HÁLÓZATI RENDSZEREK
ÉS SZOLGÁLTATÁSOK
TANSZÉK

Kriptográfiai kódolás – 1. rész

VIHIBB01 – Kódolás és IT biztonság (2023)

Dr. Buttyán Levente

CrySyS Lab, BME
buttyan@crysys.hu

Kriptográfia

- Algoritmikus módszerek tárháza információbiztonsági szolgáltatások megvalósítására
  - rejtjelezés (titkosítás) ---» bizalmasság szolgáltatás
  - üzenet hitelesítő kód (MAC) ---» integritásvédelem és eredet hitelesítés
  - digitális aláírás ---» integritásvédelem, eredet hitelesítés és eredet letagadhatatlanság

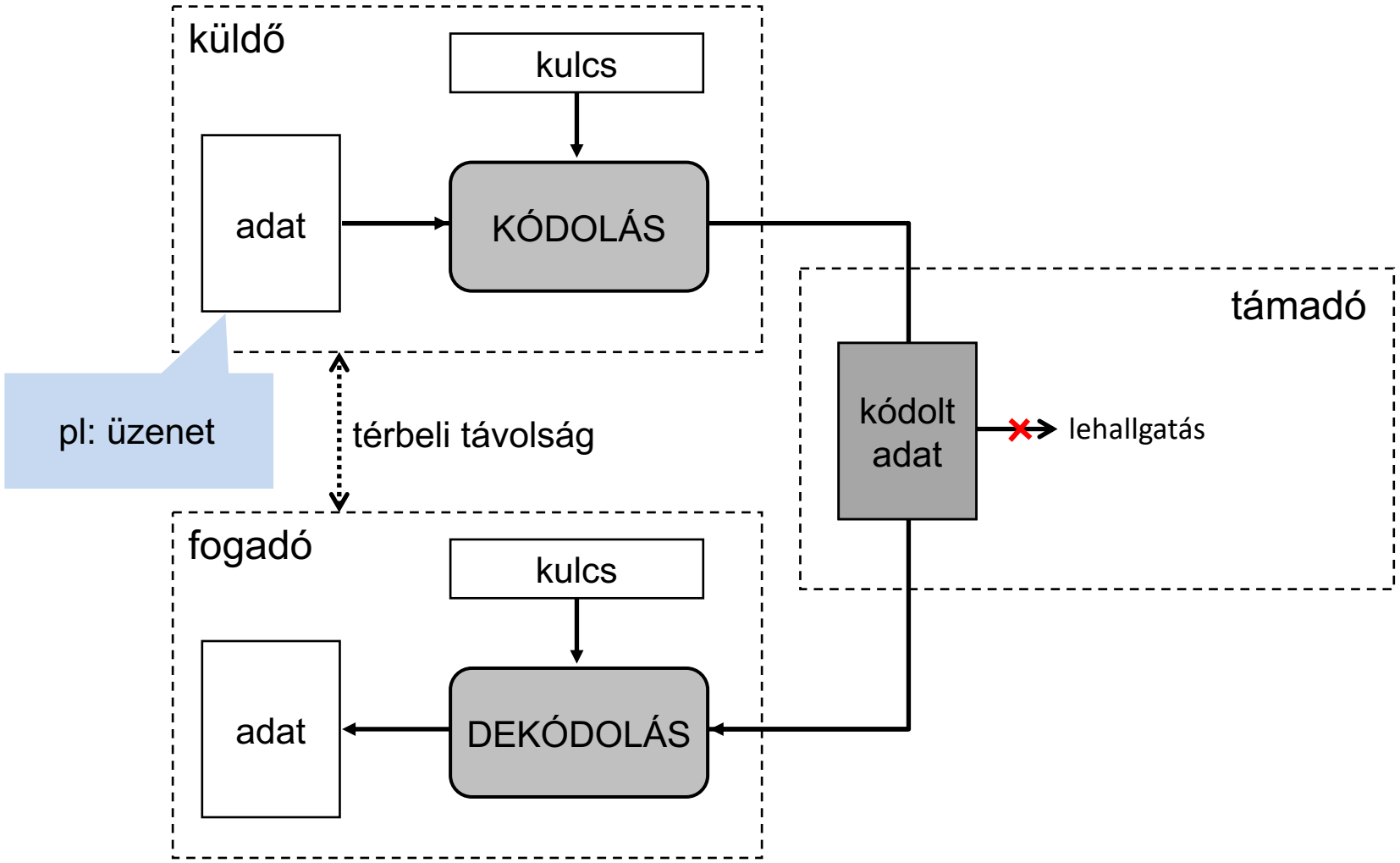
- Sok olyan biztonsági probléma van, amit kriptográfiával lehet a legkényelmesebben megoldani, de nem minden probléma oldható meg pusztán kriptográfiai módszerekkel

Kriptográfia a gyakorlatban

- A kriptográfiai algoritmusok a programozók számára általában kriptográfiai függvénykönyvtárakban (crypto library) érhetők el különböző API-kon keresztül
  - példák: OpenSSL, NaCl, Java Cryptography Extension (JCE), PyCryptodome, …
- A kripto könyvtárak és a kripto API-k a programozók számára ismert absztrakciókat használnak
  - példa: rejtjelező *objektum* melynek vannak *attribútumai* (pl. a rejtjelező kulcsa) és *függvényei*/*metódusai* (pl. egy encrypt() függvény)
- A kripto könyvtárak használata ezért nem bonyolult, ugyanakkor fontos, hogy a programozó tisztában legyen az API mögött implementált algoritmusok főbb tulajdonságaival

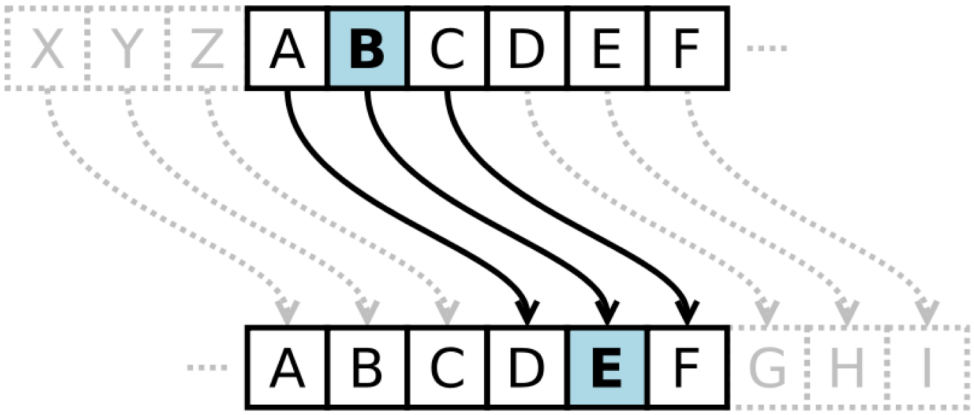
Rejtjelezés

A rejtjelezés alapmodellje



Történelmi példa: Caesar rejtjelező

- *Helyettesítéses (substitution) rejtjelező:* a nyílt üzenet betűi helyére kódbetűket helyettesít
- Caesar: minden nyílt betű helyére az ABC-ben tőle 3 pozícióval jobbra található betűt helyettesíti

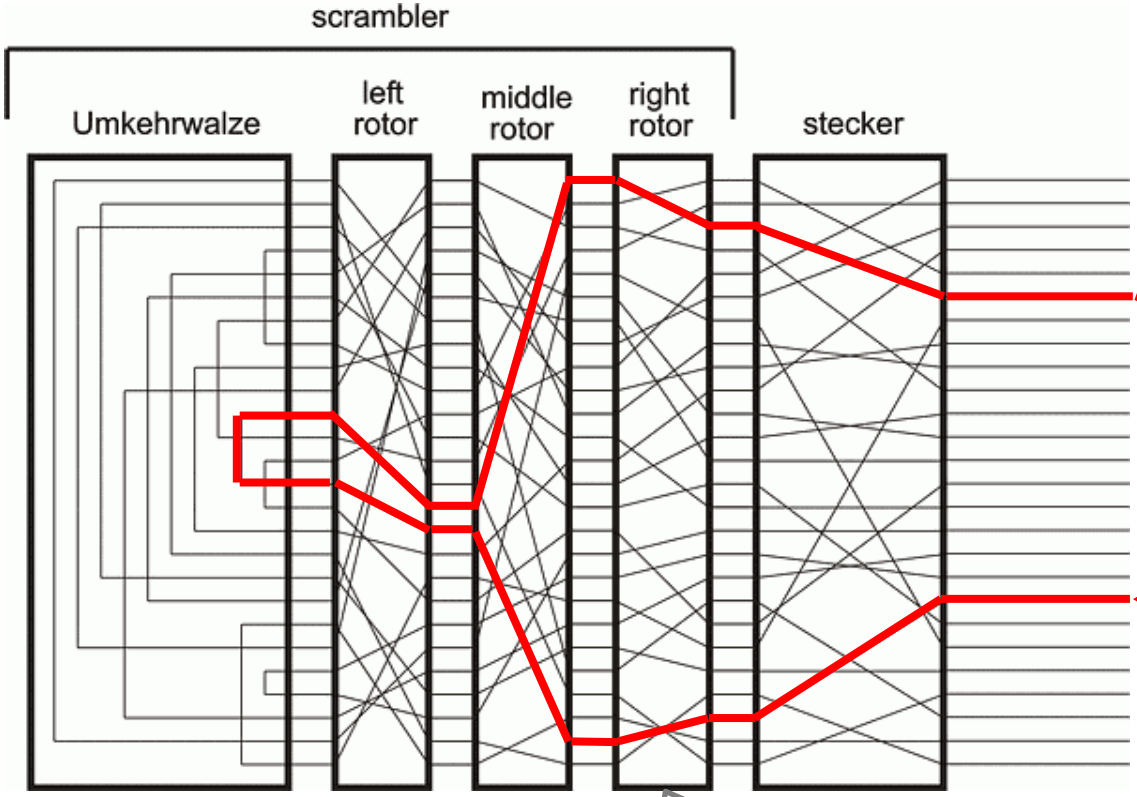


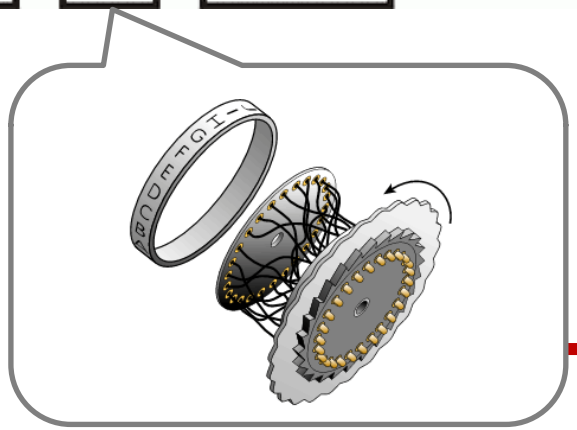
kódolási példa: **BRUTUS** → **EUXWXV**

Történelmi példa: Enigma

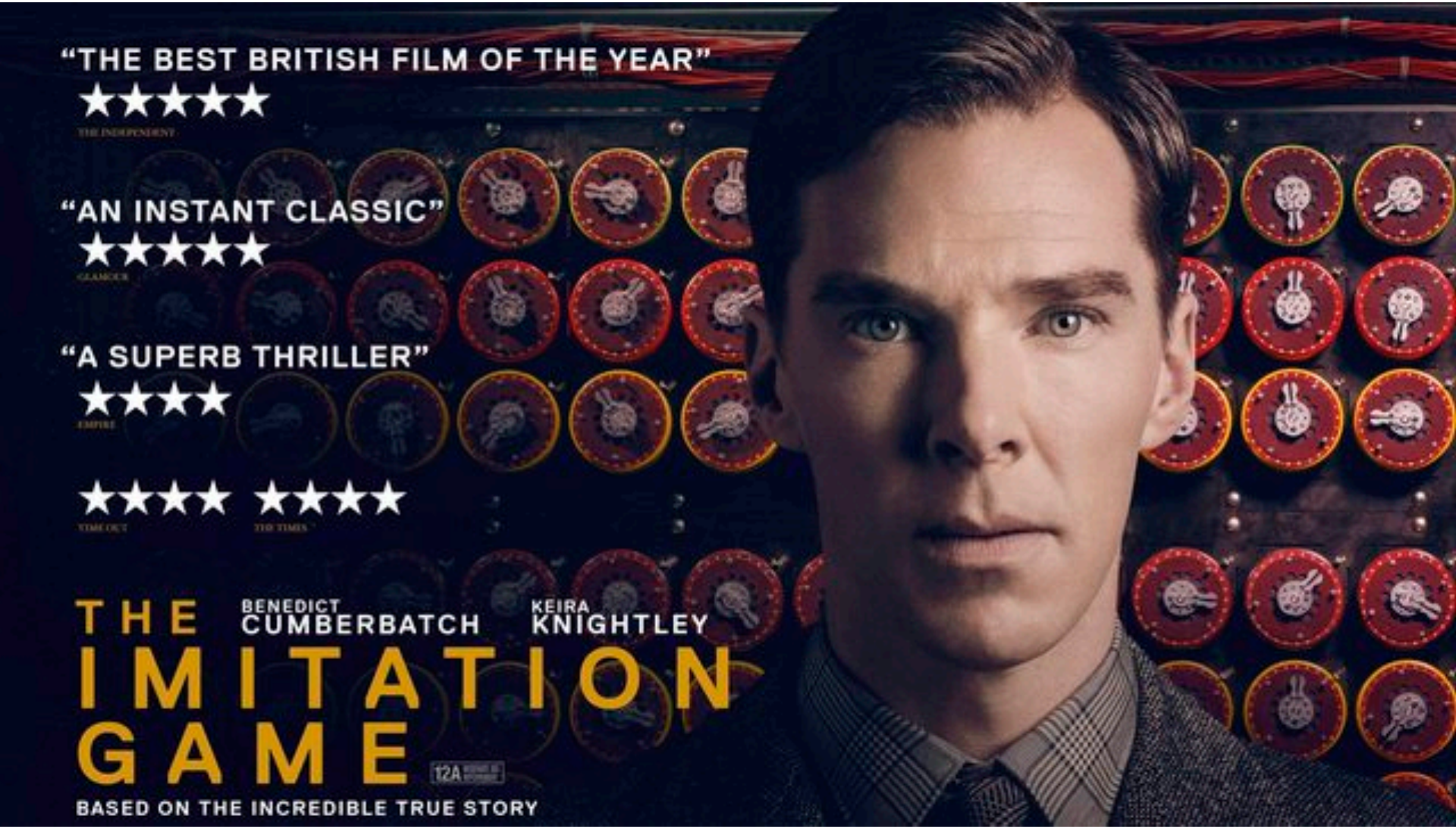
- Az első elektro-mechanikus rejtjelező
- 1926-ban rendszeresítették a német hadseregben
- Intenzíven használták a második világháborúban

Az Enigma működése

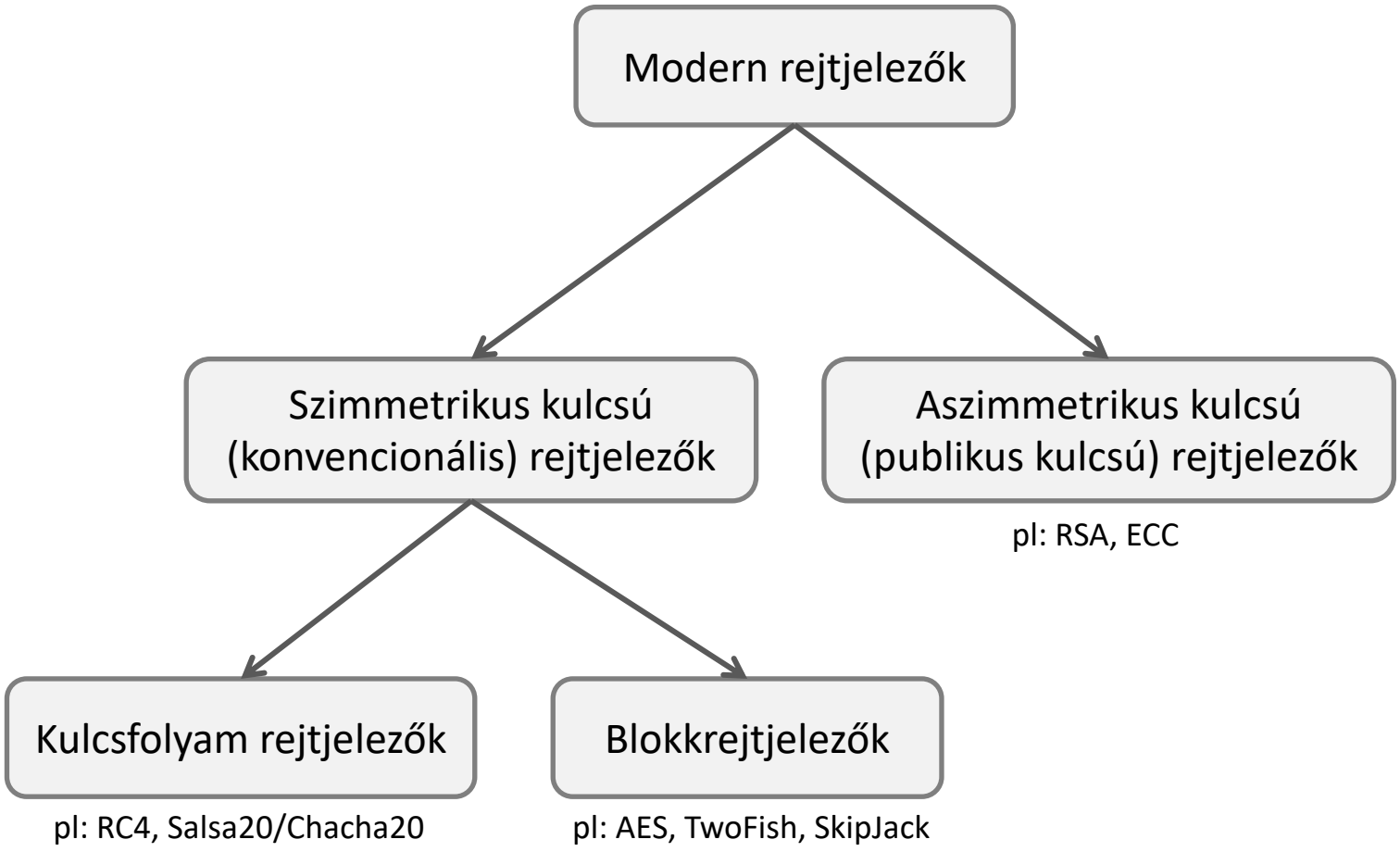




Az Enigma feltörése



Modern rejtjelezők osztályozása



Az XOR művelet

- XOR (+ vagy $\oplus$)

```
0 + 0 = 0
0 + 1 = 1
1 + 0 = 1
1 + 1 = 0
```

- Bit vektorok XOR-olását bitenként végezzük
  - pl: `0011 + 1010 = 1001`

- A XOR művelet 3 fontos tulajdonsága:
  1. X + 0 = 0 + X = X
  2. X + X = 0
  3. ha A + B = C, akkor A = B + C (és B = A + C)

One-time pad

- Kódolás
  - Az üzenetet egy byte sorozatként reprezentáljuk: $m_1\ m_2\ ...\ m_L$
  - Kulcsként egy valódi véletlen byte sorozatot használunk: $k_1\ k_2\ ...\ k_L$
  - A kettőt egymáshoz XOR-oljuk, ez adja a rejtett üzenetet:

    $m_1\ m_2\ ...\ m_L + k_1\ k_2\ ...\ k_L = c_1\ c_2\ ...\ c_L$ ahol $c_i = m_i + k_i$ minden i = 1, ..., L

- Dekódolás
  - A kulcsként használt byte sorozatot a rejtett üzenethez XOR-oljuk:

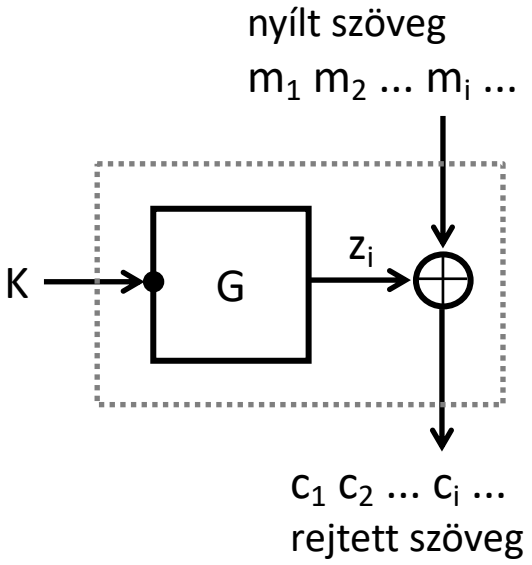
    $c_1\ c_2\ ...\ c_L + k_1\ k_2\ ...\ k_L = m_1\ m_2\ ...\ m_L$ (mert $c_i + k_i = m_i + k_i + k_i = m_i$)

- Tulajdonságok:
  - *Tökéletes titkosítás* (*perfect secrecy*)
  - A kulcs mérete legalább akkora kell legyen, mint a (tömörített) nyílt üzenet mérete → nem túl praktikus, a gyakorlatban nem használjuk

Kulcsfolyam rejtjelezők

- Ötlet: szimuláljuk a valódi véletlen kulcsfolyamot egy álvéletlen byte sorozattal, amit egy algoritmussal generálunk egy véletlen bemenetből (seed)

- terminológia:
  - m_i – nyílt szöveg (plaintext) karakter
  - c_i – rejtett szöveg (ciphertext) karakter
  - z_i – kulcsfolyam (key-stream) karakter
  - K – kulcs (seed)
  - G – kulcsfolyam generátor



- Példák:

  RC4, A5 (GSM), E0 (Bluetooth), Salsa20/ChaCha20

A kulcsfolyam rejtjelezők tulajdonságai

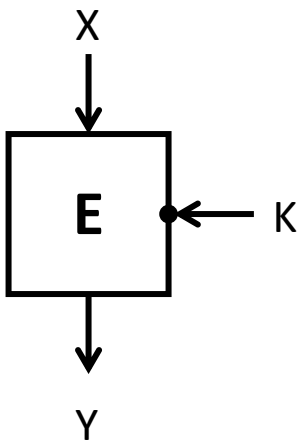
- Hatékonyság
  - A kulcsfolyam rejtjelezők nagyon gyorsak (főleg a hardver implementációk)
  - A generátor belső állapotának tárolásához nem kell sok memória (pár száz byte) és a generátor számítási műveletei is egyszerűek
- A rejtett szöveg mérete mindig megegyezik a nyílt szöveg méretével
- A küldő és a fogadó szinkronban kell működjön
  - Ha elveszik egy karakter átvitel során, a fogadó kiesik a szinkronból
  - Ilyenkor a dekódolás nem lesz helyes
  - Külön mechanizmus szükséges ennek detektálásához és az újra-szinkronizáláshoz
- A kulcsfolyam rejtjelezők egyáltalán nem biztosítanak integritás-védelmet !!!
  - Egy támadó tetszőleges bitet átbillenthet a rejtett szövegben, és ez az adott bit átbillenését okozza a nyílt szövegben
  - A fogadó nem biztos, hogy ezt az egy bit hibát (megbízhatóan) észreveszi

Blokkrejtjelezők

- A blokkrejtjelező több byte-ból álló blokkokat kódol/dekódol
  - tipikus blokkméret: 16 byte = 128 bit
- Ha valaki nem ismeri a kulcsot, akkor számára a blokkrejtjelező olyan, mint egy véletlen függvény
  - a kimenete megjósolhtatlan, hiába ismert a bemenet

- jelölések:
  - kódolás: E(K, X) vagy $E_K(X)$
  - dekódolás: $E_K^{-1}(Y)$ vagy $D_K(Y)$

- terminológia
  - X – nyílt szöveg blokk (n hosszú bit vektor)
  - Y – rejtett szöveg blokk (n hosszú bit vektor)
  - K – kulcs (k hosszú bit vektor, pl. k = 128 ... 256)
  - E – kódoló algoritmus
  - D – dekódoló algoritmus



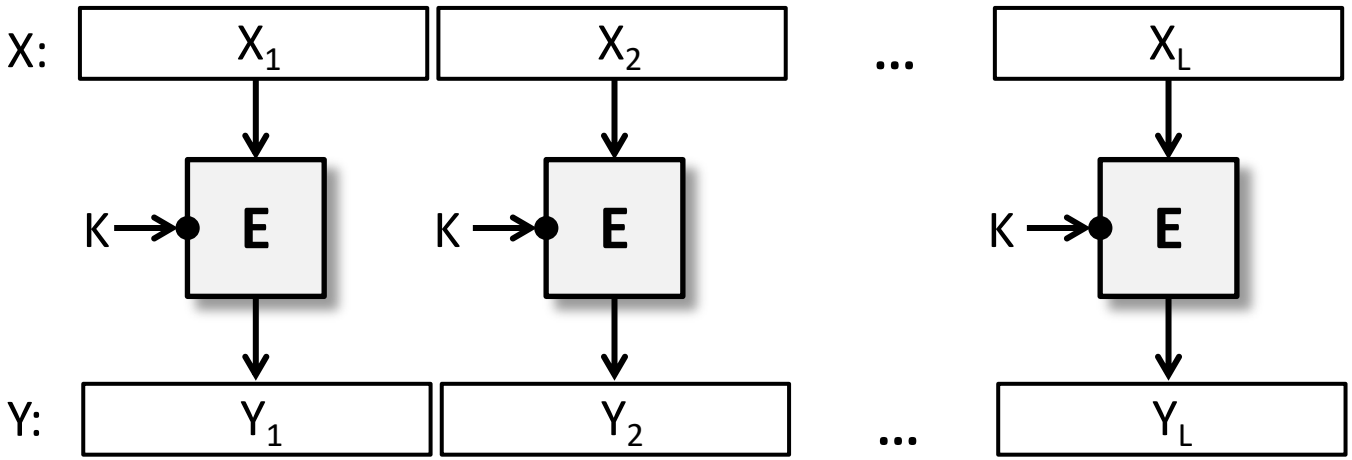
példák:
AES, DES (3DES), RC5,
Twofish, Skipjack, ...

Blokkrejtjelezési módok

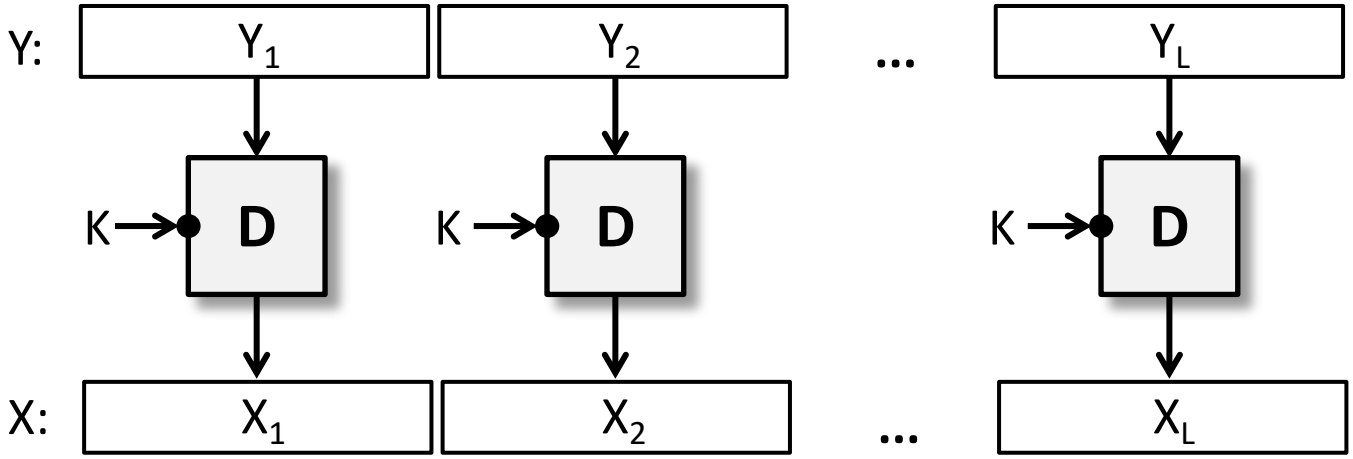
- Alap módok:
  - Electronic Codebook (ECB) mód
  - Cipher Block Chaining (CBC) mód
  - Cipher Feedback (CFB) mód
  - Output Feedback (OFB) mód
  - Counter (CTR) mód
- Néhány speciális mód:
  - XCBC
  - CBC with Ciphertext Stealing (CTS)
- Hitelesített rejtjelező (authenticated encryption) módok:
  - CCM: CTR + CBC MAC
  - GCM: Galois CTR mód
  - OCB: Offset Codebook mód

ECB mód

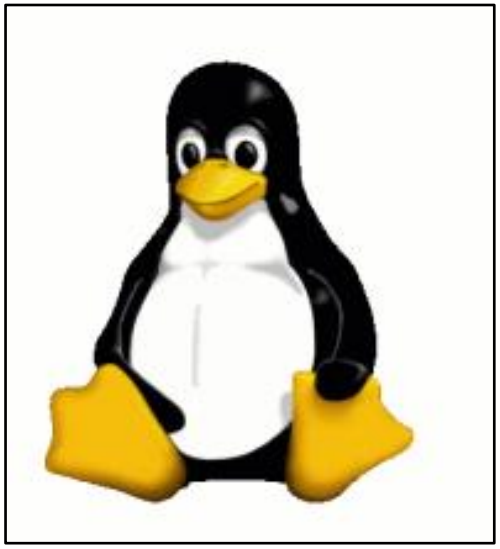
- kódolás



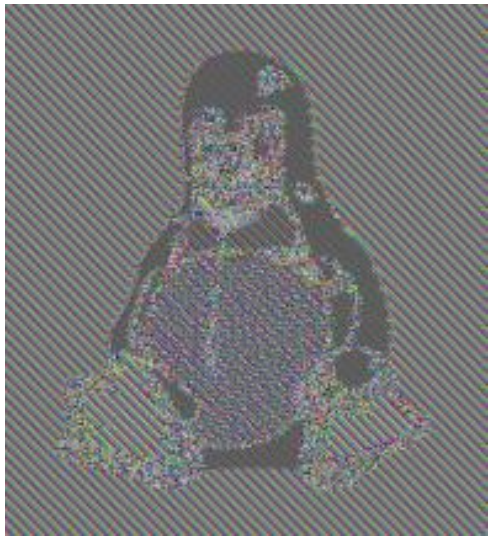
- dekódolás



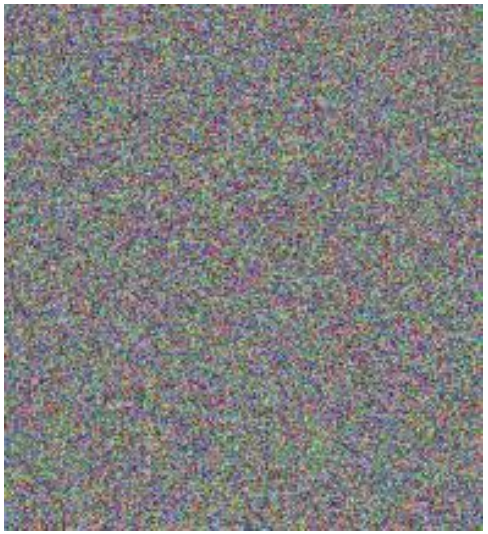
Illusztráció: az ECB mód gyengesége



eredeti kép

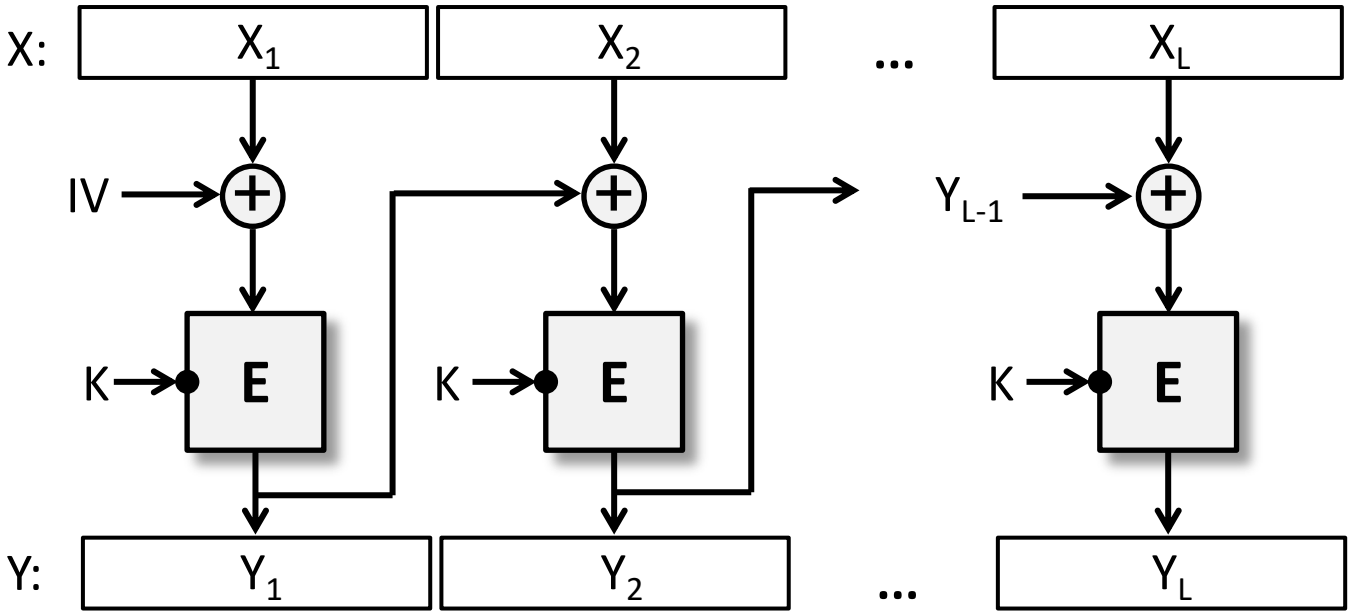


ECB módban kódolt kép



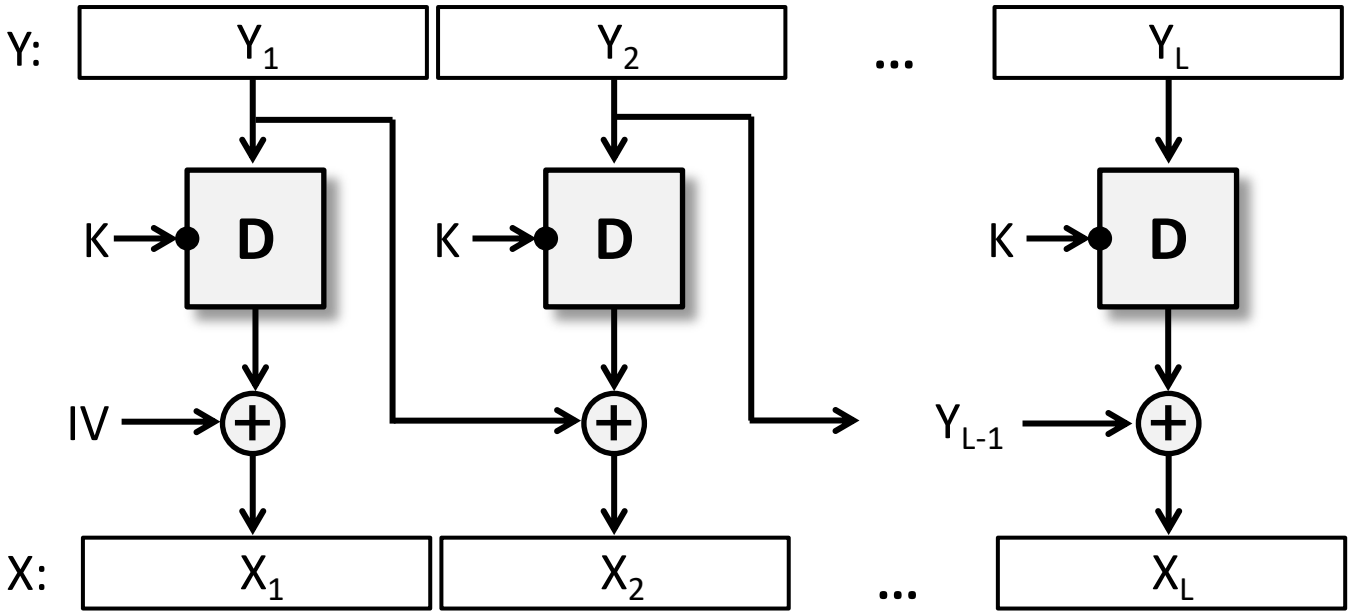
más módok esetén...

CBC mód (kódolás)



$$Y_i = E_K(X_i \oplus Y_{i-1})$$

CBC mód (dekódolás)



$$X_i = D_K(Y_i) \oplus Y_{i-1}$$

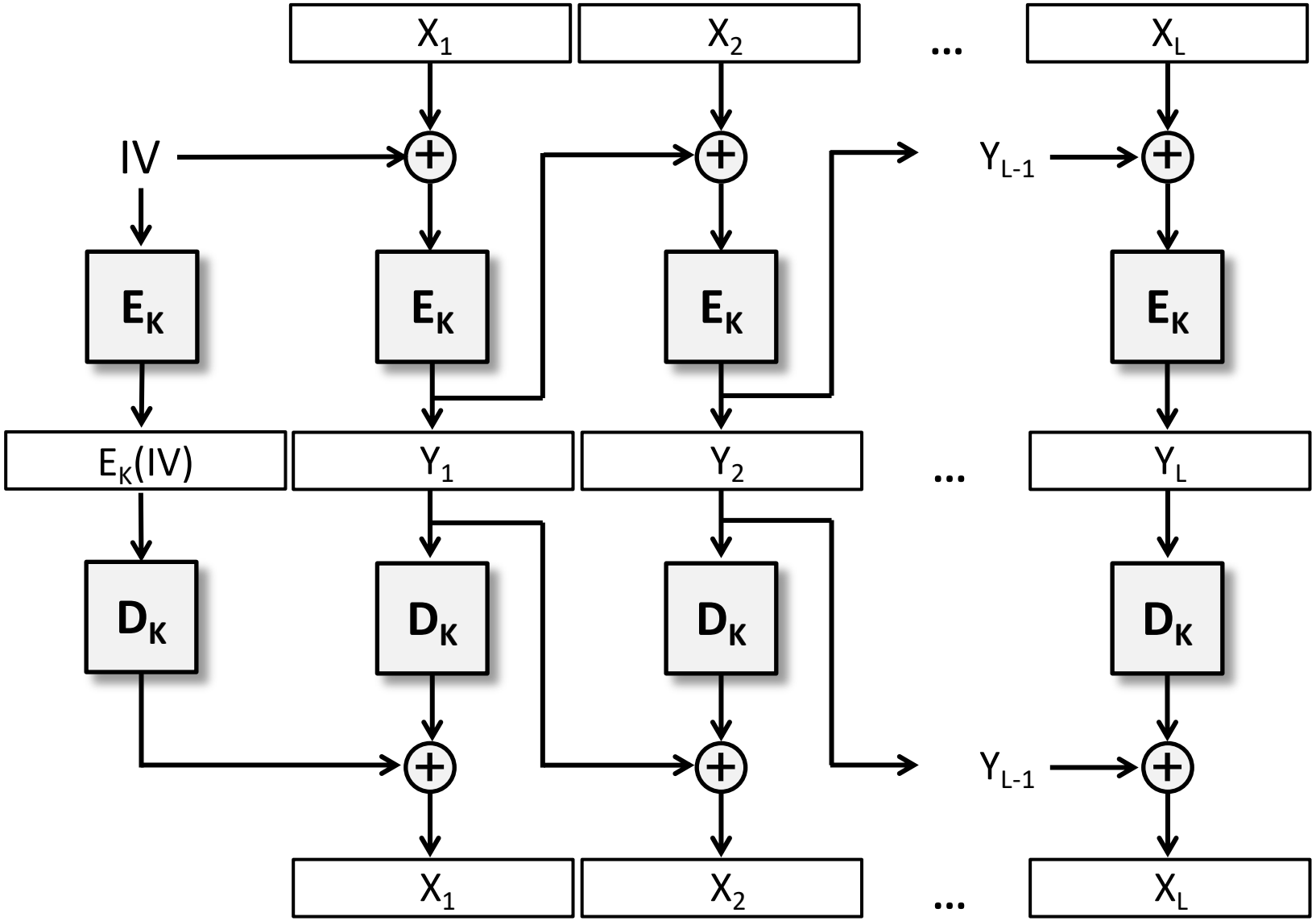
Nem-prediktálható IV generálása

- IV = **kriptográfiai** véletlenszám generátor kiemente
  - Programnyelvek standard véletlenszám generátorai (pl: rnd(), rand(), …) nem megfelelők a célra, mert prediktálható a kimenetük!
  - Speciális, kripto könyvtárakban található véletlenszám generátorok használata tanácsos
  - Az IV manipuláció elleni védelme céljából, az IV-t rejtjelezve (pl: $E_K(IV)$) érdemes elküldeni a fogadó oldalra (az üzenettel együtt)

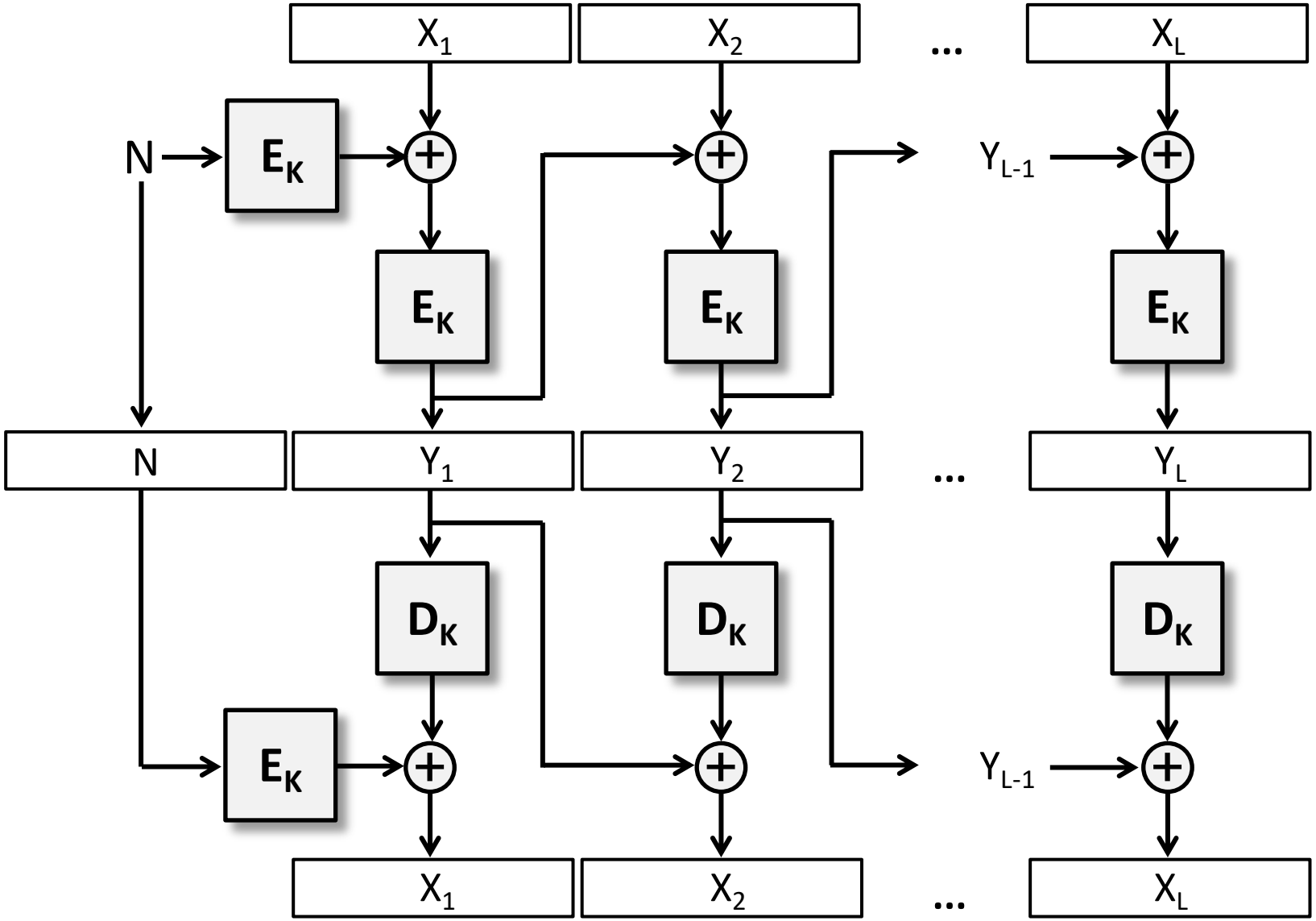
- IV = $E_K(N)$
  - N egy egyszer használt érték (nonce = ”number used once”)
  - Például, N lehet egy üzenet sorszám vagy egy egyedi üzenet azonosító
  - N nyíltan átküldhető a fogadó oldalra (az üzenettel együtt), a fogadó ebből elő tudja állítani az IV-t az üzenet dekódolásához
  - Bár a támadó manipulálhatja N-et az átvitel során, nem tudja ennek milyen hatása lesz az IV-re a fogadó oldalon (manipuláció elleni védelem)

- Mellékhatásként mindkét módszer esetén megőrződik az IV titkossága is (bár ez nem fontos biztonsági szempontból)

Illsztráció: véletlen IV használata



Illusztráció: IV mint rejtjelezett nonce

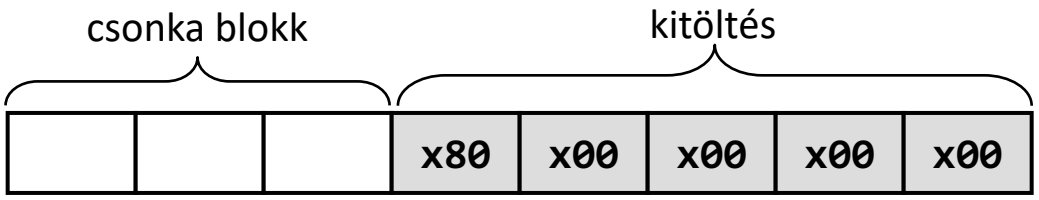


Kitöltés

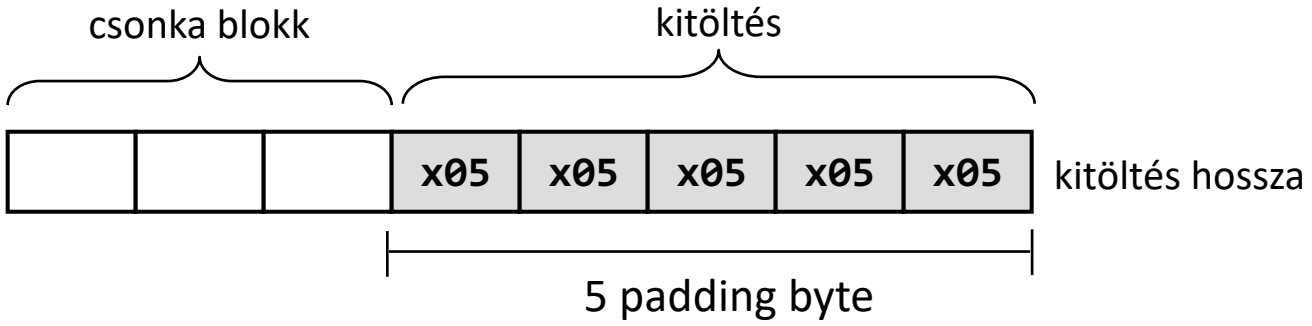
- Az üzenet hossza általában nem többszöröse a blokkmértenek, az utolsó blokk sokszor csonka
- Az utolsó csonka blokkot feltölthetjük extra byte-okkal, hogy egy teljes blokkot kapjunk – ezt nevezzük kitöltésnek (padding)
- A fogadónak egyértelműen fel kell tudni ismerni a kitöltést, hogy el tudja távolítani azt a dekódolás után
- Ebből az egyértelműségi követelményből az következik, hogy **mindig** kell kitöltést alkalmazni, még akkor is, ha az üzenet hossza pont a blokkméret többszöröse (ilyenkor egy teljes egész extra blokkot kell még az üzenethez fűzni kitöltésként)

Ismert kitöltési sémák

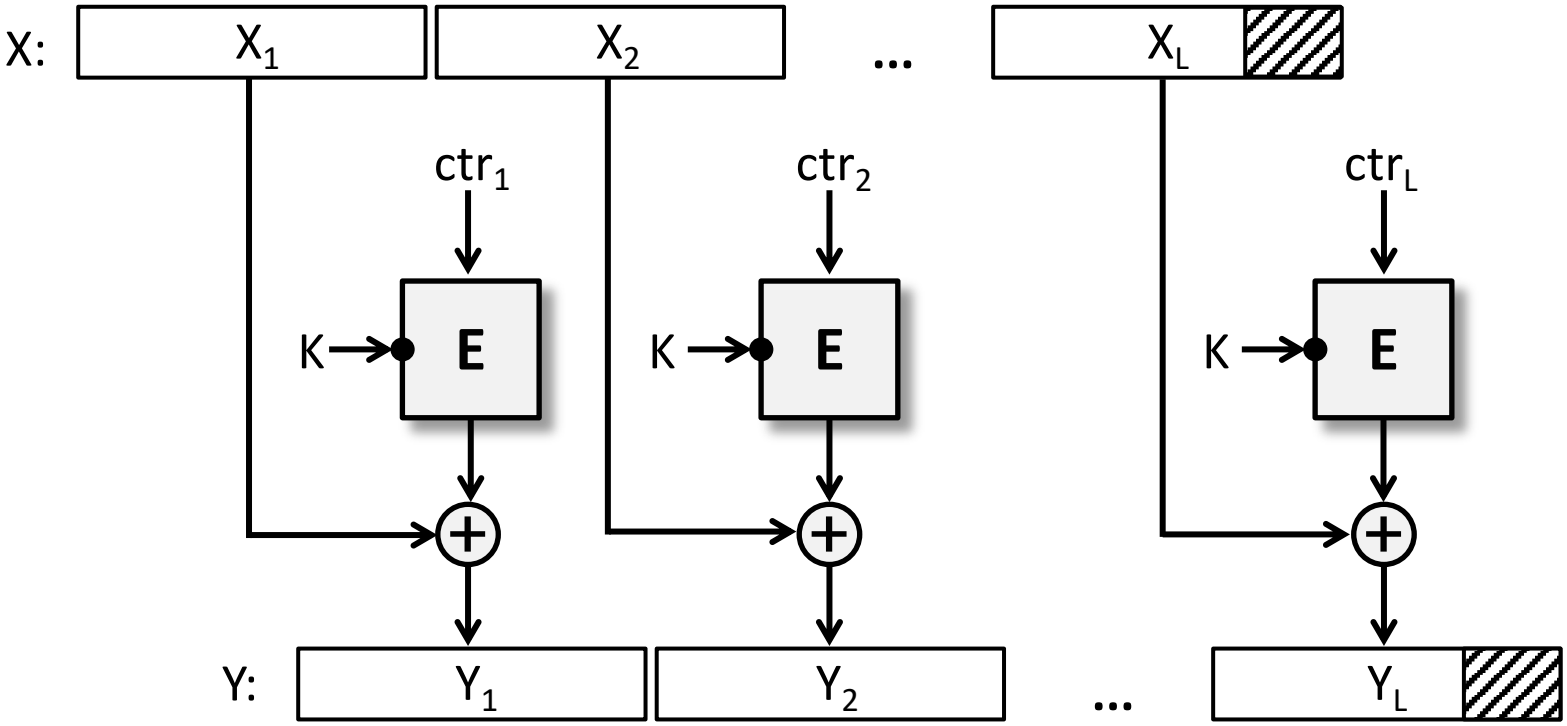
- Egy `x80` byte majd annyi `x00` byte amennyi még szükséges [ISO 7816-4]



- A kitöltés utolsó byte-ja a kitöltés hosszát tartalmazza [ANSI X.923, PKCS#7]
  - A többi byte lehet véletlen (SSL padding)
  - A többi byte értéke lehet valamilyen speciális érték, pl. a padding hossz byte (TLS padding)

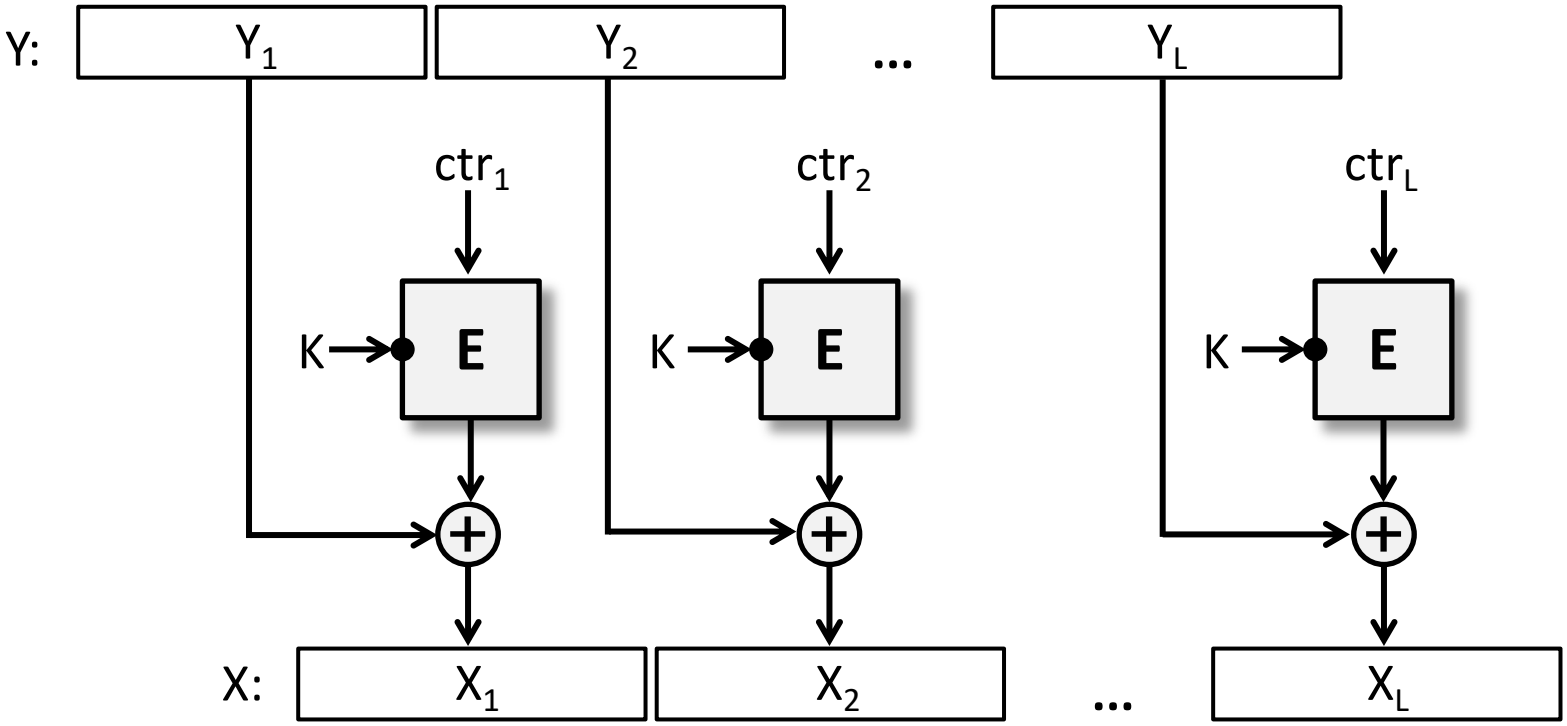


CTR mód (kódolás)



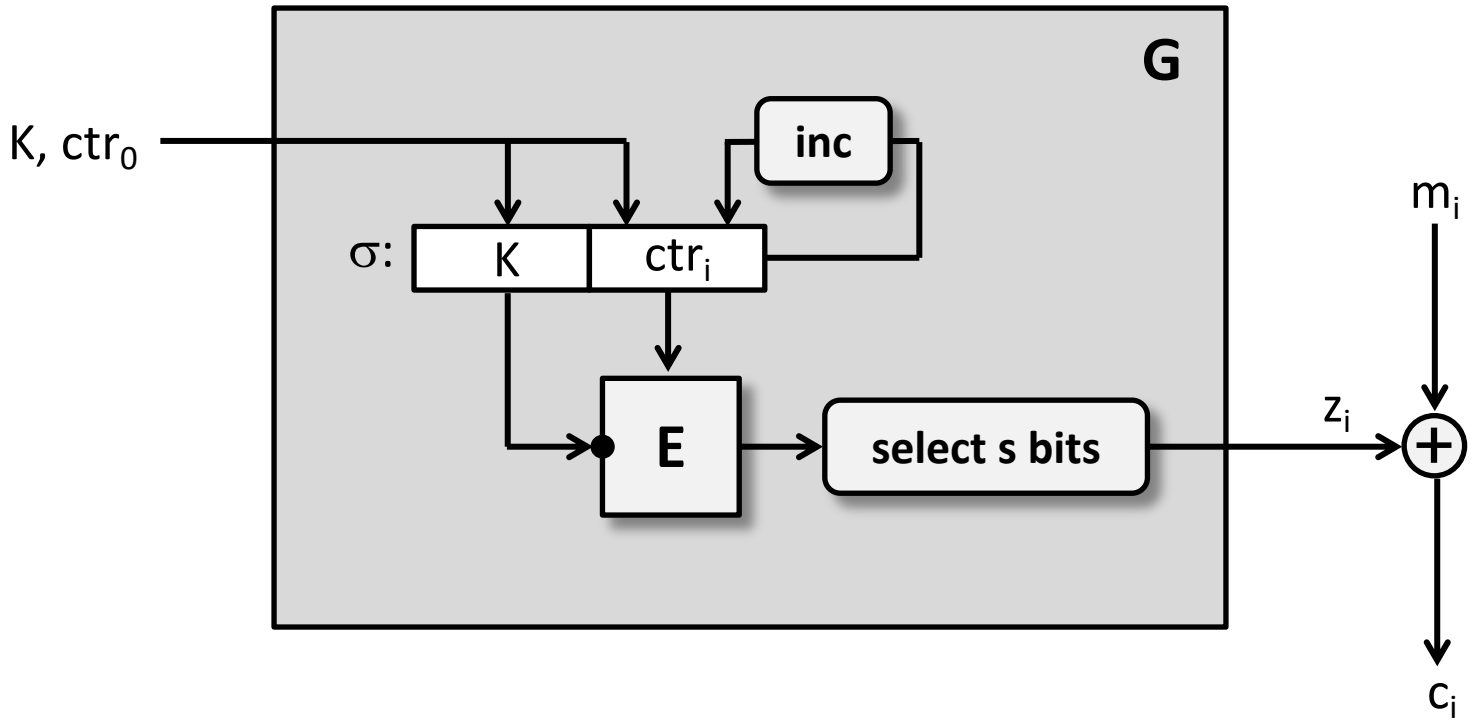
$$Y_i = X_i \oplus E_K(ctr_i)$$
$$ctr_{i+1} = ctr_i + 1$$

CTR mód (dekódolás)



$$X_i = Y_i \oplus E_K(ctr_i)$$
$$ctr_{i+1} = ctr_i + 1$$

A CTR mód más nézetben



Ez lényegében egy kulcsfolyam rejtjelező!

- Belső állapot: (K, ctr_i)
- Állapot update függvény: számláló növelése
- Kimenet generátor függvény: a blokkrejtjelező (kiment csonkolással)

A számláló blokk előállítása

- Nagyon fontos követelmény, hogy a számláló értéke ne ismétlődjön, különben…
  - ha $Y = E_K(ctr)+X$ és $Y' = E_K(ctr)+X'$, akkor $Y + Y' = X + X'$
  - azaz, ha X (vagy X egy része) ismert, akkor X'-t (vagy X' egy részét) ki tudja számolni a támadó

- Ez azt jelenti, hogy a számláló nem ismétlődhet…
  - egy üzenet belül, és
  - azonos kulccsal kódolt üzenetek között sem

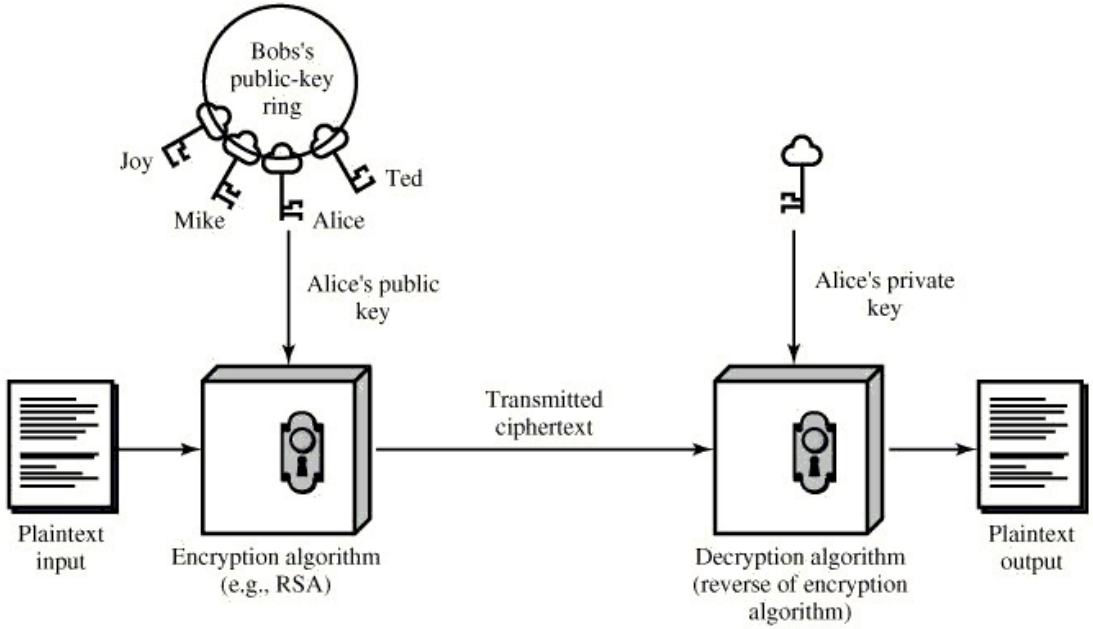
- Ez tipikusan a következő módon oldható meg:
  - A számláló blokkot két részre osztjuk: ctr = ctr'|ctr'', ahol ctr'' b bit hosszú és ctr' n-b bit hosszú (n a blokkrejtjelező blokkmérete bitbeken mérve)
  - ctr' egy nonce (pl: egy egyedi üzenet azonosító vagy sorszám), ami minden üzenetre más (→ lehetséges üzenetek száma max 2^{n-b})
  - ctr'' egy számláló, ami 0-ról indul és az üzenet minden blokkjára 1-gyel nő (→ lehetséges blokkok száma az üzenetben max 2^b)

Rejtjelezők elleni támadások

- Kerckhoff-elv
  - A támadóról mindig azt érdemes feltételezni, hogy ismeri a kódoló (és dekódoló) algoritmust, és csak a kulcs ismeretlen számára
  - Ezen elv figyelmen kívül hagyását „security-by-obscurity”-nek nevezik (ami kerülendő)
- Támadói modellek
  - A támadás célja lehet:
    - » Rejtett üzenetek szisztematikus feltörése
    - » A kulcs megfejtése
  - A támadó számára rendelkezésre álló információk jellege:
    - » Csak rejtett szövegek (ciphertext-only attack)
    - » Ismert nyílt szöveg – rejtett szöveg párok (known plaintext attack)
    - » (adaptívan) választott nyílt szövegekhez (rejtett szövegekhez) tartozó rejtett szövegek (nyílt szövegek) (chosen plaintext/ciphertext attacks) --» orákulum támadások
- Kimerítő kulcskeresés (exhaustive key search) támadás
  - Átlagos komplexitása 2^{k-1}, ha a kulcs k bites
- Algebrai támadások (algebraic attacks)
  - A rejtjelező (mint matematikai objektum) gyengeségeit kihasználó támadások
  - Ha ismertté válik egy olyan algebrai támadás, melynek komplexitása jóval kisebb, mint a kimerítő kulcskeresés komplexitása, akkor azt mondjuk, hogy a rejtjelezőt feltörték

Az aszimmetrikus kulcsú rejtjelezés ötlete

- A kódolás és a dekódolás nem ugyanazt a kulcsot használja, a két kulcs különböző (bár matematikailag függenek egymástól)
- A dekódoló kulcs kiszámítása a kódoló kulcsból nehéz feladat bizonyos titkos információk ismerete nélkül
- Ekkor a kódoló kulcs nyilvánosságra hozható (--» publikus kulcs, publikus kulcsú kriptográfia)
- A dekódoló kulcsot azonban mindig titokban kell tartani (--» privát kulcs)



Aszimmetrikus kulcsú rejtjelezők

- Algoritmusok és terminológia:
  - Kulcspár generáló algoritmus: $G(\ ) = (K^+, K^-)$

    K^+ – publikus kulcs

    K^- – privát kulcs
  - Kódoló algoritmus: $E(K^+, X) = Y$

    X – nyílt szöveg

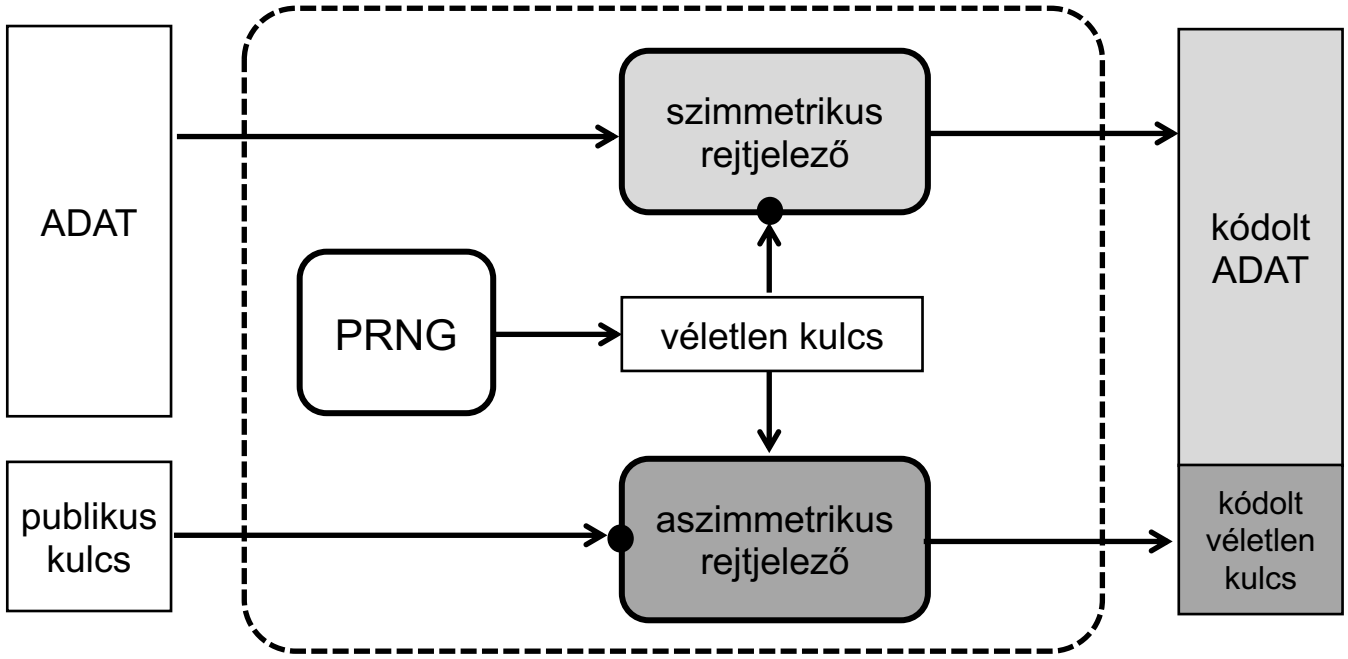
    Y – rejtett szöveg
  - Dekódoló algoritmus: $D(K^-, Y) = X$

- A nyílt szöveg (és a rejtett szöveg) tipikusan több ezer bit (több száz byte) hosszúságú (hasonlóan a blokkrejtjelezéshez)

- Példák: RSA, ElGamal

Hibrid rejtjelezés

- Az aszimmetrikus kulcsú rejtjelezők általában sokkal lassabbak mint a szimmetrikus kulcsú rejtjelezők és nagyobb a kulcsméretük (pl. 2048-4096 bit)
- A sebesség probléma hibrid rejtjelezéssel oldható meg:



Publikus kulcsú rejtjelezők biztonsága

- Ezeknek a rejtjelezőknek a biztonsága általában valamilyen nehéznek vélt matematikai problémára vezethető vissza

  Példák:

  – faktorizáció
  – diszkrét logaritmus számítás

- Néha, matematikailag egzaktul bebizonyítható, hogy a rejtjelező feltörése legalább olyan nehéz feladat, mint a kapcsolódó, nehéznek vélt matematikai probléma megoldása (redukciós bizonyítás)
  – A gyakorlatban használt rejtjelezők esetén azonban csak részleges bizonyítások vannak...

- További gyakorlati megfontolások:
  – Szemantikus biztonság (pl. randomizációval érhető el)
  – Non-malleability (pl. a nyílt szöveg rejtjelezés előtti struktúrált formázásával érhető el)

Kriptográfiai könyvtárak

Kriptográfiai könyvtárak

- Kriptográfiai algoritmusok implementációját tartalmazzák, és ezek használatát API-kon keresztül teszik lehetővé
- Általában egyéb hasznos, kriptográfiai alkalmazásokban szükséges funkciókat is tartalmaznak (pl: erős véletlenszám generátor, kulcsmenedzsment funkciók, szabványos adatformátumok megvalósítása, ...)
- Átlagos programozók által jól használhatóak

PyCryptodome

- Python-ban írt és Python programokban használható kripto könyvtár és API
  - Rejtjelezők (szimmetrikus és aszimmetrikus kulcsú)
  - Hash és MAC függvények
  - Digitális aláírás sémák
  - Véletlenszám generátor
  - Kulcspár menedzsment funkciók (pl: generálás, export, import)
  - Jelszó alapú kulcsgenerálás (szimmetrikus kulcsú rejtjelezéshez)

- Python 3-mal kompatibilis
- Elérhetőség: https://github.com/Legrandin/pycryptodome/
- Dokumentáció: https://www.pycryptodome.org/en/latest/
- Egyszerű telepítés: `pip install pycryptodome`

PyCryptodome: Szimmetrikus kulcsú rejtjelezés

- Crypto.Cipher modul
- Támogatott szimmetrikus kulcsú algoritmusok:
  - ChaCha20, Salsa20, AES
  - RC2, RC4, Blowfish, CAST, DES, 3DES

- Használati példa: AES
  - AES rejtjelező objektum létrehozása az AES.new() függvénnyel
  - A rejtejelező kezdeti paraméterei a new() bemeneteként adhatók meg
    - » pl: blokkrejtjelezési mód, kulcs, IV, számláló kezdő értéke, ...
  - A kódolás és a dekódolás az encrypt() és a decrypt() függvényekkel történik, melyeknek bemenetként kell megadni a (kitöltött) nyílt illetve a rejtett szöveget

PyCryptodome: Kódolás AES-sel CBC módban

aes-cbc-enc-test.py

```
from Crypto.Cipher import AES
from Crypto.Random import get_random_bytes
from Crypto.Util import Padding

ifile = open('testinput.txt', 'rb')
plaintext = ifile.read()
ifile.close()

plaintext = Padding.pad(plaintext, AES.block_size)

key = b'0123456789abcdef0123456789abcdef' «-- Ez csak egy (rossz) példa!
iv = get_random_bytes(AES.block_size)       Soha nem szabad kulcsot
cipher = AES.new(key, AES.MODE_CBC, iv)     alkalmazásba belekódolni!

ciphertext = cipher.encrypt(plaintext)

print('IV: ' + iv.hex())
print('Ciphertext: ')
print(ciphertext.hex())

ofile = open('testoutput.bin', 'wb')
ofile.write(iv + ciphertext)
ofile.close()
```

Mi történik az encrypt() függvényen belül?

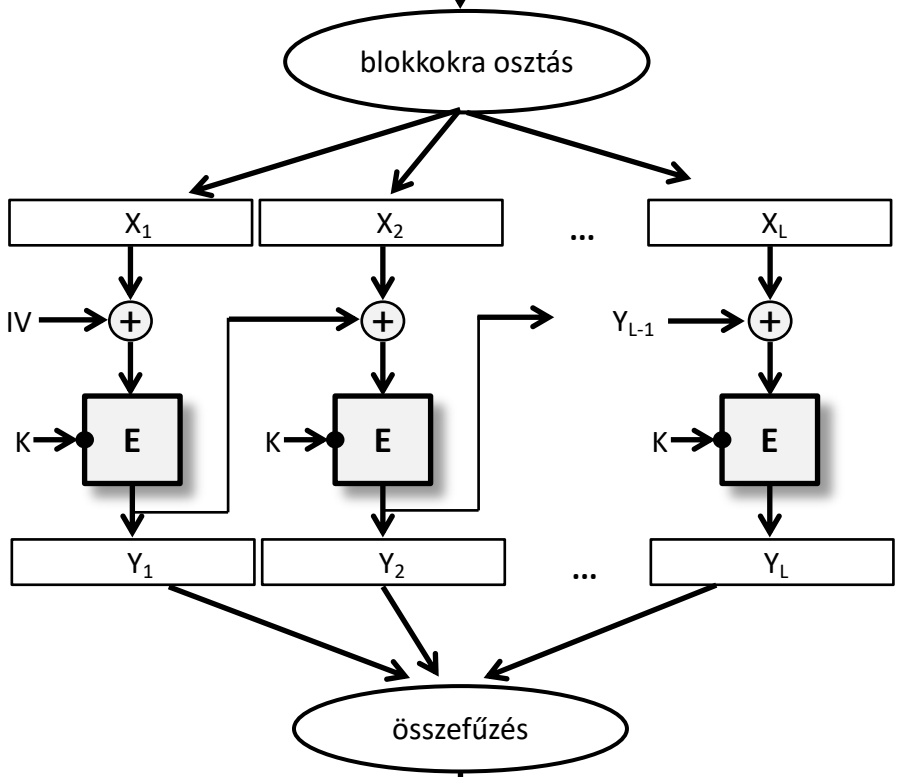
bemenet: tetszőleges méretű, kitöltött nyílt szöveg

encrypt()

Az IV és a K kulcs a new() meghívásakor került megadásra

E = AES, mert az AES osztály new() függvényét hívtuk meg.

Hasonlóan, a CBC mód a new() meghívásakor került kiválasztásra



kimenet: tetszőleges méretű rejtett szöveg

PyCryptodome: Dekódolás AES-sel CBC módban

aes-cbc-dec-test.py

```
from Crypto.Cipher import AES
from Crypto.Util import Padding

ifile = open('testoutput.bin', 'rb')
ciphertext = ifile.read()
ifile.close()

iv = ciphertext[:AES.block_size]
ciphertext = ciphertext[AES.block_size:]

key = b'0123456789abcdef0123456789abcdef' «-- Ez csak egy (rossz) példa!
cipher = AES.new(key, AES.MODE_CBC, iv)      Soha nem szabad kulcsot
                                             alkalmazásba belekódolni!
plaintext = cipher.decrypt(ciphertext)
plaintext = Padding.unpad(plaintext, AES.block_size)

print(plaintext.decode('utf-8'))
```

PyCryptodome: Kulcspár menedzsment

- Crypto.PublicKey modul
- Támogatott kulcs típusok
  - RSA, DSA, elliptikus görbe algoritmusok (ECC)

- Használati példa: RSA kulcspár
  - RSA kulcspár az RSA.generate() függvény meghívásával generálható
    - » A kívánt kulcsméret a generate() bemeneteként adható meg
    - » Az alapértelmezett publikus exponens $2^{16}+1$, de ez módosítható
  - A létrehozott RSA kulcspár objektum export_key() függvényével exportálható a kulcspár PEM vagy DER formátumban
  - Ha csak a publikus kulcsot szeretnénk exportálni, akkor először a publickey() függvényt kell meghívni, majd a visszaadott kulcs objektum export_key() függvényét
  - Az RSA.import_key() függvénnyel kulcsot vagy kulcspárt importálhatunk alkalmazásunkba

PyCryptodome: RSA kulcspár generálás és export

rsa-key-gen-test.py

```
from Crypto.PublicKey import RSA

key = RSA.generate(4096)

# export the entire key pair in PEM format
ofile = open('rsa-test-keypair.pem', 'w')
keypairstr = key.export_key(format='PEM', passphrase='x#4K').decode('ASCII')
ofile.write(keypairstr)
ofile.close()

# export only the public key in PEM format
ofile = open('rsa-test-pubkey.pem', 'w')
ofile.write(key.publickey().export_key(format='PEM').decode('ASCII'))
ofile.close()

# export the entire key pair in DER format
ofile = open('rsa-test-keypair.der', 'wb')
ofile.write(key.export_key(format='DER', passphrase='x#4K'))
ofile.close()

# export only the public key in DER format
ofile = open('rsa-test-pubkey.der', 'wb')
ofile.write(key.publickey().export_key(format='DER'))
ofile.close()
```

Ez csak egy (rossz) példa!
Soha nem szabad jelszót
alkalmazásba belekódolni!

PyCryptodome: RSA-OAEP kódolás

rsa-enc-test.py

```
from Crypto.Cipher import PKCS1_OAEP
from Crypto.PublicKey import RSA

kfile = open('rsa-test-pubkey.pem', 'r')
# kfile = open('rsa-test-pubkey.der', 'rb')
pubkeystr = kfile.read()
kfile.close()

pubkey = RSA.import_key(pubkeystr)
cipher = PKCS1_OAEP.new(pubkey)

plaintext = b'Plaintext should fit within 1 RSA block.'
ciphertext = cipher.encrypt(plaintext)

# print(ciphertext)
print(ciphertext.hex())

ofile = open('rsa-enc.out', 'wb')
ofile.write(ciphertext)
ofile.close()
```

PyCryptodome: RSA-OAEP dekódolás

rsa-dec-test.py

```
from Crypto.Cipher import PKCS1_OAEP
from Crypto.PublicKey import RSA

kfile = open('rsa-test-keypair.pem', 'r')
keypairstr = kfile.read()
kfile.close()

keypair = RSA.import_key(keypairstr, passphrase='x#4K')
cipher = PKCS1_OAEP.new(keypair)

ifile = open('rsa-enc.out', 'rb')
ciphertext = ifile.read()
ifile.close()

plaintext = cipher.decrypt(ciphertext)

print(plaintext)
```

Ez csak egy (rossz) példa!
Soha nem szabad jelszót
alkalmazásba belekódolni!

Ellenőrző kérdések

- Milyen feladatokra jó a kriptográfia?
- Mi a rejtjelezés alapmodellje?
- Mi a különbség a kulcsfolyam rejtjelezők és a blokkrejtjelezők között?
- Hogyan működik a one-time pad? Miben különböznek a praktikus kulcsfolyam rejtjelezők a one-time pad-től?
- Hogyan működik a CBC és a CTR blokkrejtjelezési mód (kódolás, dekódolás)?
- Mi a Kerckhoff-elv?
- Milyen támadó modellek léteznek rejtjelezés esetén?
- Mi a kimerítő kulcskeresés támadás átlagos komplexitása?
- Mi a publikus kulcsú rejtjelezés alapötlete?
- Mi a hibrid rejtjelezés motivációja, és hogyan működik?
- Mik azok a kriptográfiai könyvtárak? Miért hasznosak?