Analýza AES white-box schémat pomocí útoku postranním kanálem

Autor: Jakub Klemsa
Školitel: prof. RNDr. Václav Matyáš, M.Sc., Ph.D.

Katedra matematiky
FJFI, ČVUT

22. března 2016

1. Ingredience
   - Advanced Encryption Standard (AES)
   - Od black-box k white-box modelu
   - White-box AES (WBAES)
   - Útok postranním kanálem (SCA)
2. Útok na WBAES
   - Využití nástrojů SCA k útoku na WBAES
   - Nové terče
3. Výsledky
   - Reprodukce výsledků Bos et al.
   - Výsledky použití všech 255 terčů
   - Útok „naslepo“
4. Budoucí práce

Advanced Encryption Standard (AES)

Symetrická bloková šifra

- standard vydaný NIST [6, 2001]
- dodnes považována za bezpečnou

128-bitová varianta

- 10 rund, 4 elementární operace
- **mezivýsledky zranitelné**

Advanced Encryption Standard (AES)

Symetrická bloková šifra

- standard vydaný NIST [6, 2001]
- dodnes považována za bezpečnou

128-bitová varianta

- 10 rund, 4 elementární operace
- **mezivýsledky zranitelné**

Black-box model

Útočník má černou skříňku, která

- uchovává náhodný AES klíč,
- zašifruje vloženou zprávu,
- neunikne **žádná** další informace
  - mezivýsledky, doba šifrování, ...

Snaha útočníka: **získat klíč**

- uhodnutý klíč snadno ověří

Black-box model

Útočník má černou skříňku, která

- uchovává náhodný AES klíč,
- zašifruje vloženou zprávu,
- neunikne **žádná** další informace
  - mezivýsledky, doba šifrování, ...

Snaha útočníka: **získat klíč**

- uhodnutý klíč snadno ověří

Gray-box model

Blíže realitě

- z reálného hardwaru informace uniká
  - spotřeba energie, EM záření, ...

$\Rightarrow$ útok postranním kanálem (dále)

White-box model

Útočník vykonává šifrování

- vidí mezivýsledky,
- může měnit hodnoty, instrukce, ...
- klíč musí zůstat utajen

Pozorování

Odolnost k white-box $\Rightarrow$ odolnost ke gray-box.

White-box AES (WBAES)

Poprvé představeno Chow et al. [3, 2002]

- algebraický útok (Billet et al. [1, 2004])

Skrývá mezivýsledky

- plně tabulková implementace
- tabulky obklopené náhodnými bijekcemi
- vhodně se vyruší $\Rightarrow$ zachová funkcionalitu

White-box AES (WBAES)

Poprvé představeno Chow et al. [3, 2002]

- algebraický útok (Billet et al. [1, 2004])

Skrývá mezivýsledky

- plně tabulková implementace
- tabulky obklopené náhodnými bijekcemi
- vhodně se vyruší $\Rightarrow$ zachová funkcionalitu

Útok postranním kanálem (SCA) I

Kombinuje

- zranitelnost mezivýsledků
- únik informace v gray-box modelu (nazveme *stopa*)

Celá řada SCA

- přímé pozorování klíče (RSA)
- hádání klíče **po částech** a hledání náznaků mezivýsledků ve stopách

Útok postranním kanálem (SCA) I

Kombinuje

- zranitelnost mezivýsledků
- únik informace v gray-box modelu (nazveme *stopa*)

Celá řada SCA

- přímé pozorování klíče (RSA)
- hádání klíče **po částech** a hledání náznaků mezivýsledků ve stopách

Útok postranním kanálem (SCA) II

Příklad útoku proti AES

- prochází hodnoty *i*-tého bytu klíče
  - dělí stopy podle *j*-tého bitu očekávaného mezivýsledku
    - nazveme *terč* (máme jich 8)
    - liší se podle zprávy, 0 nebo 1
  - max. rozdíl středních hodnot $\sim$ správný klíč

Útok postranním kanálem (SCA) II

Příklad útoku proti AES

- prochází hodnoty *i*-tého bytu klíče
  - dělí stopy podle *j*-tého bitu očekávaného mezivýsledku
    - nazveme *terč* (máme jich 8)
    - liší se podle zprávy, 0 nebo 1
- max. rozdíl středních hodnot $\sim$ správný klíč

Útok postranním kanálem (SCA) II

Příklad útoku proti AES

- prochází hodnoty *i*-tého bytu klíče
  - dělí stopy podle *j*-tého bitu očekávaného mezivýsledku
    - nazveme *terč* (máme jich 8)
    - liší se podle zprávy, 0 nebo 1
- max. rozdíl středních hodnot $\sim$ správný klíč

Útok postranním kanálem (SCA) II

Příklad útoku proti AES

- prochází hodnoty *i*-tého bytu klíče
  - dělí stopy podle *j*-tého bitu očekávaného mezivýsledku
    - nazveme *terč* (máme jich 8)
    - liší se podle zprávy, 0 nebo 1
- max. rozdíl středních hodnot $\sim$ správný klíč

Využití nástrojů SCA k útoku na WBAES

Pozorování

Odolnost k white-box $\Rightarrow$ odolnost ke gray-box (tj. SCA).

Bos et al. [2, čvc. 2015]: SCA na white-box implementace

- zlomili všechny veřejně dostupné
- jen jedno tabulkové AES (Klinec [4])
  - není jasné, kudy informace uniká
- paměťové stopy
  - adresy čtení/zápisu
  - obsah paměti

Využití nástrojů SCA k útoku na WBAES

Pozorování

Odolnost k white-box $\Rightarrow$ odolnost ke gray-box (tj. SCA).

Bos et al. [2, čvc. 2015]: SCA na white-box implementace

- zlomili všechny veřejně dostupné
- jen jedno tabulkové AES (Klinec [4])
  - není jasné, kudy informace uniká
- paměťové stopy
  - adresy čtení/zápisu
  - obsah paměti

Využití nástrojů SCA k útoku na WBAES

Pozorování

Odolnost k white-box $\Rightarrow$ odolnost ke gray-box (tj. SCA).

Bos et al. [2, čvc. 2015]: SCA na white-box implementace

- zlomili všechny veřejně dostupné
- jen jedno tabulkové AES (Klinec [4])
  - není jasné, kudy informace uniká
- paměťové stopy
  - adresy čtení/zápisu
  - obsah paměti

Využití nástrojů SCA k útoku na WBAES

Pozorování

Odolnost k white-box ⇒ odolnost ke gray-box (tj. SCA).

Bos et al. [2, čvc. 2015]: SCA na white-box implementace

- zlomili všechny veřejně dostupné
- jen jedno tabulkové AES (Klinec [4])
  - není jasné, kudy informace uniká
- paměťové stopy
  - adresy čtení/zápisu
  - obsah paměti

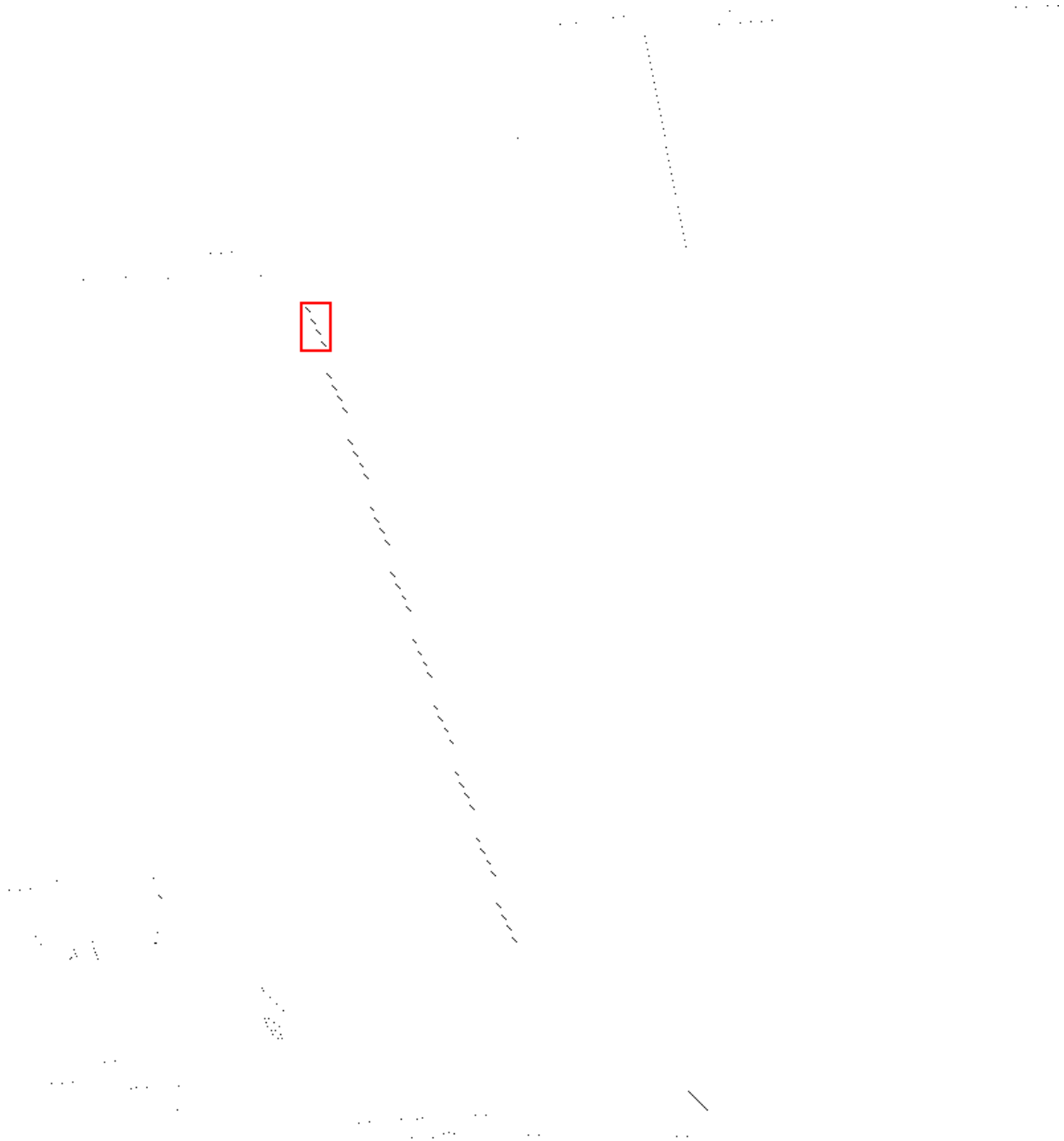
Využití nástrojů SCA k útoku na WBAES

Pozorování

Odolnost k white-box ⇒ odolnost ke gray-box (tj. SCA).

Bos et al. [2, čvc. 2015]: SCA na white-box implementace

- zlomili všechny veřejně dostupné
- jen jedno tabulkové AES (Klinec [4])
  - není jasné, kudy informace uniká
- paměťové stopy
  - adresy čtení/zápisu
  - obsah paměti



Obrázek : Paměťová stopa běhu AES (část). První runda vyznačena červeně.

Nové terče I

WBAES nerozliší, které tzv. *duální AES* je použito (Klinec [5, 2013])

- SBox – afinní zobrazení „inverze“ v GF(2^8)
- v duálním AES libovolné invertibilní afinní
- $S_{dual}(A) = p \cdot A' + q \mod x^8 + 1$
  - p nesoudělný s $x^8 + 1$

$\Rightarrow$ první nové terče (128 různých)

Nové terče I

WBAES nerozliší, které tzv. *duální AES* je použito (Klinec [5, 2013])

- SBox – afinní zobrazení „inverze“ v GF(2^8)
- v duálním AES libovolné invertibilní afinní
- $S_{dual}(A) = p \cdot A' + q \mod x^8 + 1$
  - p nesoudělný s $x^8 + 1$

$\Rightarrow$ první nové terče (128 různých)

Nové terče I

WBAES nerozliší, které tzv. *duální AES* je použito (Klinec [5, 2013])

- SBox – afinní zobrazení „inverze“ v GF(2^8)
- v duálním AES libovolné invertibilní afinní
- $S_{dual}(A) = p \cdot A' + q \mod x^8 + 1$
  - p nesoudělný s $x^8 + 1$

$\Rightarrow$ první nové terče (128 různých)

Nové terče I

WBAES nerozliší, které tzv. *duální AES* je použito (Klinec [5, 2013])

- SBox – afinní zobrazení „inverze“ v GF(2^8)
- v duálním AES libovolné invertibilní afinní
- $S_{dual}(A) = p \cdot A' + q \mod x^8 + 1$
  - p nesoudělný s $x^8 + 1$

$\Rightarrow$ první nové terče (128 různých)

Nové terče I

WBAES nerozliší, které tzv. *duální AES* je použito (Klinec [5, 2013])

- SBox – afinní zobrazení „inverze“ v GF(2^8)
- v duálním AES libovolné invertibilní afinní
- $S_{dual}(A) = p \cdot A' + q \mod x^8 + 1$
  - p nesoudělný s $x^8 + 1$

$\Rightarrow$ první nové terče (128 různých)

Nové terče II

Maticový zápis násobení mod $x^8 + 1$

- cyklicky rotované řádky
- lichý počet jedniček (invertibilita)
- terč $\sim$ skalární součin řádku matice a A'

SBox následován náhodným lin. zobrazením

- použiju i řádky se sudým počtem jedniček

$\Rightarrow$ další nové terče (127, bez $[0, \ldots, 0]$), celkem 255 terčů

Nové terče II

Maticový zápis násobení mod $x^8 + 1$

- cyklicky rotované řádky
- lichý počet jedniček (invertibilita)
- terč $\sim$ skalární součin řádku matice a A'

SBox následován náhodným lin. zobrazením

- použiju i řádky se sudým počtem jedniček

$\Rightarrow$ další nové terče (127, bez $[0, \ldots, 0]$), celkem 255 terčů

Nové terče II

Maticový zápis násobení mod $x^8 + 1$

- cyklicky rotované řádky
- lichý počet jedniček (invertibilita)
- terč $\sim$ skalární součin řádku matice a A'

SBox následován náhodným lin. zobrazením

- použiju i řádky se sudým počtem jedniček

$\Rightarrow$ další nové terče (127, bez $[0, \ldots, 0]$), celkem 255 terčů

Reprodukce výsledků Bos et al.

Bos et al. – jen originální SBox a duální SBox pro $p = 1$

- 16 terčů
- reprodukujeme k porovnání s novými terči

Byte	Terče: bity orig. SBoxu							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
1.	■	55	90	■	149	207	224	■
2.	248	218	239	244	247	■	251	247
3.	■	212	■	25	230	■	99	■
4.	■	252	226	247	■	255	241	252
5.	247	104	■	225	229	■	225	249
6.	252	255	■	241	242	■	4	255
7.	47	233	■	228	■	■	■	■
8.	■	253	253	■	255	251	1	■
9.	224	196	231	249	253	238	■	253
10.	■	■	255	245	255	■	234	■
11.	245	■	250	■	190	255	236	■
12.	254	255	■	255	■	■	■	■
13.	241	■	254	190	160	193	■	■
14.	235	■	254	■	255	2	■	255
15.	■	■	246	195	255	■	246	155
16.	252	255	254	■	251	245	235	■

Tabulka : Pořadí správného kandidáta, ■ $\sim$ 0. Útok na WBAES s použitím 1024 stop. Průměrně 2.9 terčů z 8 uspěje (36%).

Byte	Terče: bity duálního SBoxu pro $p = 1$							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
1.	207	■	4	252	253	252	■	■
2.	233	255	252	■	216	255	255	■
3.	254	209	■	■	254	225	247	189
4.	37	■	251	■	■	252	231	242
5.	244	■	250	231	134	79	214	223
6.	■	253	255	254	■	■	■	2
7.	■	248	187	255	209	■	184	227
8.	■	255	255	242	234	253	■	255
9.	227	156	237	243	229	232	■	■
10.	■	158	1	■	253	■	■	■
11.	248	■	241	254	251	45	255	1
12.	■	251	254	255	236	255	■	254
13.	205	4	191	30	■	■	240	255
14.	■	231	246	■	248	253	■	■
15.	221	250	1	■	223	■	1	225
16.	255	■	229	254	■	255	254	253

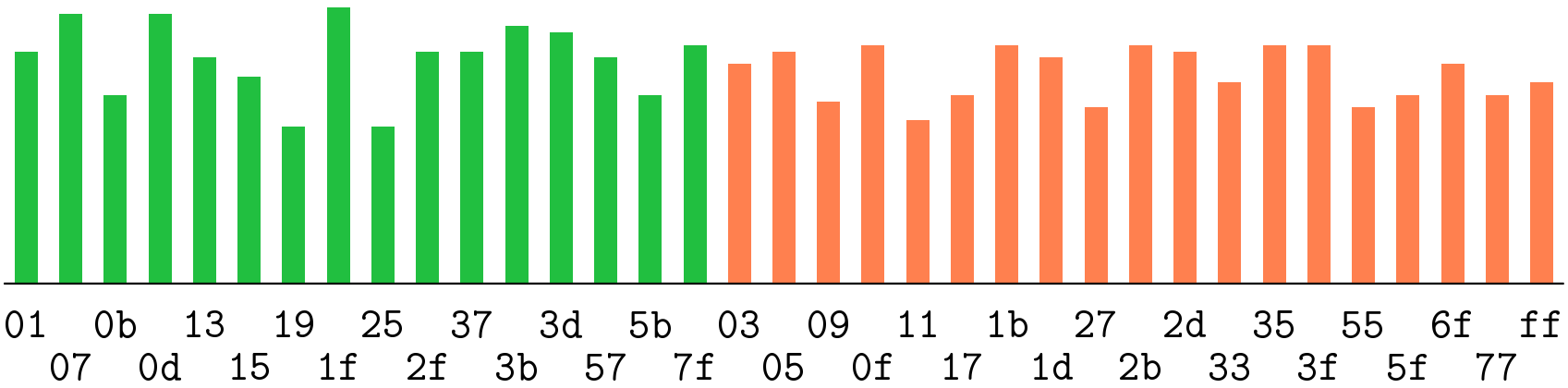
Tabulka : Pořadí správného kandidáta, ■ $\sim$ 0. Útok na WBAES s použitím 1024 stop. Průměrně 2.4 terčů z 8 uspěje (30%).

Výsledky použití všech 255 terčů

Nagenerováno 8 instancí WBAES tabulek

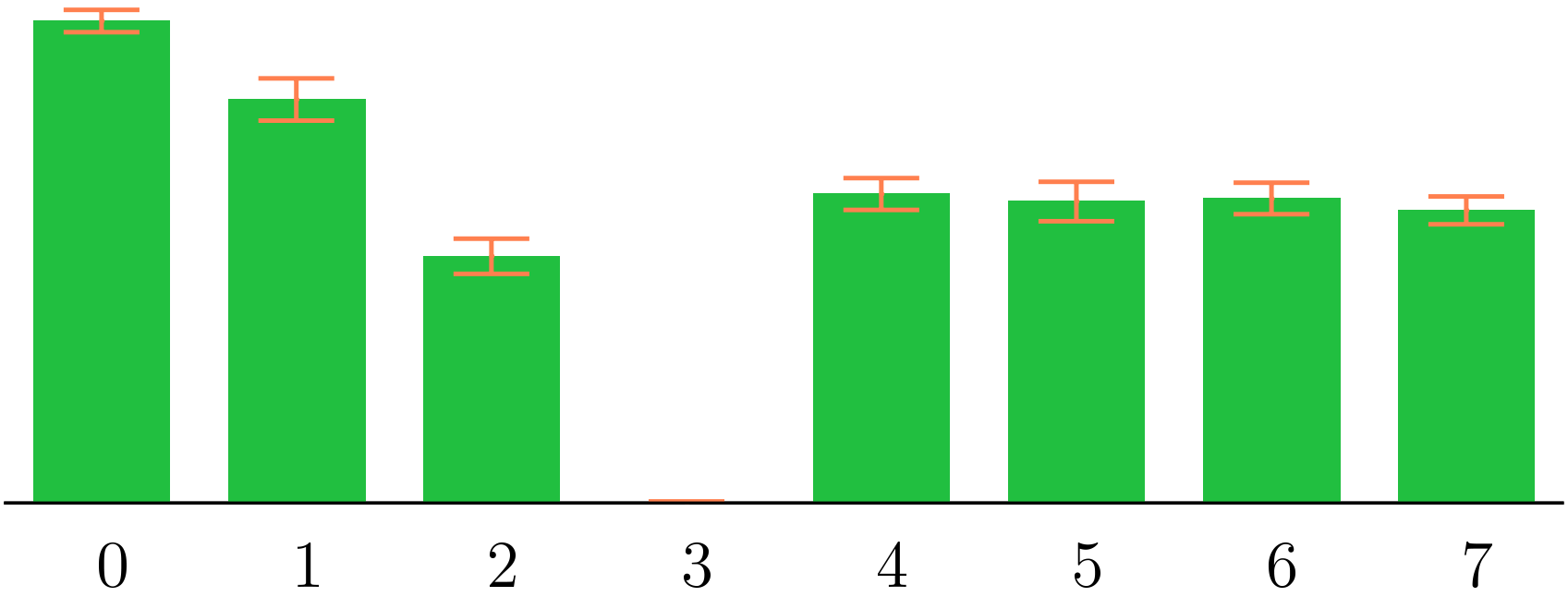
- 255 terčů pro každý ze 16 bytů klíče a každou z 8 instancí
  - 32 640 útoků
- průměrná úspěšnost 29%
- doba běhu desítky hodin

Úspěšnost dle invertibility p



Obrázek : Úspěšnost terčů podle invertibility původního p: zeleně invertibilní, cihlově neinvertibilní. Pro méně než 8 terčů na p jsou výsledky přeškálovány.

Úspěšnost podle pozice bitu ve stopě



Obrázek : Průměrná úpěšnost a její směrodatná odchylka napříč instancemi podle pozice ve stopě mod 8 (tj. bit v rámci bytu).

Útok „naslepo“

Znali jsme klíč, úskalí útoku „naslepo“

- falešní kandidáti
  - rekordní rozdíl na druhého téměř 35%
- průměr správných 34%

Návrh

- použití menšího počtu stop a více terčů
- sčítání relativních rozdílů na druhého
  - hranice pro započítání (10%)
  - hranice pro skončení (75%)

Útok „naslepo“

Znali jsme klíč, úskalí útoku „naslepo“

- falešní kandidáti
  - rekordní rozdíl na druhého téměř 35%
- průměr správných 34%

Návrh

- použití menšího počtu stop a více terčů
- sčítání relativních rozdílů na druhého
  - hranice pro započítání (10%)
  - hranice pro skončení (75%)

Budoucí práce

Nedořešené otázky

- ze které tabulky dochází k úniku,
- jak útok teoreticky podložit,
- jak provést útok rovnou z tabulek,
- proč se správný kandidát propadá na poslední místa,
- proč z pozice 3 ve stopě neuniká informace,
- ...

Literatura I

Olivier Billet, Henri Gilbert, and Charaf Ech-Chatbi.
Cryptanalysis of a white box aes implementation.
In *Selected Areas in Cryptography*, pages 227–240. Springer, 2004.

Joppe W Bos, Charles Hubain, Wil Michiels, and Philippe Teuwen.
Differential computation analysis: Hiding your white-box designs is not enough.
Technical report, Technical report, Cryptology ePrint Archive, Report 2015/753. `http://eprint.iacr.org/2015/753`, 2015.

Stanley Chow, Philip Eisen, Harold Johnson, and Paul C Van Oorschot.
White-box cryptography and an aes implementation.
In *Selected Areas in Cryptography*, pages 250–270. Springer, 2002.

Literatura II


D. Klinec.
Whitebox-crypto-AES.
Git repository.
https://github.com/ph4r05/Whitebox-crypto-AES.


Dušan Klinec.
White-box attack resistant cryptography.
2013.


NIST FIPS PUB.
197: Advanced encryption standard (aes).
Federal Information Processing Standards Publication, 197:441–0311, 2001.