

Blokové kryptosystémy s tajným klíčem

stejný klíč použit pro šifrování a dešifrování

mapují n -bitový plaintext na n -bitovou šifru za použití k -bitového klíče (parametr)

lze chápat jako jednoduché substituční šifry s nad obrovskou abecedou

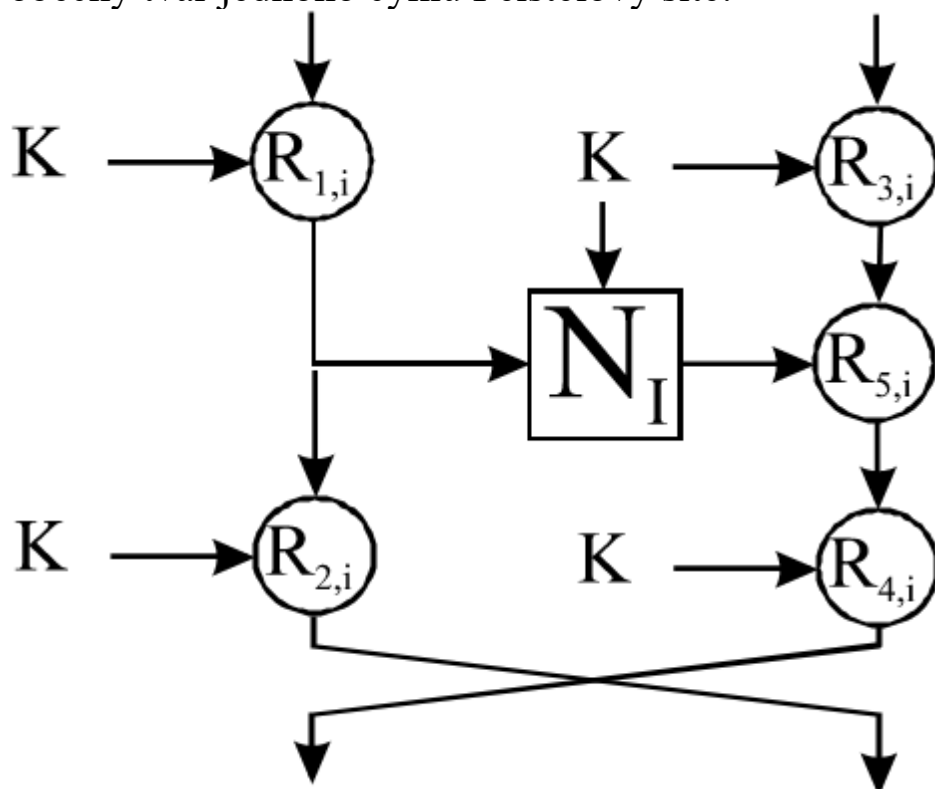
každá šifra je soustavou bijekcí definujících permutaci nad n -bitovými vektory, tj. je invertibilní, klíč vybírá konkrétní bijekci

Hodnocení blokových šifer

- odhadovaná úroveň bezpečnosti ... důvěra v historickou bezpečnost roste s časem
- velikost klíče – je horním limitem bezpečnosti šifry
- výkon (efektivita) – měřeno počtem instrukcí na zašifrovaný byte
- velikost bloku
- komplexita kryptografické transformace
- zvětšení dat šifrováním
- propagace chyb
- komplexita expanze klíče (inicializace)

mnoho dnešních systémů jsou *Feistelovy šifry*

obecný tvar jednoho cyklu Feistelovy sítě:



$R_{j,i}$ - reversibilní funkce textu a klíče

N_i - nereversibilní funkce textu a klíče

Kryptosystém DES

Vyvinula firma IBM na zakázku NBS počátkem 70. let. Původní název DEA, v USA DEA1. Jako standard přijat 23. 11. 1976

Patrně nejrozsáhleji používaný šifrovací algoritmus všech dob.

Přibližně od přelomu tisíciletí **není považován za bezpečný z důvodu malé délky klíče** – nicméně 20 let intenzivní kryptoanalýzy nepřineslo žádný zásadní poznatek o vnitřních slabínách algoritmu

Norma ANSI X3.92

šifruje 64-bitové bloky otevřeného textu na 64-bitové výstupní bloky, délka klíče 64 bitů

Požadavky zadavatele

1. Alg. musí poskytovat vysoký stupeň ochrany
2. Musí být formálně popsatelný a snadno pochopitelný
3. Bezpečnost algoritmu nesmí záviset na znalosti či neznalosti samotného algoritmu.
4. Musí být dostupný pro nejširší veřejnost.
5. Musí být použitelný v nejrůznějších aplikacích.
6. Musí být efektivní.
7. Musí být ověřitelný.
8. Musí být exportovatelný.

Analýza

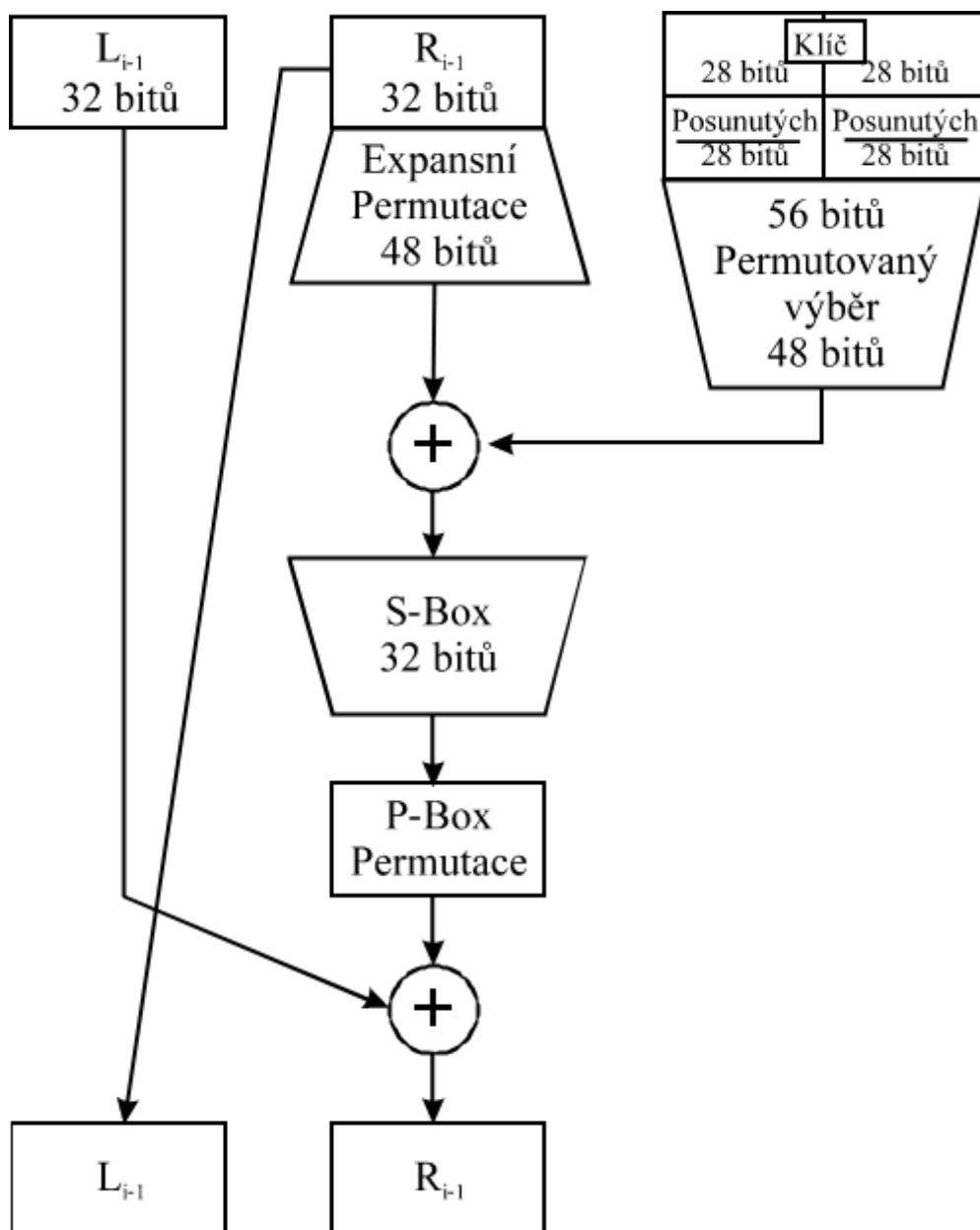
- úvodní permutace nemá prakticky žádný vliv
- příliš krátký klíč, navíc efektivně pouze 56-bitový
- komplementárnost -
$$C = E(K, P) \Leftrightarrow \neg C = \neg E(\neg K, \neg P)$$
- existence slabých (weak) klíčů ($E(K) = D(K)$) a poloslabých (semiweak) klíčů ($E(K_1) E(K_2) = Id$).
- nevhodný návrh S-boxů

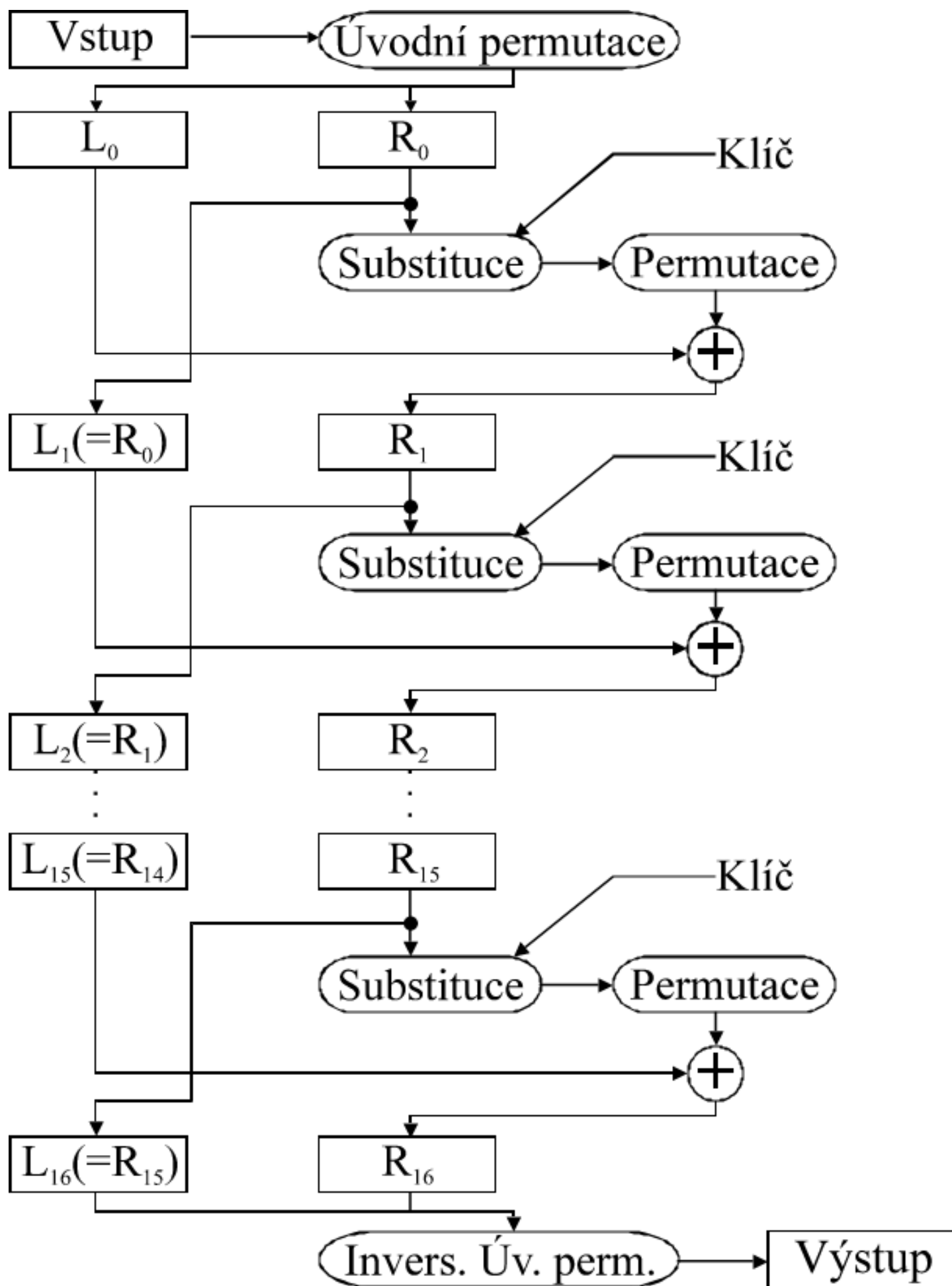
Možné způsoby zvýšení bezpečnosti

1. vícenásobné šifrování - nestačí dvojnásobné, ke skutečnému zvýšení bezpečnosti nutno šifrovat

$$C = E(K_1) D(K_2) E(K_1)$$

2. zvětšení délky hesla na 768 bitů - nepříliš účinné





Poučení z DESu

- paralelní aplikace malých S-Boxů je nevhodná pro SW implementaci
- příliš malý klíč
- permutace a permutační výběry těžko zvládnutelné v SW
- Feistelova síť principiálně funguje a vykazuje dobrou odolnost vůči analýze
- nové algoritmy by měly být vhodné pro SW implementaci na běžném HW (výběr operací)
- je třeba zvýšit odolnost vůči masivně paralelnímu útoku (drahá key schedule)
- rozhodně delší klíče, případně blok
- vysokou odolnost vykazují širší S-boxy a na klíči závislé interní struktury algoritmu
- nahrazení paralelních operací, které jsou neefektivní a mají omezený lavinový efekt sekvenčními operacemi

Systém Blowfish

opět Feistelova šifra, délka bloku 64 bitů, proměnná délka klíče až 448 bitů

Subklíče

předpočítávají se před každým šifrováním

- *P-pole* = 32 bitové klíče
 $P_1, P_2, \dots, P_{18}$
- pole *S-boxů*, každý 256 32-bitových položek
 $S_{1,0}, S_{1,1}, \dots, S_{1,255}$
 $S_{2,0}, S_{2,1}, \dots, S_{2,255}$
 $S_{3,0}, S_{3,1}, \dots, S_{3,255}$
 $S_{4,0}, S_{4,1}, \dots, S_{4,255}$

Nereverzibilní funkce *F*:

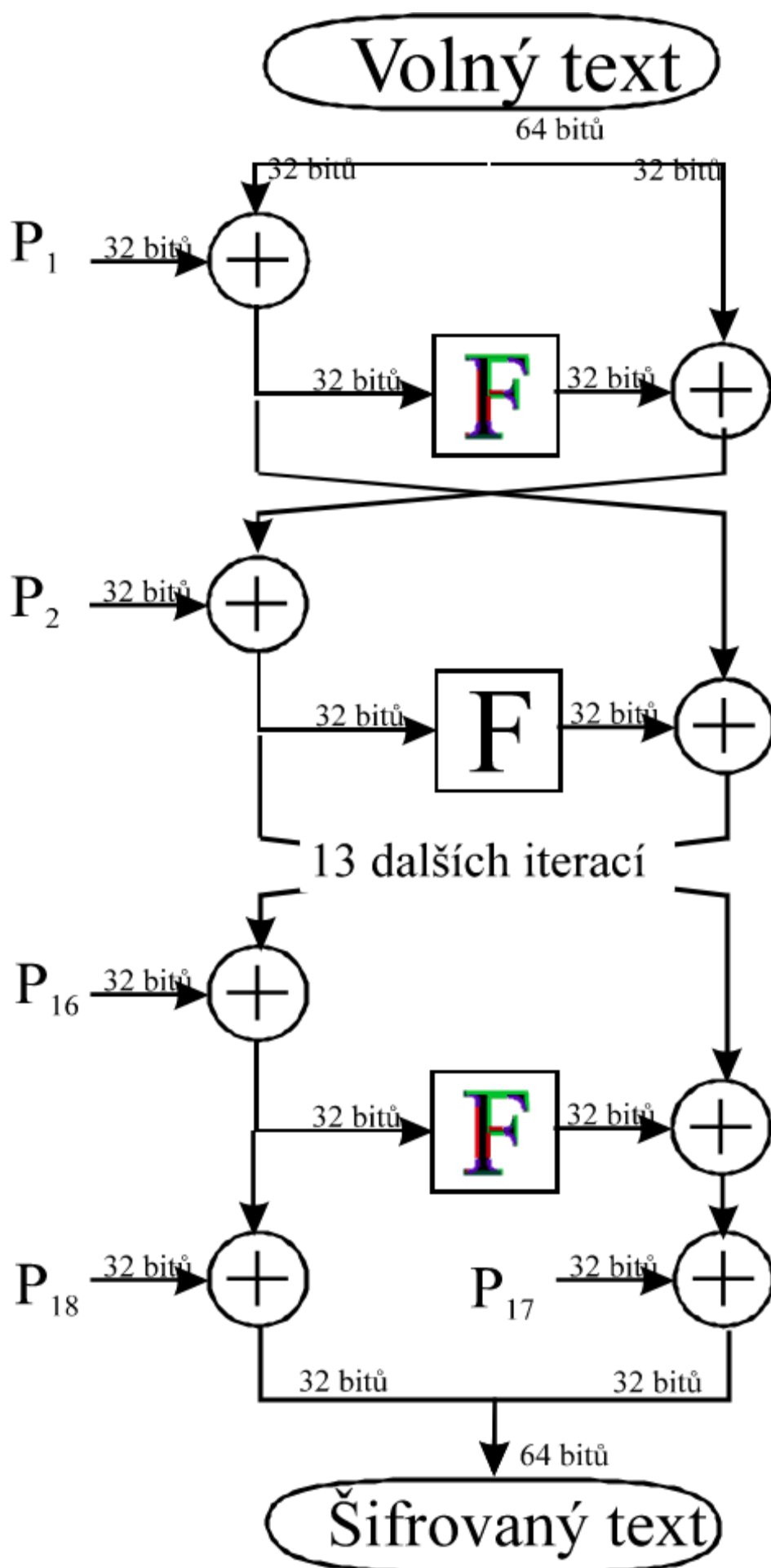
$$F(x_L) = ((S_{1,a} + S_{2,b} \bmod 2^{32}) \text{ xor } S_{3,c}) + S_{4,d} \bmod 2^{32}$$

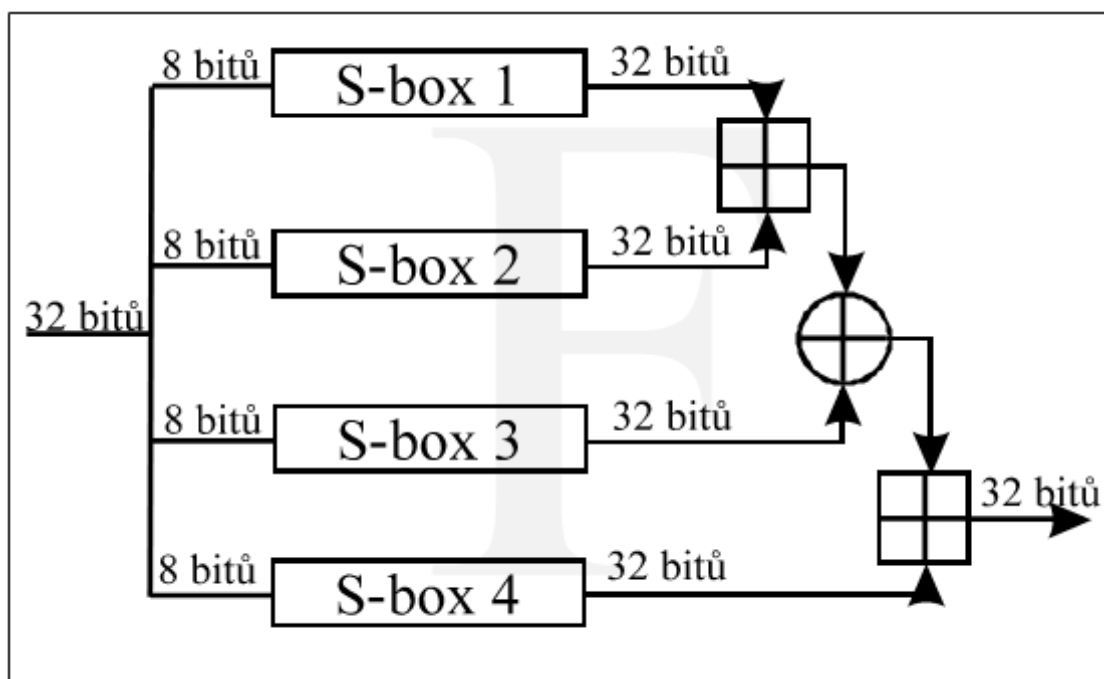
$$x_L = a \vee b \vee c \vee d$$

Generování podklíčů

1. Inicializujeme *P-pole* a všechny *S-boxy* pevným řetězcem
2. **xor** P_1 s prvními 32 bity klíče, **xor** P_2 s dalšími 32 bity klíče atd.
3. Zašifrujeme nulový řetězec
4. P_1 a P_2 nahradíme výstupem předchozího kroku
5. zašifrujeme výstup kroku 3.
6. P_3 a P_4 nahradíme výstupem předchozího kroku
7. stejně pro ostatní položky *P-pole* a všechny *S-boxy*

Algoritmus provádí 16 cyklů nad vstupem délky 64 bitů. Pro účely analýzy navržený jeho zmenšené varianty (MiniBlowfish) pracující nad vstupem 32 popřípadě 16 bitů.

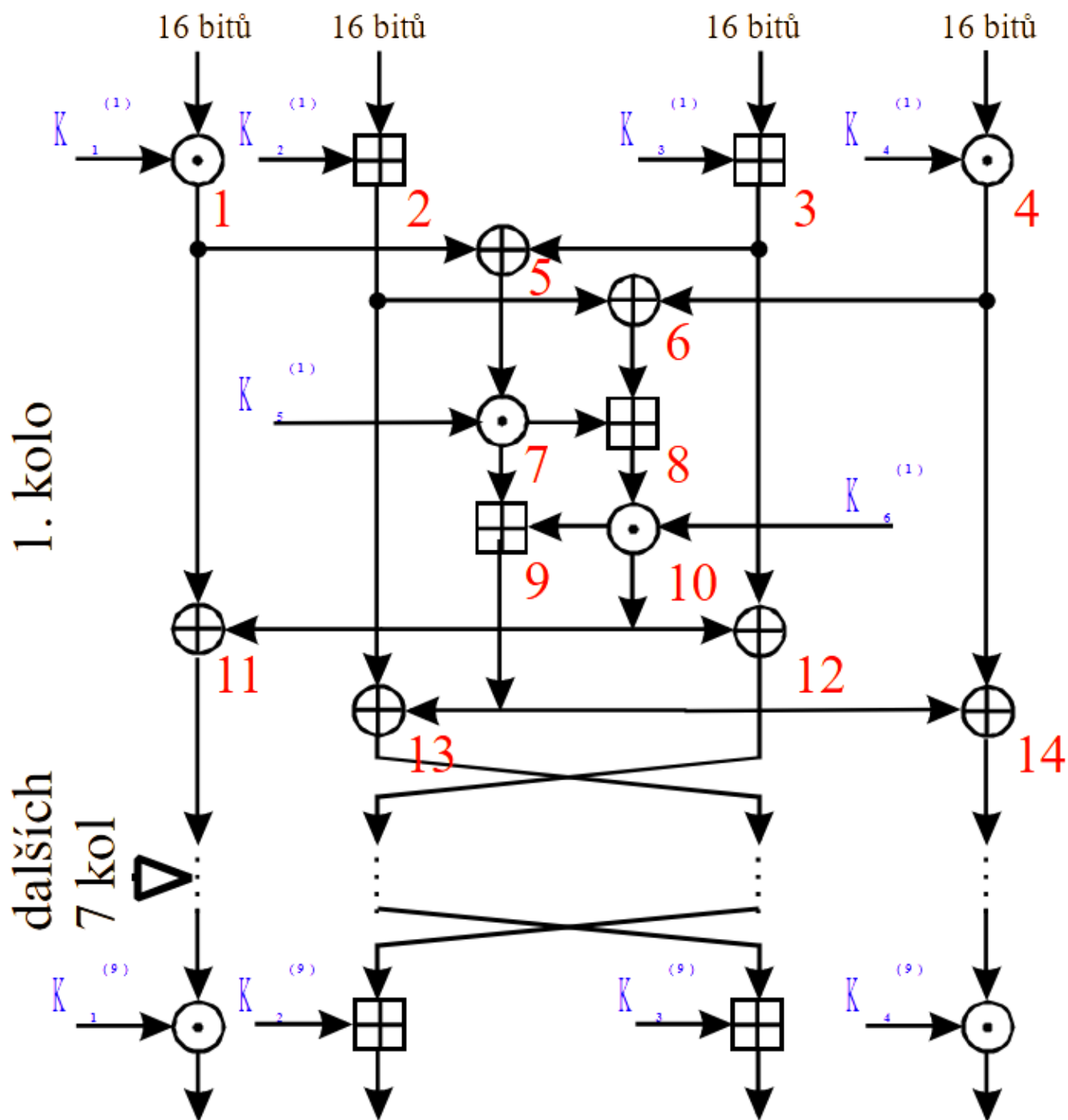




Kryptosystém IDEA

publikován v roce 1991 pod názvem IPES, autoři X. Lai a J. Massey
současný název akronymem za International Data Encryption Algorithm
bloková šifra s délkou bloku 64 bitů, pracující s klíčem o délce 128 bitů
algoritmus byl patentován (patentní ochrana již vypršela), nešel volně používat

Blok otevřeného textu je rozdělen na čtyři části, každá o délce šestnáct bitů. Poté je provedeno osm kol šifrovacího procesu.



Tvorba subklíčů

celkem 52 subklíčů:

1. klíč rozdělen na osm částí - vznikne prvních osm subklíčů
2. je provedena rotace klíče vlevo o 25 bitů
3. vzniklý řetězec je opět rozdělen na osm částí – subklíčů
4. Opakováním 2 a 3 získáme potřebné množství subklíčů.

Dešifrování

stejný algoritmus jako pro šifrování, rozdíl pouze v použitých subklíčích

použijeme-li pro šifrování v i -tém ($i = 1, \dots, 8$) kole klíčů

$$K_1^{(i)}, K_2^{(i)}, K_3^{(i)}, K_4^{(i)}, K_5^{(i)}, K_6^{(i)}$$

a v závěrečné fázi $K_1^{(9)}, K_2^{(9)}, K_3^{(9)}, K_4^{(9)}$,

pro dešifrování použijeme klíčů ve tvaru

round	$\bar{K}_1^{(r)}$	$\bar{K}_2^{(r)}$	$\bar{K}_3^{(r)}$	$\bar{K}_4^{(r)}$	$\bar{K}_5^{(r)}$	$\bar{K}_6^{(r)}$
$r = 1$	$(K_1^{(10-r)})^{-1}$	$-K_2^{(10-r)}$	$-K_3^{(10-r)}$	$(K_4^{(10-r)})^{-1}$	$K_5^{(9-r)}$	$K_6^{(9-r)}$
$2 \leq r \leq 8$	$(K_1^{(10-r)})^{-1}$	$-K_3^{(10-r)}$	$-K_2^{(10-r)}$	$(K_4^{(10-r)})^{-1}$	$K_5^{(9-r)}$	$K_6^{(9-r)}$
$r = 9$	$(K_1^{(10-r)})^{-1}$	$-K_2^{(10-r)}$	$-K_3^{(10-r)}$	$(K_4^{(10-r)})^{-1}$	—	—

kde $(K_x^{(i)})^{-1}$ znamená multiplikativní inverzi mod $2^{16}+1$, $-K_x^{(i)}$ aditivní inverzi mod 2^{16}

IDEA může být používána v libovolném pracovním módu pro blokové šifry, zejména v módech ECB, CBC, OFB, CFB

lze použít trojnásobné šifrování EDE Triple-IDEA se dvěma 128-bitovými klíči, použít 52 nezávislých řetězců

Analýza

Je zajímavé, že pokud bychom algoritmus upravili tím způsobem, že zvětšíme délku všech řetězců, se kterými pracuje na dvojnásobek, dojde ke ztrátě bezpečnosti.

Algoritmus je stále považován za bezpečný. Roku 2007 publikován útok proti algoritmu omezenému na 6 kol, v roce 2012 modifikace biclique útoku na plnou verzi algoritmu, redukující prostor klíčů o 2 bity.

Z dnešního pohledu největší slabinou nevelká efektivita.

RC5

publikoval v roce 1994 R. Rivest, přináší novou myšlenku použití rotací závislých na datech

velmi pružný algoritmus s celou řadou parametrů

- délka šifrovacího klíče (0 až 255 bytů)
- počet kol šifrovacího procesu (opět 0 až 255)
- z hodnot 16, 32, 64, ale i vyšších lze zvolit délku slova, algoritmus zpracovává bloky o délce dvojnásobku slova

$\oplus$ označuje bitové XOR, $+$ značí sčítání modulo délka slova, $--$ odčítání, $x <- y$ znamená rotaci řetězce x vlevo o y bitů a symbol $->$ rotaci opačným směrem.

Šifrování

Předpokládejme prozatím, že máme k dispozici pole subklíčů S . Necht' se blok otevřeného textu skládá ze dvou částí A a B . Šifrování probíhá dle následujícího předpisu:

```

A = A + S[0];
B = B + S[1];
for i = 1 to <počet_kol> do
    A = ((A  $\oplus$  B) <- B) + S[2i];
    B = ((B  $\oplus$  A) <- A) + S[2i + 1];

```

Dešifrování

```

for i = <počet_kol> downto 1 do
    B = ((B -- S[2i + 1]) -> A)  $\oplus$  A);
    A = ((A -- S[2i]) -> B)  $\oplus$  B);
B = B -- S[1];
A = A -- S[0];

```

Inicializace

pole subklíčů S , pomocné pole L o velikosti tolik slov, aby se do něj "vešel" klíč a dvě magická čísla:

$P_w = \text{Odd}((e - 2)2^w)$ a

$Q_w = \text{Odd}((\phi - 2)2^w)$

kde e je základ přirozeného logaritmu (2,718281...), ϕ je tzv. zlatý řez (1,618033...) a w značí délku slova. Funkce **Odd** vrací nejbližší liché celé číslo.

Do pole L zkopírujeme od začátku šifrovací klíč, a na konci případně doplníme nulami. Pole S naplníme dle předpisu

```

S[0] = P_w;
for i = 1 to 2 * (<počet_kol> + 1) -- 1 do
    S[i] = S[i - 1] + Q_w;

```

a proces generování subklíčů dokončíme promícháním obou polí:

```

i = j = 0;
A = B = 0;
for k = 1 to 3 * max(s, l) do
    A = S[i] = (S[i] + A + B) <- 3;
    B = L[j] = (L[j] + A + B) <- (A + B);

```

$$i = (i + 1) \bmod(s);$$

$$j = (j + 1) \bmod(l);$$

kde s resp. l jsou velikosti polí S , resp. L .

Velikost slova je rozumné volit v závislosti na velikosti slova používaného procesoru, 128 bitů pro hašování. Šest kol pro nenáročnou aplikaci (není bezpečné), 32 pro ty nejnáročnější. Jako rozumná se jeví volba délka slova 32 bitů, 12 kol, 16bajtový klíč, což krátce zapíšeme RC5-32/12/16.

Je znám útok založený na diferenciální kryptoanalýze se složitostí 2^{44} proti algoritmu používajícímu 12 kol. Jsou známy útoky na implementace algoritmu na platformách, kde délka provedení rotace závisí na délce rotace.

Dnes lépe 18 – 20 kol.

Poučení z devadesátých let

- nezbytné zvýšit odolnost vůči diferenční a lineární kryptoanalýze (maskování klíčem, zvýšení počtu kol)
- nově je třeba reagovat na neteoretické fyzikální útoky na procesor realizující šifru (výběr operací ekvivalentně zatěžujících procesor)
- zvýšení efektivity operací využitím plné délky slova procesoru v jednotlivých operacích

Kryptosystém Serpent

32 kol SP síť, vstup 128 bit plaintext, výstup 128 bit šifra, klíč variabilní délky až 256 bitů

konzervativní návrh využívající konstantní bitové rotace, substituce, XOR

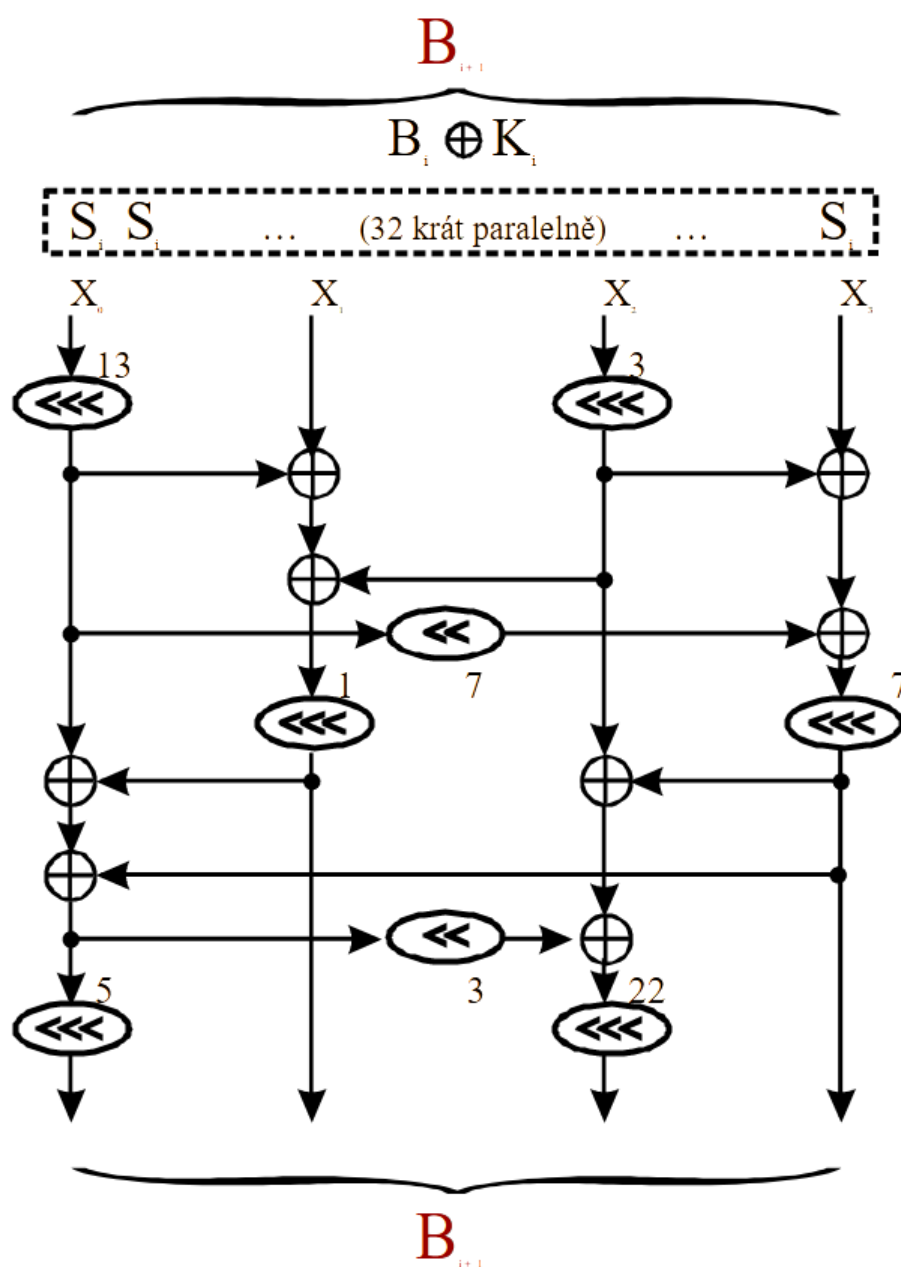
součástí definice algoritmu 8 konstantních S-boxů $S_0 \dots S_7$ se vstupem a výstupem o šíři 4 bity

Šifrování

založeno na bitových rotacích a posunech 32bitových slov

Provede se 31 kol následujícího procesu,

na závěr algoritmus provede ještě jedno míchání s klíčem, substituci a závěrečné míchání s klíčem



Tvorba subklíčů

doplnit klíč K na 256 bitů (přidáním 1000...0b)

1. $K = w_{-8}, w_{-7}, w_{-6}, w_{-5}, w_{-4}, w_{-3}, w_{-2}, w_{-1}$
2. $w_{-i} = (w_{i-8} \oplus w_{i-5} \oplus w_{i-3} \oplus w_{i-1} \oplus \phi \oplus i) \lll 11$ kde $i \in 0, 1, \dots, 131$
3. $\{k_{4i}, k_{4i+1}, k_{4i+2}, k_{4i+3}\} = S_{(i \bmod 8) + 3}(w_{4i}, w_{4i+1}, w_{4i+2}, w_{4i+3})$ kde $i \in 0, 1, \dots, 33$
4. $K_i = \{k_{4i}, k_{4i+1}, k_{4i+2}, k_{4i+3}\}$

Dešifrování

Spočte se inverzní hodnota pro všechny S-boxy a algoritmus se spustí „pozpátku“ přičemž všechny operace se invertují

Analýza

Algoritmus je navrhován aby byl odolný proti známým metodám analýzy, byl jedním z pěti postupujících kandidátů pro AES. Bylo publikováno několik útoků omezujících v malé míře bezpečnost šifry, např kompromitace 6 – 11 kol algoritmu vesměs typu known plaintext s potřebou 2^{110} plaintextů a složitostí cca 2^{200} proti neoslabenému algoritmu.

Obecně se soudí, že Serpent má větší bezpečnostní rezervu, než Rijndael, ale je pomalejší a méně vhodný pro implementaci na omezeném HW.

Kryptosystém *Rijndael*

produkční bloková šifra s proměnnou délkou bloku 16, 24 nebo 32 bajtů a klíčem o délce 128, 192, 256 bitů

založena na podobném principu jako algoritmus Square

Stavem šifry označujeme obsah pole $a_{i,j}$ o rozměrech 4 x (délka_bloku / 32)

Podobně klíč je pole $k_{i,j}$ o rozměrech 4 x (délka_klíče / 32)

$a_{0,0}$	$a_{0,1}$	$a_{0,2}$	$a_{0,3}$	$a_{0,4}$	$a_{0,5}$
$a_{1,0}$	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	$a_{1,4}$	$a_{1,5}$
$a_{2,0}$	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	$a_{2,4}$	$a_{2,5}$
$a_{3,0}$	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$

$k_{0,0}$	$k_{0,1}$	$k_{0,2}$	$k_{0,3}$
$k_{1,0}$	$k_{1,1}$	$k_{1,2}$	$k_{1,3}$
$k_{2,0}$	$k_{2,1}$	$k_{2,2}$	$k_{2,3}$
$k_{3,0}$	$k_{3,1}$	$k_{3,2}$	$k_{3,3}$

blok plaintextu je do stavu vkopírován v pořadí $a_{0,0}$, $a_{1,0}$, atd. podobně klíč počet kol je závislý na délce bloku a klíče:

Klíč / Blok	4	6	8
4	10	12	14
6	12	12	14
8	14	14	14

Šifrování

```
Round(State, RoundKey) {
    ByteSub(State);
```

```

ShiftRow(State);
MixColumn(State);
AddRoundKey(State, RoundKey);
}

```

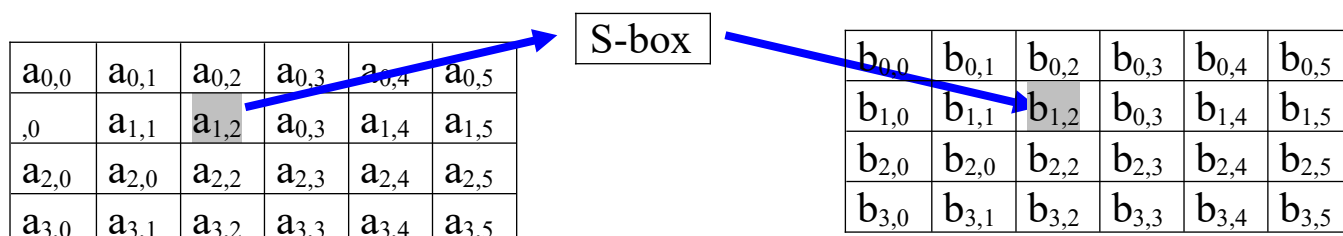
```

FinalRound(State, RoundKey) {
    ByteSub(State);
    ShiftRow(State);
    AddRoundKey(State, RoundKey);
}

```

Zde:

ByteSub(State)



S-box je nelineární invertibilní transformace definovaná ve dvou krocích –

- provede se invertování (vůči násobení) nad $GF(2^8)$, 0 je inverzní sama k sobě
- aplikuje se následující transformace

ShiftRow (State)

provádí rotaci řádků 1, 2 a 3 stavu o pevnou hodnotu závislou na velikosti stavu

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

 $\oplus C(x)$

$b_{0,0}$	$b_{0,1}$	$b_{0,2}$	$b_{0,3}$	$b_{0,4}$	$b_{0,5}$
$b_{1,0}$	$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	$b_{0,3}$	$b_{1,4}$	$b_{1,5}$
$b_{2,0}$	$b_{2,0}$	$b_{2,2}$	$b_{2,3}$	$b_{2,4}$	$b_{2,5}$
$b_{3,0}$	$b_{3,1}$	$b_{3,2}$	$b_{3,3}$	$b_{3,4}$	$b_{3,5}$

Nb	C1	C2	C3
4	1	2	3
6	1	2	3
8	1	3	4

MixColumn (State)

$a_{0,0}$	$a_{0,1}$	$a_{0,2}$	$a_{0,3}$	$a_{0,4}$	$a_{0,5}$
$a_{1,0}$	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{0,3}$	$a_{1,4}$	$a_{1,5}$
$a_{2,0}$	$a_{2,0}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	$a_{2,4}$	$a_{2,5}$
$a_{3,0}$	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$

realizuje násobení sloupce jako polynomu nad $GF(2^8)$ konstantním polynomem $C(x) = 3x^3 + x^2 + x + 2$ modulo $x^4 + 1$

AddRoundKey (State, RoundKey)

provádí míchání (XOR) stavu s příslušným podklíčem

$a_{0,0}$	$a_{0,1}$	$a_{0,2}$	$a_{0,3}$	$a_{0,4}$	$a_{0,5}$
$a_{1,0}$	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	$a_{1,4}$	$a_{1,5}$
$a_{2,0}$	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	$a_{2,4}$	$a_{2,5}$
$a_{3,0}$	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$

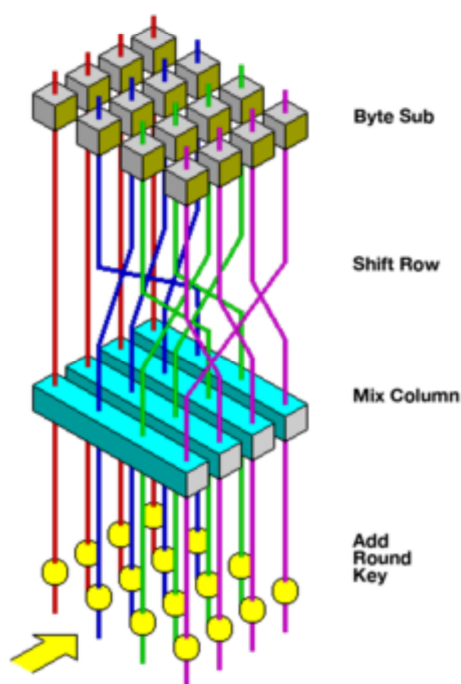
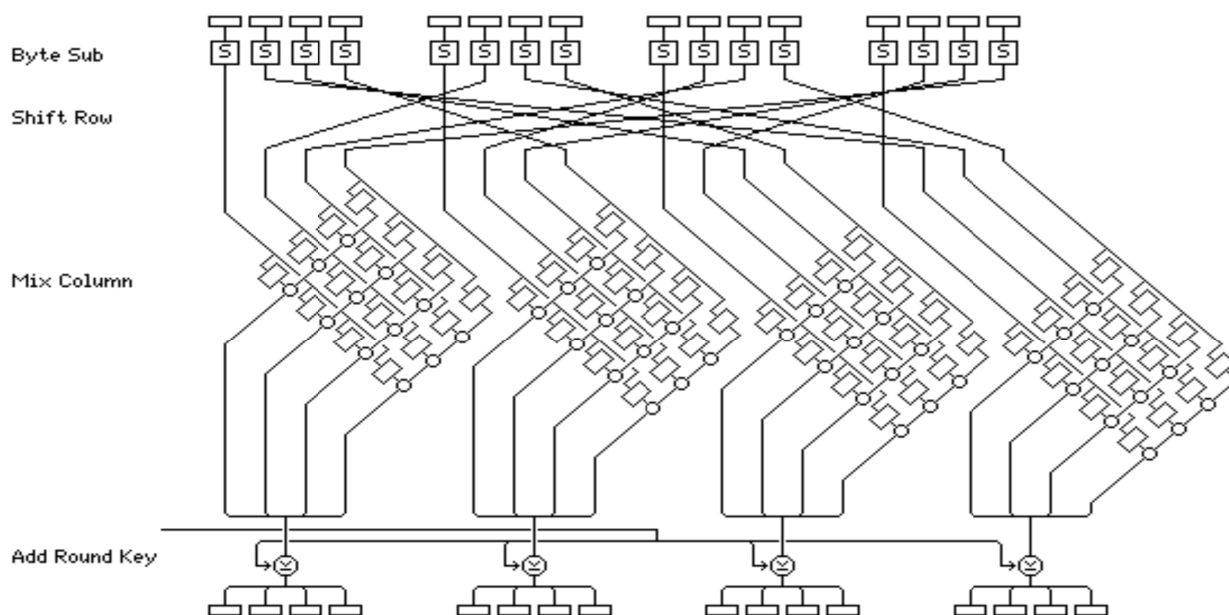
 $\oplus$

$k_{0,0}$	$k_{0,1}$	$k_{0,2}$	$k_{0,3}$	$k_{0,4}$	$k_{0,5}$
$k_{1,0}$	$k_{1,1}$	$k_{1,2}$	$k_{1,3}$	$k_{1,4}$	$k_{1,5}$
$k_{2,0}$	$k_{2,1}$	$k_{2,2}$	$k_{2,3}$	$k_{2,4}$	$k_{2,5}$
$k_{3,0}$	$k_{3,1}$	$k_{3,2}$	$k_{3,3}$	$k_{3,4}$	$k_{3,5}$

 $=$

$b_{0,0}$	$b_{0,1}$	$b_{0,2}$	$b_{0,3}$	$b_{0,4}$	$b_{0,5}$
$b_{1,0}$	$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{1,4}$	$b_{1,5}$
$b_{2,0}$	$b_{2,1}$	$b_{2,2}$	$b_{2,3}$	$b_{2,4}$	$b_{2,5}$
$b_{3,0}$	$b_{3,1}$	$b_{3,2}$	$b_{3,3}$	$b_{3,4}$	$b_{3,5}$

Zajímavé je, že celé kolo šifrovacího procesu lze na 32 bitovém procesoru implementovat jako 4 výběry z tabulky a 4 XOR operace



... asi nejlepší obrázek přehledový obrázek struktury šifrování v Rijndael algoritmu

Expanze klíče

```
KeyExpansion(byte Key[4*Nk] word W[Nb*(Nr+1)])
{
  for(i = 0; i < Nk; i++)
    W[i] = (key[4*i],key[4*i+1],key[4*i+2],key[4*i+3]);
  for(i = Nk; i < Nb * (Nr + 1); i++)
```

```

{
    temp = W[i - 1];
    if (i % Nk == 0) {
        temp = SubByte(RotByte(temp)) ^ Rcon[i / Nk];
    } else if (i % Nk == 4) {
        temp = SubByte(temp);
    }
    W[i] = W[i - Nk] ^ temp;
}
}

```

Analýza

Algoritmus byl podroben rozsáhlé analýze a zvolen jako nový standard AES

V současnosti není známa jakákoliv prakticky použitelná slabina

Zvláštností je matematický model prováděných transformací

Publikovány různé útoky do určité míry omezující bezpečnost algoritmu. Původně publikovaný XSL útok není funkční. Publikovány útoky na key schedule se složitostí 2^{99} , ovšem s malou praktickou využitelností. Publikován útok na plnou verzi algoritmu 4x rychlejší než brutal force.

Kryptosystém *Camellia*

publikován v letech 2000 – 2001, doporučen v rámci výzvy NESSIE a japonské CRYPTREK

Feistelova síť, blok o velikosti 128 bitů, klíč 128, 192, 256 bitů

18 kol šifrování s vloženou zvláštní funkční fází po 6 a 12 kole a randomizační XOR operací před prvním a po posledním kole

Šifrování:

randomizace: $P(kw_1, kw_2) = L_0 R_0$

následuje 18 kol šifrování pro 128 bitový klíč, resp. 24 pro ostatní velikosti klíče:

pro $r = 1, \dots, 5, 7, \dots, 11, 13, \dots, 18$ resp. $r = 1, \dots, 5, 7, \dots, 11, 13, \dots, 17, 19, \dots, 24$

$$L_r = R_{r-1} F(L_{r-1}, k_r)$$

$$R_r = L_{r-1}$$

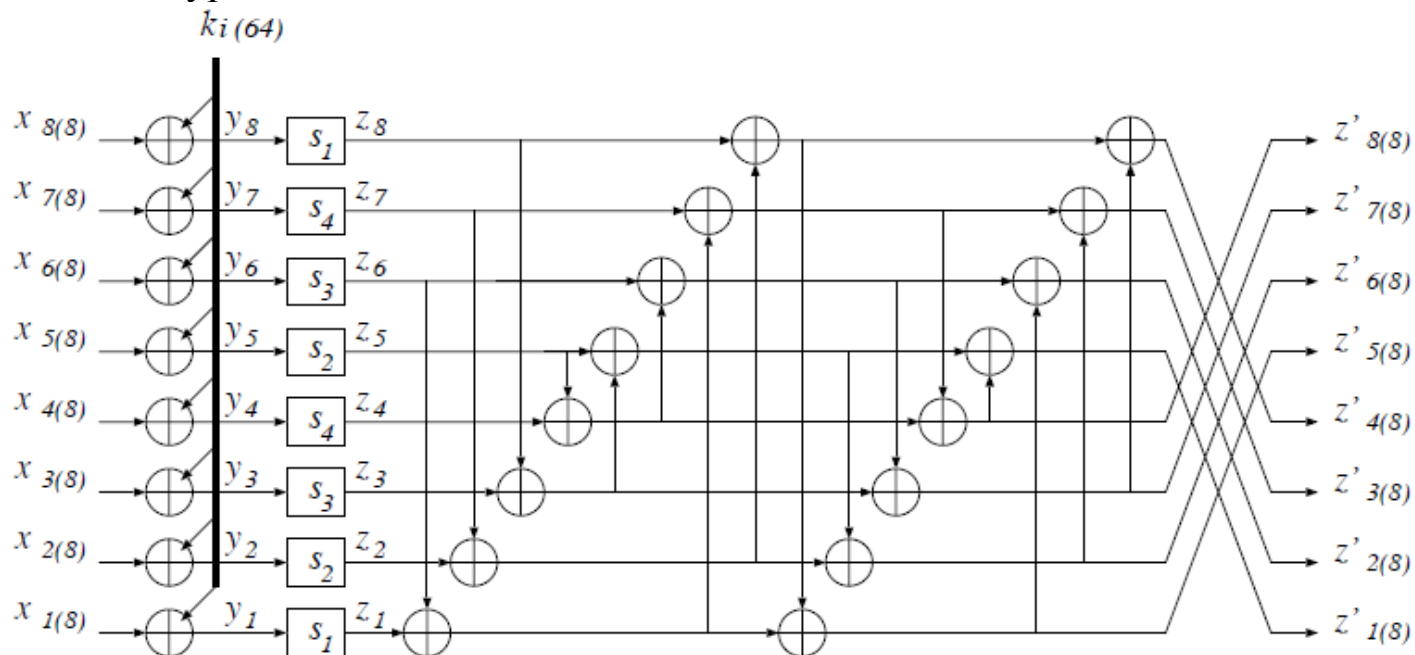
pro $r = 6$ a 12 , resp. $r = 6, 12$ a 18

$$\begin{aligned}
 L'_r &= R_{r-1} F(L_{r-1}, k_r) \\
 R'_{rr} &= L_{r-1} \\
 L_r^\square &= FL(L'_r, kl_{2r/6-1}) \\
 R_r^\square &= FL^{-1}(R'_r, kl_{2r/6})
 \end{aligned}$$

a na závěr ještě jednou randomizace

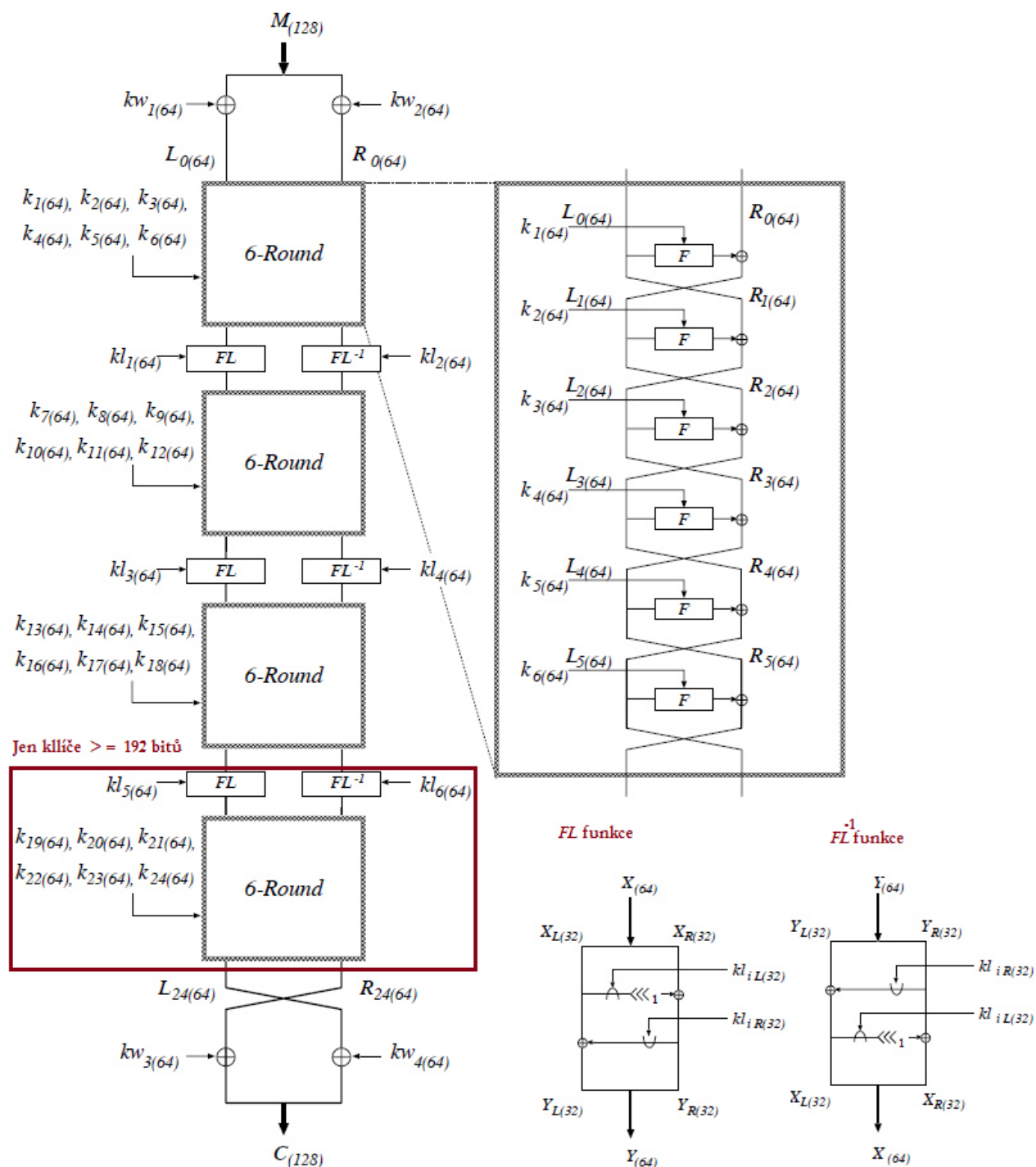
$$C = (R_{18} \ L_{18}) (kw_3 \ kw_4)$$

F funkce vypadá následovně:



Nejprve se realizuje XOR s klíčem na kolo, následuje 8 paralelně aplikovaných 8-bitových S-boxů a dále promíchání jednotlivých bitů pomocí XOR a permutace S-boxy jsou statické, definovány algebraicky

Celý algoritmus:



Dešifrování:

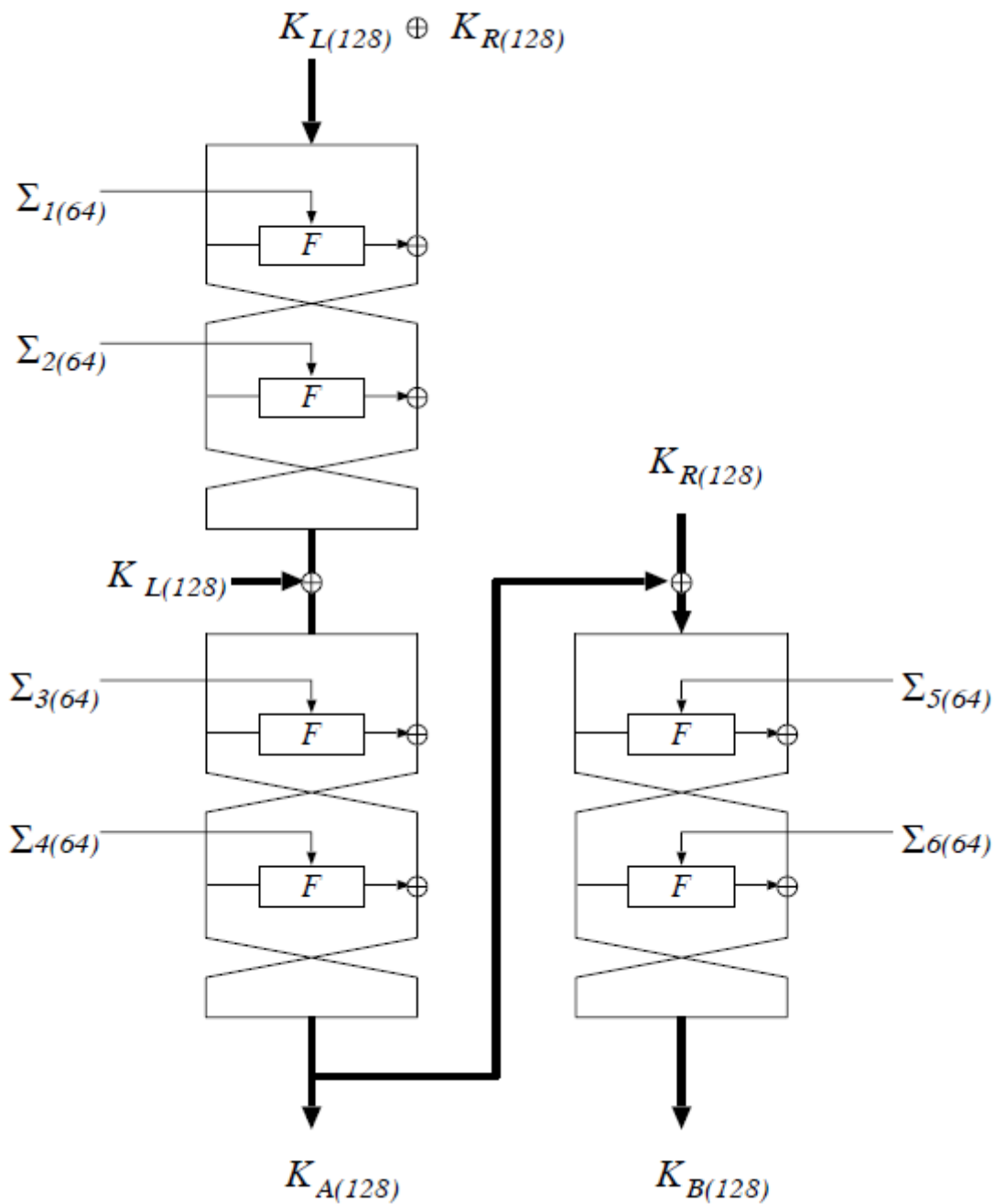
Stejný algoritmus, klíče na kolo se berou v opačném pořadí

Expanze klíče

klíč K se vkopíruje do proměnných K_L a K_R takto:

- 128 bitů - $K_L = K$, $K_R = 0$
- 192 bitů - $K_L = K$, $K_{RL} = K_{(129-192)}$, $K_{LL} = \overline{K_{RL}}$

- 256 bitů - $K_L = K_{(1-128)}$, $K_R = K_{(129-256)}$

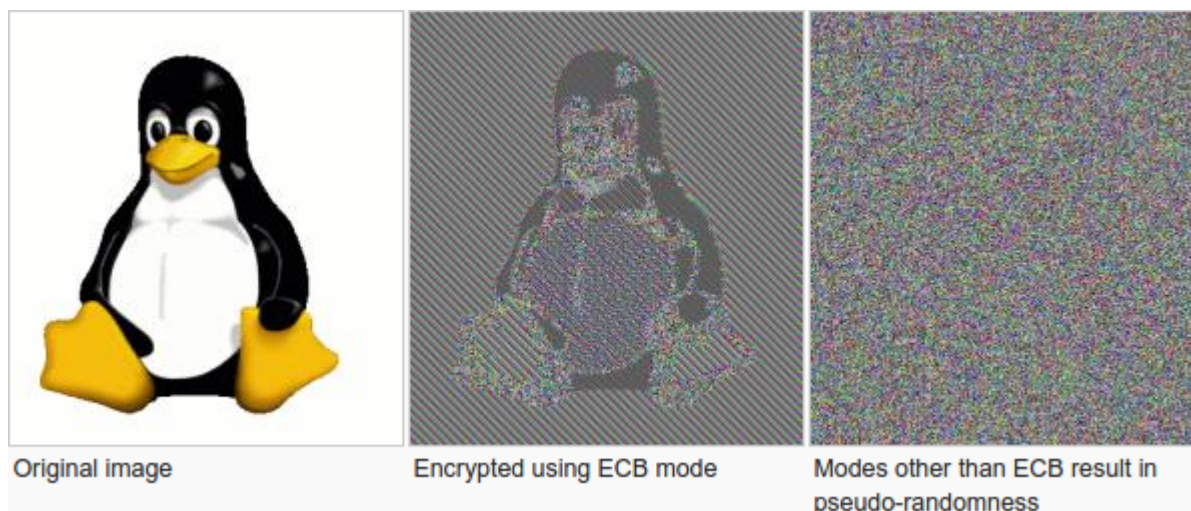


Analýza

Aktuálně se jedná o relativně nový algoritmus s pozitivním hodnocením bezpečnosti, ovšem ani zdaleka neprošla takovou mírou analýzy, jako AES.

Režimy činnosti blokových šifer

Když se to udělá nesprávně:



1. *ECB* (electronic code book) - pouze šifrování klíčů, nutný padding

$$C = \mathbf{E}(K, P)$$

2. *CBC* (cipher block chaining) - vhodný pro šifrování zpráv, nutný IV a padding

$$C_n = \mathbf{E}(K, P_n \mathbf{xor} C_{n-1})$$

3. *CFB* (cipher feed back) - pro šifrování podobné proudovým šifrám, nutný IV

$$C_n = P_n \mathbf{xor} \mathbf{E}(K, \mathbf{shl}(Reg, k) + \mathbf{left}(C_{n-1}, k))$$

4. *OFB* (output feed back) - pro aplikace, kdy je třeba eliminovat šíření přenosových chyb, vysokokapacitní spoje s velkou redundancí (řeč, video), nutný IV

$$H_n = \mathbf{E}(K, \mathbf{shl}(Reg, k) + \mathbf{left}(H_{n-1}, k))$$

$$C_n = P_n \mathbf{xor} H_n$$

5. *CTR* (counter) – vytváří se klíčová posloupnost šifrováním obsahu inkrementovaného čítače, nutný IV (počáteční hodnota counteru)

$$H_n = i$$

$$C_n = H_n \otimes P_n$$

6. *ESSIV* (Encrypted salt-sector initialization vector) – šifrování disků, jde o CBC s IV generovaným na základě čísla sektoru:

$$IV(Num) = [SecNum]_S$$

$$S = \langle K \rangle$$

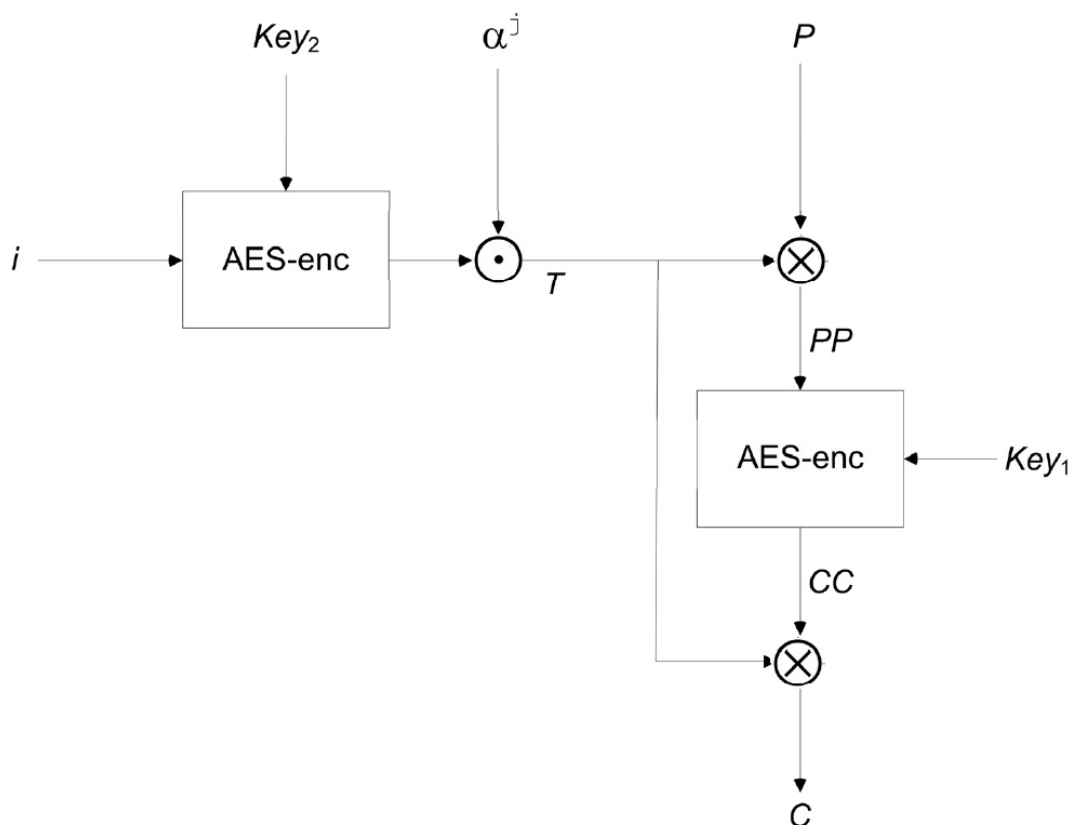
7. *XEX* (XOR Encryption XOR) – šifrování disků,

$$X = [SecNum]_K \otimes \alpha^{BlockNum}$$

$$C = [P \otimes X]_K \otimes X$$

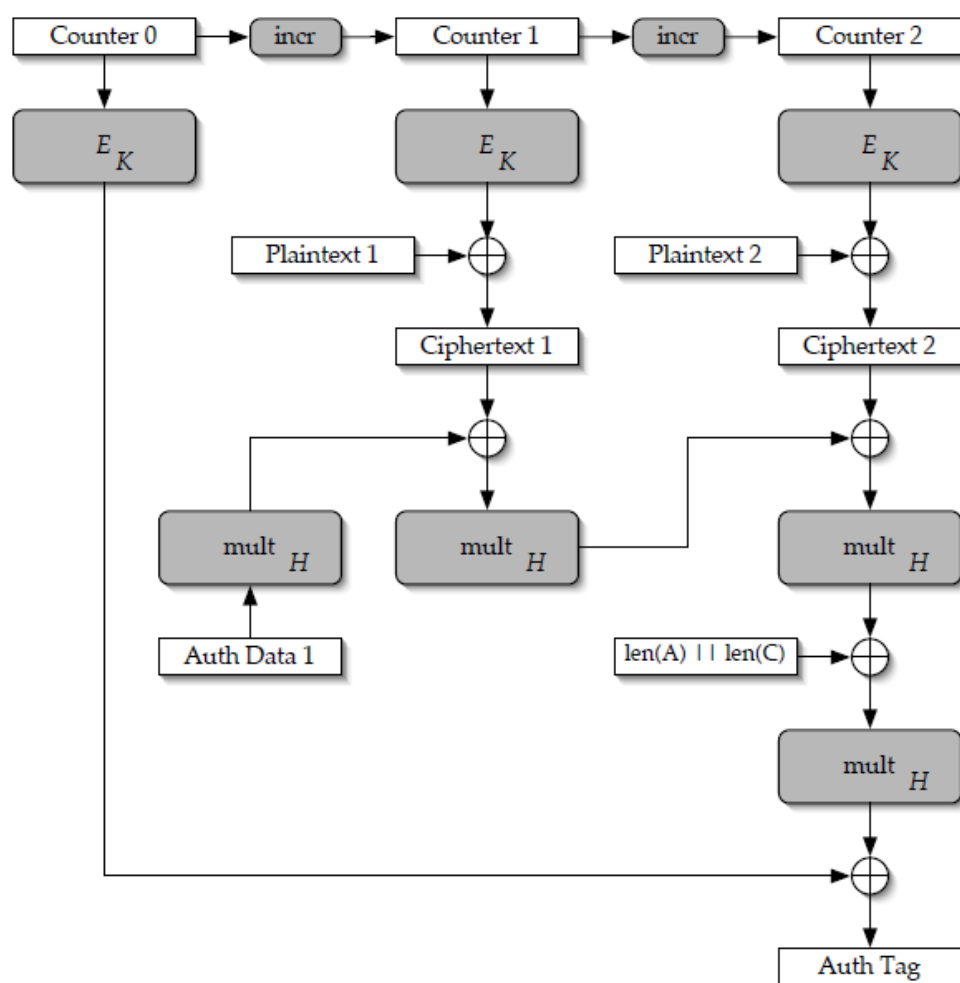
(α je primitivní prvek tělesa 2^{128} vůči zvolenému polynomu, zpravidla 2)

8. *XTS(AES)* mód – v podstatě instance předchozího módu, standardizováno NIST pro šifrování blokových zařízení s přímým přístupem (následně i neblokových), tedy data in rest šifrování



Zde i je index sektoru, j index bloku v rámci sektoru, α je ... dvojka (binárně).

9. GCM – galoisúv counter mód



režimů šifer bylo postupem času definováno mnoho dalších:

PCBC – propagovaný CBC

SIV – synthetic initialization vector

a mnoho dalších založených na kombinaci šifrování a přidruženého výpočtu autentizačních dat, případně určených ke specifickým účelům

CCM -counter with cipher block chaining

CWM -Carter-Wegman counter mode

...

Proudové šifry

zpracovávají otevřený text po jednotlivých bajtech

Kryptosystém *RC4 (arcfour)*

proudová šifra od R. Rivesta, velmi jednoduchý a rychlý algoritmus
používá stavové pole S velikosti 256 bajtů (a ještě jedno pro inicializaci klíče) a dva čítače

Inicializace

pole S naplníme čísly 0 – 255 ($S[0] = 0, S[1] = 1, \dots$)
pomocné pole $S2$ naplníme klíčem $S[i] = \text{key}[i \bmod \text{keylen}]$
zamícháme pole S :

```
j = 0;
for (i = 0; i < 256; i++) {
    j += S[i] + S2[i] mod 256;
    S[i] ↔ S[j];
}
```

pole $S2$ a proměnné i, j smažeme

Šifrování

```
i = i + 1 mod 256;
j = j + S[i] mod 256;
S[i] ↔ S[j];
output S[ S[i] + S[j] mod 256];
```

output se míchá s plaintextem pomocí XOR

Analýza

Nedostatkem špatné statistické vlastnosti prvních cca 100 bajtů výstupu
po roce 2012 byly publikovány nové statistické chyby prvních 256 bajtů výstupu,
pokud útočným může realizovat šifrování zprávy řádově desítkami milionů různých
klíčů, lze zjistit některé bajty původního plaintextu. Následně platilo doporučení
„odtočit“ alespon 3KB úvodní klíčové sekvence, v současné době není považován
za bezpečný.

Systém *Fish*

proudová šifra založená na Fibonacciho generátoru pseudonáhodných čísel

Vypouštějící generátory (*shrinking generators*)

předp. dva generátory pseudonáhodných čísel A a S .

A generuje posloupnost $a_0, a_1, \dots$ prvků $GF(2)^{n_A}$,

S obdobně posloupnost $s_0, s_1, \dots$ prvků $GF(2)^{n_S}$

dále budeme používat funkci $\mathbf{d}$: $GF(2)^{n_S} \rightarrow GF(2)$

Vypouštějící procedura ponechá k dalšímu zpracování prvky a_i a s_i pokud

$$\mathbf{d}(s_i) = 1$$

aplikací vypouštěcí procedury získáme posloupnosti $z_0, z_1, \dots$ z $a_0, a_1, \dots$, resp. $h_0, h_1, \dots$ z $s_0, s_1, \dots$

Popis algoritmu Fish

zvolíme n_A, n_S rovno 32

jako A i S budeme používat uzavřený Fibonacciho generátor

$$a_i = a_{i-55} + a_{i-24} \pmod{2^{32}}$$

$$s_i = s_{i-32} + s_{i-19} \pmod{2^{32}}$$

Samozřejmě prvky $a_{-55}, a_{-54}, \dots, a_{-1}$ musí být vhodným způsobem odvozeny z klíče. Obdobně pro posloupnost s_i .

Funkce $\mathbf{d}$ mapuje 32-bitový vektor na jeho nejméně význačný bit.

Není bezpečné používat k šifrování přímo posloupnost $z_0, z_1, \dots$:

s pravděpodobností 1/8 totiž trojice a_i, a_{i-55}, a_{i-24} projde celá do posloupnosti $\{z_i\}$

rozdělíme posloupnost $z_0, z_1, \dots$ na páry (z_{2i}, z_{2i+1}) , $h_0, h_1, \dots$ na páry (h_{2i}, h_{2i+1}) a vypočítáme výsledné hodnoty r_{2i}, r_{2i+1} :

$$c_{2i} = z_{2i} \oplus (h_{2i} \wedge h_{2i+1})$$

$$d_{2i} = h_{2i+1} \wedge (c_{2i} \oplus z_{2i+1})$$

$$r_{2i} = c_{2i} \oplus d_{2i}$$

$$r_{2i+1} = z_{2i+1} \oplus d_{2i}$$

Jako tradičně $\oplus$ značí **xor**, $\wedge$ označuje bitové **and**.

Protože h_{2i} , h_{2i+1} mají nejnižší bit jedničkový, je vhodné nastavovat nejnižší bit z_{2i} , z_{2i+1} v závislosti na hodnotě r_{2i} , r_{2i+1} .

Šifrování se provádí např. xorováním výsledné posloupnosti s otevřeným textem.

Analýza

Algoritmus byl publikován koncem roku 1993, nebyl nikdy šířeji používán, Algoritmus je náchylný na known-plaintext-attack – k prolomení stačí řádově tisíce bitů plaintextu

Trivium

Navržena jako model maximálního zjednodušení streamových šifer
Standard číslo ISO/IEC 29192-3.

v podstatě jde o kombinaci tří posuvných registrů

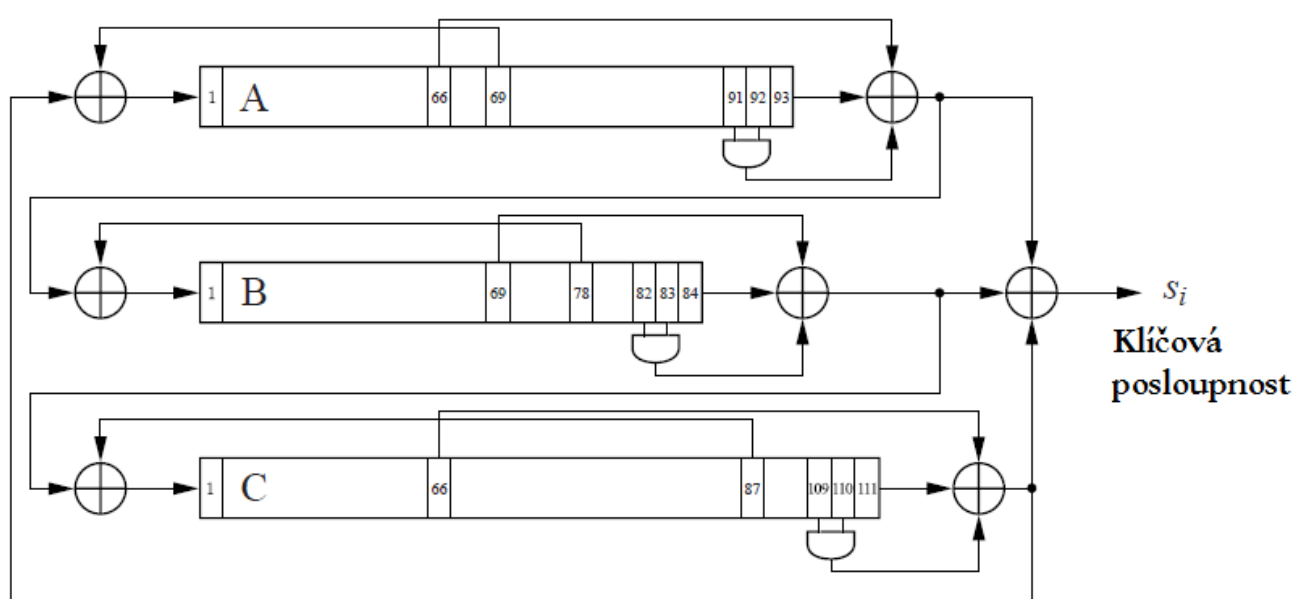
80 bitový klíč, 80 bitový inicializační vektor, vnitřní stav o velikosti 288 bitů

Šifrování

obnova vnitřního stavu

- $a_i = c_{i-66} \oplus c_{i-111} \oplus c_{i-110} \wedge c_{i-109} \oplus a_{i-69}$
- $b_i = a_{i-66} \oplus a_{i-93} \oplus a_{i-92} \wedge a_{i-91} \oplus b_{i-78}$
- $c_i = b_{i-69} \oplus b_{i-84} \oplus b_{i-83} \wedge b_{i-82} \oplus c_{i-87}$

... pozor, toto jsou *bitové* operace



výstupní posloupnost

$r_0 \dots r_{2^{64}-1}$ je generována

$$\bullet \quad r_i = c_{i-66} \oplus c_{i-111} \oplus a_{i-66} \oplus a_{i-93} \oplus b_{i-69} \oplus b_{i-84}$$

inicializace klíčem

0-ti bitový klíč $k_0 \dots k_{79}$ a l -bitový IV $v_0 \dots v_{l-1}$ (where $0 \leq l \leq 80$), se použijí takto:

- $(a_{-1245} \dots a_{-1153}) = (0, 0 \dots 0, k_0 \dots k_{79})$
- $(b_{-1236} \dots b_{-1153}) = (0, 0 \dots 0, v_0 \dots v_{l-1})$
- $(c_{-1263} \dots c_{-1153}) = (1, 1, 1, 0, 0 \dots 0)$

a spočítá se 1152 inicializačních iterací

I zde $\oplus$ značí **xor**, $\wedge$ označuje bitové **and**.

Dešifrování

:-)

Analýza

v roce 2014 publikována adaptace Cube Attack proti redukované verzi algoritmu s pouze 735 kroky inicializace a složitostí 2^{30} iterací, ne-náhodnost detekovatelná až do 885 kroků inicializace

dosud nejlepší útok na neredukovanou verzi algoritmu Maximov-Biryukov asymptoticky 2^{84}

dosud bezpečný, ale s malou rezervou

Snow3G

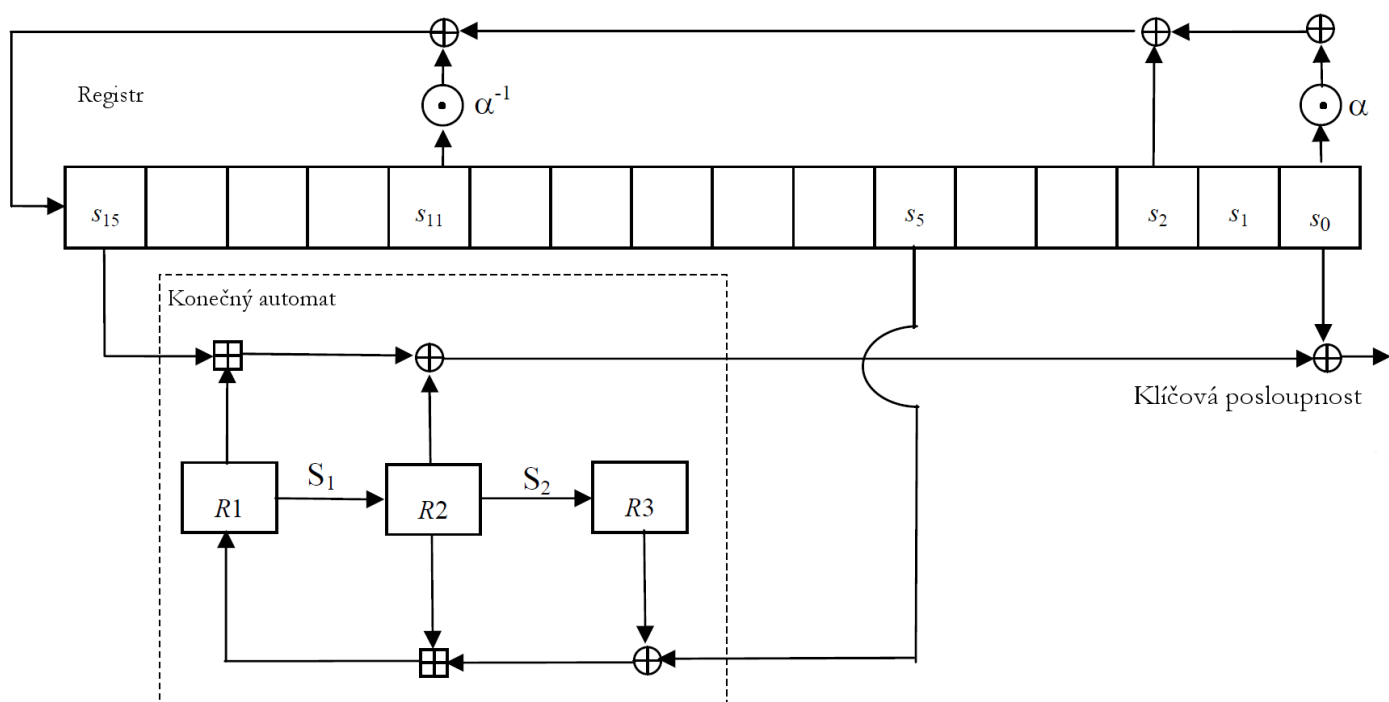
Symetrická streamová šifra – kombinace lineárního posuvného registru se zpětnou vazbou a konečného automatu

128 bitů klíče, výstupem posloupnost 32bitových slov

posuvný registr má 16 pozic pro 32bitová slova (posun celých slov), tagovací sekvence daná primitivním polynomem nad 2^{32}

$$f(x) = \alpha x^{16} + x^{14} + \alpha^{-1} x^5 + 1$$

konečný automat 3 32bitové registry svázané dvěma s-boxy a kombinací XORu a sčítání mod 2^{32}



Funkce MULx

mapuje 16 bitů vstupu $V|c$ (po osmi bitech) na 8 bitů výstupu pokud je nejvyšší bit V 1:

$$\text{MULx}(V, c) = (V \ll 1) \otimes c$$

jinak

$$\text{MULx}(V, c) = V \ll 1$$

kde $\ll$ je posun v osmibitovém registru

S-box S1

mapuje 32bitový vstup $w_0|w_1|w_2|w_3$ na 32bitový výstup $r_0|r_1|r_2|r_3$ interně využívá s-box $S_R()$ z algoritmu Rijndael (staticky definovaný)

$$\begin{aligned} r_0 &= \text{MULx}(S_R(w_0), 0x1B) \oplus S_R(w_1) \oplus S_R(w_2) \oplus \text{MULx}(S_R(w_3), 0x1B) \oplus S_R(w_3), \\ r_1 &= \text{MULx}(S_R(w_0), 0x1B) \oplus S_R(w_0) \oplus \text{MULx}(S_R(w_1), 0x1B) \oplus S_R(w_2) \oplus S_R(w_3), \\ r_2 &= S_R(w_0) \oplus \text{MULx}(S_R(w_1), 0x1B) \oplus S_R(w_1) \oplus \text{MULx}(S_R(w_2), 0x1B) \oplus S_R(w_3), \\ r_3 &= S_R(w_0) \oplus S_R(w_1) \oplus \text{MULx}(S_R(w_2), 0x1B) \oplus S_R(w_2) \oplus \text{MULx}(S_R(w_3), 0x1B). \end{aligned}$$

S-box S2

mapuje 32bitový vstup $w_0|w_1|w_2|w_3$ na 32bitový výstup $r_0|r_1|r_2|r_3$ interně využívá s-box $S_Q()$... opět staticky definovaný S-box 8x8

$$\begin{aligned}
r_0 &= \text{MULx}(S_Q(w_0), 0x69) \oplus S_Q(w_1) \oplus S_Q(w_2) \oplus \text{MULx}(S_Q(w_3), 0x69) \oplus S_Q(w_3), \\
r_1 &= \text{MULx}(S_Q(w_0), 0x69) \oplus S_Q(w_0) \oplus \text{MULx}(S_Q(w_1), 0x69) \oplus S_Q(w_2) \oplus S_Q(w_3), \\
r_2 &= S_Q(w_0) \oplus \text{MULx}(S_Q(w_1), 0x69) \oplus S_Q(w_1) \oplus \text{MULx}(S_Q(w_2), 0x69) \oplus S_Q(w_3), \\
r_3 &= S_Q(w_0) \oplus S_Q(w_1) \oplus \text{MULx}(S_Q(w_2), 0x69) \oplus S_Q(w_2) \oplus \text{MULx}(S_Q(w_3), 0x69).
\end{aligned}$$

Generování klíčové posloupnosti

Krokování registru

rozdělíme slovo s_0 na $s_{0,0} \parallel s_{0,1} \parallel s_{0,2} \parallel s_{0,3}$

spočteme

$$v = (s_{0,1} \parallel s_{0,2} \parallel s_{0,3} \parallel 0x00) _ \text{MUL_}(s_{0,0}) _ s_2 _ (0x00 \parallel s_{11,0} \parallel s_{11,1} \parallel s_{11,2}) _ \text{DIV_}(s_{11,3}).$$

posuneme slova doleva a za s_0 vložíme v

Krokování automatu

vstupem automatu jsou slova s_5 a s_{15} registru

automat vygeneruje 32 bitů výstupu viz obrázek

Generování

1 krok automatu, výstup se zahodí

1 krok registru

následně se generuje n slov klíčové posloupnosti takto:

1 krom automatu ... vygeneruje 1 slovo výstupu

výstup automatu XOR s_0 dává slovo klíčové posloupnosti

1 krok registru v módu generování posloupnosti

Inicializace

inicializace 128 bity klíče ve čtyřech slovech k_0, k_1, k_2, k_3 a 128 bity IV ve čtyřech IV_0, IV_1, IV_2, IV_3

ty se zapíší do registru takto:

$$s_{15} = k_3 \otimes IV_0 \quad s_{14} = k_2 \quad s_{13} = k_1 \quad s_{12} = k_0 \otimes IV_1$$

$$s_{11} = k_3 \otimes 1 \quad s_{10} = k_2 \otimes 1 \otimes IV_2 \quad s_9 = k_1 \otimes 1 \otimes IV_3 \quad s_8 = k_0 \otimes 1$$

$$s_7 = k_3 \quad s_6 = k_2 \quad s_5 = k_1 \quad s_4 = k_0$$

$$s_3 = k_3 \otimes 1 \quad s_2 = k_2 \otimes 1 \quad s_1 = k_1 \otimes 1 \quad s_0 = k_0 \otimes 1$$

automat se inicializuje $R_1 = R_2 = R_3 = 0$.

... a provede se 32 kol

- 1 krok automatu
- 1 krok registru v inicializačním módu, výstup automatu se zpracovává jako F

Krokování registru

Stejně, jako při generování posloupnosti, jen se navíc „konzumuje“ výstup F automatu:

$$v = (s_{0,1} \mid s_{0,2} \mid s_{0,3} \mid 0x00) \otimes \text{MUL}_\alpha(s_{0,0}) \otimes s_2 \otimes (0x00 \mid s_{11,0} \mid s_{11,1} \mid s_{11,2}) \otimes \text{DIV}_\alpha(s_{11,3}) \otimes F.$$

A ještě co znamenají pomocné funkce:

Funkci MUL_xPOW lze chápat jako mocninu

Pokud je $i = 0$

$$\text{MUL}_x\text{POW}(V, i, c) = V,$$

jinak

$$\text{MUL}_x\text{POW}(V, i, c) = \text{MUL}_x(\text{MUL}_x\text{POW}(V, i - 1, c), c).$$

...tzn. iteruje funkci MUL_x nad vstupem

$$\text{MUL}_\alpha(c) =$$

$$(\text{MUL}_x\text{POW}(c, 23, 0xA9) \mid \text{MUL}_x\text{POW}(c, 245, 0xA9) \mid \text{MUL}_x\text{POW}(c, 48, 0xA9) \mid \text{MUL}_x\text{POW}(c, 239, 0xA9)).$$

$$\text{DIV}_\alpha(c) =$$

$$(\text{MUL}_x\text{POW}(c, 16, 0xA9) \mid \text{MUL}_x\text{POW}(c, 39, 0xA9) \mid \text{MUL}_x\text{POW}(c, 6, 0xA9) \mid \text{MUL}_x\text{POW}(c, 64, 0xA9)).$$

obě mapují 8 bitový vstup c na 32 bitů výstupu

Salsa20

Streamová šifra, klíč k 16 – 32 bajtů, 8 bajtů nonce n

Používá operace XOR ($\otimes$), sčítání mod 32 (+) a pevné rotace ($\lll$)

V zásadě se jedná o hashovací funkci v counter modu

Šifrování

Stav šifry si nejlépe představit jako 4 x 4 matici 32-bitových slov

x_0	x_1	x_2	x_3
x_4	x_5	x_6	x_7
x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}

Základní primitivou je operace **quarterround**, tj modifikace jednoho řádku stavové matice:

pro $x=(x_0;x_1;x_2;x_3)$

quarterround(x)= $(z_0;z_1;z_2;z_3)$ kde

$$z_1 = x_1 \otimes ((x_0 + x_3) \lll 7);$$

$$z_2 = x_2 \otimes ((z_1 + x_0) \lll 9);$$

$$z_3 = x_3 \otimes ((z_2 + z_1) \lll 13);$$

$$z_0 = x_0 \otimes ((z_3 + z_2) \lll 18)$$

Rowdown funkce není ničím jiným než paralelní aplikací quarterround funkce na vstup délky 16 slov:

Bud' $x=(x_0;x_1;x_2;x_3;\dots;x_{15})$

rowround(x) = $(z_0;z_1;z_2;z_3;\dots;z_{15})$ kde

$$(z_0;z_1;z_2;z_3) = \mathbf{quarterround}(x_0;x_1;x_2;x_3)$$

$$(z_5;z_6;z_7;z_4) = \mathbf{quarterround}(x_5;x_6;x_7;x_4)$$

$$(z_{10};z_{11};z_8;z_9) = \mathbf{quarterround}(x_{10};x_{11};x_8;x_9)$$

$$(z_{15};z_{12};z_{13};z_{14}) = \mathbf{quarterround}(x_{15};x_{12};x_{13};x_{14})$$

Hashovací funkce Salsa

$$\mathbf{Salsa20}(x) = x + \mathbf{rowround}^{20}(x)$$

... tedy 20 iterací funkce rowround(), přičemž mezi každou iterací dojde k transpozici stavové matice

provádí transformaci 64bajtového vstupu na 64bajtový výstup

A teď konečně šifrování:
mějme

- Klíč k o délce 32 bajtů se rozdělený na poloviny k_0, k_1 ,
- n je 8-bajtová nonce náhodně volená pro každou zprávu (např id zprávy)
- t_0, t_1, t_2, t_3 jsou pevně definované sekvence.
- i je pořadové číslo bloku (counter)

i -tý blok plaintextu m_i se zašifruje

$$c_i = \text{Salsa20}(t_0; k_0; t_1; n; i; t_2; k_1; t_3) \otimes m_i$$

... s tím, že pro šifrování posledního bloku zprávy se použije pouze tolik bajtů klíčové posloupnosti, kolik je třeba. Pro klíč délky 16 bajtů se položí $k_0 = k_1$

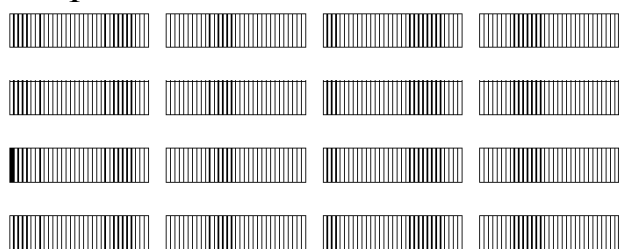
*Pozn.: rozumné implementace neztrácejí čas transpozicí stavové matice a namísto toho realizují 10 „dvoukol“ které se skládají z operace **rowround** a její transponované verze – operace **rowcolumn***

Analýza

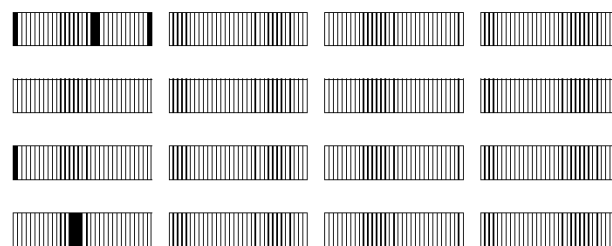
Algoritmus je v současné době považován za bezpečný, stal se vítězem výzvy eSTREAM v roce 2005, IETF zvažuje jeho standardizaci pro TLS a další použití dosud nejrychlejší útok proti algoritmu s 128 bitovým klíčem má složitost 2^{109} 2013 ověřeno, že algoritmus omezený na 15 kol alespoň 128 bitovým klíčem odolný proti diferenciální kryptoanalýze

Pro zajímavost: šíření změny jediného bitu stavem algoritmu v průběhu výpočtu:

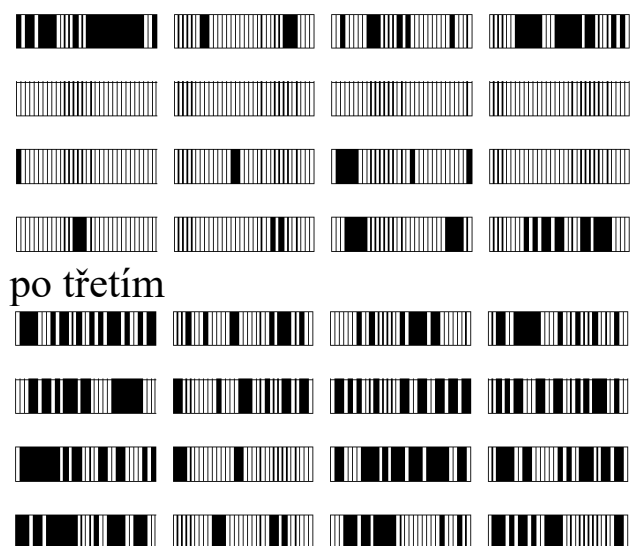
vstupní difference



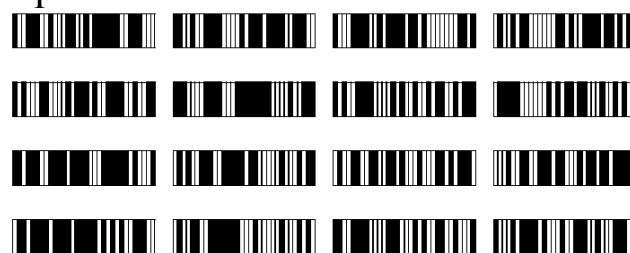
po prvním kole



po druhém kole



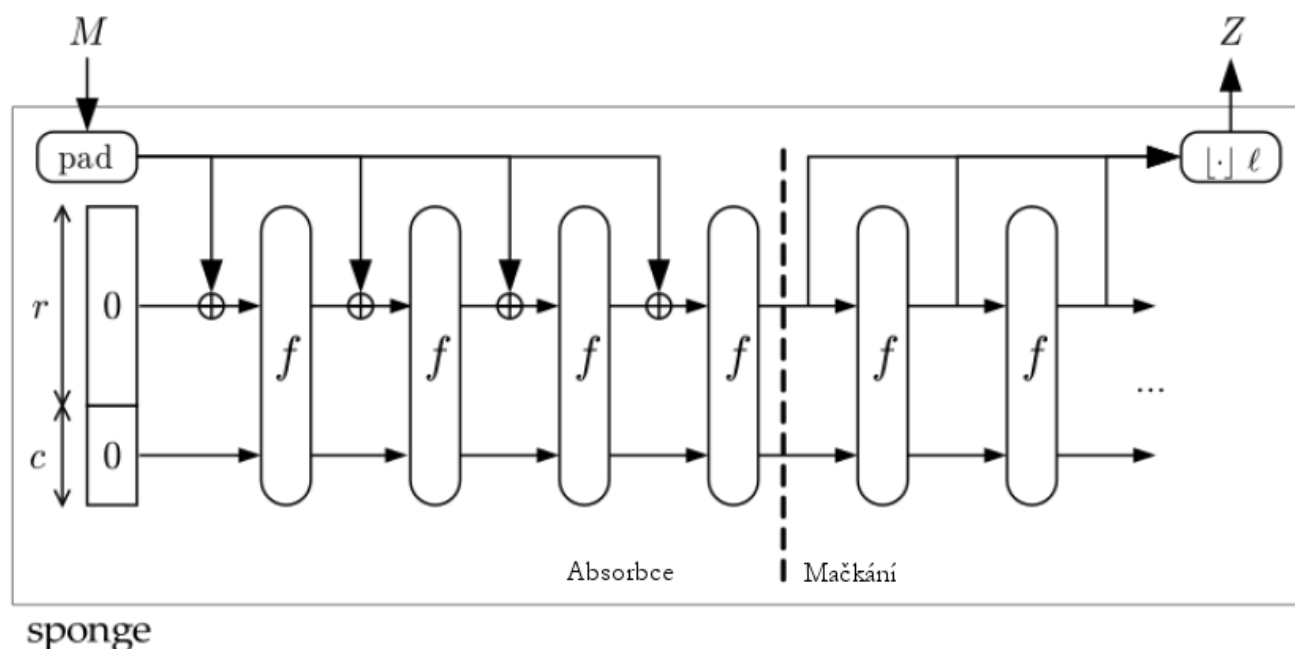
a po čtvrtém



do konce zbývá ještě 16 kol!

Keccak, Keyak – kryptografické houby (sponge)

Keyak - symetrický kryptografický algoritmus zajišťující zároveň šifrování a autentizaci zprávy (aktuálně kandidát na nový authenticated encryption standard) založen na principu struktury sponge:



Vnitřní stav rozdělen na část c – capacity a r – rate

Inicializace stavu konstantním vektorem dle aplikace (zpravidla 0)

Ve fázi absorbce se iterativně přimíchávají (XOR) bloky vstupní zprávy zarovnané na násobek r – po každém bloku dojde k promíchání vnitřního stavu funkcí f

Po zpracování se provádí „mačkání (squeezing)“ – v každém kroku je promíchán vnitřní stav a výstupem je část r vnitřního stavu.

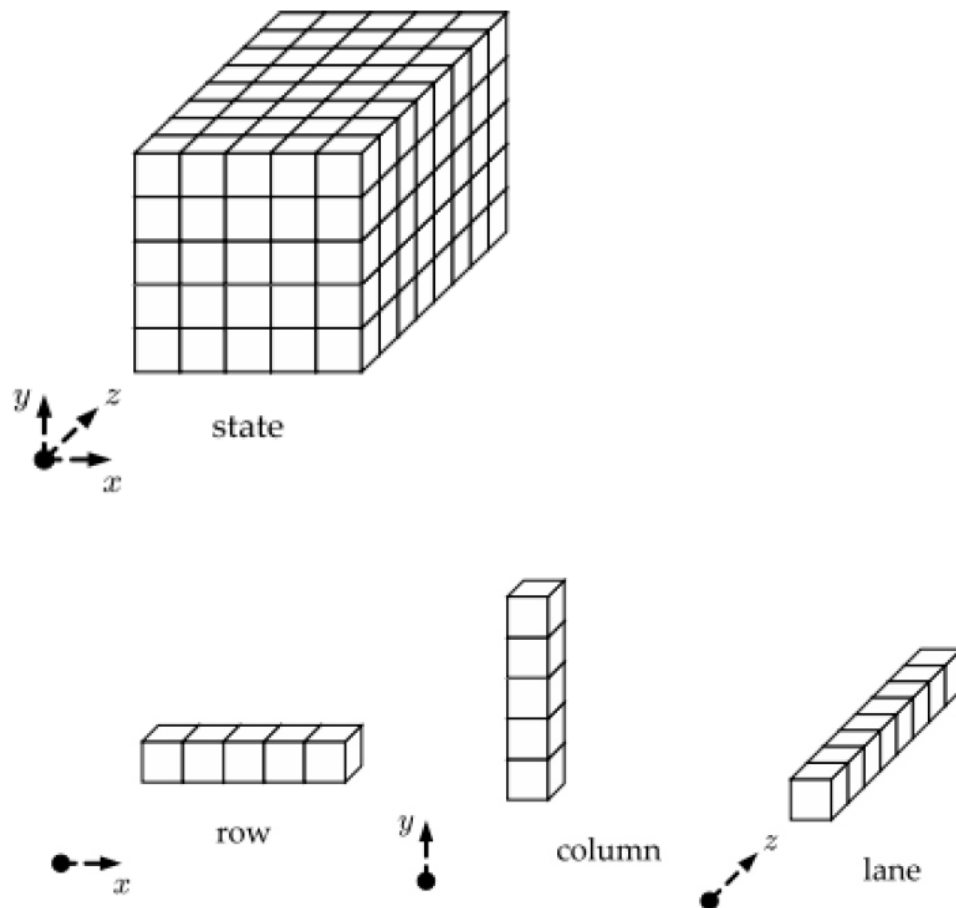
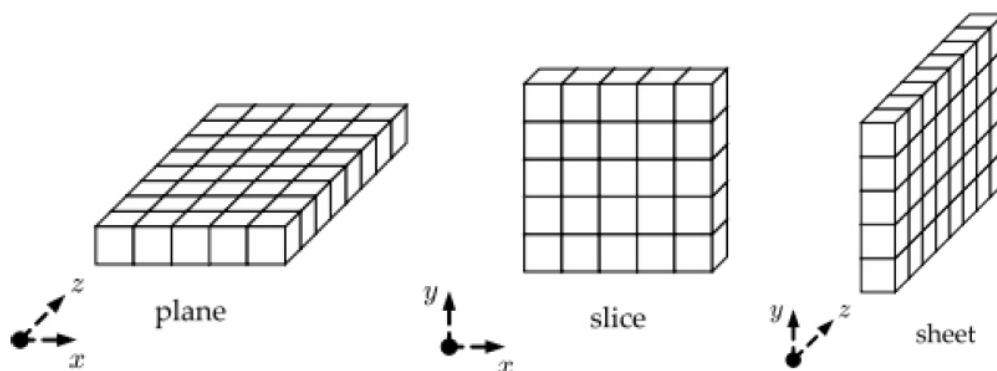


Fig. 6b: *Keccak_f state row, column and lane* [21]



```

Round[b](A, RC):
  //θ-step for bit diffusion
  for  $x \in \{0, \dots, 4\}$ :
     $C[x] = A[x,0] \text{ xor } A[x,1] \text{ xor } A[x,2] \text{ xor } A[x,3] \text{ xor } A[x,4]$ 

  for  $x \in \{0, \dots, 4\}$ :
     $D[x] = C[x-1] \text{ xor } \text{rot}(C[x+1], 1)$ 

  for  $(x, y) \in \{\{0, \dots, 4\} \times \{0, \dots, 4\}\}$ :
     $A[x,y] = A[x,y] \text{ xor } D[x]$ 

  //ρ-step for inter-slice diffusion and
  //π-step for disturbing  $x,y$  alignment through lane-transposition
  for  $(x, y) \in \{\{0, \dots, 4\} \times \{0, \dots, 4\}\}$ :
     $B[y, 2x + 3y] = \text{rot}(A[x,y], r[x,y])$ 

  //χ-step for non-linear mapping
  for  $(x, y) \in \{\{0, \dots, 4\} \times \{0, \dots, 4\}\}$ :
     $A[x,y] = B[x,y] \text{ xor } ((\text{not } B[x+1,y]) \text{ and } B[x+2,y])$ 

  //ι-step to break symmetry
   $A[0,0] = A[0,0] \text{ xor } RC$ 

  Return A

```

Fig. 6.8: Round function of the SIMECK cipher

Zde $A[x,y]$ znamená linku (lane) B, C, D jsou vnitřní pomocné proměnné

Table 1: The round constants $RC[i]$

$RC[0]$	0x0000000000000001	$RC[12]$	0x000000008000808B
$RC[1]$	0x0000000000008082	$RC[13]$	0x800000000000008B
$RC[2]$	0x800000000000808A	$RC[14]$	0x8000000000008089
$RC[3]$	0x8000000080008000	$RC[15]$	0x8000000000008003
$RC[4]$	0x000000000000808B	$RC[16]$	0x8000000000008002
$RC[5]$	0x0000000080000001	$RC[17]$	0x8000000000000080
$RC[6]$	0x8000000080008081	$RC[18]$	0x000000000000800A
$RC[7]$	0x8000000000008009	$RC[19]$	0x800000008000000A
$RC[8]$	0x000000000000008A	$RC[20]$	0x8000000080008081
$RC[9]$	0x0000000000000088	$RC[21]$	0x8000000000008080
$RC[10]$	0x0000000080008009	$RC[22]$	0x0000000080000001
$RC[11]$	0x000000008000000A	$RC[23]$	0x8000000080008008

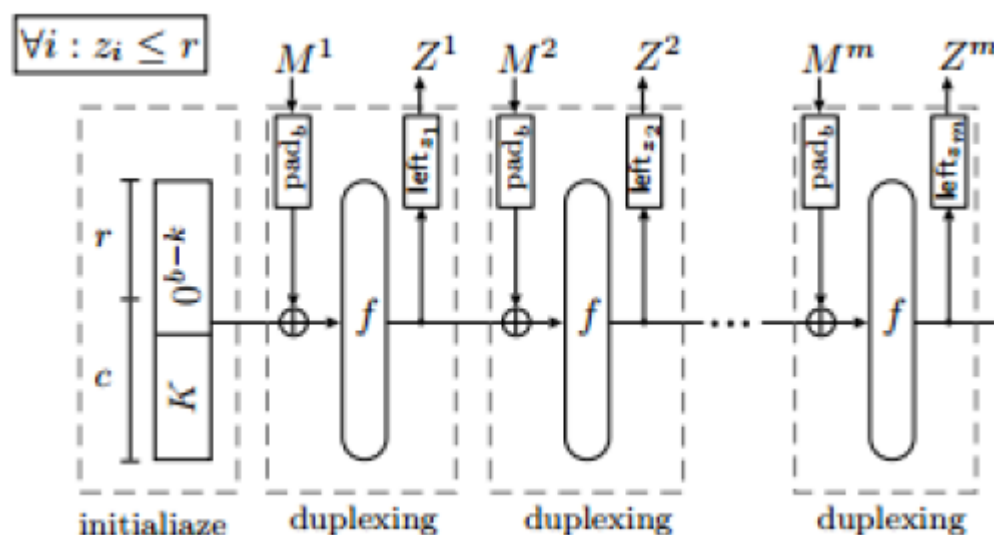
Table 2: the rotation offsets

	$x = 3$	$x = 4$	$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$
$y = 2$	25	39	3	10	43
$y = 1$	55	20	36	44	6
$y = 0$	28	27	0	1	62
$y = 4$	56	14	18	2	61
$y = 3$	21	8	41	45	15

Klíčem řízené sponge operace

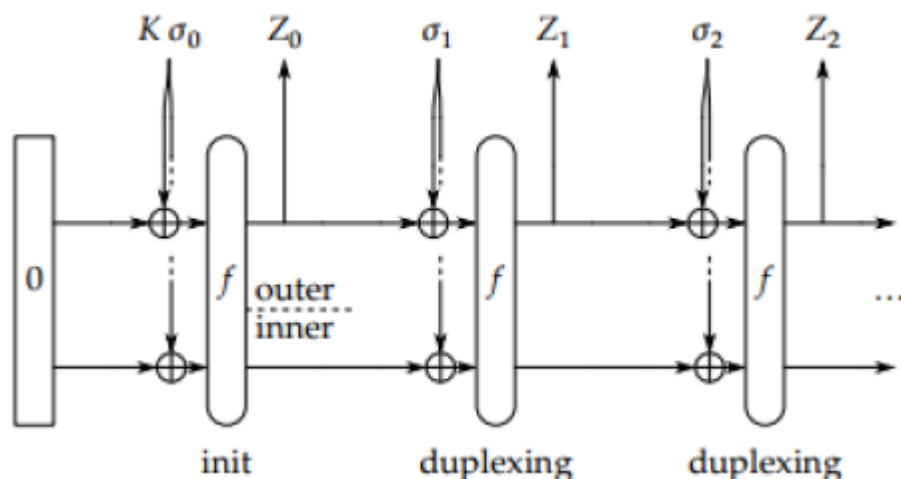
FDS (Full State Duplex Sponge)

Inicializace klíčem vloženým do „capacity“ části
následně duplexing s parciálním výstupem stavu



FSKD (Full State Keyed Duplexing)

inicializace nulovým vektorem, následně se vloží blok obsahující klíč (na „vnitřní straně“) a provede se jedno kolo stlačování (Squeeze)



Paralelizace výpočtu

paralelně běží n instancí Sponge struktury, do kterých se distribuuje výpočet nad vstupní zprávou, na konci se provede zřetězení autentizačních bloků na jednotlivými větvemi výpočtu a výpočet finálního autentizačního bloku