

تشخیص خودکار خطا در شبکه حسگرهای دمایی مبتنی بر فیلتر کالمن و جبران‌سازی

برخط خطا با استفاده از الگوریتم ژنتیک

زهرا خداداد^۱، یاسر بالغی^۲ و حسین میارنعمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران

zahra.khodadad@stu.nit.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران

y.baleghi@nit.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران

h_miare@nit.ac.ir

چکیده: جایگاه حسگرها در صنایع و علوم مختلف به عنوان یک عنصر اساسی و حیاتی، غیرقابل انکار است. بنابراین، موضوع خطایابی و رفع خطا در حسگرها اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، یک شبکه از حسگرها شامل چند حسگر دما در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که متوسط دمای حسگرها به عنوان دمای اندازه‌گیری شده در نظر گرفته می‌شود. برای مقاوم‌سازی سیستم در مقابل خطا، ابتدا با استفاده از فیلتر کالمن خطای واقع شده تشخیص داده شده است و سپس، با استفاده از الگوریتم ژنتیک آرایش سیستم اندازه‌گیری دما به شکلی مناسب تغییر داده می‌شود به گونه‌ای که خطای واقع شده تأثیری در دمای قرائت شده، نداشته باشد. در این مقاله، خطای بایاس، مقیاس، خطای سخت و نویز زیاد مطالعه شده‌اند. برای ارزیابی کارایی ساختار پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی در نرم‌افزار مطلب انجام شده است. این شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که برای طیف وسیعی از شدت خطا سیستم به شکل موثر مقاوم است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، تشخیص خطا، تصحیح خطا- حسگرحرارتی، سخت‌افزار تکامل پذیر، فیلتر کالمن

۱- مقدمه

مدارات، افزایش یافته است. زمین به طور مداوم تحت بررسی ده‌ها ماهواره از مدار این سیاره است. این ماهواره‌ها به جمع‌آوری اطلاعات می‌پردازند. ماهواره‌ها داده‌های محیطی و غیر محیطی را معمولاً با استفاده از حسگرها به دست می‌آورند. عملکرد، دوام و مقاومت حسگرها در مقابل خطاهای مختلف در شرایطی که امکان تعویض یا رفع عیب وجود ندارد، اهمیت زیادی دارد. بنابراین، تشخیص و تصحیح خطا در این موارد اهمیتی دو چندان می‌یابد. یکی از این گونه حسگرها کاربردی، حسگرهای فضایی مورد استفاده در ماهواره‌ها هستند. از حسگرهای فضایی می‌توان به حسگرهای خورشیدی، حسگر ستاره، ژيروسکوپ،

با پیشرفت مدارات الکترونیکی و روند رو به کاهش سایز قطعات و فشردگی هر چه بیشتر مدارات، احتمال وقوع خطا در مدارات الکترونیکی افزایش یافته است. بنابراین اهمیت تشخیص و تصحیح خطا در این گونه از

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۱۱/۰۳

نام نویسنده مسئول : زهرا خداداد

نشانی نویسنده مسئول : ایران - بابل - خیابان شریعتی - دانشگاه

صنعتی نوشیروانی بابل - دانشکده برق

را به گونه‌ای تغییر دهد که تنها حسگرهای سالم تعیین کننده خروجی سیستم باشند، خطا یاد شده، جبران می‌شود. روش تصحیح خطا می‌تواند نرم‌افزاری یا سخت‌افزاری انجام شود.

در روش‌های سخت‌افزاری، از سخت‌افزارهای تکامل‌پذیر برای جبران خطا استفاده می‌شود. از سخت‌افزارهای تکامل‌پذیر می‌توان از FPGA و FPTA، FPAF نام برد. در کارهای قبلی بیشتر از سخت‌افزار آنالوگ FPAF در زمینه تصحیح خطا در حسگرهای دمایی استفاده شده است [۳]. علت انتخاب سخت‌افزار آنالوگ FPAF نسبت به سخت‌افزارهای دیجیتال آن است که دیگر نیاز به مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ برای ذخیره کردن و بازبینی منابع اندوخته‌ها نیست. همچنین، معادل آنالوگ توان مصرفی کمتری دارد. که این مسأله در کاربردهای بدون سیم و شرایطی که فراهم کردن انرژی سخت است، از اهمیت زیادی برخوردار است. استفاده از طراحی آنالوگ به صورت بالقوه سطح مرده کمتری در مدار نسبت به نوع دیجیتال به جا می‌گذارد.

در روش‌های نرم‌افزاری از الگوریتم‌های متفاوتی برای تشخیص و تصحیح خطا بهره برده شده است که از آن جمله می‌توان به الگوریتم فیلتر کالمن [۴ و ۵]، شبکه‌های عصبی [۱]، سیستم‌های مبتنی بر دانش [۶]، الگوریتم ژنتیک [۳] و... اشاره کرد. پژوهش‌های زیادی در زمینه تشخیص و جبران‌سازی خطا به روش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری انجام شده است.

در سال ۲۰۰۶ هیرفورد^۱ با استفاده از روش فیلتر کالمن موفق به تشخیص خطا در حسگرهای مقاومتی (PRTD) شد [۳ و ۴]. با استفاده از مقایسه سیگنال تخمین زده شده حاصل از فیلتر کالمن با سیگنال اصلی، وقوع خطا تشخیص داده شد. نحوه تشخیص خطا با استفاده از فیلتر کالمن در مقاله یاد شده با استفاده از آستانه‌گذاری انجام شده است. اختلاف بیشتر از حد آستانه این دو سیگنال، به عنوان خطا در حسگر تشخیص داده می‌شود. در این پژوهش تنها دو خطای اتصال کوتاه و مدار باز بررسی شده است. در این

مگنومتر، حسگرهای آشکارساز سنگ‌های آسمانی، حسگرهای دمایی و... اشاره کرد.

حسگرهای دمایی از جمله حسگرهایی هستند که کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علوم دارند. حسگرهای دمایی انواع مختلفی مانند مقاومتی، ترموکوپل یا ترمیستور و... داشته و در بسیاری از زمینه‌های کاربردی به کار می‌روند. از این نوع حسگرها در کاربردهای فضایی [۱]، هواشناسی [۲] و کاربردهای اختصاصی بسیاری در صنایع و علوم مختلف استفاده می‌شود. حسگرهای دمایی بسیار مستعد خطا هستند به همین علت طراحی شبکه‌های حسگرهای دمایی مقاوم در برابر خطا یکی از موضوعات پژوهشی مورد توجه پژوهشگران است [۳].

در حسگرهای دمایی خطا در اثر تغییرات ناهمگون در ترکیب فلزاتی که در حرارت‌های بالا قرار می‌گیرند و همچنین، ایجاد گرما در اثر عبور جریان در حسگر و ایجاد فشار بر اثر شوک و نوسان، ایجاد می‌شود. اگر حسگر به طور مداوم در معرض حرارت‌های بالا قرار گیرد، به ازای هر سال، چندین درجه دچار خطا خواهد شد. مجموعه این شرایط نامطلوب فیزیکی که در حسگر ایجاد می‌شود، باعث ایجاد خطاهای مختلفی مانند بایاس، مقیاس و انواع دیگر خطاها خواهد شد [۱].

معمولاً برای رفع خطای ایجاد شده در حسگرها از روش ایجاد افزونگی استفاده می‌شود. در این روش، در صورت وقوع خطا در یک حسگر، می‌توان از حسگرهای دیگر استفاده کرد. در این پژوهش، فرض شده است که حسگرها در یک مکان در فاصله نزدیکی از هم قرار گرفته‌اند. جایگزینی حسگرها به شکل فیزیکی همواره ممکن و ساده نخواهد بود و یا در صورت امکان باعث وقفه در روند اندازه‌گیری دما می‌شود. برای مثال در سامانه‌های دور دست مانند ماهواره‌ها، این امکان وجود ندارد. در عمل همه حسگرها به اندازه‌گیری مشغول هستند و خروجی به‌دست آمده میانگین خروجی‌های آنهاست که در صورت وقوع خطا می‌توان آن را آشکار و رفع کرد. بدیهی است با به کارگیری الگوریتمی که آرایش حسگرها

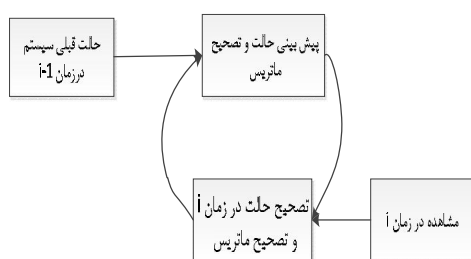
الگوریتم ژنتیک ارایه شده است و در فصل ششم شبیه‌سازی‌های انجام شده به همراه ارایه نتایج آورده شده است. در فصل آخر نیز راهکارهای ارایه شده برای کارهای بیشتر در آینده پیشنهاد شده است.

۲- پیش‌زمینه

قبل از بیان الگوریتم حل مسئله که در این مقاله ارایه شده است، لازم است مفاهیم پایه‌ای به کار گرفته شده در این پژوهش بیان شود. الگوریتم‌های مورد استفاده در این مقاله، الگوریتم فیلتر کالمن و الگوریتم ژنتیک است که از فیلتر کالمن در تشخیص خطای حسگرها و از الگوریتم ژنتیک در جهت رفع خطای ایجاد شده در حسگرها بهره گرفته شده است.

۲-۱- فیلتر کالمن

فیلتر کالمن یک فیلتر بازگشتی است که حالت یک سیستم را با استفاده از اندازه‌گیری‌های همراه با خطا برآورد می‌کند [۵]. شکل (۱)، تصویر کلی الگوریتم فیلتر کالمن را نشان می‌دهد. در این فیلتر با توجه به مدل دینامیکی توصیف‌کننده سیستم در حضور نویز مقادیر لحظه‌ای خروجی و متغیرهای سیستم پیش‌بینی می‌شود.



شکل (۱): نحوه عملکرد فیلتر کالمن

نحوه عملکرد فیلتر کالمن در دو مرحله اصلی خلاصه می‌شود. مرحله اول مرحله پیش‌بینی نامیده می‌شود. در گام پیش‌بینی، با استفاده از حالت فعلی و مدل دینامیکی سیستم، حالت بعدی سیستم پیش‌بینی می‌شود. مدل دینامیکی، نحوه

مقاله، از سخت‌افزار تکامل پذیر FPAA، برای جبران خطا استفاده شده است.

ادوارد بالابان^۲ به همراه همکارانش در سال ۲۰۰۹ با استفاده از مدل‌کردن انواع خطاها در حسگرهای فضایی، تشخیص خطاها را با استفاده از شبکه‌های عصبی چند لایه انجام داده‌اند. نقطه قوت این بررسی، ارایه پژوهشی در زمینه انواع حسگرهایی است که دارای کاربرد فضایی‌اند و همچنین، انواع خطاها ممکن به همراه مدل ریاضی آن‌ها که در هر یک از حسگرها ممکن است به وجود بیاید [۱]. در پژوهش یاد شده تنها فرآیند تشخیص خطا، آن هم تنها برای سه نوع خطای بایاس، مقیاس و دررفت، انجام شده است و در مورد جبران‌سازی خطا، گزارشی ارایه نشده است.

این گروه پژوهشی در سال ۲۰۱۲، تشخیص و تصحیح خطا در حسگرهای فضایی را با استفاده از روش سیستم‌های مبتنی بر دانش انجام دادند که برتری‌ها و نقایصی نسبت به روش شبکه‌های عصبی داشت [۶]. وجه تمایز این پژوهش با دو پژوهش گذشته، در جداسازی خطای حسگر از خطای سیستم است. برای تشخیص و جداسازی، از زمان تشخیص خطا به عنوان عامل کلیدی در تمیز دادن این دو نوع خطا بهره برده شده است. البته پژوهش‌ها شامل تمام انواع خطاها نبود و از برخی خطاها چشم پوشی شده بود. در پژوهش‌های انجام شده، خطاهای محدودی در نظر گرفته شده است و در برخی از این پژوهش‌ها نیز فقط تشخیص خطا انجام شده است. در پژوهش‌های گذشته خطاهایی مانند نویز و خطای سخت در نظر گرفته نشده است. در این مقاله، کوشش شده است شبکه حسگرهای با قابلیت آرایش مجدد ارایه شود به گونه‌ای که امکان آشکارسازی و جبران دو خطای یاد شده به همراه خطاهای بایاس و مقیاس فراهم آید. ادامه مقاله به شکل زیر سازماندهی شده است. در فصل دوم پیش‌زمینه‌ای از مفاهیم به کار گرفته شده ارایه شده است. در فصل سوم سیستم پیشنهادی تجدید پذیر مقاوم در مقابل خطا معرفی شده است و الگوریتم کلی حل مسئله بیان شده است. در فصل چهارم نحوه تشخیص انواع خطاها بیان شده است. در فصل پنجم نحوه تصحیح خطا توسط

$$K(t) = p^- H^T (Hp^- H^T + R(t))^{-1} \quad (6)$$

با استفاده از بهره به دست آمده در رابطه (۶)، حالت بعدی سیستم پیش‌بینی می‌شود. در این رابطه K بهره فیلتر کالمن است و همان‌طور که اشاره شد، P ماتریس کوواریانس و R ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری است. در رابطه‌های (۷) و (۸) تصحیح مقادیر پیش‌بینی شده، نشان داده شده است.

$$X^+(t) = X^-(t) + K(t).(L(t) - L^-(t)) \quad (7)$$

$$P^+(t) = P^-(t) - K(t).H.P^-(t) \quad (8)$$

۲-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک از جمله الگوریتم‌های تکاملی است که با الهام از الگوریتم به کار رفته شده در طبیعت، راه کارهایی برای حل بسیاری از مسائل ارایه می‌کند. در گام اول، مجموعه‌ای تصادفی از پاسخ‌ها به عنوان نسل اول انتخاب می‌شوند و در ادامه کوشش می‌شود نسل موجود با مکانیسم تدریجی تکامل داده شده و در نهایت، پاسخ بهینه یا نزدیک به بهینه به دست آید. میزان نزدیکی هر پاسخ در هر نسل، برای هر پاسخ شاخصی به نام تابع برازندگی در نظر گرفته می‌شود. برای تولید نسل بعد از نسل فعلی، پاسخ‌های برازنده‌تر با احتمال بیشتر انتخاب می‌شوند. از ترکیب هر دو پاسخ انتخاب شده با عملگری به نام همبری، دو پاسخ جدید تولید می‌شود. این فرآیند تا تکمیل نسل جدید ادامه پیدا می‌کند.

برای جلوگیری از هم‌گرایی زودرس الگوریتم، عملگر دیگری به نام جهش، تغییر تصادفی کوچکی در نسل جدید ایجاد می‌کند. الگوریتم با دو معیار متوقف می‌شود: الف - زمان اجرای از پیش تعیین شده منقضی شده باشد؛ و ب- کیفیت یا برازندگی پاسخ‌ها به میزان مورد نظر رسیده باشد [۷].

۳- سیستم پیشنهادی تجدید پذیر مقاوم در برابر خطا

در این پژوهش، شبکه‌ای از حسگرهای حرارتی در نظر

عملکرد سیگنال را در یک بازه زمانی نشان می‌دهد. برای سیستم‌های غیرخطی و در حالت کلی معادله دیفرانسیلی به شکل رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$\dot{X}(t) = f(X(t), m(t)) \quad (1)$$

مدل تخمین خطی به شکل رابطه ۲ بیان می‌شود.

$$\dot{X}(t) = F.X(t) + n(t) \quad (2)$$

ماتریس F ، ماتریس دینامیکی نامیده و ثابت در نظر گرفته می‌شود. $n(t)$ نیز نویز دینامیکی نامیده می‌شود که معمولاً به شکل نویز سفید بیان می‌شود و دارای ماتریس کوواریانس $Q(t)$ است. در گام پیش‌بینی متغیری با عنوان کوواریانس خطا به شکل رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$P_k = F.P_{k-1}.F^T + Q(t) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، p معادل کوواریانس خطا تعریف می‌شود. در گام تصحیح، مقدار پیش‌بینی شده در مرحله اول، با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده، تصحیح می‌شود. در تصحیح مقدار پیش‌بینی شده، از مدل مشاهده استفاده می‌شود. مدل مشاهده ارتباط بین حالت و مقادیر اندازه‌گیری است و به شکل روابط (۴) و (۵) تعریف می‌شود:

$$L(t) = h(X(t), W(t)) \quad (4)$$

$$L(t) = H.X(t) + W(t) \quad (5)$$

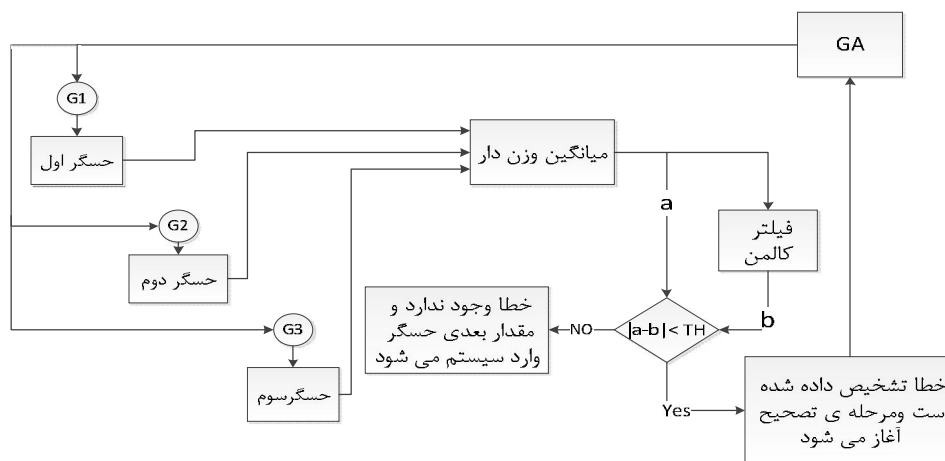
در روابط بالا، L بردار مشاهدات در زمان t ، H ماتریس مشاهدات و W نویز اندازه‌گیری است که دارای ماتریس کوواریانس $R(t)$ می‌باشد. در این پژوهش، نویز اندازه‌گیری و دینامیکی با استفاده از روابط و فرضیات موجود در [۳] و همچنین، مشخصات سیگنال اصلی به دست آمدند. برای اطمینان از عملکرد سیستم، نویز به مقدار بیشتری انتخاب شده است. شایان ذکر است که فیلتر کالمن دارای متغیری به نام بهره کالمن نیز می‌باشد که عمل تصحیح، با به روزرسانی این متغیر انجام می‌شود. با ضرب بهره کالمن در مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از مدل مشاهده، عمل تصحیح انجام می‌شود. رابطه (۶) مربوط به نحوه محاسبه بهره کالمن است.

تغییر داده می‌شوند که خروجی حسگرها به مقدار پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن منطبق شود. برای شبیه‌سازی از داده‌های به دست آمده از پایگاه داده برکلی آمیخته با نویز، به عنوان داده خروجی حسگر استفاده شده است.

پایگاه داده برکلی شامل ۳/۲ میلیون دیتاست. از این پایگاه داده در پژوهش‌های زیادی استفاده شده است [۸]. این پایگاه شامل حجم بالایی از اطلاعات جمع‌آوری شده از حسگرهای دمایی است و شامل مجموعه اطلاعاتی می‌باشد که از ۵۴ حسگر که در نقاط مختلف یک آزمایشگاه قرار داده شده، به دست آمده است. این مجموعه اطلاعات از تاریخ ۲۸ فوریه تا ۵ آوریل سال ۲۰۰۴ در این آزمایشگاه جمع‌آوری شده است. در این مقاله، از بخشی از داده‌های دمایی استفاده شده است.

گرفته شده است به گونه‌ای که دمای اندازه‌گیری شده میانگین دمای حسگرهای موجود در سیستم است. در شکل ۲ نمای کلی سیستم پیشنهادی نشان داده شده است. خروجی هر حسگر در بهره‌ای قابل برنامه‌ریزی ضرب می‌شود. بدیهی است در شرایط عدم وجود خطا این گین برای همه حسگرها مساوی است.

پیش از اعمال هر گونه تغییری در بهره‌های یاد شده، خطا باید تشخیص داده شود. برای این منظور خروجی حسگرها به یک فیلتر کالمن داده می‌شود و این فیلتر مقدار بعدی خروجی را با توجه به دینامیک سیستم تخمین می‌زند. اگر اختلاف مقدار تخمین زده شده با مقدار اندازه‌گیری شده از حد مشخصی بیشتر باشد به عنوان خطا تشخیص داده می‌شود. پس از تشخیص خطا با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهره‌های حسگرهای مختلف به گونه‌ای



شکل (۲): الگوریتم کلی سیستم مقاوم در برابر خطا

طرح شود که در صورت وقوع هر یک از این خطاها، توانایی آشکارسازی خطا را داشته باشد.

همان‌طور که توضیح داده شد، روند تشخیص خطا در حسگرها، توسط فیلتر کالمن از طریق آستانه گذاری انجام می‌شود. رابطه (۹) این حد آستانه را نشان می‌دهد.

$$\text{Threshold} = d \text{ noise} + m \text{ noise} \quad (9)$$

در عبارت بالا $d \text{ noise}$ معادل با نویز دینامیکی است و $m \text{ noise}$ نویز اندازه‌گیری است.

برای تعیین دینامیک سیستم از مثال ارتباط بین متغیر

۴- تشخیص خطا

خطا نتیجه هر گونه نقص فیزیکی یا نرم‌افزاری است که عملکرد یک سیستم را مختل می‌کند. در یک سیستم اندازه‌گیری، انواع مختلف خطا ممکن است واقع شود. در این پژوهش، چندین نوع خطا مدل‌سازی شده و بر روی داده اعمال شده است. هر کدام از خطاها می‌تواند نتیجه یک نقص فیزیکی باشد که در ساختار حسگر به وجود آمده است. در این پژوهش ۴ نوع خطای اصلی در نظر گرفته شده است و کوشش می‌شود سیستم شناسایی به گونه‌ای

همان‌طور که در شکل (۳)-الف نشان داده شده است، خطای بایاس در ثانیه ۷۰ بر روی سیگنال اعمال شده است. خطا با استفاده از اختلاف سیگنال اصلی حامل خطا از سیگنال تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن آشکار می‌شود. هرگاه اختلاف این دو سیگنال از مجموع نویز اندازه‌گیری و نویز دینامیکی بیشتر باشد، به عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود. در روابط (۱۷) تا (۲۰)، X سیگنال اصلی و Y_f سیگنال حاوی خطاست.

۴-۲- خطای مقیاس

در این نوع خطا، دامنه سیگنال در ضریبی (ثابت یا متغیر با زمان)، ضرب می‌شود. مدل ریاضی این نوع خطا به شکل رابطه (۱۸) است. نتایج عملکرد فیلتر کالمن بر روی خطای مقیاس در شکل (۳)-ب نشان داده شده است.

$$Y_f = X \cdot \alpha + noise \quad (18)$$

در خطای بایاس به علت تغییرات شدید در اثر اعمال خطا، نشان دادن عملکرد تشخیص خطا در این مورد بسیار دشوار بود. بنابراین، برای رفع مشکل کوشش شده است، محدوده بسیار کوچک نزدیک به لحظه اعمال خطا نشان داده شود که در این مورد به علت تغییرات شدید باز هم همانند دیگر موارد واضح نیست. α شاخص مقیاس است.

۴-۳- خطای نویز زیاد

خطای نویز زیاد معادل اضافه شدن نویزی با توان بالا در یک بازه زمانی به سیگنال است. به علت توان بالا، نویز سبب تغییرات بزرگ در مقدار اندازه‌گیری شده، می‌شود. مدل ریاضی خطای نویز در رابطه ۱۹ بیان شده است. در این رابطه High noise، نویز زیاد است.

$$Y_f = X + High...noise \quad (19)$$

در شکل (۳) - ج نویز گوسی و سفید با واریانس ۲ به سیگنال اضافه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به علت ماهیت تصادفی نویز، فرآیند تشخیص ممکن است کمی با تاخیر انجام شود. خطای ایجاد شده ممکن است در زمان‌های بعدی از حد آستانه عبور نکند.

مسافت و سرعت در حرکت یک قطار استفاده شده است. در حسگرها نیز می‌توان خروجی حاصل از حسگرها را به عنوان متغیر مسافت در حرکت قطار در نظر گرفت. مسافت و سرعت را می‌توان به شکل ماتریس زیر در نظر گرفت:

$$X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (10)$$

در ماتریس بالا مقدار داده اول بیانگر مسافت و داده دوم بیانگر سرعت است. طبق قانون نیوتن داریم:

$$\Delta X = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t \quad (11)$$

در روابط ۱۱ و ۱۲، a یا a_k شتاب، v_0 سرعت اولیه و t زمان است. همچنین، ΔX تغییرات مسافت است. با مقایسه رابطه مربوط به قانون نیوتن و فیلتر کالمن داریم:

$$X_k = F.X_{k-1} + G.a_k \quad (12)$$

بنابراین:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (14)$$

در رابطه‌های (۱۳) و (۱۴)، Δt اختلاف زمان بین داده فعلی و داده بعدی است. در مدل مشاهده داریم:

$$L = H.X + W \quad (15)$$

$$H = [1 \quad 0] \quad (16)$$

در روابط بالا، L بردار مشاهده، H ماتریس مشاهده و W نویز اندازه‌گیری است. مدل انواع خطاهای مختلف، در زیر آورده شده است.

۴-۱- خطای بایاس

در این نوع خطا یک مقدار ثابت (β) به سیگنال اصلی اضافه می‌شود. در صورت ایجاد این خطا در حسگر، بدون حضور سیگنال ورودی، یک مقدار آفست در خروجی وجود دارد. رابطه مربوط به مدل این نوع خطا در رابطه (۱۷) نشان داده شده است.

$$Y_f = X + \beta + noise \quad (17)$$

۴-۴- خطای سخت

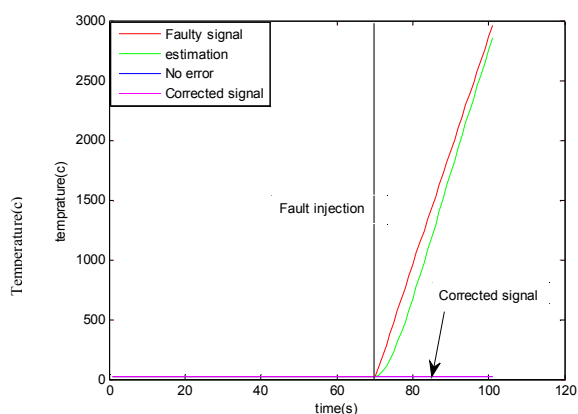
در خطای سخت، قسمتی از سیگنال از بین می‌رود. در این شرایط یک مقدار ثابت به جای سیگنال از بین رفته، قرار می‌گیرد. مدل ریاضی ارائه شده برای این نوع خطا به شکل رابطه (۲۰) است. در این رابطه C مقدار ثابتی است که در اثر ایجاد خطا جایگزین سیگنال اصلی می‌شود.

$$Y_f = C + noise \quad (20)$$

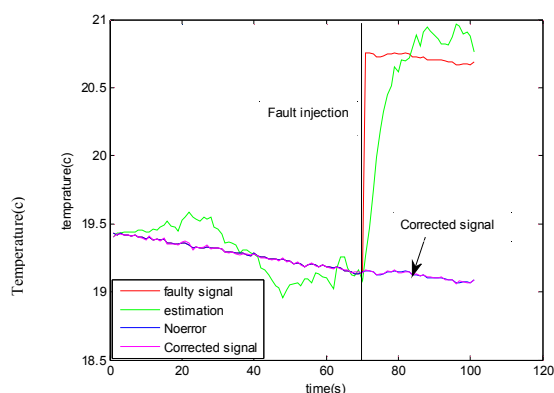
در شکل (۳) - د نحوه تشخیص خطای سخت توسط فیلتر کالمن نشان داده شده است.

۵- تصحیح خطا

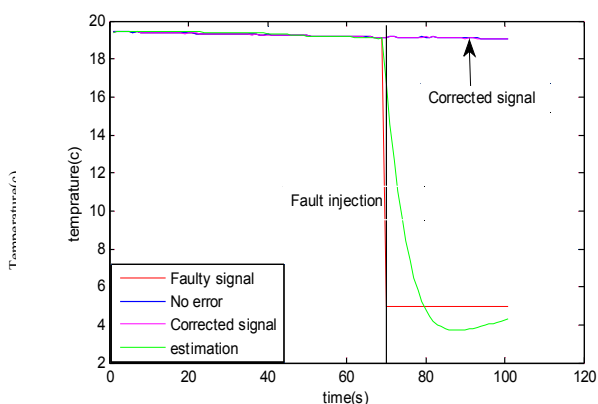
همان‌طور که بیان شد، برای جبران‌سازی و تصحیح خطا با استفاده از الگوریتم ژنتیک کوشش می‌شود تا بهره‌های حسگرهای مختلف به گونه‌ای اصلاح شوند که خروجی جدید ناشی از آن‌ها، بر خروجی پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن منطبق باشد. شمای کلی روند تنظیم مقادیر بهره‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. پس از تشخیص خطا توسط فیلتر کالمن، مقدار حسگر دارای خطا در مقدار بهره‌ای که توسط الگوریتم ژنتیک در سخت‌افزار تعیین شده است، ضرب می‌شود و از این طریق خطا تصحیح می‌شود.



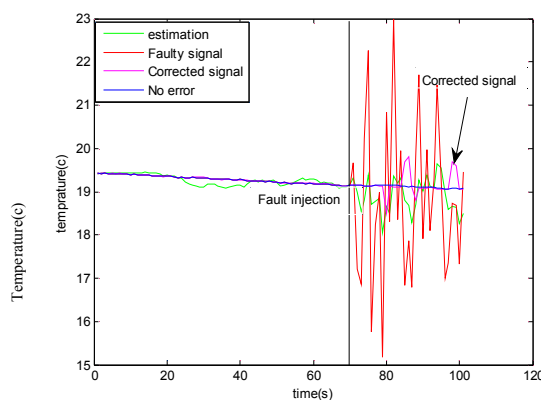
ب - خطای مقیاس



الف - خطای بایاس



د - خطای سخت



ج - خطای نویز با دامنه بالا

شکل (۳): نمایش عملکرد فیلتر کالمن و الگوریتم ژنتیک در جبران‌سازی خطا

مقدار خطا تقریباً برابر صفر است. با افزایش مقدار بایاس تا حدود مقدار ۴، خطا افزایش می‌یابد. البته این میزان افزایش خطا منظم نیست و به شکل نامنظم بین محدوده صفر تا ۰.۱۴ است. علت این امر دخالت مقدار نویز در روند الگوریتم فیلتر کالمن است. در مقادیر بایاس ۱، ۲ و ۳، خطا یا تشخیص داده نمی‌شود یا تصحیح به درستی انجام نمی‌شود. بنابراین، روش اعمالی در این بازه بایاس، عملکرد خوبی ندارد. در مقادیر بایاس بیشتر از ۳، الگوریتم عملکرد خوبی دارد و میزان میانگین مربعات خطا در این موارد حدود ۰.۰۰۰۵ است.

در شکل (۴) - ب میزان تغییرات میانگین مربعات خطا بر حسب مقیاس نشان داده شده است. الگوریتم اعمال شده بر روی خطای مقیاس عملکرد بسیار خوبی داشته است. به جز در مواردی که میزان شاخص مقیاس به مقدار یک بسیار نزدیک می‌شود، در باقی موارد خطا به خوبی تشخیص داده می‌شود. وقتی به شاخص مقیاس مقدار یک اختصاص داده می‌شود، در واقع خطایی بر روی سیگنال اعمال نشده و طبیعی است که میزان خطا در این مورد تقریباً صفر باشد.

در خطای سخت که در شکل (۴) - ج نشان داده شده است، سیگنال بدون خطا کمابیش در محدوده ۰.۱۸ تا ۱۹ است. بنابراین، جایگزینی مقادیری بین ۵ تا ۱۲ به جای مقادیر سیگنال، که اختلاف زیادی با مقدار سیگنال دارد، باعث می‌شود که فیلتر کالمن خطا را به درستی تشخیص دهد و به تبع آن تصحیح خطا به درستی انجام شود. هر چه این مقدار ثابت به محدوده سیگنال اصلی نزدیک شود، عملکرد فیلتر کالمن در تشخیص خطا ضعیف‌تر می‌شود و مجدداً با دور شدن این شاخص، عملکرد فیلتر کالمن بهبود یافته و خطای تشخیص (میانگین مربعات خطا) کاهش می‌یابد. در تمامی مواردی که بیان شد، خطا فقط بر روی یک حسگر اعمال شده است.

برای تصحیح خطا توسط الگوریتم ژنتیک از تابع برازندگی^۳ به شکل رابطه ۲۱ استفاده شده است.

$$fitness = \frac{s1 \cdot G1 + s2 \cdot G2 + s3 \cdot G3}{G1 + G2 + G3} + est \quad (21)$$

در رابطه بالا G_1 ، G_2 و G_3 مقدار بهره‌هایی است که توسط الگوریتم ژنتیک به هر حسگر اختصاص داده شده است. شاخص‌های $S1$ ، $S2$ و $S3$ مقدار هر حسگر است. مقدار est نیز تخمین فیلتر کالمن است.

در شکل (۳) سیگنال تصحیح شده نشان داده شده است.

جدول (۱): شاخص‌های در نظر گرفته شده برای الگوریتم

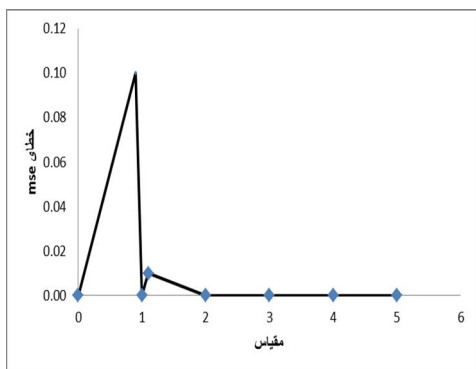
ژنتیک

| مقادیر عددی هر بهره به شکل یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود | کروموزوم‌ها |
|--|--------------------------|
| ۰/۸ | میزان همبری ^۴ |
| ۰/۷ | میزان جهش ^۵ |
| چرخه رولت ^۶ | الگوریتم انتخاب |
| کیفیت یا برازندگی پاسخ‌ها به میزان مطلوب رسیده باشد | معیار توقف الگوریتم |

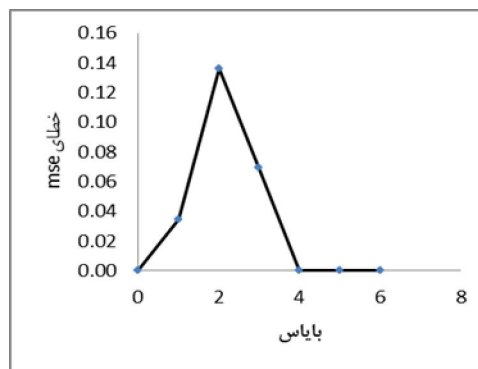
۶- نتایج

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در این الگوریتم، ابتدا خطا توسط فیلتر کالمن تشخیص داده می‌شود، سپس خطای تشخیص داده شده توسط الگوریتم ژنتیک اصلاح می‌شود. هر چه شدت خطا بیشتر باشد، فیلتر کالمن خطا را بهتر تشخیص می‌دهد و هر چه خطا کمتر باشد به علت کم شدن اختلاف بین سیگنال حاوی خطا با سیگنال عاری از خطا تشخیص خطا توسط فیلتر کالمن دشوارتر می‌شود.

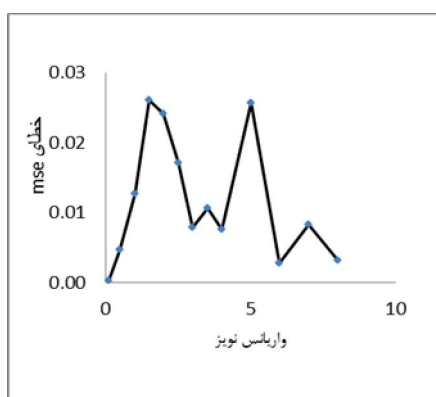
در شکل (۴) - الف روند میزان تغییر میانگین مربعات خطا بر حسب مقدار بایاس نشان داده شده است. به ازای مقدار بایاس صفر خطایی در شبکه اتفاق نمی‌افتد و این



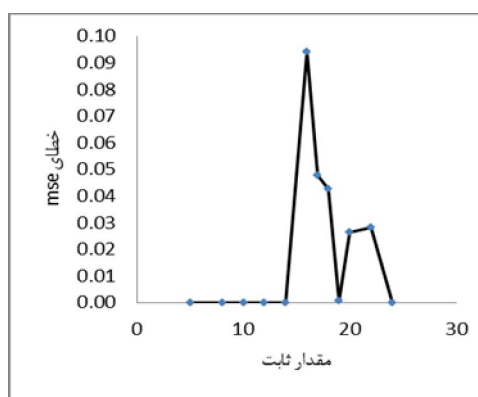
ب- خطای مقیاس



الف- خطای بایاس



د- خطای نویز زیاد



ج- خطای سخت

شکل (۴): نمایش میزان تغییرات میانگین مربعات خطا بر حسب شاخص‌های خطا

ژنتیک با اختصاص بهره کمتر به حسگر حاوی خطا، خطا را رفع می‌کند. همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، بهره اختصاص داده شده به حسگر اول که حاوی خطا نیز می‌باشد، صفر و در موارد کمی نیز مقدار کوچک ۱ و ۳ اختصاص داده شده است. نکته شایان توجه در این جدول، اختصاص یافتن مقادیر صفر به حسگر دوم و سوم است. به عبارتی در این حسگرها پوشش خطا رخ داده شده است. به این معنا که اگر در این حسگرها خطا رخ می‌داد، به علت اختصاص بهره صفر به این حسگر خطا تشخیص داده نمی‌شد.

این روند مخفی شدن خطا توسط عملکرد الگوریتم ژنتیک طبیعی است. از آنجا که الگوریتم ژنتیک برگرفته شده از طبیعت و روندی تصادفی است، احتمال رخداد چنین پدیده‌ای طبیعی است، چنین پدیده‌ای در [۹] نیز گزارش شده است. بدین صورت که در تکامل کنترل کننده یک

در شکل (۴)-د، میزان میانگین مربعات خطا بر حسب واریانس نویز نمایش داده شده است. در محدوده واریانس ۳ تا ۵، میانگین مربعات خطا به نسبت سایر مقادیر واریانس، بیشتر است. اما نسبت به سایر خطاها، مقدار میانگین مربعات خطا بیشتر است که علت آن، غیریکنواخت بودن نویز است.

نکته شایان توجه در تعیین بهره‌های اختصاص داده شده به هر حسگر این است که ممکن است عملکرد الگوریتم ژنتیک باعث پوشیده شدن خطا یا به عبارتی مخفی ماندن خطا شود. در چند مرحله خطا تشخیص داده شده است و در هر مرحله بهره‌های لازم برای هر حسگر تعیین می‌شود. در جدول (۳) مقادیر این بهره‌ها نشان داده شده است. بهره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب متعلق به حسگر ۱، ۲ و ۳ است. در آزمایش یاد شده، خطا به حسگر ۱ اعمال شده است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، الگوریتم

روبات خطا روی بعضی از حسگرها به هیچ وجه باعث کاهش کارایی عملکرد و برازندگی نمی‌شد. در این مقاله، نکته اساسی که از الگوریتم ژنتیک انتظار می‌رفت، تصحیح خطا، یعنی اختصاص بهره کم به حسگر حاوی خطا بود که به درستی انجام شد.

در جدول (۲)، از میانگین مربعات خطا به عنوان شاخص برای سنجش میزان خطا پس از تصحیح، استفاده شده است. بیش‌ترین میزان خطا مربوط به خطای نويز زياد است. این امر به علت ویژگی غیر یکنواختی و پراکندگی زیاد نويز می‌باشد.

جدول (۲): بهره‌های به دست آمده از الگوریتم ژنتیک در هر بار اصلاح انواع خطا با تغییر تعداد نسل‌ها

| میانگین مربعات خطا قبل از تصحیح | تعداد نسل‌ها | میانگین مربعات خطا بعد از تصحیح | بهره سوم | بهره دوم | بهره اول | شاخص خطا | انواع خطا | آزمایشات/شاخص‌ها |
|---------------------------------|--------------|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|------------|-----------------------|
| ۷۸۵۷.۰ | ۴ | ۰۰۵.۰ | ۸۵۳۱.۰ | ۰ | ۰ | ۵ | خطای بایاس | |
| | ۱۰ | ۰۰۱.۰ | ۰ | ۶۰۵۱.۹ | ۰ | | | |
| | ۱۲ | ۰۰۱.۰ | ۶ | ۹ | ۱ | | | |
| | ۱۸ | ۰۰۴.۰ | ۶ | ۹ | ۱ | | | |
| | ۲۵ | ۰۰۱۱.۰ | ۶ | ۹ | ۱ | | | |
| | ۳۵ | ۰۰۰۰۵.۰ | ۴ | ۰ | ۰ | | | |
| | ۵۰ | ۰۰۰۰۶.۰ | ۰ | ۵۱.۳ | ۰ | | | |
| ۹۲۲۱۰۰ | ۴ | ۰۰۰۰۵.۰ | ۰ | ۲۵.۲۳ | ۰ | ۵ | خطای مقیاس | اعمال خطا در حسگر اول |
| | ۱۰ | ۰۰۰۰۵.۰ | ۰ | ۲۵.۲۳ | ۰ | | | |
| | ۱۲ | ۰۰۰۰۷.۰ | ۰ | ۲۳.۱۴ | ۰ | | | |
| | ۱۸ | ۰۰۰۰۶.۰ | ۷.۴۰ | ۰ | ۰ | | | |
| | ۲۵ | ۰۰۰۰۶.۰ | ۰ | ۳۴.۲۷ | ۰ | | | |
| | ۳۵ | ۰۰۰۰۵.۰ | ۱۳.۲۹ | ۰ | ۰ | | | |
| | ۵۰ | ۰۰۰۰۵.۰ | ۷.۴۰ | ۰ | ۰ | | | |
| ۵۱۳۳.۷۹ | ۴ | ۰۰۱۵.۰ | ۶۰ | ۴۰ | ۳ | ۵ | خطای سخت | |
| | ۱۰ | ۰۰۰۵.۰ | ۴ | ۰ | ۰ | | | |
| | ۱۲ | ۰۰۰۰۴.۰ | ۴ | ۰ | ۰ | | | |
| | ۱۸ | ۰۰۰۰۷.۰ | ۰ | ۶.۹ | ۰ | | | |
| | ۲۵ | ۰۰۰۰۵.۰ | ۴ | ۰ | ۰ | | | |
| | ۳۵ | ۰۰۰۰۵.۰ | ۸ | ۹ | ۰ | | | |
| | ۵۰ | ۰۰۰۰۶.۰ | ۰ | ۶.۹ | ۰ | | | |
| ۲۴۰۹.۱ | ۴ | ۰۰۲۶۱.۰ | ۰ | ۶.۹ | ۰ | ۲ | خطای نويز | |
| | ۱۰ | ۰۲۶۱.۰ | ۰ | ۶.۹ | ۰ | | | |
| | ۱۲ | ۰۱۶۱.۰ | ۴ | ۰ | ۰ | | | |
| | ۱۸ | ۰۲.۰ | ۰ | ۶.۹ | ۰ | | | |
| | ۲۵ | ۰۱۹۶.۰ | ۶ | ۹ | ۱ | | | |
| | ۳۵ | ۰۱۱.۰ | ۶ | ۹ | ۱ | | | |
| | ۵۰ | ۰۱۴۵.۰ | ۴۵۷۸.۰ | ۰ | ۰ | | | |

جدول (۳): بهره‌های به دست آمده از الگوریتم ژنتیک در هر بار اصلاح انواع خطا به وجود آمده در دو حسگر

| میانگین مربعات خطا قبل از اعمال خطا | تعداد نسل‌ها | میانگین مربعات خطا پس از اعمال خطا | بهره سوم | بهره دوم | بهره اول | شاخص خطا دوم | شاخص خطا اول | آزمای‌ها/ شاخص‌ها |
|---|--------------|---|-------------|----------|-------------|-----------------|-----------------|---|
| ۴۴۹۳.۲۲۶ | ۵ | ۰۰۰۰۵.۰ | ۰ | ۶۰۵۱.۹ | ۰ | ۵ | ۵ | اعمال خطای بایاس در حسگر اول و خطای مقیاس در حسگر سوم |
| | ۱۵ | ۰۰۰۰۶.۰ | ۰ | ۶.۹ | ۰ | | | |
| | ۲۵ | ۰۰۰۰۴۹.۰ | ۰ | ۹ | ۰ | | | |
| | ۳۵ | ۰۰۰۰۵۶.۰ | ۰ | ۱۰ | ۰ | | | |
| | ۵۰ | ۰۰۰۰۵.۰ | ۰ | ۵۱۸۶.۳ | ۰ | | | |
| ۶۲۸۲.۱۳۲ | ۵ | ۰۰۰۰۶۹.۰ | ۰ | ۶.۹ | ۰ | ۵ | ۵ | اعمال خطای مقیاس در حسگر اول و خطای سخت در حسگر سوم |
| | ۱۵ | ۰۰۰۰۵۸.۰ | ۰ | ۶.۹ | ۰ | | | |
| | ۲۵ | ۰۰۰۰۵۴.۰ | ۰ | ۹ | ۰ | | | |
| | ۳۵ | ۰۰۸۱.۰ | ۰ | ۶ | ۰ | | | |
| | ۵۰ | ۰۰۰۰۳۷.۰ | ۰ | ۷۰۶۳.۷ | ۰ | | | |
| ۹۰۶۱.۰ | ۵ | ۰۰۲۵.۰ | ۰ | ۵ | ۰ | ۲ | ۲ | اعمال خطای نویز در حسگر اول و خطای بایاس در حسگر سوم |
| | ۱۵ | ۰۰۳۸.۰ | ۰ | ۷۰۶۳.۷ | ۰ | | | |
| | ۲۵ | ۰۰۱۶.۰ | ۰ | ۶ | ۰ | | | |
| | ۳۵ | ۰۰۱۱.۰ | ۰ | ۵۸.۳ | ۰ | | | |
| | ۵۰ | ۰۰۴۳.۰ | ۰ | ۶.۹ | ۰ | | | |

این شاخص، خطای کم بوده است. همان‌طور که در شکل (۴) نیز نشان داده شد، هر چه این مقدار ثابت به ۱۹ نزدیکتر می‌شد، در مرحله تشخیص الگوریتم دچار اشکال می‌شد و خطا بیشتر می‌شد. در مورد خطای مقیاس نیز به علت عمل ضرب، در سیگنال تغییرات شدیدی ایجاد می‌شود که باز هم به راحتی توسط الگوریتم قابل تشخیص است. در خطای بایاس، به علت اضافه شدن مقدار ثابت ۵ و استفاده از میانگین‌گیر به عنوان خروجی حسگرها، تغییرات بسیار واضح نیست و نیاز به تعداد نسل‌های بیشتری برای تصحیح خطاست.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ساختاری مقاوم در برابر خطاهای مختلف در اندازه‌گیری دما، ارائه شد. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، سیستم قادر بوده است که همه خطاها را به خوبی تشخیص دهد و جبران‌سازی کند. از بین

در جدول (۲)، شاخص تعداد نسل‌ها نیز مطرح شده است که در مورد خطای بایاس با افزایش تعداد نسل‌ها میزان خطا کاهش یافته است. اما در مورد سایر خطاها، شاخص تعداد نسل‌ها تأثیری در روند تغییرات خطا ندارد. علت این امر را باید شدت تغییرات اعمالی بر روی داده دانست. برای مثال در خطای نویز، سیگنال در قسمت‌هایی که حاوی خطا نیست دارای واریانس ۴.۰ است اما در هنگام اعمال خطای نویز با دامنه بالا، نویزی با واریانس ۲ به سیگنال اضافه شده است. بنابراین، این شدت تغییرات توسط الگوریتم به وضوح قابل تشخیص است و با افزایش تعداد نسل‌ها تغییر چندانی نمی‌کند.

در خطای سخت، مقادیر انتخاب شده در این آزمایش ۵ است و محدوده تغییرات سیگنال در قسمت‌های بدون خطا حدود ۵/۱۸ تا ۱۹ است. بنابراین، در این مورد نیز این اختلاف به وضوح توسط الگوریتم تشخیص داده می‌شود و با تغییر تعداد نسل‌ها تغییر چندانی نمی‌کند. علت انتخاب

Tyrrell, "Introduction to Evolvable Hardware" in the IEEE Press Series on Computational Intelligence, Catherine Faduska, Senior Acquisitions Editor, Jeanne Audino, Project Editor, pp. 130-140, 2007.

خطاهای موجود تشخیص خطای نویز زیاد به علت ماهیت تصادفی بودن آن در بعضی موارد با تأخیر و تصحیح آن با خطای بیشتری انجام شده است. این ساختار که در این مقاله، در محیط شبیه‌ساز اجرا شده است، به سادگی قابلیت پیاده‌سازی در سطح سخت‌افزار را دارد. بنابراین، به عنوان کارهای بیشتر می‌توان این شبکه حسگر دما را در سطح سخت‌افزار پیاده کرده و اندازه‌گیری‌های عملی انجام داد. ضمن این‌که می‌توان در کارهای آینده، پوشش خطا در حسگرها را نیز از طریق الگوریتم دیگری اصلاح کرد.

¹ Hereford

² Edward Balaban

³ Fitness function

⁴ Crossover

⁵ Mutation

⁶ Roulette wheel

مراجع

- [1] Edward Balaban, AbhinavSaxena, PrasunBansal, Kai F. Goebeland Simon Curran, "Modeling, Detection, and Disambiguation of Sensor Faults for Aerospace Applications", IEEE Sensors Journal, Vol. 9, NO. 12, pp. 1907-1917, 2009.
- [2] Michelena, E. D. Gutman, S. I. " An automatic meteorological data collection system that is installed at Global Positioning System monitoring stations", OCEANS '02 MTS/IEEE, Vol. 4, pp. 1930-1934, 2002.
- [3] James M. Hereford, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, "Fault-Tolerant Sensor Systems Using Evolvable Hardware", Vol. 55, No. 3, pp. 846-853, 2006.
- [4] J. Hereford and N. Galyen, "Failure detection for multiple input system", in Proc. IEEE SoutheastCon, Greensboro, NC, pp. 186-193, Mar. 2004.
- [5] Simon haykin, Kalman Filtering And Neural Networks Book, Haykin, S. (ed) ,Frontmatter and Index, in Kalman Filtering and Neural Networks, John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [6] Jonny Carlos da Silva , AbhinavSaxena , Edward Balaban , Kai Goebel, "A knowledge-based system approach for sensor fault modeling, detection and mitigation", Expert Systems with Applications, Vol 39, No. 12, pp. 10977-10989, 2012.
- [7] S. N. Sivanandam, S. N. Deepa, Introduction To Genetic Algorithm, Spring publishing company, 2007.
- [8] Amol Deshpande and Carlos Guestrin, "Model-Driven Data Acquisition in Sensor Network", VLDB '04 Proceedings of the Thirtieth international conference on Very large data bases - Vol 30 , pp. 588-599, 2004.
- [9] Garrison W. Greenwood and Andrew M.