

موقعیت‌یابی کاربران Wi-Fi با رویکرد TDOA به کمک اصلاح خطای زمان نمونه‌برداری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶

مریم نظری^۱، حسین بهرامگیری^۲، محسن فرهنگ^۱، رضا بهرامپور^۱

۱- دانشجو، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران. bahramgiri@mut.ac.ir

چکیده

موقعیت‌یابی در بسیاری از زمینه‌های نظامی و تجاری از جمله امنیت داخلی، جنگ الکترونیک و سامانه‌های کنترل، هدایت و ناوبری هوشمند کاربرد گسترده‌ای دارد. در این مقاله، موقعیت‌یابی غیرفعال کاربران شبکه Wi-Fi با استفاده از روش TDOA مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی عملکرد سامانه در محیط‌های واقعی، سیگنال‌های رادیویی توسط دستگاه‌های رادیو نرم‌افزاری USRP N210 از محیط جمع‌آوری شده‌اند. با توجه به اختلاف موجود بین سرعت نمونه‌برداری گیرنده‌ها، یک روش برای اصلاح نسبی خطای زمان نمونه‌برداری ارائه شده و با استفاده از درونیایی نقاط نمونه‌برداری، ظرفیت موقعیت‌یابی نیز به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. با اجرای یک الگوریتم همگام‌سازی چند مرحله‌ای، همزمانی دقیق بین گیرنده‌ها برقرار شده است. سپس، با استفاده از دو روش تخمین LS و میانگین‌گیری از نقاط تقاطع، موقعیت کاربر با میانگین خطای ۲/۳۶ متر و ۱/۵۲ متر تخمین زده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، پتانسیل بالایی جهت کاربرد در سامانه‌های موقعیت‌یابی مبتنی بر شبکه‌های بدون سیم دارد. این سامانه در مقایسه با سامانه‌های مشابه به طور قابل توجهی هزینه‌ها را کاهش داده و قادر است بدون ایجاد تداخل در زیرساخت شبکه‌های Wi-Fi موجود، به صورت غیرفعال اقدام به ردیابی کاربران نماید. این ویژگی، سامانه پیشنهادی را به گزینه‌ای مطلوب برای کاربردهای امنیتی تبدیل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اختلاف زمان دریافت سیگنال، حداقل مربعات، موقعیت‌یابی غیرفعال، USRP N210، Wi-Fi

Wi-Fi user localization using TDOA with sampling time error correction

Maryam Nazari¹, Hossein Bahramgiri¹, Mohsen Farhang¹, Reza Bahrampour¹

1- Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

Abstract

Localization plays a pivotal role in numerous military and commercial applications, including homeland security, electronic warfare, and intelligent control, guidance, and navigation systems. This paper investigates passive localization of Wi-Fi network users employing the Time Difference of Arrival (TDOA) method. Real-world radio signals were acquired using USRP N210 devices for evaluating the system's performance in practical environments. This paper presents a method to improve localization accuracy by correcting sampling time errors and interpolating sampling points, addressing discrepancies in receiver sampling rates. Accurate synchronization between receivers is achieved by implementing a multi-stage synchronization algorithm. The user's position was calculated with a mean error of 3.62 meters using the LS method and 1.52 meters using intersection averaging. Simulation results demonstrate that the proposed method holds significant potential for application in wireless network-based localization systems. Compared to similar systems, this system significantly reduces costs and can passively track users without interfering with existing Wi-Fi infrastructure, making it an attractive option for security applications.

Keywords: air conditioning, air distribution, cabin, passenger aircraft, thermal comfort.

۲۲۵

سال ۱۴ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۴

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



۱. مقدمه

نیاز به تعیین دقیق موقعیت اشیاء و افراد، از دیرباز مورد توجه بشر بوده است [۱]. با پیشرفت فناوری و افزایش کاربردهای موقعیت‌یابی در زندگی روزمره، این مسئله به یک حوزه تحقیقاتی فعال تبدیل شده است. تاکنون با بهره‌گیری از طیف گسترده‌ای از روش‌ها تلاش‌هایی برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر انجام شده است؛ پردازش تصویر [۲] و یادگیری ماشین [۳] از جمله این روش‌ها به شمار می‌روند. به طور خاص امروزه روش‌های موقعیت‌یابی غیرفعال فرستنده سیگنال در کانون توجه پژوهشگران، به‌ویژه در حوزه هوافضا، قرار گرفته است [۴-۶]. موقعیت‌یابی با توجه به محیطی که در آن انجام می‌شود، به دو نوع طبقه‌بندی می‌شود: موقعیت‌یابی بیرونی و موقعیت‌یابی داخلی [۷-۸]. مورد اول در خارج از ساختمان‌ها انجام می‌شود، در حالی که موقعیت‌یابی داخل ساختمان‌ها، داخل مکان‌هایی مانند خانه‌ها، بیمارستان‌ها، مراکز خرید و غیره انجام می‌شود. همچنین سامانه‌های موقعیت‌یابی به دو دسته مبتنی بر برد و بدون نیاز به برد طبقه‌بندی می‌شوند [۹]. سامانه‌های مبتنی بر برد به دو دسته سامانه‌های موقعیت‌یابی محلی و جهانی تقسیم می‌شوند. در روش‌های موقعیت‌یابی مبتنی بر برد از ویژگی‌های سیگنال دریافتی مانند زمان دریافت سیگنال (TOA) [۱۰]، اختلاف زمان دریافت سیگنال (TDOA) [۱۱]، جهت ورود سیگنال (DOA) [۱۲]، زاویه ورود سیگنال (AOA) [۱۳]، قدرت سیگنال دریافتی (RSS) [۱۴]، اختلاف فرکانس دریافت سیگنال (FDOA) [۱۵] برای موقعیت‌یابی استفاده می‌شود. همچنین در

مواردی روش‌های ترکیبی^۷ نیز پیشنهاد شده است [۱۶-۱۹]. به طور کلی برتری یک روش نسبت به روش‌های دیگر قابل تضمین نیست؛ بلکه بسته به شرایط خاص هر مسئله، ممکن است هر یک از روش‌های یادشده در اولویت قرار گیرد. در این پژوهش متناسب با ویژگی‌های مورد نظر شامل عدم تعامل گیرنده‌ها با هدف و نیز ساختار گیرنده‌ها، روش TDOA برای انجام موقعیت‌یابی انتخاب شده است؛ در جدول ۱ برخی از دلایل انتخاب روش TDOA در مسئله مورد نظر این تحقیق مشخص شده است [۲۰].

در حال حاضر، شبکه محلی بی‌سیم (WLAN)^۸ کاربرد گسترده‌ای در ایجاد دسترسی به شبکه اینترنت دارد؛ به طور خاص استاندارد IEEE 802.11 یا «Wi-Fi» در بسیاری از دستگاه‌ها فعال بوده و به عنوان منبع اطلاعاتی مناسبی برای تخمین موقعیت دستگاه‌های متحرک به کار گرفته می‌شود. تا کنون مقالات متعددی در حوزه موقعیت‌یابی سامانه‌های Wi-Fi ارائه شده است. به طور خاص در مرجع [۲۱] موقعیت‌یابی با ۶ دستگاه گیرنده با نرخ نمونه‌برداری 80 MSps و یک دستگاه مودم برای همگام‌سازی ساعت گیرنده‌ها در یک محیط بیرون ساختمانی انجام شده است. در این پژوهش، مشابه با [۲۱]، یک سامانه موقعیت‌یابی محلی ارائه می‌شود که در آن دستگاه هدف، یک کاربر Wi-Fi است. سه دستگاه USRP N210^۹ به عنوان گیرنده در نظر گرفته شده‌اند که به منظور تخمین موقعیت کاربر با یکدیگر همکاری می‌کنند. اختلاف زمان دریافت بسته‌های ارسال شده از هدف، توسط هر جفت از این گیرنده‌ها اندازه‌گیری شده و مکان هدف با استفاده از این اندازه‌گیری‌ها تعیین می‌گردد. با توجه به اختلاف

موجود بین سرعت نمونه برداری گیرنده‌ها، یک روش برای اصلاح نسیبی خطای زمان نمونه برداری ارائه شده و با استفاده از درونیابی نقاط نمونه برداری، ظرفیت موقعیت یابی به میزان قابل توجهی افزایش داده شده است. همچنین بر خلاف مقاله [۲۱]، موقعیت هدف صرفاً در میان گیرنده‌ها محدود نشده است و در چیدمان‌های متفاوت عملکرد موقعیت یابی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته شده است.

جدول ۱. دلایل انتخاب روش TDOA، مبتنی بر [۲۰]

روش	دلایل برتری TDOA در شرایط این تحقیق
AOA	زیرساخت مورد نیاز برای TDOA نسبت به AOA سبک تر است.
	AOA نسبت به چندمسیری حساسیت بیشتری دارد.
	آنتن‌های مورد نیاز در TDOA ساده تر و ارزان تر هستند.
TOA	در TOA مکان یابی به صورت فعال انجام می گیرد؛ این پژوهش به دنبال مکان یابی غیرفعال است.
	همزمان سازی منبع و همه گیرنده‌ها مورد نیاز است.
RSS	RSS نسبت به TDOA دقت پایین تری دارد.
	RSS به شدت تحت تاثیر چندمسیری و محوشدگی قرار دارد.
FDOA	FDOA برای مکان یابی به فرکانس داپلر نیاز دارد. (تحرک هدف یا گیرنده‌ها)
	زمان مورد نیاز برای پرای پردازش FDOA بیش از TDOA است.

ساختار ادامه مقاله به این شرح است: ابتدا در بخش ۲ معماری سامانه موقعیت یابی معرفی شده است. سپس در بخش ۳ به بررسی الگوریتم موقعیت یابی به روش TDOA و ملاحظات همزمانی گیرنده‌ها پرداخته شده است. در بخش ۴ مراحل تخمین موقعیت هدف بر اساس روش‌های تقاطع هذلولی‌ها و LS بیان شده است.

در بخش ۵ نتایج شبیه سازی کامپیوتری مشخص شده و در بخش ۶ به جمع بندی مقاله پرداخته شده است.

این پژوهش با تکیه بر مبانی نظری ارائه شده در مرجع [۲۲]، علاوه بر محیط شبیه سازی، به صورت عملیاتی در محیط واقعی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین شبیه سازی‌های موجود با استفاده از نرم افزار MATLAB نسخه ۲۰۲۲ صورت گرفته و مشخصات پردازنده رایانه‌های همراه استفاده شده نیز به شرح زیر است (هر سیستم متصل به یک گیرنده USRP):

- 1- 8GB RAM 1 TB HHD core i7-3630M
- 2- 4GB RAM 500 GB HHD core i5-2430M
- 3- 4GB RAM 256 HHD 256 SSD core i7-640M

۲. معماری سامانه موقعیت یابی

معماری سامانه موقعیت یابی مبتنی بر روش TDOA مورد نظر در این مقاله در شکل (۱) نشان داده شده است. این سامانه از سه دستگاه گیرنده USRP N210 که در سه رأس یک مثلث متساوی الاضلاع مستقر شده‌اند و یک دستگاه مودم که در مختصات مرکز این مثلث جهت همگام سازی آن‌ها قرار می گیرد تشکیل شده است.

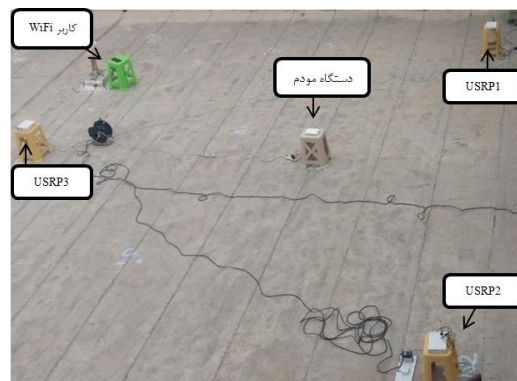
اهدافی که قرار است تعیین مکان شوند، کاربران Wi-Fi، مانند یک تلفن همراه هوشمند، می باشند. از آنجایی که به دنبال موقعیت یابی غیرفعال هستیم، فرض شده که اطلاعات پیشینی از موقعیت هدف در دسترس نیست. همچنین برای اطمینان بیشتر از نتایج شبیه سازی و نزدیک شدن به شرایط واقعی، موقعیت هدف (کاربر Wi-Fi) بیرون از مساحت احاطه شده توسط گیرنده‌ها

در نظر گرفته شده است. درحالی‌که به صورت معمول، اگر در روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری‌های TDOA موقعیت واقعی هدف میان گیرنده‌ها باشد، تخمین موقعیت بهتری حاصل خواهد شد. نمونه‌برداری در یک فضای بیرون ساختمانی با مساحت ۴۰۰ مترمربع و با نرخ نمونه‌برداری ۲۰ MSps انجام شده است.



شکل ۱. ساختار سامانه موقعیت‌یابی

نمایی از چیدمان واقعی سیستم در شکل (۲) مشخص شده است.



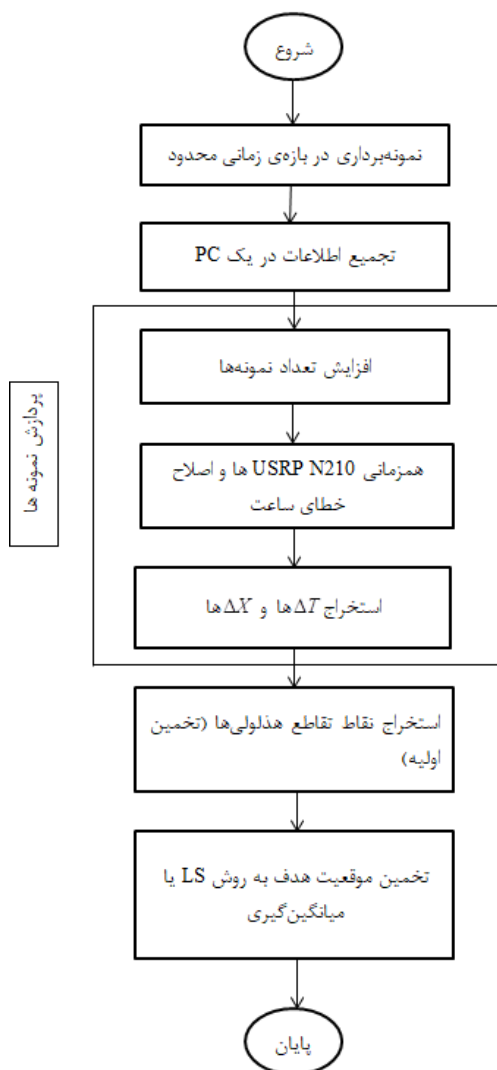
شکل ۲. نمایی از فضا و نحوه نمونه‌برداری عملی

مشابه با ساختار شکل (۱)، سه دستگاه گیرنده به صورت مثلثی در سه نقطه با مختصات معین مستقر شده و یک دستگاه مودم در مختصات مرکز این مثلث قرار داده شده است. دستگاه تلفن همراه (کاربر Wi-Fi) نیز به عنوان هدفی ثابت در نظر گرفته شده است. پس از هر

بار نمونه‌برداری و تخمین موقعیت، موقعیت هدف تغییر یافته و مجدد سامانه اجرا می‌شود تا دقت تخمین و روش ارائه شده در حالت‌های مختلف بررسی گردد.

۳. هندسه مورد مطالعه و تولید شبکه

مراحل روش موقعیت‌یابی با استفاده از اندازه‌گیری‌های TDOA در نمودار شکل (۳) مشخص شده است.



شکل ۳. نمودار بلوکی مراحل تخمین

در ادامه هر یک از این مراحل به تفکیک شرح داده شده است.

۱,۳ دریافت سیگنال کاربر Wi-Fi

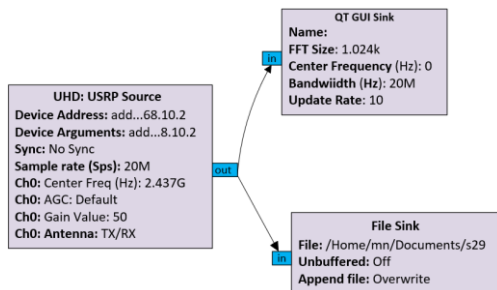
برای دریافت سیگنال با نرم افزار Gnu Radio محیط لینوکس و دستگاه USRP N210، بلوک های مورد نیاز برای دریافت سیگنال در نرم افزار ایجاد شده و تنظیمات لازم اعمال گردیده است. به این صورت که ابتدا در لپ تاپی که می خواهیم با آن نمونه برداری انجام شود، GNU Radio را در محیط لینوکس نصب می کنیم. دستگاه USRP N210 را توسط کابل اترنت یک گیگابیتی به سیستم متصل می کنیم. سپس مطابق با شکل ۴ و ۵، دو درگاه RX و TX محل قرار گرفتن آنتن در دستگاه می باشد که برای دریافت سیگنال، آنتن را به درگاه RX وصل می کنیم. برای نمونه برداری از سیگنال های WiFi، آنتنی را در محدوده فرکانسی ۴۸۹/۲ تا ۴۹۹/۲ گیگاهرتز انتخاب می کنیم.



شکل ۵. اتصال کابل اترنت و برق به USRP

```
.....
Device Address:
  serial: F4140B
  addr: 192.168.10.2
  name:
  type: usrp2
.....
```

شکل ۶. تأیید اتصال USRP در لپ تاپ



شکل ۷. نمودار بلوکی در GNU Radio



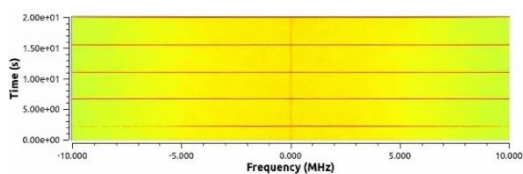
شکل ۸. اتصال آنتن به USRP

این بلوک ها را با توجه به نیاز مسئله که شامل دریافت سیگنال، ذخیره سازی سیگنال و نمایش سیگنال است انتخاب نموده ایم. این وظایف به ترتیب بر عهده بلوک های UHD: USRP Source، File Sink و QT GUI Sink می باشد. پارامترهای هر بلوک از جمله فرکانس مرکزی، نرخ نمونه برداری، اندازه FFT متناسب با سیگنالی که می خواهیم نمونه برداری کنیم، تنظیم می نماییم. IP دستگاه USRP N210 شماره سریال ۱۹۲،۱۶۸،۱۰،۱ می باشد که بر روی خود دستگاه درج شده است. بعد از تنظیم کردن این پارامترها برنامه را اجرا می کنیم. پس از شناسایی USRP N210 توسط لپ تاپ و اعمال این مراحل برای سه دستگاه USRP N210 سه لپ تاپ شروع به دریافت سیگنال توسط سه

شکل ۵ و ۶ به ترتیب نحوه اتصال USRP به لپ تاپ و تأیید اتصال توسط لپ تاپ را نشان می دهند. حال بعد از آن که آنتن را در درگاه قرار دادیم و دستگاه را توسط کابل اترنت به کامپیوتر شخصی متصل کردیم، با رسم نمودار بلوکی در نرم افزار GNU Radio به صورت شکل ۷، نمودار بلوکی را طراحی و IP دستگاه USRP N210 را تنظیم می کنیم.

USRP N210 می کنند. در نهایت می توانیم در بلوک QT GUI Sink سیگنال در حال نمونه برداری را مشاهده کرده و آن مقدار نمونه را که مورد نیاز است توسط بلوک File Sink ذخیره کنیم.

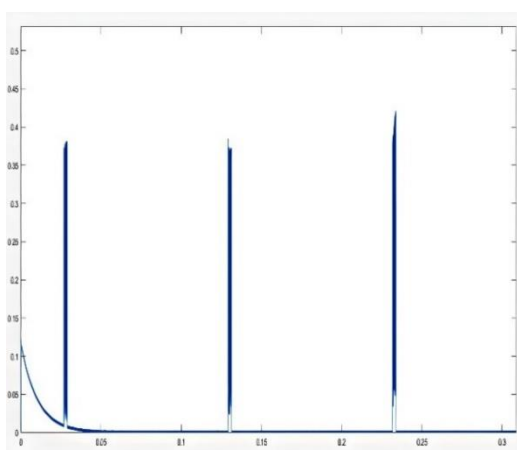
مسئله بسیار مهم در روش TDOA همزمانی ایستگاه های گیرنده است. به منظور همگام سازی و زمان بندی سیگنال های دریافتی توسط دستگاه های USRP N210، از سیگنال های راهنمای دریافت شده از مودم استفاده شده است. ابتدا سه دستگاه USRP N210 بوسیله ی سیگنال راهنمای ارسالی از دستگاه مودم همگام شده اند. دستگاه مودم در فاصله ی یکسانی از گیرنده ها قرار دارد و در نتیجه سیگنال ارسالی از مودم در زمان یکسانی توسط هر یک از گیرنده ها دریافت می شود. به عنوان یک نمونه، نمودار زمان-فرکانس سیگنال دریافتی در شکل (۸) ترسیم شده است، مشاهده می شود که سیگنال های راهنمای ارسال شده از مودم، در فاصله ی منظم ۱۰۲ میلی ثانیه از یکدیگر دریافت شده اند. نمایش توانی این سیگنال نیز در شکل (۹) آمده است.



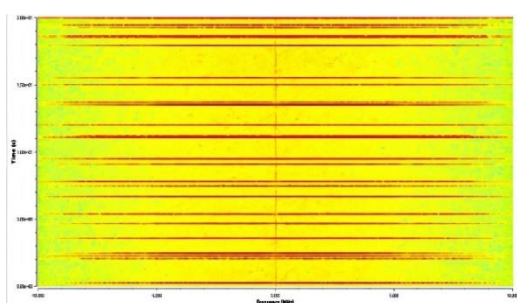
شکل ۸. نمودار زمان-فرکانس سیگنال دریافت شده از مودم توسط دستگاه USRP N210

در حضور یک تلفن همراه و فعال بودن سامانه Wi-Fi آن، سیگنال از مودم (مرجع همزمانی) و تلفن همراه به طور همزمان دریافت شده که این مورد در شکل های (۱۰) و (۱۱) قابل مشاهده است. در شکل (۱۰)، حضور سیگنال های مربوط به تلفن همراه در بین سیگنال های راهنمای مودم دیده می شود. مودم در این جا صرفاً مرجع زمانی

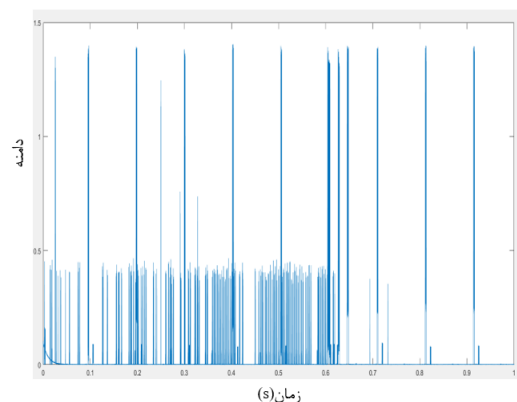
است و ارتباطی با تلفن همراه ندارد و در نتیجه تعاملی بین فرستنده و سامانه موقعیت یاب وجود ندارد؛ بنابراین سامانه مکان یابی همچنان به عنوان یک سامانه غیر فعال شناخته می شود.



شکل ۹. توان سیگنال دریافت شده از مودم در دستگاه USRP N210 بر حسب زمان (s)



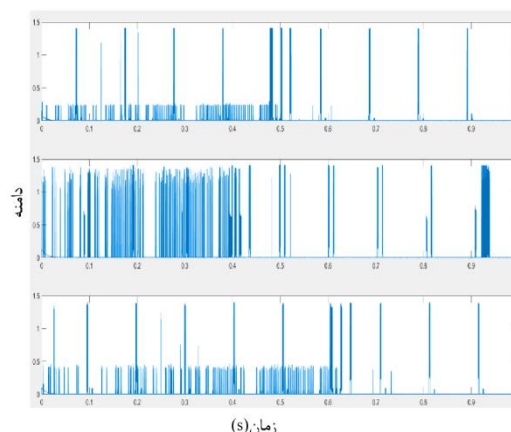
شکل ۱۰. نمودار زمان-فرکانس سیگنال دریافتی در USRP از مودم مرجع و تلفن همراه



شکل ۱۱. توان سیگنال دریافت شده از مودم و تلفن همراه

۲,۳ پردازش سیگنال‌ها

پس از نمونه‌برداری از سیگنال موبایل و مودم، سیگنال‌ها به کمک نرم‌افزار متلب پردازش شده‌اند. نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافت شده توسط سه دستگاه USRP N210 در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این سیگنال‌ها شامل سیگنال ارسالی از کاربر Wi-Fi (تلفن همراه) و دستگاه مودم می‌باشند.



شکل ۱۲. نمونه ای از سیگنال‌های دریافت شده توسط سه USRP N210 برحسب زمان (s)

همانطور که در شکل (۱۲) مشخص است، پالس‌هایی که تقریباً با دامنه‌ی یکسان و بلندتر دریافت شده‌اند، سیگنال راهنمای دریافت شده از دستگاه مودم می‌باشند که با فاصله‌ی حدوداً ۱۰۲ میلی‌ثانیه از یکدیگر و به صورت منظم دریافت شده‌اند. همچنین در شکل (۱۲) مشهود است که سیگنال‌های سه دستگاه همزمانی ندارند و این به دلیل یکسان نبودن زمانبندی‌ها در سه دستگاه است. لازم به ذکر است که در این جا جمع داده‌ها به صورت برون خط و دستی انجام شده است. مراحل تنظیم و پردازش نمونه‌های سیگنال جمع شده از سه دستگاه بدین ترتیب است:

۱) محدودسازی سیگنال: بخشی از

سیگنال‌های نمونه‌برداری شده توسط دو دستگاه USRP N210 که حاوی فاصله‌ی زمانی بین دو

سیگنال راهنمای دریافت شده از مودم (شامل سیگنال ارسال شده از تلفن همراه) است، جدا و ذخیره شده است.

۲) افزایش تعداد نمونه‌ها: سرعت نمونه‌برداری دستگاه‌ها 20 Mbps است و طبق رابطه (۱)، در چنین حالتی حد دقت موقعیتی برابر با 15 m خواهد بود.

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}, t = \frac{1}{2 \times 10^7} \text{ s} \quad (1)$$

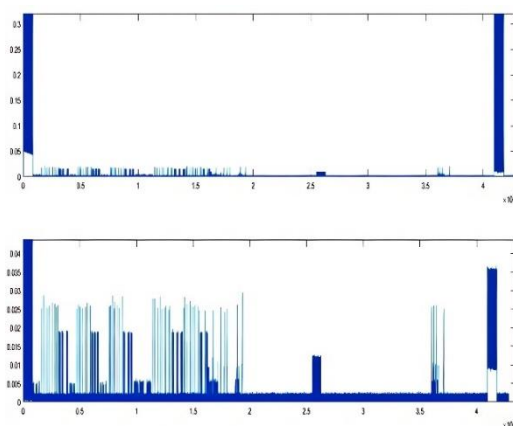
$$x = c \cdot t = 15 \text{ m}$$

به منظور افزایش دقت نمونه‌برداری، تعداد نمونه‌ها ۲۰ برابر افزایش داده شده، بر این اساس حد دقت موقعیتی نیز برابر ۰/۷۵ m خواهد شد.

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}, t = \frac{1}{2 \times 10^7} \times \frac{1}{20} \text{ s} \quad (2)$$

$$x = c \cdot t = 0.75 \text{ m}$$

بدون تردید با افزایش تعداد نمونه‌ها پیچیدگی مراحل بعدی افزایش می‌یابد. برای مقابله با این چالش، همان‌طور که در مرحله اول ذکر شد، قبل از افزایش تعداد نمونه‌ها، سیگنال محدود شده تا تنها ناحیه خاص و محدودی از سیگنال مورد بررسی قرار گیرد. نمونه‌ای از سیگنال‌های افزایش نرخ یافته مربوط به دو دستگاه USRP N210 در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۳. سیگنال‌های همگام‌شده

۳) همزمانی: سپس دو سیگنال دریافتی با هم همگام شده‌اند. این کار با توجه به سه زیرمرحله

انجام می شود:

(الف) ابتدا به کمک سیگنال راهنمای دریافت شده از مودم در ابتدای سیگنال و با به کارگیری تابع همبستگی، ابتدای دو سیگنال همگام شده است.

(ب) با انتخاب یکی از قاب های کاربر Wi-Fi که ترجیحاً می تواند اولین قاب سیگنال باشد، به کمک تابع همبستگی اختلاف زمانی دو قاب در دو سیگنال محاسبه شده که با τ_{frame} نامگذاری شده است.

(پ) در عمل، نوسانگرهای دو دستگاه USRP N210 دقیقاً با هم یکسان نیستند و این منجر به خطای همزمانی در کل سیگنال می شود. اختلاف فرکانس بین دو دستگاه در بازه زمانی نمونه برداری سیگنال هدف در ایجاد اختلاف ساعت در دو دستگاه مؤثر است. بر این اساس، خطای زمانی به طور خطی در بازه سیگنال تغییر می کند. با اعمال تابع همبستگی برای سیگنال راهنمای انتهای سیگنال، مقدار نهایی اختلاف زمانی به دست آمده و آن را $\tau_{e,final}$ نامیده ایم. بنابر فرض خطی بودن خطای جمع شونده، میزان خطای زمانی ناشی از اختلاف فرکانس، به صورت زیر است:

$$\tau_{e,frame} = \alpha \cdot \tau_{e,final} \quad (3)$$

که در آن α برابر با نسبت زمانی فاصله قاب با انتهای سیگنال به زمان کل سیگنال است. این مقدار به عنوان یک مؤلفه اصلاحی از τ_{frame} کاسته می شود:

$$\tau_{r,frame} = \tau_{frame} + \tau_{e,frame} \quad (4)$$

(۴) محاسبه اختلاف فاصله: با قرار دادن اختلاف زمانی در رابطه ی زیر، اختلاف فاصله ی کاربر Wi-Fi تا دستگاه های گیرنده بدست می آید.

$$\Delta x = c \cdot \tau_{r,frame} \quad (5)$$

۴. تخمین موقعیت هدف

مختصات هدف به صورت زیر تعریف می شود:

$$T = (x, y)^T \quad (6)$$

که در آن $[.]^T$ نشان دهنده ترانپوز ماتریس است. فرض می کنیم برای تعیین موقعیت هدف، N گیرنده وجود دارد که مختصات آن ها به فرم رابطه (۷) شناخته شده است.

$$R_i = (x_i, y_i)^T, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

گیرنده اول (R_1) را به عنوان گیرنده مرجع در نظر می گیریم. تفاوت فاصله ی بین هدف و گیرنده R_i را با نماد r_i نمایش می دهیم. در این صورت تفاوت فاصله بین هدف و دو گیرنده R_1 و R_i مطابق با رابطه (۸) با $r_{i,1}$ نمایش داده شده است:

$$r_{i,1} = r_i - r_1, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

فرض کنید زمان رسیدن سیگنال به گیرنده ی R_i ، t_i باشد. در این صورت از رابطه (۸) به دست می آید:

$$r_{i,1} = c|t_1 - t_i|, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (9)$$

به بیانی دیگر و با توجه به مختصات هدف و گیرنده ها، فاصله ی بین هدف تا هر گیرنده مطابق با رابطه (۱۰) محاسبه شده است:

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (10)$$

که در آن $i \in \{2, 3, \dots, N\}$. با توجه به روابط (۹) و (۱۰) به تساوی (۱۱) خواهیم رسید:

$$c|t_1 - t_i| = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (11)$$

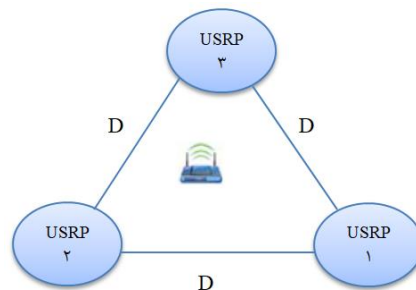
نویز هر گیرنده با نماد n_i نمایش داده شده است که ناشی از خطای تخمینی تأخیر رسیدن سیگنال به هر گیرنده است. این نویز با توزیع گوسی و میانگین صفر در نظر گرفته می شود؛ یعنی $n_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i)$. مقدار واقعی $r_{i,1}$ با در نظر گرفتن نویز به صورت رابطه (۱۲) خواهد بود:

$$r_{i,1} = r_{i,1}^0 + n_{i,1}, \quad i \in \{2, 3, \dots, N\} \quad (12)$$

با توجه به رابطه (۹) و با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۱۲) به ازای $i \in \{2, 3, \dots, N\}$ به ازای $N - 1$ معادله مختلف حاصل می‌شود. حل هندسی این معادلات منجر به ترسیم $(N(N - 1)) / 2$ هذلولی می‌شود. حل نهایی این معادلات، ما را از اطلاعات TDOA به تخمینی از موقعیت هدف، یعنی $T = (x, y)^T$ می‌رساند.

سه دستگاه گیرنده را مطابق شکل (۱۴) در نظر بگیرید. اکنون می‌خواهیم روابط هذلولی بین هر دو دستگاه گیرنده را بدست آوریم. گیرنده‌ها در فاصله $D = 7m$ از یکدیگر واقع شده‌اند. رابطه‌ی بین USRP1 و USRP2 یک حالت متقارن است و با در نظر گرفتن مختصات USRP210 در صفحه‌ی مختصات، فرض می‌کنیم USRP1 و USRP2 به ترتیب در مختصات $(-\delta, 0)$ و $(\delta, 0)$ قرار دارند. رابطه هذلولی بدست آمده از این دو دستگاه با اختلاف فاصله $m = c\Delta\tau_{1,2} = \Delta x_{1,2}$ به صورت زیر بیان شده است:

$$\frac{x^2}{m^2/4} - \frac{y^2}{\delta^2 - m^2/4} = 1 \quad (13)$$



شکل ۱۴. نحوه چیدمان USRPها و مودم

۱.۴ تقاطع هذلولی‌ها و میانگین‌گیری

برای بدست آوردن منحنی هذلولی مربوط به USRP2 و USRP3، ابتدا نقطه‌ی وسط این دو دستگاه به مختصات $(-c, d)$ را به مبدأ مختصات انتقال داده تا مختصات دستگاه‌ها در

یک حالت متقارن نسبت به مبدأ مختصات قرار گیرد. این نقاط جدید قرار گرفتن USRPها را با مختصات (a, b) و $(-a, -b)$ بیان می‌شوند، پس از بدست آوردن هذلولی بین این دو نقطه، سپس نقطه‌ای را که به مبدأ انتقال داده شده بود به همان نقطه‌ی اولیه باز می‌گردانیم. به این ترتیب، نتیجه می‌شود:

$$m = \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2} - \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} \quad (14)$$

که در آن $m = \Delta x_{2,3}$ است. پس از ساده‌سازی و انتقال هذلولی از مبدأ به نقطه‌ی اولیه، رابطه‌ی هذلولی بدست آمده بین این دو دستگاه، به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} & (1 - 4a^2/m^2)(x+c)^2 \\ & + (1 - 4b^2/m^2)(y-d)^2 \\ & - (8ab(x+c)(y-d)/m^2) \\ & + a^2 + b^2 - m^2/4 = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

مشابه مرحله‌ی قبل، رابطه‌ی هذلولی بین USRP1 و USRP3، با قرار دادن (c, d) برای مختصات نقطه وسط بین USRPها و انتقال این نقطه به مبدأ مختصات و در نظر گرفتن مختصات $(a, -b)$ و $(-a, b)$ برای گیرنده‌ها، رابطه‌ی هذلولی بین این دو دستگاه به صورت زیر بدست می‌آید:

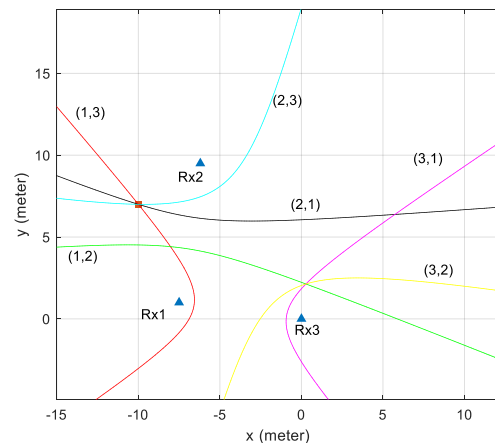
$$m = \sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2} - \sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2} \quad (16)$$

که در آن $m = \Delta x_{1,3}$ است. پس از ساده‌سازی و انتقال هذلولی از مبدأ به نقطه‌ی اولیه، رابطه‌ی هذلولی بدست آمده بین این دو دستگاه، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} & (1 - 4a^2/m^2)(x-c)^2 \\ & + (1 - 4b^2/m^2)(y-d)^2 \\ & + (8ab(x-c)(y-d)/m^2) \\ & + a^2 + b^2 - m^2/4 = 0 \end{aligned} \quad (17)$$



با در نظر گرفتن مقدار D برای فاصله‌ی بین USRPها باید شرط $m < D$ همواره برقرار باشد. در صورتی که در محاسبات مقدار m که اختلاف فاصله است از D بیشتر شود این مقدار را برابر D در نظر می‌گیریم. پس از انجام این مراحل، نقاط تقاطع هذلولی‌ها را بدست می‌آوریم. در شکل (۱۵) نمونه‌ای از مجموع این هذلولی‌ها و نقاط تقاطع آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۵. نمونه‌ای از رسم هذلولی‌ها و نقاط تقاطع [۲۰]

برای تخمین موقعیت، از بین هر دو شاخه‌ی هذلولی، یک شاخه که معتبرتر و به موقعیت واقعی نزدیک‌تر است را انتخاب می‌کنیم. این کار با توجه به علامت $\Delta\tau$ و انتخاب USRP مرجع انجام می‌شود، به این صورت که بین هر دو شاخه هذلولی رسم شده، شاخه‌ای که به USRP مرجع نزدیک‌تر است، به عنوان شاخه معتبر انتخاب می‌شود. در نهایت، موقعیت هدف را می‌توان با دو روش به صورت زیر بدست آورد:

(۱) میانگین گرفتن روی نقاط تقاطع شاخه‌های منتخب هذلولی: بهره‌گیری از روش میانگین‌گیری در تخمینگر TDOA، منجر به تخمین‌های مناسبی با پیچیدگی محاسباتی کمتر نسبت به اکثر روش‌های موجود می‌گردد. در مقاله [۲۳] با استفاده از میانگین‌گیری از چندین اندازه‌گیری مختلف در تخمینگر TDOA، نویز و خطاهای تصادفی کاهش داده شده تا دقت تخمین افزایش

یابد. در چنین حالتی زمان قابل توجهی برای پردازش سیستم مورد نیاز است. در صورتی که در این مقاله عمل میانگین‌گیری بر روی نقاط تقاطع بدست آمده از شاخه‌های هذلولی‌ها، که تنها بدست آمده از یکبار نمونه‌برداری و اندازه‌گیری می‌باشند، اجرا شده است.

(۲) استفاده از الگوریتم LS با به کارگیری نقاط تقاطع شاخه‌های منتخب به عنوان نقاط اولیه: در ادامه این روش شرح داده شده است.

جهت سادگی روابط، مطابق با رابطه (۶) موقعیت هدف با θ نمایش داده شده است:

$$\theta = (x, y)^T \quad (۱۸)$$

در این حالت، r ، بردار فواصل مشاهده شده با استفاده از اندازه‌گیری TOA به صورت زیر بیان شده است:

$$r = f(\theta) + n \quad (۱۹)$$

که در آن $f(\theta)$ یک تابع دوبعدی از n بعد است که بردار موقعیت دو بعدی θ را به یک بردار N بعدی از فواصل هر یک از N لنگر، ترسیم کرده است:

$$f(\theta) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \\ \dots \\ \sqrt{(x_N - x)^2 + (y_N - y)^2} \end{bmatrix} \quad (۲۰)$$

رابطه اصلی تخمین LS را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\phi(\theta) = [r - f(\theta)]^T [r - f(\theta)] \quad (۲۱)$$

که در آن $\phi(\theta)$ تابع هزینه نامیده می‌شود. با پیدا کردن مقدار کمینه تابع هزینه، موقعیت نهایی تخمین زده شده بدست می‌آید.

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \phi(\theta) \quad (۲۲)$$

رابطه (۲۲) غیرخطی است و حل آن دشوار است. روش‌های زیادی برای یافتن کمینه

سراسری تابع هزینه وجود دارد که می‌تواند بسیار پیچیده و مستعد به دام افتادن در کمینه‌های محلی باشد. بنابراین، یافتن تقریب‌های خطی از این تخمین لازم است. در ادامه به یک روش از این دست، پرداخته شده است [۹].

۲,۴ تقریب سری تیلور

یک روش برای ساده کردن تخمین‌گر حداقل مربعات غیرخطی (NLS)^{۱۱} استفاده از تقریب سری تیلور برای تابع $f(\theta)$ است. به طور خاص، با استفاده از دو عبارت اول بسط سری تیلور با جواب اولیه $\theta_0 = [x_0 \ y_0]^T$ ، یک تابع خطی ایجاد می‌شود. برای مولفه i ام $f(\theta)$ می‌توان نوشت:

$$f_i(x, y) \approx f_i(x_0, y_0) + \left. \frac{\partial f_i(\theta)}{\partial x} \right|_{\theta=\theta_0} \Delta x + \left. \frac{\partial f_i(\theta)}{\partial y} \right|_{\theta=\theta_0} \Delta y \quad (23)$$

که در آن $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$ ، $x = x_0 + \Delta x$ ، $y = y_0 + \Delta y$ با کنار هم قرار دادن معادلات، رابطه (۲۴) حاصل شده است:

$$f(\theta) \approx f(\theta_0) + H(\theta - \theta_0) \quad (24)$$

که در آن H یک ماتریس $N \times 2$ است که به صورت رابطه (۲۵) تعریف شده است:

$$H = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1(\theta)}{\partial x} \right|_{\theta=\theta_0} & \left. \frac{\partial f_1(\theta)}{\partial y} \right|_{\theta=\theta_0} \\ \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_N(\theta)}{\partial x} \right|_{\theta=\theta_0} & \left. \frac{\partial f_N(\theta)}{\partial y} \right|_{\theta=\theta_0} \end{bmatrix} \quad (25)$$

برای توابع مورد نظر، داریم:

$$\frac{\partial f_i(\theta)}{\partial x} = \frac{x_i - x}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}} \quad (26)$$

$$\frac{\partial f_i(\theta)}{\partial y} = \frac{y_i - y}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}} \quad (27)$$

اکنون، با بازگشت به تابع هزینه $\phi(\theta)$ ، می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \phi(\theta) &\approx [r - \{f(\theta_0) + H(\theta - \theta_0)\}]^T \\ &[r - \{f(\theta_0) + H(\theta - \theta_0)\}] \\ &= [r - f(\theta_0) + H\theta_0 - H\theta]^T \\ &[r - f(\theta_0) + H\theta_0 - H\theta] \end{aligned} \quad (28)$$

حال، با ترکیب عباراتی که مستقل از θ هستند، می‌توان $\tilde{r} = r - f(\theta_0) + H\theta_0$ را تعریف کرد، در این صورت تابع هزینه جدید به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\phi_L(\theta) = [\tilde{r} - H\theta]^T [\tilde{r} - H\theta] \quad (29)$$

و رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \phi_L(\theta) \quad (30)$$

با این ترفند، مسئله به یک رابطه حداقل مربعات خطی (LLS) تبدیل شد. راه حل این مسئله به خوبی شناخته شده است و می‌توان پاسخ آن را به این صورت نوشت:

$$\hat{\theta} = (H^T H)^{-1} H^T \tilde{r} \quad (31)$$

با جایگذاری $\tilde{r}$ در (۳۱) رابطه (۳۲) حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= (H^T H)^{-1} H^T (r - f(\theta_0) + H\theta_0) \\ &= \theta_0 + (H^T H)^{-1} H^T (r - f(\theta_0)) \end{aligned} \quad (32)$$

بنابراین، با توجه به تخمین اولیه موقعیت θ_0 ، می‌توان تخمین جدیدی در نظر گرفت که به کمینه سراسری واقعی نزدیک‌تر است. اگر از این تخمین جدید به عنوان تخمین اولیه در (۳۲) استفاده شود، یک تخمین بروز بدست می‌آید. این موضوع بیانگر یک روش تکراری است.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}[n+1] &= \hat{\theta}[n] \\ &+ (H^T H)^{-1} H^T (r - f(\hat{\theta}[n])) \end{aligned} \quad (33)$$

باید توجه داشت ماتریس H نیز باید در هر مرحله بروز شود. مزیت این رویکرد کاهش قابل توجه در پیچیدگی محاسباتی است و جنبه منفی آن در مقایسه با سایر روش‌ها این است که به یک مقدار اولیه نیاز دارد که نزدیک به موقعیت واقعی باشد [۹].



۳,۴ خطی سازی TDOA

مانند TOA، تابع هزینه TDOA نیز می تواند خطی شود. به طور خاص، اگر $f(\theta)$ با $g(\theta)$ و r با Δr جایگزین شود، داریم:

$$g(\theta) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_1-x)^2 + (y_1-y)^2} - \sqrt{(x_2-x)^2 + (y_2-y)^2} \\ \sqrt{(x_1-x)^2 + (y_1-y)^2} - \sqrt{(x_3-x)^2 + (y_3-y)^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(x_{N-1}-x)^2 + (y_{N-1}-y)^2} - \sqrt{(x_N-x)^2 + (y_N-y)^2} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\Delta r = \begin{bmatrix} r_1 - r_2 \\ r_1 - r_3 \\ \vdots \\ r_{N-1} - r_N \end{bmatrix} \quad (35)$$

سپس رابطه زیر به دست می آید:

$$\hat{\theta}[n+1] = \hat{\theta}[n] + (D^T D)^{-1} D^T (\Delta r - g(\hat{\theta}[n])) \quad (36)$$

ماتریس D به صورت زیر در نظر گرفته

می شود:

$$D = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial g_1(\theta)}{\partial x} \right|_{\theta=\theta_0} & \left. \frac{\partial g_1(\theta)}{\partial y} \right|_{\theta=\theta_0} \\ \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial g_M(\theta)}{\partial x} \right|_{\theta=\theta_0} & \left. \frac{\partial g_M(\theta)}{\partial y} \right|_{\theta=\theta_0} \end{bmatrix} \quad (37)$$

که در آن $M = \binom{N}{2}$ بوده و رابطه زیر به دست

می آید:

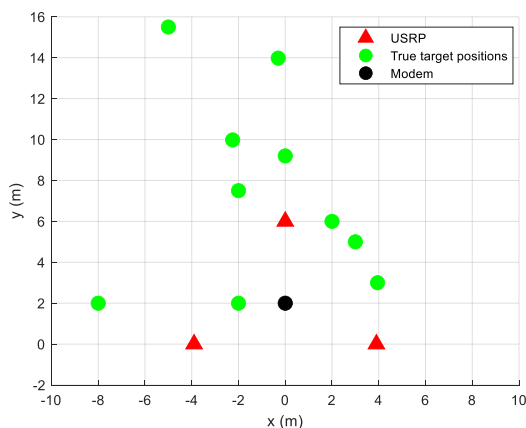
$$\frac{\partial g_1(\theta)}{\partial x} = \frac{x_1 - x}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}} - \frac{x_2 - x}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2}} \quad (38)$$

$$\frac{\partial g_1(\theta)}{\partial y} = \frac{y_1 - y}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}} - \frac{y_2 - y}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2}} \quad (39)$$

توجه داشته باشید که D باید در هر تکرار بروز شود [۹].

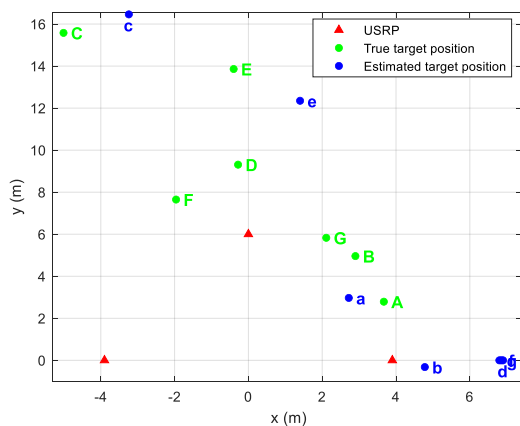
۵. نتایج شبیه سازی

در این مقاله، موقعیت یابی هدف برای ۱۰ مختصات مختلف انجام شده است. در شکل (۱۶) محل استقرار USRP ها، دستگاه مودم و مختصات مختلف هدف نشان داده شده است. همچنین در شکل های (۱۷) و (۱۸) نقاط تخمینی اهداف به همراه مختصات واقعی آن ها نشان داده شده است. حروف بزرگ نشان دهنده موقعیت واقعی کاربر و حروف کوچک نشان دهنده موقعیت تخمین زده شده است. در جداول (۲) و (۳) به ترتیب نتایج برای روش اول، یعنی میانگین گرفتن روی نقاط تقاطع هذلولی ها و روش دوم، یعنی استفاده از تخمین LS نشان داده شده است. علامت - در جداول (۲) و (۳) بیانگر این است که موقعیت یابی با استفاده از روش مربوطه برای آن مختصات خاص نتیجه مطلوبی نداشته یا اینکه الگوریتم LS همگرا نبوده است. در جدول (۴) مقایسه ای بین مرجع [۲۱] و نتایج این مقاله انجام شده است.

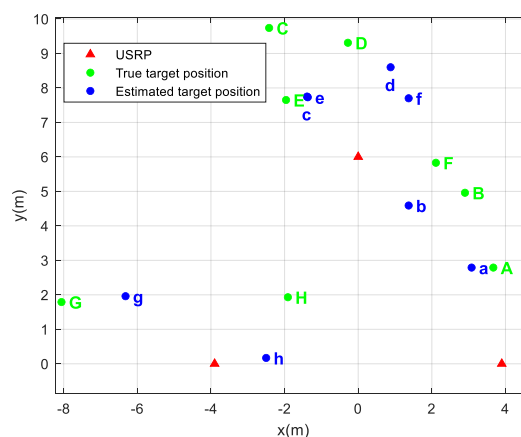


شکل ۱۶. مختصات USRP ها، مودم و نقاط استقرار هدف





شکل ۱۸. نتایج تخمین موقعیت هدف با روش دوم



شکل ۱۷. نتایج تخمین موقعیت هدف با روش اول

جدول ۲. موقعیت‌یابی هدف برای ۱۰ نقطه به روش اول

شماره	مختصات واقعی هدف		مختصات تخمینی		خطا در روش اول (متر) $d(\theta, \hat{\theta})$
	x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
۱	۳/۶۷	۲/۷۹	۳/۰۸	۲/۷۹	۰/۹۳
۲	۲/۹	۴/۹۶	۱/۳۷	۴/۵۹	۱/۵۷
۳	-۲/۴۲	۹/۷۴	-۱/۳۹	۷/۷۵	۲/۲
۴	-۵/۰۱	۱۵/۵۸	-	-	-
۵	-۰/۲۸	۹/۳۱	۰/۸۸	۸/۶	۱/۳۶
۶	-۰/۴	۱۳/۸۶	-	-	-
۷	-۱/۹۶	۷/۶۵	-۱/۳۷	۷/۷۳	۰/۵۹
۸	۲/۱۱	۵/۸۳	۱/۳۷	۷/۷	۲/۰۱
۹	-۸/۰۶	۱/۷۹	-۶/۳۲	۱/۹۶	۱/۷
۱۰	-۱/۹۱	۱/۹۳	-۲/۵	۰/۱۷	۱/۸
۱۱	میانگین خطا در روش اول				۱/۵۲

جدول ۳. موقعیت‌یابی هدف برای ۱۰ نقطه به روش دوم

شماره	مختصات واقعی هدف		مختصات تخمینی		خطا در روش دوم (متر) $d(\theta, \hat{\theta})$
	x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
۱	۳/۶۷	۲/۷۹	۲/۷۲	۲/۹۷	۰/۹۵
۲	۲/۹	۴/۹۶	۴/۷۸	-۰/۳۲	۳/۲
۳	-۲/۴۲	۹/۷۴	۶/۹	۰	۳/۷
۴	-۵/۰۱	۱۵/۵۸	-۳/۲۴	۱۶/۴۶	۱/۹۷
۵	-۰/۲۸	۹/۳۱	-	-	-
۶	-۰/۴	۱۳/۸۶	۱/۴	۱۲/۳۵	۲/۳
۷	-۱/۹۶	۷/۶۵	۶/۸۵	۰	۲/۱۱
۸	۲/۱۱	۵/۸۳	۶/۸	۰	۲/۳

۹	۱/۷۹	-۸/۰۶	-	-
۱۰	۱/۹۳	-۱/۹۱	-	-
۱۱	میانگین خطا در روش دوم			
			۲/۳۶	

جدول ۴. مقایسه نتایج دو پژوهش

عنصر مقایسه	مرجع [۲۱]	این مقاله
تعداد گیرنده	۶	۳
تعداد مودم	۱	۱
نرخ نمونه برداری	۸۰ MSps	۲۰ MSps
میانگین خطا	۲۳ cm	۲ m

لازم به ذکر است که بنابر محدودیت‌های عملیاتی موجود در این پژوهش، تنها استفاده از سه دستگاه گیرنده ممکن بوده است. برای موقعیت‌یابی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های TDOA در فضای دو بعدی به حداقل سه گیرنده و در فضای سه بعدی به حداقل چهار گیرنده نیاز است. یکی از تلاش‌های اصلی این پژوهش در راستای عملیاتی نمودن روش پیشنهادی و اجرای واقعی سامانه موقعیت‌یابی بوده است. بدیهی است که با در نظر گرفتن امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری حداقلی، در مقایسه با پژوهش [۲۱] نتایج از دقت کمتری برخوردار باشند. در مقاله یاد شده موقعیت‌یابی توسط ۶ گیرنده و نرخ نمونه‌برداری ۸۰ MSps انجام شده است، در حالیکه موقعیت‌یابی در این مقاله با در نظر گرفتن محدودیت بیشتر و قابل توجهی برای سامانه یعنی تنها با استفاده از ۳ گیرنده و نرخ نمونه‌برداری ۲۰ MSps انجام شد. این تفاوت به شدت در کاهش هزینه‌های سامانه پیشنهادی نقش دارد؛ با همه این شرایط میانگین خطای ۲ متر حاصل شد که برای کاربرد مورد نظر نتیجه مطلوبی به شمار می‌رود. واضح است که با در نظر گرفتن تعداد گیرنده‌های بیشتر و بالاتر بردن نرخ نمونه‌برداری دقت موقعیت‌یابی به طور قابل

توجهی افزایش می‌یابد.

با توجه به اینکه موقعیت‌یابی به صورت غیرفعال انجام می‌گردد و اطلاعات خاص پیشینی در مورد موقعیت واقعی هدف وجود ندارد، ممکن است موقعیت هدف خارج از محدوده احاطه شده توسط گیرنده‌ها باشد؛ بنابراین لازم است تا صحت روش مکان‌یابی در این شرایط نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. چرا که برخی از رویکردها به شدت به چیدمان حساسیت دارند و با وجود عملکرد مناسب در حالتی که هدف میان گیرنده قرار گرفته باشد در سایر شرایط نه تنها از دقت کافی برخوردار نیستند بلکه صحت مکان‌یابی نیز مورد تردید است. از این رو در این تلاش پژوهشی، بر خلاف مقاله [۲۱]، در تعدادی از نمونه‌برداری‌های انجام‌شده، چیدمان هدف و گیرنده‌ها طوری در نظر گرفته شده است که موقعیت هدف خارج از محدوده احاطه‌شده توسط گیرنده‌ها باشد (مشابه چیدمان شکل ۲).

نکته قابل توجه دیگر مربوط به نسبت خطا به فاصله بین کاربر و گیرنده‌ها است. همانطور که در بخش ۳ اشاره شد، در روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری‌های TDOA یکی از مهمترین عوامل بوجود آورنده خطا، عدم همزمانی ساعت گیرنده‌ها است. با دورتر شدن هدف نسبت به گیرنده‌ها، در

میزان ناهماهنگی ساعت گیرنده‌ها تغییری حاصل نمی‌شود. از طرفی با دورتر شدن هدف نسبت به گیرنده‌ها تمایز اطلاعات به نحو بهتری صورت می‌پذیرد، البته به شرط آنکه هدف از منطقه تحت پوشش سامانه خارج نشود. بنابراین در روش‌هایی همچون TDOA دورتر شدن هدف از گیرنده‌ها الزاماً با افزایش خطا نسبت مستقیمی ندارد. سیستم پیشنهادی برای مکان‌یابی Wi-Fi، علی‌رغم وجود برخی محدودیت‌ها، مزایای عملیاتی قابل ملاحظه‌ای دارد که قابلیت آن را برای استقرار در کاربردهای میدانی و کم‌هزینه تقویت می‌کند. در مقابل، شناسایی و تحلیل چالش‌های ساختاری نیز برای انجام ارزیابی دقیق علمی و تعیین مسیرهای پژوهشی آتی ضروری است. یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های این رویکرد، عملیاتی شدن با حداقل الزامات سخت‌افزاری است. در قیاس با روش‌های پیچیده‌تر که نیازمند زیرساخت‌های پرهزینه و متعدد هستند، طراحی سیستم پیشنهادی صرفاً بر استفاده از سه گیرنده و نرخ نمونه‌برداری 20 MSps مبتنی است. این تمهیدات، ضمن کاهش چشمگیر در هزینه‌های پیاده‌سازی، امکان توسعه یک سامانه کارآمد و پایدار را در محیط‌های واقعی فراهم می‌آورد. از دیگر نقاط قوت این سامانه، انعطاف‌پذیری عملکرد در چینش‌های غیرایده‌آل است. بر خلاف برخی الگوریتم‌های مکان‌یابی که به یک آرایش هندسی خاص گیرنده‌ها وابسته هستند، رویکرد حاضر سازگاری بالایی در شرایط گوناگون نشان می‌دهد و توانایی ارائه موقعیت‌یابی مناسب را حتی در حالتی که هدف در خارج از محدوده محصور شده توسط گیرنده‌ها قرار گرفته است، دارد. این مشخصه، یک ارتقاء عملکردی حیاتی نسبت به سیستم‌های سنتی است که کارایی آن‌ها به موقعیت‌های خاص محدود می‌شود.

با این وجود، سامانه با برخی چالش‌ها نیز

روبرو است. نخستین و مهم‌ترین عامل محدودکننده، کاهش صحت در نتیجه محدودیت‌های سخت‌افزاری است. این امر مستقیماً ناشی از به کارگیری تنها سه گیرنده و نرخ نمونه‌برداری پایین‌تر نسبت به پژوهش‌های مرجع است. این کاهش دقت مکان‌یابی، یک پیامد با توجه به محدودیت موجود، اجتناب‌ناپذیر بوده است. دومین چالش مهم، نیاز به همزمان‌سازی خارجی ساعت‌های گیرنده‌ها است. عدم همگام‌سازی دقیق ساعت‌ها، یک منبع خطای بحرانی در روش‌های مبتنی بر TDOA محسوب می‌شود و بر صحت کلی سیستم تأثیر منفی می‌گذارد. برای جبران این نقیصه در پژوهش حاضر، از یک رویکرد مبتنی بر همگام‌سازی بیرونی استفاده شده است؛ به این ترتیب که سه دستگاه گیرنده USRP N210 با سیگنال‌های راهنمای ارسالی از مودم، همگام‌سازی شده‌اند. لازم به ذکر است که برای ارتقاء پایداری و صحت سیستم در مطالعات آتی، می‌توان به صورت از طریق اصلاحات سخت‌افزاری یا نرم‌افزاری در گیرنده‌ها این مسئله را حل کرد.

۶. جمع‌بندی

در این پژوهش، مسئله موقعیت‌یابی بدون سیم یک هدف ثابت با استفاده از اندازه‌گیری‌های TDOA مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با وجود محدودیت‌های سخت‌افزاری و استفاده از تنها سه گیرنده، موقعیت هدف با میانگین خطای دو متر تخمین زده شد. روش پیشنهاد شده نسبت به چیدمان گیرنده‌ها حساسیت کمی نشان داده و با کاهش قابل توجه هزینه‌ها، قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد. اصلاح خطای نمونه‌برداری و به طور خاص درونیابی نیز



- Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms, Proceedings of the 2014 International Conference on Cyberworlds, IEEE, pp. 245–252, 2014.
- [9] R. Zekavat and R.M. Buehrer, Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances, Vol. 27, John Wiley & Sons, 2011.
- [10] G. Focarelli et al., Physical Layer Threats to 5G Positioning: Impact on TOA-Based Methods, Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), IEEE, 2024.
- [11] S. Li et al., A Fast and Accurate LEO Satellite-Based Direct Position Determination Assisted by TDOA Measurements, China Communications, Vol. 19, No. 1, pp. 92–103, 2022.
- [12] Y. Liu et al., DOA Estimation for Mixed Circular and Noncircular Coherently Distributed Sources under Impulsive Noise, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024.
- [13] M. Meles et al., Drone Localization Based on 3D-AoA Signal Measurements, Proceedings of the 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring), IEEE, 2022.
- [14] A.S. Yaro, F. Maly, and P. Prazak, A Survey of the Performance-Limiting Factors of a Two-Dimensional RSS Fingerprinting-Based Indoor Wireless Localization System, Sensors, Vol. 23, No. 5, Article 2545, 2023.
- [15] W.C. Rodrigues and J.A. Apolinário, An On-the-Fly FDOA-Based Target Localization System, Proceedings of the 2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), IEEE, 2020.
- [16] A.M. Abba et al., A Review of Localization Techniques in Wireless Sensor Networks, Proceedings of the 2023 2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS), IEEE, 2023.
- [17] L.C. Tran et al., Complexity Reduction for Hybrid TOA/AOA Localization in UAV-Assisted WSNs, IEEE Sensors Letters, 2023.
- [18] P. Zuo et al., Hybrid RSS-TDOA Measurements Based Directional Target Localization in NLOS Environments, Proceedings of the 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring), IEEE, 2022.
- [19] Y. Zhang et al., TDOA and FDOA Hybrid Positioning of Mobile Radiation Source with Receiver Position Errors, Wireless

نقش مؤثری در بهبود دقت تخمین داشته است. از بین دو روش تخمین موقعیت، روش میانگین‌گیری روی نقاط تقاطع هذلولی‌ها با توجه به تعداد محدود گیرنده‌ها، کارایی بهتری داشت. با این حال، با افزایش تعداد گیرنده‌ها، انتظار می‌رود الگوریتم LS به دلیل پیچیدگی محاسباتی کمتر و همگرایی بهتر، عملکرد بهتری داشته باشد. با توجه به نتایج این پژوهش، بررسی امکان موقعیت‌یابی سه‌بعدی کاربر با استفاده از این روش و ارزیابی دقت و کارایی آن در سناریوهای مختلف، می‌تواند موضوعی جذاب برای تحقیقات آینده باشد.

۸. مآخذ

- [1] H.E. Daniels, The Theory of Position Finding, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 13, pp. 186–207, 1951.
- [2] S. Mohammadlou, H. Ghanbarpour Asl, and A.J. Rashedi, Design of a Navigation System for an Unmanned Aerial Vehicle Equipped with an Angle Sensor, Aerospace Science and Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 60–68, 2013 (in Persian).
- [3] M. Shoaran and M. Fatāhi Sani, Vision-Based Auto Landing of a UAV, Aerospace Knowledge and Technology Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 77–90, 2019 (in Persian).
- [4] X.-Y. Wang et al., Robust DOA Estimation with Distorted Sensors, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024.
- [5] Z. Zhang and Z. Huang, An Algorithm Fusing State Estimation and TDOA Filtering for UAV Tracking Enhancement, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024.
- [6] L. Zuo et al., Multi-Frequency Coherent Integration Target Detection Algorithm for Passive Bistatic Radar, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024.
- [7] C. Yang and H.-R. Shao, WiFi-Based Indoor Positioning, IEEE Communications Magazine, Vol. 53, No. 3, pp. 150–157, 2015.
- [8] M.A. Al-Ammar, S. Alhadhrami, A. Al-Salman, A. Alarifi, H.S. Al-Khalifa, A. Alnafessah, and M. Alsaleh, Comparative

Personal Communications, Vol. 137, No. 1, 2024.

- [20] R. Bahrampour, Analysis and Simulation of Passive Localization System Based on TDOA in a Mixed LOS/NLOS Environment, Master's Thesis, Malek Ashtar University of Technology, 2024.
- [21] S. Li et al., TDOA-Based Passive Localization of Standard WiFi Devices, Proceedings of the 2018 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS), IEEE, 2018.
- [22] M. Nazari, Propose a Method of Positioning WiFi Users Based on the Signal Time Difference of Arrival (TDOA) Method, Master's Thesis, Malek Ashtar University of Technology, 2023.
- [23] R. Bahrampour, M.H. Madani, and H. Bahramgiri, An Iterative Approach to Enhance the Accuracy of TDOA-Based Localization by Averaging and Reducing Noise, Proceedings of the 2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE), IEEE, 2024.

۸. پی نوشت‌ها

-
- ¹ Time of Arrival
 - ² Time Difference of Arrival
 - ³ Direction of Arrival
 - ⁴ Angle of Arrival
 - ⁵ Received Signal Strength
 - ⁶ Frequency Difference of Arrival
 - ⁷ Hybrid Methods
 - ⁸ Wireless Local Area Networks
 - ⁹ Universal Software Radio Peripheral
 - ¹⁰ upsample
 - ¹¹ Nonlinear Least Squares

۲۴۱

سال ۱۴ - شماره ۲
پاییز و زمستان ۱۴۰۴
نشریه علمی
دانش و فناوری هوا فضا



اصلاح خطای زمان نمونه برداری
کاربران Wi-Fi با رویکرد TDOA به کمک
موقعیت یابی