بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه یزد

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی مخابرات

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

برق - مخابرات

مکان‌یابی منابع گفتار با استفاده از نمونه‌برداری فشرده

استاد راهنما: دکتر حمیدرضا ابوطالبی

استاد مشاور: دکتر محمدرضا تابان

پژوهش و نگارش: مهدی بنی‌طالبی دهکردی

بهمن ۱۳۹۰

حمد و سپاس خدایی را که لطف و محبت و هدایتش را هیچ مانعی باز نمی دارد،

تقدیم به

پدر، مادر، برادر و همسر عزیز و مهربانم، به پاس محبت های بی دریغشان در دوران پرفراز و نشیب زندگی ام،

و تقدیم به

تمام آنانی که مشوق دانشم بودند.

تشکر و قدردانی

خدای سبحان را شکر می گویم که این توفیق را به من عطا فرمود تا وجود خویش را به زینت علم بیارایم. بعد از سپاس از خداوند متعال که الطاف بیکرانش همواره شامل حال من بوده است، از پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی پشتیبان من و یاور من بوده اند، تشکر می نمایم، زحماتشان را ارج می نهم و برایشان بهترین آرزوها را دارم.

بدین وسیله مراتب تشکر و امتنان خود را از استاد راهنمای پروژه، جناب آقای دکتر حمید رضا ابوطالبی و استاد ارجمند، جناب آقای دکتر محمد رضا تابان به خاطر راهنمایی های صبورانه و عالمانه شان، در طول انجام این پروژه ابراز می نمایم.

از الطاف و محبت های کلیه اساتیدی که در طول دوران تحصیل افتخار شاگردی آن ها را داشته ام، قدردانی نموده و از درگاه ایزد منان برایشان آرزوی توفیق و موفقیت روز افزون در تمام مراحل زندگی را خواهانم.

چکیده

مکان‌یابی منابع گفتار از جمله زمینه‌های تحقیقاتی است که امروزه مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در برخی کاربردها، مکان‌یابی منابع صوت خود به عنوان هدف نهایی پردازش مطرح است و در برخی دیگر، مکان‌یابی پیش‌نیاز مراحل بعدی پردازش (نوعاً بهسازی گفتار) می‌باشد. با داشتن این اطلاعات می‌توان با حذف منابع تداخلی و مزاحم، سیگنال گفتار را بهسازی کرد. همچنین با داشتن اطلاعات مکان سیگنال گفتار با اعمال فیلتر فضائی می‌توان برای جداکردن تک گوینده در حالت چند گویندگی بهره برد. زمینه کاری این پایان‌نامه در مورد مکان‌یابی منابع صوت با استفاده از تکنیک نمونه‌برداری فشرده است. تخمین مکان منبع صوت می‌بایست با سرعت بالا و تأخیر خیلی کم انجام شود تا به اندازه کافی دقیق باشد، به همین دلیل گزینه‌ی استفاده از نمونه‌برداری فشرده به منظور کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت پردازش، از جمله گزینه‌های مطلوب برای انتخاب می‌باشد. در نمونه‌برداری فشرده ما به دنبال ایجاد تُنُکی و استفاده از شرایط مربوط به نمونه‌برداری تصادفی و کاهش حجم محاسبات هستیم. برای رسیدن به این هدف دو راه پیش روی ما وجود دارد، راه اول استفاده از یک سیگنال ورودی تُنُک در محاسبات مربوط به الگوریتم‌های مختلف مکان‌یابی است. در روند مطالعات انجام شده الگوریتمی ارائه شد که با استفاده از روش استخراج ویژگی مبتنی بر نمونه‌برداری فشرده تُنُکی مورد نظر ایجاد می‌گردد و در نهایت با استفاده از این کاهش بُعد مکان‌یابی صورت می‌گیرد. راه دوم استفاده از فرض تُنُکی فضایی موقعیت منابع است. در این راستا الگوریتمی ارائه شد که فضا را بر روی نقاط موجود در یک شبکه‌ی حلقوی نظیر می‌کند. این فرض باعث ایجاد تُنُکی در محاسبات می‌شود. در قسمت انتهایی این پایان‌نامه الگوریتمی ارائه شد که ترکیبی از دو راه فوق برای استفاده از نمونه‌برداری فشرده و درنتیجه کاهش حجم محاسبات، می‌باشد.

کلمات کلیدی:

مکان‌یابی منبع گفتار، نمونه‌برداری فشرده، تُنُکی فضایی، شبکه‌ی حلقوی، آرایه میکروفونی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول ۱

پیشگفتار ۱

۱-۱- سیستم پردازش آرایه‌ای ۱

۱-۲- سیستم‌های آرایه میکروفونی ۲

۱-۲-۱- مکان‌یابی گوینده با استفاده ازحسگرهای صوتی ۳

۱-۲-۲- تقسیم‌بندی روش‌های مکان‌یابی بر اساس تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بودن ۴

۱-۳- معرفی تکنیک نمونه‌برداری فشرده ۴

۱-۴- ساختار این پایان‌نامه ۵

فصل دوم ۷

نمونه‌برداری فشرده و کاربرد آن در پردازش سیگنال‌های گفتار ۷

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- کلیات و مفاهیم ۸

۲-۲-۱- انگیزه ۸

۲-۲-۲- پایه‌های ناهمدوس ۸

۲-۳- روش‌های بازسازی سیگنال ۹

۲-۳-۱- بازسازی سیگنال بوسیله بهینه‌سازی ترکیبی ۱۰

۲-۳-۲- بازسازی به‌وسیله‌ی بهینه‌سازی همگرا ۱۱

۲-۳-۳- بازسازی سیگنال توسط الگوریتم دنباله‌های حریصانه ۱۱

۲-۴- کاربردهای نمونه‌برداری فشرده ۱۳

۲-۴-۱- کاربرد نمونه‌برداری فشرده در مکان‌یابی منبع سیگنال ۱۳

۲-۴-۲- کاربرد نمونه‌برداری فشرده در کاهش نویز از سیگنال گفتار (استفاده در بازشناسی گفتار) ۱۴

فصل سوم ۱۷

روش‌های بدست آوردن مکان منابع مولد سیگنال گفتار ۱۷

۳-۱- مقدمه ۱۷
۳-۲- مکان یابی منابع با استفاده از پراکندگی فضایی ۲۰
۳-۳- مکان یابی منابع ارسال کننده سیگنال بوسیله‌ی اندازه‌گیری انرژی سیگنال دریافتی .. ۳۱
۳-۴- آشکارسازی هدف در شبکه‌های بیسیم با استفاده از تعیین مدل مناسب مبتنی بر نمونه‌برداری فشرده ۳۶
فصل چهارم ۴۲
الگوریتم‌ها و اصطلاحات پیشنهادی مطرح شده در این تحقیق ۴۲
۴-۱- مقدمه ۴۲
۴-۲- طراحی شبکه‌عصبی فشرده مبتنی بر نمونه‌برداری فشرده برای مکانیابی منابع گفتار ... ۴۳
۴-۳- مکان‌یابی منابع گفتار با استفاده از تُنُکی فضایی و در نظر گرفتن یک شبکه‌ی حلقوی فرضی ۵۴
۴-۴- مکان‌یابی منابع صوت با استفاده روش جدید استخراج ویژگی مبتنی بر تُنُکی و طیف سیگنال دریافتی و تُنُکی فضایی مکان منابع ۵۹
۴-۵- مکان‌یابی منابع با استفاده از روش استخراج ویژگی مبتنی بر نمونه‌برداری فشرده و تُنُکی فضایی با در نظر گرفتن یک شبکه‌ی حلقوی ۶۳
فصل پنجم ۶۸
جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۶۸
۵-۱- خلاصه ای از کارهای انجام شده ۶۸
۵-۲- نتیجه‌گیری ۶۹
۵-۳- دستاوردهای پایان‌نامه ۷۰
۵-۴- پیشنهادهایی برای ادامه کار ۷۰
فصل ششم ۷۲
ضمائم ۷۲
۶-۱- مبانی ریاضی نمونه برداری فشرده ۷۲
۶-۱-۱- مینیمم کردن نُرم l_1 به صورت مقید ۷۲
۶-۱-۲- مینیمم کردن خطای تخمین در نُرم l_1 ..... ۷۲
۶-۱-۳- مینیمم کردن نرم l_1 بوسیله تحمیل شرایط درجه دوم ۷۳
۶-۱-۴- مینیمم کردن نرم l_1 به وسیله‌ی همبستگی پسماندِ محدود ۷۳

۶-۲- بسته های مورد استفاده در برنامه نویسی کامپیوتری در زمینه نمونه برداری فشرده ۷۴
۶-۲-۱- Sparse Lab ۷۴
۶-۲-۲- magic l_1 ..... ۷۴
۶-۲-۳- Baysian Compressive Sensing ۷۵
۶-۲-۴- Sparco ۷۵
مراجع ۷۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۱– شبکه‌ی چهارخانه نشان دهنده‌ی توزیع منابع صوت و میکروفون‌ها مربوط به سناریوی [۱۸]..... ۲۲

شکل ۳-۲- تخمین صورت گرفته توسط الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۸] برای ۲ منبع و ۲ میکروفون..... ۲۷

شکل ۳-۳- مقایسه‌ی الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۸] با الگوریتم ارائه شده در مرجع [۲۵] برای ۲ منبع و ۲ میکروفون..... ۲۷

شکل ۳-۴- تخمین صورت گرفته توسط الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۸] برای ۲ منبع و ۲ میکروفون با SNR=0dB..... ۲۸

شکل ۳-۵- تخمین صورت گرفته توسط الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۸] برای ۲ منبع و ۲ میکروفون با SNR=5dB..... ۲۸

شکل ۳-۶- تخمین صورت گرفته توسط الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۸] برای ۲ منبع و ۲ میکروفون با SNR=30dB..... ۲۹

شکل ۳-۷- تخمین صورت گرفته توسط الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۷] برای ۲ منبع و ۲ میکروفون با SNR=5dB و T=120ms..... ۳۰

شکل ۳-۸- تخمین صورت گرفته توسط الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۸] برای ۲ منبع و ۲ میکروفون با SNR=5dB و T=350ms..... ۳۰

شکل ۳-۹- تخمین صورت گرفته توسط الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۸] برای ۲ منبع و ۲ میکروفون با SNR=5dB و T=540ms..... ۳۱

شکل ۳-۱۰- شبکه‌ای فرضی برای آشکارسازی هدف..... ۳۱

شکل ۳-۱۱- فلوچارت آشکارسازی هدف با استفاده ازCS ۳۳

شکل ۳-۱۲- مقایسه‌ی الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۸] با الگوریتم ارائه شده در مرجع [۲۵] و [۳۵] برای ۲ منبع و ۲ میکروفون..... ۳۶

شکل ۳-۱۳ – مدل سیستم فرضی..... ۳۷

شکل ۴-۱ – موقعیت منابع دور نسبت به آرایه میکروفونی..... ۴۵

شکل ۴-۲ - چگونگی تخمین موقعیت منابع دور ۴۵

شکل ۴-۳ – نمای شبکه عصبی مورد استفاده برای تخمین DOA..... ۴۶

شکل ۴-۴ – الگوریتم بکار رفته برای طراحی بردار ویژگی مورد استفاد ه در شبکه‌ی عصبی..... ۴۷

شکل ۴-۵ – تغییرات میزان خطا برحسب تعداد حسگر ۴۹

شکل ۴-۶ – تغییرات میزان خطا برحسب تعداد نرون در لایه مخفی..... ۵۰

شکل ۴-۷ – تغییرات میزان خطا برحسب تعداد فرکانس بکار رفته در مدل سیگنال گفتار..... ۵۱

شکل ۴-۸ – تغییرات میزان خطا برحسب فاصله بین حسگرها..... ۵۱

شکل ۴-۹ – تغییرات میزان خطا برحسب تغییرات سیگنال به نویز..... ۵۲

شکل ۴-۱۰ – شبکه‌ی چهارخانه جدید در نظر گرفته شده ۵۵
شکل ۴-۱۱- شبکه‌ای فرضی در نظر گرفته شده ۵۸
شکل ۴-۱۲ – مکان‌یابی ۲ منبع مولد سیگنال بوسیله‌ی ۲ میکروفون توسط الگوریتم ارائه شده در این بخش (با وجود نویز در سیگنال ورودی به میکروفون‌ها) ۶۰
شکل ۴-۱۳ – مکان‌یابی ۲ منبع مولد سیگنال بوسیله‌ی ۲ میکروفون توسط الگوریتم ارائه شده در این بخش (عدم وجود نویز در سیگنال ورودی به میکروفون‌ها) ۶۱
شکل ۴-۱۴ – مقایسه‌ی نتایج بدست آمده برای مکان‌یابی ۲ منبع مولد سیگنال بوسیله‌ی ۲ میکروفون توسط الگوریتم ارائه شده (CSL) در این بخش با الگوریتم‌های ارائه شده در مراجع [۱۸] (DTL) و [۲۵] (CS_NN) ۶۲
شکل ۴-۱۵– پایداری الگوریتم در برابر نویز ۶۴
شکل ۴-۱۶-۱– مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم ارائه شده در این بخش ۶۶
شکل ۴-۱۶-۲– مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم ارائه شده در این بخش با الگوریتم CSL ۶۶
شکل ۴-۱۶-۳– مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم ارائه شده در این بخش با الگوریتم DTL ۶۷

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱– مقایسه‌ی اطلاعات تخمین زده شده توسط مدل ارائه شده در ۱۰۰ بار اجرا برای یک منبع (فواصل برحسب متر و زوایا برحسب درجه) ۵۷

جدول ۴-۲– مقایسه‌ی میانگین خطای فواصل نقاط تخمین زده شده از مکان واقعی در ۱۰۰ بار اجرا با اهداف متفاوت (فواصل برحسب متر) ۵۸

جدول ۴-۳– مقایسه‌ی میانگین خطای فواصل نقاط تخمین زده شده از مکان واقعی در SNRهای مختلف (فواصل برحسب متر) ۵۸

جدول ۴-۴– مقایسه‌ی میانگین خطای فواصل نقاط تخمین زده شده از مکان واقعی در SNR=5dB و زمان‌های انعکاس مختلف (فواصل برحسب متر) ۵۸

جدول ۴-۵– خطای تخمین مکان دو منبع مولد سیگنال به وسیله دو میکروفون توسط الگوریتم ارائه‌شده (CSL). در این بخش با الگوریتم‌های ارائه‌شده در مراجع [۱۸] (DTL) و [۲۵] (CSNN) ۶۳

جدول ۴-۶– مقایسه‌ی میانگین خطای فواصل نقاط تخمین زده شده از مکان واقعی در SNRهای مختلف (فواصل برحسب متر) ۶۳

جدول ۴-۷– مقایسه‌ی میانگین خطای فواصل نقاط تخمین زده شده از مکان واقعی در SNR=5dB و زمان‌های انعکاس مختلف (فواصل برحسب متر) ۶۳

جدول ۴-۸- مقایسه نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف مکان‌یابی منابع گفتار مبتنی بر نمونه‌برداری با الگوریتم ارائه شده در این بخش (سیگنال استفاده شده سیگنال گفتار شبیه سازی شده است) ۶۵

جدول ۴-۹- مقایسه نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف مکان‌یابی منابع گفتار مبتنی بر نمونه‌برداری با الگوریتم ارائه شده در این بخش (سیگنال استفاده شده سیگنال گفتار واقعی است) ۶۵

فصل اول

پیشگفتار

در این فصل به منظور ارائه دسته‌بندی از انواع روش‌های مکان‌یابی منبع گفتار، ابتدا سیستم‌های پردازش آرایه‌ای معرفی شده و کاربرد آن در مکان‌یابی منابع صوت توضیح داده می‌شود. در ادامه فصل تکنیک نمونه‌برداری فشرده و روش‌های مکان‌یابی منبع گفتار مبتنی بر این تکنیک بیان می‌گردد. در آخر هم ساختار اصلی این پایان‌نامه بیان می‌شود.

۱-۱- سیستم پردازش آرایه‌ای[1]

به مجموعه‌ای از چندین حسگر[2] که در مکان‌های مختلفی قرار گرفته و کار جمع‌آوری سیگنال از نقاط مختلف فضا را انجام می‌دهد، آرایه حسگر می‌گویند. به‌دلیل خاصیت تبدیل انرژی حسگرها که امواج برخورد کننده را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، در پردازش‌هایی که بر روی امواج انجام می‌گیرد به صورت گسترده از آنها استفاده می‌شود. از جمله دیگر خواص حسگرها این است که خروجی هر حسگر از آرایه با میدان موج در مکان آن حسگر متناسب است که این ویژگی امکان فیلتر نمودن فضا توسط یک آرایه‌ی حسگری را فراهم می‌کند. آرایه از ترکیب خروجی‌های چندین حسگر استفاده می‌کند تا خروجی نهایی دلخواه را فراهم آورد.

هدف الگوریتم‌های پردازش آرایه‌ای ترکیب خروجی حسگرهای یک آرایه به منظور دستیابی به اهدافی خاص، بوسیله‌ی اطلاعات زمانی و مکانی بدست آمده از حسگرها است. ازجمله اهدافی که در این الگوریتم‌های پردازشی دنبال می‌شود می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

---

[1] . Array Processing System

[2] . Sensor

- بهبود کیفیت (افزایش نسبت سیگنال به نویز[1] (SNR)، کاهش پژواک[2]، کاهش تداخل و ...) سیگنال بدست آمده از آرایه در مقایسه با سیگنال ورودی به تک‌تک میکروفون‌ها یا حسگرهای آرایه.
- بدست آوردن خواص منبع انتشار دهنده و همچنین محیطی که موج در آن انتشار یافته است؛ مانند مکان منبع، سرعت منبع، راستای حرکت منبع، سرعت موج در محیط، پاسخ ضربه‌های بین منبع و هر حسگر و ...
- رهگیری یک یا چندین گوینده متحرک در محیط‌های واقعی (دارای نویز و انعکاس و تداخل).

۱-۲- سیستم‌های آرایه میکروفونی

سیستم‌های آرایه میکروفونی از حدود بیست سال پیش در مباحث مربوط به پردازش سیگنال‌های گفتار برای بدست آوردن اصوات با کیفیت بالا و نیز مکان‌یابی منبع گفتار به کارگرفته شدند. در مرجع [۱] مطالب بیشتری در مورد کاربردهای آرایه‌های میکروفونی ارائه شده است. ازجمله مهمترین توانایی‌های این سیستم‌ها فیلتر کردن فضا می‌باشد که اجازه می‌دهد سیگنال گفتاری یک گوینده از گوینده‌های دیگر و منابع ناخواسته و مزاحم جدا شود. این فرآیند عموماً بیم‌فرمینگ[3] یا شکل‌دهی پرتو نامیده می‌شود. دسته‌ای از سیستم‌های آرایه‌ای طوری طراحی شده‌اند که در یک جهت دلخواه متمرکز شده و بدین طریق نه تنها جهت‌دهی و رزولوشن (دقت) مکانی را زیاد می‌کنند، بلکه به ما اجازه می‌دهند تا الگوی تشعشعی را بدون نیاز به حرکت فیزیکی حسگرها به دلخواه و با سرعت زیاد تغییر داده و همزمان چندین هدف را آشکارسازی و دنبال نماییم. ویژگی جهت‌دهی الکترونیکی، نیاز به تجهیزات الکترونیکی از قبیل میکروفون‌های جهت‌دار و یا بوم‌های صدا را برطرف می‌کند. این امر گوینده را قادر می‌سازد بدون نیاز به همراه داشتن میکروفون و با آزادی عمل زیادی حرکت کند. ازجمله دیگر قابلیت‌های مهم و قابل توجه آرایه

---

[1] . Signal to Noise Ratio
[2] . Reverberation
[3] . Beam-forming

میکروفونی می‌توان آشکارسازی[1] منابع صوتی، مکان‌یابی منبع[2] و دنبال‌کردن[3] یا رهگیری منبع را نام برد.

۱-۲-۱- مکان‌یابی گوینده با استفاده ازحسگرهای صوتی

یکی از کاربردهای مهم سیستم‌های آرایه میکروفونی مکان‌یابی منبع سیگنال گفتار (یک یا چندین منبع) می‌باشد. برای کاربردهایی نظیر بهسازی سیگنال گفتار[4]، به منظور هدایت موثر پرتو آرایه به سمت منبع دلخواه، دانستن مکان دقیق گوینده اولیه و نیز داشتن اطلاعاتی در مورد منابع نویز و گوینده‌های تداخلی لازم است. با داشتن این اطلاعات می‌توان با حذف منابع تداخلی و مزاحم، سیگنال گفتار را بهسازی کرد. همچنین از اطلاعات مکان سیگنال گفتار با اعمال فیلتر فضائی می‌توان برای جداکردن تک گوینده در حالت چند گویندگی بهره برد. این مسأله به طور وسیعی در پردازش‌های اتاق کنفرانس مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲-۳]. مکان گوینده برای انتخاب و جهت‌دهی دوربین برای فیلم‌برداری و یا تولید مدل از محیط نیاز می‌باشد.

زمینه کاری این پایان‌نامه در مورد مکان‌یابی منابع صوت با استفاده از تکنیک نمونه‌برداری فشرده[5] است. تخمین مکان منبع صوت می‌بایست با سرعت بالا و تأخیر خیلی کم انجام شود تا به اندازه کافی دقیق باشد، به همین دلیل گزینه‌ی استفاده از نمونه‌برداری فشرده به منظور کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت پردازش، ازجمله گزینه‌های مطلوب برای انتخاب می‌باشد.

---

[1] . Detection
[2] . Source Localization
[3] . Tracking
[4] . Speech Enhancement
[5] . Compressive Sampling

۱-۲-۲- تقسیم‌بندی روش‌های مکان‌یابی بر اساس تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بودن

روش‌های مکان‌یابی منبع صوت را از دیدگاه‌های مختلفی می‌توان تقسیم‌بندی نمود که یکی از این تقسیم‌بندی‌ها، به صورت زیر می‌باشد:

۱) الگوریتم‌های دومرحله‌ای[1] و

۲) الگوریتم‌های تک‌مرحله‌ای[2].

در یک الگوریتم دو مرحله‌ای، در مرحله اول اختلاف زمانی سیگنال‌های گفتار ورودی به جفت میکروفون‌ها محاسبه و در مرحله دوم، با استفاده از این تأخیرهای زمانی، مکان هندسی موقعیت میکروفون‌ها بدست آمده و از روی این منحنی‌ها، مکان منبع تخمین زده می‌شود. چیزی که در مورد همه‌ی این روش‌ها عمومیت دارد این است که در شرایط نامطلوب محیطی از قبیل وجود انعکاس و یا نویز درمحیط، از دقت و کارآیی آنها کاسته می‌شود.

در مقابل، الگوریتم‌های تک مرحله‌ای پردازش را به صورت جفت–جفت[3] میکروفون انجام نداده و برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های دسته قبل از برآیند اطلاعات تعداد زیادی میکروفون بهره می‌گیرند.

۱-۳- معرفی تکنیک نمونه‌برداری فشرده

نمونه‌برداری فشرده و الگوریتم‌های مختلف استفاده کننده از آن، از حدود ۴ دهه پیش در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی به وجود آمده‌اند [۴]. به دلیل تُنُکی ذاتی اکثر سیگنال‌ها (که حاوی تعداد زیادی نمونه‌ی صفر یا با انرژی پایین درون مجموعه نمونه‌های خود هستند)، این تکنیک، نتایج کاربردی بسیار خوبی در زمینه‌های مختلف پیدا کرده است. در این تکنیک با وزن دادن

---

[1] . two–stage

[2] . one–stage

[3] . Pairwise