



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Analisi di Age of Information per contenuti sequenziali con modelli markoviani

LAUREANDA

Elena Chiara

RELATORE

Leonardo Badia

ANNO ACCADEMICO 2021–2022

Data di laurea 23 settembre 2022

Abstract

Questa tesi considera sistemi di trasmissione di contenuti con codifica incrementale, trasmessi con tecnica Selective Repeat ARQ e per i quali viene fornita un'analisi esatta della metrica di prestazione dell'Age of Information (AoI) tramite catene di Markov. Il modello utilizzato si rifà alla teoria delle code classica impiegata per sistemi analoghi.

In particolare, viene messa in luce la natura dell'AoI per contenuti di questo tipo e viene valutata sotto le ipotesi di canale di trasmissione markoviano binario e capacità di generazione degli aggiornamenti costante in ogni slot di tempo, nota in letteratura come condizione di Heavy Traffic.

Vengono quindi analizzate le prestazioni ottenute al variare del Round Trip Time, della probabilità media di errore sul pacchetto e del coefficiente di burstiness del canale markoviano, che ne descrive la correlazione.

I risultati così ottenuti evidenziano andamenti notevoli di questa metrica di prestazione e possono essere utili a derivare importanti linee guida per applicazioni di trasmissione multimediale.

Indice

1	Introduzione	1
2	Stato dell'arte	5
2.1	Motivazioni	5
2.2	Lavori associati	8
3	Calcolo dell'Age of Information	13
4	Risultati	21
5	Conclusioni e sviluppi futuri	27
	Bibliografia	29



Introduzione

Data l'enorme diffusione di sistemi di telecomunicazione, avvenuta principalmente negli ultimi decenni, risulta di notevole importanza avere a disposizione tecniche di controllo dell'errore per i canali di trasmissione.

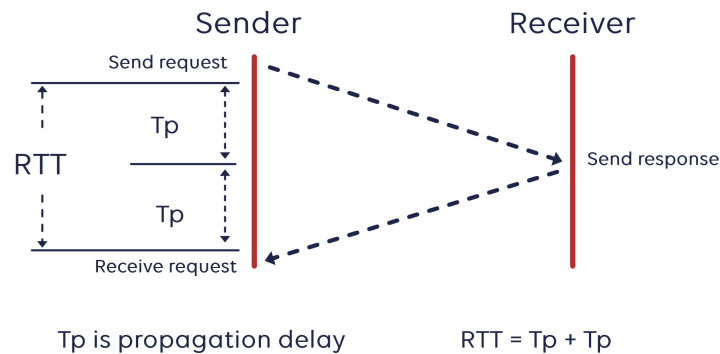
Quindi, la necessità di buone prestazioni in termini di affidabilità dei dati, latenza e utilizzo efficiente della larghezza di banda implicano l'urgenza di un'attenta progettazione di tecniche di controllo degli errori. [14]

Questo studio prende in esame trasmissioni con Automatic Repeat reQuest (ARQ).

Tale procedura si occupa del controllo e della rilevazione degli errori e si basa sulla ritrasmissione dei pacchetti la cui trasmissione è fallita.

Al termine di ogni ricezione il destinatario rimanda alla sorgente dei pacchetti di acknowledgement (ACK) o di negative acknowledgement (NACK), che supponiamo privi di errori, i quali segnalano rispettivamente l'assenza o meno di errori.

L'intervallo di tempo tra la trasmissione di un pacchetto e la sua ricezione è detto Round Trip Time (RTT) e include i tempi di propagazione T_p dei pacchetti di dati inviati dalla sorgente e dei pacchetti di feedback ACK/NACK provenienti dal ricevitore. [9]

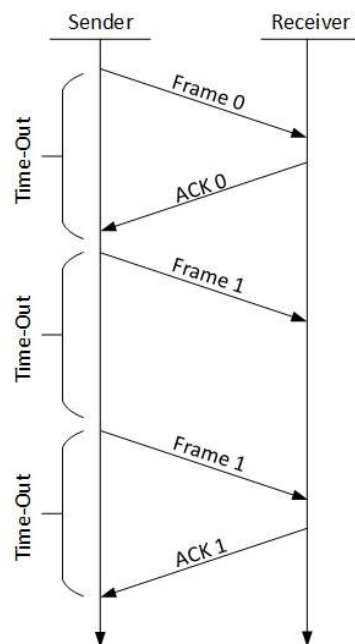


L'ARQ permette di aumentare l'affidabilità del canale ma aumenta il ritardo, riduce la bitrate e richiede la presenza di un canale di feedback.

Per questi motivi nella vita reale vengono utilizzati approcci ibridi per cui ARQ è affiancata da Forward Error Correction (FEC) che corregge l'errore automaticamente consentendo alla comunicazione di procedere senza interruzioni ma il cui svantaggio è la minor affidabilità.

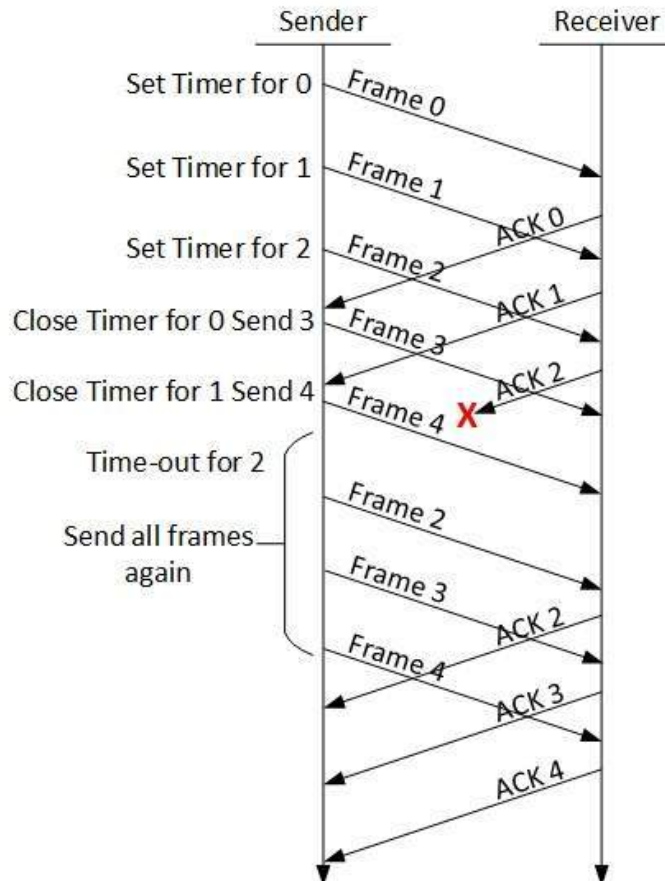
Per gestire una trasmissione tramite ARQ si distinguono tre schemi di base fondamentali: stop and wait (SW), go-back-n (GBN) e selective repeat (SR).

Lo SW consiste nella trasmissione di un pacchetto alla volta fino alla ricezione di un feedback positivo che stabilisce la sua corretta ricezione e solo a quel punto procede con l'invio del pacchetto successivo.



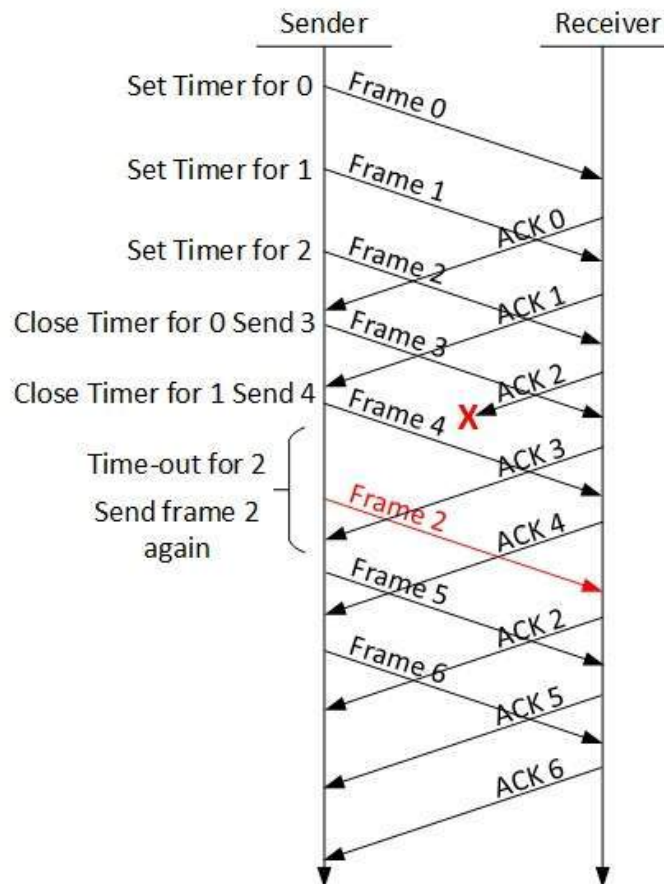
Dunque, se i pacchetti vengono trasmessi con un tempo di ritardo elevato tale sistema risulta inefficiente.

GBN invia tutti i pacchetti dello slot considerato senza aspettare la ricezione del messaggio di feedback.



Dopodiché, se la sorgente riceve un messaggio di NACK, procede a ritrasmettere il pacchetto la cui trasmissione è andata male e tutti i successivi in modo da mantenerli ordinati al lato del ricevitore.

Lo schema più efficiente, che è anche quello che consideriamo, è il SR che consente la ritrasmissione dei soli pacchetti affetti da errore ma richiede buffering sia dal lato del ricevente per riordinare i pacchetti, sia dal lato del trasmettitore per richiamare i pacchetti vecchi. [14]



Per la valutazione dell'AoI è stato avanzato un codice matlab basato su valutazioni teoriche e sono state fatte delle simulazioni pratiche che hanno confermato i risultati ottenuti dall'analisi.

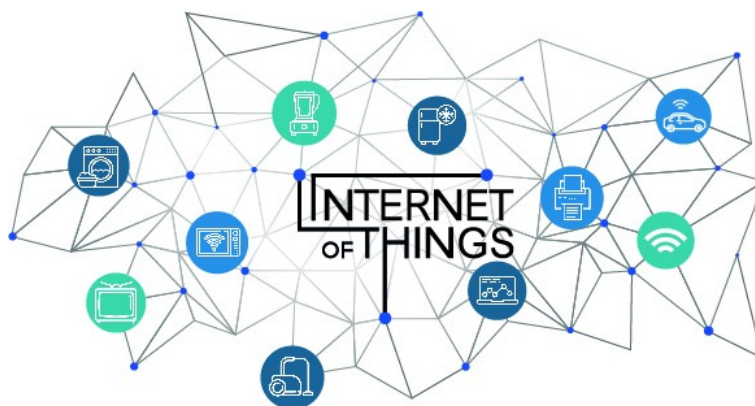
Infatti l'approccio frequentista utilizzato per calcolare la statistica di istanze particolari mostra la coincidenza delle frequenze con le probabilità dimostrando la veridicità delle teorie avanzate.

2

Stato dell'arte

2.1 MOTIVAZIONI

Con l'ampia diffusione di tecnologie intelligenti l'Internet of Things (IoT) è in continua evoluzione. Esso consiste in un'ampia gamma di prodotti, sistemi e sensori collegati in rete che sfruttano i progressi nella potenza di calcolo, nella miniaturizzazione dell'elettronica e nelle interconnessioni di rete per offrire nuove possibilità prima non possibili. [7]



L'implementazione su larga scala dei dispositivi IoT promette di trasformare molti aspetti del nostro modo di vivere.

Si prevede che in un futuro non troppo lontano centinaia di miliardi di sensori e dispositivi intelligenti interagiranno tra loro senza il bisogno dell'intervento umano, su base Machine-to-Machine (M2M), generando un'enorme quantità di dati disponibile agli esseri umani. [5]

2.1. MOTIVAZIONI

Questo consentirà di controllare eventi e oggetti anche in ambienti fisici remoti producendo cambiamenti significativi nella civiltà umana.

Un esempio è quello rappresentato dalle comunicazioni wireless e dalle tecnologie Internet a banda larga che migliorano notevolmente le nostre capacità di comunicazione e ci permettono di essere costantemente collegati al mondo esterno.

Alcuni studiosi giudicano l'IoT come una tecnologia in grado di trasformare completamente il modo in cui gli utenti interagiscono e sono influenzati da Internet, con il potenziale per aggiungere miliardi di valore all'industria e all'economia globale. [7]

Diverse aziende hanno offerto un'ampia gamma di proiezioni sul possibile impatto dell'IoT su Internet e sull'economia nei prossimi anni. Huawei prevede che le connessioni IoT saranno 100 miliardi entro il 2025 mentre McKinsey Global Institute ipotizza che l'impatto finanziario dell'IoT sull'economia globale potrebbe essere compreso tra \$3.9 e \$11.1 trilioni entro il 2025 suggerendo un quadro di crescita significativa. [7]

Grazie al continuo sviluppo di tecnologie per l'IoT l'AoI si sta affermando come metrica fondamentale per la valutazione delle prestazioni delle telecomunicazioni, insieme alle valutazioni basate sul rendimento e sulla latenza. [15]

L'AoI quantifica la freschezza delle informazioni e il suo ruolo è fondamentale nella ideazione efficiente di IoT.

Due degli obiettivi di progettazione più popolari nei sistemi di comunicazione sono la massimizzazione del throughput e la minimizzazione del ritardo end-to-end. La velocità ottimale alla quale la sorgente dovrebbe generare i suoi pacchetti per realizzare questi due scopi è però diversa dalle velocità ottimali che riducono l'AoI media. [17]

Massimizzare il throughput del sistema equivale a trasmettere i pacchetti di aggiornamento il più velocemente possibile mentre la minimizzazione del tempo di ritardo dei pacchetti si ottiene riducendo il tasso di generazione degli aggiornamenti alla fonte. In questo modo il monitor avrà informazioni obsolete sullo stato a causa della mancanza di ricezioni di pacchetti di aggiornamento.

A differenza di queste ben note metriche di prestazioni, il concetto dell'AoI consente di includere aspetti contestuali alla progettazione del sistema.

Una rete IoT è composta da tre componenti principali quali dispositivi IoT, rete di comunicazione e nodi di destinazione e la sua progettazione deve te-

ner conto del mantenimento della freschezza delle informazioni nei nodi di destinazione. [11]

Per garantire ciò è necessario quantificare rigorosamente la freschezza delle informazioni e l'AoI si dimostra la metrica migliore da adottare per l'attuarsi di tale scopo.

L'AoI è stata proposta per la prima volta in [17] come una nuova metrica in grado di catturare quale dev'essere la frequenza degli aggiornamenti delle informazioni.

Nel contesto delle reti IoT il nodo sorgente può fare riferimento a un singolo dispositivo IoT o a un aggregatore situato vicino a un gruppo di dispositivi IoT, che trasmette le misurazioni delle informazioni rilevate al nodo di destinazione [1].

Dal punto di vista energetico la natura vincolata dei dispositivi IoT, insieme alla congestione della rete, aumenta la probabilità di perdere pacchetti o di avere una ricezione fuori ordine determinando uno spreco di risorse dovuto a trasmissioni obsolete.

Da qui la necessità di introdurre la valutazione dell'AoI nella progettazione di queste reti che deve indagare un trade-off tra la massimizzazione del throughput, la minimizzazione del ritardo e il raggiungimento della somma minima dell'AoI.

2.2 LAVORI ASSOCIATI

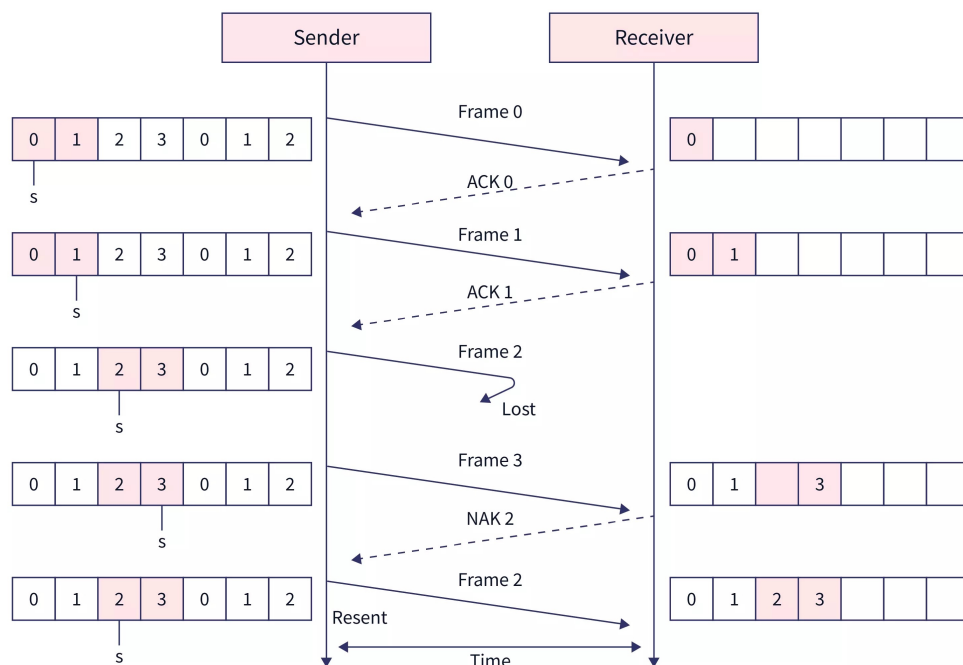
L'AoI, utilizzata principalmente nel campo delle telecomunicazioni, è una metrica di prestazione che indica il tempo trascorso dall'ultima informazione che ha raggiunto correttamente la destinazione.

L'obiettivo è dunque quello di minimizzare l'AoI ed è ciò che si propone di fare [3].

In particolare l'articolo prende in esame l'AoI per fare una valutazione della Slotted ALOHA utilizzando la teoria dei giochi e identificando quelle che possono rivelarsi le scelte strategiche dei vari nodi.

I nodi agiscono in modo indipendente tra loro e tentano di ottenere aggiornamenti da una fonte condivisa ma le collisioni impediscono loro di ottenere un aggiornamento utilizzabile.

A differenza di questa analisi che studia l'AoI in uno schema Slotted ALOHA il nostro studio si concentra sul suo calcolo per una trasmissione Automatic Repeat reQuest con Selective Repeat (SR ARQ).



Inoltre [3] calcola l'AoI nel caso di una trasmissione che ha successo con probabilità p dove p è collegata alla probabilità di collisione delle Slotted ALOHA mentre nella nostra analisi consideriamo p come un dato del problema pari a $1 - \epsilon ps$ che, diversamente dall'articolo, non è necessariamente un valore indipendente ed equamente distribuito (iid) in quanto il canale che prendiamo in esame è markoviano.

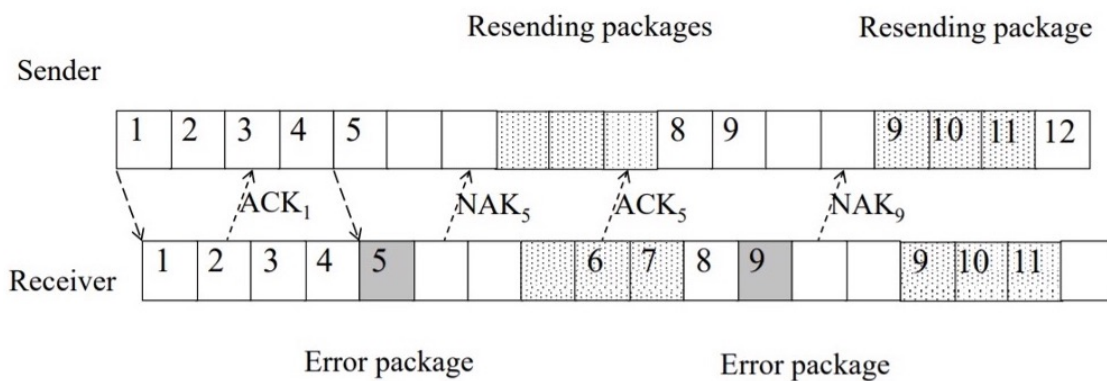
Il modello, invece, è lo stesso utilizzato in [14] e in [9] con la differenza che nel secondo articolo viene preso in considerazione il caso non Heavy Traffic mentre nella tesi viene approfondito il caso Heavy Traffic.

Nello specifico prendiamo in esame 2 nodi che comunicano tra loro attraverso un collegamento wireless rumoroso e consideriamo che il protocollo del livello collegamento dati sia completamente affidabile.

Con tali assunzioni ogni pacchetto viene trasmesso o ritrasmesso fino alla sua corretta ricezione e dunque vi è un numero di ritrasmissioni illimitate.

Inoltre supponiamo che sia il trasmettitore che il ricevitore abbiano una dimensione del buffer illimitata e che adottino il protocollo SR ARQ al livello collegamento dati.

Il trasmettitore invia pacchetti di dati al ricevitore che a sua volta rinvia al mittente i pacchetti di ACK/NACK come messaggio di feedback per segnalare rispettivamente l'assenza o meno di errori.



In questa analisi supponiamo che i pacchetti di feedback siano istantanei, in questo modo le informazioni circa la corretta ricezione di un pacchetto sono immediatamente disponibili dopo la sua trasmissione.

Questa situazione, nota in letteratura come SR ARQ ideale, semplifica il sistema consentendo all'analisi di trascurare la possibilità di avere pacchetti in

2.2. LAVORI ASSOCIATI

sospeso nel buffer del ricevitore.

In aggiunta assumiamo che il canale wireless sia descritto da una catena di Markov a tempo discreto a due stati (DTMC), con stati 0 e 1 e ipotizziamo che le trasmissioni nello stato 1 siano sempre errate mentre che lo stato 0 indichi la mancanza di errori nell'invio.

Tale ipotesi risulta ragionevole nella maggior parte dei casi [13] e dunque dal punto di vista teorico anche un modello così semplice è in grado di dare l'intuizione necessaria per l'analisi.

Nonostante ciò questo sistema si potrebbe estendere prendendo in considerazione casi più complessi, ad esempio in presenza di una catena di Markov di ordine superiore [10], e ciò non modificherebbe la natura dell'approccio analitico.

Le transizioni del nostro modello sono in corrispondenza degli slot di trasmissione e la matrice di probabilità di transizione del canale P è la seguente:

$$\begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix}$$

Da questa si può ricavare la probabilità di errore del canale in stato stazionario ϵ e la lunghezza media del burst dell'errore b :

$$\epsilon = \frac{p_{01}}{(p_{10} + p_{01})} \quad (2.1)$$

$$b = \frac{1}{p_{10}} \quad (2.2)$$

Un altro esempio di analisi con ACK/NACK errati è quello rappresentato da [12] il quale afferma che se il processo dell'errore del pacchetto di ACK è iid, l'estensione del caso base è banale e consiste nel tenere conto della singola probabilità di errore del pacchetto di ACK ϵ_{ACK} .

Ogni pacchetto che viene consegnato correttamente alla destinazione può quindi avere una probabilità ϵ_{ACK} di non essere riconosciuto.

Mentre se il canale di feedback ha memoria allora il suo processo di errore può essere descritto da una seconda matrice di transizione considerando la trasmissione di un pacchetto come riuscita solo quando entrambe le direzioni dei canali sono prive di errori, un esempio è dato in [18].

In realtà queste estensioni portano solo a complicazioni nel calcolo senza modificare l'approccio formale, dunque conviene prendere in esame il caso più semplice.

Inoltre risulta sensato assumere che i pacchetti di feedback non siano mai sbagliati in quanto si tratta di pacchetti molto più corti di quelli che contengono dati e spesso sono protetti con tecniche di codifica, rendendo così trascurabile l'impatto degli errori di ACK/NACK come mostrato in [4].

Consideriamo quindi lo schema SR ARQ in cui il trasmettitore invia nuovi pacchetti dal suo buffer fino a quando non riceve un segnale di NACK che segnala la presenza di un errore nella trasmissione.

Assumiamo che il Round Trip Time sia un multiplo intero di slot m dove m indica la dimensione della finestra ARQ.

Quindi il mittente riceve i messaggi di feedback per ciascun pacchetto dopo la trasmissione dei $m - 1$ pacchetti successivi. Dopo questo intervallo di tempo la procedura SR prevede che se il pacchetto di feedback risulta negativo si procede alla ritrasmissione dello stesso, altrimenti si procede con l'invio di un nuovo pacchetto.

Dunque le ritrasmissioni hanno la priorità rispetto ai pacchetti in coda al trasmettitore.

I pacchetti di dati vengono resi disponibili in modo ordinato ai livelli superiori e ciò è possibile grazie alla presenza di un buffer al lato ricevitore in cui vi sono i pacchetti ricevuti correttamente ma non ancora rilasciati in quanto pacchetti precedenti a questi non sono ancora stati risolti.

In questo modo il mittente ritrasmette solo i pacchetti la cui trasmissione non è andata bene.

Nel nostro sistema abbiamo considerato che il Round Trip Time sia uguale a m che è una costante. Si potrebbe considerare un Round Trip Time variabile come fatto in [2] ma in realtà il suo impatto sulle statistiche dei ritardi è piuttosto limitato.

Quindi, ancora una volta, consideriamo il caso più semplice.

Il modello di traffico che adottiamo è lo stesso di [14], ovvero la condizione di Heavy Traffic, in cui vi sono sempre dei pacchetti pronti ad essere trasmessi.

Ciò consente di non introdurre un ritardo dovuta all'attesa di avere un pacchetto pronto per essere inviato.

Questa condizione vale ad esempio per un protocollo di trasferimento file TCP (Transmission Control Protocol) come lo streaming continuo di dati

2.2. LAVORI ASSOCIATI

audio/video.

Qualora l'ipotesi di Heavy Traffic non dovesse essere verificata il ritardo di consegna calcolato con essa può essere considerato una buona approssimazione.

Infine assumiamo che il processo di arrivo dei pacchetti possa essere rappresentato da un modello di Bernoulli per cui l'arrivo dei pacchetti può avvenire in ogni slot con probabilità costante λ . In condizione di Heavy Traffic λ diventa uguale a 1.

3

Calcolo dell'Age of Information

Lo scopo principale di questo studio è il calcolo dell'AoI per sistemi markoviani per i quali la probabilità di transizione da uno stato al successivo dipende unicamente dallo stato del sistema immediatamente precedente.

Tale stima viene fatta per diversi valori della lunghezza media del burst dell'errore B per indagare gli effetti della correlazione sull'AoI media.

La matrice di transizione delle probabilità p dipende dai valori di B e di ϵ :

```
1 p = zeros(2,2);  
2 p(1,2) = eps/B/(1-eps);  
3 p(2,1) = 1/B;  
4 p(1,1) = 1-p(1,2);  
5 p(2,2) = 1-p(2,1);
```

Si procede quindi alla creazione della matrice di transizione T che descrive le probabilità del passaggio da uno stato ad un altro.

In particolare le possibili transizioni di uno stato generico j sono 2 in quanto la trasmissione di un pacchetto ha 2 soli esiti possibili: o va a buon fine oppure no.

Durante la trasmissione un pacchetto può essere inviato più volte e comunque non essere corretto. Identifichiamo questo con valori positivi che indicano il numero di trasmissioni affette da errori.

Un altro caso che può presentarsi è quello in cui la trasmissione del pacchetto è corretta ma dopo un numero arbitrario di tentativi. Questa situazione è descritta da valori negativi che indicano che il pacchetto, prima di essere trasmesso correttamente, aveva fallito dei tentativi e dunque risulta vecchio. Quin-

di per avere un'informazione aggiornata il pacchetto deve essere ritrasmesso correttamente un'altra volta.

Mappiamo questi numeri in un intervallo di valori che va da 0 a $2 \cdot Amax$ e quindi in numero pari ad $Atru = Amax \cdot 2 + 1$.

I valori da 1 ad $Amax$ rappresentano i numeri negativi mentre quelli da $Amax + 1$ a $2 \cdot Amax$ quelli positivi.

Se indichiamo con S lo stato il valore negativo corrispondente è $-S$ mentre quello positivo è $S - Amax$.

$Amax$ è un valore arbitrario che pone un limite superiore al numero di volte consecutive che un pacchetto può essere trasmesso in modo errato.

La grandezza di questo numero rappresenta un trade-off tra precisione dei risultati e spazio occupato in memoria.

Dal punto di vista teorico, infatti, è preferibile che sia un numero molto grande ma dal punto di vista pratico bisogna considerare i limiti dovuti alla memoria.

Ogni stato viene letto come un numero in base $Atru$ però scritto all'incontrario, ovvero la cifra meno significativa è quella in prima posizione.

Se consideriamo un Round Trip Time pari a 3 un ragionevole valore per $Amax$ può essere 8.

Prendiamo quindi in esame lo stato:

8	6	-1
---	---	----

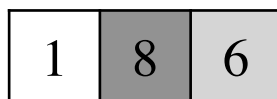
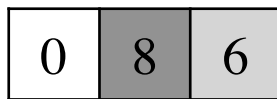
L'ultimo pacchetto trasmesso è in prima posizione mentre il prossimo pacchetto da inviare è quello in posizione m (in questo esempio $m = 3$).

Il pacchetto attuale ha un indice pari a 8 che indica che è stato trasmesso 8 volte in modo errato, il pacchetto precedente è stato trasmesso 6 volte senza avere successo e infine il terzo pacchetto è stato ricevuto correttamente dopo 1 trasmissione affetta da errore.

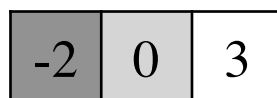
Per quanto riguarda la transizione degli stati, se abbiamo un valore positivo da ritrasmettere allora passiamo al corrispondere valore negativo se la ricezione va bene, altrimenti l'indice viene incrementato di 1.

Se invece abbiamo un valore negativo passiamo a 0 se la trasmissione avviene correttamente, altrimenti al primo valore positivo cioè 1.

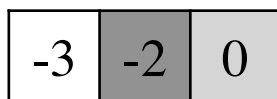
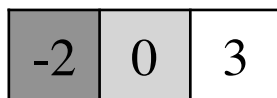
Nell'esempio viene inviato un valore negativo, dunque le 2 transizioni possibili a seconda che la trasmissione avvenga correttamente o meno sono rispettivamente:

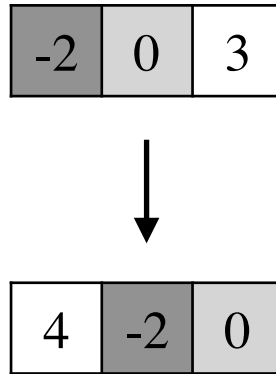


Se invece mi trovassi nello stato



i possibili stati futuri sarebbero rispettivamente:





Si procede quindi con il calcolo dell'AoI per il quale possiamo individuare 2 casi possibili.

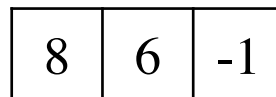
Il primo è quello in cui vi è almeno un pacchetto positivo e dunque almeno un dato che non è stato ancora ricevuto.

L'AoI di uno stato generico j segue dal pacchetto nella posizione di indice più alto e vale:

$$a(j) = posix + m \cdot (agmax - Amax - 1) \quad (3.1)$$

dove $posix$ è la posizione del pacchetto di indice maggiore più a destra, $agmax$ è il valore assunto, $Amax$ è il massimo valore che un pacchetto può assumere e infine m è il Round Trip Time.

Ad esempio l'AoI per lo stato



è determinata dal pacchetto in posizione 1 in quanto è quello più vecchio.

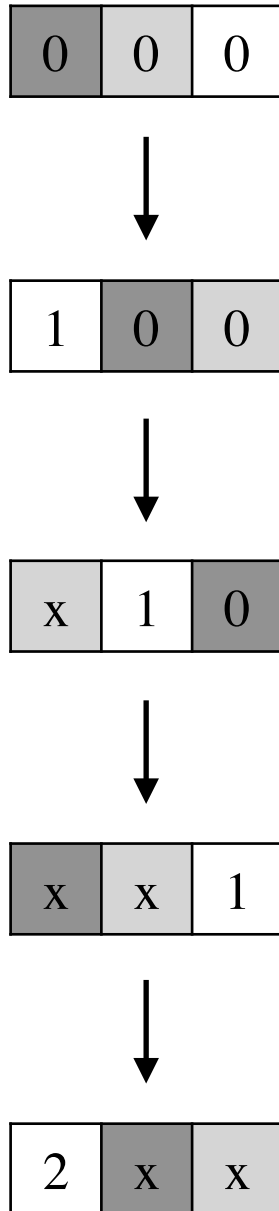
Ad un certo punto questo pacchetto si è trovato in prima posizione con indice 1.

Supponiamo che l'AoI fosse 0 per semplicità di ragionamento, è lecito farlo in quanto se fosse stata maggiore per la presenza di altri pacchetti problematici ad un certo punto questi sono stati risolti e l'AoI di tale pacchetto è quella rilevante per il calcolo dell'AoI totale.

Dunque l'AoI con il pacchetto problematico in prima posizione è 1.

Dopodiché questo è avanzato nella posizione 2 aumentando il valore dell'AoI a 2, poi è passato in posizione 3 e a questo punto il valore dell'AoI risulta 3.

Una volta ritrasmesso è tornato in posizione 1 ma con indice pari a 2 in quanto la trasmissione è ancora errata, a questo punto l'AoI vale 4.



Risulta quindi chiara la correttezza della formula per il calcolo dell'AoI in presenza di valori positivi.

Il secondo caso prevede l'assenza di valori positivi e può essere diviso in 2 sottoproblemi a seconda della presenza o meno di 0.

Se vi è almeno uno 0 ciò indica che almeno un pacchetto è stato trasmesso correttamente.

Consideriamo lo stato:

0	-2	-4
---	----	----

in cui è presente uno 0 e in cui non vi sono valori positivi.

L'AoI vale 0 in quanto non appena ricevo il pacchetto ho l'informazione aggiornata data l'assenza di pacchetti vecchi bloccanti.

Se invece lo 0 non si trovasse nella posizione iniziale conterebbe la posizione con indice minimo.

Ad esempio, se avessimo:

-1	0	0
----	---	---

l'AoI varrebbe 1 in quanto i pacchetti sono stati tutti trasmessi correttamente ma quello più recente è quello in posizione 2.

Il secondo sottocaso prevede l'assenza di 0, oltre che di numeri positivi.

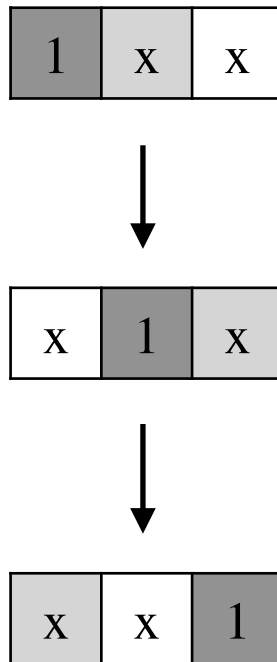
Consideriamo ora lo stato:

-4	-3	-1
----	----	----

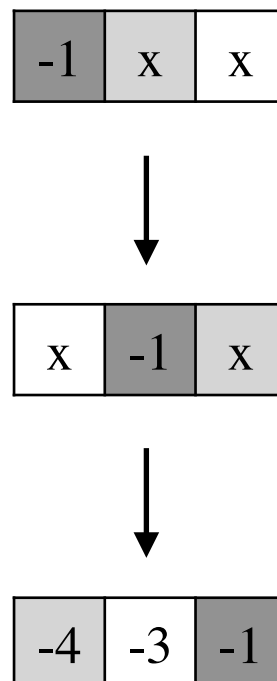
Il pacchetto più recente è quello che ha in valore assoluto l'indice più piccolo, nell'esempio -1 in ultima posizione.

Il -1 fa riferimento al fatto che la prima trasmissione di quel pacchetto è fallita mentre la seconda è andata a buon fine, dunque il pacchetto è arrivato correttamente ma fa riferimento ad un'informazione vecchia.

Consideriamo gli spostamenti di questo pacchetto:



Dopodiché la trasmissione è avvenuta correttamente e l'Age of Information è pari a 3.



Infine il pacchetto si è spostato di altre 2 posizioni.

L'informazione è corretta ma fa riferimento ad un Round Trip Time e 2

posizioni fa e quindi in definitiva l'AoI vale 5.

Dunque la formula per il calcolo dell'AoI di uno stato generico j , per questi 2 sottocasi, che sono riconducibili allo stesso, risulta:

$$a(j) = posix + m \cdot agmax - 1 \quad (3.2)$$

dove $posix$ è la posizione del pacchetto di indice minore in valore assoluto, $agmax$ è il valore assunto e m è il Round Trip Time.

A questo punto dobbiamo trovare le π ovvero le probabilità stazionarie.

Il modo più veloce per farlo è quello di prendere un vettore generico di probabilità iniziali e moltiplicarlo per se stesso un numero elevato di volte ottenendo in tal modo una stima delle probabilità stazionarie.

Nel codice abbiamo utilizzato come vettore arbitrario la prima riga della matrice di transizione T .

```
1 p1 = T(1, :);
2 for qq = 1:40000
3     p2 = p1 * T;
4     p1 = p2;
5 end
```

A questo punto la media delle AoI si trova sommando tutte le AoI dei vari stati possibili moltiplicata ciascuna per la rispettiva probabilità stazionaria:

```
1 avgseqage(binX) = sum(a.*p2);
```

4

Risultati

In questo capitolo si presentano risultati numerici volti a valutare l'analisi presentata nella sezione precedente e a ricavare conseguenze numeriche sulle prestazioni dell'AoI per sistemi SR ARQ.

Verranno considerate le prestazioni dell'AoI al variare di alcuni parametri quali la probabilità d'errore ϵ , la correlazione del canale B e il Round Trip Time m .

I risultati numerici ottenuti sono stati inoltre verificati per via simulativa, mostrando un accordo completo e verificando così la correttezza dell'analisi.

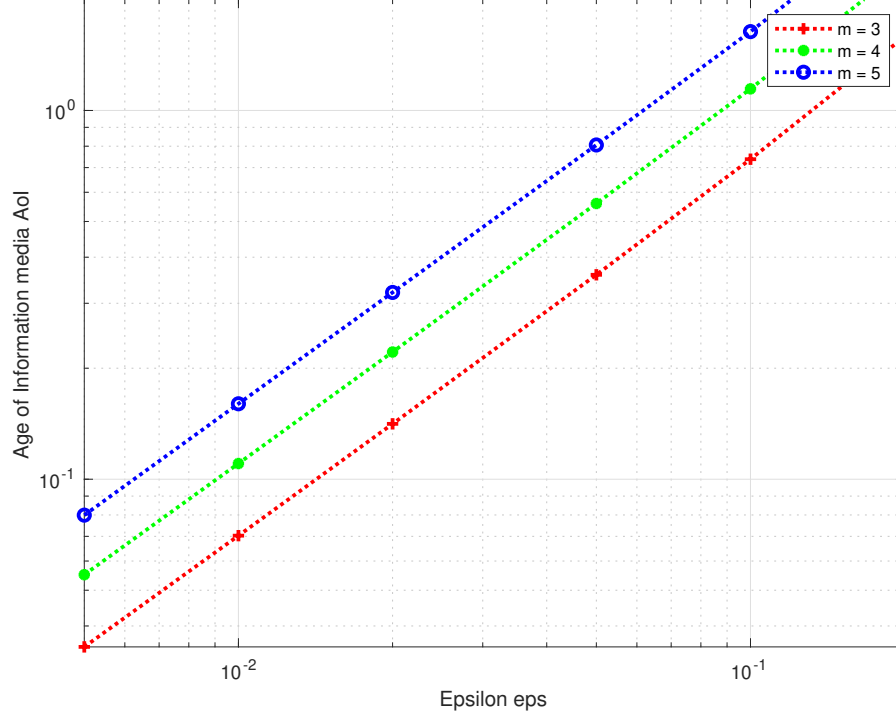
La prima simulazione effettuata è quella che valuta l'andamento dell'AoI media per tre diversi valori del Round Trip Time m e in particolare per $m = 3$, $m = 4$ e $m = 5$.

Questa analisi è stata replicata per differenti valori della lunghezza media del burst dell'errore B e in particolare per $B = \text{Biid}$, $B = 2$, $B = 5$ e $B = 8$.

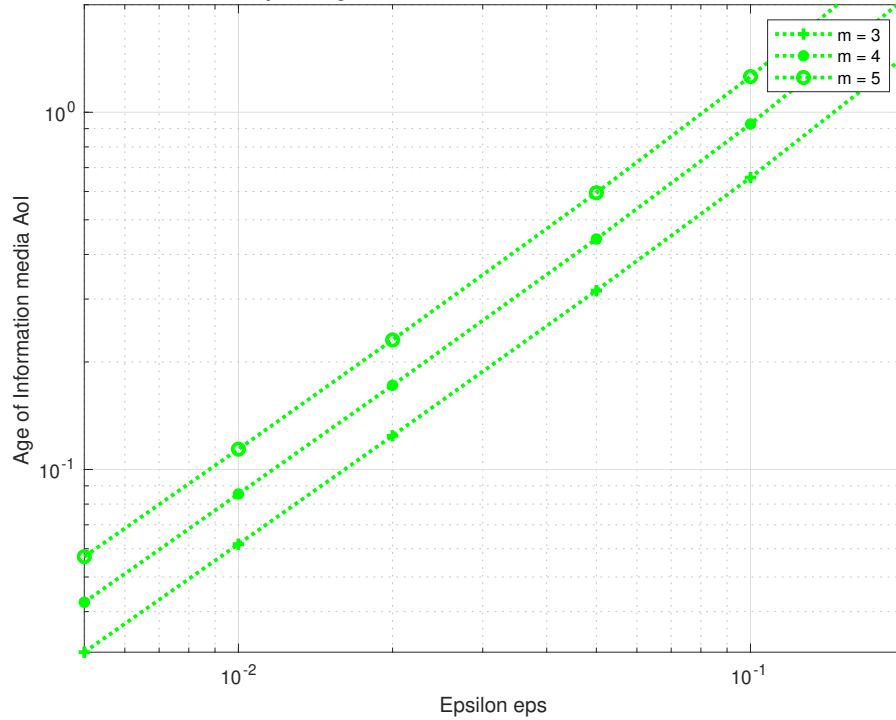
In tutti i casi si osserva un andamento crescente dell'AoI all'aumentare di ϵ e del Round Trip Time m .

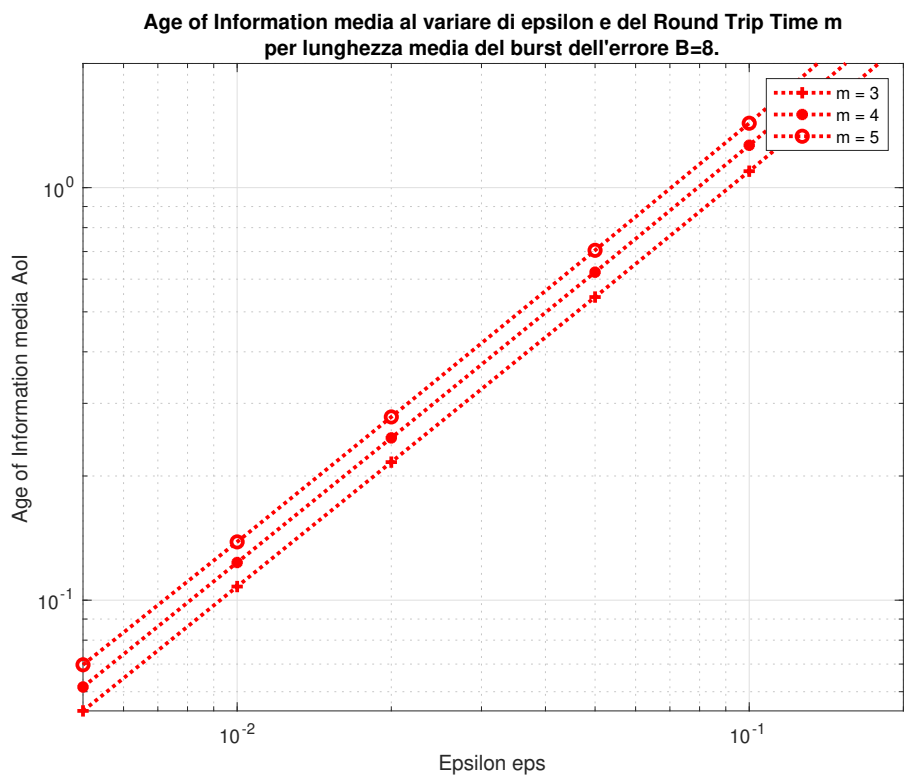
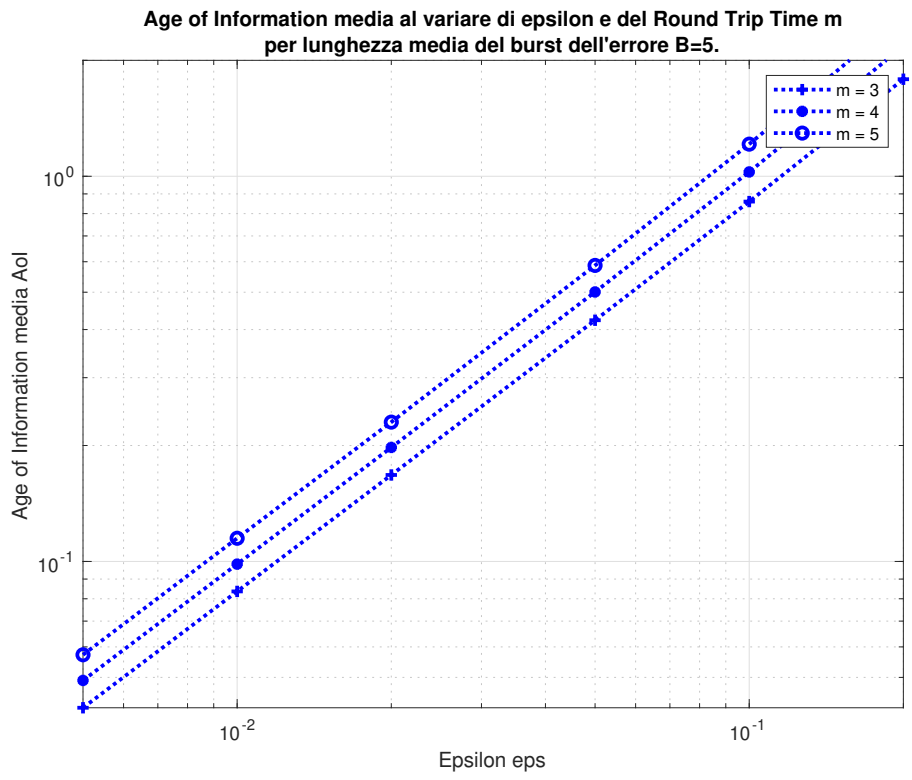
Inoltre si nota una differenza dell'AoI di circa il 25% tra i casi $B = 2$ e $B = 5$.

Age of Information media nel caso della lunghezza media del burst dell'errore indipendente ed equamente distribuita Biid, al variare di epsilon e del Round Trip Time m.



Age of Information media al variare di epsilon e del Round Trip Time m per lunghezza media del burst dell'errore B=2.





Si valuti ora l'AoI per un canale con B variabile e in particolare si esaminino canali i cui errori sono iid e canali correlati.

Si osserva che per valori alti della correlazione l'AoI è maggiore che nel caso iid in quanto l'informazione non viene aggiornata per intervalli di tempo molto lunghi.

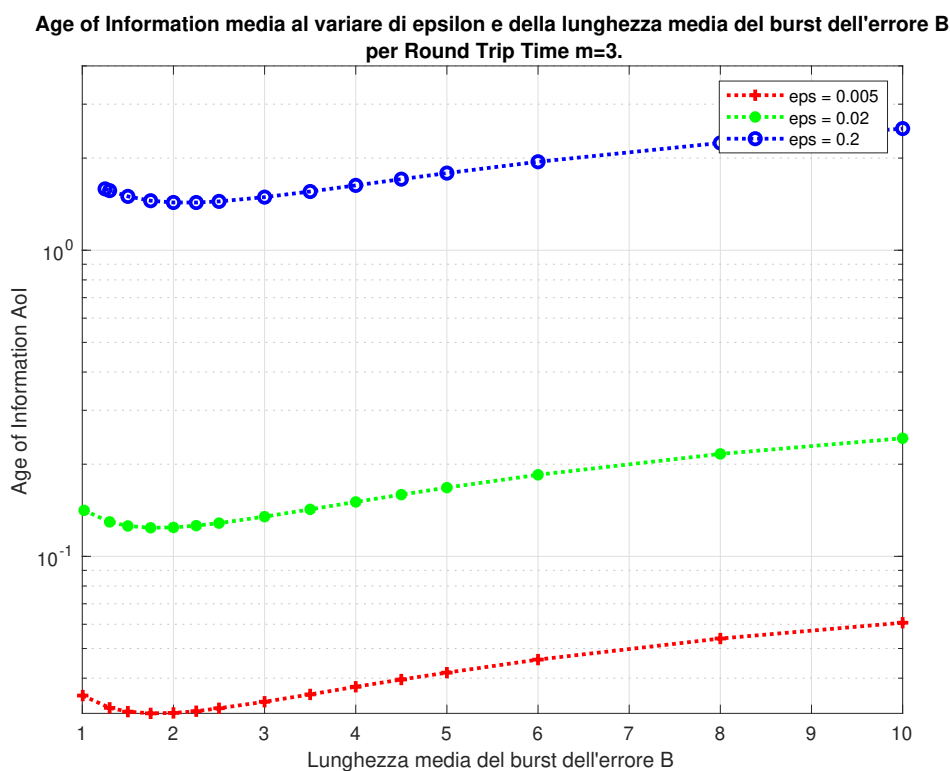
L'AoI, però, non cresce linearmente con B ma inizialmente cala fino ad un valore minimo e poi risale per valori di B elevati.

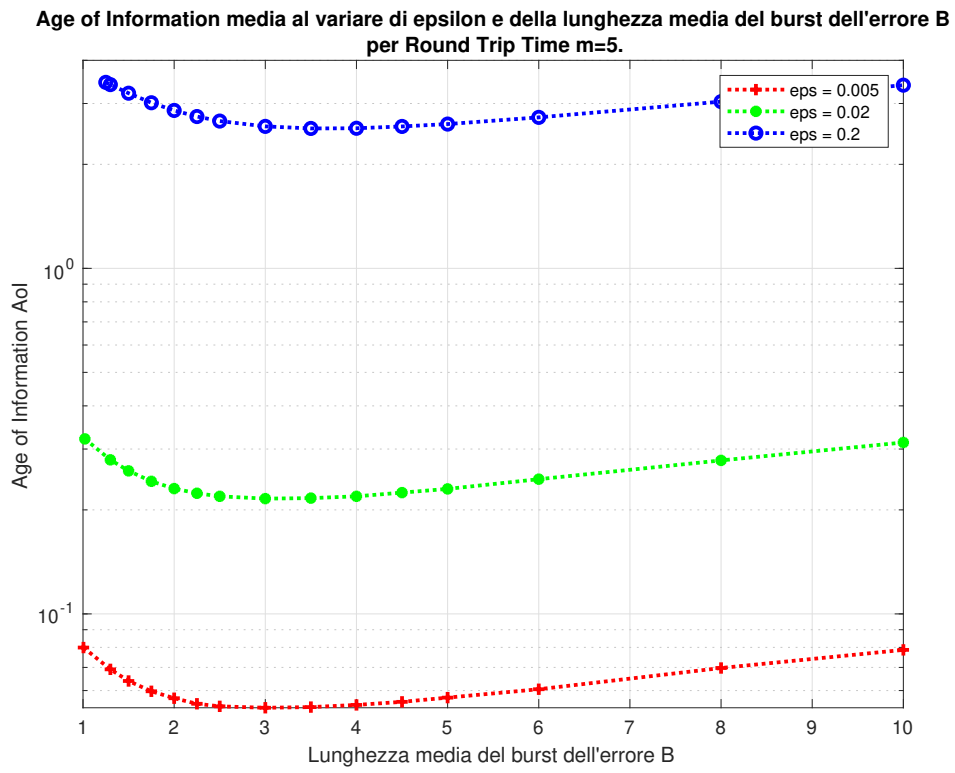
Dunque, una modica correlazione degli errori consente di avere un'AoI minore che nel caso iid.

Infatti è preferibile avere un valore di B prossimo al Round Trip Time m in quanto la trasmissione errata di un pacchetto blocca mediamente l'intera finestra di trasmissione, pari a m .

A parità di percentuale di errori conviene quindi che ce ne siano alcuni consecutivi. In questo modo si hanno lunghi periodi di correlazione in cui il canale è buono.

Questa valutazione è stata effettuata per $m = 3$ e $m = 5$ e dal loro confronto si rileva il notevole impatto di m sulla crescita dell'AoI.







Conclusioni e sviluppi futuri

In seguito all'industrializzazione e all'avvento della digitalizzazione le tecnologie ICT (Information and Communication Technologies) pervadono tutti gli ambiti della vita umana. Tra questi vi sono le reti sociali, il commercio elettronico, il GIS (Geographic Information System), la domotica, la realtà virtuale, il trasporto automatizzato e l'ambito biomedicale.

Esse vengono quindi adoperate in un vasto numero di campi e influenzano lo sviluppo sociale ed economico della civiltà umana.

Inoltre, dato il crescente volume di informazioni da gestire, è necessario adottare strategie per controllare le trasmissioni e fornire dati e informazioni di qualità.

L'AoI risulta quindi essere una metrica fondamentale per la valutazione delle prestazioni di un sistema di trasmissione. Infatti tiene conto di un aspetto essenziale quale è la freschezza delle informazioni trasmesse.

Minimizzare l'AoI vuol dire fornire informazioni aggiornate e dunque significative.

In particolare, la trasmissione SR ARQ viene impiegata in Internet, nelle telecomunicazioni nello spazio profondo, nella trasmissione satellitare e nell'archiviazione di dati e dunque la sua prestazione in termini di affidabilità è un problema rilevante e in continua crescita.

Possibili sviluppi futuri del presente lavoro comprendono il confronto tra un caso privo di feedback e uno con feedback, che è necessario per l'utilizzo di una tecnica ARQ ma comporta anche dei costi, ad esempio in termini energetici.

In questo contesto l'AoI è rilevante per ottimizzare la frequenza degli scambi, in particolare per sensori a cui è consentito un numero limitato di aggiornamenti, come tipico dei dispositivi IoT. [16]

Un altro sviluppo è quello che considera il collegamento tra l'utilizzo di una tecnica ARQ e il consumo energetico, nel caso di controllo di potenza.

Si può infatti assumere che le ritrasmissioni di pacchetti già trasmessi in precedenza richiedano una potenza minore rispetto a quelli nuovi in quanto possono combinare la trasmissione già effettuata con la prossima usando tecniche di diversità sulla ridondanza incrementale.

A questo proposito [6] indaga una politica di trasmissione che minimizza l'AoI dei pacchetti consegnati correttamente.

In particolare utilizza una catena di Markov a stati finiti a tempo discreto per valutare se conviene ritrasmettere un pacchetto di dati il cui precedente tentativo di trasmissione non è andato a buon fine o inviarne uno nuovo.

In aggiunta, questo studio può essere esteso a tecniche di ARQ ibrido. Ad esempio [8] presenta un modello analitico per lo studio di queste tecniche su canali di Markov a tempo discreto.

Nello specifico, la catena di Markov, che traccia l'esito della trasmissione, può essere utilizzata per valutare diverse metriche di prestazione, tra cui throughput, probabilità di perdita del pacchetto, numero di ritrasmissioni e ritardo.

In conclusione, l'analisi proposta può essere utile come punto di partenza per ulteriori studi, sia dal punto di vista matematico che applicativo, con importanti conseguenze sulle tecniche di trasmissione multimediale e sensoristica per le comunicazioni del futuro.

Bibliografia

- [1] M. A. Abd-Elmagid e H. S. Dhillon. «Average Peak Age-of-Information Minimization in UAV-Assisted IoT Networks». In: *IEEE Trans. Vehic. Tech.* Vol. 68. 2. Feb. 2019, pp. 2003–2008.
- [2] L. Badia. «A Markov Analysis of Selective Repeat ARQ with Variable Round Trip Time». In: *IEEE Communications Letters*. Vol. 17. 11. Nov. 2013, pp. 2184–2187.
- [3] L. Badia. «Impact of Transmission Cost on Age of Information at Nash Equilibrium in Slotted ALOHA». In: *IEEE Networking Letters*. Vol. 4. 1. Mar. 2022, pp. 30–33.
- [4] R. Cam e C. Leung. «Throughput analysis of some ARQ protocols in the presence of feedback errors». In: *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 45. 1. Gen. 1997, pp. 35–44.
- [5] Y. -K. Chen. «Challenges and opportunities of internet of things». In: *17th Asia and South Pacific Design Automation Conference*. 2012, pp. 383–388.
- [6] L. Crosara e L. Badia. «A Stochastic Model for Age-of-Information Efficiency in ARQ Systems with Energy Harvesting». In: *European Wireless 2021; 26th European Wireless Conference*. 2021, pp. 1–6.
- [7] S. Eldridge K. Rose e L. Chapin. «The internet of things: An overview». In: *The internet society (ISOC)*. Vol. 80. 2015, pp. 1–50.
- [8] M. Levorato L. Badia e M. Zorzi. «Markov analysis of selective repeat type II hybrid ARQ using block codes». In: *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 56. 9. Set. 2008, pp. 1434–1441.
- [9] M. Rossi L. Badia e M. Zorzi. «SR ARQ packet delay statistics on markov channels in the presence of variable arrival rate». In: *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Vol. 5. 7. Lug. 2006, pp. 1639–1644.

BIBLIOGRAFIA

- [10] D. -L. Lu e J. -F. Chang. «Performance of ARQ protocols in nonindependent channel errors». In: *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 41. 5. Mag. 1993, pp. 721–730.
- [11] N. Pappas M. A. Abd-Elmagid e H. S. Dhillon. «On the Role of Age of Information in the Internet of Things». In: *IEEE Communications Magazine*. Vol. 57. 12. Dic. 2019, pp. 72–77.
- [12] L. Badia M. Rossi e M. Zorzi. «SR-ARQ delay statistics on N-state Markov channels with finite round trip delay». In: *IEEE Global Telecommunications Conference*. Vol. 5. 2004, pp. 3032–3036.
- [13] R. R. Rao M. Zorzi e L. B. Milstein. «Error statistics in data transmission over fading channels». In: *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 46. 11. Nov. 1998, pp. 1468–1477.
- [14] L. Badia M. Rossi e M. Zorzi. «On the delay statistics of SR ARQ over Markov channels with finite round-trip delay.» In: *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Vol. 4. 4. Lug. 2005, pp. 1858–1868.
- [15] A. Munari. «Modern Random Access: An Age of Information Perspective on Irregular Repetition Slotted ALOHA». In: *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 69. 6. Giu. 2021, pp. 3572–3585.
- [16] A. Munari e L. Badia. «The Role of Feedback in AoI Optimization Under Limited Transmission Opportunities.» In: *arXiv preprint arXiv:2208.14128*. 2022.
- [17] R. Yates S. Kaul e M. Gruteser. «Real-time status: How often should one update?» In: *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*. 2012, pp. 2731–2735.
- [18] M. Zorzi e R. R. Rao. «Throughput performance of ARQ selective-repeat protocol with time diversity in Markov channels with unreliable feedback». In: *Wireless Network*. Vol. 2. Mar. 1996, pp. 63–75.