

یک الگوریتم جدید برای هموارسازی فازی سیگنال‌های داده غیریقینی و بررسی خواص طیفی آن

حامد شکوری گنجوی، محمدحسین کاظمی

استادیار دانشگاه شاهد

shakouri@shahed.ac.ir

چکیده

روش‌های متنوعی برای هموارسازی داده‌ها وجود دارند که حذف نوسانات غیرمترقب در منحنی‌های داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری هدف اصلی آن‌ها است. در این مقاله یک الگوریتم مبتنی بر دیدگاه فازی در تشخیص همواری و ناهمواری منحنی و حذف آن‌ها برای این منظور ارائه شده است. در این روش زاویه‌های منحنی سیگنال گسسته با متغیر زمانی <تیزی> ارزش‌گذاری شده و تیزی نقاط <بسیار تیزی> با حفظ اندازه ثابت انتگرال در محدوده نقاط مجاور کاهش داده می‌شود. خواص طیفی (*Spectral*) این روش در مقایسه با روش هموارسازی میانگین متحرک مقایسه و همانند ویژگی‌های حوزه زمان، نتایج بسیار مطلوب تری را نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: پایگاه قوانین فازی - هموارسازی - تحلیل طیفی - هموارسازی فازی - صافی‌های فازی

۱- مقدمه

کاربرد روش‌های مختلف هموارسازی فازی در زمینه‌های متنوع علوم و فنون بسیار گسترده است. پردازش تصویر و یا تشخیص لبه‌ها در تصاویر یک زمینه کاملاً شناخته شده و پرکاربرد است [۴-۱]. به عنوان یک مسأله خاص در این راستا می‌توان به حذف نویزهای ضربه در سیگنال‌ها اشاره کرد [۵]. تحلیل و پردازش صدا نیز یک زمینه پرکاربرد دیگر است [۶]. سرعت پردازش و حصول همزمان سیگنال هموارشده از مشکلات عمومی روش‌های هموارسازی و از جمله این روش‌ها است که به آن نیز پرداخته شده است [۷]. زمینه‌های گوناگون دیگری را نیز می‌توان شمرد که از حوصله این مقاله خارج است [۸-۱۱].

در این مقاله روش مستقیم و ساده‌ای برای هموارسازی سیگنال‌ها ارائه و تحلیل طیفی شده است. این روش هموارسازی بویژه در زمینه حذف عدم قطعیت از سیگنال‌های داده در سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، کاربردهای زیادی داشته است [۱۲-۱۴]. جالب توجه است که خطا در سیگنال‌های داده از متغیرهای زمانی و مفاهیم کیفی و یا حتی کمی نه تنها ناشی از اندازه‌گیری‌ها است بلکه بدلیل نادقیق بودن تعاریف نیز می‌باشد. از این رو گاهی در اندازه‌گیری این مفاهیم مقادیر ثابت شده در یک نمونه در واقع با نمونه‌های مجاور هم پوشانی داشته و در آنها سهمیم است. همین واقعیت منشأ پیشنهاد و بکارگیری این روش بوده است.

اگرچه الگوریتم بکار رفته یک فرایند غیرعلی (Noncausal) را حاصل نموده است، اما در کاربردهای مزبور یعنی برای سیستم های اقتصادی و اجتماعی مشکلی را از این بابت بوجود نمی آورد. بعلاوه روش ارائه شده قابل توسعه به یک روش تطبیقی بوده و تعمیم آن برطبق یک فرایند علی میسر است. از سوی دیگر کند بودن این گونه سیستم ها زمان کافی برای انجام محاسبات لازم را فراهم می آورد که نیاز به همزمانی را منتفی می سازد.

۲- روش پیشنهادی هموارسازی فازی

ابتدا سیگنال اولیه را $x(t)$ و هموارشده آن را $y(t)$ نام می نهیم. از نماد زیر برای نمایش هموارسازی فازی استفاده می

کنیم:

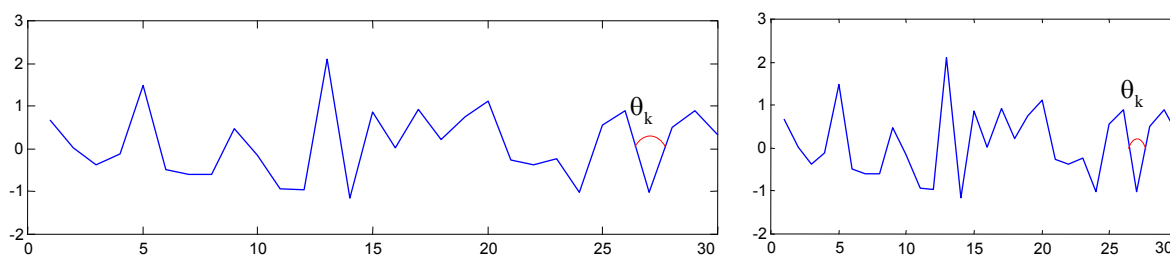
$$y(t) = S_F\{x(t)\} \quad (1)$$

چنانچه اشاره شد، این روش با الهام از مفهوم هموارسازی بر تشخیص مستقیم تیزی (Sharpness) ها در یک منحنی و حذف آن ها استوار است. در واقع می توان آن را در یک قانون ساده بصورت زیر خلاصه نمود:

(۲) اگر تیزی منحنی در نقطه k زیاد باشد، آنگاه اندازه منحنی در این نقطه با نقاط مجاور مشارکت داده می شود.

آنچه مهم است، در طرف مقدم از این قانون تفکیک نقاط به تیز و هموار است و در طرف تالی تعیین میزان مشارکت نقاط مجاور در اندازه منحنی. در ادامه به این موارد پرداخته می شود.

برای تشخیص تیزی و در واقع ناهمواری، محاسبه زاویه شکست در هر نقطه از منحنی قدم اول است. بدیهی است که منحنی حاصل از اندازه گیری ها لاجرم یک سیگنال گسسته است. بنابراین محاسبه زاویه شکست در هر نقطه بدون مشکل انجام می شود. نکته ای که هست آن که با توجه به وابستگی زوایای ظاهری به انتخاب اندازه مقیاس در محور طولی، محاسبه زوایای نسبی ضرورت دارد. (شکل) یک منحنی ناهموار را که با دو مقیاس مختلف برای محور طول ها رسم شده است نشان می دهد.



شکل ۱- یک منحنی ناهموار که با دو مقیاس مختلف رسم شده است.

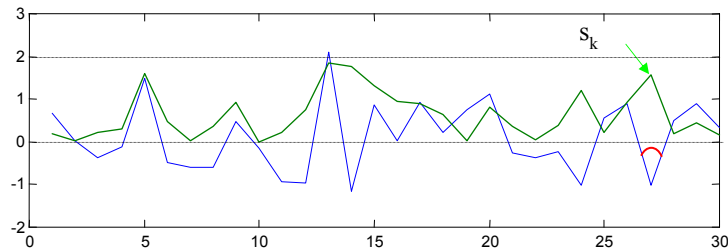
واضح است که این موضوع در مورد محور عرضی هم صدق می کند. یعنی با تغییر مقیاس در آن محور هم زوایای ظاهری متفاوت ظاهر خواهند شد. برای تصحیح محاسبه زوایا، لازم است تغییرات تابع بر عدد مناسبی که با متوسط اندازه تغییرات متناسب است، تقسیم شده و نرمالیزه گردد. گفتنی است که مقدار مطلق زوایا مدنظر بوده و مثبت یا منفی بودن آن ها از نظر هموارسازی تفاوتی ندارد. از این رو، رابطه مقابل بعنوان شاخص (index) تعیین تیزی در هر نقطه بکار گرفته شده است:

$$s_k = \cos(\theta_k) + 1 \quad (3)$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \left| \frac{x_k - x_{k-1}}{\gamma(t_k - t_{k-1})} \right| + \tan^{-1} \left| \frac{x_{k+1} - x_k}{\gamma(t_{k+1} - t_k)} \right| \quad (4)$$

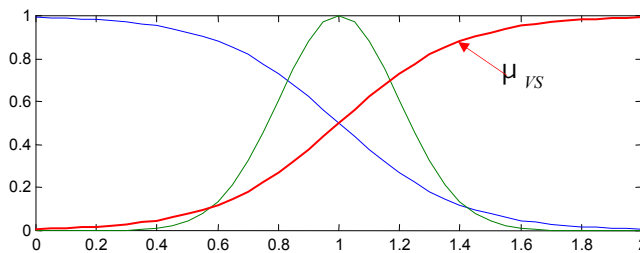
که در آن: $\gamma = (\text{constant}) E\{\Delta x\}$

به سادگی مشخص می شود که اندازه شاخص تعریف شده از صفر (برای ۱۸۰ درجه) تا ۲ (برای صفر درجه) متغیر است. در شکل (۲) این شاخص برای همان منحنی رسم شده است.



شکل ۲- شاخص های تیزی برای منحنی شکل ۱

در مرحله بعد باید نقاطی که <تیزی> به حساب می آیند تشخیص داده شوند. اولین پارامتر قابل انتخاب در این روش در همین مرحله مطرح می شود. یک مجموعه ساده توابع عضویت می تواند به صورت شکل) در نظر گرفته شود.



شکل ۳- توابع عضویت نمونه برای متغیر زبانی <تیزی> مبتنی بر شاخص تیزی (۳). منحنی سمت راست "بسیار تیز" را نشان می دهد.

به این ترتیب نقاطی که دارای زاویه نزدیک به صفر تا حدود ۴۵ درجه دارند با درجه عضویتی بیش از ۰/۹ "بسیار تیز" بشمار می روند. همچنین نقاطی با زاویه نزدیک ۱۸۰ درجه "غیر تیز" یا "صاف" خواهند بود. بکارگیری تنها یک تابع عضویت برای تشکیل قانون فازی (۲) کافیست.

در طرف تالی مفهوم <مشارکت> با تکیه بر ثابت بودن اندازه انتگرال منحنی اصلی، می توان نقطه k ام را چنین اصلاح نمود:

$$y(t_k) = \eta x(t_{k-1}) + (1 - 2\eta)x(t_k) + \eta x(t_{k+1}) \quad (5)$$

که در آن η میزان مشارکت نقاط مجاور است. به منظور ساده سازی محاسبات، در روش حاضر رابطه زیر جایگزین شده است:

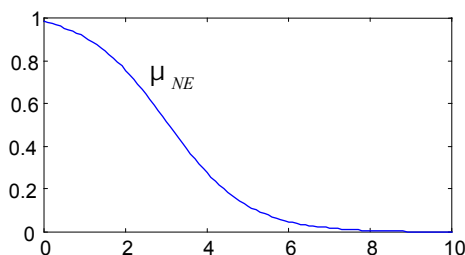
$$y(t_k) = [x(t_{k-1}) + \rho_k x(t_k) + x(t_{k+1})] / (2 + \rho_k) \quad (6)$$

در این رابطه پارامتر ρ مفهوم عکس مشارکت را دارد که می توان آن را <انحصار> نامید و باید برای هر نقطه از منحنی از طریق اعمال قانون فازی (۲) محاسبه شود. این پارامتر از صفر تا بینهایت متغیر است و با افزایش اندازه ρ به سمت بینهایت، اندازه سیگنال در نقطه مورد پردازش تغییر نخواهد کرد. ملاحظه می شود که برای ثابت ماندن اندازه انتگرال منحنی اولیه، باید اندازه سیگنال را در نقاط مجاور بصورت زیر تصحیح نمود:

$$y(t_{k-1}) = x(t_{k-1}) + [x(t_k) - y(t_k)] / 2 \quad (7)$$

$$y(t_{k+1}) = x(t_{k+1}) + [x(t_k) - y(t_k)] / 2 \quad (8)$$

مفهوم <مشارکت> یا <انحصار> (*Exclusiveness*) را نیز می توان با اعمال توابع عضویت مشابهی فازی سازی کرد. در این جا تابع عضویتی مشابه با شکل (۴) برای <انحصار کامل> بکار رفته است.

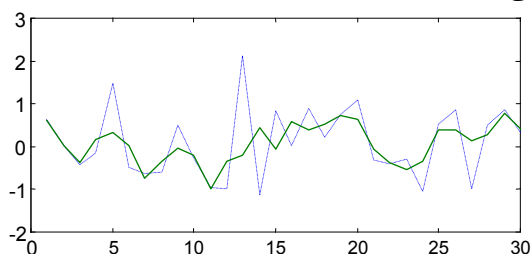


شکل ۴- تابع عضویت نمونه برای متغیر زبانی <انحصار> در رابطه (۶). این تابع عضویت مجموعه فازی <غیرمنحصر> را نمایندگی می کند.

با اعمال تنها یک قانون (۲) که در زیر به بیان ریاضی تکرار شده است، به همراه روابط (۳)، (۴)، (۶) و (۸) روش هموارسازی فازی کامل می شود:

$$R_1 : s_k \in VS \rightarrow \rho_k \in NE ; k=2, \dots, n-1 \quad (9)$$

در اینجا علامت \in برای عضویت در مجموعه فازی بکار رفته و n تعداد نمونه هاست. شکل نشان دهنده نتیجه اعمال این قانون بر منحنی شکل (۱) را نشان می دهد.



شکل ۵- منحنی هموارشده شکل) براساس قانون فازی (۹)

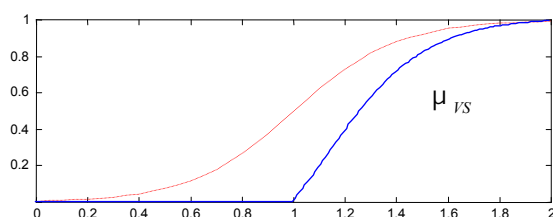
چنانچه در این شکل دیده می شود، اگرچه اعمال روش فوق در مجموع منحنی هموارتری را حاصل کرده است (متوسط شاخص تیزی از ۰/۶۲۱ به ۰/۵۰۷ کاهش یافته است) اما هنوز تیزی هایی را شامل است. قابل توجه است که این مسأله بدلیل روابط (۷) و (۸) قابل پیش بینی بود.

روش اصلاح یافته

در این بخش دو گام اصلاحی برای روش پیشنهادی معرفی می شود. گام اول آنکه پردازش تنها برای نمونه هایی از منحنی اولیه سیگنال داده صورت می گیرد که شاخص تیزی آن ها از حد معین قابل قبولی، مانند $\sigma_0=1$ بیشتر باشد. این به مثابه اصلاح تابع عضویت مجموعه فازی VS در شکل (۳) بصورت شکل (۶) است و یا بجای (۹) می توان آن را چنین نوشت:

$$R_1 : s_k \in VS \rightarrow \rho_k \in NE ; \{k | s_k > \sigma_0\} \quad (1)$$

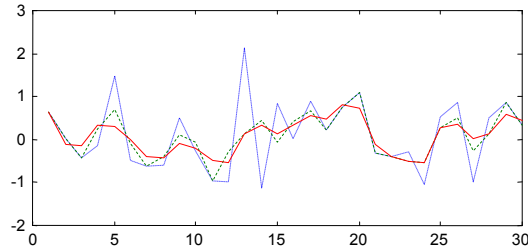
به این ترتیب تعداد قابل توجهی از داده ها از روند اصلی پردازش کنار گذاشته می شوند، اگرچه به واسطه نقاط ناهموار مجاور روابط (۷) و (۸) بر آنها اثر خواهند گذاشت.



شکل ۶- تابع عضویت نمونه برای مجموعه فازی بسیار تیز اصلاح شده در (۱)

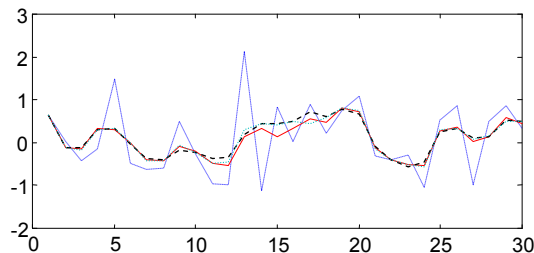
گام دوم که در بخش قبل به آن اشاره شد، پیدایش نقاط جدید ناهموار در طول روند است. بنابر این لازم است پس از پردازش اولیه بار دیگر تیزی نقاط در منحنی جدید اندازه گیری شده و در صورت لزوم فرایند رفع تیزی بر نقاطی که حد پایین قابل قبول در (۱) را تأمین نمی کنند اعمال شود. این یعنی تکرار فرایند تا حذف تمام تیزی ها. شکل (۴) نتیجه این تجربه را نشان می دهد. متوسط شاخص تیزی در این حال به ۰/۴۱۹۱ تقلیل یافته است.

یکی از نکات قابل توجه که نیاز به ادامه تحقیق در مورد خواص این روش را گوشزد می کند، همگرایی روش در صورت تکرار است. با آنکه بطور تجربی حتی برای سیگنال های بسیار طولانی (بیش از ۱۰۰۰ نمونه) اغلب کمتر از ۱۰ تکرار برای هموارسازی کافی بوده است، اما تحلیل ریاضی همگرایی برای این روش مسأله ای قابل بررسی است.



شکل ۷- هموارسازی فازی با فرض $\sigma_0=1$ و ۱ تکرار (خط چین سبز) و ۵ تکرار (خط قرمز)

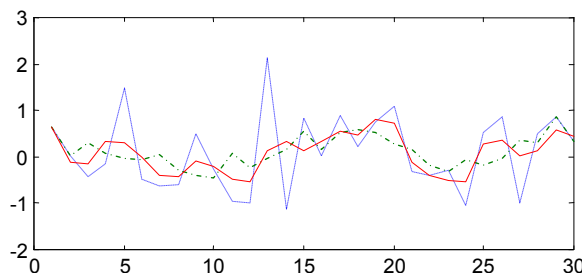
اگرچه با توجه به سادگی قانون فازی تمام فرایند را می توان بصورت روابط ریاضی ساده ای فرمول بندی کرده و به اجرا در آورد، درعین حال اقدامات دیگری نیز برای سرعت بخشیدن به روش قابل انجام هستند. از جمله در تجربه ای که انجام گرفته حذف مرحله محاسبه ρ_k برای هر نقطه و اعمال یک پارامتر مشارکت (انحصار) ثابت برای تمام نقاط است. این موضوع با فرض اعداد ثابتی مانند $\rho=2,3$ آزمایش شده که در شکل (۸) عدم مغایرت جدی نتایج (با ملاحظه می شود).



شکل ۸- هموارسازی فازی با فرض $\rho=2$ (خط چین سبز) و $\rho=3$ (خط چین سیاه)

به این ترتیب بدون از دست رفتن مزایای قبلی، هموارساز فازی پیشنهادی به یک صافی غیرخطی نسبتاً ساده تقلیل می یابد. در انتهای این بخش جا دارد نتایج هموارسازی فازی را در حوزه زمان نیز با هموارسازی معمولی مانند صافی میانگین متحرک مقایسه کنیم. رابطه زیر کلی ترین شکل یک هموارساز میانگین متحرک از درجات M و N را نشان می دهد:

$$y(t) = S_M\{x(t)\} = \frac{1}{M+N+1} \sum_{k=-M}^N x(t+k) \quad (2)$$



شکل ۹- هموارسازی فازی (خط قرمز) در مقایسه با صافی میانگین متحرک $M=N=1$ (خط چین سبز)

تفاوت دو سیگنال هموارشده با یکدیگر کاملا چشمگیر است. خروجی صافی میانگین متحرک علاوه بر شباهت کمتر به سیگنال اصلی، هنوز ناهمواری های قابل توجهی را داراست. باتوجه به اینکه هموارسازی فازی پیشنهادی در این مقاله تنها برای نقاط غیرهموار منحنی صورت می گیرد و اطلاعات نهفته در دیگر نقاط را حفظ می کند، درمقابل سایر روش های هموارسازی از جمله صافی هموارسازی میانگین متحرک (۲) که تمام نقاط را تغییر می دهد ارجح است.

ویژگی دیگری که وجود دارد آن است که درمقایسه با صافی معمولی فوق برای تصحیح نقاط در هر نقطه تأخیر به اندازه تنها یک نمونه کافی است و از این نظر در واقع با هموارسازی به $M=N=1$ مشابه است، اما پاسخ بهتری دارد. از این روی استفاده از آن در محاسبات همزمان نیز میسر است.

پس بطور خلاصه مزایای صافی فازی در حوزه زمان را می توان چنین برشمرد:

- (۱) پردازش تنها برای برخی نقاط و نقاط مجاور آنها انجام می شود،
- (۲) اطلاعات موجود در داده های اصلی بیشتر حفظ می شود،
- (۳) ناهمواری های منحنی پردازش شده کمتر است.

تحلیل طیفی روش های پیشنهادی هموارسازی فازی در مقایسه با هموارسازی میانگین متحرک

علاوه بر مزایای هموارسازی فازی حاضر که اشاره شد، در حوزه فرکانس نیز می توان خواص آن را با دیگر روش ها مقایسه نمود. در اینجا از تبدیل فوریه دوروش برای مقایسه آنها استفاده می شود. پاسخ فرکانسی صافی (۲) از رابطه ای مانند (۱) حاصل می شود:

$$P_M(f) = F \{S_M\{y(t)\}\} = \frac{\sin^2(\beta\pi f)}{(\beta\pi f)^2} \quad (3)$$

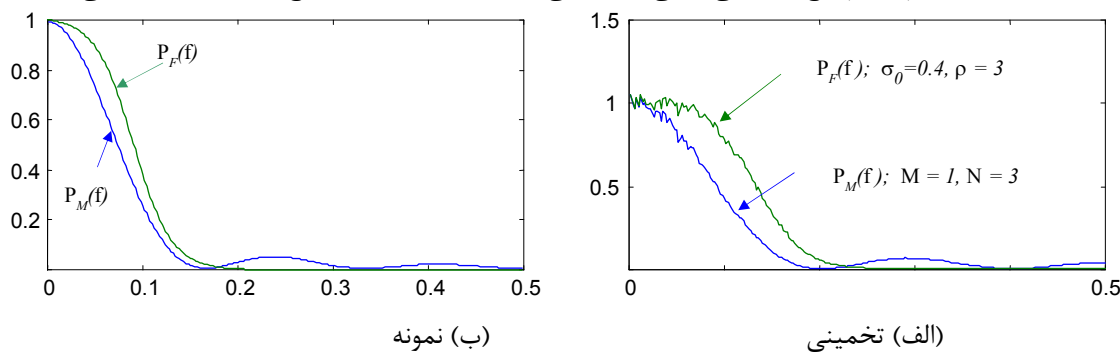
اما محاسبه تحلیلی تبدیل فوریه برای خروجی صافی هموارسازی فازی میسر نیست و تنها می توان از روش های عددی برای تخمین آن مدد جست. با انجام این تخمین به کمک شبیه سازی مونت - کارلو در مورد هزاران سیگنال نویز سفید، تابع چگالی طیفی سیگنال خروجی این صافی منحنی های مشابه با سیگموئید بدست آمده است:

$$P_F(f) = F \{S_F\{x(t)\}\} = \frac{1}{1 + e^{\alpha(f-\mu)}} \quad (2)$$

که در آن پارامترهای α و μ بستگی کامل با پارامترهای ρ و σ_0 دارند. نا گفته نماند در این مطالعه تنها هموارسازی با فرض ρ ثابت انجام شده و بدلیل مشابهت نتایج برای سایر الگوریتم ها از تکرار آن ها اجتناب شده است.

شکل (۱۰) مقایسه مزبور را عینیت می بخشد. ملاحظه می شود که:

- (۱) صافی فازی در فرکانس های بالا تضعیف را بطور ایده ال انجام می دهد،
- (۲) لبه برش در صافی فازی تندتر و با شیب بیشتری فرکانس های بالا را حذف می کند،
- (۳) در فرکانس های پایین پاسخ فرکانسی صافی فازی افقی تر بوده و باند عبور اعوجاج کمتری را حاصل می کند.



شکل ۱۰- چگالی طیفی صافی هموارسازی فازی در مقایسه با صافی (۲)

به نظر می رسد که بتوان رابطه متناظری بین پارامترهای دو نوع صافی فوق برقرار نمود بطوریکه کاربر بتواند با شناختی که از صافی میانگین متحرک دارد صافی هموارساز فازی معادل آن را طراحی کرده و بکار بگیرد.

خلاصه الگوریتم

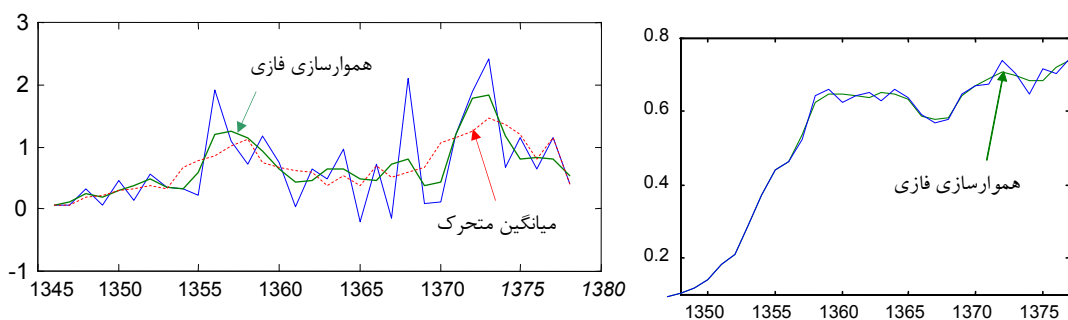
اجازه دهید در اینجا الگوریتم ساده ترین و کارآمدترین روش هموارسازی را که در بخش های پیش مورد مطالعه قرار گرفت در چند خط خلاصه کنیم:

- (۱) براساس مشتق تابع زاویه منحنی و سپس شاخص تیزی را در هر نقطه طبق (۳) محاسبه کنید.
- (۲) با تعریف توابع عضویت فازی مناسب، میزان <تیزی> منحنی در هر نقطه را بصورت یک متغیرزبانی تعیین کنید.
- (۳) در مجموعه نقاطی که عنوان "بسیار تیز" به خود می گیرند، نقاط متعلق به یک برش (α - cut) دلخواه را بیابید و به ترتیب نزولی مرتب کنید. انتخاب برش بعنوان یک پارامتر طراحی، براساس پهنای باند عبور قابل تعیین است.
- (۴) برای تعیین میزان مشارکت نقاط مجاور عددثابتی راکه پارامتر دیگری در طراحی محسوب می شود، انتخاب کنید.
- (۵) اندازه تابع در این نقاط را با ضریب وزنی انتخاب شده در مرحله (۴) با اندازه تابع در دو نقطه مجاور متوسط گیری و جایگزین کنید: رابطه (۶).
- (۶) اندازه تابع در دونقطه مجاور را چنان تغییر دهید که انتگرال تابع ثابت بماند: روابط (۷) و (۸).
- (۷) پس از انجام عملیات فوق، بار دیگر به مرحله (۱) رفته و زاویه منحنی را در هر نقطه محاسبه کنید.
- (۸) عملیات فوق را تا جایی که هیچ نقطه ای متعلق به برش یاد شده باقی نماند، ادامه دهید.

کاربردها

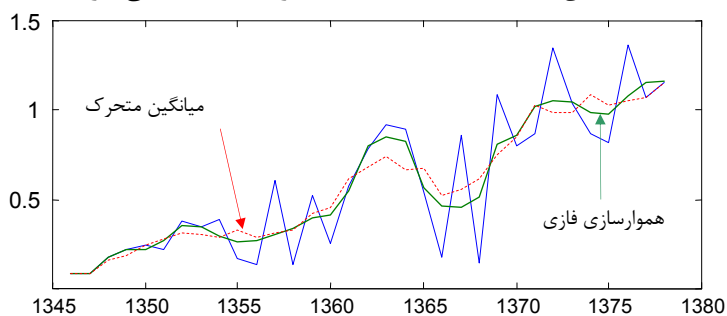
از روش پیشنهادی در این مقاله برای هموارسازی سیگنال های داده در مدل سازی سیستم های اقتصادی بهره گرفته شده و نتایج خوبی حاصل شده است. عموماً مشتق سیگنال های اندازه گیری شده در این سیستم ها بدلائل بسیار از جمله خطای اندازه گیری و مهم تر از آن، تعریف نادقیق مفاهیم دچار اعوجاجات و نوسانات ناخواسته و نامطلوب هستند که نتایج بررسی و تحلیل را خدشه دار می نمایند. در اینجا تنها بعنوان مثال به تخمین ثروت، رشد ظرفیت تولید انرژی الکتریکی (قدرت نامی یا عملی) و تغییرات تقاضای انرژی الکتریکی اشاره می شود.

یکی از روش های تخمین ثروت در اقتصاد نسبت نقدینگی به سطح عمومی قیمت هاست. بدیهی است نوسانات ثروت یک جامعه نمی تواند چندان شدید باشد. هموارسازی فازی برای حذف نوسانات نامعقول در این تخمین کاملاً مناسب است. در مورد مثال دوم نیز روشن است که اگرچه آمار ارائه شده در گزارش های رسمی حاکی از میزان توان افزوده شده تولید به جمع نیروگاه های کشور در هر سال است، اما چه از نظر اقتصادی و چه از نظر اجتماعی تغییرات آن نمی تواند از یک سال تا سال بعد تفاوت زیادی داشته باشد. منظور آن است که اولاً حصول نتیجه از سرمایه گذاری انجام شده در هر سال زمان بر است. بنابراین اندازه گیری های مربوط به هر سال در حقیقت با سال های دیگر همپوشانی داشته و بطور نسبی مشترک است. درثانی بهره برداری اجتماع از میزان انرژی قابل تأمین نیز بطور ناگهانی افزایش نیافته و نیازمند زمان است. برای تحلیل واستفاده صحیح از منحنی مثال سوم نیز به همین دلیل باید آن را هموارسازی نمود. شکل (۱۱) منحنی های اصلی را در مقایسه با هموارشده آن ها نشان می دهد.



(ب) تغییرات قدرت عملی نیروگاه ها

(الف) تخمین ثروت و هموارسازی فازی آن



شکل ۱۱- نمونه های کاربرد هموارسازی فازی

نتیجه

در این مقاله روشی نوین برای هموارسازی سیگنال های دارای اعوجاج و ناهموازی زیاد ارائه شد که از دیدگاه فازی در زدودن تیزی های منحنی داده ها نشأت می گیرد. روش فازی پیشنهادی می تواند با اعمال برخی ساده سازی ها بسیار سریع داده ها را پردازش کند و در این حال به یک صافی غیرخطی ساده تبدیل می شود. خواص این صافی در حوزه زمان و فرکانس بررسی و مزایای آن برشمرده شد. کیفیت بهتر این خواص در برابر هموارسازی خطی مانند میانگین گیری، کارایی آن را نشان داده و کاربرد آن را بویژه برای داده های اندازه گیری شده در سیستم های اجتماعی و اقتصادی توصیه می کند. در مطالعات بعدی می توان پارامترهای طراحی این صافی فازی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و معیارهای لازم را ارائه کرد. همچنین ارائه مدل های دیگر مشابه بخصوص صافی های علی می تواند موضوع پژوهش های دیگری باشد.

منابع

- [1] HiRoaki Ishii, Akira Taguchi, Mototaka Sone, "The edge detection from images corrupted by mixed noise using fuzzy rules", IX European Signal Processing Conference, September 8 - 11, 1998.
- [2] Kuo, Y. H.; Lee, C. S.; Liu, C. C. , "A New Fuzzy Edge Detection Method for Image Enhancement", The Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, Spain, July 1-5, 1997.
- [3] Rong Chung Chen, Pao-Ta Yu, "Nonlinear Filter Design Based on Fuzzy Inference Rules for Image Processing", IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing (NSIP97*) , Mackinac Island, Michigan, USA, Sept. 1997.
- [4] Q. Shen, "Fuzzy image smoothing", Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, pages 74-78, 1990.
- [5] F. Russo, G. Ramponi, "A Fuzzy Filter for Images Corrupted by Impulse Noise", IEEE Signal Processing Lectures, vol. 3. no. 6, 1996.
- [6] F. Beritelli, "Multichannel Speech/Silence Detector Based on Time Delay Estimation and Fuzzy Classification", ICASS Conf. 1999.
- [7] G.C. Cardarilli, M. Re, R. Lojacono, L. Carfagnini, "High Speed Fuzzy Filter for Non-Linear Channel Equalization", Proc. Int. Symp. Fuzzy Logic, (ISFL'97), 1997.
- [8] Akira Taguchi, Susumu Takaku, "Fuzzy Weighted Median Filters", IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, Michigan USA, September 8-10, 1997 .
- [9] Withold Pedrycz, "Conditional Fuzzy C-Means", PRL Journal, vol. 17, No. 6, pp 625-631, May 15 1996.
- [10] Akira Taguchi, "A design method of fuzzy weighted median filters", IEEE International Conference on Image Processing, pages 423-426, 1996.
- [11] Ren Hwang Yean, M. Tomizuka, "Fuzzy Smoothing Algorithms for Variable Structure Systems", IEEE Tran. On Fuzzy Syst, vol.2, no. 4, pp. 277-84, Nov. 1994.
- [12] H. Shakouri G., J. Nazarzadeh, K. Y. Nikravesh, "Exogeneity Investigation and Modeling Energy Demand via Parallel Dynamic Linear Models for Maximum Simultaneous Power Demand", Proc. IEEE Conf. Cntrl. Appl. , p.p. 355-360, Istanbul, June 2003.
- [13] H. Shakouri G., J. Nazarzadeh, K. Y. Nikravesh, "Selected Hybrid Nonlinear Model for Maximum Simultaneous Electric Power Demand in a Developing Country", Proc. IEEE DPRT Conf., HongKong, Apr. 2004.

[۱۴] ح. شکوری گنجوی، مدل سازی دینامیکی و شناسایی سیستم اقتصاد کلان ایران، رساله دکتری مهندسی کنترل سیستم، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۸.