

Teoria dell'Informazione e Crittografia

UniShare

Davide Cozzi
@dlcgold

Indice

1	Introduzione	2
2	Introduzione agli argomenti del corso	3
3	Teoria dell'informazione	4
3.1	Codici per individuare errori	9

Capitolo 1

Introduzione

Questi appunti sono presi a lezione. Per quanto sia stata fatta una revisione è altamente probabile (praticamente certo) che possano contenere errori, sia di stampa che di vero e proprio contenuto. Per eventuali proposte di correzione effettuare una pull request. Link: <https://github.com/dlccgold/Appunti>.

Capitolo 2

Introduzione agli argomenti del corso

Si ha una sorgente che emette messaggi e li vuole mandare tramite un canale di comunicazione, che contiene del rumore che agisce sui messaggi e li rovina. Il destinatario per capire che il messaggio è rovinato ha varie tecniche. Una prima cosa che potrebbe fare è chiedere di rimandare il messaggio ma sarebbe meglio correggere *in loco* e si hanno algoritmi per farlo (tra cui lo **schema di Hamming** usando il modello del **rumore bianco**).

Un'altra tematica è la codifica stessa del sorgente, comprimendo flussi di dati, senza perdere informazioni.

Si parlerà anche dei canali di comunicazione, delle capacità e dei **teoremi di Shannon**.

Si vedranno poi le basi della crittografia, i crittosistemi storici, vari standard etc. . .

Capitolo 3

Teoria dell'informazione

Si hanno due sottoparti principali:

- **teoria dei codici**, per individuare e correggere gli errori. Si studia il canale di trasmissione cercando di contrastare il rumore che c'è nel canale
- **teoria dell'informazione**, in cui il focus è la sorgente delle informazioni

Vediamo il classico schemino della teoria dell'informazione:



Figura 3.1: Schema di un sistema generale di comunicazione tipico della teoria dell'informazione

Avendo:

- la **sorgente** che produce segnali, dei simboli, che potrebbero essere continui (come la corrente), anche se noi li assumeremo come simboli di un alfabeto finito, avendo quindi una **sorgente discreta**
- i simboli, per poter essere spediti all'interno di un canale, vanno codificati, avendo una parte di **codifica**

- una volta codificati i simboli vanno nel **canale di trasmissione**, dove si ha del **rumore**. Tale *rumore* prende un simbolo di quelli inseriti e lo cambia
- dal canale esce o il simbolo che è entrato o il simbolo modificato dal rumore e, tipicamente, non è immediatamente utilizzabile ma deve passare per una fase di **decodifica**
- il simbolo decodificato arriva al **destinatario**

Si hanno alcune assunzioni sulla sorgente:

- è **discreta**, i simboli emessi appartengono ad un alfabeto finito. Normalmente tali simboli sono $S = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$
- i simboli vengono emessi uno alla volta ad ogni **colpo di clock**. Non si ha mai che in un colpo di clock non escano simboli o che ne escano più di uno solo
- la sorgente è **senza memoria** (*memoryless*), avendo che i simboli già usciti non influenzano per nulla il simbolo che sta per uscire. Ogni simbolo che esce non tiene conto del passato, è *come se fosse il primo*
- è **probabilistica e randomizzata**. Si ha quindi che i simboli $S = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$ escono con le probabilità (p_1, p_2, \dots, p_q) . Deve valere che, ovviamente, che $p_i \in [0, 1], \forall i = 1, \dots, q$. Si ha inoltre che le varie probabilità, nel loro insieme, devono formare una distribuzione di probabilità, avendo che:

$$\sum_{i=1}^q p_i = 1$$

Potrei avere simboli con probabilità nulla di comparire ma nella pratica non è qualcosa di sensato. La sorgente la costruisco o da zero (e a quel punto un simbolo con probabilità nulla non lo metterei) o ho una sorgente che devo studiare (e qui potrei avere simboli con probabilità bassissime se non nulle, in tal caso bisognerebbe rivalutare l'assunzione dei simboli di quella sorgente). Possiamo quindi meglio dire che $p_i \in (0, 1], \forall i = 1, \dots, q$.

D'altro canto vedo se posso avere probabilità pari a 1 per un simbolo ma in tal caso avrei solo quello e non sarebbe interessante. Si ha quindi che:

$$p_i \in (0, 1), \forall i = 1, \dots, q$$

$$\sum_{i=1}^q p_i = 1$$

Le sorgenti che emettono i simboli secondo uno schema prefissato, deterministico, sono poco interessanti, avendo un comportamento banale

Il concetto di *spedire in un canale* può anche essere generalizzato in altre “idee”, come il disco su cui salvo dei dati e il tempo per cui li salvo.

La parte di *codifica e decodifica* può essere approfondita. Nello schema in figura 3.1 ci si è infatti concentrati sul canale, avendo che la codifica serve a fare in modo che il simbolo trasmesso vada bene per essere trasmesso nel canale. La **codifica** è a sua volta suddivisa in due parti:

1. **codifica di sorgente**, che ha come obiettivo rappresentare nel modo più efficiente e compatto i simboli emessi dalla *sorgente*. Si vuole quindi comprimere la sequenza di simboli (messaggi) emessi dalla sorgente, per impegnare meno banda possibile quando andremo a spedire. Si deve considerare che ogni bit in un file compresso è essenziale per permettere di poter recuperare il contenuto compresso
2. **codifica di canale**, che ha quasi uno scopo opposto rispetto alla *codifica di sorgente*, infatti ha come obiettivo quello di contrastare il rumore e per farlo aggiunge ridondanza al messaggio (da qui il discorso sull'obiettivo opposto)

Si cerca quindi di comprimere il più possibile nella prima fase, quella di *codifica di sorgente* e di ridondare il meno possibile nella seconda, quella di *codifica di segnale*.

Per capire meglio quanto detto diamo alcune formalità.

Definizione 1. Una **codifica** è una funzione *cod* che prende i simboli della sorgente $S = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$ e ad ogni simbolo s_i gli assegna una stringa formata coi caratteri di un certo alfabeto Γ , l'**alfabeto della codifica**. Le stringhe di Γ^* sono tutte quelle costruite sull'alfabeto Γ di lunghezza arbitraria e finita, compresa la stringa vuota ε , che posso quindi formare coi simboli di Γ . Quindi ad ogni $s_i \in S$ assegno un $\gamma_i \in \text{Gamma}^*$, avendo che:

$$\text{cod} : S \rightarrow \Gamma^*$$

generalmente si ha che:

$$|\Gamma| < |\Sigma|$$

e quindi i simboli di Σ sono mappati da cod in sequenze di simboli di Γ , a meno che non si ritenga accettabile il fatto che due o più simboli di Σ vengano mappati nello stesso simbolo di Γ .

Più avanti nel corso vedremo casi in cui $|\Gamma| > |\Sigma|$

Si hanno quindi i simboli $S = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$ che escono con probabilità (p_1, p_2, \dots, p_q) e che vengono codificati con le stringhe $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_q$. Le varie γ_i sono dette **codeword**. Chiamando $l_i = |\gamma_i|$ la lunghezza di tali stringhe si ha che tali stringhe hanno associati i vari l_1, l_2, \dots, l_q .

L'obiettivo quindi della *codifica di sorgente* è quello di minimizzare la lunghezza media L delle stringhe, avendo quindi una media pesata (pesata sulle probabilità):

$$L = \sum_{i=1}^q p_i \cdot l_i$$

Tenendo conto delle probabilità, per minimizzare L , si deve, avendo a che fare con termini che sono tutti > 0 (avendo supposto che non si hanno probabilità nulla e avendo che una codeword pari alla stringa vuota ha poco senso), fare in modo che i termini siano tutti il più piccolo possibile. Dato che le probabilità sono date mentre la codifica la sto costruendo, calcolando le codeword e di conseguenza le loro lunghezze, devo fare in modo che se la probabilità è grande la lunghezza deve essere piccola. Se invece la probabilità è piccola posso permettermi una lunghezza più grande. Parto quindi dai simboli con probabilità più grande e inizio a usare codeword più piccole possibili, usando via via quelle più lunghe.

Un'idea simile è usata nel *codice Morse* dove le lettere meno comuni hanno le sequenze più lunghe di punti, linee e spazi (avendo una codifica ternaria). La lettera più comune, la "e", ha infatti solo con un punto, la codifica più breve mentre le meno comuni hanno sequenze multiple di punti, linee e spazi che le separano (e gli spazi contano nella lunghezza di queste codeword).

Noi non sappiamo in anticipo che messaggi verranno prodotti dalla sorgente e quindi le codeword vanno studiate passo a passo, valutando i simboli più probabili per associare le codeword più brevi e i meno probabili per le codeword più lunghe.

Analizziamo meglio i codici, le codeword. Possono essere:

1. *a lunghezza fissa*, ovvero si ha che $l_1 = l_2 = \dots = L_q$
2. *a lunghezza variabile*, avendo che ogni codeword può avere lunghezza diversa

Ne segue quindi che il discorso di minimizzare L ha senso solo in presenza di *codeword a lunghezza variabile* (potendo decidere per ogni simbolo che

codeword associare), avendo la **codifica a lunghezza variabile**.

Con *codeword a lunghezza fissa* avrei tutte le l_i uguali e quindi avrei, avendo $l_i = l, \forall i$:

$$L = \sum_{i=1}^q p_i \cdot l_i \sum_{i=1}^q p_i \cdot l = l \cdot \sum_{i=1}^q p_i = l \cdot 1 = l$$

avendo, come facilmente intuibile, che la lunghezza media è la lunghezza fissa stessa. Si hanno codifiche a lunghezza fissa, come banalmente numeri a 64bit etc. . . in tal caso si parla di **codici a blocchi**.

Usando codifiche a lunghezza fissa si hanno anche esempi interessanti come quello del *codice pesato*, detto **codice pesato 01247**. Il nome deriva dal fatto che si possono codificare le cifre da 0 a 9 (da 1 a 9 con poi lo 0 dopo il 9) sotto forma di stringhe di 5 bit usando i pesi 0,1,2,4,7 associati a ciascun bit. Vediamo la tabella con la codifica di questo codice:

	0	1	2	4	7
1	1	1	0	0	0
2	1	0	1	0	0
3	0	1	1	0	0
4	1	0	0	1	0
5	0	1	0	1	0
6	0	0	1	1	0
7	1	0	0	0	1
8	0	1	0	0	1
9	0	0	1	0	1
0	0	0	0	1	1

Si nota che ogni codeword ha sempre 3 bit pari a 0 e due bit pari a 1, avendo un **codice 2-su-5**. Banalmente i pesi si associano ai numeri 0,1,2,4,7 in modo tale che essi, sommati, formino il numero voluto (ad esempio per 1 avrò i pesi su 0 e 1, per 9 su 2 e 7 etc. . .). L'unico caso è il caso dello 0, che non può essere ottenuto come somma di due pesi (spesso si hanno nei codici casi speciali da gestire a parte). Per lo 0 viene quindi presa una codeword non usata per altri numeri e quindi l'unica scelta possibile è avere i pesi su 4 e 7 (visto che farebbe 11).

Su un totale di 5 bit, avendo due bit a 1 e tre bit a 0, posso avere un numero di codeword pari a:

$$n = \binom{5}{2} = 10$$

avendo che i 5 bit sono associati ai 5 elementi dove 1 segnala che “sto usando quel peso”, prendendo quindi i sottoinsiemi di due elementi a partire da un

insieme di cinque elementi, ovvero “in quanti modi posso formare sottoinsiemi che contengono due elementi a partire da un insieme di cinque elementi” o detto altrimenti “quanti sono i modi in cui posso disporre due uni all'interno di una stringa di cardinalità cinque”.

In un linguaggio di programmazione privo di una struttura dati dedicata posso simulare un insieme di questo tipo tramite un vettore di bit (con 1 se l'elemento associato all'indice c'è).

*Il codice a barre è detto **codice 39** ed è un **codice 3-su-9**.*

In merito alla **decodifica** si ha che anch'essa sarà di due tipi:

1. **decodifica di canale**, vedendo e c'è stato un errore di trasmissione ed eventualmente correggendolo in automatico se il codice mi consente di farlo
2. **ulteriore decodifica** che non è esattamente una *codifica di sorgente* ma quanto una *trasformazione*, dove le *codeword* vengono trasformate nel formato leggibile dal **ricevente**

3.1 Codici per individuare errori

Ci concentriamo ora sulla *codifica di canale* ignorando per ora la *codifica di sorgente*, avendo come obiettivo l'aggiunta di ridondanza a simboli, che si suppongono già codificati con codeword, in modo tale che in queste codeword, spedite nel canale dove eventualmente si possono avere modifiche causate dal rumore, vengano eventualmente riconosciuti (ed eventualmente corretti) errori in fase di *decodifica*.

Parlando di codici per individuare errori solitamente, nei disorsi, si ha che $|\Gamma| < |\Sigma|$ Qualora il ricevente con la sua decodifica si accorga che è successo qualcosa ma non si è in grado di correggere quel qualcosa si hanno i cosiddetti **codici per individuare gli errori (*error detection codes*)**. Nel caso in cui il ricevente con la sua decodifica si accorga dell'errore ci si chiede anche se può correggerlo autonomamente senza chiedere che la sorgente spedisca nuovamente il messaggio. Non sempre questa cosa si può fare ma quanto accade si parla di **codici a correzione d'errore (*error correction codes*)**. Vediamo come capire se un messaggio ricevuto è valido.

Si supponga di spedire un pacchetto di n bit (ma potrebbe essere qualsiasi altra cosa ma per praticità prendiamo un bit) nel canale e che da esso esca un certo pacchetto sempre di n bit (per il rumore potrebbe non essere lo stesso).

Definizione 2. *Definiamo il **controllo di parità**.*

*Avendo una sequenza di n bits in cui si ha $n - 1$ bits, dette **cifre di messaggio di messaggio vero**, che chiameremo **msg** e un bit che è la **cifra***

di controllo, che chiameremo **check**. Le cifre di messaggio si indicano con \circ mentre la cifra di controllo con \times e quindi il messaggio è del tipo:

\circ	\circ	\circ	\circ	\dots	\circ	\times
---------	---------	---------	---------	---------	---------	----------

avendo $n - 1$ \circ e un solo \times (che potrebbe anche non essere in fondo, basta avere coscienza della posizione nel pacchetto, concordando la cosa tra mittente e ricevente).

Si ha che:

- chi spedisce ha le cifre di messaggio e deve calcolare la cifra di controllo
- chi riceve controlla che la cifra di controllo sia coerente con le cifre di messaggio

Nell'**error detection code** il ricevente è solo in grado di capire che la sequenza non è valida ma per farlo bisogna assumere di avere limitazioni nella sequenza di n bit che è entrata nel canale. Questa limitazione è che gli n bit entranti nel canale siano una **codeword valida**, avendo che, preso un sottoinsieme M di tutto l'insieme di n bit, ovvero $M \subseteq \{0,1\}^n$, M è un insieme di codeword valide. Quindi solo un messaggio appartenente a M può entrare nel canale. Fatta questa premessa, quando esce un messaggio, ho che, a causa del rumore, questo messaggio viene rovinato, non avendo più un messaggio valido (cosa che viene capita dal ricevente). Purtroppo può succedere che il rumore trasformi un messaggio valido in un altro messaggio valido ma non considereremo questa opzione per ora.

Nel **controllo di parità semplice** il pacchetto di n bit, come visto è formato da $n - 1$ bit di messaggio e un bit di controllo, la **check digit**. Si procede quindi, ricordando che siamo in un caso binario, a contare il numero di 1 nei primi $n - 1$ bit e se questo è dispari setto il bit di check a 1 e si nota che così il numero di 1 nel pacchetto intero di n bit diventa pari, avendo la cosiddetta **parità pari** (ovvero ogni sequenza valida ha un numero pari di 1). Controllando il numero di 1 il ricevente capisce se il rumore ha modificato il messaggio anche se non può capire cosa è successo (avendo quindi che il controllo di parità semplice è solo un error detecting code e non un error correcting code). Non potendo fare nulla, in caso di errore identificato, il ricevente può solo chiedere al mittente di inviare nuovamente il messaggio. Qualora il rumore modificasse il messaggio in modo tale che si abbia comunque un numero pari di 1 si rientrerebbe nella casistica sopra descritta in cui il rumore forma ancora un messaggio valido. Questa cosa può succedere se, nel caso binario, il rumore modifica un numero pari di cifre e quindi il controllo

di parità semplice *funziona solo se viene modificato un numero dispari di cifre*.

Vediamo quindi meglio come calcolare la **check digit**.
Si rinominiamo gli n bit come:

$$x_1 x_2 \cdots x_{n-1} y$$

quindi con y *check digit*.

Si ha che, con \oplus *xor*:

$$y = x_1 \oplus x_2 \oplus \cdots \oplus x_{n-1}$$

Ricordando che:

a	b	$a \wedge b$	$a \oplus b$
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

quindi vale 1 sse i due bit in input sono diversi ma questo non ci aiuta su $n - 1$ input. Altrimenti si ha che vale 1 sse il numero di 1 in input è dispari e questo ci aiuta su $n - 1$ input infatti la generalizzazione dello *xor* a più di due input è detta **funzione di parità**. Un altro punto di vista per considerare lo *xor* è quello della **somma a modulo 2** usando la notazione:

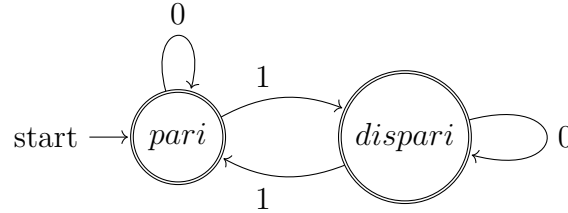
$$y = \bigoplus_{i=1}^{n-1} x_i = \sum_{i=1}^{n-1} x_i \bmod 2$$

avendo che faccio prima la somma e poi il modulo 2 mi dice 0 se è pari e 1 se è dispari.

Si ha inoltre una relazione interessante tra le formule scritte usando solo \oplus e \wedge nella cosiddetta **forma algebrica normale (ANF)**. Queste formule booleane possono essere trasformate in formule aritmetiche con *modulo 2*, quindi in \mathbb{Z}_2 dicendo che lo *xor* equivale alla *formula modulo due* e l'*and* al *prodotto modulo due* (la cosa vale in entrambi i versi).

La funzione di parità è così usata che in tutti i microprocessori, fin dagli anni settanta, si ha un *flag di parità* tra i flag della CPU, che viene settato come appena visto a seconda dei bit caricati su un registro particolare (a volte detto *accumulatore*). Tale calcolo è facilmente mappabile in un circuito, avendo che lo *xor* gode della proprietà associativa (avendo un circuito che fa un albero di porte *xor*).

Posso anche simulare lo *xor* con un **automa a stati finiti**, con due stati “pari” e “dispari”, con il “pari” stato iniziale (diciamo che input vuoto è pari):



Questo metodo ha senso se il canale è pochissimo rumoroso, avendo pochissima probabilità di avere la modifica di un bit e ancora meno di due (due modifiche si ricorda che non verrebbero rilevate essendo pari), così poca da poter ipotizzare che non avvengano mai due errori (e se mai dovesse succedere bisognerà valutare l'impatto del problema e le conseguenze). Stiamo assumendo quindi che la **probabilità d'errore** può essere **trascurabile** infatti canali di buona qualità dovrebbero sbagliare non più di un bit su un milione, per canali più affidabili anche uno su un miliardo. Possiamo quindi trascurare che possano accadere due errori e dire che il **controllo di parità** va bene.

Parliamo ora meglio di **ridondanza**, definendola formalmente.

Definizione 3. La **ridondanza** R è definita come:

$$R = \frac{\text{il numero totale di simboli/cifre spediti}}{\text{numero di simboli/cifre che sono effettivamente parte del messaggio}}$$

Nel caso del controllo di parità i simboli che vogliamo spedire sono n bit a fronte di $n - 1$ bit di vero messaggio. Si ha quindi:

$$R = \frac{n}{n-1} = \frac{(n-1)+1}{n-1} = 1 + \frac{1}{n-1}$$

Mettendo in evidenza che la ridondanza è sempre $R \geq 1$, visto che a numeratore abbiamo almeno una cifra in più (quella della check digit) e che quindi è sicuramente maggiore del denominatore. In realtà per avere $R = 1$ dovrei avere numeratore e denominatore uguali che non ha molto senso parlando di ridondanza, quindi nei casi interessanti si ha che $R > 1$. Guardando la formula la cosa è confermata da $1 + \frac{1}{n-1}$ con $\frac{1}{n-1}$ che viene detto **eccesso di ridondanza**.

Definizione 4. Possiamo **generalizzare** la definizione di **ridondanza**:

$$R = \frac{\text{msg} + \text{check}}{\text{msg}}$$

avendo:

- *msg* numero di simboli/cifre di messaggio
- *check* numero di cifre di controllo

Ma allora (avendo $check < msg$ per avere qualcosa di sensato):

$$R = \frac{msg + check}{msg} = 1 + \frac{check}{msg}$$

che è la forma “generale” della ridondanza. Si ha che $\frac{check}{msg}$ è **eccesso di ridondanza**.

Si può dire di non avere necessità di “proteggere” di più il bit di parità in quanto, per la macchina, conta come tutti gli altri. Tutti vanno “protetti” nello stesso modo.

Come ho la **parità pari** potrei avere la **parità dispari**, dove i messaggi validi hanno un numero dispari di 1. I vari ragionamenti sono analoghi, essendo tutto uguale dal punto di vista matematico, avendo un isomorfismo tra le due tecniche. La scelta tra i due dipende dai casi è dalla scelta di cosa rappresentiamo con 0 e 1 (pensiamo con 0 che rappresenta assenza di segnale, in questo caso meglio usare la parità dispari, mentre se 0 e 1 rappresentassero diverse quantità di Volt andrebbe bene la parità pari).

Nel corso si userà comunque solo la parità pari.

Introduciamo ora un primo modello di rumore, il **modello del rumore bianco**.

Definizione 5. Un **modello di rumore** è un modello matematico che descrive cosa succede nel canale quando il rumore rovina i bit.

Definizione 6. Il **modello del rumore bianco** consiste nell'avere il messaggio con i bit $x_1 x_2 \dots x_n$ (con magari x_n come controllo di parità ma dato che “i bit non sono colorati” la cosa non ci interessa davvero) e avere una certa probabilità p . Si hanno due condizioni:

1. si ha che $p \in (0,1)$ che è la probabilità che avvenga un errore in ogni posizione $i \in [1,n]$ del messaggio. Si ha quindi che la probabilità p è uguale in tutte le posizioni
2. le posizioni sono tutte indipendenti, ovvero il fatto che magari si ha un errore nella posizione i non influisce sulle altre. Avendo quindi l'evento casuale E_i con:

$$E_i = \text{è avvenuto un errore in } i$$

allora:

$$E_i \text{ ed } E_j \text{ sono indipendenti, } \forall i \neq j$$

Le due proprietà sopra elencate rendono molto semplice il modello.

Questo però non è molto realistico, basti pensare al rumore dovuto ad uno sbalzo di corrente, dove da un bit in poi e per diversi bit si avranno alte probabilità d'errore. Quando l'errore influisce su una certa porzione di bit si dice che si ha un **burst di errori** (che non può essere gestito con le tecniche per il rumore bianco, anche se si riesce con qualche workaround).

Si è visto che $p \in (0, 1)$ infatti:

- se si avesse $p = 0$ si avrebbe che ogni bit arriverebbe sempre corretto, ma questo può avvenire solo in un mondo utopico e non in quello reale/fisico. Non esiste un canale reale non affetto da errori, quindi si ha $p \neq 0$
- se si avesse $p = 1$ si avrebbe che ogni bit del messaggio arriverebbe errato ma questa non sarebbe una brutta situazione, anzi sarebbe ottima infatti mi basterebbe avere una porta logica not della linea di trasmissione per riottenere il messaggio corretto, ottenendo un canale $p = 0$ d'errore. Anche questo però è irrealistico quindi $p \neq 1$

Supponiamo ora che $p > \frac{1}{2}$ quindi ho più probabilità che un bit arrivi sbagliato che giusto. Anche in questo caso una porta logica not alla fine della linea di trasmissione per ottenere un canale con $1 - p$ come probabilità d'errore. Quindi anche questo non ha molto senso quindi si considera che:

$$p \in (0, \frac{1}{2})$$

Manca solo da valutare $p = \frac{1}{2}$.

Con $p = \frac{1}{2}$ si ha che il bit di output è completamente causale e indipendente da cosa sia stato spedito. È come se il canale generasse n bit casuali con probabilità uniforme ($\frac{1}{2}$), avendo un cosiddetto **canale completamente rumoroso**. Dal punto di vista pratico sarebbe interessante un tale canale, per altri punti di vista (come quello della crittografia), avendo infatti un **generatore di bit completamente casuali**. Purtroppo questo non si può fare quindi si assume $p \neq \frac{1}{2}$.

Cerchiamo di capire quale sia la probabilità che avvengano k errori con $0 \leq k \leq n$ (quindi da nessun errore a tutti gli n bit errati), che indichiamo con:

$$p[k \text{ errori}]$$

Valutiamo i vari casi:

- partiamo con 1 errore, quindi $k = 1$, avendo $p[1 \text{ errori}]$.
Questo significa che per il messaggio di n bit si immagina un vettore di bit associato con 0 e 1 come “bandierine” che indicano se è avvenuto un errore o no in una certa posizione. Quindi se in una certa posizione ho 0 diciamo che significa che non ho un errore di trasmissione mentre se ho 1 ho un errore. Il messaggio di n bit diventa quindi una sorta di *maschera* che con gli 1 mi dice dove è avvenuto l'errore. Se suppongo che ne è avvenuto uno solo avrò un solo 1 e bisogna calcolare la probabilità che questo avvenga. Supponga che l'errore sia al primissimo bit, quindi in posizione $i = 1$, avendo quindi, per il discorso delle “bandierine” che $msg = 10000 \dots 0$ e quindi si ha, avendo che la probabilità che avvenga la trasmissione avvenga correttamente è $1 - p$ (cosa che avviene $n - 1$ volte), mentre p che avvenga sbagliata (cosa che avviene una sola volta):

$$p[1 \text{ errori}] = p^1 \cdot (1 - p)^{n-1} = p \cdot (1 - p)^{n-1}$$

Posso fare · in quanto si è supposta l'indipendenza (non avendo intersezioni tra gli eventi).

Ma questo non sta considerando tutto ma solo la prima posizione. Completando il calcolo avendo di volta in volta in somma la probabilità di un errore nella posizione i ho che:

$$p[1 \text{ errori}] = p^1 \cdot (1 - p)^{n-1} + (1 - p)^1 \cdot p^1 \cdot (1 - p)^{n-2} + \dots$$

ma questo conto si può semplificare, avendo sempre gli stessi termini che si ripetono:

$$p[1 \text{ errori}] = n \cdot p^1 \cdot (1 - p)^{n-1} = n \cdot p \cdot (1 - p)^{n-1}$$

Infatti so che $p \cdot (1 - p)^{n-1}$ è la probabilità di avere un errore in una certa posizione fissata. Mi chiedo dove posso mettere questa posizione in tutti i modi possibili nel pacchetto di n bit e ho che, avendo un solo errore, ho n modi per posizionarlo, ciascuno con probabilità $p \cdot (1 - p)^{n-1}$

- passiamo a due errori, avendo $p[2 \text{ errori}]$.
Ho un ragionamento analogo. Parto supponendo di avere i due errori nelle prime due posizioni del messaggio/pacchetto, avendo quindi 1 nelle prime due posizioni della maschera. Abbiamo comunque già visto che poi il ragionamento si generalizza per qualsiasi posizione, in questo caso coppie (anche non consecutive) di

posizioni. Si ha che, ipotizzando che le prime due siano errate:

$$p[2 \text{ errori}] = p^1 \cdot p^1 \cdot (1-p)^{n-2} = p^2 \cdot (1-p)^{n-2}$$

Ma anche qui dobbiamo vedere la probabilità per qualsiasi coppia, facendo variare le due posizioni d'errore in tutti i modi possibili ma questo è come prendere un qualsiasi sottoinsieme di due elementi a partire da un insieme di n elementi ma questo altro non è che il calcolo che si fa tramite il coefficiente binomiale, avendo quindi:

$$p[2 \text{ errori}] = \binom{n}{2} \cdot p^2 \cdot (1-p)^{n-2}$$

- analogamente a quanto fatto per due errori potrei fare con tre, quattro, etc...
- possiamo generalizzare con k errori, avendo $p[k \text{ errori}]$.
Si hanno quindi k uni da disporre in tutti i modi possibili nel vettore di n bit. Si ha quindi:

$$p[k \text{ errori}] = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k}$$

E quindi posso valutare la cosa nei due casi estremi:

- $k = 0$, avendo 0 errori. Ho un solo modo per mettere zero 1 nella maschera di bit (da nessuna parte) e infatti (avendo poi tutti gli n bit la stessa probabilità di uscire corretti):

$$p[0 \text{ errori}] = \binom{n}{0} \cdot p^0 \cdot (1-p)^{n-0} = 1 \cdot 1 \cdot (1-p)^n = (1-p)^n$$

- $k = n$, avendo n errori¹. Ho un solo modo per mettere tutti 1 nella maschera di bit (ovunque) e infatti (avendo poi tutti gli n bit la stessa probabilità di uscire errati):

$$p[n \text{ errori}] = \binom{n}{n} \cdot p^n \cdot (1-p)^{n-n} = 1 \cdot p^n \cdot 1 = p^n$$

Si nota che i due casi estremi sono “speculari”.

¹Su dispense del prof grafico con $n = 8$, $p = 0.1$ e k che varia tra 0 e 8

In questo elenco puntato si è quindi ragionato sulle celle della maschera di bit associata al pacchetto e non del pacchetto in se, anche se spesso risulti ambiguo.

Consideriamo ora nuovamente $p[1 \text{ errore}]$, si ha che, dalla generalizzazione è:

$$p[1 \text{ errore}] = \binom{n}{1} \cdot p^1 \cdot (1-p)^{n-1} = n \cdot p \cdot (1-p)^{n-1}$$

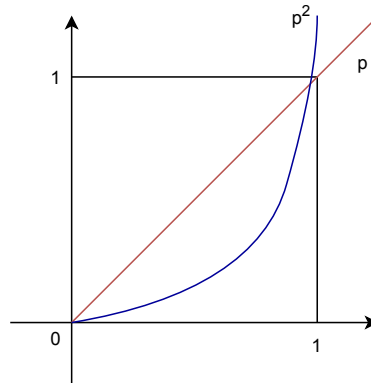
Introduciamo un'approssimazione interessante dell'analisi matematica che vale per $\alpha \in \mathbb{R}$ e $|x| < 1$, ovvero $-1 < x < 1$:

$$(1+x)^\alpha \simeq 1 + \alpha \cdot x$$

Ovvero $1 + \alpha \cdot x$ sono i primi due termini dello sviluppo in serie di $(1+x)^\alpha$. Tratto quindi la formula per un errore in base a questa approssimazione:

$$p[1 \text{ errore}] = n \cdot p \cdot (1-p)^{n-1} \simeq n \cdot p \cdot [1 - p \cdot (n-1)] = n \cdot p - n^2 \cdot p^2 + n \cdot p^2$$

Ma so che $p \in (0, 1)$ e quindi $p^2 < p$, infatti (grafico approssimativo):



ma quindi, sempre approssimando (avendo quindi già due approssimazioni):

$$p[1 \text{ errore}] = n \cdot p \cdot (1-p)^{n-1} \simeq n \cdot p - n^2 \cdot p^2 + n \cdot p^2 \simeq n \cdot p$$

Quindi:

$$p[1 \text{ errore}] \simeq n \cdot p$$

Analogamente ragiono per due errori:

$$p[2 \text{ errori}] = \binom{n}{2} \cdot p^2 \cdot (1-p)^{n-2} \simeq \binom{n}{2} \cdot p^2 \cdot [1 - p \cdot (n-2)] = \binom{n}{2} \cdot (p^2 - n \cdot p^3 + 2p^3)$$

Ma anche qui si ha che $p \in (0, 1)$ e quindi $p^3 < p$, e quindi si ha:

$$p[2 \text{ errori}] \simeq \binom{n}{2} \cdot p^2 = \frac{n \cdot (n-1)}{2} \cdot p^2$$

In generale, per k errori, con gli stessi passaggi:

$$p[k \text{ errori}] \simeq \binom{n}{k} \cdot p^k$$

I conti diventano molto più semplici.

Si è detto che se la probabilità di due errori è piccola si può decidere di trascurarla (usando poi solo il *controllo di parità semplice*). Da queste approssimazioni vediamo che la probabilità di un errore è $\simeq n \cdot p$ mentre per due $\simeq \frac{n \cdot (n-1)}{2} \cdot p^2$. Se ipotizziamo $p \sim 10^{-6}$, quindi uno su un milione, si ha che $p^2 = 10^{-12}$ quindi assolutamente trascurabile. Si segnala comunque che questa non è una pratica standard. Normalmente si hanno, ad esempio, **low density parity codes (LDPC)** dove si sparano a caso vari controlli di qualità nell'ottica di mantenere le proprietà di correzione degli errori usando meno controlli possibile, avendo, tornando alla ridondanza $R = 1 + \frac{\text{check}}{\text{msg}}$, che si vuole usare il minor numero di cifre di controllo per abbassare l'*eccesso di ridondanza*, abbassando la ridondanza stessa, avvicinandosi quindi a 1^+ (ci si avvicina da destra ovviamente). Riducendo l'*eccesso di ridondanza* si ha che ogni cifra di controllo *copre/protegge* il maggior numero di simboli/cifre del messaggio. *A parità di simboli inviati si vuole quindi ridurre il numero di cifre di controllo.*