جداسازی سیگنالهای صحبت مخلوط شده در یک محیط واقعی با استفاده از الگوریتم DUET ساده شده

فریناز آکوچکیان[۱] - محسن عشوریان[۲]

(۱) کارشناسی ارشد - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

(۲) استادیار - گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۸۹ تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۰

خلاصه

الگوریتم تخمین جداسازی کاهنده (DUET) از الگوریتمهای عملی‌ای است که جداسازی منابع در یک محیط بدون پژواک را انجام می‌دهد. این الگوریتم از حوزه فرکانس برای پردازش سیگنالها استفاده می‌کند و مخلوطهای صحبت را حتی وقتی تعداد منابع بیشتر از سنسورها باشد، جدا می‌کند. اما اجرای DUET، بخصوص برای فایلهای صحبت با طول نسبتا بزرگ، زمان‌بر و کند است. در این تحقیق ضمن کاهش نمونه‌برداری سیگنال صحبت مخلوطی که قرار است جداسازی بر روی آن اجرا شود، یک الگوریتم DUET تغییر یافته جهت کاهش زمان اجرای روش ارائه می‌گردد. استفاده از روش پیشنهادی زمان اجرای جداسازی را به حدود یک سوم الگوریتم پایه کاهش می‌دهد. کارایی الگوریتم تغییر یافته برای فایلهای صحبت با طول بزرگتر از ده ثانیه بیشتر مشخص است.

کلمات کلیدی: جداسازی منابع کور، سیگنال صحبت مخلوط، هیستوگرام وزن‌دهی شده.

۱- مقدمه

مسئله جداسازی منابع کور، با سیگنالهای ترکیب شده بدون داشتن دانش قبلی در مورد سیگنالها و نحوه ترکیب شدن آنها برخورد می‌کند. روشهایی که برای جداسازی منابع استفاده می‌شود، به نوع خاصی از سیگنالها وابسته نیست [۱]. در این مقاله سیگنالهای صحبت، مورد بررسی قرار می‌گیرند. اجازه می‌دهیم دو نفر به طور همزمان در دو میکروفن که به فاصله معینی از هم قرار گرفته‌اند، صحبت کنند [۲]. هدف آن است که بتوانیم به کمک سیگنال خروجی میکروفنها، گوینده‌ها را از هم جدا کنیم. باید به این حقیقت توجه داشت که صحبت این گوینده‌ها در یک محدوده فرکانسی است و سیگنالهای توصیف شده به تنهایی موجود نیست تا بتوان میزان انطباق آنها را کنترل نمود. بنابراین تنها تعداد محدودی از این مخلوطهای واقعی قابلیت جداسازی دارند [۳]. برای حل مسئله جداسازی منابع کور اولین روش موثر توسط هرالت و جاتن مطرح شد [۴]، که در آن هدف جداسازی یک مخلوط مربعی لحظه‌ایی از منابع مستقل غیر گوسی بود. این طرح باعث پیشگام شدن الگوریتم وفقی هرالت و جاتن گردید [۵].

لینسکرقانون یادگیری بدون ناظر را در شبکه‌های عصبی پیشنهاد کرد [۶]. طرح او بر اساس ماکزیمم سازی اطلاعات متقابل بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک شبکه عصبی مصنوعی استوار بود. پس از آن کومون [۷] مفهوم آنالیز مولفه‌های مستقل را مطرح کرد. او نشان داد ماکزیمم سازی غیر گوسی بودن منابع معادل با مینیمم کردن اطلاعات متقابل بین آنهاست. پس از آن الگوریتم BS-Infomax توسط بل و سجنووسکی [۸] مطرح گردید. طرح آنها از یک قانون یادگیری گرادیان آماری که به وسیله آمری و همکاران [۹] مطرح شده بود، استفاده می‌کرد. پس از آن الگوریتم FICA به وسیله هیوارینن و اوجا [۱۰] مطرح شد. به عنوان یک روش برای جداسازی منابع به کمک اطلاعات متقابل آنها، الگوریتم تخمین ماکزیمم همسایگی توسط گتا و لاکوم [۱۱] مطرح گردید. بعدها مشخص شد الگوریتم تخمین ماکزیمم همسایگی و BS-Infomax اساسا معادل هستند [۱۲].

در این بین الگوریتم DUET به عنوان یک الگوریتم عملی برای جداسازی هر تعدادی از منابع با استفاده از دو مخلوط کننده (مثلا دو میکروفن) در یک محیط بدون پژواک توسط جورجین و همکاران [۱۳] مطرح شد.

این روش وقتی معتبر است که منابع دارای خاصیت تعامد پنجره‌بندی شده باشند و این موقعی پشتیبانی می‌شود که تبدیل فوریه پنجره شده سیگنالها در مخلوط، نامتصل باشند. برای مخلوطهای بدون پژواک از منابع تضعیف شده و تاخیر یافته، روش اجازه می‌دهد که پارامترهای ترکیب را به وسیله دسته‌بندی کردن جفت پارامترهای تضعیف و تاخیر مرتبط استخراج شده از نمودار زمان - فرکانس مخلوط، تخمین بزنیم. سپس برای تخمین پارامترهای ترکیب، از تقسیم‌بندی نمودار زمان - فرکانس ارائه شده از یک مخلوط برای بازیابی منابع اصلی استفاده می‌شود. این روش مخصوصاً برای مخلوطهای صحبت بسیار مناسب است، چون نمودار زمان - فرکانس صحبت پراکنده است و این منجر به تعامد پنجره‌بندی شده نامتصل می‌شود. الگوریتم به آسانی در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی می‌شود.

در ادامه به بیان تغییرات صورت گرفته در ساختار الگوریتم DUET جهت کاهش زمان اجرای آن برای فایلهای صوتی با طول بزرگ، می‌پردازیم، سپس به بیان آزمایشات انجام شده جهت تست الگوریتم DUET پایه و الگوریتم DUET تغییر یافته می‌پردازیم. در انتها نیز نتایج شبیه‌سازی‌ها بیان خواهد شد.

۲- الگوریتم DUET تغییر یافته

از آنجا که اجرای الگوریتم DUET برای فایلهای صوتی با طول بزرگ (بیشتر از ۱۰ ثانیه) زمان بر و کند است، ضمن کاهش نمونه برداری سیگنال صحبت مخلوطی که قرار است جداسازی بر روی آن اجرا شود، یک الگوریتم DUET اصلاح شده جهت کاهش زمان اجرای روش ارائه می‌گردد. به این منظور در ابتدای برنامه، روی فایل صوتی موردنظر یک کاهش نمونه‌برداری انجام می‌شود تا حجم اطلاعات کاهش یابد و سپس به کمک این فایل صوتی کاهش حجم یافته، ماسکهای جداکننده منابع طراحی می‌شود که این خود تا حدود زیادی در افزایش سرعت اجرای برنامه تا مرحله طراحی ماسکها تاثیرگذار است. پس از طراحی این ماسکها، لازم است مجددا فایلهای صوتی، افزایش نمونه‌برداری شوند و سپس در این ماسکهای جداکننده ضرب شوند. البته برای تطبیق ابعاد ماتریس‌ها، لازم است در ساختار اصلی برنامه، تابع سنتز زمان - فرکانس نیز افزایش نمونه‌برداری شود، در نهایت نیز فرکانس نمونه برداری دو برابر می‌شود تا فایل صوتی با کیفیت مطلوبی پخش شود. به این ترتیب زمان اجرای سه پنجره اولیه در الگوریتم تغییر یافته نسبت به الگوریتم DUET پایه تا حد زیادی کاهش می‌یابد. البته این کار تا حدودی روی کیفیت جداسازی تاثیرگذار است اما زمان اجرای الگوریتم به حدود یک سوم زمان اجرای قبلی کم می‌شود.

۳- شرح آزمایش‌ها و شبیه سازی‌های انجام شده

۳-۱- شرایط ایجاد مخلوطهای واقعی از سیگنالهای صوتی

برای انجام آزمایش به تجهیزاتی نظیر بلوک دیاگرام شکل (۱) نیازمندیم [۳]. در این بلوک دیاگرام نشان داده شده که به دو میکروفن نیاز است، زیرا الگوریتم DUET از جمله الگوریتم‌هایی است که نیاز به دو میکروفن دارد تا بتواند هر تعداد از مخلوطها را از یکدیگر جدا کند [۲]. مشخصات میکروفنی که استفاده شد TK-600 می‌باشد. نکته مهم و قابل توجه در میزان موثر بودن این الگوریتم آن است که سیگنالهای این دو میکروفن حتما توسط یک تقویت‌کننده میکروفن که دارای کانال راست و چپ است وارد کامپیوتر شوند. یعنی سیگنال یکی از میکروفنها روی کانال چپ قرار گیرد و سیگنال میکروفن دیگر روی کانال راست باشد به گونه‌ایی که این دو کانال با هم یک فایل صوتی استریو را تشکیل بدهند (ورودی الگوریتم DUET حتما باید یک فایل صوتی استریو باشد). نکته مهم دیگر اینکه از یک ترکیب کننده با مشخصات MG32/14FX به جای تقویت‌کننده میکروفن استفاده گردید. (البته می‌توان از مخلوطهای صحبت واقعی که در پروژه‌های بین‌المللی استفاده شده است نیز برای تست کردن الگوریتم استفاده کرد [۱۴]، اما هدف ما در این پروژه انجام یک کار عملی دقیق در این زمینه بود). پس از فراهم آوردن این تجهیزات، اتاقی که ضبط در آن انجام می‌گیرد نیز حائز اهمیت است. اتاقی که استفاده شد دارای طول سه متر، عرض یک و نیم متر و ارتفاع دویست و سی سانتی‌متر بود و برای جلوگیری از انعکاس صدا دیوارها با عایق صوتی پوشانده شده بود. این کار برای جلوگیری از انعکاس صدا و بهتر شدن کیفیت جداسازی انجام می‌گیرد. البته الگوریتم یاد شده در مورد مخلوطهای با پژواک نیز نتیجه مطلوبی دارد اما برای کیفیت بهتر جداسازی، بهتر است این تمهیدات اندیشیده شوند.

در اینجا لازم به ذکر است که مدل ترکیب استفاده شده بر روی مخلوطهای منابع مطابق با روابط (۱) و (۲) می باشد:

$$x_1(t)=\sum_{j=1}^{N} s_j(t) \qquad (۱)$$

$$x_2(t)=\sum_{j=1}^{N} a_j s_j(t-\delta_j) \qquad (۲)$$

در اینجا N تعداد منابع، δ_j تاخیر و aj فاکتور تضعیف است که متناسب با نسبت تضعیف‌های مسیرهای بین منابع و سنسورهاست. از Δ به عنوان ماکزیمم تاخیر ممکن، استفاده کرده ولذا $|\delta_j| \le \Delta, \forall j$.

مدل ترکیب بدون پژواک غیر واقعی است، چون پژواک را نشان نمی‌دهد. پژواک در واقع مسیرهای ضربدری از هرمنبع به هر مخلوط است. به هر حال بررسی‌ها نشان داده است که علی‌رغم این محدودیت، روش DUET که مبتنی بر مدل بدون پژواک است نسبتاً قدرتمند است و حتی موقعی که مخلوطها با پژواک باشند کارایی مطلوبی دارد. پس از فراهم کردن تجهیزات و اتاق مخصوص برای ضبط صدا، لازم است که دو میکروفن در فاصله‌ایی کمتر از $\pi c/\omega_m$ قرار گیرند. در این رابطه c سرعت صوت است که 340 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است و ω_m ماکزیمم فرکانس مورد علاقه در مورد منابع است (برای بحث دقیق‌تر در این مورد به [۲] مراجعه شود). از آنجایی که حداکثر فرکانس مورد علاقه 4000 HZ در نظر گرفته شده است، میکروفنها در فاصله‌ایی کمتر از 4.25 سانتی‌متر قرار گرفتند. علت این رعایت

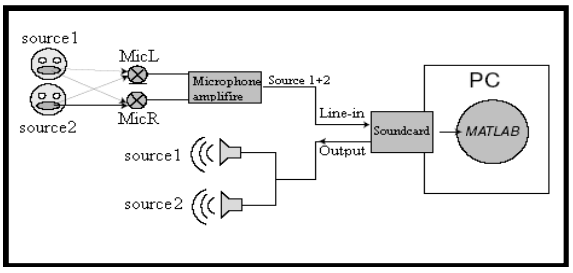
فاصله برای میکروفنها آن است که DUET قـادر بـه موقعیـت‌یـابی و جداسازی منابع به طور صحیح برای همه فرکانسهای مورد علاقه برای همه مکانهای ممکن منابع باشد و دچار ابهام فاز نشود.

پس از تنظیم میکروفنها دو گوینده جلوی میکروفنها قرار مـی‌گیرنـد. آنچه به طور تجربی در مورد فاصله گوینده‌ها و زاویـه قرارگیـری آنهـا نسبت به میکروفنها فهمیده شد، این بود که هر چه دو گوینده فاصـله کمتری از دو میکروفن داشته باشند و به طور ضمنی خود از هم فاصله بیشتری بگیرند، جداسازی دارای کیفیت بالاتری خواهد بود. آزمایشـها در سه حالت مختلف انجام گرفت. در حالت اول دو گوینده بـه فاصـله تقریبا مساوی و حدود سی سانتی‌متر از میکروفن‌ها و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور میکروفن‌ها قرار داشتند شـکل (۲). در حالـت دوم دو گوینده به فاصله تقریبا مساوی و حدود یک متر از میکروفنها و با زاویه ۳۰ درجه نسبت به محور میکروفنها قرار داشتند شکل (۳). در حالـت سوم دو گوینده به فاصله‌ایی تقریبا مساوی و حدود بیست وپنج سانتی متر و با زاویه ۶۰ درجه نسبت به محور میکروفنها قرار داشـتند شـکل (۴). در مورد متنی که در میکروفن گفته شد نیز باید نکاتی را یاداوری نمود. از آنجا که فایل صحبتی که توسط طراحان این الگـوریتم ضـبط شده بود دارای طول ۱۰ ثانیه بود و در آن گوینده اول ارقام یک تا ده را به زبان اسپانیایی و گوینده دوم نیز ارقام یک تا ده را به زبان انگلیسی همزمان با گوینده اول می‌گفت، در این پروژه نیز به همین سبک اقدام به ضبط صدا گردید. گوینده اول زن است و ارقام یک تا ده را به زبان انگلیسی می‌گوید، گوینده دوم مرد است و ارقام یک تا ده را همزمان با گوینده زن به فارسی می‌گویـد. جـدول (۱) مشخصـات اتـاق و وسـایل استفاده شده برای ضبط صدا را به صورت مختصر بیان می‌کند.

Table (1): Profile room and equipment used for recording

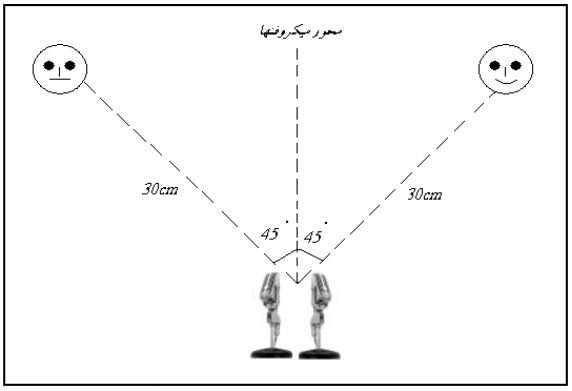
جدول (۱): مشخصات اتاق و وسایل استفاده شده برای ضبط صدا

ابعاد اتاق	طول سه متر، عرض یک و نیم متر و ارتفاع دویست و سی سانتی متر
مشخصات دو میکروفن	TK-600
مشخصات تر کیب کننده صوتی	MG32/14FX
فاصله دو میکروفن	کمتر از 4.25 سامتی متر



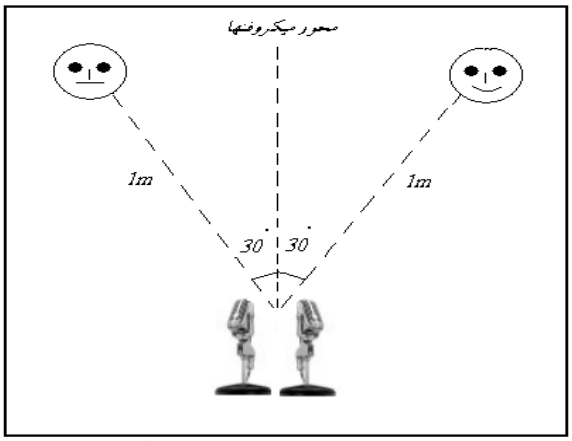
شکل (۱): ساختار سیستم پیاده سازی شده

Fig. (1): Block diagram of the equipment set-up



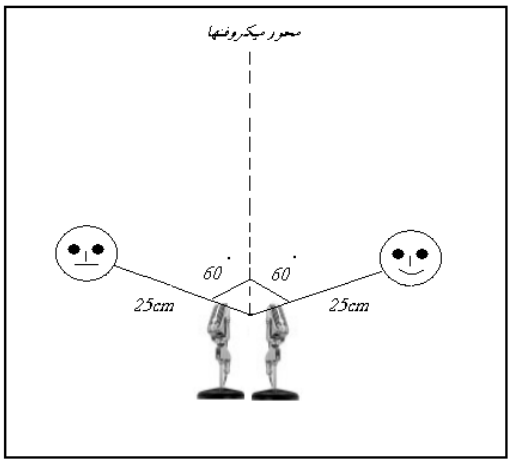
شکل (۲): حالت اول ضبط صدا: فاصله دو گوینده تقریباً مساوی و حدود سی سانتی متر از میکروفن‌ها با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور میکروفن‌ها

Fig. (2): First case: two speaker with the 30 cm distance from microphone and 45' angle to the axis



شکل (۳): حالت دوم ضبط صدا : فاصله دو گوینده تقریباً مساوی و حدود یک متر از میکروفنها و با زاویه ۳۰ درجه نسبت به محور میکروفنها .

Fig. (3): Second case: two speaker with the 1m distance from microphone and 30' angle to the axis



شکل (۴): حالت سوم ضبط صدا: فاصله دو گوینده تقریبا مساوی و حدود بیست وپنج سانتی متر و با زاویه ۶۰ درجه نسبت به محور میکروفنها.

Fig. (4): Third case: two speaker with the 25 cm distance from microphone and 60' angle to the axis

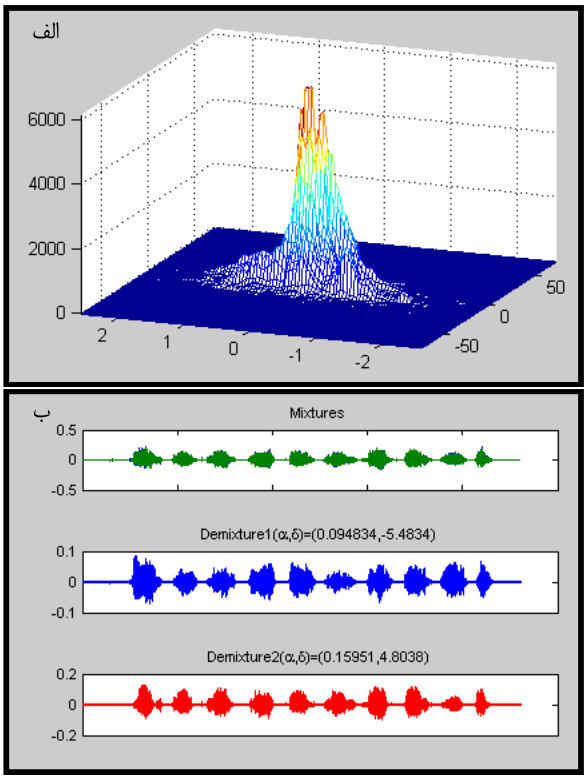
۳-۲- نتایج اجرای الگوریتم DUET پایه بر روی سه فایل صحبت واقعی

نتیجه اجرای الگوریتم بر روی حالت اول ضبط صدا در شکل (۵) آورده شده است. در این شکل دو پنجره مشاهده می‌شود:

- پنجره الف: نمایش هیستوگرام وزن‌دهی شده دو بعدی $H(\alpha,\delta)$، که δ فاکتور تاخیر و α فاکتور تضعیف متقارن است.
- پنجره ب: نمایش سیگنال زمانی مخلوط، سیگنال زمانی صحبت جدا شده گویند اول و سیگنال زمانی صحبت جدا شده گوینده دوم.

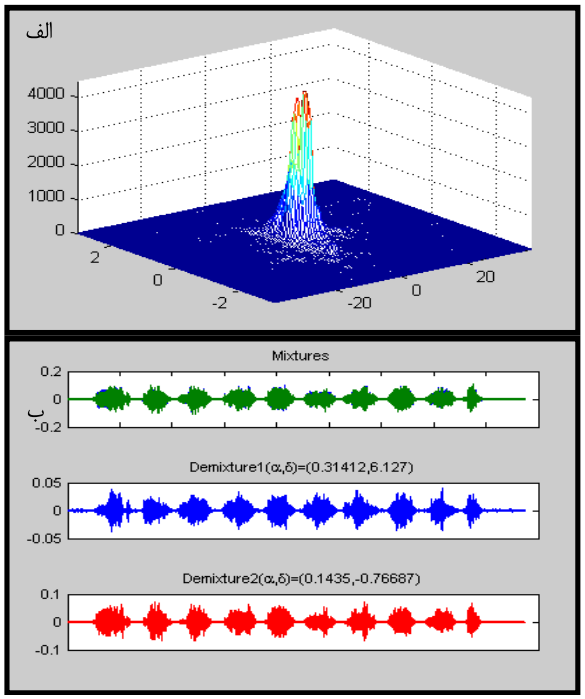
در اینجا باید یادآوری کرد که در پنجره ب تعداد قله‌هایی که آشکار می‌شود نمایانگر تعداد منابعی است که با هم مخلوط شده‌اند. (برای بحث بیشتر در این زمینه به [۲] مراجعه شود.)

همین مراحل عینا برای دو حالت دیگر ضبط صدا اجرا شده و پنجره‌های شکل‌های (۶) و (۷) برای این دو فایل صوتی باز خواهد شد.



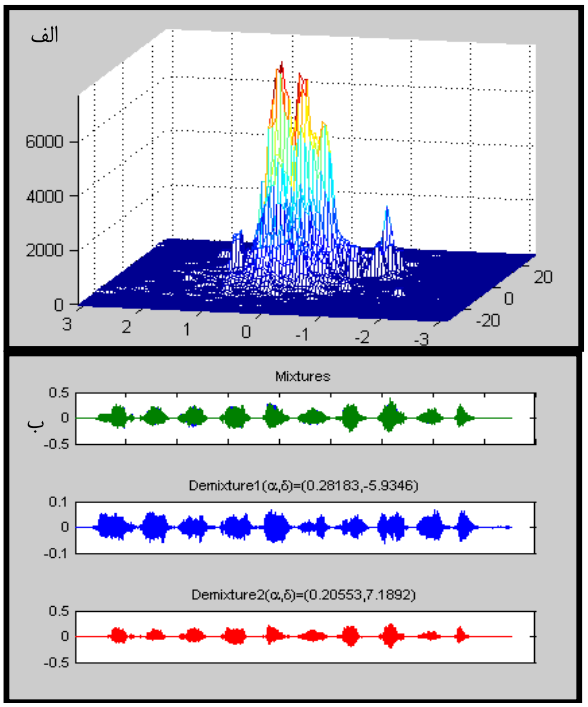
شکل (۵): نتیجه اجرای الگوریتم بر روی حالت اول الف) نمایش هیستوگرام وزن دهی شده دو بعدی ب) نمایش سیگنالهای زمانی

Fig. (5): Algorithm performance result on the first case: a) Two-dimension smoothed weighed histogram b) Representation of time signals



شکل (۶): نتیجه اجرای الگوریتم بر روی حالت دوم الف) نمایش هیستوگرام وزن دهی شده ب) نمایش سیگنال‌های زمانی

Fig. (6): Algorithm performance result on the second case:a) Two-dimension smoothed weighed histogram b) Representation of time signals



شکل (۷): نتیجه اجرای الگوریتم بر روی حالت سوم الف) نمایش هیستوگرام وزن دهی شده ب) نمایش سیگنال‌های زمانی

Fig. (7): Algorithm performance result on the third case: a) Two-dimension smoothed weighed histogram b) Representation of time signals

با بررسی سه حالت ضبط صدا به طور تجربی مشخص می‌شود که هر چه زاویه دو گوینده نسبت به محور میکروفنها بیشتر باشد (گویندگان از هم دورتر باشند) و فاصله هر کدام تا میکروفن مربوط به خود کمتر باشد، کیفیت جداسازی بهتر خواهد بود. از بین این سه حالت ضبط صدا، حالت سوم که دارای شرایط گفته شده است، دارای بهترین کیفیت جداسازی می‌باشد.کیفیت مطلوب جداسازی از قله‌های مجزای آشکار شده در قسمت الف شکل (۷) کاملاً مشهود است.

از بین این سه حالت، حالت دوم بدترین کیفیت جداسازی را دارد. در قسمت الف شکل (۶) قله‌های به هم چسبیده گواهی بر این موضوع است.

۳-۳- نتایج اجرای الگوریتم DUET بهبود یافته بر روی سه فایل صحبت واقعی

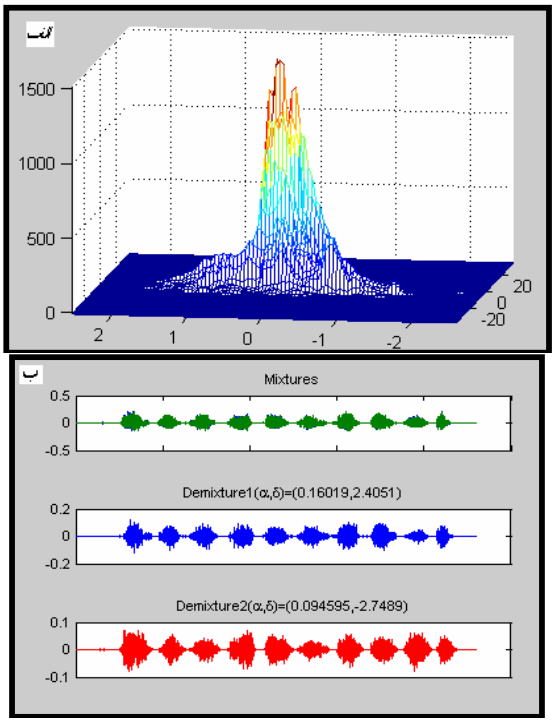
در اینجا لازم به ذکر است که ابتدا نمونه‌ها یکی در میان دور ریخته می‌شوند (کاهش نمونه‌برداری با نرخ دو)، سپس الگوریتم برای این فایل صحبت کاهش حجم یافته اجرا می‌گردد.

البته می‌توان نرخ کاهش نمونه داری را چهار در نظر گرفت اما کیفیت جداسازی بسیار پایین می‌آید. نتایج اجرای الگوریتم روی سه فایل صحبت کاهش حجم یافته در شکلهای (۸) و (۹) و (۱۰) آورده شده است.

در جدول (۲) نیز زمان های اجرای الگوریتم DUET اصلی و الگوریتم DUET تغییر یافته با یکدیگر مقایسه شده است.

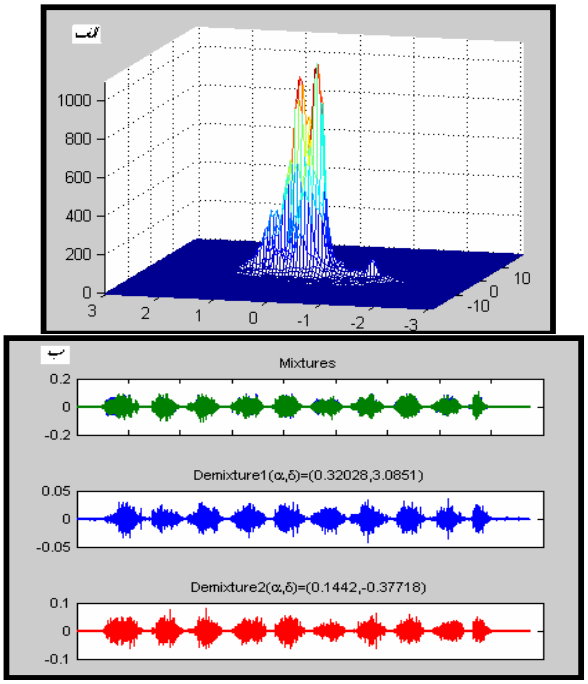
در مورد این جدول ذکر دو نکته ضروری است. نکته اول آن که در هر بار اجرای الگوریتم اصلی و بهبود یافته روی یک فایل صوتی معین، زمانهای متفاوتی به دست می‌آید، اما آنچه اهمیت دارد آن است که همواره یک تفاوت زمانی قابل ملاحظه‌ایی بین اجرای الگوریتم اصلی و الگوریتم بهبود یافته وجود دارد، یعنی همواره زمان اجرای الگوریتم تغییر یافته یک چهارم یا یک سوم زمان اجرای الگوریتم اصلی است.

نکته مهم دیگر این است که این مقایسه زمانی مربوط به زمان اجرای الگوریتم از ابتدا، تا پایان مشخص‌سازی ماسکهای جداکننده است.



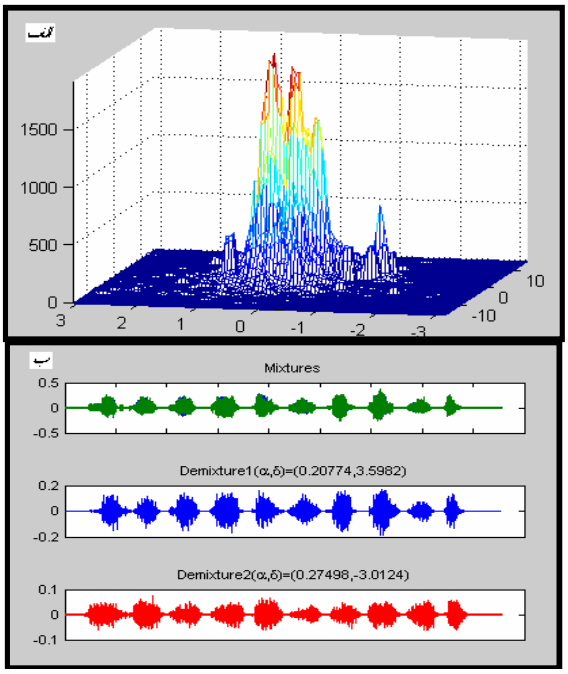
شکل (۸): نتیجه اجرای الگوریتم تغییر یافته بر روی حالت اول الف) نمایش هیستوگرام وزن‌دهی شده ب) نمایش سیگنال‌های زمانی

Fig. (8): Reduced complexity algorithm performance result on the first case: a) Two-dimension smoothed weighed histogram b) Representation of time signals



شکل (۹): نتیجه اجرای الگوریتم تغییر یافته بر روی حالت دوم الف) :نمایش هیستوگرام وزن دهی شده ب) نمایش سیگنال‌های زمانی

Fig. (9): Reduced complexity algorithm performance result on the second case: a) Two-dimension smoothed weighed histogram b) Representation of time signals



شکل (۱۰): نتیجه اجرای الگوریتم تغییر یافته بر روی حالت سوم الف) نمایش هیستوگرام وزن دهی شده ب) نمایش سیگنال‌های زمانی

Fig. (10): Reduced complexity algorithm performance result on the third case: a) Two-dimension smoothed weighed histogram b) Representation of time signals

Table (2): Comparison of run time of original algorithm and reduced complexity DUET algorithm

جدول (۲): مقایسه زمانهای اجرای الگوریتم DUET اصلی و الگوریتم DUET بهبود یافته

	زمان اجرای الگوریتم DUET اصلی	زمان اجرای الگوریتم DUET بهبود یافته
مخلوط صوتی اول	t=47.4864	t=15.6567
مخلوط صوتی دوم	t=53.5144	t=13.9975
مخلوط صوتی سوم	t=49.6122	t=12.9247

۴- نتیجه گیری

برای مؤثر بودن الگوریتم DUET در جهت جداسازی مخلوطهای صحبت واقعی، شرایط ضبط صدا بسیار مهم است. فاصله‌بندی میکروفنها حتماً باید رعایت شود. بسیار مهم است که برای وارد کردن همزمان سیگنالهای خروجی دو میکروفن به کامپیوتر از یک مخلوط‌کننده استفاده شود تا کانال راست وچپ همزمان وارد کامپیوتر شوند. با بررسی سه حالت ضبط صدا به طور تجربی مشخص شد که هر چه زاویه دو گوینده نسبت به محور میکروفنها بیشتر باشد (گویندگان از هم دورتر باشند) و فاصله هر کدام تا میکروفن مربوط به خود کمتر باشد، کیفیت جداسازی بهتر خواهد بود. از بین این سه حالت ضبط صدا، حالت سوم دارای بهترین کیفیت جداسازی می‌باشد. الگوریتم تغییریافته به طور موفقیت‌آمیزی قادر به جداسازی مخلوطهای صوتی واقعی در زمانی حدود یک سوم زمان اجرای الگوریتم پایه می‌باشد.

References

[1] P.D. O'Grady, B.A. Pearl mutter, S. Rickard, "Survey of sparse and non-sparse methods in source separation", Wiley Periodicals, pp. 18-33, Vol. 15, Inc 4, April 2005.

[2] S. Rickard, "The DUET blind source separation algorithm", S. Makino et al. (eds.), Blind speech separation, Springer, 217–237, 2007.

[3] R. Gavelin, H. Klomp, C. Priddle, M. Uddenfeldt, "Blind source separation", Dep.. of Eng. Scie., Uppsala University, Sweden, June 2004.

[4] J. Herault, C. Jutten, "Space or time adaptive signal processing by neural models", In Proc. AIP Conf. on Neur. Net. for Comp., American Institute of Physics, pp. 206–211, 1986.

[5] C. Jutten, J. Herault, "Blind separation of sources, part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture", Signal Process, 24 (1991) of 1–10.

[6] R. Linsker, "An application of the principle of maximum information preservation to linear systems", In Adva. in Neu. Info. Proc. Sys., Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, pp. 186–194, 1989.

[7] P. Comon, "Independent component analysis: A new concept", Signal Process 36, 287–314. 1994.

[8] A.J. Bell, T.J. Sejnowski, "An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution", Neural Comput 7, pp.1129–1159, 1995.

[9] S. Amari, A. Cichocki, H.H. Yang, "A new learning algorithm for blind signal separation", IANIPS.,Vol.8, MIT Press, Cambridge, MA, 1996.

[10] A. Hyva¨rinen, E. Oja, "A fast fixed-point algorithm for independent component analysis", Neural Comput 9, pp.1483–1492, 1997.

[11] M. Gaeta, J.-L. Lacoume, "Source separation without prior knowledge: The maximum likelihood solution", In Proc. EUSIPCO'90, pp.621–624, 1990.

[12] B.A. Pearlmutter, L.C. Parra, "A context-sensitive generalization of ICA", NIP-CON, Hong Kong, Sep. 24–27, Springer-Verlag, pp.151–157, 1996.

[13] A. Jourjine, S. Rickard, O. Yilmaz, "Blind separation of disjoint orthogonalsignals: Demixing N sources from 2 mixtures", ICASSP, Vol.5, pp. 2985–2988, June 2000.

[14] Sample speech: S. Rickard ,http://princeton.edu/~srickard/bss.html Blind Source Separation.