ΚΡΥΠΤΟΓΡΑΦΙΑ

- Η επιστήμη και η μελέτη της τήρησης μυστικών
- Κρυπτογράφηση: μέθοδος μετασχηματισμού απλού-μη κρυπτογραφημένου κειμένου (plaintext) σε κρυπτογραφημένο κείμενο (cipher text)
- Ο μετασχηματισμός ορίζεται μέσω ενός *κλειδιού*

Συστήματα κρυπτογραφίας

- Ενός κλειδιού
- Δύο κλειδιών
- Δημόσιου κλειδιού
- Ψηφιακές υπογραφές
- Συστατικά
  - Ο χώρος μη κρυπτογραφημένων μηνυμάτων M
  - Ο χώρος κρυπτογραφημένων μηνυμάτων C
  - Ο χώρος κλειδιών K
  - Μία οικογένεια μετασχηματισμών κρυπτογράφησης Ek: M → C
  - Μία οικογένεια μετασχηματισμών αποκρυπτογράφησης Dk: C → M

Στόχοι κρυπτογραφίας

- Εχεμύθεια
  - Πρέπει να είναι ανέφικτο να υπολογιστεί το Dk από το c, ακόμη και αν είναι γνωστό το m
  - Πρέπει να είναι ανέφικτος ο υπολογισμός του m από ένα c
- Αυθεντικότητα
  - Πρέπει να είναι υπολογιστικά ανέφικτο να προσδιοριστεί το Ek από το c, ακόμη και αν είναι γνωστό το m
  - Πρέπει να είναι υπολογιστικά ανέφικτο να βρεθεί ένα c', τέτοιο ώστε το Dk(c') να είναι παραδεκτό μη κρυπτογραφημένο μήνυμα του συνόλου M

Επιθυμητές ιδιότητες συστημάτων κρυπτογραφίας

- Πρέπει να υπάρχουν αποδοτικοί αλγόριθμοι για τις λειτουργίες της κωδικοποίησης και της αποκωδικοποίησης
- Εύχρηστο σύστημα
- Η προστασία που παρέχει το σύστημα πρέπει να προϋποθέτει μόνο τη μυστικότητα των κλειδιών, όχι του αλγόριθμου

Κρυπτογράφηση με μεταθέσεις

- Βασική ιδέα: αλλαγή της θέσης bits ή bytes εντός του μηνύματος
- Χαρακτηριστικοί εκπρόσωποι:
  - Απλή μετάθεση
  - «Συρματόπλεγμα»
  - Μετάθεση κατά στήλες

Κρυπτογράφηση με μεταθέσεις

- Απλή μετάθεση
  - Το μήνυμα *m* κατατμείται σε μπλοκ και κάθε μπλοκ αναδιατάσσεται βάσει κάποιου σχήματος
  - Παράδειγμα
    - » Κλειδί = (25413)

m	Μ	Υ	Σ	Τ	Ι	Κ	Ο		Μ	Η	Ν	Υ	Μ	Α	∅
c	Υ	Ι	Τ	Μ	Σ	Ο	Η	Μ	Κ		Υ	∅	Α	Ν	Μ

Κρυπτογράφηση με μεταθέσεις

- «Συρματόπλεγμα»

	Μ	Υ	Σ	Τ	Ι	Κ	Ο		Μ	Η	Ν	Υ	Μ	Α
(1)	Μ				Ι				Μ				Μ	
(2)		Υ		Τ		Κ				Η		Υ		Α
(3)			Σ				Ο				Ν			
	Μ	Ι	Μ	Μ	Υ	Τ	Κ		Η	Υ	Α	Σ	Ο	Ν

- Παράμετροι: (ύψος, μετατόπιση αρχής)

Κρυπτογράφηση με μεταθέσεις

- Μετάθεση κατά στήλες
  - Κλειδί: μία λέξη, της οποίας τα γράμματα αντιστοιχίζονται σε αριθμούς, ανάλογα με τη σειρά εμφάνισής τους στο αλφάβητο

Π	Ο	Λ	Υ	Μ	Ε	Ρ	Ε	Σ
6	5	3	9	4	1	7	2	8

  - Το μη κρυπτογραφημένο κείμενο γράφεται σε έναν πίνακα που έχει τόσες στήλες όσες τα γράμματα του κλειδιού

συνέχεια >>

Κρυπτογράφηση με μεταθέσεις

- Μετάθεση κατά στήλες
  - ΑΣΠΡΗ ΠΕΤΡΑ ΞΕΞΑΣΠΡΗ

Π	Ο	Λ	Υ	Μ	Ε	Ρ	Ε	Σ
6	5	3	9	4	1	7	2	8
Α	Σ	Π	Ρ	Η		Π	Ε	Τ
Ρ	Α		Ξ	Ε	Ξ	Α	Σ	Π
Ρ	Η	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅

  - Το κρυπτογραφημένο κείμενο παράγεται με ανάγνωση του πίνακα κατά στήλες, με τη σειρά που ορίζεται από την απεικόνιση του κλειδιού

	Ξ	∅	Ε	Σ	∅	Π		∅	Η	Ε	∅	Σ	Α	Η	Α	Ρ	Ρ	Π	...

Κρυπτογράφηση με αντικατάσταση

- Βασική ιδέα: Κάθε χαρακτήρας του μη κρυπτογραφημένου κειμένου αντικαθίσταται από έναν διαφορετικό χαρακτήρα στο κρυπτογραφημένο κείμενο
  - Απλή αντικατάσταση
  - Πολυαλφαβητική αντικατάσταση
  - Αντικατάσταση τρέχοντος κλειδιού
  - Μέθοδος Vernam

Κρυπτογράφηση με αντικατάσταση

- Απλή αντικατάσταση
  - Για κάθε γράμμα του αλφάβητου των μηνυμάτων ορίζουμε την απεικόνισή του.

Α	Β	Γ	Δ	Ε	Ζ	Η	Θ	Ι	Κ	Λ	Μ	Ν	Ξ	Ο	Π	Ρ	Σ	Τ	Υ	Φ	Χ	Ψ	Ω
Δ	Κ	Ρ	Ο	Υ	Λ	Ω	Ε	Π	Η	Α	Φ	Ζ	Μ	Τ	Β	Χ	Θ	Ν	Ψ	Γ	Ι	Σ	Ξ

ΑΣΠΡΗ ΠΕΤΡΑ ΞΕΞΑΣΠΡΗ

ΔΘΒΧΩ ΒΥΝΧΔ ΜΥΜΔΘΒΧΩ

- Ιδιαίτερα ευάλωτη προσέγγιση σε στατιστικές αναλύσεις εμφάνισης μεμονωμένων χαρακτήρων, ζευγών, τριάδων, κ.λπ.

Κρυπτογράφηση με αντικατάσταση

- Πολυαλφαβητική αντικατάσταση
  - Απαιτείται ένα κλειδί
  - Χρησιμοποιούμε έναν δισδιάστατο πίνακα απεικόνισης, οι γραμμές του οποίου αντιστοιχούν σε χαρακτήρες του κλειδιού και οι στήλες σε χαρακτήρες του μηνύματος
  - Αν M_i είναι ο υπ' αριθμόν i χαρακτήρας του μη κρυπτογραφημένου μηνύματος και K_i ο υπ' αριθμόν i χαρακτήρας του κλειδιού, ο υπ' αριθμόν i χαρακτήρας του κρυπτογραφημένου μηνύματος είναι η καταχώρηση στη θέση (K_i, M_i) του πίνακα

Κρυπτογράφηση με αντικατάσταση

- Πολυαλφαβητική αντικατάσταση - παράδειγμα

	Α	Β	Γ	Δ	Ε	Ζ	Η	Θ	Ι	Κ	Λ	Μ	Ν	Ξ	Ο	Π	Ρ	Σ	Τ	Υ	Φ	Χ	Ψ	Ω
Α	Δ	Κ	Ρ	Ο	Υ	Λ	Ω	Ε	Π	Η	Α	Φ	Ζ	Μ	Τ	Β	Χ	Θ	Ν	Ψ	Γ	Ι	Σ	Ξ
Β	Η	Λ	Θ	Ρ	Δ	Ξ	Κ	Α	Φ	Ο	Γ	Ψ	Π	Ι	Υ	Χ	Μ	Β	Σ	Ω	Ε	Ν	Ζ	Τ

- Κλειδί κρυπτογράφησης: ABBA

ΑΣΠΡΗ ΠΕΤΡΑ ΞΕΞΑΣΠΡΗ ← Plaintext

ΑΒΒΑΑ ΒΒΑΑΒ ΒΑΑΒΒΑΑΒ ← Κλειδί

ΔΒΧΧΩ ΧΔΝΧΗ ΙΘΜΗΒΒΧΚ ← Ciphertext

Κρυπτογράφηση με αντικατάσταση

- Πολυαλφαβητική αντικατάσταση – επιλογές
  - Αν το κλειδί τελειώσει τότε:
    - » Ξαναχρησιμοποιείται εξ αρχής
      ABBA → ABBAABBAABBAABBA
    - » Ξαναχρησιμοποιείται μετασχηματισμένο
      HAL → HALIBMJCN…
    - » Χρησιμοποιούμε ως κλειδί το ίδιο το μήνυμα
      ABBA → ABBAΑΣΠΡΗΠΕΤΡΑΞΕΞΑΣΠΡΗ
- Αν ο κακός μπορεί να μαντέψει μέρος του μηνύματος, βρίσκει και το κλειδί

Κρυπτογράφηση με αντικατάσταση

- Κρυπτογράφηση τρέχοντος κλειδιού
  - Όμοια με την πολυαλφαβητική αντικατάσταση αλλά το κλειδί απλά δεν τελειώνει ποτέ
    - » Κείμενο βιβλίου
    - » τυχαία δεδομένα που δημιουργούνται αλγοριθμικά (π.χ. περιστροφικές μηχανές)
    - » Προτιμάται η χρήση τυχαίων δεδομένων καθώς δεν είναι ευάλωτη σε στατιστικές αναλύσεις
  - Χρησιμοποιήθηκε από τους Γερμανούς στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, ο κώδικας έσπασε από την ομάδα του Alan Turing

Κρυπτογράφηση με αντικατάσταση

- Μέθοδος Vernam
  - Εξαιρετικά ασφαλής
  - Μήνυμα και κλειδί θεωρούνται ακολουθίες bits

Κλειδί \ Μήνυμα	0	1
0	0	1
1	1	0

  - Τα κλειδιά ανταλλάσσονται εκ των προτέρων εξωσυστημικά
  - Το κλειδί χρησιμοποιείται μόνο μία φορά
  - Το κλειδί έχει μήκος τουλάχιστον ίσο με το μήκος του μηνύματος

Είδη κρυπτοσυστημάτων

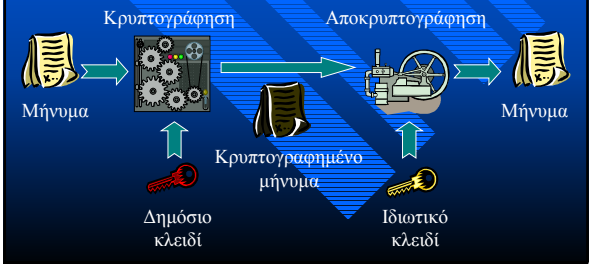
- Συμβατικά (ή συμμετρικά)
  - Ένα κλειδί
  - Κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση με τον ίδιο τρόπο
- Ασύμμετρα κρυπτοσυστήματα
  - Δύο διαφορετικά κλειδιά
  - Διαφορετικοί τρόποι κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης
  - Υπολογιστικά ανέφικτος ο συμπερασμός του ενός κλειδιού από το άλλο

Ασύμμετρα κρυπτοσυστήματα

- Στόχοι: Εχεμύθεια και αυθεντικότητα
- Δύο κλειδιά, *δημόσιο* (public) και *ιδιωτικό* (private)
- Το ιδιωτικό είναι διαθέσιμο μόνο στον κάτοχο, το δημόσιο σε όλους τους χρήστες
- Ανέφικτο να υπολογιστεί το ένα κλειδί από το άλλο
- Χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι κρυπτογράφησης-αποκρυπτογράφησης (E, D) τέτοιοι ώστε:
  - D(E(M, Pub), Priv) = M
  - D(E(M, Priv), Pub) = M
- Για να επικοινωνήσουν δύο μέρη, αρκεί ο ένας να γνωρίζει το δημόσιο κλειδί του άλλου

Ασύμμετρα κρυπτοσυστήματα

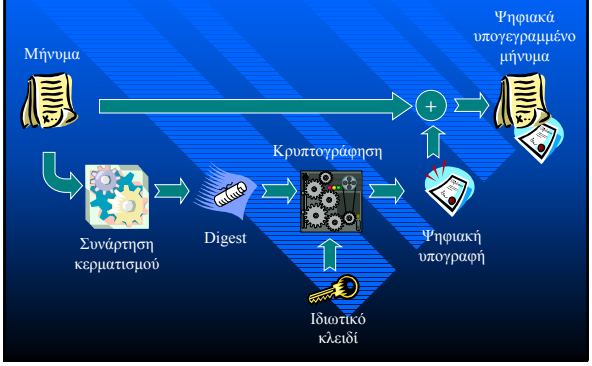
- Εχεμύθεια: Κρυπτογραφούμε με δημόσιο κλειδί, αποκρυπτογραφούμε με το ιδιωτικό



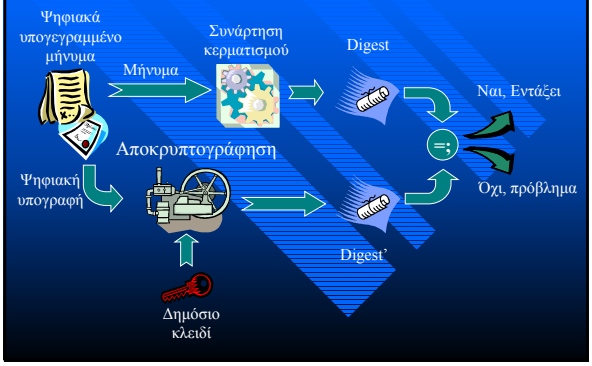
Ασύμμετρα κρυπτοσυστήματα

- Αυθεντικότητα: *Ψηφιακές υπογραφές*
- Είναι ένα σύνολο από bits που προσθέτει ο αποστολέας ενός εγγράφου σ' αυτό και έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:
  - Ο παραλήπτης μπορεί να επαληθεύσει ότι η υπογραφή είναι του αποστολέα
  - Θα πρέπει να είναι αδύνατο για οποιονδήποτε, συμπεριλαμβανομένου του παραλήπτη, να πλαστογραφήσει την υπογραφή του Α
  - Θα πρέπει να είναι δυνατόν για κάποιον τρίτο (π.χ. δικαστική αρχή) να διευθετήσει κάποια διαφωνία μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη

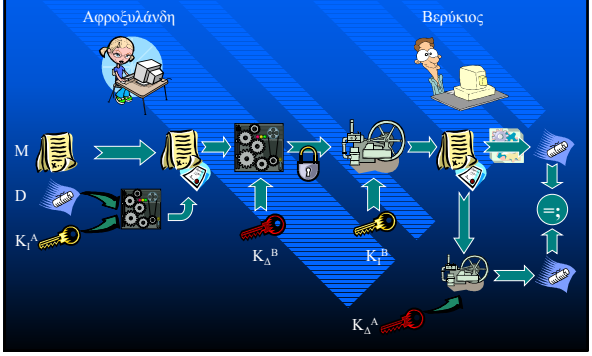
Ψηφιακές υπογραφές - Αποστολή



Ψηφιακές υπογραφές - Παραλαβή



Εχεμύθεια + Αυθεντικότητα



Προσπάθειες Εξαπάτησης

- Ο Νταβέλης δημιουργεί ένα ζεύγος κλειδιών με το όνομα της Αφροξυλάνδης, υπογράφει ψηφιακά ένα έγγραφο με τα κλειδιά αυτά και το στέλνει στον Βερύκιο
- Αν ο Βερύκιος δεν έχει ήδη το δημόσιο κλειδί της Αφροξυλάνδης μπορεί να εξαπατηθεί
- *Λύση: εισαγωγή μιας τρίτης οντότητας, της Αρχής Διαχείρισης Πιστοποιητικών* (certificate authority center)

Αρχή Διαχείρισης Πιστοποιητικών

- Εκδίδει ψηφιακώς υπογεγραμμένα *πιστοποιητικά*, αφού διαπιστώσει εξωσυστημικά την ταυτότητα του υποκειμένου.
- Το *πιστοποιητικό* είναι ένα έγγραφο που περιέχει:
  - Έκδοση και αριθμό σειράς
  - Το όνομα του εκδότη
  - Το όνομα του υποκειμένου και άλλες τυχόν επεκτάσεις (διεύθυνση οικίας, εργασίας, αριθμό ταυτότητας κ.λπ.)
  - Το σκοπό του πιστοποιητικού (αν το υποκείμενο δρα και ως αρχή πιστοποίησης)
  - Το δημόσιο κλειδί του υποκειμένου
  - Την περίοδο εγκυρότητας του πιστοποιητικού
  - Την υπογραφή της αρχής διαχείρισης πιστοποιητικών

Ψηφιακό πιστοποιητικό

Υποκείμενο:	Αφροξυλάνδη Ψαξεβρέστου 2
Πληροφορίες πιστοποιητικού:	
Έγκυρο κατά:	[02/2002, 05/2002]
Αριθμός σειράς:	A32B540XX
Δημόσιο κλειδί:	ΜΙΑ ΠΑΠΙΑ ΜΑ ΠΟΙΑ ΠΑΠΙΑ ΜΙΑ ΠΑΠΙΑ ΜΕ ΠΑΠΙΑ
Αρχή πιστοποίησης:	CLOPYSOFT SA

Ψηφιακό πιστοποιητικό - παράδειγμα

Version: 1 (0x0)
Serial Number: 04:60:00:00:02
Signature Algorithm: md2WithRSAEncryption
Issuer: C=US, O=CREN/Corp for Research and Educational Networking, OU=Education and Research Client CA
Validity
Not Before: Nov 17 00:00:00 1999 GM
Not After : Nov 17 00:00:00 2003 GMT
Subject: C=US, O=CREN/Corp for Research and Educational Networking, OU=Education and Research Client CA
Subject Public Key Info:
Public Key Algorithm: rsaEncryption
RSA Public Key: (2048 bit)
Modulus (2048 bit): (πολλά δυαδικά δεδομένα)
Signature Algorithm: md2WithRSAEncryption (και άλλα δυαδικά δεδομένα)
Certificate: (ακόμη περισσότερα δυαδικά δεδομένα)

Ο αλγόριθμος RSA

- Για την παραγωγή κλειδιών χρησιμοποιείται ο πολλαπλασιασμός πρώτων αριθμών
- Η εχεμύθεια βασίζεται στη δυσκολία παραγοντοποίησης μεγάλων ακεραίων

Ο αλγόριθμος RSA – Επιλογή κλειδιών

- Επιλέγουμε δύο μεγάλους πρώτους αριθμούς p και q
- Υπολογίζουμε το n = p * q
- Υπολογίζουμε το φ(n) = (p – 1) * (q – 1)
- Επιλέγουμε έναν ακέραιο e με $3 \le e \le \varphi(n)$ τέτοιο ώστε να μην έχει κοινό παράγοντα με το φ(n)
- Επιλέγουμε έναν ακέραιο d τέτοιο ώστε d * e mod φ(n) = 1
- Τα e, n δημοσιοποιούνται
- Τα p, q, d, φ(n) φυλάσσονται μυστικά

Αλγόριθμος RSA

- Κρυπτογράφηση:
  - $C = M^e \bmod n$
- Αποκρυπτογράφηση:
  - $M = C^d \bmod n$
- Παράδειγμα:
  - p = 53, q = 61
  - n = p * q = 3233, φ(n) = 3120
  - e = 71, d = 791

Κρυπτογράφηση κατά μπλοκ

- Το μήνυμα Μ διασπάται σε διαδοχικά μπλοκ M1, M2, ...
- Το κάθε μπλοκ κρυπτογραφείται με το ίδιο κλειδί Κ
- Τελικό μήνυμα: $E_k(M1)E_k(M2)$
- Πλεονεκτήματα:
  - Μόνο μία εκτέλεση του κρυπταλγόριθμου ανά μπλοκ
  - Σφάλματα στο ένα μπλοκ δεν επηρεάζουν τα άλλα
- Μειονεκτήματα
  - Πιο ευάλωτα σε αναλύσεις κρυπτογραφίας
  - Όμοια τμήματα plaintext γεννούν το ίδιο ciphertext

Αλυσιδωτά μπλοκ

- Το κάθε μπλοκ δεν είναι αυτόνομο, αλλά περιλαμβάνει bits από τα προηγούμενα (κρυπτογραφημένα ή μη)
  - Μειώνονται οι διαθέσιμες θέσεις πληροφορίας σε κάθε μπλοκ
  - Αναιρείται το πλεονέκτημα της ανοχής σε σφάλματα
  - Αυξάνεται όμως η ασφάλεια
- Παράδειγμα:
  - $C_i = E_k(M_i \text{ XOR } C_{i-1})$
  - Το C_i πρακτικά εξαρτάται από όλα τα C_k με $i < k$
  - Ιδιαίτερα χρήσιμο για ψηφιακές υπογραφές

Αλγόριθμος DES

- Η κρυπτογράφηση γίνεται σε μπλοκ των 64 bit
- Το κλειδί είναι μήκους 56 bits
  - Εκτελούνται 19 επαναλήψεις του υπολογισμού:
    - » $L_i = R_{i-1}$ and $R_i = L_{i-1}$ AND $f(R_{i-1}, K_i)$ *όπου*
    - » το K_i υπολογίζεται χωρίζοντας το κλειδί των 56 bit σε δύο τμήματα των 28 και ολισθαίνοντας προς τα αριστερά το κάθε τμήμα ένα πλήθος θέσεων, ανάλογα με το *i*
    - » το $f(R_{i-1}, K_i)$ υπολογίζεται ως ακολούθως:
      - Το R_{i-1} επεκτείνεται στα 48 bits και καλείται *E*
      - TMP = E XOR K_i
      - CHUNKS[1..8] = Split(TMP, 6)
      - SUBSTCHUNKS[1..8] = MAP(CHUNKS[1..8])
      - Τα τελικά τμήματα των 4 bits αναδιατάσσονται

Διπλός DES

- Στη βασική του διαμόρφωση ο DES είναι ανασφαλής – σε διαγωνισμό του '98 ο κώδικας έσπασε σε 56 ώρες από μηχανή που κόστισε λιγότερο από 300.000 €
- Διπλός DES:
  - $E(E(M, K_1), K_2)$
  - *Είναι όμως καλύτερος;*
    - » Υπάρχουν τέσσερα *ασθενή κλειδιά*, τέτοια ώστε $E(E(M, K), K) = M$
    - » Υπάρχουν τέσσερα *ημιασθενή ζεύγη κλειδιών*, τέτοια ώστε $E(E(M, K_1), K_2) = M$
    - » *Ακόμη χειρότερα...*
      - Είναι ευάλωτος σε επιθέσεις τύπου «*συνάντησης στο μέσον*», όπου η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου της αποκρυπτογράφησης είναι ίση με αυτή του απλού αλγόριθμου

Τριπλός DES

- $C = E(D(E(M, K_1), K_2), K_3)$ (DES-EDE) ή
- $C = E(E(E(M, K_1), K_2), K_3)$ (DES-EEE)

Κρυπτογραφήσεις	Κλειδιά	Υπολογισμός	Αποθήκευση	Είδος επίθεσης
1	1	2^{56}	-	Known plaintext
1	1	2^{38}	2^{38}	Chosen plaintext
1	1	-	2^{56}	Known plaintext
2	2	2^{112}	-	Chosen plaintext
2	2	2^{56}	2^{56}	Known plaintext
2	2	-	2^{112}	Chosen plaintext
3	2	2^{112}	-	Known plaintext
3	2	2^{56}	2^{56}	Chosen plaintext
3	2	$2^{120.1}$	2^1	Known plaintext
3	2	-	2^{56}	Chosen plaintext
3	3	2^{112}	2^{56}	Known plaintext
3	3	2^{56}	2^{112}	Chosen plaintext

Advanced Encryption Standard

- Πέντε υποψήφιοι
  - MARS
    - » Πολύπλοκος, όχι εύκολος να αναλυθεί, αργός
  - RC6
    - » Ταχύς σε λογισμικό, απαιτεί πολύ μνήμη, μέτριες επιδόσεις σε υλικό
  - Serpent
    - » Ιδιαίτερα ασφαλής, πολύ αργός σε λογισμικό, πολύ καλός σε υλικό
  - Twofish
    - » Πρωτοποριακός, καθώς το μισό κλειδί καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας, δύσκολο να αναλυθεί, μέτρια ταχύτητα
  - Rijndael
    - » Ταχύς, απλός και συμπαγής, με ελαφρώς μικρότερη ασφάλεια από τους συνυποψήφιους, εξαιρετικός για έξυπνες κάρτες και υλοποίηση σε επίπεδο υλικού, αρκετή εγγενής παραλληλία

Advanced Encryption Standard

- Τελικός νικητής – Rijndael
  - Κλειδιά μεγέθους 128, 192 και 256 bits
  - Μπλοκ δεδομένων μεγέθους 128, 192 και 256 bits
  - Δυνατός ο συνδυασμός όλων των μεγεθών κλειδιών και μπλοκ δεδομένων
  - Με εξειδικευμένες μηχανές που δοκιμάζουν 2^{55} κλειδιά ανά δευτερόλεπτο απαιτούνται 149 τρισεκατομμύρια έτη για να σπάσει ένα κλειδί των 128 bits
  - Εκτιμάται ότι θα «κρατήσει» για 20 χρόνια

Σε ποιο σημείο κρυπτογραφούμε;

- Κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο
  - Απαραίτητο κλειδί για κάθε επικοινωνιακό εταίρο
  - Πιθανή επίθεση με ανάλυση κυκλοφορίας
- Κρυπτογράφηση σε επικοινωνιακό κανάλι
  - Κάθε κόμβος ξέρει μόνο τους γείτονές του
  - Η πληροφορία είναι εκτεθειμένη σε κάθε ενδιάμεσο επικοινωνιακό κόμβο
  - Απαιτείται πρόσβαση σε όλα τα ενδιάμεσα κανάλια
- Συνδυασμός των δύο κρυπτογραφήσεων