



پایان نامه کارشناسی در گرایش مهندسی نرم افزار

# رهگیری کاربران اولیه متحرک در شبکه های رادیوشناختی به کمک فیلتر ذره ای

مهسا آبادیان

دانشگاه تهران

پردیس دانشکده های فنی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پاییز ۱۳۹۴



## فهرست مطالب

### چکیده

فصل اول: تشریح مسئله: رهگیری کاربران اولیه متحرک در شبکه‌های رادیوشناختی

۱-۱- معرفی شبکه‌های رادیوشناختی

۱-۱-۱- دسترسی به طیف به صورت پویا

۱-۱-۲- ناحیه محافظت شده‌ی کاربر اولیه

۱-۱-۳- پروتکل دسترسی به پایگاه‌داده

۱-۲- اهمیت حفظ حریم خصوصی و چالش‌های مربوط

فصل دوم: روش پیشنهادی: الگوریتم فیلتر ذره‌ای

۲-۱- برآورد بازگشتی

۲-۲- تخمین بیزی

۲-۳- فیلتر ذره‌ای

۲-۳-۱- تخمین دینامیکی

۲-۳-۲- الگوریتم فیلتر ذره پایه

۲-۴- حل مسئله به کمک فیلتر ذره

۲-۴-۱- تعریف دقیق مسئله

۲-۴-۲- نحوه اعمال فیلتر ذره‌ای به مسئله

فصل سوم: شبیه‌سازی

۳-۱- فرضیات مسئله

۳-۲- سناریو شبیه‌سازی

۳-۳- نتایج شبیه‌سازی

فصل چهارم: نتیجه‌گیری و کارهای آینده

فصل پنجم: منابع

## چکیده

استفاده از پایگاه داده‌های جغرافیایی در شبکه‌ی رادیوشناختی، یک رویکرد عملی برای به اشتراک گذاری طیف فرکانسی است. اما از سوی دیگر اطلاعاتی که این پایگاه درباره‌ی کاربران اولیه در اختیار کاربران ثانویه قرار می‌دهد ممکن است سبب لو رفتن مکان کاربران اولیه و به خطر افتادن حریم خصوصی آنها شود. قبلاً نشان داده شده است که شناسایی موقعیت کاربران اولیه ثابت تنها با استفاده از پرسمان‌هایی که کاربران ثانویه از پایگاه داده می‌کنند میسر است. در این پروژه قصد داریم با کمک تخمین بیزی بازگشتی و فیلتر ذره‌ای موقعیت جغرافیایی و اطلاعاتی نظیر سرعت و جهت کاربران اولیه را پیدا کنیم.

با توجه به رشد روزافزون تکنولوژی‌های نوظهور مخابراتی کمک به گسترش تکنولوژی رادیوشناختی که به حل این مشکل کمک می‌کند ضروری است. مسئله‌ی امنیت و حفظ حریم خصوصی در شبکه‌های رادیو شناختی یکی از مهم ترین مسائل موجود در راه گسترش این شبکه‌هاست که این پروژه در همین راستا می‌باشد.

## فصل اول

### تشریح مسئله: رهگیری کاربران اولیه متحرک در شبکه‌های رادیوشناختی

#### ۱-۱- معرفی شبکه های رادیوشناختی

سیستمهای ارتباطاتی بیسیم بر اساس نقل و انتقال امواج الکترومغناطیسی (امواج رادیویی) در یک محدوده فرکانسی مشخص بین ۳ تا ۳۰۰ گیگاهرتز، ساخته می‌شوند. امواج رادیویی با فرکانسهای متفاوت مشخصه های انتشار متفاوتی دارند که موجب می‌شود برای یک کاربرد بیسیم مشخص مناسب باشند.

به عنوان مثال، امواج رادیویی با فرکانس پایین برای ارتباطات با برد زیاد مناسب هستند و امواج رادیویی با فرکانس بالا برای ارتباطات بیسیم سریع و برد کوتاه مناسب هستند. بنابراین، خدمات و کاربردهای بیسیم مختلف از فرکانسهای رادیویی مختلف استفاده می‌کنند. هنگامی که امواج رادیویی منابع مختلف، به طور همزمان روی یک فرکانس مشابه ارسال شوند، تداخل رخ می‌دهد. بنابراین به منظور کنترل ارسال امواج رادیویی برای جلوگیری از تداخل در روش مدیریت طیف کنونی، طیف فرکانسی در دسترس، به بلوکهای فرکانسی متعددی تقسیم می‌شود و هر بلوک فرکانسی ثابت برای یک کاربرد مشخص و تحت قوانین تعیین شده توسط دولت، به صورت انحصاری به هر سرویس ارتباطاتی تخصیص داده می‌شود. بنابراین در این روش تخصیص طیف، تداخلی صورت نمی‌گیرد زیرا هر بخش از طیف به یک کاربر مشخص اختصاص داده می‌شود. استفاده از این روش تخصیص طیف، محدودیتهایی برای دسترسی به طیف ایجاد می‌کند.

اولین محدودیت این است که وقتی طیف به کاربر خاصی یا فراهم کننده سرویس بیسیم خاصی اختصاص داده می‌شود، این طیف برای گستره مکانی بزرگی مورد استفاده قرار می‌گیرد در بعضی قسمتهای این گستره، طیف بسیار استفاده می‌شود در حالی که در بیشتر جاها طیف بلااستفاده است و این قسمت از طیف توسط کاربر دیگری هم نمی‌تواند استفاده شود. همچنین طیفی که اختصاص داده می‌شود متناسب با اوج ترافیک بار است در حالیکه در زمانهای کوتاهی اوج ترافیک بار را داریم.

از طرف دیگر با به وجود آمدن فناوری‌های جدید و با افزایش روزافزون تعداد دستگاه‌های بیسیم، تقاضا برای طیف رادیویی روز به روز بیشتر می‌شود. اندازه گیری‌هایی که در این زمینه انجام شده است نشان می‌دهد که گستره وسیعی از طیف در بیشتر زمان‌ها به ندرت استفاده می‌شود در حالی که دیگر باندها بسیار شلوغ و پرتراфик هستند. با این حال، قسمت‌های استفاده نشده طیف که تخصیص داده شده‌اند نمی‌توانند توسط کاربران دیگری به جز صاحبان خود آن طیف که طیف را خریده‌اند، مورد استفاده قرار بگیرند.

بنابراین برای غلبه بر این مشکل و ایجاد تعادل میان این طیف بلااستفاده و کمبود طیف ناشی از افزایش نیاز به طیف با توجه به افزایش تقاضا، روش دسترسی به طیف به صورت پویا ارائه شده است تا جایگزین این تخصیص طیف ناکارآمد شود. در روش دسترسی به طیف به صورت پویا به منظور افزایش استفاده از طیف و پاسخگویی به رشد تقاضا، فرصت‌های طیفی که در حوزه زمان یا مکان توسط صاحبان مجازشان استفاده نشده‌اند، می‌توانند توسط کاربران غیرمجاز مورد استفاده قرار بگیرند. البته کاربران غیرمجاز بایستی قدرت انطباق با فرصت‌های طیفی را داشته باشند و حقوق کاربران مجاز را نیز رعایت کنند. دسترسی به طیف به صورت پویا در دوفاز عمده کاوش طیف (سنجش و ارزیابی) و بهره‌برداری از طیف (تصمیم‌گیری و دست به دست کردن) صورت می‌گیرد. برای استفاده از این روش تخصیص طیف و در نتیجه استفاده بهینه از فرصت‌های طیفی، بایستی گیرنده و فرستنده‌های بیسیم برای دستیابی به طیف رادیویی هوشمندتر شوند. به این فرستنده و گیرنده‌های هوشمند، رادیو شناختی گفته می‌شود. یک سیستم رادیو شناختی مبتنی بر دسترسی طیف به صورت پویا، یک سیستم بیسیم است که قابلیت انطباق هوشمندانه پارامترهای خود را با محیط اطراف و همچنین نیازهای کاربران، داشته و از این طریق ارتباطاتی با قابلیت اطمینان بالا را ممکن می‌سازد.

### ۱-۱-۱- دسترسی به طیف به صورت پویا

روش‌های دسترسی به طیف به صورت پویا را می‌توان در سه مدل کلی طبقه‌بندی کرد. در اینجا فقط مدل سوم مورد بحث است.

۱- مدل استفاده انحصاری: در این روش نیز همانند تخصیص طیف ثابت، یک طیف رادیویی منحصر به یک کاربر یا سرویس مشخص اختصاص میابد با این تفاوت که در این مدل، صاحبان طیف، باندهای استفاده نشده را به کاربران غیرمجاز اعطا می کنند.

۲- مدل اشتراک گذاری باز: در این مدل، طیف متعلق به هیچ پایانه یا سرویس مشخصی نیست و همه کاربران غیرمجاز، حقوق یکسانی برای استفاده از طیف دارند.

۳- مدل دسترسی سلسله مراتبی: در این مدل، کاربر ثانویه به دو حالت میتواند به طیف دسترسی پیدا کند. در حالت اول که به آن روش روی هم گذاری میگویند، کاربر غیر مجاز بایستی به سنجش طیف پردازد و فرصتهای طیفی را تشخیص داده و از آنها برای ارسال استفاده کند. یعنی به عبارت دیگر کاربر غیر مجاز تنها زمانی میتواند از طیف استفاده کند که کاربر مجاز در طیف حضور نداشته باشد. در حالت دوم که روش زمینه ای نام دارد، کاربران مجاز و غیرمجاز میتوانند به صورت همزمان روی یک باند فرکانسی ارسال کنند. در این حالت توان ارسال کاربران غیر مجاز بسیار محدود است و در مقابل توان ارسال کاربران مجاز، مثل نویز است. به همین دلیل، برای کاربردهای برد کوتاه میتوان از این حالت استفاده کرد.

همانطور که بیان شد یکی از مراحل مهم در دسترسی به طیف به صورت پویا با مدل سلسله مراتبی، کاوش طیف است. یکی از کارهایی که در این مرحله انجام می شود آشکارسازی حضور کاربران مجاز توسط کاربران غیرمجاز است که اصطلاحاً سنجش طیف نامیده می شود.

در مرحله بعد با استفاده از تجزیه و تحلیل اطلاعات به دست آمده از سنجش طیف، در مورد دسترسی به طیف تصمیم گیری می شود و سپس کاربران غیر مجاز می توانند با بکارگیری یک روش ارسال مناسب، از باندهای فرکانسی خالی استفاده کنند. رادیوشناختی به صورت یک سیستم ارتباطی بیسیم هوشمند تعریف می شود که از محیط پیرامون خود، آگاه است و با استفاده از یادگیری محیط، متغیرهای کاری خود از قبیل توان ارسال، نوع مدولاسیون، فرکانس حامل و... را تغییر می دهد.

در شبکه های رادیوشناختی دو دسته کاربر تعریف می شوند. دسته اول، کاربرانی هستند که از طریق سازمان های تخصیص فرکانسی، بخشی از طیف به آنها اختصاص داده شده است و مجاز به فعالیت در آن هستند. این کاربران، کاربران اولیه نامیده می شوند که درواقع صاحبان اصلی بخش خاصی از طیف رادیویی هستند. از آنجایی که کاربران اولیه در همه زمانها و مکانها از طیف خود استفاده نمی کنند، بخشی از طیف در این زمانها یا مکانها بلااستفاده باقی می ماند. به محدوده ای از باند فرکانسی تخصیص داده شده که در زمان یا مکان جغرافیایی خاصی استفاده نمی شوند، حفره های طیف یا فرصتهای طیف گفته می شود. در شبکه های رادیوشناختی دسته دیگری از کاربران هستند که درواقع مجوزی برای استفاده از طیف ندارند ولی می بایست از فرصتهای طیفی بهره بگیرند. به این دسته از کاربران، کاربران ثانویه یا کاربران رادیوشناختی گفته می شود. به عبارت دیگر وقتی که کاربران اولیه و ثانویه بخواهند از طیف مشترک فرکانسی استفاده کنند کاربران ثانویه باید از تکنولوژی استفاده کنند که از تداخل با کاربران اولیه جلوگیری کند.

هریک از سه بعد فرکانس، زمان و مکان می توانند در ایجاد فرصتهای طیفی دخیل باشند. البته ابعاد دیگری مانند کد در سیستمهای مبتنی بر طیف گسترده یا زاویه در سیستمهای شکل دهی موج نیز وجود دارند که درواقع شناسایی فرصتهای طیفی در هر یک از این ابعاد، روشهای مخصوص به خود را دارد. برای به اشتراک گذاری طیف میان کاربران اولیه و ثانویه، بایستی چهار عمل سنجش طیف، تصمیم گیری طیف، به اشتراک گذاری طیف و جابجایی طیف در یک سیستم رادیوشناختی انجام شود.

۱- سنجش طیف : در این مرحله هدف، تعیین وضعیت طیف و حفره های خالی طیفی است. این تابع را در قسمت بعد به صورت جزئی تر مورد بررسی قرار میدهیم.

۲- تصمیم گیری طیف : در این مرحله با استفاده از تجزیه و تحلیل اطلاعات به دست آمده از سنجش طیف و همچنین مدنظر قرار دادن مشخصه های حفره های طیفی آشکارشده، احتمال حاضر شدن کاربر اولیه و مقادیر احتمال خطای سنجش، در مورد دسترسی به طیف تصمیم گیری می شود. بعد از انتخاب یک باند مناسب برای دسترسی کاربر ثانویه، بایستی منابع موجود در سیستم به گونه ای بهینه شوند که اهداف مورد نیاز برآورده شوند.



۳- به اشتراک گذاری طیف: بعد از تصمیم گیری بر اساس تحلیل طیف، حفره های طیفی مناسب در اختیار کاربران ثانویه قرار میگیرند. به این منظور نیاز به یک پایگاه داده وجود دارد که اطلاعات طیف فرکانسی مورد استفاده کاربران را در خود ذخیره کند. پایگاه داده باید مرتباً اطلاعات تمامی کاربران از جمله ایستگاه های تلویزیونی و در موارد خاص میکروفون های بیسیم را به روزرسانی کند و از این اطلاعات برای تشخیص قابل استفاده بودن یک طیف فرکانسی در یک ناحیه ی خاص استفاده کند.

۴- جابجایی طیف : در مواقعی که کاربر اولیه بخواهد به طیف خودش که همانکون در اختیار کاربر ثانویه است، برگردد کاربر ثانویه به منظور جلوگیری از برخورد با کاربر اولیه بایستی فرکانس کاری خود را تغییر دهد و به باند خالی دیگری نقل مکان کند. به این فرآیند جابجایی طیف گفته می شود.

#### ۱-۱-۲- پروتکل دسترسی به پایگاه داده

در اینجا ما به بررسی پروتکلی برای دسترسی به پایگاه داده می پردازیم که به طور معمول در اشتراک طیف فرکانسی استفاده می شود. سه جز اصلی یک شبکه ی رادیو کاربران اولیه، کاربران ثانویه و پایگاه داده ی موقعیت جغرافیایی می باشند. کاربران اولیه همواره نسبت به کاربران ثانویه در دسترسی تقدم دارند. کاربران ثانویه در صورتی که در کار کاربران اولیه اختلال ایجاد نکنند می توانند از طیف فرکانسی استفاده نمایند. یک کاربر ثانویه می تواند یک نقطه دسترسی، یک پایگاه و یا یک دستگاه متحرک باشد.

قبل از شروع انتقال اطلاعات روی یک طیف فرکانسی کاربر ثانویه باید یک درخواست به پایگاه داده بفرستد و لیست کانال های موجود را با توجه به موقعیت جغرافیایی خود دریافت کنند. این پرسمان خود شامل اطلاعات مکان جغرافیایی کاربر ثانویه، میزان درستی اطلاعات جغرافیایی، خصوصیت آنتن و شناسه ی دستگاه است. سپس پایگاه داده مجموعه ای از کانال های قابل استفاده به همراه مدت زمان مورد استفاده بودن آنها و توان قابل استفاده در صورت استفاده از هریک از کانال ها را برای کاربر را ارسال می کند.

### ۱-۱-۳- ناحیه ی محافظت شده ی کاربر اولیه

قسمت انحصاری برای یک کاربر اولیه که هیچ کاربر ثانویه ای قابلیت انتقال با حداکثر توان در آن را ندارد ناحیه ی حفاظت شده نامیده می شود و در پایگاه داده ذخیره می گردد. ناحیه های حفاظت شده توسط آژانسهای کنترل کننده ی طیف فرکانسی مثل FCC مشخص می گردد. در این بخش ما تصور می کنیم که بیشترین توان قابل استفاده برای انتقال اطلاعات توسط یک کاربر ثانویه به صورت تابعی از فاصله ی کاربر ثانویه و اولیه محاسبه می شود و رابطه آن به صورت:  $P = h(d)$  می باشد. در اینجا چگونگی مشخص شدن این تابع مورد بحث ما نیست.

### ۱-۲- اهمیت حفظ حریم خصوصی و چالش های مربوط

با وجود اینکه استفاده از پایگاه داده هایی که موقعیت جغرافیایی را دریافت و نگهداری می کنند فواید بسیاری در استفاده ی بهینه از طیف فرکانسی دارند، ممکن است ایراد های بسیاری هم از نظر امنیتی و حفظ حریم اطلاعات شخصی داشته باشند. به طور مثال کاربران ثانویه ممکن است با چند پرسمان به ظاهر بی خطر نوع، ناحیه جغرافیایی و زمان کارکرد سیستم های فعال در یک ناحیه را تشخیص دهند. زمانی که این سیستم ها سیستم های رسانه ای و تبلیغاتی باشند این مسئله مشکل خاصی به وجود نمی آورد. اما اگر این سیستم ها سیستم های دولتی و نظامی باشند افشای این اطلاعات ممکن است بسیار خطرناک باشد.

از طرفی بیانیه ای به نام NPRM یا notice of proposed rulemaking که اخیرا توسط FCC گزارش شد مسئله ی اشتراک طیف فرکانسی را بین سرویس های دولتی و غیردولتی بسیار پراهمیت نمود. در واقع این قوانین به منظور پیاده سازی یک سرویس برای شهروندان بر روی فرکانس ۳.۵ گیگا هرتز بود. در این بیانیه به صرفه بودن باز شدن طیف فرکانسی ۳۶۵۰-۳۵۵۰ مگا هرتز به منظور استفاده ی تکنولوژی های کوچک سلولی، به صورت غیررسمی بررسی شد. در باند ۳.۵ گیگا هرتزی حفظ حریم شخصی کاربران بسیار بحرانی است و امنیت اطلاعات سازمان های دولتی-نظامی دلیل اصلی به اشتراک نگذاشتن طیف فرکانسی به شمار می رود.

از آنجایی که تمامی کاربران ثانویه به اطلاعات موجود در پایگاه داده برای اشتراک طیف فرکانسی نیاز خواهند داشت نمی‌توان با محدود کردن دسترسی آنها به آن مشکل امنیتی را حل نمود. راه دیگر در واقع مبهم کردن اطلاعات استخراج شده از پایگاه داده می‌باشد. در اینجا به مسئله چگونگی جلوگیری از لو رفتن مکان جغرافیایی کاربران در اشتراک طیف فرکانسی پرداخته می‌شود و چند تکنیک جهت پیاده سازی امنیت اطلاعات جغرافیایی ارائه خواهد شد.

سیاست ها، تکنولوژی ها و زیربنای مورد نیاز برای به اشتراک گذاشتن طیف فرکانسی برای کاربران رسانه‌ای و کاربران نظامی-دولتی در مراحل بسیار اولیه به سر می‌برد و در نتیجه ما در اینجا فرض می‌کنیم برخی از تکنولوژی‌ها و زیربنای موجود در این مورد مشابه با آن‌هایی است که برای استفاده از فضای خالی تلویزیون پیاده سازی شده است.

## فصل دوم

### روش پیشنهادی: الگوریتم فیلتر ذره‌ای

الگوریتمی که برای تحقق یافتن حمله مورد نظر جهت مکان یابی کاربران اولیه در اثر به اشتراک گذاری طیف فرکانسی استفاده کردیم الگوریتم فیلتر ذره ای می‌باشد. در این بخش ابتدا اصول الگوریتم فیلتر ذره ای توضیح داده شده است. سپس نحوه‌ی اعمال این الگوریتم به مسئله‌ی مورد نظر بیان شده است.

#### ۱-۲- برآورد بازگشتی

برآورد و پیشبینی مجموعه ای از متغیرها در موارد بسیار زیادی کاربرد دارد: مثل پیدا کردن موقعیت افراد یا اجسام، پیشبینی شاخص های اقتصادی، جهت یابی و کنترل وسایل نقلیه و پیشبینی محیط. به همین خاطر الگوریتم های تخمینی بازگشتی از اهمیت زیادی برخوردارند. اگر یک روش عمومی برای حل این مسائل یافت شود قابلیت به کارگیری آن در تمامی مسائل وجود خواهد داشت. یک روش متداول این است که یک مدل دینامیکی در نظر بگیریم که تحول سیستم را بررسی می‌کند و یک مدل اندازه‌گیری که میزان ارتباط داده‌ی موجود و سیستم را نشان می‌دهد و با کمک این دو مدل تخمین خود را از متغیرها به‌روزرسانی کرده و با تکرار این کار نهایتاً به تخمین مناسبی برسیم.

#### ۲-۲- تخمین بیزی

هدف تخمین‌گر بیزی پیشبینی حالت آینده سیستم یا در واقع به دست آوردن تابع چگالی احتمال آن با استفاده از تمام اطلاعات موجود است. تابع چگالی احتمال حالت سیستم تمامی دانش ما در مورد بردار حالت سیستم و عدم قطعیت آن را در خود دارد. در نتیجه برای حل مسائل بهینه سازی و مسائل تصمیم‌گیری به کار گرفته می‌شود. اگر مدل دینامیکی به صورت خطی و با توزیع گاوسی باشند فیلتر بیزی بازگشتی تبدیل به فیلتر کالمن می‌شود که در ۴۰ سال گذشته مورد استفاده بوده است اما مواردی که قابل تبدیل به توابع خطی و توزیع گاوسی نمی‌باشند را نمی‌توان به کمک فیلتر کالمن حل نمود.

## ۲-۳- فیلتر ذره ای ساده

### ۲-۳-۱- تخمین دینامیکی

تخمین دینامیکی دو مدل اصلی ریاضی در نظر می گیرد:

۱. مدل دینامیکی حالت

۲. مدل اندازه گیری

مدل دینامیکی تغییرات بردار حالت در طی زمان را توصیف می کند، و به فرم زیر است:

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}, v_{k-1}), k > 0$$

در اینجا  $x_k$  بردار حالت است که باید تخمین زده شود.  $K$  مقطع زمانی را بیان می کند و  $f_{k-1}$  یک تابع

مشخص است و ممکن است غیرخطی باشد.  $V_{k-1}$  دنباله ای از نویز سفید است که معمولاً به آن نویز سیستم

یا فرآیند یا مشتق شده می گویند و فرض می کنیم تابع چگالی احتمال آن مشخص است.

این رابطه یک فرآیند مارکوف درجه یک را بیان می کند و  $p(x_k | x_{k-1})$  یک توصیف احتمالاتی از تحولات

وضعیت سیستم است که تابع چگالی احتمال تغییر حالت هم نامیده می شود.

معادله ی مدل اندازه گیری، داده های دریافت شده را با بردار حالت سیستم مرتبط می سازد. این معادله فرم

زیراست:

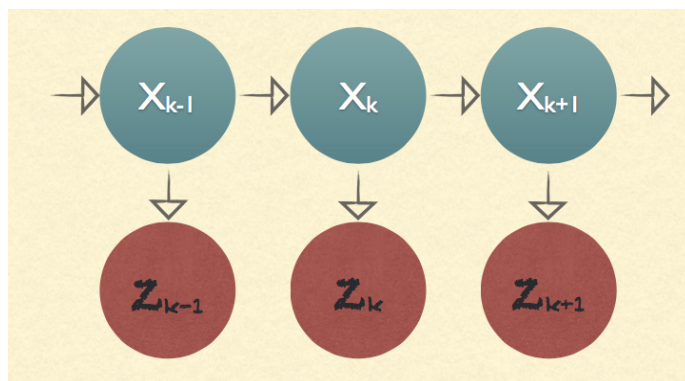
$$z_k = h_k(x_k, w_k), k > 0$$

$z_k$  بردار اندازه گیری های دریافت شده در مقطع زمانی  $k$ ،  $h_k$  تابع اندازه گیری و  $w_k$  هم نویز یا خطا

می باشند. برای این مورد هم فرض می کنیم تابع چگالی احتمال یا  $pdf$  برای  $w_k$  مشخص است، همچنین

$w_k$  و  $v_{k-1}$  از یکدیگر مستقل هستند. به همین دلیل مدل احتمالی تابع توزیع شرطی  $p(x_k | z_k)$  در نظر

گرفته می شود. اگر  $h_k$  خطی باشد و  $w_k$  گاوسی باشد  $p(x_k | z_k)$  هم گاوسی است. شکل ۱ مدل تخمین دینامیکی که شامل مدل دینامیکی حالت و همچنین مدل اندازه گیری است را نشان می دهد.



شکل ۱. مدل تخمین دینامیکی

همچنین باید حالت اولیه سیستم مشخص شود که همان تابع توزیع چگالی احتمال  $p(x_0)$  است که در زمان  $k = 0$  قبل از هر اندازه گیری دریافت می شود. پس به طور خلاصه می توان با  $p(x_0)$  و  $p(x_k | x_{k-1})$  و  $p(x_k | z_k)$  مسئله را توصیف کرد.

روش بیزی سعی می کند  $pdf$  بردار حالت  $x_k$  را با استفاده از تمام اطلاعات موجود بسازد.

این  $pdf$  به صورت  $p(x_k | Z_k)$  نوشته می شود و  $Z_k$  در بردارنده تمام اندازه گیری های انجام شده تا کنون است:

$$Z_k: Z_k = \{z_i, i = 1, \dots, k\}$$

فیلتر بازگشتی بیزی شامل دو فرآیند پیشبینی و به روزرسانی است. ابتدا پیشبینی اولیه انجام می شود سپس با بردار حالت با توجه به اندازه گیری های انجام شده به روزرسانی می شود. در عملیات پیشبینی، بردار حالت مقطع زمانی  $k-1$  به مقطع زمانی  $k$  پیش می رود.

از این پس تابع چگالی احتمال بردار حالت را پیش از به روزرسانی تابع چگالی احتمال پیشین، و پس از به روزرسانی تابع چگالی احتمال پسین می نامیم.

فرض کنید که  $p(x_{k-1}|Z_{k-1})$  موجود باشد، در این صورت  $p(x_k|Z_{k-1})$  که تابع چگالی احتمال پیشین

در مقطع زمانی  $k$  است اینگونه توسط مدل دینامیکی به دست می آید:

$$p(x_k|Z_{k-1}) = \int p(x_k|x_{k-1}) p(x_{k-1}|Z_{k-1}) dx_{k-1}$$

تابع چگالی احتمال پسین نیز با توجه به اندازه گیری جدید و به کمک تابع چگالی پسین محاسبه می شود:

این قانون نیز است و مخرج نرمال شده به این صورت محاسبه می شود:

$$p(z_k|Z_{k-1}) = \int p(z_k|x_k) p(x_k|Z_{k-1}) dx_k$$

شرایط اولیه نیز باید تعریف شده باشد:

$$p(x_0|Z_0) = p(x_0)$$

## ۲-۳-۲ الگوریتم فیلتر ذره پایه

فرض کنید که مجموعه  $N$  نمونه ی تصادفی از تابع چگالی احتمال پسین  $p(x_{k-1}|Z_{k-1})$  موجود باشد که

$$(k > 0).$$

این نمونه ها به صورت  $\{x_{k-1}^i\}_{i=1}^N$  نمایش داده می شوند.

مرحله ی پیش بینی الگوریتم در واقع اعمال مدل (۱) سیستم یا مدل دینامیکی حالت روی ذره های نمونه

است تا مجموعه ای از نمونه های مقطع زمانی  $k$  را با توجه به اندازه گیری های اعمال شده تاکنون (مقطع

زمانی  $k-1$ ) بسازد. این ذرات نمونه به صورت  $\{x_k^i\}_{i=1}^N$  نمایش داده می شوند و به کمک این رابطه به دست

می آیند:

$$x_k^i = f_{k-1}(x_{k-1}^i *, v_{k-1}^i)$$

در واقع در این مرحله نمونه‌هایی جدید توسط تابع چگالی احتمال پیشین یا  $p(x_k | Z_{k-1})$  تولید می‌شوند.  $v_{k-1}^i$  هم یک بردار از نمونه‌های مستقل است که از تابع توزیع نویز سیستم گرفته شده.

در مرحله‌ی به روز رسانی نمونه‌ها، با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده  $z_k$  وزن  $\tilde{w}_k^i$  برای هر ذره محاسبه می‌شود. این وزن برای هر یک از  $x_k^i$ ‌ها برابر با امید ریاضی به دست آوردن این اندازه‌گیری، در صورتی که حالت سیستم برابر  $x_k^i$  باشد است:

$$p(x_k | Z_k) = \frac{p(z_k | x_k) p(x_k | Z_{k-1})}{p(z_k | Z_{k-1})} \quad \tilde{w}_k^i = p(z_k | x_k^i)$$

وزن‌ها در نهایت نرمال می‌شوند و جمع آنها برابر با یک خواهد شد:

$$w_k^i = \frac{\tilde{w}_k^i}{\sum_{j=1}^N \tilde{w}_k^j}$$

ذره‌های قبلی با این نمونه‌ها جایگزین می‌شوند تا نمونه‌ی جدیدی از ذره‌ها یا  $\{x_k^i\}_{i=1}^N$  را بسازند:

$$\{x_k^i\}_{i=1}^N \text{ به طوری که: } pr\{x_k^i * = x_k^j\} = w_j^k \text{ برای هر } i, j$$

به بیان دیگر هر کدام از ذره‌های قبلی با احتمال وزن نرمال شده شان انتخاب می‌شوند و این فرآیند  $N$  بار

ادامه می‌یابد تا  $\{x_k^i\}_{i=1}^N$  را بسازد. ما ادعا می‌کنیم که این مجموعه‌ی جدید از ذره‌ها، برابر با نمونه‌هایی از

همان تابع چگالی احتمال مطوب یا  $p(x_k | Z_k)$  می‌باشد و بنابراین یک چرخه‌ی الگوریتم کامل شده است.

میزان امید ریاضی  $z_k$  برای هر ذره  $x_k^i$  یا همان  $p(z_k | x_k^i)$  نشان می‌دهد که این ناحیه از فضا بر اساس مقدار

به دست آمده در اندازه‌گیری ( $z_k$ ) چه قدر محتمل است. یعنی در قسمت‌هایی که امید ریاضی بیشتر است



این حالت ها برای سیستم با اندازه گیری ها همخوانی بیشتری دارند و وقتی امید ریاضی کمتر است بالعکس. در جاهایی که احتمال وقوع صفر است این حالت با اندازه گیری انجام شده همخوانی ندارد یا به عبارت دیگر نمی تواند وجود داشته باشد. پس درواقع آن نمونه هایی که وزن های بیشتری دارند با احتمال بیشتری در نمونه گیری آینده انتخاب می شوند.

این الگوریتم ساده به نام  $\text{sampling importance resampling}$  یا  $\text{SIR}$  معروف است و در سال ۱۹۹۳ با عنوان فیلتر بوت استرپ معرفی شد. همچنین به طور مستقل تعدادی دیگر از محققان دیگر معرفی شد که از جمله آن میتوان به مونتو کارلو فیلتر و ایزارد و بلیک با عنوان الگوریتم  $\text{condensation}$  اشاره کرد.

مجموعه نمونه ی ذکر شده در بالا همچنین می تواند به صورت توزیع تجربی برای تابع توزیع چگالی حالت مورد نظر توصیف شود.

تابع توزیع پیشین با این توصیف به این شکل تخمین زده می شود یا به عبارت دیگر نمونه برداری انجام شده را می توان به شکل یک تابع توزیع تجربی به شکل زیر نوشت:

$$p(x_k | Z_{k-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_k - x_k^i) \quad (5)$$

تابع توزیع پسین نیز به شکل زیر تخمین زده می شود:

$$p(x_k | Z_{k-1}) \approx \sum_{i=1}^N w_k^i \delta(x_k - x_k^i) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_k - x_k^{i*}) \quad (6)$$

اگر رابطه ی ۵ را در قانون بیز یا همان رابطه ۴ جایگذاری کنیم آنگاه:

که آنگاه با مقایسه با رابطه ی ۴ در می یابیم:

$$\begin{aligned}
p(x_k | Z_k) &= p(z_k | x_k) p(x_k | Z_{k-1}) / p(z_k | Z_{k-1}) \\
&\approx p(z_k | x_k) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_k - x_k^i) / p(z_k | Z_{k-1}) \\
&= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p(z_k | x_k^i) \delta(x_k - x_k^i) / p(z_k | Z_{k-1}) \\
&= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{w}_k^i \delta(x_k - x_k^i) / p(z_k | Z_{k-1}) \\
&= \sum_{i=1}^N w_k^i \delta(x_k - x_k^i) \\
p(z_k | Z_{k-1}) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{w}_k^i
\end{aligned}$$

## ۲-۴- حل مسئله به کمک فیلتر بازگشتی

در این بخش ما نشان می دهیم که چگونه کاربران ثانویه می توانند با چندین پرسمان با استفاده از الگوریتم فیلتر ذره ای مکان یک کاربر ثانویه را تشخیص دهند.

### ۲-۴-۱- تعریف دقیق مسئله

فرض می شود ناحیه ای که توسط پایگاه داده ی جغرافیایی سرویس دهی می شود یک مستطیل متشکل از  $m \times n$  سلول است و A کاربران اولیه وجود دارند که در این محدوده حرکت می کنند و B کاربر ثانویه که ممکن است در ناحیه ی سرویس دهی ثابت یا متحرک باشند. کاربران اولیه از C کانال استفاده می کنند و این کانال ها می تواند توسط کاربران ثانویه در صورتی مورد استفاده قرار گیرند که موجب تداخل با کاربران اولیه نشوند. کاربر ثانویه قبل از شروع انتقال اطلاعات باید به پایگاه داده یک پرسمان بفرستد که به

این شکل است:  $Q = (ID_i, loc_i, A_i)$

$ID_i$  شناسه‌ی کاربر ثانویه و  $loc_i$  هم مختصات مکان او می باشد  $A_i$  هم خصوصیات شکل آنتن را می گوید.

گرفتن شناسه‌ی کاربران ثانویه به منظور دنبال کردن پرسمان‌های یک کاربر ثانویه می‌باشد. پایگاه داده برای پاسخ به این پرسمان تمامی کانال‌ها را بررسی می‌کند و کانال‌هایی که قابل استفاده برای کاربر ثانویه می باشد را مشخص می‌کند. پاسخ به صورت  $R = ((ch_1, P_1, t_1), (ch_2, P_2, t_2), \dots, (ch_k, P_k, t_k))$  می باشد که در آن  $ch_i$ ،  $i$  امین کانال قابل استفاده است و  $P_i$  بیشینه‌ی توان قابل استفاده توسط کاربر ثانویه در مکان فعلی را نشان می‌دهد. همچنین  $t_i$  نشان دهنده‌ی مدت زمان قابل استفاده بودن کانال مربوطه است.

## ۲-۴-۲- نحوه اعمال فیلتر ذره‌ای به مسئله

در این قسمت نحوه‌ی اعمال فیلتر ذره‌ای به مسئله‌ی مورد نظر یا همان ردیابی کاربران اولیه در شبکه رادیوشناختی را بررسی خواهیم کرد. چند کاربر ثانویه می‌توانند با تبانی با یکدیگر با استفاده فیلتر ذره مکان یک کاربر اولیه را ردیابی کنند. ذره‌ها در این فیلتر نشان‌دهنده مکان‌های تخمین زده شده برای کاربر اولیه خواهند بود. طی اجرای الگوریتم رفته رفته ذره‌ها در کنار مکان حقیقی کاربران اولیه تجمع می‌کنند و در پایان الگوریتم مکانی که بیشترین تمرکز ذره را دارد تخمین نهایی ما از مکان کاربر اولیه خواهد بود. مکان کاربر ثانویه به صورت رندم انتخاب می‌گردد که به علت شبیه‌سازی تبانی آنهاست.

اگر  $x_k$  یک متغیر تصادفی نشان دهنده مکان و همچنین سرعت (درجهت افقی و عمودی) کاربر اولیه و  $z_k$  هم نشان دهنده‌ی بیشینه‌ی توان قابل استفاده برای ارسال روی یک کانال باشد، در این صورت برای استفاده از فیلتر بازگشتی بیزی در الگوریتم نیاز به محاسبه‌ی  $p(z_k|x_k)$  و  $p(x_k|z_{k-1})$  داریم. به این منظور باید رابطه میان  $x_k$  و  $x_{k-1}$  و همچنین رابطه  $x_k$  و  $z_k$  مشخص شود. مدلی که به طور معمول برای این منظور استفاده می‌شود به صورت زیر است:

$$x_k = f(x_{k-1}) + v_k$$

$$z_k = h(x_k) + w_k$$

که  $h(.)$  و  $f(.)$  توابع قطعی می باشند و  $w_k$  و  $v_k$  نویز هستند. تابع  $f$  حرکت کاربر را مشخص می کند و تابع  $h$  تابع اندازه گیری ماست. در واقع به این دلیل که توابع  $f$  و  $h$  خطی نیستند راه حل پیشنهادی برای این مسئله فیلتر ذره ای می باشد.

مسئله ی پیدا کردن مکان یک کاربر اولیه مثل مسئله *target-tracking* است. اطلاعات حرکتی شامل مختصات مکان و سرعت در جهت عمودی و افقی می باشد. در واقع فرض می کنیم که هر کاربر در هر مقطع زمانی با سرعت ثابت به علاوه یک نویز حرکت می کند اما این سرعت در هر مقطع زمانی اندکی تغییر می کند بنابراین می توانیم ارتباط بین  $x_k$  و  $x_{k-1}$  را اینگونه نشان دهیم:

$$x_k = Fx_{k-1} + v_k$$

این معادله در واقع همان مدل دینامیکی حالت سیستم برای مکان دو بعدی می باشد که در آن :

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

و  $v_k = (v_k^1, v_k^2)^T$  که یک بردار نویز سفید با میانگین صفر است و ماتریس کوواریانس آن به صورت زیر است:

$$\Sigma = E[v_k v_k^T] = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}T^3 & \frac{1}{2}T^2 \\ \frac{1}{2}T^2 & T \end{bmatrix} \sigma$$

که نشان دهنده چگالی نویز سیستم و  $T$  به معنی فاصله ی زمانی میان دو پرسیمان انجام گرفته است.

و تابع  $h$  هم که همان توان مجاز مورد استفاده برای کاربر ثانویه است و از پایگاه داده دریافت می شود به

صورت زیر تعریف می شود:

$$P = h(d) = \begin{cases} 0 & \text{for } d < 2 \\ 40 & \text{for } 2 \leq d < 5 \\ 100 & \text{for } d \geq 5 \end{cases}$$

در این تابع  $d$  نشان‌دهنده فاصله میان کاربر ثانویه با نزدیک‌ترین کاربر اولیه که از کانال مشابه استفاده می‌کند می‌باشد، تابع  $h$  نیز در واقع معادله مدل اندازه‌گیری سیستم می‌باشد.

$w_k$  یا  $\text{noise}$  اندازه‌گیری را در اینجا برابر با صفر در نظر می‌گیریم. چرا که پایگاه داده این اندازه‌گیری را به ما ارائه می‌دهد که درواقع همان توان مجاز برای استفاده است و کاملاً دقیق است.

نحوه‌ی پیاده‌سازی فیلتر ذره به این صورت است که در ابتدا  $N$  نمونه یا ذره  $\text{رندم}$  در نظر می‌گیریم. این ذره‌ها در واقع نشان‌دهنده مکان‌های تخمینی ما از کاربر اولیه است که ابتدا به شکل یکنواخت از کل صفحه به طور  $\text{شانسی}$  انتخاب می‌شود. این تخمین‌ها در هر بار اجرای یک دور الگوریتم رفته رفته دقیق‌تر شده تا جایی که به جواب مورد نظر در مورد مکان کاربر اولیه دست می‌یابد.

در هر بار اجرای حلقه الگوریتم فیلتر ذره نمونه‌ها را پیش‌بینی و سپس به روز رسانی می‌کنیم و یک مقطع زمانی طی می‌گردد. در مرحله‌ی پیش‌بینی، مکان جدید ذره‌ها به وسیله‌ی معادله  $x_k = Fx_{k-1}^* + v_k$  محاسبه می‌گردد. سپس اندازه‌گیری انجام می‌شود که درواقع پرسمان به پایگاه‌داده برای به دست آوردن بیشینه توان استفاده برای کاربر ثانویه انجام می‌شود. در مرحله بعد وزن هر یک از ذره‌ها محاسبه می‌شود. محاسبه‌ی وزن ذره‌ها با توجه به اندازه توان بیشینه مجاز برای کاربر ثانویه به این شیوه انجام می‌گیرد:

۱. اگر توان محاسبه‌شده برای کاربر ثانویه برابر بیشینه توان ممکن باشد با توجه به تابع  $h$  تعریف شده به این معنی است که فاصله از نزدیک‌ترین کاربر اولیه حداقل ۵ است. در نتیجه در محدوده‌ی دایره‌ای شکل به شعاع ۵ متر با مرکز مکان کاربر ثانویه هیچ کاربر اولیه‌ای نمی‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین وزن هر ذره‌ای که در این محدوده باشد صفر خواهد شد. وزن بقیه ذره‌ها که ذره‌های مجاز هستند، برابر با یکدیگر خواهد

بود. از آنجا که وزن‌ها در نهایت نرمال می‌شوند، اگر تعداد ذره‌ها در این ناحیه برابر  $p$  باشد وزن هریک از ذره‌های مجاز برابر با  $1/p$  خواهد بود.

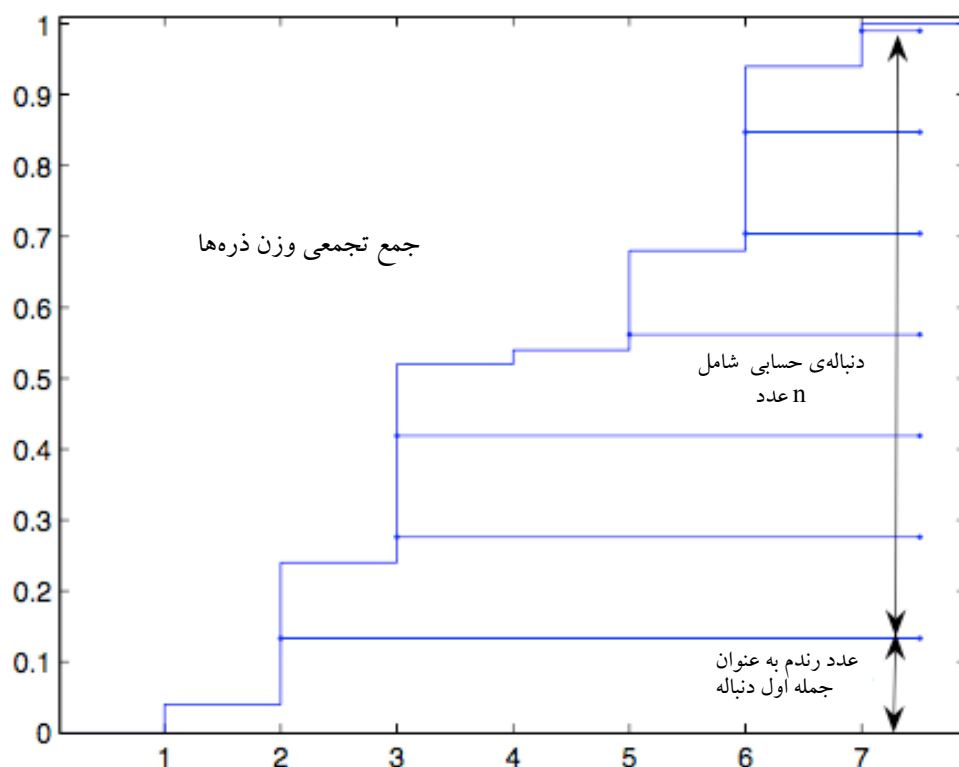
۲. اگر توان محاسبه شده صفر باشد به این معناست که حداقل یک کاربر اولیه حتما در محدوده ۲ متری کاربر ثانویه قرار دارد. بنابراین تمامی ذره‌هایی که در محدوده‌ی به شعاع ۲ به مرکز کاربر اولیه وجود دارند باید وزن بیشتری داشته باشند. پس در نهایت تعداد ذره‌ها در این محدوده شمرده می‌شود و اگر تعداد  $p$  ذره در این ناحیه وجود داشته باشد ابتدا وزن  $1/p$  به هریک از آن‌ها اختصاص داده می‌شود و وزن ذره‌های بیرونی  $1/N$  بوده تغییری نمی‌کند. اما در نهایت مجموع وزن‌ها باید یک باشند پس وزن‌ها نرمالیزه می‌شوند.

۳. اگر توان محاسبه ۴۰ باشد متوجه می‌شویم حداقل یک کاربر اولیه در فاصله حلقوی ۲ تا ۵ متری ما قرار دارد. بنابراین مجموع وزن ذره‌هایی که در این محدوده قرار دارد باید به ۱ برسد. پس اگر تعداد ذرات داخل این حلقه  $p$  باشد وزن هریک  $1/p$  خواهد بود. وزن ذراتی که از آن‌ها اطلاعاتی نداریم یا همان ذرات بیرونی را تغییر نمی‌دهیم و وزن ذرات درونی را هم صفر می‌کنیم. سپس همه‌ی وزن‌ها نرمال می‌شود.

در نهایت هم با توجه به این وزن‌ها ذره‌ها به‌روزرسانی می‌شوند. به‌روزرسانی به این مفهوم است که دوباره  $N$  ذره از میان مجموعه ذرات  $x_k$  با احتمالی برابر وزن هر ذره انتخاب می‌شود.

یکی از شیوه‌ها برای انتخاب مجموعه ذرات جدید این است که هر بار یک عدد رندم ایجاد شود و این عدد با جمع تجمعی وزن ذره‌ها مقایسه شود و از هر کدام بزرگتر شد همان ذره انتخاب شود. این روش  $O(N \log N)$  است. اما روش دیگری وجود دارد که  $O(N)$  است. در این روش سیستماتیک یک دنباله حسابی با  $n$  عدد با قدر مطلق  $1/N$  در نظر می‌گیریم که جمله‌ی اول آن یک عدد رندم است. سپس این اعداد با جمع تجمعی وزن ذره‌ها انتخاب می‌شوند به طوری که هر یک از اعداد دنباله حسابی با جمع تجمعی وزن نمونه‌ها مقایسه شده و در هر مقایسه اولین نمونه‌ای انتخاب می‌شود که جمع تجمعی آن بیشتر آن جمله از

عدد تصاعدی است. شکل ۲ به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد. مزیت این روش این است که تنها یک عدد رندم باید تولید شود. و در نتیجه نسبت به روش اول هزینه‌ی کمتری خواهد داشت.



شکل ۲. نمونه‌برداری ذره‌ها به روش سیستماتیک با  $N=7$

## فصل سوم

### شبیه‌سازی

#### ۳-۱- فرضیات مسئله

در حقیقت برای ردیابی کاربران اولیه، در هر کانال یک فیلتر ذره جداگانه استفاده می‌شود و ما در اینجا برای ساده‌سازی پیاده‌سازی فرض می‌کنیم که در واقع تنها از یک کانال استفاده می‌شود. همچنین فرض می‌کنیم تنها یک کاربر اولیه وجود دارد و هدف پیدا کردن این کاربر اولیه است.

محیط انجام الگوریتم یک صفحه‌ی  $300 \times 300$  در نظر گرفته می‌شود که البته ذره‌ها در اثر حرکت می‌توانند از این محیط محدود بیرون روند. ولی مکان اولیه تمامی ذرات در این محدوده قرار خواهد گرفت و مکان کاربران ثانویه هم در طول مدت اجرای الگوریتم در این محدوده خواهد بود.

همانطور که در [۱] گفته شده انتخاب تعداد ذره‌ها راه و روش خاصی نداشته و به طراحی فیلتر و ذره‌ها بستگی دارد. تعداد ذره‌ها را می‌توان با آزمایش و خطا به دست آورد؛ به این نحو که الگوریتم با حداقل تعداد ذره اجرا شده و تا زمانی که میانگین خطای جواب نهایی تقریباً ثابت شود تعداد ذره‌ها را افزایش می‌دهیم. خطای جواب نهایی در اینجا که در اینجا همان فاصله‌ی مکان تخمینی از مکان واقعی کاربر اولیه است. در اینجا تعداد ذره‌ها برای این محدوده برابر با  $3000$  در نظر گرفته شده است.

ماکسیمم سرعت حرکت کاربران در پیاده‌سازی اول ۱ واحد در هر مقطع زمانی در نظر گرفته شده است. چگالی نويز حرکت کاربران نیز  $0/005$  در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲- سناریوی شبیه‌سازی

پیاده‌سازی این مسئله به وسیله متلب انجام گرفته است. مکان هر کاربر به صورت یک عدد مرکب در نظر گرفته شده که قسمت حقیقی عدد نشان‌دهنده مکال طولی و قسمت **مجازی** عدد نشان‌دهنده مکان عرضی ذره در صفحه می‌باشد.

در این قسمت به توضیح جزئیات کد می‌پردازیم.

ابتدا متغیرهای اولیه مقداردهی می‌شوند. در اینجا:

$m$  و  $n$  نشان‌دهنده طول و عرض صفحه می‌باشند.



➤  $\max\_v$  حداکثر سرعت حرکت کاربر اولیه است. یعنی اگر این عدد برابر  $k$  باشد کاربر در هر مقطع زمانی حداکثر  $k$  واحد حرکت خواهد کرد.

➤ PUnum نشان دهنده‌ی تعداد کاربران اولیه است. پیاده سازی به صورتی است که بتوان برای چند کاربر اولیه نیز آن را تعمیم داد. این الگوریتم برای ردیابی چند کاربر اولیه که به اندازه کافی از یکدیگر دور باشند نیز مناسب است و جواب خواهد داد.

➤ PUs در واقع ماتریسی شامل مکان و سرعت حرکت تمام کاربران اولیه است. این ماتریس ۲ سطر دارد که در سطر اول مکان ذخیره می‌شود و در سطر دوم سرعت حرکت کاربر. هر ستون متعلق به یک کاربر است. سطر اول این آرایه با اعداد مرکب رندم با توزیع یکنواخت درون صفحه انتخاب می‌شوند. سطر دوم آرایه هم با اعداد مرکب متشکل از قسمت حقیقی و مجازی بین  $-\max\_v$  تا  $\max\_v$  انتخاب می‌شود.

➤  $T$  مطابق قبل فاصله‌ی زمانی میان دو پرسمان است که اینجا ۱ در نظر گرفته شده است.

➤  $N$  تعداد ذره‌هاست.

➤ sigma چگالی نويز حرکت ذره‌هاست که مانند مکان باید یک عدد مرکب انتخاب شود.

در ادامه نیز مقدار دهی ماتریس‌های  $F$  و کوواریانس نويز که پیشتر در مورد آنها توضیح داده شد انجام شده و ماتریس ذره‌ها نیز ایجاد و مقدار دهی می‌شود. ماتریس ذره‌ها نیز چون ماتریس کاربران اولیه دو سطر دارد که سطر اول نشان‌دهنده مکان ذره‌ها و سطر دوم نشان‌دهنده سرعت حرکت آنهاست. و مکان هر ذره نیز یک عدد رندم با توضیح یکنواخت در محدوده‌ی صفحه انتخاب شده است. و سرعت حرکت آنها نیز چون کاربران اولیه تعیین می‌شود. هر ستون ماتریس متعلق به یک ذره است.

شکل ۳. قسمت اول پیاده‌سازی، تعریف پارامترها و مقداردهی اولیه

```

7 %% initialize the problem variables
8 %% the region that is serviced by a GDB is divided into m * n square cells,
9 m=300;
10 n=300;
11 max_v= m/300; %%<1/100 m maximum x velocity
12 max_p=100; %% maximum power an SU can use
13
14 %% initiate the problem:
15 %% generate real pu locations
16 PUnum=1;
17 PUs=zeros(1,PUnum);
18
19 for i=1:PUnum
20     PUs(1,i)= complex(fix(rand*m), fix(rand*n));
21     PUs(2,i)= complex(rand*max_v*(-1)^(fix(rand*2)) , rand*max_v*(-1)^(fix(rand*2))); %i->fix(rand*2))
22 end
23
24
25 %%initial the filtering parameters
26 T=1; %% time difference between two queries
27 N = 3000;
28 sigma=complex(0.005, 0.005); %%noise intensity
29
30
31 sys_noise_cov = [1/3*T^3, 1/2*T^2; 1/2*T^2, T]*sigma; % Noise covariance in the system
32 F=[1 T; 0 1];
33 particles=zeros(2,N);
34
35 for i=1:N
36     particles(1,i)=complex(fix(rand*m), fix(rand*n));
37     particles(2,i)=complex(rand*max_v*(-1)^(fix(rand*2)) , rand*max_v*(-1)^(fix(rand*2)));
38 end
39
40 entropy=zeros(1,40);
41 distance=zeros(1,40);

```

در حلقه‌ی اصلی الگوریتم به طور کلی چهار مرحله اصلی اجرا می‌شود. پیش‌بینی، اندازه‌گیری، به روزرسانی وزن ذره‌ها و نمونه برداری مجدد.

در ابتدای حلقه مقدار دهی بعضی متغیرها، رسم نمودار، و همچنین شرط خاتمه برای الگوریتم چک شده است. این قسمت از کد در شکل ۴ آمده است.

وزن ذره‌ها در شروع حلقه همواره باید با هم برابر باشد و مقداردهی می‌شود. مکان کاربر یا کاربران اولیه در ابتدای حلقه بر حسب سرعت آنها و با اندکی نویز مشخص می‌شود. در واقع کاربران اولیه در هر دور اندکی تغییر مکان می‌دهند چون هدف متحرک است. سپس مکان کاربر ثانویه تعیین می‌شود، و همانطور که پیشتر گفته شد به علت شبیه‌سازی تبانی کاربران ثانویه این مکان به صورت رندم انتخاب گشته است.

در ادامه، نمودار مکان ذره‌ها و مکان واقعی کاربر اولیه کشیده می‌شود تا میزان پیشرفت را حین اجرای الگوریتم بتوان دید.

و در نهایت شرط خاتمه باید چک شود؛ این حلقه تا جایی تکرار می‌شود که آنتروپی ذره‌ها از حد معینی پایینتر رود. آنتروپی به این شکل محاسبه می‌گردد:

```

47                                     %%% initialization, illastration, evaluation , and end condition %%%
48 %% initialization
49
50 weights=zeros(1,N)+1/N;
51
52 % the PUs will move:
53 for j=1:PUnum
54     PUs(:,j) = F*PUs(:,j) + sqrt(sys_noise_cov) * [complex(randn, randn); 0];
55 end
56
57 % generate random location for SU
58 loc = complex(fix(rand*m), fix(rand*n));
59
60 %% illastration
61 if ( fix((k-1)/5) == (k-1)/5 )
62     figure(k)
63     plot(particles, '.b', PUs(1,:), '.r')
64 endif
65
66 %% evaluation
67 % putting particles with fix equal values together and counting the number of them in order to calculate the
68 % real weights of particles which shows the concentration in some point.
69
70 l = 10;
71 BParticles = (fix(particles(1,:)./l))*l;
72 uniqueBParticles = unique(BParticles);
73 P = zeros(size(uniqueBParticles));
74 uBParticleNum = size(uniqueBParticles,2);
75
76 for i = 1:uBParticleNum
77     P(i) = sum( uniqueBParticles(i)==BParticles );
78 end
79
80 % calculation of entropy as a parameter to show the end of algorithm
81 entropy(1,k) = -sum((P/N).*log(P/N));
82
83 if entropy(1,k)<threshold
84     break;
85 endif

```

اگر در هر بلاک  $(i,j)$  در صفحه  $p_{i,j}$  ذره وجود داشته باشد آن گاه آنتروپی در اینجا برابر

$$\sum_{j=0}^{j=300/L} \sum_{i=0}^{i=300/L} p_{i,j} \times \log(p_{i,j}) \text{ خواهد بود.}$$

در اینجا باید به این نکته توجه کرد که نمی توان برای محاسبه ی آنتروپی از وزن ذره ها استفاده نمود. به این دلیل که وزن هریک از ذره ها در شروع حلقه با یکدیگر برابر و برابر  $1/N$  خواهد بود. همچنین اگر در هنگام نمونه برداری مجدد در آخر حلقه ی پیشین چند نمونه از یک ذره انتخاب شده باشد در مرحله ی پیشینی به علت حرکت متفاوت ذره ها و نویز رندم آنها، این چند نمونه با یکدیگر نابرابر شده و با اختلاف اندکی مقادیر متفاوتی پیدا خواهند کرد. درون حلقه نیز تنها وزن اندکی از آنها تنها طبق آخرین مشاهده وزن بیشتری پیدا خواهند کرد.

در اینجا از متغیر مناسب تری استفاده خواهیم کرد تا بتوان به کمک آن آنتروپی یا بی نظمی را محاسبه نمود. این متغیر چگالی ذرات به معنی تعداد ذرات در هر واحد  $L \times L$  از صفحه است. در شبیه سازی مقدار  $L$  برابر

با ۱۰ در نظر گرفته شده است. هر قدر که ذرات در یک نقاطی خاص جمع شوند آنتروپی طبق تعریف کاهش می‌یابد پس آنتروپی معیار خوبی برای نشان دادن پراکندگی ذرات در صفحه است و کاهش آن به این معنی است که پراکندگی ذرات کاهش یافته و در نقطه یا نقاطی متمرکز شده‌اند.

در ادامه نیز چگالی ذره‌ها که همان تعداد آنها در واحد سطح است محاسبه شده. ناحیه‌هایی که از بقیه چگال‌تر هستند ناحیه جواب هستند و به این ترتیب می‌توان پارامتر کمینه‌ی فاصله‌ی ۵ نقطه از صفحه که بیشترین چگالی ذره را دارند را به عنوان خطا در نظر گرفت که کاهش آن در طول اجرای الگوریتم معیار خوبی برای نشان دادن نزدیک شدن به جواب است.

شکل ۴. قسمت دوم پیاده‌سازی، مقدار دهی متغیرها، رسم نمودار، و همچنین شرط خاتمه

در مرحله‌ی بعد ابتدا اندازه‌گیری انجام می‌شود، یک پرسمان توسط کاربر ثانویه به پایگاه داده انجام می‌شود، تا حداکثر توان مجاز را دریافت کند، و پیاده‌سازی آن به این شکل است که تابع DBreq مکان کاربر یا کاربران اولیه و کاربر ثانویه را دریافت کرده و حداکثر توان مجاز را بازمی‌گرداند.

پس از آن مرحله پیشبینی الگوریتم فیلتر ذره پیاده‌سازی شده است. به این معنی که مکان و سرعت ذرات موجود با توجه به مدل حرکتی که برای آنها تعریف کردیم تعیین می‌شود و ذرات اندکی جابه‌جا می‌شوند. سپس دوباره مشاهده در مورد آنها صورت می‌گیرد، به این شکل که حداکثر توان مصرفی برای هر یک از آنها محاسبه می‌شود. در همین حلقه تعداد ذراتی که مشاهده‌ی یکسان با اندازه‌گیری انجام شده دارند شمرده می‌شود چون هنگام به روز رسانی وزن ذره‌ها به این تعداد احتیاج داریم. در واقع پیشینه‌ی توان دریافت شده توسط کاربر ثانویه، در صورتی که هر یک از این ذرات کاربر اولیه بود، با پیشینه‌ی توانی که کاربر ثانویه از طریق اندازه‌گیری به دست آورده است کاملاً برابر است.

سپس به روز رسانی وزن ذره‌ها انجام می‌شود. در قسمت نحوه اعمال فیلتر این مسئله به تفصیل، البته از نگاه دیگر، توضیح داده شد. طبق توضیح وزن ذراتی که طبق مشاهده انجام شده برای آنها کاربر ثانویه توان

مجاز بیشتری داشته ثابت می ماند. این ذرات دورتر از یک کاربر اولیه نسبت به کاربر ثانویه هستند اما چون از تعداد کاربران اولیه اطلاعی نداریم و ممکن است کاربران اولیه دیگری در محدوده ی آنها وجود داشته باشند نمی توانیم در مورد آنها قضاوت کنیم.

وزن ذراتی که مشاهده یکسان با اندازه گیری در مورد آنها داشتیم افزایش می یابد و وزن ذراتی که مطمئنیم امکان حضور کاربر اولیه در آنجا وجود ندارد صفر مقداردهی می شود. در مشاهده ی صورت گرفته برای این ذرات این بیشینه ی توان مجاز قابل استفاده برای کاربر ثانویه کمتر از مقدار حقیقی آن به دست می آید. پس متوجه می شویم که هیچ کاربر اولیه ای در این محدوده وجود نداشته است چرا که مقداری که کاربر ثانویه به عنوان بیشینه توان مجاز با پرسمان از پایگاه داده دریافت کرده است بزرگتر از این عدد است.

```

114 %% # prediction
115
116 % these are needed parameters initialized
117 particles_star=zeros(2,N);
118 count=0;
119
120 for j = 1:N
121     % the particles should move with the PU motion model in each iteration
122     particles_star(:,j) = F*particles(:,j)+ sqrt(sys_noise_cov)*[complex(randn, randn); complex(randn, randn)];
123     % with these new updated particle locations, update the observations for each of these particles.
124     z(j) = h(abs(particles_star(1,j)-loc), max_p);
125     % counting the number of particles in the same region that we know atleast a PU should exist there
126     %inorder to update the weight with respect to it
127     if p == z(j)
128         count++;
129     end
130 end
131
132 %% # updating the weights
133 for j = 1:N
134     if (z(j)==p) % this particle might be a true locat
135         weights(j)= 1/count;
136     elseif (z(j) < p) % we know this particle does not exist!
137         weights(j)=0;
138     end
139     % otherwise we dont know anything
140 end
141
142 % Normalize to form a probability distribution (i.e. sum to 1).
143 weights = weights./sum(weights);
144 weights_resample_update=zeros(1,n);
145
146 %% # Resampling: From this new distribution, now we randomly sample from it to generate our new estimate particles
147 for j = 1 : N
148     particles(:,j) = particles_star(:,find(rand <= cumsum(weights),1));
149 end
150

```

شکل ۵. قسمت سوم پیاده سازی، پیشینی، اندازه گیری، به روزرسانی وزن ذره ها و نمونه برداری مجدد

سپس وزن ذرات نرمالایز می شود، تا مجموع آنها یک شود. در نهایت نمونه برداری مجدد از ذره ها انجام می شود. در مورد نحوه ی نمونه برداری نیز پیشتر به تفصیل توضیح داده شد. برای نمونه برداری در اینجا از روش سیستماتیک استفاده نشده است به این علت که از مستقل بودن نمونه ها اطمینان داشته باشیم.

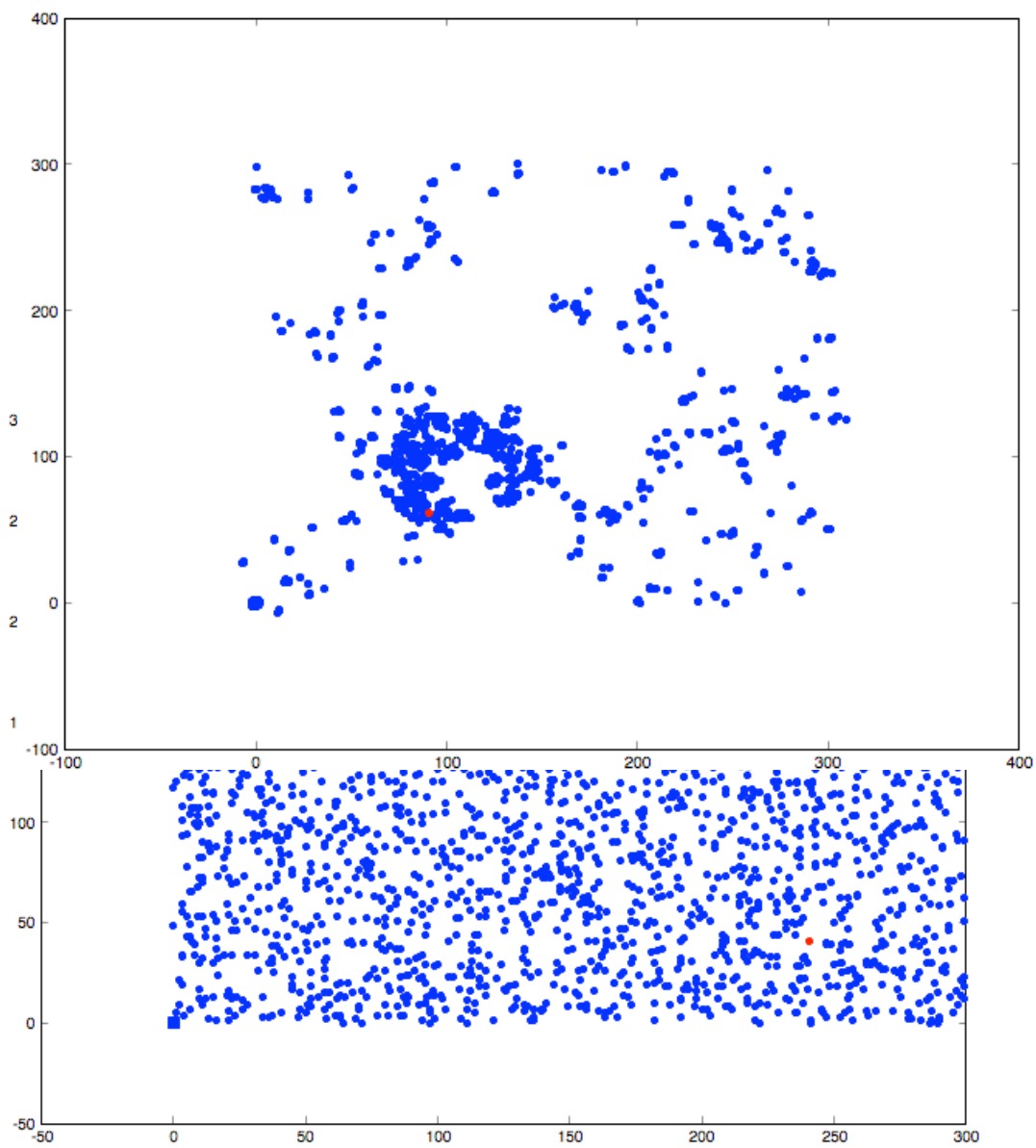
### ۳-۳- نتایج شبیه‌سازی

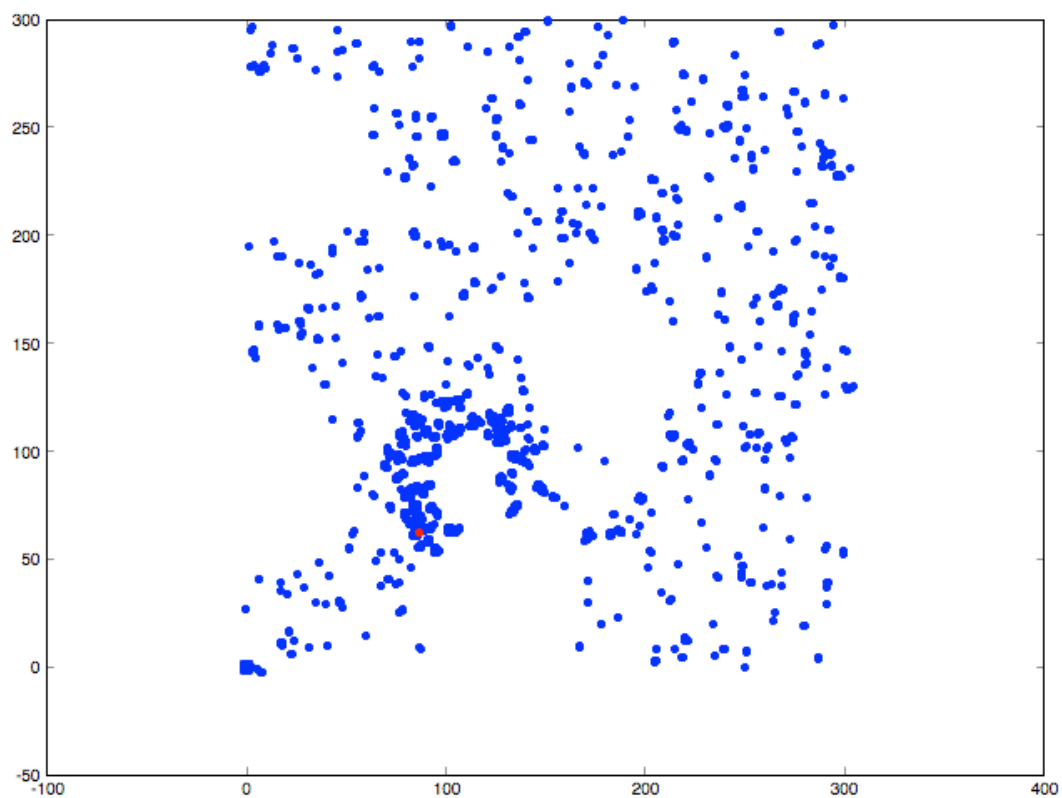
#### ۳-۳-۱- حرکت ذره‌ها و تغییر پارامترها حین اجرای الگوریتم

ابتدا نتایج شبیه‌سازی را برای یک کاربر اولیه با سرعت بیشینه‌ی ۱ واحد در مقطع زمان بررسی می‌کنیم. در شکل‌های ۶ تا ۱۱ نحوه‌ی جابه‌جا شدن ذرات و نزدیک شدن آن‌ها به مکان حقیقی کاربر اولیه را مشاهده می‌کنیم. ذرات با رنگ آبی نشان داده شده‌اند و کاربر اولیه با رنگ قرمز نشان داده شده است. شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب تغییرات متغیرهای فاصله و آنتروپی را نشان می‌دهند. مقصود از فاصله همان‌طور که پیشتر گفته شد کمینه‌ی فاصله‌ی ۵ ناحیه از چگالترین نقاط، نسبت به مکان کاربر اولیه است. این دو نمودار تقریباً نزولی هستند که نشان می‌دهد در طول اجرای الگوریتم ما با مکان حقیقی کاربر اولیه نزدیک می‌شویم و بی‌نظمی ذره‌ها نیز کاهش می‌یابد.

شکل ۶. مکان ذرات در اولین دور اجرای حلقه و در ابتدا

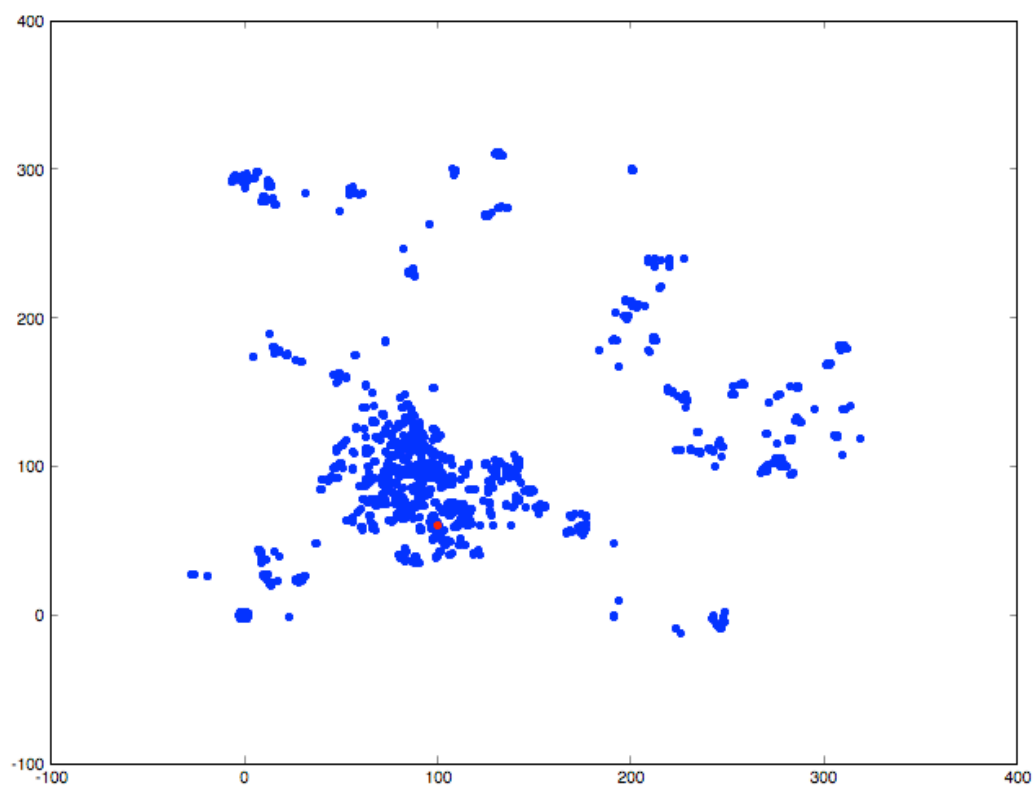
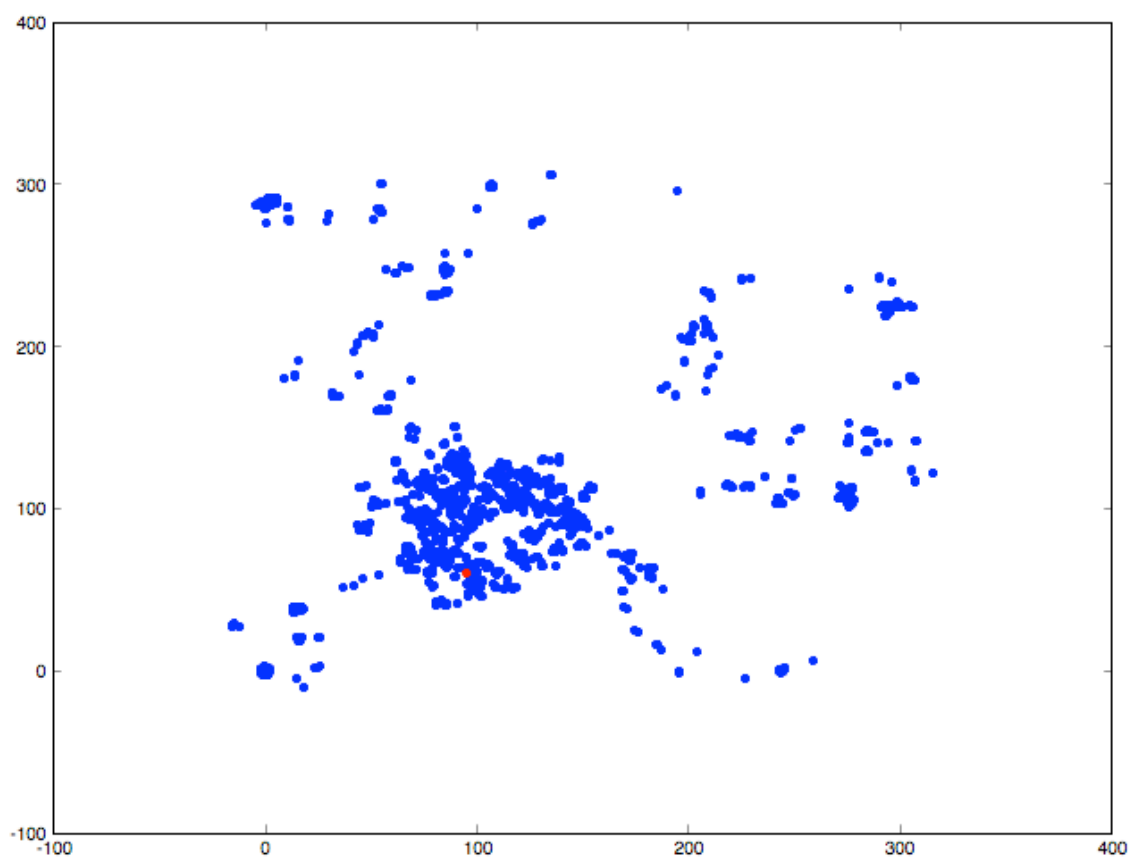
شکل ۷. مکان ذرات در ششمین دور اجرای حلقه

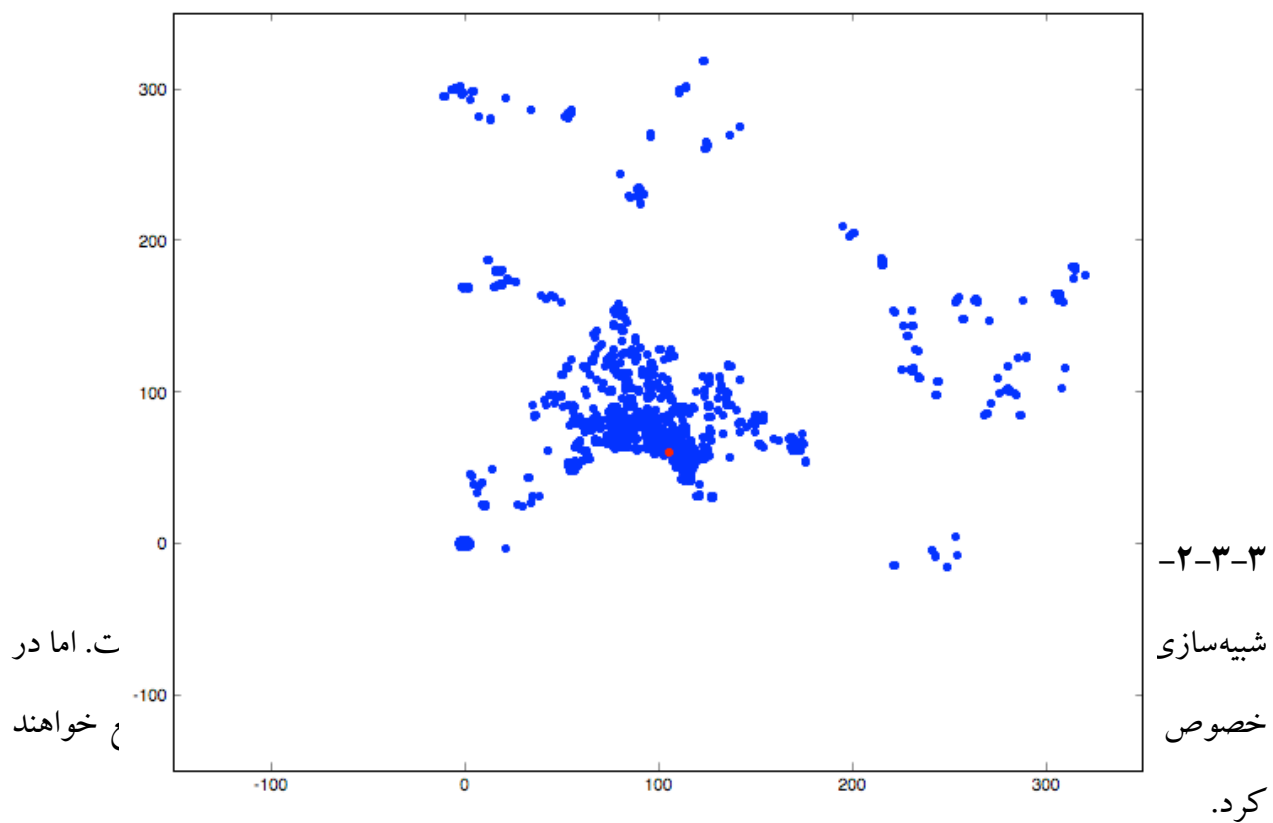




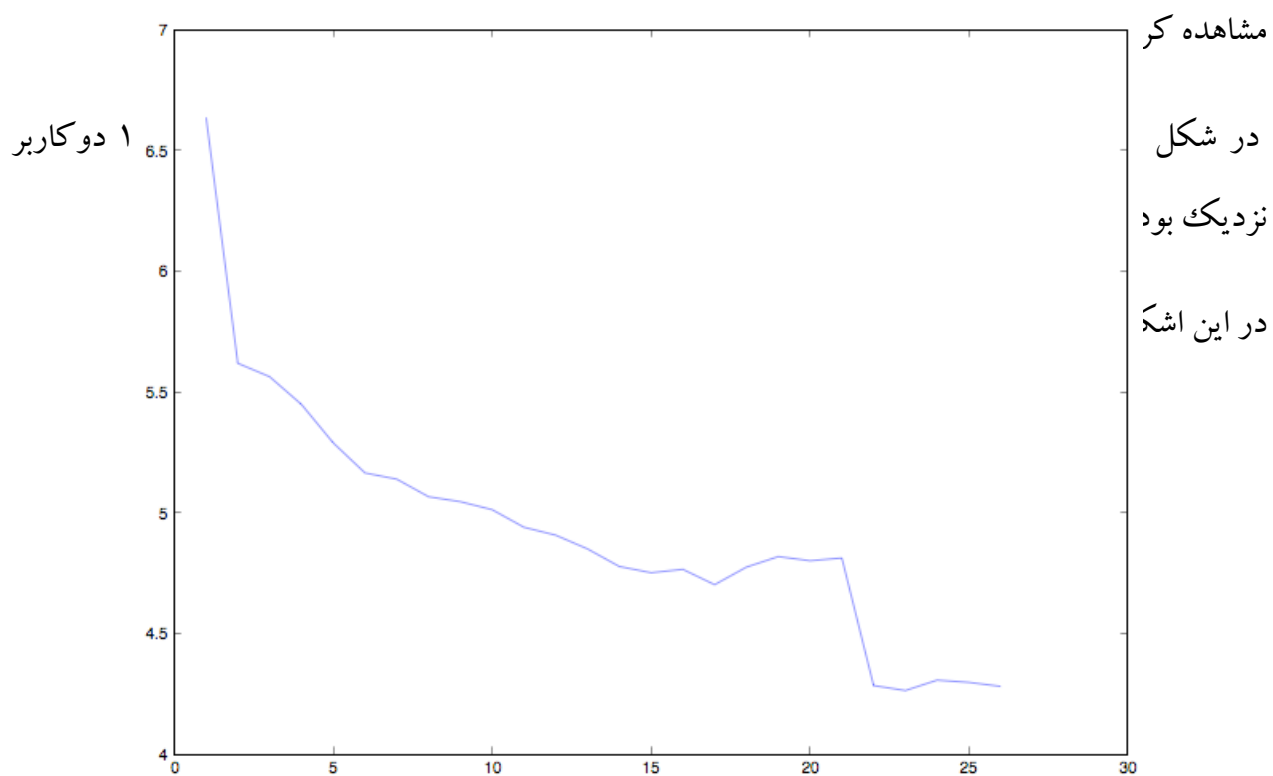
شکل ۱۰. مکان ذرات در بیست یکمین دور اجرای حلقه

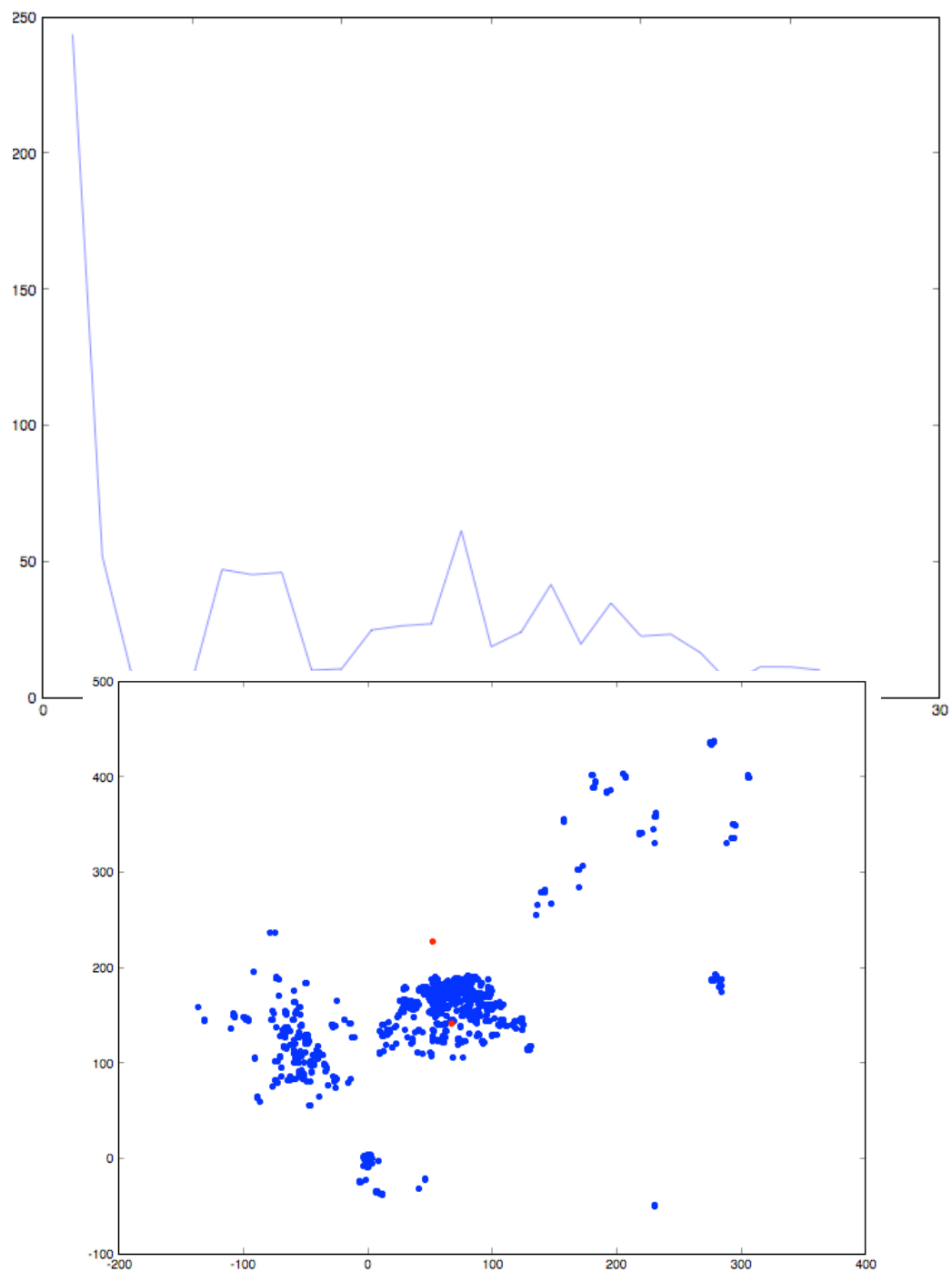






در شکل های ۱۴ و ۱۵ که مکان ذرات و کاربران اولیه را نشان می دهند، این مسئله را به خوبی می توان

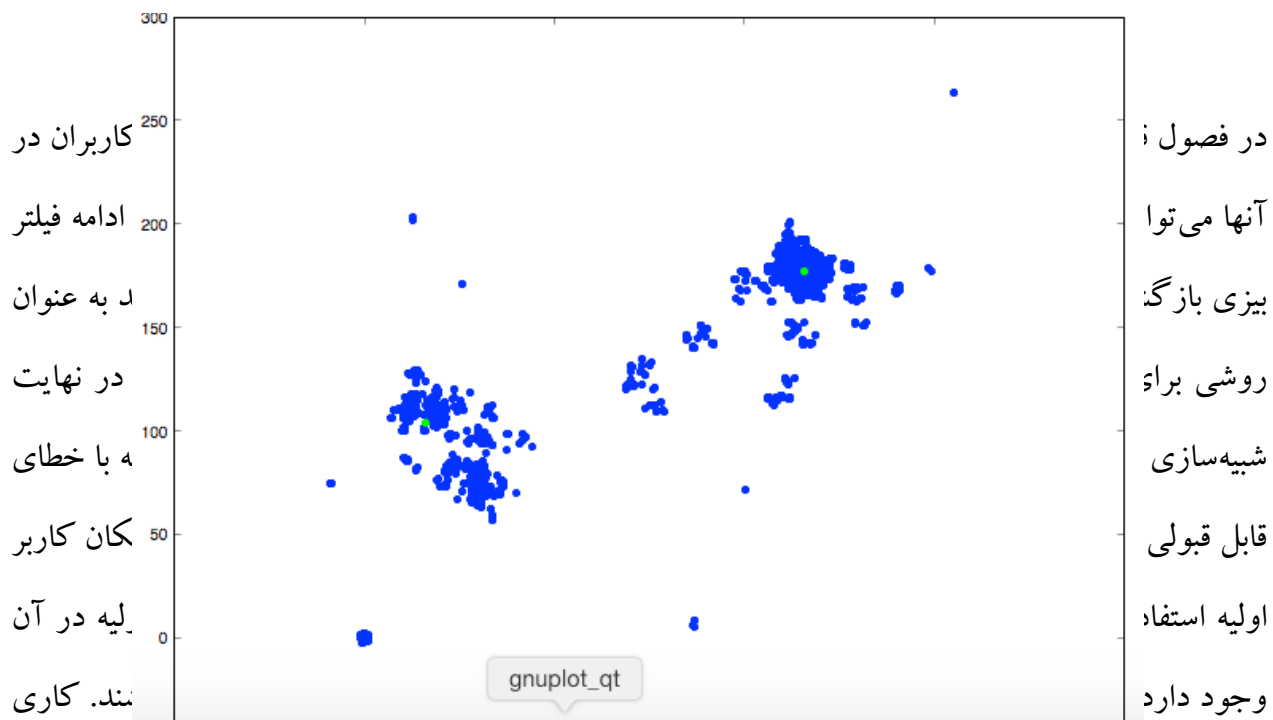




شکل ۱۷. نمودار تجمع ذرات برای دو کاربر نزدیک به یکدیگر

## فصل چهارم

### نتیجه‌گیری و کارهای آینده



که در آینده در این مورد می تواند انجام پذیرد اصلاح الگوریتم و تغییر طراحی فیلتر یا پیدا کردن الگوریتم دیگری به منظور یافتن چند کاربر اولیه بدون هیچگونه محدودیتی است.

## فصل پنجم

### منابع

- [1] D. Salmond & N. Gordon, An Introduction to Particle Filters, 2005.
- [2] B. Bahrak, Ex Ante Approaches for Security, Privacy, and Enforcement in Spectrum Sharing. PhD thesis, Virginia Tech, 2013.
- [3] Bahrak, B., Bhattarai, S., Ullah, A., Park, J.-M., Reed, J. and Gurney, D. (no date) ‘Protecting the Primary Users’ Operational Privacy in Spectrum Sharing’, .