

# جهت‌یابی زمان‌حقیقی منابع صوت زیر آب با

## استفاده از واحد پردازنده گرافیکی

احسان ایمانی‌فر<sup>۱</sup>، امیر اخوان<sup>۲\*</sup> و علی‌اصغر آبنیکی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی پزشکی-بیوالکتریک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

<sup>۳</sup>مرکز پژوهشی مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

جهت‌یابی منابع صوت به‌کمک روش‌های مبتنی بر آرایه فازی، اهمیت فراوانی در حوزه‌های مختلف از جمله سونار، بینایی ربات و تشخیص عیوب مکانیکی دارد. روش‌های شکل‌دهی پرتو وقتی، از جمله الگوریتم کمینه‌واریانس بدون‌اعوجاج از قدرت تفکیک بالایی نسبت به روش‌های غیروقتی برخوردار هستند؛ اما این برتری در ازای پیچیدگی محاسباتی این الگوریتم‌ها به‌دست آمده است. این مسئله باعث می‌شود در کاربردهایی که نیاز به جهت‌یابی زمان‌حقیقی منبع صوت دارند، به‌ندرت از این الگوریتم‌ها استفاده شود. از سوی دیگر، یک ویژگی مهم روش‌های شکل‌دهی پرتو وقتی از جمله کمینه‌واریانس، پتانسیل بالای این الگوریتم‌ها برای موازی‌سازی است. هدف این مقاله، پیاده‌سازی موازی الگوریتم کمینه‌واریانس با به‌کارگیری واحد پردازنده گرافیکی (GPU) به جای واحد پردازنده مرکزی (CPU)، به‌منظور افزایش سرعت اجرا و رسیدن به حالت زمان‌حقیقی است. برای دستیابی به این هدف از مدل برنامه‌نویسی کودا برای پیاده‌سازی الگوریتم بر روی پردازنده گرافیکی استفاده شده است. به‌منظور بررسی عملکرد پیاده‌سازی موازی الگوریتم کمینه‌واریانس، دو مدل GPU متفاوت و همچنین CPU به‌کاربرده شده است. صحت عملکرد پیاده‌سازی‌های مختلف در این مقاله به‌وسیله داده‌های واقعی سونار و همچنین داده‌های شبیه‌سازی تأیید شد. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از یک آرایه ۶۴ حس‌گره، جهت‌یابی منابع صوت زیر آب را با استفاده از الگوریتم کمینه‌واریانس به‌صورت زمان‌حقیقی و با قدرت تفکیک بالا تخمین زد. واژگان کلیدی: جهت‌یابی منابع صوت، الگوریتم کمینه‌واریانس، پردازش موازی، واحد پردازنده گرافیکی، مدل برنامه‌نویسی کودا.

## Real-Time DOA Estimation of Underwater Sound Sources Using GPU

Ehsan Imanifar<sup>1</sup>, Amir Akhavan<sup>2\*</sup> & Ali Asghar Abniki<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Biomedical Engineering-Bioelectric, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Center of Excellence in Hydrodynamics and Dynamic of Marine Vehicles, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

Direction of Arrival (DOA) estimation of sound sources using phased array-based methods has a lot of importance in various fields, including sonar, robot vision, and mechanical defect detection. Adaptive beamforming methods, such as the MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) algorithm, have high resolution compared to non-adaptive methods (Delay and Sum algorithm); but this advantage is achieved in return for the computational complexity of these algorithms. This makes it hard to use these algorithms in applications that require real-time sound source DOA estimation. On the other hand, an important feature of the adaptive beamforming methods including MVDR is the high potential of these algorithms for parallelization. The purpose of this paper is the parallel implementation of the MVDR algorithm by employing Graphical Processor Unit (GPU) instead of Central Processor Unit (CPU) to increase the execution speed and achieve the real-time mode. For this purpose, the CUDA

\* Corresponding author

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات

سال ۱۴۰۰ شماره ۲ پیاپی ۴۸

• تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱/۱۱ • تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۲ • تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷ • نوع مطالعه: پژوهشی



(Compute Unified Device Architecture) programming model has been used to implement the algorithm on the GPU. CUDA is a parallel computing platform and application programming interface (API) model created by Nvidia. It allows software developers to use a CUDA-enabled GPU for parallel processing. In order to investigate the performance of parallel implementation of the MVDR algorithm, two different GPUs, as well as CPUs, have been used. The performance validity of various implementations in this paper was confirmed by real sonar data as well as simulation data. The results show that using an array of 64 sensors, it is possible to estimate the DOA of underwater sound sources in real-time mode and with high resolution using the MVDR algorithm.

**Keywords:** DOA estimation of sound sources, MVDR algorithm, Parallel processing, GPU, CUDA.

زمان حقیقی بودن این الگوریتم‌ها می‌شود [13]. کاربرد سونار یکی از حوزه‌هایی است که جهت‌یابی زمان حقیقی منبع صوت در آن ضروری است؛ بنابراین در این مقاله تلاش شده است که داده‌های واقعی ثبت‌شده سونار را پردازش کرده و راستای منابع صوت زیر آب را به صورت زمان حقیقی تعیین کنم. پردازش زمان حقیقی الگوریتم‌های جهت‌یابی منجر به حذف تأخیر در دریافت نتیجه جهت‌یابی و به‌روزرسانی همیشگی اطلاعات خروجی آن می‌شود. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم کمینه‌وارانس ناشی از محاسبه بردار وزن موردنیاز به منظور شکل‌دهی پرتو دریافت شده است. چنانچه تعداد حس‌گرهای آرایه با  $M$  نمایش داده شود، پیچیدگی الگوریتم DAS و کمینه‌وارانس به ترتیب از مرتبه  $M$  و  $M^3$  است. علت این پیچیدگی محاسباتی در الگوریتم کمینه‌وارانس، نیاز به تخمین ماتریس کواریانس<sup>5</sup> به ابعاد  $M \times M$  و محاسبه معکوس آن به‌ازای هر جهت خاص است. با توجه به عملکرد مناسب الگوریتم کمینه‌وارانس، در مقاله پیش‌رو از این روش به‌عنوان روش مبنا استفاده می‌شود.

تاکنون روش‌های زیادی برای کاهش پیچیدگی الگوریتم کمینه‌وارانس ارائه شده‌اند. در روش‌های مبتنی بر فضای پرتو<sup>6</sup> از یک ماتریس تبدیل متعامد برای تصویر کردن داده‌ها به یک فضای با بُعد پایین و در نتیجه کاهش حجم محاسبات استفاده می‌شود [15,16]. در [17] تعدادی پنجره وزن‌دار از پیش تعیین‌شده در نظر گرفته و از بین آنها، پنجره‌ای که کمترین توان خروجی را ایجاد می‌کند انتخاب می‌شود. به این ترتیب پیچیدگی الگوریتم کمینه‌وارانس پیشنهادشده در این مقاله، تا  $P$  برابر پیچیدگی الگوریتم DAS کاهش یافته و  $P$  تعداد پنجره‌های وزن‌دار از پیش تعیین‌شده است. در [18] از تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>7</sup> برای کاهش پیچیدگی محاسبه بردار وزن بهینه در روش کمینه‌وارانس استفاده شده است. رویکردهای دیگری نیز در [19–21] مطرح شده‌اند که هر یک از آنها فرض‌ها و یا تقریب‌هایی را برای کاهش پیچیدگی محاسباتی الگوریتم کمینه‌وارانس استفاده

## ۱- مقدمه

یکی از موضوعاتی که امروزه ذهن بسیاری از پژوهش‌گران را به خود مشغول کرده است، مسأله موقعیت‌یابی و جهت‌یابی یک شیء و یا یک هدف است. یکی از اقسام جهت‌یابی، جهت‌یابی صوتی است که هدف آن، ره‌گیری جسمی است که منبع سیگنال صوت بوده و یا صوت ارسالی را منعکس می‌کند.

روش‌های جهت‌یابی صوت اغلب روش‌های مبتنی بر آرایه فازی و شکل‌دهی پرتو [1–3] هستند. در این نوع جهت‌یابی، از سیگنال صوت دریافتی، به‌منظور تعیین جهت دقیق منبع استفاده می‌شود. به این شکل که در آن، جهت‌یابی بر اساس تغییرات سیگنال منتشرشده از هدف و دریافت آن در آرایه‌ای از حس‌گرها و بررسی تفاوت‌های سیگنال‌های دریافت‌شده انجام می‌گیرد. پایه اصلی روش‌های شکل‌دهی پرتو، جبران مناسب تأخیرهای زمانی ای است که امواج هنگام رسیدن به چند گیرنده جدا از هم دچار آن می‌شوند.

از مهم‌ترین روش‌های جهت‌یابی می‌توان به تأخیر و جمع ( $DAS^1$ ) [4]، کمینه‌وارانس بدون‌اعوجاج ( $MVDR^2$ ) [4]، طبقه‌بندی سیگنال چندگانه ( $MUSIC^3$ ) [5] و روش‌های مبتنی بر تنک‌بودن [6,7] اشاره کرد. در این میان کمینه‌وارانس از معروف‌ترین روش‌های جهت‌یابی است. الگوریتم کمینه‌وارانس در سال ۱۹۶۷ توسط Capon معرفی شد [8]. جهت‌یابی با استفاده از این روش، کاربرد زیادی در تصویربرداری با شیوه‌های مختلف از جمله سونار [9]، فراصوت [10–13] و رادار [14] دارد. این الگوریتم جزو دسته شکل‌دهنده‌های پرتو وقتی است؛ به این معنی که جهت‌یابی در آن متناسب با ویژگی‌های سیگنال رسیده به حس‌گرها انجام می‌شود. شکل‌دهنده‌های پرتو وقتی نسبت به الگوریتم‌های غیروقتی، قدرت تفکیک بالاتری دارند؛ اما به‌دلیل حجم و پیچیدگی زیاد محاسبات در این شکل‌دهنده‌ها، زمان اجرای آن‌ها نیز بیشتر شده و مانع تحقق ویژگی

<sup>1</sup> Delay and Sum

<sup>2</sup> Minimum Variance Distortionless Response

<sup>3</sup> Multiple Signal Classification

<sup>4</sup> Sparsity based methods

<sup>5</sup> Covariance matrix

<sup>6</sup> Beam Space

<sup>7</sup> Principal Component Analysis (PCA)

که در آن  $s$  سیگنال دلخواه،  $n$  نویز موجود در محیط،  $\tau_m$  و  $t$  به ترتیب تأخیر زمانی سیگنال رسیده به حس گر  $m$  و شاخص زمان هستند. خروجی شکل‌دهنده پرتو (B) در حوزه فرکانس، طبق رابطه (۲) به دست می‌آید (شکل-۱):

$$B(\omega, \theta) = \sum_{m=1}^M w_m^*(\omega, \theta) \cdot y_m(\omega) = w^H(\omega, \theta) \times y(\omega) = w^H y \quad \dots \quad (2)$$

که در آن  $w_m$  وزن مربوط به حس گر  $m$ ،  $y_m$  خروجی حس گر  $m$  در حوزه فرکانس،  $w = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$  بردار وزن‌ها،  $y = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$  بردار خروجی حس‌گرها،  $(.)^H$  و  $(.)^*$  به ترتیب نشان‌دهنده مزدوج و هرمیتین<sup>۴</sup> هستند و  $\omega$  و  $\theta$  به ترتیب شاخص فرکانس زاویه‌ای و شاخص زاویه هستند.

الگوریتم DAS از پیشینه توان خروجی شکل‌دهنده پرتو به‌ازای زوایای مختلف، به‌منظور تخمین راستای منبع سیگنال دریافتی استفاده می‌کند [3]. توان خروجی شکل‌دهنده پرتو در حالت کلی، طبق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$P_{out}(\omega, \theta) = E(|B(\omega, \theta)|^2) = w^H R w \quad (3)$$

که در آن  $E$  نماد امید ریاضی و  $R$  ماتریس کواریانس مکانی آرایه است و به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$R(\omega) = E(y \times y^H) \quad (4)$$

الگوریتم DAS یک روش شکل‌دهی پرتو غیروفتی است، در این الگوریتم بردار وزن‌ها ( $w$ ) برابر بردار جهت‌دهی (a) است که به‌صورت رابطه زیر است:

$$w_{DAS}(\omega, \theta) = [e^{-j\omega\tau_1}, e^{-j\omega\tau_2}, \dots, e^{-j\omega\tau_M}]^T \quad (5)$$

در شکل‌دهنده پرتو کمینه‌واریانس، بردار وزن‌ها متناسب با سیگنال‌های دریافتی به دست می‌آیند. در این الگوریتم بردار وزن‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شود که توان خروجی شکل‌دهنده کمینه شده، به شرطی که توان سیگنال اصلی در خروجی تضعیف نشود این مسأله به زبان ریاضی به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود [24].

$$\min (w^H R w) \quad s. t. \quad w^H a = 1 \quad (6)$$

با حل این مسأله کمینه‌سازی مقید توسط روش ضرایب لاگرانژ، بردار وزن بهینه الگوریتم کمینه‌واریانس به صورت رابطه (۷) تعیین می‌شود [25]:

$$w_{MVDR}(\omega, \theta) = \frac{R^{-1} a}{a^H R^{-1} a} \quad (7)$$

برای رفع مشکل تکینگی<sup>۵</sup> ماتریس کواریانس و همچنین کاهش حساسیت الگوریتم کمینه‌واریانس به خطای بردار

کرده‌اند؛ در نتیجه هیچکدام دقت و وضوح الگوریتم اصلی معرفی شده توسط کپن<sup>۱</sup> را ندارند؛ لذا هدف اصلی از این مقاله افزایش سرعت پیاده‌سازی الگوریتم کمینه‌واریانس به‌منظور اجرای زمان حقیقی آن است. در این راستا از رویکرد برنامه‌نویسی موازی به‌منظور رسیدن به سرعت اجرای قابل قبول استفاده شده است [22].

یکی از حوزه‌های پردازشی که قابلیت موازی‌سازی زیادی دارد، شکل‌دهی پرتو است؛ به همین دلیل برای رسیدن به هدف اصلی این مقاله، از قدرت پردازش موازی در واحدهای پردازنده گرافیکی (GPUها) استفاده می‌کنیم. تعداد هسته‌های پردازشی واحد پردازنده گرافیکی، چندین برابر بیشتر از تعداد این هسته‌ها در واحد پردازنده مرکزی (CPU) است؛ اما قدرت پردازشی هر هسته GPU بسیار کمتر از یک هسته CPU است [23]. در این مقاله به‌منظور پردازش موازی الگوریتم کمینه‌واریانس روی GPU از مدل برنامه‌نویسی کودا (CUDA<sup>۲</sup>) استفاده می‌کنیم. کودا در ماه ژوئن سال ۲۰۰۷ به‌وسیله شرکت انویدیا معرفی شد [23] و تا به امروز توابع و جعبه‌ابزارهای کاربردی بسیاری به آن اضافه شده‌اند.

ادامه مقاله به این شکل است. در بخش ۲ الگوریتم کمینه‌واریانس و روابط حاکم بر آن بیان می‌شود. بخش ۳ به معرفی واحد پردازنده گرافیکی و مدل برنامه‌نویسی کودا می‌پردازد؛ در ادامه در بخش ۴ نحوه پیاده‌سازی الگوریتم کمینه‌واریانس بر روی GPU بیان و سپس نتایج به دست‌آمده از اجرای این الگوریتم روی داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده در بخش ۵ نمایش داده و در انتها نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

## ۲- شکل‌دهی پرتو به روش کمینه واریانس

با توجه به این که روش DAS مبنای روش کمینه‌واریانس است در ادامه به‌اختصار روش DAS در حوزه فرکانس بیان می‌شود و سپس به ارائه روش شکل‌دهی پرتو کمینه واریانس می‌پردازیم. فرض کنید یک آرایه متشکل از  $M$  حس گر داریم که در موقعیت‌های  $\{r_1, r_2, \dots, r_M\}$  قرار گرفته‌اند. در الگوریتم‌های شکل‌دهی پرتو، خروجی حس گر  $m$  را به‌صورت رابطه (۱) در نظر می‌گیریم:

$$\hat{y}_m(t) = s_m(t - \tau_m) + n_m(t - \tau_m) \quad (1)$$

<sup>1</sup> Capon

<sup>2</sup> Compute Unified Device Architecture

<sup>3</sup> Toolbox

<sup>4</sup> Hermitian

<sup>5</sup> Singularity

توان خروجی شکل‌دهنده پرتو در الگوریتم کمینه‌وارینانس طبق رابطه‌های (۳) و (۷) به صورت رابطه (۹) ساده می‌شود:

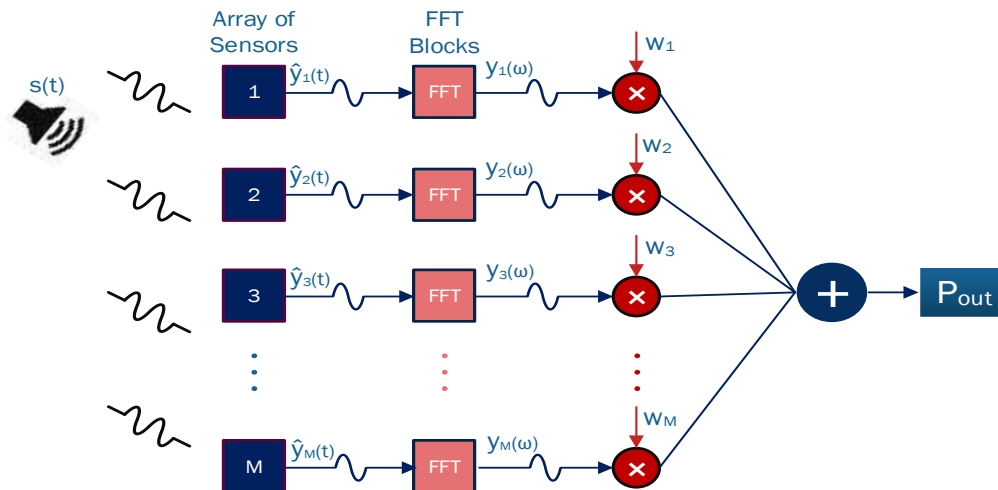
$$P_{out\_MVDR}(\omega, \theta) = \frac{1}{a^H \hat{R}^{-1} a} \quad (9)$$

رابطه (۹) طیف توان فرکانسی-زاویه‌ای الگوریتم کمینه‌وارینانس را نشان می‌دهد.

جهت‌دهی [26]، از بارگذاری روی درایه‌های قطری به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\hat{R}(\omega) = R(\omega) + I \cdot \varepsilon \cdot \text{trace}\{R(\omega)\} \quad (8)$$

که در آن  $I$  ماتریس همانی،  $\varepsilon$  یک ضریب از پیش تعیین‌شده و  $\text{trace}\{\cdot\}$  عملگر محاسبه‌گر مجموع مقادیر قطر اصلی است.

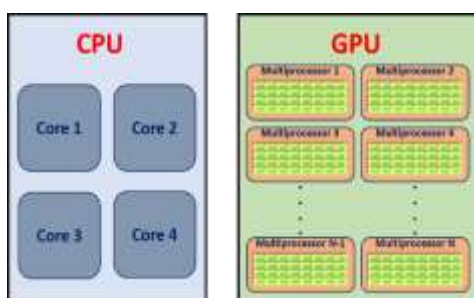


(شکل-۱): نمایش ساختار شکل‌دهنده پرتو در حوزه فرکانس  
(Figure-1): Exhibition of the beamformer structure in frequency domain

### ۳- واحد پردازنده گرافیکی

ویژگی اصلی GPU تعداد هسته‌های پردازشی آنها است؛ شکل (۲) تفاوت اصلی میان معماری داخلی CPU و GPU را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل مشخص است، GPU از هسته‌های پردازشی بسیار بیشتری نسبت به یک CPU تشکیل شده است و این ویژگی، قابلیت پردازش موازی را به GPU می‌دهد. اگرچه CPUها از هسته‌های پردازشی قوی‌تری بهره‌مند هستند، ولی در شرایطی که بخواهیم عملیاتی با محاسبات کم را به صورت مکرر انجام دهیم، استفاده از GPU و پردازش موازی از نظر زمان و سرعت انجام عملیات بسیار به صرفه‌تر است.



(شکل-۲): مقایسه معماری داخلی CPU و GPU  
(Figure-2): CPU/GPU interior architecture comparison

با استفاده از بردار وزن به دست آمده در روش کمینه‌وارینانس (رابطه ۷) توان نوفه در خروجی شکل‌دهنده پرتو کمینه می‌شود. گفتنی است که به طور کلی نوفه موجود در سامانه‌های جهت‌یابی صوت را می‌توان به دو نوع نوفه‌های جهت‌دار (ناشی از منابع صوت غیر هدف) و نوفه‌های تصادفی (نوفه‌های بدون جهت) تقسیم بندی کرد. در الگوریتم پیاده‌سازی شده در این مقاله دو نوع فیلتر برای کاهش اثر نوفه‌های یادشده وجود دارد. نخستین فیلتر در حوزه فرکانس اعمال شده است؛ بدین صورت که در پردازش داده ثبت‌شده در هر زیرباند، سهم نوفه‌های خارج از آن محدوده فرکانسی به طور کامل حذف شده است. به عبارت دیگر پیاده‌سازی الگوریتم کمینه‌وارینانس در حوزه فرکانس به طور ذاتی باعث اعمال فیلترهای فرکانسی می‌شود. چنین فیلترهایی اثر هر دو نوع نوفه جهت‌دار و بدون جهت را در خروجی الگوریتم کاهش می‌دهد. دومین سازوکار برای حذف نوفه‌های موجود در داده‌های ثبت‌شده، فیلترهای مکانی هستند. با توجه به این که روش کمینه‌وارینانس یک نوع فیلتر مکانی است، به هنگام تمرکز روی هر زاویه، نوفه‌های جهت‌دار موجود در زوایای دیگر به شدت تضعیف می‌شوند.

کودا بستری برای محاسبات موازی همه‌منظوره است که رابط‌های برنامه‌نویسی را در اختیار برنامه‌نویسان قرار می‌دهد و به طراحان نرم‌افزار اجازه می‌دهد تا از توانایی‌های GPUهای ساخته‌شده شرکت انویدیا در جهت محاسبات همه‌منظوره روی واحد پردازش گرافیکی استفاده کنند. این بستر به‌گونه‌ای طراحی شده است که با زبان‌های برنامه‌نویسی C، C++، Fortran و MATLAB کار می‌کند [23].

شیوه برنامه‌نویسی کودا به‌گونه‌ای است که امکان برنامه‌نویسی روی هردو پردازنده GPU و CPU را به برنامه‌نویس می‌دهد؛ قسمت‌های سریال برنامه بر روی CPU اجرا می‌شود، سپس برنامه به GPU منتقل شده و پس از اجرای عملیات مربوط به قسمت‌های موازی، دوباره به CPU بازمی‌گردد. بخش‌های موازی برنامه در یک تابع هسته<sup>۱</sup> نوشته می‌شوند و هر هسته توسط تعداد زیادی نخ<sup>۲</sup> به صورت موازی اجرا می‌شود. سازماندهی نخ‌ها در کودا توسط بلوک‌ها و گرید<sup>۳</sup>ها انجام می‌شود. هر بلوک شامل یک آرایه سه‌بعدی از نخ‌ها است؛ بنابراین هر نخ در هر بلوک توسط موقعیت مکانی (x, y و z) شناخته می‌شود. هر گرید نیز یک آرایه دوبعدی از بلوک‌ها است و همه بلوک‌ها در یک گرید دارای ابعاد یکسانی هستند. در فراخوانی هر هسته، برنامه‌نویس می‌تواند تعداد بلوک‌ها و تعداد نخ‌ها در هر بلوک را برای اجرای آن هسته انتخاب نماید.

کودا برای تعریف توابع، سه کلیدواژه مهم دارد. کلیدواژه `__global__` به این معنی است که تابع معرفی شده یک تابع هسته در کودا است؛ این تابع بر روی دستگاه<sup>۴</sup> اجرا می‌شود و تنها از میزبان<sup>۵</sup> می‌تواند یک شبکه از نخ‌ها را بر روی دستگاه ایجاد کند. کلیدواژه `__device__` نیز یک تابع دستگاه را نشان می‌دهد؛ این تابع در دستگاه اجرا می‌شود و تنها از یک تابع هسته یا یک تابع دستگاه دیگر می‌توان آنرا فراخوانی کرد و در نهایت کلیدواژه `__host__` نشان‌دهنده یک تابع میزبان است که در میزبان اجرا می‌شود و تنها از طریق یک تابع میزبان دیگر قابل فراخوانی می‌باشد.

یک ویژگی مهم الگوریتم کمینه‌واریناس قابلیت موازی‌سازی آن است. به‌این‌ترتیب که می‌توان توان خروجی شکل‌دهنده‌پرتو در هر زاویه و فرکانس خاص را به‌طور مستقل محاسبه کرد؛ در نتیجه قادر خواهیم بود به کمک GPU و پردازش موازی، سرعت انجام محاسبات را افزایش دهیم. گفتنی است، اگرچه پیاده‌سازی الگوریتم کمینه‌واریناس در حوزه زمان دارای پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به پیاده‌سازی آن در حوزه فرکانس است؛ ولی با اجرای الگوریتم در حوزه زمان اطلاعات فرکانسی تا حد زیادی از بین می‌رود. این در حالی است که با استفاده از پیاده‌سازی به‌کاربرده‌شده در این مقاله، نتیجه جهت‌یابی منبع صوت در همه مؤلفه‌های فرکانسی به‌صورت هم‌زمان در دسترس خواهد بود؛ بنابراین در شرایطی که طیف فرکانسی منبع صوت زیر آب به‌طور دقیق مشخص نباشد با استفاده از پیاده‌سازی روش کمینه‌واریناس در حوزه فرکانس می‌توان علاوه‌بر اطلاعات مربوط به راستای منابع صوت به اطلاعات فرکانسی آنها نیز دست یافت.

در این مقاله برای پردازش موازی الگوریتم کمینه‌واریناس از مدل برنامه‌نویسی کودا و زبان C++ استفاده می‌شود. شکل (۳) شمای کلی ساختار طراحی‌شده در این مقاله را به‌منظور پیاده‌سازی الگوریتم کمینه‌واریناس نشان می‌دهد. همان‌طور که اشاره شد، در کودا ابتدا برنامه روی CPU اجرا می‌شود تا دسترسی لازم به قسمت‌های موازی فراهم شود. در این بخش ابتدا بازه فرکانسی و زاویه‌ای مورد نظر برای جهت‌یابی منبع سیگنال تعیین، سپس سیگنال‌های همه حس‌گرها به صورت یک ماتریس به حافظه گلوبال GPU منتقل می‌شود. در این مقاله پیاده‌سازی الگوریتم کمینه‌واریناس توسط GPU در پنج بخش متوالی انجام می‌شود.

در نخستین بخش، پس از انتقال سیگنال‌ها به GPU به‌کمک جعبه‌ابزار cuFFT در کودا، سیگنال به حوزه فرکانس منتقل می‌شود.

در بخش دوم به‌وسیله یک تابع هسته، ماتریس کواریانس مکانی طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه ماتریس کواریانس، یک ماتریس هرمیتی است؛ به جهت کاهش محاسبات اضافی، تنها درایه‌های بالامثلثی این ماتریس محاسبه می‌شود. در این هسته به‌ازای هر مؤلفه فرکانسی<sup>۶</sup>، یک بلوک و به هر بلوک، به اندازه تعداد حس‌گرها، نخ اختصاص داده می‌شود؛ به این شکل که هر

<sup>6</sup> Frequency Bin

<sup>1</sup> Kernel

<sup>2</sup> Thread

<sup>3</sup> Grid

<sup>4</sup> Device

<sup>5</sup> Host

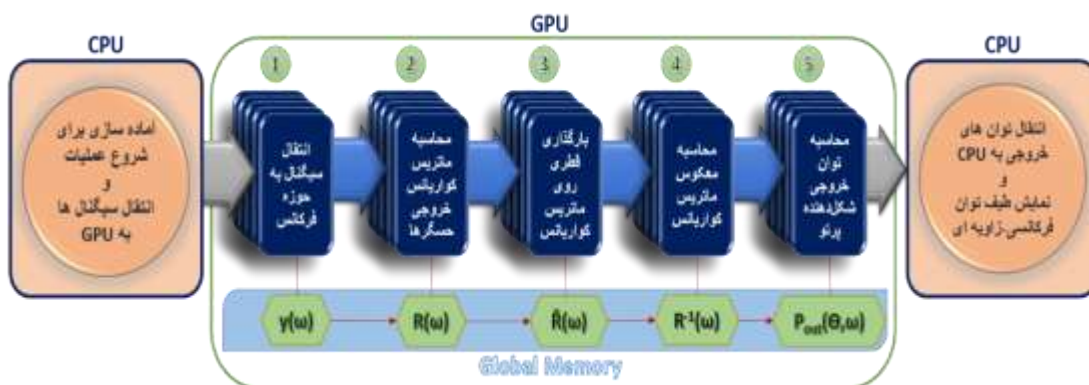
دارا بودن قابلیت معکوس‌گیری به صورت گروهی، از تعداد زیادی ماتریس با ابعاد یکسان و همچنین قابلیت معکوس‌گیری از ماتریسی با درایه‌های مختلط است. در این جعبه ابزار از روش LU برای محاسبه معکوس ماتریس‌ها استفاده می‌شود. این کار در دو مرحله انجام می‌شود [27]. در مرحله نخست تمامی ماتریس‌های داده شده به جعبه‌ابزار، به ماتریس‌های بالامثلثی و پایین مثلثی به صورت  $R = LU$  تجزیه می‌شوند و در مرحله دوم نیز، با حل معادله رابطه (۱۰) ماتریس‌های معکوس محاسبه می‌شود.

$$LUR^{-1} = I \quad (10)$$

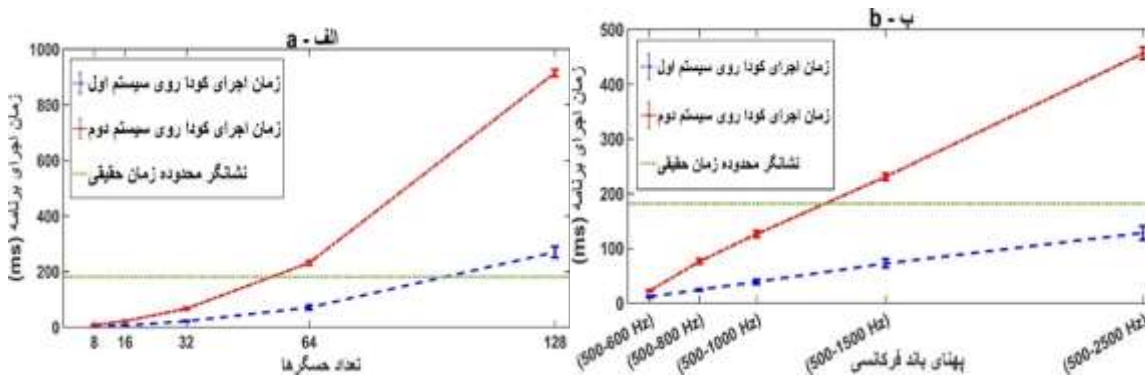
نخ، یک ستون از ماتریس کواریانس و یک بلوک از نخ‌ها، کل ماتریس کواریانس مربوط به یک فرکانس خاص را محاسبه می‌کند.

در بخش سوم، طبق رابطه (۸) در یک تابع هسته به بارگذاری قطری روی ماتریس کواریانس پرداخته می‌شود. به این هسته به تعداد مؤلفه‌های فرکانسی، نخ اختصاص داده و هر نخ، بارگذاری قطری را روی ماتریس کواریانس مربوط به یک فرکانس انجام می‌دهد.

بخش چهارم مربوط به محاسبه معکوس ماتریس کواریانس مکانی است. در این مقاله از جعبه‌ابزار cuBLAS به منظور محاسبه معکوس ماتریس کواریانس مکانی استفاده شده است. دلیل استفاده از این جعبه‌ابزار،



(شکل-۳): نمودار بلوکی پیاده‌سازی کمینه‌واریانس روی واحد پردازنده گرافیکی (Figure-3): Block diagram of the MVDR implementation on the GPU



(شکل-۴): نمایش تغییرات زمان اجرای برنامه با کودا روی سیستم اول و کودا روی سیستم دوم

الف) تغییرات زمان اجرای برنامه با تغییر تعداد حسگرها

ب) تغییرات زمان اجرای برنامه با تغییر بازه فرکانسی

(Figure-4): Displaying the changes in the program's runtime with CUDA on GPU-1 and CUDA on GPU-2

a) Changes in the program's runtime by changing the number of sensors

b) Changes in the program's runtime by changing the frequency range

فرکانسی) نخ به این هسته اختصاص داده می‌شود و هر ۵۱۲ نخ در یک بلوک قرار می‌گیرد. در این هسته، هر نخ توان سیگنال خروجی مربوط به یک فرکانس خاص و یک زاویه خاص را محاسبه می‌کند. برای محاسبه توان خروجی، پس از محاسبه بردار جهت‌دهی، از رابطه (۹)

در بخش پنجم نیز از یک تابع هسته برای محاسبه توان خروجی شکل‌دهنده پرتو استفاده می‌شود. از آنجایی که هدف نهایی، جستجو برای منبع سیگنال در همه فرکانس‌های موجود در بازه مدنظر و همه زوایای صفر تا ۳۵۹ درجه است؛ به تعداد  $360 \times$  تعداد مؤلفه‌های

استفاده می‌شود. باتوجه به اینکه توان خروجی، یک عدد حقیقی است، محاسبات مربوط به قسمت‌های موهومی حذف می‌شود. در انتها نتیجه جهت‌یابی به‌صورت یک ماتریس سه‌بعدی به CPU منتقل می‌شود.

## ۵- نتایج و بحث

نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله به دو بخش تقسیم می‌شوند. در بخش اول نتایج مربوط به داده‌های شبیه‌سازی ارائه می‌شود و در بخش دوم نتایج مربوط به داده‌های واقعی ثبت‌شده ارائه می‌شود.

### ۵-۱- نتایج داده‌های شبیه‌سازی

در این مقاله به‌منظور مقایسه زمان لازم برای جهت‌یابی صوت به روش کمینه‌وارپانس، از دو مدل سخت‌افزار متفاوت با مدل‌های زیر استفاده شده است:

CPU-1: Intel Core i7 7700HQ  
GPU-1: NVIDIA GeForce GTX 1060  
CPU-2: Intel Core i7 6700HQ  
GPU-2: NVIDIA GeForce GTX 950m

زمان لازم برای جهت‌یابی صوت بر روی هر سگمنت داده، وابسته به عواملی چون سخت‌افزار مورد استفاده، تعداد حس‌گرها و پهناهای باند فرکانسی (متناسب با آن تعداد مؤلفه‌های فرکانسی) است. در نمودارهای شکل (۴) تأثیر این عوامل بر روی زمان اجرای الگوریتم جهت‌یابی با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی نشان داده شده است. نمودار "الف" زمان لازم برای پردازش یک پنجره ۱۸۲ میلی‌ثانیه‌ای برحسب تعداد حس‌گرهای آرایه به‌ازای پهناهای باند یک کیلوهرتز (در بازه فرکانسی ۵۰۰-۱۵۰۰ هرتز) را نمایش می‌دهد. گفتنی است که طول زمانی پنجره در داده‌های شبیه‌سازی به‌دلیل شباهت با داده‌های واقعی این‌گونه انتخاب شده است.

با توجه به طول هر پنجره داده، تا هنگامی که زمان مورد نیاز برای پردازش هر پنجره کمتر از ۱۸۲ میلی‌ثانیه باشد، الگوریتم دارای قابلیت اجرای زمان حقیقی است. با افزایش تعداد حس‌گرها عرض لوب اصلی کاهش یافته و دقت جهت‌یابی نیز افزایش می‌یابد؛ پس تا زمانی که از حالت زمان حقیقی (۱۸۲ میلی‌ثانیه) خارج نشویم، می‌توانیم به‌منظور افزایش دقت، تعداد حس‌گرها را بیشتر کنیم؛ بنابراین با توجه به نتایج شکل (۴-الف)، GPU-1 و GPU-2 به‌ترتیب می‌توانند ۶۴ حس‌گر و ۳۲ حس‌گر را به‌صورت زمان حقیقی پردازش کنند. در شکل (۴-ب)

تأثیر پهناهای باند پردازش به‌ازای یک آرایه ۶۴ حس‌گره نمایش داده شده است. روشن است که با افزایش پهناهای باند فرکانسی، زمان اجرای برنامه افزایش می‌یابد. افزایش پهناهای باند فرکانسی سامانه این امکان را فراهم می‌کند که منابع مختلف با محتوای فرکانسی متفاوت جهت‌یابی شوند. با توجه به شکل (۴-ب)، GPU-2 تنها تا پهناهای باند پانصد هرتز را می‌تواند به‌صورت زمان حقیقی پردازش کند و GPU-1 تا انتهای نمودار از محدوده زمان حقیقی خارج نشده است. این پردازنده تا پهناهای باند سه‌هزار هرتز را نیز می‌تواند به‌صورت زمان حقیقی اجرا کند.

سناریوی دوم در حین چرخش منبع صوت حول یک نقطه، غیر از مرکز آرایه می‌باشد؛ در این سناریو جهت‌یابی در دو بازه فرکانسی مختلف انجام شده است. نمودارهای شکل (۶) نتایج خروجی در این سناریو را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس رزولوشن زاویه‌ای بهبود می‌یابد، درحالی‌که ابهام ناشی از الیاسینگ<sup>۱</sup> مکانی نیز افزایش می‌یابد.

شکل (۷) نتایج جهت‌یابی در سناریوی سوم و در دو بازه فرکانسی مختلف را نشان می‌دهد. در این حالت منبع صوت حول مرکز آرایه روی دایره‌ای به شعاع یک کیلومتر می‌چرخد. به‌منظور مقایسه زمان اجرای برنامه در جهت‌یابی داده‌های واقعی، پردازش داده‌های ثبت شده در سناریوی سوم در هر دو سخت‌افزار موجود انجام شده است. جدول (۱) زمان متوسط صرف‌شده برای پردازش داده‌های ثبت‌شده در سناریوی سوم (بازه فرکانسی ۲۵۰۰-۳۰۰۰ هرتز) و همچنین زمان لازم برای پردازش پنج مرحله اصلی برنامه را به‌طور مجزا نشان می‌دهد. این زمان‌ها برای سه حالت مختلف اجرا در متلب روی CPU-1، اجرا با کودا روی GPU-1 و GPU-2 گزارش شده است. گفتنی است که نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۱) مربوط به زمان متوسط پردازش ۱۱۴۶ پنجره ۱۸۲ میلی‌ثانیه‌ای و همچنین زمان متوسط پردازش یک پنجره است. همان‌طور که مشخص است، سرعت اجرا در کودا چندین برابر بیشتر از سرعت اجرا در متلب است و در هر مرحله، مقدار نسبت برتری متفاوت است. به‌منظور تشخیص بهتر نسبت برتری سرعت اجرای کودا به متلب و همچنین کودای سیستم نخست به کودای سیستم دوم، نمودارهای شکل (۸) ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Aliasing

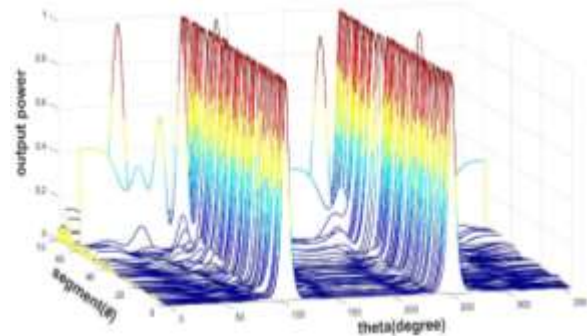


## ۲-۵- نتایج داده‌های واقعی

شکل‌دهنده پرتو است. با وجود اختلاف بین زمان‌های اجرا در این دو مدل GPU، اما هر دو سخت‌افزار توانستند به کمک روش پیاده‌سازی ارائه‌شده در این مقاله به صورت زمان حقیقی داده‌های سونار را جهت‌یابی کنند (زمان مورد نیاز برای پردازش هر پنجره داده با استفاده از هر دو GPU کمتر از ۱۸۲ میلی‌ثانیه شده است).

داده‌های واقعی در این مقاله از یک آرایه هشت حس‌گره ثبت شده است. داده‌های این سامانه سونار با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز نمونه‌برداری و در ادامه این داده‌ها به پنجره‌های بدون هم‌پوشانی ۱۸۲ میلی‌ثانیه‌ای (۱۸۲۰ نمونه) تقسیم و الگوریتم جهت‌یابی بر روی هر پنجره اعمال می‌شود. داده‌های سونار این مقاله در سه سناریوی مختلف ثبت شده است. در سناریوی نخست منبع صوت زیر آب ثابت بوده و در سناریوی دوم و سوم منبع صوت (شناور) در حال حرکت روی یک دایره بوده است. در ادامه این بخش نتایج جهت‌یابی با استفاده از روش پیاده‌سازی شده در مقاله ارائه می‌شود.

شکل (۵) نتیجه اجرای الگوریتم روی یک منبع صوت ثابت (سناریوی نخست) در فاصله و زاویه‌ای معین از آرایه را نشان می‌دهد. تخمین زاویه منبع سیگنال صوت در زمان‌های مختلف با توجه به بیشترین دامنه توان خروجی به دست می‌آید. علت وجود دو پیک<sup>۱</sup> متقارن در خروجی، خطی بودن آرایه حس‌گرها است.

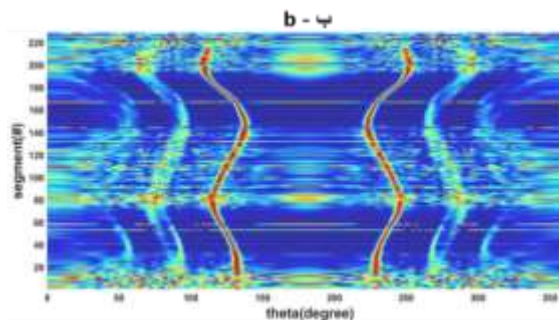
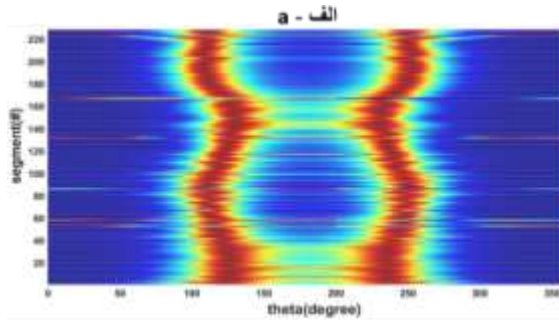


شکل (۵): نمودار آبخاری نتیجه جهت‌یابی در سناریوی نخست

(جستجو در تمامی زوایا و بازه فرکانسی ۹۵۰-۱۰۵۰ هرتز)  
(Figure-5): Waterfall chart of the DOA result in first mode

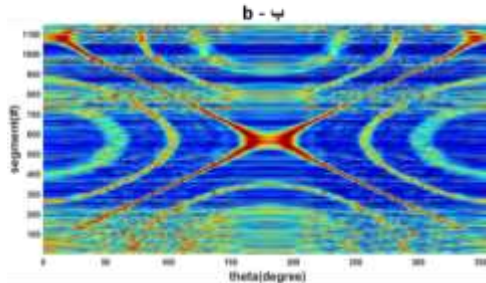
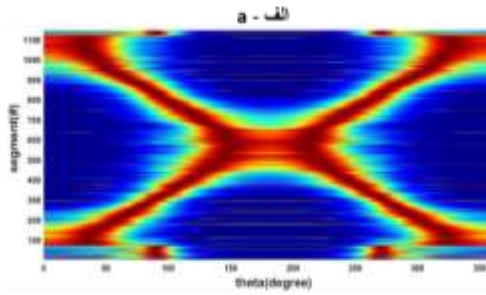
GPU-1 و GPU-2 به ترتیب دارای ۱۲۸۰ و ۶۴۰ هسته پردازشی هستند. نمودار شکل (۸) نشان می‌دهد که سرعت اجرای برنامه با GPU-1 نزدیک به ۲ تا ۲/۵ برابر بیشتر از سرعت اجرا با GPU-2 است و این موضوع، تأثیر تعداد هسته‌های یک GPU بر روی سرعت انجام محاسبات به صورت موازی را نشان می‌دهد. زمان برترین بخش برنامه، مربوط به بخش محاسبه توان خروجی شکل‌دهنده پرتو است و باقی بخش‌ها در مقایسه با بخش آخر، زمان بسیار کمتری را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین بیشترین نسبت سرعت اجرای کودا به متلب نیز در همین بخش است. علت این موضوع قابلیت موازی‌سازی زیاد در محاسبات مربوط به مرحله محاسبه توان خروجی

<sup>۱</sup> Peak



شکل (۶): نمودار آبخاری نتیجه جهت‌یابی در سناریوی دوم

(الف) جستجو در تمامی زوایا و بازه فرکانسی ۱۰۰-۳۰۰ هرتز  
(ب) جستجو در تمامی زوایا و بازه فرکانسی ۲۵۰۰-۳۵۰۰ هرتز  
(Figure-6): Waterfall chart of the DOA result in second mode  
a) Search in all angles and frequency range of 100-300 Hz  
b) Search in all angles and frequency range of 2500-3500 Hz  
(Search in all angles and frequency range of 950-1050 Hz)



شکل (۷): نمودار آبخاری نتیجه جهت‌یابی در سناریوی سوم

(الف) جستجو در تمامی زوایا و بازه فرکانسی ۱۰۰-۵۰۰ هرتز  
(ب) جستجو در تمامی زوایا و بازه فرکانسی ۲۵۰۰-۳۰۰۰ هرتز  
(Figure-7): Waterfall chart of the DOA result in third mode  
a) Search in all angles and frequency range of 100-500 Hz  
b) Search in all angles and frequency range of 2500-3000 Hz

## ۶- نتیجه گیری

پیچیدگی محاسباتی زیاد الگوریتم کمینه‌واریناس مانع از اجرای زمان حقیقی جهت‌یابی صوت در آرایه‌های با تعداد حسگر زیاد می‌شود. این در حالی است که یکی از پارامترهای مهم هر سامانه سونار قابلیت جهت‌یابی زمان حقیقی است. برای افزایش سرعت اجرای الگوریتم کمینه‌واریناس می‌توان از پیاده‌سازی سخت‌افزاری (استفاده از FPGA و یا DSP) و یا برنامه‌نویسی موازی استفاده کرد. اگرچه پیاده‌سازی سخت‌افزاری سرعت بالاتری نسبت به برنامه‌نویسی موازی دارد اما منجر به کاهش انعطاف‌پذیری برنامه خواهد شد؛ بنابراین در این مقاله از رویکرد دوم (برنامه‌نویسی موازی) به منظور پیاده‌سازی الگوریتم

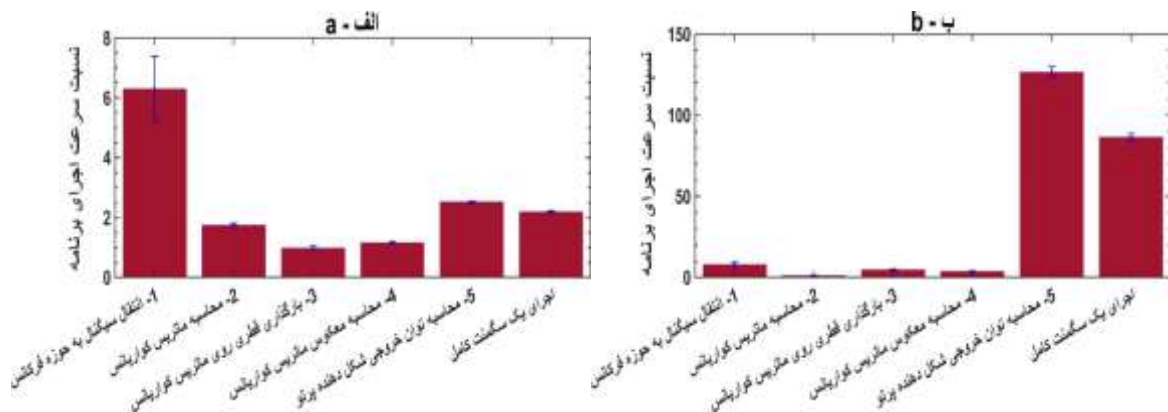
کمینه‌واریناس استفاده شده است. زمان برترین عملیات پردازشی موجود در روش کمینه‌واریناس محاسبه توان خروجی شکل‌دهنده پرتو با استفاده از بردار وزن بهینه است؛ زیرا این عملیات به ازای هر زاویه و هر مؤلفه فرکانسی یک‌بار تکرار می‌شود. نتایج ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد که با استفاده از کارت گرافیکی موجود و مدل برنامه‌نویسی کودا می‌توان سرعت اجرای الگوریتم را نسبت به برنامه‌نویسی سریال تا حدود هشتاد برابر افزایش داد (شکل-۸). همچنین تأثیر عواملی چون تعداد حسگرها در آرایه، پهنای باند فرکانسی و ویژگی‌های سخت‌افزاری، بر روی سرعت اجرای برنامه بررسی شد.

(جدول-۱): زمان لازم برای جهت‌یابی صوت در داده‌های ثبت‌شده در سناریوی سوم (بازه فرکانسی ۲۵۰۰-۳۰۰۰ هرتز) روی متلب در سیستم اول.

کودا در سیستم اول و کودا در سیستم دوم (میلی ثانیه)

(Table-1): The program's run time in third mode (frequency range of 2500-3000 Hz) on MATLAB in CPU-1, CUDA in GPU-1 and CUDA in GPU-2 (ms)

مرحله پردازش شده	زمان اجرای متلب روی CPU-1 (ms)		زمان اجرای کودا روی GPU-1 (ms)		زمان اجرای کودا روی GPU-2 (ms)	
	یک پنجره	۱۱۴۶ پنجره	یک پنجره	۱۱۴۶ پنجره	یک پنجره	۱۱۴۶ پنجره
انتقال سیگنال به حوزه فرکانس	268.6±4.1	0.234±0.003	34.4±6.15	0.030±0.005	212.2±26.69	0.185±0.023
محاسبه ماتریس کواریانس	364.8±9.8	0.318±0.008	328.4±14.45	0.287±0.013	576±14.70	0.503±0.013
بارگذاری قطری روی ماتریس کواریانس	698.5±18.8	0.609±0.016	145.3±9.49	0.127±0.008	141.9±6.88	0.354±0.006
محاسبه معکوس ماتریس کواریانس	1338.3±46.9	1.168±0.041	350.9±15.80	0.306±0.014	405.7±16.88	0.354±0.015
محاسبه توان خروجی شکل‌دهنده پرتو	225529.7±4165.1	196.797±3.634	1779.8±21.76	1.553±0.019	4477.1±20.78	3.907±0.018
مجموع مراحل	228199.9±4230.3	199.127±3.691	2638.9±28.38	2.303±0.025	5848.3±121.9	5.103±0.106



(شکل-۸): نمایش نسبت سرعت اجرای برنامه طبق اطلاعات جدول (۱)

الف) نسبت سرعت اجرای کودا روی سیستم نخست به سرعت اجرای کودا روی سیستم دوم

ب) نسبت سرعت اجرای کودا روی سیستم نخست به سرعت اجرای متلب روی سیستم نخست

(Figure-8): Displaying the ratio of the program execution speed according to information of table (1)

a) The ratio of the execution speed in CUDA on GPU-1 to that of GPU-2

b) The ratio of the execution speed in CUDA on GPU-1 to execution speed in MATLAB on CPU-1

وقفی و هوشمند پرتو در آرایه‌های میکروفونی Ad- hoc با استفاده از خوشه‌بندی و رتبه‌بندی

## 7- References

## ۷- مراجع

[۱] یزدانی سیدحمید، ابوطالبی حمیدرضا. شکل‌دهی



"Broadband minimum variance beamforming for ultrasound imaging," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 56, no. 2, pp. 314–325, 2009.

- [13] J. P. Åsen, J. I. Buskenes, C. I. C. Nilsen, A. Austeng, and S. Holm, "Implementing capon beamforming on a GPU for real-time cardiac ultrasound imaging," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 61, no. 1, pp. 76–85, 2014.
- [14] Y. S. Yoon, M. G. Amin, and F. Ahmad, "MVDR beamforming for through-the-wall radar imaging," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 347–366, 2011.
- [15] C. I. Nilsen and I. Hafizovic, "Beamspace adaptive beamforming for ultrasound imaging," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 56, no. 10, pp. 2187–2197, 2009.
- [16] A. M. Deylami, and B. M. Asl, "A Fast and Robust Beamspace Adaptive Beamformer for Medical Ultrasound Imaging," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2017.
- [17] J. F. Synnevåg, S. Holm, and A. Austeng, "A Low Complexity Data-dependent Beamformer," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 57, no. 2, 2010.
- [18] K. Kim, S. Park, J. Kim, S. Park, and M. Bae, "A Fast Minimum Variance Beamforming Method Using Principal Component Analysis," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 61, no. 6, pp. 930–945, 2014.
- [19] A. Jakobsson, S. L. Marple, Jr., and P. Stoica, "Computationally Efficient Two-Dimensional Capon Spectrum Analysis," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 48, no. 9, pp. 2651–2661, 2000.
- [20] Q. Huang, L. Zhang, and Y. Fang, "Performance analysis of Low-complexity MVDR beamformer in spherical harmonics domain," *Signal Processing*, vol. 153, pp. 153–163, 2018.
- [21] B. M. Asl and A. Mahloojifar, "A low-complexity adaptive beamformer for ultrasound imaging using structured covariance matrix," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 59, no. 4, pp. 660–667, 2012.

[۲۲] صادقی حامد، اخوان بی‌تقصیر امیر. آشکارسازی سیگنال بر اساس پردازش موازی مبتنی بر جی‌پی‌یو در شبکه‌های حس‌گری صوتی دارای زیرساخت. پردازش علائم و داده‌ها. ۱۳۹۶؛ ۱۴ (۴) ۳۰-۱۹:

میکروفون‌ها. پردازش علائم و داده‌ها. ۱۳۹۴؛ ۱۲ (۳) ۶۸-۵۷:

- [1] S. H. Yazdani, H. R. Abutalebi, "Adaptive and Smart Beamforming in Ad-hoc Microphone Arrays by Clustering and Ranking of the Microphones," *JSDP*. 2015; 12 (3) :57-68.
- [۲] مجیدیان سینا، حدادی فرزانه. تخمین جهت منابع با استفاده از زیرفضای کرونکر. پردازش علائم و داده‌ها. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۱) ۴۰-۲۹:
- [2] S. Majidian, F. Haddadi, "Direction of Arrival (DOA) Estimation Using Kronecker Subspace," *JSDP*. 2018; 15 (1) :29-40.
- [3] J. Benesty, J. Chen, and Y. Huang, "Conventional Beamforming Techniques," in *Microphone Array Signal Processing*, vol. 1, Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [4] F. Vignon, and M. R. Burcher, "Capon beamforming in medical ultrasound imaging with focused beams," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 55, no. 3, pp. 619–628, 2008.
- [5] F. Yan, M. Jin, and X. Qiao, "Low-Complexity DOA Estimation Based on Compressed MUSIC and Its Performance Analysis," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 8, pp. 1915–1930, 2013.
- [6] X. Wu, W. Zhu, and J. Yan, "Direction of Arrival Estimation for Off-Grid Signals Based on Sparse Bayesian Learning," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 7, 2016.
- [7] J. Dai, and H. Cheung, "Sparse Bayesian Learning Approach for Outlier-Resistant Direction-of-Arrival Estimation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 3, pp. 744–756, 2018.
- [8] J. Capon, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," *Proceedings of the IEEE*, vol. 57, no. 8, August 1969.
- [9] J. I. Buskenes, J. P. Asen, C. I. C. Nilsen, and A. Austeng, "An Optimized GPU Implementation of the MVDR Beamformer for Active Sonar Imaging," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 40, no. 2, pp. 441–451, 2014.
- [10] M. Sasso, and C. Cohen-Bacrie, "Medical Ultrasound Imaging Using the Fully Adaptive Beamformer," *Philips Research*, no. 4, pp. 489–492, 2005.
- [11] H. Sun, M. Lu, and T. D. Abhayapala, "Ultrasound imaging using modal domain frequency smoothed MVDR beamforming," in *2017, 11th Int. Conf. Signal Process. Commun. Syst. ICSPCS 2017 - Proc.*, no. 1, pp. 1–5, Janua 2017.
- [12] I. K. Holfort, F. Gran, and J. A. Jøensen,



**امیر اخوان** مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۸۷ در رشته برق - مخابرات از دانشگاه صنعتی اصفهان و سپس دوره کارشناسی ارشد را در دانشگاه تربیت مدرس در رشته مهندسی

پزشکی - بیوالکتریک از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۰ گذراند. وی مدرک دکترای خود را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر در سال ۱۳۹۶ دریافت کرد. ایشان هم‌اکنون استادیار دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش چندکاناله سیگنال‌های صوتی و سیگنال‌های حیاتی، بهینه‌سازی، مسأله‌های معکوس و جهت‌یابی صوت. نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

[aakhavan@cc.iut.ac.ir](mailto:aakhavan@cc.iut.ac.ir)



**علی اصغر آب‌نیک** مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک در دانشگاه جامع امام حسین (ع) گذراند و در سال ۱۳۸۸ موفق به دریافت

مدرک کارشناسی ارشد شد. ایشان هم‌اکنون دانشجوی سال آخر دکترا در رشته مهندسی دریا گرایش آکوستیک زیرآب در دانشگاه صنعتی شریف و در مرحله دفاع از رساله دکترا خود هستند. ایشان هم‌اکنون به‌عنوان پژوهش‌گر در یک مرکز پژوهشی در حوزه آکوستیک زیر آب مشغول هستند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش سیگنال صوتی زیرآب، الگوریتم‌های دسته‌بندی و استخراج ویژگی در سیگنال‌های صوتی زیرآبی و انتشار صوت زیرآب.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

[aliasghar\\_abniki@yahoo.com](mailto:aliasghar_abniki@yahoo.com)

- [22] H. Sadeghi, A. Akhavan Bitaghsir, "Signal Detection Based on GPU-Assisted Parallel Processing for Infrastructure-based Acoustical Sensor Networks," *JSDP*. 2018; 14 (4) :19-30.
- [23] D. B. Kirk, and W. W. Hwu, *Programming Massively Parallel Processors \_ A Hands-On Approach*. Burlington, MA: Elsevier, 2010.
- [24] R. Paridar, M. Mozaffarzadeh, M. Nasiriavanaki, and M. Orooji, "Double Minimum Variance Beamforming Method to Enhance Photoacoustic Imaging," *Journal of the Optical Society of America A*, pp. 1-9, 2018.
- [25] A. Hakam, R. M. Shubair, and E. Salahat, "Enhanced DOA Estimation Algorithms Using MVDR and MUSIC," in *2013 International Conference on Current Trends in Information Technology (CTIT)*, Dubai, United Arab Emirates, 2013.

[۲۶] فتحی. یاسر، محلولی‌فر. علی، محمدزاده اصل. بابک، "پیاده‌سازی بلادرنگ شکل‌دهی پرتو‌وقتی در تصویربرداری فراصداً پزشکی با استفاده از پردازش موازی به کمک واحدهای پردازنده ترسیمی (جی پی یو)"، *مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران*، جلد ۱، شماره ۱، ۱۳۹۲.

- [26] Y. Fathi, A. Mahloojifar, and B. M. Asl, "Real-time implementation of adaptive beamformer in ultrasound imaging using parallel processing with GPU," *Journal of Iran Audio Engineering Society*, vol. 1, no. 1, 2013.
- [27] Nvidia, "cuBLAS," *docs.nvidia.com*, Oct. 30, 2018. [Online]. Available: <https://docs.nvidia.com/cuda/cublas/index.html>. [Accessed: Sept. 19, 2018].



**احسان ایمانی‌فر** مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه صنعتی همدان در رشته مهندسی پزشکی، گرایش بیوالکتریک دریافت کرد؛ سپس دوره کارشناسی ارشد را در

دانشگاه صنعتی امیرکبیر در رشته مهندسی پزشکی - بیوالکتریک از سال ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ گذراند. علایق پژوهشی وی برنامه‌نویسی موازی، پردازش سیگنال، هوش مصنوعی و پردازش تصویر هستند.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

[ehsanimanif@gmail.com](mailto:ehsanimanif@gmail.com)

