

## پیاده سازی یک سیستم مخابراتی آکوستیکی زیر آب و بررسی عملکرد مدولاسیون های دیجیتال در خط انتقال آب

علی (عزیزاله) جمشیدی

دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، jamshidi@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۰

### چکیده

در این مقاله، یک سیستم تبادل داده آکوستیکی درون خط لوله های آبی، پیاده سازی شده است که هدف از آن، ایجاد ارتباط بین دو ایستگاه پمپاژ آب از طریق لوله آبی است. برای تحقق این هدف، شناسایی مشخصات کانال ضروری است که بدین منظور، تخمین کانال با استفاده از سیگنال چیرپ انجام می شود. به وسیله پاسخ فرکانسی، باند فرکانسی مناسب جهت ارسال داده مشخص شده و پاسخ ضربه کانال نیز به چگونگی قاب بندی در فرستنده کمک می کند. به منظور تبادل اطلاعات، مدولاسیون های Q-PSK، CP-FSK و CP-CSK بررسی شده اند. در مدولاسیون Q-PSK از همسان ساز خطی جهت از بین بردن اثرات تداخل کانال استفاده شده است. در آزمایش های عملی، باند فرکانسی (۳۱/۲ - ۱۶/۸) کیلوهرتز و نرخ ارسال اطلاعات ۸۳۰۳ سمبل بر ثانیه بوده است. ارسال و دریافت اطلاعات در کانال آبی از طریق ماژول های پروژکتور و هیدروفون آکوستیکی صورت گرفته شد. تمامی سیگنال های ارسالی و دریافتی توسط نرم افزار MATLAB تولید و پردازش شده اند. نتایج عملی، در یک کانال مشخص با دو دبی مختلف نشان داده شده اند که این نتایج حاکی از آن است که چنین هدفی با امکانات به کار گرفته شده، قابل پیاده سازی است.

### کلیدواژه

طراحی و پیاده سازی، خط لوله آبی، سیستم مخابراتی آکوستیکی، مدولاسیون چیرپ، مدولاسیون دیجیتال.

### مقدمه

عملکرد مدولاسیون های B-PSK و Q-PSK پرداخته اند. در مرجع [۵]، پژوهشگر به منظور برقراری لینک ارسال و دریافت در شبکه ای از لوله های حاوی سیال، ابتدا با الگوریتم های حذف نویز و اکو، سیستم را شناسایی کرده و سپس به انتقال پیام با استفاده از مدولاسیون FSK می پردازد.

در مرجع [۱۱] نویسندگان به بررسی پیاده سازی لینک ارسال اطلاعات در ارتباط با روبات ROV<sup>۱</sup> پرداخته اند که در آن اطلاعات با طی مسافت 1Km و نرخ 10Kbps با استفاده از تکنیک سیگنال چندحامله و مدولاسیون M-FSK و Q-PSK ارسال و دریافت می شود. در واقع علت اصلی نرخ ارسال 10Kbps، عمودی بودن کانال آکوستیکی زیر آبی است. به عبارتی، چون روبات در کف دریا بوده و اطلاعات به سطح آب ارسال می شده است، کانال مخابراتی به صورت عمودی بوده که دارای تداخل بسیار کمتری از کانال افقی است. در قاب بندی سیگنال به ترتیب سیگنال کاوش چیرپ، باند محافظ و اطلاعات باینری قرار دارند. همچنین، نتایج این تحقیق به ما نشان می دهد که شناسایی کانال اهمیت به سزایی دارد.

مبحث مخابرات زیر آب، موضوعی است که به تازگی در طی چند دهه گذشته، تحقیقات پژوهشگران را به خود جلب کرده است. از جمله اهداف دنبال شده در این زمینه می توان به مدل سازی کانال آکوستیکی و پیاده سازی سیستم مخابراتی ارسال و دریافت اطلاعات در آب های آزاد [۱]، کم عمق [۲،۳] و شبکه لوله های آبی با ابعاد محدود [۴،۵] و نفتی [۶]، کشف شکستگی و نشتی در لوله های آبی [۷-۹] اشاره کرد که اساس آن ها پیاده سازی سیستم ارسال و دریافت سیگنال آکوستیکی زیر آبی است. پدیده چند مسیریگی و طنین مواردی هستند که مشکلات متعددی را برای پژوهشگران به وجود آورده بود که در چند دهه گذشته تلاش هایی برای مقابله با آن ها صورت گرفته است [۱۰].

مرجع [۴] از نمونه تحقیقاتی است که در آن نویسندگان تلاش بر پیاده سازی کانال مخابرات دیجیتال کم هزینه و کم مصرف در شبکه ای از خط لوله های آبی با استفاده از حسگرهای پیزوالکتریک داشته اند. آن ها برای تحقق این امر، از سیگنال چیرپ برای پیدا کردن باند فرکانسی بهینه استفاده کردند و سپس به بررسی

1 Remotely Operated underwater Vehicle

دیگری از جمله SNR<sup>۳</sup> و BER<sup>۴</sup> نیز موثر هستند که در بخش نتایج به تاثیر نوع مدولاسیون پرداخته‌ایم.

سپس پاسخ فرکانسی از طریق تبدیل فوریه پاسخ ضربه کانال محاسبه می‌شود. هدف از بدست آوردن پاسخ فرکانسی این است که بتوانیم باند فرکانسی بهینه جهت ارسال اطلاعات را بدست آوریم. سپس با اعمال مدولاسیون‌های مختلف در این باند به بررسی کارکرد آن‌ها در لوله‌های حاوی سیال می‌پردازیم. در انتها، نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ارسال و دریافت پیام می‌تواند در باند فرکانسی مورد نظر با نرخ ارسال بیت و باند محافظ مشخص برای خانواده‌های مدولاسیون مورد استفاده دارای خطای اندکی باشد.

در ادامه، ابتدا به بررسی دیاگرام کلی سیستم مخابراتی می‌پردازیم. سپس به بررسی دقیق‌تر ساختارهای فرستنده، کانال و گیرنده می‌پردازیم. در انتها، نتایج عملی که بر روی کانال لوله آبی در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز انجام شد، مطرح می‌گردد. سپس به بحث بر روی داده‌ها و نتایج حاصل از آن می‌پردازیم.

### بلوک دیاگرام کلی سیستم مخابراتی

در این بخش به بررسی بلوک دیاگرام سیستم مخابراتی آکوستیکی پایاده‌سازی شده می‌پردازیم. شکل ۱ بلوک دیاگرام سیستم مخابراتی را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌کنید، اطلاعات باینری توسط منبعی دلخواه تولید می‌شود و عملیات مدولاسیون و قاب‌بندی بر روی آن صورت می‌گیرد. فریم تولیدی در فضای نرم‌افزار MATLAB از طریق کارت صدای لپ-تاپ با رعایت نرخ نمونه برداری نایکوئیست<sup>۵</sup>، به مبدل آلتراسونیک فرستنده منتقل و در کانال مورد نظر پخش می‌شود. در سمت دیگر کانال، مبدل آلتراسونیک گیرنده سیگنال تولیدی را دریافت می‌کند و از طریق کارت صدای لپ‌تاپ با همان نرخ نمونه برداری، جهت پردازش به نرم‌افزار MATLAB منتقل می‌کند. سپس فریم دریافتی بازگشایی می‌شود و طی عملیات همزمان‌سازی، سیگنال دریافتی استخراج می‌شود. در آخر، با انجام دمودولاسیون<sup>۶</sup>، اطلاعات باینری ارسالی در خروجی بدست می‌آیند.

### ساختار فرستنده

در این قسمت به بررسی دقیق‌تر نوع سیگنال ارسالی می‌پردازیم. بطور کلی، ساختار سیگنال ارسالی به ترتیب از سه قسمت سیگنال

در مرجع [۱۲]، مشاهده می‌شود که پژوهشگر برای مدل سازی کانال زیر آب از سیگنال چیرپ و برای ارسال و دریافت اطلاعات از مدولاسیون CSK<sup>۲</sup> استفاده کرده است. نویسنده در نتایج خود به عملکرد خوب آن در محیط‌های زیر آبی اشاره کرده است.

مرجع [۱۳]، از دیگر موارد برقرارسازی لینک آکوستیکی بین شبکه‌ای از حسگرهای پیزوالکتریک به منظور دیدبانی بر لوله‌ها و ارسال و دریافت اطلاعات در شبکه‌ای از لوله‌های آبی زیرزمینی است که طی آن نویسنده تلاش داشته است تا با شناسایی کانال توسط پاسخ ضربه و بررسی مدولاسیون‌های مختلف با نرخ ارسال اطلاعات متفاوت، صحت عملکرد کانال را بررسی کند. در زمینه شناسایی کانال و ایجاد سیستم مخابراتی زیر آب می‌توان به موارد متعددی اشاره کرد که در این قسمت از تفصیل آن پرهیز می‌شود.

هدفی که در این مقاله به دنبال آن هستیم، برقرارسازی کانال مخابراتی دیجیتالی-آکوستیکی درون خط لوله‌های حاوی سیال است. از جمله کاربردهای آن، می‌توان به برقرارسازی لینک ارتباطی بین ایستگاه‌های آبی، نفتی و یا هر سیال دیگری اشاره کرد. این ارتباط کمک می‌کند تا اطلاعات لازم جهت ارسال از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر از طریق کانال سیال صورت گیرد. در این حالت، دیگر نیازی به استفاده از سایر کانال‌های سیمی و بی سیم نیست و از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر است.

برای دستیابی به این هدف، اولین قدم شناسایی و تخمین کانال است که این کار از دو طریق پاسخ ضربه و پاسخ فرکانسی کانال صورت می‌گیرد.

برای بدست آوردن پاسخ ضربه از سیگنال کاوش چیرپ به عنوان ورودی استفاده می‌شود. این سیگنال به دلیل خواص قابل توجهی که دارد، گزینه مناسبی برای این کار است [۱۴]. از همین سیگنال نیز برای همزمان سازی بین فرستنده و گیرنده در قاب‌بندی استفاده می‌شود که در بخش بعدی با عنوان ساختار گیرنده به آن اشاره خواهد شد. سپس با بررسی پاسخ ضربه کانال، که از طریق همبستگی سیگنال کاوش چیرپ و خروجی کانال بدست می‌آید، عوامل محیطی موثر در پاسخ کانال شناسایی می‌شوند. شناسایی این عوامل در انتخاب نوع مدولاسیون و مقدار باند محافظ موثر است. از مهمترین این عوامل می‌توان به پدیده چند مسیریگی و طنین اشاره کرد. اگر میزان کشیدگی در زمان کم باشد، حاکی از آن است که می‌توانیم از مدولاسیون‌های با فاز هم‌دوس استفاده کنیم. در حالی که اگر کانال تغییرات زیادی داشته باشد، بهتر است از مدولاسیون‌های غیر هم‌دوس استفاده شود [۱۵]. البته در انتخاب نوع مدولاسیون، علاوه بر عامل فوق‌الذکر، پارامترهای

3 Signal to Noise Ratio  
4 Bit Error Rate  
5 Nyquist Sampling Rate  
6 De-modulation

۲Chirp Shift Keying

کاوش چیرپ، باند محافظ<sup>۷</sup> و سیگنال پیام مدوله شده<sup>۸</sup> تشکیل شده است. این ضریب بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$\mu = \frac{f_2 - f_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

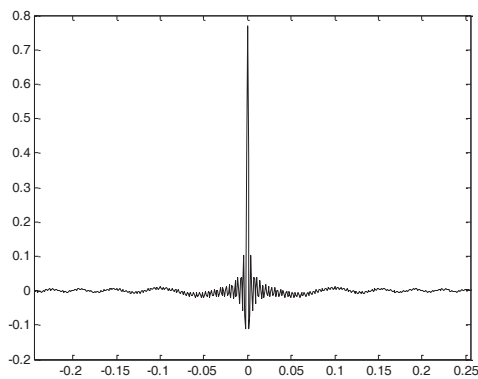
که  $f_2$  فرکانس در لحظه ثانویه است و  $t_2 - t_1$  مدت زمان تغییرات فرکانسی سیگنال چیرپ را نشان می‌دهد. پهنای باند اشغالی سیگنال چیرپ تقریباً برابر با رابطه زیر است:

$$BW = f_{\max} - f_{\min} \quad (3)$$

این سیگنال به دو دلیل در فرستنده ارسال می‌شود:

- استفاده از آن در گیرنده جهت رسیدن به پاسخ ضربه کانال
- ایجاد همزمان سازی بین فرستنده و گیرنده در دریافت پیام

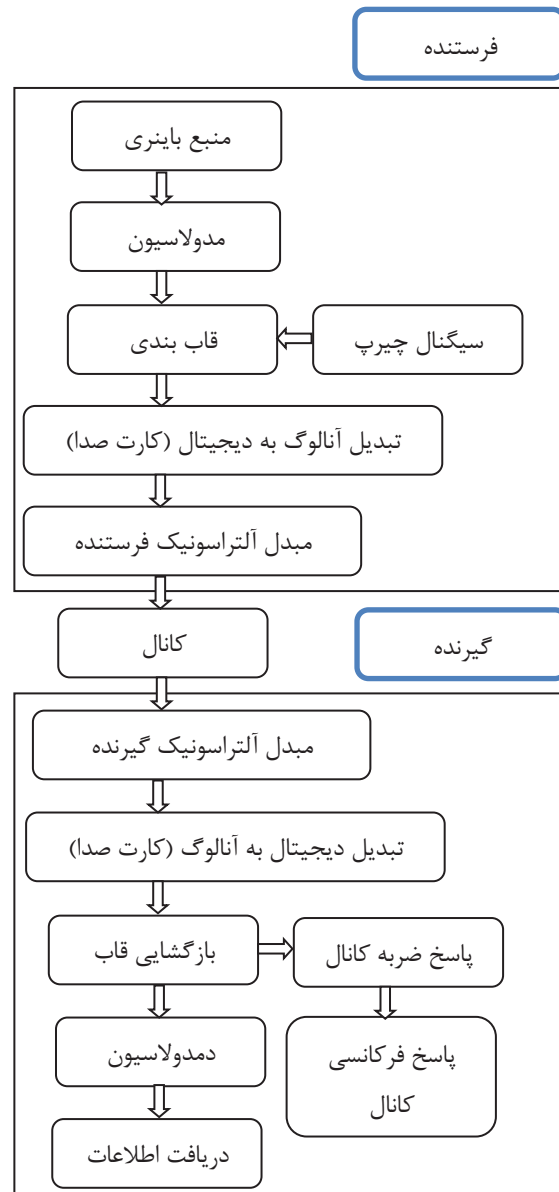
برای بدست آوردن پاسخ کانال، نیاز به اعمال تابع ضربه در ورودی کانال است که به دلیل پهنای باند بی‌نهایت آن در عمل نشدنی است. یکی از ویژگی‌های مهم تابع کاوش چیرپ این است تابع خود همبستگی آن بسیار به تابع ضربه ایده‌آل نزدیک می‌باشد که می‌توان از همین ویژگی جهت استخراج پاسخ ضربه کانال و یا شناسایی سیستم استفاده نمود. شکل زیر تابع خود همبستگی یک نمونه سیگنال کاوش چیرپ را نشان می‌دهد.



شکل ۲. خود همبستگی سیگنال کاوش چیرپ

همان طور که در شکل دیده می‌شود، تابع خود همبستگی بسیار شبیه تابع ضربه دلتای دیراک می‌باشد. این سیگنال نیز، جهت همزمان سازی در ابتدای هر فریم ارسال می‌شود که نحوه عملکرد آن در بخش همزمان سازی با فرستنده بررسی خواهد شد.

کاوش چیرپ، باند محافظ<sup>۷</sup> و سیگنال پیام مدوله شده<sup>۸</sup> تشکیل شده است.



شکل ۱. بلوک دیاگرام سیستم مخابراتی آکوستیکی

### ساختار چیرپ خطی

سیگنال چیرپ خطی، سیگنالی است که در بازه زمانی محدود، فرکانس آن به صورت خطی با زمان تغییر می‌کند در حالی که دامنه آن ثابت است. رابطه زیر این سیگنال را در حوزه زمان نشان می‌دهد:

$$s(t) = A \cos(2\pi(f_1 + \mu t)t + \theta_0) \quad (1)$$

که در آن  $f_1$ ، فرکانس اولیه در لحظه شروع و  $\mu$  ضریب تغییر فرکانس و  $\theta_0$  نیز فاز اولیه می‌باشد. اگر  $\mu$  عددی مثبت باشد، نوع

## باند محافظ

که  $T_s$  مدت زمان ارسال سمبل و برابر با نصف مدت زمان ارسال بیت ( $T_b$ ) و  $p(t)$ ، فیلتر SRRC است.

این فیلتر هم در فرستنده و هم در گیرنده استفاده می‌شود. پاسخ ضربه این فیلتر به صورت رابطه زیر است:

$$h(t) = 4\beta \frac{\cos((1+\beta)\pi t/T_s) + \frac{\sin((1-\beta)\pi t/T_s)}{(4\beta t/T_s)}}{\pi\sqrt{T_s}(1-(4\beta t/T_s)^2)} \quad (7)$$

که در رابطه فوق پارامتر  $\beta$  فاکتور سراسی‌بی<sup>۱۴</sup> فی‌لتر نامیده می‌شود.

سیگنال مدوله شده بالا را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$s(t) = \sum_k A_k p(t - kT_s) \cos(2\pi f_0 t) - \sum_k B_k p(t - kT_s) \sin(2\pi f_0 t) \quad 0 < t < T_s \quad (8)$$

که در آن  $A_k$  برابر با  $\cos(\varphi)$  و  $B_k$  برابر با  $\sin(\varphi)$  است.

## - مدولاسیون CP-CSK

مدولاسیون CSK یکی از مدولاسیون‌های مقاوم و نوظهور در عرصه مدولاسیون‌های دیجیتال با کاربردهای زیر آبی است. در ساختار این مدولاسیون از سیگنال چیرپ افزایشی جهت ارسال بیت یک و از چیرپ کاهش‌ی جهت ارسال بیت صفر استفاده می‌شود. بنابراین سیگنال مدوله شده به صورت زیر است:

$$s_1(t) = A \cos(2\pi(f_1 + \mu)t) \quad (9)$$

$$s_2(t) = A \cos(2\pi(f_2 + \mu)t) \quad (10)$$

که در آن داریم:

$$f_2 = f_1 + \mu T_b \quad (11)$$

$f_1$  نشان دهنده فرکانس کمینه،  $f_2$  نشان دهنده فرکانس بیشینه، ضریب  $\mu$  از رابطه (۲) بدست می‌آید که برای ارسال بیت یک پارامتر  $\mu$  مقداری مثبت بوده و برای ارسال بیت صفر این پارامتر مقداری منفی دارد. همچنین مقدار این پارامتر برای چیرپ افزایشی و کاهش‌ی یکسان است.

## ساختار کانال

در لوله‌های آبی، اکو مخرب‌ترین عاملی است که باعث اعوجاج در سیگنال می‌شود. میزان اکو بسته به طول، قطر و تعداد انشعابات لوله متفاوت است. در خط لوله‌های آبی به دلیل انعکاس از بدنه خط لوله تاثیر این پدیده می‌تواند بیشتر از آب‌های آزاد باشد.

اثرات مخرب کانال به ویژه اکو باعث می‌شود که تا تداخل در سیگنال‌های دریافتی صورت گیرد. هدف از این قسمت، ایجاد حاشیه‌ای امن جهت جلوگیری از تداخل در قاب‌های ارسالی است. مدت زمان باند محافظ بسته به نوع کانال متفاوت است که با توجه به پاسخ ضربه کانال می‌توان اندازه آن را تعیین کرد. توجه شود که تداخل‌های بین سمبلی<sup>۱۱</sup> در یک کانال چند مسیری با قرار دادن باند محافظ از بین نمی‌رود بلکه در مدولاسیون‌های هم‌دوس به کمک همسان سازها اثر آن جبران می‌گردد.

## مدولاسیون سیگنال پیام

سیگنال پیام مورد نظر مجموعه‌ای از صفرها و یک‌ها با توزیع احتمال برابر است که در عمل توسط منبعی که این ویژگی را دارد، تولید می‌شوند. در این قسمت مدولاسیون‌های Q-PSK، CP-FSK و CP-CSK بر سیگنال پیام اعمال می‌شود.

## - مدولاسیون CP-FSK

مدولاسیون FSK از متداول‌ترین مدولاسیون‌های دیجیتال می‌باشد که از دو سیگنال کسینوسی با فرکانس‌های  $f_1$  و  $f_2$  برای ارسال داده‌های صفر و یک استفاده می‌شود که بصورت زیر است:

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f_1 t) \quad 0 < t < T_b \quad (4)$$

$$s_2(t) = A \cos(2\pi f_2 t) \quad 0 < t < T_b \quad (5)$$

که در آن،  $T_b$  مدت زمان ارسال یک بیت است. اگر فرکانس این دو سیگنال مضربی صحیحی از نرخ ارسال بیت باشد آن‌گاه سیگنال مدوله شده ارسالی فاز پیوسته خواهد بود که آن را مدولاسیون فاز پیوسته<sup>۱۲</sup> می‌گویند.

## - مدولاسیون Q-PSK

مدولاسیون Q-PSK در حقیقت مدولاسیون 4-PSK است که در آن از یک سیگنال حامل کسینوسی با ۴ فاز متفاوت که نسبت به هم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند، برای ارسال سمبل‌های دو بیتی استفاده می‌شود.

در عمل برای بهینه شدن پهنای باند مورد استفاده، به طور معمول سیگنال ارسالی را از فیلتر SRRC<sup>۱۳</sup> عبور می‌دهند که طی این عمل، سیگنال ارسالی در باند میانی و در فرکانس  $f_0$  به صورت زیر می‌باشد:

$$s(t) = \sum_k p(t - kT_s) \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad 0 < t < T_s \quad (6)$$

11 Inter-Symbol Interference

12 Continuous Phase

13 Square-Root Raised Cosine

14 Roll-Off Factor

### دمدولاسیون

پس از تشخیص زمان شروع سیگنال پیام مدوله شده در قسمت همزمان سازی، در این قسمت عکس عمل دمدولاسیون اعمال می-شود که به شرح زیر است.

#### - دمدولاسیون Q-PSK

ساختار گیرنده این دمدولاسیون به صورت همدوس است. ابتدا سیگنال به باند پایه منتقل می شود، سپس سیگنال بدست آمده را همانند فرستنده، از فیلتر SRRC عبور می دهیم. این فیلتر همانند یک فیلتر پایین گذر عمل می کند و مولفه های فرکانسی مزاحم را حذف می کند. خروجی های این فیلتر در حقیقت  $\hat{A}_k$  و  $\hat{B}_k$  می باشند که نسبت به  $A_k$  و  $B_k$  اختلاف فاز دارند و نیاز به جبران سازی است. اختلاف فاز ایجاد شده و اثرات نامطلوب کانال از جمله چندمسیرگی و پخش شدگی زمانی باعث تداخل در سمبل ها می-شود. به کمک همسان سازها می توان اختلاف فاز ایجاد شده و همچنین تداخل بین سمبلی را تا حد زیادی جبران نمود. همسان سازهای وقفی زیادی در عمل ایجاد می شوند. همسان ساز جهت همسان ساز DFE دو نمونه از پرکاربردترین همسان سازها جهت حذف تداخل هستند. در این مقاله از همسان ساز خطی استفاده شده است. جهت تطبیق با تغییرات کانال از نوع وقفی همسان ساز استفاده می شود. سه روش مرسوم جهت تطبیق وزن های همسان ساز با تغییرات کانال روش های LMS و NLMS و RLS می باشند که در این مقاله از روش NLMS با میزان گام ۰/۵ با طول داده آموزشی ۵۰ سمبل استفاده می شود.

الگوریتم LMS اگرچه پیچیدگی کمی دارد ولی همگرایی آن کندتر است. در این مقاله چون در کانال لوله ای پدیده چند مسیرگی جدی نبوده است، استفاده از این همسان ساز ساده نیز می تواند تداخل را تا حد زیادی جبران نماید و از نظر پیچیدگی محاسباتی نیز مناسب تر است.

#### - دمدولاسیون CP-FSK

ساختار گیرنده CP-FSK به صورت گیرنده ناهمدوس است، در این حالت نیازی به دانستن فاز سیگنال دریافتی نیست. برای آشکارساز ناهمدوس می بایست تفاضل دو فرکانس های  $f_1$  و  $f_2$  مضربی صحیح از نرخ ارسال بیت باشد به عبارت دیگر دو سیگنال بر هم عمود باشند. در گیرنده ناهمدوس، سیگنال دریافتی ابتدا از دو فیلتر میان گذر با فرکانس های مرکزی  $f_1$  و  $f_2$  به طور جداگانه عبور داده می شود، سپس خروجی فیلترها به آشکارساز پوش داده می شود. خروجی آشکارسازها با هم مقایسه می شوند و بیت ارسالی مشخص می گردد.

البته پارامترهای دیگری چون سرعت، دما و فشار آب، میزان املاح موجود در آب نیز سیگنال ارسالی را تحت تاثیر قرار می دهد. در صورتیکه شبکه ای از لوله ها استفاده شود، به دلیل دریافت سیگنال از سایر مسیرهای لوله های مختلف میزان تداخل به شدت افزایش می یابد. توجه نمایید که در این تحقیق لوله دارای انشعاب نمی باشد.

### ساختار گیرنده

در قسمت گیرنده، به صورت کلی سه عملیات همزمان سازی (پیدا کردن شروع فریم های ارسالی)، بدست آوردن پاسخ ضربه کانال و دمدولاسیون سیگنال پیام صورت می گیرد.

### همزمان سازی با فرستنده

با توجه به شکل (۲) در تابع خود همبستگی سیگنال کاوش چیرپ دامنه لوب اصلی<sup>۱۵</sup> به مقدار قابل توجهی از دامنه لوب های کناری<sup>۱۶</sup> بیشتر است. از این خصوصیت برای همزمان سازی استفاده می کنیم؛ بدین صورت که ابتدا میزان همبستگی سیگنال دریافتی با سیگنال کاوش چیرپ بررسی می شود و دقیقاً در نقطه ای که به بیشینه مقدار خود رسید، آغاز فریم مشخص می گردد. با دانستن مدت زمان سیگنال کاوش چیرپ و باند محافظ، می توان به طور دقیق آغاز سیگنال پیام مدوله شده را بدست آورد.

### بدست آوردن پاسخ ضربه کانال

خروجی کانال مخابراتی بدون در نظر گرفتن نویز به صورت زیر است:

$$y[n] = x[n] * h[n] \quad (12)$$

که در آن  $y[n]$  خروجی و  $x[n]$  ورودی و  $h[n]$  پاسخ ضربه کانال است که هدف استخراج  $h[n]$  است. اگر سیگنال ارسالی که جهت شناسایی کانال استفاده می شود دارای خاصیت زیر باشد:

$$x[n] * x[-n] = \delta[n] \quad (13)$$

آن گاه همبستگی سیگنال ورودی و خروجی به صورت زیر است:

$$y[n] * x[-n] = x[n] * h[n] * x[-n] = x[n] * x[-n] * h[n] \quad (14)$$

$$= \delta[n] * h[n] = h[n]$$

سیگنال چیرپ ویژگی رابطه (۱۳) را به طور تقریبی برآورده می کند. از این رو پاسخ ضربه کانال را می توان با تقریب قابل قبولی از همبستگی سیگنال کاوش چیرپ ارسالی و دریافتی بدست آورد.

15 Main Lobe  
16 Side Lobes

خط لوله‌ای که مورد آزمایش قرار گرفت را نشان می‌دهد. برای مشاهده کامل خط لوله به شکل (۳) نیز مراجعه کنید.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خط لوله

خط لوله مکعب مستطیل شکل	
جنس لوله	آهن
طول لوله	۷۰ سانتی متر
عرض لوله	۱۲ سانتی متر
ارتفاع لوله	۶ سانتی متر
انحنای ۱۳۵ درجه‌ای	
خط لوله استوانه‌ای شکل	
جنس لوله	PVC
طول لوله	۲۴۰ سانتی متر
قطر لوله	۱۲/۷ سانتی متر

لازم به ذکر است که مبدل‌های آلتراسونیک فرستنده و گیرنده در باند فرکانسی (۳۱/۲ - ۱۶/۸) کیلوهرتز با فرکانس مرکزی ۲۴ کیلوهرتز مورد استفاده قرار گرفتند که با توجه به مسافت بین آن‌ها و ساختار مبدل‌ها، توان کافی از لپ‌تاپ به فرستنده ارسال می‌شد. همچنین در گیرنده نیز توان کافی توسط لپ‌تاپ دریافت می‌شد (این موضوع از مقدار SNR ها در جدول ۶ مشخص است). به همین خاطر نیاز به تقویت‌کننده را هم در سمت فرستنده و هم در سمت گیرنده مرتفع می‌کرد.

نتایج حاصل از عملیات بدست آوردن پاسخ ضربه، پاسخ فرکانسی و ارسال - دریافت اطلاعات در دو دبی مختلف ۲ و ۸ متر مکعب بر ثانیه نشان داده شده است.

- دمدولاسیون CP-CSK

ساختار این دمدولاسیون بصورت همدوس می‌باشد. بدین صورت که سیگنال دریافتی در سیگنال چیرپ افزایشی ضرب می‌شود و متوسط‌گیری صورت می‌گیرد، سپس با انجام مقایسه در آشکارساز، بیت‌های ارسالی را تشخیص داده می‌شود.

## آزمایش‌های عملی، نتایج و بحث

در این مرحله، به ساختار عملی کانال و تحلیل نتایج عملی بر روی لوله آبی خواهیم پرداخت. به طور کلی این بخش به سه زیر بخش زیر تقسیم می‌شود:

- ساختار فیزیکی کانال و ادوات مورد استفاده
- نتایج بدست آمده از انجام آزمایش‌ها
- بحث بر روی نتایج بدست آمده

### ساختار فیزیکی کانال و ادوات مورد استفاده

در این مقاله به دلیل دشواری در ایجاد شکل‌های مختلف کانال و گردش سیال (آب) در آن، تمامی آزمایش‌ها بر روی یک کانال ثابت و مشخص صورت گرفته است. شکل ۳ در صفحه ی بعدی کانال خط لوله آبی به همراه مکان استقرار مبدل‌های آلتراسونیک فرستنده و گیرنده مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد. مبدل‌ها را به شکلی که ملاحظه می‌کنید در خط لوله جاسازی شده‌اند.

خط لوله مورد آزمایش از دو بخش تشکیل شده بود که جزئیات آن در جدول (۱) بیان شده است. این جدول، مشخصات فیزیکی





شکل ۳. کانال خط لوله آب و ترانسدیوسرهای فرستنده و گیرنده جاسازی شده درون خط لوله آبی

### نتایج بدست آمده از انجام آزمایش ها

در ابتدای امر، به ساختار فریم ارسالی خواهیم پرداخت:

این فریم از سه قسمت سیگنال کاوش چیرپ، باند محافظ و سیگنال پیام مدوله شده تشکیل شده است که به شرح جدول ۲ می باشد. همان طور که ملاحظه می کنید، نرخ نایکوئیست با توجه به باند فرکانسی مورد استفاده در ساختار فرستنده رعایت شده است. مدت زمان سیگنال کاوش چیرپ برابر  $0/25$  ثانیه در نظر گرفته شده است. البته در آزمایش هایی که صورت گرفت، مقادیر مختلفی امتحان شد که در نهایت با توجه به نوع کانال این مقدار بهترین عملکرد سیستم را به همراه داشت.

ارسال اطلاعات استفاده شده است که ویژگی هر کدام از آن ها به شرح زیر است:

جدول ۴. مشخصات مدولاسیون Q-PSK

مدولاسیون Q-PSK	
فرکانس مرکزی مدولاسیون	۲۴ کیلوهرتز
نرخ ارسال سمبل در فریم	۳۴۹۱ سمبل بر ثانیه
تعداد سمبل ارسالی	۱۹۲۰۰ سمبل
فاکتور $\beta$ در فیلتر SRRC	۱

فیلتر SRRC در جدول ۳، فیلتر شکل دهی پالس جهت جلوگیری از ISI می باشد که این فیلتر در رابطه (۷) تعریف شده است.

جدول ۳. مشخصات فریم ارسالی

نرخ نمونه برداری	۹۶۰۰۰ سمبل بر ثانیه
مدت زمان سیگنال کاوش چیرپ	$0/25$ ثانیه
باند فرکانسی سیگنال کاوش چیرپ	$31/2 - 16/8$ کیلوهرتز
مدت زمان باند محافظ	$62/5$ میلی ثانیه

مدت زمان باند محافظ  $62/5$  میلی ثانیه در نظر گرفته شده بود که اگرچه با توجه به پاسخ ضربه کانال (شکل (۷)) مقدار زیادی به نظر می رسد ولی حاشیه اطمینان رعایت شده است و تداخلی صورت نمی گیرد و در نتیجه همزمان سازی به راحتی صورت می گیرد. از طرفی چون هدف این مقاله، صرفاً بررسی قابل پیاده سازی بودن این طرح است به همین مقدار از باند محافظ اکتفا می کنیم، هرچند در عمل، با توجه به تعداد سمبل ارسالی در هر فریم، این مقدار می تواند دستخوش تغییرات شود. همانطور که در زیر بخش ساختار سیگنال ارسالی اشاره شد، از سه نوع مدولاسیون جهت

جدول ۵. مشخصات مدولاسیون CP-FSK

مدولاسیون CP-FSK	
فرکانس حامل اول	۱۹۲۰۰ کیلوهرتز
فرکانس حامل دوم	۲۸۸۰۰ کیلوهرتز
نرخ ارسال سمبل در فریم	۳۴۹۱ سمبل بر ثانیه
تعداد سمبل ارسالی	۱۹۲۰۰ سمبل

جدول ۶. مشخصات مدولاسیون CP-CSK

مدولاسیون CP-CSK	
فرکانس حامل اول	۱۹۲۰۰ کیلوهرتز
فرکانس حامل دوم	۲۸۸۰۰ کیلوهرتز
نرخ ارسال سمبل در فریم	۳۴۹۱ سمبل بر ثانیه
تعداد سمبل ارسالی	۱۹۲۰۰ سمبل

همان‌طور که از جدول‌ها ملاحظه می‌شود، فرکانس مرکزی در هر سه نوع مدولاسیون ۲۴ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. در مدولاسیون‌های CP-FSK و CP-CSK، اختلاف دو فرکانس حامل ۹/۶ کیلوهرتز است تا بدین وسیله پیوسته فاز شوند. نرخ ارسال سمبل در سیگنال پیام مدوله شده ۹۶۰۰ سمبل بر ثانیه می‌باشد. مدت زمان سیگنال پیام نیز ۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین ۱۹۲۰۰ سمبل در یک فریم ارسال می‌شود. نحوه محاسبه نرخ ارسال سمبل در فریم به صورت زیر می‌باشد. مدت زمان فریم ارسال ناشی از سه مدت زمان سیگنال کاوش چیرپ، باند محافظ و سیگنال پیام مدوله شده تشکیل شده است که بدین ترتیب کل مدت زمان فریم برابر است با:

ثانیه

$$T_{frame} = 0.25 + 0.0625 + 2 = 2.3125$$

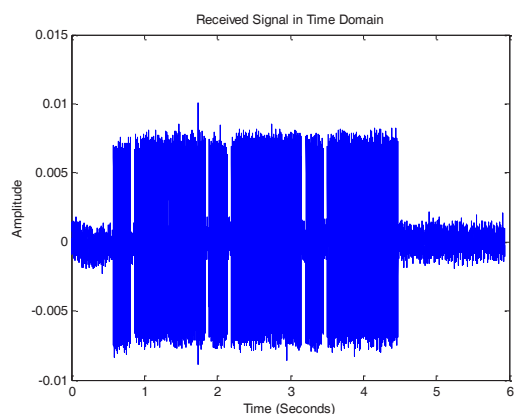
بنابراین نرخ سمبل‌رسانی برابر است با:

سمبل بر ثانیه

$$SymbolRate = 19200 / 2.3125 \approx 8303$$

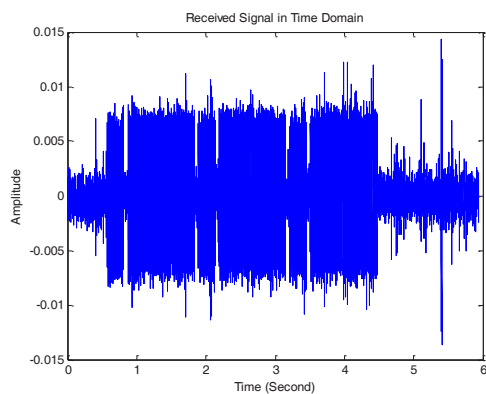
همین نرخ ارسال سمبل در مدولاسیون Q-PSK نیز استفاده شده است که البته مزیت این مدولاسیون، دو برابر بودن تعداد بیت‌های ارسال (۳۸۴۰۰ بیت در هر فریم) است. نکته قابل توجه دیگر در مورد این مدولاسیون فاکتور  $\beta$  در فیلتر RRCS است. این مقدار برابر واحد در نظر گرفته شده است. در این حالت پهنای باند مدولاسیون برابر نرخ ارسال سمبل است، یعنی برابر ۹/۶ کیلوهرتز با فرکانس مرکزی ۲۴ کیلوهرتز است.

هدف از بررسی این سه نوع مدولاسیون، مقایسه آن‌ها در این محیط جدید است. در واقع، می‌خواهیم عملکرد آن‌ها با در نظر گرفتن پهنای باند ثابت و نرخ ارسال سمبل یکسان را تحلیل کنیم. این تحلیل به ما کمک می‌کند تا بهترین و کارآمدترین آن‌ها را جهت پایه‌سازی به صرفه سیستم انتخاب کنیم. با توجه به موارد بحث شده در مورد فریم ارسال، یک نمونه از این فریم به صورت شکل زیر است:

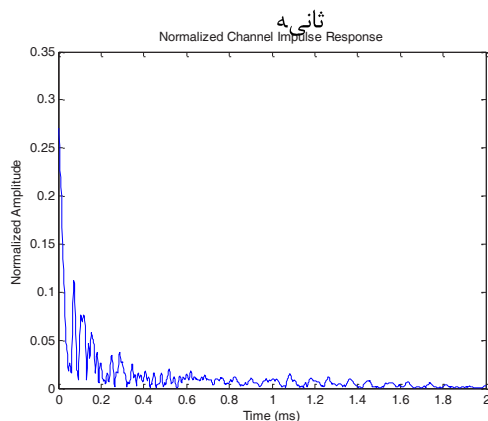


شکل ۵. نمونه‌ای از سیگنال دریافتی در دبی ۲ متر مکعب بر ثانیه

و نمونه‌ای از سیگنال دریافتی در دبی ۸ متر مکعب بر ثانیه به صورت شکل ۶ حاصل شده است:

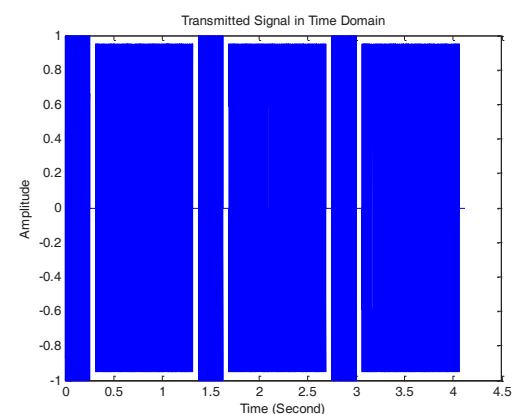


شکل ۶. نمونه‌ای از سیگنال دریافتی در دبی ۸ متر مکعب بر



شکل ۷. پاسخ ضربه کانال

شکل ۴. نمونه‌ای از سیگنال ارسال



شکل ۴. نمونه‌ای از سیگنال ارسال

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بخش اول فریم سیگنال کاوش چیرپ است، بعد از آن باند محافظ قرار گرفته و سپس سیگنال پیام مدوله شده قرار دارد. لازم به ذکر است که چون هدف



دو دبی مختلف ۲ و ۸ متر مکعب بر ثانیه در جدول زیر آورده ایم. جدول زیر عملکرد مدولاسیون ها را در دو دویی مختلف کانال نشان می دهد.

جدول ۷. BER و (S+I)NR مدولاسیون ها در دو دبی مختلف

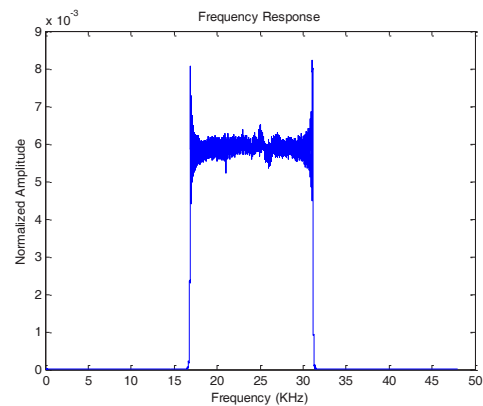
BER	(S+I)NR(dB)	مدولاسیون	دبی (متر مکعب بر ثانیه)
۰	۲۰/۴۴	Q-PSK	۲
۰	۲۰/۳۸	CP-FSK	
$3/9 \times 10^{-3}$	۲۰/۱۵	CP-CSK	
۰	۲۰/۳۳	Q-PSK	۸
$2/1 \times 10^{-4}$	۱۷/۳۲	CP-FSK	
$3 \times 10^{-4}$	۱۹/۴۶	CP-CSK	

### بحث بر روی نتایج بدست آمده

در این بخش ابتدا به بررسی سیگنال دریافت شده در دو حالت مختلف کانال می پردازیم و سپس پاسخ ضربه کانال را بررسی خواهیم کرد. در ادامه آن، پاسخ فرکانسی کانال را مورد بررسی قرار می دهیم و در آخر عملکرد مدولاسیون های مختلف را در این محیط بررسی می کنیم.

ابتدا به بررسی سیگنال های دریافتی در دو خط لوله با دبی ۲ و ۸ متر مکعب بر ثانیه می پردازیم. این سیگنال ها در شکل های (۵) و (۶) نمایش داده شده اند. همان طور که از شکل ها مشخص است، در کانال با دبی ۸ متر بر ثانیه اثر اغتشاشات محیطی بیشتر شده است. زیرا در این حالت سیال عبوری با جدارها برخورد بیشتری دارد که باعث لرزش در بدنه لوله می شود که این عامل سبب می شود تا در مبدل گیرنده سیگنال های ناخواسته بیشتری به وجود آید.

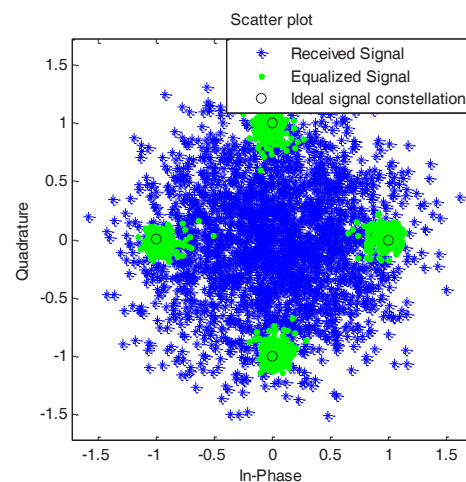
همان طور که از شکل (۷) مشخص است، پاسخ ضربه کانال دارای یک مسیر اصلی است و سپس مسیرهای فرعی که ناشی از انعکاس در بدنه لوله است قرار گرفته اند که به تدریج کم می شوند. این پاسخ برای دو مقدار دبی بررسی شده یکسان بود که نشان می دهد در این بازه از دبی، پاسخ ضربه تفاوت قابل ملاحظه ای ندارد. همچنین، این پاسخ کانال حاکی از آن است که برخلاف انتظار، اکوهای شدیدی در لوله ها به وجود نیامده است. علت این پدیده می توان ناشی از مستقیم بودن مسیر سیگنال عبوری در لوله ها دانست. چرا که بر خلاف محیط های آبی کم عمق که پدیده هایی چون طنین و اکو باعث می شوند تا چندین بار سیگنال ارسالی با دامنه های مختلف در فرستنده دریافت شود، در خط لوله مورد استفاده سیگنال ارسالی فقط از یک مسیر به گیرنده می رسد که دامنه قابل ملاحظه ای دارد. همچنین دامنه ناشی از مسیر دوم نیز



شکل ۸. پاسخ فرکانسی کانال

نتایج نشان می دهد که در هر دو وضعیت کانال، پاسخ ضربه کانال و پاسخ فرکانسی کانال بدون هیچ گونه تفاوت قابل ملاحظه ای در دو حالت مختلف به صورت شکل های ۷ و ۸ درآمده اند. شکل ۷ پاسخ ضربه سیستم و شکل ۸ پاسخ فرکانسی کانال مربوطه را نشان می دهند.

شکل ۹ نیز نمودار پخش شدگی منظومه سیگنال دریافتی در گیرنده با مدولاسیون Q-PSK، قبل و بعد از انجام عملیات همسان ساز خطی NLMS نشان می دهد. دبی آب در این آزمایش برابر ۸ متر مکعب بر ثانیه تنظیم شده بود. همانطور که در شکل زیر دیده می شود همسان ساز استفاده شده توانسته است به خوبی تداخل سمبل ها را حذف نموده و تمامی سمبل های دریافت شده در گیرنده به سمبل های ارسالی دی مدوله خواهند شد. در ادامه، کارائی مدولاسیون های مختلف را از نقطه نظر احتمال خطای بیت با یکدیگر مقایسه می کنیم. به این منظور احتمال خطای بیت مدولاسیون های مختلف را برای



شکل ۹. نمودار پخش داده های دریافتی قبل و بعد از استفاده از همسان ساز

خطا به  $10^{-4} \times 2/1$  افزایش یافته است. با وجود اینکه احتمال خطا در بیت‌های دریافتی در مدولاسیون CP-CSK از مدولاسیون CP-FSK بیشتر است ولی توجه به این نکته ضروری است که در کانالی که دبی آن ۲ متر مکعب بر ثانیه است، مقدار (S+I)NR تقریباً یکسان است ولی در محیطی که اغتشاشات شدیدتر است (دبی ۸ متر مکعب بر ثانیه) از نظر شاخص (S+I)NR مدولاسیون CP-CSK عملکرد بهتری را دارد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم مخابراتی آکوستیکی در درون خط لوله آب پایاده‌سازی شد تا به وسیله آن بین ایستگاه‌های مختلف پمپاژ آب ارتباط از طریق لوله‌ها حاوی سیال صورت گیرد. در این مقاله، آزمایش‌ها در خط لوله آبی با دو دبی مختلف انجام شدند که در طی آن‌ها تلاش شد تا با تخمین کانال ارتباطی توسط سیگنال کاوش چیرپ، کانال را به دقت شناسایی کنیم. این شناسایی به ما کمک می‌کند تا بهترین ساختار فریم جهت ارسال اطلاعات را بدست آوریم. سپس مدولاسیون‌های مختلفی جهت ارسال اطلاعات استفاده شدند که در بین آن‌ها مدولاسیون Q-PSK به همراه همسان‌ساز خطی از عملکرد بهتری برخوردار بود.

در انتها، با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی، این نتیجه مشهود است که چنین ساختاری برای برقراری لینک ارسال و دریافت اطلاعات به صورت آکوستیکی با نرخ ارسال مشخص در خط لوله‌ها قابل پایاده‌سازی است. امید است تا در آزمایش‌های آینده به شناسایی، ارسال و دریافت در شبکه‌ای از لوله‌های آبی بپردازیم.

### سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از همکاری کارکنان آزمایشگاه هیدرولیک رسوب بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز به ویژه جناب آقای دکتر تورج هنر کمال سپاسگزاری را دارد.

### مرجع‌ها

- [1] L. Freitag, M. Stojanovic, M. Grund and S. Singh, *Acoustic Communication for Regional undersea observatories*, 2002.
- [2] M. Stojanovic, *Recent Advance in High-speed Under-water Acoustic Communication Channel*, IEEE Journal, Vol. 21, No. 2, April 1996.
- [3] K. Pullarao, "Modelling and Simulation of an Underwater Acoustic Communication Channel", Hochschule Bremen, University of applied sciences, Germany, 2014.
- [4] R. G. Acevedo, A. L. Méndez, E. Á. Álvarez, S. G. Suárez, M. R. Lastra, A. G. Trashorras, *Acoustic*

مقدار قابل توجهی دارد ولی مابقی دامنه‌های ناشی از سایر مسیرها به شدت تضعیف شده‌اند که قابل نظر هستند.

در شکل (۸) مشاهده می‌کنیم که پاسخ فرکانسی کانال در بازه مورد استفاده دامنه نسبتاً ثابتی دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که کانال مذکور خاصیت فرکانس‌گزینه‌ی ندارد. البته پاسخ فرکانسی برای سایر بازه‌ها نیز بدست آورده شد، ولی در این بازه دامنه تغییرات کمتری داشت که مطلوب‌تر بود. لازم به ذکر است که همانند پاسخ ضربه کانال، این نتیجه در دو دبی مختلف تفاوت جدی نداشت.

همان‌طور که در جدول (۶) ملاحظه شد، نتایج در دو بخش مختلف (دو دبی متفاوت) ارزیابی شدند. در بخش اول، مقدار دبی سیال عبوری ۲ متر مکعب بر ثانیه و در بخش دوم ۸ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. سپس نتایج عملکرد هر کدام یک از مدولاسیون‌ها با بدست آوردن معیارهای (S+I)NR و BER بررسی شده‌اند. منظور از (S+I)NR نسبت توان سیگنال به علاوه توان تداخل‌ها بر توان نویز است چرا که این مقدار قبل از انجام عملیات همسان‌سازی صورت می‌گیرد. این دو معیار بر روی هر چهار فریم ارسالی اعمال شدند که مقادیر بدست آمده در جدول، حاصل از میانگین آن‌ها بر روی چهار فریم است. همان‌طور که از جدول (۶) ملاحظه می‌شود، مقادیر (S+I)NR برای هر کدام از مدولاسیون‌ها در دبی ۸ متر مکعب بر ثانیه کمتر از مقدار آن‌ها در دبی ۲ متر مکعب بر ثانیه است. این نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش میزان حجم سیال عبوری، اثر نویز و اغتشاشات محیطی افزایش یافته و باعث کاهش (S+I)NR در مقصد شده است. البته این کاهش مقدار به جز در مورد مدولاسیون CP-FSK، در سایر موارد ناچیز بوده و قابل صرف نظر است.

همچنین در مورد میزان خطا در بیت‌های ارسالی می‌توان گفت که مدولاسیون Q-PSK بهترین عملکرد را داشته است. زیرا در هر دو حالت مشاهده می‌شود که میزان خطا در بیت‌های ارسالی صفر بوده که این موضوع نشان می‌دهد که احتمال خطا در این مدولاسیون کمتر از یک بر تعداد بیت‌های ارسالی است، یعنی احتمال خطا کمتر از  $1/38400$  و یا  $10^{-5} \times 2/6$  است. اما این امر در مورد دو مدولاسیون دیگر صادق نبوده است. لازم به ذکر است که این مدولاسیون عملکرد بهتری نیز از جهت (S+I)NR دارد. مقادیر به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین مقدار در هر دو دبی مربوط به مدولاسیون Q-PSK است که البته این موضوع ناشی از همسان‌سازی است که در ساختار گیرنده مدولاسیون Q-PSK به کار رفته است. هرچند، این موضوع باعث پیچیده‌تر شدن ساختار این مدولاسیون می‌شود که از معایب آن به شمار می‌رود. در مورد مدولاسیون CP-FSK باید به این نکته توجه کرد که در دبی ۲ متر مکعب بر ثانیه، احتمال خطا در بیت‌های دریافتی کمتر از  $1/19200$  و یا  $5/2 \times 10^{-5}$  است ولی در دبی بالاتر این احتمال

*Communication in Water pipes: An Experimental Approach*, "1<sup>st</sup> International Congress water, waste and energy management", University of Oviedo, May 2012.

[5] Gustave Udaheureka, "Digital Communication over a Water Pipe Network," Thesis, Tshwane University of Technology, October 2006.

[6] Raju Rudraraju, *Ultrasonic Data Communication through Petroleum*, Thesis, University of Akron, May 2010.

[7] David A. Liston and James D. Liston, *Leak Detection Techniques*, Journal of the New England Water Works Association, 106(2): 103-108, 1992.

[8] H. V. Fuchs and R. Reihle, *Ten Years of Experience With Leak Detection by Acoustic Signal Analysis*, Applied Acoustics, DOI: 10.1016/0003-682X(91)90062-J, 1991.

[9] M. Fantozzi, G. D. Chirico, E. Fontana and F. Tonolini, *Leak Inspection on Water-pipelines by Acoustic Emission with Cross-Correlation Method*, Annual Conference Proceeding, American Water Works association, Engineering and Operations, Denver, Colo.: AWWA, 1993.

[10] Azizul H. Quazi, "Under Water Acoustic Communication", IEEE journal, Vol. 20, Issue: 2, March 1982.

[11] E. Law, R. Bradbeer, L. F. Yeung, Li Bin, and Gu Zhongguo, *Communication with an underwater ROV using ultrasonic transmission*, Mechatronics and Machine Vision: 295-304, 2002.

[12] Brice Zoh, *An Underwater Channel Model and Chirp Slope Keying Modulation Scheme Performance*, Thesis, University of New Orleans, 2010.

[13] George Kokossalakis, *Acoustic Data Communication System for In-pipe Wireless Sensors Network*, Ph.D. Thesis, MIT, 2006.

[14] R. Mazurek and H. Lasota, *Application of Maximum-Length Sequences for Impulse Response Measurement of Hydro-Acoustic Communication Systems*, Gdańsk University of Technology, Poland, 2007.

[15] S. XiaoHong, W. Haiyan, Z. Yuzhi, Z. Ruiqin, *Adaptive Techniques for Underwater Acoustic Communication*, Northwestern Polytechnical University, China, 2014