

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Tesi di laurea in:

Ingegneria dell'Informazione

TECNICHE ARQ PER RETI ACUSTICHE SOTTOMARINE

Relatore: *Leonardo Badia*

Laureando: *Marco Rossi*

Correlatore: *Paolo Casari*

Sessione di Settembre
Anno Accademico 2011/2012

Pagina 2

Pagina 3
INDICE

Sommario.....	5
Introduzione.....	7
Capitolo 1 – Reti di sensori sottomarine.....	9
1.1 Attenuazione.....	11
1.2 Elevati ritardi, rumore e propagazione multipath.....	12
1.3 Struttura interna di un sensore sottomarino.....	13
1.4 Topologia e architettura delle reti acustiche sottomarine.....	14
1.4.1 Topologia centralizzata	15
1.4.2 Topologia distribuita.....	16
1.4.3 Topologia multihop.....	17
1.4.4 Architettura.....	17
Capitolo 2 – Automatic Retransmission reQuest.....	21
2.1 Arresta e attendi ARQ (SW), Torna indietro N ARQ (GBN), Ripetizione selettiva ARQ (SR).	22
2.2 Stop and Wait ARQ 1	25
2.3 Stop and Wait ARQ 2	26

2.4 Ripetizione selettiva ARQ	27
2.5 Juggling Selective Repeat ARQ	28
Capitolo 3 – Grafici e commenti.....	31
3.1 Probabilità di errore sul bit.....	31
3.2 Dimensione ottima dei pacchetti.....	33
3.2.1 Dimensione ottima del pacchetto per SW ARQ 2.....	34
3.2.2 Dimensione ottima del pacchetto per SR ARQ.....	36
Capitolo 4 – Conclusioni.....	39
Bibliografia.....	41

Pagina 5

Sommario

In questa tesi vengono esposti alcuni degli aspetti fondamentali della comunicazione acustica sottomarina, tra cui le caratteristiche del canale trasmissivo e due possibili architetture per le reti di sensori sottomarini, una bidimensionale l'altra tridimensionale. Successivamente si tratterà di come tale comunicazione tra i vari sensori possa essere resa sicura ed efficace: l'utilizzo di protocolli di Automatic Retransmission reQuest (ARQ) permette infatti di ritrasmettere i pacchetti andati persi o ricevuti in maniera errata in modo da poterli consegnare correttamente. Dopo un'introduzione generale su questa tipologia di correzione d'errore verrà analizzato il protocollo ARQ più semplice da implementare, l'ARQ stop and wait, per poi passare invece allo studio di un protocollo più efficiente, ripetizione selettiva l'ARQ.

Per entrambi i protocolli infine, al variare di diversi parametri, verrà calcolata e messa a confronto l'efficienza, indice delle prestazioni effettive di un sistema di telecomunicazione.

Pagina 7

Introduzione

Il recente sviluppo delle tecnologie wireless ha reso possibile la comunicazione senza fili tra due o più nodi di una determinata rete in maniera sempre più veloce ed efficiente.

Oltre che nelle più conosciute e studiate comunicazioni terrestri, ovvero nell'etere, grandi possibilità di sviluppo e innovazione sono presenti anche nelle comunicazioni sottomarine [1].

Esse infatti sono diventate argomento di studio solamente a partire dalla seconda guerra mondiale, per permettere la comunicazione tra i sottomarini americani [2].

Le reti di sensori sottomarini trovano oggi applicazioni nella raccolta di dati relativi agli oceani e i principali ambiti di utilizzo sono: prevenzione di disastri naturali (eruzioni

sottomarine, attività sismiche e conseguenti tsunami), monitoraggio dell'inquinamento (chimico e/o naturale), sorveglianza militare, assistenza alla navigazione (identificazione di rocce e iceberg presenti sul fondo del mare) ed esplorazioni sottomarine (scoperta di nuovi giacimenti petroliferi) [3], [4], [5]. Per rendere possibili tutte queste applicazioni è necessario stabilire una comunicazione sicura ed affidabile tra i vari sensori sottomarini; essi devono inoltre essere in grado di coordinare le loro operazioni, di scambiarsi informazioni utili e di inviare i dati raccolti a una stazione sulla costa vicina [1]. Come viene riferito in [6] l'approccio tradizionale per il controllo dei fondali oceanici avveniva tramite l'uso di sensori che registravano i dati durante la missione di monitoraggio e solo una volta recuperati tali sensori era possibile accedere ai dati ottenuti. Tale metodo presenta tuttavia una serie di svantaggi [1]:

- Capacità di memoria limitata: una volta raggiunta la capacità del sensore non è più possibile immagazzinare nuovi dati; è necessario pertanto recuperare il sensore e liberare la memoria prima che esso possa tornare in funzione.
- Impossibilità di monitoraggio real-time: i dati ottenuti sono accessibili solo una volta che i sensori sono stati recuperati. Tale svantaggio risulta molto limitante in particolare per applicazioni riguardanti prevenzione di disastri ambientali e applicazioni militari, per esse infatti è necessario ottenere i dati registrati il più velocemente possibile.
- Assenza di controllo di errori: nel caso in cui si presenti un errore non sarebbe possibile accorgersene sino a quando i sensori non vengono recuperati, questo limite potrebbe portare ad esempio al completo fallimento di una missione di monitoraggio.

7

Pagina 8

- Impossibilità di riconfigurare i sistemi durante una operazione: non sono possibili interazioni con i sistemi di controllo terrestri, pertanto, in caso di necessità, non si possono modificare o riconfigurare gli strumenti.

Alla luce di quanto detto quindi è necessario dar luogo a una comunicazione sicura ed efficiente tra tutti gli strumenti in gioco, obiettivo raggiungibile attraverso collegamenti wireless basati su comunicazioni di tipo acustico [7].

Tale sicurezza ed efficienza è invece ottenibile utilizzando tecniche di Automatic Retransmission reQuest (ARQ) i cui dettagli verranno presentati nella parte seconda di

questa tesi dopo aver dato una visione generale, nel capitolo 1, delle reti acustiche sottomarine e dei principali problemi (assorbimento, rumore, attenuazione) che le caratterizzano. Nella parte terza verranno discussi i risultati più importanti ottenuti mentre nella quarta verranno stilate le principali conclusioni.

Capitolo 1 - Reti di sensori sottomarine

Per realizzare una rete sottomarina, si incontra una serie di difficoltà da superare. Sono necessari studi e ricerche a sé stanti, in quanto si presenta un elevato numero di differenze con la comunicazione terrestre [1].

Per quanto riguarda i sensori, le principali differenze tra quelli terrestri e quelli sottomarini

sono le seguenti:

- Il costo: i sensori sottomarini sono più costosi rispetto quelli terrestri, questo in particolare per la protezione che necessitano tutti i componenti del sensore date le condizioni estreme dell'ambiente oceanico.
- La potenza: in ambiente sottomarino le comunicazioni necessitano sicuramente più potenza rispetto quelle terrestri, ciò è dovuto alle lunghe distanze che i segnali devono percorrere ma soprattutto alle forti attenuazioni inserite dal canale.
- La memoria: i sensori sottomarini hanno bisogno di una memoria maggiore rispetto quelli terrestri; questo perché il canale sottomarino potrebbe essere intermittente, periodo in cui non si potrebbero inviare i dati raccolti alla stazione di controllo.

Tuttavia la differenza più significativa e rilevante riguarda il canale sottomarino, caratterizzato da una ben maggiore attenuazione rispetto quello terrestre [8].

Diventa quindi di fondamentale importanza la scelta della tipologia di collegamento tra i vari sensori della rete. È possibile infatti realizzare comunicazioni sottomarine utilizzando onde di tre tipi differenti: elettromagnetiche, ottiche e acustiche.

Le onde elettromagnetiche sono in grado di propagarsi attraverso l'acqua del mare solo a frequenze estremamente ridotte (dell'ordine di qualche centinaio di hertz), tale limitazione richiede l'impiego di grandi antenne e un'elevata potenza in trasmissione. A sostegno di questa affermazione in [1] viene citato un esperimento svolto al Robotic Embedded Systems Laboratory (RESL) dell'Università del Sud California: in ambiente sottomarino con frequenze pari a 433 MHz si raggiungono range di trasmissione di circa 120 cm. Con range di trasmissione si intende la distanza oltre la quale il segnale trasmesso risulterebbe troppo attenuato per essere correttamente rilevato dal ricevitore.

Le onde elettromagnetiche inoltre risentono di una forte attenuazione, dovuta all'assorbimento del mezzo. L'assorbimento si realizza quando si pone una porzione di

materia (acqua, vetro, etc) a contatto con una radiazione elettromagnetica e tale materia è in grado di assorbire energia dalla radiazione stessa. L'assorbimento è funzione della natura della materia ma in particolare dipende direttamente dalla sua frequenza [9], rendendo le onde elettromagnetiche inutilizzabili per applicazioni pratiche.

Per quanto riguarda le onde ottiche, nonostante siano meno colpite da così forti attenuazioni, anch'esse non sono adatte alle trasmissioni sottomarine poiché sono soggette allo scattering della luce [1]. Tale effetto consiste nella deflessione (ovvero nel cambio di traiettoria) di alcune particelle dovuta alla collisione con altre [10]. Lo scattering quindi porta a una degradazione del segnale e rende questo tipo di onde utilizzabili solo per range di trasmissione molto ridotti.

Quindi la stragrande maggioranza dei collegamenti sottomarini sono basati su comunicazioni di tipo acustico.[7]

Anche questa tipologia di trasmissione riscontra comunque una serie di problemi; i fattori che principalmente la influenzano sono: elevati e variabili tempi di propagazione, l'attenuazione, il rumore e la propagazione multi-path (ovvero su più percorsi). Questo insieme di fattori rendono il canale acustico variabile sia nello spazio che nel tempo. La sua banda risulta molto limitata e fortemente dipendente dalla frequenza e dalla distanza.

Nella tabella 1 vengono mostrate le tipiche bande disponibili al variare della distanza.

Si nota come la larghezza di banda disponibile diminuisca all'aumentare della distanza tra trasmettitore e ricevitore; ciò accade perché al crescere della frequenza trasmissiva cresce anche l'assorbimento dell'onda nel mezzo, portando di conseguenza a una comunicazione poco affidabile.

Tabella 1: Banda disponibile a seconda delle varie distanze, tratto da [1]

Tutte queste caratteristiche impongono l'utilizzo di frequenze trasmissive al di sotto di 20

kHz ed implicano di conseguenza bit-rate molto bassi, tipicamente minori di 10 kbps [11]. Andiamo ora ad analizzare brevemente questi fattori che influenzano la comunicazione acustica, riservando particolare attenzione all'attenuazione introdotta dal canale sottomarino. Successivamente passeremo alla struttura interna dei sensori e alla topologia delle reti sottomarine.

1.1 Attenuazione

L'attenuazione è principalmente dovuta all'assorbimento nel mezzo che avviene per conversione di energia acustica in calore; essa inoltre cresce all'aumentare della distanza e della frequenza.

In un canale acustico sottomarino l'attenuazione può essere espressa come segue [12]:

$$A(l, f) = l^{-k} \cdot A(f)^l$$

Dove l è la distanza, k è il coefficiente di propagazione e a è un termine che dipende dalla frequenza e si può ottenere dal coefficiente di assorbimento $\alpha(f)$, come mostrato poco più avanti. Il coefficiente k descrive la geometria della propagazione dell'onda; fondamentalmente esistono due tipi di propagazione: quella cilindrica ($k = 1$), usata per link orizzontali e in acque poco profonde, e quella sferica ($k = 2$) per comunicazioni in acque profonde. Solitamente per scopi pratici il valore tipico da assegnare è $k = 1,5$. Per quanto riguarda il termine a e il coefficiente d'assorbimento $\alpha(f)$ essi sono legati dalla seguente relazione [13]:

$$a = 10^{\alpha(f)/10}$$

dove $\alpha(f)$, per il range di frequenze d'interesse, si può calcolare in prima approssimazione tramite l'espressione di Thorp [12]:

$$\log_{10} \alpha(f) = 1,0 \left(\frac{f^2}{f^2 + 1} + 44 \frac{f^2}{4100 + f^2} + 75,2 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,03 \right)$$

Come è possibile notare dalla Figura 1.1 il coefficiente di assorbimento cresce molto rapidamente al crescere della frequenza e va quindi ad imporre un limite superiore alla frequenza utilizzabile nel canale acustico sottomarino per una distanza fissata.

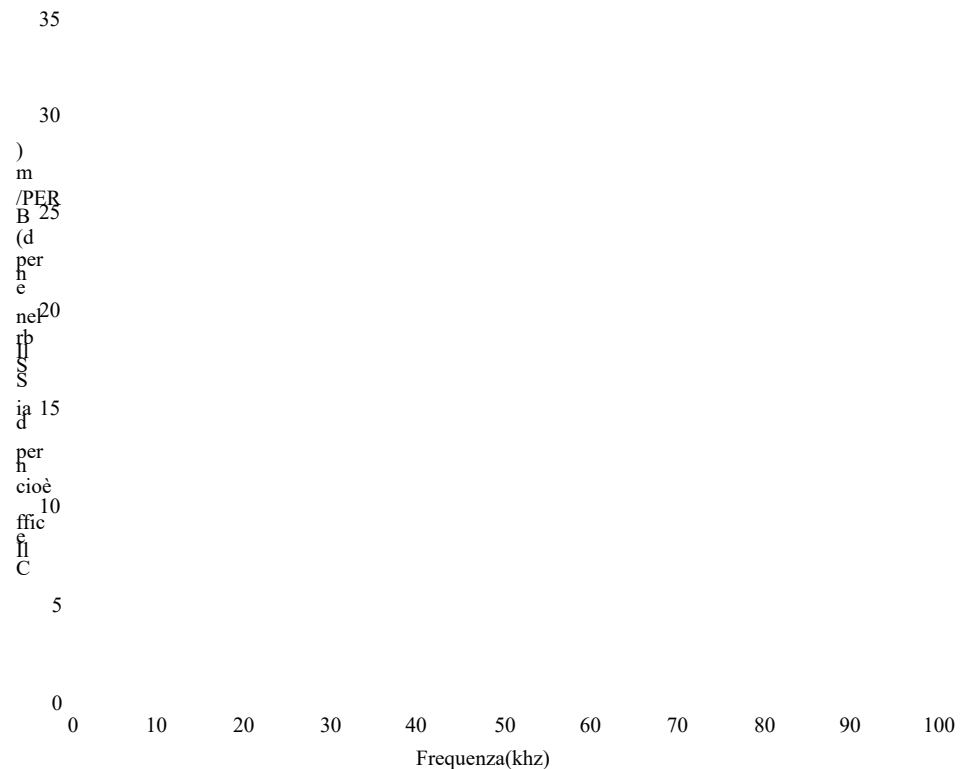


Figura 1.1: Simulazione Matlab per il coefficiente di assorbimento

1.2 Elevati ritardi , rumore e propagazione multi-path

La velocità di propagazione dei segnali nel canale acustico sottomarino è ben cinque ordini di grandezza più piccola rispetto al canale radio terrestre e varia al variare delle condizioni ambientali (profondità, salinità). Il valore nominale della velocità del suono sott'acqua è pari a 1500 m/s. Tale ritardo influisce notevolmente sull'efficienza del sistema [15].

A questo va aggiunto il rumore, che si può fondamentalmente dividere in due categorie:

- Il rumore causato dall'uomo: le principali fonti di tale rumore sono le imbarcazioni che si muovono nelle zone circostanti i sensori [1].
- Il rumore ambientale: esso è legato in particolare alla fauna, correnti, vento, pioggia e movimenti sismici sottomarini.

In [14] attraverso studi e misurazioni del fondale oceanico è stato rilevato che le due principali sorgenti di rumore in acque poco profonde sono la fauna sottomarina e il passaggio delle imbarcazioni.

Infine un'ulteriore causa di disturbo è la propagazione multi-path (Figura 1.2). Essa consiste nella distorsione di un segnale trasmesso che giunge al ricevitore sotto forma di un certo numero di repliche sfasate nel tempo e originate dai vari percorsi (multipath) che il segnale può aver compiuto durante la sua propagazione [16]. Queste repliche vanno a sommarsi al ricevitore causando una forte degradazione del segnale acustico trasmesso.

Figura 1.2: Esempio di propagazione multipath

1.3 Struttura interna di un sensore sottomarino

Come rappresentato in Figura 1.3 un sensore sottomarino è costituito da una CPU centrale interfacciata con uno o più sensori in grado di misurare caratteristiche dell'acqua (temperatura, salinità, acidità, densità, inquinamento). Tale CPU riceve i dati ottenuti dai sensori ed è in grado di memorizzarli, elaborarli e trasmetterli ad altri sensori o alla stazione sulla costa attraverso il modem acustico.

Tutti i componenti del sensore sono in genere protetti da un rivestimento in polivinilcloruro (PVC), atto a difendere tutti i componenti dalle ostiche condizioni oceaniche [1].

Figura 1.3: Architettura interna di un sensore sottomarino, tratto da [1]

Si ritiene infine che probabili sviluppi per i sensori sottomarini saranno [1]:

- Produzione di nuovi sensori meno costosi e basati sulle nanotecnologie, in modo tale da ridurre le dimensioni complessive dei componenti.
- Utilizzo di meccanismi periodici di pulizia contro corrosione e sporcizia.
- Produzione di sensori robusti e stabili in grado di essere efficaci anche in condizioni estreme di temperatura e pressione.

1.4 Topologia e architettura delle reti acustiche sottomarine

Un altro fattore di fondamentale importanza per le reti acustiche sottomarine è la topologia. Da essa possono dipendere in maniera più o meno rilevante il consumo di energia e l'affidabilità dell'intera rete: se consideriamo ad esempio una rete come in Figura 1.4 se il nodo 8 avesse malfunzionamenti o esaurisse la batteria il nodo 6 e il nodo 7 risulterebbero completamente isolati dalla rete, andando magari a compromettere un'intera missione di monitoraggio o sorveglianza con conseguente spreco di risorse.

Figura 1.4: Esempio di topologia

È di fondamentale importanza quindi che la rete sia affidabile: bisogna evitare che possibili rotture di uno o più nodi compromettano il funzionamento dell'intera rete.

Ci sono tre topologie base che possono essere utilizzate per connettere i nodi di una rete: centralizzata, distribuita e multihop [13].

1.4.1 Topologia centralizzata

In questo tipo di topologia la comunicazione tra i nodi avviene attraverso un'unità centrale, che viene spesso denominata *hub* della rete. Tale configurazione è particolarmente adatta per reti sottomarine in acque profonde, dove una boa di superficie, munita sia di un modem radio che di un modem acustico, funge da tramite tra la stazione base e la rete sottomarina [13]. Il maggiore svantaggio di questa topologia è la presenza di un singolo punto di rottura: se l'*hub* si rompe l'intera rete cessa di funzionare [17]. Inoltre, visto il range limitato di ogni singolo modem, la rete non può coprire grandi distanze.

Un esempio di topologia centralizzata è riportato in Figura 1.5.

Figura 1.5: Esempio di topologia centralizzata, tratto da [18]

1.4.2 Topologia distribuita

È classificata come rete *peer-to-peer*, ossia una rete in cui i nodi non hanno alcun tipo di gerarchia ma sono tutti nodi equivalenti: ogni nodo può fungere sia da cliente che da server per gli altri nodi della rete.

La topologia distribuita fornisce un numero elevato di collegamenti tra ogni nodo della rete, come mostrato in Figura 1.6, eliminando così la necessità di algoritmi di routing. Essa presenta tuttavia un elevato consumo di potenza per mettere in comunicazione due nodi distanti [13] e l'inserimento di un nuovo nodo nella rete risulta molto complicato e costoso.

Figura 1.6: Esempio di topologia distribuita, tratto da [15]

16

Pagina 17

1.4.3 Topologia multihop

Anche quest'ultima topologia fa parte delle reti *peer-to-peer* e ha come obbiettivo quello di mettere in comunicazione solo nodi vicini: i messaggi sono trasmessi dalla sorgente alla destinazione trasferendo i pacchetti da nodo a nodo. A differenza della topologia precedente il routing del messaggio risulta di fondamentale importanza e viene gestito da intelligenti algoritmi. Inoltre tale topologia è in grado di coprire aree maggiori rispetto quella distribuita in quanto il range di trasmissione non dipende più dal modem acustico ma dal numero di nodi presenti nella rete [13].

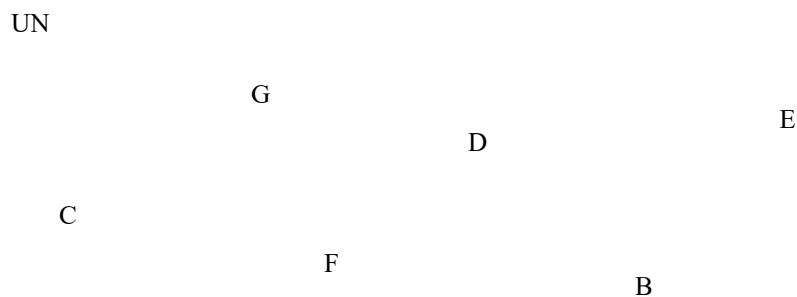


Figura 1.7: Esempio di topologia multihop

1.4.4 Architettura

A seconda del tipo di applicazione l'architettura di una rete sottomarina di sensori si divide

in due grandi categorie: reti statiche bidimensionali (2D) e reti statiche tridimensionali (3D).

Reti statiche bidimensionali

Un'architettura di riferimento per le reti bidimensionali è mostrata in Figura 1.8. Un gruppo di sensori è fissato sul fondo dell'oceano tramite apposite ancore. Tali sensori sono collegati con uno o più sink sottomarini (in figura *uw-sink*) per mezzo di collegamenti acustici wireless. I sink ricevono i dati raccolti dai sensori e sono in grado di inviarli alla stazione di superficie; per raggiungere tale scopo vengono muniti di due modem: uno per comunicazioni orizzontali l'altro per comunicazioni verticali.

La prima tipologia di modem permette ai sink di comunicare con i sensori per due scopi principali: inviare comandi ai sensori e ottenere i dati registrati dagli stessi. Il modem per le

17

Pagina 18

comunicazioni verticali invece serve al sink per inviare alla stazione di superficie i dati ottenuti dai sensori [1].

A seconda della topologia i sensori possono essere connessi ai sink direttamente oppure attraverso percorsi multihop. Nel primo caso ogni sensore manda i dati che ha registrato direttamente al sink. Questa soluzione benché sia la più semplice comporta forti dissipazioni di energia nel caso in cui il nodo sensore sia posto molto lontano dal sink.

Inoltre i link diretti possono essere causa di una diminuzione dell'efficienza del sistema, in quanto le alte potenze trasmissive necessarie creano un'elevata interferenza acustica [1].

Nel caso di percorsi multihop, come nelle reti terrestri [20], i dati vengono inviati attraverso più sensori che fungono da tramite tra il nodo sorgente e il sink di destinazione. Questo approccio porta a un risparmio di energia ma implica anche l'uso di efficienti algoritmi di routing, in quanto ogni nodo deve lavorare in maniera collaborativa con gli altri nodi della rete.

Figura 1.8: Architettura 2D, tratto da [1]

18

Pagina 19**Reti statiche tridimensionali**

Architetture di questo tipo vengono utilizzate quando certi fenomeni non sono osservabili adeguatamente tramite i sensori delle reti 2D, ossia da quei sensori che vengono ancorati sul fondo del mare. Nelle reti statiche tridimensionali i sensori vengono posti a differenti profondità in modo da poter osservare un certo fenomeno in maniera più accurata e dettagliata. Una prima possibile soluzione potrebbe essere quella di legare i sensori sottomarini a una boa di superficie attraverso dei cavi; andando quindi a regolare la lunghezza di tali cavi si potrebbe impostare la profondità adeguata per lo studio di quel fenomeno [21]. Questo approccio anche se semplice da attuare presenta due importanti svantaggi: le numerose boe in superficie potrebbero ostruire la navigazione e, in caso di applicazioni militari, sarebbero facilmente individuabili dai nemici [1]. Per queste ragioni quindi una soluzione alternativa e più adeguata potrebbe essere quella di ancorare i sensori sul fondo del mare equipaggiandoli con delle boe gonfiabili. Le boe servono per portare il sensore verso la superficie. La profondità dei sensori invece si può regolare modificando la lunghezza del cavo che li connette con l'ancora, come evidenzia la Figura 1.9.

Figura 1.9: Architettura 3D, tratto da [1]

19

Pagina 20

La topologia utilizzata per questo tipo di architettura è quella multihop; i sensori si scambiano i dati ottenuti in modo da poter collegare la sorgente con la stazione di superficie.

Il variare della profondità dei nodi però potrebbe aumentare troppo le distanze tra due nodi vicini andando così a compromettere il funzionamento della rete. È necessario pertanto che tutti i sensori siano in grado di coordinare la propria profondità in modo che la topologia della rete sia sempre connessa.

Capitolo 2 – Automatic Retransmission reQuest

Il bit error rate (BER), ossia il rapporto tra il numero di bit non ricevuti correttamente e i bit trasmessi, è un parametro molto importante perché fornisce una misura della qualità di un intero sistema di comunicazione. Tale parametro nel caso di una trasmissione sottomarina è in genere molto elevato. Questo è dovuto alle scarse prestazioni del canale, affetto da una forte attenuazione, dal rumore e dalla propagazione multipath [22].

Gli errori nella sequenza di bit ricevuta sono quindi inevitabili. Per stabilire una comunicazione sicura in un canale di questo tipo è necessario l'utilizzo di tecniche ARQ, in modo che i pacchetti ricevuti in modo errato possano essere ritrasmessi, secondo lo schema

riportato in Figura 2.1.

Figura 2.1: Sistema di trasmissione ARQ, tratto da [23]

L'idea fondamentale che sta alla base dell'ARQ consiste nell'invio da parte del ricevitore di un messaggio di acknowledgment (ACK) o di un messaggio di not acknowledgment (NACK) a seconda dei seguenti due casi: se il pacchetto inviato dal trasmettitore è stato correttamente ricevuto verrà generato un segnale di ACK, altrimenti un messaggio di not acknowledgment (NACK) farà capire al trasmettitore che è necessaria la ritrasmissione di quel determinato pacchetto.

La coda di ritrasmissione presente al trasmettitore serve per contenere una copia del pacchetto inviato. Se il ricevitore restituirà un NACK tale pacchetto verrà ritrasmesso con

21

Pagina 22

una priorità maggiore rispetto i nuovi pacchetti, altrimenti sarà semplicemente eliminato dalla coda.

La tecnica esatta con cui le ritrasmissioni sono gestite dipende dalla tipologia di ARQ implementata al ricevitore. Esistono infatti tre tipologie base di ARQ che vedremo brevemente in 2.1 dopo aver dato due definizioni necessarie:

- Finestra: la dimensione della finestra m per un protocollo ARQ è definita come il massimo numero di pacchetti che possono essere trasmessi prima di ricevere

l'acknowledgment del primo pacchetto trasmesso nella finestra in questione.

- Round trip time (RTT): il round trip time è il tempo passato tra l'inizio della

trasmissione di un pacchetto e l'istante in cui il messaggio di ACK o NACK relativo a quel pacchetto è ricevuto dal trasmettitore.

2.1 Fermati e attendi ARQ (SW), Torna indietro N ARQ (GBN), Ripetizione selettiva ARQ (SR)

Fermati e attendi ARQ

La SW ARQ è il sistema di ritrasmissione più semplice. Esso consiste nell'invio di un solo pacchetto e nell'attesa del relativo ACK o NACK: una volta inviato il pacchetto il trasmettitore resta in attesa della risposta senza inviare ulteriori pacchetti. Se viene ricevuto un ACK allora il trasmettitore può passare al pacchetto successivo altrimenti viene effettuata la ritrasmissione del pacchetto in questione. Nel caso in cui un pacchetto vada perso durante la trasmissione dopo il time-out T_0 il sistema provvede alla ritrasmissione di tale pacchetto, come mostra la Figura 2.2. La dimensione della finestra in questo caso è $m = 1$. Questa tipologia di ARQ è inefficiente per RTT elevati in quanto il trasmettitore rimane inattivo finché è in attesa dell'ACK o del NACK.

Figura 2.2: Stop and Wait ARQ

Torna indietro N ARQ

A differenza della SW tramite questa tipologia di ARQ è possibile la trasmissione di $m > 1$ pacchetti prima che sia noto l'esito del primo pacchetto inviato. Si aumenta in questo modo l'efficienza della trasmissione poiché il tempo di inattività del trasmettitore è ridotto [23]. Il protocollo GBN opera in questo modo: in ogni RTT vengono trasmessi m pacchetti; il trasmettitore si aspetta il primo messaggio di acknowledgment solo dopo aver inviato

questi primi m pacchetti. In caso di ACK per l' i -esimo pacchetto viene trasmesso il nuovo pacchetto $(i+m)$ -esimo, in caso di NACK si cancellano gli m pacchetti a partire dall' i -esimo e diventa necessario ritrasmettere l'intera finestra.

Figura 2.3: Go Back N ARQ con $m = 4$

Ripetizione selettiva ARQ

Nel protocollo SR ARQ, come nel caso della GBN, per ogni RTT il trasmettitore invia m pacchetti, con $m > 1$, e attende la ricezione del primo acknowledgment solo dopo l'invio

dell'intera finestra. In caso di ricezione di un ACK per il pacchetto i il trasmettitore invia un nuovo pacchetto, in particolare l' $(i+m)$ -esimo. Se invece viene ricevuto un NACK il trasmettitore provvede a inviare nuovamente solo il pacchetto errato, tutti i pacchetti successivi correttamente ricevuti vengono inseriti in un buffer che provvede al riordino di quest'ultimi.

Figura 2.4: Selective Repeat ARQ con $m = 4$

La scelta del protocollo ARQ utilizzato porta a una serie di vantaggi e relativi svantaggi. L'utilizzo, ad esempio, della SW ARQ è svantaggioso in quanto porta a lasciare il trasmettitore per parecchio tempo inattivo ma presenta implementazioni di ricevitori e trasmettitori relativamente semplici. La GBN ARQ invece per funzionare correttamente ha bisogno di algoritmi complessi e comunque ad ogni errore viene richiesta la ritrasmissione

dell'intera finestra e quindi di m pacchetti. La SR ARQ risulta essere la più efficiente: in caso di ricezione erronea di un pacchetto si richiede la trasmissione solo di quest'ultimo. Il trasmettitore inoltre risulta sempre in funzionamento.

Andiamo quindi ad analizzare nel dettaglio prima la SW ARQ e un suo possibile miglioramento (presentato in [22]), vista la semplicità che comporta tale protocollo.

Successivamente, vista la maggiore efficienza, mostriamo i dettagli della SR ARQ e di una sua possibile implementazione in ambiente sottomarino.

2.2 Stop and Wait ARQ 1

Consideriamo pacchetti costituiti di $N = N_{data} + N_{oh}$ bit, dove N_{data} è il numero dei bit contenenti l'informazione da trasmettere mentre N_{oh} è il numero di bit di overhead, inseriti per il controllo d'errore. Tramite quest'ultimi aumentano i tempi di propagazione ma

migliora l'efficienza della trasmissione. Il tempo di pacchetto è $T_p = NT$ con $T = \frac{1}{R}$ dove R

è il bit rate. Il time-out T_{out} è il tempo massimo d'attesa impostato al trasmettitore per ricevere il pacchetto di ACK o di NACK, oltre questo tempo il pacchetto senza acknowledgment verrà ritrasmesso. Considereremo la condizione di time-out stringente,

ossia $RTT = T_{out}$. Il canale introduce un ritardo di propagazione $T_d = \frac{l}{v}$, l è la distanza tra

trasmettitore e ricevitore mentre $v = 1500$ m/s è la velocità del suono sott'acqua. Definiamo inoltre T_{ack} come il tempo necessario per trasmettere l'ACK o il NACK e consideriamo trascurabile T_{proc} , cioè il tempo computazione di un pacchetto prima che avvenga la trasmissione. Con queste definizioni è possibile esprimere l' RTT per un singolo pacchetto come segue:

$$RTT = T_p + T_{ack} + 2T_d$$

Per la trasmissione di un gruppo di m pacchetti quindi sarà [22]:

$$RTT(m) = m(T_p + T_{ack}) + 2T_d$$

Definiamo inoltre l'efficienza o goodput η di un protocollo ARQ come il rapporto tra il tempo T_{data} speso per la parte d'informazione del pacchetto (N_{data} bit) e la media del tempo totale $E[T_{tot}]$ dedicato all'intero pacchetto ($N_{data} + N_{oh}$ bit).

Il tempo totale per un pacchetto che viene ritrasmesso i volte si può calcolare nel modo seguente:

$$T_{tot} = RTT + iRTT$$

Questo perché ogni singolo pacchetto occupa interamente il canale dall'istante della prima trasmissione sino al momento in cui viene ricevuto il suo relativo acknowledgment. La media del tempo totale è:

$$E[T_{tot}] = RTT + E[i] RTT$$

Ora se chiamiamo p la probabilità di errore sul pacchetto la probabilità che ci siano zero ritrasmissioni è un valore $1-p$, la probabilità che ci sia un valore p ($1-p$) (trasmissione errata e prima ritrasmissione corretta) e così via. Quindi la probabilità che ci siano i ritrasmissioni vale $p^i (1-p)$, che è la distribuzione di una variabile geometrica in funzione di i . La media del tempo totale dunque vale:

$$E[T_{tot}] = RTT \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} i p^i (1-p) \right) = RTT \left(1 + \frac{p}{1-p} \right) = \frac{RTT}{1-p}$$

Pertanto l'efficienza della SW ARQ 1 vale:

$$\eta_1 = (1-p) \frac{\text{Dati } T}{RTT} = (1-p) \frac{\text{Dati } TN}{RTT}$$

2.3 Stop and Wait ARQ 2

Il protocollo SW ARQ 2 presentato in [22] può essere considerato come M protocolli SW ARQ 1 che lavorano in parallelo. Ogni SW ARQ 1 ha il time-out pari a $RTT(M)$ e la probabilità di errore sul pacchetto è ancora pari a p . Alla luce del paragrafo precedente il tempo medio speso per trasmettere correttamente un pacchetto su uno degli M link è

$$\frac{RTT}{1-p} \cdot M$$

e poiché tali link lavorano in parallelo, in questo periodo di tempo, vengono

trasmessi con successo M pacchetti.

Pagina 27

Pertanto l'efficienza della SW ARQ 2 vale:

$$\eta_2 = (1-p) \frac{Dati MT}{RTT(M)} = (1-p) \frac{Dati MTN}{RTT(M)}$$

2.4 Ripetizione selettiva ARQ

Per il calcolo dell'efficienza del protocollo SR ARQ, a differenza della SW ARQ, i tempi di inattività per l'attesa degli acknowledgment non devono essere tenuti in considerazione.

Questo perché il trasmettitore continua ad inviare pacchetti anche senza aver ricevuto gli ACK o i NACK per i pacchetti precedenti. Pertanto il tempo per la ritrasmissione di ogni pacchetto è T_p e se sono necessarie i ritrasmissioni il canale verrà occupato per iT_p secondi.

Per lo stesso ragionamento svolto in 2.2 la probabilità che ci siano i ritrasmissioni vale $p^i(1-p)$, con p probabilità di errore sul pacchetto. Il tempo totale quindi è dato dal contributo di i ritrasmissioni più il contributo dell'ultima trasmissione e lo si può esprimere così:

$$T_{tot} = T_p (i + 1)$$

Valutandone la media si ottiene:

$$E[T_{tot}] = T_p + E[i] T_p = T_p \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} i p^i (1-p) \right) = T_p \left(1 + \frac{p}{1-p} \right) = \frac{T_p}{1-p}$$

Quindi infine l'efficienza della SR ARQ è:

$$\eta_3 = (1-p) \frac{T_{dati}}{T_p} = (1-p) \frac{TN_{dati}}{T_p}$$

2.5 Juggling Selective Repeat ARQ

Il protocollo presentato nel paragrafo precedente non è implementabile realmente in un canale sottomarino. Questo perché tipicamente i modem acustici sottomarini operano in half-duplex [22], è permessa cioè la comunicazione bidirezionale tra trasmettitore e ricevitore ma con il limite che essa non avvenga contemporaneamente. Di conseguenza gli unici protocolli che si pensavano utilizzabili in ambiente sottomarino erano la stop and wait ARQ e i suoi possibili miglioramenti.

Tuttavia un'importante proprietà, spesso trascurata, della comunicazione acustica sottomarina è la possibilità, per una coppia di nodi, di inviare pacchetti che si trovano nello stesso momento nel canale trasmissivo. Questo a patto che ogni nodo abbia finito la sua trasmissione e sia passato in modalità di ricezione prima che giunga il pacchetto in arrivo. Su questa proprietà e sui lunghi tempi di propagazione inseriti dal canale acustico sottomarino si basa lo schema trasmissivo presentato in [24].

Come nel caso della selective repeat ARQ il trasmettitore invia una finestra di m pacchetti, con l'unica differenza che dopo l'invio di ogni pacchetto viene inserito appositamente un tempo di ritardo t_i . Allo stesso modo il ricevitore interpone tra l'invio di due acknowledgment consecutivi un tempo di ritardo t_i' . Tali tempi di ritardo aggiuntivi permettono di evitare collisioni tra i pacchetti in arrivo e i pacchetti in trasmissione. Dopo l'invio di una finestra il trasmettitore passa in una modalità stop and wait, tempo in cui attende la ricezione di un pacchetto di acknowledgment. Solo dopo tale ricezione verrà trasmesso il nuovo pacchetto dati. Si può osservare dalla Figura 2.5 che questo schema trasmissivo può funzionare correttamente solo se $t_i \geq T_{ack}$, $t_i \geq 0$ e $t_i' \geq 0$. Le prime due condizioni infatti assicurano che il trasmettitore sia sempre in modalità di ricezione quando un acknowledgment è in arrivo. La terza invece assicura che il ricevitore sia in modalità di ricezione quando è in arrivo un pacchetto dati.

Il miglior valore a cui inizializzare i vari t_i è proprio T_{ack} [24]. In questo modo infatti si riducono al minimo i tempi di inattività del trasmettitore.

Pagina 29

Figura 2.5: Juggling Selective Repeat ARQ

Per quanto riguarda il calcolo dell'efficienza η_4 di questo protocollo ARQ si procede come nel paragrafo precedente. L'unica differenza da tenere presente è il tempo aggiuntivo inserito al trasmettitore $t_i = T_{ack}$.

Il tempo totale di occupazione del canale da parte di un pacchetto che deve essere ritrasmesso i volte pertanto sarà:

$$T_{tot} = T_p (i + 1) + T_{ack} (i + 1)$$

Raccogliendo la i :

$$T_{tot} = T_p + T_{ack} + i (T_p + T_{ack})$$

La media quindi è data da:

$$\begin{aligned}
 E[T_{tot}] &= T_p + T_{ack} + E[i] (T_p + T_{ack}) = (T_p + T_{ack}) \sum_{i=0}^{\infty} (1-p)^i = \\
 &= (T_p + T_{ack}) \left(1 + \frac{p}{1-p}\right) = \frac{T_p + T_{ack}}{1-p}
 \end{aligned}$$

29

Pagina 30

Quindi l'efficienza della juggling selective repeat ARQ vale:

$$\eta_4 = (1-p) \frac{T_{dati}}{T_p + T_{ack}} = (1-p) \frac{TN_{dati}}{T_p + T_{ack}}$$

Capitolo 3 – Grafici e commenti

Tramite l'efficienza o goodput di un protocollo ARQ è possibile valutare le prestazioni effettive di un sistema di telecomunicazione, in quanto i bit aggiuntivi, necessari per l'affidabilità della trasmissione, non vengono considerati. Andiamo pertanto a effettuare un confronto tra le quattro efficienze ottenute nel capitolo precedente al variare di due diversi parametri: la probabilità di errore sul pacchetto e il numero di bit N_{data} contenenti l'informazione da trasmettere.

Come modello di scenario consideriamo un link di trasmissione con un bit rate $R = 10$ kbps e valutiamo le principali differenze quando esso si espande prima su una distanza di 5 km e successivamente su una distanza di 50 m. Il ritardo di propagazione del canale nei due casi

pertanto sarà $T_d = \frac{l}{v} = 3,33$ s, se $l = 5$ km e $T_d = \frac{l}{v} = 0.033$ s se $l = 50$ m, ricordando che

$v = 1500$ m / s.

Per i grafici riguardanti la juggling selective repeat ARQ verrà scelta la condizione che minimizza i tempi di inattività al trasmettitore, in modo da ottenere un'efficienza più elevata: $t_i = T_{ack}$. Nel caso in cui siano necessari i bit di overhead verranno presi pari a $N_{oh} = 64$ bit. Infine le curve rappresentanti la selective repeat ARQ sono state inserite per dare un'idea del limite superiore dell'efficienza raggiungibile da tali protocolli.

3.1 Probabilità d'errore sul bit

Assumendo che gli errori sui bit siano indipendenti e identicamente distribuiti è possibile

legare la probabilità di errore sul pacchetto p con la probabilità di errore sul bit P_{bit} secondo questa relazione:

$$p = 1 - (1 - P_{bit})^L$$

Tale valore coincide con la probabilità che almeno uno dei bit nel pacchetto, di dimensione L , sia errato. In Figura 3.1 mettiamo a confronto le efficienze dei protocolli prima esposti in funzione proprio di P_{bit} mentre in Figura 3.2, mantenendo tutti i parametri inalterati, mostriamo come l'efficienza cambi se la distanza tra trasmettitore e ricevitore diventa di 50 m.

31

Pagina 32

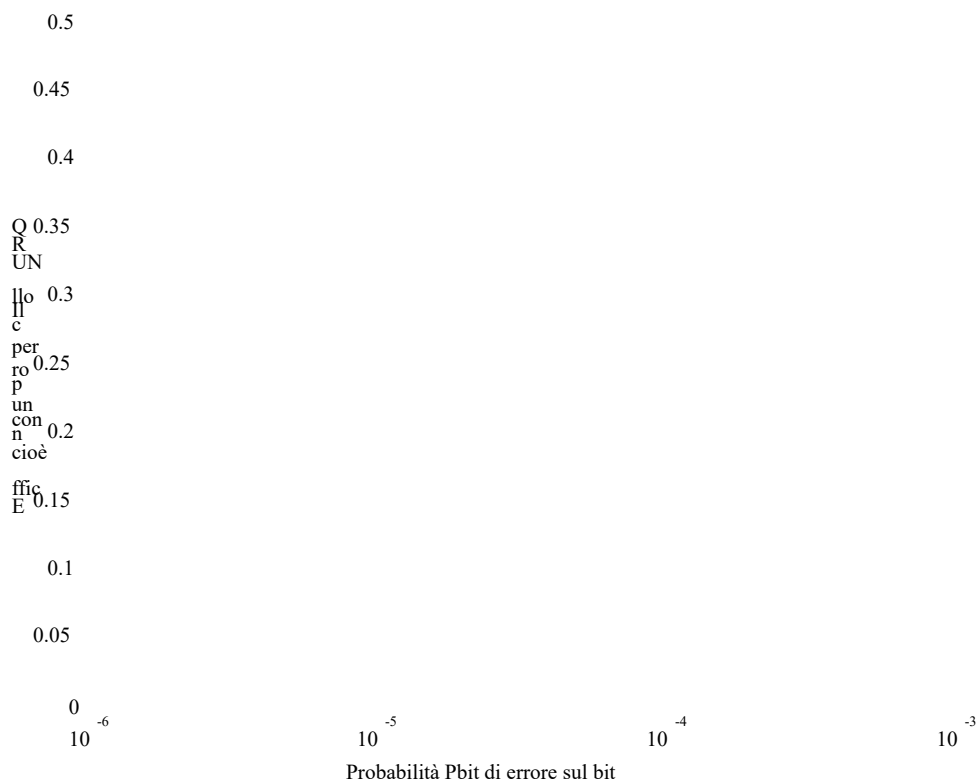


Figura 3.1: Efficienza di SW ARQ, SW ARQ 2, SR ARQ e juggling SR ARQ con $l = 5$ km

0.5

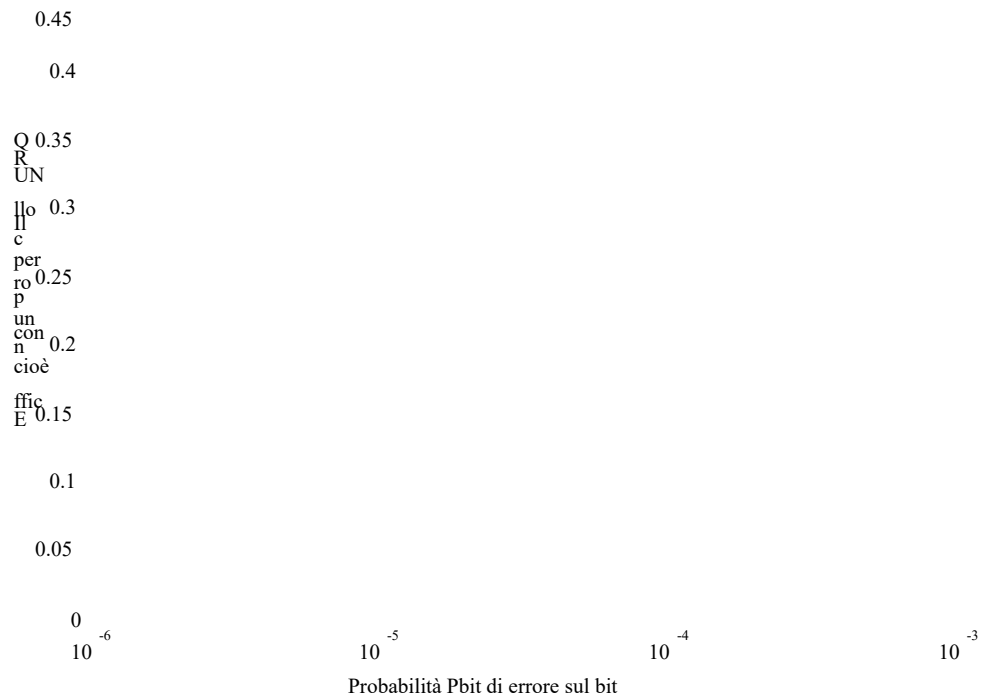


Figura 3.2 Efficienza di SW ARQ, SW ARQ 2, SR ARQ e juggling SR ARQ con $l = 50$ m

È possibile notare quanto la stop and wait ARQ 1 risulti inefficiente sulle lunghe distanze, sia per probabilità di errore sul bit elevate che ridotte. Questo perché tale protocollo inserisce, indipendentemente dalla ricezione di un ACK o di un NACK, elevati tempi di inattività al trasmettitore che vanno ad influire in maniera rilevante sul valore dell'efficienza.

Tuttavia se si effettuano le stesse simulazioni su una distanza di 50 m si vede come anche la semplice stop and wait ARQ 1 si avvicini in efficienza alla stop and wait ARQ 2 e alla juggling selective repeat. In questo caso quindi la scelta della stop and wait 1 potrebbe essere preferibile vista la ridotta complessità in termini di strumenti di memoria e di algoritmi necessari.

3.2 Dimensione ottima dei pacchetti

L'efficienza dei protocolli ARQ analizzati è funzione anche del numero di bit presenti nel pacchetto da trasmettere. Aumentando le dimensioni del pacchetto si sfruttano meglio i tempi di attesa ma aumenta anche la probabilità di avere errori sui bit.

Pertanto, dopo aver confrontato l’andamento delle varie efficienze in funzione della dimensione del pacchetto da trasmettere (Figura 3.3 e 3.4), mostriamo come ottenere tale dimensione ottimale.

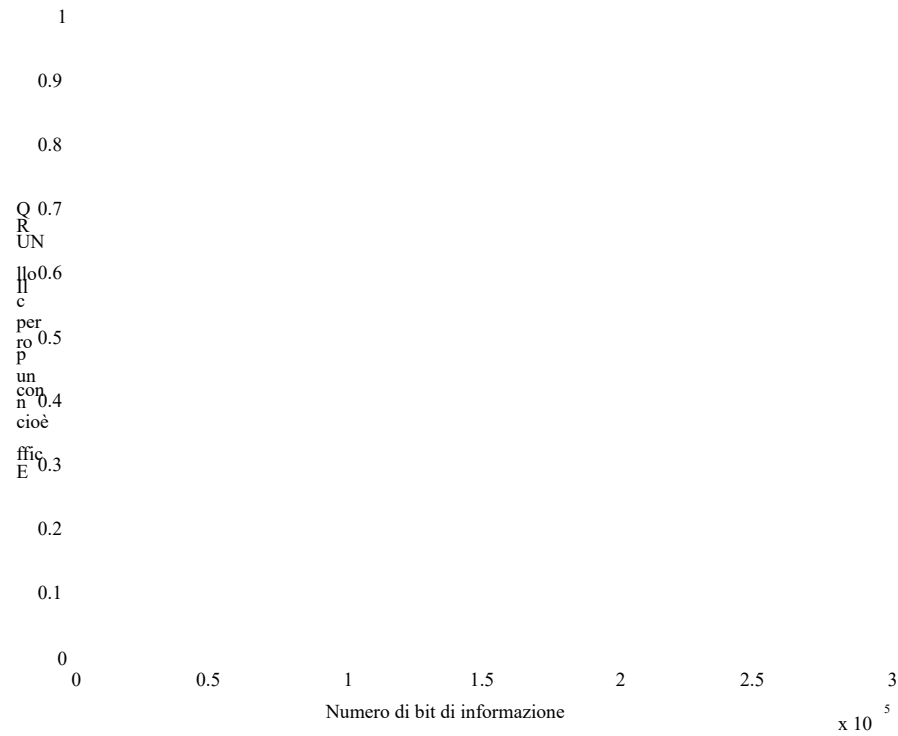
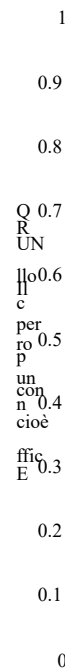


Figura 3.3: Efficienza dei protocolli ARQ in funzione del numero di bit di informazione con $l = 5 \text{ km}$



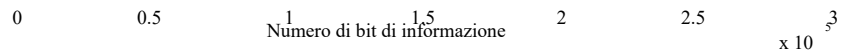


Figura 3.4: Efficienza dei protocolli ARQ in funzione del numero di bit di informazione con $l = 50$ m

Anche in questo caso, come nel paragrafo precedente, sulle lunghe distanze il protocollo juggling selective repeat risulta più performante rispetto ai due protocolli di stop and wait ARQ, avvicinandosi più velocemente al valore ideale rappresentato dalla selective repeat ARQ. Per le distanze ridotte invece potrebbe nuovamente essere preferibile il protocollo fermati e attendi ARQ 1.

3.2.1 Dimensione ottima del pacchetto per SW ARQ 2

Vista la dipendenza dell'efficienza di un protocollo ARQ dalla dimensione dei pacchetti da trasmettere in [22] è stato proposto un modo per calcolare tale valore ottimale.

L'efficienza della SW ARQ 2 può essere espressa in funzione di N_{data} in questo modo:

$$\eta_2 = \frac{1 - P_{po}}{N_{data} + N_{oh}} \frac{N_{data}}{N_{data} + \infty}$$

34

Dove

$$\infty = N_{oh} + \frac{2RT_d}{M}$$

Derivando l'efficienza η_2 sulla variabile N_{data} e eguagliandola a zero si trova il valore ottimale cercato [22]:

$$\frac{d\eta_2}{dN_{data}} = 0 \Rightarrow N_{data, opt} = \frac{\infty}{2} \left(1 + \frac{4}{\rho} - 1 \right)$$

Dove

$$\rho = \ln \frac{1}{P_{po}}$$

Le figure 3.5 e 3.6 mostrano il guadagno che si potrebbe raggiungere scegliendo di trasmettere pacchetti aventi il numero ottimale di bit: anche per probabilità di errore sul bit relativamente elevate l'efficienza della stop and wait ARQ 2 con dimensione di pacchetto ottimale non tende a zero tanto velocemente quanto fanno le altre due curve, che corrispondono a $N_{dati} = 4096$ bit, gli altri a $N_{dati} = 512$ bit.

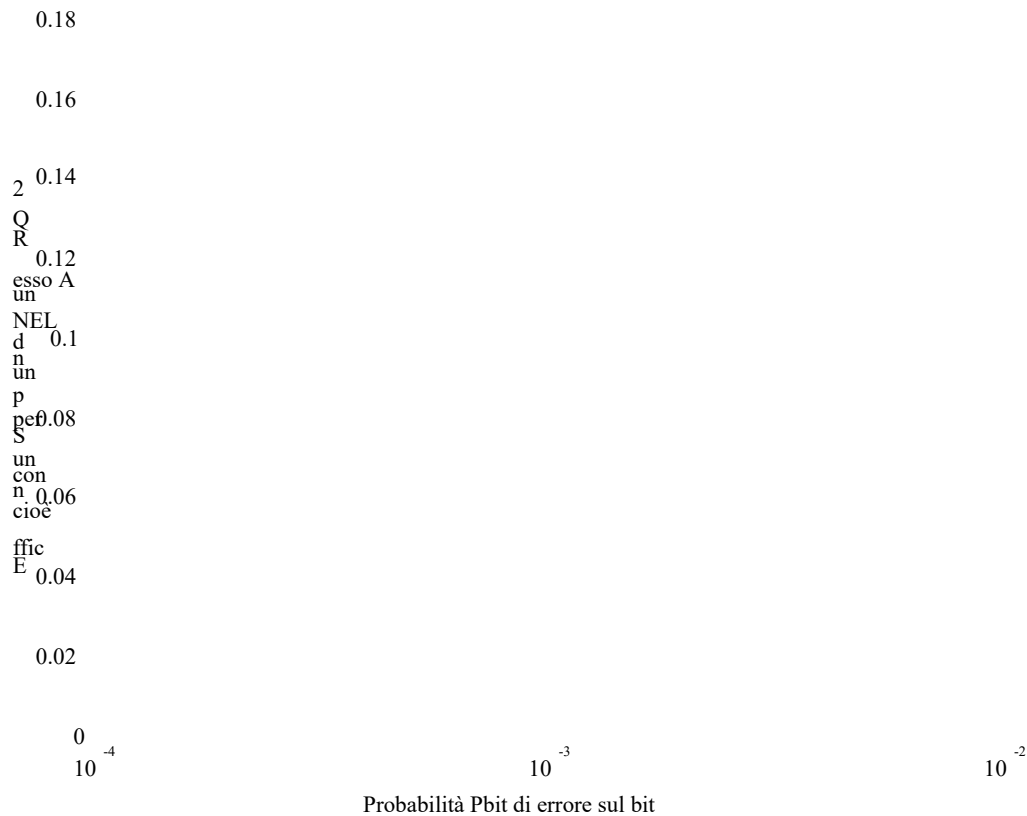
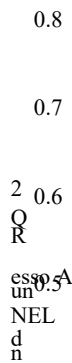


Figura 3.5: Efficienza della SW ARQ 2 per tre diversi valori di Ndata con $l = 5\text{km}$



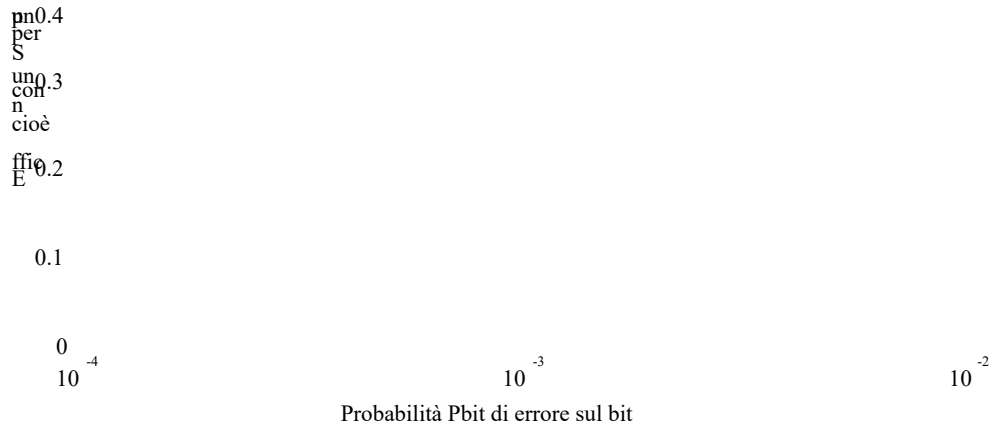


Figura 3.6: Efficienza della SW ARQ 2 per tre diversi valori di N_{data} con $l = 50m$

Tali simulazioni mostrano che l'ultima considerazione esposta resta valida sia per le lunghe distanze che per quelle ridotte.

3.2.2 Dimensione ottima del pacchetto per SR ARQ

È possibile trovare una dimensione ottimale per il pacchetto da trasmettere anche nel caso

in cui si utilizzi il protocollo SR ARQ. Osservando che $\frac{N N_{oh}}{N} = \frac{T_{dati}}{T_p}$ e utilizzando

nuovamente l'equazione $p = 1 - (1 - P_{bit})^L$ l'efficienza della SR ARQ può essere così riscritta :

$$\eta_3 = \frac{T_{dati}}{T_p} (1-p) = \frac{N N_{oh}}{N} (1 - P_{bit})^L$$

Quindi derivandola in funzione di N ed eguagliando tale derivata a zero si otterrà la dimensione ottima del pacchetto cercata:

$$d\eta_3 = \frac{N_{oh}}{N} + \frac{N_{oh}^2}{N^2} - \frac{4 N_{oh}}{1 - \log(-P_{po})}$$

$$dN \quad 0 \Rightarrow N_{optare} \quad 2$$

Infine per ottenere la dimensione ottima del pacchetto contenente l'informazione da trasmettere basterà sottrarre al numero di bit totali i bit di overhead:

$$N_{dati, opt} = N_{opt} - N_{oh}$$

Come mostra la Figura 3.7 anche in questo caso l'efficienza massima è raggiunta quando si sceglie la dimensione ottimale del pacchetto per ogni probabilità di errore sul bit.

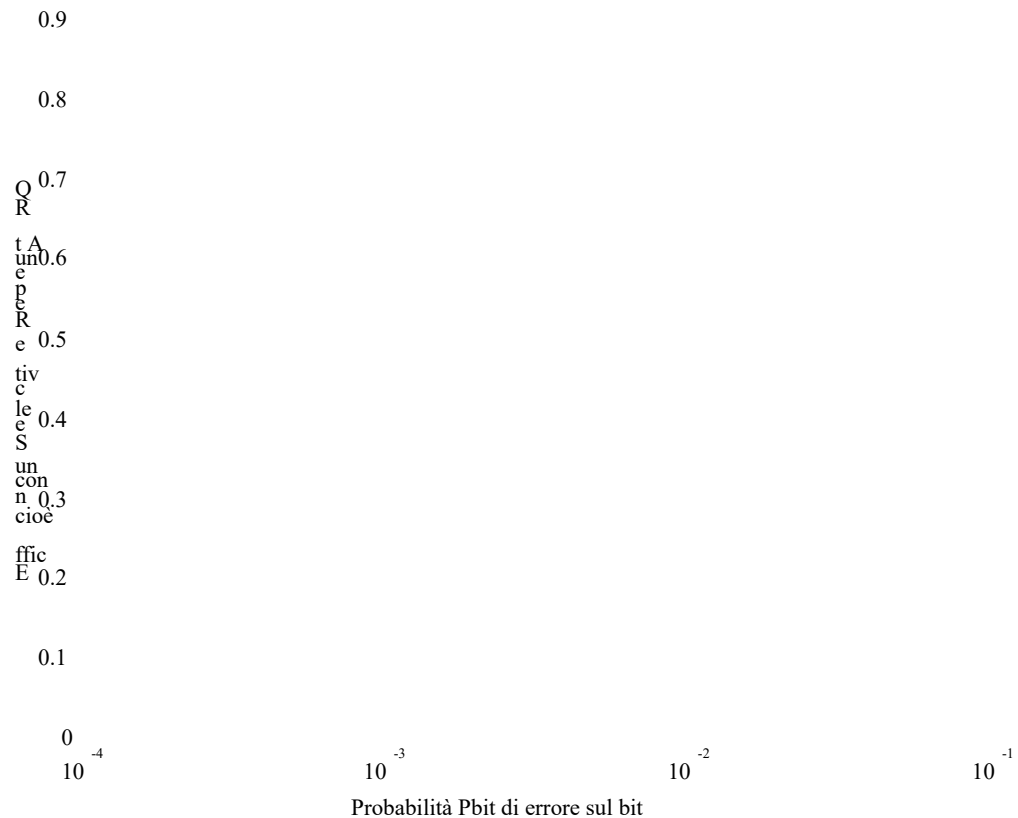


Figura 3.7: Efficienza della SR ARQ per tre diversi valori di N_{data}

Capitolo 4 – Conclusioni

In questa tesi è stata inizialmente presentata una panoramica generale delle reti di sensori sottomarine.

Sono state messe in un luce le principali caratteristiche e peculiarità del canale acustico sottomarino, mostrando i limiti pratici posti da questo ambiente così ostico.

Le lunghe distanze, le forti attenuazioni, il costo dei sensori, gli elevati consumi di potenza e la necessità di abilitare trasmissioni sicure ed efficienti rendono questo campo oggetto di continue ricerche e studi.

La parte focale di questa tesi si concentra proprio sulle modalità tramite cui è possibile rendere la comunicazione efficiente e priva di errori: sono esposte ed analizzate le principali tecniche per il controllo di errore in un sistema di telecomunicazioni.

Il primo protocollo ARQ presentato, ossia la stop and wait ARQ classica, risulta essere inefficiente in ambiente sottomarino e limita il suo uso a sistemi che trasmettono con basso bit rate e su distanze molto ridotte.

Vengono successivamente analizzati protocolli più efficienti in quanto in grado di trasmettere più pacchetti per volta: la stop and wait ARQ 2 e la selective repeat ARQ.

I risultati delle simulazioni proposte mostrano che questi ultimi protocolli consentono di ottenere efficienze più elevate rispetto la stop and wait ARQ classica, in particolare sulle lunghe distanze.

Efficienza che inoltre può essere massimizzata scegliendo la dimensione ottima del pacchetto da trasmettere come funzione dei parametri del link acustico (bit rate, distanza tra trasmettitore e ricevitore e probabilità d'errore).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia "Underwater acoustic sensor networks: sfide della ricerca "Ad Hoc Networks, vol. 3, n. 3, 2005, 257–279
- [2] A. Quazi, W. Konrad, "Underwater acoustic communication", IEEE Communications Magazine, vol. 20, n. 2, 1982, 24-30
- [3] Saleh Ibrahim, Jun-Hong Cui, Reda Ammar "Efficient surface gateway deployment for reti di sensori subacquei ", Atti ISCC, 2008, 1-7
- [4] S. Ibrahim, Jun-Hong Cui, R. Ammar, "Implementazione del gateway a livello di superficie per sott'acqua reti di sensori ", Atti Military Communications MilCom07, novembre 2007
- [5] IF Akyildiz, D. Pompili e T. Melodia, "Challenges for efficient communication in reti di sensori acustici subacquei ", ACM SIGBED Review, vol.1, no. 1, luglio 2004
- [6] JG Proakis, JA Rice, EM Sozer, M. Stojanovic, "Shallow water acoustic networks", in: JG Proakis (a cura di), Encyclopedia of Telecommunications, John Wiley and Sons, 2003
- [7] M. Stojanovic, "Comunicazioni acustiche (subacquee)", in: JG Proakis (a cura di), Encyclopedia of Telecommunications, John Wiley and Sons, New York, 2003
- [8] JG Proakis, EM Sozer, JA Rice, M. Stojanovic, "Shallow water acoustic networks", IEEE Communications Magazine, vol. 39, n. 11, 2001, 114–119
- [9] P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, "Fisica, Volume II, Elettromagnetismo-Onde", cap. 12, EdiSES, 2007, 479-480
- [10] http://it.wikipedia.org/wiki/Diffusione_ottica
- [11] J. Catipovic, "Limitazioni delle prestazioni nella telemetria acustica subacquea", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 15, no. 3, 1990, 205–216
- [12] L. Berkhovskikh e Y. Lysanov, "Fundamentals of Ocean Acoustics" New York: Springer,

Pagina 42

- [13] Ethem M. Sozer, Milica Stojanovic e John G. Proakis "Underwater Acoustic Networks" IEEE Journal Of Oceanic Engineering, vol. 25, n. 1, gennaio 2000, 72-83
- [14] SAL Glegg, R. Pirie, A. LaVigne, "A study of ambient noise in shallow water", Technical Rapporto, Florida, Atlantic University, 2000
- [15] Milica Stojanovic, "Underwater Wireless Communications: Current Achievements and Research Challenges ", IEEE Oceanic Engineering Society Newsletter, 2006
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Multipath_propagation
- [17] K. Pahlavan e AH Levesque, "Wireless Information Networks", New York: Wiley, 1995
- [18] <http://eresearch.jcu.edu.au/projects/semat-1/semat-mk3-prototype-buoy/underwater-sensor-hub>
- [19] G. Loccisano "Confronto di protocolli di routing DTN in reti acustiche sottomarine", Università degli Studi di Padova, 2010
- [20] IF Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A sondaggio ", Computer Networks Elsevier, vol. 38, n. 4, 2002, 393–422
- [21] E. Cayirci, H. Tezcan, Y. Dogan, V. Coskun, "Wireless sensor networks for underwater sistemi di sorveglianza ", Ad Hoc Networks, vol. 4, n. 4, 2006, 431-446
- [22] Milica Stojanovic, "Ottimizzazione di un protocollo di collegamento dati per un'acustica subacquea Channel ", Proceedings OCEANS, Brest, 2005
- [23] Nevio Benvenuto, Michele Zorzi "Principles of communications networks and systems", cap. 9, Wiley, 2010
- [24] Mingsheng Gao, Wee-Seng Soh, Meixia Tao, "A Transmission Scheme for Continuous ARQ Protocolli sui canali acustici subacquei ", Proceedings Communications, giugno 2009. ICC '09, Conferenza internazionale IEEE

