



Reducing the effect of the transmitter leakage signal on the receiver using the steepest descent gradient adaptation algorithm

Malek Miralahi^{1*}, Morteza Sepehvand² 

¹Master of science, Imam Hossein University, Tehran, Iran

²Associate Professor, Imam Hossein University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history: Article Type: Research paper Receive: 10 November 2025 Revise: 02 January 2026 Accept: 29 January 2026 Available online: 20 February 2026 Keywords: Gradient descent algorithm Steepest descent algorithm Step size RSSI cost function	Strong signals leaking from the transmitter increase the phase noise effect (caused by the local oscillator (LO) signal) and saturate the receiver, affecting the receiver performance. The transmitter signal leakage at the receiver must be eliminated or reduced as much as possible before reaching the RF stage of the receiver. Otherwise, the front-end circuit (low-noise amplifier and mixer section) must have a high dynamic range to receive the information signal against the strong transmitter leakage signal. In this paper, to eliminate the transmitter self-jamming signal on the receiver, the transmitter signal is sampled. Then, by compensating the amplitude and phase of the eliminating or pseudo-jammer signal, the amplitude and phase of this signal converge towards the amplitude and phase of the strong leakage signal, and the maximum elimination of the transmitter's strong leakage signal as self-jamming (jammer) occurs on the receiver. According to Figures (19 and 20), the gradient of the amplitude and phase coefficients in terms of the number of samples taken from the self-jamming signal using the steepest descent algorithm converged with less sampling, less time, and a higher slope of the curve, while in the reference method, the convergence of the amplitude and phase coefficients is not expressed and displayed. The convergence time of the steepest descent algorithm for the fastest downward slope is 68 μs. Also, the amount of elimination of the self-jamming signal in terms of phase is performed unstable and in more time, and an average of 44 dB of elimination is achieved. While in the innovative and new adaptive method based on the steepest descent algorithm algorithm, 51 dB of self-jamming signal from the transmitter on the receiver was eliminated, which is about 7 dB of elimination improvement compared to the reference method.

Cite this article: M mirelahi and M Sepahvand, Reducing the effect of the transmitter leakage signal on the receiver using the steepest descent gradient adaptation algorithm. *Applied Electromagnetics*. vol. 13, no. 2, pp. 37-48, 2026.

DOR: <https://????????????>



OPEN  ACCESS

© The Author(s). retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

کاهش اثر سیگنال ناشی فرستنده روی گیرنده با استفاده از الگوریتم وفقی گرادیان سریع ترین شیب نزولی

مالک میر الهی^{۱*}، مرتضی سپه وند^۲ 

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده	مشخصات مقاله
سیگنال های قوی نشت کننده از فرستنده با افزایش اثر نویز مرحله (ناشی از سیگنال اسپلاتور محلی (LO)) و اشباع گیرنده عملکرد گیرنده را تحت تأثیر قرار می دهند. نشت سیگنال فرستنده روی گیرنده، باید پیش از رسیدن به قسمت طبقه RF گیرنده، حذف و یا تا حد امکان کاهش داده شود در غیر این صورت مدار Front-end (بخش تقویت کننده کم نویز و همزن) باید محدوده دینامیکی بالایی برای دریافت سیگنال اطلاعات در برابر سیگنال ناشی قوی فرستنده داشته باشد. در این مقاله برای حذف سیگنال خود جمینگ فرستنده روی گیرنده از سیگنال فرستنده نمونه برداری می شود آنگاه با جبران سازی دامنه و مرحله سیگنال حذف کننده یا شبه جمر، دامنه و مرحله این سیگنال به سمت دامنه و مرحله سیگنال قوی ناشی همگرا می شود و حذف حداکثری سیگنال ناشی قوی فرستنده به عنوان خود جمینگ (جمر) روی گیرنده اتفاق می افتد در روش پیشنهادی گرادیان ضرایب دامنه و مرحله برحسب تعداد نمونه های برداشته شده از سیگنال خود جمینگ همگرا شده اند. این ضرایب با استفاده از الگوریتم سریع ترین شیب نزولی با نمونه برداری کمتر، زمان کمتر و شیب بیشتر منحنی همگرا شده اند این در حالی است که در روش مرجع همگرایی ضرایب دامنه و مرحله بیان و نمایش داده نشده است. زمان همگرایی الگوریتم وفقی گرادیان سریع ترین شیب نزولی ۶۸ میکروثانیه است. همچنین میزان حذف سیگنال خود جمینگ برحسب مرحله به طور ناپایدار و در زمان بیشتر انجام شده و به طور میانگین به ۴۴ دسی بل حذف دست یافته است. در حالی که در روش نوآورانه و جدید وفقی مبتنی بر الگوریتم سریع ترین شیب نزولی، حذف ۵۱ دسی بل از سیگنال خود جمینگ ناشی از فرستنده روی گیرنده حاصل شده است که حدود ۷ دسی بل حذف نسبت به روش مرجع بهبود نشان می دهد.	تاریخچه مقاله: نوع مقاله: علمی - پژوهشی دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹ ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱ کلیدواژه ها: الگوریتم گرادیان نزولی الگوریتم گرادیان سریع ترین شیب نزولی اندازه گام تابع هزینه RSSI

استناد: مالک میر الهی و مرتضی سپه وند، کاهش اثر سیگنال ناشی فرستنده روی گیرنده با استفاده از الگوریتم وفقی گرادیان سریع ترین شیب نزولی. *الکترومغناطیس کاربردی*. ۱۳(۲): صص ۳۷-۴۸ (۱۴۰۴).

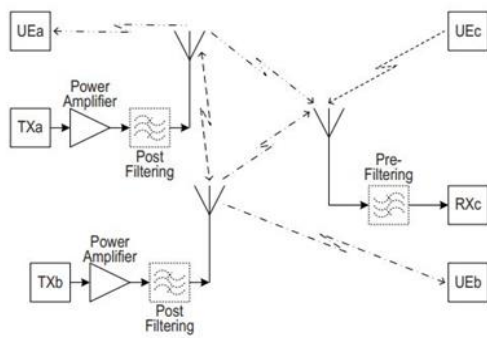
DOR: <https://doi.org/10.29252/jele.13.2.37>

© نویسنده (گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



هارمونیک یا اعوجاج در گیرنده می‌شود [۳، ۴].



شکل (۱). تداخل فرکانس رادیویی در یک سناریوی هم‌مکان [۲]

اعوجاج‌ها شامل دودسته‌اند، اعوجاج‌های اینتر مدولاسیون معکوس^۶ و اعوجاج‌های اینتر مدولاسیون مستقیم^۷

نشتی دو جمر فرستنده یا تداخل ناشی از توان بالای دو فرستنده روی یکدیگر باعث ایجاد اعوجاج‌های اینتر مدولاسیون معکوس در فرستنده می‌شود که برای حذف این اعوجاج‌ها با توجه به شکل (۵) از بلوک‌های تنظیم‌کننده دامنه و شیفت دهنده فازی جهت جبران‌سازی دامنه و مرحله استفاده شده است. سپس از یک بلوک ایزولاتور به منظور تضعیف سیگنال بازگشتی در جهت عکس ایزولاتور استفاده می‌شود. از آنجایی که ممکن است آنتن فرستنده (جمر دوم) روی آنتن فرستنده (جمر اول) تداخل ایجاد کند توزیع مدار جبران‌سازی به صورت دوطرفه است. این روش، محصولات اینتر مدولاسیون^۸ معکوس را به میزان ۳۵ دسی‌بل کاهش می‌دهد [۲، ۹].

اعوجاج‌های اینتر مدولاسیون مستقیم در اثر ارسال سیگنال‌های تداخل توان بالا خود جمینگ فرستنده روی گیرنده به وجود می‌آیند.

راه‌حل‌های مقابله با اینتر مدولاسیون مستقیم شامل روش‌های زیر است.

۱. راه‌حل فیلترینگ: در فرستنده برای از بین بردن اعوجاج‌های اینتر مدولاسیون مستقیم، از پس فیلترینگ^۹ بعد از بلوک تقویت‌کننده توان و در گیرنده نیز قبل از بلوک تقویت‌کننده کم‌نویز از پیش فیلترینگ^{۱۰} استفاده می‌شود.

۲. حذف وقتی^{۱۱} برای مقابله با اعوجاج‌های اینتر مدولاسیون مستقیم:

الف. حذف تک حلقه باند باریک

۱- مقدمه

روش کاملاً دوطرفه^۱ (FD) یک روش کارآمد در ارتباطات هم‌زمان به شمار می‌رود. در سامانه‌های FD، داده‌ها در یک بازه زمانی و در یک باند فرکانسی منتقل و دریافت می‌شوند. به اشتراک‌گذاری منابع طیف به طور هم‌زمان، سبب دوبرابر شدن کارایی طیفی این سامانه‌ها می‌شود. از سوی دیگر مشکل اساسی این روش زمانی رخ می‌دهد که سیگنال فرستنده به گیرنده FD نشت کند که به عنوان خود جمینگ^۲ شناخته شده و حذف سیگنال و دجمینگ در گیرنده چالش اصلی در برابر استقرار عملی سامانه‌های FD تلقی می‌شود. در بسیاری از ارتباطات مخابراتی و اندازه‌گیری‌های مبتنی بر فرکانس‌های رادیویی، نیاز به ارتباط کاملاً دوطرفه وجود دارد. در این حالت فرستنده و گیرنده هم‌زمان مشغول به ارسال و دریافت سیگنال هستند. در این نوع ارتباط، چالشی که وجود دارد، سیگنال مزاحم تولیدشده فرستنده در گیرنده است؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین مسائلی که باید بررسی شود، نشتی سیگنال فرستنده به گیرنده است. توان نشتی از فرستنده به گیرنده باید کنترل شود تا حساسیت گیرنده را خراب نکند. مشکل زمانی شدیدتر می‌شود که سیگنال نشتی قوی باشد که می‌تواند طبقه ورودی گیرنده را اشباع کند. از طرفی در اکثر این نوع سامانه‌ها به طور معمول از یک آنتن برای ارسال و دریافت سیگنال به صورت هم‌زمان استفاده می‌شود. در این حالت مسئله‌ی نشت توان حادث شده و نیاز به توجه بیشتری دارد. در زیر به مسئله تداخل پرداخته می‌شود.

سامانه‌های IBFD^۳ علی‌رغم قابلیت ارسال و دریافت هم‌زمان سیگنال‌ها را از طریق یک کانال و از سوی دیگر دارای مشکلات و دجمینگ^۴ هستند که مانع از به دست آوردن توان دوبرابری سامانه نسبت به سامانه‌های نیمه دوبلکس می‌شوند؛ بنابراین، اگر و دجمینگ بیشتر کاهش یابد، سامانه IBFD یا ارائه کارآمدی طیفی مناسب‌تر اولویت خواهد داشت [۱].

۲- مسئله تداخل

شکل (۱) یک سناریوی هم‌مکان^۵ را نشان می‌دهد که یک آنتن گیرنده به تعدادی آنتن فرستنده و کاربران فرستنده سیگنال رادیویی نزدیک است. این فرستنده‌های سیگنال رادیویی باعث ایجاد تداخل فرکانس رادیویی در آنتن گیرنده می‌شود.

مسئله تداخل باعث به وجود آمدن اعوجاج می‌شود؛ زیرا هرگاه گیرنده سیگنال‌های تداخل یا سیگنال‌های توان بالا را دریافت کند به دلیل غیرخطی شدن مدارات گیرنده باعث به وجود آمدن

^۶ . Reverse Intermodulation

^۷ . Forward Intermodulation

^۸ . Intermodulation (IM) Products

^۹ . Post Filtering

^{۱۰} . Pre-Filtering

^{۱۱} . Adaptive Cancellation

^۱ . Full Duplex

^۲ . Self Interference

^۳ . In-Band Full-Duplex

^۴ . Self-Interference

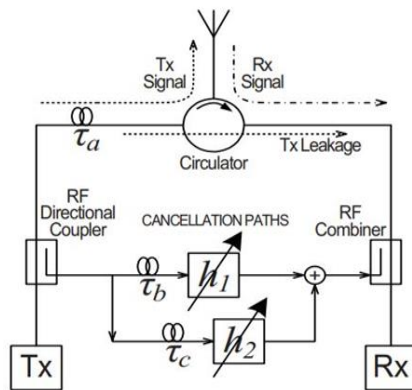
^۵ . Colocated

تنظیم‌کننده بهره به جبران‌سازی مرحله و دامنه سیگنال نشتی می‌پردازد و در نهایت در گیرنده، سیگنال نشتی به‌وسیله سیگنال حذف‌کننده‌ی اختلال رادیویی حذف می‌شود.

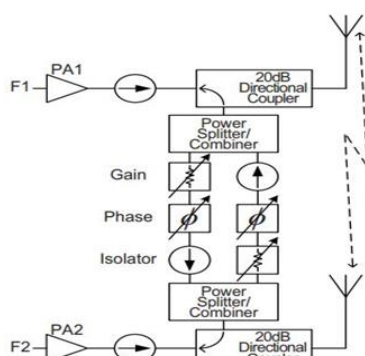
یک روش جدید لغو تداخل خود جَمینگ مبتنی بر دامنه فضایی به نام حداقل میانگین مربع خطای محدود^۱ برای سامانه‌های ارتباطی چند خروجی چند ورودی عظیم^۲ تمام دوبلکس^۳ معرفی می‌کند [۷].

ایده اصلی شامل برخورد با سیگنال و جَمینگ (SI) منتشر شده از یک گره FD به‌عنوان یک جریان فضایی مجزا است که به قسمت گیرنده همان گره FD می‌رسد.

این سیگنال SI باید در کنار سایر سیگنال‌های مربوطه که از فرستنده‌های مختلف می‌آیند، به‌صورت فضایی کدگذاری می‌شود، تا اطمینان حاصل شود که این سیگنال در فضای خالی کانال MIMO که شامل بخش فرستنده گره FD به‌عنوان ورودی است، قرار می‌گیرد. برای حل مشکل برخورد با سیگنال خود جَمینگ از بلوک دیاگرام شکل (۴) استفاده می‌شود [۶، ۷].



شکل (۴). روش حذف چند بانندی چندحلقه‌ای جهت حذف اثر نشتی فرستنده روی گیرنده [۲، ۸]

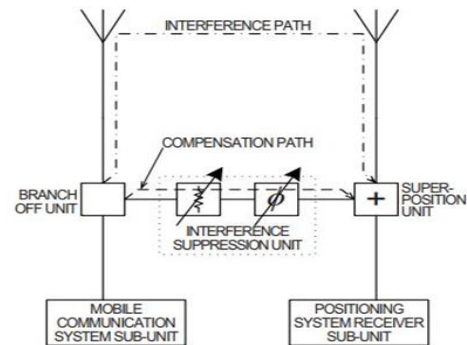


شکل (۵). مدار حذف‌کننده اینتر مدولاسیون معکوس در یک سناریو هم‌مکان [۲]

ب. حذف تک حلقه و پهن باند

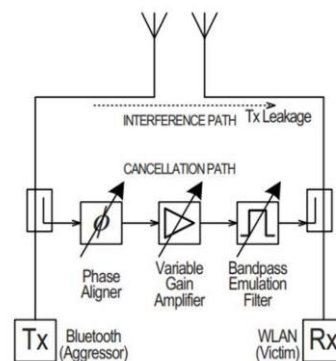
ج. حذف چند بانندی چندحلقه‌ای

الف. روش حذف تک حلقه باند باریک: باتوجه‌به شکل (۲)، از دو آنتن هم‌مکان برای از بین بردن سیگنال اختلال فرکانس رادیویی فرستنده روی گیرنده استفاده شده است به این صورت که از یک مسیر جبران‌ساز، برای جبران‌سازی دامنه و مرحله سیگنال تداخلی دریافتی توسط آنتن گیرنده استفاده می‌کند.



شکل (۲). حذف اختلال فرکانس رادیویی با استفاده یک مدار تک حلقه در یک سناریوی هم‌مکان [۲]

ب. حذف تک حلقه و پهن باند: این روش باتوجه‌به شکل (۳) همانند روش حذف تک حلقه باند باریک است با این تفاوت که در مسیر جبران‌سازی از یک فیلتر میان‌گذر برای کانالیزه کردن پهنای باند سیگنال نمونه‌برداری شده در مسیر جبران‌سازی استفاده می‌کند و در گیرنده با استفاده از یک کوپلر، سیگنال حذف‌کننده جبران‌سازی شده از سیگنال تداخل تفریق می‌شود و سیگنال تداخل حذف می‌شود.



شکل (۳). حذف اختلال با استفاده از روش تک حلقه و پهن باند [۲، ۵]

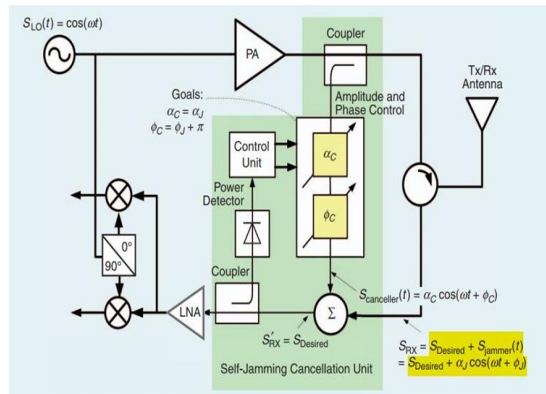
حذف چند بانندی چندحلقه‌ای: در این روش باتوجه‌به شکل (۴) از یک آنتن جهت ارسال و دریافت سیگنال استفاده می‌شود. سپس از سیگنال فرستنده به‌منظور جبران‌سازی دامنه و مرحله سیگنال نشتی فرستنده روی گیرنده، نمونه‌برداری شده و با استفاده از یک حلقه متشکل از دو بلوک تأخیر زمانی و دو بلوک

^۳ . Full-Duplex

^۱ . Constrained Minimum Mean Square Error

^۲ . Multiple-Output Multiple-Input

جمینگ با استفاده از یک کنترل کننده دامنه و یک شیفت دهنده فازی انجام می‌شود، بلوک دیاگرام شکل (۶) شامل یک فرستنده - گیرنده تک آنتن همراه یک سیرک لاتور است که باهدف حذف نیست فرستنده روی گیرنده که به‌عنوان خود جمینگ روی گیرنده عمل می‌کند.



شکل (۶). حذف خود جمینگ با استفاده از کنترل دامنه و مرحله [۱۰]

برای حذف سیگنال قدرتمند ناشی فرستنده، از آن نمونه‌برداری می‌شود. از سوی دیگر دامنه و مرحله سیگنال دریافتی گیرنده دارای دامنه و مرحله متفاوت با دامنه و مرحله سیگنال نمونه‌برداری شده است، پس سیگنال نمونه‌برداری شده نیازمند جبران‌سازی دامنه و مرحله است که با استفاده از یک بلوک جبران‌کننده دامنه و می‌شود.

این بلوک کنترل کننده از یک الگوریتم وفقی بهینه برای پیدا کردن نقطه کمینه (دامنه و مرحله بهینه) استفاده می‌کند. بعد از جبران‌سازی دامنه و مرحله سیگنال حذف کننده توسط بلوک کنترل کننده، سیگنال‌ها توسط یک بلوک تفریق کننده با یکدیگر ترکیب می‌شوند، در نتیجه مقداری از سیگنال قدرتمند فرستنده به‌عنوان خود جمینگ در گیرنده باقی می‌ماند؛ ولی مقدار آن نسبت سطح سیگنال اولیه کاهش یافته است [۱۱، ۱۲].

۳-۱-۲- بیان ریاضی حذف خود جمینگ

باتوجه به بلوک دیاگرام شکل (۶) می‌توان روابط ریاضی سیگنالی که توسط گیرنده دریافت می‌شود به‌صورت زیر نوشت.

$$S_{LO} = \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$S_{Tx} = S_{TAG}(t) + \sum_K S_{jammer} K(t) = A_{TAG}(t) \cos(\omega t) + \phi_{TAG}(t) + \sum_K A_K(t) \cos(\omega t) + \phi_K(t) + S_{Noise} \quad (2)$$

که $S_{LO}(t)$ سیگنال اسیلاتور محلی فرستنده و $S_{Tx}(t)$ سیگنال

۳- حذف خود جمینگ در اینتر مدولاسیون مستقیم

سامانه خوانش فرکانس رادیویی پسیو^۱ یک سیگنال توانی موج پیوسته (CW) را به ترانسپوندر^۲ بی‌سیم ارسال می‌کنند و به طور هم‌زمان یک سیگنال بازگشتی در فرکانس هم‌زمان دریافت می‌کنند. برای جدا کردن مسیرهای فرستنده و گیرنده، این سامانه از پیکربندی جفت آنتن یا تک آنتن استفاده می‌کند. در سامانه‌های تک آنتنه فرستنده و گیرنده از یک آنتن مشترک به همراه کوپلر یا سیرک لاتور استفاده می‌شود. با این حال، هر دو مورد از ایزولاسیون ضعیف فرستنده به گیرنده رنج می‌برند.

سیگنال‌های قوی فرستنده می‌توانند به گیرنده ناشت کنند و باعث کاهش حساسیت خود به سیگنال‌های بازگشتی از ترانسپوندر شوند. کاهش حساسیت گیرنده به دلیل نویز فازی اسیلاتور محلی^۳ (LO) اتفاق می‌افتد و همچنین به اشباع رفتن مدار فرانت - اند^۴ به علت ناشت سیگنال قوی فرستنده است. این موضوع سبب می‌شود در طبقه فرکانس رادیویی (RF) (تقویت کننده کم‌نویز و همزن) نیازمند محدوده دینامیکی بالایی باشد.

اثر ناخواسته دیگر خود جمینگ در گیرنده‌های تبدیل مستقیم^۵ (DCRs) تولید آفست‌های DC است. در یک گیرنده تبدیل مستقیم سیگنال دریافتی مستقیماً به باند پایه همراه با یک سیگنال اسیلاتور محلی در فرکانس یکسان تبدیل می‌شود که منجر به تشکیل شدن آفست‌های DC ناخواسته می‌شود؛ لذا برای کاهش اثر ناشی فرستنده روی گیرنده و بهبود عملکرد گیرنده‌ها، راه‌حل‌های حذف خود جمینگ پیشنهاد می‌شوند:

۳-۱- روش حذف اثر خود جمینگ

ناشت سیگنال قوی فرستنده به گیرنده می‌تواند طبقه RF گیرنده را اشباع کند و همچنین نویز مرحله سیگنال اسیلاتور محلی را به گیرنده منتقل کند. به همین دلیل، جلوگیری از ناشت سیگنال ناخواسته در سطح RF پیش از رسیدن به قسمت مدار RF مهم است. اگر یک طرح حذف کننده RF مورد استفاده قرار نگیرد آنگاه مدار فرانت - اند (تقویت کننده کم‌نویز و همزن) باید محدوده دینامیکی بالایی برای دریافت سیگنال اطلاعات در حضور سیگنال‌های جمر قوی داشته باشد.

۳-۱-۱- روش حذف خود جمینگ با استفاده از کنترل دامنه و مرحله

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود روش حذف خود

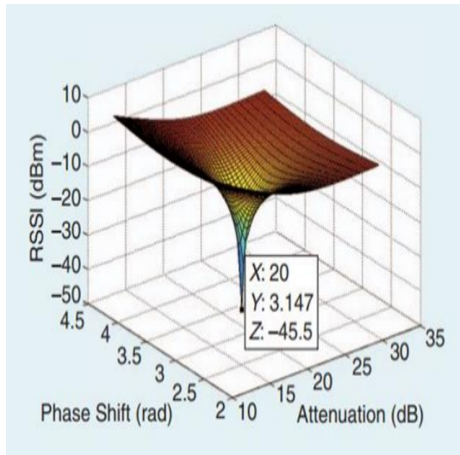
^۴. Front-End

^۵. Direct Conversion Receivers

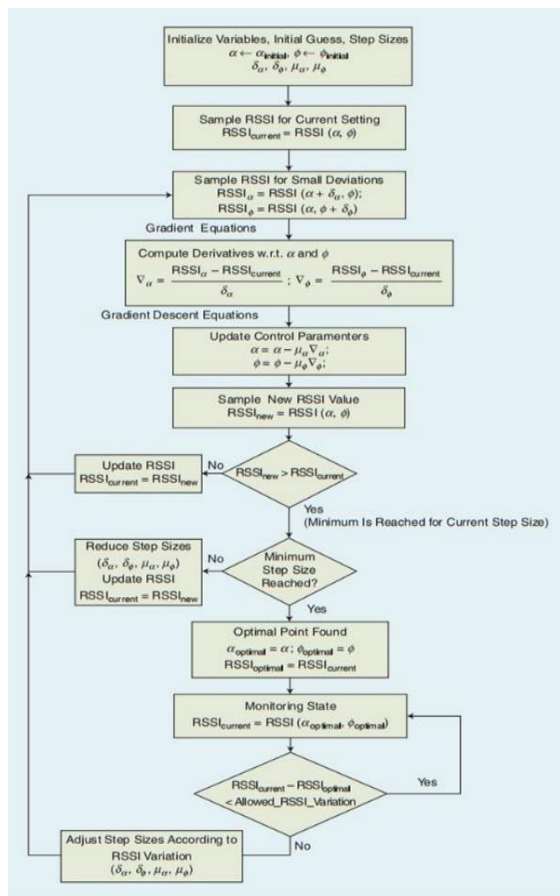
^۱. Passive Radio Frequency Identification Readers

^۲. Transponder

^۳. Local Oscillator



شکل (۷). شکل سه بعدی توان سیگنال دریافتی توسط آشکارساز توان [۱۰]



شکل (۸). حذف وقفی مبتنی بر الگوریتم گرادیان شیب نزولی [۱۰، ۱۴]

در هر مرحله، الگوریتم برای دستیابی به نقطه بهینه تابع هزینه، شیب نزولی تابع هزینه (توان سیگنال دریافتی) را محاسبه و بر اساس این اطلاعات، مقادیر برای تنظیمات بعدی عامل‌های کنترل را تعیین می‌کند. در ابتدا برای محاسبه شیب، الگوریتم نقطه فعلی (α, ϕ) را نمونه‌برداری می‌کند. سپس، با تغییر دو عامل کنترل (α, ϕ) به وسیله مقادیر کوچک $(\delta_\alpha, \delta_\phi)$ بیش از دو نقطه را نمونه‌برداری می‌کند: $(\alpha + \delta_\alpha, \phi)$ و $(\alpha, \phi + \delta_\phi)$. بردار شیب

ارسال شده توسط فرستنده و $S_{TAG}(t)$ سیگنال اطلاعات ارسالی توسط فرستنده و $S_{RX}(t)$ سیگنال دریافت شده توسط گیرنده که شامل سیگنال اطلاعات، سیگنال خود جَمینگ و سیگنال نویز است. باتوجه به شکل (۷) سیگنال دریافتی در خروجی تفریق کننده $S'_{RX}(t)$ حاصل تفریق سیگنال دریافتی توسط گیرنده $S_{RX}(t)$ از سیگنال حذف کننده سیگنال جَمر $S_{Canceller}$ است که به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} Rx'_{RX} &= S_{RX} - S_{Canceller} \\ &= S_{Desired} + S_{jammer} \\ &\quad + S_{Noise} - S_{Canceller} \\ &= S_{Desired} \\ &\quad + \alpha_I \cos(\omega t + \phi_I) + S_{Noise} \\ &\quad - \alpha_C \cos(\omega t + \phi_C) \\ &= S_{Desired} + S_{Noise} \end{aligned} \quad (3)$$

اگر دامنه سیگنال حذف کننده سیگنال جَمر برابر با دامنه سیگنال جَمر باشد $\alpha_C = \alpha_I$ و مرحله سیگنال حذف کننده سیگنال جَمر برابر با مرحله سیگنال جَمر باشد $\phi_C = \phi_I$ باشد آنگاه حذف کامل اتفاق می‌افتد [۱۰، ۱۳].

۳-۱-۳ الگوریتم وقفی گرادیان نزولی یا شیب نزولی^۱

الگوریتم گرادیان نزولی یا شیب نزولی یک الگوریتم بهینه سازی است که برای به حداقل رساندن تابع هزینه در الگوریتم های مختلف یادگیری ماشین مورد استفاده قرار می گیرد. در اصل این الگوریتم برای به روز رسانی عامل های حالت یادگیری استفاده می شود. نقطه بهینه می تواند به طور مؤثر با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی ردیابی شود که یک روش تکرار برای تخمین حداقل عملکرد بر اساس گرادیان آن است. در بلوک دیاگرام شکل (۶) در قسمت بلوک کنترل کننده واحد از الگوریتم گرادیان نزولی استفاده شده است. با استفاده از همین الگوریتم، سیگنال حذف کننده به یک دامنه و مرحله بهینه دست می یابد.

برای به دست آوردن دامنه و مرحله سیگنال نشتی باتوجه به شکل (۶) از یک آشکارساز توان جهت تخمین توان سیگنال استفاده شده است که همپوش دامنه و همپوش مرحله سیگنال باقی مانده حاصل از تفریق سیگنال جَمر از سیگنال حذف کننده برای دستیابی به دامنه و مرحله بهینه، به بلوک کنترل کننده واحد داده می شود. شکل سه بعدی توان سیگنال دریافتی^۲ (RSSI) بعد از آشکارساز توان برای سیگنال ورودی بلوک کنترل کننده مطابق شکل (۷) است.

فلوچارت بلوک دیاگرام الگوریتم گرادیان نزولی که به عنوان الگوریتم وقفی برای بلوک کنترل کننده واحد در شکل (۶) است مطابق شکل (۸) است.

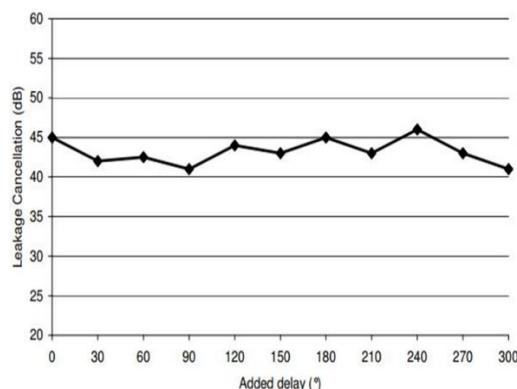
^۲. Received Signal-Strength Indicator

^۱. Gradient-Descent

۳-۱-۴- نتایج حاصل از حذف اثر خود جمینگ یا

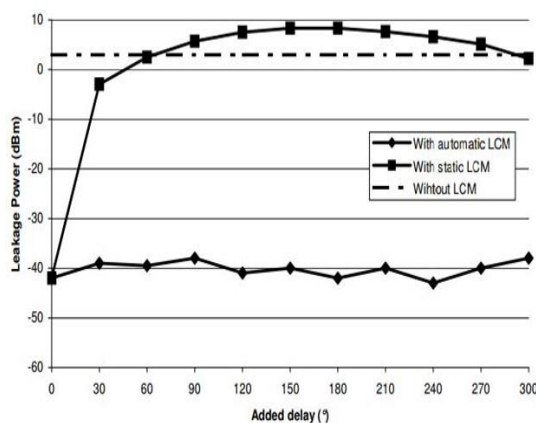
نشستی

شکل (۹) حذف خود جمینگ را برحسب شیفیت فازی نشان می‌دهد. برای رنج شیفیت فازی بین ۰ تا ۳۰۰ درجه با تغییرات مرحله به اندازه ۳۰ درجه در هر گام در فرکانس ۸۶۸ مگاهرتز، حذف اثر نشستی بین ۴۱ دسی‌بل تا ۴۶ دسی‌بل به دست می‌آید که به طور متوسط معادل ۴۴ دسی‌بل حذف اثر سیگنال نشستی یا خود جمینگ در گیرنده است.



شکل (۹). حذف اثر نشستی یا خود جمینگ برای رنج فازی ۳۰۰ درجه [۱۴]

همچنین توان نشستی برحسب (dBm) برحسب تأخیر فازی در شکل (۱۰) رسم شده است که مقدار توان سیگنال نشستی بدون حذف و با حذف وفقی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰). توان نشستی یا خود جمینگ با و بدون حذف وفقی [۱۴، ۱۵]

شکل (۱۱) منحنی توان نشستی (dBm) برحسب زمان (ms) را نشان می‌دهد که حدود ۳۳۰ میلی‌ثانیه طول می‌کشد تا توان سیگنال نشستی تقریباً به مقدار توان -41dBm همگرا شود.

یا گرادینان سیگنال دریافتی (RSSI) باتوجه به عامل‌های کنترلی $[\nabla_{\alpha}, \nabla_{\varphi}]$ در فرمول (۴) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} (\nabla_{\alpha}, \nabla_{\varphi}) &= \nabla \text{RSSI}(\alpha, \varphi) = \\ &\left[\frac{\partial \text{RSSI}(\alpha, \varphi)}{\partial \alpha}, \frac{\partial \text{RSSI}(\alpha, \varphi)}{\partial \varphi} \right] \approx \\ &\left[\frac{\partial \text{RSSI}(\alpha + \delta_{\alpha}, \varphi) - \text{RSSI}(\alpha, \varphi)}{\delta_{\alpha}}, \frac{\partial \text{RSSI}(\alpha, \varphi + \delta_{\varphi}) - \text{RSSI}(\alpha, \varphi)}{\delta_{\varphi}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

دامنه و مرحله جدید الگوریتم گرادینان شیب با استفاده از فرمول (۵) تعریف می‌شود

$$\begin{cases} \alpha = \alpha - \mu_{\alpha} \nabla_{\alpha} \\ \varphi = \varphi - \mu_{\varphi} \nabla_{\varphi} \end{cases} \quad (5)$$

که برای تعیین مقادیر عامل‌های کنترلی که در مرحله بعدی الگوریتم عامل‌های کنترلی همیشه در جهت نزولی شدن تابع هزینه به‌روز می‌شوند که در آن μ_{α} و μ_{φ} اعداد مثبت حقیقی هستند که عامل‌های اندازه گام اشاره دارند. پس از به‌روزرسانی عامل‌های کنترلی مطابق با معادلات بالا، مقدار باقی‌مانده توان سیگنال دریافتی نمونه‌برداری می‌شود.

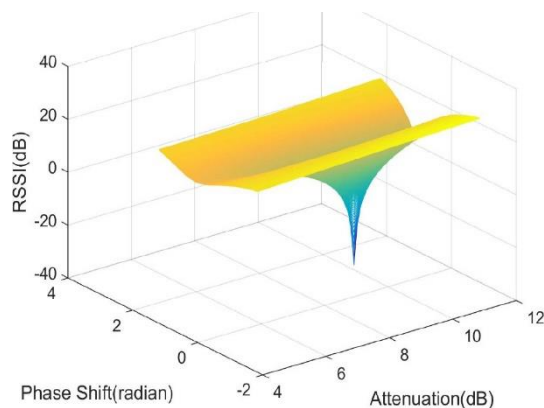
اگر این مقدار کمتر از مقدار توان سیگنال دریافتی فعلی باشد، الگوریتم ادامه می‌یابد و سپس فرایند مطابق با معادلات (۴) و (۵) می‌شود. با فرض اینکه این الگوریتم همگرا شود، مقادیر بعدی به نقطه بهینه نزدیک و نزدیک‌تر خواهند شد.

اگر در هر نقطه، مقدار جدید توان سیگنال باقی‌مانده بالاتر از مقدار قبلی باشد، الگوریتم اندازه گام را کاهش می‌دهد و در جهت افزایش شیب تابع ادامه می‌دهد تا به نقطه کمینه همگرا شود. نقطه کمینه زمانی یافت می‌شود که حداقل اندازه گام به دست آید. در ابتدا، اندازه گام به یک مقدار نسبتاً بزرگ تنظیم می‌شود و وقتی که الگوریتم به نقطه کمینه نزدیک می‌شود، اندازه گام به تدریج کاهش می‌یابد.

با یافتن یک حداقل قابل قبول الگوریتم ارائه شده در شکل (۸) وارد یک حالت ارزیابی می‌شود که در آن عامل‌های کنترل را در نقطه کمینه ثابت نگه می‌دارد تا زمانی که یک تغییر شرط شناسایی شود. این کار با اندازه‌گیری پیوسته مقدار فعلی تابع هزینه و مقایسه آن با مقدار کمینه صورت می‌پذیرد. اگر تفاوت بزرگ‌تر از یک مقدار از پیش تعیین شده باشد، الگوریتم اندازه گام را طبق این تفاوت به‌روزرسانی می‌کند و دوباره برای رسیدن به نقطه کمینه شروع به جستجو می‌کند. به‌روزرسانی اندازه گام بر اساس انحراف از الگوریتم بهینه طبق بلوک دیاگرام شکل (۸) الگوریتم را بهبود می‌بخشد. سرانجام الگوریتم به یک دامنه و مرحله کمینه همگرا می‌شود و در حالت ارزیابی نمایش داده می‌شود. پس سیگنال حذف‌کننده با به‌دست آوردن دامنه و مرحله بهینه به حذف سیگنال جمر می‌پردازد [۱۴، ۱۰].

^۱. Step Size

که در آن مقادیر $S_{jammer} = \alpha \cos(2\pi f_c t + \varphi)$ و $S_{canceler} = \alpha_1 \cos(2\pi f_c t + \varphi_1)$ به ترتیب سیگنال پرتوان فرستنده (جمر) به عنوان خود جمینگ در گیرنده و سیگنال حذف کننده ی جمر هستند. شبیه سازی الگوریتم گرادیان نزولی یا شیب نزولی در فرکانس نمونه برداری $f_s = 1\text{GHz}$ و فرکانس حامل $f_c = 100\text{MHz}$ انجام می شود که نرخ نایکویست $(f_s > 2f_c)$ رعایت شده است. یعنی فرکانس نمونه برداری حداقل دوبرابر فرکانس حامل است، سیگنال RSSI (توان سیگنال دریافتی) برای دامنه و مرحله اولیه $(\alpha = 6, \varphi = \frac{60\pi}{180} = \frac{\pi}{3})$ که دامنه برحسب مقدار (عدد) و مرحله برحسب رادیان است. تابع هزینه به صورت شکل (۱۲) در فضای سه بعدی در نرم افزار متلب شبیه سازی شده است که تابع هزینه به صورت محدب^۱ است و در جهت افزایش شیب کاهش می یابد، در جایی که به حداکثر شیب رسیده است صفر^۲ تابع اتفاق افتاده است یا به عبارتی تابع در آن نقطه دارای یک نقطه کمینه است. نقطه کمینه همان طور که در شکل (۱۲) مشاهده می شود روی تابع هزینه برحسب محورهای $(\text{RSSI}(\text{dB}), \text{Phase}(\text{radian}), \text{Atten})$ به ترتیب مقادیر $(-39.46, 1.047, 9.965)$ است.



شکل (۱۲). تابع هزینه الگوریتم مرجع (اختلاف سیگنال ناشی فرستنده روی گیرنده (جمر) و سیگنال حذف کننده $(\text{RSSI}(\alpha, \varphi))$)

تابع هزینه در فضای دوبعدی به صورت کانتور در نرم افزار متلب شبیه سازی شده است که به صورت دایره هایی با شعاع متفاوت رسم می شود و در جهت افزایش شیب تابع هزینه، شعاع دایره کوچک و کوچک تر می شود تا جایی که صفر تابع اتفاق می افتد که در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

در این روش با استفاده از الگوریتم وفقی سریع ترین شیب نزولی که فلوچارت آن در شکل (۱۴) نشان داده شده است برای حذف سیگنال خود جمینگ استفاده می کند.



شکل (۱۱). حذف اثر خود جمینگ یا ناشی (dBm) برحسب زمان [۱۴]

۴- الگوریتم وفقی جدید مبتنی بر گرادیان سریع ترین شیب نزولی

برای حذف سیگنال خود جمینگ مطابق بند ۴-۱ از یک روش نوآورانه وفقی مبتنی بر سریع ترین شیب نزولی بکار گیری می شود که الهام گرفته از روش گرادیان شیب نزولی در شکل (۸) است و این الگوریتم وفقی جدید در قسمت کنترل کننده حذف کننده اثر خود جمینگ در بلوک دیاگرام شکل (۶) استفاده می شود که الگوریتم سریع ترین شیب نزولی نسبت به الگوریتم گرادیان شیب نزولی خیلی بهینه تر و سریع تر و در حذف اثر خود جمینگ بهتر و بیشتر عمل می کند و تأثیرگذارتر است و بر اساس بلوک دیاگرام شکل (۶) طراحی شده است. نکته دیگر آن است که در مقاله [۱۰] میزان حذف سیگنال ناشی برحسب درجه و در روش مورد استفاده برحسب تعداد نمونه برداشته شده از سیگنال است.

الگوریتم وفقی سریع ترین شیب نزولی طبق بلوک دیاگرام حذف وفقی شکل (۶) جهت حذف اثر ناشی یا خود جمینگ طراحی و در نرم افزار متلب پیاده سازی شده است که در ادامه به شرح این روش نوآورانه پرداخته می شود.

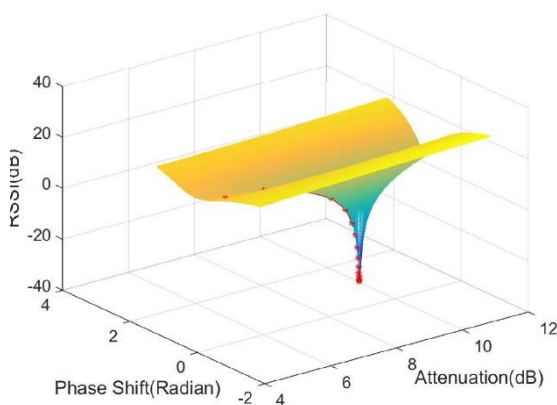
ابتدا دامنه و مرحله سیگنال باقی مانده (حاصل اختلاف سیگنال قدرتمند فرستنده و سیگنال حذف کننده ی خود جمینگ روی گیرنده) توسط یک آشکارساز توان (دامنه) و یک آشکارساز فازی، پوش دامنه و مرحله آن محاسبه می شود و طبق رابطه ریاضی متوسط توان به صورت $P = \frac{V^2}{2R}$ بیان می شود، سیگنال خروجی حاصل از آشکارساز توان برحسب دامنه به صورت توان سیگنال دریافتی بیان می شود که به ورودی بلوک کنترل کننده واحد برای محاسبه ی ضرایب دامنه و مرحله داده می شود. این سیگنال دریافتی برحسب دامنه و مرحله به صورت حداکثر دامنه تا حداقل دامنه محاسبه می شود:

$$\text{RSSI}(\alpha, \varphi) = \frac{((\text{Max}(S_j - S_c) - \text{Min}(S_j - S_c))/2)^2}{2R} \quad (۶)$$

^۲. Null

^۱. Convex

جهت قرینه مشتق حرکت کند و عامل‌های $(\delta_\alpha, \delta_\varphi, \mu_\alpha, \mu_\varphi)$ را به‌روزرسانی کند تا به نقطه کمینه برسد. هدف از به‌دست‌آوردن نقطه کمینه رسیدن به یک دامنه و مرحله بهینه برای تابع هزینه است. در شکل (۱۵) همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ چون تابع هزینه محدب است الگوریتم گرادیان نزولی حتماً به نقطه کمینه تابع دست پیدا می‌کند. الگوریتم از یک نقطه اولیه $(\alpha, \varphi) = (5, 0.42)$ شروع می‌کند و سپس نقطه فعلی به‌وسیله مقادیر کوچک $((\delta_\alpha, \delta_\varphi) = (0.04, \frac{0.004 \cdot \pi}{180}))$ برحسب دامنه و مرحله، بیش از دونقطه را نمونه‌برداری می‌کند که به‌صورت پرچم قرمز رنگ بر روی تابع هزینه نشان داده شده است.

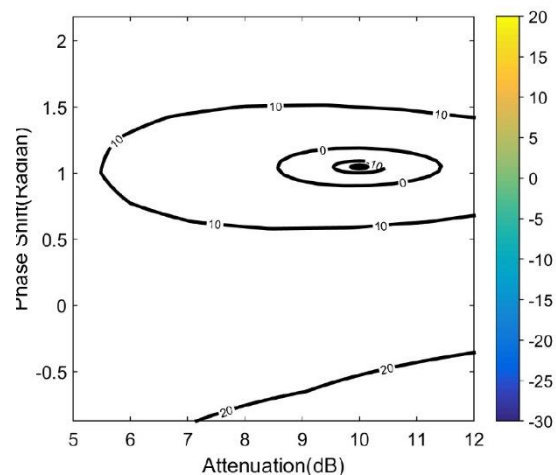


شکل (۱۵). تابع هزینه محدب و نحوه دست‌یابی به نقطه کمینه.

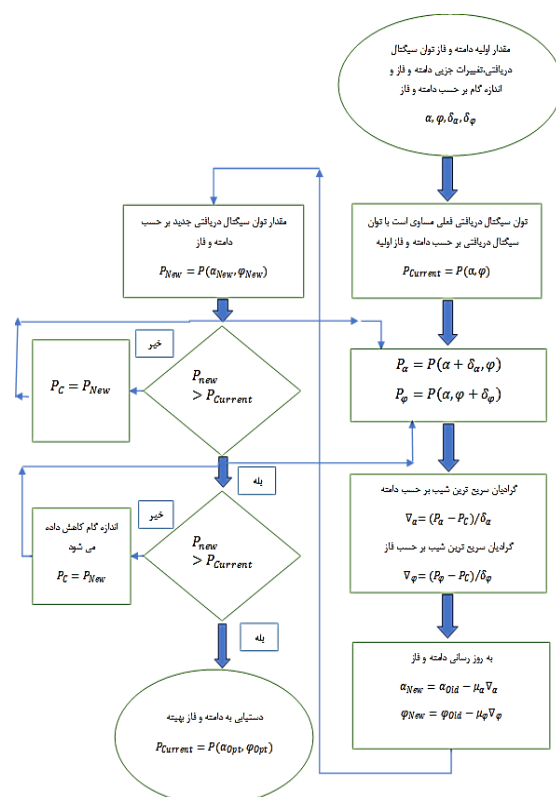
با به‌روزرسانی کردن عامل‌های کنترلی در جهتی که تابع هزینه تندترین شیب را دارد و همچنین حرکت در جهت عکس‌بردار گرادیان برای دستیابی به نقطه کمینه تابع هزینه در شکل (۱۵) نشان داده شده است، نقطه کمینه در نقطه $(\alpha, \varphi) = (9.98, 1.047)$ اتفاق می‌افتد. در این الگوریتم مقدار اولیه اندازه گام $(\mu_\alpha, \mu_\varphi) = (0.5, 0.01)$ است. جهت حرکت برای رسیدن به نقطه کمینه تابع هزینه به‌صورت کانتور در شکل (۱۶) شبیه‌سازی شده است، حرکت در جهتی که تابع هزینه تندترین شیب را دارد در هر بار که عامل‌های کنترلی به‌روز می‌شوند اندازه گام کاهش می‌یابد و تابع هزینه یک مقدار جدیدی خواهد داشت اگر اندازه گام خیلی کوچک در نظر گرفته شود الگوریتم زمان زیادی طول می‌کشد تا به نقطه کمینه تابع هزینه دست پیدا کند و همچنین اگر اندازه گام عدد خیلی بزرگی در نظر گرفته شود ممکن است نقطه کمینه تابع هزینه را رد کند و الگوریتم واگرا شود پس انتخاب درست اندازه گام برای دستیابی به نقطه کمینه تابع هزینه و همگرایی الگوریتم مؤثر است.

باتوجه به شکل (۱۷) مقدار دامنه (برحسب عدد) بعد از ۱۳ نمونه که از تابع هزینه برداشته می‌شود به مقدار ۹.۹۸ همگرا می‌شود.

همچنین برای همگرایی مرحله تابع هزینه، بعد از ۱۰ نمونه، مرحله به مقدار ۰.۴۷ برحسب رادیان همگرا می‌شود که در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



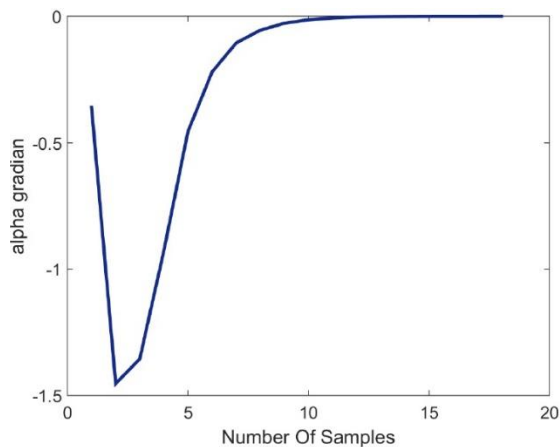
شکل (۱۳). تابع هزینه به‌صورت کانتور با شعاع‌های متفاوت



شکل (۱۴). حذف وقفی مبتنی بر الگوریتم سریع‌ترین شیب نزولی

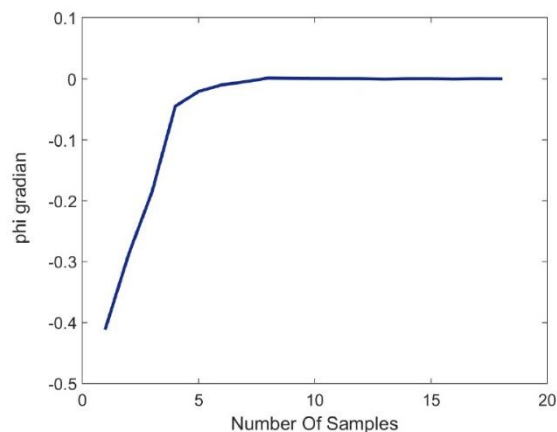
در این روش، الگوریتم برای محاسبه شیب تابع هزینه RSSI و پیدا کردن صفر تابع هزینه در جهت افزایش شیب تابع، نقطه فعلی (α, φ) را نمونه‌برداری می‌کند سپس، با تغییر نقطه فعلی به‌وسیله مقادیر کوچک $(\delta_\alpha, \delta_\varphi)$ (بیش از دونقطه را نمونه‌برداری می‌کند یعنی $(\delta_\alpha + \alpha, \varphi)$ و $(\alpha, \delta_\varphi + \varphi)$). الگوریتم از یک نقطه اولیه شامل دامنه و مرحله به‌عنوان تخمین اولیه ضرایب شروع کرده و در هر تکرار در جهتی که تابع هزینه تندترین شیب را دارد حرکت کرده که برای نزدیک شدن به نقطه کمینه تابع هزینه با اندازه گام‌های $(\mu_\alpha, \mu_\varphi)$ متوالی برای پیدا کردن نقطه کمینه شروع به جستجو می‌کند. در این روش گرادیان نزولی یا شیب نزولی باید در

قرینه مشتق حرکت می کند تا نقطه کمینه به دست آید. اگر گرادیان تابع هزینه نسبت به دامنه شبیه سازی شود بعد از ۱۴ نمونه، گرادیان دامنه همگرا می شود که در شکل (۱۹) نشان داده شده است.



شکل (۱۹). همگرایی گرادیان تابع هزینه نسبت به دامنه

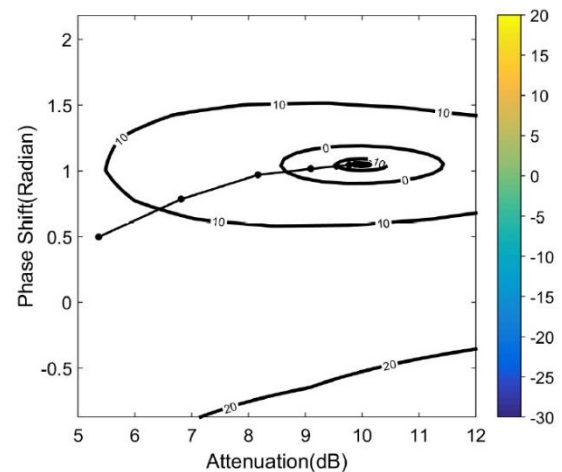
برای گرادیان تابع هزینه نسبت به مرحله بعد از ۱۴ نمونه، گرادیان مرحله همگرا می شود که نقطه همگرایی در شکل (۲۰) مشخص شده است.



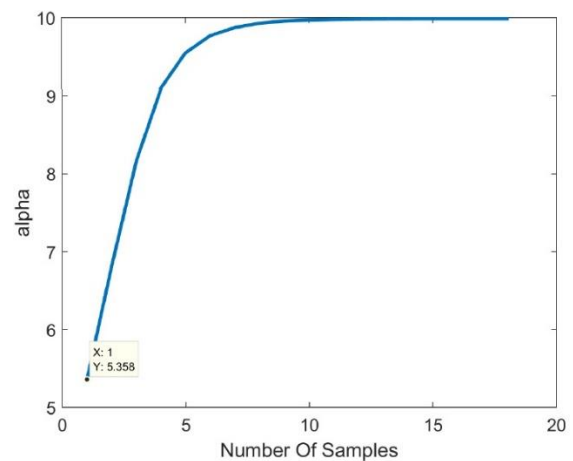
شکل (۲۰). همگرایی گرادیان تابع هزینه نسبت به مرحله

همان گونه که در شکل های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می شود زمان همگرایی الگوریتم وفقی گرادیان سریع ترین شیب ۶۸ میکروثانیه (برابر با زمان ۱۴ بار نمونه برداری و تکرار حلقه الگوریتم^۱) است.

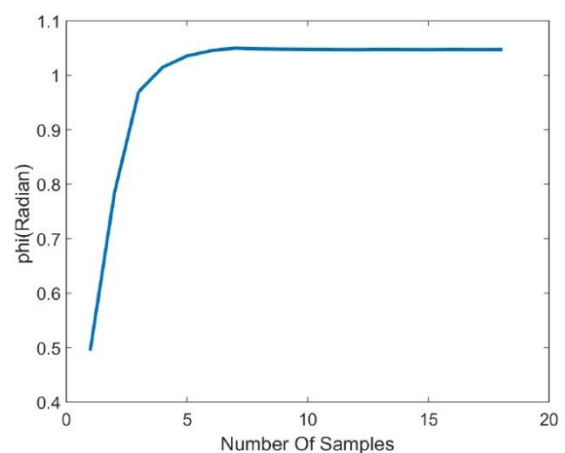
بعد از دستیابی به نقطه کمینه تابع هزینه و به دست آوردن دامنه و مرحله کمینه برای سیگنال حذف کننده، حداکثر حذف سیگنال خود جمینگ در گیرنده اتفاق می افتد. پس مقدار دامنه باقی مانده حذف سیگنال خود جمینگ در گیرنده قبل از دستیابی به نقطه کمینه باتوجه به منحنی شکل (۲۱) برابر با مقدار ۱۲ دسی بل است که بعد از دستیابی به نقطه کمینه مقدار آن برابر با ۳۹- دسی بل شده است؛ یعنی باقی مانده سیگنال نشتی ناشی از فرستنده روی



شکل (۱۶). رسم تابع هزینه در فضای دوبعدی و مسیر حرکت الگوریتم گرادیان سریع ترین شیب برای دستیابی به نقطه کمینه



شکل (۱۷). همگرایی دامنه تابع هزینه.

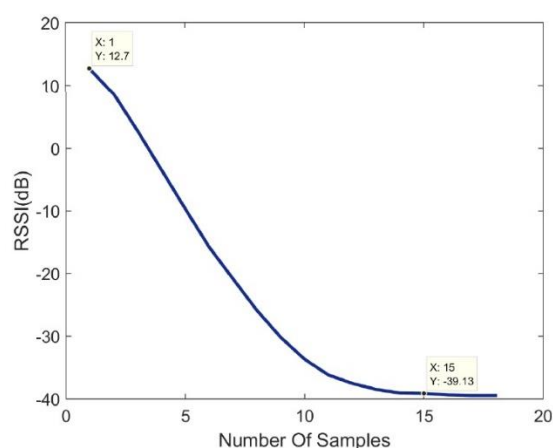


شکل (۱۸). همگرایی مرحله تابع هزینه

باتوجه به الگوریتم سریع ترین شیب نزولی در شکل (۱۴)، معادلات به روزرسانی دامنه و مرحله به صورت $\alpha = \alpha - \mu_{\alpha} \nabla_{\alpha}$ و $\varphi = \varphi - \mu_{\varphi} \nabla_{\varphi}$ برای دامنه و مرحله هستند. برای دستیابی به نقطه کمینه (مرحله و دامنه بهینه) تابع هزینه باتوجه به الگوریتم مبتنی بر گرادیان سریع ترین شیب در جهت

¹ Iteration

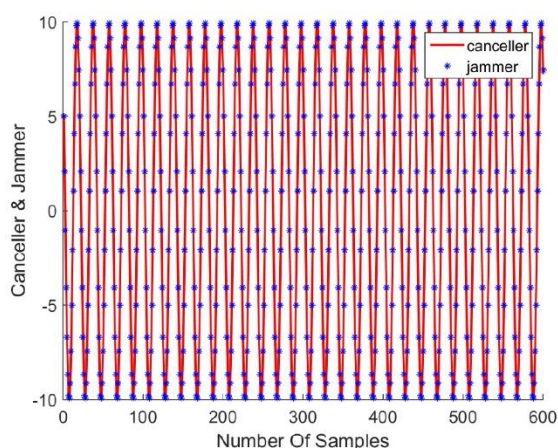
گیرنده به مقدار ۵۱ دسی‌بل کاهش یافته است.



شکل (۲۱). حذف وقتی ۵۱ دسی‌بل از سیگنال قدرتمند فرستنده به‌عنوان خود جمینگ روی گیرنده

با همگرا شدن دامنه و مرحله سیگنال حذف‌کننده به دامنه و مرحله سیگنال جمر، مقدار باقی‌مانده حاصل از تفریق این دو سیگنال به سمت صفر میل می‌کند که هر چه این همگرایی دامنه و مرحله بیشتر شود حداکثر حذف سیگنال ناشی اتفاق می‌افتد.

باتوجه‌به شکل (۲۲) سیگنال ناشی قدرتمند فرستنده روی گیرنده کاملاً با سیگنال حذف‌کننده‌ی ناشی هم‌پوشانی دارد.



شکل (۲۲). هم‌پوشانی سیگنال ناشی فرستنده (به‌عنوان جمر) و سیگنال حذف‌کننده‌ی جمر از نظر تطبیق دامنه و مرحله

۵- نتیجه‌گیری

درروش مرجع حذف خود جمینگ ناشی از فرستنده روی گیرنده با استفاده از روش کنترل دامنه و مرحله سیگنال خود جمینگ، مبتنی بر الگوریتم گرادیان نزولی یا شیب نزولی صورت می‌پذیرد که توانایی حذف سیگنال خود جمینگ ناشی از فرستنده روی گیرنده بین ۴۱ دسی‌بل تا ۴۶ دسی‌بل به‌دست‌آمده است که به طور میانگین توانایی حذف ۴۴ دسی‌بل از سیگنال جمر فرستنده روی گیرنده اتفاق افتاده است و مقدار حذف خود جمینگ برحسب

مرحله باتوجه‌به شکل (۹) به مقدار ثابت ۴۴ دسی‌بل همگرا نشده است و زمان زیادی لازم است تا همگرا شود و همگرایی گرادیان ضرایب دامنه و مرحله بیان و نمایش داده نشده است.

درروش جدید و نوآورانه مبتنی بر الگوریتم گرادیان سریع‌ترین شیب توانایی حذف و کاهش سطح سیگنال ناشی فرستنده روی گیرنده توسط الگوریتم گرادیان سریع‌ترین شیب نزولی در حدود ۵۱ دسی‌بل حاصل‌شده است که حدود ۷ دسی‌بل حذف سیگنال ناشی فرستنده روی گیرنده بیشتر از روش مرجع اتفاق افتاده است، یعنی با استفاده از الگوریتم نوآورانه گرادیان سریع‌ترین شیب نزولی ۷ دسی‌بل در حذف سیگنال ناشی ناشی از فرستنده روی گیرنده موفق‌تر بوده است، در این روش نوآورانه، باتوجه‌به شکل‌های (۱۹ و ۲۰) همگرایی گرادیان ضرایب دامنه و مرحله برحسب تعداد نمونه‌ها با تعداد نمونه کمتر و زمان کمتر و شیب بیشتر منحنی انجام‌شده است.

۶- مراجع

- [1] Naman, H.A. and A. Abdelkareem, Self-Interference Cancellation Techniques for In-Band Full-Duplex Wireless Communication Systems: A Review. Iraqi Journal of Science, 2023: p. 6292-6315.
- [2] Ahmed, S., & Faulkner, M. (2012, September). Interference at colocated base stations: A review. In 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications- (PIMRC) (pp. 1716-1721).
- [3] Ahmed, S., & Faulkner, M. (2013, September). A double loop jammer cancellation system for colocated radios. In 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) (pp. 1352-1355).
- [4] Hong, S., et al., Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond. IEEE Communications Magazine, 2014. 52(2): p. 114-121.
- [5] Elsayed, M., et al., Low complexity neural network structures for self-interference cancellation in full-duplex radio. IEEE Communications Letters, 2020. 25(1): p. 181-185.
- [6] Eslampanah, R., et al., Adaptive duplexing for transceivers supporting aggregated transmissions. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015. 65(9): p. 6842-6852.
- [7] Chen, X., Savaux, V., Crussière, M., Savelli, P., & Yao, K. C. (2024). Constrained-MMSE combining for spatial domain self-interference cancellation in full-duplex massive MIMO systems. IEEE Open Journal of the Communications Society, 5, 649-663.
- [8] Liu, Z., Luo, H., & Ratnarajah, T. (2024). Reservoir computing-based digital self-interference cancellation for in-band full-duplex radios. IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking, 2, 855-868.
- [9] Ahmed, S. and M. Faulkner, Mitigation of reverse intermodulation products at colocated base stations. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012. 60(6): p. 1608-1620.
- [10] Boaventura, A., et al., Perfect isolation: Dealing with self-jamming in passive RFID systems. IEEE Microwave Magazine, 2016. 17(11): p. 20-39.
- [11] Jung, J.-Y., C.-W. Park, and K.-W. Yeom, A novel carrier leakage suppression front-end for UHF RFID reader. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012. 60(5): p. 1468-1477.
- [12] Antayhua, R. R., Rambo, C. R., & de Sousa, F. R. (2018, May). Self-interference cancellation in chipless RFID readers for reading range enhancement. In 2018 IEEE

- International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) (pp. 1-6).
- [13] Kurzo, Y., et al., Hardware implementation of neural self-interference cancellation. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2020. 10(2): p. 204-216.
- [14] Mayordomo, I., & Bernhard, J. (2011, April). Implementation of an adaptive leakage cancellation control for passive UHF RFID readers. In *2011 IEEE International Conference on RFID* (pp. 121-127).
- [15] Liu, Z., Wang, D., Zhang, J., Yao, J., Wang, Y., Zhou, Y., & Rong, L. (2024). Scalable photonic-assisted multipath self-interference cancellation based on optical frequency comb. *IEEE Photonics Journal*, 16(2), 1-8.