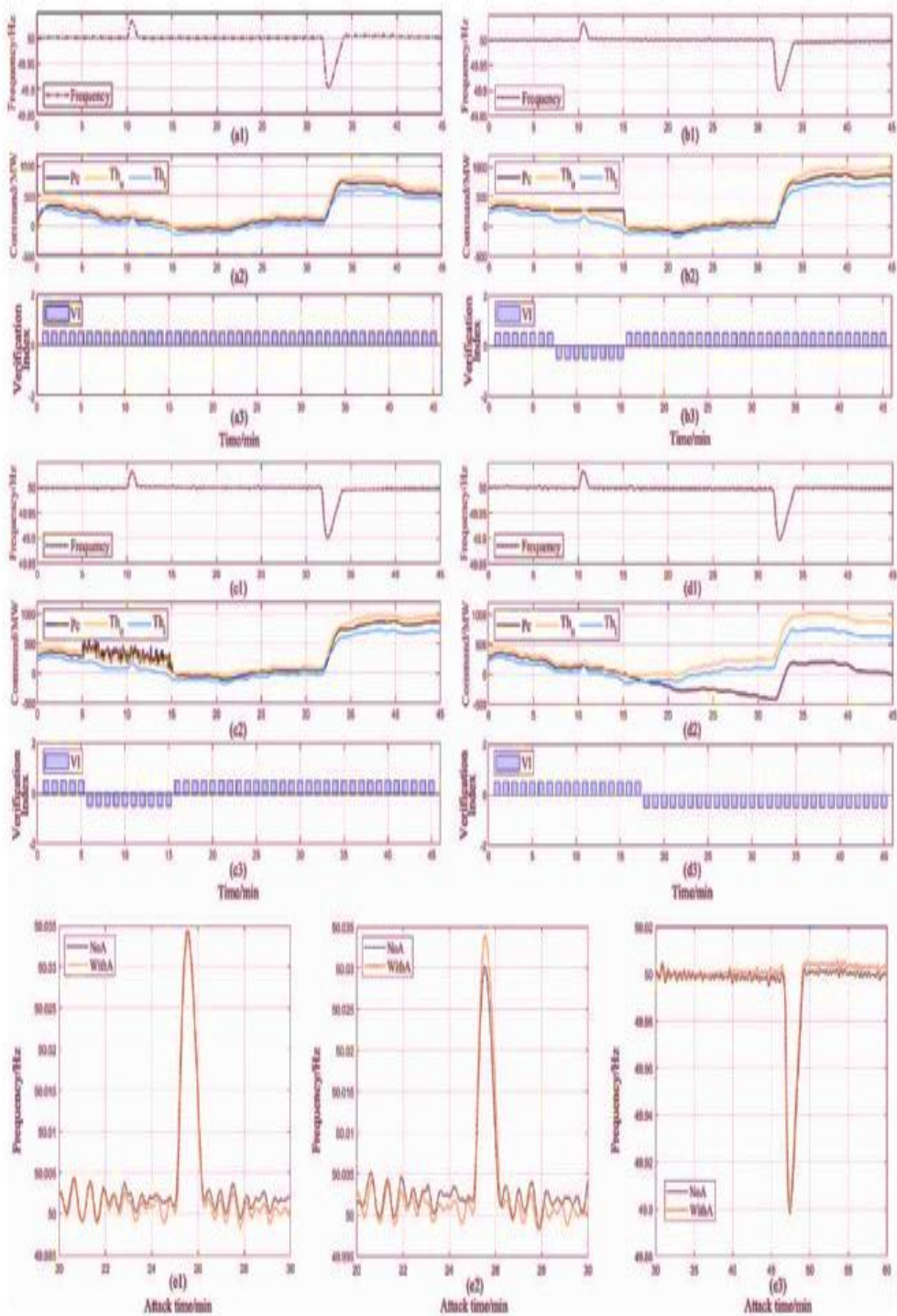
در این آزمایش، به منظور آزمایش مقاومت الگوریتم، پنج روش حمله انتخاب شده است، اضافه کردن نویز سفید، برش جزئی تصویر، چرخاندن تصویر به میزان ۱۰ درجه، فشرده‌سازی تصویر و اضافه کردن نویز نمک و لفل یکی از سه کانال مورد حمله نویز سفید قرار گرفته است. این الگوریتم با زمان اجرای کل تنها ۱.۵۹ ثانیه، ویژگی‌های همگرایی بهتری را شامل می‌گردد که در مقایسه با الگوریتم FT-GS، به طور قابل توجهی ۲۰.۳٪ بهبود کارایی را نشان می‌دهد. در نهایت، از نظر کیفیت بازاریابی، این الگوریتم به بالاترین نسبت سیگنال به نویز بیک (۳۳.۴۷۹۹ دسی‌بل) دست یافت که عملکرد بسیار مناسب آن را در حفظ کیفیت بازاریابی سیگنال و در عین حال بهبود کارایی محاسباتی کاملاً نشان می‌دهد. این بخش به صورت نظری پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی را تجزیه و تحلیل می‌کند و از طریق آزمایش‌ها، کارایی زمانی آن را با روش‌های موجود مقایسه می‌کند تا عملی بودن و برتری آن را تأیید کند. این مطالعه تفاوت‌های عملکرد بین الگوریتم سنتی G-S (FT-GS) و الگوریتم پیشنهادی G-S با دامنه کسری (FrFT-GS) مورد مقایسه قرار داده است. در حالی که FrFT-GS در دامنه کسری بهینه (p 0.8) عمل می‌کند. این آزمایش از تصاویر ۲۵۶ در ۲۵۶ پیکسل به عنوان داده‌های آزمایشی استفاده کرده است. زمان تکرار هر دو الگوریتم به طور یکنواخت روی ۵۰ بار تنظیم شد و از حمله نویز سفید برای آزمایش استفاده شد. شاخص‌های ارزیابی شامل زمان تکرار تکی، زمان کل اجرا و نسبت سیگنال به نویز اوج (PSNR) است.



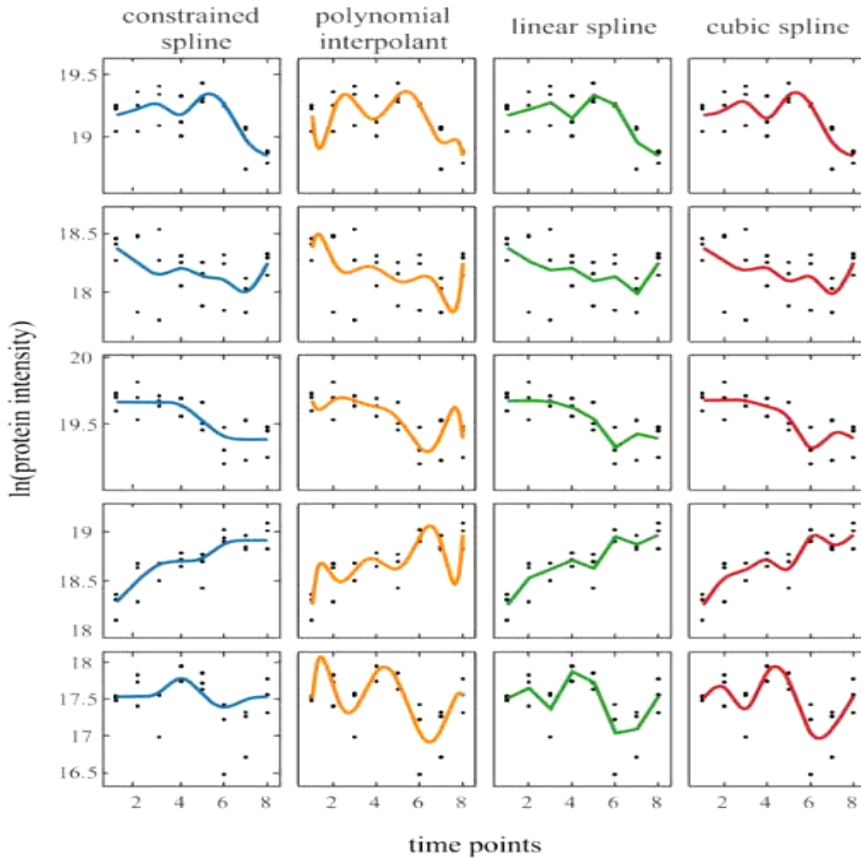
شکل ۸: نمایش آزمایش نوری با استفاده از لنز فوریه



شکل ۹: نمایش نتایج خروجی با استفاده از لنز فوریه



شکل ۱۰- نتایج راستی آزمایی تحت ناهنجاری های مختلف



شکل ۱۱: نتایج درون یابی سیگنال در حالت و نقاط مختلف

در این بخش به صورت نظری پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و از طریق آزمایش‌ها، کارایی زمانی آن را با روش‌های موجود مقایسه می‌کند تا عملی بودن و برتری آن را تأیید کند. این مطالعه تفاوت‌های عملکردی بین الگوریتم سنتی $G-S$ (FT-GS) و الگوریتم پیشنهادی GS با دامنه کسری (FrFT-GS) را مورد مقایسه قرار داده است. این آزمایش از تصاویر 256×256 پیکسلی به عنوان داده‌های آزمایشی استفاده و زمان تکرار هر دو الگوریتم به طور یکنواخت روی ۵۰ بار تنظیم و از حمله نویز سفید برای آزمایش استفاده شده است. شاخص‌های ارزیابی شامل زمان تکرار تکی، زمان کل اجرا و نسبت سیگنال به نویز پیک (PSNR) است. جدول ۳ نتایج مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف را تحت معیارهای همگرایی یکسان نشان می‌دهد.

جدول ۱: چرخه نقشه آرلوند در تصاویر ورودی با اندازه‌های مختلف

اندازه	۴×۴	۸×۸	۳۲×۳۲	۶۴×۶۴	۱۲۸×۱۲۸	۲۵۶×۲۵۶
چرخه	۳	۶	۱۲	۱۸	۲۴	۳۶

جدول ۲: ضرایب همبستگی متقابل تصویر آرلود و تصویر اصلی

تبدیل آرلود	۰.۷۵۸۹	۰.۸۵۲۱	۰.۹۱۴۷
تصویر اصلی	۴۴	۵۴	۶۴

جدول ۳: مقایسه الگوریتم سنتی در این زمینه و روش ترکیبی پیشنهادی

الگوریتم	تعداد نمونه ها	دوره تناوب	مجموع زمان ها	PSNR
FT-GS	۵۰	۳۵	۷.۳۲۱	۳۱.۲۱
FR-FT-GS	۵۰	۲۷	۴.۰۲۱	۳۵.۷۹

۵- نتیجه گیری:

بر اساس رمزگذاری تصویر دیجیتال، و یک سیستم نرم‌افزاری یکپارچه و ماژولار را طراحی و پیاده‌سازی می‌کند. این سیستم با موفقیت فرآیند پیچیده را به پنج ماژول اصلی تجزیه می‌کند: رمزگذاری صدا، رمزگذاری تصویر، تأیید حمله، بازیابی تصویر و مقایسه نتایج، که به طور قابل توجهی عملکرد و قابلیت نگهداری سیستم را بهبود می‌بخشد. هسته سیستم یک طرح رمزگذاری را اتخاذ می‌کند که تبدیل آرلود و تبدیل فوریه کسری را ترکیب می‌کند و به طور موثر امنیت و قابلیت ضد حمله پنهان‌سازی اطلاعات را از طریق رمزگذاری دوگانه افزایش می‌دهد. در عین حال، یک سیستم تأیید و ارزیابی شامل چندین روش حمله، همراه با شاخص‌های ارزیابی کیفیت صدای عینی، ایجاد شده است تا به تجزیه و تحلیل کمی علمی از استحکام الگوریتم دست یابد. رابط کاربری گرافیکی توسعه‌یافته، کل فرآیند را از رمزگذاری، رمزگذاری، حمله تا بازیابی به طور کامل نشان می‌دهد و به طور شهودی اثربخشی و امکان‌سنجی راه حل را تأیید می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی دارای امنیت بالا و استحکام قوی است و یک راه حل موثر برای پنهان‌سازی اطلاعات ایمن و قابل اعتماد ارائه می‌دهد.

مراجع:

- [1] V. Dankan Gowda, A. Pola, J. R. Hershey, Z. Chen, J. Le Roux, and S. Watanabe, "Deep clustering: discriminative embeddings for segmentation and separation," in International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2022
DOI: <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-0330-7.ch008>
- [2] Z. Wang, J. Le Roux, and J. R. Hershey, "Multi-channel Deep Clustering: Discriminative spectral and spatial embeddings for speaker-independent speech separation," in International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2023.
- [3] Akhtar, M.S., Ekbal, A., Cambria, E.: How intense are you? predicting intensities of emotions and sentiments using stacked ensemble [application notes]. IEEE Computational Intelligence Magazine 15(1), 64–75 (2020)
- [4] M. Alajeely, R. Doss, and A. Ahmad, "Routing Protocols in Opportunistic Networks – A Survey," *IETE Tech. Rev.*, vol. 35, no. 4, pp. 369–387, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02564602.2017.1304834>
- [5] K. Ahmad, M. Fathima, M. S. Hossen, J. Ahamed, and K. A. Bin Ahmad, "Opportunistic Networks: An Empirical Research of Routing Protocols and Mobility Models," *SN Comput. Sci.*, vol. 4, no. 5, p. 652, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02054-y>

- [6] Alhussan, A., M. Talaat, F., El-kenawy, E.S., Abdelhamid, A., Ibrahim, A., Khafaga, D., Alnagar, M.: Facial expression recognition model depending on optimized support vector machine. *Computers, Materials and Continua* 76, 499–515 (06 2023).
<https://doi.org/10.32604/cmc.2023.039368>
- [7] R. Dalal, M. Khari, J. P. Anzola, and V. Garcia-Diaz, “Proliferation of Opportunistic Routing: A Systematic Review,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 5855–5883, 2022.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3136927>
- [8] Li, H., Wang, N., Yang, X., Wang, X., Gao, X.: Towards semi-supervised deep facial expression recognition with an adaptive confidence margin. 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) pp. 4156–4165 (2022), <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:247618790>
- [9] Li, S., Deng, W.: Reliable crowdsourcing and deep locality-preserving learning for unconstrained facial expression recognition. *IEEE Transactions on Image Processing* 28(1), 356–370 (2019). <https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2868382>
- [10] Liu, F.: Artificial intelligence in emotion quantification : A prospective verview. *CAAI Artificial Intelligence Research* 3, 9150040 (2024).
<https://doi.org/10.26599/AIR.2024.9150040>, <https://www.scipopen.com/article/10.26599/AIR.2024.9150040>
- [11] S. Esmaili and J. Ghasemi, “A location-aware covert communication protocol in inter-environmental communication applications,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 123, pp. 592–609, 2025.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.03.087>
- [12] Liu, F., Wang, H.Y., Shen, S.Y., Jia, X., Hu, J.Y., Zhang, J.H., Wang, X.Y., Lei, Y., Zhou, A.M., Qi, J.Y., Li, Z.B.: Opo-fcm: A computational affection based occpad-ocean federation cognitive modeling approach. *IEEE Transactions on Computational Social Systems* 10(4), 1813–1825 (2023). <https://doi.org/10.1109/TCSS.2022.3199119>
- [13] E. H. Houssein, M. R. Saad, Y. Djenouri, G. Hu, A. A. Ali, and H. Shaban, “Metaheuristic algorithms and their applications in wireless sensor networks: review, open issues, and challenges,” *Cluster Comput.*, vol. 27, no. 10, pp. 13643–13673, 2024.
 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04619-9>
- [14] D. Bahrepour, N. Evaznia, and T. Khodabakhshi, “A New Resource Allocation Method Based on PSO in Cloud Computing,” *Int. J. Web Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 13–21, 2024.
 DOI: <https://doi.org/10.22133/ijwr.2024.457539.1216>
- [15] Liu, H., Cai, H., Lin, Q., Li, X., Xiao, H.: Adaptive multilayer perceptual attention network for facial expression recognition. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 32(9), 6253–6266 (2022)
- [16] N. Evaznia, R. Ebrahimi, and D. Bahrepour, “An Energy-Aware Approach to Virtual Machine Consolidation Using Classification and the Dragonfly Algorithm in Cloud Data Centers,” *J. Inf. Syst. Telecommun.*, vol. 12, no. 48, pp. 280–290, 2025.
 DOI: <https://doi.org/10.61186/jist.48021.12.48.280>
- [17] Ngwe, J.L., Lim, K.M., Lee, C.P., Ong, T.S., Alqahtani, A.: Patt-lite: Lightweight patch and attention mobilenet for challenging facial expression recognition. *IEEE Access* 12, 79327–79341 (2024). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3407108>
- [18] S. Chaurasia and K. Kumar, “EEMOR: Energy Efficent Metaheuristic Opportunistic Routing Protocol for WSNs.,” *Adhoc Sens. Wirel. Networks*, vol. 55, 2023.
 DOI: <https://doi.org/10.32908/ahsw.n.v55.9265>

- [19] M. Sharifi Sani, S. Iranmanesh, H. Salarian, F. Tubbal, and R. Raad, "Optimizing Energy Efficiency in Opportunistic Networks: A Heuristic Approach to Adaptive Cluster-Based Routing Protocol," *Information*, vol. 15, no. 5, p. 283, 2024.
DOI: <https://doi.org/10.3390/info15050283>
- [20] Y. Zing and N. Zhao, "Routing revolution: strategic applications of meta-heuristic AI in wireless sensor networks—a comprehensive survey," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 84, no. 35, pp. 44605–44646, 2025.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-025-20843-w>
- [21] S. Chaurasia, K. Kumar, and A. K. Kamboj, "EHRP-WSN: Energy-Efficient Hyperheuristic Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 202, p. 156044, 2025.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2025.156044>
- [22] J. M. Belman-Flores, D. A. Rodríguez-Valderrama, S. Ledesma, J. J. García-Pabón, D. Hernández, and D. M. Pardo-Cely, "A Review on Applications of Fuzzy Logic Control for Refrigeration Systems," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 3, p. 1302, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031302>
- [23] Qian, B., Chen, H., Xu, Y., Wen, Y., Li, H., Xie, Y., Feng, D.D., Kim, J., Bi, L., Xu, X., He, X., Sheng, B.: Deep contour attention learning for scleral deformation from oct images. *The Visual Computer* pp. 1–16 (2024)
- [24] She, J., Hu, Y., Shi, H., Wang, J., Shen, Q., Mei, T.: Dive into ambiguity: Latent distribution mining and pairwise uncertainty estimation for facial expression recognition. In: *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. pp. 6244–6253 (2021).
<https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.00618>
- [25] Khalilpour, J., Moradi, S. H., & Zarezadeh, I. (2023). Design and fabrication of Fabry-Perot fiber optic sensor with FMCW phase extraction method for acoustic detection implementation. *Journal of Acoustical Engineering Society of Iran*, 10(2)
<http://joasi.ir/article-1-238-fa.html>
- [26] M. F. Khan, E. A. Felemban, S. Qaisar, and S. Ali, "Performance Analysis on Packet Delivery Ratio and End-to-End Delay of Different Network Topologies in Wireless Sensor Networks (WSNs)," in *2013 IEEE 9th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, IEEE, pp. 324–329, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MSN.2013.74>