

ارائه روشی برای مقابله با جمینگ در سامانه ناوبری دریایی JTIDS/Link-16

سید محمدرضا موسوی^۱، محسن عابدی^۲، محمدجواد رضائی^۳

m_mosavi@iust.ac.ir

۱- استاد دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

در این مقاله روشی برای مقابله با جمینگ در سامانه ناوبری دریایی JTIDS/Link-16 ارائه شده است. این روش بر بهینه‌سازی ساختار دوپالسی ارسال داده استوار می‌باشد و مشکلات ساختار دوپالسی قدیمی را رفع نموده است. در این مقاله کران بالای احتمال خطای نشانه مدولاسیون CCSK برای دنباله ۳۲ چیبی انتخاب شده برای سیستم JTID در ساختار تک‌پالس استخراج شده و در نهایت روشی برای محاسبه خطا در ساختار دوپالسی ارائه شده است. این کار به وسیله مقایسه چیبی به چیبی در ساختار دوپالسی و تصمیم‌گیری نشانه صورت می‌گیرد. روش پیشنهادی علاوه بر غلبه بر مشکل پایین بودن سرعت در ساختار دوپالسی، امکان تعیین محل وقوع خطا را نیز میسر می‌سازد.

واژگان کلیدی: احتمال خطای نشانه، مدولاسیون، CCSK، JTIDS، Link-16.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۲/۶/۷
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۳/۳/۱۱

۱- مقدمه

موقعیت‌یابی در دریا یکی از موضوعاتی است که پیشینه زیادی دارد. اما امروزه با توجه به گسترش استفاده از بستر دریا برای کاربردهای تجاری و نظامی، اهمیت موقعیت‌یابی امن در دریا دوچندان شده است. امروزه سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ای از جمله GPS، GLONASS و یا ترکیبی از این دو، به کار گرفته می‌شوند تا دقت و امنیت موقعیت‌یابی در دریا افزایش یابد [۱-۳]. اما یکی از مهم‌ترین و ایمن‌ترین سیستم‌های ناوبری که امروزه برای ناوبری دریایی استفاده می‌شود و در انحصار ایالات متحده آمریکا و متحدانش در ناتو می‌باشد، سامانه Link-16/JTIDS است. این سامانه به دلیل استفاده ترکیبی از مخابرات طیف گسترده و مخابرات مبتنی بر جهش فرکانس، محیطی ایمن برای ارسال اطلاعات ناوبری را فراهم آورده است [۴-۶].

همان‌طور که اشاره شد یکی از سیستم‌های ناوبری که امروزه توسط نیروی دریایی آمریکا و ناتو مورد استفاده قرار می‌گیرد، Link-16 می‌باشد. این سیستم و پایانه مخابراتی آن، یعنی JTIDS، شرایط ارسال اطلاعات را به صورت ایمن در برابر جمینگ^۱ فراهم می‌کنند. لازم به ذکر است که Link-16 نام کل سیستم داده ارتباطی است، در حالی که JTIDS یکی از اعضای مخابراتی این سیستم می‌باشد. پیشرفت JTIDS از سال ۱۹۶۰ با رقابت بین دو نسل TDMA (برای نیروی هوایی آمریکا) و DTDMA (برای نیروی دریایی آمریکا) آغاز شد. قبل از این سیستم داده ارتباطی پیشرفته، Link-4A و Link-11 مورد استفاده قرار می‌گرفت. JTIDS دو نوع امنیت به نام‌های امنیت پیام یا MSEC و امنیت ارسال یا TSEC را برای Link-16 فراهم می‌کند [۷-۱۱].

سامانه JTIDS از مخابرات ترکیبی طیف گسترده و مبتنی بر جهش فرکانسی بهره می‌گیرد و اصطلاحاً یک سیستم DS/FH (دنباله مستقیم طیف گسترده مبتنی بر جهش فرکانسی) نامیده می‌شود [۱۲ و ۱۳]. ساختار مخابراتی این سیستم، خود دارای مقداری خاصیت ضدجمینگ می‌باشد. اما برای توان‌های بالای جمینگ و جمرهای خاص، این سیستم مانند سایر سیستم‌های ناوبری نیازمند روش‌های

کمکی مقابله با جمینگ می‌باشد [۱۴ و ۱۵].

یکی از پرکاربردترین راه‌های مقابله با جمینگ در JTIDS، روش ارسال دوپالسی اطلاعات است. مزیت این روش در این می‌باشد که کانال (یا دشمن) برای ایجاد خطا در تشخیص نشانه باید تعداد بیشتری خطا در چیپ‌ها ایجاد کند. همچنین تضمینی برای کانال (یا دشمن) وجود ندارد که بتواند در هر دو پالس، یک چیپ خاص را دچار خطا کند. در نتیجه این روش می‌تواند در صورت ایجاد خطا در چیپی از یک پالس، گیرنده را از رخداد خطا آگاه کند.

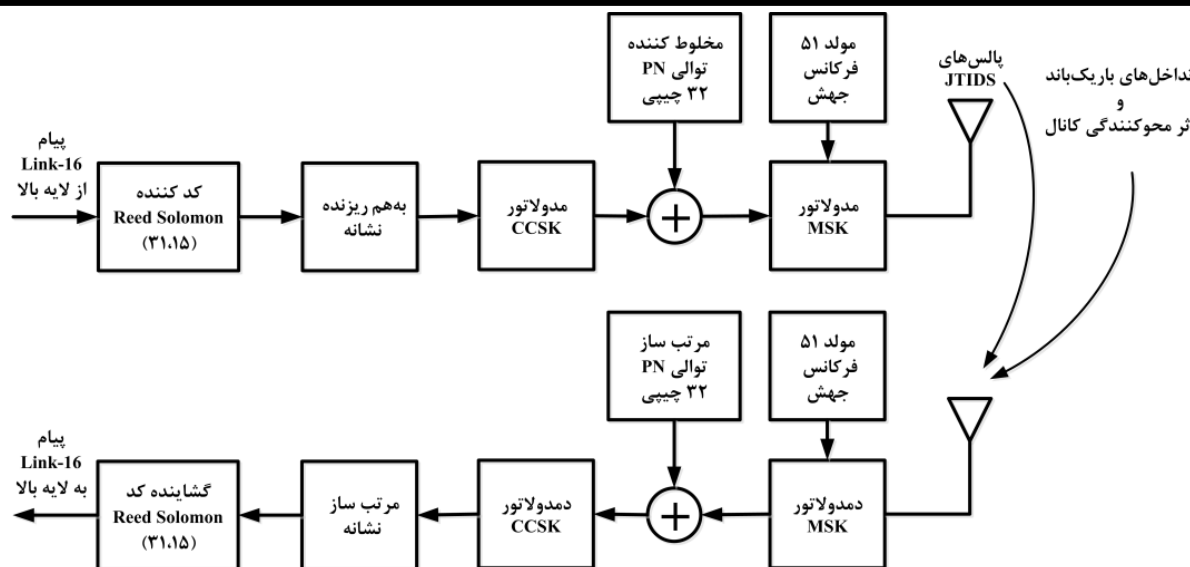
اما این روش از مشکلاتی نیز رنج می‌برد. یکی از این مشکلات افت سرعت سیستم می‌باشد. مشکل دیگر این که روش فوق هیچ گونه اطلاعاتی در مورد موقعیت خطاهای رخ داده در هر پالس نمی‌دهد. به این ترتیب ممکن است حالتی پیش آید که صحت کل پالس دریافتی زیر سوال رود [۱۶]. در این مقاله روشی پیشنهاد شده است که به بهینه‌سازی ساختار دوپالسی می‌پردازد و علاوه بر این که بر مشکل اول (سرعت پایین غلبه می‌کند)، محل وقوع خطا را نیز مشخص می‌نماید. این روش برخلاف روش قدیمی دوپالسی که به مقایسه کلی دوپالس ارسالی می‌پردازد و صرفاً وقوع خطا را از طریق یک همبسته‌گیری کلی آشکار می‌نماید، بستری برای مقایسه چیپ به چیپ پالس‌های ارسالی فراهم کرده است. به این ترتیب روش پیشنهادی، در هنگام وقوع خطا، در زمانی به مراتب کمتر از زمان ارسال دو پالس کامل، به تشخیص خطا می‌پردازد.

ساختار مقاله پیش‌رو به این صورت است که ابتدا در بخش دوم به معرفی JTIDS و اجزای آن پرداخته خواهد شد. سپس در بخش سوم سازوکار مدولاسیون و دمدولاسیون CCSK [۱۷-۲۰] در سامانه JTIDS شرح داده می‌شود. در ادامه این بخش، ویژگی‌های همبستگی عرضی برای مدولاسیون CCSK مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم روش پیشنهادی برای بهبود عملکرد ضدجمینگ ساختار دوپالسی ارائه می‌شود و نتایج تحلیلی این روش با روش‌های پیشین مقایسه می‌گردد. نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

۲- معرفی JTIDS

سیستم JTID یک سیستم DS/FH (طیف گسترده جهش

^۱ Jamming



شکل (۱) روند ارسال و دریافت سیگنال JTIDS/Link-16

به کار می‌برد. در واقع وظیفه تبدیل اطلاعات دیجیتال به آنالوگ و فرستادن آن در کانال بر عهده همین لایه MSK می‌باشد [۱۵]. تعبیه این لایه‌ها در JTIDS به منظور مقابله با مشکلات و تغییراتی است که در پالس‌های ارسال شده توسط کانال ایجاد می‌شود که برای نمونه می‌توان به نویز سفید گوسی، تداخلات عمدی (مثل تداخل نویز مسلسل وار (BNI)، تداخل نویز پالسی (PNI) و تداخل نویز زیرباند (PBNI)) و هم‌چنین اثر محوکنندگی کانال، اشاره کرد. در گیرنده نیز دمدولاتورهای مورد استفاده در فرستنده را به منظور مدولاسیون‌های مورد استفاده در فرستنده را به منظور بازیابی اطلاعات، اعمال می‌نمایند. در این مقاله عملکرد JTIDS در حضور نویز سفید گوسی AWGN بررسی خواهد شد.

۳- مدولاسیون CCSK

مدولاسیون CCSK، مدولاسیون نشانه در باند پایه است و توسط پایانه فیزیکی Link-16 به نام JTIDS استفاده می‌شود. مدولاسیون CCSK در واقع دنباله‌ای ۳۲ چیبی برای هر نشانه ۵ بیتی در نظر می‌گیرد. روش کار به این صورت است که برای نشانه ۵ بیتی ۰۰۰۰۰ دنباله‌ای از چیبی‌ها فرستاده می‌شود (برای مثال 01111100111010010000101011101100) و برای نشانه ۵ بیتی ۰۰۰۰۱ از چرخش به چپ دنباله پیشین به اندازه یک چیبی، دنباله متناظر به دست می‌آید. این روند

فرکانسی و دنباله مستقیم چندگانه) است [۳]. این سیستم به عنوان لایه فیزیکی برای Link-16 شناخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، JTIDS متشکل است از یک لایه کدکننده ریدسولامون (RS) از نوع (۳۱،۱۵)، یک مدولاتور CCSK برای باند پایه، یک مدولاتور MSK برای مدولاسیون چیبی، یک به هم ریزنده نشانه که وظیفه به هم ریختن ترتیب نشانه‌ها را بر عهده دارد (البته این به هم ریختن، شبه تصادفی است و در گیرنده بر اساس الگوریتم به هم ریختن فرستنده مرتب‌سازی صورت می‌گیرد [۷]) و هم‌چنین یک مخلوط کننده که وظیفه آن ضرب انحصاری (XOR) دنباله چیبی آماده‌شده با لایه CCSK در یک دنباله شبه نویز است تا اطلاعات به شکلی رمزگذاری شود. دو بخش مهم و اساسی JTIDS لایه مربوط به مدولاتور CCSK و لایه مرتبط با مدولاتور MSK می‌باشد. بخش نخست، به تفصیل در این مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت، اما برای بخش دوم به توضیح مختصری در همین قسمت اکتفا خواهد شد. در کدکننده ریدسولامون هر ۱۵ نشانه از اطلاعات تبدیل به ۳۱ نشانه می‌شود، به گونه‌ای که سیستم تا ۸ خطای نشانه را می‌تواند تحمل کرده و نشانه‌های واقعی را بازیابی کند. مدولاتور MSK با استفاده از فرکانس حامل شبه تصادفی و جهش فرکانسی، چیبی‌های نشانه را مدوله می‌نماید. این لایه ۵۱ فرکانس مختلف را به‌طور شبه تصادفی انتخاب می‌کند و به عنوان فرکانس حامل برای این لایه مخابراتی

که در آن h_i نتایج همبسته‌گیری S_0 با S_i در حالت بدون خطا می‌باشد و می‌تواند برای $i=1,2,\dots,31$ مقادیر 0-4 و 4 باشد (در نتیجه $H=4$ است) و R_i نیز نتایج همبسته‌گیری S_0 با S_i در حالت کلی است. در حالت بدون خطا، دمدولاتور CCSK فرستاده شدن نشانه صفر را تصمیم‌گیری می‌کند، زیرا $R_0=32$ دارای بیش‌ترین مقدار همبستگی، نسبت به هر یک از R_1 تا R_{31} می‌باشد.

۳-۱- ویژگی‌های همبستگی عرضی مربوط به

مدولاسیون CCSK

در این قسمت حالتی را بررسی می‌کنیم که تعداد N تا از چیپ‌ها دچار خطا شده باشند. برای $N=0,1,2$ نتایج همبستگی عرضی در جدول (۲) آورده شده است. در تمامی مقاله فرض بر این است که نشانه صفر S_0 فرستاده شده است. وقتی خطای چیپ نداشته باشیم و به بیان دیگر $N=0$ باشد، در $H=4$ در R_7 ، R_{16} و R_{25} رخ می‌دهد. وقتی $N=1$ باشد، R_0 دو واحد کاهش می‌یابد و مابقی بسته به این‌که خطای چیپ در کجا رخ داده باشد، دو واحد کم یا زیاد می‌شود. جدول (۳) به تبیین این بخش می‌پردازد. برای هر جفت نشانه تعداد $(32+h_i)/2$ چیپ هم علامت وجود دارد که آن را گروه اول چیپ‌ها می‌نامند و تعداد خطاهایی که در این ناحیه رخ می‌دهد را برای هر جفت نشانه، با X_1 نمایش داده می‌شود. از طرف دیگر تعداد $(32-h_i)/2$ چیپ غیر هم‌علامت وجود دارد که آن را گروه دوم چیپ‌ها می‌نامند و تعداد خطاهایی که در این ناحیه رخ دهد را برای هر جفت نشانه، با X_2 نمایش می‌دهند. برای محاسبه خطا در نواحی هم‌علامت از رابطه (۲) بهره گرفته می‌شود:

$$P\{X_1 = q | X_1 + X_2 = j\} = \frac{\binom{n_1}{q} \binom{n_2}{j-q}}{\binom{n_1+n_2}{j}} \quad (2)$$

در این رابطه n_1 ، تعداد جفت چیپ‌های هم‌علامت و n_2 تعداد جفت چیپ‌های غیر هم‌علامت است. j تعداد کل خطاها و q تعداد خطاهایی است که در ناحیه هم‌علامت رخ داده است. X_1 و X_2 نیز تعداد خطای چیپی است که به ترتیب در ناحیه هم‌علامت و ناحیه غیر هم‌علامت بین S_0 با S_i رخ داده است.

برای سایر نشانه‌ها ادامه می‌یابد. مزیت این روش در این است که اجازه وقوع خطای چیپ تا تعداد بالایی داده می‌شود، بدون این‌که خطای نشانه رخ دهد [۱۶]. هم‌چنین می‌توان از دنباله‌های دیگری نیز استفاده کرد (برای مثال به عنوان دنباله متناظر با نشانه صفر $0111010001111010010000001100110$). لازم به ذکر است که به‌کارگیری دنباله‌هایی با مقادیر همبستگی عرضی کوچک‌تر، احتمال خطای نشانه را اندکی کاهش خواهد داد. استفاده از دنباله‌های پایه مناسب می‌تواند احتمال خطای نشانه را کاهش دهد.

در JTIDS مدولاسیون اطلاعات از نوع CCSK و MSK می‌باشد. CCSK مدولاسیونی در باند پایه با M آرایه M - (ary) می‌باشد که در آن هر نشانه ۵ بیتی به یک دنباله ۳۲ چیبی تبدیل می‌شود. MSK مدولاسیون چیپ را برای فرستادن در کانال فراهم می‌کند. همان‌طور که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود، ۳۲ دنباله با انتقال چرخشی به چیپ دنباله ۳۲ بیتی S_0 (به اندازه ۱ الی ۳۱)، به‌دست می‌آیند [۴]. این ویژگی در این دنباله نهفته است که با فرض این‌که نشانه ۵ بیتی صفر و در پی آن دنباله ۳۲ چیبی S_0 فرستاده شود، با فرض عدم خطا در هیچ یک از چیپ‌ها، نتیجه همبسته‌گیری عرضی آن با هر یک دنباله‌های ۳۲ چیبی دیگر در گیرنده، حداقل می‌گردد [۱۷ و ۱۸].

در دمدولاتور نشانه CCSK تصمیم‌گیری در مورد این‌که کدام نشانه فرستاده شده است، با به‌دست آوردن همبستگی عرضی ۳۲ چیپ دریافتی با همه ۳۲ دنباله ممکن از S_0 تا S_{31} انجام می‌شود. سپس بر اساس بیشترین مقدار همبستگی محاسبه شده، نشانه متناظر به‌دست می‌آید. برای مثال وقتی نشانه صفر یعنی S_0 توسط فرستنده ارسال شود، در غیاب نویز، نتایج همبستگی عرضی به‌صورت زیر خواهد بود.

$$\mathfrak{R}_i = \begin{cases} 32 & i = 0 \\ h_i \leq H & i = 1, 2, \dots, 31 \end{cases} \quad (1)$$

جدول (۱) دنباله ۳۲ CCSK چیبی انتخابی برای JTIDS

دنباله ۳۲ CCSK چیبی معادل هر نشانه ۵ بیتی
$S_0 = 01111100111010010000101011101100$
$S_1 = 11111001110100100001010111011000$
$S_3 = 11110011101001000010101110110001$
⋮
$S_{31} = 00111110011101001000010101110110$

جدول (۲) نتایج نمونه همبستگی عرضی برای دنباله CCSK ۳۲
چیپی انتخاب شده برای JTIDS با فرض فرستاده شدن S_0 .

R_i	$N=0$	$N=1_{(1)}$	$N=1_{(5)}$	$N=2_{(5,10)}$	$N=2_{(1,2)}$
$i=0$	32	30	30	28	28
$i=1$	0	2	-2	-4	0
$i=2$	0	2	2	4	0
$i=3$	-4	-2	-2	-4	-4
$i=4$	0	2	-2	0	0
$i=5$	0	2	-2	0	4
$i=6$	-4	-6	-6	-8	-4
$i=7$	4	2	6	8	0
$i=8$	0	2	-2	0	0
$i=9$	-4	-2	-2	0	-4
$i=10$	-4	-2	-2	0	0
$i=11$	0	-2	-2	-4	-4
$i=12$	0	2	2	4	4
$i=13$	0	-2	2	0	0
$i=14$	0	-2	2	4	-4
$i=15$	-4	-2	-2	-4	0
$i=16$	4	2	2	0	4
$i=17$	-4	-6	-2	-4	-4
$i=18$	0	-2	-2	0	0
$i=19$	0	-2	2	0	-4
$i=20$	0	2	-2	-4	4
$i=21$	0	-2	-2	0	-4
$i=22$	-4	-2	-6	-4	0
$i=23$	-4	-6	-2	0	-8
$i=24$	0	2	-2	-4	0
$i=25$	4	6	2	0	4
$i=26$	-4	-2	-2	-4	0
$i=27$	0	-2	2	0	-4
$i=28$	0	2	2	0	0
$i=29$	-4	-2	-6	-4	0
$i=30$	0	-2	-2	0	0
$i=31$	0	-2	-2	-4	0

رابطه بالا بیانگر احتمال شرطی این است که اگر z خطای چیپ وجود داشته باشد، q تای آن در ناحیه هم علامت رخ داده باشد. حال می‌خواهیم میانگین احتمال خطای نشانه را بر حسب انرژی به نویز استفاده شده در کانال به دست آوریم. ابتدا باید محاسبه کنیم اگر در ۳۲ چیپ دریافتی تعداد z خطای چیپ رخ دهد، احتمال این که این تعداد خطا منجر به خطای نشانه شود، چقدر است. با ضرب این احتمال شرطی در احتمال رخ دادن z خطا احتمال، خطای نشانه به شرط رخ دادن z خطای چیپ به دست می‌آید. به این ترتیب طبق رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$P\{\text{symbol error}|N = z\} = 0, \text{ when: } 0 \leq z \leq 6 \quad (3)$$

علت صفر شدن حاصل رابطه (۳) این است که اگر $z \leq 6$ باشد، R_0 حداقل برابر ۲۰ خواهد شد و حداکثر R_i ها در $i=7,16,25$ ممکن است بتواند ۱۶ شود که در این حالت، S_0 به عنوان نشانه ارسالی تصمیم‌گیری می‌گردد.

$$P\{N = z\} = \binom{32}{z} P_c^z (1 - P_c)^{32-z}, z = 0, 1, \dots, 3 \quad (4)$$

رابطه (۴) بیانگر احتمال رخداد z خطای چیپ است و P_c بیانگر احتمال خطای چیپ است. چون نشانه ارسالی، S_0 در نظر گرفته شده است، هر نشانه دیگری انتخاب شود، خطا رخ داده است. بنابراین:

$$P\{\text{symbol error}|N = z\} = \sum_{i=1}^{31} P\{S_i \text{ chosen}|N = z\} = \zeta_{UB_j} \quad (5)$$

در این رابطه ζ_{UB_j} احتمال شرطی خطای نشانه می‌باشد و مقادیر محاسبه شده آن برای $6 < z < 32$ در جدول (۴) به تفصیل آمده است. طبق رابطه (۶) می‌توان احتمال خطای نشانه را با استفاده از احتمال خطای چیپ محاسبه کرد. از جدول (۴) برای محاسبه احتمال خطای نشانه طبق رابطه (۶) استفاده می‌شود.

$$P_S < \sum_{j=0}^{32} \zeta_{UB_j} \binom{32}{j} P_c^j (1 - P_c)^{32-j} \quad (6)$$

که در آن P_S احتمال خطای نشانه، قبل از وارد شدن نشانه‌ها دمولاتور RS است.

جدول (۳) پنج جفت CCSK ۳۲ چیبی.

نشانه‌ها	دنباله‌های متناظر
نشانه ۰	-1 1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1
نشانه ۷	-1 1 1 1 1 -1 -1 -1 1 1 -1 -1 -1 -1 1 1 -1 1 1 1 1 -1 1 1 1 1 -1 1 1 1 1 -1
نشانه ۰	-1 1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1
نشانه ۱۶	-1 -1 -1 -1 1 1 -1 1 1 1 1 -1 1 1 -1 -1 1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 1 1 -1 1 -1 -1 1
نشانه ۰	-1 1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1
نشانه ۲۵	1 1 -1 1 1 1 -1 -1 1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
نشانه ۰	-1 1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 1 1 -1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1
نشانه ۱	1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 1 1 -1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 1 1 1 -1 -1 -1
نشانه ۰	-1 1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1
نشانه ۳	1 1 1 -1 -1 1 1 1 -1 1 -1 -1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1 1

جدول (۴) کران‌های بالای احتمال‌های شرطی خطای نشانه

برای ساختار تک پالس.

N = j	ζ_{UBj}
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0.0015
8	0.0207
9	0.1166
10	0.4187
11	1
12	1
0	0
0	0
0	0
32	1

$$P_c = Q\left(\sqrt{\frac{10 E_b}{32 N_0}}\right) \quad (۸)$$

هم‌چنین به دلیل این‌که مدولاتور RS هر ۱۵ نشانه را به ۳۱ نشانه با حداکثر فاصله تبدیل می‌کند به طوری که اجازه تا ۸ خطای نشانه را می‌دهد و قابلیت تصحیح خواهد داشت، بنابراین احتمال میانگین خطای نشانه را می‌توان از رابطه (۹) محاسبه کرد:

$$P_s \approx (1/31) \sum_{i=9}^{31} i \binom{31}{i} p_s^i (1 - p_s)^{31-i} \quad (۹)$$

چون هر ۱۵ نشانه به ۳۱ نشانه تبدیل می‌شود، انرژی اختصاص یافته به هر بیت، ۱۵/۳۱ قبل از کدکننده است. بنابراین:

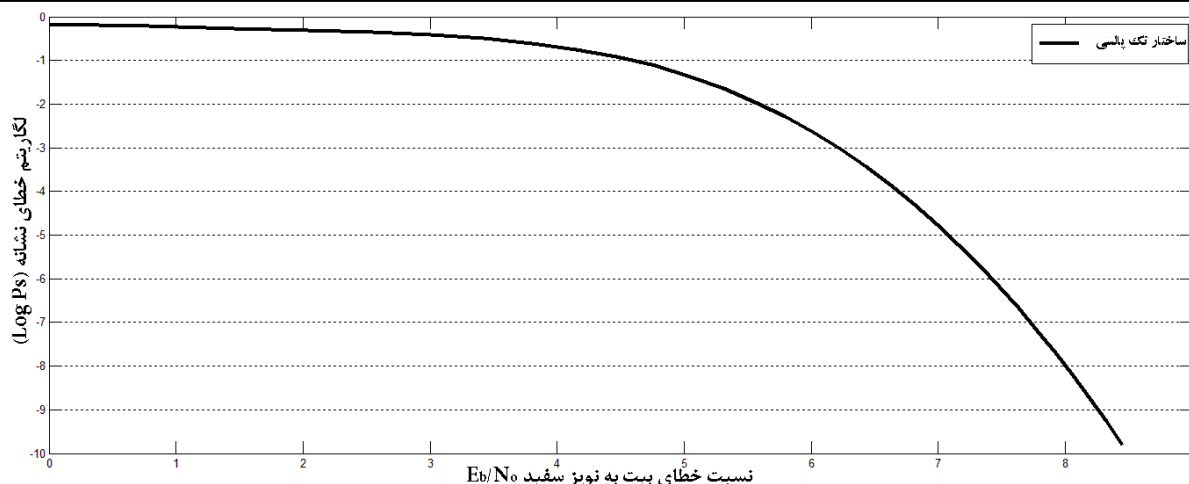
$$P_c = Q\left(\sqrt{\frac{10 * 15 E_b}{32 * 31 N_0}}\right) \quad (۱۰)$$

حال می‌توان از روابط توصیف شده در این بخش استفاده نمود و احتمال خطای نشانه برای ساختار عادی (تک‌پالسی) JTIDS را به دست آورد. شکل (۲) بیان‌گر میانگین احتمال خطای نشانه بر حسب انرژی سیگنال به نویز گوسی است.

رابطه (۷) احتمال خطای چیب را بر حسب انرژی به نویز گوسی به دست می‌دهد.

$$P_c = Q\left(\sqrt{\frac{2 E_c}{N_0}}\right) = \int_{\sqrt{\frac{2 E_c}{N_0}}}^{+\infty} e^{-x^2/2} dx \quad (۷)$$

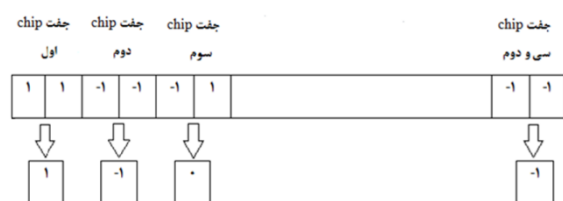
در رابطه (۷)، $N_0/2$ چگالی طیف توان نویز سفید گوسی بوده و E_b ، E_c و E_s به ترتیب انرژی چیب، انرژی بیت و انرژی نشانه می‌باشند. چون $E_s = 5E_b = 32E_c$ است، معادله (۷) را می‌توان به صورت معادله (۸) بازنویسی کرد:



شکل (۲) احتمال خطای نشانه شکل موج JTIDS/Link-16 در نویز سفید گوسی برای ساختار تک پالسی.

وقتی در حالت تک پالس خطای چیپ رخ دهد، دو واحد از R_0 کم و دو واحد به برخی از R_i های دیگر اضافه می شود و این باعث می گردد با تعداد خطای چیپ کمتری، خطای نشانه پیش آید ولی در این حالت اگر یک چیپ دچار خطا شود، صفر به عنوان نتیجه تصمیم گیری ظاهر می شود و از R_0 فقط یک واحد کم می گردد و در همبسته گیری عرضی به جای این که خطا را در ناحیه ناهم علامت دو واحد زیاد کند فقط یک واحد زیاد می کند. در این روش تنها در صورتی خطای چیپ در نظر گرفته می شود که هر دوی چیپ ها، دارای خطا باشند.

هدف از ارائه این ساختار ایجاد حاشیه اطمینان بیشتر برای صحت نشانه دریافتی است. با این ساختار کانال برای ایجاد خطای نشانه باید خطای چیپ بیشتری تولید کند. در این حالت اگر تعداد خطای چیپ، تا ۱۳ عدد باشد، خطای نشانه رخ نمی دهد. زیرا مقدار R_0 برابر ۱۹ می گردد و حداکثر در همبستگی عرضی های دیگر $R_{7,16,25}$ می تواند ۱۷ شود. لازم به ذکر است، این که دو خطا در یک جفت چیپ رخ دهد یا در دو چیپ مختلف، البته در یک ناحیه، هردو تاثیر یکسانی در کم کردن R_0 و زیاد کردن R_i ها دارند.



شکل (۳) تصمیم گیری در حالت دوپالسی شکل موج

JTIDS/LINK-16

۴- ساختار پیشنهادی دوپالسی

یکی از راه کارهایی که تا کنون برای بهبود عمل کرد JTIDS در مقابل جمینگ پیشنهاد شده است، استفاده از ساختار دوپالسی به جای ساختار تک پالسی می باشد. در این روش هر بخش از اطلاعات در دو پالس متوالی ارسال می گردد و از مقایسه دو پالس دریافتی، وقوع خطا یا عدم وقوع خطا تشخیص داده می شود [۱۲]. اشکال اساسی این روش، این است که برای تشخیص خطا، سیستم باید به اندازه دو پالس کامل متوقف بماند. اما در این مقاله روشی پیشنهاد شده است که بر اساس آن، دو پالس ارسالی در یکدیگر ادغام می شوند و به این ترتیب هر چیپ از پالس دوم بلافاصله بعد از چیپ متناظر از پالس نخست می آید. بنابراین خطایابی در این روش با سرعت بسیار بالاتری صورت خواهد گرفت. لازم به ذکر است که روش پیشنهادی به مانند روش قدیمی دوپالسی از مشکل افزایش پهنای باند رنج می برد.

همان طور که اشاره شد، در ساختار دوپالسی هر نشانه دو بار فرستاده می شود. در این روش، به جای یک دنباله ۳۲ چیبی، یک دنباله ۶۴ چیبی خواهیم داشت. بررسی به این صورت است که مطابق شکل (۳) دو پالس به صورت چیپ به چیپ بررسی می شوند. در حالت بدون خطا، اگر هر دو چیپ در خانه های $2k < k < 2k+10$ برابر باشند (یعنی یا هر دو ۱ یا هر دو -۱ باشند)، همان عدد تصمیم گیری می شود. اما وقتی یکی از آن ها ۱ و دیگری -۱ باشد، قطعاً خطایی رخ داده و عدد صفر به عنوان چیپ در نظر گرفته خواهد داشت. مزیت دوپالسی بر تک پالس این است که

دارند. کاملاً واضح است که در ساختار دوپالسی میانگین احتمال خطای نشانه در همه مقادیر انرژی بیت به نویزها بهتر از حالت تک پالس است و احتمال خطای نشانه با افزایش انرژی بیت به نویز با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل (۴) پیداست، در صورتی که $E_b/N_0=5\text{dB}$ باشد، میانگین احتمال خطای نشانه در حالت دوپالسی تا 10^{-6} برابر کوچک‌تر شده است و این نتیجه حاکی از برتری کامل این روش‌ها نسبت به حالت تک پالس می‌باشد.

اما در رابطه با مقایسه روش دوپالسی پیشنهادی با روش دوپالسی قدیمی باید گفت که با توجه به شکل (۴)، همان‌طور که در بند پیش اشاره شد، میانگین احتمال خطای نشانه برحسب انرژی بیت به نویزگوسی، مقادیر بسیار نزدیکی در هر دو روش دارد. این خود مؤید این مطلب است که روش پیشنهادی ضمن حفظ عمل‌کرد روش پیشین از منظر مقابله با جمینگ (با توجه به معیار میانگین احتمال خطای نشانه برحسب انرژی بیت به نویز)، سرعت پردازش را افزایش داده و برای سیستم قابلیت مکان‌یابی خطای چیپ را فراهم کرده است.

جدول (۵) کران‌های بالای احتمال‌های شرطی خطای نشانه برای ساختار دوپالسی.

$N=j$	ζ_{UB_j}
0	0
1	0
2	0
0	0
0	0
0	0
13	0
14	1.2574×10^{-6}
15	1.428×10^{-5}
16	9.70×10^{-5}
17	4.98×10^{-4}
18	0.0021
19	0.0073
20	0.0221
21	0.0714
22	0.1381
23	0.4112
24	1
0	0
0	0
0	0
64	1

در صورتی که ۱۴ خطا داشته باشیم، باید هر ۱۴ تای آن در ناحیه ۲۸ تایی ناهم‌علامت باشند تا منجر به خطای نشانه شوند. در این حالت ۲۸ چیپ در ناحیه ناهم‌علامت و ۳۶ چیپ در ناحیه هم‌علامت برای $R_{7,16,25}$ وجود دارند و ۳۲ چیپ در ناحیه ناهم‌علامت و ۳۲ چیپ در ناحیه هم‌علامت برای R_i هایی که در حالت تک پالس صفر بودند، می‌باشند و برای R_i هایی که در حالت تک پالس ۴- بودند، ۳۶ چیپ در ناحیه ناهم‌علامت و ۲۸ چیپ در ناحیه هم‌علامت خواهد بود. براین اساس می‌توان جدول (۵) را به دست آورد. روابط مربوط به روش دوپالسی همان روابط تک پالسی است به جز این که تعدادی از آن‌ها با توجه به ماهیت ۶۴ چیبی بودن دوپالسی دچار تغییراتی شده‌اند.

$$\mathfrak{R}_i = \begin{cases} 64 & i = 0 \\ h_i \leq H & i = 1, 2, \dots, 63 \end{cases} \quad (11)$$

$$P\{\text{symbol error} | N = j\} = 0, \quad \text{when: } 0 \leq j \leq 1 \quad (12)$$

$$P\{N = j\} = \binom{64}{j} P_c^j (1 - P_c)^{64-j}, \quad j = 0, 1, \dots, 6 \quad (13)$$

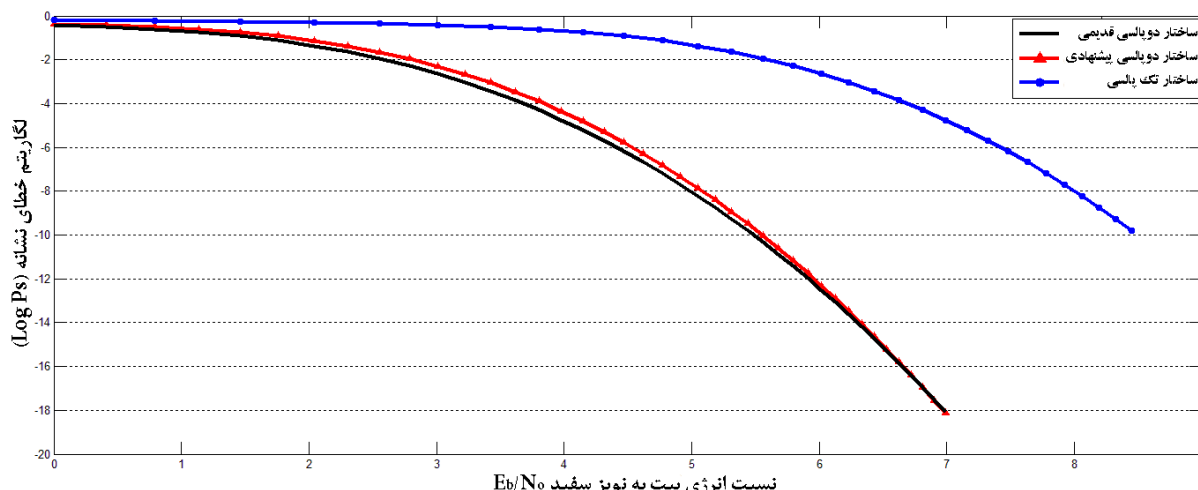
$$P\{\text{symbol error} | N = j\} = \sum_{i=1}^{63} P\{S_i \text{ chosen} | N = j\} = \zeta_{UB_j} \quad (14)$$

روابط (۱۰) تا (۱۴) برای استخراج جدول (۵) محاسبه شده‌اند.

$$P_S < \sum_{j=0}^{64} \zeta_{UB_j} \binom{64}{j} P_c^j (1 - P_c)^{64-j} \quad (15)$$

روابط (۷) تا (۱۰) که مربوط به ساختار تک پالسی هستند، برای ساختار دوپالسی نیز صادق می‌باشند و به قوت خود باقی خواهند ماند. با استفاده از روابط (۹) تا (۱۵)، نمودار شکل (۴) به دست خواهد آمد. در این‌جا نیز میانگین احتمال خطای نشانه برحسب انرژی بیت به نویزگوسی رسم شده است و به منظور مقایسه، نمودار شکل (۲) نیز آورده شده است.

در شکل (۴) ملاحظه می‌شود که ساختارهای دوپالسی قدیمی و پیشنهادی، از منظر میانگین احتمال خطای نشانه برحسب انرژی بیت به نویزگوسی، عمل‌کرد مشابهی



شکل (۴) احتمال خطای نشانه در JTIDS/Link-16 در حضور نویز سفید گوسی (ساختر دوپالسی در برابر ساختار تک پالسی).

Navigation Satellite Systems: Unveiling Its Core Features in Signal Processing”, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 29, No. 2, pp. 108-131, Mar. 2012.

- [2] Kawaguchi, A., Inaishi, M., Kondo, H., and Kondo, M., “Towards the Development of Intelligent Navigation Support Systems for Group Shipping and Global Marine Traffic Control”, IET Journal of Intelligent Transport Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 257-267, Sep. 2009.
- [3] Kao, C. H., “Performance Analysis of a JTIDS/Link-16-type Waveform Transmitted Over Slow, Flat Nakagami Fading Channels in the Presence of Narrowband Interference”, PhD. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, 2008.
- [4] Koromilas, I., Robertson, C. and Kragh, F., “Performance Analysis of the LINK-16/JTIDS Waveform with Concatenated Coding in both AWGN and Pulsed-Noise Interference”, IEEE Conference on Military Communications, pp. 2074-2081, USA, Nov. 2010.
- [5] Xie, D. G., Wu, N., Wang, C. and Liu, Q. F. “Anti-Jamming Performance Simulation of Tactical Data Link Communication System”, 10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, pp. 1056-1059, China, Oct. 2012.
- [6] Dickerson, C. E., “A Relational Oriented Approach to System of Systems Assessment of Alternatives for Data Link Interoperability”, IEEE Systems Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 549-560, May 2013.
- [7] Charalampos, K., “Performance Analysis of the Link-16/JTIDS Waveform with Concatenated Coding, Soft Decision Reed-Solomon Decoding and Noise Normalization”, MSc. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, 2010.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله اهمیت ناوبری دریایی و یکی از مهم‌ترین سیستم‌های مورد استفاده در این حوزه مورد بررسی قرار گرفت. با وجود این‌که، در بین سیستم‌های ناوبری مورد استفاده در حوزه دریا، سامانه Link-16/JTIDS به جهت استفاده ترکیبی از مخابرات طیف گسترده و مخابرات مبتنی بر جهش فرکانسی از قابلیت اطمینان بالایی در برابر جمینگ برخوردار بوده و مورد استفاده نیروی دریایی ناتو و آمریکا می‌باشد. ولی این سیستم نیز در مقابل حملات جمینگ کاملاً ایمن نیست. یکی از مهم‌ترین راه‌کارهای مقابله با جمینگ در JTIDS/Link-16 ارسال دوپالسی اطلاعات می‌باشد که از مشکل کاهش سرعت سیستم ناوبری و عدم آشکارسازی موقعیت وقوع خطا رنج می‌برد. در این مقاله روش بهینه‌ای برای ساختار دوپالسی ارائه شد. این روش برخلاف روش قدیمی دوپالسی که به مقایسه کلی دوپالسی ارسالی می‌پرداخت و صرفاً وقوع خطا را از طریق یک همبسته‌گیری کلی آشکار می‌کرد، بستری برای مقایسه چیپ به چیپ پالس‌های ارسالی فراهم نموده است. روش پیشنهادی بر این‌که از نظر میانگین احتمال خطای نشانه عمل کرد مشابهی با روش قدیمی داشت، سرعت تصمیم‌گیری را افزایش می‌داد و امکان تعیین محل وقوع خطا را نیز فراهم می‌نمود.

۶- مراجع

- [1] Granados, G. S., Salcedo, J. A. L., Banos, D. J. and Risueno, G. L., “Challenges in Indoor Global

- [15] Shang, F., Gao, B. Q., Liu, G. and Xiao, X., "Bit Error Performance Analysis of FH/MSK System in Different Multi-Tone Noise Jamming", IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, China, pp. 1398-1401, Aug. 2005.
- [16] Kao, C. H. and Robertson, C., "Performance of a JTIDS-Type Waveform with Noise-Normalization Combining in Pulsed-Noise Interference", IEEE Conference on Military Communications, USA, pp. 1690-1694, Nov. 2010.
- [17] Kao, C. H., Robertson, C. and Lin, K., "Performance Analysis and Simulation of Cyclic Code-Shift Keying", IEEE Conference on Military Communications, USA, pp. 1-6, Nov. 2008.
- [18] Hu, S., Bi, G., Guan, Y. L. and Li, S., "Spectrally Efficient Transform Domain Communication System with Quadrature Cyclic Code Shift Keying", IET Journal of Communications, Vol. 7, No. 4, pp. 382-390, Mar. 2013.
- [19] Noh, H. J., and Lim, J. S., "Partitioned Cyclic Code Shift Keying for JTIDS", IEEE Conference on Military Communications, USA, pp. 1-6, Nov. 2012.
- [20] Chen, L., Tang, S. and Ma, X., "Progressive Algebraic Soft-Decision Decoding of Reed Solomon Codes", IEEE Transaction on Communications, Vol. 61, No. 2, pp. 433-442, Feb. 2013.
- [8] Chacon, M., Esteve, M., Perez, I. and Palau, C. E. "Design and Implementation of a Simulation Platform for Link-16 Networks Using NS-2", 7th Iberian Conference on Information Systems and Technologies, pp. 1-6, Jun. 2012.
- [9] Bareum, L., Eunbyeong, J., and Sangho, C., "Simulator for Tactical Data Link System with Anti-Jamming Capability", 15th International Conference on Advanced Communication Technology, pp. 789-793, South Korea, Jan. 2013.
- [10] Cruz, C. I., "Net-Wars Based Study of a Joint Stars LINK-16 Network", MSc. Thesis, Air Force Institute of Technology, Air University, Ohio, USA, 2004.
- [11] Wang, L. Y., Xue, W., and Luo, W. Z., "Model Analysis of Link-16 Based on Global Grid Reference Model", International Conference on Computer Science and Network Technology, pp. 910-913, Dec. 2011.
- [12] Kao, C. H. and Robertson, C. "An Improved Link-16/JTIDS Receiver in Pulsed-Noise Interference", IEEE Conference on Military Communications, USA, pp. 341-346, Nov. 2011.
- [13] Lekkakos, D. and Robertson, R. C., "Performance Analysis of a LINK-16/JTIDS Compatible Waveform Transmitted Over a Channel with Pulse-Noise Interference", IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, Canada, pp. 29-34, Aug. 2009.
- [14] Xie, D. G., Wu, N., Wang, C. and Liu, Q. F., "Performance Analysis and Simulation of DSSS in Tactical Data Link Communication System", 6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, pp. 194-197, Nov. 2012.