

تخمین طیف فرکانسی در رادیوهای شناختگر به کمک فیلتر ذره مبتنی بر روش باز نمونه برداری

محمدعلی شورش^۱، حسین خالقی بیزکی^۲

۱. دانشجوی دکتری فناوری اطلاعات، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۲. دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، bizaki@ee.iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۵

چکیده

تخمین طیف فرکانسی یکی از موضوعات مورد نیاز در رادیوهای شناختگر است. در این مقاله، برای تخمین طیف فرکانسی از حل معادلات بیزین با فرض یک سیستم غیرخطی با توزیع غیرگوسی نویز بر اساس الگوریتم فیلتر ذره استفاده شده و به منظور کاهش محاسبات، با روش باز نمونه برداری توسعه داده شده است. در این روش، ابتدا سیگنال کاربران اولیه تخمین زده شده، سپس مکان طیفی کاربر اولیه با استفاده از ذرات کاندید در مرحله بعد پیشگویی شده و از روی میزان شباهت با مدل کاندید ذرات، وزن دهی آغاز می شود. سپس با استفاده از الگوریتم باز نمونه برداری در فیلتر ذره، ذرات کاندید بسوی ذرات با وزن بیشتر سوق می یابند و وضعیت مشغول یا خالی بودن طیف فرکانسی سیگنال های کاربران اولیه تخمین زده می شود. با تخمین طیف فرکانسی محدوده مجاز برای کاربر ثانویه از حفره های طیفی مشخص می شود که بتواند بدون ایجاد مزاحمت و تداخل برای کاربر اولیه از طیف فرکانسی استفاده نماید. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با توجه به هر طیف موجود تعداد ذرات بهینه وجود دارد که باعث خطای حداقلی شده و از طرفی متناسب با ذرات بهینه یک زمان بهینه نیز وجود دارد که هر چه تعداد ذرات کم یا زیادتر شود زمان سنجش بیشتر خواهد شد. همچنین از نتایج بدست آمده می توان به کاهش خطا نسبت به برخی روش ها و افزایش سرعت سنجش طیف به روش های دیگر اشاره نمود.

کلیدواژه

فیلتر ذره، رادیو شناختگر، تخمین طیف، روش باز نمونه برداری.

مقدمه

کاربرانی که از طریق سازمان های تخصیص فرکانسی، حق استفاده از قسمت خاصی از طیف فرکانسی را دارند، اصطلاحاً کاربران اولیه^۱ اطلاق می گردد. به عبارت دیگر کاربران اولیه را می توان مالکان اصلی بخشی از طیف فرکانسی که مجاز به فعالیت در آن هستند، در نظر گرفت [۲]. کاربر ثانویه^۲ به کاربری اطلاق می شود که به صورت آگاهانه یا غیرآگاهانه از حفره های خالی طیف در زمان عدم حضور کاربر اولیه استفاده نماید.

در مقاله های [۴] تا [۱۱] چندین روش سنجش طیف فرکانسی با روش های مختلف بررسی شده است.

در [۴] و [۵] آشکارسازی به روش فیلترینگ منطبق^۳ بررسی شده است. مشکل اصلی این روش این است که رادیو هوشمند نیاز به یک گیرنده اختصاصی برای هر نوع سیگنال اولیه دارد که این روش را پرهزینه و پیچیده می کند. در صورتی که در روش

گسترش روز افزون استفاده از سیستم های مخابراتی در دهه های اخیر باعث ازدحام و ترافیک در طیف فرکانسی شده است. طیف فرکانسی یک منبع طبیعی محدود است و باتوجه به تقاضای زیاد، باید به شکل بهینه استفاده شود. از طرف دیگر، نتایج سنجش طیف نشان می دهد که در سیستم های مخابرات بی سیم بخش های عمده ای از طیف فرکانسی کاربران در زمان هایی بدون استفاده می ماند. هدف مقاله حاضر، تخمین سریع و با دقت طیف های بدون استفاده کاربران اولیه در یک شبکه مخابراتی سیار به منظور استفاده توسط کاربران ثانویه در رادیوهای شناختگر است.

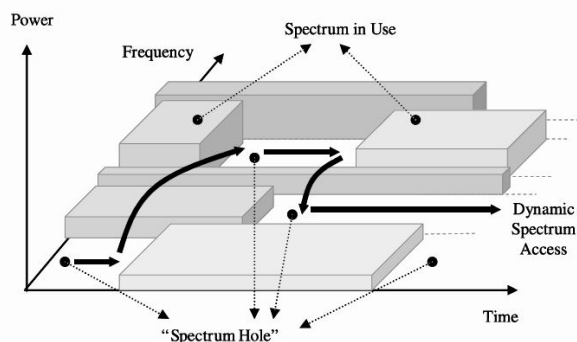
رادیو شناختگر اولین بار در سال ۱۹۹۹ توسط میتولا در مقاله ای در کارگاه آموزشی ارتباطات چندرسانه ای موبایل IEEE مطرح شد [۱]. رادیو شناختگر رادیویی است که توانایی سنجش طیفی محیط اطراف خود را داراست بطوری که به صورت پویا به طیف دسترسی پیدا می کند. در زمینه سیستم های اشتراک طیفی، به

1. Primary User
2. Secondary User
3. Match Filter

در بخش دوم سنجش طیف فرکانسی و روش‌های متداول سنجش طیف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم الگوریتم فیلتر ذره، روش باز نمونه برداری برای سنجش طیف فرکانسی توضیح داده شده است و در بخش چهارم نتایج مربوط به شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی ارائه و با پیاده سازی روش‌های سطح بندی (MSP) و (MSS) با روش مطرح شده در مقاله حاضر بررسی و مقایسه شده است.

سنجش طیف فرکانسی

سنجش طیف فرکانسی یکی از مهمترین کارهای مورد استفاده برای رادیوهای شناختگر جهت مشخص نمودن طیف مشغول و حفره‌های طیفی است.



شکل ۱۰: حفره‌های طیفی در زمان‌ها، باند‌های فرکانسی و توان‌های مختلف [۴]

شکل ۱ حفره‌های طیفی را بصورت نمونه در زمان‌ها، فرکانس‌ها و توان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنها بخشی از منابع زمانی و فرکانسی توسط کاربران اولیه استفاده می‌شود. بنابراین یک کاربر ثانویه می‌بایست برای تعیین فرکانس کاری بطور مداوم و هم‌زمان وضعیت طیف فرکانسی را بررسی نموده و در زمان لازم بتواند فرکانس کاری خود را تغییر دهد. پس از سنجش طیف فرکانسی، کاربران ثانویه قادر به استفاده از طیف به دو روش ارسال هم‌پوشانی و یا ارسال زمینه‌ای^۴ می‌باشند [۵] و [۶]. در روش هم‌پوشانی، کاربران ثانویه قسمتی از طیف که توسط کاربران اولیه استفاده نمی‌شود را به صورت فرصت طلبانه مورد استفاده قرار می‌دهند. در روش ارسال زمینه‌ای، کاربر ثانویه با استفاده از تکنیک طیف گسترده از محدوده وسیعی از باند فرکانسی و به صورت هم‌زمان و هم کانال با فعالیت کاربر اولیه و با توان پایین استفاده می‌کند. مهمترین مسئله در این طرح، کنترل توان ارسال به منظور عدم تداخل با فعالیت کاربران اولیه، خواهد بود. در این حالت هدف این است که حضور کاربر ثانویه برای کاربر اولیه همانند نویز تلقی شود [۵].

پیشنهادی با توجه به استفاده از آشکارساز انرژی دارای سرعت بالاتر و هزینه کمتری می‌باشد.

در [۶] و [۷] آشکارسازی براساس خواص ایستادن چرخشی^۴ بررسی شده است. آشکارسازی ویژگی ایستایی گردشی به جای چگالی طیف توان از تابع خود همبستگی متناوب برای آشکارسازی حضور سیگنال در یک طیف مشخص استفاده می‌کند. الگوریتم‌های آشکارسازی براساس ایستایی، نویز را از سیگنال کاربر اولیه متمایز می‌کند. لیکن آشکارساز ایستادن گردشی پیچیدگی محاسباتی بالایی دارد و نمی‌تواند عملکرد بلادرنگ لازم برای سنجش طیف در رادیو شناختگر را برآورده کند. در صورتی که روش پیشنهادی برای حداقل تاخیر می‌باشد.

در [۸] با استفاده از فیلترکالمن سنجش طیف فرکانسی انجام شده است. در این روش مبنای سنجش براساس شرایط خطی با نویز گوسی می‌باشد که از مزایای این روش سادگی و سرعت تخمین طیف می‌باشد. در صورتی که طیف می‌تواند دارای شرایط غیرخطی با نویز غیرگوسی باشد که در این حالت این روش کارایی مناسب را ندارد. روش پیشنهادی این مشکل را حل نموده ولی در عوض دارای زمان سنجش بیشتری است.

در [۹] با استفاده از فیلترکالمن پیشرفته سنجش طیف فرکانسی انجام شده است. در این روش مبنای سنجش بر اساس شرایط غیرخطی با نویز گوسی می‌باشد که از مزایای این روش سادگی و سرعت تخمین طیف می‌باشد. در صورتی که طیف می‌تواند دارای شرایط غیرخطی با نویز غیرگوسی باشد که در این حالت این روش کارایی مناسب را ندارد. روش پیشنهادی این مشکل را حل نموده ولی در عوض دارای زمان سنجش بیشتری است.

در [۱۱] از روش موجک (ویولت) با روش آشکارسازی لبه به روش سطح بندی^۵ MSS و MSP^۶ استفاده شده که در این مقاله روش MSS دارای سرعت بیشتری ولی در تشخیص لبه دارای خطا می‌باشد از طرفی MSP دارای دقت بیشتر در عوض سرعت پائین تری است. در مقایسه با روش پیشنهادی در مواقعی که محدوده فرکانسی مورد نظر دارای طیف وسیعی باشد روش MSS دارای خطای بیشتر و MSP دارای سرعت کمتری می‌باشد. در تخمین طیف فرکانسی با استفاده از فیلتر ذره و با توجه به برتری نسبی [۱۱] نسبت به سایر روش‌ها (از قبیل، کارایی الگوریتم پیشنهادی در این نوشتار با شبیه سازی انجام شده در [۱۱] مقایسه شده است. روش موجک نسبت به روش‌های دیگر در برابر شرایط غیرخطی و نویز غیرگوسی دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

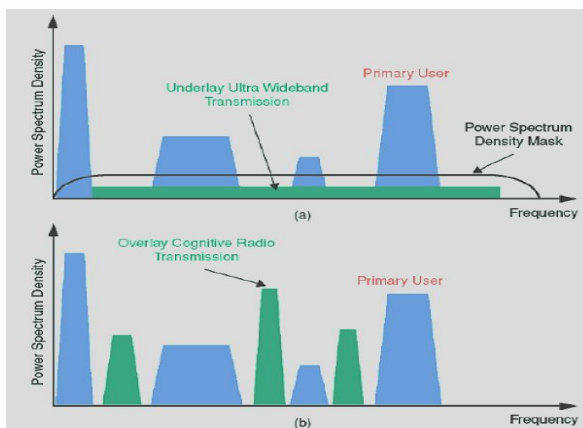
4. Cyclo stationary
5. Wavelet
6. Multi scale sum
7. Multi scale product

تابع خود همبستگی است که به جای چگالی طیف توان از تابع خود همبستگی متناوب برای آشکارسازی حضور سیگنال در یک طیف مشخص استفاده می‌شود. الگوریتم‌های آشکارسازی براساس وجود همبستگی طیفی در سیگنال‌های مدوله و عدم وجود همبستگی در نویز می‌تواند نویز را از سیگنال کاربر اولیه متمایز می‌کند [۶]. بنابراین اگر سیگنال به همراه نویز باشد، بین سیگنال و نویز هیچ گونه همبستگی وجود ندارد. این روش می‌تواند برای انواع مختلف فرستنده‌ها و کاربرهای اولیه بکار رود و در جاهایی که هیچ گونه اطلاعاتی از سیگنال اولیه، نوع و مدولاسیون آن در دسترس نباشد، می‌تواند مفید واقع شود. به طور معمول آشکارساز ایستگاه گردشی پیچیدگی محاسباتی بالایی دارد و نمی‌تواند عملکرد بلادرنگ لازم برای سنجش طیف در رادیو شناختگر را برآورده کند [۶] و [۲] به دلایل گفته شده در مقاله حاضر دارای کاربرد نمی‌باشد.

آشکارسازی انرژی^{۱۰}

اگر گیرنده اطلاعات کافی درباره سیگنال کاربر اولیه نداشته باشد، مثلاً تنها توان نویز گوسی تصادفی برای گیرنده معلوم باشد، آشکارساز مناسب یک آشکارساز انرژی خواهد بود. ایده آشکارسازی براساس انرژی سیگنال دریافتی متداول‌ترین راه سنجش طیف است. در این روش گیرنده نیازی به دانستن اطلاعات از کاربر اولیه ندارد و سیگنال با یک بار تکرار نمونه‌برداری و اخذ اتوکورلیشن تشخیص داده می‌شود. برای اندازه‌گیری انرژی سیگنال دریافت شده، ابتدا سیگنال ورودی توسط یک فیلتر میان‌گذر فیلتر می‌شود تا پهنای باند مورد نظر برای بررسی انتخاب شود. سپس سیگنال خروجی فیلتر باند میانی به توان دو رسانده شده و از نمونه‌ها متوسط‌گیری می‌شود. در پایان به منظور آشکارسازی، خروجی با یک آستانه مقایسه می‌شود تا وجود یا عدم وجود یک کاربر مجوزدار را تشخیص دهد. مشکلات این آشکارساز شامل انتخاب سطح آستانه برای تشخیص سیگنال اولیه، ناتوانی در تمایز بین تداخل سیگنال اولیه و نویز و همچنین کارایی ضعیف در سیگنال به نویز پایین است. علاوه بر این، آشکارساز انرژی برای تشخیص سیگنال طیف گسترده مفید نیست [۷]. با توجه به مشکلات مطرح شده در روش‌های فیلتر منطبق و ایستگاه چرخشی روش آشکارسازی انرژی با اعمال فیلتر ذره قابل پیاده‌سازی است. مهمترین علل برتری روش آشکارسازی انرژی با اعمال فیلتر ذره نسبت به بقیه روش‌های متداول استفاده شده در سنجش طیف به شرح زیر است:

مثالی از دو روش فوق برای اشتراک‌گذاری طیفی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. اشتراک‌گذاری طیفی به روش ارسال زمینه‌ای (شکل بالا) و به روش هم پوشانی سیگنال‌ها (شکل پایین) [۵]

باتوجه به دو روش ذکر شده برای ارسال بدلیل اینکه در روش پیشنهادی از ارسال هم‌پوشانی استفاده می‌شود، لذا نحوه سنجش و اجرا به روش هم پوشانی با چند روش به همراه نقاط قوت و ضعف شان بررسی شده و در نهایت روش منتخب برای مقاله حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

آشکارسازی به روش فیلترینگ منطبق^۹

اگر مشخصات سیگنال ارسال شده را بدانیم، فیلترینگ منطبق روش بهینه برای آشکارسازی کاربران اولیه است. مزیت اصلی این روش، زمان کوتاه و احتمال خطای کم در مقایسه با سایر روش‌ها می‌باشد. به هر حال فیلترینگ منطبق نیازمند مدوله کردن سیگنال دریافتی توسط گیرنده از کاربر اولیه است. به همین دلیل این روش نیازمند داشتن اطلاعات کامل ویژگی‌های سیگنالینگ از جمله شکل پالس، نوع مدولاسیون، فرکانس کاری و پهنای باند می‌باشد. علاوه بر این چون هر سنسور طیف سنج نیازمند داشتن گیرنده برای تمامی انواع سیگنال‌ها است، از این رو پیچیدگی پیاده‌سازی آن بسیار زیاد و غیرعملی است. عیب دیگر فیلترینگ منطبق، مصرف زیاد توان برای انجام عملیات سنجش است (به علت استفاده از الگوریتم‌های متفاوت گیرنده) [۴].

آشکارسازی براساس خواص ایستگاه چرخشی

آشکارسازی براساس ویژگی ایستایی چرخشی، روشی برای آشکارسازی سیگنال کاربر اولیه است. ویژگی ایستایی چرخشی براساس پررودیک بودن سیگنال یا آمارگان‌هایش مانند میانگین و

- ۱- همزمانی در سنجش طیف و انتخاب کانال خالی از فرکانس (علت استفاده از فیلتر ذره).
- ۲- امکان سنجش طیف بدون داشتن اطلاعات اولیه از طیف فرکانسی.
- ۳- عدم نیاز به تعدد گیرنده برای ارسال های مختلف.

جدول ۱. مزایا و معایب تکنیک های مهم طیف سنجی

تکنیک طیف سنجی	مزیت	عیب
آشکارساز انرژی	۱. عدم نیاز به اطلاعات اولیه در مورد سیگنال کاربران اولیه و یا ثانویه ۲. حجم محاسباتی بسیار کم	۱. در SNR های پایین عملکرد ضعیفی دارد ۲. قابلیت تفکیک سیگنال از نویز و همچنین تفکیک کاربرانی که از کانال استفاده می کنند را ندارد
فیلترینگ منطقی	۱. بهینه بودن ۲. حجم محاسباتی بسیار کم	۱. به اطلاعات پیشین نسبتاً کاملی از کاربر اولیه نیاز دارد ۲. برای تمامی انواع سیگنال های کاربران اولیه باید جداگانه طراحی شده و تمامی طرح ها هم زمان آماده به کارگیری باشند
آشکارسازی براساس خواص ایستادن چرخشی	۱. عملکرد خوب در SNR پایین ۲. قابلیت تفکیک سیگنال از نویز و در نتیجه مقاوم بودن نسبت به نویز و تداخل	۱. به بخشی از اطلاعات از کاربر اولیه نیاز دارد. ۲. هزینه محاسباتی بسیار بالایی دارد.

پس از ورود سیگنال به همراه نویز محیطی، FFT آن محاسبه و وارد مرحله الگوریتم فیلتر ذره جهت تعیین نوع فضای باند فرکانسی می گردد. الگوریتم فیلتر ذره با استفاده از مرحله باز نمونه برداری، مشغول بودن یا نبودن باند فرکانسی را تعیین می نماید. در ادامه نحوه عملکرد فیلتر ذره و تخمین وضعیت باند فرکانسی از طریق الگوریتم باز نمونه برداری تشریح می گردد.

برای سنجش طیف به روش آشکارسازی انرژی دو روش کلی وجود دارد:

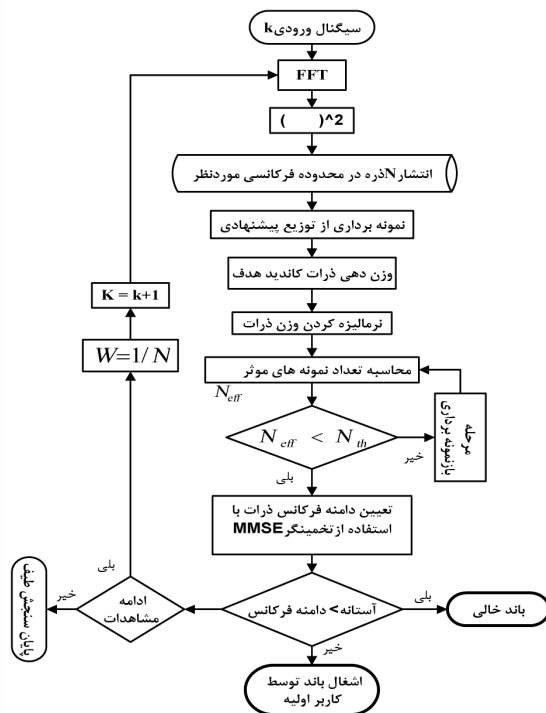
۱. روش ترتیبی یا SMHO^{۱۱}

۲. روش وزن دهی WBHO^{۱۲}

در روش ترتیبی، کاربر ثانویه از ابتدای باند به ترتیب شروع به سنجش طیف کرده و در صورت خالی بودن باند، ارسال در آن طیف را شروع می کند، به عبارت دیگر کاربر ثانویه اقدام به بررسی نمودن طیف شماره i ام نمی کند، مگر اینکه تمام طیف های $(i-1)$ ، $(i-2)$ ام تا طیف شماره یکم را مشغول و غیر قابل استفاده حس نماید.

در روش وزن دهی، در ابتدای کار سنجش طیف یکبار در محدوده تعریف شده شروع و کامل می شود. با توجه به سطح سیگنال دریافتی (انرژی یا دامنه سیگنال)، وزن دهی انجام می شود. در این حالت لیستی از وزن طیف ها به ترتیب نزولی مرتب می شود. برای ارسال با توجه به اینکه در زمان سنجش و سپس شروع به ارسال، احتمال مشغول بودن وزن کمتر از نقاط دیگر کمتر است، سنجش های بعدی براساس همین ترتیب صورت می گیرد. این روش نسبت به روش ترتیبی با سرعت بیشتر و با تاخیر کمتری می تواند باند خالی از ارسال را در محدوده مشخص تعیین نماید و به همین دلیل در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد.

الگوریتم استفاده شده در این مقاله جهت سنجش طیف با توجه به عدم آگاهی در مورد طیف فرکانسی، از طریق آشکارسازی انرژی در اعلام وضعیت باند فرکانسی همراه با اعمال فیلتر ذره، در شکل ۳ به صورت فلوچارت نمایش داده شده است. در این شکل،



شکل ۱۲. فلوچارت سنجش طیف فرکانسی با استفاده از الگوریتم باز نمونه برداری

فیلتر ذره

11. Sequential Method for Hand Over
12. Weighted-Based Hand Over

مقدار I در رابطه ۳، امید ریاضی تابع دلخواه $f(x)$ است. اگر از مدل حالت سیستم تا لحظه k که با تابع احتمال $p(X_k|Z_k)$ بیان می‌شود، به تعداد N ذره ($N \geq 1$) با توزیع مستقل و یکسان^{۱۶} مانند $X_{0:k}^i$ در فرکانس‌های مختلف نمونه‌برداری شود (مرحله انتشار ذرات در فلوچارت شکل (۳))، داریم:

$$X_{0:k}^i = X_k^i \approx p(X_k|Z_k); (i=1,2,\dots,N) \quad (4)$$

تخمینی از این توزیع به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود [۲۷]:

$$P_N(X_k|Z_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(X_k - X_k^i) \quad (5)$$

که در آن $\delta(X_k - X_k^i)$ نشان دهنده تابع دلتای دیراک در نقطه $(X_k = X_k^i)$ است. از چنین تخمینی برای توزیع فیلترسازی نیز استفاده می‌شود. اگر امید ریاضی تابع دلخواه $f(\cdot)$ را نسبت به $p(X_k|Z_k)$ با I نشان داده شود، آنگاه تخمین مونته‌کارلوی انتگرال بصورت حاصل جمع مقادیر تابع $f(\cdot)$ به ازای نمونه‌های بدست آمده، بصورت رابطه ۶ بیان می‌شود:

$$I^{\wedge}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(X_k^i) \quad (6)$$

اگر نمونه‌های X_k^i مستقل باشند آنگاه I^{\wedge}_N یک تخمین ناریب می‌گردد [۱۷] و مطابق با قانون اعداد بزرگ، با I قابل تقریب است و در صورتی که N عدد بسیار بزرگی باشد، تخمین به سمت مقدار واقعی همگرا خواهد شد. همچنین نشان داده می‌شود که سرعت همگرایی تخمین، مستقل از واریانس و ابعاد فضای ویژگی بوده و فقط به تعداد ذرات نمونه وابسته است [۲۷]. چنین خصوصیتی مهمترین مزیت انتگرال‌گیری مونته‌کارلو نسبت به دیگر روش‌های انتگرال‌گیری عددی است.

نمونه‌برداری با اهمیت^{۱۷}

برای نمونه‌برداری از تابع توزیع احتمال انرژی $p(x)$ بصورت مستقیم در هر مرحله زمانی به دلایلی مانند پیچیدگی، ابعاد بالا، چندمتغیره بودن و غیره از توزیع دیگری مثل $q(x)$ که بسیار شبیه $p(x)$ است، استفاده می‌شود بطوریکه با وزن‌دهی مناسب می‌توان به همان تخمین مونته‌کارلو نزدیک شد [۲۹]. این توزیع $q(x)$ را توزیع پیشنهادی^{۱۸} می‌نامند و شرط لازم جهت این کار {اگر $p(x) > 0$ آنگاه $q(x) > 0$ برای $x \in R^m$ است، لذا انتگرال بصورت (۳):

$$I = \int f(x).p(x)dx = \int f(x). \frac{p(x)}{q(x)}.q(x)dx \quad (7)$$

نوشته می‌شود و تخمین مونته‌کارلوی آن برای تعداد $N \geq 1$ نمونه مستقل، مطابق با توزیع $q(x)$ بصورت زیر خواهد بود:

الگوریتم فیلتر ذره

برای بسیاری از مسائل عملی، خطی بودن و در نظر گرفتن مدل گوسی نوین امکان‌پذیر نخواهد بود، لذا به تکنیک‌های تخمین برای حل معادلات بازگشتی در مسائل غیرخطی و غیرگوسی نیاز است. فیلتر ذره یک روش جدید برای بدست آوردن تابع توزیع احتمال پسین برپایه تئوری بیز است. الگوریتم فیلتر ذره بر مبنای روش‌های مونته‌کارلوی زنجیره‌ای^{۱۳} بوده که در آن از نمایش ذره‌ای چگالی احتمال، برای تخمین پارامترهای یک توزیع دلخواه استفاده می‌شود. از آنجا که در این مقاله تابع توزیع پسین، میزان انرژی هر فرکانس در محدوده باند می‌باشد، لذا فیلتر ذره تخمینی برای یافتن میزان انرژی هر ذره نمونه‌برداری شده در فرکانس مربوطه می‌باشد.

حال اگر انتقال یا حرکت از فرکانس به فرکانس دیگر با زبان احتمالاتی بصورت $p(x_t|x_{t-1})$ و مدل مشاهده و یا اندازه‌گیری سیستم با $p(x_t|z_{t-1})$ بیان شود، x_t نماینده بردار حالت سیستم در حالت کنونی و z_t نماینده مشاهدات سیستم است. معادلات بازگشتی بیز از دو مرحله زیر تشکیل شده‌اند [۱۷]:
مرحله پیش بینی^{۱۴}: این مرحله با فرمول ۱ بیان می‌گردد:

$$p(x-t|Z-(t-1)) = \int_{R^n} p(x_t|x_{t-1}) p(x_{t-1}|Z_{t-1}) dx_{t-1} \quad (1)$$

بطوریکه R^n فضای اعداد حقیقی n بعدی می‌باشد.

مرحله بروز رسانی^{۱۵}: این مرحله با فرمول ۲ بیان می‌گردد:

$$p(x_t|Z_t) = \frac{p(z_t|x_t) p(x_t|z_{t-1})}{p(z_t|Z_{t-1})} \quad (2)$$

$$p(z_t|Z_{t-1}) = \int_{R^n} P(z_t|x_t) p(x_t|Z_{t-1}) dx_t$$

مشاهده می‌شود که عمل انتگرال‌گیری بر روی متغیرهای فضای حالت صورت می‌گیرد، صرف‌نظر از اینکه چنین انتگرالی می‌تواند در هر حالت، حل به فرم بسته داشته باشد، در صورتی که ابعاد فضای حالت بالا باشد هزینه محاسباتی بالایی خواهد داشت. روش شبیه‌سازی مونته‌کارلو به جای محاسبه انتگرال در تمامی نقاط، مقدار آن را با نمونه‌برداری در نقاطی که بیشترین سهم را در محاسبه انتگرال دارند، انجام می‌دهد. مبنای کار به این صورت است که برای محاسبه انتگرال:

$$I = \int g(x)dx \quad (3)$$

آنرا به صورت حاصل ضرب عبارت $g(x) = f(x)$ تبدیل کرده که در آن $p(x)$ بیانگر یک تابع احتمال است که شرایط $\{ \int p(x)dx = 1 \text{ and } p(x) \geq 0 \}$ را برآورده می‌کند، لذا با این شرایط

16. Independent and Identically Distributed (i.i.d.)
17. Importance Sampling
18. Proposal Distribution

1.1.1
1.1.2

13. Sequential Monte Carlo (SMC)
14. Prediction
15. Update

برای این توزیع، توزیع پیشین است [۲۰]. لذا در مرحله k ام لازم است که از تابع چگالی احتمال انتقال نمونه برداری کنیم، یعنی:

$$q(x_k^i | X_{k-1}^i, Z_k) = p(x_k^i | x_{k-1}^i) \quad (12)$$

در این صورت وزن‌ها باید بصورت رابطه ۱۳ تغییر کنند [۲۰]:

$$w_k^i = w_{k-1}^i p(z_k | x_k^i) \quad (13)$$

مشکل اصلی در این روش به افزایش واریانس وزن‌ها مربوط می‌شود [۲۶]، که در هر مرحله زمانی افزایش می‌یابد و تنها چند ذره در فرکانس‌های خاص وزن زیادی دارند (دارای انرژی زیادی هستند)، یعنی پس از گذشت زمان اندکی، بیشتر نمونه‌ها، وزن نرمالیزه شده‌ای نزدیک به صفر خواهند داشت و تنها یک ذره دارای وزن بزرگی است که از این پدیده با نام انحطاط^{۱۹} ذرات یاد می‌شود. لذا تخمین مناسبی از توزیع پسین توام را ارائه نمی‌کند [۲۶]. برای جلوگیری از بروز مشکل انحطاط نیاز به بازنمونه برداری از بین نمونه‌ها وجود دارد. در الگوریتم بازنمونه برداری، ذرات نمونه با وزن کمتر بصورت تصادفی حذف شده و ذرات نمونه با وزن بزرگ چندین بار کپی می‌شوند.

بازنمونه برداری دنباله‌ای^{۲۰} (SIR)

بازنمونه برداری، روشی برای حل مشکل انحطاط از طریق صفر کردن واریانس وزن‌هاست. این روش نقشی اساسی در کارایی روش‌های مونته‌کارلوی دنباله‌ای بازی می‌کند. در این روش از میان نمونه‌های وزن‌دهی شده (ذرات در فرکانس‌های مختلف با انرژی‌های مربوطه)، N بازنمونه برداری انجام می‌شود. شانس انتخاب شدن هر ذره به وزن آن ذره وابسته است. در نتیجه، در این گام نمونه‌هایی با وزن بیشتر چندین مرتبه کپی شده و تبیین کننده محدوده مشغول باند فرکانسی می‌باشند و نمونه‌هایی با وزن کمتر که برای خالی بودن محدوده باند فرکانسی استفاده می‌گردد حذف می‌شوند. لذا می‌توان با توجه به وزن ذرات، که نشان دهنده مشغول بودن یا نبودن محدوده باند فرکانسی می‌باشد، وضعیت باند را تعیین نمود. در انتهای این گام وزن همه نمونه‌های انتخاب شده برابر با $N-1$ خواهد بود. به روشی که از نمونه برداری با اهمیت دنباله‌ای، بازنمونه برداری می‌کند، بازنمونه برداری دنباله‌ای (SIR) گویند. شکل ۵ نمای گرافیکی مرحله بازنمونه برداری را برای $N=10$ ذره که منجر به حذف نمونه‌های با وزن کم و تمرکز روی نمونه‌های با وزن زیاد است را برای ۱۰ ذره نشان می‌دهد. (مرحله بازنمونه برداری فلوچارت شکل ۳).

$$I^{\wedge}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x^i) \cdot \tilde{w}(x^i) \quad (8)$$

بطوریکه که در آن $w(x^i)$ نشان دهنده وزن نرمالیزه شده نمونه نام است که بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\tilde{w}(x^i) = \frac{p(x^i)}{q(x^i)} \quad (9)$$

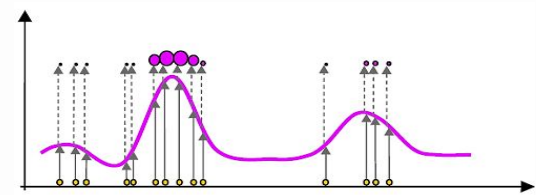
عبارت $\tilde{w}(x^i)$ وزن های با اهمیت نامیده می شوند (مرحله وزن دهی ذرات کاندید هدف در فلوچارت شکل ۳) و از آنجا که فاکتور نرمالیزاسیون مربوط به $p(x)$ را نداریم، لذا وزن‌های با اهمیت بدست آمده را بصورت [۱۵]:

$$I^{\wedge}_N = \sum_{i=1}^N f(x^i) \cdot w(x^i) \quad (10)$$

نرمالیزه کرده که در آن $w(x^i)$ نشان دهنده وزن نرمالیزه شده نمونه i ام است که بصورت زیر محاسبه می‌گردد (مرحله نرمالیزه کردن وزن ذرات در فلوچارت شکل ۳):

$$w(x^i) = \frac{\tilde{w}(x^i)}{\sum_{i=1}^N \tilde{w}(x^i)} \quad (11)$$

در نمونه برداری با اهمیت، در هر مرحله زمانی می‌بایستی نمونه برداری از توزیع $q(x)$ را به همراه محاسبه وزن‌ها انجام داد. شکل ۴ روش نمونه برداری با اهمیت را به صورت شماتیک نشان می‌دهد، نقاط دایره‌ای، توزیع ذرات و قطر آنها، وزن ذرات را نشان می‌دهد. با فرض اینکه همه ذرات در لحظه k وزن یکسانی داشته باشند، توزیع احتمال پسین در لحظه k محاسبه می‌شود، به این ترتیب وزن ذرات در لحظه $k+1$ ، با استفاده از توزیع احتمال پسین در لحظه k (توزیع پیشین در لحظه $k+1$) به روز می‌گردند. لذا وزن ذرات، یعنی قطر نقاط دایره‌ای، در مکان‌هایی که مقدار تابع توزیع احتمال کوچکتر است، کمتر هستند.



شکل ۴. نمایش روش نمونه برداری با اهمیت از تابع چگالی احتمال پسین

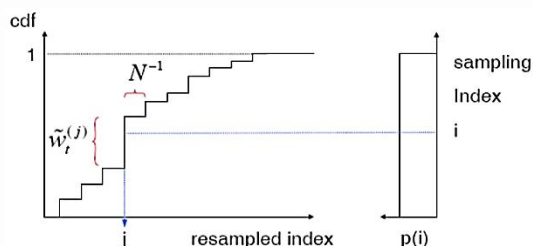
این ساختار که توزیع پسین توام در هر گام، با استفاده از نمونه‌های وزن دار شده توصیف می‌گردند، اساس کاری فیلترهای ذره‌ای محسوب می‌شوند.

توزیع پیشنهادی

نمونه برداری از تابع توزیع احتمال به کمک فیلتر ذره‌ای، با انتخاب یک توزیع پیشنهادی مناسب، امکان پذیر است. ساده ترین انتخاب

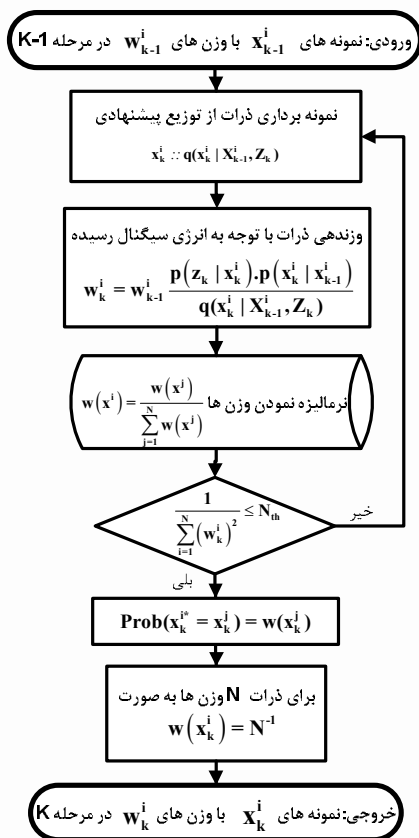
19. Degeneracy
20. Sequential Importance Resampling

مرحله، یک مجموعه جدید از ذرات با موقعیت‌ها و وزن‌های جدید بدست می‌آیند [۱۷].



شکل ۶. نحوه جایگزینی وزن‌ها در مرحله SIR

با توجه به مباحث فوق، الگوریتم کلی فیلترزده با استفاده از روش بازنمونه‌برداری مطابق با شکل ۷ بیان می‌گردد [۱۷].
برای مقایسه مراحل محاسبات لازم برای سنجش طیف مشغول، مقایسه‌ای بین روش MSP، MSS و روش پیشنهادی در جدول ۲ انجام شده است

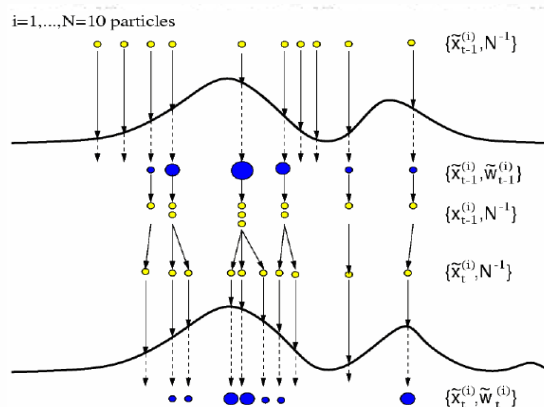


شکل ۷. روش باز نمونه برداری

در این مقاله، معیاری نیز برای سنجش میزان مراحل بازنمونه‌برداری بیان شده است که با عنوان تعداد نمونه‌های موثر^{۲۱} معرفی می‌گردد. این معیار، به وضعیت نمونه‌ها در هر گام، عددی مثبت و کوچکتر از N_{th} نسبت می‌دهد (به طور معمول $3N/4$ یا $N/2$) که به عنوان تعداد نمونه‌هایی که بصورت موثر توزیع هدف را تخمین می‌زنند، تعبیر می‌شوند. نمونه‌های موثر را با N^{eff} نشان داده و بصورت زیر تعریف می‌کنیم (مرحله محاسبه تعداد نمونه‌های موثر فلوچارت شکل ۳):

$$N^{eff} \approx \frac{1}{\sum_{i=1}^N (w_k^i)^2} \quad (14)$$

اگر تعداد نمونه‌ها از مقدار آستانه از پیش تعیین شده‌ای کمتر باشد، یعنی $N^{eff} < N_{th}$ ، بازنمونه‌برداری انجام می‌پذیرد. لذا $1 \leq N^{eff} \leq N$ است که حد بالای آن برای مواقعی است که ذرات دارای وزن‌های یکسانی باشند و حد پایین آن برای مواقعی است که جمع احتمال ذرات در گام k ام برابر یک باشد.



شکل ۵. نمای گرافیکی بازنمونه برداری N ذره

شکل ۶ نحوه جایگزینی وزن‌ها در مرحله SIR را نشان می‌دهد، که در آن ابتدا عددی بین صفر و یک به صورت اتفاقی و با توزیع یکنواخت تولید شده و با تصویر کردن آن بر روی تابع سمت چپ، که تابع تجمیع وزن‌های نرمالیزه نامیده می‌شود، اندیس ذره‌ای که باید در جمعیت گام بعدی حضور داشته باشد بدست می‌آید. لذا همان‌طور که باشد، احتمال انتخاب شدن بیشتری را دارد، لذا موقعیت و وزن از این شکل مشاهده می‌شود، ذره‌ای که وزن بیشتر داشته هر ذره به میزان چگالی در آن نقطه از فضای حالت وابسته است و این روش، موقعیت هر ذره و وزن متناظرش را برای هر مشاهده بصورت بازگشتی بروز می‌کند. به طوری که در پایان این

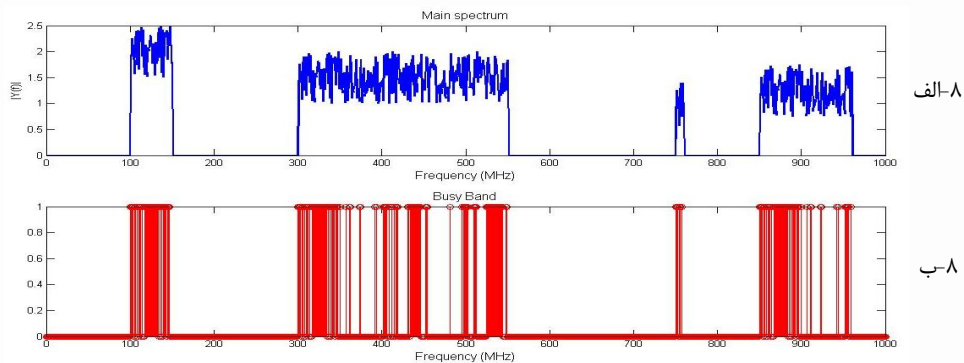
جدول ۲. مراحل محاسباتی سنجش طیف برای سه روش MSP، MSS و روش پیشنهادی

مراحل محاسباتی روش پیشنهادی	مراحل محاسباتی MSS	مراحل محاسباتی MSP
چیدن ذرات در باند فرکانسی مورد سنجش	پراکندگی سیگنال	پراکندگی سیگنال
گرفتن میانگین از سطوح سیگنال	مشتق گیری	مشتق گیری
تعیین آستانه	تعیین آستانه	تعیین آستانه
نرمالیزه نمودن	نرمالیزه نمودن	نرمالیزه نمودن
باز نمونه برداری که متناسب با وزن ذرات است.	بدست آوردن سطح دو برابر از سطح اصلی	تعیین باندهای مشغول
تعیین باندهای مشغول	محاسبه سطح سه برابر	
	جمع کردن سطح ها	
	مشتق گیری از جمع سطوح	
	نرمالیزه نمودن	
	تعیین باندهای مشغول	

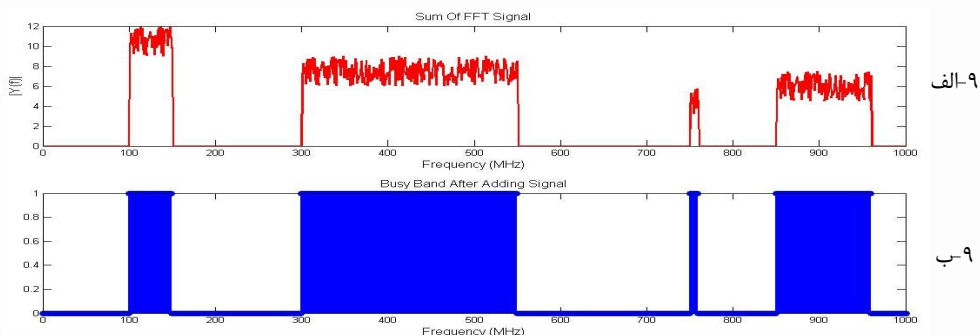
شبه سازی

کرده و باهم جمع می کنیم. با این کار دامنه طیف ورودی افزایش یافته و سیگنال به نویز افزایش می یابد. برای نشان دادن کارایی روش MSS، سیگنال ورودی را مطابق شکل (۸-الف) در نظر می گیریم. همان طور که در شکل (۹-الف) ملاحظه می گردد با ضرب شدن طیف ورودی در اعداد ۲ و ۳، دامنه طیف ورودی بالاتر از شکل (۸-الف) قرار می گیرد. به ازای این ورودی، از شکل (۹-ب) ملاحظه می شود که باند مشغول درست تشخیص داده شده است.

به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، در ابتدا روش های سطح بندی (MSP) و (MSS) [۱۱] به عنوان مرجع مقایسه مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل (۸-الف) فرض می کنیم که ورودی شامل چهار باند فرکانسی تا ۱ گیگاهرتز باشد. همانطور که از شکل (۸-ب) ملاحظه می شود تشخیص طیف مشغول با روش MSP دارای خطا می باشد بطوریکه برخی فرکانس های مشغول بصورت فرکانس های آزاد تشخیص داده شده اند. به منظور کاهش خطای روش MSP می توان از روش MSS استفاده نمود. در این روش طیف ورودی را در اعداد ۲ و ۳ ضرب



شکل ۸. نمایش تعیین فضای خالی باند فرکانسی با الف. طیف فرکانسی ب. نمایش باند مشغول با برخی ایرادات به روش سطح بندی MSP

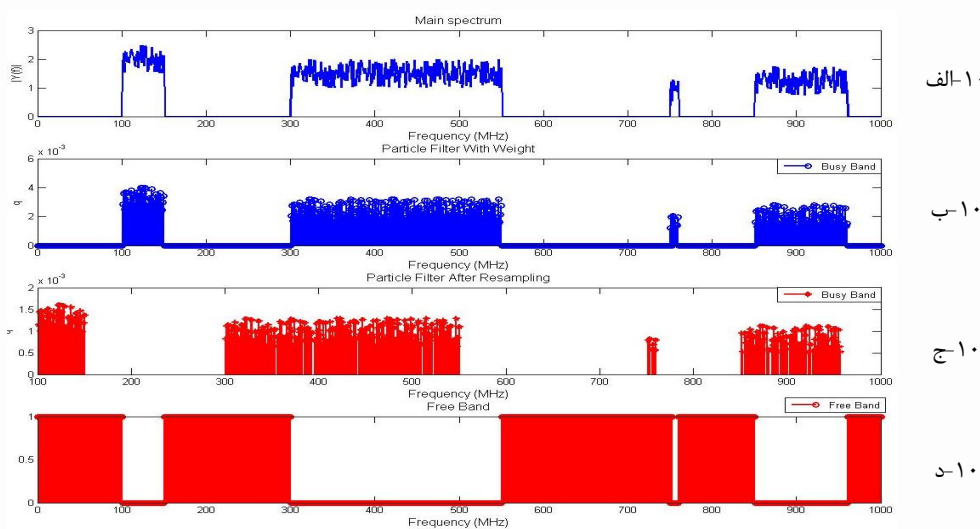


شکل ۹. نمایش تعیین فضای خالی باند فرکانسی با الف. طیف فرکانسی ب. نمایش باند مشغول از روی باند فرکانسی به روش سطح بندی (MSS)

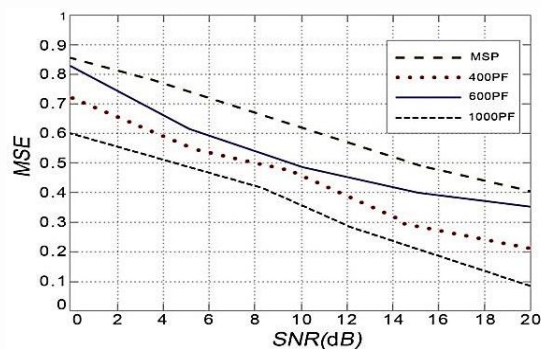
شکل ۱۱ مقایسه میزان کارایی روش پیشنهادی با روش MSP را از نظر میزان خطای تشخیص طیف مشغول براساس معیار MSE^{۲۳} را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد روش پیشنهادی از روش MSP خیلی بهتر است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد ذرات (PE) در روش پیشنهادی، همانطور که انتظار می‌رود، میزان خطای MSE کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در خطای MSE برابر با ۰/۱ و به ازای تعداد ذره با NP=۱۰۰۰ (1000PF)، روش پیشنهادی حدود ۵ برابر بهتر از روش MSP است.

ایراد روش MSS در این است که زمان اجرای آن زیاد می‌باشد و سنجش طیف را از حالت زمان واقعی^{۲۲} بودن دور می‌کند. برای این منظور، با استفاده از تایمر زمانی اجرای برنامه مطلب، روش MSS با روش پیشنهادی این مقاله مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمان اجرا در روش MSS برابر ۴۰۸ میلی‌ثانیه بوده در حالی که در روش پیشنهادی این زمان برابر با ۸۰ میلی‌ثانیه می‌باشد.

شکل ۱۰ نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی به ازای طیف ورودی در شکل (۸-الف) را نشان می‌دهد. مطابق با فلوجارت شکل ۳، شکل (۱۰-ب) مبین خروجی بلوک «نمونه برداری از توزیع پیشنهادی» و شکل (۱۰-ج) مبین خروجی بلوک «وزن دهی ذرات کاندید هدف» می‌باشد. در نهایت از شکل (۱۰-د) مشاهده می‌شود که سنجش طیف به درستی انجام شده است.



شکل ۱۰. سنجش طیف فرکانسی با الف. طیف فرکانسی ب. وزن دهی ذرات به فرکانس ها ج. هدایت ذرات در باز نمونه برداری به سمت ذرات با وزن بیشتر و د. تعیین باند خالی به روش پیشنهادی



شکل ۱۱. نمایش سطح کارایی MSE

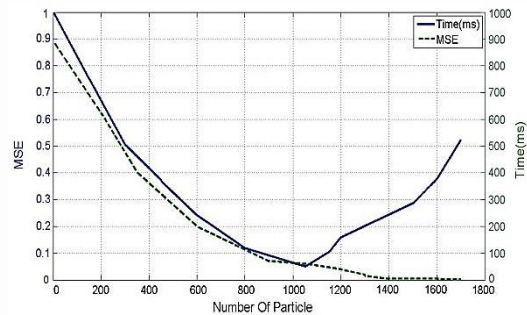
شبه‌سازی‌های انجام شده با یک میزان زمان بهینه و میزان خطا با تعداد مشخص ذرات بهبود یافت.

مرجع‌ها

- [1] J. Mitola and G.Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," IEEE Personal Communications, vol. 6, Issue 4, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [2] D. Ariananda, M. K. Lakshmanan and H. Nikookar, "A survey of spectrum sensing techniques for cognitive radio," IEEE Second International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management cog ART 09, May, 2009.
- [3] G. Ganesan, L.Ye, and R. Reggiannini, "Agility Improvement through Cooperative Diversity in Cognitive Radio," IEEE GlobeCom2005, vol. 5, pp. 2505-2509, Dec. 2005.
- [4] S.Shobana, R.Saravanan, R.Muthaiah "Matched Filter Based Spectrum Sensing on Cognitive Radio for OFDM WLANs" School of Computing, SASTRA University, Thanjavur, TamilNadu, India Vol 5 No 1 pp 142-146 Feb-Mar 2013.
- [5] R. Tandra and A. Sahai, "Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty" in Proc. IEEE Int. Conf. Wireless Networks, Commun. and Mobile Computing, vol. 1, Maui, HI, pp. 464–469, June 2005.
- [6] M. Oner and F. Jondral, "Cyclostationarity based air interface recognition for software radio systems," in Proc. IEEE Radio and Wireless Conf., Atlanta, Georgia, USA, pp. 263–266, Sept. 2004.
- [7] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. W. Brodersen, "Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection," in Military Comm. Conf. (MILCOM), pp. 1–7, Oct. 2006.
- [8] Z.Wen, Tao Luo-Weidong Xiang, Sudhan Majhi-Yunhong Ma "Autoregressive Spectrum Hole Prediction Model for Cognitive Radio Systems" IEEE Communications Society subject matter experts ICC 2008 workshop
- [9] S.Kandeepan, S.Reisenfeld, T.CanAysal, D.Lowe, R.Piesiewicz "Bayesian Tracking in Cooperative Localization for Cognitive Radio Networks" in 69th vehicular technology conference, IEEE, pp.1-526-29 April 2009

با توجه به شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود در روش پیشنهادی با افزایش تعداد ذرات خطا کاهش می‌یابد. از طرفی اگر ذرات از یک حدی بیشتر شود باعث افزایش زمان سنجش طیف مشغول می‌شود.

شکل ۱۲ مصالحه بین تعداد ذرات و زمان سنجش را بصورت توأم نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود تعداد ذرات نمونه برداری فیلتر ذره از یک حدی کمتر باشد خطا خیلی زیاد است و از یک میزان به بعد مقدار خطا تغییر چندانی ندارد. لذا از یک مرحله به بعد افزایش ذرات باعث دقت خیلی بیشتری نمی‌شود، در عوض زمان افزایش می‌یابد، لذا باید انتخاب تعداد ذرات بهینه باشد. همانطور که از این شکل ملاحظه می‌شود بهترین تعداد ذرات روش پیشنهادی به ازای طیف ورودی شکل (۸-الف) برابر $N_p=1000$ می‌باشد که به نوبه خود مبین خطای حدود ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۱۲. نمودار ارتباط میزان خطا و زمان سنجش با تعداد ذرات

نتیجه‌گیری

در این مقاله تخمین فضای باند فرکانسی از طریق الگوریتم فیلتر ذره با روش باز نمونه برداری بررسی گردید. در مواقعی که سیگنال تغییرات تصادفی دارد از آنجا که سنجش طیف با روش آشکارسازی انرژی است و تغییرات سیگنال بصورت غیرخطی با نویز غیرگوسی (بدلیل شرایط مختلف محیطی) است، تشخیص سریع و درست مشغول یا خالی بودن باند فرکانسی در فضای فرکانسی امری مهم است. این مساله در مقاله حاضر با بهره‌گیری از خصوصیت فیلتر ذره و وزن دهی و هدایت مناسب ذرات نمونه در تعیین نوع محدوده فرکانسی انجام گرفت. مهمترین موردی که در این مقاله به آن دست یافته شد، سرعت تشخیص نوع فضای باند فرکانسی و اعلام باند خالی جهت سوئیچ کردن رادیو شناختگر به محدوده خالی از طیف فرکانسی است، که در این مقاله از طریق الگوریتم فیلتر ذره به زمان ۸۰ میلی ثانیه جهت تشخیص محدوده فرکانسی تا یک گیگاهرتز دست یافته شد. لذا می‌توان یک لینک ارتباطی فاقد قطع شدگی و بدون ایجاد مزاحمت برای باندهای فرکانسی دیگر با دقت بالا را هدایت نمود. از طرفی با

- [10] S. Balaneshin Kordan, B. Abolhassani "Blind Spectrum Sensing for Cognitive Radio Based on Complexity measurement" *Electrical Engineering (ICEE)*, 2011 19th Iranian Conference on vol. 2, pp. 2970-2973, 17-19 May 2011.
- [11] S. Imani, A. Banitalebi Dehkordi and M. Kamarei "Using Weighted Multilevel Wavelet Decomposition for Wideband Spectrum Sensing in Cognitive Radios" *Electrical Engineering (ICEE)*, 2011 19th Iranian Conference on, On page(s): -2227-2231, Volume: Issue: , 17-19 May 2011.
- [12] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications" *IEEE J. Select. Areas Communication* , vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [13] M. Sanjeev Arulampalam, Simon Maskell, Neil Gordon and Tim Clapp "A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking" *IEEE Transaction Signal Processing*, vol. 50, no. 2, February 2002.
- [14] A. Doucet, S. Godsill, and C. Andrieu, "Sequential Monte Carlo Sampling Methods for Bayesian Filtering" *Journal Statistics and Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 197-208, 2000.
- [15] C. R. del Blanco, "Visual Object Tracking in Challenging Situations using a Bayesian Perspective" Ph.D. Thesis, Thesis Doctoral, Madrid polytechnic 2010.
- [16] A. Doucet, N. D. Freitas, and N. Gordon, "Sequential Monte Carlo methods in practice" New York, NY: Springer, 2001.
- [17] B. Sugandi, H. Kim, and J. Kooi, "A moving object tracking based on color information employing a particle filter algorithm" *International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 39-42, 2009.
- [18] D. Comaniciu, V. Ramesh and P. Meer, "Kernel-Based Object Tracking" *IEEE Trans. PAMI*, v. 25, pp. 564-575, 2003.
- [19] Y. Cheng, "Mean Shift, Mode Seeking, and Clustering", *IEEE Trans. PAMI*, vol. 17, no. 8, pp. 790-799, 1995.
- [20] R. T. Collins, "Mean-shift blob tracking through scale space", *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 234-240, 2003.
- [21] D. Liang, "Mean-Shift blob tracking with adaptive feature selection and scale adaptation" *ICIP*, 2007.
- [22] O. Hlinka, F. Hlawatsch, and P. M. Djuric, "Likelihood consensus-based distributed particle filtering with distributed proposal density adaptation" Available online: arXiv, 1109.6191v1 [stat.AP], Sep. 2011.
- [23] O. Hlinka, O. Slu`ciak, F. Hlawatsch, P. M. Djuric, and M. Rupp, "Likelihood consensus and its application to distributed particle filtering." Available online: arXiv:1108.6214v1 [stat.AP], Aug. 2011.
- [24] M. Gao, H. Zhang, "Sequential Monte Carlo methods for parameter estimation in nonlinear state-space models" in *Proc. Science Direct*, March. 2012.
- [25] M. Li, T. Tan, W. Chen, and K. Huang, "Efficient Object Tracking by Incremental Self-Tuning Particle Filtering on the Affine Group" in *Proc. IEEE*, March. 2012.
- [26] J. Pock, S. Dance, and A. Lawless, "State estimation using the particle filter with mode tracking" *Comput. Fluids*, vol. 46, no. 1, pp. 392-397, Jul. 2011.
- [27] B. Ristic, S. Arulampalam, and N. Gordon, "Beyond the Kalman Filter, Particle Filters For Tracking Applications" Artech House, Boston, London, 2004.
- [28] M. Afonso, "Particle Filter and Extended Kalman Filter for Nonlinear Estimation: A Comparative Study" *IEEE*, 2008.
- [29] D. Cabric, S. Mishra, and R. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," in *Proc. Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*, vol. 1, Pacific Grove, California, USA, pp. 772-776, Nov. 2004.
- [30] D. Cabric and R. W. Brodersen, "Physical layer design issues unique to cognitive radio systems," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, vol. 2, Berlin, Germany, pp. 759-763, Sept. 2005.

