Vol.7/ No. 4/ 2014

JSST
Journal of Space Science & Technology

Precise Positioning in GPS Receivers for Very High Velocities Using Combination of Recursive Least Squares and Fuzzy Logic

S. M. R. Mosavi[1*], N. Rahemi[2] and S. Mirza Kuchaki[3]

1- 3. Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology

[*]Postal Code:16846-13114, Tehran, IRAN

m_mosavi@iust.ac.ir

GPS is a satellite-based navigation system that is able to determine the exact position of objects on the Earth, sky, or space. By increasing the velocity of a moving object, the accuracy of positioning decreases; meanwhile, the calculation of the exact position in the movement by high velocities like airplane movement or very high velocities like satellite movement is so important. In this paper, two methods for positioning in very high velocities based on recursive least squares method and its combination with fuzzy logic are presented. Simulations on different data with different velocities show that proposed method can improve the accuracy of positioning more than 50%. In previous methods, the algorithm is quite dependent on the initial point, whereas in proposed method, this dependency is resolved.

Keywords: Fuzzy logic, Navigation equations solving, Recursive least squares, Very high velocities

1. Professor (Corresponding Author)
2. M. Sc. Student
3. Associate Professor

Recived: 2013.10.01, Accepted: 2014.09.17

JSST
فصلنامهٔ علمی - پژوهشی علوم و فناوری فضایی

جلد ۷ / شمارهٔ ۴/ زمستان ۱۳۹۳
ص. ص. ۷۲- ۶۳

تعیین دقیق موقعیت گیرنده‌های GPS در سرعت‌های بسیار زیاد با استفاده از ترکیب روش حداقل مربعات بازگشتی و منطق فازی

سید محمدرضا موسوی[۱*]، نرجس راحمی نوش‌آبادی[۲] و ستار میرزاکوچکی[۳]

۱- ۳- دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

*تهران، کدپستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

m_mosavi@iust.ac.ir

با بالارفتن سرعت حرکت اجسام در سیستم GPS دقت تعیین موقعیت کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که محاسبهٔ دقیق موقعیت در حرکت با سرعت‌های بسیار زیاد نظیر حرکت ماهواره‌ها بسیار حائز اهمیت است. روش‌هایی مانند روش حداقل مربعات خطا که برای تعیین موقعیت استفاده می‌شوند، در چنین سرعت‌های بالایی، دقت پایینی دارند و با افزایش سرعت، خطای آن‌ها افزایش می‌یابد. در این مقاله، دو روش برای موقعیت‌یابی مبتنی بر روش حداقل مربعات بازگشتی و ترکیب آن با روش‌های محاسبه واریانس مبتنی بر منطق فازی برای وزن‌دهی به مشاهدات در شرایطی که سرعت حرکت بسیار زیاد باشد، ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، روش‌های پیشنهادی در مقایسه با روش‌های قبلی، دقت تعیین موقعیت را حدود ۵۰٪ بهبود می‌بخشند. همچنین در روش‌های قبلی، الگوریتم کاملاً وابسته به نقطهٔ اولیه بود و در صورت نامشخص بودن این مقدار، الگوریتم نمی‌توانست مکان‌یابی را انجام دهد؛ در حالی‌که در روش‌های پیشنهادی این وابستگی کاملاً برطرف شده است.

واژه‌های کلیدی: حل معادلات موقعیت، سرعت‌های خیلی بالا، حداقل مربعات بازگشتی، منطق فازی

علائم و اختصارات

فاز حامل بین ماهوارهٔ j ام و گیرندهٔ i ام	ϕ_i^j
عدد ابهام فاز	N_i^j
فاصلهٔ دقیق ماهوارهٔ i ام از گیرنده	R_i
سرعت نور	c
بردار شبه‌فاصله‌های خطی شده	P_i
ماتریس واریانس اندازه‌گیری‌های کد	Q_{∇_i}
ماتریس واریانس اندازه‌گیری‌های فاز حامل	Q_{Φ_i}
بردار عدد ابهام	∇
بردار پارامترهای مجهول (شامل مختصات مکانی و زمان)	x_i
واریانس داده‌های فاز حامل	σ_{φ}^2
نسبت چگالی توان حامل به نویز	C/N_0
میزان اختلاف بین C/N_0 دریافتی و قابل انتظار	Δ
پراکندگی تخمین زده شده برای i امین مشاهده	$\tilde{e}_{i_k}$
ضرایب نهایی برای تخمین واریانس	α_{i_k} & β_{i_k}
ماتریس کوفاکتور مشاهدات	V

۱. استاد (نویسنده مخاطب)
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد
۳. دانشیار

دریافت مقاله: ۹۲/۰۷/۰۹، تأیید مقاله: ۹۳/۰۶/۲۶

ماتریس کوفاکتور پراکندگی	$V_{\tilde{e}}$
پارامتر تشخیص پرت‌بودن داده‌ها	T_i

مقدمه

سیستم مکان‌یابی جهانی یا GPS، یک سیستم ناوبری ماهواره‌ای اســت که قادر است موقعیت دقیق اجسام را مشخص کند. این سیستم، موقعیت‌یابی را به کمک گروهی از ماهواره‌ها انجام می‌دهد که هر کدام در مدارهای خود به دور زمین در گردشند [۱]. این ماهواره‌ها با ارسال پیوستهٔ سیگنال‌های L_1 و L_2 با فرکانس‌های به ترتیب ۱۵۷۵/۴۲ و ۱۲۲۶/۷ مگاهرتز، زمان و مکان خود را نسبت به زمین مشخص می‌کنند [۲]. یک گیرندهٔ GPS روی زمین، با گرفتن این اطلاعات از چهار ماهواره یا بیشتر، معادلات موقعیت را تشکیل داده و با حل آن‌ها، موقعیت کاربر را به او نشان می‌دهد [۴ و ۳].

حل معادلات موقعیت و به‌دست آوردن موقعیت اجسام دارای سرعت‌های زیاد نظیر هواپیما یا سرعت‌های بسیار زیاد نظیر ماهواره‌ها با استفاده از گیرنده‌های GPS، اهمیت فراوانی دارد. پرش در داده‌های خروجی موقعیت گیرنده‌های GPS و شتاب‌های ناگهانی در سرعت‌های خیلی بالا، موجب ایجاد خطا در تعیین موقعیت گیرنده می‌شود. روش‌هایی مانند روش حداقل مربعات خطا که برای تعیین موقعیت استفاده می‌شوند، در چنین سرعت‌های بالایی، دقت پایینی دارند. ضمن اینکه با افزایش سرعت، خطای آن‌ها به شدت افزایش می‌یابد [۶ و ۵].

در حال حاضر تنها راه مکان‌یابی پویا با دقت بالا، استفاده از روش‌های نسبی است که به دو گیرنده نیاز دارد [۸ و ۷]. برای دست‌یابی به دقت‌های بالاتر، بررسی‌های زیادی روی روش‌های تفاضلی انجام شده است [۱۲-۹]. هم چنین مطالعاتی روی ترکیب GPS با سایر وسایل ناوبری برای افزایش دقت صورت پذیرفته است [۱۵-۱۳]. اگرچه این روش‌ها برای مکان‌یابی پویا و با سرعت زیاد ارائه شده‌اند؛ با این حال، هیچ کدام از آن‌ها، دقت مناسبی برای مکان‌یابی در سرعت‌هایی در حدود ۳۵۰۰ متر بر ثانیه ارائه نمی‌دهند. بنابراین، به دنبال روشی هستیم که بتوان توسط آن، با استفاده از تنها یک گیرندهٔ تک‌فرکانس و بدون به‌کارگیری سایر وسایل ناوبری، معادلات موقعیت را حل کرده و خطای موقعیت‌یابی را به مقدار چشمگیر کاهش داد.

استفاده از روش‌های بازگشتی و ترکیب مشاهدات شبه‌فاصله و فاز حامل، علاوه بر کاهش حجم و افزایش سرعت محاسبات، باعث افزایش دقت در تعیین موقعیت می‌شوند [۱۶]. علاوه بر این با وزن‌دهی مناسب به مشاهدات می‌توان این دقت را بهبود داد.

روش حداقل مربعات خطا، یکی از روش‌های پرکاربرد برای تقریب مدل‌های خطی است. طبق این روش، ضرایب مجهول مدل‌ها بر اساس کمینه کردن مجموع مربعات تفاضل مقادیر مشاهده شده از مقادیر به دست آمده از مدل، تعیین می‌شوند به نحوی‌که مدل بازگشتی تقریب زده شده، بیشترین نزدیکی را به مشاهدات داشته باشد.

وزن‌دهی مناسب به داده‌های GPS نیز براساس کیفیت مشاهدات صورت می‌گیرد؛ به نحوی‌که با اختصاص وزن‌های مناسب به داده‌ها، می‌توان ضمن استفاده از تمام داده‌ها در یافتن موقعیت، اثر داده‌ها با نویز بیشتر را کمتر کرد. بدین منظور تاکنون روش‌هایی نظیر استفاده از سیگنال به نویز مشاهدات فاز یا استفاده از زاویهٔ فراز پیشنهاد شده‌اند [۱۸ و ۱۷]. در این مقاله ما از ترکیب دو روش بالا استفاده می‌کنیم.

برای بهبود روش‌های قبلی محاسبهٔ ماتریس واریانس، ایدهٔ استفاده از منطق فازی پیشنهاد شد [۱۹]. پس از آن، روشی تحت عنوان سیگما- اف[4] بر پایهٔ سیستم فازی ارائه شد که علاوه بر استفاده از اطلاعات سیگنال به نویز دریافتی، از روش دنیش[5] برای مشخص‌کردن داده‌های پرت و محاسبهٔ ماتریس پراکندگی داده‌های فاز حامل استفاده می‌کرد [۲۱ و ۲۰]. وجود داده‌های پرت و نویزی، اثر خود را در افزایش مقدار واریانس نشان می‌دهند. این روش برای محاسبهٔ ماتریس پراکندگی مشاهدات فاز حامل تفاضلی دوگانه مطرح شده بود و برای استفاده از آن باید روش حداقل مربعات معمولی (غیربازگشتی) برای تعیین موقعیت به‌کار می‌رفت. اما از آنجا که هدف ما استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی وزن‌دار برای تعیین موقعیت به دلیل فراهم آوردن دقت بیشتر بود، نیاز به روشی برای تعیین واریانس داشتیم که سازگار با داده‌های غیرتفاضلی باشد. بنابراین، در این مقاله، دو روش برای تعیین واریانس مشاهدات غیرتفاضلی مبتنی بر سیستم‌های فازی ارائه کرده و مورد استفاده قرار می‌دهیم.

مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است. ابتدا به اختصار به بررسی نحوهٔ تعیین موقعیت در سیستم GPS می‌پردازیم. سپس چگونگی استفاده از روش حداقل مربعات خطای بازگشتی به‌منظور حل معادلات موقعیت را تشریح می‌کنیم. پس از آن نحوهٔ وزن‌دهی به داده‌ها بر اساس کیفیت آن‌ها را بررسی می‌نماییم. در بخش بعد، سیستم‌های فازی و دو سیستم فازی را به‌منظور محاسبهٔ واریانس مشاهدات معرفی می‌کنیم. سرانجام در قسمت آخر، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی را ارائه کرده و به مقایسه با نتایج سایر روش‌ها می‌پردازیم.

4. SIGMA-F
5. Danish - Method

مکان‌یابی در سیستم GPS

تعیین موقعیت در سیستم GPS با استفاده از دو نوع مشاهدات صورت می‌گیرد: مشاهدات شبه‌فاصله و مشاهدات فاز دانستن میزان فاصلهٔ گیرنده از ماهواره است. ایدهٔ اصلی برای محاسبهٔ این فاصله، استفاده از معادلهٔ سرعت نور و مدت زمان تأخیر است. بنابراین، روند کار بدین صورت است که گیرندهٔ کاربر، مدت زمانی که طول می‌کشد تا امواج رادیویی از ماهواره به او برسد، اندازه‌گیری می‌کند. همان‌طور که می‌دانیم امواج رادیویی با سرعت نور حرکت می‌کنند. بدین ترتیب، گیرنده با ضرب زمان اندازه‌گیری شده در سرعت نور، مسافت خود را تا ماهواره به‌دست می‌آورد [۲۳ و ۲۲]. به این مسافت اندازه‌گیری شده شبه‌فاصله[6] می‌گویند. شبه‌فاصله به علت خطای موجود در ساعت گیرنده، خطای زیادی دارد، اما از آنجا که این خطا برای تمام مشاهدات، به یک نسبت است، می‌توان اثر آن را از بین برد. محاسبهٔ مسافت، حداقل باید برای چهار ماهوارهٔ مشخص صورت گیرد. پس از آن با تشکیل معادلات موقعیت به صورت رابطهٔ (۱)، می‌توان خطای شبه‌فاصله را محاسبه کرد. با محاسبهٔ خطا، امکان تعیین موقعیت گیرنده با استفاده از داده‌های شبه‌فاصله فراهم می‌شود [۲۴].

$$\begin{cases}(X_1-U_X)^2+(Y_1-U_Y)^2+(Z_1-U_Z)^2=(R_1-c\Delta T_B)^2\\(X_2-U_X)^2+(Y_2-U_Y)^2+(Z_2-U_Z)^2=(R_2-c\Delta T_B)^2\\(X_3-U_X)^2+(Y_3-U_Y)^2+(Z_3-U_Z)^2=(R_3-c\Delta T_B)^2\\(X_4-U_X)^2+(Y_4-U_Y)^2+(Z_4-U_Z)^2=(R_4-c\Delta T_B)^2\end{cases} \quad (۱)$$

در این روابط، (U_X,U_Y,U_Z) مبین مختصات گیرنده (کاربر)، ΔT_B مبین اختلاف زمان گیرنده و ماهواره، (X_i,Y_i,Z_i) مبین موقعیت هر یک از ماهواره‌های در دید، R_i مبین فاصلهٔ دقیق ماهواره iام از گیرنده در شرایط ایده‌آل و c مبین سرعت نور است.

اندازه‌گیری که دقت بیشتر از کد دارد، فاز حامل دریافت شده از یک ماهواره است [۲۵]. اندازه‌گیری فاز حامل، اختلاف بین فاز سیگنال حامل تولیدشده در گیرنده و حامل دریافت‌شده از یک ماهواره در یک لحظه است. فاز سیگنال دریافت شده در هر لحظه، متناسب با فاز در زمان انتقال بر حسب عباراتی از زمان گذر سیگنال است. در صورت نداشتن خطای ساعت و خطای اندازه‌گیری، رابطهٔ فاز حامل ϕ_i^j (بین ماهواره j ام و گیرندهٔ i ام) در واحد سیکل را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\phi_i^j(t)=\phi_i(t)-\phi^j(t-\tau)+N_i^j \quad (۲)$$

که در این رابطه، $\phi_i(t)$ مبین فاز سیگنال دریافتی توسط گیرنده، $\phi^j(t-\tau)$ مبین فاز سیگنال تولیدی ماهواره و N_i^j مبین عدد ابهام فاز است. بر مبنای رابطهٔ (۲) و با به‌کارگیری روش‌های مناسب، می‌توان موقعیت گیرنده را با استفاده از مشاهدات فاز حامل محاسبه کرد [۵].

تعیین موقعیت با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی

بهترین روش برای یافتن موقعیت دقیق اجسام، استفادهٔ هم زمان از مشاهدات شبه‌فاصله و فاز حامل است [۲۶]. یکی از روش‌هایی که تاکنون برای این منظور ارائه شده است، روش حداقل مربعات بازگشتی است [۲۷]. در این روش از مشاهدات شبه‌فاصله و فاز حامل غیرتفاضلی به عنوان مشاهدات پایه در یک مدل یکتا استفاده شده و عدد ابهام و موقعیت اجسام به روش بازگشتی و با حداقل‌کردن مجموع مربعات خطا، تخمین زده می‌شوند.

روش حداقل مربعات خطا، یکی از روش‌های پرکاربرد برای تقریب مدل‌های بازگشتی خطی و غیرخطی است. زیربنای فکری روش حداقل مربعات خطا این است که ضرایب مدل مقادیری اختیار کنند که مدل بازگشتی تقریب‌زده شده، بیشترین نزدیکی را به مشاهدات داشته باشد و به‌عبارت دیگر کمترین انحراف را از مشاهدات نشان دهد. براساس این روش، ضرایب مدل به‌نحوی معین می‌شوند که مجموع مربعات خطا، حداقل شود. منظور از خطا، اختلاف بین داده مشاهده شده و مقداری است که از مدل به‌دست می‌آید [۲۸]. ضمن اینکه، یکی از مزایای روش حداقل مربعات این است که این روش برای حل دستگاه معادلاتی به‌کار می‌رود که تعداد معادله‌هایش بیشتر از تعداد مجهول‌هایش باشد. سودمندی این ویژگی در مسئلهٔ تعیین موقعیت، آنجا آشکار می‌شود که تعداد ماهواره‌های در دید (تعداد مشاهدات)، از تعداد مجهولات ما (که معمولاً ۴ عدد هستند: مؤلفه‌های موقعیت و زمان) بیشتر باشند و ما بخواهیم برای افزایش دقت، از تمام مشاهدات استفاده کنیم.

درصورتی‌که روش حداقل مربعات را به صورت بازگشتی به کار بریم، علاوه بر کاهش بار محاسباتی و استفاده از تمام اطلاعات، دقت تعیین موقعیت را نیز افزایش داده‌ایم. بنابراین، در این قسمت به تشریح چگونگی حل معادلات موقعیت بر اساس روش حداقل مربعات وزن‌دار بازگشتی و با استفادهٔ همزمان از مشاهدات شبه-فاصله و فاز حامل می‌پردازیم.

معادلات بازگشتی برای تخمین پارامترهای موقعیت بر اساس روش حداقل مربعات خطا را می‌توان به صورت رابطهٔ (۳) بیان کرد [۳]:

$$\begin{aligned}\hat{x}_k&=Q_{\hat{x}_k}A_k^T(Q_{P_k}^{-1}P_k+[Q_{\Phi_k}+Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}]^{-1}[\Phi_k-\hat{\nabla}_{k-1}])\\Q_{\hat{x}_k}&=[A_k^T(Q_{P_k}^{-1}+[Q_{\Phi_k}+Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}]^{-1})A_k]^{-1}\end{aligned} \quad (۳)$$

که در آن P_i مبین بردار شبه‌فاصله‌های خطی شده در لحظهٔ t_i، Φ_i مبین بردار فازهای حامل خطی‌شده در لحظهٔ t_i، x_i مبین

6. Pseudo Range

بردار پارامترهای مجهول در لحظهٔ t_i، A_i مبین ماتریس طراحی خطی‌شده در لحظهٔ t_i، Q_{∇_i} و Q_{Φ_i} به ترتیب مبین ماتریس واریانس اندازه‌گیری‌های کد و فاز حامل در لحظهٔ t_i و ∇ مبین بردار عدد حامل. گام اساسی برای تعیین موقعیت با استفاده از مشاهدات شبه‌فاصله، ابهام‌های مجهول هستند. مقدار به‌روز شدهٔ عددهای ابهام فاز برای حل معادلهٔ موقعیت، با استفاده از روابط (۴) به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned}\hat{\nabla}_k &= \hat{\nabla}_{k-1} + Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}[Q_{P_k} + Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}]^{-1}[\Phi_k - \hat{\nabla}_{k-1} - A_k\hat{x}_k] \\ Q_{\hat{\nabla}_k} &= Q_{\hat{\nabla}_{k-1}} - Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}[Q_{\Phi_k} + Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}]^{-1}Q_{\hat{\nabla}_{k-1}} + Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}[Q_{\Phi_k} \\ &+ Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}]^{-1}A_k Q_{\hat{x}_k} A_k^T[Q_{\Phi_k} + Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}]^{-1}Q_{\hat{\nabla}_{k-1}}\end{aligned} \quad (۴)$$

مقدار اولیهٔ پارامترهای $\hat{x}_1$، $\hat{\nabla}_1$، $Q_{\hat{x}_1}$ و $Q_{\hat{\nabla}_1}$ براساس روش حداقل مربعات معمولی و با استفاده از P_1 و Φ_1 به‌دست می‌آیند.

این الگوریتم از آنجا که رفتار سیستم را کاملاً مدل می‌کند، بهینه بوده و علاوه بر فرض عدم وجود همبستگی زمانی بین لحظات، به فرض دیگری نیاز ندارد. همچنین مزیت دیگر الگوریتم در این است که برای شرایط دینامیک نیز قابل استفاده است.

وزن‌دهی به داده‌ها

یافتن مدلی مناسب برای پردازش داده‌های GPS، مسئله‌ای است که گرچه تاکنون افراد زیادی به آن پرداخته‌اند، اما هنوز پاسخی که بتواند رفتارهای تصادفی در مشاهدات GPS را به صورت مطمئن مدل کند، ارائه نشده است. در این میان آنچه می‌تواند تا حدود زیادی به مدل‌کردن اثرات تصادفی در مشاهدات کمک کند، بررسی کیفیت مشاهدات و اعمال آن به داده‌ها از طریق وزن‌دهی است. بنابراین، آنچه باقی می‌ماند، یافتن پارامتری است که بتوان از آن به عنوان شاخصی برای تعیین کیفیت مشاهدات استفاده کرد.

همان‌طور که اشاره شد، وزن‌دهی به مشاهدات، بر اساس کیفیت آن‌ها انجام می‌شود. کیفیت مشاهدات بر اثر عواملی چون نویز موجود در آن‌ها (ناشی از نویز گیرنده، خطای حاصل از چندمسیری، داشتن زاویهٔ فراز کم، نویز تصادفی مشاهدات، همبستگی جبری بین داده‌ها و غیره) یا اثرات سیستمی مدل نشده افت پیدا می‌کند. افت کیفیت مشاهدات باعث اعوجاج در آن‌ها می‌شود. از آنجا که کیفیت مشاهدات، رابطهٔ معکوسی با مقدار واریانس آن‌ها دارد، بنابراین از معکوس ماتریس واریانس داده‌ها، می‌توان به عنوان ماتریس وزن استفاده کرد. به این ترتیب با اختصاص وزن کمتر به داده‌های با نویز بیشتر، می‌توان ضمن استفاده از داده‌های نویزی در تعیین موقعیت، اثر آن‌ها را کمتر کرده و به دقت بیشتری دست یافت.

در حالت کلی که بین داده‌ها همبستگی وجود دارد، وزن مشاهدات برابر با ماتریس کواریانس آن‌ها خواهد بود. ماتریس کواریانس به صورت رابطهٔ (۵) بیان می‌شود:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \sigma_{x_1x_2} & \cdots & \sigma_{x_1x_n} \\ \sigma_{x_2x_1} & \sigma_{x_2}^2 & \cdots & \sigma_{x_2x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{x_nx_1} & \sigma_{x_nx_2} & \cdots & \sigma_{x_n}^2 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

که در آن $\sigma_{x_i}^2$ مبین واریانس مشاهدهٔ i ام و $\sigma_{x_ix_j}$ مبین واریانس بین مشاهده i ام و j ام است. در حالتی که بین داده‌ها همبستگی وجود نداشته باشد، تمام عناصر به غیر از عناصر قطر اصلی برابر با صفر بوده و ماتریس کواریانس یک ماتریس قطری خواهد بود. در این حالت، ماتریس کوفاکتور مشاهدات به صورت ضریبی از ماتریس کواریانس به صورت رابطهٔ (۶) تعریف می‌شود:

$$Q_{P_i} = \frac{1}{\sigma_0^2}\Sigma_{P_i} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_2^2}{\sigma_0^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{\sigma_n^2}{\sigma_0^2} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

که در این رابطه، Q_{P_i} مبین ماتریس کوفاکتور مشاهدات شبه‌فاصله در لحظهٔ t_i و σ_0^2 مبین واریانس مرجع است. در نتیجه ماتریس وزن مشاهدات را می‌توان طبق رابطهٔ (۷) محاسبه کرد:

$$W_i = Q_{P_i}^{-1} = \sigma_0^2\Sigma_{P_i}^{-1} \quad (۷)$$

در حالتی که ماتریس کوفاکتور قطری باشد، معکوس آن نیز قطری خواهد بود. بنابراین ماتریس وزن هم قطری می‌شود. در نتیجه به طور خلاصه می‌توان نوشت:

$$w_i(n) = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2(n)} \quad (۸)$$

که در آن $\sigma_i^2(n)$ مبین واریانس فاز حامل مشاهدهٔ i ام در لحظهٔ n ام است. برای پیدا کردن ماتریس واریانس فاز حامل، روش‌های مختلفی مطرح شده است. از بین این روش‌ها می‌توان به دو روش سیگما- دلتا[۷] و سیگما- اپسیلون[۸] اشاره کرد [۱۸].

روش سیگما- اپسیلون براساس معیار سیگنال به نویز مشاهدات، وزن مناسب را به داده‌های فاز حامل نسبت می‌دهد و رابطهٔ آن مطابق رابطهٔ (۹) است:

$$\sigma_\varphi^2 = V_i + C_i.10^{-C/N_0} \quad (۹)$$

7. SIGMA-Δ
8. SIGMA-ε

که در آن σ_{φ}^2 مبین واریانس داده‌های خام فاز حامل، V_i و C_i مبین پارامترهای مدل و C/N_0 مبین نسبت چگالی توان حامل به نویز است. مقدار V_i در فرکانس L_1 برابر با صفر و در فرکانس L_2 برابر با $۰/۸۸ \times ۱۰^{-۶}$ است. مقادیر C_i هم برای فرکانس L_1 و L_2 به ترتیب ۰/۲۴۴ و $۰/۷۷ \times ۱۰^{-۳}$ هستند [۲۰].

در روش سیگما- دلتا، محاسبهٔ داده‌های ماتریس واریانس فاز حامل، با استفاده از وابستگی بین مقدار زاویهٔ فراز و مقدار سیگنال به نویز انجام می‌شود. با توجه به اینکه در هر زاویهٔ فراز، مقدار خاصی برای C/N_0 انتظار می‌رود، تفاوت C/N_0 دریافتی و C/N_0 مورد انتظار به‌گونه‌ای نمایانگر اعوجاج سیگنال است. رابطهٔ مورد استفاده در این روش برای محاسبهٔ ماتریس واریانس را می‌توان به‌صورت رابطهٔ (۱۰) نمایش داد:

$$\sigma_{\varphi}^2 = V_i + C_i.10^{-\frac{C/N_0 - \alpha|\Delta|}{10}} \qquad (۱۰)$$

که در آن α مقدار ثابت ۲ و Δ مبین تفاوت میان مقدار C/N_0 مورد انتظار و C/N_0 دریافتی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود تفاوت بین این دو مقدار باعث افزایش واریانس می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این دو روش از معیارهای زاویهٔ فراز و مقدار سیگنال به نویز برای بررسی میزان اعوجاج و در نتیجه تعیین کیفیت مشاهدات GPS استفاده شده است. اما در این میان علاوه بر میزان اعوجاج، داشتن معیاری برای تشخیص پرت‌بودن داده‌ها نیز می‌تواند در بهبود کیفیت داده‌ها و وزن‌دهی به آن‌ها مورد استفاده قرار بگیرد. در بخش‌های بعد به تشریح نحوهٔ ترکیب این سه معیار برای محاسبهٔ واریانس داده‌ها می‌پردازیم.

منطق فازی

نظریه مجموعه‌های فازی برای بیان و تشریح عدم قطعیت و دقت رویدادها بر اساس منطق چندارزشی را پروفسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح کردند. اگر بخواهیم نظریهٔ مجموعه‌های فازی را تعریف کنیم، باید بگوییم که نظریه‌ای است برای اقدام در شرایط عدم اطمینان. این نظریه قادر است بسیاری از مفاهیم، متغیرها و سیستم‌هایی را که دقیق نیستند، صورت‌بندی ریاضی ببخشد و زمینه را برای استدلال، استنتاج، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد. منطق فازی نوعی از منطق بی‌نهایت مقداره و در حقیقت ابتکاری برای بیان رفتار مطلوب سیستم‌ها با استفاده از زبان روزمره است. در واقع منطق فازی منطقی پیوسته است که از استدلال تقریبی بشر الگوبرداری کرده است. منطق فازی عبارت است از استدلال با مجموعه‌های فازی. بر اساس این نظریه، یک سیستم فازی مقادیر ورودی را به مقادیر خروجی نگاشت می‌کند؛ اما برخلاف تبدیلات ریاضی که از ارقام برای نگاشت استفاده می‌کنند، این سیستم از صفت‌هایی مانند کم و زیاد، برای پیدا کردن مقدار خروجی استفاده می‌کند. ارتباط متغیرهای ورودی و خروجی نیز برخلاف تبدیلات ریاضی که از روابط استفاده می‌کنند، توسط قوانین، معین می‌شوند.

مجموعه‌های اساسی که سیستم‌های فازی بر اساس آن‌ها عمل می‌کنند، مجموعه‌های فازی هستند که توسط توابع عضویت مشخص می‌شوند. این توابع عضویت برای هر کمیت از مجموعه‌های فازی، مقداری بین صفر و یک به خود می‌گیرند. ارزش توابع عضویت نمایانگر درجه عضویت آن کمیت در مجموعه-های فازی هستند. برای تبدیل هر کمیت عددی، نیاز به فازی‌سازی است تا قبل از به‌کارگیری متغیرهای ورودی در سیستم فازی، این متغیرها را با مقدار حقیقی به یک مجموعهٔ فازی تبدیل کند و ارزش عضویت را برای کمیت ورودی تعیین کند. بعد از فازی‌سازی تمامی مقادیر ورودی، می‌توان قواعد فازی که قلب یک سیستم فازی را تشکیل می‌دهند، پیاده‌سازی کرد. این قوانین، براساس تجربه، در تفسیر پارامترهای ورودی استفاده می‌شوند و بر اساس آن‌ها تصمیم‌گیری می‌شود که در شرایط مختلف برای داده‌های ورودی، خروجی چگونه مقدار بگیرد. در نهایت، نتیجهٔ استنتاج فازی که به مجموعه‌ای فازی خروجی منجر شده است، توسط فازی‌زدا به مقادیر خروجی عددی تبدیل می‌شود.

وزن‌دهی به داده‌ها با استفاده از منطق فازی

در ادامه، دو روش برای تعیین واریانس مشاهدات غیرتفاضلی مبتنی بر سیستم‌های فازی ارائه کرده و مورد استفاده قرار می‌دهیم. از آنجا که هدف ما استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی وزن‌دار برای تعیین موقعیت به دلیل فراهم آوردن دقت بیشتر است، روش‌های پیشنهادی برای تعیین واریانس را به صورت سازگار با داده‌های غیرتفاضلی ارائه می‌کنیم.

سیستم فازی اول

نحوهٔ محاسبهٔ مقادیر واریانس با استفاده از مشاهدات فاز حامل غیرتفاضلی به صورت روابط (۱۱) تا (۱۴) هستند:

$$\begin{cases} \overline{\sigma}_{i(k)}^2 = \sigma_{i_0}^2 . f(\alpha_{i_k}, \Delta_i) . g(\beta_{i_k}, \tilde{e}_{i_{k-1}}); \\ 0 \le \alpha_{i_k} \le 1 \ , 0 \le \beta_{i_k} \le 1 \end{cases} \qquad (۱۱)$$

$$f(\alpha, \Delta) = 10^{\alpha|\Delta|/3} \qquad (۱۲)$$

$$g(\beta, \tilde{e}_i) = (1 + \beta . \exp(\frac{-|\tilde{e}_i|}{3\overline{\sigma}_i}))^{-1} \qquad (۱۳)$$

که در آن $\sigma^2{}_{i_k}$ مبین واریانس iامین مشاهده در تکرار k ام، f(.) و g(.) توابع نشان‌دهندهٔ توابع تجمع واریانسی، Δ_i بیانگر میزان اختلاف بین C/N_0 دریافتی و قابل انتظار برای iامین مشاهده

برحسب دبی- هرتز[9]، $\tilde{e}_{i_k}$ مبین پراکندگی تخمین زده شده برای iامین مشاهده در تکرار k ام و α_{i_k} و β_{i_k} مبین ضرایب نهایی برای تخمین واریانس هستند. $\sigma_{i_0}^2$ نیز مدل واریانس ابتدایی است که از مدل سیگما- اپسیلون (مطابق رابطهٔ (۹)) به‌دست می‌آید و نشانگر نویز تصادفی است.

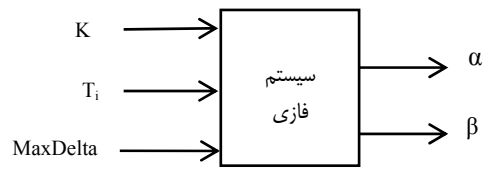
تابع f حاوی اطلاعاتی است که از مدل سیگما- دلتا (مطابق رابطهٔ (۱۰) استخراج می‌شوند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود با افزایش مقدار Δ، واریانس حاصله افزایش خواهد یافت و به ازای مقدار $\Delta = 0$، تابع f کمترین مقدار خود را اختیار می‌کند. پارامتر دیگری که در تابع f مشاهده می‌شود، α است که مقدار آن توسط سیستم فازی مشخص می‌شود. از آنجا که مقدار سیگنال به نویز به تنهایی قادر به توصیف میزان پراکندگی و تداخل سیگنال نبوده و هم‌چنین مقدار Δ لزوماً همیشه مبین مقدار صحیح مشاهدات مخدوش شده نیست، پارامتر α مطرح شد. نقش این پارامتر کاهش میزان واریانس در مواقعی است که مقادیر زیاد Δ با سایر شاخص‌های کیفیت هم‌خوانی ندارد. تابع g نیز که در تعریف خود از روش دنیش استفاده کرده است، با بهره‌گیری از بزرگی خطا که مبین وجود داده پرت است، در مقدار واریانس تأثیر می‌گذارد. در اینجا نیز کنترل مقدار واقعی واریانس توسط پارامتر β امکان‌پذیر خواهد بود.

برای پیداکردن مقادیر بهینهٔ خروجی α و β از سیستم فازی استفاده می‌شود. مسئلهٔ اصلی در طراحی هر سیستم فازی، انتخاب متغیرهای ورودی، تخمین مقادیر ممکن هر یک از ورودی‌ها، تعیین قوانین فازی و انتخاب شکل توابع عضویت برای متغیرهاست که معمولاً به صورت ابتکاری به‌دست می‌آیند.

ورودی‌های این سیستم فازی مقادیر زیر هستند: k یا شماره تکرار الگوریتم[10]، T_i که مقدار آن معیاری برای تشخیص پرت بودن داده‌هاست و MaxDelta که بیشترین تفاوت بین مقدار واقعی و مقدار قابل انتظار C/N_0 داده‌ها بوده و میزان اعوجاج را نشان می‌دهد. بلوک دیاگرام سیستم فازی اول در شکل (۱) آمده است.

برای محاسبهٔ T_i از رابطه (۱۴) استفاده می‌نماییم:

$$T_i = \frac{\eta'_{[i]} V^{-1} \tilde{e}}{\sigma \sqrt{\eta'_{[i]} V^{-1} V_{\tilde{e}} V^{-1} \eta_{[i]}}} \qquad (۱۴)$$



شکل ۱- بلوک دیاگرام سیستم فازی پیشنهادی اول

در این رابطه، e معرف پراکندگی‌های پیش‌بینی شده یا خطای تخمین، V معرف ماتریس کوفاکتور مشاهدات، σ معرف واریانس اولیه، $V_{\tilde{e}}$ مبین ماتریس کوفاکتور پراکندگی و $\eta_{[i]}$ مبین بردار واحدی است که iامین عنصر آن برابر با ۱ است. اگر خطای مشاهدات، توزیع نرمال داشته باشد، T_i نیز توزیع نرمالی خواهد داشت؛ اما اگر مشاهدهٔ i ام داده پرت باشد، اثر آن در زیاد بودن مقدار T_i نمایان می‌شود. برای پارامتر T_i در مجموعه‌های فازی، دو حالت زیاد[11] و کم[12] در نظر گرفته شده است.

هستهٔ یک سیستم فازی، قوانینی هستند که به صورت کلامی، ارتباط بین متغییرهای ورودی و خروجی را توصیف می‌کنند. تصمیم‌گیری و انتخاب قوانین، تجربی بوده و با استفاده از آزمایش روی چندین نمونه در شرایط مختلف به‌دست می‌آیند. قوانین فازی مورد نیاز برای سیستم فازی مطرح شده برای به‌دست‌آوردن دو پارامتر α و β، در جدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول ۱- قوانین فازی برای به‌دست آوردن دو پارامتر α و β

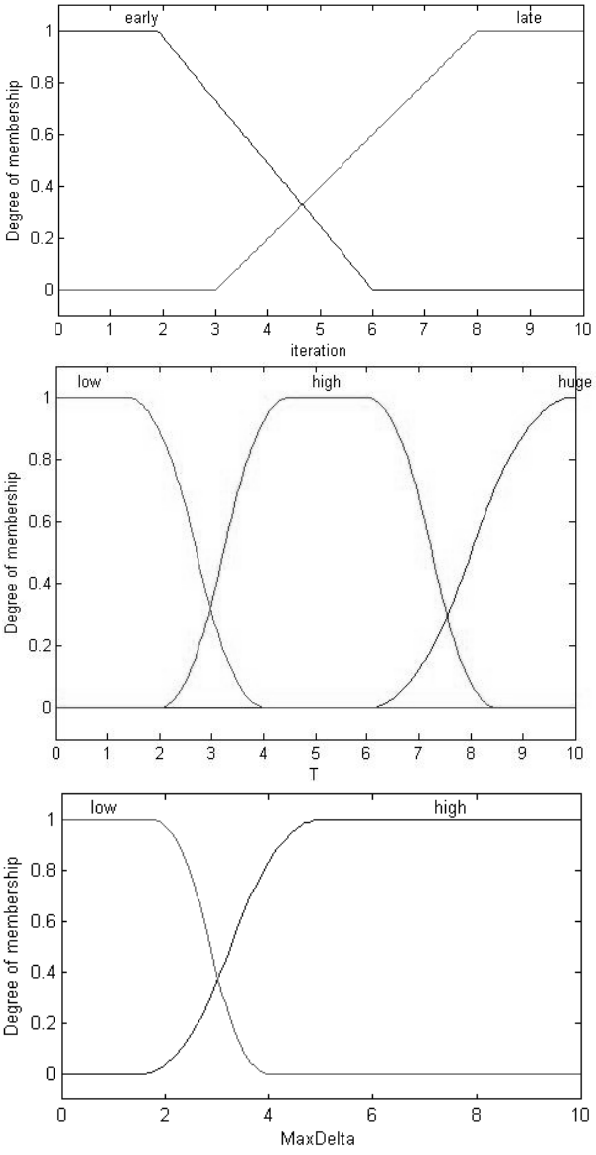
شماره قاعده	K	T_i	Max Delta	α	β
۱	مقدم	-	-	زیاد	کم
۲	مقدم	کم	-	کم	-
۳	ماخر	-	-	کم	-
۴	ماخر	کم	-	-	کم
۵	ماخر	بسیار زیاد	-	زیاد	زیاد
۶	ماخر	زیاد	زیاد	-	زیاد
۷	ماخر	زیاد	کم	-	کم

قانون اول: اگر K مقدم باشد، آنگاه α زیاد و β کم هستند.
قانون دوم: اگر K مقدم و T_i کم باشند، آنگاه α کم است.
قانون سوم: اگر K ماخر باشد، آنگاه α کم است.
قانون چهارم: اگر K ماخر و T_i کم باشند، آنگاه β کم است.
قانون پنجم: اگر K ماخر و T_i بسیار زیاد باشند، آنگاه α و β زیاد هستند.
قانون ششم: اگر K ماخر و T_i زیاد و Max Delta زیاد باشند، آنگاه β زیاد است.
قانون هفتم: اگر K ماخر و T_i زیاد و Max Delta کم باشند، آنگاه β کم است.

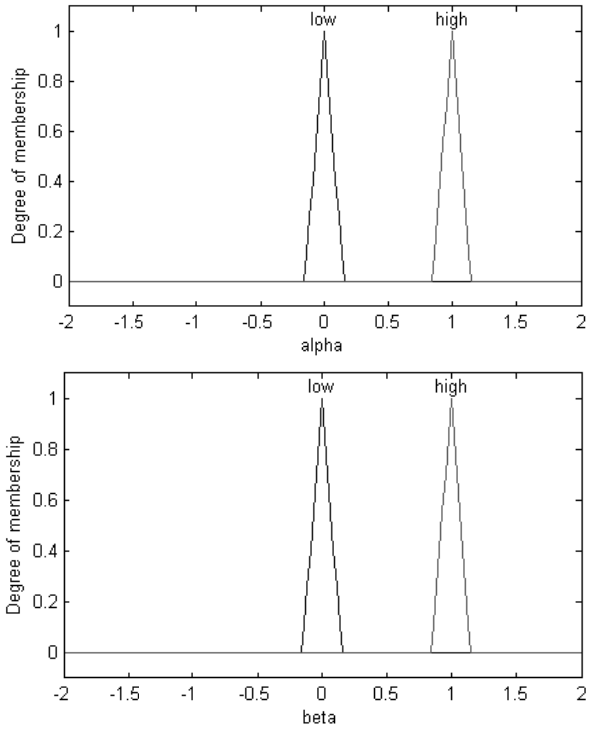
ارزیابی تمامی قوانین، منجر به حاصل شدن یک مجموعهٔ فازی برای هر یک از متغییرهای خروجی α و β می‌شود. همان‌طور که از قوانین پیداست، در قانون اول در هنگام تکرارهای اولیه، تجمع واریانسی

9. dB-Hz
10. Iteration
11. High
12. Low

احتمالی ناشی از مقدار تولید می‌شود. همچنین در شروع به دلیل مطمئن نبودن در مشاهدات اولیه، اختصاص وزن‌های کمتر به مشاهدات باعث افزایش دقت می‌شود. با حرکت به سمت تکرارهای بیشتر (معمولاً از تکرار دهم یا پانزدهم به بعد)، مقادیر T_i و MaxDelta تعیین‌کنندهٔ تجمع واریانسی خواهند بود. زیاد بودن مقدار پارامتر T_i نشانگر پرت بودن داده‌ها و مقدار زیاد MaxDelta به معنی اعوجاج زیاد دادهٔ مورد بررسی است. در نهایت متغییرهای عددی α و β از طریق فازی‌زدای میانگین مرکز مجموعه‌های فازی محاسبه می‌شوند [۲۹]. این شیوه موجب می‌شود که مقادیر خروجی، تغییراتی هموار بین صفر و یک باشند. توابع عضویت تعریف شده برای پارامترها در شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده‌اند.



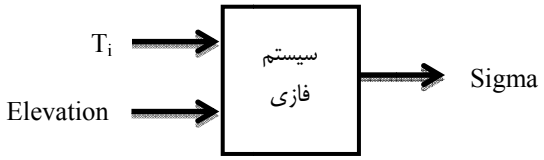
شکل ۲- توابع عضویت متغییرهای ورودی سیستم فازی پیشنهادی اول



شکل ۳- توابع عضویت متغییرهای خروجی سیستم فازی پیشنهادی اول

سیستم فازی دوم

در این سیستم مستقیماً براساس متغییرهای T_i و زاویهٔ فراز[13]، واریانس[14] را محاسبه می‌کنیم. بلوک دیاگرام این سیستم در شکل (۴) و همچنین قواعد فازی مورد نیاز برای محاسبهٔ واریانس در جدول (۲) آمده است:



شکل ۴- بلوک دیاگرام سیستم فازی پیشنهادی دوم

جدول ۲- قوانین فازی برای به‌دست آوردن واریانس

شماره قاعده	T_i	Elevation	Sigma
۱	کم	کم	متوسط
۲	کم	زیاد	کم
۳	زیاد	کم	زیاد
۴	زیاد	زیاد	متوسط

قانون اول: اگر T_i و Elevation کم باشند، آنگاه Sigma متوسط است.

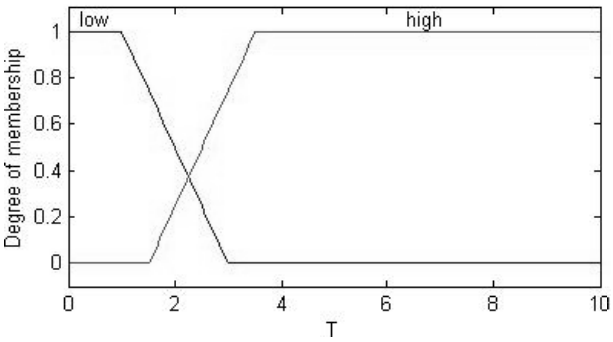
13. Elevation
14. Sigma

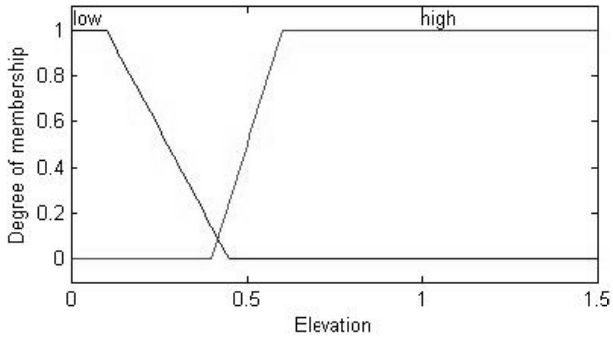
قانون دوم: اگر T_i کم و Elevation زیاد باشند، آنگاه Sigma کم است.

قانون سوم: اگر T_i زیاد و Elevation کم باشند، آنگاه Sigma زیاد است.

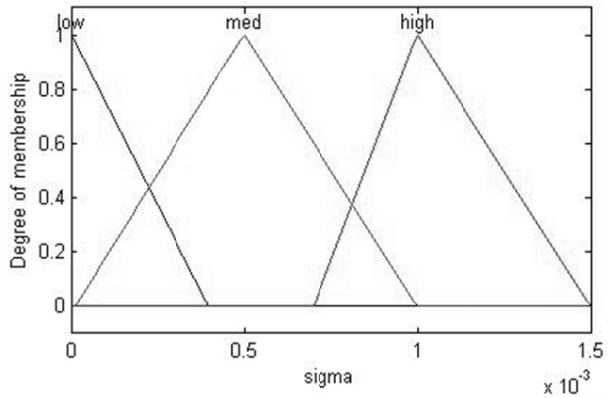
قانون چهارم: اگر T_i و Elevation زیاد باشند، آنگاه Sigma متوسط است.

با افزایش مقدار T_i که شاخصی برای تشخیص میزان پرت بودن داده‌هاست، مقدار واریانس افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویهٔ فراز که نشان‌دهندهٔ هندسهٔ مناسب ماهواره نسبت به گیرنده است، واریانس کاهش پیدا می‌کند. توابع عضویت تعریف شده برای پارامترهای ورودی و خروجی در شکل‌های (۵) و (۶) آورده شده‌اند.





شکل ۵- توابع عضویت متغییرهای ورودی سیستم فازی پیشنهادی دوم



شکل ۶- توابع عضویت متغییر خروجی سیستم فازی پیشنهادی دوم

نتایج شبیه‌سازی‌ها

شبیه‌سازی برای دو نوع داده در محیط متلب صورت پذیرفته است. دادهٔ اول، دارای میانگین سرعت ۹۰ متر بر ثانیه و دادهٔ دوم با حرکت دایروی دارای میانگین سرعت ۳۵۰۰ متر بر ثانیه هستند. گام‌های اصلی برای پیاده سازی روش پیشنهادی اول به شرح زیر هستند:

گام اول: پس از تعیین مکان دقیق شروع حرکت جسم، مشاهدات کد و فاز حامل را خطی می‌کنیم.

گام دوم: با استفاده از رابطهٔ (۱۴) و جدول (۱)، مقادیر α و β را محاسبه می‌کنیم.

گام سوم: با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۳)، ماتریس واریانس را تعیین می‌کنیم.

گام چهارم: موقعیت گیرنده را با استفاده از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آوریم.

همچنین گام‌های اصلی برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی دوم به شرح زیر هستند:

گام اول: پس از تعیین مکان دقیق شروع حرکت جسم، مشاهدات کد و فاز حامل را خطی می‌کنیم.

گام دوم: با استفاده از سیستم فازی شکل (۴)، مقدار واریانس را محاسبه می‌کنیم.

گام سوم: موقعیت گیرنده را با استفاده از روابط (۳) و (۴) به‌دست می‌آوریم.

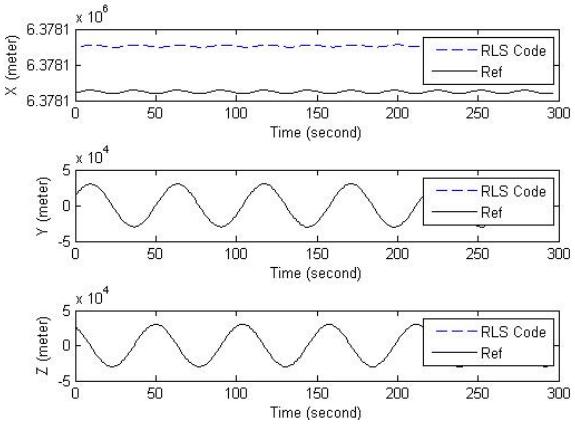
نتایج تعیین موقعیت با استفاده از دو روش پیشنهادی برای دادهٔ دوم با سرعت ۳۵۰۰ متر بر ثانیه، در شکل‌های (۷) تا (۱۰) و همچنین نتایج پیاده‌سازی این روش در مقایسه با سایر روش‌ها در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- مقایسهٔ مقدار مؤثر خطای روش‌های مختلف بر حسب متر

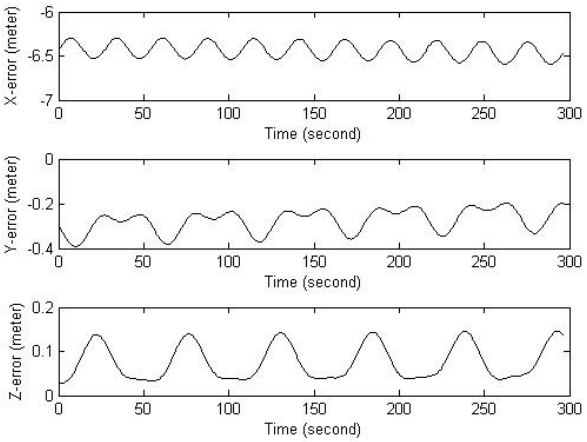
روش‌ها / داده‌ها	حداقل مربعات خطای بازگشتی	روش پیشنهادی به همراه سیستم فازی اول	روش پیشنهادی به همراه سیستم فازی دوم
داده اول با سرعت ۹۰ متر بر ثانیه	۱۴/۷۷۰۶	۸/۲۹۶۰	۸/۴۰۸۵
داده دوم با سرعت ۳۵۰۰ متر بر ثانیه	۱۲/۲۹۲۳	۶/۷۰۳۹	۶/۷۰۴۳

مشاهده می‌شود هر دو روش پیشنهادی، میزان خطا را به مقدار چشمگیری کاهش داده و حدود ۵۰ درصد در نتایج تعیین موقعیت بهبود ایجاد کرده‌اند. به‌رغم اینکه دقت هر دو روش تقریباً یکسان است، اما روش دوم به علت سادگی و داشتن پیچیدگی محاسباتی کمتر مناسب به نظر می‌رسد. در روش حداقل مربعات خطای بازگشتی، الگوریتم کاملاً وابسته به نقطهٔ اولیه است و در صورت نامشخص بودن این مقدار، الگوریتم نمی‌تواند مکان‌یابی را انجام دهد؛ در حالی‌که در روش-

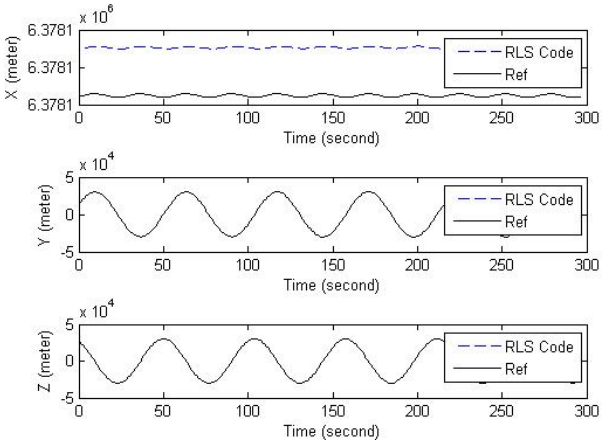
های پیشنهادی این وابستگی کاملاً برطرف شده است. همچنین مشاهده می‌کنیم خطای روش‌ها در سرعت‌های بالا بهبود پیدا کرده و مناسب سرعت‌های بسیار زیاد هستند.



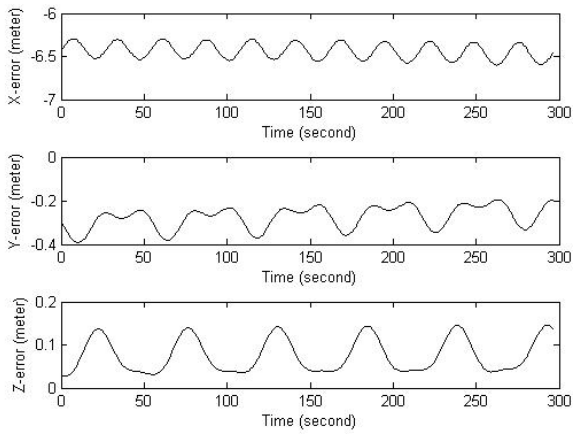
شکل ۷- مؤلفه‌های موقعیت محاسبه شده توسط روش فازی پیشنهادی اول



شکل ۸- خطای مؤلفه‌های موقعیت محاسبه شده توسط روش فازی پیشنهادی اول



شکل ۹- مؤلفه‌های موقعیت محاسبه شده توسط روش فازی پیشنهادی دوم



شکل ۱۰- خطای مؤلفه‌های موقعیت محاسبه شده توسط روش فازی پیشنهادی دوم

نتیجه‌گیری

در این مقاله دو روش برای تعیین موقعیت با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی و ترکیب آن با روش‌های محاسبهٔ واریانس با استفاده از منطق فازی برای وزن‌دهی به مشاهدات براساس کیفیت آن‌ها در شرایطی که سرعت حرکت بسیار زیاد باشد، ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند با استفاده از روش پیشنهادی، خطای مکان‌یابی به میزان زیادی کاهش یافته و دقت تعیین موقعیت حدود ۵۰٪ بهبود می‌یابد. از مزایای این روش‌ها می‌توان به عدم وابستگی به مقدار دقیق نقطهٔ اولیه، در عین داشتن دقت بیشتر اشاره کرد.

مراجع

[1] Mosavi, M. R. and Shiroie, M., "Efficient Evolutionary Algorithms for GPS Satellites Classification," *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 37, No. 7, 2012, pp. 2003-2015.

[2] Mohammadi, M., *Global Positioning System,* Publications of Shahid General Sayyad Shirazi Research Center, 2009 (In Persian).

[3] Mosavi, M. R. and EmamGolipour, I., "De-Noising of GPS Receivers Positioning Data using Wavelet Transform and Bilateral Filtering," *Journal of Wireless Personal Communications*, Vol. 71, No. 3, 2013, pp. 2295-2312.

[4] Mosavi, M. R., Soltani Azad, M. and EmamGholipour, I., "Position Estimation in Single-Frequency GPS Receivers Using Kalman Filter with Pseudo-Range and Carrier Phase Measurements," *Journal of Wireless Personal Communications*, Vol. 72, No. 4, 2013, pp. 2563-2576.

[5] Thipparthi, S. N., *Improving Positional Accuracy Using Carrier Smoothing Techniques in Inexpensive GPS Recievers*, (M.Sc. Thesis), New Mexico State University, 2004.

[6] Mosavi, M. R., Azarshahi, S., EmamGholipour, I. and Abedi, A. A., "Least Squares Techniques for GPS Receivers Positioning Filter Using Pseudo-Range and Carrier Phase Measurements," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 10, No. 1, 2014, pp.18-26.

[7] Wen, Z., Henkel, P. and Gunther, C., "Reliable Estimation of Phase Biases of GPS Satellites with a Local Reference Network," *IEEE Conference on ELMAR*, 2011, pp. 321-324.

[8] Cui, Y. J. and Ge, S. S., "Autonomous Vehicle Positioning with GPS in Urban Canyon Environments," *IEEE Conference on Robotics & Automation*, 2001, pp. 1105-1110.

[9] Evers, H. and Kasties, G., "Differential GPS in a Real Time Land Vehicle Environment-Satellite Based Van Carrier Location System," *IEEE Magazine on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 9, No. 8, 1994, pp. 26-32.

[10] Pikander, M. and Eskelinen, P., "Differential GPS Dynamic Location Experiments at Sea," *IEEE Magazine on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 19, No. 4, 2004, pp. 36-39.

[11] Rezaei, S. and Sengupta, R., "Kalman Filter-Based Integration of DGPS and Vehicle Sensors for Localization," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 6, 2007, pp. 1080-1088.

[12] Yang, Q. and Sun, J., "A Location Method for Autonomous Vehicle Based on Integrated GPS/INS," *IEEE Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2007, pp. 1-4.

[13] Yu, J. and Chen, X., "Application of Extended Kalman Filter in Ultra-Tight GPS/INS Integration Based on GPS Software Receiver," *IEEE Conference on Vehicular Green Circuits and Systems*, 2010, pp. 82-86.

[14] Defraigne, P., Harmegnies, A. and Petit, G., "Time and Frequency Transfer Combining GLONASS and GPS Data," *IEEE Joint Conference on Frequency Control and the European Frequency and Time Forum*, 2011, pp. 1-5.

[15] Zhao, X. et al, "An Improved Adaptive Kalman Filtering Algorithm for Advanced Robot Navigation System Based on GPS/INS," *IEEE Conference on Mechatronics and Automation*, 2011, pp. 1039-1044.

[16] Guyennon, N., Cerretto, G., Tavella, P. and Lahaye, F., "Further Characterization of the Time Transfer Capabilities of Precise Point Positionnig (PPP): the Sliding Batch Procedure," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 56, No. 8, 2009, pp. 1634-1641.

[17] Collins, J. P. and Langley, R. B., *Possible Weighting Schemes for GPS Carrier Phase Observations in the Presence of Multipath,* Performing on Geodetic Research Laboratoty, University of New Brunswick, 1999.

[18] Wieser, A. and Brunner, F. K., "An Extended Weight Model for GPS Phase Observation," *Journal of Earth, Planets and Space*, Vol. 52, No. 10, 2000, pp. 777-782.

[19] Crocetto, N., Ponte, S., Pugliano, G. and Savino, L., "Fuzzy-Logic Based Methodologies Fir Mobile Mapping: Enhancing Positioning Accuracy of GPS/GNSS Measurments," *The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, 2007.

[20] Azarbad, M. R. and Mosavi, M.R., "A New Method to Mitigate Multipath Error in Single-Frequency GPS Receiver based on Wavelet Transform," *Journal of GPS Solutions*, Vol. 18, No. 2, 2014, pp.189-198.

[21] Mosavi, M. R. and Azarbad, M. R., "Multipath Error Mitigation Based on Wavelet Transform in L1 GPS Receivers for Kinematic Applications," *International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 67, No. 10, 2013, pp. 875-884.

[22] Knight, N. L. and Wang, J., "A Comparison of Outlier Detection Procedures and Robust Estimation Methods in GPS Positioning," *Journal of Navigation*, Vol. 62, No. 4, 2009, pp. 699-709.

[23] Wieser, A. and Brunner, F. K., "SIGMA-F: Variances of GPS Observations Determined by a Fuzzy System," *Proceedings of the IAG Scientific Assembly*, 2001, pp. 1-6.

[24] Mosavi, M. R., *Data Processing in Single Frequency GPS Receivers,* Publications of Iran Univercity of Science and Technology, 2010 (In Persian).

[25] Hu, H. and Fang, L., "GPS Cycle Slip Detection and Correction Based on High Order Difference and Lagrange Interpolation," *International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System,* Vol. 1, 2009, pp. 384-387.

[26] Wu, J. F. and Huang, Y., "GPS Precise Point Positioning Models and Their Utility Analysis," *Journal of Geodesy and Geodynamics,* Vol. 28, No. 1, 2008, pp. 96-100.

[27] Le, A. Q. and Teunissen, P. J. G., "Recursive Least-Squares Filtering of Pseudorange Measurements," *Proceedings of the European Navigation Conference,* 2006, pp. 1-11.

[28] Xiaojing, D., Li, L. and Huaijian, L., "Experimental Study on GPS Non-linear Least Squares Positioning Algorithm," *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Vol. 2, 2010, pp. 262-265.

[29] Cox, E., *The Fuzzy Systems Handbook*, 2nd Edition, Academic Press, 1998.