

ارائه یک الگوریتم بهینه به منظور حذف تداخل موج پیوسته هم‌زمان با استفاده از کدینگ فاز پیشنهادی در سامانه لورن

میثم بیات^۱، محمدحسین مدنی^{۲*}

^۱استادیار دانشکده برق، دانشگاه هوایی شهید ستاری تهران، Meysam.baya302@gmail.com

^۲دانشیار دانشکده مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، mh_madani@aut.ac.ir

چکیده

منابع مختلف خطا که از جمله مهمترین آن‌ها تداخل موج پیوسته (CWI) است، باعث خطا در اندازه‌گیری زمان ورود و در نهایت کاهش دقت ناوبری در سامانه لورن می‌شود. در این مقاله به ارائه یک الگوریتم جدید به منظور حذف CWI هم‌زمان با استفاده از تحلیل ساختار پالس‌های لورن در حوزه زمان و ارایه یک کدینگ فاز جدید پرداخته شده است. این الگوریتم از بار محاسباتی بسیار پایینی برخوردار است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد SIR در خروجی الگوریتم پیشنهادی تقریباً مستقل از سیگنال دریافتی بوده و عامل محدود کننده در این الگوریتم تنها SNR سیگنال دریافتی است. الگوریتم پیشنهادی با استفاده از کدینگ فاز جدید برای اندازه‌گیری زمان ورود (TOA)، عملاً باعث حذف اثر تداخل هم‌زمان می‌شود. این الگوریتم برای نسبت سیگنال به تداخل برابر با -15 dB خطای زمان ورود را تا 693% برابر نسبت به الگوریتم متداول میانگین‌گیری و کدگذاری فاز که از سیگنال با کدینگ فاز استاندارد لورن استفاده می‌کند، بهبود می‌بخشد. این بهبود چشمگیر در ازای کاهش SIR دریافتی ناشی از تداخل موج پیوسته غیرهم‌زمان به اندازه حداکثر 2 dB ، که می‌توان آن را با استفاده از یک فیلتر میان‌گذر به راحتی حذف نمود، حاصل می‌شود.

کلیدواژه

سامانه لورن، تداخل موج پیوسته، ردیابی فاز، SIR، TOA

مقدمه

زمان سبب ایجاد یک جابجایی نوسانی شده و CWI غیرهم-زمان نیز سبب یک جابه‌جایی شبیه به نویز می‌شود [۷]. CWI هم‌زمان و شبه هم‌زمان هستند که اغلب سبب ایجاد خطاهای غیرقابل قبولی در اندازه‌گیری TOA (زمان ورود) گیرنده شده و از این رو پوشش سامانه‌های لورن-C را کاهش می‌دهند [۸]. گیرنده لورن C استاندارد از فیلتر میان‌گذر برای حذف CWI غیرهم‌زمان استفاده می‌نماید، اما این فیلتر دو نوع دیگر را نمی‌تواند حذف کند. طیف فرکانسی CWI شامل طیف گسسته خطی می‌باشد، با توجه به این مفهوم سیگنال CWI را می‌توان به صورت دسته‌ای از موج سینوسی خالص با فرکانس‌های مشخص و همچنین دامنه‌های متفاوت مدل نمود [۹]. در گیرنده لورن-C سیگنال وارد شونده، ابتدا وارد فیلتر میان‌گذر می‌شود. پهنای باند این فیلتر بسته به نوع آن بین ۱۵ الی ۴۰ کیلو هرتز است که فرکانس مرکزی این فیلتر روی فرکانس حامل 100 kHz قرار دارد [۱۰]. گیرنده لورن C موقعیت خود را با استفاده از اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال امواج زمینی از

سامانه زمین پایه لورن^۱ یک سامانه ناوبری رادیویی زمینی با برد زیاد است که در فرکانس پایین (100 KHz) و با استفاده از ایستگاه‌های زمینی که به صورت زنجیره‌ای سازمان‌دهی شده‌اند، طراحی شده است. استفاده از سامانه زمین پایه لورن در ناوبری، به دلیل مصونیت در مقابل جیمینگ و امکان بهبود کارایی آن با استفاده از سخت افزارها و الگوریتم‌های پردازشی جدید، اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۵-۱]. مهمترین عامل خطا در سامانه‌های لورن، تداخل موج پیوسته با امواج زمینی است [۱۰]. معیارهای حداقل میزان کارایی (MPS)، سه نوع CWI هم‌زمان، شبه هم‌زمان و غیرهم‌زمان را مشخص می‌کنند [۶]. هر نوع از CWI‌ها خطاهایی با ویژگی‌های مختلف ایجاد می‌کنند. CWI هم‌زمان سبب ایجاد یک جابه‌جایی ثابت در اندازه‌گیری TOA می‌گردد، CWI شبه هم-

Long Range Navigation ۱

به بازه دید مستقیم^۲ محدود نمی‌شود [۲۰-۱۸]. این سامانه می‌تواند به عنوان یک پشتیبان مستقل سامانه موقعیت‌یاب جهانی عمل کند و انتشار زمانی با دقت بالا ارائه نماید [۲۱]. نحوه ارسال سیگنال در این سامانه در مرجع [۱۰] به‌طور کامل بیان شده است. فاصله زمانی بین ارسال موفق گروه پالس‌ها توسط ایستگاه اصلی، فاصله تکرار گروه (GRI) نامیده می‌شود. GRI بر حسب میکروثانیه بیان می‌شود. مشخصه GRI برابر با مقدار GRI تقسیم بر ۱۰ می‌باشد که به‌عنوان علامتی برای مشخص نمودن زنجیره لورن به‌کار می‌رود. سیگنال‌های لورن با یک دنباله کد فاز ثابتی ارسال می‌شوند که در طول دو گروه پالس متوالی امتداد دارد و سپس تکرار می‌شوند. به‌عبارت دیگر سیگنال لورن، متناوب با دوره تناوب دو برابر بازه تکرار گروهی می‌باشد. این دوره تناوب اصطلاحاً بازه کد فاز^۴ نامیده می‌شود [۱۰، ۲۲]. الگوی فوق در جدول ۱ نمایش داده شده است. به‌طور ساده کدینگ فاز مشخص می‌کند که پیک اول در هر پالس به سمت بالا یا پایین است. [۲۴-۲۳]

جدول ۱. پالس‌های ارسالی با یک الگوی مشخص [۱۰]

ایستگاه رادیویی		
گروه	ایستگاه رادیویی اصلی	ایستگاه رادیویی فرعی
A	++---+--+	+++++---
B	+-----	+--+---

فرم ریاضی یک پالس لورن استاندارد در زیر آورده شده است [۲۴]:

$$i(t) = A(t-\tau)^2 \exp\left(-2\left(\frac{t-\tau}{65}\right)\right) \sin(\omega t + \phi), \quad \text{for } \tau \leq t \leq \tau + 65$$

$$i(t) = 0 \quad \text{for } t \leq \tau$$

(۱)

کدینگ فاز BPCI^۵ [۱۷]

با تحلیل سیگنال لورن و نحوه عملکرد کدینگ به‌منظور حذف تداخل بر روی این سامانه، یک دوره کد فاز جدید در سامانه لورن ارائه شده است. با اعمال الگوریتم مرسوم میانگین-گیری و کدگذاری فاز نشان داده شده است که کدینگ فاز ارائه شده بهبود چشمگیری در حذف تداخلات CWI، CRI و تداخل ناشی از امواج آسمانی ایجاد می‌کند. پیچیدگی

ایستگاه‌های فرستنده رادیویی که ثابت هستند محاسبه می‌کند. CWI و برخی از سیگنال‌های مزاحم دقت اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال امواج زمینی را پایین می‌آورند. برای بهبود کارایی گیرنده‌ی لورن C در مواجهه با این سیگنال‌های مزاحم از دو نوع فیلتر مختلف، در حوزه فرکانس استفاده شده است [۱۲ و ۱۱]. همچنین در حوزه زمان برای کاهش تداخل، از کدگذاری فاز و میانگین‌گیری بر روی CWI هم‌زمان و شبه‌هم‌زمان استفاده شده است [۱۶-۱۳]. نویسندگان این مقاله با تحلیل سیگنال در حوزه زمان و استفاده از کدینگ فاز استاندارد سیگنال لورن، یک روش بهبودیافته با پیچیدگی محاسباتی پایین برای حذف CWI‌های هم‌زمان که به فاصله ۱ کیلوهرتز از همدیگر قرار دارند ارائه نموده‌اند [۱۰]. از تمامی موارد ذکر شده در بالا می‌توان مشاهده نمود که فیلترهای انطباقی، رمزگذاری فاز و گردآوری وابسته می‌توانند تا حد زیادی CWI را کاهش دهند اما نمی‌توانند CWI هم‌زمان را به کلی حذف نمایند. نویسندگان این مقاله یک دوره کد فاز جدید ارائه نموده‌اند که با استفاده از کد فاز پیشنهادی و استفاده از الگوریتم میانگین‌گیری و کدگذاری فاز تداخل CWI هم‌زمان به‌طور کامل حذف می‌گردد [۱۷].

هدف از این مقاله تحلیل عملکرد یک الگوریتم پیشنهادی است، که به منظور حذف CWI هم‌زمان در سامانه لورن C برای بهبود کارایی و کاهش بار محاسباتی ناشی از الگوریتم میانگین-گیری و کدگذاری فاز ارائه گردیده است. الگوریتم مطرح شده براساس تحلیل ساختار پالس‌های لورن C در حوزه زمان و استفاده از کدینگ فاز جدید در این سامانه است. با استفاده از این الگوریتم تأثیرات CWI هم‌زمان بر روی گیرنده‌ی لورن به‌طور کامل حذف می‌گردد و دقت اندازه‌گیری‌های مربوط به زمان ورود (TOA) تا میزان زیادی بهبود می‌یابند.

در ادامه و در بخش ۲ ابتدا به معرفی سامانه ناوبری لورن و نحوه انتشار سیگنال آن پرداخته شده است. در بخش ۳ یک دوره کدینگ فاز جدید به منظور بهبود کارایی و افزایش دقت تخمین زمان ورود و در نهایت افزایش دقت ناوبری ارائه گردیده و سپس در بخش ۴ یک الگوریتم پیشنهادی برای حذف CWI هم‌زمان به‌منظور بهبود کارایی و افزایش دقت تخمین زمان ورود و در نهایت افزایش دقت ناوبری ارائه گردیده است. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی آورده شده و در پایان، نتیجه‌گیری از تحلیل‌های صورت گرفته انجام شده است.

معرفی سامانه ناوبری زمین پایه لورن

سامانه لورن C یک سامانه رادیوناوبری زمین‌پایه است که انتشار امواج زمینی را به‌عنوان ابزار اصلی ارسال به کار می‌برد و

^۲ Line Of Sight (LOS)
^۳ Group Repetition Interval
^۴ Phase Code Interval (PCI)
^۵ Bayat phase code interval

کدینگ فاز پالس m در یک BPCI است. t_m نیز به صورت رابطه زیر به دست می آید:

$$t_m = \begin{cases} (m-1)T & , 1 \leq p \leq 8 & 1 \leq m \leq 8 \\ (m-1)T + GRI & , 9 \leq p \leq 16 & 1 \leq m \leq 16 \\ (m-1)T + 2GRI & , 17 \leq p \leq 24 & 1 \leq m \leq 24 \\ (m-1)T + 3GRI & , 25 \leq p \leq 32 & 1 \leq m \leq 32 \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه بالا منظور از p شماره پالس در BPCI است و $T=1000$ میکروثانیه است. توجه شود در اینجا برای ساده سازی تحلیل در هر GRI، ۸ پالس مربوط به ایستگاه اصلی (بدون در نظر گرفتن پالس نهم) و یا ۸ پالس مربوط به هر یک از ایستگاه های ثانویه را می توان در نظر گرفت و نیازی نیست که در هر GRI تمامی پالس های ایستگاه های اصلی و ثانویه را در نظر گرفت. البته نتیجه نهایی هیچ تفاوتی با حالتی که تمامی پالس ها در نظر گرفته شود، ندارد. به منظور بررسی وابستگی فرکانس تداخلی CWI، طبق تعریف طبقه بندی (MPS)، CWI بر حسب q_{int} بازنویسی می شود.

$$f_{int} = \frac{N_{int} + q_{int}}{2 GRI} \quad (4)$$

در رابطه بالا $N_i = 1, 2, 3, \dots, n$ یک عدد صحیح و $-0.5 \leq q_{int} \leq 0.5$ است. برای انواع مختلف CWI داریم:

$$\begin{aligned} |q_{int}| = 0 & \quad \text{تداخل هم زمان} \\ |q_{int}| > 2 GRI \times f_b & \quad \text{تداخل شبه هم زمان} \\ |q_{int}| < 2 GRI \times f_b & \quad \text{تداخل غیر هم زمان} \end{aligned} \quad (5)$$

هدف ما در این قسمت حذف CWI هم زمان با استفاده از یک الگوریتم پیشنهادی است. با توجه به سیگنال دریافتی در سامانه لورن با کدینگ فاز پیشنهادی در زمان BPCI 1 داریم:

$$X_L(t) = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^8 [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) p_{cA}(m) \\ + \sum_{m=9}^{16} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) p_{cB}(m) \\ + \sum_{m=17}^{24} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) p_{cC}(m) \\ + \sum_{m=25}^{32} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) p_{cD}(m) \\ + CWI(t) + n(t) \end{bmatrix} \quad \text{for } t_1 \leq t \leq t_1 + 4GRI \quad (6)$$

محاسباتی گیرنده با استفاده از کدینگ فاز ارائه شده افزایش پیدا نکرده است. این دوره کد فاز BPCI نامیده شده است [۱۷]. کدینگ فاز ارائه شده متشکل از چهار GRI است و در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. کدینگ فاز پیشنهادی [۱۷]

ایستگاه رادیویی		
گروه	ایستگاه رادیویی اصلی	ایستگاه رادیویی فرعی
A	++-+-+--+	+++++--+
B	+---++++-	+--+---++
C	---++-+-+	-----++
D	-++-----	-+--+----

در ادامه کدینگ BPCI برای حذف تداخل موج پیوسته هم زمان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی که دارای پیچیدگی محاسباتی بسیار کمتری نسبت به روش مرسوم میانگین گیری است، تحلیل می شود و نشان داده خواهد شد که کدینگ فاز ارائه شده بهبود فوق العاده ای در حذف تداخل موج پیوسته هم زمان از خود نشان می دهد.

حذف تداخل موج پیوسته هم زمان با الگوریتم پیشنهادی

به منظور تجزیه و تحلیل الگوریتم پیشنهادی، نخست این فرضیه ها را ارائه می دهیم:

(۱) نسبت سیگنال به تداخل به اندازه ای است که یک تخمین قابل قبولی از زمان ورود سیگنال، قبل از این که تداخل آن حذف شده باشد، می توان زد. (با دقت ۱۲۵ میکروثانیه تخمین اولیه قابل قبول است و باعث خطا در روش پیشنهادی و تخمین عبور از صفر سوم بعد از حذف تداخل نمی گردد)

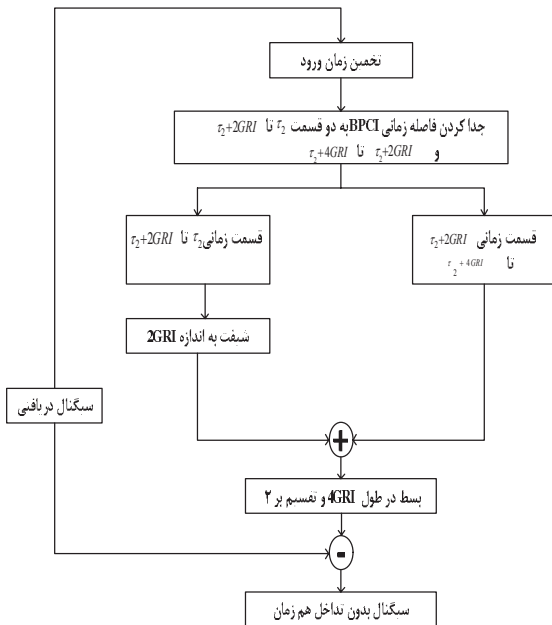
(۲) در مدت زمان کوتاهی، مسیر انتقال امواج آسمانی تغییر ناپذیر است، یعنی تاخیر در انتقال امواج آسمانی در طول یک دوره ی کوتاه، ثابت می باشد.

با توجه به کدینگ فاز پیشنهادی، سیگنال دریافتی در سامانه های ناوبری لورن در زمان یک BPCI به صورت زیر است:

$$X_L(t) = \sum_{m=1}^{32} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) Bpc(m) + CWI(t) + n(t) \quad (7)$$

که در آن $n(t)$ نویز، $CWI(t)$ تداخل موج پیوسته، $x_0(t)$ پالس لورن، $x_s(t)$ پالس موج آسمانی، δ تابع ضربه، و $Bpc(m)$ نیز

الگوریتم ارائه شده به این صورت است که ابتدا یک زمان ورود اولیه قبل از حذف تداخل به دست می آید. (نیاز به دقت بالا برای تخمین زمان ورود اولیه نیست. مثلاً با فرض این که زمان ورود $\tau_1 = t_1$ بوده ولی به اشتباه $\tau_2 = t_1 + b$ که $b \leq 125 \mu sec$ است تخمین زده شده است. مشکلی برای الگوریتم ایجاد نمی شود) سپس با توجه به این که GRIA به اندازه 2GRI با GRIC فاصله دارد و GRIB نیز به اندازه 2GRI با GRID فاصله دارد و از طرفی $GRIC = -GRIA$ و $GRID = -GRIB$ است، پس از تخمین زمان ورود (τ_2) ، از زمان τ_2 تا $\tau_2 + 2GRI$ جدا و به اندازه 2GRI شیفت داده می شود. همچنین از زمان $\tau_2 + 2GRI$ تا $\tau_2 + 4GRI$ نیز جدا و سپس با هم جمع می شوند. حاصل نهایی بر ۲ تقسیم و در طول 4GRI بسط داده می شود و از سیگنال دریافتی کم می گردد. شکل (۱) نمودار بلوکی نحوه اجرای الگوریتم را نشان می دهد.



شکل ۱. نمودار بلوکی نحوه اجرای الگوریتم

بنابراین برای اجرای الگوریتم ارائه شده می توان سیگنال دریافتی را به صورت زیر نوشت:

$$X_L(t) = Y_1(t) + Y_2(t) + CWI_1(t) + n_1(t) + CWI_2(t) + n_2(t) \quad (11)$$

که $Y_1(t)$ سیگنال مربوط به لحظه τ_2 تا $\tau_2 + 2GRI$ است و $n_1(t)$ و $CWI_1(t)$ به ترتیب نویز و تداخل موج پیوسته در این فاصله زمانی است. $Y_2(t)$ سیگنال مربوط به لحظه

که در رابطه فوق $pc_A(m)$ ، $pc_B(m)$ ، $pc_C(m)$ و $pc_D(m)$ به ترتیب کدینگ فاز مربوط به GRI های A، B، C و D است. با توجه به این که در کدینگ BPCI، $GRI_C = -GRI_A$ و $GRI_D = -GRI_B$ است، داریم:

$$X_L(t) = \left[\begin{aligned} & \sum_{m=1}^8 [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) pc_A(m) \\ & + \sum_{m=9}^{16} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) pc_B(m) \\ & - \sum_{m=17}^{24} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) pc_A(m - 16) \\ & - \sum_{m=25}^{32} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) pc_B(m - 16) \\ & + CWI(t) + n(t) \end{aligned} \right] \quad (7)$$

for $t_1 \leq t \leq t_1 + 4GRI$

و $CWI(t)$ به صورت مجموعه ای از سینوسی ها در نظر گرفته می شود.

$$CWI(t) = \sum_{i=1}^k I_i \sin(2\pi f_i t + \phi) \quad (8)$$

با توجه به تعریف CWI هم زمان $|q_{int}| = 0$ است و می توان فرکانس تداخلی را به صورت $f_{int} = \frac{N_i}{2 GRI}$ در نظر گرفت، که N_i یک عدد صحیح است. بنابراین داریم:

$$CWI(t) = \sum_{i=1}^k I_i \sin\left(2\pi \left(\frac{N_i}{2 GRI}\right) t + \phi\right), N_i \in Z \quad (9)$$

با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۷) داریم:

$$X_L(t) = \left[\begin{aligned} & \sum_{m=1}^8 [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) pc_A(m) \\ & + \sum_{m=9}^{16} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) pc_B(m) \\ & - \sum_{m=17}^{24} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) pc_A(m - 16) \\ & - \sum_{m=25}^{32} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) pc_B(m - 16) \\ & + \sum_{m=1}^k I_i \sin\left(2\pi \left(\frac{N_i}{2 GRI}\right) t + \phi\right) + n(t) \end{aligned} \right] \quad (10)$$

for $t_1 \leq t \leq t_1 + 4GRI$

$$Y_L(t) = Y_I(t - 2GRI) = \begin{cases} \sum_{m=1}^8 [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2 - 2GRI) p_{c_A}(m) \\ + \sum_{m=9}^{16} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2 - 2GRI) p_{c_B}(m) \\ \text{for } \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI, I \\ \\ 0, \text{ Other.} \end{cases} \quad (16)$$

و همچنین $CWI_1(t)$ نیز به اندازه 2GRI شیفت می‌یابد تا $CWI_L(t)$ به دست آید

$$CWI_L(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^k I_i \sin \left(2\pi \left(\frac{N_i(t - (\tau_2 + 2GRI))}{2GRI} \right) + \phi \right), \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ \\ 0, \text{ Other} \end{cases} \quad (17)$$

با ساده سازی معادله (17) داریم:

$$CWI_L(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^k I_i \sin \left(2\pi \left(\frac{N_i(t - \tau_2)}{2GRI} \right) - 2\pi N_i + \phi \right), \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ \\ 0, \text{ Other} \end{cases} \quad (18)$$

با توجه به این که $\sin(A+B) = \sin(A)\cos(B) + \cos(A)\sin(B)$ و N_i یک عدد صحیح است، پس داریم:

$$CWI_L(t) = \sum_{i=1}^k I_i \sin \left[\left(2\pi \left(\frac{N_i(t - \tau_2)}{2GRI} \right) + \phi \right) - 2\pi N_i \right]$$

$CWI_2(t)$ و $n_2(t)$ است تا $\tau_2 + 4GRI$ تا $\tau_2 + 2GRI$ ترتیب نویز و تداخل موج پیوسته در این فاصله زمانی است.

$$Y_1(t) = \begin{cases} \sum_{m=1}^8 [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2) p_{c_A}(m) \\ + \sum_{m=9}^{16} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2) p_{c_B}(m) \\ \text{for } \tau_2 \leq t \leq \tau_2 + 2GRI \\ \\ 0, \text{ Other} \end{cases} \quad (12)$$

$$Y_2(t) = \begin{cases} - \sum_{m=17}^{24} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2) p_{c_A}(m-16) \\ - \sum_{m=25}^{32} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2) p_{c_B}(m-16) \\ \text{for } \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ \\ 0, \text{ Other} \end{cases} \quad (13)$$

$$CWI_1(t) = \sum_{i=1}^k I_i \sin \left(2\pi \left(\frac{N_i}{2GRI} \right) (t - \tau_2) + \phi \right), N_i \in Z, \tau_2 \leq t \leq \tau_2 + 2GRI \quad (14)$$

$$CWI_2(t) = \sum_{i=1}^k I_i \sin \left(2\pi \left(\frac{N_i}{2GRI} \right) (t - \tau_2 - 2GRI) + \phi \right) \text{ for } \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \quad (15)$$

در ادامه سیگنال $Y_1(t)$ را به اندازه 2GRI شیفت می‌دهیم تا $Y_L(t)$ به دست آید:

$$Z_L(t) = Y_L(t) + CWI_L(t) + n_1(t)$$

$$= \begin{cases} \sum_{m=1}^8 [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2 - 2GRI) pc_A(m) \\ + \sum_{m=9}^{16} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2 - 2GRI) pc_B(m) \\ + \sum_{i=1}^k I_i \sin\left(2\pi\left(\frac{N_i(t - \tau_2)}{2GRI}\right) - 2\pi N_i + \phi\right) + n_1(t) \\ \text{for } \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ 0 \quad , \quad \text{Other} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \sum_{i=1}^k I_i \sin\left(2\pi\left(\frac{N_i(t - \tau_2)}{2GRI}\right) + \phi\right) \cos(-2\pi N_i) \\ + \sum_{i=1}^k I_i \cos\left(2\pi\left(\frac{N_i(t - \tau_2)}{2GRI}\right) + \phi\right) \sin(-2\pi N_i) \\ \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ 0 \quad , \quad \text{Other} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \sum_{i=1}^k I_i \sin\left(2\pi\left(\frac{N_i(t - \tau_2)}{2GRI}\right) + \phi\right) \\ \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ 0 \quad , \quad \text{Other} \end{cases} \quad (19)$$

با توجه به رابطه t_m اختلاف بین پالس‌های اول با پالس ۱۷ و پالس ۱۹ با پالس ۲۵ به اندازه 2GRI است، بنابراین می‌توان رابطه (۱۳) را به صورت زیر نوشت:

(۲۱)

$$Z_2(t) = Y_2(t) + CWI_2(t) + n_2(t)$$

$$= \begin{cases} - \sum_{m=1}^8 [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - \tau_2 - t_m - 2GRI) pc_A(m) \\ - \sum_{m=9}^{16} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2 - 2GRI) pc_B(m) \\ + \sum_{i=1}^k I_i \sin\left(2\pi\left(\frac{N_i}{2GRI}\right)(t - \tau_2 - 2GRI) + \phi\right) + n_2(t) \\ \text{for } \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ 0 \quad , \quad \text{Other} \end{cases}$$

$$Y_2(t) = \begin{cases} - \sum_{m=1}^8 [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - \tau_2 - t_m - 2GRI) pc_A(m) \\ - \sum_{m=9}^{16} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m - \tau_2 - 2GRI) pc_B(m) \\ \text{for } \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ 0 \quad , \quad \text{Other} \end{cases} \quad (20)$$

در ادامه با توجه به عملکرد الگوریتم پیشنهادی، می‌بایست دو عبارت $Z_L(t)$ و $Z_2(t)$ باهم جمع شوند.

(۲۲)

بنابراین داریم:

$$C(t) = Z_L(t) + Z_2(t)$$

(۲۳)

با فرض $n(t) = \frac{n_1(t) + n_2(t)}{2}$ می‌توان نوشت:

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش انجام شبیه‌سازی شامل سه مرحله است. در مرحله اول سیگنال لورن به اضافه تداخل هم‌زمان تولید می‌شود. برای تولید سیگنال، $GRI=50000$ میکروثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به این GRI ، کلیه تداخل‌ها که به صورت $N/2GRI$ هستند، تداخل هم‌زمان هستند و الگوریتم ارایه شده قادر به حذف کامل آن‌ها است. بنابراین الگوریتم پیشنهادی قادر به حذف تمامی تداخل‌ها که مضرری از ۱۰هزتر هستند را برای این GRI دارد (توجه شود که در هر GRI تنها ۸ پالس ایستگاه اصلی یا فرعی نمایش داده شده است). مرحله دوم، بلوک تخمین سیگنال تداخلی CWI است. در این بخش ابتدا یک تخمین اولیه از زمان ورود سیگنال زده می‌شود. برای تخمین اولیه زمان ورود از الگوریتم Music استفاده شده است. البته می‌توان این کار را با استفاده از رابطه‌ی هم‌بستگی بین سیگنال دریافتی و سیگنال استاندارد ارسالی زنجیره مورد نظر نیز انجام داد. پس از تخمین زمان ورود از ابتدای پالس اول GRI_A تا ابتدای پالس اول GRI_C از سیگنال جدا می‌گردد، همچنین از ابتدای پالس اول GRI_C تا ابتدای پالس اول GRI_A در دوره فاز بعدی از سیگنال جدا شده و با هم جمع می‌شوند. توجه شود که برای هر $4GRI$ الگوریتم یک بار اجرا می‌شود (هر دوره کد فاز در کدینگ ارایه شده شامل $4GRI$ است). بعد از انجام این کار نتیجه بر ۲ تقسیم شده و در طول زمان به اندازه تعداد نمونه‌های مورد نیاز بسط داده می‌شود. بخش سوم شامل حذف تداخل تخمین زده شده در بلوک دوم است. این کار به سادگی و با تفریق سیگنال دریافتی از تداخل تخمین زده شده انجام می‌شود. اگر تداخل محیط پایدار باشد، برای کاهش محاسبات می‌توان برای چندین دوره کد فاز از تداخل به‌دست آمده استفاده نمود.

شکل (۲) سیگنال لورن استاندارد در طول یک دوره $BPCI$ را نشان می‌دهد. برای تولید سیگنال، $GRI=50000$ میکروثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به این GRI ، کلیه تداخل‌ها که به صورت $N/2GRI$ هستند، تداخل هم‌زمان هستند و الگوریتم ارایه شده قادر به حذف کامل آن‌ها است. بنابراین الگوریتم پیشنهادی توانایی حذف تمامی تداخل‌ها که مضرری از ۱۰هزتر هستند را برای این GRI دارد (توجه شود که در هر GRI تنها ۸ پالس ایستگاه اصلی یا فرعی نمایش داده شده است).

$$C(t) = \begin{cases} 2 \sum_{m=1}^k I_i \sin \left(2\pi \left(\frac{N_i(t-\tau_2)}{2GRI} \right) + \phi \right) + 2n(t) & \text{for } \tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ 0 & \text{Other} \end{cases} \quad (24)$$

$C(t)$ به‌دست آمده مربوط به زمان‌های بین $\tau_2 + 2GRI \leq t \leq \tau_2 + 4GRI$ است. حال طبق عملکرد الگوریتم بایستی عبارت به‌دست آمده را در طول $4GRI$ بسط دهیم.

$$K(t) = C(t) + C(t + 2GRI) \quad (25)$$

$$K(t) = \begin{cases} 2 \sum_{m=1}^k I_i \sin \left(2\pi \left(\frac{N_i(t-\tau_2)}{2GRI} \right) + \phi \right) + 2n(t) & , \tau_2 \leq t \leq \tau_2 + 4GRI \\ 0 & , \text{Other} \end{cases} \quad (26)$$

بنابراین همان‌گونه که از رابطه (۲۶) مشخص است :

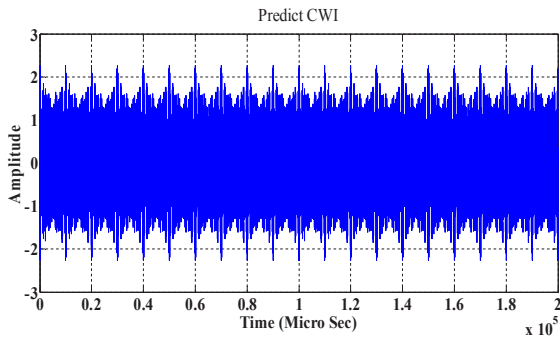
$$K(t) = 2CWI(t) + 2n(t) \Rightarrow CWI(t) = \frac{K(t)}{2} + n(t) \quad (27)$$

پس با استفاده از کدینگ فاز پیشنهادی و الگوریتم ارایه شده دقیقاً مقدار $CWI(t)$ با فرض SNR بالا به‌دست آمد. در مرحله آخر کافی است تداخل به‌دست آمده، از سیگنال دریافتی در زمان τ_2 تا $\tau_2 + 4GRI$ کسر گردد.

$$M(t) = X_L(t) - \frac{K(t)}{2} = \sum_{m=1}^{32} [x_0(t) + x_s(t)] * \delta(t - t_m) Bpc(m) + n(t) \quad (28)$$

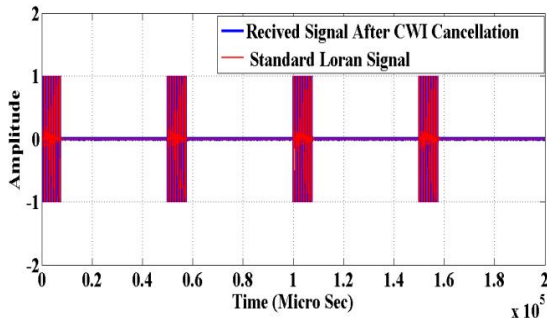
$M(t)$ در واقع سیگنال دریافتی پس از حذف تداخل است. همان‌طور که مشخص است با اعمال الگوریتم پیشنهادی تداخل‌های هم‌زمان به طور کامل حذف می‌شوند.

شکل (۵) سیگنال تداخلی تخمین زده شده با الگوریتم پیشنهادی را در حوزه زمان نشان می‌دهد.



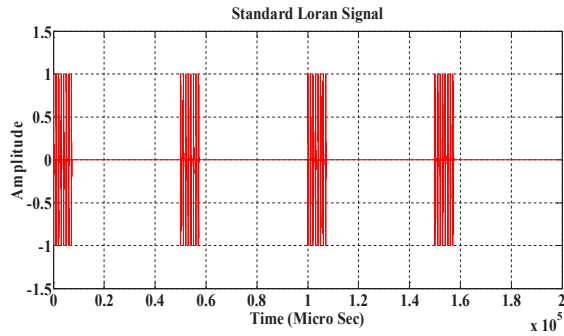
شکل ۵. سیگنال تداخلی تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

به منظور نمایش دقیق سیگنال خروجی الگوریتم ارایه شده و مقایسه آن با سیگنال ارسال شده بدون تداخل (سیگنال استاندارد لورن با کدینگ فاز BPCI)، در شکل (۶) این دو سیگنال در دوره زمانی یک BPCI نمایش داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی تداخل به طور کامل حذف شده است و سیگنال خروجی دقیقاً منطبق بر سیگنال ارسالی بدون تداخل است.



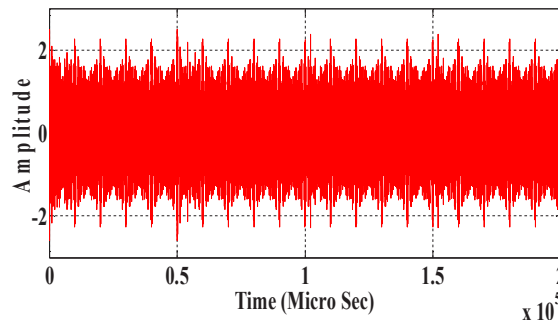
شکل ۶. مقایسه سیگنال استاندارد لورن (سیگنال ارسالی) با سیگنال تخمین زده شده در طول یک دوره BPCI

به منظور نمایش دقیق‌تر سیگنال خروجی الگوریتم ارایه شده و مقایسه آن با سیگنال ارسال شده بدون تداخل (سیگنال استاندارد لورن با کدینگ فاز BPCI)، در شکل (۷) و (۸) این دو سیگنال در دوره زمانی به ترتیب یک GRI و یک پالس نمایش داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی سیگنال خروجی دقیقاً منطبق بر سیگنال ارسالی بدون تداخل است.



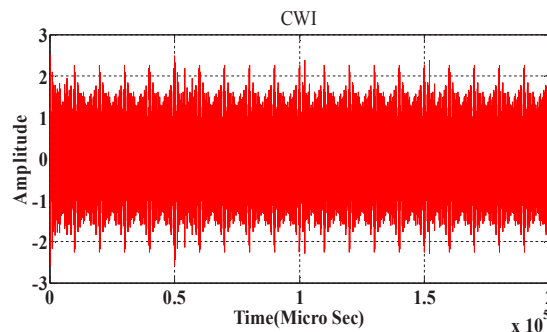
شکل ۷. سیگنال لورن استاندارد در طول یک دوره BPCI

در شکل (۳) سیگنال دریافتی (سیگنال به اضافه تداخل) در شرایط $SIR = -10$ dB و فرکانس‌های تداخلی ۸۰، ۹۳/۵، ۹۴، ۹۹، ۲، ۹۴، ۱۰۰، ۱۰۰/۱، ۱۰۰/۷ و ۱۲۰/۷ کیلوهرتز و (با توجه به این که در این قسمت هدف بررسی الگوریتم پیشنهادی برای حذف تداخل است، مقدار نسبت سیگنال به نویز به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته می‌شود) $SNR = 30$ dB نشان داده شده است.



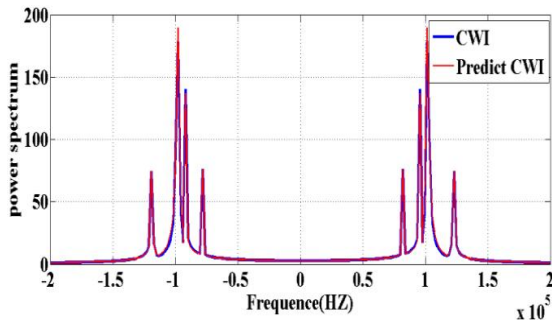
شکل ۸. سیگنال دریافتی (سیگنال به اضافه تداخل)

در شکل (۴) سیگنال تداخلی واقعی با فرکانس‌های تداخلی ۸۰، ۹۳/۵، ۹۴، ۹۹، ۲، ۹۴، ۱۰۰، ۱۰۰/۱، ۱۰۰/۷ و ۱۲۰/۷ کیلوهرتز و $SNR = 30$ dB نشان داده شده است.



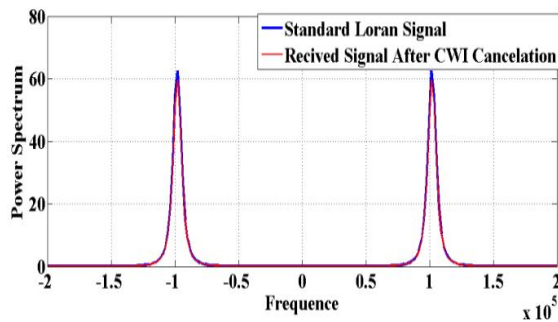
شکل ۹. سیگنال تداخلی واقعی

شکل (۱۰) طیف توان سیگنال تداخلی تخمین زده شده با سیگنال تداخلی واقعی را به صورت هم‌زمان نشان می‌دهد. از شکل مشخص است که پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی تداخل به‌طور دقیقی تخمین زده شده و هر دو سیگنال طیف تقریباً یکسانی دارند.



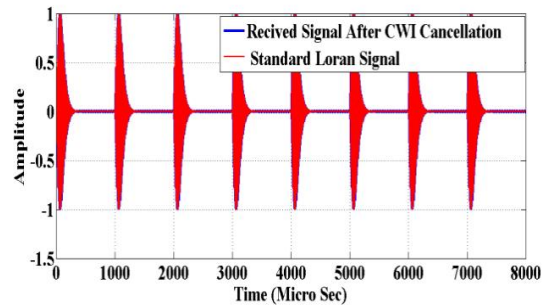
شکل ۱۰. مقایسه طیف توان سیگنال تداخلی تخمین زده شده با سیگنال تداخلی واقعی

شکل (۱۱) طیف توان سیگنال استاندارد لورن با کدینگ BPCI (سیگنال ارسالی) و طیف توان سیگنال تخمین زده شده را به صورت هم‌زمان نشان می‌دهد. از شکل مشخص است که پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی تداخل به‌طور کامل حذف شده است و هر دو سیگنال طیف تقریباً یکسانی دارند.

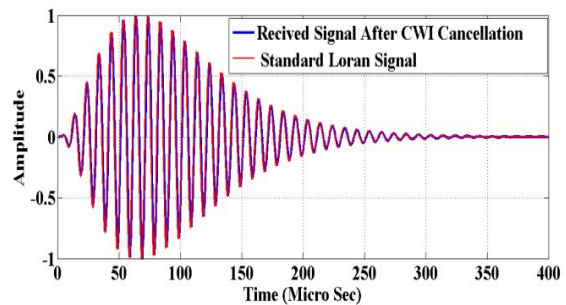


شکل ۱۱. مقایسه طیف توان سیگنال استاندارد لورن (سیگنال ارسالی) با طیف توان سیگنال دریافتی پس از حذف تداخل

شکل (۱۲) تغییرات SIR پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی در برابر افزایش نسبت دریافتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است با افزایش SIR ورودی نسبت SIR در خروجی الگوریتم تغییری نمی‌کند. دلیل این امر آن است که زمان ورود دقیقاً تخمین زده می‌شود و دقت الگوریتم مستقل از SIR سیگنال ورودی می‌گردد.

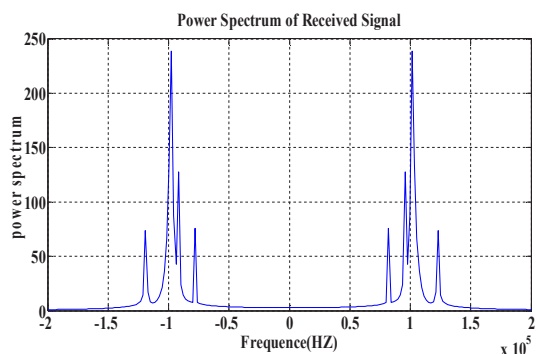


شکل ۷. مقایسه سیگنال استاندارد لورن (سیگنال ارسالی) با سیگنال تخمین زده شده در طول یک گروه پالس ارسالی از یک ایستگاه



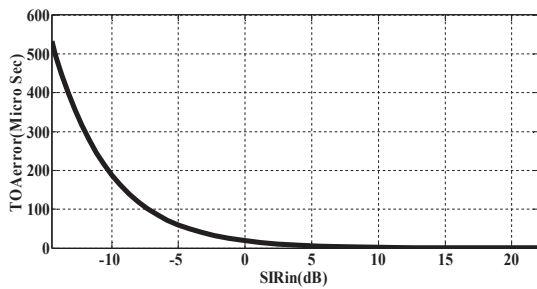
شکل ۸. مقایسه سیگنال استاندارد لورن (سیگنال ارسالی) با سیگنال تخمین زده شده در مدت زمان یک پالس لورن

شکل (۹) طیف توان سیگنال دریافتی قبل از حذف تداخل را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است در طیف توان پیک‌هایی در فرکانس‌های تداخلی روی می‌دهد. همچنین چون سیگنال تداخلی شامل سیگنال لورن نیز هست، در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز پیک مربوط به تداخل با فرکانس تداخلی ۱۰۰ کیلوهرتز با پیک مربوط به طیف توان سیگنال استاندارد لورن جمع شده است و در این فرکانس دامنه طیف توان بیشتر از سایر فرکانس‌های تداخلی است.



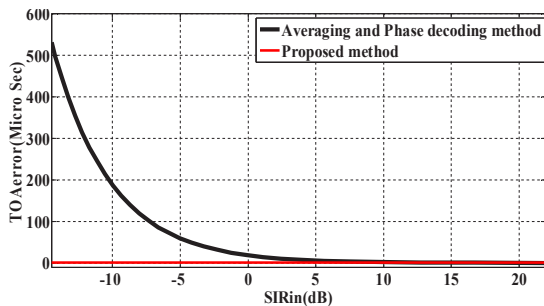
شکل ۹. طیف توان سیگنال دریافتی قبل از حذف تداخل

تداخلی از الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز استفاده شود ناوبری مختل می‌شود.



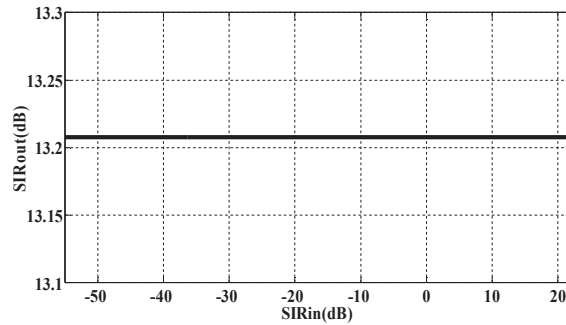
شکل ۱۳. حداکثر خطای TOA بعد از اعمال الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز برای سیگنال لورن با کدینگ فاز استاندارد و نسبت SIR های ورودی مختلف

شکل (۱۴) به‌طور هم‌زمان حداکثر خطای TOA (بر حسب میکروثانیه) بعد از اعمال الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز با کدینگ استاندارد لورن و اعمال الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز قادر به حذف تداخل نبوده و خطای زمان ورود سیگنال که منجر به کاهش دقت ناوبری می‌شود به شدت زیاد است. اما الگوریتم پیشنهادی به خوبی تداخل را حذف می‌نماید و خطای زمان ورود سیگنال که منجر به کاهش دقت ناوبری می‌شود را به شدت کاهش می‌دهد و به دقت بسیار خوبی برای ناوبری می‌رسد.



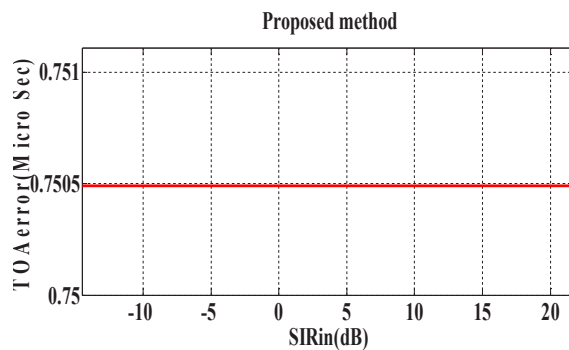
شکل ۱۴. مقایسه حداکثر خطای TOA بعد از اعمال الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز و اعمال الگوریتم پیشنهادی برای نسبت SIR های ورودی مختلف

همان‌طور که در شکل‌های (۲) الی (۱۵) نشان داده شد، به وضوح می‌توان مشاهده نمود که الگوریتم مطرح شده می‌تواند CWI هم‌زمان را حذف نموده و سیگنال لورن را عملاً بازسازی کند. علاوه بر این، SIR موج زمینی تخمین زده شده، تحت شرایط الگوریتم پیشنهادی مستقل از SIR سیگنال دریافتی است. به منظور مشاهده دقیق‌تر میزان بهبود در کاهش خطای زمان ورود سیگنال زمانی که از الگوریتم



شکل ۱۵. تغییرات نسبت سیگنال به تداخل پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی در برابر افزایش نسبت سیگنال به تداخل دریافتی

شکل (۱۳) حداکثر خطای TOA (بر حسب میکروثانیه) بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی برای فرکانس‌های تداخلی و نسبت SIR های ورودی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است با افزایش نسبت SIR سیگنال دریافتی، حداکثر خطای TOA در خروجی الگوریتم تغییری نمی‌کند. دلیل این امر در بالا توضیح داده شد. همان‌طور که از شکل مشخص است، الگوریتم پیشنهادی به خوبی و با حداقل پیچیدگی محاسباتی تداخل را حذف می‌نماید و خطای زمان ورود سیگنال که منجر به کاهش دقت ناوبری می‌شود را به شدت کاهش می‌دهد و به دقت بسیار خوبی برای ناوبری می‌رسد.



شکل ۱۶. حداکثر خطای TOA (بر حسب میکروثانیه) بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی برای نسبت SIR های ورودی مختلف

شکل (۱۴) حداکثر خطای TOA بعد از اعمال الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز با استفاده از کدینگ استاندارد لورن و برای فرکانس‌های تداخلی ۸۰، ۹۳/۵، ۹۴، ۹۹، ۲۰۹۴، ۱۰۰، ۱۰۰/۱، ۱۰۰/۷ و ۱۲۰/۷ و نسبت SIR های ورودی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز قادر به حذف تداخل نبوده و خطای زمان ورود سیگنال که منجر به کاهش دقت ناوبری می‌شود به شدت زیاد است و اگر برای این فرکانس‌های

۱۵dB- خطای زمان ورود را تا ۶۹۳ برابر نسبت به الگوریتم متداول میانگین‌گیری و کدگشایی فاز بهبود می‌بخشد. همچنین الگوریتم دارای پیچیدگی محاسباتی بسیار پایین‌تری نسبت به روش‌های موجود است و در هر مرحله تنها یک عمل جمع و یک عمل تفریق نیاز است. روش ارائه شده در این مقاله، به لحاظ بهبود کارایی گیرنده‌ی لورن از اهمیت بسیار بالایی به خصوص در شرایط تداخلی شدید برخوردار است.

مراجع

- [1] M. Bayat, M.H. Madani, and S.M.J. Razavi, "A Combined Improved Algorithm to Estimating The delay of Sky waves In Loran c Receiver," J. Electronical & Cyber Defence. Iran, vol. 2, pp.55-63, , 2014.
- [2] H. Arthur, O. Gerard, S. Charles, and S. Charles, "Design and Performance of a Low Frequency Time and Frequency Dissemination Service," Proc. Int. Meeting. FAA APNT Public, pp. 75-84, 2013.
- [3] H. Arthur, O. Gerard, S. Charles, and W. Brian, "Low Frequency (LF) Solutions for Alternative Positioning, Navigation, Timing, and Data (APNT&D) and Associated Receiver Technology," Proc. ION Int. Technical Meeting (ITM), January 2011.
- [4] N. Mitch, "Alternative Positioning, Navigation, and Timing Initiative: Assumptions and Requirements," FAA APNT Public Meeting USA, August 2010.
- [5] M. Bayat, and M.H. Madani, "Analysis and Simulation of a Hybrid Filter to Cancel Cross Rate Interference in Loran System, " J. Advanced Defence Sci. & Tech. Iran, vol.4, pp.51-60, 2017. .
- [6] L.P. Remmerswaal, and V. Willgen, "Some Aspects of Interference on Loran-C," J. IEE Pruc. F, vol.136, pp. 109-117, 1989.
- [7] L.P. Remmerswaal, and V. Willgen, "Interference and Loran-C: A European problem," Proc. 17th Annual Technical Symposium. The Wild Goose Association, pp. 22-40, October 1988.
- [8] A.C. BRUIN, and D. VAN Willigen, "Loran-C in a Hostile Environment," Royal Institute of

پیشنهادی و کدینگ فاز BPCI استفاده می‌شود در مقایسه با الگوریتم متداول میانگین‌گیری و کدگشایی فاز و استفاده از کدینگ فاز استاندارد لورن در جدول ۳ برای نسبت SIRهای مختلف باهم مقایسه شده است.

جدول ۳. مقایسه میزان بهبود در کاهش خطای اندازه‌گیری TOA

SIRin(dB)	TOA error(micro sec)		نسبت بهبود
	الگوریتم پیشنهادی و استفاده از کدینگ فاز BPCI	الگوریتم میانگین-گیری و کدگشایی فاز و استفاده از کدینگ فاز استاندارد	
-۱۵	۰/۷۵	۵۲۰	۶۹۳
-۱۰	۰/۷۵	۱۹۵	۲۶۰
۰	۰/۷۵	۲۰	۲۶/۶
۵	۰/۷۵	۵	۶/۷
۱۰	۰/۷۵	۱	۱/۳
۱۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۱

نتیجه‌گیری

منابع مختلف خطا که از جمله مهمترین آن‌ها تداخل موج پیوسته (CWI) می‌باشد، باعث خطا در ردیابی فاز سیگنال شده، که این عامل باعث خطا در اندازه‌گیری زمان ورود و در نهایت کاهش دقت ناوبری می‌شود. بر اساس تحلیل ساختار لورن در حوزه زمان و کدینگ فاز ارائه شده، در این مقاله یک روش جدید به منظور حذف تداخل CWI هم‌زمان مطرح شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد، الگوریتم پیشنهادی بهبود فوق‌العاده‌ای نسبت به روش میانگین‌گیری و کدگشایی فاز دارد. الگوریتم پیشنهادی می‌تواند CWI هم‌زمان را تقریباً به طور کامل حذف نموده و سیگنال لورن را عملاً بازسازی نماید. عامل محدود کننده در این الگوریتم SNR سیگنال دریافتی است. مهمترین فرکانس تداخلی که به کمک این الگوریتم به طور کامل حذف می‌شود، فرکانس ۱۰۰ KHz است. این فرکانس تداخلی باعث تخریب ناوبری می‌شود و با استفاده از روش میانگین‌گیری در کدینگ فاز استاندارد لورن نیز قابل حذف نیست و حتی کاهش هم نمی‌یابد. این الگوریتم برای نسبت سیگنال به تداخل برابر با

- Techniques,” M.S. Thesis, Department of Telecommunications and Signal Processing, Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2003.
- [20] M. Lad, “Characterization of Atmospheric Noise and Precipitation Static in the Loran-C Band for Aircraft,” M.S. Thesis, Ohio University, 2004.
- [21] M. Bayat, and J. Mazloun, “Design and Simulation of a Linear Adaptive System to Eliminate the Effect of Single-frequency Jammer in Warplane Data Link,” J. Aeronautical Eng. Iran, vol.18, pp.51-59, 2016.
- [22] M. Bayat, and M.H. Madani, “Navigation Accuracy Improvement Using a New Integrated Algorithm of TOA/TDOA in Ground-based Loran Systems,” J. Aeronautical Eng. Iran, vol.16, pp.37-60, 2015.
- [23] P.F. Swaszek, “Loran Phase Codes Revisited”, Position, Location and Navigation Symp. IEEE/ION.USA, 2008.
- [24] M. Bayat, and M.H. Madani, “Analysis of Cross-Rate Interference Cancellation by Use of a Novel Phase Code Interval in Loran Navigation System,” J. NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation. USA, vol. 64, DOI, 10.1002/navi.202, 2017.
- Navigation conf. NAV88/2000 London, March 1988.
- [9] D. VAN Willigen, “Hard Limiting and Sequential Detecting loran C Sensor,” Ph.D. Thesis, Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1985.
- [10] M. Bayat, and M.H. Madani, “A New Algorithm For Synchronous Continuous wave interference Cancellation In Loran Navigation System,” J. Electronical & Cyber Defence. Iran, vol. 4, pp.23-38, 2016.
- [11] T. Wei-li, “Study of Digital Signal Process in the Front of the Loran-C Receiver,” J. Xi’an: Xidian University, vol.12, pp. 29-55, 2007.
- [12] K. Helge Strom, and T. Eltoft, “Cancellation of Continuous Wave Interferences in Loran-C Receivers using an Adaptive Predictor,” Proc. Signal Processing Symp. Norwegian, pp. 167-172, 1995.
- [13] D. Last, and Y. Bian, “Carrier wave interference and Loran-C receiver performance,” J. Radar and Signal Processing, IEE Proceedings-F, vol.140(5), pp.273-283, 2008.
- [14] D. Last, and Y. Bian, “High-Efficiency Loran-C Interference Identification by Synchronous Sampling,” J. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. USA, vol.33, pp.134-141, 1997.
- [15] Lu. Wan-Hong, X. Lei, and Liu. Xiao-qiu, “Analysis of Carrier Wave Interference Suppression in Loran-C Receiver,” J. Ship Electronic Engineering, vol. 26, pp.77-79, 2006.
- [16] Z. Xin-li, M. Qing-ping, and L. Hua-Qin, “Noise Suppression Technique in Loran-C Receivers,” J. Chongqin University of Science and Technology, vol. 10, pp. 82-87, 2008.
- [17] M. Bayat, and M.H. Madani, “Loran Phase Code Revisited for Continuous Wave Interference Cancellation,” IET Science, Measurement & Technology.Iran, vol. 11, pp. 322 – 330, 2017.
- [18] M. BECKMAN, “Carrier Wave Signals Interfering With Loran C,” Ph.D. Thesis, Delft University Press. Delft, The Netherlands, 1992.
- [19] L. Fernand, and L. Roux, “Estimation of Loran C Sky Waves Using Frequency Estimation