



Elementi di Crittografia

A.A. 2025-2026



Prof. Paolo D'Arco

Introduzione

Crittografia / Crittologia

Due parole greche:

Kryptos che significa “nascosto”

Graphia che significa “scrittura” / **Logos** che significa “discorso”



Introduzione

Dal vocabolario Treccani:

“Crittografia: l’insieme delle teorie e delle tecniche (manuali, meccaniche o elettroniche) che permettono di **cifrare** un testo in chiaro ...”

Dal Concise Oxford English Dictionary:

“Cryptography: the **art** of **writing or solving codes**”

Definizioni storicamente corrette ma ... **non catturano** l’ampiezza attuale!



Attività umane

- Conversare privatamente
- Avere un diario segreto
- Prelevare soldi dal conto
- Votare alle elezioni
- Partecipare ad un'asta
- Giocare a poker
- Effettuare compravendite

...



Attività umane

- Conversare privatamente
- Avere un diario segreto
- Prelevare soldi dal conto
- Votare alle elezioni
- Partecipare ad un'asta
- Giocare a poker
- Effettuare compravendite

...

Dispositivi fisici e parti fidate

- Ambienti riservati/protetti
- Lucchetti e casseforti
- Bancomat, carta, pin
- Cabine e schede elettorali
- Buste oscuranti
- Carte da gioco
- Notai e ufficiali riconosciuti



Fiducia



Mondo digitale: “chiedere la luna ...”

Vogliamo riprodurre le stesse attività, ma gli unici oggetti di cui disponiamo sono sequenze di bit, che possono essere elaborate e trasmesse su reti di computer!

La crittografia moderna rende possibile tutto ciò senza ricorso ad alcun dispositivo fisico e riducendo al minimo l'uso di parti fidate



Crittografia moderna

*“Lo studio delle tecniche matematiche utili a proteggere l’informazione digitale, i sistemi di elaborazione e le computazioni distribuite **da attacchi avversari**”*

Strumento per corroborare la fiducia nei processi che abbiamo riprodotto o creato ex-novo nel mondo digitale



Scopo del corso

Presentare i principi e le tecniche alla base della Crittografia Moderna.

Al termine dovrete essere in grado di:

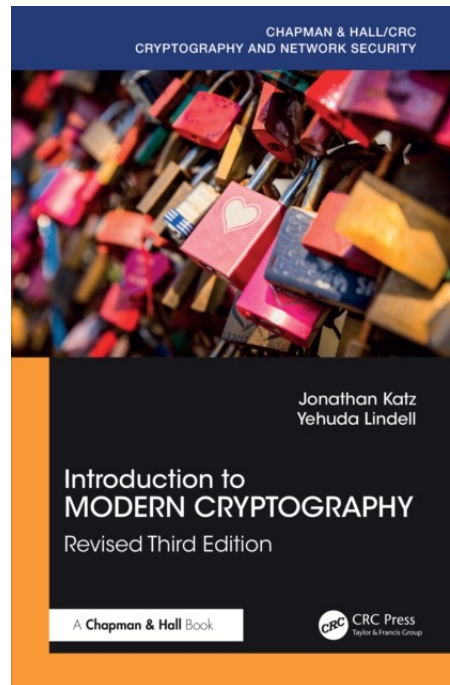
- **apprezzare** le **garanzie** che le primitive crittografiche offrono in termini di sicurezza
- **conoscere** ed avere una discreta familiarità con le **costruzioni standard**
- **effettuare valutazioni di base** di primitive e protocolli crittografici

Approccio: studio rigoroso e strutturato



Libri di testo

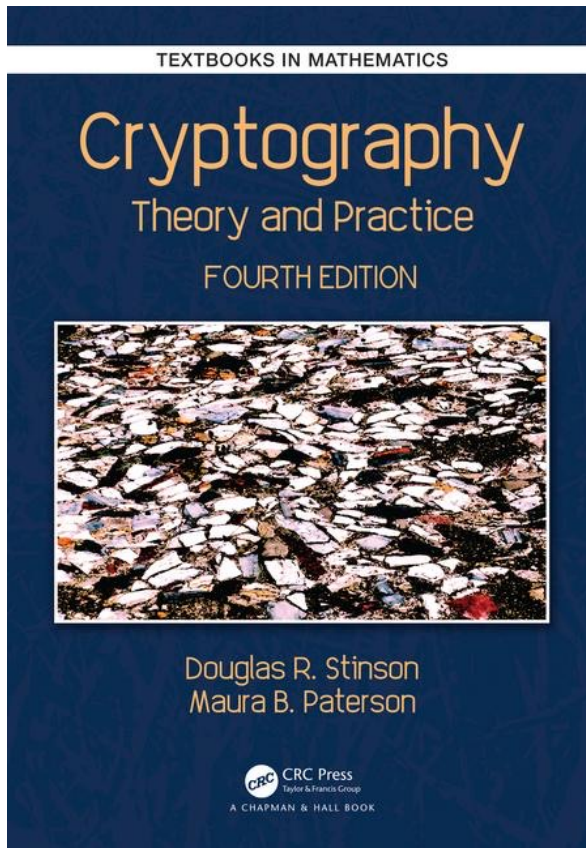
J. Katz and J. Lindell, **Introduction to Modern Cryptography**, revised 3-rd Edition.
CRC Press, 2025



Riferimento principale ... più letture di approfondimento consigliate



Libri di testo



D.R. Stinson and M.B. Paterson,
Cryptography: Theory and Practice,
CRC Press, 2018

Approccio più tradizionale, con capitoli su
tecniche avanzate (e.g. post-quantum crypto).



Confidenzialità ...

Dal vocabolario Treccani:

“Crittografia: l’insieme delle teorie e delle tecniche (manuali, meccaniche o elettroniche) che permettono di **cifrare** un testo in chiaro ...”

Dal Concise Oxford English Dictionary:

“Cryptography: the **art** of **writing or solving codes**”

Definizioni storicamente corrette ma ... **non catturano** l’ampiezza attuale!



Introduzione: oltre la “confidenzialità”

- Meccanismi per assicurare l'**integrità** dei dati
 - esser certi che i dati trasmessi o memorizzati non siano stati modificati
- Meccanismi per assicurare l'**autenticità** dei dati e delle parti che entrano in gioco in un protocollo
 - esser certi che **i dati** che abbiamo necessità di elaborare siano prodotti dall'ente/persona che supponiamo sia l'origine dei dati stessi
 - esser certi che **la parte** con cui stiamo comunicando sia quella giusta e non un impostore

e, ancora ...



Introduzione: oltre la “confidenzialità”

- Protocolli per lo scambio sicuro di **chiavi crittografiche** tra persone che non si sono mai incontrate in precedenza
- Protocolli per funzionalità generali e funzionalità specifiche:
 - Schemi per la **condivisione di segreti**
 - Sistemi di **prova a conoscenza zero**
 - **Calcolo sicuro di funzioni multi-party** (n variabili – n parti)
 - Elezioni elettroniche
 - Giochi on-line
 - Denaro digitale
 - Database distribuiti di transazioni autenticate ... e molto altro!



Crittografia moderna

- Tra gli anni 80' e 90': transizione da “arte” a “scienza”



Natura della transizione

Insieme di
strumenti euristici
che garantiscono
comunicazioni
segrete a militari e
diplomatici



Scienza che aiuta a
proteggere i
sistemi digitali usati
da persone
ordinarie sparse su
tutto il globo
terrestre



Crittografia Classica

- Permette di introdurre facilmente alcuni concetti di base
- Ci serve per motivare l'approccio più rigoroso che applicheremo nel seguito

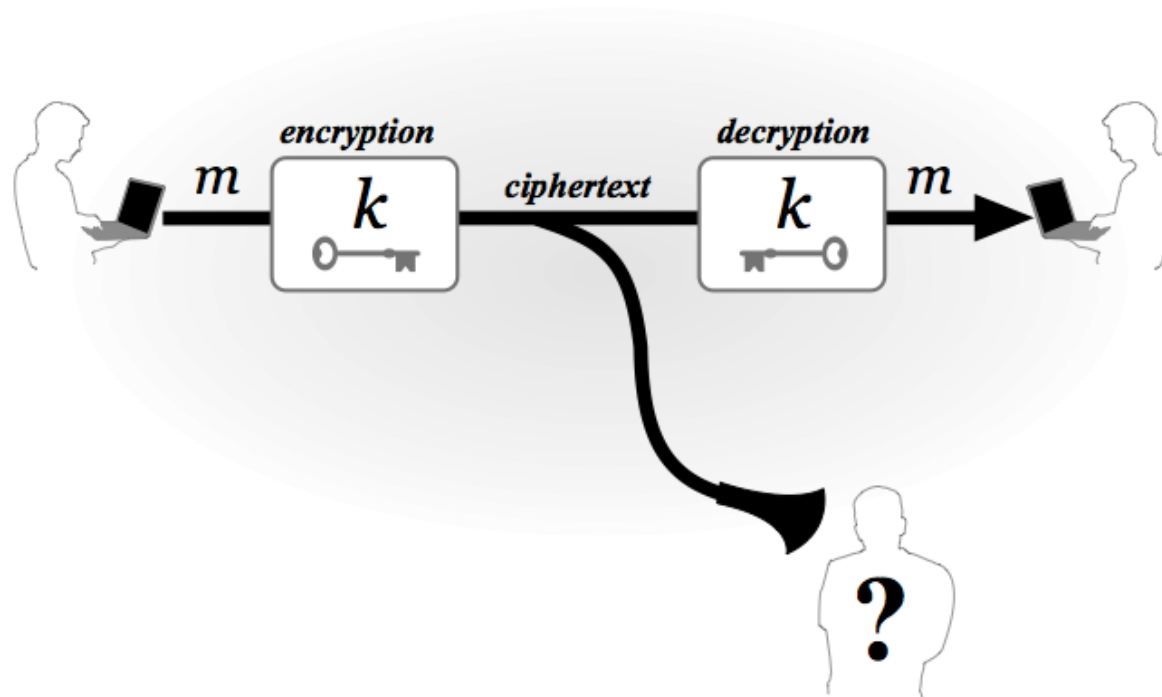
Obiettivo classico: progetto ed uso di codici (anche detti cifrari)

“due parti comunicano segretamente in presenza di un ascoltatore che può monitorare tutte le comunicazioni tra di loro”

Codici, in termini moderni: schemi di cifratura



Schemi di cifratura



Basato sulla segretezza della chiave condivisa dalle due parti comunicanti



Schemi di cifratura

A chiave simmetrica (symmetric key setting) = **stessa chiave** per cifrare e decifrare

A chiave asimmetrica (asymmetric key setting / public key setting) = **chiavi diverse**

Due applicazioni canoniche per lo scenario a chiave simmetrica:

- le parti sono separate “**nello spazio**”
- una parte comunica con se stessa “**nel tempo**”

Sintassi che useremo per riferirci agli oggetti di uno schema:

M	:	spazio dei messaggi leciti
C	:	spazio dei cifrati possibili
Gen	:	algoritmo per generare le chiavi
Enc	:	algoritmo di cifratura
Dec	:	algoritmo di decifratura



Chiavi e principio di Kerckhoffs

Osservazione: un avversario, disponendo della chiave K e **Dec**, decifra!

Pertanto, la chiave deve essere segreta. E circa l'algoritmo **Dec** di decifratura?

August Kerckhoffs, fine 19esimo secolo

“Il metodo di cifratura non è richiesto che sia segreto e dovrebbe essere in grado di cadere nelle mani del nemico senza creare problemi.”



La sicurezza non dovrebbe basarsi sulla segretezza degli algoritmi di cifratura, ma soltanto sulla segretezza della chiave.



Perché?

Argomenti a favore del principio di Kerckhoffs:

- è più facile per le parti proteggere solo K
- è più facile cambiare una chiave che un intero schema
- è più facile lo sviluppo su larga scala se gli utenti possono usare gli stessi algoritmi
- rende possibile la standardizzazione, che è utile per garantire compatibilità ed il pubblico scrutinio

Oggi il principio di Kerckhoffs è universalmente accettato e la pratica della cosiddetta “security by obscurity” – che poggia sulla segretezza anche dei metodi - sempre più desueta.



Nota: Kerckhoff e la Cybersecurity

Terminologia introdotta dalla letteratura (Science-fiction)

Cyberspace – termine introdotto nel romanzo *Burning Chrome* di William Gibson del 1982 per denotare reti interconnesse di computer, dispositivi e persone

Cyberpunk – titolo del romanzo di Bruce Bethke del 1983, usato per denotare individui “socialmente inetti” ma con capacità tecnologiche notevoli

Cyberattack, *cybercrime*, *cyberwar*, *cyberterrorism* ...et cetera

Il principio di Kerckhoff si applica anche nell'area più ampia della cosiddetta cybersecurity.



Schemi “storici”

Consideriamo ora alcuni cifrari al fine di:

- mostrare le debolezze di un approccio “ad hoc”, motivando l’importanza dell’approccio moderno strutturato
- rendere chiaro che approcci semplicistici difficilmente hanno successo



Cifrario di Cesare

“De Vita Caesarum”, 110 a. C.

Cifratura: ogni lettera del messaggio in chiaro viene sostituita dalla lettera che si trova **3** posti in avanti nell'alfabeto

A → D, B → E, C → F, ..., Z → C

Decifratura: operazione inversa (lettera che precede di **3** posti)

Osservazioni: lo schema di cifratura è fisso. Non c'è chiave segreta!

- una variante – ROT 13 – è usata ancora oggi in alcuni forum on-line per disturbare chi vuole capire al volo cosa le parti si dicono
- invece di **3**, i posti in avanti sono **13**

Il cifrario di Cesare è un caso particolare dello Shift Cipher



Shift cipher

Alfabeto Inglese mappato su $\{0, 1, 2, \dots, 25\}$

↑ ↑ ↑ ↑
a, b, c, ..., z

Messaggio $m = m_1 m_2 \dots m_n$, con m_i in $\{0, 1, 2, \dots, 25\}$

Enc_K($m_1 m_2 \dots m_n$) = $c_1 c_2 \dots c_n$, con $c_i = [(m_i + k) \bmod 26]$ per $i=1, \dots, n$

dove $[a \bmod N]$ denota il resto della divisione per N e risulta $0 \leq [a \bmod N] < N$

L'associazione di $[a \bmod N]$ ad a prende il nome di “riduzione modulo N ”.

Dec_K($c_1 c_2 \dots c_n$) = $m_1 m_2 \dots m_n$, con $m_i = [(c_i - k) \bmod 26]$ per $i=1, \dots, n$

È sicuro lo Shift cipher?



Ricerca esaustiva

Dato un cifrato, ci sono soltanto 26 possibili chiavi. Basta provarle tutte!

Un attacco che richiede di provare ogni possibile chiave viene detto un attacco per **ricerca esaustiva** o anche di **forza bruta**.

Condizione necessaria (ma non sufficiente) affinché un cifrario sia sicuro è che lo spazio delle chiavi sia sufficientemente grande (**sufficient key-space principle**)

“Qualsiasi schema di cifratura sicuro deve avere uno spazio delle chiavi sufficientemente grande da rendere un attacco per ricerca esaustiva impraticabile.”

Tipicamente deve contenere almeno 2^{80} elementi al giorno d'oggi.



Cifrari per sostituzione monoalfabetica

“Shift cipher”  l'associazione carattere in chiaro/carattere cifrato è uno **spostamento fissato**

“Mono-alfabetico”  associazione **arbitraria**

Spazio delle chiavi = { tutte le possibili permutazioni dell'alfabeto }

alfabeto in chiaro


a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z
X	E	U	A	D	N	B	K	V	M	R	O	C	Q	F	S	Y	H	W	G	L	Z	I	J	P	T

alfabeto cifrante



Cifrari per sostituzione monoalfabetica

Messaggio in chiaro =	tell	him	about	me	tellhimaboutme
Messaggio cifrato =	GDOO	KVC	XEFLG	CD	GDOOKVCXEFLGCD

Sostituzione monoalfabetica  La chiave specifica una sostituzione **FISSA** per ogni carattere del messaggio in chiaro

Lo stesso carattere viene cifrato sempre allo stesso modo

| Spazio delle chiavi | = $26! = 26 \cdot 25 \cdot 24 \cdot \dots \cdot 2 \cdot 1 \approx 2^{88}$

Un attacco di forza bruta è impraticabile! Sfortunatamente, non è sufficiente ...



Analisi delle frequenze

Il cifrario è facile da “rompere”.

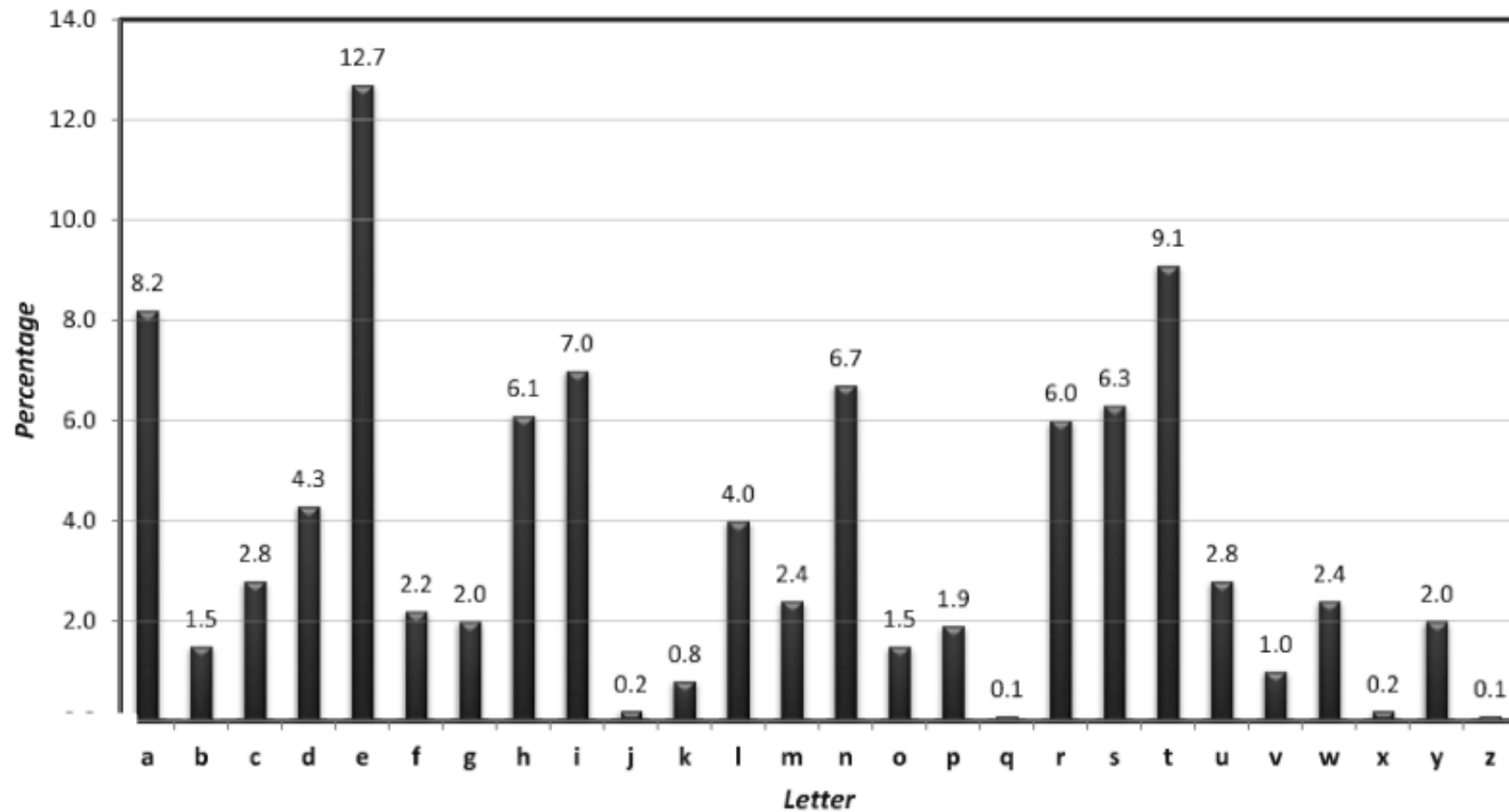
Supponiamo che il messaggio in chiaro sia testo inglese corretto. Il cifrario può essere attaccato usando **caratteristiche statistiche** della lingua inglese.

L'attacco si basa su due elementi:

1. Per ogni chiave, l'associazione di ciascuna lettera **è fissa**, per cui se “D” viene associata ad “e”, allora **ogni** occorrenza di “e” nel messaggio in chiaro diventa “D” nel cifrato
2. La **distribuzione delle frequenze** delle lettere dell'alfabeto inglese è **nota**.

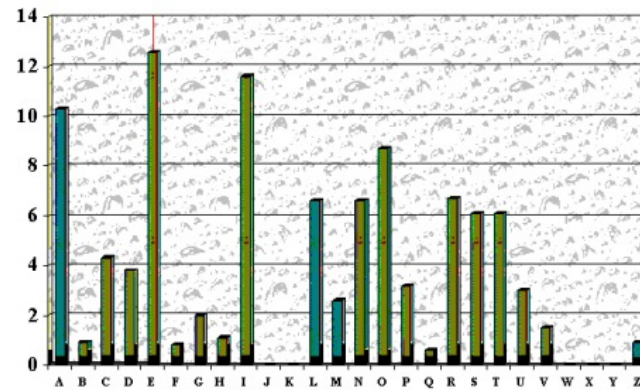


Frequenze delle lettere dell'Inglese



Frequenze in lingue diverse

Frequenze delle lettere



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
italiano	10,3	0,9	4,3	3,8	12,6	0,8	2,0	1,1	11,6	0,0	0,0	6,6	2,6	6,6	8,7	3,2	0,6	6,7	6,1	6,1	3,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,9
inglese	7,3	1,3	3,5	4,3	12,8	3,0	2,0	3,5	7,8	0,3	0,5	3,7	2,8	7,8	7,5	2,8	0,5	8,5	6,0	9,3	3,0	1,5	1,5	0,5	2,3	0,3
francese	8,3	1,3	3,3	3,8	17,8	1,3	1,3	1,3	7,3	0,8	0,0	5,8	3,2	7,2	5,7	3,7	1,2	7,3	8,3	7,2	6,3	1,8	0,0	0,0	0,8	0,0

Attacco tramite analisi delle frequenze

L'attacco opera **tabulando le frequenze dei caratteri presenti nel cifrato.**

Queste frequenze sono poi **comparate** alle frequenze dell'Inglese

In questo modo:

- parte dell'associazione può essere inferita
- ipotesi corrette ed altre conoscenze della lingua inglese possono aiutare a ricostruirla (e.g., dipendenze tipo “the”, “qu”, etc)

Conclusione: spazio delle chiavi grande ma ... cifrario debole!



Provate!

Per rendervi conto dell'applicabilità dell'attacco e del suo funzionamento, provate a decifrare l'esempio che segue (usando la tabella delle frequenze dell'Inglese)

JGRMQOYGHMVBjWRWQFPWHGFFDQGFPFZRKBEEBJIZQQOCIBZKLFAFGQVFZFWWE
OGWOPFGFHWOLPHLRLOLFDMMFGQWBLWBWQOLKFWBYLBLYLFSFLJGRMQBOLWJVFP
FWQVHQWFFPQOQVFPQOCFPOGFWFJIGFQVHLHLROQVFGWJVFPFOLFHGQVQVFILE
OGQILHQFQGIQVVOSFAFGBWQVHQWijVWJVFPFWHGFIWIHZZRQGBABHZQOCGFHX



Shift cipher: un attacco più efficiente

Usiamo la distribuzione delle frequenze per calcolare la chiave segreta.

Sia $0 \leq p_i \leq 1$ la frequenza della i -esima lettera dell'alfabeto inglese.

Risulta:

$$\sum_{i=0}^{25} p_i^2 \approx 0.065$$

Si consideri il cifrato dato.

Sia $0 \leq q_i \leq 1$ la frequenza della i -esima lettera dell'alfabeto inglese nel cifrato, cioè:

$$0 \leq q_i = (\text{num. di occorrenze } i\text{-esima lettera nel cifrato} / \text{lungh. cifrato}) \leq 1$$


Se la chiave segreta scelta è k , allora si ha che:



Shift cipher: un attacco più efficiente

$p_i \longrightarrow q_{i+k}$ per tutti gli indici $i=0, \dots, 25$

i-esima lettera (i+k)-esima lettera nel cifrato



sostituita con

Per ogni valore di $j = 0, 1, \dots, 25$, calcoliamo

$$I_j = \sum_{i=0}^{25} p_i \cdot q_{i+j}$$

Ci aspettiamo: $I_k \approx 0.065$

$I_j, j \neq k$ sostanzialmente diverso da 0.065



Shift cipher: un attacco più efficiente

L'attacco restituisce **come ipotesi per** k il valore di j per cui I_j è più vicino a 0.065

Osservazioni sull'attacco:

- è efficiente
- è facile da automatizzare
- non è richiesta alcuna “analisi del significato” (attacco precedente manuale)



Il cifrario di Vigenère

Realizza uno “shift poli-alfabetico”

Osservazioni:

- gli attacchi statistici contro i cifrari mono-alfabetici sono possibili poiché la chiave definisce un’associazione **FISSA**, lettera per lettera, da applicare al testo in chiaro
- nei cifrari poli-alfabetici la chiave definisce una sostituzione da applicare a blocchi di caratteri del messaggio in chiaro

e.g., ab → DZ, ac → TY



non è associata ad un singolo
carattere nel cifrato

**In questo modo essenzialmente
la distribuzione delle frequenze
viene “appianata”**



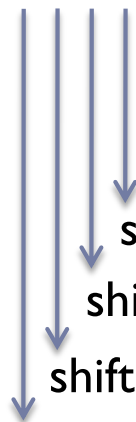
Il cifrario di Vigenère

Il cifrario di Vigenere usa semplicemente “più istanze indipendenti dello shift cipher”.

chiave  stringa di caratteri

Plaintext:	tellhimaboutme
Key (repeated):	cafecafecafeca
Ciphertext:	VEQPJIREDOZXOE

Ricordo che:
caratteri = numeri
shift = + mod 26



- shift cipher con chiave “e”: 4°, 8°, 12°, ...
- shift cipher con chiave “f”: 3°, 7°, 11°, ...
- shift cipher con chiave “a”: 2°, 6°, 10°, ...
- shift cipher con chiave “c”: 1°, 5°, 9°, ...

Il cifrario di Vigenère

Se la chiave è sufficientemente lunga, rompere il cifrario sembra impresa ostica.

È stato ritenuto inattaccabile per centinaia di anni.



Rompere il cifrario di Vigenère

Per iniziare, si **assuma** che la lunghezza (detta *periodo*) della chiave k sia nota.

Sia $k = k_1 k_2 \dots k_t$, dove k_j è un carattere della chiave.

Si divida il cifrato $c = c_1 c_2 \dots$ in t parti. Precisamente, per $j=1, \dots, t$



Si calcoli la chiave k_j , per $j=1, \dots, t$, usando l'attacco efficiente contro lo shift cipher descritto in precedenza.



Test di Kasiski

Facile, vero? E se invece la lunghezza della chiave non è nota? Che si fa?

1. Se è noto un massimo per la lunghezza, potremmo tentare tutte le ipotesi, una per una, i.e., $t=1$, $t=2$, $t=3$, ...
2. Usare il metodo di Kasiski
 - cerca di individuare “pattern ripetuti”

Plaintext:	the	man	and	the	woman	retrieved	the	letter	from	the	post	office
Key:	bea	dsb	ead	sbe	adsbe	adsbeadsb	ead	sbeads	bead	sbe	adsb	eadsbe
Ciphertext:	ULE	PSO	ENG	LII	WREBR	RHLSMEYWE	XXH	DFXTHJ	GVOP	LII	PRKU	SFIADI

due volte

Test di Kasiski

La distanza tra i pattern ripetuti, assumendo che non sia un evento accidentale, deve essere un **multiplo** del periodo della chiave

Il **massimo comune divisore** delle distanze tra i pattern ripetuti restituirà il periodo (o un multiplo di esso)



limite superiore al periodo

Tuttavia, esiste un altro approccio al calcolo del periodo, maggiormente strutturato e facile da automatizzare.

È il metodo dell'indice di coincidenza.



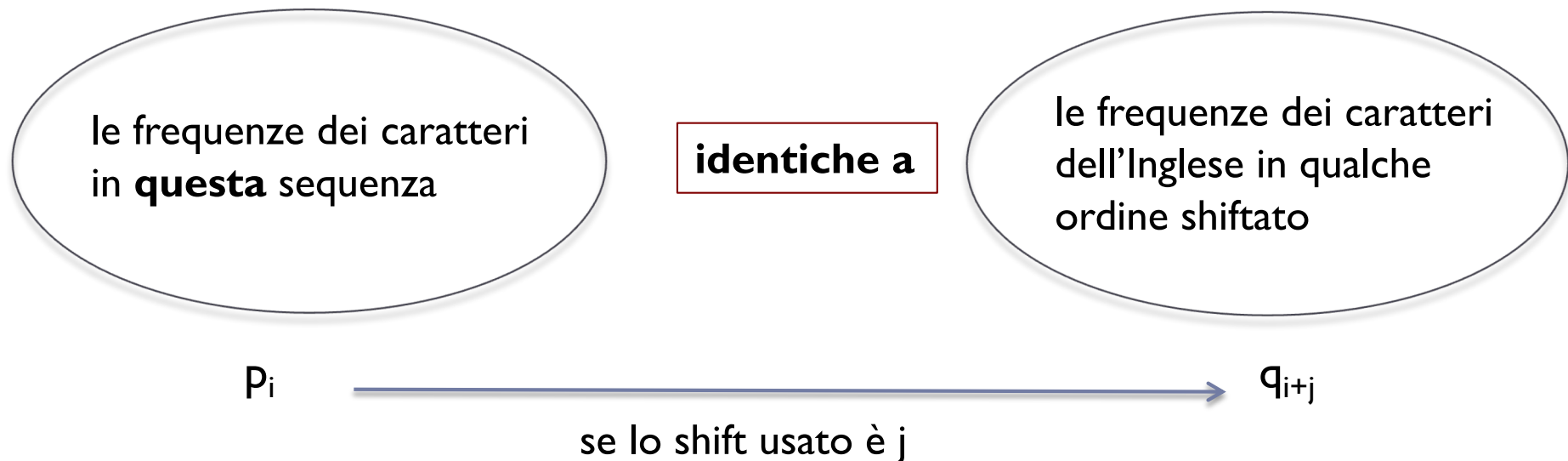
Indice di coincidenza

Se il periodo del cifrato $c = c_1c_2\dots$ è t , allora

$c_1, c_{1+t}, c_{1+2t}, c_{1+3t}, \dots$

è la prima sequenza che risulta dalla cifratura ottenuta usando il “primo shift cipher”.

Come già osservato



Indice di coincidenza

Ciò significa che $q_0q_1\dots q_{25}$ è semplicemente $p_0p_1\dots p_{25}$ “shiftata” di j posizioni.
Pertanto, risulta

$$\sum_{i=0}^{25} q_i^2 \approx \sum_{i=0}^{25} p_i^2 \approx 0.065$$

Disponiamo, quindi, di un modo elegante per determinare la lunghezza t della chiave.
Per $w=1,2,3, \dots$ consideriamo la sequenza

$$c_1, c_{1+w}, c_{1+2w}, c_{1+3w} \dots$$

e calcoliamo i valori $q_0q_1\dots q_{25}$, e il valore

$$S_w = \sum_{i=0}^{25} q_i^2$$



Indice di coincidenza

Ci aspettiamo che, quando $w = t$, risulta $S_w \approx 0.065$.

D'altra parte, se $w \neq t$, i caratteri $c_1, c_{1+w}, c_{1+2w}, c_{1+3w} \dots$ sono presenti approssimativamente con la stessa frequenza, vicina a quella uniforme.

Vale a dire, $q_i \approx 1/26$, per $i = 0, \dots, 25$. Da cui risulta

$$S_w = \sum_{i=0}^{25} q_i^2 \approx \sum_{i=0}^{25} \left(\frac{1}{26}\right)^2 \approx 0.038$$

Pertanto, il valore più piccolo di w per cui $S_w \approx 0.065$ è verosimilmente il periodo (lunghezza della chiave).

Una seconda sequenza $c_2, c_{2+w}, c_{2+2w}, c_{2+3w} \dots$ può essere usata per confermare l'ipotesi



Conclusioni

- l'attacco è elegante ed efficiente
- richiede un cifrato lungo per la stima delle frequenze
- una chiave più lunga implica la necessità di un cifrato più lungo

Progettare cifrari sicuri non è impresa facile!



Team di supporto al corso

- ▶ Link al team: Elementi di Crittografia 2025

[Elementi di Crittografia - 2025 | General | Microsoft Teams](#)

- ▶ **Codice di accesso:** vrf9f83

