شیوه‌های مدل‌سازی کانال مخابرات نوری بی‌سیم زیر آب

زهرا ولی[۱] اصغر غلامی[۲] خدیجه عالی محمودی[۳]

۱- دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
z.vali@ec.iut.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
gholami@cc.iut.ac.ir

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
k.aalimahmoodi@ec.iut.ac.ir

چکیده: ایده استفاده از مخابرات نوری فضای آزاد در دریاها با توجه به دلایل علمی و اقتصادی در راستای بررسی آب‌های طبیعی با سرعت چشم‌گیری توسعه یافته است. مخابرات نوری بی‌سیم زیر آب (UWOC) فنآوری تازه‌ای است که از حامل‌های نوری برای انتقال اطلاعات در آب استفاده می‌کند. استفاده از امواج نوری در مقایسه با امواج صوتی، سرعت انتقال و پهنای باند ارسال اطلاعات را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. از طرفی، استفاده از امواج نوری محدود به فواصل کوتاه می‌شود زیرا جذب آب در فرکانس‌های نوری شدید است. به علاوه، عوامل دیگر از جمله پراکندگی چندگانه و اغتشاش سبب کاهش عملکرد سیستم UWOC می‌شوند. باتوجه به ویژگی‌های منحصر به فرد آب، مدل‌های کانال مربوط به مخابرات نوری فضای آزاد برای کانال‌هایUWOC مناسب نیستند و برای داشتن نرخ داده و نرخ خطای قابل قبول در ارتباط نوری زیر آب لازم است اثر عوامل کلیدی بر انتشار نور به دقت در مدل کانال در نظرگرفته شود. در این راستا، این مقاله به بررسی مدل‌های کانال UWOC موجود در تحقیقات گذشته می‌پردازد. در این مدل‌ها به‌طور خاص، اثر عوامل جذب، پراکندگی و اغتشاش درنظر گرفته شده‌اند. مطالعه روش‌های مدل‌سازی به ارائه یک مدل جامع و فراگیر، کمک شایانی خواهد کرد.

واژه های کلیدی: مخابرات نوری بی‌سیم زیر آب، مدل‌سازی کانال، جذب، پراکندگی چندگانه، اغتشاش.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۰۴/۰۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر اصغر غلامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران –اصفهان–کدپستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱ –دانشگاه صنعتی اصفهان– دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

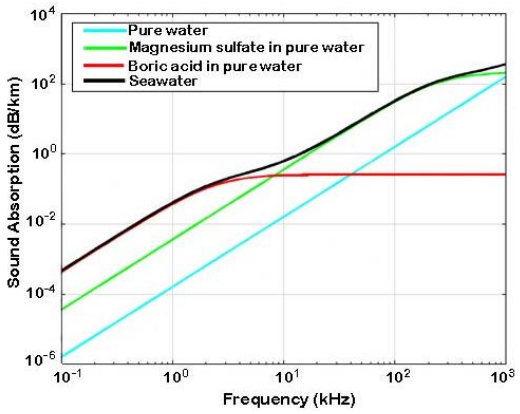
۱- مقدمه

بیش از هفتاد درصد سطح کره زمین با آب پوشیده شده است. با این وجود اقیانوس‌های ما بسیار کمتر از ماه و حتی مریخ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دانش انسان از اقیانوس‌ها به توانایی او در جمع‌آوری اطلاعات از مناطق مختلف زیر دریا بستگی دارد. هرچند کشف‌های دهه‌های گذشته مانند باقیمانده‌های تایتانیک یا منفذهای گرمابی[1] در اعماق اقیانوس‌ها با استفاده از ماشین‌های زیر آبی کابلی با سرعت بالا محقق شدند، همچنان این کنجکاوی وجود دارد که چگونه می‌توان بدون نیاز به کابل‌های سنگین این کار را انجام داد. روش‌های بر پایه فیبر یا کابل، سرعت بالا و مخابرات قابل اطمینان دارند، اما استفاده از آن‌هادرمناطق با دسترسی سخت و دریاهای عمیق مشکل‌می‌باشد زیرا محدوده و قابلیت حرکت وسیله زیر آب محدود است [۱].

با توجه به دلایل علمی، اقتصادی و نظامی در راستای بررسی اقیانوس‌ها، ایده استفاده از مخابرات نوری فضای آزاد[2] در محیط‌های آبی، با سرعت چشم‌گیری توسعه یافته است. مخابرات نوری فضای آزاد یکی از شاخه‌های مخابرات نوری است که بر اساس دید مستقیم، از هوا به عنوان محیط انتقال استفاده می‌کند. این فنآوری، پهنای باندی در حدود پهنای باند قابل دسترسی با مخابرات نوری با فیبر فراهم می‌کند درحالی‌که مشکلاتی نظیر حفاری، کابل‌کشی و مجوز حق عبور را ندارد و پیاده سازی آن نیز سریع و با هزینه‌ای مقرون به صرفه صورت می‌گیرد. علاوه‌براین، عدم نیاز به مجوز طیف، مخابرات امن، وزن سبک، کم حجم بودن تجهیزات، توان مصرفی پایین، فراهم سازی پهنای باند بالاتر نسبت به سیستم‌های رادیویی و مصونیت در برابر تداخل‌های مغناطیسی از دیگر مزیت‌های این فنآوری می‌باشد.

انتقال اطلاعات در محیط‌های آبی از طریق حامل‌های بی‌سیم مانند امواج فرکانس رادیویی، امواج صوتی و امواج نوری، مخابرات بی‌سیم زیر آب[3] نامیده می‌شود. برای تأکید بر مزایا و نشان دادن مشخصه‌های منحصر به فرد UWOC، در این قسمت مقایسه‌ای بین استفاده از امواج نوری، صوتی و رادیویی در مخابرات بی‌سیم زیر آب ارائه می‌گردد.

صوت پذیرفته شده‌ترین فنآوری در مخابرات بی سیم زیر آب است و تاریخچه کاربرد طولانی آن به اواخر سال ۱۸۰۰ برمی‌گردد. پس از گسترش عمده کاربردهای نظامی در طی جنگ جهانی دوم، سیستم مخابرات صوتی زیر آب یک فنآوری معروف شد و در UWSN اعمال شد. با درنظر گرفتن وسعت زیاد اقیانوس و اثر تضعیف شدید آب دریا بر امواج نوری و رادیویی، عمده‌ترین مزیت جذاب مخابرات صوتی زیر آب امکان ایجاد طول لینک بلند تا چند ده کیلومتر می‌باشد. همان گونه که در شکل (۱) نشان داده می‌شود، میزان جذب امواج صوتی زیر آب کم و وابسته به فرکانس انتشار می‌باشد. جدول (۱) طول و نرخ داده لینک‌های صوتی را نشان می‌دهد.



شکل(۱): جذب امواج صوتی در آب دریا وابسته به فرکانس[۲]

جدول (۱): طول و نرخ داده لینک‌های صوتی[۳]

نرخ داده (کیلوبیت بر ثانیه)	طول لینک (کیلومتر)	تقسیم‌بندی
<۱	>۱۰۰	بسیار بلند
~۲-۵	۱۰-۱۰۰	بلند
~۱۰	۱-۱۰	متوسط
~۱۰-۱۰۰	۰/۱-۱	کوتاه
>۱۰۰	<۰/۱	بسیارکوتاه

با این وجود، این روش محدودیت‌های تکنیکی اساسی دارد. فرکانس‌های نمونه مربوط به صوت در زیر آب در محدوده ۱۰ هرتز تا ۱ مگاهرتز هستند و درنتیجه نرخ انتقال اطلاعات لینک صوتی نسبتاً پایین، از مرتبه کیلو بیت بر ثانیه می‌باشد [۴]. در [۵]نرخ داده حداکثر ۱ مگابیت بر ثانیه در ۱ کیلومتر گزارش شده است. به دلیل سرعت کم انتشار صوت در آب (در حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در آب ۲۰ درجه خالص)، لینک صوتی از تأخیر مخابراتی شدید از مرتبه ثانیه رنج می‌برد و قادر به حمایت از کاربردهای بلادرنگ با تبادل حجم زیاد اطلاعات نمی‌باشد. در آب‌های کم عمق که طول انتشار از عمق آب بیشتر است، بازتاب‌های موج از سطح و کف آب سبب می‌شود موج از چند مسیر دریافت شود. در آب‌های عمیق، بازتاب‌های سطح و کف قابل صرف نظر هستند، اما به دلیل سرعت متغیر با مکان صوت، پدیده شکست رخ می‌دهد و این امر سبب چند مسیری شدید می‌گردد. فرستنده‌ها و گیرنده‌های صوتی معمولاً حجیم و پر هزینه هستند و انرژی زیادی مصرف می‌کنند و برای پیاده‌سازی‌های مقیاس وسیع UWSN اقتصادی نیستند. به علاوه، فنآوری صوتی می‌تواند بر زندگی پستانداران دریایی مانند دلفین‌ها و نهنگ‌ها که از امواج صوتی برای ارتباط و راه‌یابی استفاده می‌کنند، تأثیرگذار باشد [۶, ۷].

مخابرات الکترومغناطیس با استفاده از امواج رادیویی زیر آب گسترشی از مخابرات رادیویی زمینی است. مخابرات رادیویی زیر آب چند مزیت عمده دارد؛ اول اینکه در مقایسه با امواج صوتی و نوری، امواج رادیویی عبور نسبتاً نرمی بین سطح هوا و آب ایجاد می‌کند. از این مزیت می‌توان در برقراری مخابرات بین مرزی استفاده کرد. دوماً نسبت به امواج صوتی و نوری، تحمل بیشتری در برابر اغتشاش و

کدری آب دارند [۸]. سوماً امواج رادیویی نسبت به امواج صوتی، سرعت بیشتر، فرکانس کاری بالاتر و درنتیجه پهنای باند بیشتری دارند.

محدودیت مهلکی که مانع از گسترش استفاده از امواج رادیویی در زیر آب می‌شود، طول لینک کوتاه آن است. آب دریا شامل نمک زیادی است و یک محیط انتقال هادی می‌باشد. متعاقباً، امواج رادیویی تنها می‌توانند چند متر در فرکانس‌های خیلی پایین (۳۰-۳۰۰ هرتز) منتشر شوند [۴]. علاوه بر این، سیستم‌های رادیویی به آنتن های بزرگ و فرستنده‌ها و گیرنده‌های پر مصرف و پر هزینه نیاز دارند.

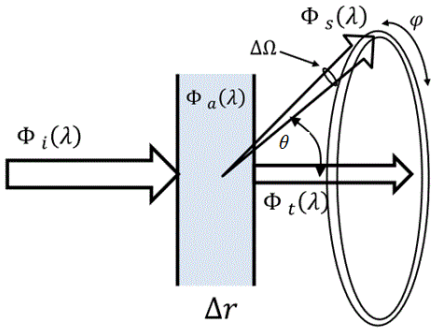
مخابرات بی‌سیم نوری زیرآب[۴]فنآوری تازه‌ای است که ازحامل‌های نوری برای انتقال اطلاعات در محیط‌های آبی استفاده می‌کند. استفاده از امواج نوری به عنوان حامل مخابرات بی‌سیم سبب می‌شود ارتباط با پهنای باند بالا، تأخیر زمانی کم و امنیت بالا در مقایسه با سیستم‌های بر اساس امواج فرکانس رادیویی و امواج صوتی به دست آید[۹]. این ویژگی‌ها فناوریUWOC را برای محدوده‌ی گسترده‌ای از کاربردها از جمله اتصال زیردریایی‌ها به خشکی، برقراری ارتباط بین زیردریایی-ها،کشتی‌ها،غواصان،کنترل شرایط آب وهوایی و نظارت ودیده‌بانی محیط، نگهداری و نظارت بر کارکرد تجهیزات نفتی، جستجوی میدان نفتی دور از ساحل، بازرسی مرز آبی کشورها جهت هرگونه ورود و خروج غیر عادی یا حمله دشمن بصورت زیر آبی و غیره جذاب کرده-است[۱۰, ۱۱].

با این وجود، پیاده‌سازی سیستم‌هایUWOC به دلیل محیط‌های پیچیده و تصادفی زیر آب با چالش‌های مختلف همراه خواهد بود. از جمله اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد سیستم‌هایUWOC، جذب[۵]، پراکندگی[۶] و اغتشاش[۷]می‌باشند. مدل کردن این عوامل به‌طور نظری قبل از پیاده‌سازی تجربی این سیستم‌ها کمک شایان توجهی به طراحی و ارزیابی سیستم‌های UWOC خواهد کرد. در این راستا، این مقاله به بررسی و مطالعه مدل‌های کانال موجود در تحقیقات گذشته می‌پردازد. در این مدل‌ها سه عامل بیان شده بررسی شده‌اند. در بخش ۲ ویژگی‌های انتشار نور در محیط‌های آبی ارائه می‌شود. دانستن این ویژگی‌ها در بررسی مدل‌های مختلف کانال UWOC ضروری است. سپس روش‌های کلی حل انتشار امواج نوری در محیط‌های آبی شامل معادله انتقال تشعشعی[۸] و شبیه‌سازی مونت کارلو[۹] به ترتیب، در بخش‌های ۳ و ۴معرفی می‌شوند.پس از آن در بخش‌های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب به بیان روش‌های مختلف مدل کردن تضعیف، پاسخ ضربه و اغتشاش در کانال پرداخته می‌شود. در بخش ۸ به‌طور مختصرسیستم انتها به انتهای[۱۰]UWOC بررسی خواهد شد. بخش ۹ به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- انتشار نور در آب

ویژگی‌های نوری ذاتی آب پارامترهای نوری هستند که تنها وابسته به خود محیط انتقال (به طور خاص‌تر، ترکیب محیط و مواد ذره‌ای درون آن) می‌باشند[۱۲, ۱۳]. این پارامترها مستقل از ویژگی‌های منابع نوری هستند و در تعیین بودجه‌بندی لینک مخابراتی استفاده می-شوند. اصلی‌ترین ویژگی‌های نوری ذاتی آب، ضریب جذب، ضریب پراکندگی، ضریب تضعیف[۱۱] و تابع پراکندگی حجمی[۱۲]می‌باشند.

برای توصیف رفتار نور در آب در حضور پراکندگی و جذب و به دست آوردن پارامترهای لازم، مطابق شکل (۲)یک المان کوچک از حجم آب شامل ذرات پراکنده کننده، به عرض Δr با طول و ارتفاع دلخواه کوچک در نظر گرفته می شود[۱۲]. نور تک رنگ همدوسی به آن تابیده می‌شود. نوری که وارد المان حجمی آب می شود، بخشی از آن جذب شده و بقیه نور از آن خارج می‌شود. همان‌طورکه درشکل(۲) نشان داده‌شده‌است، قسمتی از نور که از المان حجمی آب خارج می-شود، جهت انتشار خود را حفظ می‌کند، درحالی‌که باقیمانده به سمت جهت‌های دیگر منتشر می‌شود[۱۲].



شکل(۲): هندسه برخورد پرتو نور به آب[۱۲]

در شکل (۲)،Φi (با واحد $W.nm^{-1}$) توان تشعشعی طیفی تابیده شده به حجم آب ، Φa توان جذب شده، Φs توان پراکنده شده در همه جهت‌هاΦt باقیمانده توانی است که بدون تغییر جهت، منتقل شده است. همه این مقادیر وابسته به طول‌موج هستند. Φi به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi_i(\lambda) = \frac{hc}{\lambda}\frac{N}{\Delta\lambda} \qquad (۱)$$

که در آنhc/λ انرژی یک فوتون با طول‌موجλ، N تعداد فوتون‌های تابیده به المان حجمی آب در مدت زمان مشخص، و $\Delta\lambda$ محدوده طول‌موج مشاهده (یا پهنای باند فیلتر گیرنده نوری) می‌باشد. نسبت توان جذب شده $A(\lambda)$، توان منتقل شده $T(\lambda)$و توان پراکنده‌شده$B(\lambda)$، به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$A(\lambda) = \frac{\Phi_a(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \qquad (۲)$$

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \qquad (۳)$$

$$B(\lambda) = \frac{\Phi_s(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \qquad (۴)$$

اگر نسبت توان جذب شده و پراکنده شده را به فاصله Δr تقسیم کنیم و سپس آن را به سمت صفر میل دهیم، این مقادیر به ضرایبی تبدیل می‌شوند که تلفات در واحد فاصله را اندازه‌گیری می‌کنند که به آن‌ها ضریب جذب $a(\lambda)$ و ضریب پراکندگی $b(\lambda)$ گفته می‌شود و با روابط زیر بیان می‌شوند.

$$a(\lambda)=\frac{\mathrm{d}A(\lambda)}{\mathrm{d}r} \qquad (۵)$$

$$b(\lambda)=\frac{\mathrm{d}B(\lambda)}{\mathrm{d}r} \qquad (۶)$$

$A(\lambda)$ و $B(\lambda)$ دو پارامتر بدون واحد و ضریب جذب و ضریب پراکندگی با واحد m^{-1} هستند. تلفات کل یا ضریب تضعیف c با واحد m^{-1} به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$c(\lambda)=a(\lambda)+b(\lambda) \qquad (۷)$$

پارامتر مهم دیگر البیدو[۱۳] است که به صورت زیر تعریف می‌شود،

$$w_0(\lambda)=\frac{b(\lambda)}{c(\lambda)} \qquad (۸)$$

و نسبت تلفات ناشی از پراکندگی به تلفات کل را نشان می‌دهد. این پارامتر در مقایسه آب‌های مختلف مفید است و در محدوده صفر تا یک تغییر می‌کند. در آب‌های طبیعی این مقدار برای آب تمیز برابر ۰/۲۵ و برای آب‌های گل‌آلود بندرگاهی برابر ۰/۸ است. مقدار آن برای محیط کاملاً پراکنده‌کننده، یک و برای محیط بدون پراکندگی با تلفات ناشی از جذب، برابر صفر خواهد بود.

پرتو ناشی از پراکندگی که با Φ_s نشان داده می‌شود، وابسته به زاویه انحراف از جهت پرتو تابیده شده است که زاویه پراکندگی قطبی θ نامیده می‌شود. از آنجا که ذرات پراکنده کننده در آب‌های اقیانوسی به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند، توزیع زاویه شعاعی پراکندگی φ متقارن است، به شکل (۲) مراجعه شود. توزیع زاویه پراکندگی قطبی که به آن تابع پراکندگی حجمی گفته می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]،

$$\beta(\lambda;\theta)=\lim_{\Delta r\to 0}\lim_{\Delta\Omega\to 0}\frac{\Phi_s(\theta;\lambda)}{\Phi_i(\lambda)\Delta r\Delta\Omega} \qquad (۹)$$

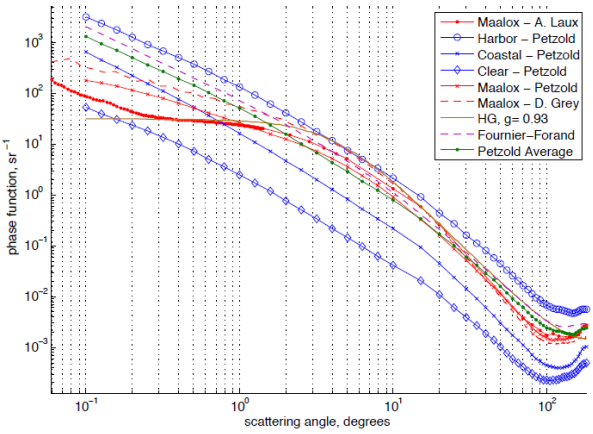
که برابر حد میزان پراکندگی نور به سمت خارج از حجم Δr درون زاویه فضایی $\Delta\Omega$ به مرکز θ است، وقتی که Δr و $\Delta\Omega$ هر دو به صفر میل می‌کنند. واحد β برابر $m^{-1}sr^{-1}$ می‌باشد و با آن ویژگی‌های پراکندگی تک فوتون در شرایط ضریب شکست ثابت به‌دست می‌آید. درحالی‌که برای مدل کردن رفتار پراکندگی تعداد زیادی فوتون مناسب نمی‌باشد. با انتگرال‌گیری از β روی همه زوایای فضایی، رابطه‌ای برای b به دست می‌آید.

$$b(\lambda)=\int_{4\pi}\beta(\lambda;\theta)\mathrm{d}\Omega=2\pi\int_0^{\pi}\beta(\lambda;\theta)\sin\theta\mathrm{d}\theta \qquad (۱۰)$$

از آنجا که توزیع زاویه پراکندگی شعاعی متقارن است، انتگرال روی آن برابر 2π است و زاویه پراکندگی قطبی در محدوده $[0,\pi]$ می‌باشد. اگر تابع پراکندگی حجمی β به ضریب پراکندگی b بهنجار شود، تابع فاز پراکندگی $\tilde{\beta}$ به‌دست می‌آید که تابع چگالی احتمال[۱۴] زاویه‌ی پراکندگی قطبی است.

$$\tilde{\beta}(\lambda;\theta)=\frac{\beta(\lambda;\theta)}{b(\lambda)} \qquad (۱۱)$$

تابع فاز پراکندگی برای انتخاب زوایای پراکندگی قطبی در شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، توسط تابع فاز پراکندگی می‌توان میزان نور پراکنده شده را برای همه زوایای پراکندگی نشان داد. این تابع، مخصوصاً در آب‌های ساحلی و بندرگاهی مهم است زیرا اثر مستقیم روی نحوه‌ی پاشندگی مکانی و زمانی دارد [۱۴]. هرچند اندازه‌گیری مستقیم آن آسان نیست، در [۱۵] تابع فاز پراکندگی برای انواع آب در ناحیه طول‌موج سبز-آبی اندازه گیری شده است و از آن در بسیاری از تحقیقات مربوط به UWOC استفاده شده است. با این وجود به دلیل حجم محاسبات زیاد مربوط به استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی مونت کارلو، تعدادی تابع فاز پراکندگی تحلیلی مانند تابع Henyey-Greenstein (HG) پیشنهاد شده‌اند [۱۶]. تابع HG به طور گسترده برای مدل کردن محیط پاشنده مانند ابر و آب دریا استفاده شده است [۱۷]. Fournier-Forand یکی دیگر از توابع فاز پراکندگی است که علیرغم دقت آن به دلیل پیچیدگی محاسبات رایج نشده است[۱۸]. شکل (۳) توابع فاز پراکندگی تحلیلی HG و Fournier-Forand، توابع فاز اندازه گیری شده Petzold برای انواع آب‌ها و متوسط آن‌ها و توابع فاز پراکندگی ناشی از مالوکس[۱۵](داروی ضد اسید معده که برای ایجاد پراکندگی به آب خالص افزوده می‌شود) اندازه‌گیری شده توسط افراد مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۳): توابع فاز پراکندگی تحلیلی و اندازه‌گیری شده برای انواع آب‌ها و مالوکس[۱۸]

۳- معادله انتقال تشعشعی

به منظور مدل کردن کانال نوری زیر آب، رفتار نور در محیط انتشار با معادله انتقال تشعشعی توصیف می‌شود. معادله انتقال تشعشعی از بیان پایستگی انرژی حاصل می‌شود. به طور خلاصه بیان می‌کند که پرتو نور، انرژی را از طریق پخش شدن و تلفات از دست می‌دهد و از طریق منبع نوری در محیط و بخشی از نور پراکنده شده که به سمت پرتو اولیه برمی‌گردد به دست می‌آورد.کلی‌ترین فرم معادله انتقال تشعشعی برای محیط ناهمگن و ناهمسان‌گرد برای تشعشع $L(\vec{x},t,\hat{\xi},\lambda)$ پلاریزه نشده و وابسته به زمان در مختصات مکانی سه بعدی، توسط رابطه زیر داده می‌شود [۱۲].

$$\frac{1}{v}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{L}{n^2}\right)+\hat{\xi}.\nabla\left(\frac{L}{n^2}\right)=-c\left(\frac{L}{n^2}\right)+\mathcal{L}_*^E+\mathcal{L}_*^I+\mathcal{L}_*^S \qquad (۱۲)$$

در این رابطه cضریب تضعیف مربوط به محیط، $v=v(\vec{x},t,\lambda)$ سرعت نور در محیط در مکان $\vec{x}$و در زمان tبرای طول‌موج λمی‌باشد. $\hat{\xi}$ جهت حرکت فوتون و nضریب شکست متغیر در زمان و مکان محیط است. $\mathcal{L}_*^E$، $\mathcal{L}_*^I$و $\mathcal{L}_*^S$ توابع مسیر(با واحد $m^{-3}W.sr^{-1}.nm^{-1}$) برای پراکندگی الاستیک، پراکندگی غیر الاستیک و منبع هستند [۱۲]. مشتقات رابطه بالا در [۱۹, ۲۰] یافت می‌شوند.

به دلیل پیچیدگی‌های زیاد عوامل تأثیرگذار بر چگونگی انتشار نور در محیط‌های آب طبیعی، معادله انتقال تشعشعی، یک معادله انتگرالی دیفرانسیلی و شامل متغیرهای مستقل متعددی است. از این رو، حل آن در حالت کلی بسیار پیچیده می‌باشد و یافتن یک حل تحلیلی دقیق، مشکل است. تنها تعداد کمی مدل تحلیلی در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند. در [۱۰] با استفاده از بردار اصلاح شده استوکس یک حل تحلیلی برای معادله انتقال تشعشعی به دست آمده است. در این مدل اثر پراکندگی چندگانه و پلاریزاسیون نور درنظر گرفته شده‌اند. با استفاده از نتایج عددی حاصل از مدل، حداکثر فاصله لینک با نرخ ارسال داده و نرخ خطای بیت مشخص به دست می‌آیند. در [۳, ۲۱] با استفاده از تقریب زاویه کوچک[۱۶]، معادله انتقال تشعشعی ساده شده و حل تحلیلی برای مدل کردن پخش پرتو در لینک UWOC مبتنی بر لیزر ارائه شده است. این مدل تحلیلی رابطه بین توان نوری دریافتی در فواصل مختلف لینک را برای هم‌ترازی‌های مختلف فرستنده گیرنده بیان می‌کند و در آزمایش‌های تانک آب اعتبارسنجی شده است. در تقریب زاویه کوچک فرض می‌شود که پراکندگی در زوایای کوچک مستقیم رخ می‌دهد و توزیع تشعشع نور نسبت به محور پرتو متقارن است. پراکندگی در زوایای بزرگ برای طول‌های پراکندگی بیشتر یا برای فاصله‌های آفست بیشتر قابل صرف نظر نیست. در این مواقع، اعمال تقریب زاویه کوچک سبب می‌شود که مدل تحلیلی ارائه شده با تشعشع واقعی مطابق نباشد.

علاوه بر راه حل‌های تحلیلی، روش‌های عددی نیز برای حل معادله انتقال تشعشعی به‌کار برده می‌شوند. برای بسیاری از کاربردهای عملی UWOC پیدا کردن حل تحلیلی دقیق معادله انتقال تشعشعی، بسیار مشکل و در برخی موارد غیر ممکن است. از طرفی، به دلیل فرض‌ها و تقریب‌های ساده کننده برای حل معادله، راه حل‌های تحلیلی از محدودیت‌های زیادی رنج می‌برند. به همین دلیل، بیشتر محققان بر ایجاد حل‌های عددی قدرتمند تمرکز کرده‌اند [۲۲, ۲۳]. برخلاف روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی با هر نوع هندسه سیستم انعطاف پذیر هستند و می‌توان پارامترهای مختلف سیستم مخابراتی را در آن‌ها در نظر گرفت. رایج‌ترین و کلی‌ترین روش عددی حل معادله انتقال تشعشعی، شبیه‌سازی احتمالی مونت کارلو است.

علاوه بر روش احتمالی مونت کارلو، دو روش قطعی Discrete ordinates و Invariant imbedding نیز برای حل عددی معادله انتقال تشعشعی استفاده می‌شوند [۱۲, ۲۳]. اما محققان کمی این دو روش را به عنوان جایگزینی برای شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده کرده‌اند [۲۲, ۲۴].

۴- شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو روش احتمالی تقلید انتشار نور در زیر آب با ارسال و ردیابی تعداد زیادی فوتون می‌باشد [۲۵, ۲۶]. مزیت روش مونت کارلو برنامه‌نویسی ساده، دقت نتایج و انعطاف‌پذیری بالای آن است. عیب آن خطاهای آماری تصادفی، سرعت پائین شبیه‌سازی به دلیل زمان‌بر بودن محاسبات و نیاز به پردازشگر قوی و حافظه زیاد می‌باشد و پدیده موجی را نمی‌تواند مخاطب قرار دهد. با این وجود به دلیل مزیت‌های آن و با پیشرفت‌های اخیر، در کاربردهای UWOC بسیار رایج شده‌است. در آزمایشگاه تحقیقاتی دریایی آمریکا یک راهنمای شبیه‌سازی مونت کارلو کامپیوتری برای کاربردهای عملی نور در آب گزارش شده است [۲۷]. این مرجع توسط محققین بسیاری در زمینه UWOC ارجاع داده شده است و دقیق بودن آن تأیید شده است.

برخلاف مدل‌های تحلیلی که پاسخ دقیقی برای یک مسئله تقریبی ارائه می‌دهند، شبیه سازی مونت کارلو، با استفاده از نمونه‌برداری تصادفی، حل تقریبی از یک مسئله دقیق ارائه می‌دهد. به این صورت که تعداد زیادی فوتون با استفاده از توابع چگالی احتمال مشخص برای طول مسیرهای پراکندگی و زوایای پراکندگی در مسیر دنبال می‌شوند. مجموع این فوتون‌ها، تقریبی از میدان نوری دریافت شده در گیرنده را به‌دست می‌دهند. با در نظر گرفتن تعداد کافی فوتون مورد شبیه‌سازی، می‌توان طبیعت آماری کانال را با دقت خوبی تخمین زد که با استفاده از معادله انتقال تشعشعی امکان پذیر نیست. روش مونت کارلو برای بسیاری از هندسه‌های سیستم انعطاف‌پذیر است. با مقایسه شبیه‌سازی‌ها و نتایج عملی، اعتبار روش مونت کارلو در پیش‌بینی ویژگی‌های مکانی و زمانی تایید شده است [۱۸, ۲۰, ۲۳, ۲۸-۳۲].

در تعدادی از تحقیقات گذشته از تلفیق روش‌های تحلیلی و مونت کارلو استفاده شده است. برای مثال در [۳۳] یک مدل انتقال تشعشعی نیمه تحلیلی مونت کارلو برای سیستم‌های لیدار[۱۷] اقیانوسی ارائه شده است که در مقایسه با روش رایج مونت کارلو، کاهش اساسی در واریانس نتایج و منابع کامپیوتری حاصل شده است.

در ادامه، روش‌های مختلف مدل کردن کانال UWOC در حضور عوامل جذب، پراکندگی و اغتشاش مربوط به ویژگی‌های طبیعی کانال

بررسی می‌شوند. ویژگی‌های سیستم مخابراتی نیز در این مدل‌ها درنظر گرفته شده‌اند.این روش‌ها به صورت تحلیلی، مونت کارلو یا تلفیقی از هر دو هستند.

۵- مدل کردن تضعیف در کانال UWOC

در لینکUWOC پرتو نوری ارسال شده در فرستنده، تلفات مختلفی را قبل از رسیدن به گیرنده تجربه می‌کند. در حالت کلی، رابطه توان خروجی P_{rx} بر اساس توان ورودی P_{tx} و اثرات کانال و مشخصات سیستم به صورت زیر بیان می‌شود [۳۴]. همه مقادیر به صورت dB هستند.

$$P_{tx} = P_{rx} + \tau_{optics} + \tau_{channel} + \tau_{pointing} + \tau_{geo} \qquad (۱۳)$$

τ_{optics} تلفات مربوط به سیستم نوری ازجمله فرستنده، گیرنده و لنزها است که بر اساس طراحی سیستم و پارامترهای قطعات نوری یک مقدار ثابت دارد. $\tau_{pointing}$ تلفات به دلیل ناهم‌ترازی هندسی فرستنده گیرنده و $\tau_{channel}$ تلفات ناشی از کانال به دلیل جذب و پراکندگی و τ_{geo} تلفات ناشی از پخش‌شدگی هندسی پرتو روی فاصله انتقال می‌باشد [۳۴]. در ادامه، روش‌های مدل کردن تضعیف در انواع مختلف لینک‌هایUWOC بیان می‌شوند.

۵-۱- مدل تضعیف در پیکربندی مستقیم[۱۸]

انتشار به صورت مستقیم و بدون پراکندگی درآب خالص و با ضریب شکست ثابت محیط، ساده‌ترین حالت معادله انتقال تشعشعی است که به قانون Beer Lambert شناخته می‌شود[۲۸]. این قانون ساده‌ترین و پراستفاده‌ترین روش را برای توصیف اثرات تضعیف ناشی از کانال بر نور در محیط‌های زیر آب فراهم می‌کند.

$$I = I_0 \exp[-c(\lambda)z] \qquad (۱۴)$$

در آنI_0 توان نور ارسال شده، z فاصله انتشار نور، Iتوان نور پس از عبور فاصله z و $c(\lambda)$ ضریب تضعیف می‌باشد[۳, ۷]. در این قانون دو فرض درنظر گرفته می‌شود. اول اینکه فرستنده و گیرنده در یک لینک مستقیم نقطه به نقطه کاملاً هم‌تراز هستند. دوم اینکه، همه فوتون‌های پراکنده شده از دست می‌روند؛ هرچند در واقعیت برخی از فوتون‌های پراکنده شده می‌توانند پس از رخدادهای متوالی پراکندگی، در گیرنده دریافت شوند. این فرض سبب می‌شود که این رابطه توان نوری دریافت شده را مخصوصاً در محیط‌هایی که پراکندگی زیاد است به شدت کم تخمین بزند. این رابطه تنها توان دریافتی را به طور ساده محاسبه می‌کند و اطلاعاتی راجع به ویژگی‌های زمانی- مکانی پرتو دریافت شده در اختیار نمی‌گذارد. برای ایجاد مدل دقیق تضعیف در لینک UWOC لازم است اثرات پراکندگی، جذب و اغتشاش به همراه تنظیمات خاص لینک در نظرگرفته شوند.

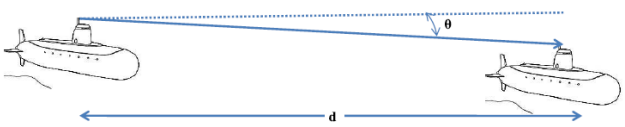
به منظور مدل کردن اثرات پراکندگی با در نظر گرفتن تابع پراکندگی حجمی $\beta(\lambda;\theta)$ نسخه‌ای دیگر از قانونBeer Lambert در [۳۵] به صورت زیر بیان شده است.

$$P_r(\lambda, z, \theta) = P_0 \exp[-c(\lambda)z]\beta(\lambda;\theta) \qquad (۱۵)$$

در این رابطه اثر طول مخابراتی و زوایای پراکندگی برای انواع آب‌های مختلف قابل ارزیابی است. در [۷] با درنظر گرفتن پارامترهای فرستنده و گیرنده، رابطه جامع‌تری برای توان سیگنال دریافتی P_R در لینک با پیکربندی مستقیم ارائه شده است.

$$P_{R-LOS} = P_T \eta_T \eta_R L_P(\lambda, \frac{d}{\cos\theta}) \frac{A_R \cos\theta}{2\pi d^2 (1-\cos\theta_0)} \qquad (۱۶)$$

P_T متوسط توان نوری فرستنده، η_T و η_R به ترتیب راندمان نوری فرستنده و گیرنده، d فاصله عمودی بین صفحه فرستنده و گیرنده، θ زاویه بین عمود به صفحه گیرنده و مسیر فرستنده گیرنده، A_R مساحت روزنه گیرنده و θ_0 زاویه واگرایی پرتو لیزر می‌باشد. تعدادی از پارامترها در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.

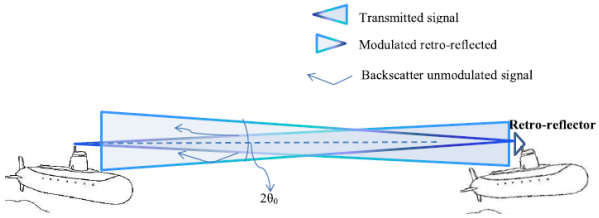


شکل (۴): پارامترهای پیکربندی مستقیم [۳۵]

پیکربندی مبتنی بر بازتاب[۱۹] یکی دیگر از انواع لینک‌های مستقیم است که توان دریافتی در این حالت طبق رابطه زیر در [۷] داده شده است.

$$P_{R_Retro} = P_T \eta_T \eta_R \eta_{Retro} L_P(\lambda, \frac{2d}{\cos\theta}) \times \frac{A_{Retro}\cos\theta}{2\pi d^2(1-\cos\theta_0)} \times \left[\frac{A_R \cos\theta}{\pi(d\tan\theta_{Retro})^2}\right] \qquad (۱۷)$$

که در آن η_{Retro} راندمان نوری بازتابنده، A_{Retro} مساحت روزنه بازتابنده، θ_{Retro} زاویه واگرایی بازتابنده است و سایر پارامترها مشابه پیکربندی مستقیم تعریف می‌شوند، به شکل (۵) مراجعه شود.



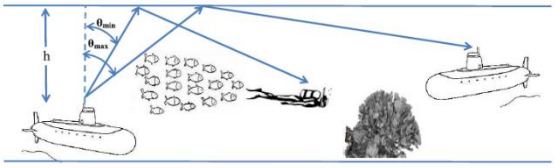
شکل(۵): پیکربندی مبتنی بر بازتابنده [۳۵]

۵-۲- مدل تضعیف در پیکربندی غیر مستقیم[۲۰]

در مقایسه با پیکربندی‌های مستقیم، مدل‌سازی کانال UWOCبا پیکربندی غیرمستقیم توجه کم‌تری دریافت کرده است. با این وجود تعدادی از تحقیقات گذشته این مسئله را مورد بررسی قرار داده‌اند که در اینجا بیان می‌شوند. در پیاده‌سازی‌های غیرمستقیم، از بازتاب سطح دریا برای غلبه بر موانع موجود بر سر راه لینک استفاده می‌شود. انتشار نور در پیکربندی غیرمستقیم اثرات تضعیف مشابه پیکربندی مستقیم را تجربه می‌کند. تفاوت اصلی آن‌ها، اثرات بازتاب ایجاد شده از طریق سطح مواج دریا می‌باشد و توصیف دقیق اثر بازتاب سطح دریا به عنوان بحرانی‌ترین بخش مدل‌سازی پیکربندی غیرمستقیم درنظر گرفته می‌شود. در [۳۶-۳۸] مدل‌های متعددی برای توصیف شیب‌های تصادفی سطح دریا ارائه شده‌اند.

مشابه مدل‌های کانال با پیکربندی مستقیم، مدل‌های کانال با پیکربندی غیرمستقیم نیز به صورت تحلیلی و عددی قابل دست‌یابی هستند. با این وجود، بیشتر مدل‌های کانال با پیکربندی غیرمستقیم، بر اساس روش‌های عددی مونت کارلو به دست آمده‌اند. به عنوان مثالی از روش تحلیلی، در [۷, ۳۹] مدل ریاضی برای توان دریافتی در کانال با پیکربندی غیرمستقیم به دست آمده است. در این مدل، لازم است واگرایی پرتو لیزر با استفاده از آرایه‌ای از LED ها یا لیزرها برای ایجاد یک مخروط نوری با زوایای داخلی و خارجی θ_{min} و θ_{max}، در آب‌های تمیز افزایش یابد، به شکل (۶) رجوع شود. نوری که به سطح هوا-اقیانوس می‌رسد، یک ناحیه حلقوی را روشن می‌کند و از آنجا که ضریب شکست هوا کم‌تر از آب است، بازتاب کامل داخلی بالای زاویه تابش بحرانی می‌تواند رخ دهد.

در این مدل، مفهوم جدیدی از شبکه UWOC با پیکربندی غیرمستقیم ارائه شده است. هر گره درون این شبکه می‌تواند با گره‌های دیگر از طریق بازتاب سطح اقیانوس-هوا ارتباط برقرار کند. ارتباط از یک تک گره به چندین گره قابل دست‌یابی است. همچنین برای تست معتبر بودن مدل، شبیه‌سازی عددی نیز انجام شده است. از نتایج شبیه‌سازی مشخص می‌شود که افزایش فاصله بین گره‌ها به شدت نرخ خطای بیت سیستم را افزایش می‌دهد.



شکل (۶): چیدمان پیکربندی غیرمستقیم [۳۵]

در مثالی دیگر، با اعمال روش مونت کارلو در [۴۰, ۴۱] با در نظر گرفتن اثر شیب‌های تصادفی سطح دریا و پراکندگی آب، یک مدل تضعیف برای لینک‌های با پیکربندی غیرمستقیم ارائه شده است. شیب‌های تصادفی سطح دریا با یک فرم گوسی مدل شده است. سطح دریا به برش‌های کوچک[۲۱] تقسیم شده و بردار عمود به هر برش با یک توزیع احتمال به دست آمده است و به این صورت تاثیر سطح با یک حل عددی ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند که شیب‌های تصادفی سطح القا شده توسط باد یا سایر منابع اغتشاشی می‌تواند به شدت سیگنال دریافتی را تحریف کند. هنگامی که سیگنال دریافتی شامل چندین مؤلفه غالب نور پراکنده شده است، اثر نوسانات سطح کاهش می‌یابد.

در ادامه کار [۴۱]، در [۳۸] یک مدل تحلیلی از شیب‌های تصادفی سطح دریا ارائه شده است که خطاهای هم‌سوسازی لینک ایجاد شده توسط جیتر[۲۲] کم فرستنده گیرنده در یک سیستم UWOC عمودی مبتنی بر بویه[۲۳] را در نظر می‌گیرد. تابع چگالی احتمال شیب‌های تصادفی سطح دریا طبق [۳۸] بیان می‌شوند.

$$P(s_x, s_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_c}\exp\left[-\left(\frac{s_x^2}{2\sigma_u^2}+\frac{s_y^2}{2\sigma_c^2}\right)\right] \quad (۱۸)$$

که درآن $s_x = \partial z / \partial x$ و $s_y = \partial z / \partial y$ به ترتیب به عنوان شیب‌های موج موازی باد و متقاطع باد در مختصات دکارتی(x, y, z) تعریف می‌شوند. σ_u^2 و σ_c^2 به ترتیب، نشان‌دهنده مربع میانگین شیب در جهت‌های موازی باد و متقاطع باد هستند. با استفاده از این مدل و میزان پخش‌شدگی پرتو می‌توان عملکرد نرخ خطای بیت سیستم را ارزیابی کرد. نتایج عددی نشان می‌دهند که نرخ خطای بیت با افزایش خطاهای هم‌سوسازی بدتر می‌شود. هرچند، این کاهش عملکرد می تواند با افزایش کدری آب دریا جبران شود. در [۴۲] تابع چگالی احتمال مشابهی از شیب‌های تصادفی سطح دریا مشابه [۳۸] برای مدل کردن خطاهای هم‌سوسازی مربوط به لینک‌های عمودی UWOC مبتنی بر بویه به کار گرفته شده است. با استفاده از این مدل، ظرفیت لینک‌های عمودی UWOC چند ورودی- چند خروجی مبتنی بر بویه ارزیابی شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که آب‌های کدرتر و طول لینک بزرگ‌تر، ظرفیت کانال را کاهش می‌دهند، درحالی‌که اثرات شیب‌های تصادفی را تضعیف می‌کنند [۴۲].

۵-۳- مدل تضعیف با درنظر گرفتن ناهمترازی[۲۴]

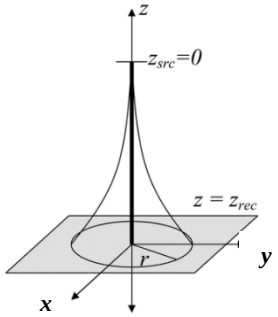
به سه دلیل اصلی، ناهم‌ترازی لینک در هر سیستم UWOC غیر قابل اجتناب است: ۱- برای فراهم کردن نرخ داده بالاتر و طول لینک بلندتر، در بسیاری از کاربردهای UWOC از دیود لیزری و دیودهای نوری به عنوان فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود. زاویه واگرایی کم دیودهای لیزری و میدان دید محدود دیودهای نوری، نیازمندی سیستم‌های UWOC به هم‌ترازی را افزایش می‌دهد. ۲- حرکت‌های نسبی تولید شده در اثر عبور وسایل زیر آب، جریان اقیانوس و سایر منابع اغتشاشی و همین طور فرستنده و گیرنده متحرک سبب ناهم‌ترازی شدید لینک‌های UWOC می‌شوند و نیازمندی‌های ردیابی و

هم‌ترازی برای ایجاد یک لینک قابل اعتماد و متوقف نشده افزایش می‌یابد. ۳- تغییرات ضریب شکست با شرایط محیطی ناهم‌ترازی لینک UWOC را بدتر می‌کند [۴۳].

خطای هم‌سوسازی در UWOC شامل دو مؤلفه است: دید مستقیم[۲۵] و جیتر[۴۴]. دید مستقیم یک جابه‌جایی ثابت بین مرکز پرتو و مرکز گیرنده نوری است، درحالی‌که جیتر جابه‌جایی تصادفی مرکز پرتو در صفحه گیرنده است. یک نمونه مدل تحلیلی تضعیف ناشی از ناهم‌ترازی با صرف نظر از خطای هم‌سوسازی ناشی از جیتر کم فرستنده گیرنده در [۳, ۴۱, ۴۵] ارائه شده است. برای مدل کردن ناهم‌ترازی لینک، تابع پخش پرتو[۲۶] (توزیع توان پرتو نوری در فاصله L از منبع) در صفحه‌ای عمود به محور پرتو با فاصله آفست r از مرکز پرتو (r فاصله مرکز روزنه گیرنده و مرکز پرتو در صفحه گیرنده است) محاسبه می‌شود.

$$BSF(L,r) = E(L,r)\exp(-cL) + \int_0^{\infty} E(L,v)\exp(-cL) \times \left\{ \exp\left[\int_0^L bs(v(L-z))dz \right] - 1 \right\} J_0(vr)vdv \quad (۱۹)$$

$BSF(L,r)$ تابع پخش پرتو یا توزیع شدت نور در صفحه گیرنده، $E(L,r)$ و $E(L,v)$ توزیع‌های شدت نور لیزر در مختصات مکانی و حوزه فرکانس مکانی، b و c ضرایب پراکندگی و تضعیف و $s(v)$ تبدیل هنکل تابع فاز پراکندگی هستند. شکل(۷) هندسه مسئله برای محاسبه تابع پخش پرتو را نشان می‌دهد. تابع پخش پرتو هر دو مؤلفه نوری پراکنده شده و پراکنده نشده را در نظر می‌گیرد و تخمین خوبی از توزیع توان فراهم می‌کند. مؤلفه پراکنده نشده به صورت نمایی با طول انتشار کاهش می‌یابد. برای انجام محاسبات تابع پخش پرتو، تبدیل هنکل برایهندسه‌های متقارن حل تحلیلی ساده‌ای فراهم می‌کند.



شکل (۷): هندسه مسئله برای محاسبه تابع پخش پرتو[۳]

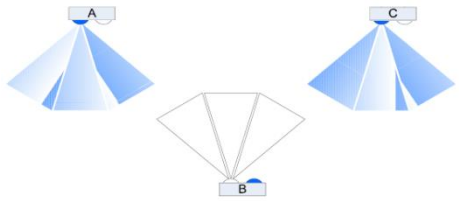
در این مدل، عملکرد نرخ خطای بیت سیستم با استفاده از تابع پخش پرتو در شرایط ناهم‌ترازی (گیرنده در فاصله r) ارزیابی شده است. نتایج عددی مشخص می‌کنند که صرف نظر از نوع آب، اگر توان ارسالی با توجه به طول لینک به اندازه کافی زیاد باشد، یک مقدار مشخص ناهم‌ترازی، کاهش عملکرد شدیدی را سبب نمی‌شود. به عنوان مثال، برای نرخ خطای بیت 10^{-4} در فاصله لینک ۵۰ متر آب ساحلی و توان ارسالی ۶۰dBm، فاصله آفست گیرنده از محور افقی لینک حداکثر ۱ متر به دست آمده است [۴۱].

تعدادی از تحقیقات گذشته از روش‌های عددی برای مدل کردن ناهم‌ترازی لینک UWOC استفاده کرده‌اند. با استفاده از روش مونت کارلو در [۴۶]، اثر ناهم‌ترازی لینک بر توان دریافتی سیستم با پیکربندی مستقیم نقطه به نقطه بررسی شده است و با آزمایش‌های تانک آب با طول ۳/۵ متر اعتبارسنجی شده است. برای مدل کردن اثرات ناهم‌ترازی ناشی از تغییرات ضریب شکست در [۴۳, ۴۷, ۴۸] پروفایل تغییرات ضریب شکست با عمق آب ارائه شده است. سپس با ردیابی فوتون‌ها در این پروفایل در شبیه‌سازی عددی، میزان آفست قابل تحمل در لینک UWOC محاسبه شده است. برای مثال در [۴۷] نشان داده شده است که برای فاصله لینک عمودی ۲۰۰ متری، ۰/۲۳ متر آفست با گیرنده با میدان دید ۰/۵۷ درجه قابل حصول است. اثر ناهم‌ترازی به دلیل ویژگی‌های منبع نوری مانند واگرایی و زاویه فرستنده از سطح[۲۷] با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای توزیع زمانی مکانی نور در [۴۹] بررسی شده است.

برای اجتناب از نیازمندی هم‌سوسازی در UWOC، برخی سیستم‌ها از PMT[۲۸] به عنوان گیرنده نوری استفاده می‌کنند، زیرا آن‌ها به دلیل اندازه روزنه بزرگ از ۱۰ میلیمتر تا ۵۰۰ میلیمتر، میدان دید بزرگ‌تری را فراهم می‌کنند. با این حال، این سیستم‌ها گران و حجیم هستند و برای محیط چند کاربری مناسب نمی‌باشند.

برای کاهش اثرات ناشی از ناهم‌ترازی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، هم‌سوسازی و ردیابی به صورت الکترونیکی پیاده‌سازی می‌شود، به طوریکه گیرنده قادر است میدان دید خود را متناسب با زاویه ورود سیگنال نوری تغییر دهد. در [۵۰] استفاده از فرستنده گیرنده‌های هوشمند برای بهبود دقت هم‌سوسازی سیستم UWOC گزارش شده است. فرستنده‌های هوشمند می‌توانند کیفیت آب را از نوری که به عقب پراکنده شده است و توسط گیرنده جمع‌آوری شده است، تخمین بزنند. گیرنده‌های هوشمند، میدان دید عریض تقسیم‌بندی شده و مکانیزم الکترونیکی هدایت پرتو[۲۹] برای هم‌راستا کردن میدان دید به سمت سیگنال مطلوب را دارند. سناریوهای مختلف پیاده‌سازی فرستنده گیرنده‌های هوشمند در شکل (۸) نشان داده شده‌اند.

(الف) (ب)



(ج)

شکل(۸): فرستنده گیرنده‌های هوشمند برای سیستم UWOC (الف) ردیابی و هم‌سوسازی با سوئیچینگ الکترونیک (ب) تخمین نور به عقب پراکنده شده (ج) میدان دید تقسیم‌بندی شده برای سیستم دو طرفه با چند پایگاه[۵۰]

۶- مدل پاسخ ضربه کانال

برای بررسی تأثیر پراکندگی چندگانه در میزان پاشندگی زمانی و پس از آن نرخ خطای بیت، مدل کردن پاسخ ضربه کانالUWOC اهمیت زیادی دارد. در تحقیقات گذشته پاسخ ضربه به صورت عددی، تحلیلی یا تلفیقی از هر دو مدل شده است. در [۱۰] بر اساس حلی از معادله انتقال تشعشعی، پاسخ ضربه کانال به صورت تحلیلی مدل شده است و نشان داده شده که عملکرد لینک به دلیل پراکندگی چندگانه کاهش می‌یابد. یک نور پلاریزه شده برای تحلیل اثر فاصله انتقال بر پاشندگی زمانی استفاده می‌شود و نتیجه‌گیری شده است که ISI برای مخابرات طول بلند (۵۰ متر) در نرخ داده بالا (۱ گیگا بیت بر ثانیه) شدید است. در [۱۶, ۵۱] با استفاده از توابعDoubleGamma یک عبارت به فرم بسته برای پاسخ ضربه به دست آمده است.

$$h(t)=C_1\Delta t e^{-C_2\Delta t}+C_3\Delta t e^{-C_4\Delta t},(t\geq t_0) \qquad (۲۰)$$

که در آن $\Delta t=t-t_0$، t مقیاس زمانی و $t_0=L/v$ مدت زمان انتشار است. L طول لینک و vسرعت نور در آب است [۱۶]. پارامترهای (C_1, C_2, C_3, C_4) از نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو طبق زیر قابل محاسبه هستند.

$$(C_1,C_2,C_3,C_4)=\text{argmin}(\int[h(t)-h_{mc}(t)]^2dt) \qquad (۲۱)$$

که در آن $h(t)$ تابع Double Gamma بیان شده در رابطه قبلی و $h_{mc}(t)$ پاسخ ضربه ناشی از شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد. argmin(.) عملگری برای برگرداندن مقدار مینیمم است. رابطه (۲۱) با استفاده از روش عددی انطباق منحنی قابل حل است [۱۶]. علاوه بر پاسخ ضربه، این رابطه می‌تواند عملکرد سیستم را با محاسبه نرخ خطای بیت و پهنای باند ۳dB کانال ارزیابی کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهدتابع Double Gamma برای توصیف پاسخ ضربه آب‌های کدر بندرگاهی و ساحلی با نتایج مونت کارلو مطابقت دارد. در مدل مونت کارلو تابع فازپراکندگی Henyey-Greenstein (HG)استفاده شده است. برای هردوآب، پاسخ ضربه برای طول لینک بلندتر، پهن‌ترمی‌شود زیرا فوتون‌ها در طول بزرگتر، بیشتر دچار پراکندگی می‌شوند و از پراکندگی زمانی نمی‌توان صرف نظر کرد. پارامترهای کانال مانند تابع فاز پراکندگی والبیدو می‌تواند روی شکل پاسخ ضربه مؤثر باشد.در [۵۱]، برابرسازی Zero-Forcing (ZF) برای مقابله با اثر پاشندگی زمانی استفاده شد و عملکرد سیستم UWOC بهبود یافت.

در ادامه [۱۶, ۵۱]، در [۵۲]عبارت به فرم بسته از توابع Weighted Double Gammaبرای مدل کردن پاسخ ضربه سیستم‌های چند ورودی چند خروجی ایجادشده است. توابع Double Gamma برای لینک‌های دو ورودی در دو خروجی مناسب نیستند. زیرا نور از دو منبع از بین کانال‌های نوری مختلفی عبور می‌کند که طول‌های تضعیف نابرابر دارند و بنابراین برای هر گیرنده متفاوت عمل می‌کنند. تابعHG به عنوان تابع فاز پراکندگی انتخاب شده است. در مناطق با طول و تضعیف زیاد در آب‌های ساحلی و بندرگاهی، نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو با نتایج پاسخ ضربه پیشنهادی مطابق اند. امادرمناطق با طول وتضعیف کم،پاسخ ضربه پیشنهادی مطلوب نیست؛ زیرا پاشندگی زمانی کم است و پاسخ ضربه تقریباً تابع دلتای ایده‌آل می‌شود. حتی باجابجایی فرستنده وگیرنده باز هم پاسخ ضربه ارائه شده با حل عددی در آب‌های با کدری بیشتر مطابق است. تنظیم فاصله دقیق فرستنده‌ها و گیرنده‌ها برای داشتن مدل کامل‌تر به تحقیقات بیشتر نیاز دارد. در [۵۳] پاسخ ضربه کانال با در نظر گرفتن پارامترهای گیرنده مانند اندازه روزنه و میدان دید، با شبیه‌ساز مونت کارلو مدل شده است. این شبیه‌ساز مونت کارلو برای ارزیابی ظرفیت کانال با فواصل لینک، شرایط آب و پارامترهای فرستنده گیرنده مختلف استفاده شده است [۵۴]. نتایج شبیه‌سازی مشخص می‌کند که پهنای باند UWOC در طول تضعیف (حاصل ضرب ضریب تضعیف در طول لینک) برابر ۱۵، برای آب تمیز و آب ساحلی از مرتبه صدها مگاهرتز و برای آب بندرگاهی از مرتبه ده‌ها مگاهرتز هستند. در [۱۷, ۲۸] پاسخ ضربه کانال با روش مونت کارلو به دست آمده است و پاشندگی زمانی کانال برای انواع مختلف آب، فواصل لینک و مشخصه‌های فرستنده گیرنده به صورت کمی بیان شده‌اند. در این مدل نسخه‌ای از تابع فاز پراکندگی HG به نام TTHG[۳۰] به‌کار گرفته شده است که نسبت به تابع HG با نتایج آزمایشگاهی تطبیق بهتری دارد.

$$P_{TTHG}(\theta)=\alpha P_{HG}(\theta,gFWD)+(1-\alpha)P_{HG}(\theta,-gBKWD) \qquad (۲۲)$$

که در آن P_{HG}تابع فاز پراکندگی HG، α وزن تابع HG در جهت جلو، $gFWD$ و $gBKWD$ فاکتورهای نامتقارن مربوط به توابع فاز HG در جهت جلو و عقب هستند [۲۸]. بر اساس این مدل عددی کانال، پاشندگی زمانی کانال در آب تمیز قابل چشم‌پوشی است. هرچند، در آب‌های کدر، پاشندگی زمانی بر انتقال اطلاعات تأثیرگذار است. بنابراین، در فواصل انتقال کوتاه و آب‌های تمیز، ISI کمتری در سیگنال دریافتی رخ می‌دهد. در [۵۵] برای ارزیابی روش مونت کارلو، آزمایشی در تانک آب ۲ متری صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو و آزمایش برهم منطبق هستند و نرخ اطلاعات ۱ گیگا بیت بر ثانیه حاصل شده است. نمونه دیگری از حل پاسخ ضربه با روش مونت کارلو در [۳۲] و [۳۴] انجام شده است. دقت شبیه‌ساز [۳۴] با

مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی [۳، ۵۶] ارزیابی شده است.

هرچند، بیشتر مدل‌های کانال UWOC بر اساس حل معادله انتقال تشعشعی هستند، در برخی از تحقیقات گذشته، مدل های تصادفی از طبیعت احتمالی حرکت فوتون‌ها ارائه شده‌اند. در [۵۷] یک مدل کانال تصادفی برای نشان دادن توزیع احتمالی زمانی-مکانی فوتون‌های منتشر شده برای مؤلفه‌های تک پراکندگی و بدون پراکندگی در لینک‌های UWOC ارائه داده شده است و توافق خوبی با نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو نشان می‌دهد. در ادامه [۵۷]، همان مدل کانال در [۵۸] با در نظر گرفتن همه حالت‌های فوتون‌های منتشر شده شامل پراکندگی چندگانه، تک پراکندگی و بدون پراکندگی ارائه شده

است که به خوبی با نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو در آب‌های کدر ساحلی و بندرگاهی منطبق می‌شود. بر اساس روش تصادفی ارائه شده در [۵۷، ۵۸]، عبارت به فرم بسته برای توزیع زاویه ورودی به گیرنده[۳۱] در [۵۹] ارائه شده است، درحالی‌که تنها مؤلفه‌های بدون پراکندگی و تک پراکندگی درنظر گرفته شده‌اند. مدل ارائه شده برای زاویه ورود، توزیع توان دریافت شده را روی همه زوایای دریافتی فوتون در گیرنده نشان می‌دهد. نتایج توزیع پیشنهادی با نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو در آب‌های تمیز، ساحلی و بندرگاهی با طول لینک نسبتاً کوتاه منطبق هستند.

اثر پراکندگی چندگانه در پیکربندی غیرمستقیم در [۶۰، ۶۱] مطالعه شده است و در [۶۲، ۶۳] پاسخ ضربه لینک UWOC با پیکربندی غیرمستقیم بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو ارائه شده است. مقایسه‌ای بین پیکربندی مستقیم و غیرمستقیم در [۲۹] انجام گرفت و نشان داده شد که ۱۰۰ مگاهرتز پهنای باند دردسترس برای لینک مستقیم در ۱۰متر آب کدر بندرگاهی به تقریباً ۲۰ مگاهرتز در محیط غیرمستقیم حتی در ۲۰ متر آب تمیز کاهش می‌یابد.

۷- مدل اغتشاش در لینک UWOC

اغتشاش در مخابرات نوری فضای آزاد به دقت بررسی شده و مطالعات نظری و تجربی آن به خوبی انجام گرفته است. به علت ماهیت پویا و تصادفی پدیده‌ی اغتشاش، مدل‌سازی و بررسی رفتار آن زیر آب امری دشوار است و به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است، درحالی‌که برکیفیت لینک زیر آب اثر می‌گذارد و قابل اجتناب نیست.

اغتشاش نوری زیرآب بیشتر بر اساس نتایج و تشابه تحقیقات کانال اغتشاش نوری اتمسفری در مخابرات نوری فضای آزاد می‌باشد. محققان بسیاری مدل‌های اغتشاش نوری اتمسفری کلاسیک را به عنوان مدل‌های اغتشاش نوری زیر آب مستقیماً اعمال و یا با تغییر، مورد استفاده قرار داده‌اند. برای مثال، در [۶۴-۶۶] مدل طیف کولموگروف[۳۲] برای نمایش اغتشاش نوری زیر آب پذیرفته شده است.

$$\Phi_n(\kappa) = K_3 \kappa^{-11/3} \qquad (۲۳)$$

که در آن $K_3 = \chi \varepsilon^{-1/3}$ پارامتری مشابه ضریب C_n^2 در مخابرات نوری فضای آزاد است و شدت توربولانس نوری زیر آب را نشان می‌دهد. χ نرخ اتلاف واریانس دما یا شوری، ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی (معمولاً بین $۱۰^{-۳}$ تا $۱۰^{-۱۱}$ m^2s^{-3} در آب‌های طبیعی است) و κ فرکانس مکانی اسکالر با واحد rad/m می‌باشد. یک مدل طیف توان دقیق‌تر برای نوسانات ضریب شکست در آب دریای اغتشاشی در [۶۷] استخراج شده است.

در فضای آزاد نوسانات تصادفی شدت نور دریافتی به طور کمی توسط تابع چگالی احتمال و ضریب درخشش[۳۳] مشخص می‌شود. ضریب درخشش از معادله زیر به‌دست می‌آید که در آن I شدت نور دریافتی است.

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \qquad (۲۴)$$

برای اغتشاش هوا مدل‌های تابع چگالی احتمال شامل توزیع نرمال لگاریتمی (لگنرمال)[۳۴]، توزیع K، توزیع گاما گاما[۳۵] و توزیع نمایی منفی[۳۶] استفاده می‌شوند. دو مدل اول برای اغتشاش ضعیف[۳۷]، مدل سوم برای اغتشاش ضعیف تا قوی[۳۸] و مدل آخر برای اغتشاش قوی تا شدید استفاده می‌شود.

باید توجه شود که تغییرات ضریب شکست در آب، چندین مرتبه بزرگتر از تغییرات ضریب شکست در هوا است [۶۸]. بنابراین به نظر می‌رسد مسئله اغتشاش در آب به بررسی مستقل بیشتری نیاز دارد و نمی‌توان تنها به تحقیقات انجام گرفته در فضای آزاد استناد کرد. در طی ده-پانزده سال اخیر، بیشتر مطالعات کانال UWOC، بر ارائه توصیف دقیق از اثرات جذب و پراکندگی تمرکز کرده‌اند، درحالی‌که بررسی اثر اغتشاش در دو سه سال اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه، تحقیقات انجام شده راجع به پدیده اغتشاش مربوط به کاربردهای UWOC بررسی می‌شوند.

ضریب درخشش پرتو صفحه‌ای، کروی وگوسی روی انتشار در اقیانوس با اغتشاش ضعیف و قوی بررسی شده است ونشان داده شده که تغییرات ضریب درخشش با پارامترهای اغتشاش زیر آب می‌تواند زیاد باشد[۶۹]. معادله انتقال تشعشعی در طول‌موج‌های ۶۰۰-۴۰۰ نانومتر در آب اقیانوس اغتشاشی در [۷۰] برای جریان‌ها، دما، و شوری مختلف برای تحلیل نوسانات تشعشع شبیه‌سازی شد. در لینک‌های مخابرات نوری فضای آزاد، روش‌هایی نظیر متوسط‌گیری روزنه[۳۹] و پیاده‌سازی طرح‌های دایورسیتی فضائی در گیرنده، جهت تعدیل اثر درخشش به کار برده می‌شود و روش‌های مشابهی نیز برای مخابرات زیر آب مورد استفاده قرار می‌گیرد[۷۱]. اثر متوسط‌گیری روزنه در [۷۲] برای آب اقیانوسی در شرایط اغتشاش ضعیف سبب کاهش شدید ضریب درخشش و بهبود عملکرد سیستم شده و نشان داده شده که اثر آن در پرتو صفحه‌ای شدیدتر از پرتو کروی است. با درنظر گرفتن اثر متوسط‌گیری روزنه، تابع چگالی احتمال شدت نور دریافتی در

اغتشاش هوا حتی برای اغتشاش قوی به خوبی با مدل نرمال لگاریتمی نشان داده می‌شود. به طور مشابه اغتشاش آب هم با تابع نرمال لگاریتمی طبق رابطه زیر مدل شده است [۶۶]که در آن I_0 مقدار میانگین شدت نور دریافتی است، به‌طوریکه $E(I)=I_0$.

$$p(I)=\frac{1}{I\sigma_I\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{\left[\ln(\frac{I}{I_0})+\frac{1}{2}\sigma_I^2\right]^2}{2\sigma_I^2}\right\},I>0 \quad (۲۵)$$

در [۶۶] اثر هم‌زمان جذب وپراکندگی و اغتشاش ضعیف در آب تمیز درنظرگرفته‌شده است.برای کاهش اثر درخشش و جبران محو شدگی از یک گیرنده چندتایی در سیستم تک ورودی-چند خروجی[۴۰] استفاده شده و فرض کرده که جذب و پراکندگی در آب تمیز اثری روی محوشدگی ندارند و اغتشاش علت اصلی محوشدگی است. شبیه سازی عددی مونت کارلو برای ارزیابی عملکرد نرخ خطای بیت سیستم اجرا شد. نتایج نشان می‌دهند که در طرح تک ورودی-چند خروجی، هرچهتعدادگیرنده‌هابیشترباشد، با یک میزان اغتشاش ثابت،می‌توان فاصله لینک را افزایش داد. اثر اغتشاش بر تصویربرداری زیر آب با آزمایش در محیط‌های طبیعی در [۷۳] بررسی شده است. در [۷۴] و [۷۵] اندازه‌گیری شدت اغتشاش در عمق‌های متغیر درون آب برای تحلیل اثر آن بر تصویر برداری زیر آب انجام شده است. در [۷۶] ثابت ساختار ضریب شکست با آزمایش در آب دریادر لینک عمودی حدوداً ۹ متری بررسی شده است. اثر اغتشاش بر تغییرات اندازه پرتو دریافتی و راندمان کوپلینگ پرتو لیزر درون فیبر تک مود در تانک ۲ متری آب در [۶۴] مورد بررسی قرار گرفته است.

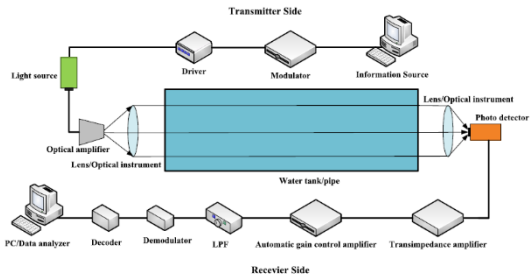
ضریب درخشش پرتو لیزر با مودهای مرتبه بالاتر در یک لینک افقی تحت اغتشاش ضعیف در [۷۷] و عملکرد نرخ خطای بیت آن در [۷۸] بررسی شده‌اند. ضریب درخشش و عملکرد نرخ خطای بیت یک سیستم چند ورودی تک خروجی[۴۱] با استفاده از پرتو لیزر آرایه‌ای در [۷۹] بررسی شده است. در مقایسه با سیستم‌های با یک فرستنده و یک گیرنده، سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی قابلیت اطمینان و بازدهی انتقال اطلاعات را افزایش می‌دهند [۵۲, ۸۰]. در [۸۱]یک سیستم با دو فرستنده دوگیرنده در یک محیط کدر و اغتشاشی از طریق تزریق حباب، خطاهای ناشی ازمحوشدگی را ده برابرکاهش داده است. در[۶۶] با پیاده‌سازی لینک تک ورودی-چند خروجی با۱ LED واتودرشرایط اغتشاش ضعیف در آب تمیز، طول لینک مؤثر بیشتر از ۶۰ متر به دست آمده است. مدل کردن کانال‌های چند ورودی-چند خروجی به دلیل افزایش تعداد فرستنده و گیرنده یکی از زمینه‌های چالش برانگیز در مخابرات نوری بی‌سیم زیر آب است و به تحقیقات بیشتر نیاز دارد.

در [۸۲]، ضریب درخشش پرتوهای نوری کروی و صفحه‌ای منتشر شونده در محیط‌های اغتشاشی زیر آب با استفاده از روش رایتو[۴۲] ارزیابی شدند و گزارش شد که اثر اغتشاش می‌تواند در محدوده ۱۰-۵ متری برای پرتو صفحه‌ای و ۲۵-۲۰ متری برای پرتو کروی تأثیرگذار باشد. ویژگی‌های آماری انتشار پرتوهای گوسی در آب‌های اغتشاشی در [۱۸, ۶۹, ۸۳-۸۵] بررسی شده‌اند. ضریب درخشش پرتو گوسی متمرکز[۴۳] برای اغتشاش اقیانوسی ضعیف در [۸۶] برای محاسبات نرخ خطای بیت مطالعه شده است. عبارت نیمه تحلیلی برای ضریب درخشش روی محور[۴۴]پرتو لیزر جزئی همدوس در [۸۷] استخراج شده است. کاهش در ضریب درخشش برای پرتو جزئی همدوس درمقایسه با پرتو گوسی در [۷۲] گزارش شده است.

در [۸۸] با به کار بردن مدل اغتشاش اقیانوسی از [۶۷, ۶۹]، رفتار زمانی تشعشع در اقیانوس در حال حرکت با اغتشاش ضعیف بررسی شده است. رابطه کرولیشن زمانی تشعشع، فاصله انتشار و سرعت متوسط محیط در حال حرکت با یک عبارت به فرم بسته توصیف شده است. نتایج نشان می‌دهند که متوسط سرعت جریان اقیانوسی عامل اصلی تأثیرگذار بر آمارهای زمانی تشعشع است درحالی‌که فاصله لینک اثر قابل چشم‌پوشی دارد [۸۸]. خلاصه مدل-های کانال بیان شده در قسمت‌های مختلف، در جدول (۲) آمده است.

۸- مدل انتها به انتهای سیستمUWOC

همان‌طور که در قسمت‌های پیشین بیان شد، در طول ده سال گذشته، تحقیقات زیادی در زمینه مدل‌سازی کانال UWOCانجام شده است. هدف نهایی،استفاده از مدل‌های بیان شده برای داشتن یک سیستم UWOC جامع است که بتواند در شرایط آب‌های مختلف و برای هندسه‌های لینک متعدد، ارتباط انتها به انتهای قابل اطمینان با نرخ خطای بیت کم بین فرستنده و گیرنده نوری فراهم کند.در مرحله قبل از آزمایش این مدل می‌تواند یک عبارت به فرم بسته برای محاسبه نرخ خطای بیت در شرایط مختلف و یا به صورت یک شبیه‌ساز و در مرحله آزمایش، به صورت یک سیستم عملی با قابلیت تولید و تجاری شدن باشد. مزیت مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازها، فراهم کردن امکان تخمین عملکرد کلی سیستم قبل از آزمایش به طراحان سیستم است. همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، این مدل می‌تواند شامل منبع نوری و درایور، مدلاتور، تقویت کننده، لنزهای نوری، گیرنده نوری، فیلتر نوری، دمدلاتور، دکدر و پردازش کننده سیگنال انتهایی باشد.



شکل (۹): چیدمان سیستم انتها به انتهای UWOC در پیکربندی مستقیم [۶, ۸۹]

در [۹۰] با در نظر گرفتن اثرات جذب، پراکندگی و اغتشاش روش تحلیلی برای محاسبه نرخ خطای بیت شبکه‌های بی‌سیم نوری زیر آب با دسترسی چندگانه با تقسیم‌بندی در حوزه کد[۴۵] معرفی شده است. برای افزایش محدوده پوشش لینک و افزایش عملکرد سیستم از تقویت کننده‌های میانی در چند مرحله در طول لینک استفاده شده است. در [۹۱] عبارت تحلیلی برای محاسبه نرخ خطای بیت سیستم‌های UWOC چند ورودی چند خروجی معرفی شده است. در [۹۲] نرخ خطای بیت سیستم UWOC تک ورودی چند خروجی شامل تقویت کننده نوری محاسبه شده است.

یک شبیه‌ساز انتها به انتهای شبکه با استفاده از روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی لایه فیزیکی شبکه در [۹۳] معرفی شده است که می‌تواند به همراه پروتکل‌های بالاتر لایه شبکه برای شبیه‌سازی عملکرد شبکه در مقیاس بزرگ‌تر و برای تعیین نیازمندی‌های سخت افزاری، تحت شرایط آب‌های مختلف استفاده شود. در [۹۴] یک مدل انتها به انتهای سیستم UWOC شامل مؤلفه‌های منبع نوری، آشکارساز، تقویت کننده، و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال ارائه شده و نتایج در یک استخر اعتبارسنجی شده‌اند. علی رغم تحقیقات انجام شده، همچنان یک شبیه‌ساز یکپارچه برای طراحان سیستم در دسترس نیست. هم چنین، با وجود آزمایش‌های متعدد در شرایط آب‌های مختلف، سیستم عملی قابل دسترس، تجاری نشده است.

۹- نتیجه‌گیری

استفاده از حامل‌های نوری برای انتقال اطلاعات در مخابرات نوری بی‌سیم زیر آب (UWOC) در مقایسه با امواج صوتی، سرعت انتقال و پهنای باند ارسال اطلاعات را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. به منظور بهره‌برداری از ویژگی‌های آن، لازم است عوامل تأثیرگذار بر انتشار نور در آب به دقت بررسی و در مدل‌سازی کانال UWOC درنظر گرفته شوند. در این مقاله پس از معرفی دانش پایه راجع به انتشار نور در آب و بیان روش‌های کلی حل انتشار نور در آب، مدل‌های ارائه شده کانال با توجه به سه عامل کلیدی مربوط به ویژگی طبیعی کانال شامل جذب، پراکندگی و اغتشاش مورد بررسی قرار گرفتند. به علاوه، نقش برخی ویژگی‌های سیستم مخابراتی مانند نوع لینک در مدل‌سازی کانال مطالعه شد. در پایان، مدل انتها به انتهای سیستم UWOC به‌طور مختصر معرفی شد. مطالعه روش‌های مدل‌سازی برای ارائه یک مدل کانال جامع و فراگیر، و سپس مدل انتها به انتهای سیستم برای داشتن نرخ داده و نرخ خطای قابل قبول در ارتباط نوری زیر آب لازم و ضروری است.

جدول (۲): خلاصه مدل‌های مختلف کانال UWOC

مدل کانال UWOC	مزایا	محدودیت‌ها	منابع
حل تحلیلی معادله انتقال تشعشعی	مدل کلی برای همه محیط‌ها	پیچیدگی حل	[۱۲, ۱۹, ۲۰]
حل تحلیلی با استفاده از بردار اصلاح شده استوکس	اثر پراکندگی چندگانه و پلاریزاسیون نور	حل تقریبی و تأیید نشده با آزمایش	[۱۰]
حل تحلیلی با استفاده از تقریب زاویه کوچک	اعتبارسنجی رابطه توان نوری دریافتی در فواصل مختلف لینک برای هم‌ترازی‌های مختلف فرستنده گیرنده	خطای تقریب زاویه کوچک در زوایای بزرگ پراکندگی برای طول‌های پراکندگی بیشتر یا برای فاصله‌های آفست بیشتر	[۳, ۲۱]
قانون Beer Lambert در پیکربندی مستقیم	ساده‌ترین و پراستفاده‌ترین روش برای توصیف اثر تضعیف	کم تخمین زدن توان نوری دریافت شده در محیط‌های با پراکندگی زیاد صرف نظر کردن از ویژگی‌های زمانی- مکانی پرتو دریافت شده	[۲۸]
قانون Beer Lambert اصلاح شده در پیکربندی مستقیم	در نظر گرفتن اثرات پراکندگی در تضعیف	صرف نظر کردن از ویژگی‌های زمانی پرتو دریافت شده	[۳۵]
قانون Beer Lambert اصلاح شده در پیکربندی مستقیم	در نظر گرفتن هندسی سیستم و پارامترهای فرستنده و گیرنده	صرف نظر کردن از ویژگی‌های زمانی پرتو دریافت شده	[۷]
مدل تضعیف در پیکربندی غیر مستقیم	در نظر گرفتن بازتاب سطح اقیانوس-هوا	صرف نظر از اثر شیب‌های تصادفی سطح دریا	[۷, ۳۹]
مدل تضعیف ناشی از ناهم‌ترازی	حل ساده	حل تقریبی با صرف نظر از خطای هم‌سوسازی جیتر فرستنده گیرنده	[۳, ۴۱, ۴۵]
مدل پاسخ ضربه	عبارت به فرم بسته	نیاز به شبیه‌سازی مونت کارلو	[۱۶, ۵۱]
مدل پاسخ ضربه	عبارت به فرم بسته برای سیستم‌های چند ورودی چند خروجی	محدودیت روش در مناطق با طول و تضعیف کم	[۵۲]

حل عددی معادله انتقال تشعشعی یا شبیه‌سازی احتمالی مونت کارلو	انعطاف پذیر با هر نوع هندسه سیستم، برنامه‌نویسی ساده، دقت نتایج	خطاهای آماری تصادفی، سرعت پائین شبیه‌سازی و نیاز به پردازشگر قوی و حافظه زیاد و پشتیبانی نکردن از پدیده موجی	[۱۸, ۲۰, ۲۳, ۲۸-۳۲]
مدل تضعیف در پیکربندی غیر مستقیم	در نظر گرفتن اثر شیب‌های تصادفی سطح دریا و پراکندگی آب	حل تقریبی و تأیید نشده با آزمایش	[۴۰, ۴۱]
مدل تضعیف ناشی از ناهم‌ترازی	اعتبارسنجی نتایج با آزمایش	طول محدود لینک	[۴۶, ۴۷, ۴۹]
پاسخ ضربه کانال	در نظر گرفتن پارامترهای گیرنده	در نظر نگرفتن پارامترهای فرستنده	[۳۲, ۳۴, ۵۳, ۵۴]
حل تحلیلی تصادفی	شامل توزیع احتمالی زمانی-مکانی فوتون‌های منتشر شده	انعطاف پذیر نبودن برای شرایط مختلف سیستم	[۵۷-۵۹]
مدل اغتشاش	عبارت به فرم بسته برای تابع چگالی احتمال	متناسب با شرایط فضای آزاد	[۶۶, ۷۷, ۷۸]

مراجع

[1] Stojanovic, M., "Underwater Wireless Communications: Current Achievements and Research Challenges", IEEE Oceanic Engineering Society Newsletter, Vol. 41, No. 2, pp. 1-5, 2006.

[2] Lanbo, L., Shengli, Z., Jun-Hong, C., "Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks," Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 8, pp. 977-994, 2008.

[3] Cochenour, B. M., Mullen, L. J., Laux, A. E., "Characterization of the Beam-Spread Function forUnderwater Wireless Optical Communications Links",IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 33, pp. 513-521, 2008.

[4] Pompili D., Akyildiz, I. F., "Overview of Networking Protocols for Underwater Wireless Communications",IEEE Communications Magazine, Vol. 47, pp. 97-102, 2009.

[5] Passerieux, J. M., Socheleau, F. X., Laot, C., "On the Capacity of the Underwater Acoustic Communication Channel under Realistic Assumptions,"11th European Wireless Conference Sustainable Wireless Technologies (European Wireless), pp. 1-6, 2011.

[6] Zeng, Z., A survey of underwater wireless optical communication, University of British Columbia, 2016.

[7] Arnon, S., "Underwater Optical Wireless Communication Network", Optical Engineering,Vol. 49, No. 1, pp. 015001-015001-6, 2010.

[8] Che, X., Wells, I., Dickers, G., Kear, P., Gong, X., "Re-evaluation of RF Electromagnetic Communication in Underwater Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, Vol. 48, pp. 143-151, 2010.

[9] Ghassemlooy, Z., PANG, N. W., Le Minh, H., "High-Speed All-Optical Time DivisionMultiplexed Node",Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers,Vol. 13, No. 2, 2006.

[10] Jaruwatanadilok, S., "Underwater Wireless Optical Communication Channel Modelingand Performance Evaluation Using Vector Radiative Transfer Theory", IEEE Journal on Selected Areas in Communications,Vol. 26, No. 9, 2008.

[11] Khalighi, M. A., Gabriel, C., Hamza, T., Bourennane, S., Leon, P., Rigaud, V., "Underwater Wireless Optical Communication; Recent Advances and RemainingChallenges", 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1-4, 2014.

[12] Mobley, C. D., Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters, Academic Press, 1994.

[13] Johnson, L. J., Jasman, F., Green, R. J., Leeson, M. S., "Recent Advances in Underwater Optical Wireless Communications",Underwater Technology, Vol. 32, No. 3, pp. 167-175, 2014.

[14] Potter, J. R., "UComms: A Conference and Workshop on Underwater Communications, Channel Modeling, and Validation",IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 38, No. 4, pp. 603-613, 2013.

[15] Petzold, T. J., Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters, Scripps Institution of Oceanography La Jolla Ca Visibility Lab, 1972.

[16] Tang, S., Zhang, X., Dong, Y., "On Impulse Response for Underwater Wireless Optical Links", MTS/IEEE OCEANS-Bergen, pp. 1-4, 2013.

[17] Gabriel, C., Khalighi, M. A., Bourennane, S., Leon, P., Rigaud, V., "Channel Modeling for Underwater Optical Communication", IEEE GLOBECOM Workshops, pp. 833-837, 2011.

[18] Cox Jr, W. C., Simulation, Modeling, and Design of Underwater Optical Communication Systems, Ph.D. Thesis, North Carolina State University, 2012.

[19] Mobley, C., Boss, E., Roesler, C., Ocean Optics Web Book, 2010.

[20] Van de Hulst, H. C., Multiple Light Scattering: Tables, Formulas, and Applications, Academic Press, 1980.

[21] Cochenour, B. M., Mullen, L. J., Laux, A. E., "Characterization of the Beam-Spread Function for Underwater Wireless Optical Communications Links",IEEE Journal of Oceanic Engineering,Vol. 33, No. 4, pp. 513-521, 2008.

[22] Li, C., Park, K.H., Alouini, M. S., "On the Use of a Direct Radiative Transfer Equation Solver for Path Loss Calculation in Underwater Optical Wireless Channels",IEEE Wireless Communications Letters,Vol. 4, pp. 561-564, 2015.

[23] Mobley, C. D., Gentili, B., Gordon, H. R., Jin, Z., Kattawar, G. W., Morel,A., et al., "Comparison of Numerical Models for Computing Underwater Light Fields",Applied Optics,Vol. 32, No. 36, pp. 7484-7504, 1993.

[24] Li, C., Park, K. H., Alouini, M. S., A Direct Radiative Transfer Equation Solver for Path Loss Calculation of Underwater Optical Wireless Channels, 2014.

Random Sea Surface", IEEE Communications Letters,Vol. 19, No. 12, pp. 2166-2169, 2015.
[43] Johnson, L. J., Green, R. J., Leeson, M. S., "Underwater Optical Wireless Communications: Depth Dependent Variations in Attenuation",Applied Optics,Vol. 52, No. 33, pp. 7867-7873, 2013.
[44] Yang, F., Cheng, J., Tsiftsis, T. A., "Free-Space Optical Communication with Non-Zero Boresight Pointing Errors",IEEE Transactions on Communications,Vol. 62, No. 2, pp. 713-725, 2014.
[45] Wei, W., Zhang, X., Chao, Y., Zhou, X., "An Analytical Model of the Power Spatial Distribution for Underwater Optical Wireless Communication",Optica Applicata, Vol. 42, No. 1, pp. 157-166, 2012.
[46] Gabriel, C., Khalighi, M. A., Bourennane, S., Léon, P., Rigaud, V., "Misalignment Considerations in Point-to-Point Underwater Wireless Optical Links", MTS/IEEE OCEANS-Bergen, pp. 1-5, 2013.
[47] Johnson, L. J., Green, R. J., Leeson, M. S., "Underwater Optical Wireless Communications: Depth-Dependent Beam Refraction",Applied Optics,Vol. 53, No. 31, pp. 7273-7277, 2014.
[48] Johnson, L. J., Green, R. J., Leeson, M. S., "The Impact of Link Orientation in Underwater Optical Wireless Communication Systems", IEEE Oceans-St. John's, pp. 1-8, 2014.
[49] Zhang, H., Dong, Y., "Link Misalignment for Underwater Wireless Optical Communications", Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), pp. 215-218, 2015.
[50] Simpson, J. A., Hughes, B. L., Muth, J. F., "Smart Transmitters and Receivers for Underwater Free-Space Optical Communication",IEEE Journal on Selected Areas in Communications,Vol. 30, No. 5, pp. 964-974, 2012.
[51] Tang, S., Dong, Y., Zhang, X., "Impulse Response Modeling for Underwater Wireless Optical Communication Links,"IEEE Transactions on Communications,Vol. 62, No. 1, pp. 226-234, 2014.
[52] Dong, Y., Zhang, H., Zhang, X., "On impulse response modeling for underwater wireless optical MIMO links", IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), pp. 151-155, 2014.
[53] Li, J., Ma, Y., Zhou, Q., Zhou, B., Wang, H., "Monte Carlo Study on Pulse Response of Underwater Optical Channel", Optical Engineering,Vol. 51, No. 6, pp. 066001-1-066001-5, 2012.
[54] Li, J., Ma, Y., Zhou, Q., Zhou, B., Wang, H., "Channel Capacity Study of Underwater Wireless Optical Communications Links Based on Monte Carlo Simulation",Journal of Optics,Vol. 14, No. 1, p. 015403, 2011.
[55] Hanson, F., Radic, S., "High Bandwidth Underwater Optical Communication",Applied Optics,Vol. 47, No. 2, pp. 277-283, 2008.
[56] Berrocal, E., Multiple Scattering of Light in Optical Diagnostics of Dense Sprays and Other Complex Turbid Media, Ph.D. Thesis, Cranfield University, 2006.
[57] Zhang, H., Dong, Y., Zhang, X., "On Stochastic Model for Underwater Wireless Optical Links", IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC),pp. 156-160, 2014.
[58] Zhang, H., Dong, Y., "General Stochastic Channel Model and Performance Evaluation for Underwater Wireless Optical Links",IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 15, No. 2, pp. 1162-1173, 2016.
[59] Zhang, H., Hui, L., Dong, Y., "Angle of Arrival Analysis for Underwater Wireless Optical Links",IEEE
[25] Wang, L., Jacques, S. L., Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-Layered Tissues in Standard C,The University of Texas, MD Anderson Cancer Center, pp. 4-11, 1992.
[26] Lerner, R. M., Summers, J. D., "Monte Carlo Description of Time-and Space-Resolved Multiple Forward Scatter in Natural Water", Applied optics, Vol. 21, No. 5, pp. 861-869, 1982.
[27] Leathers, R. A., Downes, T. V., Davis, C. O., Mobley, C. D., Monte Carlo Radiative Transfer Simulations for Ocean Optics: A Practical Guide, Naval Research Lab Washington Dc Applied Optics Branch, 2004.
[28] Gabriel, C., Khalighi, M. A., Bourennane, S.,Léon, P., Rigaud, V., "Monte-Carlo-based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems", Journal of Optical Communications and Networking,Vol. 5, No. 1, pp. 1-12, 2013.
[29] Jasman, F., Green, R., "Monte Carlo Simulation for Underwater Optical Wireless Communications", 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), pp. 113-117, 2013.
[30] Mullen, L., Cochenour, B., Rabinovich, W., Mahon, R., Muth, J., "Backscatter Suppression for Underwater Modulating Retroreflector Links Using Polarization Discrimination",Applied Optics,Vol. 48, No. 2, pp. 328-337, 2009.
[31] Wang, L., Jacques, S. L., Zheng, L., "MCML—Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-Layered Tissues",Computer methods and programs in biomedicine,Vol. 47, No. 2, pp. 131-146, 1995.
[32] Dalgleish, F. R., Caimi, F. M., Vuorenkoski, A. K., Britton, W. B., Ramos, B., Giddings,T. E., et al., "Efficient Laser Pulse Dispersion Codes for Turbid Undersea Imaging and Communications Applications", in Proc. SPIE, p. 76780I, 2010.
[33] Poole, L. R., Venable, D. D., Campbell, J. W., "Semianalytic Monte Carlo Radiative Transfer Model for Oceanographic Lidar Systems",Applied Optics,Vol. 20, No. 20, pp. 3653-3656, 1981.
[34] Cox, W., Muth, J., "Simulating Channel Losses in anUnderwater Optical Communication System",JOSA A,Vol. 31, No. 5, pp. 920-934, 2014.
[35] Kaushal, H., Kaddoum, G., "Underwater Optical Wireless Communication",IEEE Access,Vol. 4, pp. 1518-1547, 2016.
[36] Cox, C., Munk, W., Slopes of The Sea Surface Deduced from Photographs of Sun Glitter, Scripps Institution of Oceanography,1956.
[37] Plant, W. J., "A New Interpretation of Sea-Surface Slope Probability Density Functions",Journal of Geophysical Research: Oceans,Vol. 108, No. C9, 2003.
[38] Dong, Y., Tang, S., Zhang, X., "Effect of Random Sea Surface on Downlink Underwater Wireless Optical Communications",IEEE Communications Letters,Vol. 17, No. 11, pp. 2164-2167, 2013.
[39] Arnon, S., Kedar, D., "Non-Line-of-Sight Underwater Optical Wireless Communication Network",JOSA A,Vol. 26, No. 3, pp. 530-539, 2009.
[40] Tang, S., Dong, Y., Zhang, X., "On Path Loss of NLOS Underwater Wireless Optical Communication Links", MTS/IEEE OCEANS-Bergen, pp. 1-3, 2013.
[41] Tang, S., Dong, Y., Zhang, X., "On Link Misalignment for Underwater Wireless Optical Communications",IEEE Communications Letters,Vol. 16, pp. 1688-1690, 2012.
[42] Zhang, H., Dong, Y., Hui, L., "On Capacity of Downlink Underwater Wireless Optical MIMO Systems with

Imaging", Ocean Sensing and Monitoring III, Vol. 8030, p. 803009, 2011.
[76] Nootz, G., Jarosz, E., Dalgleish, F. R., Hou, W., "Quantification of Optical Turbulence in the Ocean and its Effects on Beam Propagation",Applied Optics,Vol. 55, No. 31, pp. 8813-8820, 2016.
[77] Baykal, Y., "Higher Order Mode Laser Beam Scintillations in Oceanic Medium", Waves in Random and Complex Media,Vol. 26, No. 1, pp. 21-29, 2016.
[78] Arpali, S. A., Baykal, Y., Arpali, Ç., "BER Evaluations for Multimode Beams in Underwater Turbulence", Journal of Modern Optics,Vol. 63, No. 13, pp. 1297-1300, 2016.
[79] Gökçe, M.C., Baykal, Y., "Scintillation Analysis of Multiple-Input Single-Output Underwater Optical Links",Applied Optics,Vol. 55, No. 22, pp. 6130-6136, 2016.
[۸۰] زراعتکار مقدم. جواد، فرخی. حمید، ندا. ناصر، "بررسی تأثیر فاصله بین آنتن ها در فرستنده و گیرنده بر روی ظرفیت کانال MIMO"،نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۵.
[81] Simpson, J. A., Hughes, B. L., Muth, J. F., "A Spatial Diversity System to Measure Optical Fading in an Underwater Communications Channel", MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges, pp. 1-6, 2009.
[82] Ata, Y., Baykal, Y., "Scintillations of Optical Plane and Spherical Waves in Underwater Turbulence", JOSA A,Vol. 31, No. 7, pp. 1552-1556, 2014.
[83] Korotkova, O., Farwell, N., "Effect of Oceanic Turbulence on Polarization of Stochastic Beams",Optics Communications,Vol. 284, No. 7, pp. 1740-1746, 2011.
[84] Ata, Y., Baykal, Y., "Field Correlation of Spherical Wave in Underwater Turbulent Medium,"Applied Optics,Vol. 53, No. 33, pp. 7968-7971, 2014.
[85] Huang, Y., Zhang, B., Gao, Z., Zhao, G., Duan, Z., "Evolution Behavior of Gaussian Schell-Model Vortex Beams Propagating through Oceanic Turbulence",Optics Express,Vol. 22, No. 15, pp. 17723-17734, 2014.
[86] Charnotskii, M., "Bit Error Rate of Focused Gaussian Beams in Weak Oceanic Turbulence: Comment",JOSA A,Vol. 32, No. 7, pp. 1247-1250, 2015.
[87] Yousefi, M., Golmohammady, S., Mashal, A., Kashani, F. D., "Analyzing the Propagation Behavior of Scintillation Index and Bit Error Rate of a Partially Coherent Flat-Topped Laser Beam in Oceanic Turbulence",JOSA A,Vol. 32, No. 11, pp. 1982-1992, 2015.
[88] Tang, S., Zhang, X., Dong, Y., "Temporal Statistics of Irradiance in Moving Turbulent Ocean", MTS/IEEE OCEANS-Bergen, pp. 1-4, 2013.
[89] Zeng, Z., Fu, S., Zhang, H., Dong, Y., Cheng, J., "A Survey of Underwater Optical Wireless Communications",IEEE Communications Surveys & Tutorials,Vol. 19, No. 1, pp. 204-238, 2017.
[90] Jamali, M. V., Akhoundi, F., Salehi, J. A., "Performance Characterization of Relay-Assisted Wireless Optical CDMA Networks in Turbulent Underwater Channel",IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 15, pp. 4104-4116, 2016.
[91] Jamali M. V., Salehi, J. A., "On the BER of Multiple-Input Multiple-Output Underwater Wireless Optical Communication Systems",4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), pp. 26-30, 2015.
Communications Letters,Vol. 19, No. 12, pp. 2162-2165, 2015.
[60] Kedar, D., Arnon, S., "Non-Line-of-Sight Optical Wireless Sensor Network Operating in Multiscattering Channel", Applied Optics,Vol. 45, No. 33, pp. 8454-8461, 2006.
[61] Kedar, D., "Multiaccess Interference in a Non-Line-of-Sight Ultraviolet Optical Wireless Sensor Network",Applied Optics, Vol. 46, No. 23, pp. 5895-5901, 2007.
[62] Choudhary, A., Jagadeesh, V., Muthuchidambaranathan, P., "Pathloss Analysis of NLOS Underwater WirelessOptical Communication Channel", International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), pp. 1-4, 2014.
[63] Jagadeesh, V., Choudhary, A., Bui, F. M., Muthuchidambaranathan, P., "Characterization of Channel Impulse Responses for NLOS Underwater Wireless Optical Communications", 4th International Conference on Advances in Computing and Communications (ICACC), pp. 77-79, 2014.
[64] Hanson, F., Lasher, M., "Effects of Underwater Turbulence on Laser Beam Propagation and Coupling into Single-Mode Optical Fiber",Applied Optics,Vol. 49, No. 16, pp. 3224-3230, 2010.
[65] Hou, W. W., "A Simple Underwater Imaging Model",Optics Letters,Vol. 34, No. 17, pp. 2688-2690, 2009.
[66] Liu, W., Xu, Z., Yang, L., "SIMO Detection Schemes for Underwater Optical Wireless Communication under Turbulence",Photonics Research,Vol. 3, No. 3, pp. 48-53, 2015.
[67] Nikishov, V., Nikishov, V., "Spectrum of Turbulent Fluctuations of the Sea-Water Refraction Index",International Journal of Fluid Mechanics Research,Vol. 27, No. 1, 2000.
[68] Bogucki, D., Domaradzki, J., Anderson, C., Wijesekera, H., Zaneveld, J., Moore, C., "Optical Measurement of Rates of Dissipation of Temperature Variance due to Oceanic Turbulence",Optics Express,Vol. 15, No. 12, pp. 7224-7230, 2007.
[69] Korotkova, O., Farwell, N., Shchepakina, E., "Light Scintillation in Oceanic Turbulence", Waves in Random and Complex Media, Vol. 22, No. 2, pp. 260-266, 2012.
[70] Xu, Z., Guo, X., Shen, L., Yue, D. K., "Radiative Transfer in Ocean Turbulence and its Effect on Underwater Light Field",Journal of Geophysical Research: Oceans,Vol. 117, No. C7, 2012.
[71] Andrews, L. C., Phillips, R. L., Hopen, C. Y., "Aperture Averaging of Optical Scintillations: Power Fluctuations and the Temporal Spectrum",Waves in Random Media,Vol. 10, No. 1, pp. 53-70, 2000.
[72] Yi, X., Li, Z., Liu, Z., "Underwater Optical Communication Performance for Laser Beam Propagation through Weak Oceanic Turbulence", Applied Optics,Vol. 54, No. 6, pp. 1273-1278, 2015.
[73] Hou, W., Woods, S., Jarosz, E., Goode, W., Weidemann, A., "Optical Turbulence on Underwater Image Degradation in Natural Environments",Applied Optics,Vol. 51, No. 14, pp. 2678-2686, 2012.
[74] Woods, S., Hou, W., Goode, W., Jarosz, E., Weidemann, A., "Measurements of Turbulence for Quantifying the Impact of Turbulence on Underwater Imaging", IEEE/OES 10th Current, Waves and Turbulence Measurements (CWTM), pp. 179-183, 2011.
[75] Hou, W., Woods, S., Goode, W., Jarosz, E., Weidemann, A., "Impacts of Optical Turbulence on Underwtaer

[92] Boucouvalas, A.C, Peppas, K. P., Yiannopoulos, K., Ghassemlooy, Z., "Underwater Optical Wireless Communications with Optical Amplification and Spatial Diversity",IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 28, pp. 2613-2616, 2016.
[93] Rashkin, D., Dalgleish, F., Cardei, I., Ouyang, B., Vuorenkoski, A., Cardei, M., "Experimental Validation of an Undersea Free Space Laser Network Simulator in Turbid Coastal Conditions", Ocean Sensing and Monitoring V, p. 872404, 2013.
[94] Doniec, M., Angermann, M., Rus, D., "An End-to-End Signal Strength Model for Underwater Optical Communications",IEEE Journal of Oceanic Engineering,Vol. 38, No. 4, pp. 743-757, 2013.

زیرنویس‌ها

[1]Hydro Thermal Vent
[2]Free Space Optical (FSO) Communications
[3]Underwater Wireless Communications
[4]Underwater Wireless Optical Communications
[5]Absorption
[6]Scattering
[7]Turbulence
[8]Radiative Transfer Equation
[9]Monte Carlo
[10]End-to-End
[11]Attenuation Coefficient
[12]Volume Scattering Function
[13]Albedo
[14]Probability Density Function
[15]Maalox
[16]Small Angle Approximation
[17]Lidar
[18]Line-of-Sight (LOS) Configuration
[19]Retroreflector-Based LOS Configuration
[20]Non-Line-of-Sight (NLOS) Configuration
[21]Facet
[22]Jitter
[23]Buoy
[24]Misalignment
[25]Bore-Sight
[26]Beam Spread Function
[27]Elevation Angle
[28]Photomultiplier Tubes
[29]Beam Steering
[30]Two-Term Henyey-Greenstein
[31]Angle of Arrival
[32]Kolmogorov Spectrum Model
[33]Scintillation Index
[34]Lognormal
[35]Gamma-Gamma
[36]Negative Exponential
[37]Weak Turbulence
[38]Strong Turbulence
[39]Aperture Averaging
[40]Single Input-Multiple Output
[41]Multiple Input-Single Output
[42]Rytov
[43]Focused
[44]On-Axis Scintillation Index
[45]Optical code divison multiple access (OCDMA)