ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИЕТО НА БЕЗЖИЧНИТЕ ПОДВОДНИ КОМУНИКАЦИИ

НИКОЛАЙ ГЕОРГИЕВ^{*}, АЛЕКСАНДЪР КОЛАРОВ
и ВЕНЦИСЛАВ ПЕХЛИВАНСКИ

*Институт по металознание, съоръжения и технологии
с Център по хидро- и аеродинамика „Акад. Ангел Балевски“,
Българска академия на науките,
бул. Шипченски проход № 67, 1574 София, България,
e-mails: niki0611@abv.bg; aleksandar_kolarov@abv.bg;
venpeh@abv.bg*

Резюме. Нарастващата експлоатация на природните ресурси под водата, особено в моретата и океаните, значително ускори развитието на много технологични постижения в мониторинга на околната среда, проучването за нефт и газ, провеждането на операции по търсене и спасяване, във военната област и др. При всички тези дейности, подводните безжични комуникации играят важна роля, където наличните технологии разчитат на радиочестотна енергия, оптични и акустични предавания.

Ключови думи: подводна комуникация, комуникационни технологии – хидроакустична, електромагнитна, оптична.

1. УВОД

За разлика от кабелните и безжичните комуникации през атмосферата, подводните безжични комуникации се сблъскват с нови и различни предизвикателства, преодоляването на които би могло да осигури постигане на относително бързо, надеждно и защитено предаване на информация на различни разстояния. Основното предизвикателство пред подводните безжични комуникации е свързано с уникалните характеристики на работната средата, т.е. на подводната среда, в която се разпространяват акустичните, електромагнитните или оптичните колебания, използвани от този тип средства за комуникация. С развитието на технологиите за производство на акустични модеми, сензори, подводни роботи и транспортни средства, както и разположени на дъното инструменти, океанското инженерство днес се стреми към преодоляване на посоченото предизвикателство чрез интегриране на тези компоненти в автономни подводни мрежи.

^{*} Corresponding author.

DOI: 10.7546/EngSci.LVI.19.02.02

Докато текущите приложения включват контрол, управление и обмен на информация с отделни подводни устройства и телеметрия на добити океанографски данни, визията за бъдещето е тази на „цифровия океан“, в който интегрирани мрежи работят заедно. В зависимост от приложението, бъдещите подводни мрежи вероятно ще се развиват в две посоки (два типа топологии): централизирани и децентрализирани мрежи. В централизирана мрежа възлите комуникират чрез базова станция, която покрива една клетка. По-голямата площ е покрита от повече клетки, чиито базови станции са свързани помежду си с комуникационна инфраструктура. Базовите станции могат да бъдат на повърхността и да комуникират чрез радиовръзки или да бъдат на дъното, свързани с кабел. Алтернативно, базовата станция може да бъде и подвижна. В децентрализирана мрежа възлите комуникират чрез peer-to-peer, многоканално предаване на пакети данни [1].

Съществуват три основни технологии за подводни безжични комуникации. Една от тях е радиочестотната (RF) комуникация, която има висока производителност на много къси разстояния и почти не се влияе от Доплеровия ефект. Друга технология е оптичното предаване, което изисква позициониране на линията на видимост. Технологиите, които са най-използвани при съвременните подводни комуникации са хидроакустичната. Тя позволява най-голям по дистанция обхват на комуникацията, но е със сравнително ниска производителност, силно се влияе от ефекта на Доплер, засегната е от многогълчевия характер на разпространението на звука в морската вода. При всички тези технологии е важно да се вземат под внимание разходите за внедряване, свързани с целевата пропускателна способност на данните за определен честотен диапазон, както и въздействията върху околната среда, като пряка намеса в живота на морската флора и фауна [2]. Независимо, че се наблюдава известно фокусиране върху хидроакустичните комуникации, трябва да отбележим, че това няма да бъде единственият начин за установяване на безжична комуникация в бъдещите подводни мрежи. Например оптичните вълни, и по-специално тези в синьо-зеления диапазон, предлагат много по-висока производителност (Mbps), макар и на къси разстояния (до около 100 m).

За оптимално използване на възможностите на различните типове комуникационни технологии и модули е необходимо да се систематизират и анализират техните особености, но преди всичко, състоянието и тенденциите за използване на различните методи за дистанционно подводно предаване на информация, което е целта на статията.

2. СИСТЕМИ ЗА ПОДВОДНИ БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИИ

Съвременните системи за подводна комуникация реализират процеса на предаване/приемане на информация под формата на модулирани звукови (ултразвукови), електромагнитни или оптични вълни. Всяка от тези техники има предимства, недостатъци и ограничения.

Хидроакустичната комуникация е най-универсалната и широко използвана техника. Основните предизвикателства пред нея са сравнително ниската скорост на разпространение на акустичните вълни във вода – около 1500 m/s, която ограничава ширината на честотната лента, а оттук и броя на битовете, които могат да се предават по комуникационния канал за единица време. Намаляването, макар и сравнително малко, на акустичната мощност на сигналите с увеличаване на разстоянието се дължи основно на загуби от абсорбция и разсейване, както и от процеси при тяхното разпространение [3]. Акустичните вълни се разпространяват добре в морската вода, което се дължи основно на относително ниската абсорбция на акустичните вълни в подводна среда, *фиг. 1*.

Фиг. 1. Затихване на акустичните вълни в морска вода

Fig. 1. Attenuation of acoustic waves in seawater

Загубите от разпространение – това е дисперсията на част от енергията, предава от източника, когато с увеличаване на разстоянието предният фронт на вълната се разпространява върху все по-голяма площ. Едновременно с това се наблюдава изкривяване на траекторията на акустичните лъчи, повлияно от температурните градиенти по дълбочина, също тяхното многопътно разпространение, в резултат от многократно пречупване и отражение от дъното и морската повърхност, както и интерференция на сигналите с морските шумове.

Скоростта на разпространение на звука в морската вода винаги е нарастваща функция на температурата, солеността и дълбочината. От една страна, бавната скорост на акустичните вълни причинява забавяне на информацията в комуникационния канал и появата на силни интерсимволни смущения, дължащи се на времевата дисперсия на формата на вълната, а от друга страна въвежда големи честотни изменения, предизвикани от ефекта на Доплер, които водят до намаляване на времето за кохерентност на канала. През последните години, основната цел на подводната акустична комуникация е да се преодолеят индуцираните ограничения на производителността от високодисперсионния канал, като в същото време се подобри ефективността на честотната лента, доколкото е възможно.

Използването на електромагнитни вълни в радиочестотната лента за подводна комуникация има няколко предимства пред акустичните вълни, породени основно от значително по-високите скорост на разпространение и работна честота, които осигуряват по-широка ефективна честотна лента. Има обаче и много ограничаващи фактори при разпространението на електромагнитното поле в морската вода, различаващо се от това в сладка вода, която има много ниска електропроводимост. В резултат на разтворените соли и процеса на електролитна дисоциация, в морската вода се създават много положителни и отрицателни йони, които увеличават нейната електрическа проводимост с два порядъка в сравнение с тази на сладката вода. Приема се, че електрическата проводимост на морската вода е постоянна, със средна стойност 4 [S/m] , а абсолютната и магнитната проницаемост, като диамагнитен материал, е същата като вакуумната магнитна проницаемост, т.е. $\mu_0 = 4\pi * 10 \text{ [H/T]}$. Това означава, че с проводимост, считана за постоянна, дълбочината на проникване δ на електромагнитното поле в морска вода зависи само от честотата – колкото е по-висока честотата, толкова е по-малка дълбочината на проникване, *фиг. 2*.

Дълбочината на проникване δ на електромагнитното поле в морска вода и неговото затихване α могат да бъдат изчислени съответно по формулите (1) и (2), където f е честотата на електромагнитната вълна, μ е абсолют-

Фиг. 2. Затихване на електромагнитните вълни в морска вода
Fig. 2. Attenuation of electromagnetic waves in seawater

ната магнитна проникваемост и σ е проводимостта:

$$\delta = \pi f \mu \sigma \text{ [m]}, \quad (1)$$

$$\alpha = 0,0173 f \sigma \text{ [dB/m]}. \quad (2)$$

Изчисленията показват, че електромагнитните полета могат да се използват за предаване на радио сигнали в морска среда само на много ниска честота. Единствените обхвати, използвани за подводна радиокомуникация, са в групата ELF (Extremely Low Frequency), която варира от 3 до 300 Hz. Известни са системи от групата ELF за комуникация с подводници – американската система „Seafarer“, която работи на честота 78 Hz, и руската „Зевс“ – на честота 82 Hz, които осигуряват комуникация, от фиксирана станция на морската повърхност с подводница, от порядъка на 10 km наклонена дистанция [4].

Реализацията на комуникационен канал при тези честоти налага технически ограничения, които са изключително трудни за преодоляване. Един от най-големите проблеми, който трябва да бъде решен, е размерът на

антените. Освен това, поради ограничената честотна лента, този комуникационен канал не може да се използва за предаване на аудио сигнали, а само за текстови съобщения. За подводни комуникации от близко разстояние, са разработени и се прилагат в практиката техники за безконтактно предаване на данни с помощта на сравнително високочестотни електромагнитни полета [5]. Проведените експерименти показват, че в тези случаи, за подводна комуникация могат да се използват разпространените и стандартизирани безжични радиочестотни комуникационни технологии като Wi-Fi, Bluetooth, RFID, NFC, ZigBee и др.

Сравнителният анализ на основните характеристики на някои от тях е даден в *табл. 1*.

ТАБЛИЦА 1. Основни характеристики на радиочестотни комуникационни технологии

TABLE 1. Basic characteristics of RF communications technologies

	NFC	RFID	Bluetooth	Wi-Fi
Максимална дистанция	0,07 [m]	LF – 0,7 [m] HF – 0,068 [m] UHF – 9 [mm]	5 [mm]	5 [mm]
Работна честота	13,56 [MHz]	Low Frequency (LF) – 125/134,2 [kHz] High Frequency (HF) – 13,56 [MHz] Ultra High Frequency (UHF) – 433 [MHz], 868÷928 [MHz] Microwave – 2,45÷5,8 [GHz]	2,4 [GHz]	2,4/5 [GHz]
Посочност на връзката	Дву-	Едно-	Дву-	Дву-
Скорост на пренос на данните	106/212/424 [kbps]	1÷64 [kbps]	22 [Mbps]	144 [Mbps]

Трябва да се отбележи, че приложението на устройства за подводна електромагнитна високочестотна комуникация е сравнително малко, насочено основно за следене на морски животни, мониторинг на подводни тръбопроводи и морската среда, също обмен на хидрологична и друга информация с подводно позиционирани и дънни устройства. Използват се основно устройства, реализирани на NFC-RFID технологии (NFC се основава на стандартите на HF RFID). Предпочитанията са към NFC, защото

устройството може да действа както като четец, така и като таг при комуникацията от типа “peer to peer”.

Основната разлика между радиочестотната и оптичната подводна комуникация е в дуалистичното поведение на морската вода, като проводяща среда – тя се проявява като проводник за радиочестотния диапазон и като диелектрик за оптичния диапазон. Обяснението на това явление се крие в плазмената честота, чиято стойност определя обхвата на честотите, за които средата се държи или като проводник, или като диелектрик. Морската вода се променя от проводник на диелектрик за честоти около 250 GHz. В диелектрична среда електромагнитната вълна има по-малки загуби, отколкото в проводяща среда, *фиг. 3*.

Фиг. 3. Затихване на оптичните вълни в морска вода

Fig. 3. Attenuation of optical waves in seawater

Оптичната технологията може да осигури по-високи скорости на трансфер на данни в сравнение с радиочестотната такава за обхват на разпространение, ограничен до няколко десетки метра. Скоростта на разпространение на оптичните вълни в морската вода е с около 4÷5 порядъка по-голяма от тази на акустичните вълни, поради което ефектът на Доплер практически е незначителен.

Разстоянието на разпространение на оптичните сигнали зависи от честотния диапазон. Синьо-зеленият оптичен прозорец е с по-ниска степен на абсорбция, което в подводните комуникации определя използването на светлинни източници и детектори, работещи в този честотен диапазон, при дължина на вълната $\sim 490\div 520$ nm.

За оптичните комуникации обикновено е необходима линейна видимост между предавател и приемник, която изисква някакъв вид проследяване на посоката между тях, за да бъде поддържана комуникационната връзка. За отчитане степента на въздействие на условията в проводящата среда, в случая морска вода, върху разпространението на светлината, при оптичните комуникации е прието да се отчита влиянието на две групи характеристики: присъщите оптични свойства – inherent optical properties (IOPs), които зависят само от състоянието на водата, и видимите оптични свойства – apparent optical properties (AOPs), които зависят основно от параметрите на източника на светлина. При анализ на ефективността на система за оптична комуникация, е целесъобразно да бъде използвана групата на IOPs, по-специално коефициентът на спектрално поглъщане и функцията за разсейване на спектралния обем, в която влиза като елемент коефициентът на отразяване. Той се използва основно за оценяване мътността на водата. Затихването на оптичния сигнал може да се изчисли по формула (3), където I е интензитетът на светлината на приемника, I_0 – интензитетът на светлината от предавателя, d – разстоянието между предавателя и приемника, $c(\lambda)$ – коефициентът на енергийни загуби от абсорбция и разсейване, стойностите на който за различните типове вода са дадени в табл. 2:

$$I = I_0 e^{-c(\lambda)d}. \quad (3)$$

ТАБЛИЦА 2. Коефициент на загуби
TABLE 2. Loss rate

	$c(\lambda)$
Чиста морска вода	0,056
Чиста океанска вода	0,150
Крайбрежна морска вода	0,305
Вода в морски пристанища и устия на реки	2,170

Една от перспективните подводни оптични комуникационни технологии е Li-Fi, която дължи името си на подобие с Wi-Fi, с тази разлика, че вместо радиовълни се използва източник на светлина. Li-Fi технологията

осигурява ефективна двупосочна комуникация, между надводни и подводни плавателни съдове, подводни превозни средства и роботи (ROV и AUV) и позиционирани на или до дъното подводни станции и апарати, с висока скорост [Gbps] на дистанция до 100 m, в зависимост от мътността на водата. Li-Fi може да използва широк диапазон от дължини на вълните, от инфрачервения, през видимия, до ултравиолетовия спектър. Тя осигурява скорости на комуникация до гигабит за секунда [Gbps] за кратки, средни и дълги разстояния, както и еднопосочен и/или двупосочен трансфер на данни, използвайки линии на видимост или дифузни връзки, отражения и много други. Основен недостатък на технологията е необходимостта от безпрепятствена линия на видимост между предавателя и приемника.

Последните достижения в LED технологиите позволиха на пазара да се появи продукция със сравнително ниска цена, с високо ниво на светлинна интензивност, с голяма скорост на превключване, с висока енергийна ефективност при използване на оптимални за разпространение на светлината в морска вода дължини на вълните. Разработваните оптични подводни комуникационни системи се реализират като мобилни платформи, извършващи интерактивни операции в реално време [6]. По-разпространените двойки предавател/приемник в оптичните системи са за източник – LED или лазерен диод, а за приемник – лавинен диод (avalanche diode) или фотоумножителна тръба (photomultiplier tube – PMT). Дизайнът на системите за оптична комуникация трябва да включва избор на стратегия за насочване и проследяване на комуникационната линия, избор на източник и детектор на светлината, както и избор на метод на модулация на светлинните лъчи.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различните технологии за предаване на информация имат своите положителни характеристики и недостатъци. Ето защо решението, коя технология да бъде използвана при планиране изграждането на система за подводна комуникация, трябва да бъде съобразено както с тактико-техническите изисквания за нейното функциониране, така и с екологичните условия, при които ще работи. В *таблица 3* са обобщени основните характеристики, присъщи на всяка технология, които могат да помогнат за намирането на подходящо решение.

Предизвикателство за постигане на стабилна и надеждна подводна комуникация е да се използва гъвкава комуникационна схема, която да включва всички горе споменати технологии. Тя трябва да бъде интелигентна, да

ТАБЛИЦА 3. Характеристики на подводните комуникации
TABLE 3. Characteristics of underwater communications

Комуникация	Акустична	Електромагнитна	Оптична
Честотен диапазон	~kHz	~ MHz	$\sim 10^{14} \div 10^{15}$ Hz
Ефективен диапазон	от 0,5 kHz (гол. дист.) до 50 kHz (ср. дист.)	от 100 Hz (100 m) до 100 kHz (5 m)	синьо-зелен $\sim 10^{14}$ Hz
Номинална скорост	1450÷1550 m/s	1500 m/s (1 Hz) 10^6 m/s (1 MHz)	$2,25 \times 10^8$ m/s
Практически обхват	~ до 10 km	~ 10 m	$\sim 10 \div 100$ m
Честотна лента	~kHz	~ MHz	$\sim 10 \div 150$ MHz
Енергийни загуби	> 0,1 dB/m/Hz	~ 28 dB/1 km/100 MHz Зависят от мътността	0,1 dB/m (океан) 10 dB/m (+ до брега)
Абсорбционни загуби	0,05 dB/m (150 kHz) 0,0001 dB/m (1,5 kHz)	5,4 dB/m (25 kHz) 1,1 dB/m (1 kHz)	0,1 dB/m (океан) 10 dB/m (+ до брега)
Скорост на пренос на данни	10's bps÷ 10's kbps	10's bps÷ 100's+ kbps	100's kbps÷ 10's Mbps
Размер на антените	~ 0,1 m	~ 0,5 m	~ 0,1 m

постига максимална скорост на трансфер при различен тип информация – текст, говор, видео и др., да отчита условията на околната среда, разстоянието и относителното движение между предавателя и приемника, *фиг. 4*.

Такава хетерогенна система трябва да бъде в състояние да превключва технологията на предаване/приемане за постигане на най-висока ефективност, а за определяне на нейната надеждност и ефективност биха могли да са приложими както методите на класическата теория на надеждността, така и специфичните такива, които се явяват инвариантни по отношение на областите на използване [7].

Фиг. 4. Хетерогенна интелигентна система за подводна комуникация
Fig. 4. Heterogeneous intelligent underwater communication system

REFERENCES

- [1] LUI LANBO AND SHENGLI ZHOU, *Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks*, Wiley Wcmc Special Issue On Underwater Sensor Networks (Invited) (2015) 4–11, DOI:10.1002/wcm.654.
- [2] I. F. AKYILDIZ, D. POMPILI AND T. MELODIA (2005), *Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges*, Ad Hoc Networks (2015) 257–279, DOI:10.1016/j.adhoc.2005.01.004.
- [3] P. KUMAR, S. PRANEETH AND ROMARSHA B. NARENDER, Analysis of Optical Wireless Communication for Underwater Wireless Communication, *International Journal of Scientific & Engineering Research* (2011) **2** (6) 2–5, ISSN 2229-5518.
- [4] B. THAWALI, DESHMUKH VISHVAJEET, MHASKE NAWANATH AND SHIRGIRE VITTHAL, Ship To Ship Communication Using LI-FI Technology, *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science* (2015) **03** (01) 137–140, ISSN 2348-7550.
- [5] A. NACHEV, On the Determination of the Effectiveness of Information Protection Systems, *Collection of Scientific Papers*, Institute for Prospective Studies for Defense, Sofia (2004) 44–46, ISSN: 1312-2916.

- [6] A. I. NACHEV, Approach for the Evaluation of the Resilience of Network Structures on the Basis of Counterintelligent Information Processes, National Military University, Scientific Session 2010, Shumen, *Collective Scientific Papers, Part II* (2011) 59–62, ISSN: 1313-7433.
- [7] A. I. NACHEV, On the Determination of the Effectiveness of Information Protection Systems, *Collection of Scientific Papers*, Institute for Prospective Studies for Defense, Sofia (2004) 44–46, ISSN: 1312-2916.

TENDENCIES IN THE DEVELOPMENT OF WIRELESS UNDERWATER COMMUNICATIONS

NIKOLAY GUEORGUIEV, ALEKSANDAR KOLAROV,
AND VENCISLAV PEHLIVANSKI

*Institute of Metal Science, Equipment and Technologies,
with Hydro- and Aerodynamics Centre “Acad. A. Balevski”,
Bulgarian Academy of Sciences,
67, Shipchenski Prohod Blvd, 1574 Sofia, Bulgaria,
e-mails: niki0611@abv.bg; aleksandar_kolarov@abv.bg;
venpeh@abv.bg;*

Abstract. The growing exploitation of underwater natural resources, especially in seas and oceans, significantly accelerates the development of many technological advances in the field of environmental monitoring, oil and gas exploration, search and rescue operations in the military, and more. In all these activities, underwater wireless communications play an important role where available technologies rely on radio frequency, optical and acoustic transmissions.

Keywords: underwater communication, communication technologies – hydroacoustic, electromagnetic, optical.

Received January 28, 2019