

Harmonic Noise Cancellation with Varing Fundametal frequency of MRS Signal Using Time-Domain Remote Reference Loop Method

Sharafi, A.¹  | Hafizi, M. K.²  | Ghanati, R.²   | Shirvani Mahdavi, H. R.¹ 

1. Department of of Physics, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran.

2. Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: rghanati@ut.ac.ir

(Received: 26 June 2022, Revised: 4 Dec 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 30 Aug 2023)

Summary

Magnetic Resonance Sounding (MRS), as a surface geophysical method, provides good information about the hydro-geophysical parameters (such as water content and hydraulic conductivity) of aquifers. The main advantage of the MRS method compared to other geophysical methods is that the surface measurement of the MRS signal responds directly to the presence of water below the surface. Despite the high efficiency of this method, the recorded signal is strongly affected by electromagnetic noises, including spike noises and harmonic noises. The first generations of MRS instruments were single-channel instruments. In single-channel instruments, both magnetic resonance excitation and signal recording are done with a single loop, and it is necessary to use various forms of filtering to eliminate noise, in particular powerline harmonics.

Then a new generation of multichannel MRS instruments with multiple is was built, so that the main loop is still used for magnetic resonance excitation and signal recording. In addition, a number of reference loops, physically displaced from the main loop, measure only noise. Parts of the noise recorded by the reference loops can correlate with the noise in the main loop. With proper signal processing, the noise in the reference coils can be filtered to obtain a replica of the noise in the main coil and when this replica is subtracted from the signal recorded in the main loop, hence, the MRS signal remains noiseless. One of the current challenges of MRS signal processing is the existence of harmonic noise with the variable fundamental frequency. If the harmonic signal from a specific source has a fundamental frequency that varies with time, most of the proposed algorithms will not perform well in eliminating harmonic noise. Therefore, a new topic that is followed in this paper is to evaluate the performance of the proposed algorithm in cases where the harmonic signal has a fundamental frequency that varies with time.

In this paper, in order to obtain an accurate estimate of the parameters of the magnetic resonance sounding signal, a method for eliminating spike and then harmonic noise in the time domain is presented. Synthetic signals are contaminated with different electromagnetic noises to investigate the effect of different optimal filter parameters for spike and harmonic event elimination methods. Spike noise has a detrimental effect on the performance of the harmonic noise elimination algorithm. Hence, spike signals must be deleted or adjusted before applying the harmonic noise elimination algorithm. First, a statistical processing algorithm based on the signal-dependent rank-order mean (SD-ROM) filter for eliminating spike noise is presented and after deleting spike noise, a method for eliminating harmonic noise is assumed based on the fixed and variable fundamental frequency with time using remote reference loop. Numerical results of applying the proposed processing algorithms in the time domain show that by applying the mentioned methods, a considerable amount of spike and harmonic signals are removed leading to a good estimate of the parameters of the magnetic resonance sounding signal (i.e., initial amplitude, relaxation time, phase and frequency of the signal).

Keywords: Harmonic noises, Magnetic resonance sounding, Spiky noises, Transfer function, variable fundamental frequency.

Cite this article: Sharafi, A., Hafizi, M. K., Ghanati, R., & Shirvani Mahdavi, H. R. (2023). Harmonic Noise Cancellation with Varing Fundametal frequency of MRS Signal Using Time-Domain Remote Reference Loop Method. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 293-311. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.344620.1007440>

E-mail: (1) adn.sharafi.sci@iauctb.ac.ir | hsm@iauctb.ac.ir (2) hafizi@ut.ac.ir



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.344620.1007440>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

حذف نوفه‌های هارمونیک با بسامد پایه متغیر سیگنال MRS با روش مبتنی بر لوب مرجع در حوزه زمان

عدنان شرفی^۱ | محمد کاظم حفیظی^۲ | رضا قناتی^۲ | حمیدرضا شیروانی مهدوی^۱

۱. گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

۲. گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: rghanati@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۴/۵، بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۱۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۶/۸)

چکیده

روش سونداژ تشدید مغناطیسی (Magnetic Resonance Sounding) که به اختصار MRS نامیده می‌شود، به‌عنوان یک روش ژئوفیزیکی سطحی اطلاعات مناسبی درباره پارامترهای هیدروژئوفیزیکی (مانند محتوای آب و هدایت هیدرولیکی) لایه‌های آبخوان ارائه می‌دهد. با وجود کارایی بسیار این روش، سیگنال ثبت‌شده با این شیوه، به‌شدت تحت تأثیر نوفه‌های الکترومغناطیسی از جمله نوفه‌های هارمونیک و نوفه‌های اسپایکی قرار می‌گیرد. در این مقاله برای آن که بتوان برآورد درستی از پارامترهای سیگنال MRS به‌دست آورد، روشی برای حذف نوفه‌های هارمونیک در حوزه زمان ارائه می‌شود. سیگنال‌های مصنوعی به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای گوناگون بهینه فیلتر، برای روش‌های حذف رویدادهای اسپایکی و هارمونیک شرح داده شده و ارزیابی می‌شوند.

مبحث جدیدی که در این مقاله دنبال می‌شود بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی در مواقعی است، که سیگنال هارمونیک دارای فرکانس پایه متغیر با زمان باشد. پیش از به‌کاربردن الگوریتم حذف نوفه‌های هارمونیک، می‌بایست سیگنال‌های اسپایکی حذف و یا تا اندازه ممکن کاهش داده شوند. بنابراین نخست، یک الگوریتم پردازشی آماری بر اساس روش SD-ROM برای حذف نوفه‌های اسپایکی ارائه می‌شود و پس از آن، روشی برای حذف نوفه‌های هارمونیک، با فرض بسامد پایه ثابت و متغیر با زمان، بر اساس لوب مرجع راه دور و با به‌کارگیری توابع انتقال ارائه می‌شود. نتایج عددی به‌کارگیری الگوریتم‌های پردازشی پیشنهادی در حوزه زمان نشان می‌دهد که از طریق کاربست روش‌های یادشده، سیگنال‌های اسپایکی و هارمونیک تا اندازه چشم‌گیری حذف می‌شوند و بنابراین به برآورد مناسبی از پارامترهای سیگنال MRS (دامنه اولیه، زمان آسایش، فاز و بسامد سیگنال) می‌انجامد.

واژه‌های کلیدی: بسامد پایه متغیر، توابع انتقال، سونداژ تشدید مغناطیسی، نوفه اسپایکی، نوفه هارمونیک.

۱. مقدمه

روش MRS به‌عنوان یک روش اکتشاف هیدروژئوفیزیکی در دهه‌های گذشته همواره توسعه پیدا کرده و به یک روش ژئوفیزیکی پرکاربرد تبدیل شده است. پیشرفت‌های چشم‌گیری در مدل‌سازی مستقیم (لمان-هورن و همکاران، ۲۰۱۱)، وارون‌سازی و تفسیر (هرتریچ و همکاران، ۲۰۰۹؛ مولر-پتکه و یارامانچی، ۲۰۱۰؛ گونتر و مولر-پتکه، ۲۰۱۲) در چند سال اخیر صورت گرفته است. این پیشرفت‌ها موجب گسترش محدوده کاربرد این روش در حل مسائل

سونداژ تشدید مغناطیسی از پایان دهه ۱۹۸۰ به بعد همواره در حال پیشرفت بوده است؛ به‌گونه‌ای که امروزه به یک روش مناسب برای بررسی غیرمخرب منابع آب‌های زیرزمینی تبدیل شده است. به بیان دقیق‌تر، این روش امکان تعیین مستقیم محتوای آب در زیر زمین را میسر می‌سازد (لگچنکو و والا، ۲۰۰۲). مانع اصلی که در حال حاضر استفاده گسترده‌تر از این روش را محدود می‌کند، نسبت سیگنال به نوفه (S/N) بسیار پایین سیگنال‌های MRS، هنگام ثبت در نزدیکی تأسیسات ساخت بشر است.

استناد: شرفی، عدنان؛ حفیظی، محمد کاظم؛ قناتی، رضا؛ شیروانی مهدوی، حمیدرضا (۱۴۰۲). حذف نوفه‌های هارمونیک با بسامد پایه متغیر سیگنال MRS با روش مبتنی بر لوب

مرجع در حوزه زمان. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۲)، ۲۹۳-۳۱۱. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.344620.1007440>

رایانامه: (۱) hsm@iauctb.ac.ir | (۲) hafizi@ut.ac.ir | adn.sharafi.sci@iauctb.ac.ir

هیدروژنولوژیکی شده‌اند.

برتری اصلی روش MRS در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی این است که اندازه‌گیری سطحی سیگنال MRS، مستقیماً به وجود آب در زیر سطح زمین واکنش نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، روش MRS برای تعیین کمی وجود آب در زیر سطح زمین به کار برده می‌شود؛ درحالی‌که انجام این کار با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی موجود امکان‌پذیر نیست (هرتریچ، ۲۰۰۵). MRS در واقع، پیاده‌سازی میدانی روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای به‌شمار می‌آید، به‌گونه‌ای که در آن هسته اتم‌های هیدروژن مولکول‌های آب (یعنی پروتون‌ها) در زیر سطح زمین، با ارسال پالس الکترومغناطیسی (EM) با بسامد لارمور (Larmor frequency)، تشدید می‌شوند و سپس پروتون‌های انرژی‌دار پس از قطع پالس تحریک، سیگنال تشدید مغناطیسی ثانویه‌ای را تولید می‌کنند که به القای ولتاژ ضعیفی در حد نانولت در لوپ چیده‌شده در روی سطح زمین می‌انجامد. پاسخ سیگنال هسته‌های هیدروژن، که یک تابع میرای نمایی از زمان است، در بسامد لارمور پروتون (بسامد تشدید هیدروژن مولکول‌های آب در میدان ژئومغناطیسی با مقدار متغیر در بازه ۱ تا ۲/۷ کیلوهرتز) و با فاز ϕ_0 ، تولید می‌شود. این سیگنال قابل آشکارسازی، که واپاشی القایی آزاد (free induction decay) نام دارد، مطابق لگچنکو و والا (۲۰۰۳) به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$S(t) = S_0 \cos(2\pi f_0 t + \phi_0) \exp(-t/T_2^*) \quad (1)$$

که در آن ϕ_0 فاز سیگنال، t مدت‌زمان ثبت سیگنال، S_0 دامنه اولیه، T_2^* زمان واپاشی (relaxation time) سیگنال FID و f_0 بسامد لارمور است. T_2^* و S_0 دو عامل کلیدی در یافتن ویژگی‌های هیدروژنولوژیکی لایه آبخوان هستند. دامنه اولیه S_0 به مقدار آب لایه‌های زیرسطحی بستگی دارد و زمان آسایش نیز اطلاعات مربوط به ساختارهای منافذ دربرگیرنده آب را در اختیار ما می‌گذارد. باوجود امکان برآورد اطلاعات هیدروژنوفیزیکی ارزشمند از داده‌های MRS، سیگنال ثبت‌شده از این روش، به‌شدت تحت‌تأثیر نوفه‌های

الکترومغناطیسی محیطی قرار می‌گیرد که باعث کاهش کیفیت سیگنال می‌شود؛ به‌گونه‌ای که درعمل در بسیاری از موارد توانایی برآورد پارامترهای سیگنال پیش از پردازش داده‌ها وجود ندارد. به‌طور کلی، دو منبع مهم نوفه الکترومغناطیسی محیطی هنگام ثبت سیگنال‌های MRS، هارمونیکی‌های خطوط نیرو و نوفه‌های اسپایکی هستند. نوفه هارمونیکی از مجموعه سیگنال‌های هارمونیکی تشکیل شده است که بسامد آنها مضرب صحیحی از بسامد پایه ویژه آن منبع نوفه الکتریکی است. هارمونیکی‌های خطوط نیرو به‌دلیل ماهیت ناپایدار بسامد پایه و محتوای هارمونیکی‌ها در طول زمان و همچنین داشتن مشخصه‌های متفاوت در شبکه‌های گوناگون برق، پیچیده هستند (کوهن و همکاران، ۲۰۱۰). نوفه‌های اسپایکی از منابع نوفه طبیعی و انسانی با ظاهر متفاوت، سرچشمه می‌گیرند و کیفیت داده‌ها را کاهش می‌دهند. MRS در مناطق شهری، به‌دلیل نسبت پایین سیگنال به نوفه، بسیار محدود است. در بسیاری از موارد، سیگنال‌های MRS مورد انتظار، صرفاً چند ده نانولت هستند. بنابراین اغلب توسط نوفه‌های الکترومغناطیسی قابل توجهی آلوده می‌شوند. ازاین‌رو، برای آن‌که محدوده کاربردهای این روش صرفاً در مباحث تئوری باقی نماند، نیاز به بهبود نسبت S/N وجود دارد.

در دهه گذشته، روش‌های کاربردی گوناگونی برای پردازش داده‌های سونداژ تشدید مغناطیسی توسعه و معرفی شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به فیلتر ناچ، تفریق بلوکی، تفریق سینوسی (لگچنکو و والا، ۲۰۰۳) و همچنین به‌کارگیری آنتن 8-شکل (تروشکین و همکاران، ۱۹۹۴) برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه اشاره کرد. روش‌های یادشده دارای معایبی هستند برای نمونه به‌کاربردن فیلتر ناچ در مواردی که بسامد لارمور نزدیک به یکی از بسامدهای هارمونیکی باشد، واپیچش سیگنال و درپی آن از دست‌دادن بخش مهمی از اطلاعات سیگنال را به‌همراه دارد. از سوی دیگر، استقرار آنتن 8-شکل باعث پیچیدگی تابع حساسیت می‌شود و عمق نفوذ را تا اندازه زیادی کاهش می‌دهد. در همین راستا، روش‌های

پردازشی عددی گوناگونی معرفی و توسعه داده شده است؛ از جمله، دالگارد و همکاران (۲۰۱۲)، ویژگی‌های حذف نوفه از طریق فیلتر وینر و روش‌های وقتی (Adaptive methods) را بررسی کردند. نتایج بررسی‌های آنها نشان می‌دهد که هر دو روش به یک خروجی مشترک منجر می‌شوند. روشی دو مرحله‌ای برپایه مدل‌سازی سیگنال‌های هارمونیک و به‌کاربردن ویژگی‌های فیلتر وینر توسط لارسن و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شده است.

همچنین یک روش پردازشی بهینه از لحاظ محاسباتی برپایه الگوریتم بهبود یافته نایمن-گایسر (Modified Nyman-Gaiser Method) جهت تضعیف نوفه‌های هارمونیک از روی داده‌های سونداژ تشدید مغناطیسی توسط قناتی و حفیظی (۲۰۱۷) پیشنهاد شد. این روش شامل برآورد مؤلفه‌های هارمونیک و سپس تفریق آن از سیگنال ثبت‌شده به‌منظور دستیابی به سیگنال دلخواه است. روش‌های گوناگونی برای آشکارسازی و حذف رویدادهای اسپایکی در پردازش سیگنال سونداژ تشدید مغناطیسی ارائه شده است. برای نمونه لگچنکو (۲۰۰۷) پیشنهاد حذف اسپایک بر پایه امحای بخشی از سری زمانی تخریب‌شده را داد. یک روش آماری بر مبنای ضابطه رومانوفسکی برای شناسایی و حذف نوفه‌های اسپایکی توسط ژیانگ و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شد. دالگارد و همکاران (۲۰۱۲) روش شناسایی رویدادهای اسپایکی بر اساس عملگر انرژی غیر خطی (Non-linear energy operator) که در آن نمونه‌های اسپایکی توسط مقادیر صفر جایگزین می‌شوند را معرفی کرد. کاستابل و مولر-پتکه (۲۰۱۴) روش‌هایی جهت حذف نوفه اسپایکی بر مبنای ضابطه آستانه‌گذاری در حوزه زمان ارائه کردند. همچنین قناتی و همکاران (۲۰۱۶) الگوریتم عددی بر مبنای روش تحلیل مقادیر تکین به‌منظور پردازش و برآورد پارامترهای سیگنال سونداژ تشدید مغناطیسی ارائه کردند. روش پیشنهادی آنها بر روی سیگنال ثبت‌شده توسط دستگاه‌های تک کاناله قابل استفاده است.

اولین نسل از دستگاه‌های MRS دستگاه‌های تک کاناله

بودند. در دستگاه‌های تک کاناله، تحریک تشدید مغناطیسی و ثبت سیگنال هر دو با یک لوپ (loop) انجام می‌شوند و نیاز است تا از انواع گوناگون فیلترینگ برای حذف نوفه به‌ویژه هارمونیک‌های خطوط نیرو استفاده کرد (لگچنکو و والا، ۲۰۰۳). سپس نسل جدیدی از دستگاه‌های MRS چندکاناله با چندین لوپ ساخته شده است (والش، ۲۰۰۸) به‌طوری‌که لوپ اصلی همچنان برای تحریک تشدید مغناطیسی و ثبت سیگنال به‌کار می‌رود. علاوه بر این، چند لوپ مرجع که به‌طور فیزیکی از لوپ اصلی جدا شده‌اند، صرفاً نوفه را اندازه‌گیری می‌کنند. بخش‌هایی از نوفه که توسط لوپ‌های مرجع ثبت می‌شود، با نوفه موجود در لوپ اصلی همبستگی خواهند داشت. با پردازش مناسب سیگنال، می‌توان نوفه موجود در لوپ‌های مرجع را شناسایی و حذف کرد و یک نسخه تکراری از نوفه موجود در کوئل اصلی به دست آورد و هنگامی که این نسخه تکراری از سیگنال ثبت‌شده در لوپ اصلی کسر شود، سیگنال MRS بدون نوفه باقی می‌ماند.

انتقال سیگنال نوفه، به سیگنال ثبت‌شده در لوپ اصلی به این سادگی نیست و نیاز به تخمین یک تابع انتقال، به‌منظور تبدیل سیگنال نوفه اندازه‌گیری‌شده در لوپ مرجع، به سیگنال ثبت‌شده در لوپ اصلی است. تعداد لوپ‌های مرجع بستگی به نوع و جهت انتشار نوفه‌های الکترومغناطیسی دارد. با توجه به اهمیت حذف نوفه و افزایش نسبت سیگنال به نوفه در اندازه‌گیری‌های سیگنال MRS، به‌کارگیری روش‌های پردازشی پیشرفته ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین در این مقاله ابتدا الگوریتمی بر مبنای روش‌های آماری جهت حذف نوفه‌های اسپایکی ارائه می‌شود. سپس نوفه‌های هارمونیک مربوط به خطوط نیرو، از طریق روش لوپ مرجع راه دور و به‌کمک تخمین یک تابع انتقال حذف می‌شوند. عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی بر روی سیگنال‌های شبیه‌سازی‌شده سونداژ تشدید مغناطیسی و آلوده به نوفه‌های اسپایکی و هارمونیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یکی از چالش‌های کنونی پردازش سیگنال MRS وجود نوفه‌های هارمونیک با بسامد پایه (Fundamental Frequency)

معمولاً اسپایک‌ها فقط قسمتی از سیگنال را مخدوش می‌کنند و بخش عمده آن دست نخورده باقی می‌ماند، بنابراین حذف کل سری زمانی ضروری نیست. در این بخش روش حذف اسپایک سریع، کارآمد و خودکار در حوزه زمان ارائه می‌شود که منجر به کاهش قابل توجه نوفه‌های اسپایکی می‌شود.

در انواع گوناگون روش‌های حذف اسپایک، نمونه‌های مخدوش (نمونه‌هایی که از لحاظ مقدار دامنه شباهتی به نمونه‌های مجاور خود ندارند) با صفر جایگزین می‌شوند که این روش اغلب اعوجاج‌های قابل توجهی در سیگنال اصلی ایجاد می‌کند، لذا در این مقاله از فیلتر میانگین ترتیب رتبه‌ای وابسته به سیگنال SD-ROM (Signal Dependent Rank-Order Mean Filter) (آبرئو و همکاران، ۱۹۹۶؛ مور و میترا، ۲۰۰۰) که یک فیلتر غیرخطی است و به دسته فیلترهای مبتنی بر تصمیم‌گیری یا فیلترهای مشروط به حالت، تعلق دارد (فرحتیا و همکاران، ۲۰۰۹) استفاده شده است. فیلتر SD-ROM از یک آشکارساز اسپایک استفاده می‌کند تا تعیین کند که آیا نمونه تحت بررسی، یک نمونه مخدوش است یا خیر. به عبارت دیگر، پیاده‌سازی کلی آن را می‌توان حالت خاصی از روش حذف نوفه اسپایک در نظر گرفت که در آن نمونه اصلی سیگنال اسپایکی، در صورت شناسایی به عنوان سیگنال مخدوش، با برآورد مناسبی از آن جایگزین می‌شود. در غیر این صورت، نمونه بدون تغییر باقی می‌ماند.

فرایند شناسایی اسپایک در الگوریتم پیشنهادی SD-ROM از طریق ۶ مرحله زیر انجام می‌شود:

مرحله ۱: انتخاب یک پنجره لغزان 1-D (یک بعدی) با طول تعداد نمونه‌های فرد، که بر روی کل سری زمانی حرکت می‌کند (برای مثال، $k = 9$):

$$T = \{S_1(t), S_2(t), S_3(t), S_4(t), S_5(t), S_6(t), S_7(t), S_8(t), S_9(t)\} \quad (2)$$

مرحله ۲: عنصر مرکزی بردار T را با $C(t)$ نام‌گذاری کرده و سپس آن را از بردار پنجره خارج می‌کنیم:

متغیر است. در صورتی که سیگنال هارمونیک از یک منبع مشخص دارای بسامد پایه متغیر با زمان باشد اکثر الگوریتم‌های پیشنهادی عملکرد مناسبی در حذف نوفه‌های هارمونیک نخواهد داشت. بنابراین مبحث جدیدی که در این مقاله دنبال می‌شود بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی در مواقعی است که سیگنال هارمونیک دارای بسامد پایه متغیر با زمان است.

در ادامه، ابتدا تئوری روش‌های پردازشی پیشنهادی فرمول‌بندی می‌شود. سپس نحوه تخمین تابع انتقال و پارامترهای تأثیرگذار بر آن ارائه می‌شود و نحوه کاربست و عملکرد روش‌های پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت نتایج مهم این تحقیق در قسمت نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. روش پژوهش

در این بخش روش‌های حذف نوفه اسپایکی و حذف نوفه هارمونیک همراه با پارامترهای تأثیرگذار بر روی کارایی این روش‌ها ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد. تخمین صحیح پارامترهای سیگنال MRS به شدت متأثر از کیفیت سیگنال می‌باشد؛ بنابراین قبل از هرگونه تخمین پارامتر و یا استفاده از شکل موج سیگنال در الگوریتم وارون‌سازی، نیاز به بهبود نسبت سیگنال به نوفه وجود دارد.

۲-۱. روش فیلتر SD-ROM

حضور رویدادهای اسپایکی حاصل از منابع گوناگون در اندازه‌گیری‌های سیگنال MRS، باعث افت عملکرد الگوریتم حذف نوفه هارمونیک خطوط نیرو می‌شوند، بنابراین اسپایک‌ها قبل از حذف نوفه هارمونیک، باید شناسایی و حذف شوند (قناتی و همکاران، ۲۰۱۶). اگر نوفه‌های اسپایکی، تک‌سمپلی باشند شاید با عملیات برانبارش ساده یا به عبارتی از طریق متوسط‌گیری استاندارد از اندازه‌گیری‌های متعدد، از بین بروند؛ اما در صورتی که نوفه‌های اسپایکی حالت بانندی (band like) داشته باشند، نیاز به روش‌های پردازشی پیشرفته‌تری می‌باشد. در عمل

در نتیجه معیار آستانه به این صورت تعریف می‌شود:

$$\Sigma = \sigma K(N, \beta). \quad (۷)$$

به‌طور کلی انتخاب آستانه، مسئله آماری بسیار مهمی است به‌طوری که انتخاب آستانه کوچک، تضعیف سیگنال MRS مورد نظر در داخل اسپایک‌های نوفه را در پی دارد و انتخاب آستانه بزرگ نیز، منجر به حذف نوفه اسپایکی نامناسب می‌شود؛ بنابراین انتخاب آستانه بر اساس سطح نوفه و مشخصات آماری ثبت‌ها (یعنی آستانه داده‌محور)، می‌تواند موجب حذف کارآمدتر نوفه‌های اسپایکی شود.

مراحل ۱ تا ۵ در تمام تکرارهای اندازه‌گیری یک گشتاور پالس انجام می‌شوند (یعنی مجموعه متشکل از تمام تک‌اندازه‌گیری‌ها) و آن دسته از توالی‌های زمانی که به‌عنوان اسپایک نوفه تشخیص داده شده‌اند، در تمام ثبت‌های موردنظر علامت‌گذاری می‌شوند.

مرحله ۶: نمونه‌های اسپایکی (نمونه‌های علامت‌دار) که در مراحل قبلی شناسایی شده‌اند، با نادیده گرفتن مشخصه‌های اسپایکی آنها، با مقادیر میانگین تکرارهای اندازه‌گیری در محل متناظر با آنها، بر روی محور زمان جایگزین می‌شوند.

بررسی‌های عددی نشان می‌دهند که یک پنجره لغزان با اندازه $k = 9$ نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است که در الگوریتم SD-ROM، استفاده از معیارهای آستانه به جای انحراف مطلق میانه و انحراف معیار داده‌ها امکان شناسایی دقیق‌تر اسپایک‌ها در ثبت‌های MRS را میسر می‌سازد (قناتی و حفیظی، ۲۰۱۷). شکل ۱ فلوچارت الگوریتم حذف اسپایک مبتنی بر روش SD-ROM را نشان می‌دهد.

در ادامه با استفاده از مدل‌سازی یک سیگنال مصنوعی میراشونده نمایی با دامنه اولیه $S_0 = 250 \text{ nV}$ ، زمان واپاشی $T_2^* = 100 \text{ ms}$ ، بسامد لارمور $f_0 = 1995 \text{ Hz}$ ، فاز $\phi_0 = 1.03 \text{ rad}$ ، طول زمان ۵۰۰ میلی‌ثانیه و بسامد نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز که توسط اسپایک‌ها و نوفه گوسی با انحراف معیار $\sigma = 150 \text{ nV}$ و مقدار میانگین

$$\begin{aligned} \tilde{T} = \\ \{S_1(t), S_2(t), S_3(t), S_4(t), S_6(t), S_7(t), S_8(t), S_9(t)\} \end{aligned} \quad (۳)$$

مرحله ۳: نمونه‌های بردار $\tilde{T}$ را به‌ترتیب صعودی مرتب کنید:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{\text{rearranged}} = \\ \{\tilde{S}_1(t), \tilde{S}_2(t), \tilde{S}_3(t), \tilde{S}_4(t), \tilde{S}_5(t), \tilde{S}_6(t), \tilde{S}_7(t), \tilde{S}_8(t)\} \end{aligned} \quad (۴)$$

به‌طوری که $\tilde{S}_1(t) \leq \tilde{S}_2(t) \leq \dots \leq \tilde{S}_8(t)$ است؛

مرحله ۴: تفاضلات $W(t)$ با ترتیب رتبه‌ای بین عناصر $\tilde{T}_{\text{rearranged}}$ و $C(t)$ را محاسبه کنید:

$$W_i(t) = \begin{cases} \tilde{S}_1(t) - C(t) & \text{if } C(t) \leq \mu \\ C(t) - \tilde{S}_{9-i}(t) & \text{if } C(t) > \mu \end{cases} \quad (۵)$$

که در آن $\mu = [\tilde{S}_4(t) + \tilde{S}_5(t)]/2$ میانگین ترتیب رتبه‌ای نامیده می‌شود. برای پنجره‌ای با اندازه ۹ داریم $i = 1, 2, \dots, 4$

مرحله ۵: الگوریتم تعیین می‌کند که $C(t)$ یک اسپایک است در صورتی که هر یک از شروط زیر برقرار باشند: $W_i(t) \geq \Sigma$ ، $i = 1, 2, \dots, 4$

Σ یک معیار آستانه‌گذاری است که به‌صورت آماری با استفاده از بررسی توزیع t محاسبه می‌شود و اساساً بر مبنای محدوده توزیع خطای واقعی در توزیع t ، مورد پردازش قرار می‌گیرد. مشخصه توزیع t این است که ابتدا نمونه مشکوک، حذف شده و سپس بر اساس توزیع t بررسی می‌شود که آیا نمونه حذف‌شده دارای خطای فاحشی است یا خیر. فرض کنید یکی از نمونه‌های اندازه‌گیری شده S_q یک داده مشکوک باشد، این نمونه را حذف کرده و سپس انحراف معیار دیگر اندازه‌گیری‌ها را مجدداً به‌صورت زیر محاسبه کنید:

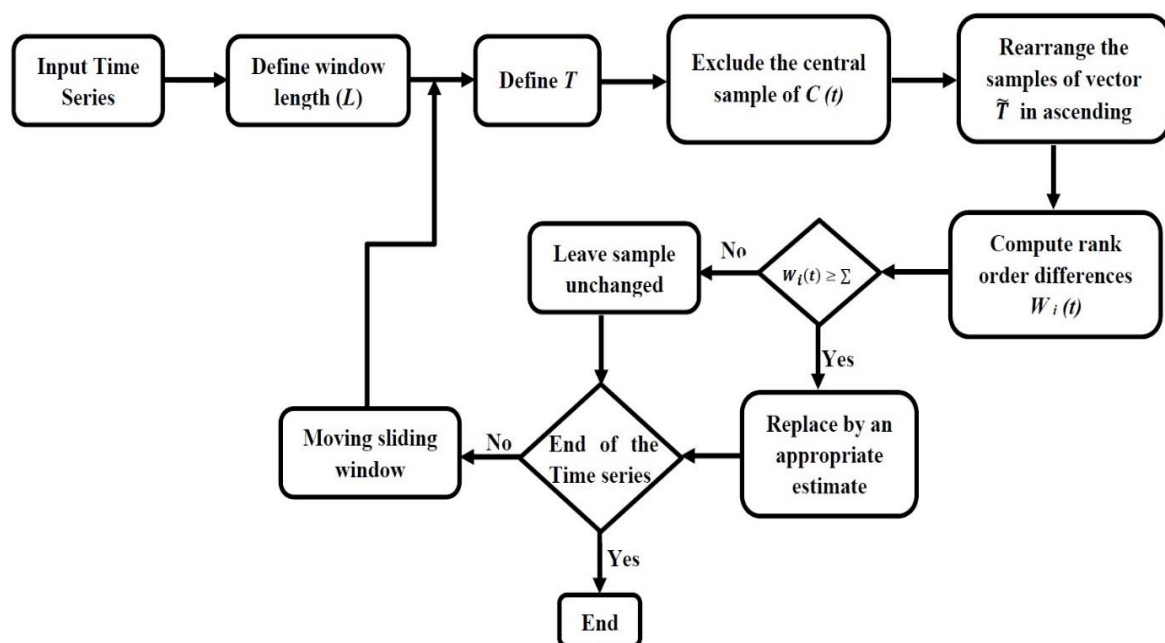
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1, i \neq q}^N (S_i - (\frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j \neq q}^N S_j))^2} \quad (۶)$$

بنابراین بر اساس مقدار چشم‌گیر انتخاب‌شده برای β (سطح اطمینان) و تعداد اندازه‌گیری‌های N ، می‌توان ضریب آزمایش $K(N, \beta)$ توزیع t را با استفاده از جدول ضرایب توزیع t به دست آورد (رز، ۲۰۰۹).

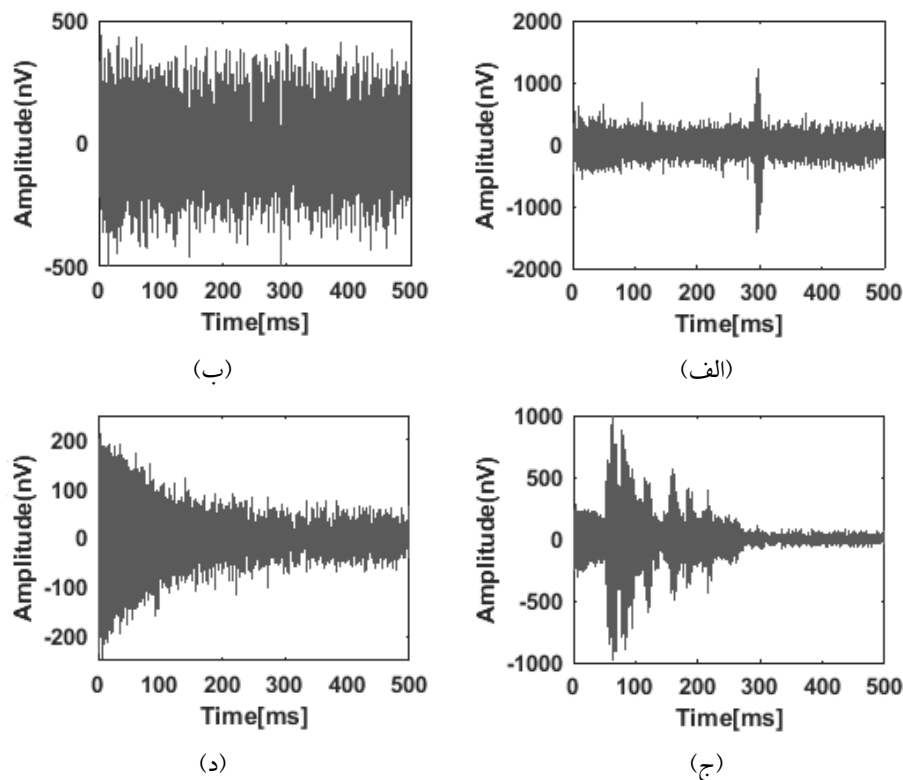
اسپایک‌هایی مانند اسپایکی که در شکل ۲-الف از $t = 282 \text{ ms}$ تا $t = 310 \text{ ms}$ نشان داده شده است در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲-ب نتیجه استفاده از روش حذف اسپایک SD-ROM برای تک‌اندازه‌گیری شکل ۲-الف را نشان می‌دهد. علاوه بر این، سیگنال برانداشته (stacked) پیش از پردازش در شکل ۲-ج و همچنین سیگنال صرفاً برانبارش شده (میانگین ۳۵ سیگنال شیشه‌سازی شده) پس از حذف اسپایک توسط الگوریتم پیشنهادی، در شکل ۲-د نشان داده می‌شود. در شکل ۲-ب مشاهده می‌شود که نوفه‌های اسپایکی توسط الگوریتم SD-ROM به‌طور قابل‌توجهی حذف شده‌اند و نسبت سیگنال به نوفه از $-73/9 \text{ dB}$ (مربوط به سیگنال نوفه انباشته) به $0/1 \text{ dB}$ افزایش یافته است. نتایج حاصل از الگوریتم حذف اسپایک و برآورد پارامترهای سیگنال $(\phi_0, \Delta f_0, T_2^*, S_0)$ از طریق آشکارسازی پوش سیگنال و سپس برازش تک‌نمایی غیرخطی (قناتی و حفیظی، ۲۰۱۸)، در جدول ۱ آورده شده است. پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار بعد از ۱۰ بار تکرار محاسبه شده است.

صفر آغشته شده است، به بررسی عملکرد حذف اسپایک از طریق الگوریتم پیشنهادی می‌پردازیم. برای تولید نوفه اسپایکی مجموعه‌ای از تک‌اسپایک‌ها کنار یکدیگر قرار گرفته و حالت باندی ایجاد می‌کنند که هر کدام از تک‌اسپایک‌ها با دامنه تصادفی با رنج ۵ تا ۱۰ برابر دامنه سیگنال، انتخاب شده است (به شکل ۲-الف مراجعه کنید). سیگنال مصنوعی را به همراه اسپایک‌ها و نوفه گوسی ۳۵ بار تولید می‌کنیم. سیگنال اسپایکی هر بار به‌طور تصادفی در موقعیت‌های گوناگون بر روی محور زمان قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که وجود تک‌اسپایک‌ها در اندازه‌گیری‌های MRS مسئله چالش‌برانگیزی نیست حتی اگر تعداد آنها در داده‌ها زیاد باشد. در این حالت، به کارگیری یک روش حذف اسپایک ساده می‌تواند نتایج رضایت‌بخشی را به همراه داشته باشد. اما حذف چنین نوفه‌هایی (اسپایک‌های باندی شکل) از دوره‌های زمانی زیاد در سیگنال می‌تواند مشکل‌ساز باشد (کاستابل و مولر-پتکه، ۲۰۱۴).

بنابراین برای تحلیل بهتر عملکرد الگوریتم پیشنهادی،



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم SD-ROM وابسته به خصوصیات سیگنال.



شکل ۲. نتایج اعمال الگوریتم حذف اسپایک یک سیگنال MRS مصنوعی با دامنه اولیه $S_0 = 250 \text{ nV}$ و زمان واپاشی $T_2^* = 100 \text{ ms}$ که به اسپایک‌ها و نوفه گوسی با انحراف معیار $\sigma = 150 \text{ nV}$ و مقدار میانگین صفر آلوده شده است. (الف) تکناندازه‌گیری؛ پیش از پردازش. (ب) پس از پردازش از طریق SD-ROM. (ج) سیگنال برانباشته، پیش از پردازش برای ۳۵ تکناندازه‌گیری. (د) سیگنال برانباشته و پس از پردازش با استفاده از SD-ROM برای ۳۵ تکناندازه‌گیری.

جدول ۱. پارامترهای برآوردشده در پیاده‌سازی الگوریتم حذف اسپایک SD-ROM بر روی یک سیگنال MRS مصنوعی ($T_2^* = 100 \text{ ms}$) و $\phi_0 = 1.03 \text{ rad}$ و $S_0 = 250 \text{ nV}$ که توسط نوفه گوسی و اسپایک‌ها مخدوش شده است. پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار بعد از ۱۰ بار تکرار محاسبه شده است.

پارامتر	مقدار
$S_0(\text{nV})$	$210/64 \pm 2/18$
$T_2^*(\text{ms})$	$108/15 \pm 2/22$
$\Delta f_0(\text{Hz})$	$0/06 \pm 0/017$
$\phi_0(\text{rad})$	$1/019 \pm 0/011$

۲-۲. روش لوپ مرجع راه دور (Remote Reference Loop Method)

ایده استفاده از دستگاه‌های چندکاناله (دستگاه‌های چند کاناله متشکل از یک لوپ اصلی به‌عنوان لوپ فرستنده و گیرنده و چند لوپ مرجع که وظیفه ثبت نوفه‌های محیطی را دارند و در فاصله دورتر از لوپ اصلی قرار می‌گیرند) امکان معرفی روش‌های پردازشی پیشرفته را جهت حذف نوفه‌های هارمونیک در اختیار قرار می‌دهد.

در قسمت قبل الگوریتمی برای حذف نوفه‌های اسپایکی ارائه شد، در مرحله بعد روشی جهت حذف نوفه‌های هارمونیک ارائه می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، وجود نوفه‌های اسپایکی به‌شدت بر روی عملکرد الگوریتم ارائه‌شده برای حذف نوفه هارمونیک تأثیر گذار است، ازاین‌رو قبل از کاربست روش حذف نوفه هارمونیک، می‌بایست ابتدا رویدادهای اسپایکی در سری زمانی حذف و یا تعدیل شوند.

که همدوسی بین لوپ‌های اصلی و مرجع را توصیف می‌کند (چاو و همکاران، ۱۹۸۷؛ اسپایز، ۱۹۸۸)، یعنی تمام مشخصه‌های مربوط به نوفه‌های نا همگن مانند تغییرات دامنه، فاز و تفاوت‌های شکل و اندازه لوپ‌ها را در خود جای می‌دهد. سپس ثبت Nx با استفاده از TF، تبدیل شده و از سیگنال ثبت شده Tx در لوپ آشکارسازی کسر می‌شود. نکته اصلی این است که باید تا حد امکان TF مناسبی تشکیل شود.

۲-۲-۱. معادلات اصلی برای توابع انتقال (TF) در

حوزه زمان TD (Time Domain)

تبدیل سیگنال $R(t)$ به سیگنال $S(t)$ در حوزه زمان یعنی فیلتر H ، نیازمند انتخاب فیلتر بهینه همانند آنچه که دالگارد و همکاران (۲۰۱۲) به کار برده‌اند، می‌باشد. معادله نهایی برای یک لوپ مرجع به صورت زیر بیان می‌شود:

$$RS_t = \sum H_\tau RR_{t-\tau} \quad (8)$$

RS و RR به ترتیب خودهمبستگی $R(t)$ و همبستگی متقابل $R(t)$ و $S(t)$ هستند. جواب حاصل برای فیلتر H با استفاده از نمایش ماتریسی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$H = (R(t)^T R(t))^{-1} \cdot R(t)^T S(t) \quad (9)$$

بنابراین برآورد H یک مسئله معکوس است. با فرض این که ثبت‌ها حاوی نوفه هارمونیک همبسته هستند، اما علاوه بر آن توسط نوفه گوسی نیز آلوده شده‌اند، تعیین H ناپایدار می‌شود و عدم قطعیت‌هایی را نیز دربردارد. بنابراین فیلترینگ بهینه، تعداد ضرایب H_τ در معادله (۸) را محدود می‌کند. همانند دیگر مسائل معکوس بدو وضع (به عنوان مثال، آستر و همکاران، ۲۰۰۵) که تعداد مجهول‌ها در حوزه مدل کاهش می‌یابد (ضرایب H_τ)، اما تعداد داده‌ها ثابت است (همبستگی متقابل و خودهمبستگی RS_t و $RR_{t-\tau}$) برای این مسئله نیز برآورد در حوزه مدل دقیق‌تر می‌شود، یعنی عدم قطعیت ضرایب H_τ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، به کارگیری کمترین ضرایب ممکن باعث می‌شود که اثرات تصنعی در ابتدای ثبت، فیلترشده و به حداقل برسند (باتکاس، ۲۰۰۰). با

معرفی دستگاه چندکاناله برای اندازه‌گیری‌های MRS سطحی یک پیشرفت مهم، در زمینه کاهش نوفه محسوب می‌شود. این ایده بر پایه چیدمان لوپ‌های مرجع در فاصله دورتر از لوپ اصلی، در منطقه تحت بررسی استوار است که فقط نوفه محیط را اندازه‌گیری می‌کنند (والش، ۲۰۰۸). تعداد و نیز جهت‌یافتگی لوپ‌های مرجع به نوع منابع نوفه‌های الکترومغناطیسی و همچنین موقعیت جغرافیایی (جهت) آن بستگی دارد. برای نمونه اگر در منطقه‌ای دو منشأ نوفه الکترومغناطیسی در جهت‌های گوناگون وجود داشته باشد، در این صورت دو لوپ مرجع در همان جهات به منظور ثبت نوفه‌ها به کار برده می‌شود. هرچند استفاده از این روش از لحاظ عملیاتی می‌تواند زمان بر و نیاز به کار بیشتر داشته باشد ولی نتایج کاربست آن امیدبخش است.

برای این که سیگنال نوفه‌ای که بر روی لوپ‌های مرجع ثبت شده است، شبیه به نوفه ثبت شده در سیگنال لوپ اصلی باشد، از توابع انتقال (TF) (Transfer Function) استفاده می‌کنیم. توابع انتقال (TF) جهت همدوسی نوفه‌های به دست آمده از لوپ‌های مرجع و اصلی تعیین می‌شوند. این توابع انتقال، امکان پیش‌بینی نوفه در لوپ اصلی را میسر می‌سازند و در نتیجه منجر به کاهش مؤثر نوفه هارمونیک در داده‌های اصلی می‌شود (والش، ۲۰۰۸؛ دالگارد و همکاران، ۲۰۱۲؛ مولر-پتکه و کاستیل، ۲۰۱۳). این روش را حذف نوفه‌های هارمونیک (HNC) می‌نامیم. روش حذف نوفه هارمونیک (HNC) مبتنی بر ایده ساده‌ای برای اندازه‌گیری سیگنال MRS آلوده به نوفه، در یک کانال (کانال آشکارسازی- Tx) و اندازه‌گیری نوفه در کانال یا کانال‌های راه دور دیگر (کانال مرجع- Nx) است. اگر نوفه به لحاظ مکانی همگن باشد و لوپ‌های آشکارسازی و مرجع نیز هم‌اندازه و هم‌شکل باشند، می‌توان به سادگی کانال مرجع را از کانال آشکارسازی کسر کرد. اما نوفه معمولاً همگن نیست و به کارگیری لوپ‌های کوچک‌تر برای کانال‌های مرجع به دلایل لجستیکی ترجیح داده می‌شود. این روش از دو مرحله تشکیل شده است. ابتدا باید تابع انتقال (TF) به دست آید

می‌کنیم:

$$\begin{bmatrix} (R^1)^T S \\ \vdots \\ (R^c)^T S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R^1)^T R^1 & \dots & (R^1)^T R^c \\ (R^2)^T R^1 & \dots & (R^2)^T R^c \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (R^c)^T R^1 & \dots & (R^c)^T R^c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H^1 \\ \vdots \\ H^c \end{bmatrix} \quad (14)$$

بنابراین این معادله باید برای به دست آوردن فیلتر جداگانه H حل شود و این فیلتر نیز در ادامه برای انجام هماویخت یعنی تبدیل ثبت‌های نوفه، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳. مثال‌های عددی

در مدل‌سازی مصنوعی دو فرض در نظر گرفته می‌شود: فرض بسامد پایه ثابت با زمان، فرض بسامد پایه متغیر با زمان و به بررسی کارایی الگوریتم در این دو مورد پرداخته می‌شود.

۳-۱. حذف نوفه با فرض بسامد پایه ثابت با زمان

با استفاده از مدل‌سازی یک سیگنال مصنوعی میرای نمایی، با دامنه اولیه $s_0 = 250 \text{ nV}$ ، زمان واپاشی $T_2^* = 100 \text{ ms}$ ، بسامد لارمور $f_0 = 1995 \text{ Hz}$ ، فاز $\phi_0 = 1.03 \text{ rad}$ ، طول زمان 500 میلی‌ثانیه و بسامد نمونه‌برداری 10 کیلوهرتز که توسط اسپایک‌ها، نوفه‌های هارمونیک و نوفه تصادفی گوسی با انحراف معیار $\sigma = 150 \text{ nV}$ و مقدار میانگین صفر، مخدوش شده است، به بررسی عملکرد روش حذف نوفه می‌پردازیم. به کارگیری فیلتر میانگین ترتیب رتبه‌ای وابسته به سیگنال (SD-ROM) به حذف نوفه اسپایکی می‌پردازیم و از یک لوپ اصلی برای ثبت سیگنال و از سه لوپ مرجع برای ثبت نوفه استفاده می‌کنیم. دامنه هارمونیک‌ها در لوپ اصلی به صورت تصادفی بین 20 تا 80 نانو ولت انتخاب شده است و دامنه هارمونیک‌ها در لوپ‌های مرجع به صورت تصادفی بین 300 تا 600 نانو ولت در نظر گرفته شده است. فاز سیگنال در لوپ اصلی $1/3$ رادیان و فاز هارمونیک‌ها در لوپ‌های مرجع به صورت تصادفی بین $0/5$ تا $1/5$ رادیان انتخاب شده است بسامد پایه ثابت $49/7$ هرتز و بسامد هارمونیک‌های 37 تا 46 ام به ترتیب $(1838/9, 1888/6, 1938/3, 1988, 2037/7, 2087/4, 2137/1, 2186/8, 2236/5, 2286/2)$ برای شبیه‌سازی

این حال، برای تبدیل مناسب سیگنال، نیاز به تعداد ضرایب مشخصی وجود دارد، یعنی ضرایب بیشتری با افزایش پیچیدگی نوفه مورد نیاز هستند. این فیلتر H در نهایت با سیگنالی که در لوپ مرجع ثبت شده است، هماویخت می‌شود و سپس از سیگنالی که در لوپ اصلی ثبت شده است، کسر می‌شود. معادله (۸) را می‌توان به راحتی به تعداد دلخواه مراجع تعمیم داد. فیلتر H با ضرایب H_τ را تابع انتقال (TF) در حوزه زمان می‌نامیم.

۲-۲-۲. TF در TD برای تعداد لوپ مرجع دلخواه

برای به دست آوردن تبدیل سیگنال $R(t)$ به سیگنال $S(t)$ در حوزه زمان و برای یک لوپ مرجع، فیلتر H به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_t = \sum_{\tau=0}^n H_\tau R_{t-\tau} \quad (10)$$

n تعداد ضرایب فیلتر است. این رابطه را صرفاً با جمع کردن تمام کانال‌ها، هر کدام با فیلتر مخصوص خود به تعداد دلخواه c کانال مرجع $R(t)^c$ تعمیم می‌دهیم، یعنی نتایج حاصل را پس از انجام کانولوشن جداگانه برای هر لوپ مرجع، با هم جمع می‌کنیم:

$$S_t = \sum_{\tau=0}^n H_\tau^1 R_{t-\tau}^1 + \sum_{\tau=0}^n H_\tau^2 R_{t-\tau}^2 + \dots + \sum_{\tau=0}^n H_\tau^c R_{t-\tau}^c \quad (11)$$

این رابطه را می‌توانیم با استفاده از نمایش ماتریسی برای عملیات هماویخت به صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$S = R^1 H^1 + R^2 H^2 + \dots + R^c H^c \quad (12)$$

بدین ترتیب تعداد ضرایب مجهول فیلتر را به طور چشم‌گیری افزایش داده‌ایم اما همچنان تنها یک معادله داریم این معادله جواب ندارد. با این حال، می‌توانیم از همبستگی احتمالی بین کانال‌ها استفاده کنیم. بنابراین معادله (۱۲) را در هر یک از کانال‌های مرجع ضرب کرده و همبستگی را وارد می‌کنیم:

$$\begin{aligned} (R^1)^T S &= (R^1)^T R^1 H^1 + (R^1)^T R^2 H^2 + \dots + (R^1)^T R^c H^c \\ (R^2)^T S &= (R^2)^T R^1 H^1 + (R^2)^T R^2 H^2 + \dots + (R^2)^T R^c H^c \\ &\vdots \\ (R^c)^T S &= (R^c)^T R^1 H^1 + (R^c)^T R^2 H^2 + \dots + (R^c)^T R^c H^c \end{aligned} \quad (13)$$

روابط فوق را به صورت نمایش ماتریسی زیر بازنویسی

سیگنال هارمونیک در نظر گرفته شده است.

ابتدا یک فیلتر میان‌گذر (band pass) بر روی داده‌ها اعمال کرده تا هارمونیک‌های خیلی پایین‌تر و خیلی بالاتر از بسامد سیگنال را به راحتی حذف کنیم و حذف هارمونیک‌هایی که نزدیک بسامد سیگنال می‌باشند برای ما چالش اصلی باشد.

همان‌گونه که ذکر شد سیگنال از یک بسامد پایه ثابت (۴۹/۷ هرتز) با هارمونیک‌هایی از مضارب صحیح آن در زمان معین تشکیل شده است. فیلترینگ از طریق جداسازی یک نسخه بازسازی شده از نوفه‌ها و تفریق آنها از سیگنال اصلی دارای نوفه انجام می‌شود.

پارامترهای مفروض برای سیگنال مصنوعی آلوده به نوفه شبیه‌سازی شده به ترتیب در جدول ۲ و ۳ آورده شده است. نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم حذف اسپایک و روش حذف نوفه‌های هارمونیک شامل برآورد پارامترهای سیگنال (S_0 , T_2^* , Δf_0 , ϕ_0) از طریق آشکارسازی پوش سیگنال و سپس برازش تک‌نمایی غیرخطی در جدول ۴ آورده شده است. پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار بعد از ۱۰ بار تکرار محاسبه شده است.

در شکل ۳-الف نوفه اسپایکی از $t = 282 \text{ ms}$ تا $t = 310 \text{ ms}$ نشان داده شده است. شکل ۳-الف تک‌اندازه‌گیری پیش از پردازش حاوی نوفه اسپایکی و هارمونیک و گوسی را نشان می‌دهد که در شکل ۳-ب در حوزه بسامد نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بر اساس شکل ۳-ب در بسامد مرکزی مقدار انرژی بیشتر از بخش‌های دیگر است، این به دلیل وجود نوفه اسپایکی است.

شکل ۳-ج نتیجه به کارگیری الگوریتم حذف اسپایک و

حذف نوفه‌های هارمونیک با استفاده از توابع انتقال را نشان داده که در شکل ۳-د این موضوع در حوزه بسامد نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-ج دیده می‌شود، اسپایک‌ها به خوبی حذف شده‌اند و مقادیر اسپایک با میانگین مقادیر تک‌اندازه‌گیری‌های دیگر جایگزین شده است. علت اصلی این که شکل نمایی در سیگنال مشاهده نمی‌شود، وجود نوفه‌های گوسی می‌باشد.

در شکل ۳-د مشاهده می‌شود انرژی بسامد مرکزی پس از حذف نوفه اسپایکی کاهش می‌یابد و بر اثر اعمال روش حذف نوفه‌های هارمونیک با استفاده از توابع انتقال، مقدار قابل ملاحظه‌ای از نوفه‌های هارمونیک حذف شده است. هارمونیک‌های ۱۸۳۸/۹، ۱۹۸۸، ۲۰۳۷/۷، ۲۰۸۷/۴ و ۲۲۸۶/۲ تقریباً حذف شده است و دامنه بقیه هارمونیک‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای تضعیف شده است و همان‌طور که دیده می‌شود، بسامد سیگنال خودش را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین سیگنال برانباشته و پردازش شده از طریق SD-ROM و TF برای ۳۵ تک‌اندازه‌گیری به همراه پوش سیگنال در شکل ۳-ه آورده شده و نتایج آن در حوزه بسامد نیز در شکل ۳-و نشان داده شده است. در شکل ۳-ه شکل نمایی سیگنال، بعد از برانبارش ۳۵ تک‌اندازه‌گیری و حذف نوفه‌های گوسی، به وضوح قابل مشاهده است. همچنین پوش سیگنال (منحنی آبی‌رنگ) و مقدار دامنه اولیه (دایره آبی‌رنگ) بعد از برانبارش به دست آمده است.

همان‌طور که در شکل ۳-و دیده می‌شود بعد از برانبارش سیگنال‌ها، تقریباً دیگر از نوفه‌های هارمونیک اثری نیست و سیگنال بهتر نمایش داده می‌شود و نسبت سیگنال به نوفه از $-73/9 \text{ dB}$ (مربوط به سیگنال نوفه انباشته) به $-15/15 \text{ dB}$ افزایش یافته است.

جدول ۲. پارامترهای مفروض برای سیگنال مصنوعی.

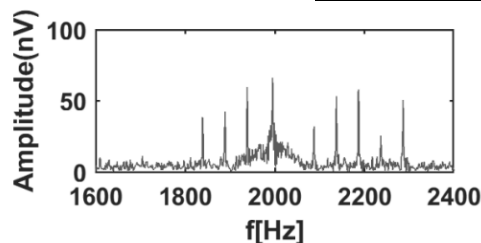
سیگنال لوپ اصلی	پارامتر
۲۵۰	$S_0(nv)$
۱۰۰	$T_2^*(ms)$
۱۹۹۵	$f_0(Hz)$
۱/۰۳	$\phi_0(rad)$

جدول ۳. پارامترهای مفروض برای سیگنال مصنوعی آلوده به نوفه شبیه‌سازی شده (اعداد به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند).

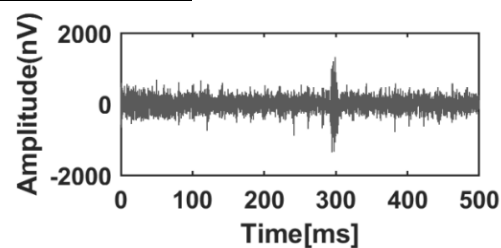
سیگنال لوپ مرجع ۳	سیگنال لوپ مرجع ۲	سیگنال لوپ مرجع ۱	سیگنال لوپ اصلی	پارامتر
۶۰۰-۳۰۰	۶۰۰-۳۰۰	۶۰۰-۳۰۰	۸۰-۲۰	دامنه هارمونیک‌ها (nv)
۰/۳۱۶	۰/۳۱۶	۰/۳۱۶	۱۵۰	انحراف معیار نوفه گوسی
۰/۵-۱/۵	۰/۵-۱/۵	۰/۵-۱/۵	۰/۵-۱/۵	فاز هارمونیک‌ها (rad)

جدول ۴. پارامترهای برآورد شده در پیاده‌سازی الگوریتم حذف اسپایک SD-ROM و روش حذف نوفه‌های هارمونیک با بسامد پایه ثابت بر روی یک سیگنال MRS مصنوعی ($T_2^* = 100\ ms$ ، $\phi_0 = 1.03\ rad$ و $S_0 = 250\ nV$) که توسط نوفه گوسی و اسپایک‌ها و نوفه‌های هارمونیک مخدوش شده است. پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار بعد از ۱۰ بار تکرار محاسبه شده است.

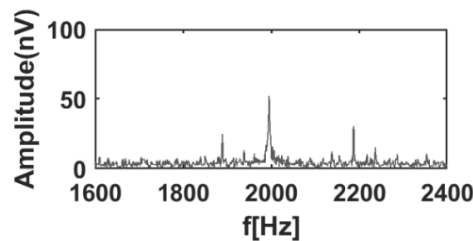
مقدار	پارامتر
$214/68 \pm 2/54$	$S_0(nV)$
$107/19 \pm 1/75$	$T_2^*(ms)$
$-0/04 \pm 0/03$	$\Delta f_0(Hz)$
$1/05 \pm 0/01$	$\phi_0(rad)$



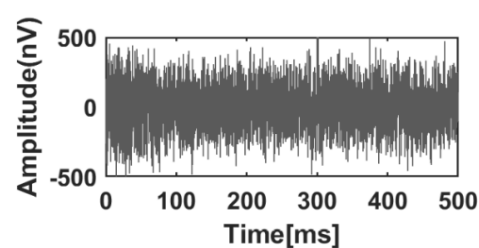
(ب)



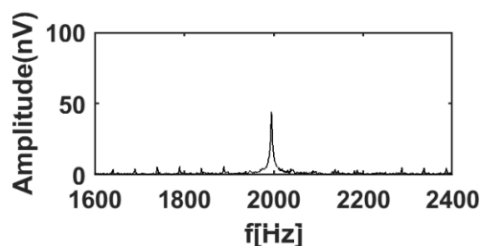
(الف)



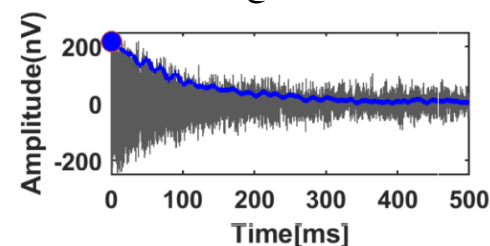
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۳. نتایج اعمال الگوریتم حذف اسپایک و حذف نوفه هارمونیک با بسامد پایه ثابت، به یک سیگنال MRS مصنوعی با دامنه اولیه $S_0 = 250\ nV$ و زمان واپاشی $T_2^* = 100\ ms$ که به اسپایک‌ها و نوفه هارمونیک و نوفه گوسی با انحراف معیار $\sigma = 150\ nV$ آلوده شده است. الف) نمایش تک‌اندازه‌گیری، پیش از پردازش در حوزه زمان، ب) نمایش تک‌اندازه‌گیری، پیش از پردازش در حوزه بسامد، ج) پردازش از طریق SD-ROM و TF در حوزه زمان، د) نمایش سیگنال پردازش شده از طریق SD-ROM و TF در حوزه بسامد، ه) سیگنال برانباشته و پردازش شده از طریق SD-ROM و TF برای ۳۵ تک‌اندازه‌گیری، به همراه پوش سیگنال در حوزه زمان و نمایش سیگنال انباشته و پردازش شده از طریق SD-ROM و TF برای ۳۵ تک‌اندازه‌گیری، به همراه پوش سیگنال در حوزه بسامد. و) نمایش سیگنال پردازش شده و برانباشته در حوزه بسامد. دایره آبی رنگ مقدار دامنه اولیه (S_0) برآورد شده است.

۳-۲. حذف نوفه با فرض بسامد پایه متغیر با زمان

همان‌طور که قبلاً اشاره شد یکی از چالش‌های کنونی پردازش سیگنال MRS وجود نوفه‌های هارمونیک با بسامد پایه متغیر با زمان است. در صورتی که سیگنال هارمونیک از یک منبع مشخص دارای بسامد پایه متغیر با زمان باشد یعنی مقدار بسامد پایه چند میلی‌هرتز نسبت به مقدار اسمی اختلاف داشته باشد (به علت تغییرات عرضه و تقاضا در شبکه الکتریکی) اکثر الگوریتم‌های پیشنهادی عملکرد مناسبی در حذف نوفه‌های هارمونیک نخواهد داشت.

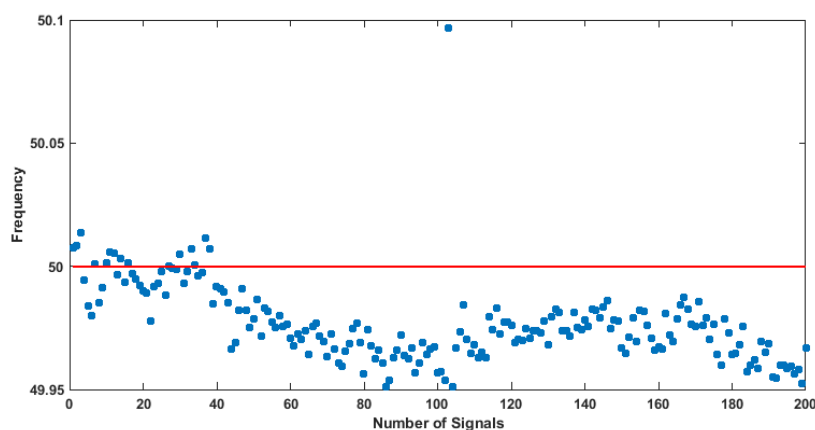
هدف این مطالعه، بررسی شرایطی است که در آن بسامد پایه را نتوان در طول اندازه‌گیری سیگنال ثابت در نظر گرفت. در واقع، کاملاً مشخص شده است که بسامد پایه نوفه هارمونیک به علت تغییرات عرضه و تقاضا در شبکه برق سراسری، تغییرات اندکی در طول زمان خواهد داشت (آدامز و همکاران، ۱۹۸۲؛ لگچنکو و والا، ۲۰۰۳). در بررسی‌های MRS فرض عمومی این است که این تغییرات در مدت ثبت سیگنال به آرامی تغییر می‌کنند و در نتیجه، نوفه هارمونیک را می‌توان با فرض بسامد پایه ثابت پردازش کرد. با این وجود بررسی‌های گوناگونی به بیان ریسک نامعتبر بودن این فرض پرداخته‌اند از جمله می‌توان به بوتلر و راسل (۲۰۰۳) جنگ و چن (۲۰۱۱) اشاره کرد. بنابراین به بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی در مواقعی که سیگنال هارمونیک دارای بسامد پایه متغیر با زمان است، پرداخته می‌شود. برای آن که متغیر بودن بسامد پایه با

زمان را بر روی داده‌های صحرایی نشان دهیم، از سیگنال نوفه که به طول ۱۰۰ ثانیه و با بسامد نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز ثبت شده، استفاده شد. سیگنال نوفه صحرایی به ۲۰۰ قسمت از لحاظ زمانی تقسیم و برای هر قسمت آن، بسامد پایه برآورد شد. به منظور برآورد بسامد پایه، از الگوریتم ارائه شده توسط قناتی و حفیظی (۲۰۱۷) استفاده شد. این الگوریتم برپایه یک روش بهینه‌سازی و با هدف برآورد مؤلفه‌های سیگنال هارمونیک (یعنی دامنه، فاز و بسامد) ارائه شده است.

شکل ۴، تغییرات بسامد پایه برآورد شده برای هر قسمت از سیگنال که به طول ۰/۵ ثانیه است را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود بسامد پایه در محدوده ۴۹/۹۵ تا ۵۰/۰۹ هرتز در حال تغییر است.

در گام بعدی، عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی سیگنال سونداژ تشدید مغناطیسی آغشته به نوفه هارمونیک متغیر با زمان ارزیابی می‌شود. برای این منظور ابتدا نیاز به ساختن هارمونیک‌ها با بسامد متغیر است. برای اضافه کردن بسامدهای پایه متغیر با زمان هیچ الگوی خاصی وجود ندارد و با توجه به این که رفتار آنها تقریباً تصادفی است، بنابراین نمی‌توانیم یک الگوی ریاضی خاصی برای آن ارائه دهیم؛ از این رو در این مقاله از رابطه زیر برای ساختن بسامدهای پایه که تابعی از زمان‌های گوناگون است، استفاده می‌شود. بر اساس تعداد زمان‌ها بردار بسامد پایه تغییر می‌کند.

$$F = 50 + 0.05 t^2 \quad (15)$$



شکل ۴. تغییرات بسامد پایه با زمان بر روی سیگنال نوفه به طول ۱۰۰ ثانیه و با بسامد نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز که به ۲۰۰ قسمت مساوی با طول ۰/۵ ثانیه تقسیم شده است.

به طوری که t زمان بر حسب ثانیه و F بسامد پایه مورد نظر است. مدت ثبت سیگنال ۱ ثانیه در نظر گرفته شده که به ۶ قسمت مساوی تقسیم می شود (زمان های ۰،۲، ۰،۴، ۰،۶، ۰،۸ و ۱ ثانیه که منجر به تولید بسامد پایه ۵۰ و ۵۰/۰۰۲ و ۵۰/۰۰۸ و ۵۰/۰۱۸ و ۵۰/۰۳۲ و ۵۰/۰۵ و ۵۰/۰۷۵ هرتز می شود). هارمونیک ها را با بسامد پایه متغیر شبیه سازی کرده و هارمونیک ها با مضارب ۳۷ تا ۴۶ ام را در نظر می گیریم و به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، زمانی که بسامد پایه متغیر باشد می پردازیم. پارامترهای هارمونیک های شبیه سازی شده به جز بسامد پایه، همانند پارامترهایی است که در جدول ۲ و ۳ آورده شده، در نظر گرفته می شود.

نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم حذف اسپایک و روش حذف نوفه های هارمونیک با بسامد پایه متغیر شامل برآورد پارامترهای سیگنال ($\phi_0, \Delta f_0, T_2^*, S_0$) از طریق آشکارسازی پوش سیگنال و سپس برازش تک نمایی غیرخطی در جدول ۵ آورده شده است. پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار بعد از ۱۰ بار تکرار محاسبه شده است. همان طور که مشاهده می شود مقادیر مناسب می باشند.

جدول ۵. پارامترهای برآورد شده در پیاده سازی الگوریتم حذف اسپایک SD-ROM و روش حذف نوفه های هارمونیک با بسامد پایه متغیر بر روی یک سیگنال MRS مصنوعی ($T_2^* = 100 \text{ ms}$ و $\phi_0 = 1.03 \text{ rad}$ و $S_0 = 250 \text{ nV}$) که توسط نوفه گوسی و اسپایک ها و نوفه های هارمونیک آغشته شده است. پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار بعد از ۱۰ بار تکرار محاسبه شده است.

مقدار	پارامتر
196.08 ± 5.36	$S_0 (nV)$
112.84 ± 2.95	$T_2^* (ms)$
-0.001 ± 0.02	$\Delta f_0 (Hz)$
1.02 ± 0.02	$\phi_0 (rad)$

در شکل ۵-الف سیگنال بدون نوفه در حوزه زمان و در شکل ۵-ب سیگنال بدون نوفه در حوزه بسامد نشان داده شده است. در شکل ۵-ج نوفه اسپایکی از $t = 225 \text{ ms}$

تا $t = 249 \text{ ms}$ نشان داده شده است. شکل ۵-د تک اندازگی پیش از پردازش حاوی نوفه اسپایکی و هارمونیک و گوسی را نشان می دهد که در شکل ۵-د در حوزه بسامد نمایش داده شده است. همان طور که دیده می شود بر اساس شکل ۵-د به دلیل وجود نوفه اسپایکی، بسامد مرکزی مقدار انرژی بیشتری نسبت به بخش های دیگر دارد.

شکل ۵-ه نتیجه به کارگیری الگوریتم حذف اسپایک و حذف نوفه های هارمونیک با استفاده از توابع انتقال را نشان داده که در شکل ۵-و این موضوع در حوزه بسامد نمایش داده شده است. همان طور که در شکل ۵-ه دیده می شود، اسپایک ها به خوبی حذف شده اند و مقادیر اسپایک با میانگین مقادیر تک اندازگی های دیگر جایگزین شده است. علت اصلی این که شکل نمایی در سیگنال مشاهده نمی شود، وجود نوفه های گوسی می باشد.

در شکل ۵-و مشاهده می شود که پس از حذف نوفه اسپایکی، انرژی بسامد مرکزی کاهش می یابد و بر اثر اعمال روش حذف نوفه های هارمونیک با استفاده از توابع انتقال در حوزه زمان، مقدار قابل ملاحظه ای از نوفه های هارمونیک حذف شده و دامنه بقیه هارمونیک ها تضعیف شده است و همان طور که دیده می شود، بسامد سیگنال خودش را به خوبی نشان می دهد.

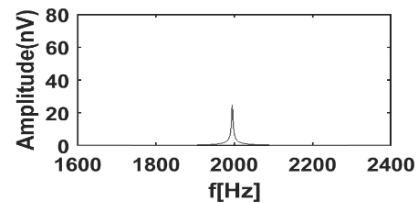
همچنین سیگنال برانباشته و پردازش شده از طریق SD-ROM و TF برای ۳۵ تک اندازگی گیری به همراه پوش سیگنال در شکل ۵-ز آورده شده و نتایج آن در حوزه بسامد نیز در شکل ۵-ح نشان داده شده است. در شکل ۵-ز بعد از برانبارش ۳۵ تک اندازگی و حذف نوفه های گوسی، شکل نمایی سیگنال به وضوح قابل مشاهده است. همچنین پوش سیگنال (منحنی آبی رنگ) و مقدار دامنه اولیه (دایره آبی رنگ) بعد از برانبارش به دست آمده است.

همان طور که در شکل ۵-ح دیده می شود بعد از برانبارش سیگنال ها، تقریباً دیگر از نوفه های هارمونیک اثری نیست و سیگنال بهتر نمایش داده می شود و نسبت سیگنال به نوفه

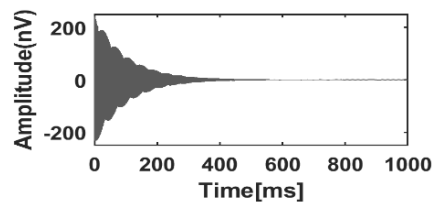
کنند، اما این به‌عنوان یک روش ایده‌آل برای حذف هارمونیک‌ها در نظر گرفته نمی‌شود؛ زیرا تا حدود خیلی کمی اثر هارمونیک‌ها را حذف می‌کند. بنابراین به‌کارگیری الگوریتم‌هایی مانند آنچه که در این مقاله ارائه شده است، برای حذف هارمونیک‌ها یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است.

از -80 dB (مربوط به سیگنال نوفه انباشته) به $0/12$ dB افزایش یافته است.

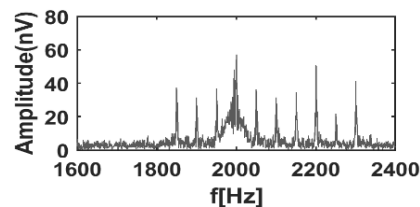
بعد از برانبارش تک‌سیگنال‌هایی که پردازش شده، باز هم مقداری از هارمونیک‌ها تضعیف می‌شود، دلیل این تضعیف هارمونیک‌ها وجود دامنه و فازهای تصادفی می‌باشد که باعث می‌شود تا حدودی اثر همدیگر را خنثی



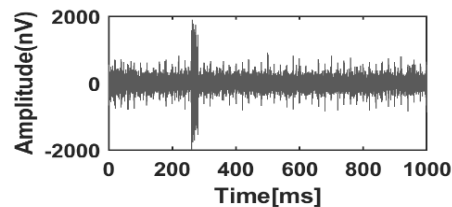
(ب)



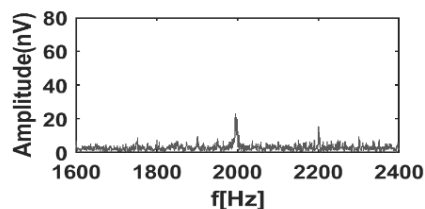
(الف)



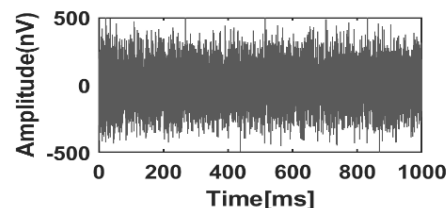
(د)



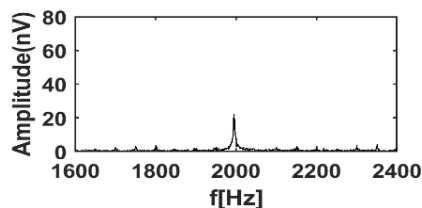
(ج)



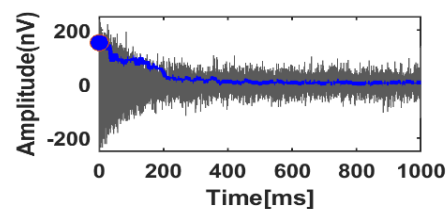
(و)



(ه)



(ح)



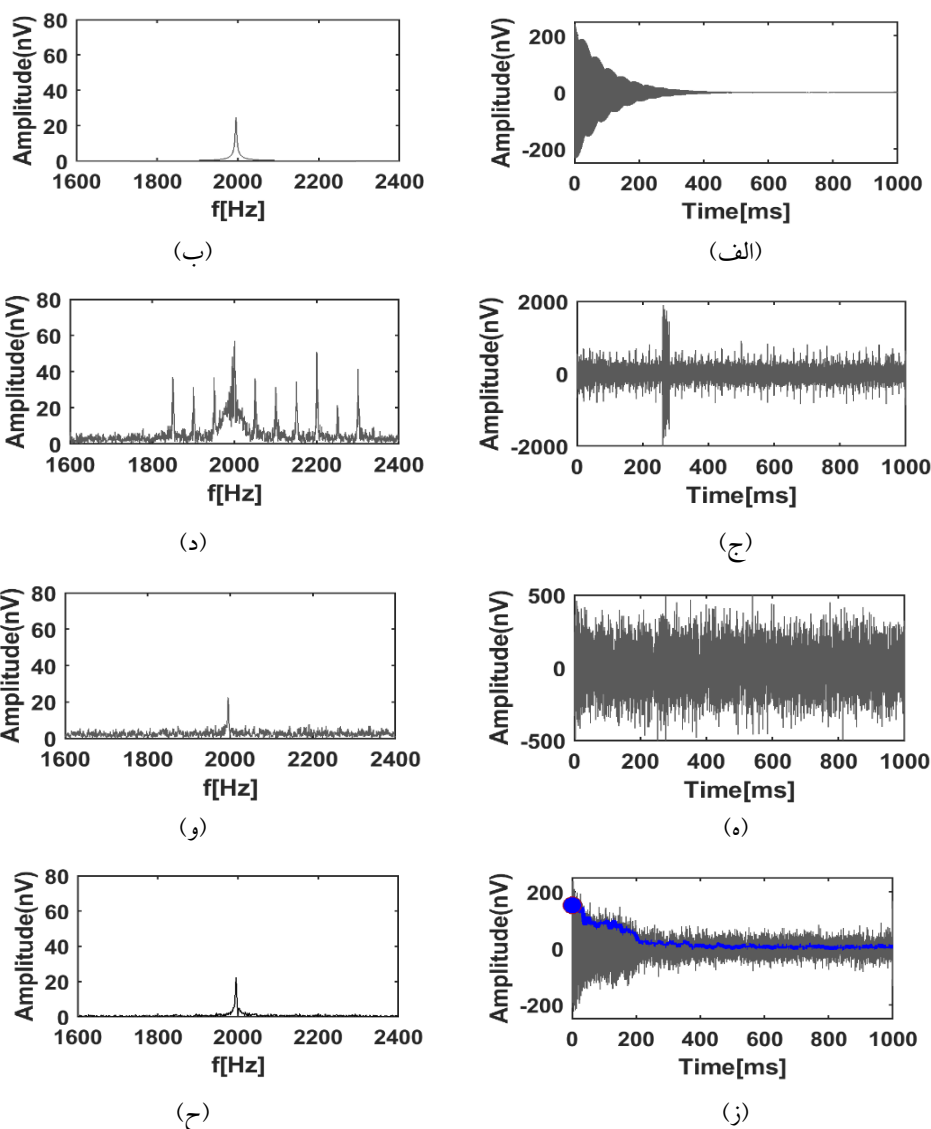
(ز)

شکل ۵. نتایج اعمال الگوریتم حذف اسپایک و حذف نوفه هارمونیک با بسامد پایه متغیر با استفاده از توابع انتقال، به یک سیگنال MRS

مصنوعی با دامنه اولیه $S_0 = 250$ nV و زمان واپاشی $T_2^* = 100$ ms که به اسپایک‌ها و نوفه هارمونیک و نوفه گوسی با انحراف معیار $\sigma = 150$ nV آلوده شده است. (الف) سیگنال بدون نوفه در حوزه زمان، (ب) نمایش سیگنال بدون نوفه در حوزه بسامد، (ج) تکاندازه‌گیری؛ پیش از پردازش در حوزه زمان، (د) نمایش تکاندازه‌گیری؛ پیش از پردازش در حوزه بسامد، (ه) پردازش از طریق SD-ROM و TF در حوزه زمان و (و) نمایش سیگنال پردازش شده از طریق SD-ROM و TF در حوزه بسامد، (ز) سیگنال برانباشته و پردازش شده از طریق SD-ROM و TF برای ۳۵ تکاندازه‌گیری، به‌همراه پوش سیگنال در حوزه زمان، (ح) نمایش سیگنال انباشته و پردازش شده از طریق SD-ROM و TF برای ۳۵ تکاندازه‌گیری. دایره آبی‌رنگ مقدار دامنه اولیه (S_0) برآورد شده است.

که نشان از عملکرد و نتایج مناسب الگوریتم حذف نوفه‌های هارمونیک با استفاده از توابع انتقال دارد. همچنین لازم به ذکر است که پردازش سیگنال با استفاده از روش بر پایه مدل، بسیار زمان‌بر بوده اما با روش ارائه‌شده در این مقاله با سرعت بسیار بیشتری صورت می‌پذیرد.

برای ارزیابی بهتر عملکرد روش حذف نوفه‌های هارمونیک با استفاده از توابع انتقال، آن را با روش بر پایه مدل (Model-based)، (لارسن و همکاران، ۲۰۱۴) مقایسه کرده و نتایج به‌کارگیری روش بر پایه مدل در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مطابقت خوبی در نتایج نهایی قابل مشاهده بوده



شکل ۶. نتایج اعمال الگوریتم حذف اسپایک و حذف نوفه هارمونیک با بسامد پایه متغیر با استفاده از روش بر پایه مدل، به یک سیگنال MRS مصنوعی با دامنه اولیه $S_0 = 250 \text{ nV}$ و زمان واپاشی $T_2^* = 100 \text{ ms}$ که به اسپایک‌ها و نوفه هارمونیک و نوفه گوسی با انحراف معیار $\sigma = 150 \text{ nV}$ آلوده شده است. (الف) سیگنال بدون نوفه؛ در حوزه زمان، (ب) نمایش سیگنال بدون نوفه؛ در حوزه بسامد، (ج) تکاندازه‌گیری؛ پیش از پردازش در حوزه زمان، (د) نمایش تکاندازه‌گیری؛ پیش از پردازش در حوزه بسامد، (ه) پردازش از طریق SD-ROM و روش بر پایه مدل در حوزه زمان، (و) نمایش سیگنال پردازش‌شده از طریق SD-ROM و روش بر پایه مدل در حوزه بسامد، (ز) سیگنال برانباشته و پردازش شده از طریق SD-ROM و روش بر پایه مدل برای ۳۵ تکاندازه‌گیری، به‌همراه پوش سیگنال در حوزه زمان، (ح) نمایش سیگنال انباشته و پردازش شده از طریق SD-ROM و روش بر پایه مدل برای ۳۵ تکاندازه‌گیری. دایره آبی‌رنگ مقدار دامنه اولیه (S_0) برآورد شده است.

۴. نتیجه‌گیری

همان‌گونه که ذکر شد دو منبع مهم نوفه الکترومغناطیسی محیطی هنگام ثبت سیگنال‌های MRS، هارمونیک‌های خطوط نیرو و نوفه‌های اسپایکی می‌باشند. هارمونیک‌های خطوط نیرو به دلیل ماهیت تغییرپذیر بسامد پایه و محتوای هارمونیک‌ها در طول زمان و همچنین به دلیل داشتن مشخصه‌های متفاوت در شبکه‌های گوناگون برق، هارمونیک‌های پیچیده‌ای محسوب می‌شوند. نوفه‌های اسپایکی از منابع نوفه طبیعی و انسانی با ظاهر متفاوت، نشأت می‌گیرند و کیفیت داده‌ها را کاهش می‌دهند.

با توجه به اهمیت حذف نوفه و افزایش نسبت سیگنال به نوفه در اندازه‌گیری‌های سیگنال MRS، به‌کارگیری روش‌های پردازشی پیشرفته ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین در این مقاله ابتدا الگوریتمی بر مبنای روشی آماری تحت عنوان SD-ROM جهت حذف نوفه‌های اسپایکی با آستانه‌گذاری بر اساس ویژگی‌های خود سیگنال ارائه شد و سپس نوفه‌های هارمونیک مربوط به خطوط نیرو، از طریق روش لوپ مرجع راه دور و به کمک تخمین یک تابع انتقال حذف شدند. نوفه‌های اسپایکی با منابع گوناگون در اندازه‌گیری‌های MRS، باعث افت عملکرد الگوریتم حذف نوفه هارمونیک خطوط نیرو می‌شوند. همچنین وجود نوفه اسپایکی باعث افزایش مقدار انرژی در بسامد مرکزی سیگنال می‌شود. بنابراین اسپایک‌ها قبل از حذف نوفه هارمونیک، باید شناسایی و حذف شوند. با استفاده از الگوریتم حذف اسپایک، مقادیر اسپایک با میانگین مقادیر تک‌اندازه‌گیری‌های دیگر جایگزین شد. عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی بر روی سیگنال‌های شبیه‌سازی شده سونداژ تشدید مغناطیسی و آلوده به نوفه‌های اسپایکی و هارمونیک مورد ارزیابی قرار گرفت. بسامد پایه ۴۹/۷ هرتز و بسامد هارمونیک‌های ۳۷ تا ۴۶ ام آن برای شبیه‌سازی سیگنال هارمونیک با بسامد پایه ثابت

با زمان در نظر گرفته شد، نتایج نشان می‌دهد که پس از به‌کارگیری الگوریتم حذف اسپایک، انرژی بسامد مرکزی کاهش یافته و بر اثر اعمال روش حذف نوفه‌های هارمونیک با استفاده از توابع انتقال، مقدار قابل ملاحظه‌ای از نوفه‌های هارمونیک حذف شده است. هارمونیک‌های ۳۷، ۴۰، ۴۱، ۴۲ و ۴۶ ام تقریباً حذف شده و دامنه بقیه هارمونیک‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای تضعیف شده است و بسامد سیگنال خودش را به خوبی نشان می‌دهد. بعد از برابارش اندازه‌گیری‌ها و حذف نوفه‌های گوسی، سیگنال به شکل نمایی قابل مشاهده بوده و در حوزه بسامد، تقریباً دیگر اثری از نوفه‌های هارمونیک نیست و سیگنال بهتر نمایش داده می‌شود که عملکرد مناسب الگوریتم حذف اسپایک و روش حذف نوفه‌های هارمونیک با استفاده از توابع انتقال را نشان می‌دهد.

در ادامه شرایطی که بسامد پایه متغیر با زمان باشد مورد ارزیابی قرار گرفت و بسامد هارمونیک‌های ۳۷ تا ۴۶ ام آن برای شبیه‌سازی سیگنال هارمونیک در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که انرژی بسامد مرکزی، پس از به‌کارگیری الگوریتم حذف اسپایک، کاهش می‌یابد و با روش حذف نوفه‌های هارمونیک با استفاده از توابع انتقال، مقدار قابل ملاحظه‌ای از نوفه‌های هارمونیک حذف شد. هارمونیک‌های ۳۷، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۵ و ۴۶ ام تقریباً حذف شده و دامنه بقیه هارمونیک‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای تضعیف شده است و بسامد سیگنال به خوبی قابل مشاهده است. بعد از برابارش اندازه‌گیری‌ها و حذف نوفه‌های گوسی، سیگنال به شکل نمایی قابل مشاهده بوده و در حوزه بسامد، تقریباً اثری از نوفه‌های هارمونیک دیده نمی‌شود و سیگنال بهتر نمایان است که نشان از عملکرد و نتایج مناسب الگوریتم دارد.

منابع

Abreu, E., Lightstone, M., Mitra, S. K., & Arakawa, K. (1996). A new efficient approach for the removal of impulse noise from highly corrupted images. *IEEE Transactions on*

Image Processing, 5, 1012-1025.
Adams, R. K., McIntyre, J. M., & Symonds, F. W. (1982). Characteristics of the eastern interconnection line frequency. *IEEE*

- Transactions on Power Apparatus and Systems*, (12), 4542-4547.
- Aster, R., Borchers B., & Thurber, C. (2005). *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Elsevier Academic Press.
- Buttkus, B. (2000). *Spectral Analysis and Filter Theory in Applied Geophysics*. Springer-Verlag Berlin.
- Butler, K. E., & Russell, R. D. (2003). Cancellation of multiple harmonic noise series in geophysical records. *Geophysics*, 68(3), 1083-1090.
- Chave, A. D., Thomson, D. J., & Ander, M. E. (1987). On the Robust Estimation of Power Spectra, Coherences, and Transfer Functions. *Journal of Geophysical Research*, 92(B1), 633-648.
- Cohen, M. B., Said, R. K., & Inan, U. S. (2010). Mitigation of 50-60 Hz power line interference in geophysical data. *Radio Science*, 45, 1-12.
- Costabel, S., & Müller-Petke, M. (2014). Despiking of magnetic resonance signals in time and wavelet domain. *Near Surface Geophysics*, 12, 185-197.
- Dalgaard, E., Auken, E., & Larsen, J. (2012). Adaptive noise cancelling of multichannel magnetic resonance sounding signals. *Geophysical Journal International*, 191(1), 88-100.
- Ferahtia, J., Djarfour, N., Baddari, K., & Guérin, R. (2009). Application of signal dependent rank-order mean filter to the removal of noise spikes from 2D electrical resistivity imaging data. *Near Surface Geophysics*, 7, 159-169.
- Ghanati, R., & Hafizi, M. K. (2018). Estimation of harmonic interference parameters of surface-NMR signal using an adaptive method and residual signal power. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(5) 13 - 25.
- Ghanati, R., & Hafizi, M. K. (2017). Statistical de-spiking and harmonic interference cancellation from surface-NMR signals via a state-conditioned filter and modified Nyman-Gaiser method. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, 58(3), 181-204.
- Ghanati, R., Hafizi, M. K., Mahmoudvand, R., & Fallahsafari, M. (2016). Filtering and parameter estimation of surface-NMR data using singular spectrum analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 130, 118-130.
- Günther, T., & Müller-Petke, M. (2012). Hydraulic properties at the North Sea island of Borkum derived from joint inversion of magnetic resonance and electrical resistivity soundings. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3279-3291.
- Hertrich, M. (2005). Magnetic resonance sounding with separated transmitter and receiver loops for the investigation of 2D water content distributions. *Ph.D. thesis*, School of Civil Engineering and Applied Geosciences, Technical University of Berlin, 125.
- Hertrich, M., Green, A. G., Braun, M., & Yaramanci, U. (2009). High-resolution surface-NMR tomography of shallow aquifers based on multi-off set measurements. *Geophysics*, 74(6), G47-G59.
- Jeng, Y., & Chen, C. S. (2011). A nonlinear method of removing harmonic noise in geophysical data. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 18(3), 367-379.
- Jiang, C., Lin, J., Duan, Q., Sun, S., & Tian, B. (2011). Statistical stacking and adaptive notch filter to remove high-level electromagnetic noise from MRS measurements. *Near Surface Geophysics*, 9, 459-468.
- Larsen, J. J., Dalgaard, E., & Auken, E. (2014). Noise cancelling of MRS signals combining model-based removal of power-line harmonics and multi-channel Wiener filtering. *Geophysical Journal International*, 196, 828-836.
- Legchenko, A. (2007). MRS measurements and inversion in presence of EM noise. *Boletín Geológico y Minero*, 118 (3), 489 - 508.
- Legchenko, A., & Valla, P. (2003). Removal of power-line harmonics from proton magnetic resonance measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 53, 103-120.
- Legchenko, A., & Valla, P. (2002). A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 50 (1-2), 3-19.
- Lehmann-Horn, J. A., Hertrich, M., Greenhalgh, S. A., & Green, A. G. (2011). Three-Dimensional Magnetic Field and NMR Sensitivity Computations Incorporating Conductivity Anomalies and Variable-Surface Topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49, 3878-3891.
- Moore, M. S., & Mitra, S. K. (2000). Statistical threshold design for the two-state signal dependent rank order mean filter. In: *Proceedings 2000 International Conference on Image Processing* (Cat. No.00CH37101), 1, 904-907.
- Müller-Petke, M., & Costabel, S. (2013). Comparison and optimal parameter setting of reference-based harmonic noise cancellation in time and frequency domain for surface-NMR. *Near Surface Geophysics*, 12(2), 190-210.
- Müller-Petke, M., & Yaramanci, U. (2010). QT inversion - Comprehensive use of the complete surface NMR data set. *Geophysics*, 75(4), WA199-WA209.
- Ross, S. M. (2009). Introduction to probability

- and statistics for engineers and scientists. *Elsevier Academic Press*, 664.
- Spies, B. R. (1988). Local noise prediction filtering for central induction transient electromagnetic sounding. *Geophysics*, 53(8), 1068–1079.
- Trushkin, D., Shushakov, O., & Legchenko, A. (1994). The potential of a noise-reducing antenna for surface NMR groundwater surveys in the Earth's magnetic field. *Geophysical Prospecting*, 42, 855 – 862.
- Walsh, D. O. (2008). Multi-channel surface NMR instrumentation and software for 1D/2D groundwater investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 66 (3–4), 140–150.