

طراحی و شبیه‌سازی سیستم مخابراتی زیرسطحی با برد کوتاه و ارائه مدلی جدید برای کانال آکوستیکی چندمسیره کم‌عمق در خلیج فارس

بیژن عباسی آرند^۱، عبدالله دوستی عارف^{۲*}

۱- دکترای مخابرات میدان، پژوهشگاه الکترونیک ایران

۲- کارشناس ارشد مخابرات سیستم، پژوهشگاه الکترونیک ایران

doosti.aref@ieee.org

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۹، پذیرش مقاله: اسفند ۱۳۸۹)

چکیده- در این مقاله بر اساس نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌ها در تنگه هرمز و اطلاعات موجود درباره نمایه سرعت صوت در اعماق مختلف آن، مدلی جامع برای کانال آکوستیکی زیرسطحی چندمسیره کم‌عمق در انتشار افقی ارائه شده است. مدل‌سازی پدیده چندمسیری بر مبنای تئوری شعاعی و روش تصاویر انجام شده و در مدل‌سازی کانال، تضعیف ناشی از پراکندگی موج در سطح و بازتاب آن از کف، تضعیف ناشی از اثر جذبی مواد مختلف و نویزهای محیطی مانند نویز ناشی از وضعیت دریا، نویز حرارتی، نویز کشتیرانی و اغتشاشها نیز در نظر گرفته شده است. همچنین یک سیستم مخابراتی زیرسطحی کامل، شامل فرستنده و گیرنده طراحی و شبیه‌سازی شده است. مدولاسیون به‌کار رفته از نوع QPSK است و اطلاعات با نرخ ۵ kbps از طریق فرکانس حامل ۲۷ kHz حداکثر تا فاصله ۱ km ارسال می‌شود. تشخیص رفتار کانال در گیرنده بر مبنای دنباله آموزشی انجام می‌شود که ۱۰٪ را در ابتدای سیگنال ارسالی به خود اختصاص می‌دهد.

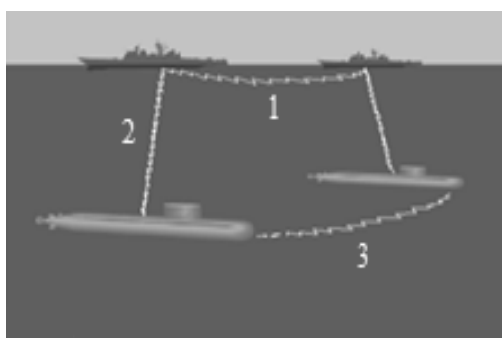
کلیدواژگان: تئوری شعاعی، چندمسیری، خلیج فارس، مدولاسیون QPS، مخابره زیر آبی.

۱- مقدمه

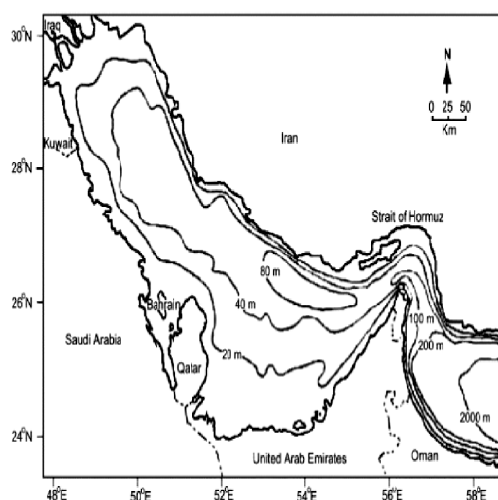
می‌شوند و برای انتقال سیگنال اطلاعات در زیر آب به پرتوهای باریک و قدرتمند لیزر نیاز است. پرتوی لیزر نیز برای مسافت‌های بلند مناسب نبوده و فقط در مسافت‌های کوتاه کاربرد دارد. در شکل (۱) ارتباطات زیر سطحی در

ارتباط مخابراتی بی‌سیم در زیر آب توسط امواج آکوستیکی امکان‌پذیر است، زیرا امواج رادیویی به دلیل تضعیف شدید، کارایی بسیار کمی دارند. امواج نوری نیز به سرعت پراکنده

کشورهای عراق و کویت بین 1524 m/s تا 1528 m/s در کف آب و بین 1547 m/s تا 1549 m/s در سطح آب است [۱]. لذا میزان تغییرات سرعت در سطح نسبت به کف در این مناطق در فصل تابستان در حدود 20 m/s است.



شکل ۱ انواع ارتباطات زیرسطحی



شکل ۲ موقعیت طول و عرض جغرافیایی منطقه خلیج فارس و عمق آب در آن

در جنوبی‌ترین ناحیه خلیج فارس به جز مناطق مربوط به کشورهای بحرین و قطر، سرعت صوت بین 1548 m/s تا 1552 m/s در کف و بین 1553 m/s تا 1557 m/s در

محیط دریا به سه دسته تقسیم شده و در این مقاله، ارتباط میان فرستنده و گیرنده از نوع سوم است. آب دریا مانند موجبر آکوستیکی عمل می‌کند و سیگنال صوتی را از درون خود انتقال می‌دهد. کانال صوتی به عنوان نوعی موجبر صوتی، کانالی با پارامترهایی کاملاً تصادفی است، اما این به معنای غیرقابل پیش‌بینی بودن کامل آن نیست. مهمترین مشخصه آب دریا، ناهمگن بودن آن است و در تقسیم‌بندی کلی می‌توان ناهمگونی‌های آن را به دو دسته منظم و تصادفی تقسیم کرد. تغییرات منظم سرعت صوت در لایه‌های مختلف آب منجر به شکل‌گیری کانال‌هایی صوتی می‌شود که موجب انتشار صوت تا فواصل بسیار طولانی می‌شوند و ناهمگونی‌های تصادفی باعث پراکندگی امواج صوتی و نوسان‌هایی در میدان صوتی می‌شوند. از این رو در این جا به عنوان مقدمه و در اساسی‌ترین گام، به معرفی نمایه سرعت صوت در خلیج فارس می‌پردازیم. در بخش دوم، شکل اصلاح شده رابطه مدوین^۱، را که بعداً معرفی خواهد شد، از نظر انطباق با داده‌های اندازه‌گیری شده در خلیج فارس ارائه می‌کنیم. در بخش سوم مدل در نظر گرفته شده برای کانال معرفی می‌شود. در بخش چهارم بلوک دیاگرام فرستنده توضیح داده شده و در بخش پنجم بلوک دیاگرام گیرنده و عملکرد آن معرفی می‌شود. در پایان و در بخش ششم نتایج شبیه‌سازی فرستنده، کانال و گیرنده در خلیج فارس آورده شده است.

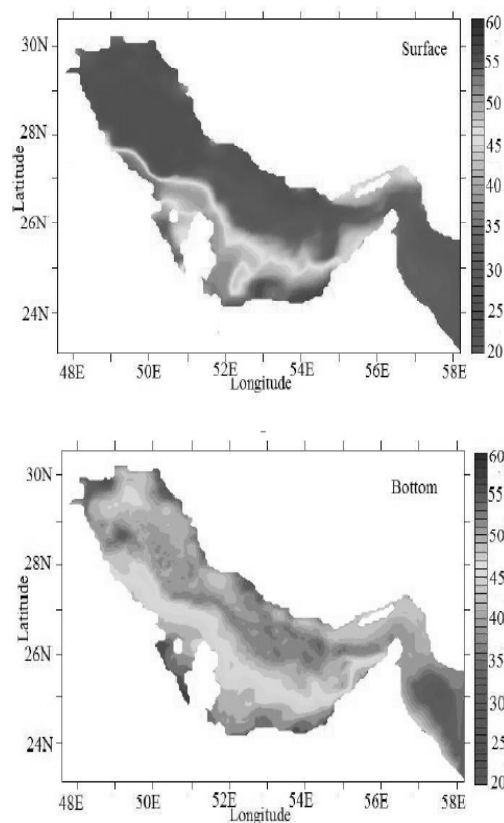
همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، خلیج فارس در بیشتر نواحی، به جز نواحی شرقی، کم‌عمق محسوب می‌شود. براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده بیشترین مقدار سرعت صوت برابر 1560 m/s [۱] و مربوط به نواحی جنوبی آن است. همچنین مطابق شکل (۳) تغییرات سرعت در نواحی شمالی و شمال‌غربی و در همسایگی

1. Medwin

۲- اصلاح رابطه مدوین به منظور تطبیق با داده‌های تجربی خلیج فارس

در این قسمت بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، رابطه مدوین را (برای سرعت صوت) [۳] به گونه‌ای اصلاح می‌کنیم که با دقت خوبی بر نمایه سرعت اندازه‌گیری شده در خلیج فارس منطبق باشد. در شکل (۴) نمایه سرعت صوت برحسب عمق در منطقه تنگه هرمز با طول جغرافیایی ۵۶/۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۵/۴ درجه شمالی در شرایطی که عمق آب برابر ۸۰ متر و عمق دستگاه اندازه‌گیری ADCP متعلق به زیردریایی NOAA، برابر ۱۰ متر بوده، نشان داده شده است.

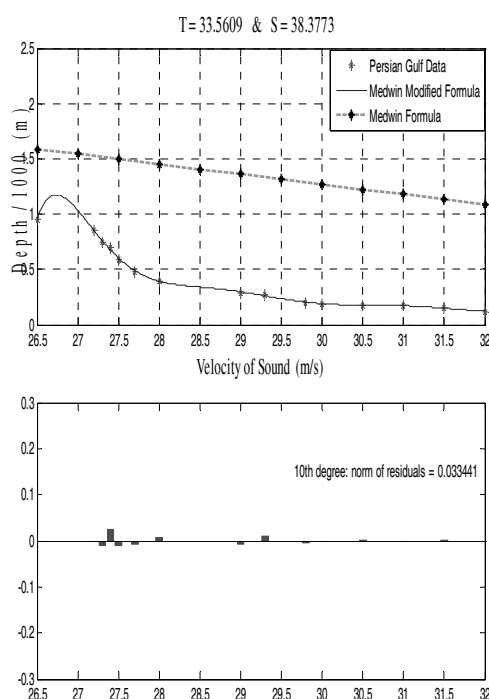
سطح متغیر است. این نواحی عمق متوسطی دارند (۴۰ تا ۱۰۰ متر) و در آنها سرعت صوت بیشتر متأثر از دو پارامتر دما و شوری آب است. در نواحی مربوط به کشورهای قطر و بحرین عمق آب بسیار کم بوده و لذا شوری آب بیشتر از دما بر افزایش یا کاهش سرعت تأثیر می‌گذارد [۲]. در منطقه تنگه هرمز و در همسایگی عراق و کویت سرعت در کف بیشتر از سطح است که علت آن شوری بیش از اندازه آب (۴۰ ppt) است. با حرکت از تنگه هرمز به سمت نوار غربی، سرعت صوت نسبت به عمق کم‌کم کاهش می‌یابد.



شکل ۴ نمایه سرعت صوت در منطقه تنگه هرمز.

محور افقی اختلاف سرعت صوت اندازه‌گیری شده را با 1500 m/s نشان می‌دهد. محور عمودی تغییرات عمق در مقیاس کیلومتر است [۳].

شکل ۳ سرعت صوت در نواحی مختلف خلیج فارس در فصل تابستان. در این شکل مقدار 1500 m/s از سرعت صوت کم شده است [۲].



شکل ۵ مقایسه خروجی رابطه مدوین و شکل اصلاح شده آن با داده‌های اندازه‌گیری شده همراه با خطای تخمین در هر نقطه از نمایه سرعت صوت در تنگه هرمز.

محور افقی اختلاف سرعت صوت را با عدد ۱۵۰۰ m/s نشان می‌دهد. محور عمودی تغییرات عمق آب در مقیاس کیلومتر است. در نمودار میله‌ای، میزان خطا برحسب درصد نشان داده شده است.

۳- مدل‌سازی کانال

در مدل‌سازی کانال، تضعیف ناشی از جذب فرکانسی، نویزهای محیطی و اتلاف ناشی از پراکندگی موج در سطح و کف، با توجه به مدل‌هایی که در ادامه توضیح خواهیم داد در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی پدیده چندمسیری بر مبنای روش شعاعی و تئوری تصویر انجام می‌شود.

چگونگی تغییر سرعت صوت برحسب شوری و دما در رابطه مدوین، در رابطه (۱) آورده شده است. با توجه به میزان شوری آب (S) و دمای اندازه‌گیری شده (T) در آزمایشها برای نمایه ترسیم شده در شکل (۴)، مقداری که به‌ازای مقادیر فوق، یعنی دمای $33/5609^{\circ}\text{C}$ و شوری ۳۸/۳۷۷۳ ppt از رابطه (۱) به‌دست می‌آید نیز در محدوده ۱۵۰۰ m/s تا ۱۵۰۱ m/s قرار دارد:

$$C = 1449.2 + 4.7T + 0.056T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.07T)(S - 35) \quad (1)$$

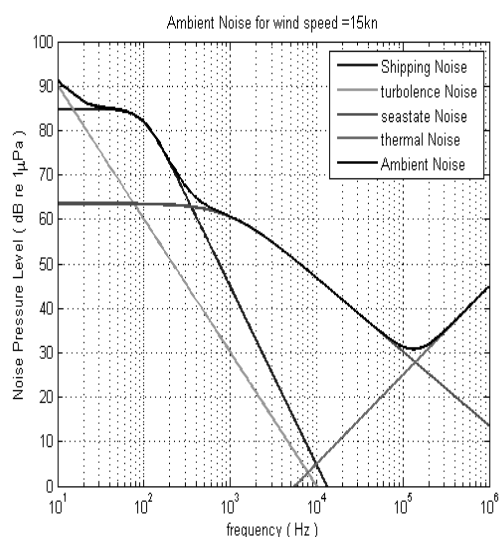
اما وابستگی سرعت صوت به عمق (D) در رابطه مدوین که به‌صورت $C = 0.016 D$ است، در شرایط یکسان شوری آب و دما، منطبق با داده‌های اندازه‌گیری شده نیست و این در شکل (۵) نمایان است. رابطه (۲) شکل اصلاح شده رابطه مدوین است که در آن وابستگی سرعت صوت با شوری آب و دما کاملاً مطابق با رابطه مدوین بوده اما تغییرات سرعت نسبت به عمق را با یک چندجمله‌ای از مرتبه ۱۰ تخمین زده‌ایم تا مقداری که برای سرعت صوت به‌دست می‌آید با داده‌های اندازه‌گیری شده منطبق باشد.

$$C = 1449.2 + 4.7T + 0.056T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.07T)(S - 35) - 8.28 \times 10^{-6} D^{10} - 0.0024 D^9 + 0.31 D^8 - 0.24 D^7 + 1.2 \times 10^{-3} D^6 - 4.2 \times 10^{-4} D^5 + 1.0^{-6} D^4 - 1.6 \times 10^{-7} D^3 + 1.1 \times 10^{-9} D + 3.1 \times 10^{-9} \quad (2)$$

در شکل (۵) نمایه به‌دست آمده از رابطه مدوین، رابطه اصلاح شده مدوین و همچنین داده‌های واقعی ترسیم شده است، همچنین خطای تخمین در هریک از نقاط آورده شده که تا حد خوبی (خطای ۳٪) قابل قبول است.

نویز محیطی را که در شبیه سازی کانال از آن استفاده شده بیان می کند:

$$NL = 10 \log_{10} \left(10^{NL_{traffic}} + 10^{NL_{turbulence}} + 10^{NL_{seastate}} + 10^{NL_{thermal}} \right) \quad (3)$$



شکل ۷ فشار آکوستیکی ایجاد شده توسط عوامل مختلف به وجود آورنده نویز محیطی.

داده ها در فرکانس های مختلف توسط دستگاه اندازه گیری ADCP، متعلق به زیردریایی NOAA اندازه گیری شده است. [۳]

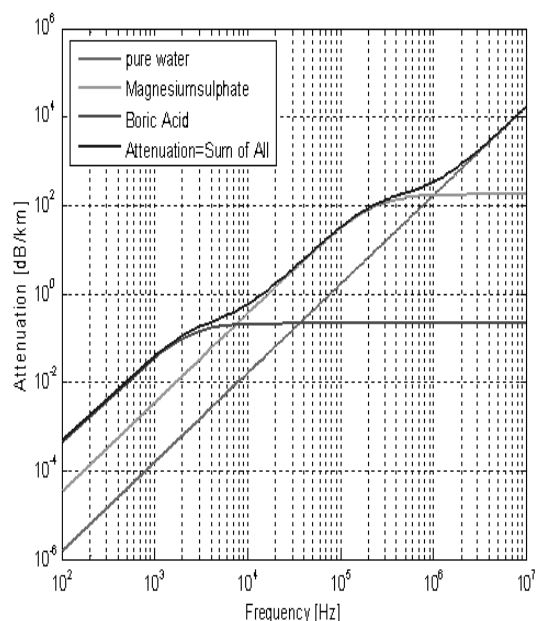
۳-۳- مدل سازی پراکندگی موج در سطح و بازتاب از کف

برای محاسبه اتلاف ناشی از پراکندگی موج در سطح، از تابع چگالی احتمال توزیع گوسی متغیر جابه جایی سطح استفاده کرده ایم [۵]، در شبیه سازی، میانگین ضریب بازتاب سطح از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$R_{Gauss} = Re^{-2(kh)^2 \cos^2 \varphi} \quad (4)$$

۳-۱- مدل سازی اتلاف

با توجه به نتایج به دست آمده از اندازه گیری ها [۳]، تضعیف ناشی از اثر جذبی اسید بوریک، سولفات منیزیم و آب خالص را در نظر گرفته ایم و اتلاف کل، مجموع اتلاف ناشی از این سه ماده است. نتایج اندازه گیری ها و نمودار به دست آمده برای هریک از مواد و اتلاف کل در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل ۶ اتلاف ناشی از اثر جذب فرکانسی مواد

داده ها در فرکانس های مختلف، توسط دستگاه اندازه گیری ADCP متعلق به زیردریایی NOAA اندازه گیری شده است. [۳]

۳-۲- مدل سازی نویز

مدلی که برای نویز در نظر گرفته شده ترکیبی از نویزهای حرارتی، نویز وضعیت دریا، نویز کشتیرانی و نویز ناشی از اغتشاشها است [۴]، رابطه (۳) شکل کلی

موجی دریافتی در یکی از چهار حالت بالا به گیرنده

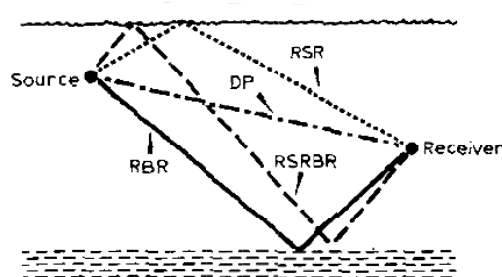
می‌رسد: Refracted Bottom – Direct Path (DP)
Refracted Surface Reflected Reflected (RBR)-
(RSR)- Refracted Surface Reflected Bottom
Reflected (RSRBR)

در روش تصویر، مطابق شکل (۹)، سطح و کف مانند دو آینه در نظر گرفته می‌شوند، به طوری که در مختصات استوانه‌ای برای کانالی که عمق آن برابر D است، سطح آب در $z=0$ و کف آب در $z=D$ قرار دارند. فرض کنید فرستنده در مختصات $(0, z_s)$ و گیرنده در مختصات (r, z) باشند. در این صورت اولین تصویر فرستنده در مختصات $(0, -z_s)$ تشکیل می‌شود. فرستنده و این تصویر، نسبت به کف به ترتیب در مکان‌های $(0, z_s + 2D)$ و $(0, z_s - 2D)$ دومین و سومین تصویر را به وجود خواهند آورد. در حالت کلی تعداد تصاویر یا همان منابع مجازی فرستنده برابر بی نهایت بوده و در هر تکرار تصاویر، چهار تصویر جدید به وجود می‌آید که هر یک متناسب با یکی از چهار شعاع ویژه خواهند بود. مطابق این نظریه می‌توان میدان فشار صوتی را در حالت کلی با رابطه (۵) بیان کرد [۶] تا [۸]. در این رابطه، A دامنه موج صوتی، $\widehat{R}_1$ و $\widehat{R}_2$ به ترتیب ضرایب بازتاب از سطح و کف، ϕ_{m1} و ... و ϕ_{m4} زوایای بازتاب چهار شعاع ویژه، K عدد موج و $L_{m1}, L_{m2}, L_{m3}, L_{m4}$ به ترتیب طول بردارهای جابه‌جایی مربوط به شعاع‌های ویژه RSRBR, RBR, RSR, DP در مرتبه $m+1$ ام از مرحله تولید منابع مجازی است.

که در آن k عدد موج، h مقدار مؤثر ارتفاع موج‌های سطحی، ϕ زاویه برخورد نسبت به سطح نرمال و R ضریب بازتاب فشار برای سطح نرمال است. مقدار R را برابر ۱- در نظر گرفته‌ایم و پارامتر h از چگالی طیف متغیر جابه‌جایی سطح آب که معروفترین آن طیف Neumann-Pierson است به دست می‌آید [۵] و [۶] و ما در شبیه‌سازی از آن استفاده کرده‌ایم. برای محاسبه ضریب بازتاب موج در کف آب از الگوی Jackson در انتخاب جنس کف آب [۵] و [۶]، که با توجه به شرایط تنگه هرمز در شبیه‌سازی است و همچنین مدل Hamilton & Backman استفاده کرده‌ایم [۵] و [۶].

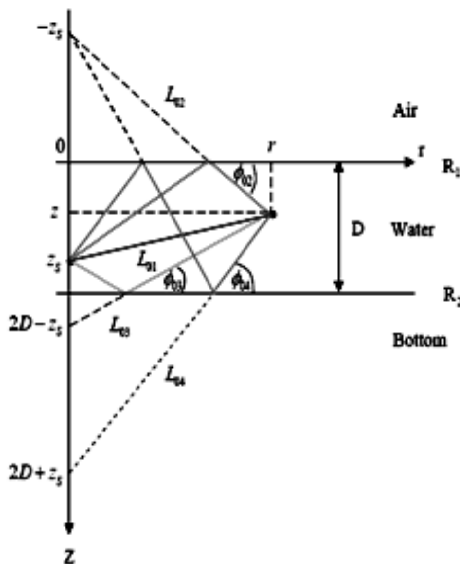
۳-۴- مدل سازی پدیده چندمسیری

تعداد مسیرهای کانال در شبیه‌سازی انجام شده، متغیر بوده و مضربی از چهار است. در مدلی که برای انتشار امواج از فرستنده به گیرنده - پس از برخوردهای متوالی با سطح و کف - در نظر گرفته‌ایم از چهار شعاع ویژه که در شکل (۸) مشخص شده استفاده کرده‌ایم. موجی که از سوی فرستنده ارسال می‌گردد یا یکی از این چهار شعاع ویژه است یا مضارب دیگر آنها که پس از انعکاسهای متوالی، با یکی از چهار حالت مشخص شده در شکل (۸) به گیرنده می‌رسند.



شکل ۸ چهار شعاع ویژه مورد استفاده در شبیه‌سازی [۷]

$$P(r, z, \omega) = A(\omega) \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} & \hat{R}_1^m(\varphi_{m_1}, \omega) \hat{R}_2^m(\varphi_{m_2}, \omega) \frac{e^{-jkL_{m_1}}}{L_{m_1}} \\ & + \hat{R}_1^{m+1}(\varphi_{m_1}, \omega) \hat{R}_2^m(\varphi_{m_2}, \omega) \frac{e^{-jkL_{m_2}}}{L_{m_2}} \\ & + \hat{R}_1^m(\varphi_{m_1}, \omega) \hat{R}_2^{m+1}(\varphi_{m_2}, \omega) \frac{e^{-jkL_{m_3}}}{L_{m_3}} \\ & + \hat{R}_1^{m+1}(\varphi_{m_1}, \omega) \hat{R}_2^{m+1}(\varphi_{m_2}, \omega) \frac{e^{-jkL_{m_4}}}{L_{m_4}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$



شکل ۹ شماتیک هندسی فرستنده و سه تصویر نخست آن در تئوری تصویر برای یک کانال همگن

۴- فرستنده

تحقیقات انجام شده و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از مدولاسیون‌های همدوس نظیر QAM^1 و PSK^2 به منظور افزایش بازدهی پهنای باند، بهترین نتیجه را در کاربردهای زیرسطحی به دست می‌دهد [۹] تا [۱۲]. با توجه

با توجه به موقعیت مکانی تصاویر ایجاد شده در مرحله m ام، طول بردارهای جابجایی مسیرهای انتشار از رابطه زیر به دست می‌آید [۶] تا [۸]:

$$\begin{aligned} L_{m_1} &= \sqrt{r^2 + (2Dm - z_s + z)^2} \\ L_{m_2} &= \sqrt{r^2 + (2Dm + z_s + z)^2} \\ L_{m_3} &= \sqrt{r^2 + (2D(m+1) - z_s - z)^2} \\ L_{m_4} &= \sqrt{r^2 + (2D(m+1) + z_s - z)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

در این شبیه‌سازی، هریک از ضرایب بازتاب از کف و سطح مطابق الگوی معرفی شده در بخش (۳-۳) محاسبه می‌شود. در مورد کانال خلیج فارس با در نظر گرفتن $m=1$ یعنی هشت مسیر، که در بخش نتایج شبیه‌سازی نشان داده خواهد شد، به این نتیجه رسیدیم که از مسیر ششم به بعد، با توجه به تضعیف شدیدی که بر موج ارسالی اعمال می‌شود، سیگنالی دریافت نمی‌شود. لذا در نظر گرفتن الگوی کانال پنج مسیره برای این مکان مناسب به نظر می‌رسد.

1. Quadrature Amplitude Modulation
2. Phase Shift Keying

هدف از این کار آن است که با آشکارشدن آن درگیرنده، تخمین فاز و سنکرون‌سازی امکان پذیر شود.

۴-۲- نگاشت سمبل‌های QPSK

بیت‌های اطلاعات با استفاده از کدگری به سمبل‌های QPSK معادل نگاشته می‌شوند. مطابق شکل (۱۳) هر سمبل QPSK عددی مختلط به صورت $d_I + jd_Q$ است که در آن مؤلفه‌های حقیقی و موهومی به ترتیب خروجی کانال‌های هم‌فاز و تربیعی در مبدل سریال به موازی دنباله اطلاعات ارسالی است.

۴-۳- شکل‌دهی پالس

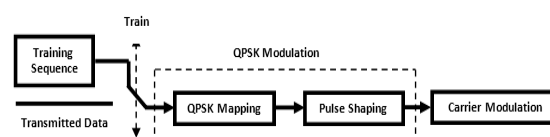
برای جلوگیری از اثر مخرب لوب‌های فرعی و صرفه‌جویی در پهنای باند، به‌جای پالس مستطیلی، اطلاعات را توسط پالس‌های شکل یافته ارسال می‌کنیم [۱۳]. برای این منظور سمبل‌های QPSK حاصل، از فیلتر شکلهی پالس عبور می‌کنند تا شکل مستطیلی به شکل کسینوسی با ریشه افزایش یافته^۲ تبدیل شود. پاسخ ضربه فیلتری که این کار را انجام می‌دهد به شکل رابطه زیر است [۱۳] و [۱۴].

(۷)

$$\Psi_T(t) = \epsilon\beta \frac{\cos[\frac{(1+\beta)\pi t}{T}] + \sin[\frac{(1-\beta)\pi t}{T}](\epsilon\beta/T)^{-1}}{\pi\sqrt{T} \left[1 - \epsilon\beta^2 t^2/T^2\right]}$$

شکل (۱۱) پاسخ ضربه مزبور را نشان می‌دهد که در آن $T = 4 \times 10^{-4} \text{ sec}$ مدت زمان ارسال سیگنال و $\beta = 0.6$ ضریب کنترل‌کننده شکل و پهنای باند سیگنال است.

به روشی که برای سنکرون‌کردن حامل‌ها به‌کار می‌رود، سیستم‌های وابسته به فاز به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- همبسته تفاضلی ۲- کاملاً فاز همبسته. نتایج استفاده از کدگذاری PSK تفاضلی با آشکارسازی همبستگی تفاضلی آن است که آشکارسازی حامل بسیار ساده می‌شود، اما در مقایسه با آشکارسازی کاملاً فاز همبسته بازدهی کمتری دارد. بسیاری از سیستم‌هایی که از مدولاسیون^۱ DPSK استفاده می‌کنند، این سیستم را برای غلبه بر مشکل آشکارسازی فاز سیگنال حامل در اعماق زیاد و انتشار عمودی که در آنها اثر چندمسیری بسیار کم است به‌کار می‌برند [۱۲]. در این مقاله برای مقابله با پدیده چندمسیری و تداخل بین سمبل‌ها از مدولاسیون QPSK که کاملاً فاز همبسته است استفاده کرده‌ایم. بلوک دیگرام فرستنده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. فرستنده شامل بلوک‌هایی برای تولید دنباله آموزشی، تولید سمبل‌های QPSK و شکلهی پالس است که این دو در کنار هم به‌عنوان بخش مدولاسیون QPSK در شکل مشخص شده است. بلوک مدولاسیون حامل عمل شیفت فرکانسی را انجام می‌دهد. هریک از بلوک‌ها را توضیح خواهیم داد.



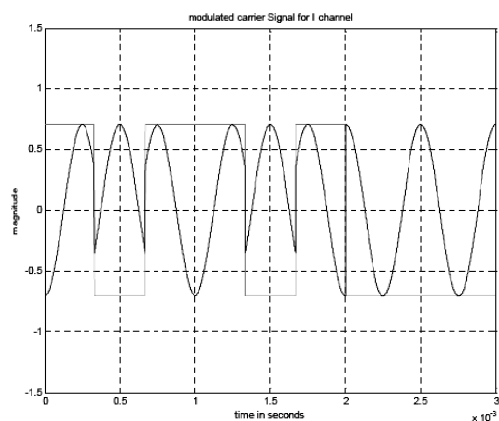
شکل ۱۰ بلوک دیگرام فرستنده

۴-۱- دنباله آموزشی

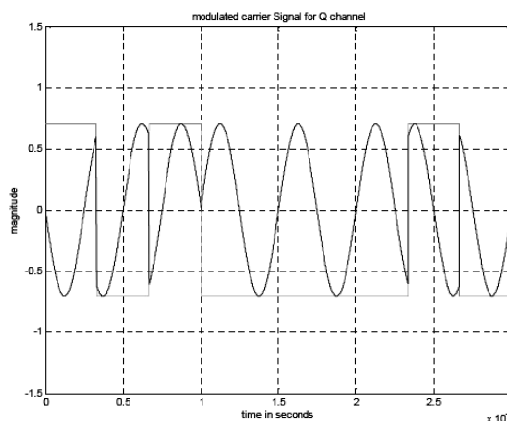
در هر بار ارسال بسته‌های اطلاعاتی، قبل از مدولاسیون، دنباله آموزشی که ۱۰٪ ابتدای دنباله ارسالی را به خود اختصاص می‌دهد با دنباله اطلاعات ترکیب می‌شود.

2. Root Raised Cosine

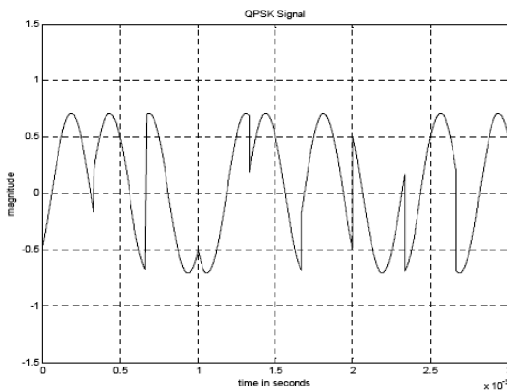
1. Differentially PSK



(الف)



(ب)

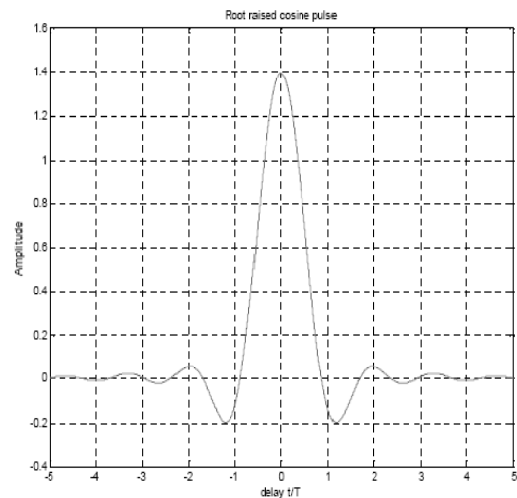


(ج)

شکل ۱۲ الف) شکل سیگنال مدوله شده در کانال I (ب)

شکل سیگنال مدوله شده در کانال Q (ج) شکل

سیگنال QPSK



شکل ۱۱ پاسخ ضربه فیلتر شکل دهی پالس

۴-۴- افزایش فرکانس

افزایش فرکانس و تبدیل سیگنال باندپایه به باند میانی با ضرب در $e^{j2\pi f_c t}$ انجام می‌شود. فرکانس سیگنال حامل است که متناسب با پهنای باند کانال انتخاب می‌شود و در این شبیه‌سازی برابر ۲۷kHz است. سیگنال باند میانی ارسال شده بر روی کانال در مدت زمان ارسال هر سمبل از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$S(t) = \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)] \quad (۸)$$

که در آن $0 \leq t \leq T$ و $\varphi(t)$ مقداری ثابت برای هر جفت بیت از داده ورودی فرض شده و فاز آن به ترتیب برای جفت بیت (۰۰) برابر $\frac{\pi}{4}$ ، (۰۱) برابر $\frac{3\pi}{4}$ ، (۱۱)

برابر $\frac{5\pi}{4}$ و (۱۰) برابر $\frac{7\pi}{4}$ است. در شکل (۱۲) برای

دنباله فرضی ۰۰۱۱۰۰۰۱۱۱۰۱۱۱۰۱۱ در کانال‌های I، Q و سمبل‌های QPSK نهایی، نشان داده شده است.

۵- گیرنده

شکل (۱۳) بلوک دیاگرام گیرنده را نشان می‌دهد.

۵-۱- فیلتر باند میانی

این بلوک فیلتر میان‌گذری با فرکانس مرکزی برابر فرکانس حامل یعنی $f_c = 27 \text{ kHz}$ و پهنای باند آن برابر 5 kHz است.

۵-۲- کاهش فرکانس

این بلوک سیگنال باند میانی را دریافت و با ضرب آن در $e^{-j2\pi f_c t}$ سیگنال باند پایه یا مختلط را تولید می‌کند.

۵-۳- فیلتر منطبق، همزمان‌سازی، نمونه‌برداری

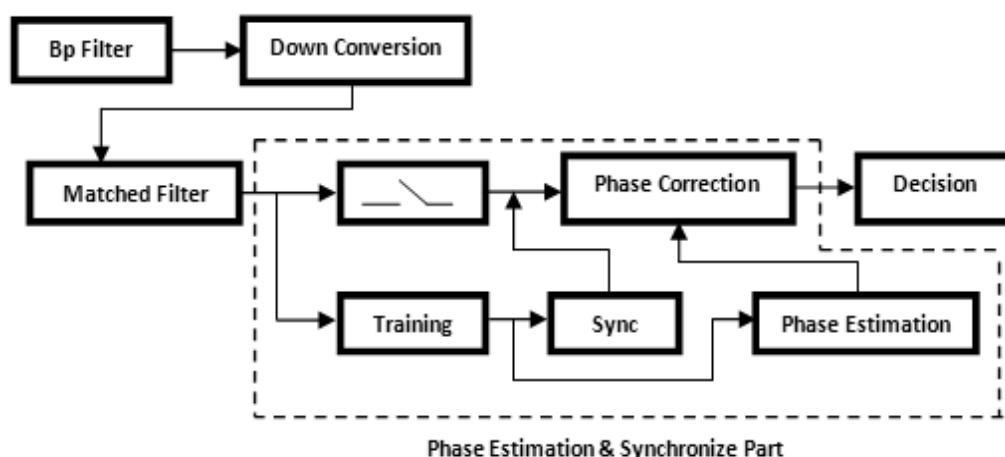
الگوریتم همزمان‌سازی در عملکرد سیستم بسیار مهم است. وظیفه بلوک همزمان‌ساز آن است که بهترین زمان نمونه‌برداری را برای نمونه‌بردار تعیین کند.

در حالت ایدئال باید از فیلتر منطقی استفاده شود تا نرخ سیگنال به نویز برای متغیر تصمیم‌گیری به

مقدار بیشینه برسد [۱۳] و [۱۴]. برای پالس مثلثی بهترین زمان نمونه‌برداری (T_{samp}) مطابق شکل (۱۴) در نقطه حداکثر مثلث‌ها در حال خروج از فیلتر منطبق است که این در شکل با پیکانهایی کوچک نشان داده شده. الگوریتم همزمان‌سازی استفاده شده در این شبیه‌سازی بر پایه دنباله آموزشی مختلط عمل می‌کند. یک راه برای بازیابی مناسب سمبل آن است که همبستگی متقابل میان دنباله آموزشی و نمونه‌های با مقادیر مختلط در خروجی فیلتر منطبق محاسبه شود. اگر $\{C(n)\}_{n=0}^{L-1}$ نسخه مشابه دنباله آموزشی در گیرنده و $r(n)$ خروجی فیلتر منطبق باشد، زمان نمونه‌برداری را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۱۴]:

(۹)

$$t_{\text{samp}} = \arg(\max | \sum_{k=0}^{L-1} r(kQ + t_{\text{samp}}) * c(k) |)$$



شکل ۱۳ بلوک دیاگرام گیرنده

همچنین اگر $\{\tilde{r}(n)\}_{n=0}^{L-1}$ نشان دهنده L سمبل برداری QPSK دریافتی (یعنی سیگنال دریافتی پس از کاهش نمونه ها) در طول دنباله آموزشی باشد و $\{C(n)\}_{n=0}^{L-1}$ نسخه مشابه دنباله آموزشی مختلط باشد، ϕ از رابطه زیر به دست می آید [۱۳] و [۱۴]:

$$\hat{\phi} = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \arg(\tilde{r}(k) c(k)^*) \quad (11)$$

۵-۵- تصمیم گیری

بلوک تصمیم گیری، نوعی تصمیم گیرنده حد آستانه ای است که به ترتیب کانال های I و Q را با سطح آستانه صفر مقایسه می کند. اگر متغیر تصمیم گیری بزرگتر از صفر باشد صفر منطقی انتخاب می شود و اگر کمتر از صفر باشد، یک منطقی انتخاب می شود.

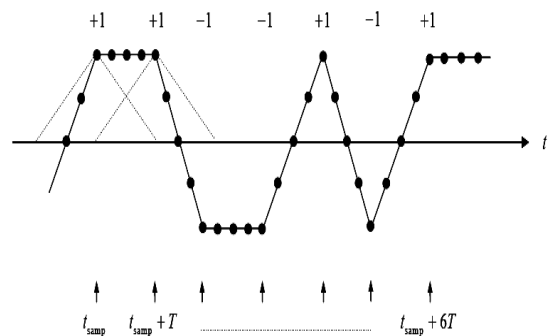
۶- نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج به دست آمده از کانالی که نمایه سرعت آن در شکل (۴) آورده شد، برای فرستنده و گیرنده ای که در دو بخش قبل توضیح داده شد ارائه می شود.

۶-۱- نتایج شبیه سازی فرستنده

در شکل (۱۵) وضعیت سمبل های QPSK و چگالی طیف توان سیگنال باند میانی که فرکانس حامل آن برابر ۲۷ kHz است، قبل از ارسال بر روی کانال نشان داده شده است.

تعداد سمبل های خروجی فیلتر منطبق، با نرخ نمونه برداری $1/Q$ کاهش می یابد. یعنی فقط سمبل های مضرب Q در دنباله خروجی نگاه داشته می شوند. این نکته در شکل (۱۴) با پیکان هایی که زمان نمونه برداری مناسب را پیشنهاد می کنند نشان داده شده است و این زمان نمونه برداری از طریق عملیات سنکرون سازی کنترل می شود.



شکل ۱۴ نمونه های خروجی فیلتر منطبق

۵-۴- تخمین و تصحیح فاز

الگوریتم تخمین فاز استفاده شده در این شبیه سازی بدین ترتیب کار می کند که اگر نمونه های انتخاب شده در خروجی فیلتر منطبق را با رابطه زیر نشان دهیم:

$$\dots, e^{j(\phi_{n-1} + \ell)}, e^{j(\phi_n + \ell)}, e^{j(\phi_{n+1} + \ell)}, e^{j(\phi_{n+2} + \ell)}, \dots \quad (10)$$

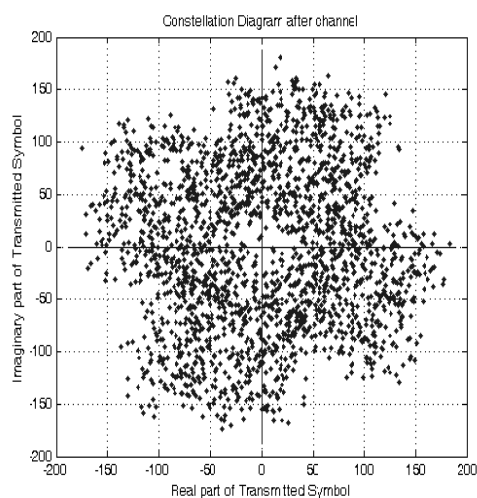
که $\phi_n \in \{\pm\pi/4, \pm 3\pi/4\}$ فاز اطلاعات نمونه n ام و ℓ فاز مجهول به وجود آمده توسط کانال است.

روش شعاعی و تئوری تصاویر انجام می‌شود، لذا تعداد مسیرهای کانال می‌تواند متغیر باشد. مدلی که برای نویز در نظر گرفته‌ایم، با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در منطقه خلیج فارس، مدل نویز محیطی است که با سیگنال جمع می‌شود. مشخصات کانالی که شبیه‌سازی شده مطابق جدول (۱) است.

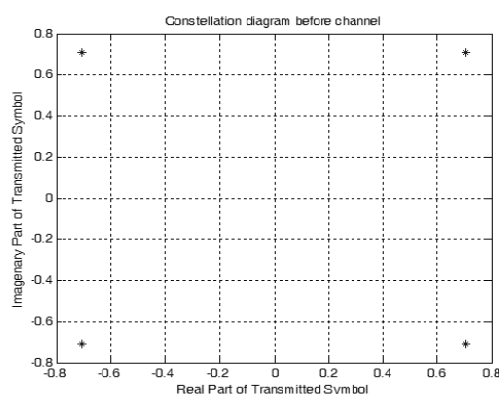
جدول ۱ مشخصات کانال براساس اندازه‌گیری‌ها در تنگه هرمز (ماه آگوست، سال ۲۰۰۷) طول جغرافیایی: ۵۹/۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی: ۲۴/۶ درجه شمالی، عمق متوسط کانال: ۸۰ متر و عمق دستگاه اندازه‌گیری ADCP متعلق به زیردریایی NOAA: ۳۵ متر.

پارامتر	اندازه
عمق متوسط	۸۰ متر
برد	۱۰۰۰ متر
عمق فرستنده	۸ متر
عمق گیرنده	۵۰ متر
فرکانس حامل	۲۷ کیلوهرتز
پهنای باند	۵ کیلوهرتز

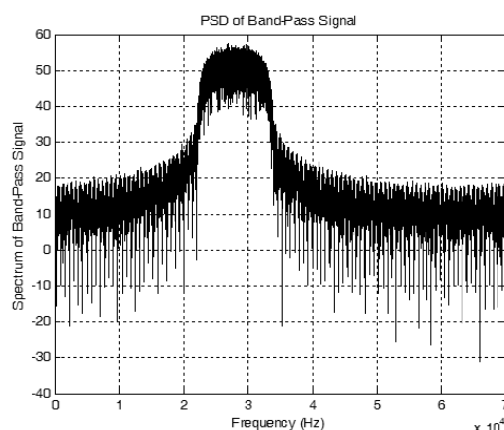
وضعیت سمبل‌های QPSK پس از ورود به کانال فیدینگ مطابق شکل (۱۶) به‌دست آمده که isi در آن بسیار زیاد است.



شکل ۱۶ تداخل بین سمبل‌های QPSK پس از عبور از کانال



(الف)

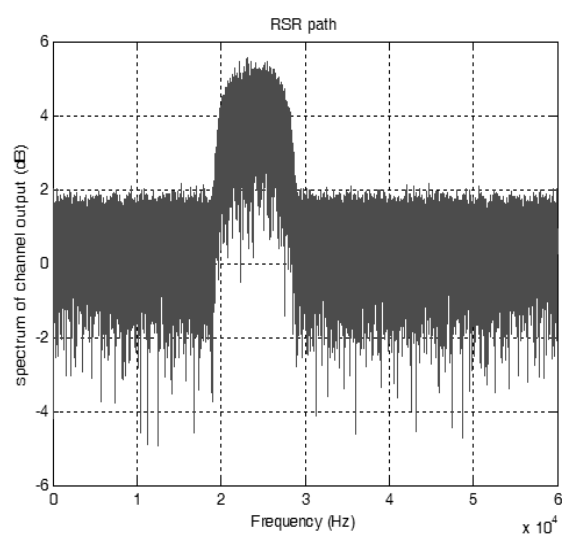


(ب)

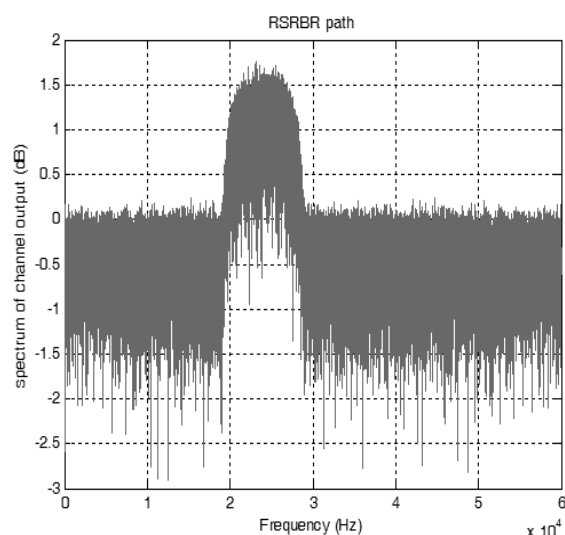
شکل ۱۵ (الف) وضعیت سمبل‌ها قبل از ورود به کانال (ب) چگالی طیف توان سیگنال باند میانی قبل از ورود به کانال

۶-۲ نتایج شبیه‌سازی در کانال خلیج فارس

در مدل‌سازی کانال، اتلاف ناشی از گسترش هندسی موج و تضعیف ناشی از جذب فرکانسی را در نظر گرفته‌ایم. همچنین مدل‌سازی پراکندگی موج در سطح و اتلاف ناشی از آن بر مبنای الگوی Neumann-Pierson و چگونگی بازتاب موج از کف با توجه به نوع آن، بر اساس مدل Hamilton & Backman در نظر گرفته شد. از آنجا که مدل‌سازی ریاضی پدیده چندمسیری بر مبنای



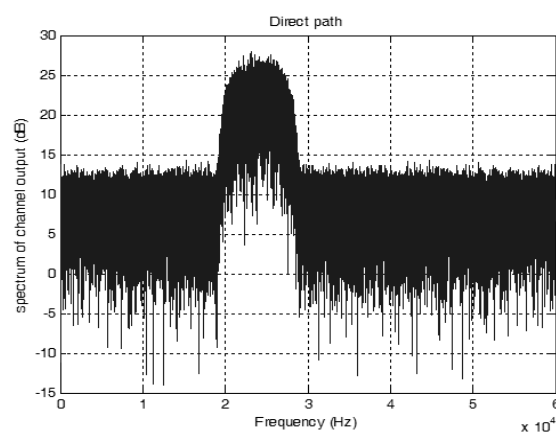
(ج)



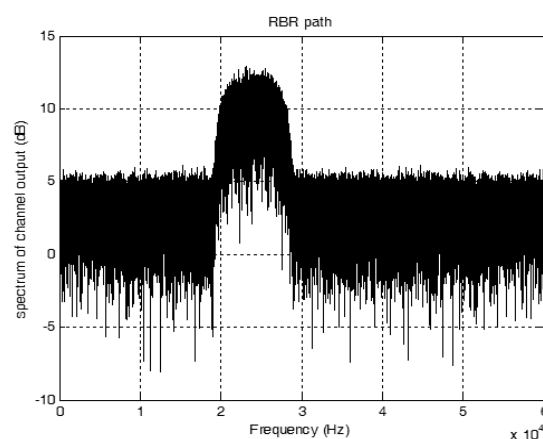
(د)

شکل ۱۷ الف) چگالی طیف توان در مسیر DP ب) چگالی طیف توان در مسیر RBR ج) چگالی طیف توان در مسیر RSR د) چگالی طیف توان در مسیر RSRBR

در شکل (۱۷) چگالی طیف توان سیگنال ارسالی بر روی کانال در هریک از چهار مسیر ویژه نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار داشتیم در مسیر RSRBR سیگنال بیشترین تضعیف را داشته و سطح توان در این مسیر در مقایسه با مسیر مستقیم به اندازه ۲۳dB افت داشته است. به همین ترتیب امواج دریافتی در خروجی کانال در هریک از هشت مسیری که در ابتدای شبیه‌سازی تعیین شده ($m=2$)، در شکل (۱۵) نشان داده شده است، ملاحظه می‌شود که از مسیر ششم به بعد سیگنال به شدت تضعیف شده و در عمل سیگنالی دریافت نمی‌شود. لذا در نظر گرفتن مدل پنج مسیره برای این ناحیه مناسب است.

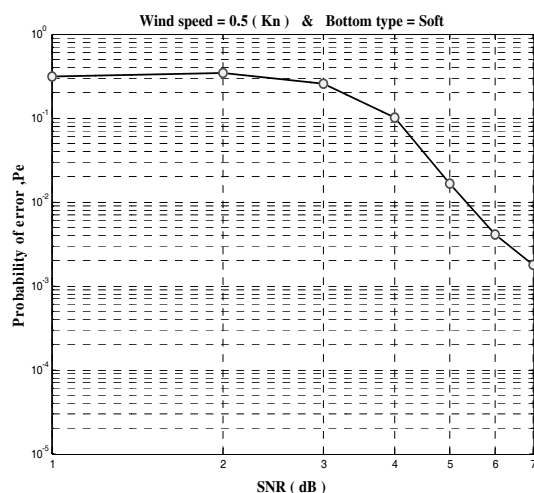


(الف)

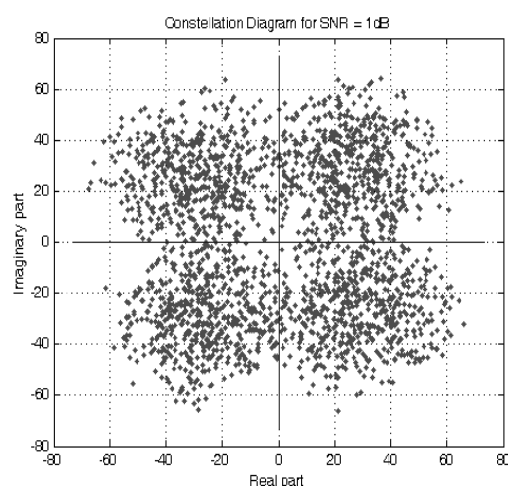


(ب)

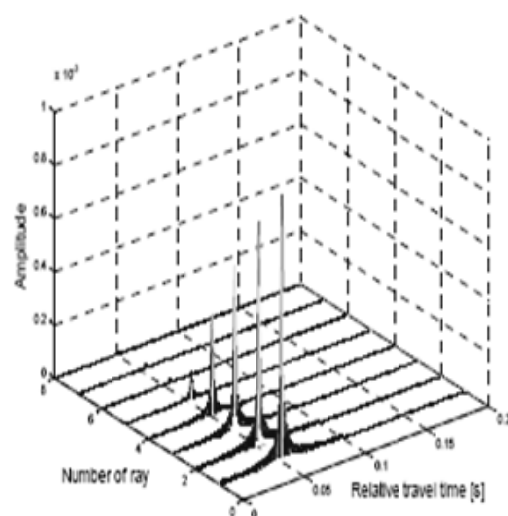
در شرایطی مطابق جدول (۱)، استفاده از چنین فرستنده و گیرنده ای می‌تواند مفید باشد. اما در نسبت‌های کمتر سیگنال به نویز، مثلاً ۴dB یا پایین‌تر، استفاده از همسان‌ساز در گیرنده، به‌منظور مقابله با تداخل میان سمبل‌ها - ناشی از کم‌عمق بودن کانال - ضروری است.



شکل ۱۹ احتمال خطای سمبل‌ها برحسب نسبت سیگنال به نویز در شرایطی که سرعت باد ۲ m/s و نوع کف نرم است.



شکل ۲۰ وضعیت سمبل‌های آشکار شده در گیرنده در حالی که نسبت سیگنال به نویز برابر ۱dB باشد.



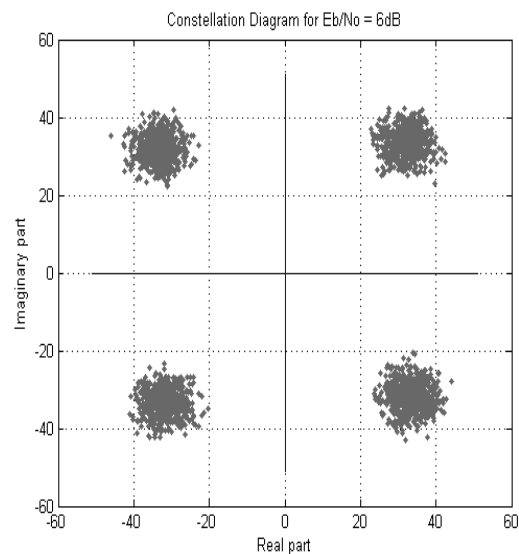
شکل ۱۸ سیگنال‌های دریافتی از مسیرهای مختلف کانال. در این مدل، کانال هشت مسیره بوده و در مسیرهای ششم تا هشتم هیچ سیگنالی دریافت نمی‌شود. اولین سیگنال مربوط به مسیر مستقیم بوده و تأخیر سایر مسیرها نسبت به زمان دریافت این مسیر سنجیده می‌شود.

۶-۳- نتایج شبیه‌سازی گیرنده

در شکل (۱۹) احتمال خطای دریافت نمونه‌ها برای مقادیر مختلف نسبت سیگنال به نویز به‌دست آمده است. لازم است توضیح دهیم که در این شبیه‌سازی تعداد بیت‌های ارسالی در هر بار تکرار برابر ۵۰۰۰ بوده و تعداد دفعات تکرار دنباله آموزشی برای به‌دست آوردن نرخ خطای بیت برای نسبت سیگنال به نویز مشخص برابر ۵۰ مرتبه است. شکل‌های (۲۰) و (۲۱) وضعیت سمبل‌های آشکار شده برای مقادیر مختلف نسبت سیگنال به نویز آورده شده است. از این خروجی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در شرایطی که در طراحی سیستم بتوانیم سطح توان سیگنال را در فرستنده طوری اختیار کنیم که نسبت سیگنال به نویز بیشتر از ۵dB باشد، در چنین کاربردی و

۸- منابع

- [1] M. Sadrinasab, K. Kenarkoohi, "Numerical Modelling of sound Velocity profile in different layers in the Persian Gulf", Asian journal of Applied Sciences, Malaysia, 232- 239, 2009.
- [2] W. E. Johns, F. Yao, D. B. Olson, S. A. Josey, J. P. Grist, and D. A. Smeed, "Observations of seasonal exchange through the Straits of Hormuz and the inferred freshwater budgets of the Persian Gulf," J. Geophys, 210- 219, 2007.
- [۳] عبدالله دوستی عارف، "بررسی محیط انتشار در مخابرات زیرسطحی و شبیه سازی به همراه ارائه یک مدل برای کانال آکوستیکی چندمسیره کم عمق در آب های خلیج فارس" پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر بیژن عباسی آرند، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شهریور ۱۳۸۸، صفحات ۶۶-۴۷.
- [4] R. J. Urick, *Ambient Noise in the Sea*, Peninsula Publishing, California, Third edition, pp. 155-205, 1986.
- [5] L. M. Berkhovskikh and Yu. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Second edition. Springer-Verlog, 2000, pp. 130-155.
- [6] H. Medwin, C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, New York, San Diego, 1989; pp. 220-228.



شکل ۲۱ وضعیت سمبل های آشکار شده در گیرنده در حالی که نسبت سیگنال به نویز برابر ۶dB باشد.

۷- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از اندازه گیری ها در تنگه هرمز و شبیه سازی های این تحقیق بر اساس آنها، رابطه (۲) به عنوان نمایه سرعت صوت در این منطقه ارائه می شود. همچنین در نظر گرفتن مدل کانال پنج مسیره، مطابق الگوهایی که در بخش ۳ ارائه شد، مناسب به نظر می رسد. همچنین در کاربردهایی که توان سیگنال ارسالی در فرستنده به اندازه ای است که نسبت سیگنال به نویز در گیرنده می تواند بیشتر از ۴dB باشد، استفاده از فرستنده و گیرنده ای که از مدولاسیون QPSK با فرکانس حامل ۲۷kHz در پهنای باند ۵kHz استفاده می کند، برای کانال پنج مسیره - که عمق متوسط آن برابر ۸۰ متر و برد آن حداکثر برابر ۱km باشد - در نواحی تنگه هرمز عملکرد قابل قبولی دارد، اما در نسبت های کمتر سیگنال به نویز استفاده از همسان ساز در گیرنده ضروری است.

- Oceanic Engeneering*, OE-19, no.3, pp. 100-114, 1998.
- [11] M. Stojanovic, J. A. Catipovic and J.G.Proakis, "Reduced-complexity multichannel processing of underwater acoustic communication signals," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.98 (2), Pt. 1, pp.961-972, Aug. 2003.
- [12] A. Falahati, B. Woodward and S.C. Bateman.; "Underwater Acoustic Channel Models for 4800 b/s QPSK Signals", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 211-220, 1994.
- [13] J. P. Gomes and V. Barroso, "SDR Underwater Acoustic Modem," Ph.D Thesis, Instituto de Sistemas e Robotica, Lisboa, Portugal, Apr. 2005.
- [14] J.G. Proakis, *Digital Communications*, 3rd Ed, McGraw-Hill, pp. 257-268, 2002.
- [7] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill Book Company, Third editin, pp.140-145, 2000.
- [8] K. C. Hegewisch, N. R. Cerruti and S. Tomsovic, "Ocean acoustic wave propagation and ray method correspondence: internal wave fine structure," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 114, Issue 4, p.2428, Oct.2006.
- [9] M. Stojanovic and J. G. Proakis, "Recent Advances in High Speed Underwater Acoustic Communication," *IEEE Journal of Oceanic Engeneering*, vol.121, no.3, pp. 105-122, July 1996.
- [10] J. G. Proakis, M. Stojanovic and J. Capitovic, "Phase Coherent Digital Communications for Underwater Acoustic Communications," *IEEE Journal of*