روش هم‌گاه‌سازی رقومی در مخابرات صوتی داده‌های زیر آب برد بلند (۱۰ کیلومتر) دریاهای کم‌عمق

عبدالخالق محمدیان دهزیری*[۱]، محسن معصومی[۲]

۱. گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز

۲. گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد جهرم

چکیده

در این مقاله یک روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) صوتی رقومی (آکوستیکی دیجیتال) مخابرات داده زیر آب، برای کاربرد در مخابرات صوتی بدون سیم دریاهای کم‌عمق، پیشنهاد و برای بردهای یک کیلومتر و ده کیلومتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ارائه این روش از مفهوم یا روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) سامانه تلویزیون و هم‌چنین از یک روش تجربی استفاده می‌گردد. در روش پیشنهادی این مقاله، سازوکاری در پاکت داده‌های ارسالی تعبیه می‌گردد که به کمک آن هم‌گاه‌ساز (سنکرون‌ساز) گیرنده، ابتدا بسته‌های ارسالی را (با دقت لازم و برخط) تشخیص می‌دهد و آشکارسازی صحیح بیت‌های دریافتی از محل دقیق شروع بیت‌های مدوله شده در طول زمان ارسال- دریافت (در روند تبادل اطلاعات) بر مبنای آن انجام می‌پذیرد. به دلیل ماهیت صوتی کال (کانال) مخابرات زیرآب و عدم انتشار امواج برقامغناطیس به درون آب، روش‌های معمول بیرون از آب (نظیر روش هم‌گاه‌سازی سامانه تلویزیون) برای کار در زیر آب جوابگو نیستند و لذا روش پیشنهادی مقاله (که از روش هم‌گاه‌سازی سامانه تلویزیون الهام گرفته است)، کار هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) مخابرات داده زیر آب را به طور مؤثر انجام می‌دهد. مشارکت اصلی مقاله، پیشنهاد یک پروتکل جدید هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) رقومی برای سامانه‌های مخابرات داده آب‌های کم‌عمق برد بلند (تا ده کیلومتر) مبتنی بر روش مذکور می‌باشد. به منظور ارزیابی روش و پروتکل پیشنهادی، یک مودم صوتی زیر آب اِف‌اِس‌کِی ردهٔ برد بلند (ده کیلومتر)، طراحی و پیاده‌سازی گردید که نتایج ارزیابی‌ها و مطالعات عملکردی نشان از اثربخشی روش پیشنهادی مقاله می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: مخابرات، صوتی، زیر آب، دریای کم‌عمق، هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی).

۱. مقدمه

کال (کانال) مخابراتی زیر آب از چند جنبه با کال (کانال) مخابراتی بیرون آب متفاوت است: امواج برقامغناطیسی بسامد بالا (باند بسامدی وی‌اِچ‌اِف[۱] و یو‌اِچ‌اِف[۲]) به دلیل تلفات انتشار، عملاً درون آب منتشر نمی‌شوند و انتشار امواج برقامغناطیسی بسامد پایین (اِل‌اِف[۳] و وی‌اِل‌اِف[۴]) با هزینه بسیار زیاد همراه است، بعنوان یک راه حل جایگزین، از امواج صوتی بجای امواج الکترومغناطیسی در زیر آب استفاده می‌شود که به نوبه خود باعث محدودیت پهنای باند در دسترس کال (کانال) مخابراتی زیر آب در محدوده ۱۰۰ الی ۲۰۰ کیلوهرتز می‌شود که بسیار کم‌تر از مقدار مشابه بیرون آب (محدوده مگاهرتز) می‌باشد [۱]. تفاوت دیگر کال (کانال) زیر آب به ماهیت صوتی و نوع چند مسیرگی کال (کانال) زیر آب (ناشی از انعکاسات سطح و کف دریا) بر می‌گردد که این موضوع نیز به نوبه خود کار مخابرات زیر آب را با مشکلات زیادی مواجه می‌سازد. وجود لایه‌های سطح و کف و تغییرات نیم‌رخ (پروفایل) سرعت صدا در دریا باعث می‌شوند پدیده چند مسیرگی زیر آب نسبت به بیرون آب پیچیده‌تر شود که باعث می‌شود عملکرد مخابرات رقومی (دیجیتال) زیر آب به شدت وابسته به طول کال (کانال) و ساختار آن و پارامترهای آوصوتی (هیدروآکوستیکی) زیرآب گردد [۲-۴]. (پدیده چند مسیرگی زیر آب با طول و عمق کال (کانال)، عمق فرستنده، عمق گیرنده، دما، شوری آب و پارامترهای دیگر وابستگی دارد). هم‌چنین، شرایط فیزیکی محیط زیر آب متغیر با زمان است که باعث تغییر زمانی

* نویسنده پاسخگو: mohammadian@mut-es.ac.ir

[1] VHF
[2] UHF
[3] LF
[4] VLF

[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]

کال (کانال) مخابراتی زیر آب و پاسخ ضربه آن می‌شود. به طور خلاصه کال (کانال) زیر آب دریاهای کم‌عمق با این ویژگی‌ها شناخته می‌شوند: چند مسیرگی غیرقابل پیش‌بینی و متغیر، تأخیرهای انتشار بسیار بزرگ، تلفات، پهنای باند محدود و کم، شرایط فیزیکی متغیر با زمان، نوفه (نویز) (ناشی از کشتی‌ها و جانوران دریایی)، سرعت کم و متغیر صدا و به تبع آن گسترش داپلر زیاد و شیفت داپلر متغیر و تداخل‌های محیطی. این پدیده‌ها علامت‌های (سیگنال‌های) منتشره در کال (کانال) را به شدت دست‌خوش تغییر می‌کنند. بنابراین برای طراحی و ساخت یک سامانه مخابرات داده زیر آب قابل اطمینان، عوامل اشاره شده را باید مد نظر قرار داد و پیش‌بینی‌های لازم را به عمل آورد.

با توجه به اینکه در برد کوتاه (کم‌تر از ۱۰۰۰ متر) فقط مسیر اصلی بین فرستنده و گیرنده اهمیت زیادی دارد، اثر پدیده چندمسیری ناچیز است (یعنی فقط مسیر مستقیم علامت اهمیت دارد)، ولی در برد متوسط (۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر) و برد بلند (بیش‌تر از ۵۰۰۰ متر) مسیرهای فرعی نیز با اهمیت می‌شوند و طبق فرضیه اولیه مقاله، اثر پدیده چندمسیری بر سایر پدیده‌ها و مسائل مخابراتی غالب می‌شود. به عبارتی دیگر در برد بلند نسبت به برد کوتاه پدیده اصلی حاکم بر یک سامانه مخابراتی صوتی زیر آب دریای کم‌عمق، پدیده چند مسیرگی علامت (سیگنال) می‌باشد. در برد بلند چند مسیرگی علامت بسیار شدید می‌باشد و چالش اول هر سامانه مخابراتی زیر آب می‌گردد. پدیده چند مسیری باعث می‌شود، (یک) علامت صوتی ارسالی، از چند مسیر به گیرنده برسد و چند کال (کانال) صوتی (بین فرستنده و گیرنده) تشکیل گردد که باعث می‌شوند تأخیرهای مختلفی (ناشی از مسیرهای مختلف) در گیرنده بوجود آیند. طبق تعریف منابع منتشر شده [۵، ۱۱]، به حداکثر زمان این تأخیرها، گسترش تأخیر گفته می‌شود. پارامتر گسترش تأخیر در برد کوتاه (کم‌تر از ۱۰۰۰ متر) به طور معمول ۲-۵ میلی‌ثانیه می‌باشد و در برد بلند (بیش‌تر از ۵۰۰۰ متر) در برخی حالت‌ها به حداکثر ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌ثانیه هم می‌رسد. یکی از فرضیات مقاله این است که اگر زمان نماد (سیگنال) ارسالی طول تپ علامت (پالس سیگنال) ارسالی بیش‌تر از گسترش تأخیر کال (کانال) صوتی باشد، بدیهی است دقت عملکرد سامانه متأثر از پدیده چندمسیری ناچیز باشد ولی اگر زمان نماد (طول تپ) کم‌تر از گسترش تأخیر باشد، پیش‌بینی می‌شود دقت عملکرد سامانه به شدت تحت تأثیر پدیده چندمسیری باشد که در این مقاله برای حالت‌های مختلف مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه تاریخچه کار مربوطه و مقایسه‌ای با کارهای مشابه انجام می‌شود، سپس روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پیشنهادی مقاله توضیح داده می‌شود. در بخش نتایج، سامانه مخابرات مورد مطالعه (یک مودم صوتی اِف‌اِس‌کِی[1] قابل تنظیم با پارامترهای مورد نظر) مبتنی بر روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پیشنهادی مقاله ارائه می‌گردد.

۲. نظریه روش

آقای سوزر و خانم استوجانُویچ در دانشگاه اِم‌آی‌تی[2] (۲۰۰۶) نوعی مودم با قابلیت پیکره‌بندی مجدد برای شبکه‌های حسگر زیرآب ارائه داده‌اند [۵-۶]. این کار منجر به تولید و تجاری‌سازی یک مودم صوتی با قابلیت پیکره‌بندی مجدد[3] با همکاری مؤسسه وی‌اِچ‌اُآی[4] شده است. کار ایشان دارای سخت‌افزار اختصاصی است و مبتنی بر پردازشگر دی‌اِس‌پی[5] انجام شده است. این کار از جنبه‌های نوع سخت‌افزار و پیاده‌سازی متفاوت است و از لحاظ ارائه کاری با قابلیت پیکره‌بندی مجدد مشابه با این مقاله می‌باشد.

آقای جورداک و همکاران (۲۰۰۹) شبکه‌های حسگر نرم‌افزاری (فعال‌شونده با نرم‌افزار) برای کاربردهای برد کوتاه دریاهای کم‌عمق پیشنهاد داده‌اند. تمرکز اصلی مرجع [۷]، توسعه لایه فیزیکی (لایه مخابرات زیرآب به

[1] FSK; Frequency-Shift Keying

[2] MIT

[3] توضیح: با توجه به اینکه بر مبنای روش پیشنهادی مقاله، کار مخابرات زیرآب مبتنی بر نرم‌افزار (و نه سخت‌افزار) انجام می‌شود، مشابه با کارهای ارائه شده در مراجع [۵-۶]، زیرسامانه‌ها (زیربلوک‌های) مخابراتی به صورت پارامتری در نرم‌افزار تنظیم می‌شوند و بدین طریق پیکره‌بندی مجدد گیرنده و فرستنده صوتی، متناسب با شرایط کال (کانال) صوتی می‌توانند انجام شوند.

[4] WHOI; Woods Hole Oceanographic Institution

[5] DSP; Digital Signal Processing

[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]

صورت نرم‌افزاری) بوده است. به لحاظ توسعه نرم‌افزاری مخابرات زیرآب اهداف مشابهی با این مقاله دنبال شده است با این تفاوت که کار ایشان برای مخابرات زیر آب برد کوتاه می‌باشد و قابلیت پیکره‌بندی مجدد ندارد. ولی کار پیشنهاد شده در این مقاله محدود به برد کوتاه نیست و برای برد متوسط و برد بلند نیز قابل برنامه‌ریزی و پیکره‌بندی مجدد مخابرات رقومی (دیجیتال) زیر آب می‌باشد. آقای جورداک در ادامه کار قبلی، شبکه‌های حسگر صوتی زیرآب نرم‌افزاری را بنا نهاد [۸-۱۰] که در آن از نوعی روش طراحی لایه‌بندی- متقاطع (کِراس- لایرینگ)[1] استفاده می‌کند. این کار، از جنبه‌های مختلفی قابل بحث و بررسی هست: الف) روش انجام کار آن‌ها به صورت تجربی است و از این نظر با کار ارائه شده در این مقاله یکسان است. با این تفاوت که کار ایشان برای بردهای کوتاه (در حد ۲۰ متر) می‌باشد ولی کار انجام شده در این مقاله برای بردهای کوتاه، متوسط و بلند می‌باشد. ب) در کار ایشان نوعی روش یا مفهوم هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) برای شبکه‌های زیر آب پیشنهاد شده که موسوم به ۴اِس[2] شده است. این روش و مفهوم هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) محدودیت‌های زیادی دارد از جمله این که کاربری خاص دارد، قابلیت توسعه برای لایه‌های دیگر شبکه نظیر لایه اِم‌ای‌سی[3] و لایه مسیردهی (روتینگ)[4] ندارد و از این نظر کارآ (اثربخش) نیست. ج) در شبکه‌های ایجاد شده توسط کار ایشان فقط و فقط به لایه فیزیکی کار توجه شده و به لایه‌های دیگر شبکه نظیر لایه پیوند داده‌ها، لایه شبکه و سایر لایه‌ها توجه نشده است و به نظر می‌رسد در روش کار (و سازوکارهای طراحی شده) ایشان محدودیت‌های ذاتی وجود دارند که ایجاد یک شبکه زیر آب گسترده و با قابلیت‌های مختلف را عملاً غیرممکن می‌سازند. لذا شبکه زیرآب ایجاد شده توسط ایشان کاربری بسیار خاص و محدود دارد، حال آن که در این مقاله سعی شده است این محدودیت برطرف گردد. روش پیشنهادی مقاله، قابلیت ایجاد شبکه زیر آب گسترده که توانمندی توجه هم‌زمان به لایه‌های مسیردهی، پیوند داده‌ها و لایه شبکه، در هنگام طراحی لایه فیزیکی، با تکیه بر مفاهیم روش طراحی لایه‌بندی متقاطع (کِراس- لایرینگ) (که آقای راجا جورداک در مراجع [۸-۱۰] پیشنهاد و توسعه داده‌اند) دارا می‌باشد و نیاز است در مقاله دیگری به آن پرداخته شود.

از طرفی دیگر، در این دو دسته فعالیت زیرساختی که در بالا توضیح داده شدند [۵-۷]، بررسی اثرات پدیده چندمسیری و محوشوندگی ناشی از آن بر سامانه (و مقاوم‌سازی مبتنی بر آن)، انجام نشده است. حداقل این که به طور مستقیم ارزیابی (و مقاوم سازی) عملکرد سامانه مخابراتی زیر آب مبتنی بر آثار و پارامترهای چندمسیری زیرآب دریاهای کم‌عمق در این کارها انجام نشده است. به طور کلی، در مورد تأثیر پارامترهای چندمسیری (گسترش تأخیر و زمان همدوسی[5]) و پارامترهای محیطی تأثیرگذار بر پدیده چندمسیری (نظیر عمق و طول کال (کانال) و موقعیت نسبی فرستنده و گیرنده، نیم‌رخ (پروفایل) سرعت صدا و غیره) بر روی عملکرد سامانه، تحقیقی گزارش نشده است و معمولاً آثار چندمسیری به صورت مفروض، لحاظ شده‌اند. به طور نمونه، آقای لابرادور و همکاران [۱۱] یکی از پارامترهای چندمسیری، گسترش تأخیر کال (کانال) را ثابت فرض کرده‌اند ($Tm = 5$ msec) (و برای یک سامانه مفروض با پهنای تپ (پالس) ثابت ($Tb = 2$ msec) در مورد تصحیح عملکرد (و مدولاسیون) مطالعاتی انجام داده‌اند)، در کار ایشان، هیچ یک از پارامترهای تأثیرگذار بر پدیده چندمسیری، نظیر عمق و طول کال (کانال) و موقعیت نسبی فرستنده و گیرنده و شرایط محیطی و هیدروفیزیکی دریاهای کم‌عمق لحاظ نشده است. در تحقیق حاضر پارامترهای فوق برای دریاهای کم‌عمق، به طور واقعی محاسبه می‌شوند و مقاوم‌سازی سامانه مخابراتی زیرآب به دو شیوه (روش سنتی (کدگذاری، هم‌گاه‌سازی، اکولایزر) و روش غیرسنتی پروتکل‌سازی)، قابل پیگیری و اجرا است که در مقاله حاضر تأثیر دقت هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) با روش پیشنهادی مقاله بر دقت عملکرد سامانه مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد.

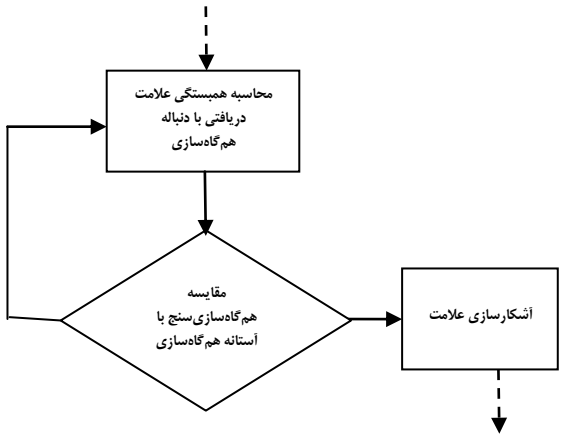
[1] Cross-Layering
[2] 4S
[3] MAC; Media Access Control
[4] Routing
[5] Coherence time

[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]

۲-۱. روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پیشنهادی مقاله

برای آشکارسازی صحیح بسته‌های داده (و بیت‌های دریافتی)، لازم است که گیرنده از محل دقیق شروع بسته‌ها و بیت‌های مدوله شده در طول زمان ارسال-دریافت (در روند تبادل اطلاعات) آگاهی داشته باشد که این وظیفه توسط واحد هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی)، پیاده‌سازی و اجرا می‌گردد. برای آن که در روند دائم تبادل اطلاعات بین فرستنده و گیرنده، عملکرد سامانه مخابراتی حفظ گردد، نیاز است به مانند سامانه تلویزیون به طور دائم و دوره‌ایی علامت‌های (سیگنال‌های) هم‌گاه‌ساز (سنکرون‌ساز) بین فرستنده و گیرنده و در لابلای داده‌های پیام تبادل گردد. این روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) در مخابرات رقومی (دیجیتال) به نام هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) بسته‌ای شناخته می‌شود و مبنای کار سامانه‌های سویچینگ بسته‌ای بر همین اساس قرار دارد. در این روش از هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی)، لازم است که گیرنده از محل دقیق شروع بیت‌های مدوله‌شده آگاهی داشته باشد. برای این منظور لازم است که سازوکاری در پاکت داده ارسالی تعبیه شود که به کمک آن هم‌گاه‌ساز (سنکرون‌ساز) گیرنده بتواند ابتدای بسته ارسالی را تشخیص دهد. برای این منظور روش‌های مختلفی وجود دارد. به دلیل اعوجاج و چند مسیری شدید کانال مخابراتی زیر آب معمولاً از دنباله‌های شبه نوفه (شبه نویز) پی‌اِن[1]، برای این منظور استفاده می‌شود که در این پروژه نیز از این نوع دنباله استفاده شده است. در فرستنده یک دنباله شبه نوفه به ابتدای بسته ارسالی افزوده می‌شود که خاصیت اصلی آن این است که خود همبستگی آن شبیه ضربه می‌باشد. پس از انتشار علامت (سیگنال) در کال (کانال)، گیرنده، همبستگی علامت دریافتی را با دنباله شبه نوفه معلوم می‌سنجد و در صورت بیش‌تر شدن ضریب همبستگی از یک مقدار آستانه، گیرنده فوق، دریافت یک بسته اطلاعات را تشخیص می‌دهد و بسته را برای انجام مراحل پردازش بعدی و در نهایت استخراج بیت‌های داده، به بلوک پردازشی بعدی می‌فرستد. انتخاب میزان آستانه بهینه بستگی به میزان نوفه کال (کانال)، اعوجاج علامت دریافتی و احتمالا زمان همدوسی کال (کانال) دارد که در فازهای آتی اثر این پارامترها با دقت بیش‌تری بررسی خواهد شد. مقدار آستانه باید طوری انتخاب شود که در عین حفظ کیفیت دریافت مناسب، احتمال هشدار خطا[2] نیز تا جای ممکن کاهش یابد. در شکل ۱ فلوچارت و فرآیند کلی الگوریتم هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پیشنهادی این مقاله مشاهده می‌گردد [۱۲]. هدف نویسنده مقاله، صرفاً برداشت مفهومی از روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) تلویزیون می‌باشد. در روش تلویزیون در جریان دائمی اطلاعات ارسالی و دریافتی، بخشی از قالب علامت به عنوان بخش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) شناخته می‌شود که در مقاله حاضر صرفاً از همین مفهوم استفاده می‌شود و به نوعی قرض‌گیری مفهومی (یا الهام‌گیری) می‌شود و قصد ورود به تفاوت‌های زیاد این روش‌ها نبوده است. از جمله این تفاوت‌ها به طور اجمال به شکل علامت، ماهیت علامت، بسامد و پهنای باند علامت، تعداد تکرار آن‌ها و ابعاد آن‌ها می‌توان اشاره کرد که بررسی جزئیات آن‌ها از محدوده این مقاله و اهداف ذکر شده مقاله خارج می‌باشد.



شکل ۱ فلوچارت کلی هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) سامانه مخابرات رقومی (دیجیتال) پیشنهادی.

در شکل ۲ نمونه‌ای از خروجی هم‌گاه‌سازسنج بلوک سنکرون‌ساز مشاهده می‌گردد. همان‌طور که در شکل مشخص است، محل بیشینه هم‌گاه‌سازسنج گیرنده با محل بیشینه دقیق نظری اندکی تفاوت دارد که منجر به خطای جزیی در فرآیند هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) می‌شود که با نام خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) (یا

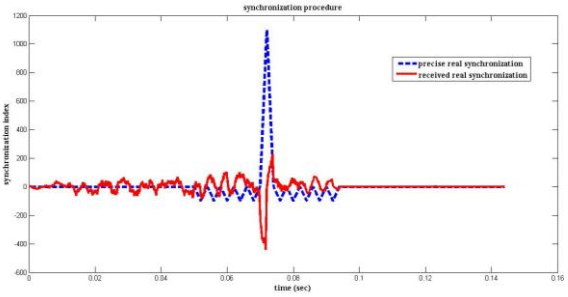
[1] PN; Pseudo Noise

[2] False alarm

[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]

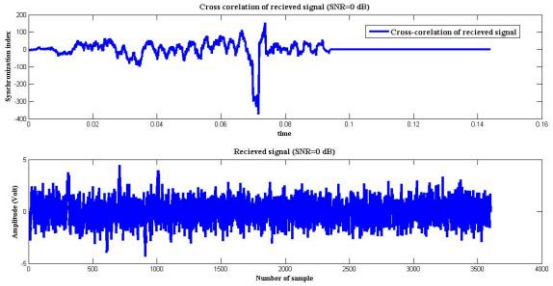
شاخص همبستگی[1]) نام‌گذاری می‌شود. لذا بنا به تعریف این مقاله، خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) خطایی است که در فرآیند هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) ناشی از اختلاف بین نمونه‌های خروجی هم‌گاه‌سازسنج بلوک هم‌گاه‌ساز (سنکرون‌ساز) محاسبه می‌گردد.



شکل ۲ روش محاسبه میزان خطا و دقت روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پیشنهادی مقاله.

۲-۲. علت ایجاد خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) و راهکارهای پیشنهادی جهت کاهش آن در این نوع هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی):

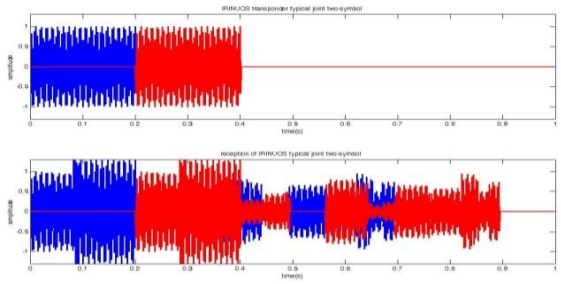
علت اصلی ایجاد خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) تأخیرهای بوجود آمده در علامت (سیگنال) دریافتی (در محل گیرنده) ناشی از مسیرهای مختلف می‌باشد. همان‌طور که در بخش مقدمه مقاله توضیح داده شد، علامت چندمسیری باعث می‌شود به تعداد مسیرها، در محل گیرنده، علامت بوجود آید. روی هم افتادگی و علامت برآیند حاصله باعث ایجاد (علامت جدید) و این خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) می‌شود. شکل ۳ نمونه‌ای از علامت دریافتی (برآیند مسیرهای مختلف) و همبستگی آن با علامت مرجع هم‌گاه‌ساز (سنکرون‌ساز) را



شکل ۳ علامت دریافتی و همبستگی آن با علامت مرجع هم‌گاه‌ساز (سنکرون‌ساز).

[1] Synchronization Index

نشان می‌دهد. علت دیگر ایجاد خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) (با درجه اهمیت کم‌تر)، تداخل بین نمادی (سمبولی) است که در شکل ۴، نمونه‌ای از این نوع تداخل برای دو نماد (سمبول) ارسالی نشان داده شده است.



شکل ۴ نمایش تداخل بین نمادی برای دو نماد ارسالی.

۲-۳. راهکارهای کاهش خطا در این نوع هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی):

براساس روش‌های تجربی مشاهده شده در فرآیند طراحی و پیاده‌سازی روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پیشنهادی مقاله، در عمل به سه روش می‌توان خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) را کاهش داد:

الف) تکرار کدهای شبه نوفه (نویز) در فواصل مشخص از قالب پیام به طوری که برای گیرنده از قبل معلوم باشد[2]، تا براساس آن گیرنده با کمی کار بیش‌تر، خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) را کاهش دهد و در برخی موارد به صفر رساند (نتایج این بررسی‌های تجربی- عملاً مشاهده شده - در کاهش خطا در مقاله جداگانه‌ای قابل بررسی دقیق و ارائه خواهند بود).

ب) استفاده از یک علامت (سیگنال) مرجع به عنوان علامت کالیبراسیون با مشخصات معلوم شامل قالب مشخص، ابعاد و محتوای مشخص که بصورت دوره‌ای در فرآیند تبادل پیام بین فرستنده و گیرنده مبادله گردد. دوره‌های مبادله این علامت کالیبره و سایر ویژگی‌های اشاره شده، در تعریف پروتکل ارتباطی (و براساس نوع کانال صوتی) توسط طراحان سامانه باید تعریف گردند.

ج) استفاده از بیت‌های آموزشی در لابلای پیام و یا قبل از

[2] یعنی مبتنی بر پروتکل ارتباطی معلوم با تکرار کدهای شبه نوفه به دفعات تعریف شده در پروتکل، و از قبل تعیین شده، صورت پذیرد.

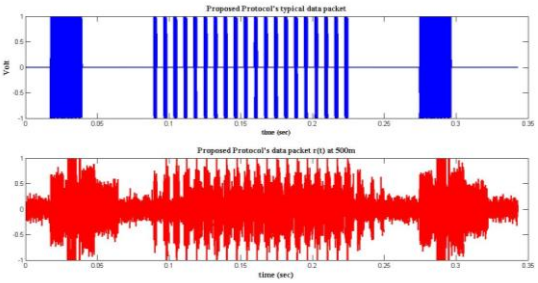
[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]

ارسال پیام اصلی (در یک پروتکل ارتباطی مشخص در حال اجرا) باعث کاهش خطای عملکرد سامانه و هم‌چنین خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) می‌شود که این روش نیز، نیازمند پیاده‌سازی سازوکار مربوطه در ساختار الگوریتم‌های گیرنده می‌باشد.

۳. نتایج

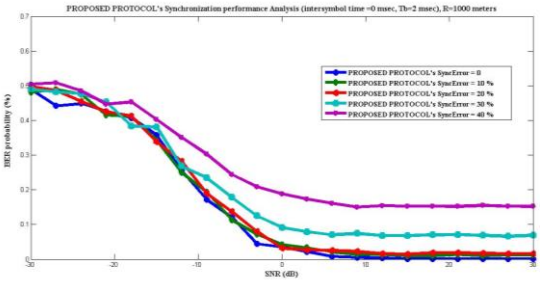
۳-۱. سامانه مخابرات مورد مطالعه (مودم صوتی با مدولاسیون بسامدی)

به منظور ارزیابی روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پروتکل پیشنهادی (مخابرات داده زیرآب)، یک مودم صوتی زیر آب اِفاِس‌کِی[1] ردهٔ متوسط طراحی و پیاده‌سازی گردید [۱۲] که نتایج ارزیابی‌ها و مطالعات عملکردی بخش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) آن در این بخش ارائه می‌گردد. (توضیح: اِفاِس‌کِی یک مدولاسیون بسامدی رقومی (دیجیتال) است که براساس آن علامت (سیگنال) پیام از طریق تغییر بسامد علامت حامل انتقال می‌یابد). شکل ۵ نمونه‌ای از پاکت‌بندی داده پروتکل پیشنهادی (علامت ارسالی S(t) و علامت دریافتی r(t) در فاصله ۵۰۰ متر) را نشان می‌دهد.

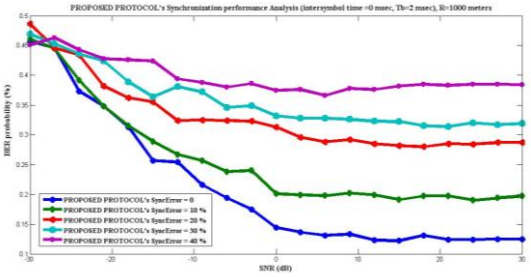


شکل ۵ نمونه ای از پاکت‌بندی داده پروتکل پیشنهادی مخابرات رقومی زیرآب، (پهنای تپ ۲ میلی‌ثانیه و زمان بین نماد صفر ثانیه) (شکل بالا: علامت ارسالی S(t) و شکل پایین: علامت دریافتی r(t) در فاصله ۵۰۰ متر) محور افقی: زمان (ثانیه) و محور عمودی: دامنه (ولت).

شکل ۶ نقش روش هم‌گاه‌ساز (سنکرون‌ساز) پیشنهادی مقاله با مقدار خطای ۰-۴۰ درصد در عملکرد سامانه مخابرات زیر آب اِفاِس‌کِی مورد مطالعه بر روی همین نمونه ولی با مشخصات دقیق (پهنای تپ (پالس) ۲ میلی‌ثانیه و زمان بین نماد صفر ثانیه و طول کانال ۱۰۰۰ متر) را نشان می‌دهد. شکل ۷ همین نتایج را با پهنای تپ ۶ میلی‌ثانیه تکرار می‌کند.



شکل ۶ نقش روش هم‌گاه‌سازی پیشنهادی مقاله با مقدار خطای ۰-۴۰ درصد در عملکرد سامانه مخابرات زیرآب اِفاِس‌کِی مورد مطالعه (پهنای تپ ۲ میلی‌ثانیه و زمان بین نماد صفر ثانیه و طول کال ۱ کیلومتر).



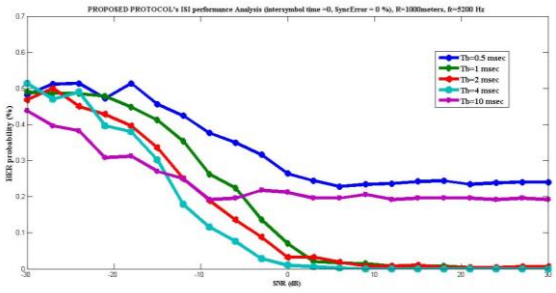
شکل ۷ نقش روش هم‌گاه‌سازی پیشنهادی مقاله با مقدار خطای ۰-۴۰ درصد در عملکرد سامانه مخابرات زیرآب اِفاِس‌کِی مورد مطالعه (پهنای تپ ۶ میلی‌ثانیه و زمان بین نماد ۰ ثانیه و طول کال ۱۰۰۰ متر).

در شکل ۸ و شکل ۹ حالت‌های دیگری را برای نشان دادن نقش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) در عملکرد سامانه مورد مطالعه را به نمایش می‌گذارند. در شکل ۱۰ نمونه ارسال شده شکل ۵ را که در فاصله‌های ۲ کیلومتر و ۴ کیلومتر دریافت می‌شود (علامت دریافتی r(t))، را نمایش می‌دهد. در مقایسه شکل‌های ۵ و ۱۰ مشاهده می‌شود که تأثیرات پدیده چندمسیری در فاصله‌های مختلف (۵۰۰ متر، ۲ کیلومتر و ۴ کیلومتر) متفاوت هستند و در بخش‌های مختلف قالب پیام (شکل ۵ قسمت بالا) تأثیرات متفاوتی گذاشته‌اند.

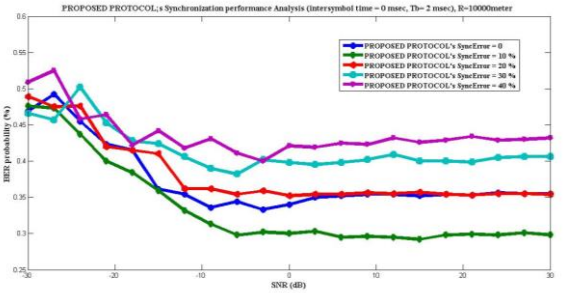
[1] FSK; Frequency Shift Keying

[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]

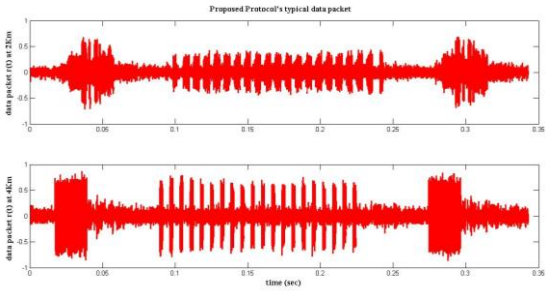
[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]



شکل ۸ نقش روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پیشنهادی مقاله با مقدار خطای صفر درصد در عملکرد سامانه مخابرات زیرآب اِفاِس‌کِی مورد مطالعه (پهنای تپ‌های ۰٫۵ ، ۱ ، ۲ ، ۴ و ۱۰ میلی‌ثانیه و زمان بین نماد ۰ ثانیه و طول کانال ۱۰۰۰ متر).



شکل ۹ نقش روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پیشنهادی مقاله با مقدار خطای صفر تا ۴۰ درصد در عملکرد سامانه مخابرات زیرآب اِفاِس‌کِی مورد مطالعه (پهنای تپ ۲ میلی‌ثانیه و زمان بین نماد صفر ثانیه و طول کال ۱۰ کیلومتر).



شکل ۱۰ پاکت داده دریافتی پروتکل پیشنهادی مخابرات رقومی زیرآب (پهنای تپ ۲ میلی ثانیه و زمان بین نماد ۰ ثانیه (شکل بالا: علامت دریافتی r(t) در فاصله ۲۰۰۰ متر و شکل پایین: علامت دریافتی r(t) در فاصله ۴۰۰۰ متر) محور افقی: زمان (ثانیه) و محور عمودی: دامنه (ولت).

۴. بحث

الف) نمودارهای شکل ۶ و شکل ۷ نشان می‌دهند هر چه دقت هم‌گاه‌سازی کاهش یابد، به طور مستقیم دقت عملکرد سامانه مورد مطالعه (و پروتکل ارتباطی مربوطه) کاهش می‌یابد که نشان از رابطه مستقیم دقت هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) با دقت عملکرد سامانه (تا مقدار SNR= -۲۰ dB) را می‌دهد. این نتیجه از قبل قابل پیش‌بینی بود و دور از انتظار نمی‌باشد (رفتار مشابه کم‌تر از SNR= -۲۰ dB به این دلیل است که علامت دریافتی در گیرنده در این حالت‌ها عملاً نوفه خالص می‌باشد که باعث شده است رفتار مشابهی در نمودارها تکرار شود).

ب) مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که با خطای صفر تا ۴۰ درصد، هرچه پهنای تپ (پالس) کم‌تر باشد (Tb=۲ msec در مقایسه با Tb=۶ msec)، عملکرد سامانه بهتر می‌شود. به عبارتی دیگر پهنای تپ‌های بزرگ‌تر عملکرد سامانه را بدتر می‌کند که این نتیجه دور از انتظار بوده است. ولی با توجه به توضیحاتی که در بخش مقدمه مقاله (در خصوص چندمسیرگی زیرآب) آمده‌اند، این نتایج توجیه‌پذیر می‌شوند. پهنای تپ بزرگ‌تر به معنای تداخل بین نماد آی‌اِس‌آی بزرگ‌تر و بیش‌تر می‌باشد که باعث بدتر شدن عملکرد می‌شود. این موضوع در شکل ۹ به نتیجه جالب‌تری منجر شده است:

ج) شکل ۸ نشان می‌دهد خراب شدن عملکرد سامانه در دو ناحیه رخ می‌دهد: در ۱۰ میلی‌ثانیه و ۰٫۵ میلی‌ثانیه که هر چند دور از انتظار بوده‌اند ولی قابل توجیه می‌باشند. از آن یک نتیجه‌گیری کلی در زیر می‌توان ارائه داد (در ناحیه میانی این دو ناحیه یعنی ۱٫۲msec<Tb<۱۰msec که به عنوان ناحیه سوم تعریف می‌شود، نتایج بدست آمده مطابق با نتیجه قسمت ۲ می‌باشد).

ناحیه اول: مطابق آن چه در قسمت بالا گفته شد، اگر Tb از یک حد بزرگ‌تر شود (براساس تأثیرات آی‌اِس‌آی، عملکرد سامانه خراب می‌شود).

ناحیه دوم: اگر Tb از یک حد کوچک‌تر شود (که در سامانه مورد مطالعه و در این شکل خاص این مورد در ۰٫۵ میلی‌ثانیه نشان داده شده است) در اثر اشباع شدن کانال، عملکرد سامانه خراب می‌شود.

ناحیه سوم: ناحیه میانی این دو ناحیه یعنی ۱٫۲msec<Tb<۱۰msec نتایج بدست آمده مطابق با نتیجه قسمت ۲ می‌باشند.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]

نتیجه‌ای که از تعریف این محدوده‌ها (حد بالا و حد پایین) می‌توان گرفت این است که زمان همدوسی کانال این فاصله را برای هر سامانه مخابراتی تعیین می‌کند که توجه به این موضوع می‌تواند در بهره‌وری سامانه‌های عملیاتی موجود و یا در طرح‌ریزی سامانه‌های جدید مؤثر باشد.

د) شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ نشان می‌دهند که «در اِس‌اِن‌آر-های[1] بالاتر از صفر دسی‌بل، اثر پهنای تپ (پالس) در خراب شدن عملکرد سامانه شدیدتر است» که نشان از اثر بیش‌تر مسیرهای با تأخیرات بیش‌تر (نسبت به اِس‌اِن‌آر-های کمتر از صفر) می‌باشد. این موضوع نیز کاملاً بدیهی است و نشان از صحت نتایج بدست آمده و درستی کارکرد روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) پیشنهادی و سامانه مخابراتی مورد مطالعه در مقاله می‌باشد.

این نتیجه در مقایسه شکل ۶ و ۷ مشهودتر است و در شکل ۸ فقط برای ناحیه حد بالا (ناحیه شماره ۱) مصداق دارد، زیرا در ناحیه حد پایین (ناحیه شماره ۲) فقط به دلیل اشباع شدن کال (کانال)، خراب‌شدگی عملکرد رخ می‌دهد و طول تپ (پالس) افزایش نمی‌یابد. به عبارتی دیگر با یک خطای هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) ثابت (برای یک کال ثابت) «در اِس‌اِن‌آرهای بالاتر از صفر دسی‌بل، اثر پهنای تپ در خراب شدن عملکرد سامانه شدیدتر است» خود را در ناحیه حد بالا (ناحیه شماره ۱) نشان می‌دهد و پیش‌بینی می‌شود، هر چه از مرز این ناحیه (که در این مثال ۱۰ میلی‌ثانیه می‌باشد)، دورتر شویم، این خراب‌شدگی، شدیدتر و رفتاری بر خلاف قواعد حاکم بر ناحیه شماره ۳ نشان خواهد داد.

هـ) مقایسه شکل‌های ۶ و ۹ نشان می‌دهد، برد ده کیلومتر در مقایسه با برد یک کیلومتر، حساسیت دقت هم‌گاه‌سازی پیشنهادی بیش‌تر می‌شود که مورد انتظار است و از قبل قابل پیش‌بینی است. چون پدیده چندمسیری و آی‌اِس‌آی در ده کیلومتر به مراتب شدیدتر از یک کیلومتر می‌باشد. این موضوع لزوم تدوین راهبرد هم‌گاه‌سازی مخابرات (برد متوسط و برد بلند) دریاهای کم‌عمق با توجه به مباحث مذکور روشن می‌گردد. در این راهبرد لزوم توجه به روش هم‌گاه‌سازی مبتنی بر پروتکل‌سازی[2] (و هم‌چنین از طریق بیت‌های آموزشی بین فرستنده و گیرنده) بیش از پیش (نسبت به برد کوتاه یک کیلومتر) محسوس می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) رقومی (دیجیتال) مخابرات داده‌های زیر آب، برای کاربرد در مخابرات صوتی بدون سیم دریاهای کم‌عمق، پیشنهاد و برای بردهای یک کیلومتر و ده کیلومتر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی‌های انجام شده در برد کوتاه یک کیلومتر نشان می‌دهند، در برد کوتاه یک کیلومتر هر چه خطای هم‌گاه‌سازی به صفر نزدیک شود، خطای کلی سامانه مخابرات صوتی دریای کم‌عمق نیز به سمت صفر نزدیک می‌شود. از ارزیابی‌های انجام شده، این نتیجه کلی حاصل می‌شود که در صورت کارکرد صحیح بخش هم‌گاه‌سازی (خطای هم‌گاه‌سازی صفر باشد) مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در عملکرد سامانه (به عنوان اولویت دوم بعد از دقت هم‌گاه‌سازی)، پارامتر طول تپ (پالس) (زمان نماد) صوتی می‌باشد. نتایج ارزیابی‌های انجام شده در خصوص پارامتر طول تپ (زمان نماد) نشان می‌دهند که هرچه پهنای تپ بزرگ‌تر باشد، آثار تخریبی چند مسیرگی صوتی دریای کم‌عمق بیش‌تر نمایان می‌شود و عملکرد سامانه مخابرات صوتی دریای کم‌عمق بدتر می‌شود. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عملکرد سامانه مخابراتی صوتی دریای کم‌عمق (از منظر طول تپ) در سه ناحیه قابل ارزیابی است که در دو ناحیه (حد بالا و حد پایین) عملکرد سامانه خراب می‌شود و در ناحیه میانی این دو آستانه (حد بالا و حد پایین) عملکرد سامانه صحیح می‌باشد که لزوم توجه طراحان و کاربران این گونه سامانه‌ها را جلب می‌نماید.

روش پیشنهادی مقاله مبتنی بر روش هم‌گاه‌سازی (سنکرون‌سازی) بسته‌ای بنا نهاده شده است. بر مبنای

[1] SNR

[2] در این راهبرد، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهبودسازی عملکرد هم‌گاه‌سازی از جمله طراحی قالب‌های پیش فرض مشخص هم‌گاه‌ساز با تکرار مشخص شبه نوفه‌های هم‌گاه‌ساز پیشنهادی مقاله در طول قالب پیام، طراحی و اجرا می‌گردند. این موضوع می‌تواند مبنای یک کار تحقیقاتی جدید در این حوزه گردد.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]

روش پیشنهادی می‌توان شبکه‌های داده‌های زیر آب مبتنی بر سویچینگ بسته‌ای طراحی و پیاده‌سازی نمود (به طوری که در آن پارامترهای لایه فیزیکی مخابرات زیر آب مانند طول تپ (پالس)، بسامد حامل، نوع مدولاسیون و غیره از ابتدا مبنای کار طراحی شبکه قرار گیرند و ارزیابی و تحلیل لایه‌های شبکه بر مبنای آن بنا نهاده شوند. در این مقاله یک پروتکل بسته‌ای نقطه به نقطه به روش مذکور (برای کار مخابرات صوتی نقطه به نقطه دریاهای کم‌عمق) مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. در این پروتکل بسته‌ای، علامت‌های (سیگنال‌های) سر برگ و ته برگ و داده‌های پیام، سه بخش اصل علامت مخابراتی را تشکیل می‌دهند. دستاورد این کار، در زمینه پروتکل‌سازی لایه‌های مختلف شبکه مخابرات داده‌های زیر آب مبتنی بر شرایط واقعی کال (کانال) دریاهای کم‌عمق قابل استفاده می‌باشد (در این خصوص یک کار تحقیقاتی توسط نویسندگان مقاله در حال انجام است که نتایج مربوطه در مقاله مجزایی ارائه خواهند شد).

بر مبنای روش پیشنهادی مقاله، می‌توان پروتکل‌ها و سناریوهای مختلف برای ارسال و دریافت داده‌ها در سامانه‌های عملی مخابرات صوتی دریاهای کم‌عمق نقطه به نقطه طراحی و اجرا نمود. ارزیابی‌های انجام شده در این مقاله برای یک سامانه عملی مخابرات داده‌های آب‌های کم عمق برد بلند تا ده کیلومتر نشان از اثر بخشی و بهبود عملکرد سامانه، تحت سناریوها و پروتکل‌های اجرایی مشخص می‌باشد که لزوم توجه کاربران و طراحان سامانه‌های مخابرات زیرآب را به مقوله بهبود عملکرد مخابرات صوتی دریای کم‌عمق برد بلند «مبتنی بر پروتکل‌سازی» در فعالیت‌های تحقیقاتی آتی بیش از پیش نشان می‌دهد.

۶. فهرست منابع

[1] T. Melodia, H. Kulhandjian, L.C. Kuo, E. Demirors, "Advances in Underwater Acoustic Networking," Chapter 23, First Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2013.

[2] L.M. Brekhovskikh, Y.P. Lysanov, "Fundamentals of Ocean Acoustics," Third Edition, Springer, New York, 2003.

[3] M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications: design considerations on the physical layer," Fifth Annual Conference on WONS, pp. 1–10, 2008.

[4] M.C. Domingo, "Overview of channel models for underwater wireless communication networks," Physical Communication, vol. 1, pp. 163–182, September 2008.

[5] E.M. Sozer, M. Stojanovic, "Reconfigurable acoustic modem for underwater sensor networks," Proc. ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUWNet), Los Angeles, CA, USA, 101–104, 2006.

[6] The WHOI Micro-Modem. [Online]. Available: http://acomms.whoi.edu/umodem.

[7] R. Jurdak, P. Baldi, C. Videira Lopes, "Software-Driven Sensor Networks for Short-Range Shallow Water Applications," Elsevier Ad Hoc Networks Journal, vol. 7, no. 5, 837-848, 2009.

[8] R. Jurdak, "Software Driven Underwater Acoustic Sensor Networks," Chapter 1, World Scientific Review Volume - 9in x 6in, 2010.

[9] R. Jurdak, "Wireless Ad Hoc and Sensor Networks: A Cross-Layer Design Perspective," Springer-Verlag, 2007.

[10] R. Jurdak, P.M.Q. Aguiar, P. Baldi, C.V. Lopes, "Software Modems for Underwater Sensor Networks," Proceeding of Ocean 2007, pp. 1067-1078, 2007.

[11] Y. Labrador, M. Karimi, D. Pan, J. Miller, "Modulation and Error Correction in the Underwater Acoustic Communication Channel," IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 9, no. 7, pp. 123-130, 2009.

[12] A. Mohammadian dehziri, "Robust performance of underwater digital communication system under multipath fading phenomena in shallow-water sea," M.S.c. thesis, SIAU University, Iran, 2015 (In Persian).

[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]

Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, vol. 3, no. 1, 2015

Investigation and evaluation of acoustic-communication synchronization method for shallow-water long-range applications

A. Mohammadian Dehziri[*1], M. Maesoumi[2]

1. Islamic Azad Univ., Shiraz Branch
2. Islamic Azad Univ., Jahrom Branch

Abstract

In this paper investigation of acoustic-communication synchronization method for shallow-water data communication is presented and a method is proposed and is evaluated for long-range applications. The proposed method is based on A) an empirical methodology and B) borrowing the concept of the television synchronization method. In proposed method, a mechanism is adopted in packet structure by which the receiver synchronizer extracts the beginnings of the transmitted packet through the communication task. Because of the acoustic nature of the channel (underwater communication channel) and non-applicability of EM propagation in water, the terrestrial synchronization methods (such as TV synchronization method) are not suitable for underwater applications, so the proposed method is effective for shallow-water acoustic communication. Main contribution of the paper is the proposal of a novel synchronization protocol for medium to long-range shallow-water (acoustic) data-communication systems. In order to evaluate the proposed method and protocol, a FSK acoustic modem (medium-range class) was developed which the results show the effectiveness of the proposed method and protocol for medium up to long-range acoustic data communication.

Keywords: Communication, Acoustic, Underwater, Shallow water, Synchronization.

pp. 1-9 (In Persian)

[Downloaded from joasi.ir on 2026-06-18]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.3.3]

[*] Corresponding author E-mail: mohammadian@mut-es.ac.ir