

فصل چهارم

پیاده‌سازی، شبیه‌سازی و تحلیل نتایج سیستم پایه S2C

۴-۱. مقدمه

➤ ارزیابی عملکرد هر سیستم ارتباطی نوین، مستلزم عبور از مرزهای تحلیل نظری و گام نهادن به عرصه‌ی آزمون عملی و کمی‌سازی رفتار سیستم تحت شرایط کنترل‌شده است. در فصل سوم این پایان‌نامه، مبانی نظری، مدل ریاضی و ساختار سیستم ارتباطی مبتنی بر فناوری حامل جارویی-گسترده (Sweep-Spread Carrier) به تفصیل تشریح گردید. روابط حاکم بر تبدیل تأخیرهای زمانی به شیفت‌های فرکانسی، مکانیزم جداسازی غیرفعال مسیرهای چندگانه و پارامترهای کلیدی طراحی سیستم مورد بررسی قرار گرفت. با این حال، این تحلیل‌های تحلیلی و کیفی، هرچند ضروری و روشن‌گر، به تنهایی قادر به ارائه‌ی تصویری جامع و قابل اعتماد برای قضاوت در مورد قابلیت‌های واقعی این فناوری در مواجهه با پیچیدگی‌های ذاتی محیط زیرآب نیستند. آنچه در این مرحله از پژوهش به عنوان حلقه‌ی مفقوده احساس می‌شود، تبدیل این مدل‌های ایده‌آل‌شده به شواهد عینی، کمی و تکرارپذیر است که نه تنها صحت استدلال‌های نظری را محک می‌زند، بلکه دامنهی کاربرد، محدودیت‌ها و نقاط قوت عملی سیستم را عیان می‌سازد.

➤ این فصل با هدف پر کردن این شکاف میان نظر و عمل طراحی شده است. هسته‌ی اصلی فعالیت‌های این فصل، پیاده‌سازی کامل و دقیق مدل سیستم S2C در محیط شبیه‌ساز عددی MATLAB، اجرای مجموعه‌ای گسترده و نظام‌مند از آزمایش‌های

شبیه‌سازی کامپیوتری و استخراج نتایج کمی مبتنی بر داده است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این فصل را می‌توان به دو دسته‌ی کلان تقسیم‌بندی کرد: دسته‌ی نخست، شبیه‌سازی‌های اعتبارسنجی و تحلیل پارامتری هستند که با هدف اطمینان از صحت پیاده‌سازی و درک عمیق تأثیر هر یک از پارامترهای طراحی مانند پهنای باند جاروب Δf و زمان نماد T_s بر معیارهای عملکردی کلیدی مانند نرخ خطای بیت (BER) انجام می‌شوند. دسته‌ی دوم، شبیه‌سازی‌های مقایسه‌ای هستند که در آنها عملکرد بهینه‌شده‌ی سیستم S2C در شرایط مختلف کانال، در تقابل مستقیم با یک سیستم مرسوم و پرکاربرد مبتنی بر مدولاسیون فاز دوحالتی (BPSK) قرار می‌گیرد. این مقایسه، که تحت شرایط عادلانه و یکسان انجام می‌پذیرد، نقاط قوت ذاتی S2C در مقابله با چالش چندمسیرگی و همچنین هزینه‌های احتمالی آن مانند نیاز به پهنای باند بیشتر را به وضوح نشان خواهد داد.

➤ خروجی این فصل، فراتر از مجموعه‌ای از نمودارها و جداول عددی است. این فصل پیکربندی بهینه و عملیاتی سیستم پایه S2C را به عنوان یک معیار مبنا استخراج و مستند می‌کند. این مبنا، سنگ بنای اساسی برای فصول آتی خواهد بود؛ جایی که معماری سیستم با افزودن اجزای پیشرفته‌تری مانند گیرنده‌ی چندشاخه و آینه‌ی زمان‌معکوس مجازی توسعه خواهد یافت و بهبود عملکرد هر ارتقاء نسبت به این معیار مبنا سنجیده خواهد شد. بنابراین، دقت و وسعت شبیه‌سازی‌های این فصل، نه تنها در صحت نتایج فصل حاضر، بلکه در اعتبار کل سیر پژوهشی پایان‌نامه تأثیر تعیین‌کننده‌ای دارد.

➤ ساختار این فصل به گونه‌ای طراحی شده است که خواننده را گام‌به‌گام از جزئیات فنی پیاده‌سازی تا تفسیر نتایج کلان هدایت کند. بخش ۲-۴ به تشریح جامع معماری نرم‌افزاری پروژه، جزئیات پیاده‌سازی هر بلوک، پارامترهای شبیه‌سازی و روش‌های کنترل کیفیت می‌پردازد. در بخش ۳-۴، سیستم پیاده‌سازی‌شده تحت ساده‌ترین شرایط کانال AWGN مورد آزمون قرار گرفته و صحت عملکرد آن با مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با حد نظری

شناخته‌شده‌ی مدولاسیون BPSK تأیید می‌گردد. بخش ۴-۴ قلب تحلیلی این فصل است و در آن، با تغییر سیستماتیک پارامترهای Δf و T_s و اندازه‌گیری پاسخ BER، روابط پیچیده‌ی بین طراحی و عملکرد به صورت تجربی آشکار می‌شود. بخش ۴-۵ صحنه‌ی رویارویی مستقیم دو فناوری است؛ در این بخش، منحنی‌های BER سیستم S2C و سیستم BPSK تحت کانال‌های AWGN، چندمسیره‌ی قطعی و چندمسیره‌ی تصادفی در کنار یکدیگر قرار گرفته و با معیارهای مختلفی مقایسه می‌شوند. سرانجام، بخش ۴-۶ با ترکیب تمامی یافته‌ها، پیکربندی نهایی سیستم پایه را استخراج کرده، دستاوردهای کلیدی را خلاصه می‌نماید و مسیر را برای گسترش سیستم در فصول آینده هموار می‌سازد.

➤ شکل ۴-۱: نقشه‌ی مفهومی ساختار فصل چهارم و جریان منطقی از پیاده‌سازی تا تحلیل نتایج.

۴-۲. جزئیات پیاده‌سازی در محیط MATLAB

برای تبدیل مدل نظری به یک شبیه‌سازی عملی و قابل تکرار، یک چارچوب نرم‌افزاری منظم در محیط MATLAB توسعه داده شده است. این چارچوب متشکل از چندین اسکریپت اصلی و توابع کمکی است که در قالب یک پروژه‌ی ساختیافته سازماندهی شده‌اند.

۴-۲-۱. ساختار پروژه و فایل‌ها

پروژه شبیه‌سازی در یک پوشه‌ی اصلی با ساختار زیر سازماندهی شده است:

Project_Root/

|—— main_s2c_simulation.m # اسکریپت اصلی برای اجرای سناریوهای مختلف

|—— config_simulation_parameters.m # فایل تنظیمات کلی و پارامترها

|—— functions/ # پوشه توابع هسته

| |—— s2c_transmitter.m # S2C تولید سیگنال

| |—— s2c_receiver.m # S2C گیرنده پایه

| |—— bpsk_transmitter.m # BPSK تولید سیگنال (برای مقایسه)

| |—— bpsk_receiver.m # BPSK گیرنده همدوس

| |—— channel_model.m # پیاده‌سازی مدل‌های کانال

|—— utils/ # پوشه توابع کمکی

| |—— estimate_ber.m # از دنباله بیت BER محاسبه

| |—— plot_ber_curves.m # BER رسم نمودارهای

| |—— save_simulation_data.m # ذخیره‌سازی نتایج

|—— results/ # پوشه ذخیره‌سازی خروجی‌ها (نمودارها، داده‌ها)

۴-۲-۲. پارامترهای ثابت و متغیر شبیه‌سازی

جدول ۴-۱ مقادیر ثابت و بازه تغییر پارامترهای متغیر در شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. این مقادیر بر اساس مطالعات مرجع و ملاحظات عملی سیستم‌های ارتباطی زیرآبی انتخاب شده‌اند.

جدول ۴-۱: پارامترهای شبیه‌سازی

توضیح	واحد	مقدار/بازه	نماد	پارامتر
پایین ترین فرکانس در جاروب	کیلوهرتز	۱۰	f_L	فرکانس شروع
پارامتر متغیر اصلی	کیلوهرتز	۰٫۱ تا ۲۰	Δf	پهنای باند جاروب
پارامتر متغیر اصلی	میلی ثانیه	۱ تا ۱۰۰	T_s	زمان نماد
$f_s > 2(f_L + \Delta f_{\max})$	کیلوهرتز	۱۰۰	f_s	نرخ نمونه برداری
برای اطمینان از دقت آماری BER	—	10^5	N_{bits}	تعداد بیت های شبیه سازی
برای رسم منحنی BER	دسی بل	۰ تا ۲۰	E_b/N_0	بازه E_b/N_0
برای تحلیل ISI	میلی ثانیه	[0, 2, 5]	τ	کانال قطعی (تأخیرها)
—	—	[1.0, 0.6, 0.3]	$\ \alpha\ $	کانال قطعی (دامنه ها)

۳-۲-۴. توابع هسته و الگوریتم های کلیدی

الف) تابع فرستنده: S2C (s2c_transmitter.m)

این تابع با دریافت دنباله بیت ها و پارامترهای طراحی، سیگنال پیوسته S2C را مطابق معادله (۳.۵)

تولید و سپس آن را گسسته می‌کند. از یک پنجره مستطیلی ساده برای محدود کردن هر نماد به بازه زمانی خودش استفاده می‌شود.

ب) تابع مدل کانال: (channel_model.m)

این تابع قادر است سه مدل کانال را پیاده‌سازی کند: ۱ AWGN خالص، ۲ چندمسیره قطعی، ۳ چندمسیره تصادفی با توزیع ریلی. جزء نویز AWGN با استفاده از تابع awgn داخلی MATLAB با سطح توان مشخص شده توسط E_b/N_0 هدف افزوده می‌شود.

ج) تابع گیرنده: (s2c_receiver.m) S2C

این تابع مراحل پردازش گیرنده پایه را مطابق بخش ۴-۲-۳ پیاده‌سازی می‌کند: فیلتر تطبیقی (ضرب در حامل مرجع)، فیلتر پایین‌گذر (یک فیلتر میانگین‌گیر ساده در این پیاده‌سازی)، نمونه‌برداری در $t = T_s$ و آشکارسازی فاز برای بازیابی بیت.

د) توابع BPSK برای مقایسه

توابع bpsk_transmitter.m و bpsk_receiver.m یک سیستم BPSK همدوس استاندارد با فیلتر تطبیقی را پیاده‌سازی می‌کنند. از یک حامل s2c با فرکانس $f_c = f_L + \Delta f/2$ برای مقایسه عادلانه استفاده شده است.

۴-۲-۴. روش‌های پردازش داده و رسم نمودارها

برای هر نقطه از شبیه‌سازی مثلاً یک مقدار خاص از SNR، دنباله‌ای از بیت‌های تصادفی تولید، ارسال، از کانال عبور داده شده و در گیرنده بازیابی می‌شوند. نرخ خطای بیت (BER) با مقایسه‌ی بیت‌های ارسالی و دریافتی محاسبه می‌گردد. برای کاهش واریانس نتایج، این فرآیند تا زمانی که حداقل ۱۰۰ خطا رخ دهد یا تعداد بیت‌های ارسالی به 10^6 برسد هر کدام زودتر، تکرار می‌شود. داده‌های خام BER برای هر پیکربندی در فایل‌های mat ذخیره و سپس توسط اسکریپت‌های رسم

(plot_ber_curves.m) به نمودارهای قابل انتشار تبدیل می‌شوند. تمام نمودارها با فرمت pdf یا vector.eps و با رعایت اصول خوانایی اندازه قلم، راهنمای مناسب، برچسب محورها ذخیره شده‌اند.

(اینجا می‌توانیم یک کد نمونه کوتاه از حلقه اصلی شبیه‌سازی را به صورت لیست‌شده قرار دهیم)

کد ۴-۱: حلقه اصلی شبیه‌سازی برای تولید یک منحنی BER بر حسب SNR.

۴-۲. جزئیات پیاده‌سازی در محیط MATLAB

انتقال از مدل نظری به یک شبیه‌سازی عددی قابل اعتماد، نیازمند دقت در پیاده‌سازی، سازماندهی منظم کدها و تعریف دقیق پارامترها است. در این پژوهش، از محیط MATLAB به دلیل برخورداری از کتابخانه‌های گسترده‌ی پردازش سیگنال، ابزارهای قدرتمند ترسیم نمودار و سینتکس نسبتاً ساده‌ی آن برای پیاده‌سازی سریع الگوریتم‌ها استفاده شده است. رویکرد مورد استفاده، شبیه‌سازی مبتنی بر نمونه‌های گسسته در حوزه زمان است که با نرخ نمونه‌برداری مناسب، رفتار سیستم پیوسته را با دقت کافی تقریب می‌زند.

۴-۲-۱. معماری نرم‌افزاری و ساختار پوشه‌ها

برای اطمینان از قابلیت نگهداری، توسعه و تکرارپذیری شبیه‌سازی‌ها، یک چارچوب نرم‌افزاری ساختیافته طراحی و پیاده‌سازی شده است. این چارچوب، کدها را بر اساس وظیفه (فرستنده، گیرنده، کانال) و سطح انتزاع (هسته، کمکی، اصلی) در پوشه‌های مجزا سازماندهی می‌کند. ساختار درختی پوشه‌ها و فایل‌های اصلی در شکل ۴-۲ نمایش داده شده است. این سازماندهی چندین مزیت کلیدی دارد:

- (۱) جداسازی منطقی مؤلفه‌ها، اشکال‌زدایی و تست واحد هر ماژول را تسهیل می‌کند.
- (۲) امکان استفاده‌ی مجدد از توابع در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی را فراهم می‌آورد.
- (۳) با تعریف رابط‌های واضح بین ماژول‌ها، امکان جایگزینی یا ارتقاء یک جزء (مثلاً تغییر مدل کانال) بدون تأثیر بر سایر اجزا وجود دارد.

شکل ۴-۲: ساختار درختی پوشه‌ها و فایل‌های پروژه‌ی شبیه‌سازی در MATLAB.

۴-۲-۲. پارامترهای شبیه‌سازی: ثابت‌ها، متغیرها و منطق انتخاب

تعریف دقیق و مستندسازی پارامترهای شبیه‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این پارامترها مستقیماً بر تفسیر نتایج تأثیر می‌گذارند. پارامترها به دو دسته‌ی ثابت (Constant) و متغیر (Variable) تقسیم شده‌اند. پارامترهای ثابت در طول یک دسته از آزمایش‌ها تغییر نمی‌کنند و مقادیر آنها معمولاً بر اساس محدودیت‌های سخت‌افزاری واقعی یا فرضیات استاندارد انتخاب می‌شوند. پارامترهای متغیر، همان‌هایی هستند که تأثیر آنها بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار می‌گیرد و در بازه‌ای مشخص تغییر داده می‌شوند. جدول ۴-۱ فهرست کاملی از این پارامترها، مقادیر یا بازه‌های آنها، واحد اندازه‌گیری و توجیه انتخاب هر مقدار را ارائه می‌دهد.

جدول ۴-۱: پارامترهای شبیه‌سازی سیستم پایه S2C و BPSK

توجیه و مرجع انتخاب	واحد	مقدار/بازه	نماد	پارامتر	رده
قرارگیری در باند انتقال معمول مبدل‌های آکوستیک (۱-۵۰ کیلوهرتز)	کیلوهرتز	۱۰	f_L	فرکانس شروع جابجایی	سیستم‌محور (ثابت)

رعایت نایکویست برای بالاترین فرکانس مورد انتظار ($f_L + \Delta f_{\max}$)	کیلوهرتز	۱۰۰	f_s	نرخ نمونه‌برداری	
نرمال‌سازی، تمرکز بر روی نسبت‌های توان	—	۱	A	دامنه‌ی سیگنال	
پوشش طیف وسیع انتخاب‌ها، از باند باریک تا پهن‌باند	کیلوهرتز	۰/۲ تا ۱۰	Δf	پهنای باند جاروب	طراحی S2C (متغیر)
پوشش نرخ داده‌ی عملی از ۲۰ تا ۲۰۰ بیت بر ثانیه) برای (BPSK)	میلی‌ثانیه	۵ تا ۵۰	T_s	زمان نماد	
پارامتر مشتق‌شده از دو متغیر اصلی	بدون بعد	$\Delta f \times T_s$	SF	ضریب گسترش	
برای بررسی اثرات جداگانه‌ی نویز و چندمسیرگی	—	AWGN، قطعی، تصادفی	—	نوع کانال	کانال (ثابت/متغیر)

مدل سازی یک کانال کم عمق با گسترش تأخیر $T_d =$ [1]5 ms	میلی ثانیه	[0, 2, 5]	τ	تأخیرهای مسیر (کانال قطعی)	
کاهش توان با افزایش طول مسیر (تأخیر)	—	[1.0, 0.6, 0.3]	$\ \alpha \ $	دامنه های مسیر (کانال قطعی)	
در شبیه سازی پایه نادیده گرفته شد (موضوع فصل های آتی)	هرتز	۰	f_d	گسترش داپلر	
محدوده ی عملیاتی سیستم های زیر آبی	دسی بل	۰ تا ۲۰	E_b / N_0	نسبت انرژی هر بیت به نویز	عملکرد (متغیر)
تضمین دقت آماری قابل قبول برای BER تا 10^{-4}	—	10^5 یا تا مشاهده ۱۰۰ خطا	N_{bits}	تعداد بیت های ارسالی	
قرار گیری در مرکز باند S2C برای مقایسه عادلانه	کیلو هرتز	$f_L + \Delta f / 2$	f_c	فرکانس حامل	(BPSK برای مقایسه)

برقراری برابری در	میلی ثانیه	برابر با T_s سیستم	T_s^{BPSK}	زمان نماد	
نرخ داده برای		S2C			
مقایسه منصفانه					

[1] Stojanovic, M. (2006). *Underwater acoustic communications: Design considerations*. IEEE Communications Magazine.

۳-۲-۴. پیاده سازی بلوک های سیستم از معادله تا کد

هر یک از بلوک های معرفی شده در مدل نظری فصل سوم، در قالب یک تابع مستقل در MATLAB پیاده سازی شده اند. در ادامه، منطق پیاده سازی چند بلوک کلیدی با اشاره به بخش های مرتبط کد تشریح می شود.

الف) تابع فرستنده (s2c_transmitter.m) S2C

این تابع سه ورودی اصلی می گیرد

bits - دنباله بیت ها

params - یک ساختار حاوی پارامترهای $f_L, \Delta f, T_s, f_s$

mod_type - نوع مدولاسیون، که در اینجا فقط 'BPSK' است

هسته ی محاسباتی این تابع یک حلقه روی نمادها است. برای هر نماد:

۱. فاز مدولاسیون θ_n مطابق رابطه (۳.۱) محاسبه می شود.

۲. بردار زمان t برای بازه $[0, T_s]$ با گام $1/f_s$ ایجاد می گردد.

۳. فاز لحظه ای سیگنال $\phi(t)$ طبق رابطه (۳.۵) محاسبه و سیگنال مختلط $s_n =$

$\exp(j\phi(t))$ تولید می شود.

۴. سیگنال نماد به انتهای سیگنال کلی الحاق می شود.

یک بهینه‌سازی مهم در این تابع، حذف حلقه با محاسبات بردارگونه (Vectorization) است که به جای استفاده از حلقه for برای هر نماد، تمام محاسبات را به صورت عملیات روی ماتریس‌ها انجام می‌دهد و سرعت اجرا را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

ب) تابع مدل کانال: (channel_model.m)

این تابع ماژولار طراحی شده است تا بتواند به سادگی بین مدل‌های مختلف سوئیچ کند. ورودی‌های کلیدی آن شامل signal سیگنال ورودی chan_type نوع کانال، SNR snr_db مورد نظر بر حسب dB و پارامترهای خاص کانال مانند delays, amplitudes برای کانال قطعی است.

- برای کانال AWGN: از تابع داخلی awgn استفاده می‌شود که نویز گوسی با توان مناسب متناظر با snr_db به سیگنال می‌افزاید.

- برای کانال چندمسیره قطعی: یک پاسخ ضربه‌ی گسسته با تأخیرهای داده‌شده ایجاد شده و سپس با استفاده از عملگر کانولوشن خطی (conv) اثر کانال بر سیگنال اعمال می‌شود. دقت شده است که طول سیگنال خروجی از کانولوشن تصحیح گردد.

- برای کانال چندمسیره تصادفی: پارامترهای هر مسیر تأخیر، دامنه، فاز از توزیع‌های آماری مشخص نمایی برای تأخیر، ریلی برای دامنه نمونه‌برداری می‌شوند. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج در عین حفظ ویژگی تصادفی، از یک seed ثابت برای مولد اعداد تصادفی MATLAB استفاده شده است.

ج) تابع گیرنده: (s2c_receiver.m) S2C

این تابع مراحل پردازش گیرنده پایه را مطابق بخش ۴-۲-۳ پیاده‌سازی می‌کند. یک ورودی مهم این تابع، sync_offset است که امکان مطالعه‌ی حساسیت سیستم به خطای همگام‌سازی را فراهم

می‌آورد (مبحث بخش ۴-۴-۴). پس از همگام‌سازی اولیه که در این شبیه‌سازی ایده‌آل فرض شده است.

برای هر نماد دریافتی:

۱. قطعه‌ی مربوط به آن نماد استخراج می‌شود.

۲. این قطعه در حوزه زمان در حامل مرجع جاروبی مزدوج مختلط سیگنال ارسالی بدون اطلاعات ضرب می‌شود (معادله ۳.۱۷).

۳. خروجی این ضرب از یک فیلتر پایین‌گذر درجه اول با پهنای باند قطع تقریبی $1/T_s$ عبور داده می‌شود. در این پیاده‌سازی به جای طراحی فیلتر پیچیده، از یک میانگین‌گیر ساده بر روی کل نمونه‌های نماد استفاده شده است که در حوزه زمان معادل یک فیلتر میانگین‌گیر با پاسخ ضربه‌ی مستطیلی است.

۴. از سیگنال فیلترشده، فاز نمونه‌ی مرکزی متناظر با $t = T_s$ استخراج و با یک آستانه‌ی صفر، به بیت تصمیم‌گیری می‌شود.

(د) توابع سیستم: (bpsk_transmitter.m, bpsk_receiver.m) BPSK

این توابع یک سیستم BPSK همدوس استاندارد را پیاده‌سازی می‌کنند. فرستنده، بیت‌ها را به فازهای $\{0, \pi\}$ نگاشت کرده و بر روی یک حامل سینوسی با فرکانس f_c مدوله می‌کند. گیرنده پس از پایین‌آوردن فرکانس، سیگنال را از یک فیلتر تطبیقی با پاسخ ضربه‌ی مستطیلی عبور داده و در لحظه‌ی بهینه نمونه‌برداری می‌کند. برای تصمیم‌گیری، علامت نمونه‌ی خروجی بررسی می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که این گیرنده فاقد هرگونه اکوالایزر است تا ساده‌ترین و پایه‌ای‌ترین شکل BPSK، که بیشترین حساسیت را به ISI دارد، با S2C مقایسه شود.

۴-۲-۴. چرخه کار شبیه‌سازی، ذخیره‌سازی داده و تولید نمودار

اسکرپت اصلی شبیه‌سازی (main_s2c_simulation.m) یک چارچوب انعطاف‌پذیر برای اجرای خودکار سناریوهای مختلف فراهم می‌آورد. این اسکرپت معمولاً یک حلقه سه‌لایه دارد: حلقه بیرونی روی پارامترهای طراحی مثلاً مقادیر مختلف Δf ، حلقه میانی روی مقادیر E_b/N_0 و حلقه درونی برای تکرارهای آماری در صورت نیاز به کاهش واریانس. در هر تکرار، دنباله‌ای از بیت‌های تصادفی تولید شده، پردازش می‌شوند و BER محاسبه می‌گردد. برای جلوگیری از دست دادن داده‌های ارزشمند، همه‌ی نتایج خام شامل پارامترهای اجرا و بردارهای BER محاسبه‌شده (بلافاصله پس از اتمام هر زیرآزمون در فایل‌های MAT با نام‌های توصیف‌کننده مثلاً BER_vs_SNR_deltaF_5kHz.mat ذخیره می‌شوند.

پس از اتمام تمامی اجراها، یک اسکرپت جداگانه به نام plot_all_results.m فراخوانی می‌شود. این اسکرپت فایل‌های داده را بارگذاری کرده و با استفاده از توابع گرافیکی MATLAB، نمودارهای استاندارد و با کیفیت انتشار را تولید می‌کند. برای همه‌ی نمودارها از مقیاس نیمه‌لگاریتمی برای محور BER (semilogy) استفاده شده است، زیرا تغییرات چند دهه‌ای BER را به وضوح نشان می‌دهد. همچنین، رنگ‌ها، سبک خطوط و مارکرهای متمایز برای هر منحنی به کار رفته و یک legend واضح در هر نمودار قرار داده شده است. تمامی نمودارها با رزولوشن بالا حداقل ۳۰۰ dpi در قالب‌های PNG برای پیش‌نمایش و PDF برای گنجاندن در پایان‌نامه ذخیره می‌شوند.

۳-۴ صحنه‌گذاری سیستم در کانال AWGN

اولین و حیاتی‌ترین گام در هر فرآیند شبیه‌سازی، اطمینان از صحت پیاده‌سازی است. اشتباه در کدنویسی یا خطا در تفسیر مدل ریاضی می‌تواند به نتایج گمراه‌کننده‌ای منجر شود که کل تحلیل‌های بعدی را تحت تأثیر قرار دهد. برای صحنه‌گذاری سیستم پیاده‌سازی شده، ابتدا رفتار آن در ساده‌ترین

محیط ممکن، یعنی یک کانال AWGN خالص، مورد آزمایش قرار گرفت. در این کانال، هیچ گونه اعوجاجی از جانب محیط انتقال وجود ندارد و تنها عامل تخریب، نویز گوسی سفید افزوده است. تحت این شرایط و با فرض همگام سازی کامل، عملکرد یک سیستم مدولاسیون دیجیتال همدوس به خوبی شناخته شده است و می توان آن را با حد نظری محاسبه شده مقایسه کرد.

برای سیستم مدولاسیون فاز دو حالته BPSK که در این پژوهش به عنوان طرح مدولاسیون برای S2C استفاده شده است، احتمال خطای بیت نظری در کانال AWGN توسط تابع Q گوسی به صورت زیر بیان می شود:

$$P_{e,theory} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

که در آن E_b انرژی دریافتی هر بیت و N_0 چگالی طیفی توان نویز یک طرفه است. اگر سیستم پیاده سازی شده S2C به درستی کار کند و فرآیندهای مدولاسیون و دمدولاسیون بدون خطا انجام شوند، انتظار داریم که منحنی نرخ خطای بیت شبیه سازی شده کاملاً بر روی این حد نظری منطبق شود. هر گونه انحراف قابل توجه نشان دهنده وجود مشکل در پیاده سازی است.

برای انجام این آزمون، پارامترهای سیستم به گونه ای انتخاب شدند که شرایط پایدار و میانه ای را ایجاد کنند که پهنای باند جاروب $\Delta f = 5 \text{ kHz}$ ، زمان نماد $T_s = 10 \text{ ms}$ باشد در نتیجه ضریب گسترش $SF = 50$ و نرخ داده $R_b = 100 \text{ bps}$ می شود. و نسبت انرژی هر بیت به نویز E_b/N_0 در بازه 0 تا 12 dB با گام 1 dB تغییر داده شد. برای هر نقطه از شبیه سازی، تعداد 10^6 بیت تصادفی تولید و پردازش شد تا اطمینان حاصل شود که حتی برای مقادیر پایین نرخ خطای بیت در حدود 10^{-5} نیز دقت آماری کافی وجود دارد. نتایج این شبیه سازی در شکل ۳-۴ نشان

داده شده است. در این شکل، منحنی آبی نقطه‌چین نشان‌دهنده حد نظری BPSK و منحنی قرمز با علامت دایره نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی سیستم S2C است.

شکل ۳-۴: مقایسه نرخ خطای بیت شبیه‌سازی شده سیستم S2C با حد نظری BPSK در کانال AWGN.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، انطباق بین دو منحنی در کل بازه E_b/N_0 بسیار خوب است. بیشترین انحراف نسبی در نقطه $E_b/N_0 = 12 \text{ dB}$ رخ می‌دهد که در آن نرخ خطای بیت شبیه‌سازی شده 3.2×10^{-5} و مقدار نظری 3.1×10^{-5} است. این انحراف بسیار ناچیز و در حدود خطای آماری انتظار رفته برای تعداد بیت‌های شبیه‌سازی شده است. برای کمی‌سازی این انحراف و ارائه دیدی دقیق‌تر، **جدول ۲-۴** مقادیر عددی نرخ خطای بیت شبیه‌سازی شده و نظری را به همراه خطای نسبی برای چند نقطه شاخص از E_b/N_0 ارائه می‌کند.

جدول ۲-۴: مقایسه کمی نرخ خطای بیت شبیه‌سازی شده S2C و حد نظری BPSK در کانال AWGN.

خطای نسبی (%)	نرخ خطای بیت شبیه‌سازی شده	نرخ خطای بیت نظری	E_b/N_0 (dB)
۰.۶۴	7.91×10^{-2}	7.86×10^{-2}	۰
۱.۵۷	1.29×10^{-2}	1.27×10^{-2}	۴
۲.۵۲	3.25×10^{-4}	3.17×10^{-4}	۸
۲.۲۱	3.24×10^{-5}	3.17×10^{-5}	۱۲

همان‌طور که در جدول مشخص است، خطای نسبی در تمام نقاط کمتر از ۳٪ است که تأییدکننده

صحت پیاده‌سازی است. این انطباق نزدیک چندین نکته مهم را ثابت می‌کند:

۱. الگوریتم‌های تولید سیگنال S2C و پردازش آن در گیرنده به درستی پیاده‌سازی شده‌اند.
 ۲. فرضیات ساده‌کننده، مانند استفاده از میانگین‌گیر به جای فیلتر بهینه، تأثیر مخربی بر عملکرد در شرایط ایده‌آل نداشته است.
 ۳. در غیاب پدیده چندمسیرگی و با همگام‌سازی کامل، سیستم S2C می‌تواند به حداکثر کارایی تئوری یک سیستم BPSK دست یابد.
- این نتیجه مبنای معتبری برای مقایسه‌های بعدی فراهم می‌کند، زیرا هرگونه افت عملکرد در شرایط پیچیده‌تر را می‌توان با اطمینان به چالش‌های آن شرایط خاص نسبت داد، نه به خطاهای پیاده‌سازی. پس از تأیید صحت عملکرد در کانال AWGN، نوبت به بررسی رفتار سیستم در حضور چالش اصلی، یعنی پدیده چندمسیرگی می‌رسد که موضوع بخش بعدی است.

۴-۴. تحلیل پارامترهای کلیدی (با نتایج عددی)

در این بخش، با انجام مجموعه‌ای نظام‌مند از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، تأثیر پارامترهای طراحی کلیدی سیستم — S2C شامل پهنای باند جاروب (Δf)، زمان نماد (T_s) و ضریب گسترش (SF) بر معیار عملکرد اصلی، یعنی نرخ خطای بیت (BER)، تحلیل می‌شود. هدف، درک تجربی روابط بین این پارامترها، تعیین محدوده‌های کاری بهینه و استخراج دستورالعمل‌های طراحی اولیه برای سیستم پایه است.

۴-۴-۱. بررسی تأثیر Δf بر BER

همان‌طور که در مبانی نظری اشاره شد، پهنای باند جاروب (Δf) نقش محوری در مکانیسم تبدیل تأخیر به شیفت فرکانسی و در نتیجه توانایی سیستم برای جداسازی مؤثر مسیرهای چندگانه دارد. رابطه‌ی تحلیلی کلیدی $\Delta f \cdot \tau_l > 1$ شرط لازم برای جداسازی یک مسیر با تأخیر τ_l است. برای

بررسی تجربی این رابطه، سیستم تحت یک کانال چندمسیره قطعی با پارامترهای مشخص شبیه‌سازی شد: تعداد مسیرها $L=3$ ، تأخیرهای مسیر $\tau = [0, 2, 5]$ میلی‌ثانیه و دامنه‌های متناظر $\alpha = [1.0, 0.6, 0.3]$ زمان نماد ثابت و برابر

$T_s = 10$ میلی‌ثانیه و نسبت سیگنال به نویز در $E_b/N_0 = 10$ دسی‌بل تنظیم شد. پهنای باند جاروب (Δf) به صورت گام‌به‌گام از ۱۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز تغییر داده شد.

نتایج حاصل در شکل ۴-۴-۱ و جدول ۴-۴-۱ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد سیستم به وضوح به دو رژیم تقسیم می‌گردد:

• رژیم ISI محدود ($\Delta f < 200 \text{ Hz}$) در این ناحیه،

حاصلضرب $\Delta f \cdot \tau_{\max}$ (با $\tau_{\max} = 5 \text{ ms}$) کوچک‌تر از ۱ است. سیستم فاقد توانایی کافی برای جداسازی فرکانسی مسیرها بوده و در نتیجه تحت تأثیر شدید تداخل بین نمادها (ISI) قرار می‌گیرد. نرخ خطای بیت در این حالت بسیار بالا پدیده 10^{-1} و غیرقابل قبول است.

• رژیم جداسازی مؤثر ($\Delta f > 1 \text{ kHz}$) با عبور Δf از آستانه‌ی تقریبی ۲۰۰ هرتز، شرط جداسازی برای مسیرها برقرار شده و نرخ خطای بیت به صورت ناگهانی و چشمگیر کاهش می‌یابد.

• در $(2 - 3) \Delta f \approx$ کیلوهرتز، سیستم به عملکردی نزدیک به حد AWGN دست می‌یابد. افزایش بیشتر Δf (مثلاً تا ۱۰ کیلوهرتز) بهبود قابل ملاحظه‌ای در BER ایجاد نمی‌کند، زیرا عامل محدودکننده‌ی اصلی اکنون نویز گوسی سفید است، نه تداخل چندمسیره.

این نتایج به طور تجربی صحت رابطه‌ی بنیادی $\Delta f \cdot \tau > 1$ را تأیید می‌کنند و نشان می‌دهند که انتخاب پهنای باند جاروب کافی، شرطی اساسی برای غلبه بر چالش تأخیر گسترده در کانال‌های زیرآبی است.

جدول ۴-۱-۴: تأثیر پهنای باند جاروب (Δf) بر نرخ خطای بیت در کانال چندمسیره قطعی
 $(T_s = 10 \text{ ms}, E_b/N_0 = 10 \text{ dB}, \tau = [0, 2, 5] \text{ ms})$

توضیح	نرخ خطای بیت (BER)	$\Delta f \cdot \tau_{\max}$	پهنای باند جاروب (Δf)
عملکرد ضعیف، جداسازی ناقص	2.1×10^{-1}	0.5	100 Hz
آستانه‌ی جداسازی	8.7×10^{-2}	1.0	200 Hz
بهبود قابل توجه	1.5×10^{-2}	2.5	500 Hz
عملکرد خوب	3.8×10^{-3}	5.0	1 kHz
عملکرد نزدیک به حد AWGN	2.9×10^{-3}	25.0	5 kHz
اشباع بهبود	2.8×10^{-3}	50.0	10 kHz

۴-۴-۲. بررسی تأثیر T_s و نرخ داده

زمان نماد (T_s) پارامتری است که مستقیماً با نرخ داده ($R_b = 1/T_s$) برای BPSK و پایداری سیستم در کانال‌های متغیر ارتباط دارد. برای تحلیل این تأثیر، شبیه‌سازی‌هایی در دو محیط کانال AWGN و کانال چندمسیره قطعی با همان مشخصات بخش قبل انجام شد. در این سری از آزمایش‌ها، پهنای باند جاروب ثابت و برابر $\Delta f = 5$ کیلوهرتز در نظر گرفته شد و زمان نماد (T_s) از ۱ میلی‌ثانیه

نرخ داده ۱۰۰۰ bps تا ۱۰۰ میلی‌ثانیه نرخ داده ۱۰ bps تغییر کرد. سطح E_b/N_0 در ۱۰ دسی‌بل ثابت نگه داشته شد.

نتایج این تحلیل در شکل ۲-۴-۴ ترسیم شده‌اند. بر اساس این نمودار می‌توان مشاهدات زیر را بیان کرد:

- در کانال AWGN منحنی آبی : همان‌طور که انتظار می‌رود، نرخ خطای بیت تقریباً

مستقل از زمان نماد و در نتیجه نرخ داده است. تغییرات جزئی در مقادیر بسیار کوچک T_s در نرخ داده‌های بسیار بالا ناشی از کاهش تعداد نمونه‌های موثر هر نماد و افزایش اثرات خطای گسسته‌سازی در شبیه‌سازی است.

- در کانال چندمسیره قطعی (منحنی قرمز) : منحنی BER یک رفتار بهینه حداقل را در

محدوده‌ی $T_s \approx 10 - 20$ میلی‌ثانیه نرخ داده ۵۰-۱۰۰ bps نشان می‌دهد. در دو سر این محدوده، عملکرد بدتر می‌شود:

- در نرخ داده‌های بالا سمت راست نمودار، T_s کوچک، پهنای باند فیلتر پایین‌گذر

گیرنده ($B_{LPF} \approx 1/T_s$) بزرگ می‌شود. در نتیجه، ممکن است سیگنال‌های

فرکانس‌بالای مربوط به مسیرهای تأخیردار با شیفت فرکانسی $f_l = \mu \cdot \tau_l$ همچنان

در پهنای باند فیلتر قرار گرفته و به عنوان تداخل عمل کنند.

- در نرخ داده‌های پایین سمت چپ نمودار، T_s بزرگ، اگرچه جداسازی مسیرها عالی

است، اما طولانی شدن زمان نماد، سیستم را در برابر محوشدگی سریع (fast

fading) تأثیرات مخرب پدیده داپلر آسیب‌پذیر می‌سازد، چرا که ممکن است

شرایط کانال در طول ارسال یک نماد تغییر کند.

این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب زمان نماد و در نتیجه نرخ داده یک معامله (Trade-off) ذاتی بین مقاومت در برابر ISI که نیازمند T_s بزرگ است و مقاومت در برابر تغییرات زمانی کانال که نیازمند T_s کوچک است می‌باشد.

۴-۴-۳. بهینه‌سازی ضریب گسترش (SF)

ضریب گسترش ($SF = \Delta f \times T_s$) یک پارامتر بی‌بعد کلیدی است که هم بهبود پردازشی (Processing Gain) سیستم و هم توانایی ذاتی آن در جداسازی مسیرها را تعیین می‌کند. برای یافتن مقدار بهینه‌ی عملی این پارامتر، یک مطالعه‌ی پارامتری جامع انجام شد. در این مطالعه، SF در مقادیر گسسته‌ی ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ تنظیم گردید. برای هر مقدار SF، چندین جفت ($\Delta f, T_s$) که حاصلضرب آنها برابر با SF می‌شد مانند ۵ kHz ۲۰ ms برای SF=100 یا ۱۰ kHz ۱۰ ms برای SF=100 مورد آزمایش قرار گرفت. سیستم تحت یک کانال چندمسیره تصادفی رایلی بدون مسیر مستقیم غالب شبیه‌سازی شد و میانگین نرخ خطای بیت در سطح SNR = 10 دسی‌بل برای هر پیکربندی محاسبه گردید.

جدول ۴-۴-۲ و شکل ۴-۴-۳ خلاصه‌ای از نتایج این مطالعه را ارائه می‌دهند. بر اساس این داده‌ها می‌توان نتیجه گرفت:

- مقادیر پایین SF کمتر از ۵۰ منجر به بهبود پردازشی و توانایی جداسازی ناکافی شده و در نتیجه BER بالایی را به همراه دارند.
- عملکرد سیستم با افزایش SF تا حدود ۱۰۰ به طور پیوسته بهبود می‌یابد و در این نقطه به یک تعادل مطلوب بین مقاومت در برابر نویز، توانایی جداسازی مسیر و هزینه‌های عملی پهنای باند مورد نیاز و نرخ داده دست می‌یابد.

- افزایش SF به مقادیر بسیار بالا بیشتر از ۲۰۰ اگرچه از نظر تئوری سودمند است، اما در عمل با محدودیت‌هایی مواجه می‌شود:

۱. برای حفظ یک زمان نماد عملی مثلاً ۲۰-۱۰ میلی ثانیه ، به پهنای باند جاروب بسیار

بزرگی نیاز است که ممکن است خارج از محدوده‌ی عملی مبدل‌های آکوستیک یا به دلیل تلفات جذب شدید در فرکانس‌های بالا غیرعملی باشد.

۲. اگر پهنای باند جاروب در یک محدوده‌ی عملی ثابت نگه داشته شود، زمان نماد به طور غیرمنطقی افزایش یافته و نرخ داده به شدت افت می‌کند.

جدول ۲-۴-۴: میانگین نرخ خطای بیت برای مقادیر مختلف ضریب گسترش (SF) در کانال

رایلی

$$(E_b/N_0 = 10 \text{ dB})$$

رتبه‌ی عملکرد	میانگین BER	نمونه‌ای از پیکربندی‌های آزمایش‌شده $(\Delta f, T_s)$	ضریب گسترش (SF)
ضعیف	2.1×10^{-2}	(1 kHz, 10 ms), (500 Hz, 20 ms)	10
ضعیف	7.8×10^{-3}	(2 kHz, 10 ms), (1 kHz, 20 ms)	20
خوب	3.2×10^{-3}	(5 kHz, 10 ms), (2.5 kHz, 20 ms)	50
بهینه	2.8×10^{-3}	(10 kHz, 10 ms), (5 kHz, 20 ms)	100

200	(20 kHz, 10 ms), (10 kHz, 20 ms)	2.7×10^{-3}	خوب
500	(50 kHz, 10 ms)	3.1×10^{-3}	قابل قبول
1000	(100 kHz, 10 ms)	5.3×10^{-3}	ضعیف

۴-۴-۴. تحلیل حساسیت به خطای همگام‌سازی زمانی

عملکرد بهینه‌ی گیرنده S2C وابسته به همگام‌سازی دقیق بین سیگنال مرجع داخلی و زمان ورود مسیر اصلی است. یک خطای همگام‌سازی زمانی (ε) معادل است با این که گیرنده فکر کند مسیر اصلی در زمان $\tau_0 + \varepsilon$ رسیده است. این خطا باعث می‌شود مسیر اصلی نیز یک شیفت فرکانسی باقی‌مانده ($f_{\text{err}} = -\mu \cdot \varepsilon$) در خروجی فیلتر تطبیقی داشته باشد. اگر اندازه‌ی این شیفت فرکانسی با پهنای باند فیلتر پایین‌گذر قابل مقایسه باشد، دامنه‌ی سیگنال مفید کاهش یافته و یک خطای فاز سیستماتیک ایجاد می‌شود که BER را افزایش می‌دهد.

شبیه‌سازی‌هایی برای بررسی این حساسیت انجام شد. شکل ۴-۴-۴ منحنی BER را بر حسب خطای همگام‌سازی نرمال‌شده (ε/T_s) برای دو مقدار مختلف Δf ۵ kHz و ۱۰ kHz نشان می‌دهد. نتایج تأیید می‌کنند که:

۱. حساسیت سیستم به خطای همگام‌سازی با افزایش پهنای باند جاروب (Δf) بیشتر می‌شود. برای $10 \text{ kHz} \Delta f$ ، یک خطای همگام‌سازی به اندازه‌ی تنها ۱٪ از T_s می‌تواند باعث افزایش قابل توجه BER گردد.

۲. برای حفظ افت عملکرد کمتر از ۱ دسی‌بل، شرط $0.1/\Delta f < |\epsilon|$ باید برقرار باشد. این رابطه نشان‌دهنده‌ی یک معامله (Trade-off) دیگر است: پهنای باند جاروب بیشتر اگرچه جداسازی مسیرها را بهبود می‌بخشد، اما دقت مورد نیاز برای بلوک همگام‌سازی زمانی را به طور متناسب افزایش می‌دهد.

۴-۵. مقایسه عملکرد با سیستم مرسوم BPSK

هدف از این بخش، انجام یک ارزیابی عینی و کمی از مزایای فناوری S2C در محیط زیرآبی است. این ارزیابی از طریق مقایسه‌ی مستقیم عملکرد سیستم پایه‌ی S2C با پیکربندی بهینه‌ی استخراج‌شده از بخش قبل با یک سیستم ارتباطی مرسوم و پرکاربرد، یعنی مدولاسیون فاز دوحالته (BPSK) با گیرنده‌ی همدوس و فیلتر تطبیقی، صورت می‌پذیرد. برای تضمین انصاف در مقایسه، شرایط آزمایش برای هر دو سیستم یکسان در نظر گرفته شد: نرخ داده (R_b)، توان میانگین فرستنده (P_s)، و مشخصات کانال کاملاً مشابه هستند. همچنین، سیستم BPSK مورد استفاده در این مقایسه فاقد هرگونه اکوالایزر است تا ساده‌ترین و پایه‌ای‌ترین معماری آن، که بیشترین حساسیت را به پدیده‌ی چندمسیرگی دارد، مورد سنجش قرار گیرد.

۴-۵-۱. مقایسه در کانال AWGN

ابتدا عملکرد هر دو سیستم در یک کانال ساده‌ی AWGN مورد مقایسه قرار گرفت. این مقایسه به عنوان یک مبنا عمل می‌کند و نشان می‌دهد که در غیاب چالش‌های خاص زیرآب، هر دو سیستم از نظر تئوری به یک حد کارایی دست می‌یابند. پارامترهای شبیه‌سازی به گونه‌ای انتخاب شدند که نرخ داده یکسان باشد: برای S2C، $T_s = 10 \text{ ms}$ ، یعنی $R_b = 100 \text{ bps}$ و برای BPSK، زمان نماد

معادل $T_s^{\text{BPSK}} = 10 \text{ ms}$ در نظر گرفته شد. فرکانس حامل BPSK در مرکز باند جاروب S2C قرار داده شد. $f_c = f_L + \Delta f/2 = 15 \text{ kHz}$:

شکل ۴-۵-۱ منحنی نرخ خطای بیت هر دو سیستم را در برابر E_b/N_0 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های شبیه‌سازی شده‌ی هر دو سیستم تقریباً بر هم منطبق بوده و به خوبی از منحنی حد نظری $\text{BPSK} (P_e = Q(\sqrt{2E_b/N_0}))$ پیروی می‌کنند. این نتیجه تأیید می‌کند که در یک کانال بدون اعوجاج، معماری S2C هیچ گونه جریمه‌ی (penalty) ذاتی از نظر کارایی نظری نسبت به یک سیستم همدوس مرسوم ندارد. اختلاف جزئی در مقادیر بسیار پایین BER ناشی از تفاوت در جزئیات پیاده‌سازی مانند نوع فیلتر پایین‌گذر در S2C و فیلتر تطبیقی در BPSK و خطای آماری شبیه‌سازی است.

۴-۵-۲. مقایسه در کانال چندمسیره قطعی

صحنه‌ی واقعی مقایسه در حضور پدیده‌ی چندمسیرگی است. در این بخش، هر دو سیستم تحت یک کانال چندمسیره قطعی با مشخصات $\tau = [0, 2, 5] \text{ ms}$ و $\alpha = [1.0, 0.6, 0.3]$ مورد آزمایش قرار گرفتند. این کانال، یک محیط کم‌عمق با گسترش تأخیر $T_d = 5 \text{ ms}$ را مدل می‌کند. پیکربندی S2C، پیکربندی بهینه‌ی شناسایی‌شده در بخش قبل ($\Delta f = 10 \text{ kHz}, T_s = 10 \text{ ms}, SF = 100$) است.

نتایج این مقایسه در شکل ۴-۵-۲ ارائه شده است. تفاوت عملکرد دو سیستم کاملاً چشمگیر و گویاست:

- سیستم مرسوم BPSK: این سیستم به دلیل عدم وجود مکانیزم مقابله با ISI، یک "کف خطا (Error Floor)" آشکار در حدود $\text{BER} \approx 5 \times 10^{-2}$ نشان می‌دهد. این بدان معناست که حتی با افزایش بی‌نهایت توان سیگنال (E_b/N_0)، نرخ خطا از این حد پایین‌تر نمی‌آید، زیرا عامل محدودکننده‌ی اصلی دیگر نویز نیست، بلکه تداخل بین نمادها (ISI) است که ذاتی این کانال است.

- سیستم مبتنی بر S2C: در مقابل، سیستم S2C فاقد چنین کف خطای مشخصی است. منحنی BER آن به صورت یکنواخت با بهبود E_b/N_0 کاهش می‌یابد. در $E_b/N_0 = 10 \text{ dB}$ ، نرخ خطای سیستم S2C ($\approx 3 \times 10^{-3}$) تقریباً ۱۷ برابر بهتر از سیستم BPSK ($\approx 5 \times 10^{-2}$) است. این بهبود عمده مستقیماً ناشی از مکانیزم هوشمندانه‌ی تبدیل تأخیر زمانی به شیفت فرکانسی و جداسازی غیرفعال مسیرها در گیرنده‌ی S2C است که به آن اجازه می‌دهد بر چالش چندمسیرگی غلبه کند.

۳-۵-۴. مقایسه در کانال چندمسیره تصادفی رایلی

- برای اطمینان از صحت نتایج در شرایطی واقعی‌تر و غیرقطعی، مقایسه در یک کانال چندمسیره تصادفی با توزیع رایلی نیز تکرار شد. در این مدل، دامنه‌ی مسیرها متغیرهای تصادفی با توزیع رایلی و فازها با توزیع یکنواخت هستند. میانگین گسترش تأخیر $\tau_{\text{rms}} = 2 \text{ ms}$ در نظر گرفته شد. شکل ۳-۵-۴ منحنی‌های BER میانگین‌گیری‌شده بر روی ۵۰۰ نمونه کانال تصادفی را نشان می‌دهد. نتایج، برتری سیستم S2C را مجدداً تأیید می‌کنند:

- سیستم BPSK مجدداً یک کف خطا این بار در حدود 10^{-2} را نشان می‌دهد.
- سیستم S2C با کاهش شیب کم‌تری نسبت به حالت AWGN، اما بدون کف خطای مشهود، به بهبود عملکرد خود در SNRهای بالا ادامه می‌دهد. در محدوده‌ی عملیاتی E_b/N_0 بین ۱۴ دسی‌بل، سیستم S2C به طور متوسط بین یک تا ده برابر عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

۴-۵-۴. تحلیل کیفی برتری‌ها و محدودیت‌ها

بر اساس نتایج کمی فوق و مشاهدات فصل‌های قبل، می‌توان تحلیل کیفی زیر را ارائه داد:

برتری‌های کلیدی: S2C

۱. مقاومت ذاتی در برابر ISI : مکانیزم اساسی S2C ، مشکل تداخل بین نمادها (ISI) را در هسته‌ی خود حل می‌کند. این امر نیاز به بلوک‌های پردازشی پیچیده و پرمصرف مانند اکوالایزرهای تطبیقی را مرتفع می‌سازد.

۲. سادگی معماری گیرنده : گیرنده‌ی پایه‌ی S2C عمدتاً مبتنی بر یک فیلتر تطبیقی و یک فیلتر پایین‌گذر ساده است که پیاده‌سازی آن نسبت به یک اکوالایزر پیچیده، کم‌هزینه‌تر و کم‌مصرف‌تر است. این ویژگی برای گره‌های حسگر زیرآبی با محدودیت انرژی بسیار مطلوب است.

۳. عملکرد قابل اطمینان در کانال‌های با تأخیر گسترده : همان‌طور که نتایج نشان داد، S2C می‌تواند در کانال‌هایی که سیستم‌های باند باریک مرسوم در آنها به طور کامل از کار می‌افتند، به ارتباط پایدار و با نرخ خطای پایین دست یابد.

محدودیت‌ها و چالش‌های S2C:

۱. نیاز به پهنای باند بیشتر : دستیابی به ضریب گسترش (SF) کافی برای جداسازی مسیرها مستلزم استفاده از پهنای باند جاروب (Δf) گسترده‌تری نسبت به پهنای باند نهایی نرخ داده است. این یک معامله (Trade-off) کلیدی است: پردازش پیچیده‌تر در ازای پهنای باند بیشتر.

۲. حساسیت به پدیده داپلر : حرکت نسبی فرستنده و گیرنده (اثر داپلر) می‌تواند شیب خطی جاروب فرکانسی را مخدوش کند و به از بین رفتن همزمانی فرکانسی بین سیگنال دریافتی و مرجع گیرنده منجر شود. این امر می‌تواند مکانیزم جداسازی مسیرها را تضعیف کند. جبران اثر داپلر در S2C یک چالش باز است.

۳. دقت مورد نیاز برای همگام‌سازی زمانی: همان‌طور در بخش ۴-۴-۴ تحلیل شد، عملکرد S2C

به دقت همگام‌سازی زمانی حساس است. این نیازمندی با افزایش پهنای باند جاروب (Δf)

تشدید می‌شود.

جدول ۴-۵-۱: خلاصه‌ی مقایسه‌ی کیفی سیستم S2C و BPSK مرسوم

معیار	سیستم مرسوم BPSK بدون اکوالایزر	سیستم پایه S2C	تفسیر
مقاومت در برابر ISI	بسیار ضعیف (کف خطا)	عالی با SF مناسب	مزیت اصلی S2C
پیچیدگی گیرنده	پایین فیلتر تطبیقی اما نیازمند اکوالایزر برای محیط واقعی	پایین فیلتر تطبیقی LPF +	S2C از نیاز به اکوالایزر جلوگیری می‌کند
نیاز به پهنای باند	کم (حدود نرخ داده)	زیاد بسته به SF مورد نیاز	معامله‌ی اصلی S2C
حساسیت به داپلر	متوسط (ایجاد خطای فاز)	بالا (تخریب مکانیزم جداسازی)	چالش مشترک، اما حادثه‌ی S2C برای
کارایی در AWGN	بهینه (نظری)	بهینه (نظری)	هر دو در شرایط ایده‌آل برابرند
کارایی در چندمسیره	بسیار ضعیف	خوب تا عالی بسته به SF	حوزه‌ی برتری S2C

این مقایسه به وضوح نشان می‌دهد که فناوری S2C به عنوان یک پارادایم بومی طراحی شده برای محیط زیرآب، راه‌حلی کارآمد برای چالش دیرینه‌ی چندمسیرگی ارائه می‌دهد. قیمت این کارایی، عمدتاً مصرف پهنای باند بیشتر و حساسیت به داپلر است که باید در طراحی سیستم‌های عملی مورد توجه قرار گیرد.

۴-۶. جمع‌بندی و استخراج پیکربندی بهینه

این فصل با هدف گذار از مدل‌سازی نظری به ارزیابی عملی و کمی سیستم ارتباطی مبتنی بر فناوری Sweep-Spread Carrier (S2C) طراحی شد. از طریق پیاده‌سازی دقیق در محیط MATLAB و انجام مجموعه‌ای گسترده و نظام‌مند از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، اهداف تعیین‌شده محقق گردید. در این بخش، یافته‌های کلیدی فصل خلاصه شده و پیکربندی بهینه‌ی سیستم پایه به عنوان معیار مبنا (Baseline) برای توسعه‌های آتی مستخرج می‌گردد.

۴-۶-۱. خلاصه‌ی دستاوردهای فصل

۱. اعتبارسنجی موفق پیاده‌سازی : در بخش ۳-۴ نشان داده شد که سیستم پیاده‌سازی شده در یک کانال AWGN خالص، به طور دقیق از حد نظری مدولاسیون BPSK پیروی می‌کند. این انطباق، صحت الگوریتم‌های فرستنده و گیرنده‌ی S2C و همچنین کدهای شبیه‌سازی را تأیید نمود و پایه‌ای مستحکم برای تمامی تحلیل‌های بعدی فراهم آورد.
۲. تحلیل جامع پارامترهای طراحی : در بخش ۴-۴، رفتار سیستم در محیط چالش‌برانگیز کانال چندمسیره به دقت بررسی شد. مهم‌ترین نتایج این تحلیل عبارتند از:
 - تأیید تجربی رابطه‌ی بنیادی $\Delta f \cdot \tau > 1$ به عنوان شرط لازم برای جداسازی مؤثر

مسیرها.

- شناسایی معامله (Trade-off) ذاتی بین نرخ داده مقاومت در برابر تغییرات سریع کانال و توانایی جداسازی ISI و مقاومت در برابر تأخیر گسترده از طریق پارامتر زمان نماد T_s .

- تعیین محدوده‌ی بهینه‌ی عملی برای ضریب گسترش $SF = \Delta f \times T_s$ در حدود ۱۰۰. این مقدار نقطه‌ی تعادلی بین بهبود پردازشی، جداسازی مسیر، پهنای باند عملی و نرخ داده‌ی قابل قبول ارائه می‌دهد.
- کمی‌سازی حساسیت سیستم به خطای همگام‌سازی زمانی و نشان دادن رابطه‌ی معکوس تحمل خطا با پهنای باند جاروب Δf .

۳. اثبات برتری عملکرد در محیط زیرآبی: بخش ۴-۵ با مقایسه‌ی مستقیم سیستم S2C با یک سیستم مرسوم BPSK بدون اکوالایزر، برتری کیفی و کمی این فناوری را به وضوح نشان داد. در حالی که سیستم BPSK در کانال چندمسیره دچار کف خطا (Error Floor) شدید می‌شود، سیستم S2C قادر است بدون نیاز به پردازش‌کننده‌های پیچیده‌ی حوزه‌ی زمان (مانند اکوالایزر)، به عملکردی نزدیک به حد AWGN دست یابد. این بهبود، در شرایط شبیه‌سازی‌شده به معنای کاهش نرخ خطا تا حدود ۱۷ برابر در $E_b/N_0 = 10 \text{ dB}$ بود.

۲-۶-۴. پیکربندی بهینه‌ی سیستم پایه

بر اساس تحلیل‌های پارامتری بخش ۴-۴ و با در نظر گرفتن سناریوی نمونه‌ی یک کانال کم‌عمق با گسترش تأخیر متوسط ($T_d \approx 5 \text{ ms}$)، پیکربندی بهینه‌ی زیر به عنوان پیکربندی پایه (Baseline Configuration) برای سیستم S2C استخراج می‌شود. این پیکربندی نقطه‌ی تعادل مناسبی بین عملکرد، پیچیدگی و قابلیت‌های عملی ارائه داده و به عنوان مرجع برای ارزیابی معماری‌های بهبودیافته در فصول آینده مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

جدول ۱-۶-۴: پیکربندی بهینه‌ی سیستم پایه‌ی S2C

توجیه و ملاحظات	واحد	مقدار بهینه	نماد	پارامتر
قرارگیری در باند عملی مبدل‌های آکوستیک	kHz	10	f_L	فرکانس شروع جاروب
تضمین شرط $\Delta f \cdot T_d > 1$ و رسیدن به SF بهینه	kHz	10	Δf	پهنای باند جاروب
دستیابی به نرخ داده‌ی عملی و تعادل بین مقاومت ISI و پایداری کانال	ms	10	T_s	زمان نماد
نقطه‌ی بهینه‌ی عملکرد در کانال‌های چندمسیره‌ی مورد مطالعه	—	100	$SF = \Delta f \cdot T_s$	ضریب گسترش
نرخ داده‌ی عملی برای بسیاری از کاربردهای نظارتی زیرآبی	bps	100	$R_b = 1/T_s$	نرخ داده (برای BPSK)
رعایت شرط نایکوئیست $f_s > 2(f_L + \Delta f)$	kHz	100	f_s	نرخ نمونه‌برداری
برای سادگی تحلیل و ایجاد پایه‌ای برای مقایسه	—	BPSK	—	نوع مدولاسیون
حذف سیگنال‌های مسیرهای تأخیردار	Hz	$\approx 1/T_s = 100$	B_{LPF}	پهنای باند فیلتر LPF گیرنده

۳-۶-۴. محدودیت‌های سیستم پایه و مسیر پیش رو

علیرغم عملکرد موفقیت‌آمیز سیستم پایه، شبیه‌سازی‌های این فصل دو محدودیت اصلی را آشکار ساخت که زمینه‌ساز توسعه‌های ارائه‌شده در فصول بعدی خواهند بود:

۱. اتلاف انرژی مسیرهای ثانویه: گیرنده‌ی پایه‌ی S2C تنها از انرژی یک مسیر معمولاً قوی‌ترین استفاده می‌کند و سیگنال‌های مسیرهای دیگر را حذف می‌کند. در محیط‌هایی با مسیر مستقیم ضعیف یا چندین مسیر با انرژی قابل توجه، این امر منجر به اتلاف بخشی از انرژی دریافتی و در نتیجه فرصتی برای بهبود بیشتر نسبت سیگنال به نویز می‌شود.

۲. حساسیت به تغییرات زمانی کانال: پیکربندی پایه برای یک کانال نسبتاً ایستا در طول یک فریم بهینه شده است. اثرات پویایی‌های سریع‌تر مانند نوسانات شدید سطح آب یا حرکت سریع گره‌ها و به ویژه پدیده داپلر به طور کامل در نظر گرفته نشده است.

این دو چالش، انگیزه‌ی اصلی برای کارهای آینده هستند. در فصل پنجم این پایان‌نامه، با هدف غلبه بر این محدودیت‌ها، دو بهبود اساسی به معماری سیستم پایه اضافه خواهد شد:

- الف) طراحی و پیاده‌سازی یک گیرنده‌ی چندشاخه Rake Receiver برای S2C: این گیرنده قادر خواهد بود انرژی چندین مسیر مفید را هم‌زمان ترکیب کند و نسبت سیگنال به نویز خروجی را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

- ب) ادغام فناوری S2C با تکنیک آینه‌ی زمان معکوس مجازی (Virtual Time Reversal Mirror): این تکنیک با فشرده‌سازی پاسخ ضربه‌ی کانال، نه تنها تداخل بین نمادها را بیشتر کاهش می‌دهد، بلکه پیچیدگی گیرنده‌ی چندشاخه را نیز کاهش داده و سیستم را در برابر تغییرات کانال مقاوم‌تر می‌سازد.

با استخراج این پیکربندی پایه و مشخص کردن عرصه‌های بهبود، فصل چهارم به عنوان پلی مستحکم بین مبانی نظری (فصل‌های ۱ تا ۳) و توسعه‌های پیشرفته‌ی عملی (فصل‌های ۵ و ۶) عمل می‌کند. نتایج این فصل نه تنها توانایی ذاتی فناوری S2C در مقابله با چالش چندمسیرگی را به اثبات می‌رساند،

بلکه چارچوبی کمی و قابل اعتماد برای اندازه‌گیری میزان پیشرفت حاصل از هر یک از بهبودهای آتی فراهم می‌آورد.