



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ

**Ευφυή Συστήματα
(Intelligent Systems)**

(ΠΔ 58/2021/ΦΕΚ 145 Α'/17.08.2021)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη Τεχνολογιών Υποβρυχίων Ασύρματων
Επικοινωνιών, Επισκόπηση του Διαδικτύου των
Υποθαλάσσιων Πραγμάτων (IoUT) και
Μελλοντικές Τεχνολογικές Προοπτικές

Υπό:

Χρήστου Μπάλια

A.M.: 2021018006

ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Μπάλια Χρήστου, εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγήτρια Ειρήνη Καρανάσιου (Επιβλέπουσα),

Αν. Καθηγητής Μιχαήλ Γαργαλάκος (1^ο μέλος),

Αν. Καθηγητής Στυλιανός Τσαφαράκης (2^ο μέλος)

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων και Πολυτεχνείου Κρήτης.

Copyright ©Μπάλλιας Χρήστος, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Στην αγαπημένη μου οικογένεια

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Καρανάσιου, την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας για την καθοδήγησή της, την υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Κατάλογος Σχημάτων.....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	10
Κατάλογος Συντμήσεων.....	11
Περίληψη.....	14
Abstract.....	15
 Εισαγωγή-Πρόλογος.....	 16
 Ενότητα 1	
Επισκόπηση των υποθαλάσσιων ασύρματων επικοινωνιών (Underwater Wireless Communications) και εξέταση υγρών μέσων διάδοσης.....	18
 Ενότητα 2	
Ηλεκτρομαγνητικές (H/M) υποθαλάσσιες επικοινωνίες – Γενικά χαρακτηριστικά – Επιδραστικοί παράγοντες - RF πομποδέκτες - Μελλοντικές προοπτικές.....	25
 Ενότητα 3	
Οπτικές υποθαλάσσιες επικοινωνίες – Γενικά χαρακτηριστικά – Επιδραστικοί παράγοντες – ηλεκτρο-οπτικοί μορφοτροπείς - Μελλοντικές προοπτικές.....	30
 Ενότητα 4	
Ακουστικές υποθαλάσσιες επικοινωνίες – Γενικά χαρακτηριστικά – Επιδραστικοί παράγοντες - Ακουστικοί μορφοτροπείς - Μελλοντικές προοπτικές.....	36
 Ενότητα 5	
Σύγκριση H/M, οπτικών και ακουστικών τεχνολογιών στο υποθαλάσσιο περιβάλλον...	45

Ενότητα 6

Δίκτυα υποθαλάσσιων αισθητήρων – Γενικά χαρακτηριστικά – Απαιτήσεις – Αρχιτεκτονική δικτύου – 2D και 3D υποθαλάσσιοι δικτυακοί αισθητήρες.....48

Ενότητα 7

Επισκόπηση του διαδικτύου των υποθαλάσσιων αντικειμένων (IoUT).....54

Υποενότητα 7.1

Αρχιτεκτονική iout - Επίπεδο λήψης δεδομένων - Δικτυακό επίπεδο - Επίπεδο εφαρμογών.....54

Υποενότητα 7.2

Σενάρια εφαρμογών IoUT.....66

Υποενότητα 7.3

Πλεονεκτήματα και ωφέλειες από την εφαρμογή IoUT.....75

Ενότητα 8

Αναδυόμενες υποθαλάσσιες τεχνολογίες.....79

Υποενότητα 8.1

Σύστημα συλλογής ενέργειας επ'ωφελεία των υποθαλάσσιων ασύρματων δικτυακών αισθητήρων.....79

Υποενότητα 8.2

Τεχνική massive MIMO - Τεχνική NOMA - Εφαρμογή των mm-Waves.....83

Υποενότητα 8.3

Το 5G δίκτυο στις υποθαλάσσιες επικοινωνίες.....88

Συμπεράσματα – Επίλογος.....92

Βιβλιογραφία.....94

Κατάλογος Σχημάτων

ΕΝΟΤΗΤΑ 1

Σχήμα 1.1	Περιγραφή του H/M φάσματος [1].....	19
Σχήμα 1.2	Μοντέλο UWSN που χρησιμοποιεί RF και ακουστικά links επικοινωνιών [1].....	21
Σχήμα 1.3	Μοντέλο UWSN που χρησιμοποιεί RF και οπτικά/ακουστικά links επικοινωνιών [1].....	22

ΕΝΟΤΗΤΑ 2

Σχήμα 2.1	Δυνατά μονοπάτια διάδοσης H/M κυμάτων σε θαλάσσιο περιβάλλον [3].....	26
Σχήμα 2.2	Ιδιότητες των υδάτινων καναλιών στις H/M επικοινωνίες [3].....	27

ΕΝΟΤΗΤΑ 3

Σχήμα 3.1	Εξασθένιση του οπτικού κύματος [3].....	32
-----------	---	----

ΕΝΟΤΗΤΑ 4

Σχήμα 4.1	Multipath channel [3].....	37
Σχήμα 4.2	Ιδιότητες καναλιού για ακουστικές επικοινωνίες [3].....	40
Σχήμα 4.3	Προκύπτουσα γεωμετρία κατά την ταυτόχρονη κίνηση πομπού και δέκτη εντός του μέσου διάδοσης [3].....	42

ΕΝΟΤΗΤΑ 5

Ουδέν

ΕΝΟΤΗΤΑ 6

Σχήμα 6.1	2D αρχιτεκτονική υποβρύχιου δικτύου αισθητήρων [1].....	52
Σχήμα 6.2	3D αρχιτεκτονική υποβρύχιου δικτύου αισθητήρων [1].....	53

ΕΝΟΤΗΤΑ 7

Σχήμα 7.1	Προτεινόμενη αρχιτεκτονική IoUT [5].....	56
Σχήμα 7.2	Σενάριο ενυδρείου [5].....	68
Σχήμα 7.3	Σενάριο ιχθυοκαλλιέργειών [5].....	69
Σχήμα 7.4	Σενάριο παρακολούθησης υποβρύχιων αγωγών [5].....	71
Σχήμα 7.5	Σενάριο ασφάλειας λιμανιού [5].....	75

ΕΝΟΤΗΤΑ 8

Σχήμα 8.1	Αρχιτεκτονική πολλαπλού υβριδικού συστήματος συλλογής ενέργειας [26].....	82
Σχήμα 8.2	Υπό μελέτη υποβρύχιο σύστημα ακουστικών επικοινωνιών όπου αριθμός υδρο-φώνων ευρίσκονται στον σταθμό επιφανείας προς υποστήριξη της τεχνικής Massive MIMO στο δέκτη [30].....	85
Σχήμα 8.3	Η διαφορά μεταξύ OMA και NOMA [90].....	86
Σχήμα 8.4	Εξέλιξη του ασύρματου δικτύου ανά δεκαετία [19].....	89
Σχήμα 8.5	Διάρθρωση χρόνου και συχνότητας τεχνικών OFDM και GFDM [21].....	91

Κατάλογος Πινάκων

ΕΝΟΤΗΤΑ 1

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών απορρόφησης και σκέδασης σε διαφορετικά υγρά μέσα [1].....23

ΕΝΟΤΗΤΑ 2

Πίνακας 2.1 Απόσταση διάδοσης H/M κυμάτων για εξασθένηση σήματος των 50 dB σε γλυκό και θαλασσινό νερό [3].....28

ΕΝΟΤΗΤΑ 3

Ουδείς

ΕΝΟΤΗΤΑ 4

Ουδείς

ΕΝΟΤΗΤΑ 5

Πίνακας 5.1 Ιδιότητες H/M, οπτικών και ακουστικών κυμάτων [3].....46

ΕΝΟΤΗΤΑ 6

Ουδείς

ΕΝΟΤΗΤΑ 7

Ουδείς

ΕΝΟΤΗΤΑ 8

Ουδείς

Κατάλογος Συντμήσεων

AMMCA	Acoustic Massive MIMO with Carrier Aggregation
AOPs	Apparent optical properties
APD	Avalanche photodiode
AR	Augmented Reality
ASVs	Autonomous Surface Vehicles
AUVs	Autonomous underwater vehicle
BF	Beamforming
BQP	Biologically-inspired quantum photosensors
CA	Carrier Aggregation
CDMA	Code division multiple access
CDOM	Colored dissolved organic matter
CLAs	Convergence Layer Adapters
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CP	Circular prefix
DFE	Decision-feedback equalizers
DPSS	Diode-pumped solid-state
DTN	Delay-Tolerant Networks
D2D	Device to Device
EH	Energy harvesting
EHF	Extremely High Frequency
ELF	Extremely Low Frequency
ETT	Equal transmission times
FBMC	Filter bank multi-carrier
FDMA	Frequency division multiple access
GFDM	Generalized frequency division multiplexing
GPRS	General Packet Radio Service
HF	High Frequency
HTTP	Hypertext Transfer Protocol

HTML	Hyper Text Markup Language
H2T	Human to Thing
ICI	intercarrier interference
ID	Information Decoding
IMC	Inter-Module Communication
IOP	Inherent optical properties
IoT	Internet of things
IoUT	Internet of Underwater Things
ISI	Intersymbol Interference
JSON	Java Script Object Notation
LIDAR	Light Detection And Ranging
LMS	Least square mean
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium access control
MF	Medium Frequency
MFC	Microbial or biological fuel cell
MIMO	Multiple-input-multiple-output
MMSE	Minimum mean-squared error-based
mm-Waves	Millimeter waves
MULBL	Multi-User Long Base Line
NOMA	Non-orthogonal frequency division multiplexing
OMA	Orthogonal multiple access
OPT	Optical transmission
OWC	Optical wireless communication
PAPR	Peak to average power ratio
PIT	Passive Integrated Transponder
PMT	Photomultiplier tube
ppt	parts per thousand
QoS	Quality of Services

REST	Representational State Transfer
RF	Radio Frequency
RF-EH	Radio Frequency – Energy Harvesting
RFID	Radio-frequency identification
ROVs	Remotely operated vehicle
SIC	Successive interference cancellation
SSP	Sound speed profile
SWIPT	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
TDMA	Time division multiple access
TDOA	Time Difference of Arrival
T2T	Thing to Thing
UAC	Underwater acoustic communication
UCL	Underwater Convergence Layer
ULF	Ultra Low Frequency
URI	Universal Resource Identifiers
UWAR	Underwater Augmented Reality
UWB	Ultra-wideband
UWC	Underwater Communications
UWNs	Underwater networks
UWOC	Underwater wireless optical communication
UWSN	Under Water Sensor Networks
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WoT	Web of Things
WPT	Wireless Power Transfer
XML	Extensible Markup Language

Περίληψη

Περισσότερο από το 75% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από νερό υπό τη μορφή ωκεανών οι οποίοι δεν έχουν εισέτι εξερευνηθεί από τον άνθρωπο καθόσον υφίσταται πλήθος φυσικών φαινομένων και δραστηριοτήτων στο υποβρύχιο περιβάλλον που δυσκολεύουν τη διαδικασία αυτή. Οι υποβρύχιες ασύρματες επικοινωνίες (UWC) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παρατήρηση της θαλάσσιας ζωής, της ρύπανσης των υδάτων και των φυσικών καταστροφικών φαινομένων (λ.χ. σεισμοί), στην εξερεύνηση περιοχών αποθεμάτων πετρελαίου και αερίου, στην παρακολούθηση των μεταβολών στο υποβρύχιο περιβάλλον και τέλος στην εφαρμογή ναυτικών τακτικών επιχειρήσεων και συγκεκριμένα στην παράκτια προστασία και ασφάλεια. Υπό αυτό το πρίσμα, η ευρεία υιοθέτηση των υποβρύχιων ασύρματων επικοινωνιών έχει καταστεί βασικό πεδίο μελέτης προς την πρόβλεψη διάφορων στρατιωτικών και εμπορικών εφαρμογών που στρέφουν το ενδιαφέρον τους προς την εξερεύνηση του υποβρύχιου περιβάλλοντος. Οι συχνότητες που έχουν επιλεγεί για τη μετάδοση δεδομένων στο υποβρύχιο περιβάλλον αφορούν στα ακουστικά, οπτικά κύματα και σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις σε συνδυασμό με ραδιοκύματα τα οποία αναλύονται και συγκρίνονται στη διατριβή αυτή. Επιπρόσθετα το διαδίκτυο των υποβρύχιων αντικειμένων (IoUT) και το ασύρματο δίκτυο πέμπτης γενιάς (5G) έχουν μεγάλο αντίκτυπο στις υποβρύχιες ασύρματες επικοινωνίες καθώς δύναται να παρακολουθούνται και ελέγχονται μεγάλες ανεξερεύνητες θαλάσσιες περιοχές ενώ παράλληλα υποστηρίζουν την αύξηση του ρυθμού δεδομένων, την βελτίωση της συνδεσιμότητας και της ενεργειακής απόδοσης. Προς τούτο συνεπικουρούν τα δίκτυα υποθαλάσσιων αισθητήρων συγκεντρώνοντας και καταγράφοντας δεδομένα από το θαλάσσιο περιβάλλον δίνοντάς μας την ευκαιρία να επεξεργαστούμε τις πληροφορίες αυτές προς όφελός μας, εντός ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών. Τέλος, σε αυτή τη διατριβή παρουσιάζονται οι αναδυόμενες υποθαλάσσιες τεχνολογίες με τις οποίες επιτυγχάνεται ενεργειακή αυτονομία, η εφαρμογή ολοένα και περισσότερων real-time δραστηριοτήτων και υψηλής ποιότητας και ταχύτητας μετάδοση και επεξεργασία δεδομένων.

Abstract

More than 75% of earth's surface is covered by oceans which have not been researched yet due to the fact that several underwater natural phenomena and activities hinder the procedure. Underwater wireless communications (UWC) have a significant role in observation of sea life, water pollution and natural disastrous phenomena (i.e. earthquakes) as well as in research of oil and natural gas reserves and monitoring declinations within underwater environment. Moreover, their contribution in the implementation of naval tactical operations and especially in coastal protection and security is highly invaluable. In this context, the broad adoption of underwater communications has evolved in a fundamental field of study for various military and commercial applications which are oriented to/towards underwater environment research. The carrier frequencies that have been utilized to transfer data and information through underwater environment are mainly acoustic and optical and partly in special cases radio waves which are analyzed in this dissertation. Furthermore, the Internet of Underwater Things (IoUT) and the wireless fifth generation network (5G) have a tremendous impact on underwater wireless communications as wide unexplored sea areas can be monitored and controlled while they are able to support data rate increase, improvement of connectivity and power efficiency. For this reason, underwater sensor networks accumulate and record underwater environmental data providing the opportunity to process and evaluate that information in the context of a wide variety of beneficial applications. Finally, in this dissertation, emerging underwater technologies are presented which contribute to energy autonomy, implementation of real time activities and high quality and high data rate transmission and process.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η υπερθέρμανση του πλανήτη αποτελεί φλέγον ζήτημα εδώ και αρκετές δεκαετίες λόγω της άμεσης εμπλοκής της στην κλιματική αλλαγή. Εξαιτίας της σταδιακής υπερθέρμανσης του πλανήτη, οι πολικοί πάγοι λιώνουν με αποτέλεσμα να συντελείται βαθμιαία άνοδος της στάθμης του θαλάσσιου νερού. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να παρατηρηθούν οι ωκεάνιες περιβαλλοντικές δραστηριότητες, να συλλεχθούν ωκεανογραφικά δεδομένα, να εκτελεσθεί δειγματοληψία νερού και να εξετασθεί η ρύπανση των υδάτων. Τα τελευταία χρόνια, παρουσιάσθηκε σημαντικό ενδιαφέρον προς τη μελέτη των αλλαγών στο παγκόσμιο κλίμα, την εξερεύνηση και παρακολούθηση του ακανόνιστου θαλάσσιου και ωκεάνιου περιβάλλοντος. Η διερεύνηση της τεχνικής των ασύρματων υποθαλάσσιων επικοινωνιών (underwater wireless communications - UWC), η οποία αναφέρεται στη μέθοδο εκπομπής δεδομένων εντός ενός υγρού μέσου, αποτελεί το επίκεντρο του ενδιαφέροντος της εξερεύνησης του ωκεάνιου περιβάλλοντος. Το UWC είναι μια καινοτόμος προσέγγιση των σύγχρονων υποβρύχιων επικοινωνιών που έχει επιλεγεί για έρευνα και παρατήρηση των δεδομένων στο υποβρύχιο περιβάλλον. Επιπλέον, το UWC χρησιμοποιείται επίσης για τη μετάδοση κρίσιμων πληροφοριών που αφορούν τη σεισμική δραστηριότητα όπως η μετακίνηση σεισμικών και τεκτονικών πλακών και συμβάλλει στην έγκαιρη προειδοποίηση εντοπισμού ενός δημιουργούμενου τσουνάμι από μια υποβρύχια τοποθεσία. Ήδη οι τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας αποτελούν μέρος της καθημερινής ζωής του ανθρώπου και αποτελούν σημαντικό πεδίο έρευνας τα τελευταία χρόνια. Επί του παρόντος, τα ακουστικά, οπτικά και ηλεκτρομαγνητικά (στο πεδίο των ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency – RF)) κύματα χρησιμοποιούνται ως ασύρματοι φορείς των UWC τεχνικών στις υποβρύχιες εφαρμογές [1].

Η επικοινωνία μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency – RF) διαθέτει υψηλή απόδοση δεδομένων σε μικρή βέβαια απόσταση ενώ πάσχει από την επίδραση του φαινομένου Doppler. Η οπτική μετάδοση αποδίδει βέλτιστα εντός του μπλε και πράσινου φάσματος και αποτελεί τρόπο επικοινωνίας με εμβέλεια οπτικής επαφής (Line Of Sight). Ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία είναι τα ακουστικά κύματα τα οποία επιτρέπουν την επικοινωνία σε μεγαλύτερες αποστάσεις πλην όμως παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση καθώς επηρεάζονται ιδιαίτερα από το Doppler effect και από το μεγάλο βαθμό καθυστέρησης διάδοσης που οδηγεί σε σοβαρές διασυμβολικές παρεμβολές (intersymbol interference - ISI). Σε όλες αυτές τις παραπάνω τεχνολογίες, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη το

κόστος υλοποίησης που σχετίζεται με την αποδοτικότητα του ρυθμού δεδομένων για ένα καθορισμένο εύρος επικοινωνίας, καθώς και η ισχύς μετάδοσης που μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις παρεμβαίνοντας στη θαλάσσια ζωή [1].

Η ανάπτυξη αυτών των τεχνικών ασύρματης επικοινωνίας, σε ένα υγρό μέσο είναι πιο δύσκολη σε σύγκριση με την επίγεια ασύρματη επικοινωνία. Ωστόσο, η ποιότητα της μετάδοσης των δεδομένων και η αξιοπιστία τους μπορεί να εξαρτώνται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του νερού και από τα φυσικά χαρακτηριστικά των οπτικών σημάτων. Το UWC απαιτεί πιο εξελιγμένες συσκευές επικοινωνίας για την επίτευξη σχετικά υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και αυτό για μικρές αποστάσεις. Επιπλέον έχει πολλά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που το καθιστούν αντίστοιχα διαφορετικό από την επίγεια ασύρματη επικοινωνία. Το σύστημα του UWC είναι δύσκολο να αναπτυχθεί και επηρεάζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του υγρού μέσου, όπως η θερμοκρασία, η συγκέντρωση άλατος και η πίεση [1].

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η παρουσίαση και ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών, οπτικών και ακουστικών υποθαλάσσιων ασύρματων επικοινωνιών καθώς και η εξέταση των διαφορετικών υγρών μέσων διάδοσής τους. Κατόπιν θα επιχειρηθεί η σύγκριση μεταξύ αυτών των τεχνολογιών λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Εν συνεχεία μελετώνται τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων (Under Water Sensor Networks – UWSN) και οι αρχιτεκτονικές τους, τα οποία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών (Quality of Services - QoS) ενώ καθιστούν, λόγω του μεγάλου εύρους εφαρμογών τους, την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας εντός του υποβρύχιου περιβάλλοντος μια σημαντική πρόκληση. Επιπρόσθετα αναλύονται τα ωφέλη των επικοινωνιών αυτών από την ολοκλήρωση του 5G δικτύου καθώς και οι αναδυόμενες τεχνολογίες με τις εφαρμογές τους όπως οι τεχνικές πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (Multiple-input-multiple-output - MIMO), μη ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Non-orthogonal frequency division multiplexing - NOMA) και χιλιοστομετρικά κύματα (Millimeter waves - mm-Waves) οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και απόδοση των υποβρύχιων επικοινωνιών. Τέλος το διαδίκτυο των υποβρύχιων αντικειμένων (Internet of Underwater Things – IoUT) αποτελεί μια τεχνολογική επανάσταση των υποβρύχιων επικοινωνιών και παρουσιάζεται εκτενώς με τις εφαρμογές της στην παρούσα εργασία.

ΕΝΟΤΗΤΑ 1.

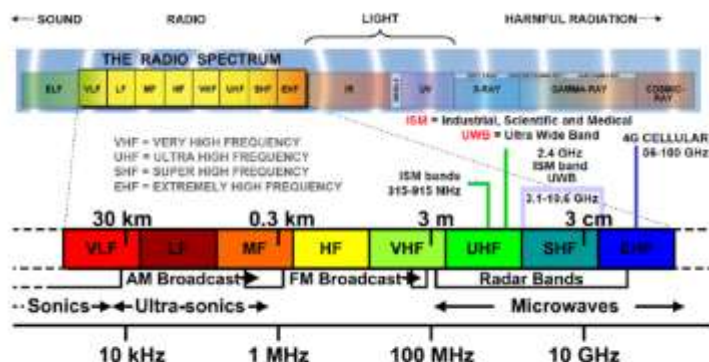
ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ (UNDERWATER WIRELESS COMMUNICATIONS) – ΕΞΕΤΑΣΗ ΥΓΡΩΝ ΜΕΣΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Το UWC είναι η πιο απαιτητική και συνάμα η πιο ολοκληρωμένη τεχνολογία για ενσύρματες και ασύρματες επικοινωνίες. Τα δίκτυα των UWC είναι απαραίτητα δια την πρόσβαση σε δεδομένα εντός ενός υδάτινου μέσου όπως είναι ο βαθύς ωκεανός ενώ τα τελευταία χρόνια αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας και μελέτης για ακαδημαϊκούς και ερευνητές. Η χρήση των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών των UWC είναι επωφελής στην ανάλυση ωκεανογραφικών δεδομένων όπως η παρατήρηση της ρύπανσης των υδάτων, η έγκαιρη προειδοποίηση για φυσικές καταστροφές όπως πλημμύρες και τσουνάμι, η παρακολούθηση του ωκεάνιου περιβάλλοντος και της αύξησης της στάθμης του νερού στους ωκεανούς. Έτσι λοιπόν, στο UWC χρησιμοποιούμε τρία είδη υποβρύχιας ασύρματης μετάδοσης σήματος. Η πρώτη τεχνολογία είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (σε μορφή ραδιοσυχνοτήτων) που παρέχουν υψηλό ρυθμό δεδομένων σε μικρές αποστάσεις ενώ δεύτερη είναι η υποβρύχια τεχνική οπτικής μετάδοσης σήματος (Optical transmission - OPT) που επιτυγχάνει υψηλό εύρος ζώνης και ρυθμό δεδομένων σε μεσαίες αποστάσεις. Η τρίτη και ευρύτερα εφαρμόσιμη τεχνολογία είναι τα ακουστικά κύματα που επιτυγχάνουν επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις πλην όμως παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση καθώς επηρεάζονται ιδιαίτερα από το Doppler effect φαινόμενο και από το μεγάλο βαθμό καθυστέρησης διάδοσης που οδηγεί σε σοβαρές διασυμβολικές παρεμβολές (ISI). Στις προαναφερθείσες τεχνολογίες, πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος υλοποίησης το οποίο σχετίζεται με την απαιτούμενη απόδοση/διεκπεραίωση δεδομένων για μια καθορισμένη απόσταση επικοινωνίας και τη σχετική ισχύ εκπομπής που μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως ανεπιθύμητες παρεμβάσεις στη θάλασσα ζωή. Επιπρόσθετα είναι γνωστό ότι με την αύξηση του βάθους στους ωκεανούς, η πυκνότητα και η πίεση τείνουν να αυξάνονται γεγονός το οποίο προκαλεί ανάκλαση, διάθλαση και διάχυση των οπτικών κυμάτων εντός ενός καναλιού διάδοσης [1].

Τα ραδιοκύματα χρησιμοποιούνται κυρίως στις επίγειες επικοινωνίες παρέχοντας άμεση ανταπόκριση και ελάχιστη καθυστέρηση διάδοσης.

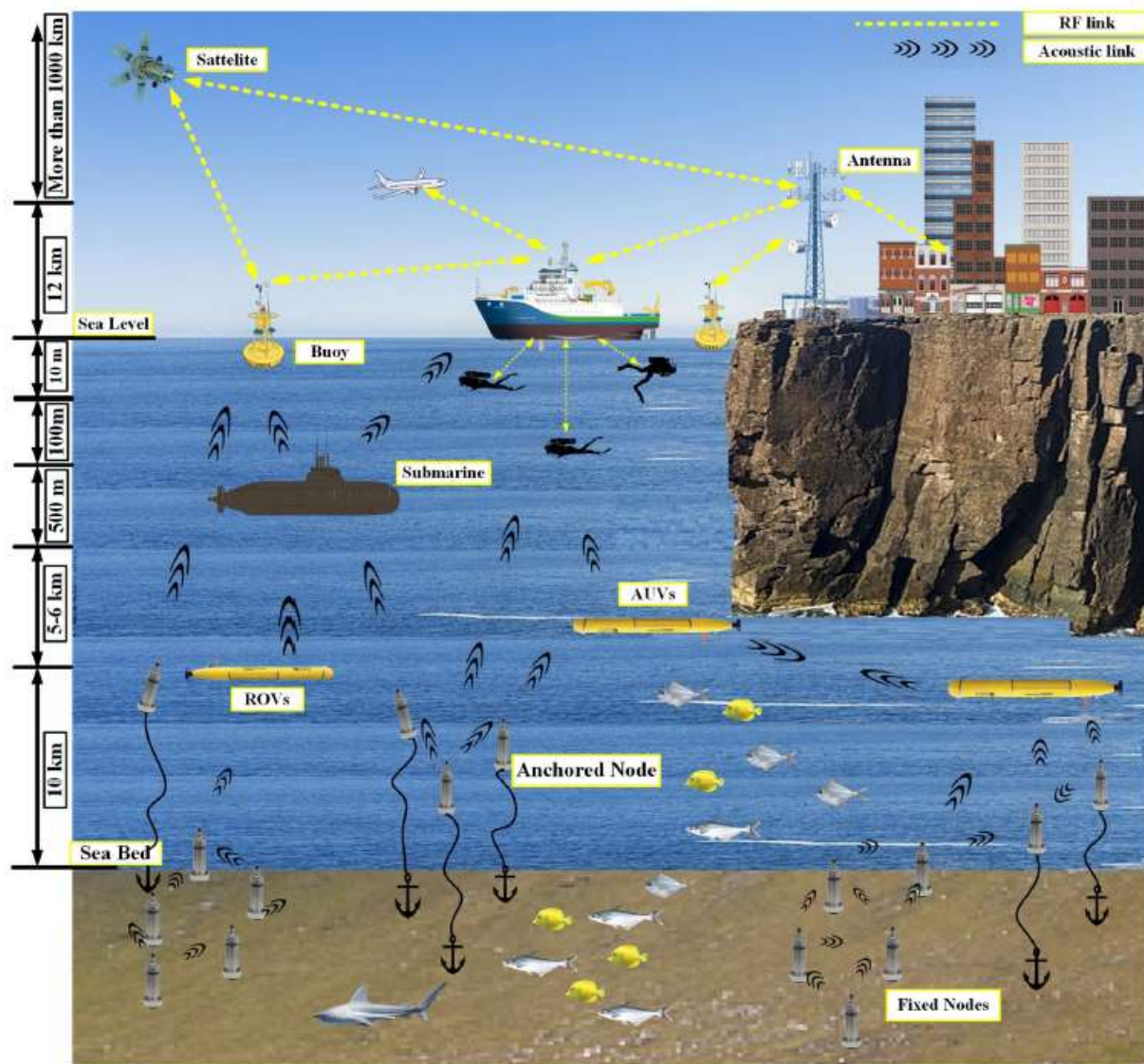
Επιπρόσθετα, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαθέτουν υψηλές συχνότητες εκπομπής, υψηλό εύρος ζώνης και εξασφαλίζουν αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου που αναλύονται στο [6]. Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών (στο πεδίο των ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency – RF)) κυμάτων είναι παρόμοια με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός ενώ διαδίδονται διαφορετικά στο νερό σε σχέση με τον αέρα λόγω της ηλεκτρικής επιτρεπτότητας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού [7].

Μια εναλλακτική προσέγγιση αποτελούν οι οπτικές υποθαλάσσιες επικοινωνίες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε μεσαίες αποστάσεις συγκρινόμενα με τα RF και τα ακουστικά κύματα [8]. Στον αντίποδα, τα οπτικά σήματα σκεδάζονται λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων που ευρίσκονται εντός ενός υδάτινου καναλιού και απορροφώνται ένεκα των φυσικών ιδιοτήτων του υγρού μέσου όπως θολότητα, πίεση και θερμοκρασία. Λόγω λοιπόν της απορρόφησης αυτής, η ενέργεια των οπτικών κυμάτων μετατρέπεται σε θερμική, η οποία με τη σειρά της αυξάνει τη χημική δραστηριότητα του υδάτινου καναλιού. Ιδίως το νερό ενός λιμανιού το οποίο είναι πολύ θολό, προκαλεί στην οπτική δέσμη περισσότερες σκεδάσεις και ανακλάσεις διαφόρων γωνιών [6]. Επιπρόσθετα στις ασύρματες υποθαλάσσιες οπτικές επικοινωνίες (Underwater wireless optical communication - UWOC), κάθε χρώμα του φάσματος ορατού φωτός έχει διαφορετικό εύρος συχνοτήτων και δεν αποδίδει με τον ίδιο τρόπο [3]. Στην εικόνα (1) παρατηρούμε ότι το μπλε με πράσινο χρώμα προσφέρει απόδοση 10 με 150 Mbps για απόσταση 10 με 100 m [6]. Τα οπτικά κύματα δεν διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα στο νερό όπως στο κενό αλλά επιταχύνουν εκθετικά σε ένα υγρό μέσο λόγω της εξασθένησης [1].

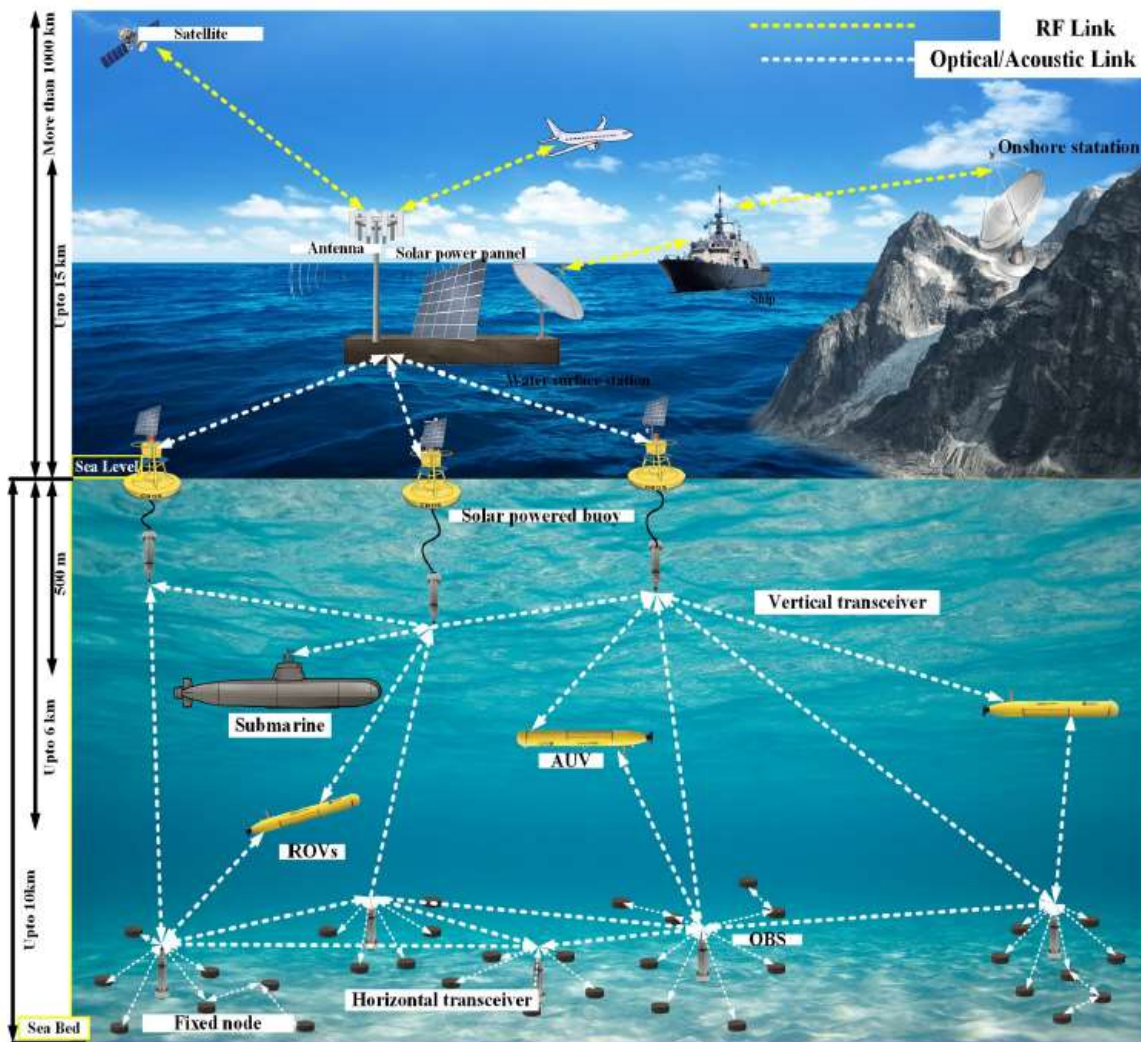


Σχήμα 1.1: Περιγραφή του Η/Μ φάσματος [1]

Μια άλλη σημαντική τεχνική ασύρματου φορέα είναι τα ακουστικά κύματα, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στις υποβρύχιες ασύρματες επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων με χαμηλό εύρος ζώνης δεδομένων. Τα ακουστικά κύματα, ως γνωστόν, παράγονται μέσω της δόνησης των μορίων ενός ελαστικού μέσου. Συγκεκριμένα, αυτά διαδίδονται σε κατά μήκος διεύθυνση μέσω αδιαβατικής διαδικασίας συμπίεσης και εκτόνωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης ενώ τα υποβρύχια ακουστικά κύματα διαδίδονται γρηγορότερα από ότι τα αντίστοιχα στον αέρα με λιγότερες απώλειες ενέργειας. Τα ακουστικά κύματα διαδίδονται γενικά με 1400–1600 m / s στον ωκεανό ενώ ταξιδεύουν με ταχύτητα 340 m / s στον αέρα [6]. Αρκετοί παράγοντες επηρεάζουν την διάδοσή τους στους οποίους περιλαμβάνονται η σκέδαση, η ανάκλαση και η απορρόφηση που υφίστανται εντός ενός υδάτινου μέσου. Η διάδοση των ακουστικών κυμάτων εξαρτάται πλήρως από τις φυσικές ιδιότητες του καναλιού, όπως η πίεση, η θερμοκρασία και η αλατότητα, αλλά κατά τη διάδοση, εμφανίζεται επίσης μια τεράστια απώλεια ισχύος λόγω φαινομένων απορρόφησης και σκέδασης που κατ' επέκταση επηρεάζουν και την ταχύτητα του μεταδιδόμενου σήματος. Η πρόοδος και εξέλιξη όμως των υποβρύχιων επικοινωνιών έγκειται στην αρχιτεκτονική σχεδίαση και εφαρμογή του υποβρύχιου δικτύου αισθητήρων (Underwater sensor network – UWSN) με σκοπό την κατάλληλη επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων συσκευών. Οι σταθεροποιημένοι και αγκυροβολημένοι κόμβοι στο βυθό της θάλασσας, λιμνών ή ποταμών έχουν θεμελιώδη ρόλο στην επίτευξη επικοινωνίας προς όφελος του εντοπισμού και συλλογής δεδομένων. Το σύμπλεγμα των UWSNs αποτυπώνεται στα σχήματα 1.2 και 1.3 [1].



Σχήμα 1.2: Μοντέλο UWSN που χρησιμοποιεί RF και ακουστικά links επικοινωνιών [1]



Σχήμα 1.3: Μοντέλο UWSN που χρησιμοποιεί RF και οπτικά/ακουστικά links επικοινωνιών [1]

ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΥΓΡΑ ΜΕΣΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Υπάρχουν διάφοροι τύποι νερών που ταξινομούνται σύμφωνα με τη συγκέντρωση του άλατος και της πυκνότητας του νερού. Το αλμυρό νερό, το οποίο ευρίσκεται ως επί το πλείστον σε ωκεανούς, είναι αρκετά διαφορετικό από το αντίστοιχο γλυκό το οποίο συναντάμε σε ποτάμια, λίμνες και φράγματα. Η θαλάσσια βλάστηση και τα θαλάσσια θηλαστικά και έμβια είδη είναι προσαρμοσμένα για να ζουν σε αλμυρό νερό αλλά πολλά φυτά θα

μπορούσαν να ευδοκιμήσουν και στους δύο τύπους νερού. Γενικά, το νερό των ωκεανών μπορεί να διαχωρισθεί σε δύο οριζόντια επίπεδα την άνω και κάτω περιοχή όπου εντός αυτών τα ηχητικά κύματα επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο λόγω των διαφορετικών τιμών θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν σε αυτά. Το άνω στρώμα έχει υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το αντίστοιχο μεταβατικό (κάτω), λόγω του ότι το ηλιακό φως έχει άμεση επαφή με αυτό. Το μεταβατικό στρώμα ονομάζεται θερμοκλινές καθόσον η θερμοκρασία μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος. Λόγω πτώσης της θερμοκρασίας, η ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων επίσης μειώνεται [1].

Σύμφωνα με το [2], ο τύπος νερού κατά Jerlon περιλαμβάνει τρεις κύριες κατηγορίες: το καθαρότερο (clearest water), το ενδιάμεσο (intermediate) και το θολό (murkiest) νερό. Το καθαρότερο νερό μπορεί να βρεθεί στον κεντρικό Ειρηνικό και Ατλαντικό Ωκεανό, το ενδιάμεσο νερό συναντάται στον Βόρειο Ειρηνικό Ωκεανό ενώ το θολό νερό είναι χαρακτηριστικό της Βόρειας Θάλασσας και του Ανατολικού Ατλαντικού Ωκεανού. Μια άλλη κατάταξη σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [9], [10] το θαλασσινό νερό, χωρίζεται σε τέσσερις τύπους στο καθαρό θαλασσινό (pure seawater), στο καθαρό νερό των ωκεανών (clear ocean water), στο παράκτιο ωκεάνιο νερό (coastal ocean water) και στο θολό του λιμανιού και των εκβολών του ποταμού (turbid harbor and estuary water), ως αναφέρονται και στον Πίνακα 1.1 [1].

Description of water for UWC	$a(\lambda)$	$b(\lambda)$	$b_b(\lambda)$	$c(\lambda)$
Pure sea water	0.053	0.003	0.0006	0.056
Clear ocean water	0.069	0.08	0.001	0.15
Coastal ocean water	0.088	0.216	0.0014	0.305
Turbid harbor water	0.295	1.875	0.0076	2.17

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών απορρόφησης και σκέδασης σε διαφορετικά υγρά μέσα [1]

Στο καθαρό θαλασσινό νερό, οι μεγάλες απώλειες οφείλονται στην απορρόφηση των οπτικών σημάτων διάδοσης, ενώ στο καθαρό νερό των ωκεανών υφίσταται επίσης απώλεια λόγω σκέδασης ένεκα υψηλότερης συγκέντρωσης σωματιδίων σε αυτό εν συγκρίσει με το καθαρό θαλασσινό νερό. Το παράκτιο ωκεάνιο νερό παρουσιάζει ακόμη μεγαλύτερη σκέδαση και απορρόφηση των οπτικών κυμάτων λόγω ακόμη υψηλότερης συγκέντρωσης σωματιδίων ενώ το θολό νερό του λιμανιού και των εκβολών του ποταμού εμφανίζει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση αυτών [1].

Ο συντελεστής εξασθένησης δέσμης (beam attenuation coefficient) σχετίζεται με το συνολικό άθροισμα των απωλειών της ενέργειας που συμβαίνουν εξαιτίας της απορρόφησης και της σκέδασης και ορίζεται ως ακολούθως [3],[32],[33],[34]:

$$c(\lambda) = \alpha(\lambda) + b(\lambda) \quad (1)$$

Πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούν τον συντελεστή οπισθοσκέδασης (backscattering coefficient) $b_b(\lambda)$ ο οποίος αποτελεί μέρος του συντελεστή σκέδασης και σχετίζεται με την ποσότητα φωτός που επιστρέφει στον πομπό. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ποιότητας του νερού καθόσον η γνώση του πόσο θολό είναι ένα υγρό μέσο δύναται να είναι σημαντική για το σχεδιασμό “έξυπνων” πομπών, οι οποίοι θα είναι ικανοί να ρυθμίζουν την ισχύ εκπομπής τους όπως αντιστοίχως και το ρυθμό δεδομένων [3].

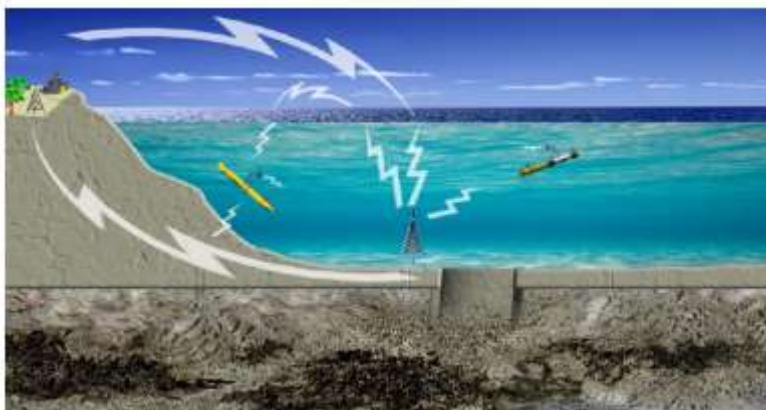
ΕΝΟΤΗΤΑ 2.

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ (H/M) ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

ΓΕΝΙΚΑ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ

Από άποψη Φυσικής, για τα εύρη συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, τηλεόρασης, ραδιοφώνου και δορυφορικών επικοινωνιών, το θαλασσινό νερό είναι πολύ αγωγίμο, επηρεάζοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα από αυτό. Ως αποτέλεσμα, δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί επικοινωνία για αποστάσεις άνω των 10 μέτρων στον ωκεανό [3] μέσω VHF, UHF και HF επικοινωνιών. Στις χαμηλότερες όμως συχνότητες, δηλαδή στις ELF και VLF επικοινωνίες, η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να θεωρηθεί αρκούντως χαμηλή ώστε να επιτρέπει αξιόπιστες επικοινωνίες σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων. Δυστυχώς όμως, αυτές οι συχνότητες κυμαίνονται σε εύρη από 3 Hz έως 3 kHz και από 3 kHz έως 30 kHz τα οποία δεν είναι αρκετά ώστε να επιτύχουν μεταδόσεις υψηλού ρυθμού δεδομένων. Παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται σε ναυτικές [3] και περιβαλλοντικές εφαρμογές [3], υφίστανται επιχειρησιακές και οικονομικές δυσκολίες λόγω του όγκου, του κόστους και της μεγάλης ισχύος που απαιτεί ο συγκεκριμένος εξοπλισμός.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των υποβρύχιων σημάτων ραδιοσυχνοτήτων (Radio frequency - RF) είναι ότι αυτά μπορούν να ταξιδέψουν χρησιμοποιώντας διάφορα μονοπάτια διάδοσης καθόσον το σήμα μπορεί να διαπεράσει την επιφάνεια του νερού (όριο νερού-αέρα) και μπορεί επίσης να διαδοθεί μέσω του πυθμένα, όπως απεικονίζεται στην Σχήμα 2.1. Ως εκ τούτου, η χρήση πολλαπλών διαδρομών δύναται να αυξήσει την απόσταση διάδοσης του σήματος σε ρηχά νερά και κατά συνέπεια, ένας βυθισμένος σταθμός μπορεί να μεταδίδει πληροφορίες σε έναν χερσαίο σταθμό [3]. Σε αυτήν την περίπτωση λοιπόν, το σήμα που διατρέχει τον βυθό ή τον αέρα μπορεί να υφίσταται χαμηλότερη εξασθένηση συγκριτικά με το σήμα που διαδίδεται μόνο στο νερό. Εκτός από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, το σήμα RF επηρεάζεται επίσης από το φαινόμενο Doppler effect το οποίο παρόλο που δεν είναι τόσο έντονο όσο στα ακουστικά κύματα, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.



Σχήμα 2.1: Δυνατά μονοπάτια διάδοσης H/M κυμάτων σε θαλάσσιο περιβάλλον [3]

Η διάδοση των σημάτων RF εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η αλατότητα και η θερμοκρασία ενώ ταυτόχρονα εξαρτάται και από τη συχνότητα εκπομπής. Στον παρακάτω τύπο (2), το $\alpha(f)$ αποτυπώνει την εξασθένηση ανά μέτρο στο θαλασσινό νερό.

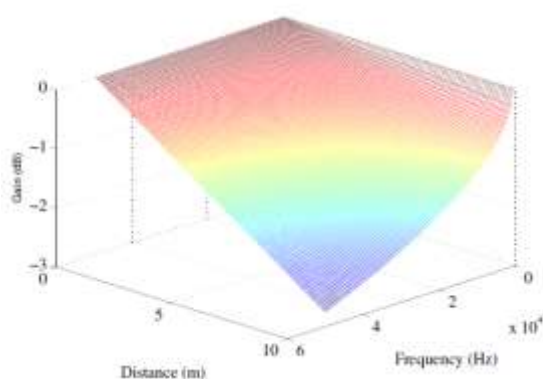
$$\alpha(f) = \sqrt{\pi \sigma \mu_0} \sqrt{f} = k \sqrt{f} \quad (2)$$

όπου f , η συχνότητα του σήματος σε Hertz, σ , η αγωγιμότητα του νερού σε Siemens ανά μέτρο και μ_0 , η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό. Η αγωγιμότητα είναι άμεσα εξαρτώμενη από την αλατότητα και την θερμοκρασία, η οποία είναι 4.3 S/m για το θαλασσινό νερό, ενώ για το γλυκό νερό κυμαίνεται από 0.001 έως 0.01 S/m. Ως αποτέλεσμα, είναι φυσικό να αναμένεται μεγαλύτερη εξασθένιση του RF σήματος στο θαλασσινό νερό σε σχέση με το γλυκό, αφού όσο πιο αγωγίμο είναι το μέσο διάδοσης, τόσο μεγαλύτερη εξασθένιση παρουσιάζεται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική διαπερατότητα του θαλασσινού και του γλυκού νερού είναι περίπου ίσες ενώ οι τιμές της αγωγιμότητας δείχνουν την σημασία που έχει η αλατότητα στη διάδοση του σήματος RF. Κατά συνεπεία λοιπόν, η κύρια πτυχή που πρέπει να εξεταστεί, προκειμένου ένα ασύρματο κανάλι να εκτιμηθεί πόσο κατάλληλο είναι για μετάδοση RF, είναι η αλατότητα του νερού [3].

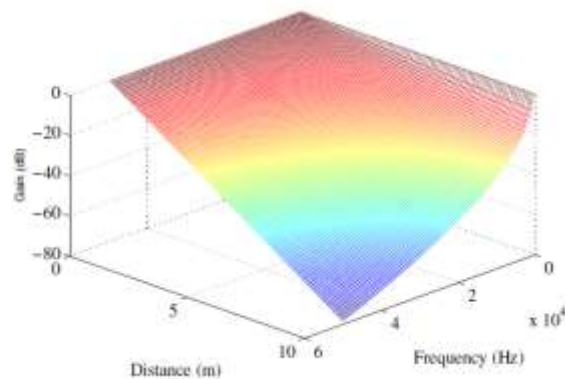
Η ακόλουθη μαθηματική εξίσωση περιγράφει το μοντέλο ενός καναλιού διάδοσης:

$$H(f) = H_0 e^{-\alpha(f)d} e^{-j\theta(f)} \quad (3)$$

όπου H_0 , το κέρδος του καναλιού σταθερού ρεύματος, $\theta(f)$, η φάση του καναλιού, και d , η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Για μια σταθερή συχνότητα, το μέγεθος της απόκρισης ενός καναλιού μειώνεται εκθετικά σε συνάρτηση με την απόσταση. Τα σχήματα 2.2(α) και 2.2(β) απεικονίζουν τη μεταβολή του μεγέθους της απόκρισης του καναλιού σε σχέση με τη συχνότητα και την απόσταση, θεωρώντας ως υδάτινο μέσο διάδοσης γλυκό και θαλασσινό νερό, αντίστοιχα. Η εξασθένηση εντός του θαλασσινού νερού είναι πάντα υψηλότερη από ό, τι στο γλυκό νερό για όλες τις αποστάσεις και συχνότητες. Επιπλέον, χαμηλότερες συχνότητες και μικρότερες αποστάσεις οδηγούν σε λιγότερη εξασθένηση για όλους τους τύπους νερού. Αξίζει να αναφερθεί ότι η Εξ. (3) δεν λαμβάνει υπόψη τις απώλειες διάδοσης λόγω του απλουστευμένου μοντέλου του επίπεδου κύματος. Άλλωστε, ακόμα κι αν επρόκειτο να εξετάσουμε ένα μοντέλο σφαιρικών κυμάτων, η εξασθένηση του σήματος θα υπερίσχυε έναντι εκείνων των απωλειών διάδοσης, ήτοι το πρώτο αυξάνεται εκθετικά σε σχέση με την απόσταση διάδοσης, ενώ το δεύτερο αυξάνεται αναλογικά και αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αγωγιμότητας του μέσου. Πράγματι λοιπόν στην πράξη, η παραπάνω αιτία εξασθένησης επισκιάζει οποιαδήποτε άλλη πηγή απώλειας κατά τη διάδοση των κυμάτων [3].



Κέρδος καναλιού συναρτήσει
συχνότητας- απόστασης
για γλυκό νερό (α)



Κέρδος καναλιού συναρτήσει
συχνότητας- απόστασης
για θαλασσινό νερό (β)

Σχήμα 2.2: Ιδιότητες των υδάτινων καναλιών στις H/M επικοινωνίες [3]

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει την απόσταση διάδοσης για εξασθένηση σήματος των 50 dB. Για το θαλασσινό νερό, όταν χρησιμοποιούνται συχνότητες της τάξεως μεγέθους MHz, η απόσταση διάδοσης είναι αντίστοιχα

τάξεως εκατοστών. Παρά λοιπόν τις μικρές αυτές αποστάσεις, η τεχνολογία RF μπορεί να φανεί χρήσιμη σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στη μεταφορά δεδομένων μεταξύ συσκευών σε βαθιά νερά, άνευ μηχανικής σύζευξης [3].

	Frequency						
	10 Hz	10 ² Hz	10 ³ Hz	10 ⁴ Hz	10 ⁶ Hz	10 ⁷ Hz	10 ⁹ Hz
Seawater	4.4×10^2	1.4×10^2	4.4×10^1	1.4×10^1	1.4×10^0	4.4×10^{-1}	4.4×10^{-2}
Fresh water	2.9×10^4	9.2×10^3	2.9×10^3	9.2×10^2	9.2×10^1	2.9×10^1	2.9×10^0

Πίνακας 2.1: Απόσταση διάδοσης H/M κυμάτων για εξασθένηση σήματος των 50 dB σε γλυκό και θαλασσινό νερό [3]

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ Η/Μ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΣΤΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Η υποβρύχια επικοινωνία μέσω RF επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις απώλειες διάδοσης ώστε να πρέπει να υπολογίζονται με ακρίβεια και ιδίως προς όφελος απαιτητικών λειτουργιών, όπως η ανάκτηση και αποθήκευση δεδομένων καθώς και η μεταφορά ισχύος σε υποβρύχιο εξοπλισμό. Επιπλέον, για κάθε κανάλι υπάρχουν συγκεκριμένες συχνότητες RF σημάτων που δύναται να διαδοθούν σε αυτά, ενώ εκείνα με τη σειρά τους, επηρεάζονται από τον περιβαλλοντικό θόρυβο. Οι αντίστοιχοι λοιπόν υπολογισμοί πρέπει να είναι αξιόπιστοι έτσι ώστε να εκτιμηθεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια η χωρητικότητα του καναλιού. Γι' αυτό λοιπόν, μια λύση θα μπορούσε να αποτελέσει η χρήση πομποδεκτών πολλαπλών φορέων (multicarrier transceivers) με δυνατότητα εκτίμησης της κατάστασης και χωρητικότητας ενός καναλιού διάδοσης (channel capacity - state) [3].

Επομένως, η τεχνολογία RF αντιμετωπίζει σοβαρούς περιορισμούς όσον αφορά το ρυθμό δεδομένων και τις αποστάσεις διάδοσης. Αυτοί είναι άλλωστε οι λόγοι που εξηγούν τον μικρό αριθμό υποβρύχιων συσκευών επικοινωνίας που χρησιμοποιούν RF τεχνολογία μέχρι τώρα. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες εφαρμογές στις οποίες η ακουστική ή οπτική μετάδοση δεν αποτελούν βιώσιμη λύση. Για παράδειγμα, η παρακολούθηση των ιζημάτων βυθού προς έλεγχο της παράκτιας διάβρωσης επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερα μέσω της ανάπτυξης ενός δικτύου αισθητήρων που μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσω σημάτων RF [3].

ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΡΑΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (RF TRANSDUCERS)

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τους πομποδέκτες είναι η ίδια όπως αυτή που υιοθετήθηκε για τις ασύρματες επικοινωνίες μέσω του αέρα, π.χ. κεραίες. Εάν τα χρησιμοποιούμενα εύρη συχνοτήτων είναι ELF και VLF τότε υφίσταται η απαίτηση για μεγάλες κεραίες λήψης, γεγονός το οποίο μπορεί να περιορίσει την εφαρμογή της τεχνολογίας RF σε ορισμένες περιπτώσεις. Επιπλέον, το σύνολο του εξοπλισμού θα πρέπει να περικλείεται κατάλληλα για λειτουργία στο υποβρύχιο περιβάλλον [3].

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η επικοινωνία RF αποτελεί μια εξαιρετική προοπτική των UWC που επιτρέπει την εξερεύνηση του απαιτητικού πεδίου των ωκεανών και του υποβρύχιου περιβάλλοντος. Η ανάπτυξη των RF επικοινωνιών δύναται να εξασφαλίσει υψηλό ρυθμό δεδομένων ενώ η αξιοποίηση συχνοτήτων εύρους ULF (Ultra low frequency) έως MF (Medium frequency) αποτελούν μελλοντική πτυχή και συζητείται ευρέως στο [11]. Επί του παρόντος τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χρησιμοποιούνται σε υποβρύχιες επικοινωνίες περιορισμένης εμβέλειας, κάτι το οποίο όμως θα μπορούσε να βελτιωθεί έτσι ώστε να εφαρμοστούν σε μεγαλύτερη εμβέλεια στον βαθύ ωκεανό μέσω συγκεκριμένου σχεδιασμού κεραιών, λαμβανομένου υπόψη ότι οι χαμηλές συχνότητες (Extremely low frequency - ELF) καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις ενώ αντίστοιχα οι υψηλές (High frequency - HF) παρουσιάζουν υψηλή εξασθένηση. Μελλοντική πρόκληση λοιπόν στις υποβρύχιες επικοινωνίες RF, δύναται να θεωρηθεί ο κατάλληλος σχεδιασμός των κεραιών καθώς επίσης και η βελτιστοποίηση σημαντικών παραγόντων όπως η εκπομπή ισχύος, το εύρος ζώνης και ο θόρυβος.

ΕΝΟΤΗΤΑ 3.

ΟΠΤΙΚΕΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η βασική διαφορά μεταξύ των RF και των οπτικών υποβρύχιων επικοινωνιών εντοπίζεται στη συμπεριφορά του μέσου διάδοσης καθώς το νερό θεωρείται αγωγός για τα RF σήματα ενώ ως διηλεκτρικό για την οπτική διάδοση. Η εξήγηση για αυτό το φαινόμενο βρίσκεται στη συχνότητα του πλάσματος (plasma frequency), του οποίου η τιμή καθορίζει το εύρος των συχνοτήτων για τις οποίες το μέσο συμπεριφέρεται άλλοτε ως αγωγός και άλλοτε ως διηλεκτρικό. Το θαλασσίνο νερό αλλάζει ιδιότητα από αγωγός σε διηλεκτρικό σε συχνότητες περί τα 250 GHz που αντιστοιχεί στο ραδιο-φάσμα του EHF (extremely high frequency). Παρά το γεγονός ότι στο διηλεκτρικό μέσο το ηλεκτρομαγνητικό κύμα παρουσιάζει χαμηλότερη εξασθένηση από ότι σε ένα αγωγίμο μέσο, η αντίστοιχη οπτική τεχνολογία δύναται να παρέχει υψηλότερο ρυθμό δεδομένων σε σύγκριση με την RF, για περιορισμένη βέβαια απόσταση διάδοσης της τάξης των δεκάδων μέτρων. Επίσης λαμβάνοντας υπόψη ότι η ταχύτητα του φωτός είναι περίπου 4 έως 5 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων σε υγρό μέσο, οι επιδράσεις λόγω Doppler είναι σχεδόν αμελητέες στην οπτική ασύρματη διάδοση [3].

Η απόσταση διάδοσης των οπτικών σημάτων εξαρτάται από το εύρος συχνοτήτων. Το μπλε-πράσινο οπτικό παράθυρο έχει παρατηρηθεί ότι παρουσιάζει χαμηλότερη εξασθένηση κατά τη διάδοση και αυτό έχει χρησιμοποιηθεί προς τη βελτίωση των αντίστοιχων πομπών και δεκτών. Οι οπτικές επικοινωνίες συνήθως απαιτούν οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και του δέκτη, που συνεπάγεται ότι απαιτείται κάποιο είδος παρακολούθησης κατεύθυνσης για τη διατήρηση του συνδέσμου επικοινωνίας [3].

Λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών, το νερό εμφανίζει δύο σημαντικές ιδιότητες που επηρεάζουν τη διάδοση του φωτός, τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες (Inherent optical properties - IOP) και τις φαινόμενες οπτικές ιδιότητες (apparent optical properties - AOPs). Οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες εξαρτώνται μόνο από το μέσο διάδοσης (νερό) και είναι πιο συναφείς με τις υποβρύχιες οπτικές ασύρματες επικοινωνίες, ενώ οι

φαινόμενες οπτικές ιδιότητες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της πηγής φωτός, π.χ. εάν η πηγή λείζερ εκπέμπει παραλληλισμένες ή διάχυτες ακτίνες [3].

Οι δύο κύριες εγγενείς οπτικές ιδιότητες είναι ο συντελεστής φασματικής απορρόφησης (spectral absorptive coefficient) και η οπτική συνάρτηση όγκου σκέδασης (volume scattering function). Απορρόφηση καλείται η διαδικασία όπου η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα και αυτή συμβαίνει στη χλωροφύλλη του φυτοπλαγκτόν, στην έγχρωμη διαλυμένη οργανική ύλη (colored dissolved organic matter - CDOM), στα μόρια του νερού και στα διαλυμένα άλατα του νερού. Το αποτέλεσμα της εν λόγω απορρόφησης μπορεί να εκφρασθεί μέσω της παραμέτρου $a(\lambda)$, η οποία ονομάζεται συντελεστής φασματικής απορρόφησης (spectral absorption coefficient), με λ να αποτυπώνει το μήκος κύματος [3].

Η κατεύθυνση των φωτονίων δύναται να αλλάζει λόγω της σκέδασης η οποία οφείλεται στα ιόντα άλατος του καθαρού νερού και από τη σωματιδιακή ύλη. Η σκέδαση εξαιτίας αντικειμένων μικρότερων από το μήκος κύματος του φωτός περιγράφεται από το μοντέλο Rayleigh, ενώ αντίστοιχα λόγω μεγαλύτερων αντικειμένων από το μήκος κύματος του φωτός περιγράφεται από τη θεωρία του Mie. Ο συντελεστής φασματικού βαθμού σκέδασης δηλώνεται ως $b(\lambda)$ [3].

Ο συντελεστής εξασθένησης της ακτινοβολίας σχετίζεται με το συνολικό άθροισμα των απωλειών της ενέργειας που συμβαίνουν εξαιτίας της απορρόφησης και της σκέδασης και ορίζεται ως εξίσωση (1) ενότητας 1. Παράλληλα σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιείται ο συντελεστής οπισθοσκέδασης $b_b(\lambda)$ ο οποίος αποτελεί μέρος του συντελεστή σκέδασης και σχετίζεται με την ποσότητα φωτός που επιστρέφει στον πομπό.

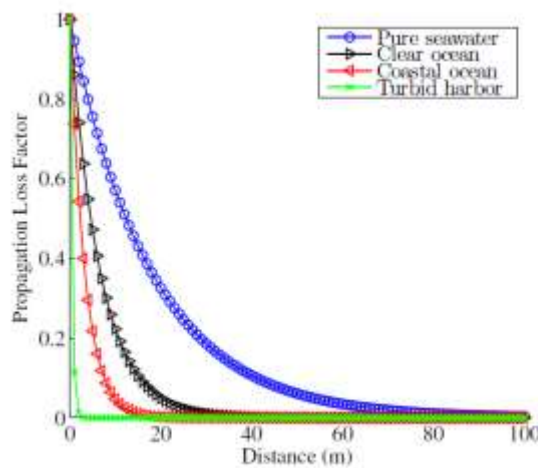
Λαμβάνοντας υπόψη λοιπόν τα παραπάνω, η αντίστοιχη εξασθένηση του οπτικού σήματος μπορεί να περιγραφθεί ως [3]:

$$I=I_0 e^{-c(\lambda)d} \quad (4)$$

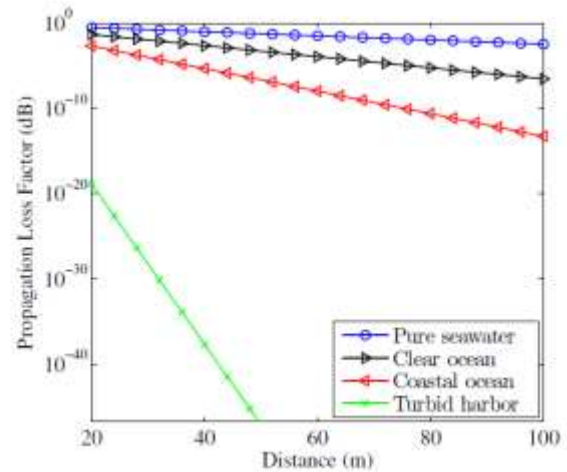
όπου I , η ένταση του φωτός στο δέκτη, I_0 , η ένταση του φωτός στον πομπό και d , η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Επίσης μπορεί να ορισθεί:

$$L(\lambda, d) = e^{-c(\lambda)d} \quad (5)$$

ως παράγοντας απωλειών διάδοσης και απεικονίζεται στην εικόνα 3.1(α) καθώς και στην εικόνα 3.1(β) με λογαριθμική κλίμακα στον άξονα y.



(α)



(β)

Σχήμα 3.1: Εξασθένιση του οπτικού κύματος [3]

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΣΤΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Στις οπτικές επικοινωνίες είναι σημαντικό να ποσοτικοποιηθεί η διάχυση προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη μέθοδος ανίχνευσης σήματος για αξιόπιστη επικοινωνία. Το μοντέλο του καναλιού διάδοσης επηρεάζεται από χαρακτηριστικά εγγενή (inherent) στο φυσικό στρώμα, όπως ο τύπος νερού, καθώς και επιδράσεις που σχετίζονται με το μέγεθος διαφράγματος φακού του δέκτη. Σε αντίθεση με τις άλλες τεχνολογίες, ο οπτικός πομποδέκτης απαιτεί ειδικούς αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος ώστε να παρακολουθεί τις αλλαγές στην κατεύθυνση του οπτικού πεδίου του δέκτη και της δέσμης του οπτικού πομπού. Έτσι λοιπόν, το ενδεχόμενο διακοπής της επικοινωνίας λόγω διέλευσης θαλάσσιας ζωής δύναται να προλαμβάνεται για να αποφευχθεί η απώλεια πληροφοριών ενώ ο οπτικός πομπός μπορεί να επεξεργαστεί το σήμα οπισθο-σκέδασης (backscattered) έτσι ώστε να προσδιοριστεί η απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης ή / και του κατάλληλου ρυθμού δεδομένων. Η επεξεργασία σήματος παίζει επίσης βασικό ρόλο καθόσον το φιλτράρισμα του λαμβανόμενου σήματος είναι απαραίτητο για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών θορύβων. Ο οπτικός πομποδέκτης

μπορεί να διαμορφωθεί σε ένα κλειστού τύπου βρόχου σύστημα όπου ο δέκτης περιλαμβάνοντας ένα συνδυαστή διαφορισμού (diversity combiner) και κατόπιν εκτίμησης της οπισθο-σκέδασης, μπορεί να παρέχει πληροφορίες ελέγχου στον πομπό σχετικά με την ισχύ και το ρυθμό δεδομένων. Ο δέκτης επίσης μπορεί να εκτιμήσει τη γωνία πρόσπτωσης του οπτικού σήματος και με αυτό τον τρόπο να αποστείλει κατάλληλες πληροφορίες στον πομπό προκειμένου να διατηρεί συνεχώς την ευθυγράμμιση όσο το δυνατόν ακριβέστερα [3].

Εκτός από όλα τα προαναφερθέντα ζητήματα, το κύριο μειονέκτημα των οπτικών επικοινωνιών εντοπίζεται στην εξάρτησή τους από τη θολότητα του νερού, γεγονός το οποίο περιορίζει δραστικά την απόσταση διάδοσης [3].

ΗΛΕΚΤΡΟ-ΟΠΤΙΚΟΙ ΜΟΡΦΟΤΡΟΠΕΙΣ (OPTICAL TRANSDUCERS)

Οι μορφοτροπείς των υποβρύχιων οπτικών επικοινωνιών έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ανάλογα με το αν λειτουργούν ως αισθητήρες στο δέκτη ή ως ενεργοποιητές του πομπού. Οι μορφοτροπείς που είναι σχεδιασμένοι για την παραγωγή οπτικών σημάτων μέσω της μετατροπής των αντίστοιχων ηλεκτρικών, αποτελούνται από μια οπτική πηγή, ένα σύστημα οπτικής προβολής, και ένα σύστημα διεύθυνσης δέσμης, ενώ οι μορφοτροπείς ανίχνευσης οπτικών σημάτων και κατόπιν μετατροπής τους σε αντίστοιχα ηλεκτρικά, αποτελούνται από μια συλλογή οπτικών υλικών και εντοπιστών [35].

Πομπός: Η οπτική πηγή μπορεί να είναι είτε λέιζερ είτε μια δίοδος εκπομπής φωτός (Light emitting diode - LED). Στην περίπτωση των πηγών λέιζερ, όπως κάθε τεχνολογία έχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά, έτσι και η επιλογή της πιο κατάλληλης εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος όπως για παράδειγμα η τεχνολογία λέιζερ ιόντων αργού, κατά την οποία η μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε οπτικά είναι εξαιρετικά μη αποδοτική [35]. Άλλες τεχνολογίες περιλαμβάνουν λέιζερ διόδου-αντλίας στερεάς κατάστασης (diode-pumped solid-state -DPSS) και λέιζερ InGaN των οποίων οι συσκευές είναι πολύ πιο ακριβές από αυτές των LED [35] και είναι επιρρεπείς σε υπερεντάσεις ρεύματος. Ακόμη, τα συντονίσιμα (tunable) λέιζερ μπορούν να προσαρμόζουν τη συχνότητα της εκπομπής σύμφωνα με τα συγκεκριμένα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά έτσι ώστε να περιορίζεται κάθε φορά η εξασθένιση διάδοσης του κύματος. Μια άλλη τεχνολογία είναι οι διαμορφωτές

λείζερ των οποίων η απόσταση διάδοσης είναι σχετικά μεγαλύτερη (της τάξεως των εκατοντάδων μέτρων) πλην όμως ο ρυθμός δεδομένων παρουσιάζεται εξαιρετικά χαμηλός (της τάξεως των bps ή kbps) [35]. Από την άλλη πλευρά, τα LED είναι φθηνότερες οπτικές πηγές σε σύγκριση σε τα λείζερ, αλλά έχουν μικρότερη απόσταση διάδοσης [33].

Η λειτουργία της οπτικής προβολής έγκειται στην εστίαση της δέσμης προς μια προκαθορισμένη κατεύθυνση ενώ η καθοδήγηση της δέσμης αυτής έχει θεμελιώδη σημασία στην απόδοση του οπτικού συστήματος. Πράγματι, στο χώρο μεταξύ πομπού και δέκτη θα πρέπει να υφίσταται μια ευθυγραμμισμένη σύνδεση από σημείο σε σημείο έτσι ώστε τα οπτικά σήματα που φτάνουν στο δέκτη να έχουν αρκετή ενέργεια για να αποκωδικοποιηθούν αξιόπιστα. Σε αυτό το πλαίσιο, οι πομποί των έξυπνων οπτικών συστημάτων μπορούν να εκτιμήσουν την ποιότητα του νερού μέσω του σήματος οπισθοσκέδασης έτσι ώστε να προσαρμόζεται αναλόγως κάθε φορά η εκπομπή ισχύος, βελτιώνοντας τοιουτοτρόπως συνολικά τη διαδικασία μετάδοσης του σήματος [33]. Ένας έξυπνος λοιπόν πομπός μπορεί να έχει μια σειρά από LED σε διάταξη εξαγωνικού σχήματος πυραμίδας [16], όπου το καθένα θα διαθέτει έναν φακό και θα μπορεί να ελέγχεται και καθοδηγείται ξεχωριστά επιλέγοντας μια συγκεκριμένη κατεύθυνση εξόδου, διαμορφώνοντας έτσι τον μηχανισμό διεύθυνσης της μεταγόμενης δέσμης (switched beam steering mechanism) του πομπού.

Δέκτης: Οι δέκτες αποτελούνται από συλλογή οπτικών υλικών (collection optics) και εντοπιστές (detector) [35]. Τα οπτικά αυτά υλικά μπορεί να είναι ένας μόνο φακός, ή μια σειρά φακών, των οποίων ο κύριος ρόλος είναι η συλλογή των εκπεμπόμενων σημάτων. Ο εντοπιστής είναι ένας φωτοαισθητήρας, του οποίου ο κύριος ρόλος είναι η μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό ενώ ο στόχος του μορφοτροπέα είναι η συλλογή από το δέκτη της μέγιστης ποσότητας φωτονίων που εκπέμφθηκαν. Προς τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, ορισμένα σχετικά χαρακτηριστικά της συλλογής των οπτικών υλικών και των εντοπιστών πρέπει να αναλυθούν και να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος.

Ένα λοιπόν παραπάνω χαρακτηριστικό είναι το μέγεθος διαφράγματος του φωτοαισθητήρα και είναι γενικώς επιθυμητό να διαθέτουμε έναν αισθητήρα με μεγάλο μέγεθος διαφράγματος. Ένας φωτοαισθητήρας με αυτό το χαρακτηριστικό είναι ο σωλήνας φωτοπολλαπλασιαστή (photomultiplier tube - PMT) ο οποίος ωστόσο, μπορεί

να είναι ακριβός και ογκώδης [33], και αυτό αποτελεί μειονέκτημα για ορισμένες εφαρμογές. Μια άλλη εναλλακτική λύση για την αύξηση του μεγέθους του διαφράγματος είναι η χρήση διάταξης φακών στο μπροστινό μέρος της περιοχής όπου ευρίσκεται η συλλογή των οπτικών υλικών του φωτοαισθητήριου.

Ένας ιδανικός φωτοαισθητήρας θα πρέπει να είναι φθηνός, μικρού μεγέθους, αξιόπιστος και ενεργειακά αποδοτικός [36], ωστόσο, αυτές οι απαιτήσεις δεν μπορούν να εκπληρωθούν ταυτόχρονα κατά το τρέχον στάδιο της τεχνολογίας. Σύμφωνα με τις εκάστοτε προδιαγραφές του συστήματος, θα πρέπει να επιλέγεται ένας συγκεκριμένος τύπος φωτοαισθητήρα όπως οι ακόλουθοι [3]: φωτοαντιστάτες, φωτοθυρίστορ, φωτοτρανζίστορ, σωλήνας φωτοπολλαπλασιαστή (PMT), p-n φωτοδίοδοι, φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (avalanche photodiode - APD), επιλογή φωτοανιχνευτή, φωτοαισθητήρες ημιαγωγών, και βιο-εμπνευσμένοι κβαντικοί φωτοαισθητήρες (biologically-inspired quantum photosensors - BQP).

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η χρήση της τεχνικής των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών (OWC - Optical wireless communication) στο υποβρύχιο περιβάλλον αξιοποιώντας υψηλές συχνότητες, ανοίγουν νέους ορίζοντες ευκαιριών στο μέλλον αφού επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων με υψηλές ταχύτητες. Μια πιο διευρυμένη προσέγγιση των UWOC θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων και συγκεκριμένα μέσω της τεχνολογίας των UWSNs καθώς εξασφαλίζουν μετάδοση σήματος υψηλής ενέργειας και μεγάλου εύρους ζώνης χρησιμοποιώντας οπτικά σήματα μεταξύ των αισθητήριων κόμβων και του σταθμού βάσης διαμέσου αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων (Autonomous underwater vehicle - AUVs) και εξ αποστάσεως χειριζόμενων οχημάτων (Remotely operated vehicle - ROVs). Εξαιτίας λοιπόν του χαμηλού κόστους, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και της υψηλής συμβατότητας με άλλες τεχνολογίες, τα οπτικά δίκτυα βρίσκουν εφαρμογές σε ετερογενή συστήματα δικτύων όπως στα ακουστικά-οπτικά υβριδικά συστήματα επικοινωνίας τα οποία είναι ικανά να παρέχουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέσω υποβοήθησης από δίκτυα ρομποτικών αισθητήρων [1].

ΕΝΟΤΗΤΑ 4.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Όπως διαπιστώθηκε προηγουμένως, τόσο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ραδιοσυχνοτήτων (Radio frequency - RF) όσο και οι οπτικές εκπομπές έχουν περιορισμένη απόσταση διάδοσης. Το πρώτο επηρεάζεται σοβαρά από ισχυρή εξασθένηση, η οποία οδηγεί σε μια μικρή απόσταση διάδοσης, ενώ το δεύτερο εξαρτάται από τη θολότητα του νερού. Επομένως, η ακουστική επικοινωνία είναι μια εναλλακτική τεχνολογία προκειμένου να επιτύχουμε υψηλότερες αποστάσεις, και γι' αυτό το λόγο σήμερα κυριαρχεί στις ασύρματες υποβρύχιες επικοινωνίες.

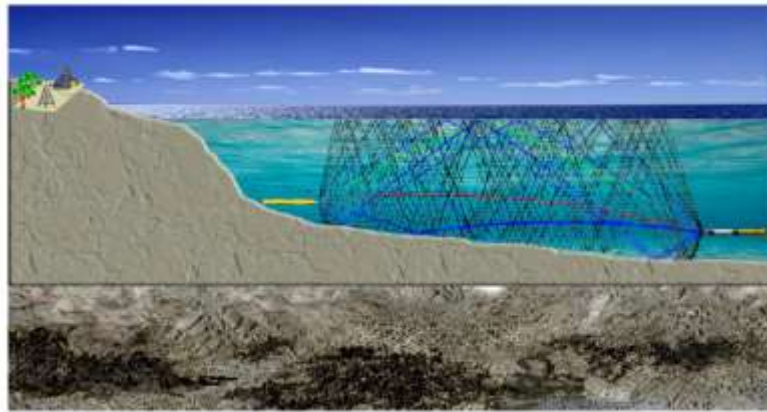
Η ταχύτητα διάδοσης των κυματομορφών εξαρτάται από τις ηλεκτρομαγνητικές ή μηχανικές ιδιότητες του μέσου. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ραδιοσυχνοτήτων μπορούν να διαδοθούν μέσω του αέρα με ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός σε κενό, που είναι περίπου 4 έως 5 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης “c” του ακουστικού κύματος στα υγρά δημιουργώντας τεράστιους περιορισμούς στη συνολική διαδικασία μετάδοσης μέσω ακουστικών κυμάτων. Πράγματι, οι παράμετροι που επηρεάζουν την ταχύτητα διάδοσης παίζουν σημαντικό ρόλο στις επικοινωνίες που έχουν ως βάση τα ακουστικά κύματα. Ένα μοντέλο που χαρακτηρίζει το προφίλ ταχύτητας του ήχου (Sound speed profile - SSP) εντός υποβρύχιου περιβάλλοντος με βάθος έως 1000 μέτρα είναι ο ακόλουθος τύπος [3] (σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο):

$$c=1449.2+4.6T-0.055T^2+0.00029T^3+(1.34-0.01T)(S-35)+0.016z \quad (6)$$

στον οποίο όπου T η θερμοκρασία (βαθμοί Κελσίου), όπου S η αλατότητα (σε parts per thousand - ppt) και z το βάθος νερού (σε μέτρα). Παρατηρούμε λοιπόν ότι η ταχύτητα διάδοσης είναι μια αύξουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας, της αλατότητας και του βάθους. Στην περίπτωση που απαιτείται ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου, θα πρέπει επιτόπου να εκτελείται μέτρηση θερμοκρασίας, αγωγιμότητας και βάθους.

Η διάδοση των σημάτων είναι ένα άλλο συναφές ζήτημα στην υποβρύχια ακουστική επικοινωνία. Το εκπεμπόμενο σήμα δύναται να φθάνει καθυστερημένα και παραμορφωμένο στον δέκτη εξαιτίας του καναλιού

πολλαπλών διαδρομών (multipath channel), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Αυτά τα φαινόμενα δημιουργούν παραμορφώσεις στο σήμα, όπως η διασυμβολική παρεμβολή (Inter-symbol interference - ISI), η οποία θα πρέπει να αντισταθμιστεί από τον πομποδέκτη. Συνεπώς, η γνώση και ο χαρακτηρισμός του μοντέλου ενός καναλιού καθώς και ο προσδιορισμός της χωρητικότητάς του, δύναται να επιτρέψει το σχεδιασμό αποτελεσματικότερων πομποδεκτών, οδηγώντας σε επικοινωνίες με βελτιωμένο ρυθμό δεδομένων [3].



Σχήμα 4.1: Multipath channel [3]

Η διάδοση των ακουστικών κυμάτων έρχεται αντιμέτωπη με φαινόμενα εξασθένησης και καθυστέρησης εξαρτώμενα από τη συχνότητα, και αυτό το γεγονός διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στο σχεδιασμό παραδοσιακών ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας. Ο προσδιορισμός του τρόπου εξασθένησης ως συνάρτηση της συχνότητας είναι σημαντικό για το έργο της σχεδίασης των συστημάτων δεδομένου ότι αποτελεί σημαντική παράμετρο για την επιλογή των κατάλληλων ζωνών συχνοτήτων επικοινωνίας. Ως γνωστόν το ακουστικό σήμα στις χαμηλές συχνότητες παρουσιάζει μικρή εξασθένηση ενώ στις υψηλές αυξάνεται. Ωστόσο, οι χαμηλές συχνότητες και ταχύτητες διάδοσης δύναται να εμποδίζουν την υψηλή απόδοση των υποθαλάσσιων επικοινωνιών. Πράγματι, το χαμηλό εύρος ζώνης περιορίζει το ποσό των bits που μπορεί να μεταδοθεί σε κάθε χρήση καναλιού, ενώ η χαμηλή ταχύτητα διάδοσης ενισχύει το φαινόμενο Doppler [3].

Ένα άλλο κοινό πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι όταν ο δέκτης βρίσκεται στη σκιερή ζώνη και έτσι τα ληφθέντα σήματα είναι σχετικά αδύναμα, προκαλώντας εν τέλει απώλεια σύνδεσης. Άλλα φαινόμενα που

επηρεάζουν τη διάδοση του ήχου είναι οι παλίρροιες, τα ρεύματα και τα εσωτερικά κύματα [3].

Επιπλέον, όπως συμβαίνει και με τις τεχνολογίες των RF και οπτικών σημάτων, οι ακουστικές επικοινωνίες ταξινομούνται λαμβάνοντας υπόψη το υποβρύχιο περιβάλλον. Έτσι λοιπόν αυτό διαχωρίζεται σε ρηχά και βαθιά νερά, με τον κάθε ένα από αυτούς τους τύπους νερού να διαθέτει δύο διαφορετικούς ορισμούς, τον υψομετρικό (hypsonetric) και τον ακουστικό (acoustic). Στον υψομετρικό ορισμό, τα ρηχά νερά ευρίσκονται στην περιοχή της υφαλοκρηπίδας, στην οποία το βάθος στήλης του νερού έχει τιμές χαμηλότερες των 200 μέτρων. Γενικά, ο πυθμένας της θάλασσας στο όριο της υφαλοκρηπίδας λαμβάνει απότομα υψηλές τιμές βάθους, ήτοι η στήλη νερού παρουσιάζει τιμές άνω των 2000 μέτρων. Στον ακουστικό ορισμό, η ταξινόμηση σε ρηχά νερά θεωρεί ότι τα ακουστικά κύματα αντανακλώνται στον πυθμένα και στην επιφάνεια της θάλασσας και πριν αυτά εντοπιστούν από τον δέκτη, ενώ στα βαθιά νερά, τα κύματα δεν αντανακλώνται απαραίτητα στο πυθμένα της θάλασσας [3].

Οι απώλειες ισχύος στα ακουστικά κύματα συμβαίνουν λόγω της διάδοσής τους, της απορρόφησης και σκέδασης που υφίστανται. Οι απώλειες λόγω διάδοσης είναι η διασπορά ενός πεπερασμένου ποσού ενέργειας που μεταδίδεται από μια πηγή όταν το κύμα διαδίδεται σε μια μεγάλη επιφάνεια. Σε συνάρτηση πάντα με την απόσταση, η επιφάνεια αυτή διαμορφώνεται είτε ως σφαίρα είτε ως κύλινδρος. Για μεγάλες αποστάσεις, οι απώλειες διάδοσης μοντελοποιούνται ως κυλινδρικές δεδομένου ότι το εύρος διάδοσης οριοθετείται μεταξύ του πυθμένα και της επιφάνειας της θάλασσας. Από την άλλη πλευρά, οι απώλειες λόγω απορρόφησης, είναι ο μετασχηματισμός μέρους της μεταδιδόμενης ενέργειας του ακουστικού κύματος σε θερμότητα. Οι υψηλές συχνότητες υφίστανται μεγάλες απώλειες απορρόφησης ενώ ομοίως, οι μεγαλύτερες αποστάσεις διάδοσης οδηγούν σε υψηλότερες απώλειες απορρόφησης [3]. Η τρίτη αιτία όπως προείπαμε είναι η σκέδαση, η οποία είναι μια τροποποίηση της διάδοσης των ακουστικών κυμάτων λόγω εμποδίων τα οποία δύναται να είναι η επιφάνεια και ο πυθμένας της θάλασσας, όπως και τα αντικείμενα στο νερό. Οι προαναφερθείσες απώλειες λόγω διάδοσης και απορρόφησης συμβάλλουν στην απώλεια διαδρομής (path loss), η οποία εκφράζεται με τον ακόλουθο τύπο εκφραζόμενο σε dB ως [3]:

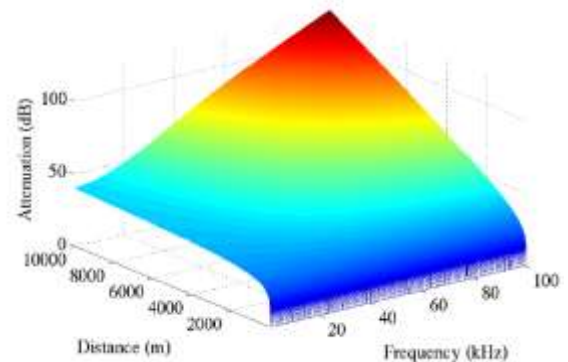
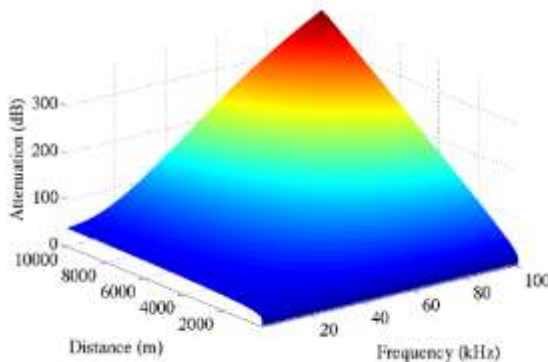
$$10\log A(l,f) = 10\log A_0 + 10k\log l + 10\log a(f,S,T,c,pH,z) \quad (7)$$

NF

$a(f, S, T, c, \rho H, z)$

όπου l είναι η απόσταση (σε μέτρα) μεταξύ πομπού και δέκτη, f η συχνότητα (σε kHz) και k ο συντελεστής διάδοσης ο οποίος συνήθως λαμβάνει τιμή 1 για κυλινδρική διάδοση, 2 για σφαιρική και 1,5 για “πρακτική” (practical spreading) [3]. Η παράμετρος $NF = 10 \log A_0$ είναι ο συντελεστής εξομάλυνσης που σχετίζεται με το αντίστροφο της εκπεμπόμενης ισχύος. Η μεταβλητή $a(f, S, T, c, \rho H, z)$ αντιπροσωπεύει τον συντελεστή εξασθένησης (σε dB / m) που εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και συγκεκριμένα από την συχνότητα (f σε kHz), την αλατότητα (S σε ppt), την θερμοκρασία (T σε βαθμούς Κελσίου), την ταχύτητα διάδοσης του ακουστικού κύματος (c σε m / s), το ρH και το βάθος του υδάτινου μέσου (z σε m). Συνήθως, για ρηχά νερά, η διάδοση θεωρείται κυλινδρική, ενώ για βαθιά νερά θεωρείται σφαιρική σε θέσεις σχετικά κοντά στον πομπό [3].

Ένα αριθμητικό παράδειγμα εξάρτησης των απωλειών διαδρομής εξαιτίας παραγόντων όπως η συχνότητα και η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, απεικονίζεται στα Σχήματα 4.2 (α) και 4.2 (β) για ρηχά και βαθιά νερά, αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής, ο συντελεστής NF θεωρήθηκε ίσος με μηδέν, επίσης $k = 1$ για ρηχά νερά και $k = 2$ για βαθιά νερά. Για σταθερή απόσταση, υπάρχει μια ελάχιστη τιμή απώλειας που σχετίζεται με τις απώλειες λόγω διάδοσης και ο συντελεστής εξασθένησης ($l a(f, S, T, c, \rho H, z)$) κυριαρχεί στις υψηλότερες συχνότητες. Από τα παρακάτω σχήματα λοιπόν, παρατηρούμε ότι, για χαμηλές συχνότητες, οι απώλειες διαδρομής είναι περίπου οι ίδιες για διαφορετικές αποστάσεις ενώ οι απώλειες διαδρομής αυξάνονται σημαντικά όταν η συχνότητα και η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη αυξάνονται [3].



(α) Για ρηχά νερά (βάθος 60μ)

(β) Για βαθιά νερά (βάθος 10χμ)

Σχήμα 4.2: Ιδιότητες καναλιού για ακουστικές επικοινωνίες [3]

Ένα πιθανό μοντέλο πολλαπλών διαδρομών για το ακουστικό περιβάλλον έχει τους συντελεστές καναλιού αντιστρόφως ανάλογους με τις απώλειες διαδρομής καθώς και με τις άλλες πρόσθετες απώλειες μετάδοσης, όπως οι αντανάκλασεις και η διάχυση [3].

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΣΤΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι περισσότερες ακουστικές επικοινωνίες απαιτούν περιορισμό του φαινομένου Doppler, χρησιμοποιώντας ταχείας εκμάθησης και προσαρμοστικής παρακολούθησης αλγορίθμους όπως τα φίλτρα Kalman. Τα χαρακτηριστικά διασποράς του μοντέλου του ακουστικού καναλιού είναι ένα άλλο σημαντικό ζήτημα για την εγγύηση της επιτυχούς εξισορρόπησης (equalization) και του συγχρονισμού. Η χρήση πομποδεκτών πολλαπλού φέροντος (multicarrier transceivers) είναι επίσης μια λύση για την αξιολόγηση/ανάλυση ενός καναλιού, αλλά η επίδραση του φαινομένου Doppler στις ακουστικές επικοινωνίες επηρεάζει την υπο-καναλική ορθογωνιότητα των υπο-φερόντων (subchannel orthogonality of the subcarriers). Η καθυστέρηση διάδοσης του ακουστικού σήματος θέτει επιπλέον περιορισμούς στην επεξεργασία του σήματος που συντελείται σε αυτά τα συστήματα καθιστώντας την ορθή ανάπτυξη/παράταξη των δικτύων αισθητήρων αναμετάδοσης ως πρόκληση [3].

Η σχετική ταχύτητα μεταξύ πομπού και δέκτη και το υποβρύχιο δυναμικό περιβάλλον είναι οι αιτίες που προκαλούν την εμφάνιση του φαινομένου Doppler. Παρότι εμφανίζεται επίσης στην επικοινωνία ραδιοσυχνοτήτων, το φαινόμενο Doppler είναι ιδιαίτερα αισθητό όταν στην επικοινωνία χρησιμοποιούνται κύματα πίεσης, λόγω της σχετικά χαμηλής ταχύτητας διάδοσης του κύματος. Το αποτέλεσμα είναι ακόμη περισσότερο αισθητό στην υποβρύχια ακουστική επικοινωνία, από τη στιγμή που σημαντήρες και σκάφη διαθέτουν πομπό και δέκτη που ευρίσκονται σε διαρκή λειτουργία. Επομένως, η παραμόρφωση λόγω Doppler δεν μπορεί να αγνοηθεί και η άμβλυνση του αποτελέσματός της είναι πρωταρχικής σημασίας για την εξασφάλιση ενός αποδοτικού συστήματος επικοινωνίας [3].

Το φαινόμενο Doppler προκαλεί χρονική στρέβλωση στο εκπεμπόμενο σήμα. Εκτός από την επέκταση ή τη συστολή της χρονικής διάρκειας του σήματος, η χρονική αυτή στρέβλωση παραμορφώνει επίσης τη φάση του σήματος. Η χρονική στρέβλωση μπορεί να θεωρηθεί ως η τροποποίηση της μεταβλητής του χρόνου από t σε $t' = [t + \rho(t)]$, όπου $\rho(t)$ ισούται με $(u_R \cos \varphi + u_T \cos \theta)/c$, όπου u_R και u_T είναι οι ταχύτητες του δέκτη και του πομπού αντίστοιχα, ενώ οι γωνίες φ και θ φαίνονται στο Σχήμα 4.3. Δε θα πρέπει να ξεχνάμε ότι οι ταχύτητες και οι γωνίες αναμένεται να τροποποιούνται προϊόντος του χρόνου, και επομένως ο συντελεστής Doppler $\rho(t)$ διατηρεί την εξάρτησή του από το χρόνο ενώ μόλις αυτός υπολογισθεί, το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί όταν εκτελεσθεί σωστή ρύθμιση της συχνότητας δειγματοληψίας, ακολουθούμενη από διόρθωση της φάσης του σήματος [3]. Πάρα τούτα δύναται να παραμείνει μια παραμόρφωση, η οποία όμως συνήθως αντιμετωπίζεται κατά τη διαδικασία αξιολόγησης/ανάλυσης του καναλιού. Επομένως, οποιοδήποτε σχέδιο εκτίμησης Doppler ενός καναλιού επιβάλλεται να είναι αξιόπιστο. Προκειμένου λοιπόν να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, νέες προσεγγίσεις για την εκτίμηση και την αντιστάθμιση του φαινομένου Doppler μελετώνται στα [36] - [49]. Ωστόσο, δεν υφίσταται κάποια γενική παραδοχή σχετικά με τον βέλτιστο τρόπο αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος [3].



Σχήμα 4.3 : Προκύπτουσα γεωμετρία κατά την ταυτόχρονη κίνηση πομπού και δέκτη εντός του μέσου διάδοσης [3]

Ένα άλλο θέμα που αφορά τις υποβρύχιες ακουστικές επικοινωνίες αφορά την απόκριση του καναλιού (impulse response). Λόγω λοιπόν του ότι η ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων είναι χαμηλότερη από την

αντίστοιχη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον αέρα, ο χρόνος συμφωνίας του ακουστικού καναλιού είναι μικρότερος από εκείνον σε ένα RF κανάλι. Πράγματι, ένα κανάλι που διαθέτει μια υψηλότερη διάδοση καθυστέρησης μπορεί να απαιτεί έναν δέκτη με υψηλότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα, λόγω του αυξημένου αριθμού των μεταβλητών. Μια πιθανή αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η αξιοποίηση της γνώσης ότι ένα ακουστικό κανάλι είναι εγγενώς αραιό. Σχετικές αναφορές που αναφέρουν αυτήν την ιδιότητα σε συνδυασμό με την μελέτη και εκτίμηση της απόκρισης ενός καναλιού, ευρίσκονται στα [39], [50] -[55].

Η εξισορρόπηση ενός καναλιού είναι ένα άλλο μεγάλο ζήτημα στην υποβρύχια ακουστική επικοινωνία αφού οι ιδιότητές του που αναφέρονται παραπάνω μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές διασυμβολικές παρεμβολές (ISI) και παρεμβολές μεταξύ των φορέων (intercarrier interference - ICI) στο λαμβανόμενο σήμα. Ο εξισορροπητής λοιπόν πρέπει να είναι ικανός να αφαιρεί και να αντισταθμίζει αυτές τις παραμορφώσεις. Ορισμένες τεχνικές, όπως οι εξισορροπητές ανάδρασης που βασίζονται στο ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (minimum mean-squared error-based decision-feedback equalizers - MMSE-based DFEs) [56] και ο καθρέφτης αντιστροφής χρόνου (time reversal mirror - TRM) [57], [58], [59], αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Παρ' όλα αυτά, η εξισορρόπηση και η αποκωδικοποίηση του καναλιού θα μπορούσαν να εφαρμοστούν με έναν επαναληπτικό τρόπο, ανταλλάσσοντας πληροφορίες που βοηθούν στην επίτευξη καλύτερης απόδοσης. Οι εξισορροπητές Turbo αποτελούν περιπτώσεις αυτών των συστημάτων που εφαρμόζουν μια τέτοια επαναληπτική διαδικασία και έχουν διερευνηθεί εκτενώς ως [60], [61] - [64].

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΙ ΜΟΡΦΟΤΡΟΠΕΙΣ (ACOUSTIC TRANSDUCERS)

Οι ακουστικοί μορφοτροπείς μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα σε ήχο (πομπός) ή τον ήχο σε ηλεκτρικά σήματα (δέκτης). Οι πομποί ονομάζονται πηγές ή προβολείς ενώ οι δέκτες καλούνται υδρόφωνα. Ωστόσο, συνήθως ένας μόνο μορφοτροπέας δρα ως πομπός και δέκτης ταυτόχρονα και αυτές οι συσκευές είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε υποβρύχιο περιβάλλον ενώ μπορούν να συνδεθούν με πλωτά αντικείμενα όπως ένα σκάφος ή ένα σημαντήρα ή ακόμη μπορούν να αγκυροβοληθούν [3].

Γενικά οι πηγές ή οι προβολείς λειτουργούν σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων, οι οποίες είναι γενικά στενότερες από τις αντίστοιχες των υδροφώνων. Οι προβολείς μπορεί να είναι πανκατευθυντικοί ή ημισφαιρικοί, ενώ τα υδρόφωνα μπορούν να είναι πανκατευθυντικά ή κατευθυντικά. Πολλά πανκατευθυντικά υδρόφωνα μπορούν να συνθέσουν μια διάταξη τέτοια ώστε όταν τα ληφθέντα σήματα συνδυάζονται σωστά, να καθίσταται δυνατή η επιλογή μιας συγκεκριμένης διεύθυνσης λήψης ή περισσοτέρων συμβάλλοντας στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος [3].

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι μορφοτροπέων είναι οι πιεζοηλεκτρικοί (piezoelectric) και οι μαγνητοσυστολικοί (magnetostrictive) ενώ λιγότερο οι παραμετρικοί ή οι πεπερασμένου πλάτους (parametric or finite-amplitude sources and receivers) [3].

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Το UWC είναι μια πρόσφατη μεθοδολογία επικοινωνιών τις τελευταίες δεκαετίες η οποία ακόμα ευρίσκεται σε στάδιο έρευνας. Η υποβρύχια ακουστική επικοινωνία (Underwater acoustic communication - UAC) είναι η μοναδική και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη ασύρματου φορέα επικοινωνία με χαρακτηριστικό πλεονέκτημα τη χαμηλή εξασθένηση του ήχου εντός του υγρού μέσου διάδοσης. Τα τελευταία χρόνια, παρουσιάζεται μεγάλο ενδιαφέρον για έρευνα και ανάπτυξη εφαρμογών των UAC σε πολλούς τομείς όπως στην βιομηχανία και στο στρατό. Οι προκλήσεις της υποβρύχιας επικοινωνίας μπορούν να συσχετισθούν με την ανάπτυξη των UWSNs καθώς η χρήση των τεχνικών πολυπλεξίας με ορθογωνική διαίρεση συχνοτήτων (OFDM) και η γενικευμένη πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (GFDM) αποτελούν ένα επαναστατικό βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση [1].

ΕΝΟΤΗΤΑ 5.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ Η/Μ, ΟΠΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Προτού καταλήξουμε ποια τεχνολογία είναι η καλύτερη για την μεταφορά των πληροφοριών, πρέπει να γνωρίζουμε σε ποιο περιβάλλον και σε τι συνθήκες πρέπει να λειτουργεί το σύστημα, καθώς και ποιες είναι οι απαιτήσεις από πλευράς επικοινωνιών. Ο Πίνακας 5.1 συνοψίζει τα κύρια χαρακτηριστικά και μειονεκτήματα που ενυπάρχουν σε κάθε τεχνολογία και δύναται να συνδράμει προς μια κατάλληλη επιλογή μεταξύ αυτών. Σε αυτόν λοιπόν τον πίνακα εκθέτονται οι ιδιότητες του νερού που επηρεάζουν περισσότερο την κάθε τεχνική μετάδοσης και συγκεκριμένα διαπιστώνεται ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ραδιοσυχνοτήτων (Radio frequency - RF) επηρεάζονται κυρίως από την αλατότητα, τα οπτικά κύματα από τη θολότητα και η ακουστική επικοινωνία από το βάθος του νερού. Στη βιβλιογραφία [65] - [72] υφίστανται πληροφορίες σχετικά με τους εφικτούς ρυθμούς δεδομένων για διαφορετικές τεχνολογίες και παραμέτρους [3].

Θεωρητικά λοιπόν, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ραδιοσυχνοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο νερό, αλλά για μικρές αποστάσεις λόγω υψηλής εξασθένησης ενώ τα οπτικά σήματα αποτελούν μια λύση για την επίτευξη υψηλού ρυθμού δεδομένων σε μεσαίες αποστάσεις λαμβάνοντας βέβαια υπόψη ότι το λέιζερ μπλε-πράσινου φάσματος πάσχει από την σκέδαση και απαιτεί κατάλληλη θέση που να εξασφαλίζει ακρίβεια κατάδειξης. Έτσι λοιπόν συγκρίνοντας τις ανωτέρω τεχνικές επικοινωνίας, τα ακουστικά κύματα εμφανίζονται ως η προτιμώμενη λύση. Ωστόσο, ακόμη και η τεχνική αυτή απέχει πολύ από το ιδανικό, ειδικά σε πολύ ρηχά νερά. Επιπλέον λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης προκαλείται σοβαρή διασπορά του σήματος τόσο χρονικά όσο και στη συχνότητα και επομένως τα ακουστικά κύματα μπορούν να επηρεαστούν από τον θόρυβο, τις ανακλάσεις, τις διαθλάσεις και από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του καναλιού ενώ η ταχύτητα της ακουστικής διάδοσης στο νερό είναι πολύ πιο αργή σε σύγκριση με αυτή των ηλεκτρομαγνητικών και των οπτικών κυμάτων [1].

	ΤΕΧΝΙΚΗ / ΕΙΔΟΣ ΚΥΜΑΤΩΝ		
ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	RF	Οπτικά	Ακουστικά
Καταλυτική ιδιότητα νερού	Αλατότητα	Θολότητα	Βάθος
Είδη νερού	Γλυκό νερό vs θαλασσινό νερό	Κατά Jerlon: Καθαρό – Μέσο – Θολό Άλλη κατηγοριοποίηση: Καθαρό θαλασσινό – Καθαρό ωκεάνιο – Παράκτιο ωκεάνιο – Θολό λιμανίσιο – Εκβολών ποταμού	Ρηχά νερά vs Βαθιά νερά
Μειονεκτήματα / επιπλέον απαιτήσεις	Υψηλή απομείωση σε μικρές αποστάσεις	(1) Link LOS (2) Παρακολούθηση κατεύθυνσης δέκτη (3) Έκθεση στο θαλάσσιο δυναμικό περιβάλλον	(1) Υπολογισμός και αντιστάθμιση φαινομένου Doppler (2) Καθυστέρηση στην επικοινωνία (3) Εμφάνιση σκιερών ζωνών
Κύρια χαρακτηριστικά	Δύναται να διαπεράσει το όριο μεταξύ θαλάσσης / αέρα	Δύναται να επιτύχει υψηλές τιμές ρυθμών δεδομένων	Διαδίδεται σε μεγάλες αποστάσεις
Αξιόπιστη επικοινωνία	Μερικά μέτρα	Δεκάδες μέτρα	Χιλιόμετρα
Ρυθμοί δεδομένων που δύναται επιτευχθούν	1 έως 10 Mbps (1 με 2 μέτρα) 50 έως 100 bps (200 μέτρα)	1 Gbps (2m) 1 Mbps (25m)	1.5 με 50 Kbps (0.5 km) 0.6 με 3 Kbps (28 με 120 km)
Εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης	Συχνότητα – Αγωγιμότητα νερού	Συχνότητα – θολότητα νερού	Θερμοκρασία – αλατότητα – βάθος νερού

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες H/M, οπτικών και ακουστικών κυμάτων [3]

Σε κάθε περίπτωση, για την επίτευξη ισχυρής και αξιόπιστης υποβρύχιας επικοινωνίας, αποτελεί πρόκληση η εφαρμογή ευέλικτων επικοινωνιακών συστημάτων συμπεριλαμβανομένων όλων των προαναφερόμενων τεχνολογιών επικοινωνίας. Αυτό το ευέλικτο σύστημα θα μπορούσε να διαθέτει την ευφυία να επιτύχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης συνυπολογίζοντας, για παράδειγμα, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την απόσταση και τη σχετική κίνηση μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτό λοιπόν το ετερογενές σύστημα θα μπορούσε να μεταβάλλει κάθε φορά την τεχνολογία μετάδοσης / λήψης σύμφωνα με μια προκαθορισμένη συνάρτηση κόστους (cost function) ήτοι ο δέκτης θα εξέπεμπε περιστασιακά ένα σήμα επιβεβαίωσης λήψης προς τον πομπό ώστε να προβαίνει κάθε φορά σε αντίστοιχες κατάλληλες ενέργειες προσαρμογής του συστήματος [3].

Επιπλέον, δεδομένου ότι όλα τα υποβρύχια συστήματα επικοινωνίας έχουν εγγενείς περιορισμούς όσον αφορά τις συνδέσεις σε μεγάλες αποστάσεις, η χρήση των δικτύων συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων, των αναμεταδοτών και της εφαρμογής έξυπνων πρωτοκόλλων, φαίνεται να αποτελεί μια φυσιολογική λύση. Οι κόμβοι του δικτύου δύναται να είναι σταθεροί ή κινητοί ενώ θα πρέπει ιδανικά να μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν πληροφορίες μέσω και των τριών τεχνολογιών. Τέλος οι μετακινούμενοι κόμβοι (Remotely operated vehicle - ROV ή Autonomous underwater vehicle - AUVs) θα πρέπει να είναι αρκετά “ευφυείς” ώστε να μετακινούνται σε κατάλληλη θέση προκειμένου να βελτιστοποιείται κάθε φορά το αποτέλεσμα της επικοινωνίας σύμφωνα με τη συνάρτηση κόστους (cost function)[3].

ΕΝΟΤΗΤΑ 6.

ΔΙΚΤΥΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων (Underwater sensor networks - UWSNs) είναι μια διάταξη από αισθητήρες που έχει ως σκοπό την καταγραφή δεδομένων και την εξερεύνηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος [70]. Τα εν λόγω δίκτυα βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως στην σεισμολογία, στην ωκεανογραφία, στην παρακολούθηση και επιτήρηση της θαλάσσιας ζωής, στην πρόληψη και έλεγχο των φυσικών καταστροφών, στον έλεγχο των εγκαταστάσεων πετρελαίου και φυσικού αερίου και στις στρατιωτικές τακτικές επιχειρήσεις [12]. Όλα τα παραπάνω βασίζονται στη συλλογή δεδομένων, στην ανταλλαγή εντολών ελέγχου μεταξύ τμημάτων του συνολικού εξοπλισμού και γενικότερα στη μεταφορά πληροφοριών. Το είδος του δικτύου που απαιτείται προς υποστήριξη των εφαρμογών αυτών δύναται να διαφέρει κάθε φορά αφού εξαρτάται από την τεχνολογία μετάδοσης-επικοινωνίας που χρησιμοποιείται από τους κόμβους του δικτύου αυτού όπως επίσης και από το πλήθος των λειτουργιών τους όπως δυνατότητες μέτρησης, αποθήκευσης και μετάδοσης δεδομένων [1].

Οι αισθητήρες των UWSNs δύναται να ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορίες ενσύρματα ή ασύρματα όπως φαίνεται από τα Σχ. 2 και 3 της ενότητας 1. Για παράδειγμα, τα υποβρύχια δίκτυα (Underwater networks - UWNs) που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές εκμετάλλευσης πετρελαίου και φυσικού αερίου, χρησιμοποιούν ένα σύνολο σταθερών κόμβων δικτύου στο βυθό των ωκεανών οι οποίοι ανταλλάσσουν πληροφορίες με άλλους κόμβους που βρίσκονται στην επιφάνεια του ωκεανού ή ακόμη και στην ξηρά. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει οι κόμβοι που τοποθετούνται στον πυθμένα του ωκεανού να μεταφέρουν τις πληροφορίες προς ένα υποβρύχιο κόμβο πύλης μέσω διαδικασίας multi-hop, ο οποίος στη συνέχεια θα είναι ικανός να εκτελεί όλες τις απαραίτητες μετατροπές σε πρωτόκολλα άλλων τύπων δικτύων [1].

Τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων προκειμένου να αποστείλουν και να λάβουν σήματα μέσω μιας πλατφόρμας/συσκευής που επιπλέει στην

επιφάνεια της θάλασσας σε άγνωστη θέση, απαιτείται μια συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης επικοινωνίας η οποία ενδεχομένως να καλύπτει πολλά τετραγωνικά χιλιόμετρα επιφάνειας. Επιπλέον, η αξιοποίηση των εξ αποστάσεως χειριζόμενων οχημάτων (Remotely operated vehicle - ROVs) και των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων (Autonomous underwater vehicle - AUVs) για την λήψη της πληροφορίας από μια συσκευή παρακολούθησης π.χ. πετρελαιοπηγών, αποτελεί μια ικανοποιητική λύση για κοντινές αποστάσεις δίχως την απαίτηση μεγάλης ισχύος [1]. Επιπρόσθετα, τα οχήματα αυτά δημιουργούν νέες προκλήσεις για τα UWNs, δεδομένου ότι μπορούν να λειτουργήσουν ως ενδιάμεσοι κόμβοι παίζοντας σημαντικό ρόλο στη μετάδοση σημάτων μεγάλου εύρους ζώνης με υψηλό ρυθμό δεδομένων σε μορφή βίντεο και ήχου. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η ανάπτυξη των UWNs είναι μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία καθόσον υφίσταται μεγάλο εύρος διαφορετικών περιορισμών. Πάρα τούτα, η συνύπαρξη ασύρματων και ενσύρματων UWN φαίνεται να αποτελεί μια εφικτή λύση για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του συστήματος [1].

ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Οι υποβρύχιοι αισθητήριοι κόμβοι πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν μια σημαντική ποσότητα δεδομένων που συλλέγονται από έτερους αισθητήρες που βρίσκονται σε άλλη τοποθεσία. Πράγματι, υπάρχουν πολλές εφαρμογές στις οποίες οι εγκατεστημένοι κόμβοι που δραστηριοποιούνται στο υποβρύχιο περιβάλλον, λαμβάνουν συνεχώς μεγάλο όγκο δεδομένων από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων που παρακολουθούν φυσικές μεταβλητές, όπως την πίεση, τη θερμοκρασία και τη ροή. Συνεπώς, όπως είναι αναμενόμενο, αυτά τα πακέτα πληροφοριών απαιτούν προσωρινή αποθήκευση (buffering) πριν τη διαβίβασή τους μέσω των κόμβων των UWN [1].

Λόγω του προαναφερθέντος τεράστιου όγκου δεδομένων, μια άλλη γενική απαίτηση που σχετίζεται με τα UWNs αποτελεί η χρήση κατάλληλων πρωτοκόλλων που θα εξασφαλίζουν την αποτελεσματικότητα των μεταδόσεων-εκπομπών ήτοι να μην σπαταλάται εύρος ζώνης για περιττές πληροφορίες. Επιπλέον, η συμπίεση των δεδομένων πρέπει να εκτελείται όποτε αυτή είναι δυνατή, και το φυσικό επίπεδο (physical layer) των UWNs πρέπει να λειτουργεί με βάση τη συγκεκριμένη χωρητικότητα του καναλιού [3].

Συνήθως, η ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση ενός σήματος στο υποβρύχιο περιβάλλον και ειδικά στον τομέα όπου τα μηχανικά κύματα χρησιμοποιούνται στην ακουστική τεχνολογία, είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που απαιτείται για ακρόαση, λήψη και επεξεργασία των δεδομένων [1]. Η αρχιτεκτονική των UWN καθώς και τα πρωτόκολλα δικτύου πρέπει να αναπτύσσονται και να εξελίσσονται λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό ότι οι μπαταρίες δεν μπορούν εύκολα να επαναφορτιστούν ή να αντικατασταθούν σε ορισμένους κόμβους των UWN. Έτσι λοιπόν, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας με σκοπό την αποφυγή συχνών επαναφορτίσεων των κόμβων είναι ιδιαίτερα επιθυμητή αφού η ενεργειακή απόδοση είναι ένα βασικό ζήτημα των UWN. Μια εναλλακτική μέθοδος διατήρησης ενέργειας των UWSNs ερευνάται στο [14].

Μια άλλη απαίτηση των UWN είναι ότι οι κόμβοι πρέπει να είναι ανθεκτικοί ώστε να είναι ικανοί να αντέχουν σε ενδεχόμενες προσκρούσεις που δύναται να συμβούν κατά τη διάρκεια της εγκατάστασής τους ή και μετά από αυτή, καθώς επίσης να είναι αξιόπιστοι ώστε να μπορούν να λειτουργούν σε αφιλόξενο περιβάλλον. Επιπρόσθετα, η αξιοποίηση των ευέλικτων κόμβων (flexible nodes) είναι επίσης σημαντική διότι με αυτόν τον τρόπο μπορούν να ικανοποιηθούν διαφορετικές ανάγκες, διασυνδέσεις και διατάξεις [3].

Επίσης, τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα των UWNs πρέπει να εγγυώνται την αξιοπιστία της συνολικής μετάδοσης-εκπομπής. Πρέπει να έχουμε υπόψη ότι το υποβρύχιο περιβάλλον είναι ένα δύσκολο κανάλι-μέσο επικοινωνίας και η διασφάλιση της αξιοπιστίας της μετάδοσης όπως και της διαδικασίας λήψης δεν είναι εύκολη υπόθεση, ειδικά όταν απαιτούνται ταυτόχρονα ενεργειακή απόδοση και οι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων [3].

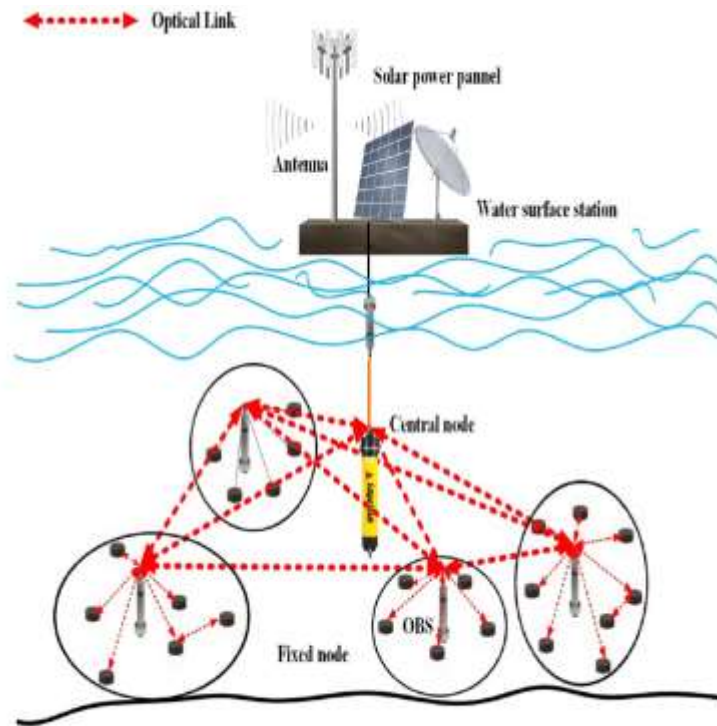
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών σημάτων κάτω από το νερό είναι συνήθως πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τα σήματα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (RF) που διαδίδονται μέσω του αέρα. Συνεπώς, αυτό σημαίνει μεγάλη καθυστέρηση στις ανταλλαγές πακέτων δεδομένων μεταξύ των κόμβων UWN ενώ με δεδομένο ότι οι ακουστικοί σύνδεσμοι υπόκεινται σε διακοπές συνδέσεως, τα πρωτόκολλα UWN θα πρέπει να εξασφαλίζουν ανοχή στις καθυστερήσεις [3].

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Η αρχιτεκτονική των δικτύων υποβρύχιων αισθητήρων παρουσιάζεται στα Σχ. 6.1 και 6.2, όπου χρησιμοποιούνται όλα τα πιθανά μέσα επικοινωνίας έχοντας το καθένα συγκεκριμένο ρόλο στην διάταξη αυτή. Γενικότερα τα UWSNs είναι ένα ανοιχτό ακόμη ερευνητικό ζήτημα όπου απαιτείται περαιτέρω αναλυτική έρευνα [1]. Ακολουθώς οι δύο τύποι αρχιτεκτονικής UWSN που παρουσιάζονται παρακάτω αναλύονται και στο [4].

ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

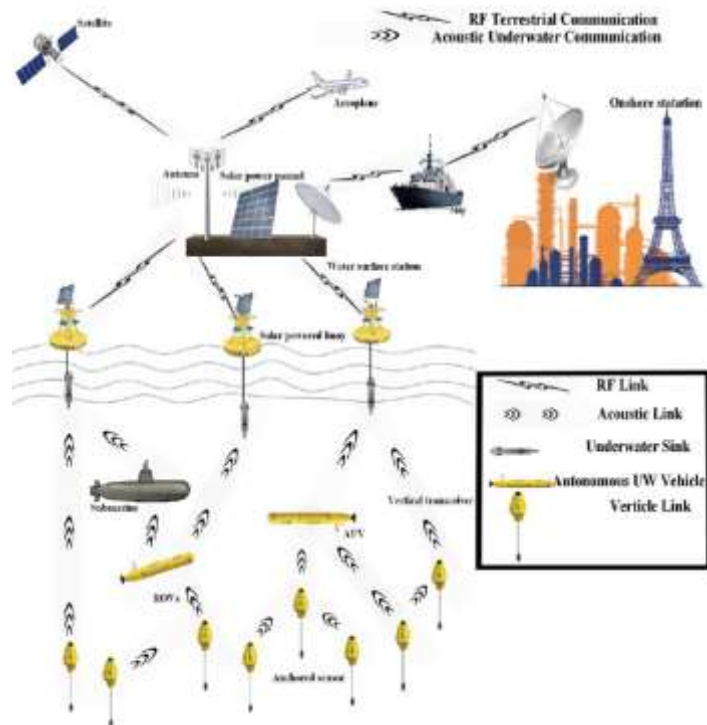
Το δισδιάστατο δίκτυο υποβρύχιων αισθητήρων (2D Underwater sensor network - 2D UWSN) αποτελείται από μια ομάδα σταθερών αισθητήριων κόμβων (clusters) που βρίσκονται στον βυθό του ωκεανού οι οποίοι αλληλεπιδρούν με τον αντίστοιχο τοπικό κεντρικό (head cluster) (Σχήμα 6.1). Τα ανωτέρω μέσα επικοινωνίας του δικτύου είναι απαραίτητα για την αναμετάδοση των δεδομένων που συλλέγονται από τους σταθερούς κόμβους με σκοπό τη διαβίβασή τους προς τον πλωτό σημαντήρα (υποσταθμό) που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Κάθε τοπικός κεντρικός κόμβος (head cluster) αποτελείται από δύο πομποδέκτες έναν οριζόντιο και έναν κατακόρυφο. Ο οριζόντιος πομποδέκτης χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τους σταθερούς αισθητήριους κόμβους (clusters) και αφορά την μετάδοση πληροφοριών όπως την αποστολή εντολών, την διαμόρφωση και συλλογή των δεδομένων, ενώ ο κάθετος πομποδέκτης χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τον πλωτό σημαντήρα (υποσταθμό επιφανείας). Επιπλέον ο κάθετος πομποδέκτης πρέπει να έχει δυνατότητα κάλυψης επικοινωνίας σε αποστάσεις έως και 10 χλμ. ενώ ο πλωτός υποσταθμός θα πρέπει να φέρει ακουστικό πομποδέκτη (Central node) που θα μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές παράλληλες επικοινωνίες με τους τοπικούς κεντρικούς κόμβους (head clusters) [4].



Σχήμα 6.1: 2D αρχιτεκτονική υποβρύχιου δικτύου αισθητήρων [1]

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Το τρισδιάστατο δίκτυο υποβρύχιων αισθητήρων (3D Underwater sensor network - 3D UWSN) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση των υποθαλάσσιων φυσικών φαινομένων και βιοχημικών δραστηριοτήτων, όπου οι κόμβοι (clusters) είναι ικανοί να ανιχνεύουν πληροφορίες σε 3D περιβάλλον επικοινωνίας όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2. Στο 3D δίκτυο υποβρύχιων αισθητήρων, οι κόμβοι δεν είναι πλέον σταθεροί αλλά επιπλέουν σε διαφορετικά βάθη εκπέμποντας και λαμβάνοντας σήματα. Σε περίπτωση που χρησιμοποιούσαμε ρυθμιζόμενη ενσύρματη ζεύξη (καλώδιο) μεταξύ πλωτού σημαντήρα και αισθητήριου κόμβου τότε θα ήταν δυνατή η χρήση υψηλού εύρους ζώνης επιτρέποντας παράλληλα την εύκολη και γρήγορη ανάπτυξη ενός δικτύου αισθητήρων πλην όμως οι πολλαπλοί πλωτήρες στην επιφάνεια της θάλασσας θα δυσκόλευαν την τοπική ναυσιπλοΐα όπως επίσης θα ήταν εύκολα ανιχνεύσιμοι από τον εχθρό κατά τη διάρκεια στρατιωτικών επιχειρήσεων με αποτέλεσμα να θέτονται εκτός λειτουργίας [4]. Γι' αυτό το λόγο μια λύση θα μπορούσε να είναι η εγκατάσταση ενός φουσκωτού σημαντήρα σε κάθε αγκυροβολημένο αισθητήρα όπου η άνωση θα έτεινε να τον κινήσει προς την επιφάνεια της θάλασσας ενώ το μήκος της καδένας θα μπορεί να ρυθμίζεται με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο αλυσέλικτρο [1].



Σχήμα 6.2: 3D αρχιτεκτονική υποβρύχιου δικτύου αισθητήρων [1]

ΕΝΟΤΗΤΑ 7.

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ (IoUT)

Το Internet of Underwater Things (IoUT) αποτελεί μια τεχνολογική επανάσταση των υπολογιστών και των επικοινωνιών και ορίζεται ως το παγκόσμιο δίκτυο των υποθαλάσσιων ψηφιακών αντικειμένων που είναι κατάλληλα διασυνδεδεμένα μεταξύ τους [5]. Η χρήση κατάλληλων τεχνολογιών και αισθητήρων σε συνδιασμό με το Internet δημιουργούν τις προϋποθέσεις εκείνες ώστε οι ανωτέρω συσκευές/αντικείμενα να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον ενώ παράλληλα είναι δυνατό να διασυνδέονται και με επίγειες συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα (smartphones).

Έτσι λοιπόν, κάθε υποβρύχιο υλικό αντικείμενο συνοδεύεται παράλληλα από ένα εικονικό αντικείμενο το οποίο δύναται να είναι παγκόσμια προσβάσιμο παρέχοντας ένα αρχείο πληροφοριών που αφορούν τις υλικές ιδιότητές του, την προέλευσή του καθώς και το αισθητήριο περιβάλλον του (sensory context). Αυτό το σύνολο πληροφοριών είναι ευρύ και διαθέσιμο σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τρόπους επικοινωνίας όπως μεταξύ ατόμου προς αντικείμενο (Human to Thing - H2T) και αντικείμενο προς αντικείμενο Thing to Thing - T2T) και βελτιστοποιεί σημαντικά τον τρόπο διαχείρισης του υποβρύχιου περιβάλλοντος και πόρων [5].

Παρακάτω λοιπόν θα δούμε πως μπορούμε να ωφεληθούμε από το Internet of Underwater Things (IoUT) καθώς μας δίνει τη δυνατότητα της παρακολούθησης μεγάλων ανεξερεύνητων θαλάσσιων περιοχών στο πλαίσιο αξιοποίησης και διατήρησης των φυσικών υδάτινων πόρων ενώ παράλληλα μας επιτρέπει την ανάπτυξη επιστημονικών, βιομηχανικών και στρατιωτικών εφαρμογών όπως εκθέτονται ακολούθως στην παρούσα ενότητα.

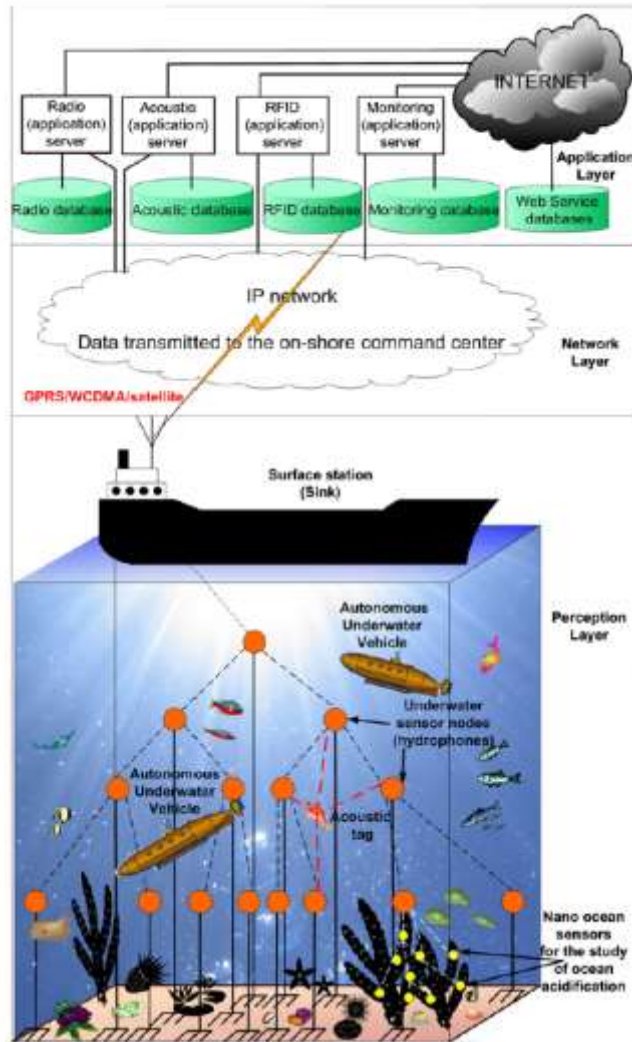
ΥΠΟΕΝΟΤΗΤΑ 7.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ IoUT – ΕΠΙΠΕΔΑ ΛΗΨΗΣ / ΔΙΚΤΥΟΥ / ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική IoUT παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1 χωριζόμενη σε τρία επίπεδα, των οποίων οι βασικές λειτουργίες συνοψίζονται ως ακολούθως:

Επίπεδο λήψης (Perception layer): Σε αυτό το στάδιο αναγνωρίζονται αντικείμενα και συλλέγονται πληροφορίες ενώ διαμορφώνεται κυρίως από την παρουσία υποβρύχιων αισθητήρων, υποβρύχιων οχημάτων, σταθμών επιφανείας, σταθμών παρακολούθησης (όπως tablet PC, smartphones κλπ.), συσκευών ανάγνωσης ετικετών (tag readers), υδροφώνων, ακουστικών και RF ετικετών (tag) καθώς και ετικετών ολοκληρωμένου παθητικού αναμεταδότη (Passive Integrated Transponder – PIT tags) και αποθήκευσης δεδομένων [5].

Επίπεδο δικτύου (Network layer): Αποτελείται από ένα ενοποιημένο δίκτυο συναποτελούμενο από ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα ιδιωτικής χρήσης, Internet, δίκτυα συστημάτων διοίκησης, πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους (cloud computing platforms) κλπ. Εν ολίγοις επεξεργάζεται την πληροφορία που αποκτάται από το επίπεδο λήψης και την προωθεί στο επίπεδο εφαρμογής [5].

Επίπεδο εφαρμογής (Application layer): Είναι ένα σύνολο έξυπνων εφαρμογών που χρησιμοποιούν την τεχνολογία του IoUT και έχουν ως στόχο την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών [5].



Σχήμα 7.1: Προτεινόμενη αρχιτεκτονική IoUT [5]

Παρακάτω θα εξετάσουμε με περισσότερες λεπτομέρειες τα δομικά στοιχεία του κάθε επιπέδου.

Επίπεδο λήψης:

(1) AUVs και υποθαλάσσιοι μικρο (micro) και νάνο (nano) αισθητήρες.

Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (Autonomous underwater vehicle – AUV) είναι μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα, τα οποία λειτουργούν δίχως ανθρώπινη παρέμβαση και διαχωρίζονται σε αυτόνομα οχήματα ικανά να λειτουργούν (α) στην επιφάνεια της θάλασσας (Autonomous Surface Vehicles - ASVs), (β) AUV που λειτουργούν στο εσωτερικό στρώμα και (γ) AUV που

λειτουργούν στο κάτω στρώμα. Τα πιο σημαντικά υποσυστήματα ενός AUV είναι το είδος της χρησιμοποιούμενης πλατφόρμας, η πλοήγηση και μέθοδος ελέγχου, ο τρόπος τροφοδότησης / παροχής ενέργειας στο σύστημα, οι επικοινωνιακές δυνατότητες και τα είδη των αισθητήρων [28]. Στις θαλάσσιες περιοχές όπου τα AUVs επιχειρούν, θα πρέπει αυτά να είναι σε θέση να εκτιμούν και υπολογίζουν τη θέση τους ώστε να είναι ικανά να αποφεύγουν τις συγκρούσεις/ατυχήματα με άλλα εγγύς κινούμενα οχήματα ενώ αποτελεί πρόκληση αυτό να συμβεί μέσω της αυτόνομης πλοήγησης και τεχνητής νοημοσύνης αξιοποιώντας τους αισθητήρες σόναρ που φέρονται από τα AUVs [5].

Οι υποβρύχιοι αισθητήρες και τα AUVs στο Σχήμα 7.1 αλληλεπιδρούν και συνεργάζονται μεταξύ τους μέσω συγκεκριμένων εφαρμογών όπως η συγκέντρωση ωκεανογραφικών δεδομένων και η από κοινού παρακολούθηση και επιτήρηση των φυσικών διαδικασιών και διεργασιών του ωκεάνιου περιβάλλοντος με τη συλλογή σημάτων/δεδομένων από αυτό. Αυτή λοιπόν η συνεργασία μεταξύ τους είναι πολύ χρήσιμη ιδίως όταν υφίστανται σύνθετες απαιτήσεις όπως η επιδίωξη για σφαιρική γνώση και αντίληψη του περιβάλλοντος και των αντιδράσεων του σε αλλαγές σε βάθος χρόνου. Τα αποκτώμενα δεδομένα διαβιβάζονται στον επιπλέοντα σταθμό επιφανείας ο οποίος κατόπιν μέσω ραδιοεπικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας αποστέλλει αυτά τα δεδομένων σε έναν χερσαίο κεντρικό σταθμό παρακολούθησης όπου εκεί εκτελείται περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων. Επιπρόσθετα αναμένεται το μέγεθος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την έρευνα και παρακολούθηση των ωκεανών να ελαττωθεί στη micro και αργότερα στη nano κλίμακα αφού οι nano αισθητήρες χρησιμοποιούν τις ιδιότητες των nano υλικών και nano σωματιδίων για τον εντοπισμό και τη μέτρηση φαινομένων στη nano-κλίμακα [5] προσδίδοντας έτσι νέες δυνατότητες στον τομέα αυτό. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η καύση ορυκτών καυσίμων οδηγούν σε μια νέα αυξημένη ροή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, η οποία είναι εν μέρει απορροφάται από τους ωκεανούς με συνέπεια, η οξύτητα του θαλασσινού νερού να αυξάνεται (ήτοι το pH μειώνεται). Το φαινόμενο λοιπόν αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της ωκεάνιας χημείας με τρόπο που να απειλεί ιδιαίτερα ορισμένους θαλάσσιους οργανισμούς, καθόσον είναι πιο δύσκολο για αυτούς να σχηματίσουν τους σκελετούς ή τα κελύφη τους. Έτσι λοιπόν το φαινόμενο αυτό δύναται να παρακολουθηθεί αφού οι νανο-αισθητήρες είναι σε θέση να εντοπίζουν την ποσότητα του διαλυμένου CO₂ στη θάλασσα [5].

(2) Ακουστικές συσκευές εκπομπής τύπου ετικέτας (Acoustic tags)

Ένα ακουστικό tag μπορεί να εισαχθεί γαστρεντερικά ή να εμφυτευθεί χειρουργικά σε υδρόβιο οργανισμό που μας ενδιαφέρει, εκπέμποντας περιοδικά ένα σήμα ελέγχου διαθεσιμότητας (ring) με συγκεκριμένο ρυθμό προς μια διάταξη υδροφώνων (ακουστικός αισθητήρας ή AUVs), και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το δίκτυο αισθητήρων, προωθείται προς την πλατφόρμα επιφανείας. Κάθε ένας λοιπόν από αυτούς τους υδρόβιους οργανισμούς κωδικοποιείται με μια μοναδική ψηφιακή ταυτότητα χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη διαμόρφωση σήματος (π.χ. DPSK). Το κάθε εκπεμπόμενο ring ανιχνεύεται από το εκάστοτε υδρόφωνο σε ελάχιστα διαφορετικό χρόνο εξαρτώμενο πάντα από την απόσταση του παρακολουθούμενου οργανισμού από το κάθε υδρόφωνο. Αυτές οι χρονικές διαφορές χρησιμοποιούνται για τον τρισδιάστατο (3D) προσδιορισμό της θέσης του οργανισμού (τεχνική Time Difference of Arrival (TDOA)) όπως για παράδειγμα των σολομών. Ο σολομός ζει το μεγαλύτερο μέρος της ζωής του στον ωκεανό, αλλά μεταναστεύει σε ποτάμια για την αναπαραγωγή του. Όταν φτάσει στον τόπο ωοτοκίας κολυμπώντας στο ποτάμι, ζευγαρώνει, γεννάει τα αυγά του και πεθαίνει αμέσως μετά. Μετά την εκκόλαψη των αυγών, οι νεαροί σολομοί κολυμπώντας στο ποτάμι κατευθύνονται στον ωκεανό όπου και πλέον ζουν. Σύμφωνα με το [75], οι ακουστικές ετικέτες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της μετανάστευσης των νεαρών σολομών μέσω του Ποταμού Κολούμπια σε 3D απεικόνιση καθώς πλησιάζουν και περνούν από σημεία στενέματος, υπερχείλισης και παράκαμψης του καναλιού του ποταμού εκτιμώντας με αυτόν τον τρόπο τα ποσοστά επιβίωσης αφού γίνεται χρήση καινοτόμων μεθόδων που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια όπως οι αλγόριθμοι πυκνότητας πληθυσμών των ψαριών και βελτιώσεις στο τρισδιάστατο πρόγραμμα απεικόνισης.

Σύμφωνα με το [73], αναπτύχθηκε μια μέθοδος που προέβλεπε την ακρίβεια των μετρήσεων της θέσης που παρέχονται από μια ακουστική ετικέτα. Οι θεμελιώδεις παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια αυτή, είναι η θέση της ετικέτας σε σχέση με αυτή των υδροφώνων, το επίπεδο θορύβου στα υδρόφωνα σε σχέση με το επίπεδο σήματος της ετικέτας και οι ανακρίβειες στον υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου στο νερό. Σύμφωνα λοιπόν με το [73], η ακρίβεια θέσης της ακουστικής ετικέτας δύναται να υπολογισθεί χωρίς να απαιτείται η μέτρηση κάποιου πεδίου ή προσομοιώσεων Monte Carlo καθώς αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού με την επιλογή του αριθμού των υδρόφωνων που

απαιτούνται καθώς και των βέλτιστων θέσεων τους στο χώρο με στόχο την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων θέσεως. Στο [74] αναφέρεται μια ολοκληρωμένη μελέτη κατά την οποία προβλέπεται η βέλτιστη χρήση των παραμέτρων της λειτουργίας και σχεδιασμού της ακουστικής ετικέτας ενώ η εμβέλεια αποστάσεων στις οποίες μπορούν να εντοπισθούν και να ταυτοποιηθούν οι ακουστικές ετικέτες, η ακρίβεια θέσης και ο αριθμός των κωδικών ταυτοποίησης που μπορούν να ανατεθούν σε συγκεκριμένους έμβιους οργανισμούς μελετώνται υπό το πρίσμα του τύπου σήματος των ακουστικών ετικετών.

(3) Ράδιο συσκευές εκπομπής τύπου ετικέτας (Radio tags)

Οι ράδιο ετικέτες εκπέμπουν σήματα ραδιοσυχνοτήτων τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν άνωθεν της θαλάσσιας επιφάνειας (πχ από σταθμό επιφανείας). Το θαλασσινό νερό είναι ένα μέσο υψηλών απωλειών όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι περίπου δυο τάξεις υψηλότερη από εκείνη του γλυκού νερού κυρίως λόγω της υψηλής αλατότητάς του. Οι ράδιο ετικέτες (σε αντίθεση με τις ακουστικές ετικέτες) είναι λιγότερο αποτελεσματικές στο αγωγίμο νερό. Στο γλυκό νερό, παρά την περιορισμένη εμβέλεια (περίπου 10m), τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, σε αντίθεση με τα ακουστικά κύματα, είναι περισσότερο ανθεκτικά σε στροβιλισμούς που προκαλούνται από παλινδρομικά κύματα και αιωρούμενα ιζήματα ενώ δεν επηρεάζονται από τον ακουστικό θόρυβο και από τις διαβαθμίσεις της πίεσης. Επομένως, ο συνδυασμός ακουστικών και ράδιο ετικετών αποτελεί την καλύτερη επιλογή για την παρακολούθηση των έμβιων οργανισμών που μας ενδιαφέρουν οι οποίοι κινούνται μεταξύ και των δυο ειδών υδάτινων μέσων. Αυτή είναι η περίπτωση των ψαριών που μεταναστεύουν από διαφορετικό περιβάλλον (για παράδειγμα, μέσω ποταμών, εκβολών και θαλάσσιου περιβάλλοντος, ή ξεκινώντας από ποταμούς ταχείας ροής την άνοιξη που καταλήγουν σε βαθιές λίμνες και δεξαμενές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού) όπως εξηγήσαμε άλλωστε στην προηγούμενη παράγραφο αναφερόμενοι στους σολομούς. Ο συνδυασμός λοιπόν ακουστικών και ράδιο ετικετών σε μια ενιαίου τύπου, εξαλείφει την υποχρέωση χρήσης δυο ξεχωριστών ετικετών κατά τη διάρκεια των μελετών/έρευνας ενώ παράλληλα μέσω κατάλληλου προγραμματισμού θα δύναται να επιλέγεται η βέλτιστη λειτουργία εκπομπής (ηλεκτρομαγνητικά κύματα ραδιοσυχνοτήτων (RF) ή ακουστική) [5].

(4) Ολοκληρωμένος παθητικός αναμεταδότης ετικέτας (Passive Integrated Transponder - PIT tags)

Ένα σύστημα PIT-tag αποτελείται από μια κεραία και έναν αναμεταδότη ενώ περιέχει έναν μεμονωμένο αλφαριθμητικό κωδικό για την ταυτοποίηση του παρακολουθούμενου έμβιου οργανισμού. Το μικρό μέγεθος των PIT-tags δεν επηρεάζει την ανάπτυξη των οργανισμών αυτών, τη συμπεριφορά, την υγεία ή τη θηρευτική τους ικανότητα. Η μικρή εμβέλεια εντοπισμού βέβαια απαιτεί να κατευθύνονται σε συγκεκριμένη περιοχή ανίχνευσης για ανάγνωση των ετικετών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αναγνώρισης μέσω ραδιοκυμάτων (radio-frequency identification - RFID). Συγκεκριμένα, το παθητικό κύκλωμα του PIT-tag ενεργοποιείται όταν αυτό εισέρχεται μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του συστήματος ανάγνωσης. Αφού λοιπόν διεγερθεί από το χαμηλής συχνότητας ραδιοσήμα (134,2 kHz), ο αναμεταδότης του PIT-tag μεταδίδει το σήμα κώδικα στο σύστημα ανάγνωσης. Κατόπιν το σύστημα ανάγνωσης αποκωδικοποιεί τον μοναδικό αυτό αριθμό ταυτοποίησης και τον στέλνει σε έναν υπολογιστή προς περαιτέρω επεξεργασία [5].

Το γεγονός ότι τα PIT-tags είναι παθητικού τύπου συσκευές, αυτό σημαίνει ότι δύναται να παραμείνουν λειτουργικά για όλη τη ζωή του οργανισμού. Έτσι λοιπόν, στην περίπτωση του σολομού, η ετικέτα εξακολουθεί να λειτουργεί όταν αυτός επιστρέφει από τον ωκεανό, μεταναστεύοντας προς το ποτάμι για λόγους αναπαραγωγής, καταγράφοντας έτσι το σύνολο των δεδομένων. Αυτά με τη σειρά τους δύναται να συσχετιστούν με πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά το παρελθόν όταν το ψάρι ήταν ηλικιακά νεότερο και κατά συνέπεια είναι εφικτό να υπολογιστεί το ποσοστό επιστροφής τους. Σε ορισμένα ερευνητικά προγράμματα κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου, εμφυτεύονται ετικέτες μόνο σε μερικές δεκάδες ψάρια, ενώ σε άλλα μεγαλύτερα ερευνητικά προγράμματα δύναται να εμφυτεύονται ετικέτες έως και σε 20.000 ψάρια ανά ημέρα [5].

(5) Ετικέτες αποθήκευσης δεδομένων (Data storage tags)

Οι ετικέτες αποθήκευσης δεδομένων ή αρχειοθέτησης μπορούν να τοποθετηθούν είτε στο εσωτερικό είτε στο εξωτερικό μέρος των οργανισμών συλλέγοντας δεδομένα όπως χρόνος, θερμοκρασία, αλατότητα και βάθος και αποθηκεύονται σε μια εσωτερική μνήμη. Στο τέλος της περιόδου παρακολούθησης, οι καταγραφείς αυτοί μπορούν να συνδεθούν με ένα υπολογιστή και τα δεδομένα εξάγονται προς ανάλυση [5].

Επίπεδο δικτύου:

Αυτό το στρώμα επιτρέπει την πρόσβαση του σταθμού που ευρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας, στο κανάλι επικοινωνίας για επεξεργασία και μετάδοση των απαιτούμενων πληροφοριών που λαμβάνονται από το επίπεδο λήψης που αναλύσαμε παραπάνω. Αυτές οι πληροφορίες αναμεταδίδονται στο κέντρο διοίκησης και ελέγχου που ευρίσκεται στην ξηρά χρησιμοποιώντας μια ποικιλία ειδών πρόσβασης σε δικτυακές τεχνολογίες όπως δορυφορικές επικοινωνίες General Packet Radio Service - GPRS ή τύπου ευρυζωνικής πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (Wideband Code Division Multiple Access - WCDMA). Άλλες ασύρματες τεχνολογίες προορίζονται για επικοινωνίες μικρής εμβέλειας (π.χ. επ'ωφελεία σταθμών παρακολούθησης μέσω κινητού τηλεφώνου, tablet PC, smartphone, κλπ.) και παρουσιάζονται σε άλλα σενάρια όπως θα αναλύσουμε παρακάτω. Τα διαφορετικά αυτά πρότυπα επικοινωνίας μικρής εμβέλειας περιλαμβάνουν το Bluetooth (IEEE 802.15.1), το υπερ-ευρυζωνικό (Ultra-wideband - UWB) (IEEE802.15.4a και ECMA-368) και το ZigBee (IEEE802.15.4). Τέλος, χρησιμοποιούνται ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks - WLAN) (παραλλαγές του IEEE802.11) και το παγκόσμιο δίκτυο διαλειτουργικότητας για πρόσβαση μικροκυμάτων (Worldwide Interoperability for Microwave Access - WiMAX) (IEEE802.16) για την παροχή ασύρματης πρόσβασης στο Internet σε τοπικές και σε ευρύτερες περιοχές, αντίστοιχα. Όλα αυτά τα ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικά είδη τεχνολογιών πρόσβασης ονομάζονται ετερογενή δίκτυα και είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη του IoUT διατηρώντας τη συνδεσιμότητα καθόλη τη διάρκεια των επιχειρήσεων [5].

Παρότι η διασύνδεση των υποβρύχιων “αντικειμένων” με το Internet παρέχει μεγάλες δυνατότητες ως προς την ανάπτυξη χρήσιμων και εύχρηστων υποβρύχιων εφαρμογών, η πρακτική εκτέλεσή του παρουσιάζει δυσκολίες. Τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας εμφανίζουν έλλειψη ορισμένων κοινών βασικών παραδοχών σε σχέση με το Internet [76] όπως: (1) η διαθεσιμότητα μιας συνεχούς διαδρομής/κανάλι μεταξύ πομπού και δέκτου κατά τη διάρκεια μιας περιόδου επικοινωνίας, (2) ο περιορισμός του χρονικού ορίου (timeout) και των καθυστερήσεων, (3) οι αμφίδρομες επικοινωνίες, (4) το γεγονός ότι ο χρόνος συνοχής των καναλιών είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των πακέτων δεδομένων (channel coherence times longer than packet lengths), (5) το περιορισμένο ποσοστό σφαλμάτων και (6) η επαρκής απόδοση των επικοινωνιών για την υποστήριξη εφαρμογών.

Επιπλέον, η IP αρχιτεκτονική συνιστάται ως ένα μακροχρόνιο, σταθερό, ευέλικτο και πολυχρηστικό πρωτόκολλο για την υποστήριξη ενός μεγάλου εύρους φάσματος εφαρμογών και τεχνολογιών επικοινωνίας ετερογενών δικτύων [5]. Ωστόσο, δεν υποστηρίζουν όλοι οι υποβρύχιοι αισθητήριοι κόμβοι την IP αρχιτεκτονική και επομένως απαιτούνται νέα πρωτόκολλα που θα μπορούν να παρέχουν διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών αισθητήρων καθώς και αποτελεσματικές διακτυακές πύλες οι οποίες θα επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών μέσων μετάδοσης όπως ο συνδυασμός υποβρύχιας ακουστικής και ράδιο / δορυφορικών επικοινωνιών [76].

Τα δίκτυα ανοχής καθυστέρησης (Delay-Tolerant Networks - DTN) αντιμετωπίζουν τα τεχνικά ζητήματα των ετερογενών δικτύων δίχως να υφίσταται απαίτηση συνεχούς συνδεσιμότητας των δικτύων αυτών. Τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας μπορούν λοιπόν να προσεγγισθούν/θεωρηθούν ως Delay Tolerant Networks (DTNs) λόγω της αραιής ανάπτυξής τους, της κίνησης των αισθητήριων κόμβων και ενός σημαντικά περιορισμένου εύρους ζώνης υποβρύχιου καναλιού ακουστικών επικοινωνιών [5]. Προς τούτο λοιπόν έχει αναπτυχθεί μια αρχιτεκτονική DTN [77] που επιδέχεται τις διακοπές σύνδεσης του δικτύου και παρέχει ένα πλαίσιο για την υποστήριξη των ετερογενών πυλών ενός δικτύου αισθητήρων. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική [77], διαφορετικά πρωτόκολλα βασισμένα σε IP και non-IP αρχιτεκτονική (TCP / IP, πρωτόκολλο raw MAC, serial line κλπ.) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διακίνηση των δεδομένων. Οι προσαρμογείς συγκλίσεως επιπέδου (Convergence Layer Adapters - CLAs) παρέχουν τις απαραίτητες λειτουργίες για τη μεταφορά μονάδων δεδομένων (αποκαλούμενες ως “πακέτα”) πρωτοκόλλου DTN σε καθένα από τα αντίστοιχα πρωτόκολλα [77] ενώ οι δρομολογητές που αποθηκεύουν και προωθούν τα πακέτα αυτά δεδομένων ονομάζονται πύλες DTN. Έτσι λοιπόν, η αρχιτεκτονική του “πακέτου” δεδομένων λειτουργεί ως δίκτυο επικάλυψης που παρέχει υπηρεσίες παράδοσης μηνυμάτων εξασφαλίζοντας τη διασύνδεση μεταξύ των ετερογενών τμημάτων ενός μεγαλύτερου δικτύου.

Το DTN2 είναι μια σχετική εφαρμογή των DTN πρωτοκόλλων καθώς υλοποιεί κυρίως το πρωτόκολλο πακέτων DTN [5] για τη μετάδοση δεδομένων σε πολλά επίπεδα υπό τη μορφή πακέτων (ήτοι μια σειρά από συναφή τμήματα δεδομένων). Στο [78] αναφέρεται ότι ένα υποβρύχιο επίπεδο συγκλίσεως (Underwater Convergence Layer - UCL) λογισμικό έχει σχεδιαστεί και εφαρμόζεται επ’ ωφελεία του DTN2 προς επίτευξη της διασύνδεσης μεταξύ

δικτύων που βασίζονται σε IP αρχιτεκτονική και ακουστικών δικτύων. Το λογισμικό λοιπόν αυτό είναι κατάλληλο για σενάρια δικτύων ετερογενούς φύσεως περιλαμβάνοντας πύλες που συνδέουν υποβρύχιους ακουστικούς κόμβους με αντίστοιχους επιφανείας που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ραδιοκυμάτων. Επιπρόσθετα, δύναται να χρησιμοποιηθεί προς εφαρμογή της μεθόδου διακίνησης δεδομένων μέσω ευρείας επέκτασης κινητών τοπικών δικτύων Mobile Ubiquitous LAN Extension (DATA - MULE) μεταξύ AUV και άλλων υποβρύχιων συσκευών, όπου ανταλλάσσονται δεδομένα μεταξύ των “αντικειμένων” που δεν εφαρμόζουν το πρωτόκολλο TCP / IP ενώ επίσης δύναται να επεκταθεί για την υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων MAC ή διαφορετικών μόντεμ ακουστικών κυμάτων. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι το UCL δοκιμάστηκε επιτυχώς κατά τη διάρκεια εν πλω δοκιμών [78].

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης (Routing protocols) πρέπει να σχεδιάζονται κατάλληλα έτσι ώστε να υποστηρίζουν τις απαιτήσεις μιας δεδομένης εφαρμογής λαμβανομένου υπόψη ότι η διαθεσιμότητα των δικτυακών πόρων επηρεάζει την απόδοσή τους. Η δρομολόγηση είναι ιδιαίτερα απαιτητική στα δίκτυα υποβρύχιας ασύρματης επικοινωνίας λόγω των μεγάλων καθυστερήσεων διάδοσης, του χαμηλού εύρους ζώνης, της δυσκολίας επαναφόρτισης των μπαταριών των υποβρύχιων αισθητήρων και της δυναμικής τοπολογίας. Επομένως, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης στο IoUT πρέπει να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψη κάθε φορά την παρούσα ενεργειακή κατάσταση, να είναι αξιόπιστα, ανθεκτικά, ευέλικτα και επεκτάσιμα. Επιπλέον ο αριθμός των μηνύματων ελέγχου θα πρέπει επίσης να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο ενώ η αυτο-οργάνωση και η αυτο-συντήρηση είναι βασικές ιδιότητες ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία του συστήματος. Παράλληλα απαιτούνται κατάλληλοι μηχανισμοί και λειτουργίες με σκοπό τη δημιουργία και διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών υποβρύχιων συσκευών (π.χ. αισθητήρων και AUV) καθώς και με επιφανειακούς σταθμούς (που χρησιμεύουν ως δικτυακές πύλες επιφανείας) [28]. Μια πλήρης έρευνα και σύγκριση διαφορετικών τεχνικών υποβρύχιας δρομολόγησης μελετώνται στο [79].

Επίπεδο εφαρμογής:

Το δίκτυο αντικειμένων (Web of Things - WoT) είναι το σκεπτικό κατά το οποίο “έξυπνες” συσκευές ενσωματώνονται στο διαδίκτυο ενώ οι εφαρμογές τους μπορούν να δημιουργηθούν με βάση τις αρχιτεκτονικές Representational State Transfer - REST [80]. Η αρχιτεκτονική μορφή REST

διαχωρίζει τις εφαρμογές από τις υπηρεσίες που παρέχουν, οι οποίες μπορεί να υπόκεινται σε κοινή χρήση και επαναχρησιμοποίηση και συγκεκριμένα, η βασική αφαίρεση πληροφοριών στην αρχιτεκτονική REST έχει να κάνει με τους πόρους (π.χ. ένα έγγραφο ή μια εικόνα) ενώ οι πόροι αυτοί που βασίζονται σε διαδικτυακή λογική αναγνωρίζονται από τους αναγνωριστές γενικών πόρων (Universal Resource Identifiers - URI). Οι αρχιτεκτονικές τύπου REST αποτελούνται από πελάτες και διακομιστές που ακολουθούν τη διαδικασία κατά την οποία οι πελάτες ξεκινούν αιτήματα προς τους διακομιστές, κατόπιν οι διακομιστές επεξεργάζονται αυτά τα αιτήματα και στο τέλος επιστρέφουν τις κατάλληλες απαντήσεις. Οι πελάτες έχουν πρόσβαση σε πόρους χρησιμοποιώντας μεθόδους του Hypertext Transfer Protocol (HTTP) όπως το GET, PUT, POST και DELETE. Οι πόροι αυτοί λοιπόν είναι θεωρητικά ξεχωριστοί από τις αναπαραστάσεις της πληροφορίας που επιστρέφονται στον πελάτη, για παράδειγμα, ο διακομιστής δεν στέλνει τη βάση δεδομένων αυτή καθεαυτή, αλλά μάλλον, ίσως, κάποιο Hyper Text Markup Language (HTML), Extensible Markup Language (XML) ή Java Script Object Notation (JSON) που αντιπροσωπεύει κάποιες εγγραφές της βάσης δεδομένων ανάλογα βέβαια με τις λεπτομέρειες του εκάστοτε αιτήματος και τις εφαρμογές του διακομιστή [5].

Μια αρχιτεκτονική τύπου REST μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση και την πρόσβαση σε δεδομένα συσκευών IoUT (οχήματα, αισθητήρες κ.λπ.). Με αυτόν τον τρόπο, όλοι οι συμμετέχοντες κόμβοι μπορούν να αιτούν και να παρέχουν υπηρεσίες ενώ οι χειριστές μπορούν να ελέγχουν αυτά τα αντικείμενα χρησιμοποιώντας το διαδίκτυο. Σύμφωνα με το [5], αυτή η ανοιχτή διαδικτυακή αρχιτεκτονική έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί αποτελούμενη από ετερογενή μη επανδρωμένα οχήματα (AUV, αυτόνομα οχήματα επιφανείας (ASV), οχήματα που λειτουργούν εξ αποστάσεως (ROVs), μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV)), αισθητήρες περιβάλλοντος, ενεργοποιητές και ανθρώπινους χειριστές που συνδέονται συνεχώς ή σποραδικά στο διαδίκτυο, παρέχοντας δυνατότητα ελέγχου του δικτυακού συστήματος ενώ δύναται να ενοποιηθούν υπηρεσίες, χρησιμοποιώντας ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες διαδικτύου. Εξαιτίας της ετερογένειας που παρουσιάζουν τα συστατικά μέρη του δικτύου αυτού, έχει αναπτυχθεί ένα δομοστοιχειωτό σύστημα λογισμικού [190], το Inter-Module Communication (IMC) το οποίο συγκεκριμένα είναι ένα πρωτόκολλο προσαρμοσμένο στη λογική του μηνύματος αφού αποτελείται από μια ενοποιημένη προδιαγραφή δομών μηνυμάτων (ένα απλό αρχείο XML), κατάλληλα σχεδιασμένο έτσι ώστε να διασυνδέονται οχήματα, αισθητήρες και άνθρωποι χειριστές. Το ίδιο

ενσωματωμένο λογισμικό (DUNE) προσαρμόζεται σε κάθε όχημα, καθώς περιλαμβάνει συγκεκριμένους hardware drivers και ειδικούς ελεγκτές κίνησης οχημάτων ενώ οι διάφορες ασύγχρονες εργασίες που λαμβάνουν χώρα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω μηνυμάτων IMC. Παράλληλα, η κατάσταση κάθε κόμβου εξαρτάται από ένα σύνολο πόρων, για παράδειγμα, η κατάσταση ενός μη επανδρωμένου οχήματος σχετίζεται με την κατάσταση των ενσωματωμένων αισθητήρων, το σχέδιο αποστολής, το χάρτη του χώρου δράσης, τις εντολές που στέλνει ο χειριστής κλπ. Τέλος, η κατάσταση κάθε κόμβου εξελίσσεται με βάση την τρέχουσα/παρούσα φάση χρησιμοποιώντας την ανάδραση από το περιβάλλον (αλληλεπίδραση με άλλους κόμβοι / νέες εντολές από το χειριστή, κλπ.) [5].

Μια αρχιτεκτονική τύπου REST για πρόσβαση και αναπαραγωγή δεδομένων από ένα IoUT αναλύεται αμέσως παρακάτω. Κάθε πόρος μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια λίστα από ζεύγη ονόματος-τιμής, για παράδειγμα, η θέση ενός οχήματος είναι ένας πόρος που περιλαμβάνει τα πεδία του γεωγραφικού πλάτους, μήκους και υψομέτρου. Οι πόροι αυτοί λοιπόν δύναται να ταξινομούνται ως ακολούθως [81]: (1) περιοδικής φύσεως δεδομένα που λαμβάνονται από αισθητήρες, (2) στατικά δεδομένα (όπως χάρτης χώρου δράσης ή διαμορφώσεις δικτύου) και (3) ερωτήματα (για τη συγκέντρωση δεδομένων, λίστα κατάστασης πόρων, κ.λπ.). Όταν ένας κόμβος ερωτάται σχετικά με τους πόρους του, τότε λαμβάνεται μια λίστα από αναγνωριστές πόρων μαζί με τη χρήση τους. Κατόπιν, οι πόροι τίθενται κατά σειρά εντός δομών μηνυμάτων IMC και εκπέμπονται χρησιμοποιώντας μια μορφή αυτο-περιγραφής μέσω HTTP [81]: Οι πόροι προσδιορίζονται σύμφωνα με την προσέγγιση τύπου REST από ένα ή περισσότερα URLs που περιέχουν τον συγκεκριμένο πόρο, μια διαδρομή που περιέχει τον αναγνωριστή του πόρου, ένα επιθυμητό σχέδιο για την τοποθέτηση των πόρων κατά σειρά (προαιρετικό) και συγκεκριμένες παράμετρους των ερωτημάτων. Δίνοντας ένα παράδειγμα, η διεύθυνση <http://192.168.1.37/dune/imclPosition.xml> αντιστοιχεί στο τελευταίο μήνυμα θέσεως του οχήματος που δημιουργήθηκε στη διεύθυνση 192.168.1.37 σε μορφή XML [81] ενώ οι πόροι μπορούν να έχουν ρόλο συμβουλευτικό ή να παραβλέπονται χρησιμοποιώντας μεθόδους HTTP όπως GET και PUT, αντίστοιχα. Επιπλέον, δύναται να λαμβάνεται μια απόκριση σφάλματος με τη μορφή HTTP Forbidden (3xx) ή επιτυχίας αντιστοίχως ως HTTP (2xx) Success αναλόγως με το εάν ο χρήστης έχει εξουσιοδότηση να τροποποιήσει τον πόρο ή όχι. Όσον αφορά εφαρμογές που απαιτούν ενημερώσεις κατάστασης σε πραγματικό χρόνο (όπως κοινή χρήση δεδομένων αισθητήρα) τότε για τη μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιείται το

HTTP streaming. Επιπλέον χρησιμοποιούν το πρότυπο Atom, ένα απλό πρωτόκολλο που βασίζεται στο HTTP για τη δημιουργία και την ενημέρωση των διαδικτυακών πόρων. Τέλος το Atom χρησιμοποιείται για την καταγραφή των αναγνωριστών των υπαρχόντων πόρων στο δίκτυο, των διευθύνσεων URL τους και τη χρονική σήμανση των τελευταίων αλλαγών [81].

Στο επίπεδο εφαρμογής (Σχήμα 7.1), οι διακομιστές διαχειρίζονται τις υπηρεσίες. Ένας σημαντικός διακομιστής εφαρμογών στο IoUT είναι ο ακουστικός διακομιστής ο οποίος αποκτά δεδομένα τύπου ετικέτας από διαφορετικά υδρόφωνα. Το κατάλληλο λογισμικό κατόπιν επεξεργασίας, παρέχει το τρισδιάστατο ίχνος των παρακολουθούμενων ψαριών, τα ποσοστά επιβίωσης, τους χρόνους ταξιδιού, κλπ. ενώ η ακουστική βάση δεδομένων αποθηκεύει και ενημερώνει τις εγγραφές της σχετικά με τα είδη ψαριών, το μοτίβο κολύμβησης και την χαραχθείσα διαδρομή κατά τη μετανάστευση [5]. Ομοίως, οι ραδιο-διακομιστές και οι τύπου RFID επεξεργάζονται δεδομένα ραδιο/PIT τύπου ετικέτας για την αναγνώριση των ψαριών και την αξιολόγηση σχετικών πληροφοριών ενώ οι βάσεις δεδομένων τους αποθηκεύουν και ενημερώνουν αυτά τα δεδομένα [5].

Οι διακομιστές παρακολούθησης προσφέρουν κωδικούς εφαρμογής ώστε να επεξεργάζονται τα αποκτώμενα δεδομένα που επιθυμούμε να ελεγχθούν ενώ περιοδικές αναφορές και οπτικά γραφήματα αποστέλλονται σε χερσαίους σταθμούς του κέντρου παρακολούθησης ή σε σταθμούς παρακολούθησης σε επίπεδο χρήστη. Οι κόμβοι των αισθητήρων προσφέρουν τα δεδομένα μέσω διαδικτυακών υπηρεσιών σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη. Για παράδειγμα, ένας βιολόγος μπορεί να ενδιαφέρεται για την παρακολούθηση της 3-D θέσης και της ανάλυσης δεδομένων σχετικά με τα μεταναστευτικά ψάρια ή ένας άλλος χρήστης μπορεί να θέλει να λάβει στατιστικά στοιχεία σχετικά με την ποιότητα του νερού [5].

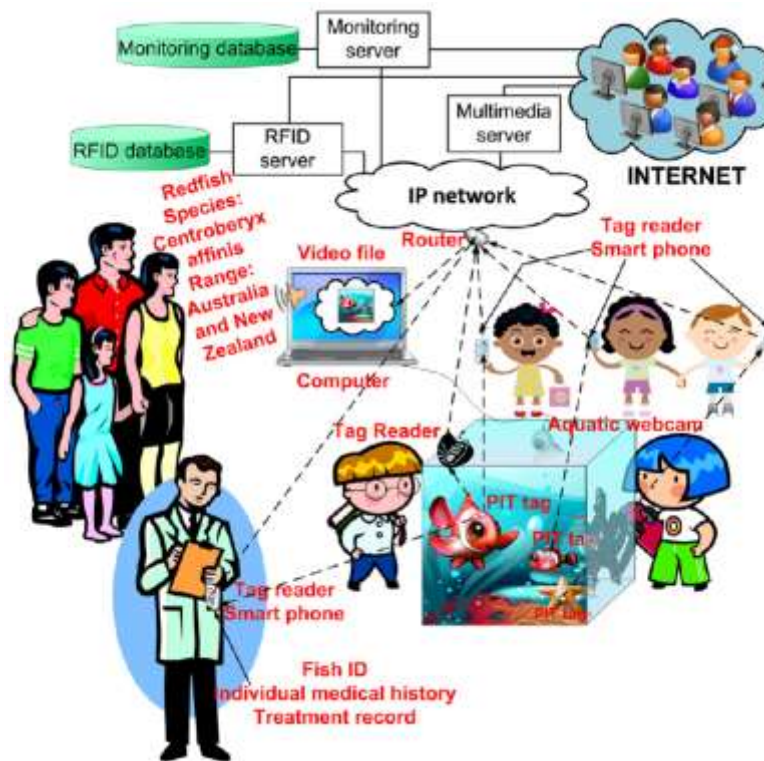
ΥΠΟΕΝΟΤΗΤΑ 7.2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ IoUT

Οι υποβρύχιες εφαρμογές μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής [5] (1) επιστημονικές, (2) βιομηχανικές και (3) στρατιωτικής ασφάλειας εφαρμογές. Οι επιστημονικές εφαρμογές σχετίζονται με την παρατήρηση του περιβάλλοντος, δηλαδή, την παρακολούθηση των γεωλογικών διεργασιών στον πυθμένα του ωκεανού, των χαρακτηριστικών του νερού και της θαλάσσιας ζωής. Οι βιομηχανικές εφαρμογές παρακολουθούν και ελέγχουν τις

εμπορικές δραστηριότητες ενώ τέλος, οι στρατιωτικές εφαρμογές ασφαλείας περιλαμβάνουν την ασφάλεια λιμενικών εγκαταστάσεων, ναυστάθμων ή πλοίων σε ξένα λιμάνια, επιχειρήσεις ναρκοθηρίας και επικοινωνία με υποβρύχια και δύτες. Στη συνέχεια, στα παρουσιάσουμε ορισμένα σενάρια εφαρμογών που επωφελούνται από το IoT.

Ενυδρείο

Η σήμανση (tagging) ψαριών σε ενυδρεία (Σχήμα 7.2) με PIT tag χρησιμοποιώντας RFID επιτρέπει στους ενδιαφερόμενους να μάθουν τα χαρακτηριστικά των ψαριών σε πραγματικό χρόνο. Οι αναγνώστες ετικέτας που βρίσκονται πάνω από τη δεξαμενή έκθεσης εκπέμπουν ραδιοκύματα και κάθε φορά που ένα ψάρι με ετικέτα κολυμπά εντός της εμβέλειας ενός αναγνώστη, τότε στέλνει τη μοναδική αναγνωριστική (ID) συμβολοσειρά προς τον αναγνώστη, ο οποίος την προωθεί στον διακομιστή RFID. Οι χρήστες μπορούν επίσης να εντοπίσουν αυτό το αναγνωριστικό με τη βοήθεια ενός αναγνώστη ενσωματωμένου σε ένα σταθμό παρακολούθησης (smartphone), όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2. Οι πληροφορίες για συγκεκριμένα ψάρια επιστρέφονται από τη βάση δεδομένων του RFID στην οθόνη αφής ενός υπολογιστή που βρίσκεται δίπλα στο ενυδρείο. Το όνομα, η καταγωγή, η διατροφή και άλλα ατομικά χαρακτηριστικά του είδους των ψαριών (ηλικία, βάρος) εμφανίζονται καθώς οι χρήστες περιηγούνται στο μενού. Τα εκπαιδευτικά βίντεο μπορούν επίσης να αποθηκεύονται και να λαμβάνονται από τον διακομιστή πολυμέσων μαζί με όλα τα δεδομένα ψαριών στους σταθμούς παρακολούθησης. Επίσης αυτό το σύστημα είναι ένας ακριβής τρόπος για τους κατόχους ενυδρείων να παρακολουθούν το ατομικό ιατρικό ιστορικό και το αρχείο θεραπείας για κάθε ψάρι της δεξαμενής. Οι αναφορές / στατιστικά των ψαριών αποστέλλονται περιοδικά από τον διακομιστή παρακολούθησης στον σταθμό φυλακής παρακολούθησης των ενυδρείων ενώ οι εικόνες ή τα βίντεο των ψαριών του ενυδρείου παρουσιάζονται από υποβρύχιες κάμερες μέσω Internet σε πραγματικό χρόνο και κατανέμονται στο ενδιαφερόμενο κοινό μέσω των κοινωνικών δικτύων [5].

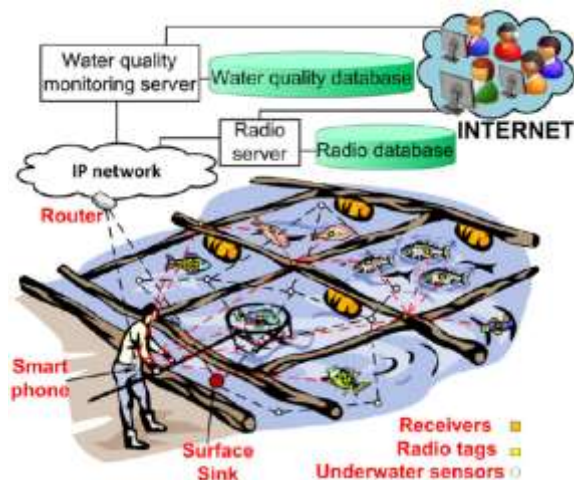


Σχήμα 7.2: Σενάριο ενυδρείου [5]

Ιχθυοκαλλιέργειες

Η ιχθυοκαλλιέργεια (Σχήμα 7.3) είναι η διαδικασία εκτροφής ψαριών σε μια κλειστή περιοχή. Μια ραδιο-ετικέτα τοποθετείται σε κάθε ψάρι και έτσι ένας μοναδικός κωδικός δύναται πλέον να το προσδιορίζει ενώ οι υπάλληλοι των ιχθυοτροφείων διαθέτουν κατάλληλο σταθμό παρακολούθησης (smartphone) που σαρώνει τις παραπάνω ραδιο-ετικέτες. Παράλληλα, δύναται να υπάρχουν δέκτες εντός των δεξαμενών, οι οποίοι θα μπορούν να λαμβάνουν τη συμβολοσειρά της ταυτότητας, και έτσι να την προωθούν προς το σταθμό παρακολούθησης χρησιμοποιώντας Bluetooth ή ZigBee. Κατόπιν αυτή αποστέλλεται από τον σταθμό παρακολούθησης στον ραδιο-διακομιστή και με αυτόν τον τρόπο η ραδιο-βάση δεδομένων καταγράφει πληροφορίες για τα ψάρια όπως το είδος, την περιοχή παραγωγής, την κατάσταση νερού, το χρόνο καλλιέργειας, την προέλευση και τις καθημερινές δραστηριότητες σχετικά με τη διατροφή και τη χορήγηση φαρμάκων. Οι παραπάνω πληροφορίες λοιπόν σχετίζονται/συνδέονται με τον αριθμό αναγνώρισης της ραδιο-ετικέτας του κάθε ψαριού οπότε και μετά από ένα αίτημα προς τη βάση δεδομένων θα δύναται να ακολουθεί μια λεπτομερής αναφορά του ψαριού που μας ενδιαφέρει, εμφανιζόμενη στο σταθμό παρακολούθησης του υπαλλήλου. Αυτά

τα δεδομένα στη συνέχεια μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα και να αποδειχθούν πολύ χρήσιμα κατά την πώληση και το εμπόριο των ψαριών αυτών [5].



Σχήμα 7.3: Σενάριο ιχθυοκαλλιέργειών [5]

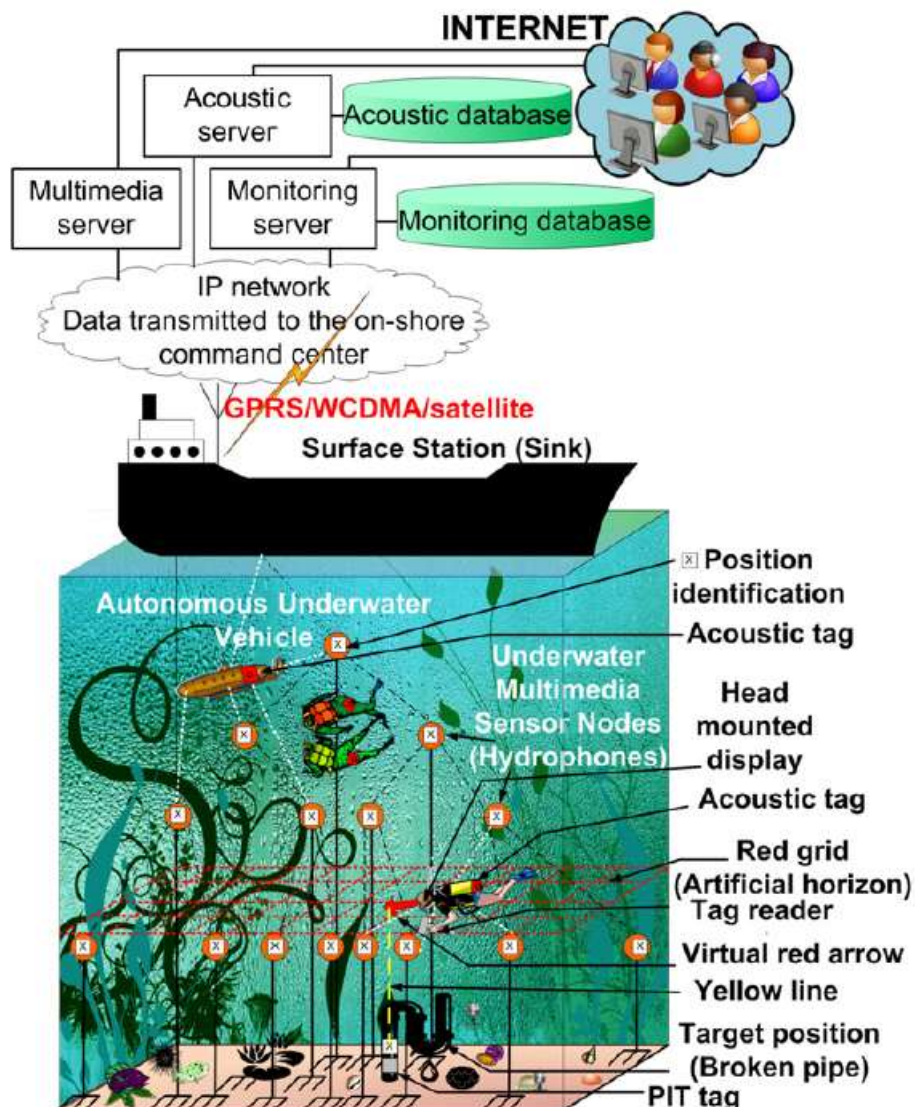
Τα ψάρια είναι πολύ σημαντικό να ταυτοποιούνται σε ατομικό επίπεδο καθώς με αυτόν τον τρόπο, γενικές πληροφορίες (όνομα είδους και οικότοπος) της βάσης δεδομένων συμπληρώνονται με πιο λεπτομερείς πληροφορίες, όπως πότε και πού συλλέχθηκαν, το φύλο, την ηλικία, το μήκος του σώματός τους, το βάρος και το ιστορικό ανάπτυξης. Όλα αυτά είναι σημαντικά προκειμένου να παρακολουθείται ένα ατομικό ιατρικό αρχείο για κάθε ψάρι ενώ ο έλεγχος αυτού σε πραγματικό χρόνο θα δύναται να διασφαλίζει την ασφάλεια των τροφίμων. Οι ραδιο-ετικέτες έχουν υψηλό κόστος, καθώς οι τιμές τους κυμαίνονται από 200 έως 500 \$ το καθένα, ανάλογα με τις δυνατότητές τους. Μια φθηνότερη λύση θα μπορούσε να είναι η χρησιμοποίηση των PIT tags τα οποία βέβαια παρέχουν ένα πιο περιορισμένο εύρος ανίχνευσης (περίπου 20 cm αντί για 10 m που παρέχουν οι ραδιο-ετικέτες σε γλυκό νερό), αλλά είναι πολύ φθηνότερα (περίπου 3 \$ το καθένα) [5].

Επιπλέον, η ποιότητα του νερού των ιχθυοτροφείων πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς, δεδομένου ότι είναι ευάλωτο κατά τη γεωργική χρήση των φυτοφαρμάκων και των λιπασμάτων και στη ρύπανση. Υποβρύχιοι αισθητήρες (Σχήμα 7.3) παρακολουθούν τις μεταβλητές ποιότητας του νερού όπως η θερμοκρασία, η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, η τιμή pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (αλατότητα) [5]. Τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται στο

σταθμό επιφανείας σε πραγματικό χρόνο, ο οποίος στη συνέχεια τα προωθεί στον διακομιστή παρακολούθησης ποιότητας νερού. Αυτός ο διακομιστής αναλύει αυτά τα δεδομένα και σε περίπτωση εντοπισμού τιμών εκτός ορίων (όπως για παράδειγμα το διαλυμένο οξυγόνο) προειδοποιεί τους ενδιαφερόμενους με μηνύματα κειμένου ή ήχου που αποστέλλονται στους σταθμούς παρακολούθησης ενώ η βάση δεδομένων της ποιότητας του νερού αποθηκεύει τις τιμές των παραμέτρων συμπεριλαμβανομένων και των μη φυσιολογικών. Κατόπιν οι ενδιαφερόμενοι λαμβάνουν αυτές τις τιμές στους σταθμούς παρακολούθησής τους σε πραγματικό χρόνο μέσω πλήρων αναφορών ανάλυσης δεδομένων και ενημερώνονται για τυχόν προβλήματα σε συγκεκριμένες δεξαμενές [5].

Παρακολούθηση αγωγών

Οι υποβρύχιοι αισθητήρες και τα AUV δύναται να συνεργάζονται κατάλληλα μεταξύ τους για την αποτελεσματική επιθεώρηση και παρακολούθηση των υποβρύχιων θαλάσσιων υποδομών (Σχήμα 7.4), π.χ. για έλεγχο και εντοπισμό πετρελαιοκηλίδων σε αγωγούς όπου οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν εντός και εκτός των αγωγών αυτών. Οι υποβρύχιοι αισθητήρες που βρίσκονται εξωτερικά των αγωγών τοποθετούνται σε σταθερές θέσεις (αγκυροβολημένοι στον πυθμένα της θάλασσας, αιωρούμενοι σε διαφορετικά βάθη) ή μπορούν να επιπλέουν ελεύθερα ακολουθώντας τα ρεύματα του νερού πλην όμως απαιτούνται κατάλληλες τεχνικές εντοπισμού [5] ώστε κάθε φορά να είναι γνωστές οι θέσεις τους. Άλλοι πάλι αισθητήρες ευρίσκονται τοποθετημένοι εσωτερικά των αγωγών μετρώντας την πίεση και την ταχύτητα του πετρελαίου, καθώς και τις ακουστικές δονήσεις που προκαλούνται από τυχόν διαρροές. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες μεταδίδονται μέσω του δικτύου αισθητήρων προς το σταθμό επιφανείας, ο οποίος στη συνέχεια τα προωθεί στο χερσαίο κέντρο παρακολούθησης [5].



Σχήμα 7.4: Σενάριο παρακολούθησης υποβρύχιων αγωγών [5]

Τα AUVs μετακινούνται εντός της ζώνης παρακολούθησης και επικοινωνούν με τους υποβρύχιους αισθητήρες μέσω ακουστικών συνδέσεων για τη συλλογή των δεδομένων. Τα υδρόφωνα (ακουστικοί αισθητήρες) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της 3D θέσης των AUV (που φέρουν ακουστικές ετικέτες) η οποία υπολογίζεται από τον ακουστικό διακομιστή του κέντρου παρακολούθησης [5].

Τα AUVs συλλέγουν πληροφορίες, εξετάζουν και καταγράφουν φυσικούς οικοτόπους καθώς επίσης επιθεωρούν (και δυνητικά επισκευάζουν) θαλάσσιες υποδομές (π.χ. αγωγούς πετρελαίου) ενώ οι υποβρύχιοι αισθητήρες

μπορούν να εντοπίσουν την περιοχή όπου απαιτούνται επισκευές. Ακόμη τα PIT tags μπορούν να συνδεθούν σε έναν υποβρύχιο αγωγό πετρελαίου και να συνδράμουν στο να εντοπισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η τοποθεσία της απαιτούμενης επισκευής [5].

Επιπλέον, τα πολυμέσα των υποβρύχιων δικτύων ακουστικών αισθητήρων [5] επιτρέπουν την απόκτηση και ταξινόμηση εικόνων και βίντεο τα οποία αποστέλλονται στον διακομιστή πολυμέσων. Με αυτόν τον τρόπο, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να παρακολουθούν τη ροή και το περιεχόμενό τους καθώς είναι πολύ χρήσιμα για την πρόληψη των καταστροφών καθώς και για τον εντοπισμό και ανάλυση των τιμών που εμφανίζονται εκτός ορίων στην περιοχή παρακολούθησης ενώ επίσης δύναται να έχουν υποστηρικτικό ρόλο κατά τις εργασίες επιθεώρησης και επισκευής [5].

Παρόλο που τα AUVs παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στις υποβρύχιες αποστολές, ορισμένες υποβρύχιες επιχειρήσεις εξακολουθούν να απαιτούν τη συνδρομή δυτών λόγω της δυνατότητας που έχουν να εκτελούν πολύπλοκες εργασίες, όπως η συναρμολόγηση υποβρύχιων κατασκευών ή η σύνδεση ενός νέου αγωγού και ενώ η εγκατάσταση παραμένει σε λειτουργία [5]. Ωστόσο, οι δύτες μπορούν να υποφέρουν από άγχος και η έκθεσή τους σε αντίξοες υποβρύχιες συνθήκες όπως υψηλή πίεση, θαλάσσια ρεύματα, θολότητα κ.λπ. δημιουργούν περιορισμούς στις αισθήσεις, στην αντίληψη και τη μνήμη των δυτών.

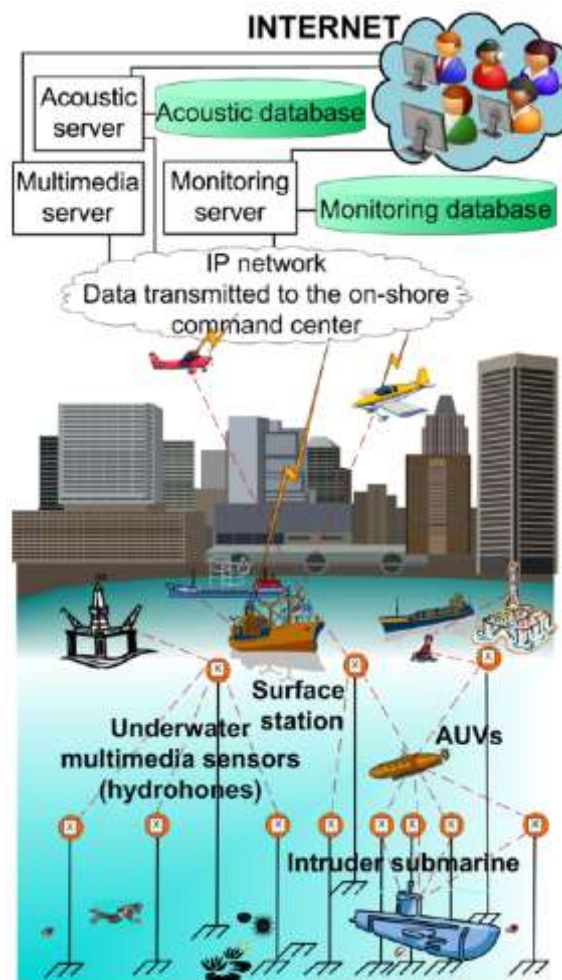
Στο [89], περιγράφεται ένα σύστημα υποβρύχιας επαυξημένης πραγματικότητας (Underwater Augmented Reality - UWAR) προκειμένου να βοηθήσει τους δύτες στον εντοπισμό του τόπου εργασίας όπου απαιτούνται επισκευές καθώς και να διατηρούν σταθερή τη δική τους θέση. Το σύστημα (Σχήμα 7.4) αποτελείται από μια οθόνη απεικόνισης βίντεο προσαρμοσμένη στο κεφάλι (Head Mounted Display - HMD) με web-camera μπροστά της, προστατευόμενο από ένα αδιάβροχο περίβλημα, προσαρμοσμένο πάνω από την καταδυτική μάσκα. Οι οπτικοί τετράγωνοι δείκτες χρησιμοποιούνται για λόγους προσανατολισμού και προσδιορισμού θέσης και, όπως η αναγνώριση του χώρου εργασίας. Η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality - AR) ενσωματώνει εικονικά στοιχεία όπως πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον και τα ανατιθέμενα έργα στο οπτικό πεδίο των δυτών προκειμένου να βελτιώσει τις οπτικές ενδείξεις και την κατανόηση του περιβάλλοντος χώρου ενώ η οπτικοποίηση ενός τεχνητού ορίζοντα (κόκκινη εσχάρα-πλέγμα) (Σχήμα 7.4) αυξάνει την επίγνωση της θέσης των δυτών στο περιβάλλον και στο χώρο

εργασίας τους. Τα βοηθήματα πλοήγησης επικουρούν στην καθοδήγηση προς τον χώρο εργασίας που υλοποιείται με εικονικό κόκκινο βέλος που δείχνει συνεχώς τη θέση εργασίας ενώ μια κίτρινη γραμμή συνδέει το βέλος αυτό με τη θέση του στόχου (χώρο εργασίας) [5]. Παράλληλα η θέση του δύτε παρακολουθείται συνεχώς αφού ακουστική ετικέτα εκπέμπει ένα σήμα (ring) με πληροφορίες ταυτοποίησης του δύτε προς τους υποβρύχιους αισθητήρες (υδρόφωνα). Κατόπιν, προσδιορίζεται η ώρα άφιξης του ήχου στα διάφορα εγκατεστημένα στο χώρο υδρόφωνα και με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η τρισδιάστατη θέση του δύτε στον ακουστικό διακομιστή χρησιμοποιώντας την ακουστική βάση δεδομένων. Εν συνεχεία, η θέση του δύτε προωθείται πάλι πίσω στον δύτε χρησιμοποιώντας το δίκτυο αισθητήρων ενώ μέσω αυτής της μεθόδου είναι εφικτό οι θέσεις του συνόλου των δυτών να είναι γνωστές ακόμη και αν χαθεί η οπτική επαφή μεταξύ τους. Παράλληλα, μέσω υπολογιστή που δύναται να φέρεται στον καρπό του χεριού όπως ένα ρολόι, ο δύτες δύναται να παρακολουθεί το βάθος του με την προϋπόθεση βέβαια να υφίσταται καλή ορατότητα. Ένα άλλο υποβρύχιο σύστημα ακουστικής παρακολούθησης για δύτες είναι το Multi-User Long Base Line (MULBL) [191] όπου σύμφωνα με αυτό οι πληροφορίες σχετικά με τη θέση άλλων δυτών, υποβρύχιων αισθητήρων και AUVs εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο ως 3-D γραφικά στοιχεία στο HMD που φέρει ο δύτες. Επιπλέον μέσω τηλεφώνων ακουστικών κυμάτων ή μόντεμ επιτρέπεται στους δύτες η αποστολή μηνυμάτων κειμένου διατηρώντας με αυτόν τον τρόπο την επαφή τους με τον έξω κόσμο [5].

Ασφάλεια Λιμανιών

Τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων σε συνδιασμό με τα υποβρύχια οχήματα και τα οχήματα επιφανείας μπορούν να συμβάλουν στην προστασία των λιμένων (Σχήμα 7.5). Το κινούμενο δίκτυο ασφαλείας διαμορφώνεται από ASVs, AUVs, αεροπλάνα και δορυφόρους ενώ δύναται να περιλαμβάνει σταθερές πλατφόρμες που περιέχουν σημαντήρες και θαλάσσιο εξοπλισμό [83]. Παράλληλα μια μεγάλη ποικιλία αισθητήρων μπορεί να τοποθετηθεί στα οχήματα ενώ ένας άλλος αριθμός υποβρύχιων αισθητήρων αναπτύσσεται καλύπτοντας μια μεγάλη θαλάσσια περιοχή. Προκειμένου να στερεωθούν αυτοί οι κόμβοι αισθητήρων στο βυθό της θάλασσας με τέτοιο τρόπο ώστε να διανεμηθούν σε διαφορετικά βάθη, χρησιμοποιούνται μεταλλικά κομμάτια μαζί με λεπτά σχοινιά [84] εξασφαλίζοντας έτσι τη συλλογή πληροφοριών σε διάφορα επίπεδα βάθους. Αυτή η στρατηγική ανάπτυξης απαιτεί την εφαρμογή μιας δενδρικής ιεραρχικής τοπολογίας με multi-hop δρομολόγηση

κατά την οποία τα δεδομένα αποστέλλονται στο σταθμό επιφανείας, ο οποίος επιπλέει στην επιφάνεια του νερού και χρησιμοποιεί ραδιοεπικοινωνία μεγάλης απόστασης για να στείλει αυτά τα δεδομένα είτε απευθείας είτε μέσω αεροσκαφών σε έναν χερσαίο σταθμό όπου εκεί εκτελείται περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων. Αυτοί λοιπόν οι υποβρύχιοι αισθητήρες διαθέτουν την ικανότητα έρευνας υποβρύχιων εισβολών και σε περίπτωση εντοπισμού δύναται να αποστείλουν ένα σήμα ειδοποίησης προς τα AUVs που επιχειρούν εκείνη τη στιγμή. Στο [85] περιγράφεται μια μέθοδος ανίχνευσης υποβρυχίων εισβολών με εξοικονόμηση ενέργειας. Συγκεκριμένα, εντός μιας τρισδιάστατης περιοχής κινητών ακουστικών ή μαγνητικών αισθητήρων κάθε ένας από αυτούς τοποθετείται σε μια τέτοια θέση έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει την ποσότητα ενέργειας που δαπανάται για την κίνηση του αισθητήρα. Επιπλέον, στο [86], εκθέτονται οι περιοδικές τροχιές που πρέπει να εκτελούν τα AUVs έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν την πιθανότητα εντοπισμού ενός υποβρύχιου εισβολέα.



Σχήμα 7.5: Σενάριο ασφάλειας λιμανιού [5]

Το Light Detection And Ranging (LIDAR) είναι μια μέθοδος φωτοεντοπισμού που δύναται να υπολογίζει την απόσταση ή και άλλες παραμέτρους ενός στόχου ενδιαφέροντος, φωτίζοντάς τον με φως, συνήθως κάνοντας χρήση παλμών λέιζερ. Οι αισθητήρες LIDAR που είναι τοποθετημένοι σε ASVs δύναται να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση πλωτών μέσων που εισέρχονται στο λιμάνι και εντοπισμό για τυχόν μεταφορά παράνομων ή εκρηκτικών αντικειμένων όπως για παράδειγμα ναρκών, που είναι προσαρτημένα στο εξωτερικό μέρος τους [83] ενώ στη συνέχεια οι εικόνες των ύποπτων αυτών υποβρύχιων αντικειμένων πρέπει να αναγνωρίζονται και να διαβιβάζονται άμεσα σε ένα κέντρο διοίκησης και ελέγχου. Αναπτύσσοντας λοιπόν καινοτόμα υποβρύχια δίκτυα απεικόνισης με ακτίνες λέιζερ και αξιοποιώντας κατάλληλες τεχνολογίες επικοινωνιών που θα εφαρμόζονται και διανέμονται εντός μιας ομάδας συνεργαζόμενων μικρών ρομπότ, οι εικόνες των ύποπτων υποβρύχιων αντικειμένων θα μπορούν να μεταδίδονται άμεσα στο κέντρο διοίκησης και ελέγχου. Τέλος, βίντεο και εικόνες που συλλέχθησαν είτε από υποβρύχια ρομπότ είτε από δίκτυα πολυμέσων ακουστικών αισθητήρων αποστέλλονται στον διακομιστή πολυμέσων καθόσον το περιεχόμενο αυτό συμβάλλει στην επαύξηση της παράκτιας και τακτικής παρακολούθησης [5].

ΥΠΟΕΝΟΤΗΤΑ 7.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΩΦΕΛΕΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙοUT

Στη συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζονται τα οφέλη του ΙοUT, εστιάζοντας στα σενάρια εφαρμογών που περιγράφησαν στην προηγούμενη ενότητα.

Οι επισκέπτες των ενυδρείων παρατηρούν τα ψάρια καθώς κολυμπούν εντός των δεξαμενών διαβάζοντας πληροφορίες σχετικά με το εκάστοτε είδος ψαριού σε κάποια οθόνη ενώ μπορούν ακόμη να παρακολουθούν βίντεο με θέμα τη θαλάσσια ζωή. Παρ' όλα αυτά όμως, το ΙοUT προσφέρει στους επισκέπτες και ειδικότερα σε μικρότερες ηλικίες ένα πιο διαδραστικό τρόπο μάθησης προσφέροντας μια συναρπαστική εμπειρία εκπαίδευσης αφού ένα ψάρι πλέον μπορεί να αναγνωριστεί ατομικά σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τις γενικές πληροφορίες όπως το είδος ή ο βιότοπος των ψαριών, επιπλέον

λεπτομέρειες όπως το πότε και το που συλλέχθηκε, την ηλικία, το βάρος, το ιστορικό ανάπτυξης ή ακόμη και το ψευδώνυμό του δύναται πλέον να είναι γνωστά. Η παρακολούθηση υδρόβιων ζώων σε πραγματικό χρόνο με επιτόπου τοποθέτηση περιεχομένου πολυμέσων είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος για τη βελτίωση της μάθησης καθόσον φέρνει τους ανθρώπους πιο κοντά στο φυσικό κόσμο. Επιπλέον, το IoUT διευκολύνει τους φύλακες των ενυδρείων στην παρακολούθηση της ατομικής υγείας του κάθε ζώου και στην καλύτερη κατανόηση σχετικά με τη συμπεριφορά του και το προσδόκιμο ζωής του [5].

Από την άλλη πλευρά, το IoUT στις ιχθυοκαλλιέργειες είναι επίσης σημαντικό εργαλείο για τον έλεγχο των ψαριών για τη διασφάλιση της ασφάλειας των τροφίμων. Η εφοδιαστική αλυσίδα των αλιευτικών προϊόντων περιλαμβάνει πέντε διαφορετικά στάδια [5]: την παραγωγή, τη μεταφορά, την επεξεργασία, την αποθήκευση και τη διανομή. Τα Barcodes αποτελούν αυτή τη στιγμή την πιο κοινή μέθοδο επισημάνσης και ιχνηλάτησης και συγκεκριμένα τα Barcodes EAN-13 και UCC-12 είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα. Ωστόσο, τα PIT tags τα οποία όπως εξηγήσαμε και σε προηγούμενη ενότητα είναι εμφυτεύσιμες συσκευές RFID, έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα Barcodes όπως ο επαναπρογραμματισμός, η ικανότητα να παρέχουν περισσότερες πληροφορίες για το προϊόν και δυνατότητα ανάγνωσης σε μεγαλύτερες αποστάσεις [87]. Προς το παρόν, λίγες εταιρείες έχουν αναπτύξει τα δικά τους συστήματα εσωτερικής ανίχνευσης, οι οποίες συχνά χρησιμοποιούν τα δεδομένα αυτά με μη αποτελεσματικό τρόπο αφού δεν διοχετεύονται σε όλη την αλυσίδα των εμπλεκόμενων μελών με την παραγωγή και προμήθεια ψαριών [88]. Για όλους αυτούς τους λόγους, η ραδιοτεχνολογία μέσω των συσκευών (RFID) μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη του ελέγχου των αλιευτικών προϊόντων σε πραγματικό χρόνο εξασφαλίζοντας έτσι τον ποιοτικό έλεγχο και την αποθήκευση πρόσθετων πληροφοριών σε κάθε στάδιο. Επιπλέον είναι απαραίτητο για την καλή διατήρηση των ιχθυοτροφείων να εκτελείται κατάλληλος έλεγχος της ποιότητας του νερού έτσι ώστε η συγκέντρωση των περιβαλλοντικών παραμέτρων του νερού να τηρείται εντός κατάλληλων τιμών. Στις περισσότερες υδατοκαλλιέργειες χρησιμοποιούνται παραδοσιακές μέθοδοι για την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού των λιμνών / δεξαμενών από όπου και λαμβάνονται δείγματα για την ανίχνευση επικίνδυνων ουσιών μετά από ανάλυση σε χημικό εργαστήριο. Το κύριο μέρος της διαδικασίας αυτής απαιτεί συχνές επισκέψεις στις τοποθεσίες του νερού με αποτέλεσμα να καθίσταται χρονοβόρα. Συνεπώς, η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού σε πραγματικό χρόνο και σε τακτική

βάση με χρήση ασύρματων αισθητήρων αποτελεί τον αποτελεσματικότερο τρόπο για τον έγκαιρο εντοπισμό και τη μείωση ασθενειών και κατ' επέκταση την ενίσχυση του ρυθμού ανάπτυξης των ψαριών [5].

Όσον αφορά το σύστημα παρακολούθησης των αγωγών, σκοπός του είναι να αποτρέπει και να προειδοποιεί για πιθανές ζημιές. Όμως η παρακολούθηση αγωγών συχνά περιορίζεται στην οπτική επιθεώρηση και στις μετρήσεις ισοζυγίου μάζας και όγκου. Συνεπώς, οι αστοχίες των αγωγών συνήθως δεν παρατηρούνται έγκαιρα με αποτέλεσμα να προκύπτουν σοβαρές ζημιές. Επί του παρόντος, τα AUVs συνεργάζονται για την επιθεώρηση των θαλάσσιων υποδομών, ωστόσο, αυτές οι οπτικές επιθεωρήσεις είναι κοστοβόρες και διαθέτουν ικανότητα εντοπισμού μόνο εξωτερικών βλαβών και όχι αλλοιώσεων εσωτερικών δομών. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της τεχνολογίας RFID και αισθητήρων είναι πολύ χρήσιμη για τον γρήγορο εντοπισμό προβλημάτων / δυσλειτουργιών των υποβρύχιων αγωγών σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, συνδράμει θετικά στο έργο των αυτοδυτών καθώς είναι συνήθως υπεύθυνοι για πολύπλοκες εργασίες επισκευής αγωγών, παρέχοντας τη δυνατότητα μέσω του IoUT, επίγνωσης του περιβάλλοντος, μειώνοντας έτσι τα επίπεδα άγχους τους και παρέχοντας συνεπώς μεγαλύτερη ασφάλεια και αποτελεσματικότητα κατά την εκτέλεση των καθηκόντων τους [5].

Τέλος, όσον αφορά την ασφάλεια των λιμανιών, αυτή είναι απαραίτητη για τη διατήρηση του εμπορίου και της ανάπτυξης σε μια περιοχή και το IoUT είναι το κλειδί για αυτό, αφού η διατήρηση ενός ασφαλούς περιβάλλοντος είναι ζωτικής σημασίας για τη ναυτιλία και την οικονομική ανάπτυξη. Επί του παρόντος, ASVs, AUVs, σημαντήρες, συστήματα αισθητήρων και δίκτυα είναι σε θέση να προσφέρουν ασφάλεια στα λιμάνια ενάντι των θαλάσσιων απειλών. Ωστόσο ακόμη, πολλά λιμάνια εξακολουθούν να μη διαθέτουν ευέλικτα, εξελιγμένα και ισχυρά συστήματα ασφαλείας. Για το σκοπό αυτό, θεμελιώδης αρχή αποτελεί η επίγνωση του περιβάλλοντος που επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη ενός συστήματος / διάταξης αισθητήρων προς συγκέντρωση δεδομένων τόσο από το βυθό της περιοχής όσο και από αέρος-επιφανείας μέσω αεροπορικών και δορυφορικών πηγών. Ένα εξελιγμένο παράκτιο σύστημα ασφαλείας που αποτελείται από κάμερες και διαφορετικά είδη αισθητήρων, θα μπορούσε να εντοπίσει ένα εχθρικό σκάφος έγκαιρα προτού εισβάλει στο λιμάνι που επιθυμούμε να προστατέψουμε. Εν κατακλείδι, ο συνδυασμός πληροφοριών από μια βάση δεδομένων, με τους εντοπισμούς μιας διάταξης αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο, θα ήταν πολύ

αποτελεσματικό για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας των πλοίων και την έγκαιρη προειδοποίηση έναντι πιθανών κινδύνων ασφαλείας [5].

ΕΝΟΤΗΤΑ 8.

ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΕΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

ΥΠΟΕΝΟΤΗΤΑ 8.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΠΩΦΕΛΕΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΑΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Η συλλογή ενέργειας (energy harvesting - EH) είναι η διαδικασία κατά την οποία η χαμένη ενέργεια όπως η θερμότητα, ο ήχος και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συγκεντρώνεται και μετατρέπεται σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ισχύ. Το EH επιτρέπει τη λειτουργία των ηλεκτρονικών τμημάτων ενός συστήματος όταν δεν υπάρχει συμβατική πηγή ισχύος, εξαλείφοντας την ανάγκη ύπαρξης καλωδίων ή συχνών απαιτήσεων προς αντικατάσταση των μπαταριών [24]. Εξαιτίας της δυσκολίας που υφίσταται σε υποβρύχιο περιβάλλον στην διαδικασία αλλαγής μπαταρίας ή φόρτισης ενός πυκνωτή των αισθητήριων κόμβων, απαιτείται το σύστημα EH να εξασφαλίζει μέσω του συνδέσμου επικοινωνίας μεταφορά ενέργειας προς τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος. Σε αρκετές μελέτες έχει διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης φυσικών πηγών ενέργειας στη διαδικασία EH εντός του δικτύου επικοινωνίας οι οποίες όμως καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι φυσικές πηγές δεν είναι πλήρως αποτελεσματικές λόγω της απρόβλεπτης φύσης των περιβαλλοντικών πηγών και ως εκ τούτου παρουσιάζονται περιορισμοί [1].

Συστήματα συλλογής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency - Energy Harvesting - RF-EH)

Η μέθοδος συλλογής ενέργειας μέσω ραδιο-συχνότητας (RF-EH) είναι μία από τις τεχνικές EH όπου αίρονται οι παραπάνω περιορισμοί καθόσον οι κόμβοι φορτίζουν τις μπαταρίες τους μέσω χρήσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [25]. Συγκεκριμένα, η RF ενέργεια παρέχεται από πηγές που υπάρχουν στο περιβάλλον ή που εκπέμπουν αποκλειστικά προς τούτο (ad hoc) για λόγους συλλογής ενέργειας. Μια από αυτές λοιπόν τις τεχνικές είναι η ασύρματη μετάδοση ισχύος (Wireless Power Transfer - WPT) όπου κατά την πρώτη φάση της ανάπτυξης της μελετήθηκαν δυο σημαντικοί παράγοντες που είναι η απόσταση και η ισχύς εκπομπής. Πάρα ταύτα όμως, περαιτέρω εξέλιξη της έλαβε τέλος λόγω χαμηλής αποδοτικότητας της εκπεμπόμενης ισχύος ενώ προέκυψαν θέματα ασφάλειας της ανθρώπινης υγείας ένεκα

χρήσης υψηλής ισχύος. Γι αυτό το λόγο η έρευνα συνεχίστηκε σε δυο διακριτούς τομείς, σε εκπομπές ενέργειας εγγύς αποστάσεων (εγγύς πεδίο - Near-field) και σε εκείνες μεγάλων αποστάσεων (μακρινό πεδίο - Far-Field) [1].

Εγγύς πεδίου (near-field)

Το εγγύς ή μη ακτινοβολούν πεδίο είναι η απόσταση ενός μήκους κύματος της κεραίας εκπομπής. Η ενέργεια δύναται να μεταφερθεί με την εφαρμογή επαγωγικής σύζευξης, συντονιστικής επαγωγικής σύζευξης ή πυκνωτικής σύζευξης σε κλίμακα δεκάτων Watt. Στο εγγύς πεδίο, το σύστημα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας απαιτεί υψηλή αποδοτικότητα ισχύος εκπομπής και δύναται να επιτευχθεί άνω του 80 %. Η ισχύς εξέρχεται του πομπού μόνο όταν υφίσταται δέκτης ή απορροφητικό μέσο εντός του μήκους κύματος, πράγμα το οποίο εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος της κεραίας του πομπού. Γι αυτό το λόγο η εκπεμπόμενη ισχύς μειώνεται εκθετικά συναρτήσει της απόστασης πομπού-δέκτη, που σημαίνει ότι εάν το μήκος κύματος εκπομπής είναι μικρότερο από την απόσταση πομπού-δέκτη τότε επιτυγχάνεται μικρό ποσό συλλεχθείσας ενέργειας [25].

Μακρινού πεδίου (far-field)

Η περιοχή μακρινού πεδίου αφορά αποστάσεις αρκετά μεγαλύτερες από τη διάμετρο της κεραίας εκπομπής. Η ισχύς εκπομπής ενός μακρινού πεδίου δύναται να μεταφέρει σημαντική ενέργεια σε μακρινότερες αποστάσεις δίχως τη χρήση ενσύρματου ηλεκτρικού δικτύου ενώ αποτελεί ένα τομέα των WPT εφαρμογών που επιδέχεται περαιτέρω βελτιώσεις και αναβαθμίσεις της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας. Οι μορφές της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στο ανωτέρω είδος WPT είναι τα μικροκύματα και οι ακτίνες λέιζερ, τα οποία όμως κατά μήκος της απόστασης εξασθενούν ενώ η μέγιστη ενεργειακή αποδοτικότητα που δύναται να επιτευχθεί δεν ξεπερνά το 50%. Πάρα τούτα έχουν αναπτυχθεί συστήματα τα οποία με χρήση μικροκυματικών σημάτων και υψηλού κέρδους κεραίας δύναται να επιτύχουν ενεργειακή αποδοτικότητα 90% λαμβάνοντας βέβαια υπόψη τον περιορισμό που δημιουργούν οι σημείο προς σημείο (point to point) ή οπτικής επαφής (line of sight) συνδέσεις. Προκειμένου όμως να επεκτείνουμε την περιοχή κάλυψης της εκπομπής μέσω ομοιοκατευθυντικών κεραιών, απαιτούνται περισσότερες έρευνες με σκοπό τη βελτιστοποίηση της κατευθυντικότητας και της απόδοσης ενέργειας [25].

Τεχνική ταυτόχρονης ασύρματης μετάδοσης πληροφοριών και ισχύος (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer - SWIPT)

Η τεχνική SWIPT είναι μια πρόσφατη εξέλιξη της τεχνολογίας WPT η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά πληροφοριών και ενέργειας. Αν και ένας ιδανικός δέκτης θα έπρεπε να έχει την ταυτόχρονη δυνατότητα αποκωδικοποίησης πληροφοριών (Information Decoding - ID) και συλλογής ενέργειας (Energy Harvesting - EH), στην πραγματικότητα αυτές οι δυο διεργασίες δεν είναι δυνατό να συνυπάρξουν στο ίδιο σήμα που λαμβάνεται από ένα σύστημα SWIPT αφού η λειτουργία συλλογής ενέργειας σε ένα RF σήμα δύναται να καταστρέψει το αντίστοιχο περιεχόμενο της πληροφορίας. Προς τούτο λοιπόν, και προκειμένου να επιτευχθεί πρακτικά η τεχνική SWIPT, είτε το ληφθέν σήμα θα πρέπει να διαιρεθεί σε δυο ξεχωριστά, είτε θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δυο διαφορετικές κεραίες και για τις δυο διεργασίες του ID και EH [25]. Στη σχετική βιβλιογραφία [25] περιγράφονται τέσσερις διαφορετικές αρχιτεκτονικές δέκτη με δυνατότητα SWIPT: ξεχωριστού δέκτη, εναλλαγής χρόνου, διαχωρισμού ισχύος και εναλλαγής κεραίας.

Σύστημα συλλογής ενέργειας πολλαπλών πηγών (Multi-Source Energy Harvesting System)

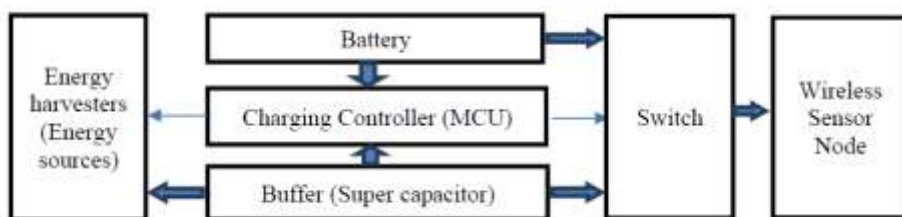
Μια ακόμη τεχνική που υπόσχεται αδιάλλειπτη παροχή ενέργειας σε ένα υποβρύχιο δίκτυο αισθητήρων είναι η συλλογή ενέργειας μέσω πολλαπλών πηγών. Συγκεκριμένα σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιούνται συνδυαστικά δυο είδη συλλογής ενέργειας, οι μικροβιακές ή βιολογικές κυψέλες καυσίμου (microbial or biological fuel cell – MFC) και η ακουστική πιεζοηλεκτρική μέθοδος που αναλύονται στη συνέχεια [26].

Οι μικροβιακές ή βιολογικές κυψέλες καυσίμου (microbial or biological fuel cell – MFC) είναι βιο-ηλεκτροχημικά συστήματα που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιώντας τις μεταβολικές διεργασίες των βακτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, στο ανόδιο η αποικία των βακτηρίων κατά τον πολλαπλασιασμό της και λόγω των μεταβολικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα, μεταφέρονται ηλεκτρόνια στο ανόδιο τα οποία κατόπιν μέσω εξωτερικού κυκλώματος φτάνουν στο θάλαμο της καθόδου όπου εκεί ευρίσκεται διαλυμένο οξυγόνο. Εν συνεχεία τα μόρια του οξυγόνου λειτουργούν ως υποδοχείς των ηλεκτρονίων αυτών εξασφαλίζοντας έτσι τη

συνεχή ροή τους από το ανόδιο δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο συλλέγεται και κατόπιν τροφοδοτούνται οι υποβρύχιοι αισθητήρες δικτύου μέσω εξωτερικής αντίστασης [26].

Οι ακουστικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπως η ενίσχυση του ήχου σε μουσικά όργανα και η απόσβεση θορύβου σε βιομηχανικές εφαρμογές. Τα στάσιμα κύματα συντονισμού σχηματίζονται όταν οι ακουστικοί ενισχυτές διεγείρονται από ένα προσπίπτων κύμα στις συχνότητες συντονισμού τους παράγοντας ακουστική ενέργεια και αυτό αποτελεί την βασική αρχή της λειτουργίας των ακουστικών πιεζοηλεκτρικών συλλεκτών ενέργειας (acoustic piezo electric harvesters). Όταν η πιεζοηλεκτρική δέσμη τοποθετείται σε ένα συντονιστή, η διαφορά πίεσης εντός της δέσμης δημιουργείται εξαιτίας της χωρικά μεταβαλλόμενης ακουστικής πίεσης συντονισμού. Αυτή η διαφορά πίεσης κατευθύνει τις δονήσεις της πιεζοηλεκτρικής δέσμης στη συχνότητα συντονισμού με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [26].

Ένα πολλαπλό υβριδικό σύστημα συλλογής ενέργειας (Multi-hybrid energy harvesting system) (Σχήμα 8.1) είναι ικανό λοιπόν να συλλέγει ενέργεια από πολλαπλές πηγές ταυτόχρονα. Οι μικροβιακές ή βιολογικές κυψέλες καυσίμου και οι ακουστικοί πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες που εξηγήσαμε παραπάνω αποτελούν τις πηγές αυτές. Η ενέργεια αυτή που συγκεντρώνεται, αποθηκεύεται αρχικά σε ένα τοπικό πυκνωτή υψηλής χωρητικότητας και κατόπιν αφού φορτιστεί πλήρως, επαναφορτίζει τις μπαταρίες του υποβρύχιου σένσορα [26].



Σχήμα 8.1: Αρχιτεκτονική πολλαπλού υβριδικού συστήματος συλλογής ενέργειας [26]

Έτερες μέθοδοι τροφοδοσίας ενέργειας υποβρύχιων ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Underwater Wireless Sensor Networks - UWSNs)

Τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (UWSN), αντιμετωπίζουν αρκετά προβλήματα κατά τη διάδοση των σημάτων όπως ενεργειακούς περιορισμούς, δυναμικές περιβαλλοντικές συνθήκες, διαφορετικές τοπολογίες και υψηλή πιθανότητα σφάλματος μετάδοσης σήματος. Βέβαια το ζήτημα που αποτελεί κοινό παρανομαστή σε όλα τα παραπάνω είναι η τροφοδοσία των αισθητήριων κόμβων καθώς οι μπαταρίες δεν έχουν μεγάλη διάρκεια παροχής ισχύος ενώ η αντικατάστασή τους σε υδάτινο περιβάλλον είναι μια πολύπλοκη διαδικασία [27] και γι' αυτό το λόγο οι καινοτομίες στον τομέα της συλλογής ενέργειας θα μπορούσαν να προσφέρουν σημαντικές λύσεις. Συγκεκριμένα λοιπόν, στη σχετική βιβλιογραφία [28] παρουσιάζεται μια πειραματική εφαρμογή κατά την οποία αξιοποιούνται βολταϊκές κυψέλες με χρήση ηλεκτροδίων από ψευδάργυρο και ορύχαλκο και ποταμίσιο νερό ως ηλεκτρολύτη. Η προκύπτουσα παραγωγή ενέργειας καλύπτει τις βασικές ενεργειακές ανάγκες του αισθητήρα ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις τροφοδοτεί πλήρως τον υποβρύχιο κόμβο. Στη μελέτη [29] προτείνεται μια ενεργειακή λύση για τους αισθητήρες επί των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων (με αξιοποίηση πρόωσης μεταβλητής πλευστότητας), εφαρμόζοντας έναν εκκρεμούς τύπου συλλέκτη ενέργειας ωκεάνιας κινητικής. Αξιοποιώντας λοιπόν την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή συλλέγει την κυματική ενέργεια του ωκεανού με τελικό προϊόν την παραγωγή επαρκούς ισχύος 150mW για κατάσταση θαλάσσης ίση με 1 και μετά από δοκιμές σε ειδική πλατφόρμα προσομοίωσης της ωκεάνιας κίνησης [1].

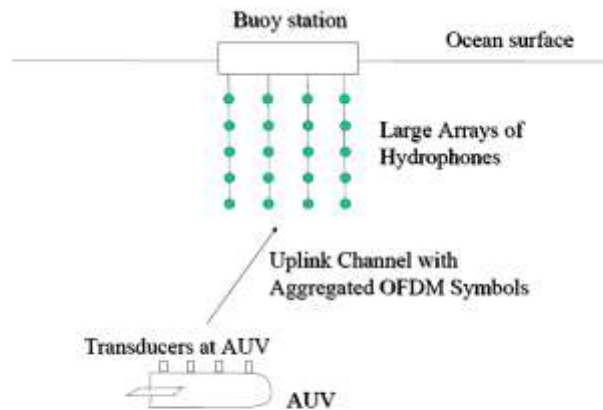
ΥΠΟΕΝΟΤΗΤΑ 8.2 ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ (MASSIVE MULTI-INPUT MULTI-OUTPUT - MASSIVE MIMO) - ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS - NOMA) - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ (MM-WAVES)

ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ (MASSIVE MULTI-INPUT MULTI-OUTPUT - MASSIVE MIMO)

Εφαρμογές όπως η παράκτια και τακτική παρακολούθηση με χρήση πολυμέσων, η υπεράκτια εξερεύνηση κοιτασμάτων πετρελαίου, η παρακολούθηση και αναφορά ρύπανσης, η στρατιωτική άμυνα, η συλλογή ωκεανογραφικών δεδομένων και οι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, συνεπάγονται υψηλή κίνηση δεδομένων ενώ ταυτόχρονα είναι επιρρεπείς και

ευαίσθητες σε καθυστερήσεις και απώλειες κατά την κίνηση των δεδομένων αυτών. Αυτό συμβαίνει διότι το υποβρύχιο περιβάλλον παρουσιάζει μοναδικούς περιορισμούς όπως υψηλές καθυστερήσεις, αυξημένο ποσοστό σφάλματος, χαμηλό εύρος ζώνης, μειωμένη απόδοση των καναλιών λόγω προβλημάτων πολλαπλών διαδρομών και εξασθένησης και υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Στο πλαίσιο εγγύησης της ποιότητας των υπηρεσιών (Quality of Services - QoS) που αφορά την υψηλή κίνηση δεδομένων που απαιτούν οι παραπάνω εφαρμογές, η μέθοδος massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για την βελτίωση της υποβρύχιας επικοινωνίας μέσω αναβάθμισης της χωρητικότητας, της φασματικής και ενεργειακής απόδοσης [31].

Στη σχετική βιβλιογραφία [30] παρουσιάζεται μια νέα προσέγγιση στον τομέα των επικοινωνιών αποκαλούμενη ως ακουστική τεχνική μεγάλης κλίμακας πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων με συνδυασμό εύρους ζώνης φερόντων (Acoustic Massive MIMO with Carrier Aggregation - AMMCA), βασισμένη στην τεχνική massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) με συνδυασμό εύρους ζώνης φερόντων (Carrier Aggregation (CA)) που δύναται να ενισχύει το ρυθμό μεταφοράς δεδομένων εντός υποβρύχιων ακουστικών καναλιών. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν σημαντήρα σε ρόλο σταθμού επιφανείας αποτελούμενο από πολλά υδρόφωνα και ένα υποβρύχιο στατικό ή κινητό κόμβο όπως είναι ένα αυτόνομο υποβρύχιο όχημα (AUV) που φέρει αριθμό μορφοτροπέων. Η προτεινόμενη αυτή ιδέα στηρίζεται σε δυο κύριους πυλώνες: (i) στην ανάπτυξη ενός μεγάλου αριθμού υδροφώνων στο σημαντήρα προς υποστήριξη της μεθόδου massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) στο δέκτη (ii) στη χρήση συνδυασμού εύρους ζώνης φερόντων με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM) με σκοπό την εκμετάλλευση ενός ευρύτερου υποβρύχιου εύρους ζώνης σε αντίθεση με τα κλασικά ακουστικά συστήματα που χρησιμοποιούν μόνο μερικές δεκάδες KHz. Κατόπιν τόσο της θεωρητικής ανάλυσης όσο και των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν σε υπολογιστή όπως αναφέρεται στο σχετικό [30], το AMMCA φαίνεται να ενισχύει τον ρυθμό δεδομένων στα υποβρύχια ακουστικά κανάλια για μεσαίες / μικρές και μεγάλες αποστάσεις.

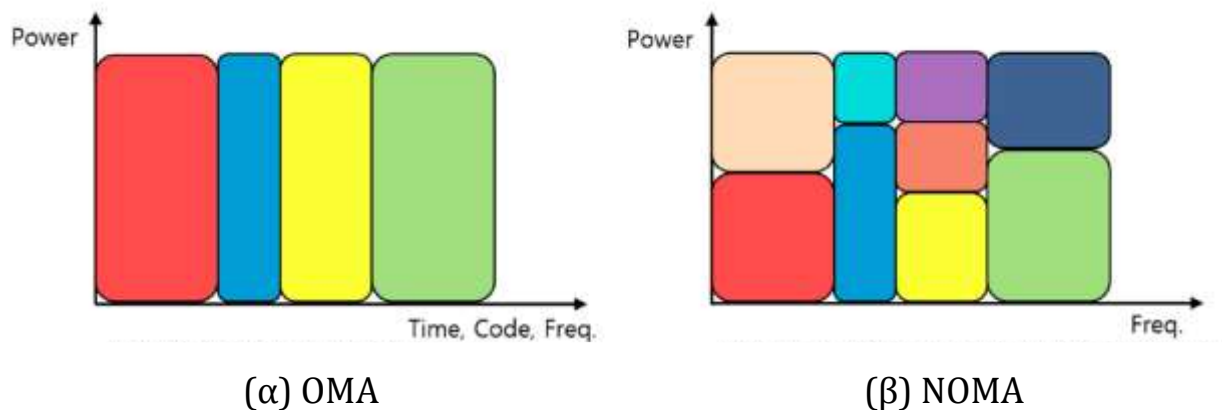


Σχήμα 8.2: Υπό μελέτη υποβρύχιο σύστημα ακουστικών επικοινωνιών όπου αριθμός υδροφώνων ευρίσκονται στον σταθμό επιφανείας προς υποστήριξη της τεχνικής Massive MIMO στο δέκτη [30]

ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS - NOMA)

Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία [90], ανάμεσα στα medium access control (MAC) πρωτόκολλα της 5^{ης} γενιάς κινητής τηλεφωνίας, ένα από τα πιο πολλά υποσχόμενα είναι το non-orthogonal multiple access (NOMA) καθώς αυξάνει τη χωρητικότητα κυψέλης. Προκειμένου να υποστηρίξει πολλαπλό αριθμό χρηστών, το πρωτόκολλο NOMA κατανέμει δισδιάστατες πηγές χρόνου-συχνότητας σε πολλούς χρήστες των οποίων η διαφορά κέρδους καναλιού είναι μεγάλη. Κάθε δέκτης κόμβου μπορεί να αποκωδικοποιήσει ένα ατομικό πακέτο ανάμεσα από πλήθος πακέτων που είναι τοποθετημένα επάλληλα μεταξύ τους στον τομέα ισχύος χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (successive interference cancellation - SIC). Συνεπώς λοιπόν το πρωτόκολλο NOMA επιτυγχάνει υψηλή χωρητικότητα κυψέλης και επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες που έχουν μεταξύ τους σημαντική διαφορά κέρδους καναλιού να μοιράζονται την ίδια πηγή/πόρο. Αντιθέτως τα κλασικά πρωτόκολλα ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (orthogonal multiple access - OMA) κατανέμουν πηγές στον κάθε χρήστη αποκλειστικά σε μορφή χρόνου ή συχνότητας ή κώδικα το οποίο και περιορίζει τη χωρητικότητα κυψέλης και τον αριθμό των χρηστών (Σχήμα 8.3). Επιπλέον παρατηρούμε ότι τα συμβατικά πρωτόκολλα OMA εμφανίζουν αδυναμίες όταν

εφαρμόζονται σε υποβρύχια κανάλια. Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time division multiple access - TDMA) απαιτεί ακριβή συγχρονισμό και συνάμα παρακολούθηση χρόνου ώστε να αποφεύγονται τυχόν δυσχέρειες κατά την εκπομπή και λήψη των σημάτων οι οποίες δύναται να υποβαθμίζουν την απόδοση του TDMA λόγω της χαμηλής αξιοποίησης του καναλιού. Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (Frequency division multiple access - FDMA), όπου το εύρος ζώνης συχνοτήτων διαιρείται σε πολλαπλά μη επικαλυπτόμενα υποκανάλια, δεν είναι κατάλληλη για τα υποβρύχια κανάλια διότι εμφανίζεται στενό εύρος ζώνης. Στην περίπτωση της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (code division multiple access - CDMA), το πρόβλημα εγγύς-μακράν είναι ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα αφού ο δέκτης δεν μπορεί να ανιχνεύσει το ασθενές σήμα παρουσία ενός ισχυρού σήματος. Αντίθετα, η τεχνική NOMA εκμεταλλεύεται τη διαφορά κέρδους μεταξύ των κόμβων δέκτη και αυτό το καθιστά κατάλληλο για τα υποβρύχια κανάλια λαμβανομένου υπόψη της σοβαρής εξασθένησης που εμφανίζουν. Επίσης στη σχετική βιβλιογραφία [90] αναφέρεται ότι η μη ορθή αξιοποίηση πόρων, που προκαλείται από άνισους χρόνους εκπομπής μεταξύ καναλιών όπου εφαρμόζεται η τεχνική NOMA, ενδέχεται να έχει δυσμενή επίδραση στο ρυθμό δεδομένων των πολλαπλών καναλιών. Ως εκ τούτου, προτείνεται ένα νέο σχήμα που ονομάζεται κατανομή ισχύος ίσου χρόνου μετάδοσης (equal transmission times - ETT) για την εξάλειψη της σπατάλης των πόρων.



Σχήμα 8.3: Η διαφορά μεταξύ OMA και NOMA [90]

Σε ένα υποβρύχιο περιβάλλον, τα εξ αποστάσεως χειριζόμενα οχήματα (Remotely operated vehicle - ROVs) και τα αυτόνομα υποβρύχια (Autonomous underwater vehicle - AUVs) κινούνται συνεχώς στην περιοχή των κόμβων των αισθητήρων συλλέγοντας ωκεανογραφικά δεδομένα από το εκεί αναπτυγμένο δίκτυο αισθητήρων. Για αυτήν τη διαδικασία απαιτείται η ύπαρξη μιας άνω και κάτω σύζευξης (up-link και down-link) όπου το πρωτόκολλο NOMA μπορεί να εφαρμοστεί και να συνδυαστεί με massive MIMO και χιλιοστομετρικά κύματα (millimeter-waves) για περαιτέρω υποστήριξη και καλύτερη απόδοση του συστήματος στο υποβρύχιο περιβάλλον [91].

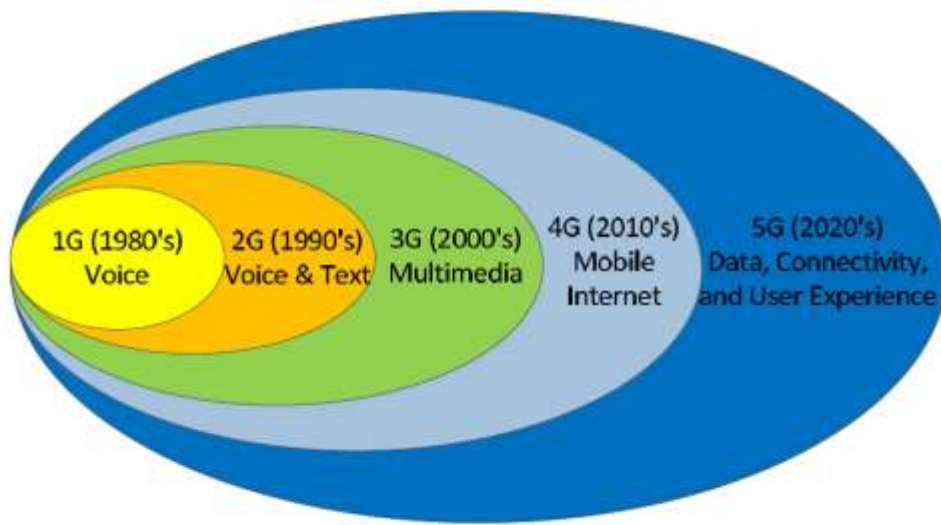
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ (mm-Waves)

Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία [1],[92],[93], με την εκρηκτική αύξηση της ζήτησης όγκου δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, προκύπτει μια ασυμβατότητα μεταξύ των απαιτήσεων χωρητικότητας και του περιορισμένου φάσματος που γίνεται ολοένα και πιο εμφανής ενώ η συμφόρηση που εμφανίζεται στο ασύρματο εύρος ζώνης αποτελεί βασικό πρόβλημα της πέμπτης γενιάς (5G) ασύρματων δικτύων. Από την άλλη πλευρά, το μεγάλο εύρος ζώνης στην περιοχή των mmWave αποτελεί μια σημαντική λύση στο πρόβλημα, με τις συχνότητες να κυμαίνονται για επίγειες ασύρματες επικοινωνίες από 30 GHz έως 300 GHz ενώ για τις υποβρύχιες από 150 έως 1500 kHz (μήκος κύματος 1-10 mm). Έτσι λοιπόν δύναται να παρέχονται υπηρεσίες επικοινωνίας πολλαπλών gigabit όπως εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας βίντεο (UHDV), τηλεοράσεις υψηλής ευκρίνειας (HDTV) ενώ παράλληλα αναπτύσσονται ολοκληρωμένα κυκλώματα complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) που θα λειτουργούν στην mmWave μπάντα. Στις υποβρύχιες δε επικοινωνίες η εκμετάλλευση της ζώνης συχνοτήτων mmWave δύναται να βρει εφαρμογή στο πεδίο απεικόνισης υψηλής ανάλυσης των σόναρ. Πάρα τούτα, υφίστανται θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ των επικοινωνιών mmWave και άλλων υφιστάμενων συστημάτων επικοινωνίας, και αφορά τις υψηλές απώλειες διάδοσης, την κατευθυντικότητα και την ευαισθησία έναντι εμποδίων. Αυτά τα χαρακτηριστικά των επικοινωνιών mmWave θέτουν πολλές προκλήσεις προς την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των επικοινωνιών αυτών, συμπεριλαμβανομένων της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, τον σχεδιασμό συστημάτων και τη διαχείριση παρεμβολών με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η εισαγωγή νέων πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών για να αντιμετωπισθούν αυτές οι προκλήσεις. Λόγω της υψηλής συχνότητας φορέα, οι επικοινωνίες mmWave

όπως αναφέρθηκε υποφέρουν από τεράστιες απώλειες διάδοσης, με συνεπακόλουθο η τεχνική μορφοποίησης δέσμης (beamforming - BF) να έχει υιοθετηθεί ως απαραίτητη, έτσι ώστε οι mmWave επικοινωνίες να θεωρούνται εγγενώς κατευθυντικές. Οι υποβρύχιες mmWave επικοινωνίες παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες καθώς αντιμετωπίζουν υψηλές απώλειες διάδοσης και είναι πιο ευαίσθητες σε εμπόδια σε σχέση με τις αντίστοιχες των RF συστημάτων. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιώντας τη ζώνη αυτή συχνοτήτων δύναται να βελτιωθεί αποτελεσματικά η απόδοση των υποβρύχιων επικοινωνιών. Από δεδομένα μετρήσεων που συλλέχθηκαν στη Νότια θάλασσα της Κίνας [92] αποδεικνύεται ότι το κανάλι επικοινωνίας στη συχνότητα των mmWave, χαρακτηρίζεται από αραιότητα ή αραιότητα συστάδας (the sparsity or cluster-sparsity) όταν η γωνία εκπομπής είναι μεγάλη. Με αφορμή αυτό το φαινόμενο, στη σχετική βιβλιογραφία [92] προτείνεται μια νέα μορφή αλγορίθμου βασιζόμενου στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Least square mean - LMS) που μπορεί να αναγνωρίσει αυτό το κανάλι επικοινωνίας και να επιτύχει υψηλή ακρίβεια εκτίμησης αφού εκμεταλλεύεται αυτές τις αραιές ιδιότητές του ενώ η μέθοδος συρρίκνωσης / απο-θορυβοποίησης βελτιώνει σημαντικά τη δυνατότητα παρακολούθησης του αραιού αυτού καναλιού που μεταβάλλεται χρονικά. Ωστόσο, υφίσταται εισέτι περιορισμένη έρευνα των mmWave στον τομέα των υποβρύχιων επικοινωνιών και απαιτούνται περισσότερες μελέτες.

ΥΠΟΕΝΟΤΗΤΑ 8.3 ΤΟ 5G ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΙΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Η ασύρματη επικοινωνία πέμπτης γενιάς είναι ένα ασύρματο δίκτυο χαμηλής καθυστέρησης, υψηλού ρυθμού δεδομένων, μεγάλης χωρητικότητας και εύρους ζώνης εν συγκρίσει με το 4G μακρόχρονης εξέλιξης (Long Term Evolution - LTE). Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία [17, 18] περισσότερες από τις μισές συσκευές παγκοσμίως ευρίσκονται συνδεδεμένες στο διαδίκτυο μέσω ασύρματης διασύνδεσης παρουσιάζοντας εκθετική αύξηση της τάξεως του 51% μόνο το 2016 σε σύγκριση με το 32% της μέσης αύξησης κίνησης ενώ τα προσεχή έτη αναμένεται να φτάσει το 63% [18]. Το 5G παρουσιάζει την μεγαλύτερη επιρροή επί των νέων εφαρμογών, όπως στο Διαδίκτυο των αντικειμένων (Internet of things - IoT) και υποβρύχιων αντικειμένων (Internet of underwater things - IoUT), στη συσκευή προς συσκευή (Device to Device - D2D) επικοινωνία και επίσης στην υποβρύχια ασύρματη επικοινωνία [19].

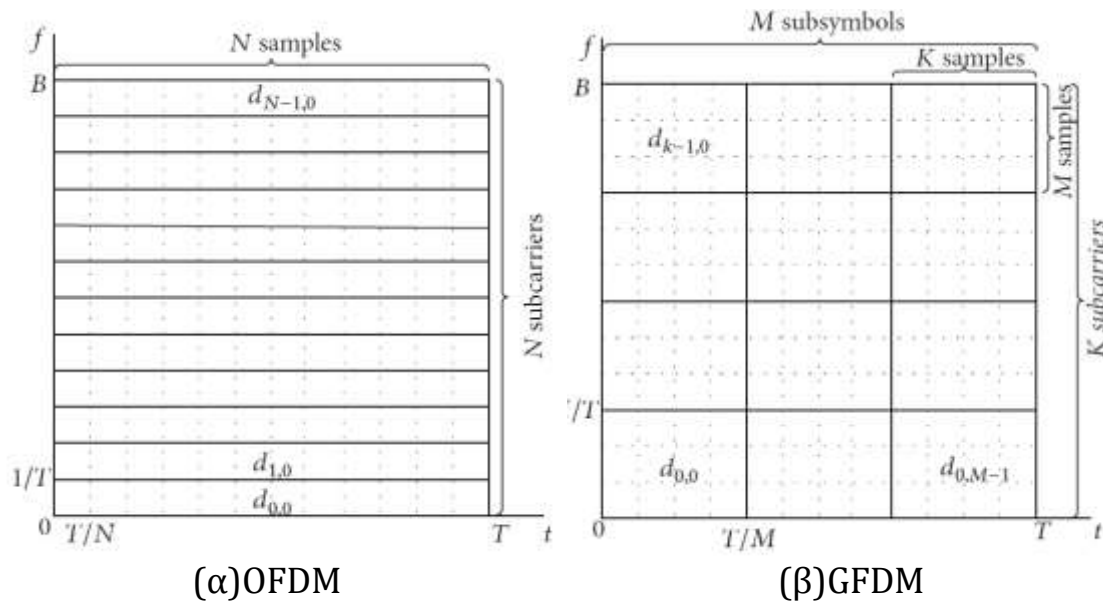


Σχήμα 8.4: Εξέλιξη του ασύρματου δικτύου ανά δεκαετία [19]

Η απαιτούμενη χωρητικότητα του ασύρματου δικτύου εξαρτάται από τη φασματική αποδοτικότητα και το εύρος ζώνης που σχετίζεται με το μέγεθος της εμβέλειας του δικτύου [20]. Το υπάρχον κυψελοειδές ασύρματο δίκτυο 4G LTE υποστηρίζει την αύξηση της χρήσης δεδομένων και της συνδεσιμότητας βασισμένο στην τεχνική ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) που υποστηρίζει μέγιστο εύρος ζώνης 20 MHz. Ο υφιστάμενος περιορισμός του εύρους ζώνης ενός καναλιού στις υποβρύχιες επικοινωνίες καθιστά την OFDM ως μια χρήσιμη, συμφέρουσα και πλεονεκτική τεχνική διαμόρφωσης καθώς συνδυάζονται να αντιμετωπίζει την επιλεκτική εξασθένηση συχνότητας [21]. Παρόλα αυτά όμως, η τεχνική αυτή δεν είναι δυνατό να ικανοποιήσει τις μελλοντικές απαιτήσεις λόγω της ανάγκης για ακριβή συγχρονισμό και για μεγαλύτερη φασματική αποδοτικότητα, απαιτήσεις οι οποίες εξασφαλίζονται από νέες τεχνικές μετάδοσης πολλαπλών φορέων [1].

Οι τεχνικές συστοιχίας φίλτρων για πολλαπλά φέροντα (FBMC - filter bank multi-carrier) και πολυπλεξίας γενικευμένης διαίρεσης συχνότητας (GFDM - generalized frequency division multiplexing) είναι νέες καινοτόμες προσεγγίσεις για την υποστήριξη των επικοινωνιακών δυνατοτήτων των υποβρύχιων καναλιών λόγω των αυξημένων απαιτήσεων των ασύρματων δικτύων 5G. Στο σχετικό [21] αναλύεται ο τρόπος που επηρεάζεται ο λόγος μέγιστης προς μέσης ισχύος PAPR (peak to average power ratio) της τεχνικής

GFDM από τα φίλτρα διαμόρφωσης παλμού. Το GFDM το οποίο βασίζεται στην τεχνική FBMC, σε αντίθεση με το OFDM, επιτρέπει την αξιοποίηση πολλαπλών χρηστών στους τομείς συχνότητας και χρόνου ενώ δύναται να υλοποιηθεί ψηφιακά. Πρόκειται ουσιαστικά για γενίκευση του κλασικού OFDM με ορισμένα επιπρόσθετα πλεονεκτήματα όπως το χαμηλό PAPR (peak to average power ratio). Επιπρόσθετα στο σχετικό [21] συγκρίνεται το PAPR με χρήση τεχνικών OFDM και GFDM ενώ παρατηρείται ότι επιλέγοντας τις κατάλληλες παραμέτρους και φίλτρα, το PAPR δύναται να περιορισθεί σε χαμηλές τιμές καθιστώντας την υποβρύχια ακουστική επικοινωνία πιο αποτελεσματική αφού μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας και το κόστος εξοπλισμού. Το GFDM είναι λοιπόν μια δισδιάστατη τμηματική δομή δεδομένων χρόνου και συχνότητας με μορφή μετάδοσης πολλαπλών φορέων που προέρχεται από την αντίστοιχη προσέγγιση-σκεπτικό της FBMC και διαιρεί τα εκπεμπόμενα δεδομένα σε υπο-ομάδες και σε κατάλληλα παλμικά διαμορφωμένους υπο-μεταφορείς. Αυτή η διαδικασία μειώνει τις εκπομπές εκτός ζώνης (out of band - OOB), επιτρέποντας έτσι τη δυναμική κατανομή του φάσματος δίχως παρουσία σοβαρών παρεμβολών. Επιπλέον στην τεχνική OFDM υφίσταται η απαίτηση για προσθήκη κυκλικού προθέματος (circular prefix - CP) σε κάθε σύμβολο ενώ στην GFDM μόνο σε κάθε τμήμα πληροφορίας βελτιώνοντας τοιούτοτρόπως τη φασματική απόδοση. Έτσι, το GFDM διατηρεί όλα τα κύρια οφέλη του OFDM με μοναδικό μειονέκτημα το γεγονός ότι υφίσταται μια επιπρόσθετη πολυπλοκότητα στην υλοποίησή της. Η δυνατότητα επιλογής του αριθμού των υποτμημάτων και των υποφορέων έχει ως αποτέλεσμα η τεχνική GFDM να δύναται να αξιοποιεί το κατακερματισμένο φάσμα αυξάνοντας σημαντικά την αποτελεσματική του χρήση ενώ εμφανίζεται ιδιαίτερα αποδοτικό σε συστήματα περιορισμένου εύρους φάσματος όπως είναι το υποβρύχιο περιβάλλον [21].



Σχήμα 8.5: Διαίρεση χρόνου και συχνότητας τεχνικών OFDM και GFDM [21]

Τέλος, το σκεπτικό της τεχνικής μεγάλης κλίμακας πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (massive - Multiple-input-multiple-output - massive-MIMO) και η τεχνική διαμόρφωσης FBMC στο πλαίσιο της 5G επικοινωνίας εξετάζονται ως προς την εφαρμογή και απόδοσή τους στα υποβρύχια ακουστικά κανάλια στο σχετικό [22] ενώ στο σχετικό [23] προτείνεται ο συνδυασμός τεχνικών MIMO-OFDM ως μια αξιόπιστη λύση που εξασφαλίζει υψηλό ρυθμό δεδομένων εκπομπής εντός υποβρυχίων καναλιών [1].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στις Ενότητες 1, 2, 3 και 4 της παρούσης εργασίας παρουσιάσθηκαν και αναλύθηκαν οι ηλεκτρομαγνητικές, οπτικές και ακουστικές υποθαλάσσιες ασύρματες επικοινωνίες και διαπιστώθηκε ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η κάθε μια από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υγρού μέσου διάδοσης. Εν συνεχεία στην Ενότητα 5 επιχειρήθηκε μια σύγκριση μεταξύ αυτών των τεχνολογιών η οποία κατέδειξε ότι η βέλτιστη επιλογή για μεταφορά πληροφορίας σχετίζεται με το περιβάλλον και τις συνθήκες που επιθυμούμε να λειτουργήσει το σύστημα. Κατόπιν στην ενότητα 6 μελετήθηκαν τα δίκτυα υποβρύχιων αισθητήρων (Under Water Sensor Networks – UWSN) και οι αρχιτεκτονικές τους όπου βρίσκει εφαρμογή το σύνολο των υποθαλάσσιων ασύρματων επικοινωνιών. Στην ενότητα 7 έλαβε χώρα μια εκτεταμένη ανάλυση της αρχιτεκτονικής του IoUT καθώς και των επιπέδων λήψης, δικτύου και εφαρμογής ενώ παρουσιάσθηκαν αναλυτικά τέσσερα πρακτικά σενάρια εφαρμογών. Επιπρόσθετα αναλύθηκαν τα ωφέλη των επικοινωνιών αυτών από την ολοκλήρωση του 5G δικτύου ενώ εκτέθηκαν τα πλεονεκτήματα της νέας τεχνικής GFDM έναντι της OFDM η οποία επαυξάνει τις επικοινωνιακές δυνατότητες των υποβρυχίων καναλιών. Στην τελευταία ενότητα εκτέθηκαν καινοτόμα συστήματα συλλογής ενέργειας και στη συνέχεια αναλύθηκε ο εξέχων ρόλος των τεχνικών Massive MIMO, NOMA και mm-Waves προς τη βελτίωση της υποβρύχιας επικοινωνίας μέσω αναβάθμισης της χωρητικότητας, της φασματικής και της ενεργειακής απόδοσης.

Όλες οι τεχνολογίες και οι μέθοδοι που αναλύθηκαν σε αυτή την εργασία δύναται να αποτελέσουν το σημείο αναφοράς για την κατανόηση και επίλυση των πολύπλοκων προβλημάτων λόγω του ιδιαίτερου και απαιτητικού υποβρύχιου περιβάλλοντος. Συμπερασματικά λοιπόν, για την επίτευξη μιας αξιόπιστης υποβρύχιας επικοινωνίας, αποτελεί πρόκληση η εφαρμογή ευέλικτων ετερογενών επικοινωνιακών συστημάτων που θα περιλαμβάνουν το σύνολο των ειδών της υποβρύχιας επικοινωνίας. Τα υποβρύχια δίκτυα επικοινωνιών και κατ' επέκταση το IoUT θα πρέπει να βασίζονται στην εφαρμογή και επιλογή μιας κατάλληλης αρχιτεκτονικής όπου θα αξιοποιούνται οι βέλτιστοι τύποι υποθαλάσσιων ασύρματων επικοινωνιών αναλόγως των συνθηκών και του περιβάλλοντος δράσης λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις συγκεκριμένες – ιδιαίτερες ιδιότητες του υδάτινου μέσου. Επιπλέον η κατάλληλη τοποθέτηση και διάταξη των σταθμών επιφανείας, των

ενδιάμεσων υποβρύχιων σταθμών όπως ROVs και AUVs καθώς και των αισθητήριων κόμβων είναι εξαιρετικά σημαντική προς την επίτευξη της υποβρύχιας επικοινωνίας. Επιπρόσθετα η εφαρμογή νέων τεχνολογιών όπως Massive MIMO, AMMCA, NOMA και mm-Waves δύναται να ενισχύσουν τον ρυθμό των δεδομένων και την χωρητικότητα κυψέλης (ήτοι πολλοί χρήστες να μοιράζονται τις ίδιες πηγές - πόρους) καθώς επίσης να υποστηρίξουν την υψηλή κίνηση των δεδομένων και να αναβαθμίσουν τη φασματική και ενεργειακή απόδοση εξαλείφοντας την σπατάλη πόρων εντός ενός υποβρύχιου καναλιού. Παράλληλα καινοτόμες τεχνολογίες σχετικά με τα συστήματα συλλογής ενέργειας δύναται να επιτρέπουν τη λειτουργία των ηλεκτρονικών τμημάτων ενός υποβρύχιου συστήματος όταν δεν υπάρχει συμβατική πηγή ισχύος, δίχως να υφίσταται πλέον ανάγκη ύπαρξης καλωδίων ή συχνών απαιτήσεων αντικατάστασης των μπαταριών. Τέλος το 5G δίκτυο δρα υποστηρικτικά προς τα UWSN αφού βελτιώνει τις υποβρύχιες επικοινωνιακές δυνατότητες αυξάνοντας τη φασματική απόδοση και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος εξοπλισμού με την εισαγωγή της νέας τεχνικής GFDM.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Mohammad Furqan Ali, Dushantha Nalin K. Jayakody, Yury Alexandrovich Chursin, Sofeine Affes, Sonkin Dmitry (2019) Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications
2. Lanzagorta M (2012) Underwater communications. Synth Lect Commun 5(2):1–129
3. Gussen C, Diniz P, Campos M, Martins WA, Costa FM, Gois JN (2016) A survey of underwater wireless communication technologies. J Commun Inf Sys 31(1):242–255
4. Akyildiz IF, Pompili D, Melodia T (2004) Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks. ACM Sigbed Rev 1(2):3–8
5. Domingo MC (2012) An overview of the internet of underwater things. J Netw Comput Appl 35(6):1879–1890
6. Garcia M, Sendra S, Atenas M, Lloret J (2011) Underwater wireless ad-hoc networks: a survey. Mobile ad hoc networks: current status and future trends, pp. 379–413. Available: <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9780429192227>
7. West Lothian U (2007) Electromagnetic propagation in sea water and its value in military systems. In: SEAS DTC Technical Conference, pp. 1–6
8. Kaur N, Singh P, Kaur P (2016) Under water environment: a brief of explored work and future scope. Int J Comput Appl 0975:8887
9. Gabriel C, Khalighi M-A, Bourennane S, Lion P, Rigaud V(2013) Monte-carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems. J Opt Commun Netw 5(1):1–12
10. Cochenour BM, Mullen LJ, Laux AE (2008) Characterization of the beam-spread function for underwater wireless optical communications links. IEEE J Ocean Eng 33(4):513–521
11. Che X, Wells I, Dickers G, Kear P, Gong X (2010) Re-evaluation of rf electromagnetic communication in underwater sensor networks. IEEE Commun Mag 48(12):143–151
12. Gkikopouli A, Nikolakopoulos G, Manesis S (2012) A survey on underwater wireless sensor networks and applications. In: 2012 20th Mediterranean Conference on control & automation (MED). IEEE, pp 1147–1154
13. Guo Z, Li Z, Hong F (2009) USS-TDMA: self-stabilizing TDMA algorithm for underwater wireless sensor network. In: International conference on computer engineering and technology, 2009 (ICCET'09) , vol. 1. IEEE, pp 578–582

14. Kao C-C, Lin Y-S, Wu G-D, Huang C-J (2017) A comprehensive study on the internet of underwater things: applications, challenges, and channel models. *Sensors* 17(7):1477
15. Davis A, Chang H (2012) Underwater wireless sensor networks. In: *Proceedings of IEEE oceans*, pp. 1–5
16. Freitag L, Stojanovic M, Grund M, Singh S (2002) Acoustic communications for regional undersea observatories. In: *Proceedings of oceanology international*, pp 5–8
17. Agiwal M, Roy A, Saxena N (2016) Next generation 5g wireless networks: a comprehensive survey. *IEEE Commun Surv Tutor* 18(3):1617–1655
18. CISCO (March 2017) Global mobile data traffic forecast update, 2016–2021, p white paper
19. Pirinen P (2014) A brief overview of 5g research activities. In: *1st international conference on 5G for ubiquitous connectivity (5GU)*, 2014. IEEE, pp 17–22
20. Stallings W (2007) *Data and computer communications*. Pearson Education India, New Delhi
21. Wu J, Ma X, Qi X, Babar Z, Zheng W (2017) Influence of pulse shaping filters on papr performance of underwater 5g communication system technique: GFDM. In: *Wireless communications and mobile computing*, vol 2017
22. Aminjavaheri A, Farhang-Boroujeny B (2015) UWA massive mimo communications. In: *OCEANS'15 MTS/IEEE Washington*. IEEE, pp 1–6
23. Li B, Huang J, Zhou S, Ball K, Stojanovic M, Freitag L, Willett P (2009) Mimo-ofdm for high-rate underwater acoustic communications. *IEEE J Ocean Eng* 34(4):634–644
24. Energy harvesting in underwater acoustic networks, p. white paper, 2012
25. Perera TDP, Jayakody DNK, Sharma SK, Chatzinotas S, Li J (2017) Simultaneous wireless information and power transfer (swipt): recent advances and future challenges. *IEEE Commun Surv Tutor* 20(1):264–302
26. Srujana BS, Mathews P, Harigovindan V et al (2015) Multisource energy harvesting system for underwater wireless sensor networks. *Proc Comput Sci* 46:1041–1048
27. Saeed N, Celik A, Al-Naffouri T, Alouini M-S (2018) Energy harvesting hybrid acoustic-optical underwater wireless sensor networks localization. *Sensors* 18(1):51
28. Rezaei HF, Kruger A, Just C (2012) “An energy harvesting scheme for underwater sensor applications. In: *2012 IEEE international conference on electro/information technology (EIT)*. IEEE, pp 1–4

29. Ding W, Song B, Mao Z, Wang K (2015) Experimental investigation on an ocean kinetic energy harvester for underwater gliders. In: 2015 IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE). IEEE, pp 1035–1038
30. Zhao X, Pompili D (2015) AMMCA: acoustic massive MIMO with carrier aggregation to boost the underwater communication data rate. In: Proceedings of the 10th international conference on underwater networks & systems. ACM, p 5
31. Lawal B, Ali SSA, Awang AB (2016) Massive mimo systems for underwater acoustic communication. In: IEEE international conference on Underwater system technology: theory and applications (USYS). IEEE, pp 159–164
32. C. Gabriel, M. Khalighi et al., “Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–12, January 2013. doi: 10.1364/JOCN.5.000001
33. J. Simpson, B. Hughes, and J. Muth, “Smart Transmitters and Receivers for Underwater Free-Space Optical Communication,” *Selected Areas in Communications*, IEEE Journal on, vol. 30, no. 5, pp. 964–974, June 2012. doi: 10.1109/JSAC.2012.120611
34. S. Arnon, “An underwater optical wireless communication network,” in *Proc. SPIE 7464, Free-Space Laser Communications IX*, 2010
35. M. Lanzagorta, *Underwater Communication*, ser. Synthesis Lectures on Communications. Morgan & Claypool Publishers, 2012, vol. 5.
36. T. Riedl and A. Singer, “Broadband Doppler Compensation: Principles and New Results,” in *Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on, 2011. doi: 10.1109/ACSSC.2011.6190149 pp. 944–946
37. R. Diamant, A. Feuer, and L. Lampe, “Choosing the Right Signal: Doppler Shift Estimation for Underwater Acoustic Signals,” in *7th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems*, Los Angeles, CA, USA, November 2012
38. K. Perrine, K. Nieman et al., “Doppler estimation and correction for shallow underwater acoustic communications,” in *Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, 2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on, 2010. doi: 10.1109/ACSSC.2010.5757663 pp. 746–750
39. O. Rabaste and T. Chonavel, “Estimation of multipath channels with long impulse response at low snr via an mcmc method,” *Signal Processing*, IEEE Transactions on, vol. 55, no. 4, pp. 1312–1325, 2007. doi: 10.1109/TSP.2006.888060

40. C. H. Yuen and B. Farhang-Boroujeny, "Doppler scaling correction in ofdm," in Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on, June 2013. doi: 10.1109/ICC.2013.6655317 pp. 4713–4717
41. A. Abdelkareem, B. Sharif et al., "Low-complexity doppler compensation for ofdm-based underwater acoustic communication systems," in OCEANS, 2011 IEEE - Spain, June 2011. doi: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003384 pp. 1–6
42. T. Kang and R. Iltis, "Fast-varying doppler compensation for underwater acoustic ofdm systems," in Signals, Systems and Computers, 2008 42nd Asilomar Conference on, October 2008. doi: 10.1109/ACSSC.2008.5074548 pp. 933–937
43. A. Kibangu, L. Ros, and C. Siclet, "Doppler estimation and data detection for underwater acoustic zf-ofdm receiver," in Wireless Communication Systems (ISWCS), 2010 7th International Symposium on, September 2010. doi: 10.1109/ISWCS.2010.5624286 pp. 591–595
44. B. Li, S. Zhou et al., "Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform doppler shifts," Oceanic Engineering, IEEE Journal of, vol. 33, no. 2, pp. 198–209, April 2008. doi: 10.1109/JOE.2008.920471
45. S. Mason, C. Berger et al., "Detection, synchronization, and Doppler scale estimation with multicarrier waveforms in underwater acoustic communication," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 26, no. 9, pp. 1638–1649, December 2008. doi: 10.1109/JSAC.2008.081204
46. J. Trubuil and T. Chonavel, "Accurate doppler estimation for underwater acoustic communications," in OCEANS, 2012 - Yeosu, May 2012. doi: 10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263500 pp. 1–5
47. K. Tu, T. Duman et al., "Multiple-resampling receiver design for ofdm over doppler-distorted underwater acoustic channels," Oceanic Engineering, IEEE Journal of, vol. 38, no. 2, pp. 333–346, April 2013. doi: 10.1109/JOE.2012.2221812
48. Y. Zakharov and V. Kodanov, "Multipath-doppler diversity of ofdm signals in an underwater acoustic channel," in Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000. ICASSP '00. Proceedings. 2000 IEEE International Conference on, vol. 5, 2000. doi: 10.1109/ICASSP.2000.861150 pp.2941–2944
49. C. H. Yuen and B. Farhang-Boroujeny, "Non-linear doppler scaling correction in underwater acoustic channels: Analysis and simulation," in Oceans - San Diego, 2013, Sept 2013, pp. 1–7
50. W. Li and J. C. Preisig, "Estimation of rapidly time-varying sparse channels," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 32, no. 4, pp. 927–939, Oct 2007. doi: 10.1109/JOE.2007.906409

51. M. Stojanovic, "Ofdm for underwater acoustic communications: Adaptive synchronization and sparse channel estimation," in 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, March 2008. doi: 10.1109/ICASSP.2008.4518853 pp. 5288–5291
52. C. R. Berger, S. Zhou et al., "Sparse channel estimation for multicarrier underwater acoustic communication: From subspace methods to compressed sensing," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 58, no. 3, pp. 1708–1721, March 2010. doi: 10.1109/TSP.2009.2038424
53. T. Kang and R. A. Iltis, "Iterative carrier frequency offset and channel estimation for underwater acoustic ofdm systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 26, no. 9, pp. 1650–1661, December 2008. doi: 10.1109/JSAC.2008.081205
54. K. Pelekanakis and M. Chitre, "Adaptive sparse channel estimation under symmetric alpha-stable noise," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 6, pp. 3183–3195, June 2014. doi: 10.1109/TWC.2014.042314.131432
55. J. Li and Y. V. Zakharov, "Sliding window adaptive filter with diagonal loading for estimation of sparse uwa channels," in OCEANS 2016 -Shanghai, April 2016. doi: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485346 pp. 1–5
56. A. B. Baggeroer, "An overview of acoustic communications from 2000-2012," in Underwater Communications: Channel Modelling & Validation (UComms). Sestri Levante, Italy: NATO Centre for Maritime Research and Experimentation, September 2012
57. H. C. Song, "An overview of underwater time-reversal communication," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. PP, no. 99, pp. 1–12, 2015 doi: 10.1109/JOE.2015.2461712
58. M. Fink, "Time-Reversed Acoustics," Scientific American, pp. 91–97, November 1999
59. M. Fink, "Time Reversal of Ultrasonic Fields – Part I: Basic Principles," Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, vol. 39, no. 5, pp. 555–566, September 1992. doi: 10.1109/58.156174
60. J. W. Choi, T. Riedl et al., "Adaptive Linear Turbo Equalization Over Doubly Selective Channels," Oceanic Engineering, IEEE Journal of, vol. 36, no. 4, pp. 473–489, 2011. doi: 10.1109/JOE.2011.2158013
61. M. Tuchler, R. Koetter, and A. C. Singer, "Turbo equalization: principles and new results," IEEE Transactions on Communications, vol. 50, no. 5, pp. 754–767, May 2002. doi: 10.1109/TCOMM.2002.1006557
62. R. Otnes and M. Tuchler, "Iterative channel estimation for turbo equalization of time-varying frequency-selective channels," IEEE Transactions on Wireless

- Communications, vol. 3, no. 6, pp. 1918–1923, Nov 2004. doi: 10.1109/TWC.2004.837421
63. R. Otnes and T. H. Eggen, “Underwater acoustic communications: Longterm test of turbo equalization in shallow water,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 321–334, July 2008. doi: 10.1109/JOE.2008.925893
64. K. Fang, L. Rugini, and G. Leus, “Low-complexity block turbo equalization for ofdm systems in time-varying channels,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 11, pp. 5555–5566, Nov 2008. doi: 10.1109/TSP.2008.929129
65. L. Freitag, M. Grund et al., “A bidirectional coherent acoustic communication system for underwater vehicles,” in *OCEANS ’98 Conference Proceedings*, vol. 1, 1998. doi: 10.1109/OCEANS.1998.725794 pp. 482–486
66. J. Kojima, T. Ura et al., “High-speed acoustic data link transmitting moving pictures for autonomous underwater vehicles,” in *Underwater Technology, 2002. Proceedings of the 2002 International Symposium on*, 2002. doi: 10.1109/UT.2002.1002439 pp. 278–283
67. C. Pelekanakis, M. Stojanovic, and L. Freitag, “High rate acoustic link for underwater video transmission,” in *OCEANS 2003. Proceedings*, vol. 2, 2003. doi: 10.1109/OCEANS.2003.178494 pp. 1091–1097
68. H. Ochi, Y. Watanabe et al., “The acoustic communication experiment at 1,600 m depth using qpsk and 8psk,” in *OCEANS 2010*, 2010. doi: 10.1109/OCEANS.2010.5664308 pp. 1–5
69. M. Tivey, P. Fucile, and E. Sichel, “A low power, low cost, underwater optical communication system,” in *Ridge 2000 Events*, April 2004, pp. 27–29
70. F. Schill, U. R. Zimmer, and J. Trumpf, “Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications,” in *Australian Conf. on Robotics and Automation (ACRA)*, Canberra, Australia, December 2004
71. M. Doniec, I. Vasilescu et al., “AquaOptical: A Lightweight Device for High-Rate Long-Range Underwater Point-to-Point Communication,” in *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, 2009, pp. 1–6
72. N. Farr, A. Bowen et al., “An integrated, underwater optical /acoustic communications system,” in *OCEANS 2010 IEEE. Sydney, Australia: IEEE*, May 2010. doi: 10.1109/OCEANSSYD.2010.5603510 pp. 1–6
73. Ehrenberg JE, Steig TW. A method for estimating the position accuracy of acoustic fish tags. *ICES Journal of Marine Science* 2001;59:140–9

74. Ehrenberg JE, Steig TW. A study of the relationship between tag-signal characteristics and achievable performances in acoustic fish-tag studies. *ICES Journal of Marine Science* 2009;66:1278–83
75. Steig TW, Johnston SV. Behavioral results from acoustically tagged fish using innovative techniques for analyzing three-dimensional data. In: *Proceedings of OCEANS 2010*; September 2010
76. Potter JR, Berni A, Alves J, Merani D, Zappa G, Been R. Underwater communications protocols and architecture developments at NURC. In: *Proceedings of IEEE OCEANS 2011*. Santander, Spain; June 2011
77. Fall K, Farrell S. DTN: an architectural retrospective. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 2008;26(5):828–36
78. Merani D, Berni A, Potter J, Martins R. An underwater convergence layer for disruption tolerant networking. In: *Proceedings of the Baltic conference on future internet communications (BCFIC 2011)*. Riga, Latvia; February 2011
79. Ayaz M, Baig I, Abdullah A, Faye I. A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications* 2011;34(6):1908–27
80. Fielding RT, Taylor RN. Principled design of the modern web architecture. *ACM Transactions on Internet Technology* 2002;2(2):115–50
81. Pinto J, Martins R, Sousa JB. Towards a REST-style architecture for networked vehicles and sensors. In: *Proceedings of the 8th IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (PERCOM work-shops)*; March 2010
82. Newborough D., Woodward B. Diver navigation and tracking system. In: *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS '99*; 1999
83. Patrikalakis NM, Hover FS, Ooi BH, Zheng H, Yeo KT, Cho W, et al. Infrastructure for mobile sensor network in the Singapore coastal zone. In: *Proceedings of the 20th international offshore and polar engineering conference (ISOPE 2010)*. Beijing, China; June 2010
84. Akyildiz IF, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks* 2005;3(3):257–79
85. Barr S, Wang J, Liu B. An efficient method for constructing underwater sensor barriers. *Journal of Communications* 2011;6(5):370–83
86. Chung H, Polak E, Royset JO, Sastry SS. On the optimal detection of an underwater intruder in a channel using unmanned underwater vehicles. *Naval Research Logistics* 2011;58(8):804–20
87. Narasimhan P. Assistive embedded technologies. *Computer* 2006;39(7):85–7
- Neiffer DL, Stamper MA. Fish sedation, anesthesia, analgesia, and euthanasia: considerations, methods, and types of drugs. *ILAR Journal* 2009;50(4):343–60

88. Trebar M, Grah A, Melcon AA, Parreno A. Towards RFID traceability systems of farmed fish supply chain. In: Proceedings of the 19th international conference on software, telecommunications and computer networks (SoftCOM); Sep-tember 2011
89. Morales R, Keitler P, Maier P, Klinker G. An underwater augmented reality system for commercial diving operations. In: Proceedings of OCEANS 2009; October 2009
90. 118. Cheon J, Cho H-S (2017) Power allocation scheme for non orthogonal multiple access in underwater acoustic communications. *Sensors* 17(11):2465
91. 119. Wan D, Wen M, Ji F, Yu H, Chen F (2018) Non-orthogonal multiple access for cooperative communications: challenges, opportunities, and trends. *IEEE Wirel Commun* 25(2):109–117
92. 127. Zhang Y, Xiao S, Liu L, Sun D (2016) “Analysis and estimation of the underwater acoustic millimeter-wave communication channel. In: Ocean acoustics (COA), 2016 IEEE/OES China. IEEE, pp 1–5
93. 130. Niu Y, Li Y, Jin D, Su L, Vasilakos AV (2015) A survey of millimeter wave communications (mmwave) for 5g: opportunities and challenges. *Wireless Netw* 21(8):2657–2676