

بهبود سرعت شناسایی سیگنال در سیستم های مسیریابی ماهواره ای جهانی سامانه های نوین فرماندهی و کنترل

تاریخ دریافت:

۹ مردادماه ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش:

۵ مهرماه ۱۴۰۲

ناصر مختارزاده^{۱*}، سجاد علیزاده^۲، احسان عالمزاده^۳

۱. پژوهشکده فناوری ارتباطات و اطلاعات

۲. پژوهشکده فناوری ارتباطات و اطلاعات

۳. دانشجوی دکتری، مهندسی برق مخابرات، پژوهشکده فناوری ارتباطات و اطلاعات

چکیده

سیستم های مسیریابی ماهواره ای جهانی به منظور مکان یابی و مسیریابی نیروهای نظامی، در فرایندهای فرماندهی و کنترل حائز اهمیت هستند. واحد شناسایی سیگنال یکی از بخش های کلیدی برای مکان یابی در این سیستم ها می باشد. در این قسمت به شناسایی و جداسازی سیگنال های دریافتی از ماهواره های مختلف پرداخته می شود و تخمینی از تاخیر کد و فرکانس داپلر در این سیگنال ها ارائه می گردد. در صورتی که سطح توان سیگنال دریافتی پایین باشد و سیگنال ضعیف باشد، شناسایی به روش معمول قابل انجام نیست. به همین خاطر روش های شناسایی سیگنال های ضعیف مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از چالش های اصلی این روش ها، پیچیدگی محاسباتی بالا و زمان بر بودن آن ها است. در این مقاله روشی نوین برای شناسایی سیگنال های ضعیف با پیچیدگی کمتر و سرعتی بالاتر نسبت به روش های معمول ارائه خواهیم کرد. روش پیشنهادی با تقسیم مرحله ای شناسایی سیگنال به بخش های کوچک تر، فضای جستجو را محدود می کند و ضمن حفظ دقت، سرعت تشخیص سیگنال را تا حد زیادی افزایش می دهد. نتایج شبیه سازی، بهبود قابل توجهی در پیچیدگی محاسباتی و زمان شبیه سازی روش پیشنهادی را نسبت به روش های معمول نشان می دهند.

واژه های کلیدی: شناسایی سیگنال، سیستم مسیریابی ماهواره ای جهانی، تاخیر کد، فرکانس داپلر، سیگنال ضعیف

Signal Acquisition in Satellite Navigation of Modern Command and Control Systems

Abstract

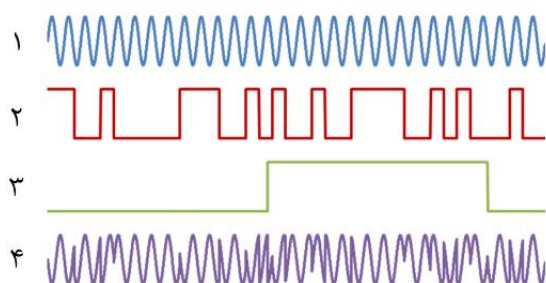
The Global Satellite Navigation Systems (GNSS) play a critical role in command and control processes as a tool for positioning and navigation of military forces. The acquisition block is a key element in GNSS systems. This block utilizes correlation to detect and distinguish received signals. Moreover, it provides a rough estimation for code delay and Doppler frequency of each signal. In this paper, we study acquisition methods for weak signals and low-coverage areas. Considering the computational complexity of existing algorithms, we present a novel algorithm for weak signal acquisition. The proposed scheme divides the acquisition integration time into short intervals. By detecting and stripping incompetent frequencies in each step, we achieve increased acquisition speed and reduced complexity. Finally, we provide a numerical comparison between the proposed algorithm and the non-coherent integration (NCI) method. The simulation results demonstrate that our algorithm outperforms the NCI method in terms of execution time and computational complexity.

Key words: Acquisition, Global navigation satellite system, Code delay, Doppler frequency, Non-Coherent integration

پیچیدگی محاسباتی زیادی دارند و هزینه بر هستند. در این پژوهش به «بررسی راهکارهای شناسایی سیگنال‌های GNSS ضعیف و ارائه‌ی روشی برای بهبود سرعت شناسایی سیگنال‌های ضعیف» خواهیم پرداخت. ساختار کلی مقاله به این صورت است: در بخش ۲ به معرفی پیشینه پژوهش و مدل‌سازی مساله می‌پردازیم. در بخش ۳ روش پیشنهادی شناسایی سیگنال را ارائه خواهیم نمود. در بخش ۴ به بررسی نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با روش‌های موجود پرداخته می‌شود. در بخش ۵ به نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادات می‌پردازیم.

۲- مبانی نظری

در سیستم‌های GNSS، ماهواره‌ها اطلاعات ارسالی خود را با یک سیگنال متناوب و یک دنباله‌ی کد شبه تصادفی (PRN) مدوله کرده و در فضا ارسال می‌کنند. در شکل ۱ نمونه‌ای از سیگنال ارسالی از یک ماهواره‌ی GNSS را مشاهده می‌کنیم. بسته به موقعیت مکانی و زمان دریافت سیگنال، گیرنده می‌تواند سیگنال ارسالی از چند ماهواره را دریافت کند. پس از دریافت سیگنال آنالوگ و تبدیل آن به یک سیگنال دیجیتال باند پایه اولین گام در آشکارسازی پیام دریافتی، تشخیص و جداسازی سیگنال متعلق به ماهواره‌های مختلف است که اصطلاحاً به آن شناسایی سیگنال گفته می‌شود. در هر زمان و مکان، تنها تعداد محدودی از ماهواره‌ها در دسترس هستند. به همین خاطر لازم است که در ابتدا سیگنال‌های مذکور شناسایی شوند، تا در ادامه ردیابی و آشکارسازی این سیگنال‌ها انجام شود.



شکل ۱- سیگنال نمونه‌ی ماهواره‌ی GNSS مشتمل بر ۱- موج

سینوسی، ۲- کد PRN و ۳- داده‌ی مکان‌یابی

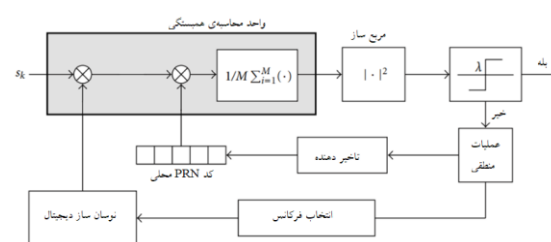
در زمان شناسایی سیگنال با دو مجهول اصلی روبرو هستیم. اولین مجهول تاخیر کد PRN است که بسته به فاصله‌ی گیرنده با فرستنده می‌تواند متفاوت باشد. مجهول دوم فرکانس داپلر است که به علت حرکت گیرنده نسبت به فرستنده و پدیده‌ی داپلر ایجاد شده است. گیرنده برای شناسایی هر سیگنال باید تخمینی از این دو پارامتر داشته باشد. به همین خاطر، فضایی دو بعدی از مقادیر ممکن برای تاخیر و فرکانس داپلر تشکیل می‌شود. سپس به ازای هر یک از نقاط این فضا، یک سیگنال محلی با این دو پارامتر در گیرنده ساخته می‌شود و همبستگی آن با سیگنال دریافتی محاسبه می‌گردد. در صورتی که

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های مکان‌یابی و مسیریابی بخشی از زندگی روزمره شده است و استفاده‌ی گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف اعم از هوانوردی، دریانوردی، کشاورزی و ... پیدا کرده است. یکی از تکنولوژی‌های کلیدی در این زمینه سیستم‌های مسیریابی ماهواره‌ای جهانی (GNSS) است. این سیستم‌ها برای اولین بار با اهداف نظامی طراحی و راه‌اندازی شدند و سپس کاربرد آن‌ها به زمینه‌های غیر نظامی گسترش پیدا کرد. کنترل و مسیریابی نیروها در قلمروی دشمن و به خصوص در عملیات‌های شبانه، یکی از کاربردهای مهم این سیستم‌ها است. ردیابی و شناسایی اهداف احتمالی و همین‌طور سیستم‌های هدایت‌کننده‌ی تسلیحاتی از دیگر کاربردهای نظامی رایج برای سیستم‌های GNSS است. به همین خاطر مسیریابی ماهواره‌ای در زمینه‌ی فرماندهی و کنترل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیستم مکان‌یابی جهانی (GPS) اولین نمونه از این سیستم‌ها است که در سال ۱۹۷۸ توسط آمریکا عملیاتی شده است و در حال حاضر بیشترین تعداد کاربر را دارد [۱]. علاوه بر این، سیستم‌های مکان‌یابی GLONASS، GALILEO و BEIDOU از دیگر نمونه‌های مهم این تکنولوژی هستند که تا کنون عملیاتی شده‌اند. با وجود اینکه هر یک از این سیستم‌ها تنظیمات و مشخصات متفاوتی دارند اما همگی روش کار مشابهی دارند. به طور کلی یک سیستم مکان‌یابی ماهواره‌ای از ماهواره‌ها برای تعیین موقعیت بهره می‌برد و در صورتی که این ماهواره‌ها کره زمین را به طور کامل پوشش دهند اصطلاحاً به آن‌ها سیستم مسیریابی ماهواره‌ای جهانی گفته می‌شود [۲].

سیستم GNSS نیز همانند سایر سیستم‌های مخابراتی، از یک فرستنده و گیرنده تشکیل می‌شود. فرستنده‌ی سیستم‌های GNSS ماهواره‌هایی هستند که در مدارهای مختلف پیرامون زمین قرار گرفته‌اند و به صورت دائمی در حال ارسال اطلاعاتی از موقعیت جغرافیایی خود هستند. گیرنده‌های GNSS نیز با توجه به نیاز، می‌توانند در هر سیستم و دستگاهی مورد استفاده قرار گیرند. یک گیرنده GNSS، برای تعیین موقعیت خود از امواج دریافتی از ماهواره‌های مختلف استفاده می‌کند و در نهایت با تجمیع سیگنال‌های دریافتی، اطلاعات مکانی خود را محاسبه می‌نماید. یکی از مراحل اصلی پردازش سیگنال در گیرنده، مرحله‌ی شناسایی سیگنال است. در این مرحله وجود پیام ماهواره‌های مختلف در سیگنال دریافتی بررسی می‌گردد و تخمینی اولیه از پارامترهای مختلف آن محاسبه می‌شود. این مرحله به دلیل پیچیدگی محاسباتی و تاثیر آن در فرایند مکان‌یابی حائز اهمیت است.

یکی از چالش‌های مهم شناسایی سیگنال، کشف سیگنال‌های ضعیف در مناطق جغرافیایی فاقد پوشش‌دهی مناسب است. برای مقابله با این مشکل، الگوریتم‌هایی ارائه شده است که با افزایش میزان محاسبات، نسبت سیگنال به نویز را در گیرنده افزایش می‌دهند و به این روش تشخیص سیگنال را بهبود می‌دهند. متأسفانه این روش‌ها اغلب

مقدار همبستگی محاسبه شده برای یک گیرنده از حد آستانه‌ای بیشتر باشد، سیگنال مذکور شناسایی می‌گردد و تاخیر و فرکانس داپلر تقریبی آن مشخص می‌شود. در شکل ۲ تصویری از ساختار کلی واحد شناسایی سیگنال در یک گیرنده GNSS را مشاهده می‌کنیم. به طور کلی روش‌های شناسایی سیگنال به دو دسته‌ی روش‌های متوالی و موازی تقسیم می‌شوند. روش متوالی همه‌ی حالت‌های ممکن در فضای جستجوی کد و فرکانس را به صورت متوالی جستجو می‌کند. با توجه به زمان‌بر بودن و کندی روش متوالی، روش جستجوی موازی پیشنهاد شده است [۳]. در این روش با بهره‌گیری از FFT، بخشی از جستجو به صورت موازی انجام می‌شود و سرعت شناسایی افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند.



شکل ۲ - ساختار داخلی واحد شناسایی سیگنال

۲-۱- روش‌های شناسایی سیگنال ضعیف

پوشش‌دهی سیستم GNSS در همه جا یکسان نیست و برخی مناطق جغرافیایی فاقد پوشش مناسب هستند. در این شرایط، سیگنال دریافت شده ضعیف و نسبت سیگنال به نویز کمتر از حد معمول است. به منظور بهبود شناسایی سیگنال‌های ضعیف، روش‌های متفاوتی ارائه شده است که با افزایش بازه‌ی همبستگی، میزان حساسیت و دقت گیرنده را افزایش می‌دهند. از این جمله می‌توان به افزایش زمان انتگرال‌گیری همدوس (CIT)، استفاده از روش‌های انتگرال‌گیری ناهمدوس (NCI) و یا انتگرال‌گیری تفاضلی همدوس (DCI) اشاره کرد [۴].

یکی از روش‌های شناسایی سیگنال‌های ضعیف افزایش زمان انتگرال‌گیری همدوس است که محاسبه‌ی همبستگی سیگنال دریافتی با سیگنال تولید شده‌ی محلی را در بازه‌ی زمانی طولانی تری محاسبه می‌کند. در شرایط ایده‌آل این روش توان سیگنال مطلوب را تقویت می‌کند و موجب افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) می‌گردد. یکی از مشکلات اصلی این روش در تغییرات ناشی از خطای تخمین فرکانس است. در حقیقت با افزایش بازه‌ی انتگرال‌گیری، وجود خطایی اندک در تخمین فرکانس داپلر موجب کم شدن همبستگی نسبت به مقدار واقعی می‌گردد. به همین خاطر باید در فرایند جستجو فرکانس‌های بیشتری مورد بررسی قرار گیرند. این امر موجب افزایش قابل توجهی در

پیچیدگی محاسباتی و کاهش سرعت پردازش می‌گردد. از دیگر مشکلات این روش، مساله‌ی گذار بیت داده مسیر یابی است که موجب تغییر علامت همبستگی در نقاط گذار می‌شود. این اتفاق منجر به کم شدن همبستگی در بازه‌های طولانی و ناکارآمدی روش فوق می‌گردد. برای مقابله با مشکلات گفته شده، روش‌های NCI و DCI معرفی شده‌اند. روش NCI همبستگی در بازه‌های متوالی را محاسبه کرده و مجموع مربع اندازه‌ی همبستگی‌های محاسبه شده را به عنوان معیاری از همبستگی کل بازه در نظر می‌گیرند [۵]. روش DCI نیز تا حد زیادی مشابه همین روش عمل می‌کند با این تفاوت که به جای مربع اندازه‌ی همبستگی، از حاصل ضرب همبستگی بازه‌ی فعلی در مزدوج مختلط همبستگی بازه‌ی زمانی قبلی استفاده می‌کند [۶]. به این ترتیب مشکل گذار بیت و خطای فرکانس داپلر برطرف می‌گردد. یکی از چالش‌های جدی روش‌های ذکر شده، پیچیدگی محاسباتی آن‌ها است. به همین خاطر کارهای زیادی در جهت کاهش پیچیدگی و افزایش سرعت شناسایی انجام شده است. در [۷] روش SDHT پیشنهاد شده است که محاسبه همبستگی را به جای همه نقاط، در زیرمجموعه‌ای از نقاط انجام می‌دهد و پیچیدگی محاسباتی را برای محاسبه همبستگی در بازه‌های طولانی کاهش می‌دهد. در [۸] نیز روشی برای افزایش سرعت شناسایی سیگنال ارائه شده است که با تخمین فرکانس داپلر سعی بر افزایش سرعت دارد. در [۹] فضای جستجوی فرکانس داپلر به چند بخش تقسیم شده است که در هر بخش در یک فاز مجزا جستجو شده و فضای جستجو کوچک‌تر شده است. با وجود کارهایی که در این زمینه انجام شده است، کماکان مساله‌ی پیچیدگی و زمان‌بر بودن فرایند شناسایی سیگنال‌های ضعیف به عنوان یک چالش مهم در سیستم‌های GNSS مطرح است. بنابراین نیاز به روش‌های شناسایی با پیچیدگی کمتر احساس می‌شود.

۲-۲- مدل‌سازی مساله

در این قسمت به بیان مدل نظری و متغیرهای مساله می‌پردازیم. سیگنال دریافت شده از یک ماهواره خاص در گیرنده را می‌توان به این صورت در نظر گرفت [2]:

$$y(t) = ADC(t - \tau) \times e^{j(2\pi(f_I + f_d)t + \phi)} + n(t) \quad (1)$$

در عبارت فوق، A دامنه سیگنال را نشان می‌دهد. D بیت داده‌های پیام ارسالی است که مکان‌یابی به کمک آن‌ها صورت می‌گیرد. تاخیر سیگنال PRN کد دریافتی با τ نمایش داده شده است و به آن تاخیر کد یا فاز کد نیز گفته می‌شود. f_I فرکانس باند میانی (IF) است و f_d فرکانس داپلر را نشان می‌دهد. همچنین ϕ فاز اولیه‌ی سیگنال را نمایش می‌دهد و $n(t)$ نشان‌دهنده‌ی نویز و تداخل‌های دریافت شده

در روش مورد نظر، به ازای هر بار تکرار، همبستگی سیگنال دریافتی با سیگنال‌های ساخته شده را به ازای مقادیر مختلف (τ, f) محاسبه می‌کنیم. فرض کنیم همبستگی دو سیگنال برای $0 < k \leq M$ در بازه‌ی زمانی $[(k-1)T, kT]$ به صورت زیر نمایش داده شود:

$$Z_k(\tau, f) = \int_{(k-1)T}^{kT} x(t; \tau, f) y^*(t) dt \quad (6)$$

در تکرار m ام این حلقه $(1 \leq m \leq \frac{M}{K})$ ، از مجموع مربعات همبستگی در K بازه متوالی شاخص همبستگی زیر را محاسبه می‌کنیم:

$$d_m(\tau, f) = \sum_{k=(m-1)K+1}^{mK} |Z_k(\tau, f)|^2 \quad (7)$$

همچنین یک متغیر سطح آستانه $(\eta > 1)$ تعریف می‌کنیم. حال بیشترین مقدار شاخص فوق از روابط زیر محاسبه می‌کنیم:

$$d_{m,max}(\tau, f) = \max_{\tau} d_m(\tau, f) \quad (8)$$

$$d_m^* = \max_{\tau, f} d_m(\tau, f) \quad (9)$$

در این قسمت مجموعه‌ی همه‌ی فرکانس‌های غیر محتمل را تشکیل می‌دهیم:

$$F = \{f | \eta d_{m,max}(\tau, f) < d_m^*\} \quad (10)$$

با توجه به اینکه شاخص همبستگی این مجموعه فرکانس‌ها، فاصله‌ی زیادی با مقدار بیشینه دارد، می‌توان آن‌ها را نادیده گرفت و از فضای جستجو حذف کرد. سپس مجدداً این عملیات را برای K بازه‌ی بعدی تکرار می‌کنیم. این کار تا جایی تکرار می‌شود که محاسبه‌ی همبستگی برای همه‌ی M بازه‌ی انتگرال‌گیری ناهمدوس انجام شده باشد. در انتهای کار، شاخص همبستگی را برای کل بازه انتگرال‌گیری از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌کنیم:

$$d(\tau, f) = \sum_m d_m(\tau, f) \quad (11)$$

سپس مقدار بیشینه‌ی d را محاسبه می‌کنیم و آن را d^* می‌نامیم. در صورتی که این مقدار با همبستگی در سایر فرکانس و تاخیرها اختلاف قابل توجهی داشته باشد و به ازای مقادیر مختلف f, τ رابطه‌ی زیر برقرار باشد:

$$d^* \geq \eta d(\tau, f) \quad (12)$$

در این صورت وجود سیگنال تایید می‌گردد و فرکانس و تاخیر متناظر با d^* به عنوان مقادیر تقریبی فرکانس و تاخیر سیگنال دریافتی از کد PRN معرفی می‌شوند. به این ترتیب فضای جستجو برای PRN کدهایی که در دید گیرنده هستند در هر چرخه کوچک‌تر می‌شود و سرعت شناسایی سیگنال بالا می‌رود. همان‌طور که گفته شد، معمولاً از بین ماهواره‌های یک سیستم GNSS تعداد اندکی از آن‌ها در دید

است. همان‌گونه که گفته شد، اگر بتوانیم سیگنالی متشکل از موج سینوسی و کد PRN مربوط به ماهواره را دقیقاً مشابه این سیگنال در گیرنده بازسازی کنیم، با محاسبه‌ی همبستگی آن با سیگنال دریافتی، می‌توانیم از وجود سیگنال ماهواره‌ی مورد نظر مطلع شویم. فرض می‌کنیم سیگنال ساخته شده در گیرنده به این صورت باشد:

$$x(t; \hat{\tau}, \hat{f}_d) = C(t - \hat{\tau}) e^{j2\pi(f_d + \hat{f}_d)t} \quad (2)$$

در عبارت فوق \hat{f}_d و $\hat{\tau}$ به ترتیب تاخیر کد و فرکانس داپلر تخمین زده شده در گیرنده باشند. به این ترتیب همبستگی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z = \int_T x(t; \hat{\tau}, \hat{f}_d) y^*(t) dt = \int_T ADC(t - \tau) C(t - \hat{\tau}) e^{j\phi + j2\pi\Delta f t} dt + N \quad (3)$$

که در عبارت فوق T بازه محاسبه همبستگی است که معادل طول یک دوره کد PRN در نظر گرفته می‌شود. همچنین $\Delta f = f_d - \hat{f}_d$ خطای تخمین فرکانس داپلر است و N نویز بدست آمده پس از عبور از بلوک همبستگی گیر را نشان می‌دهد. با فرض اینکه $1 \ll T\Delta f$ باشد:

$$Z(\hat{\tau}, \hat{f}_d) \approx ADR(\delta\tau) e^{j\phi + j2\pi\Delta f T} + N \quad (4)$$

در عبارت فوق $\delta\tau = \tau - \hat{\tau}$ خطای تخمین تاخیر کد است و $R(\delta\tau)$ تابع همبستگی کد PRN روی یک دوره T است.

$$R(\delta\tau) = \int_T C(t) C(t + \delta\tau) dt \quad (5)$$

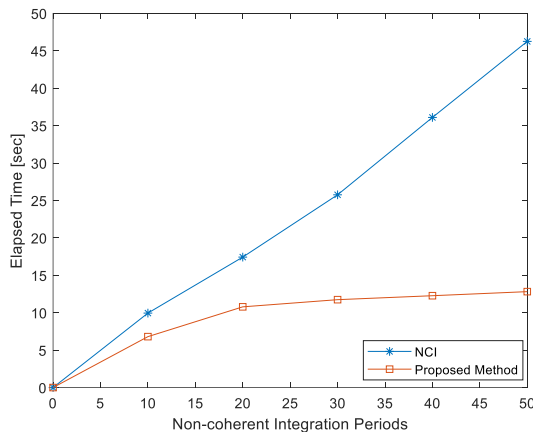
در صورتی که تاخیر کد و فرکانس داپلر به درستی تخمین زده شده باشند، عدد حاصل از محاسبه همبستگی بیشترین مقدار خود را خواهد داشت و دقت شناسایی بالا خواهد رفت.

۳- روش تحقیق

در این بخش به معرفی الگوریتم پیشنهادی شناسایی سیگنال خواهیم پرداخت. روش پیشنهادی محاسبه‌ی همبستگی را به فازهای کوچک‌تری تقسیم می‌کند و پس از هر فاز فرکانس‌های غیر محتمل را از مجموعه‌ی جستجو حذف می‌کند. به این ترتیب فضای جستجو کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. در ابتدا مفهوم بازه‌ی انتگرال‌گیری ناهمدوس کاهشی تعریف می‌کنیم. این بازه‌ی زمانی را با $t_{NCRI} = KT$ نمایش می‌دهیم. به منظور محاسبه‌ی همبستگی، بازه‌ی زمانی انتگرال‌گیری ناهمدوس که خود ضریبی صحیح از T است $(= t_{NCI} MT)$ را به بازه‌های کوچک‌تر به طول t_{NCRI} تقسیم می‌کنیم. سپس فضای جستجوی فرکانس داپلر و تاخیر کد را تشکیل می‌دهیم و به ازای هر زوج مقدار فرکانس داپلر و تاخیر کد (τ, f) یک سیگنال محلی با این مشخصات می‌سازیم. حال وارد حلقه‌ی اصلی الگوریتم می‌شویم.

۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها و یافته‌های تحقیق

در این بخش به بررسی نتایج شبیه‌سازی برای روش پیشنهادی می‌پردازیم. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از پلتفرم SoftGNSS v3.0 انجام شده است [10]. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار MATLAB 2022b استفاده شده است. همچنین داده‌های مورد استفاده، از یک نمونه سیگنال GPS موجود در اینترنت به طول 60 ثانیه بدست آمده است. داده‌ی مورد نظر در یک گیرنده با فرکانس 16.36 MHz نمونه برداری شده است و در مدل آنالوگ به دیجیتال با کوانتایزر ۱ بیتی به نمونه‌های ۱- و ۱ از سیگنال‌های I و Q تبدیل شده است. در شکل (۴) مدت زمان شناسایی یک سیگنال ضعیف را به ازای بازه‌های NCI متفاوت مشاهده می‌کنیم. به منظور دستیابی به سیگنال ضعیف، نسبت سیگنال به نویز به اندازه 10 dB نسبت به حالت معمول کاهش پیدا کرده است. همان‌طور که در شکل می‌بینیم با افزایش طول بازه انتگرال‌گیری، زمان شناسایی با روش NCI به صورت خطی افزایش پیدا کرده است. اما برای الگوریتم پیشنهادی، این زمان با شیب بسیار کمی افزایش یافته و از جایی به بعد تقریباً ثابت شده است. علت این موضوع حذف فرکانس‌های غیر غالب در طول فرایند شناسایی است. در واقع با گذشت چند دوره انتگرال‌گیری، بیشتر فرکانس‌های فضای جستجو همبستگی بسیار کمی پیدا می‌کنند. پس از حذف این فرکانس‌ها محاسبات کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند به نحوی که در نمودار تقریباً زمان انجام محاسبات با عبور از ۲۰ دوره تقریباً بدون تغییر مانده است.



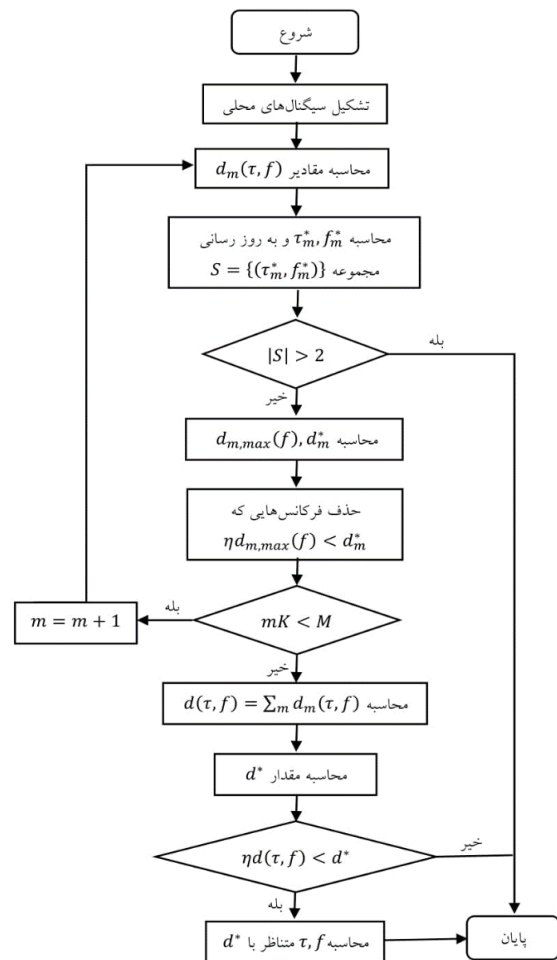
شکل ۴ - نمودار زمان شناسایی بر حسب طول دوره همبستگی ناهمدوس

در شکل ۵ وضعیت شناسایی ماهواره‌های مختلف را برای انتگرال‌گیری ناهمدوس در طول ۲۰ میلی ثانیه مشاهده می‌کنیم. در شکل الف نتایج برای محاسبه همبستگی به روش معمول و در شکل ب نتایج روش پیشنهادی نمایش داده شده است. همان‌طور که مورد انتظار بود، روش پیشنهادی از نظر کیفیت تشخیص سیگنال عملکردی کاملاً مشابه با روش انتگرال‌گیری معمول داشته است.

گیرنده قرار می‌گیرند. بنابراین به ازای اکثر کدهای PRN سیگنالی قابل شناسایی نخواهد بود و به همین خاطر روش فوق منجر به بهبود سرعت نمی‌گردد. در شرایطی که سیگنال موجود نباشد، شاخص d نشان‌دهنده‌ی همبستگی سیگنال محلی با نویز و تداخل‌های دریافتی است و مقداری تصادفی دارد. بنابراین مقدار آن در بازه‌های متوالی روند خاصی ندارد و رفتاری تصادفی از خود نشان می‌دهد. همچنین در تکرارهای متوالی زوج فرکانس داپلر و تاخیر کدی که منجر به بیشترین مقدار شاخص d شده نیز تغییر می‌کند. به همین خاطر در هر تکرار زوج زیر را ذخیره می‌کنیم:

$$(\tau_m^*, f_m^*) = \arg \max d_m(\tau, f) \quad (13)$$

و زوج بدست آمده در مرحله‌ی جاری را با زوج‌های بدست آمده در مراحل قبلی مقایسه می‌کنیم. در صورتی که تعداد زوج‌های منحصر به فرد بیش از ۲ باشد، جستجو را متوقف می‌کنیم و عدم وجود سیگنال ماهواره‌ی مورد نظر در سیگنال دریافتی احراز می‌گردد. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی را در شکل (۳) مشاهده می‌کنیم.



شکل ۳- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی سیگنال یک کد PRN مشخص

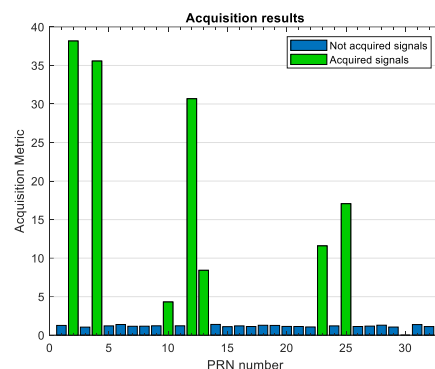
در شکل ۶ وضعیت شناسایی برای سیگنال‌های ضعیف در بازه زمانی طولانی تر نمایش داده شده است. به این منظور نسبت سیگنال به نویز نسبت به حالت قبل به اندازه ۱۰ dB کاهش پیدا کرده است. همچنین زمان انتگرال‌گیری ناهمدوس به ۵۰ میلی ثانیه افزایش پیدا کرده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی عملکردی مشابه روش انتگرال‌گیری متداول داشته است و از نظر کارایی هیچ گونه افتی مشاهده نمی‌شود. در ادامه به بررسی تاثیر پارامتر t_{NCRI} بر سرعت شناسایی، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۷ سیگنال ضعیف شده با بازه انتگرال‌گیری ۰ تا ۸۰ دوره مورد استفاده قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که با افزایش طول زمان t_{NCRI} فرایند شناسایی نیز کندتر می‌گردد. این موضوع مورد انتظار بوده است چرا که با افزایش این پارامتر، بازه‌های طولانی تری برای محاسبه همبستگی و تشخیص و هرس کردن فضای سرچ مورد استفاده قرار می‌گیرد و متعاقباً زمان شناسایی نیز افزایش می‌یابد. البته با افزایش این پارامتر دقت نیز افزایش اندکی پیدا می‌کند زیرا در بازه‌های کوتاه‌تر تاثیر نویز می‌تواند غالب شود و تصمیم‌گیری را با خطا روبرو کند.

۵- نتیجه‌گیری

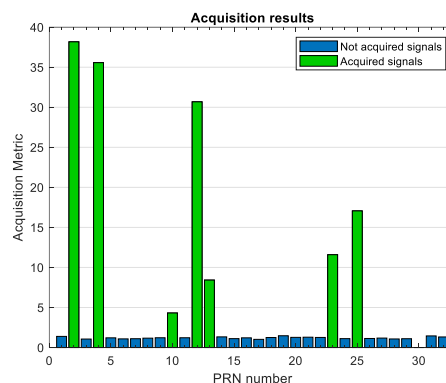
در این مقاله به بررسی روش‌های شناسایی سیگنال در سامانه‌های فرماندهی و کنترل مبتنی بر مسیریابی ماهواره‌ای پرداخته شد. ابتدا روش‌های موجود برای شناسایی سیگنال را معرفی شدند و با چالش‌های این روش‌ها در شناسایی سیگنال‌های ضعیف آشنا شدیم. در ادامه الگوریتم جدیدی برای شناسایی سیگنال ارائه شد. در انتها نتایج شبیه‌سازی این روش ارائه گردید و عملکرد آن از نظر دقت و پیچیدگی با روش NCI مقایسه شد. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی از نظر پیچیدگی و سرعت شناسایی سیگنال، بهبود قابل توجهی نسبت به روش‌های موجود داشته است و بر خلاف روش‌های متداول، با افزایش طول بازه‌ی انتگرال‌گیری، پیچیدگی روش پیشنهادی به صورت خطی افزایش نمی‌یابد. به عنوان ادامه‌ی این پژوهش، می‌توان نحوه‌ی انتخاب سطح آستانه‌ی تصمیم‌گیری در مورد موجود یا ناموجود بودن سیگنال را مورد بررسی قرار داد. انتخاب بهینه‌ی سطح آستانه، در بهبود دقت تصمیم‌گیری حائز اهمیت است. علاوه بر این، طول بازه‌ی محاسبه‌ی همبستگی، یکی از پارامترهای سیستم است که پیرامون نحوه‌ی انتخاب آن باید بررسی بیشتری انجام شود. چرا که افزایش بیش از حد این متغیر، بهبود قابل توجهی در دقت ایجاد نمی‌کند و پیچیدگی محاسباتی را افزایش می‌دهد. به همین خاطر انتخاب بهینه‌ی این متغیر، می‌تواند به بهبود سرعت شناسایی سیگنال کمک کند.

مراجع

- [1] United States Department of Defense, "Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard - 5th Edition," 2020.

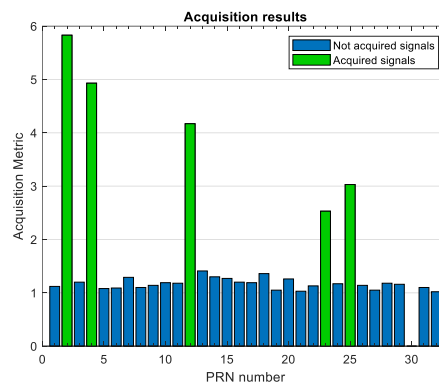


(الف)

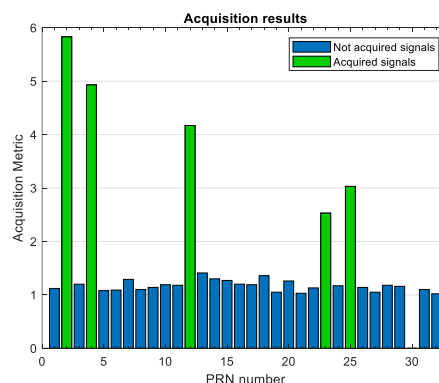


(ب)

شکل ۵ - نمودار سیگنال‌های کشف شده در بازه ۲۰ میلی ثانیه انتگرال‌گیری ناهمدوس برای (الف) روش معمول (ب) روش پیشنهادی



(الف)



(ب)

شکل ۱ - نمودار سیگنال‌های کشف شده در بازه ۵۰ میلی ثانیه انتگرال‌گیری ناهمدوس و کاهش SNR به اندازه ۱۰ dB برای (الف) روش معمول (ب) روش پیشنهادی

- [6] H. Elders-Boll and U. Dettmar, "Efficient differentially coherent code/Doppler acquisition of weak GPS signals," Eighth IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 2004, pp. 731-735.
- [7] S.-H. Kong, "SDHT for fast detection of weak GNSS signals," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 11, no. 33, pp. 2366-2378, 2015.
- [8] F. Gao and H. Xia, "Fast GNSS signal acquisition with Doppler frequency estimation algorithm," GPS solutions, vol. 4, no. 22, pp. 1-13, 2018.
- [9] K. Bahmani, M. Nezhadshahbodaghi and M. R. Mosavi, "Reduction of the acquisition time in GPS receiver by multi-stage frequency bins".2018.
- [10] K. Borre, D. M. Akos, N. Bertelsen, P. Rinder و S. H. Jensen, A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach, Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] Y. J. Morton, F. Van Diggelen, J. J. Spilker Jr, B. W. Parkinson, S. Lo G. Gao, Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: Integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications, volume 2, 2021
- [3] D. Van Nee and A. Coenen, "New fast GPS code-acquisition technique using FFT," Electronics Letters, vol. 2, no. 27, pp. 158-160, 1991
- [4] F. Van Diggelen, "Correlation and Coherent Integration," A-gps: Assisted gps, gnss, and sbas, Artech house, 2009, pp. 140-160
- [5] D. Borio و D. Akos, "Noncoherent integrations for GNSS detection: Analysis and comparisons," IEEE transactions on Aerospace and electronic systems, vol. 45, pp. 360-375, 2009.