



OPERAČNÍ MODY BLOKOVÝCH ŠIFER, NÁHODNÁ ČÍSLA

Jak ze čtverce udělat kruh

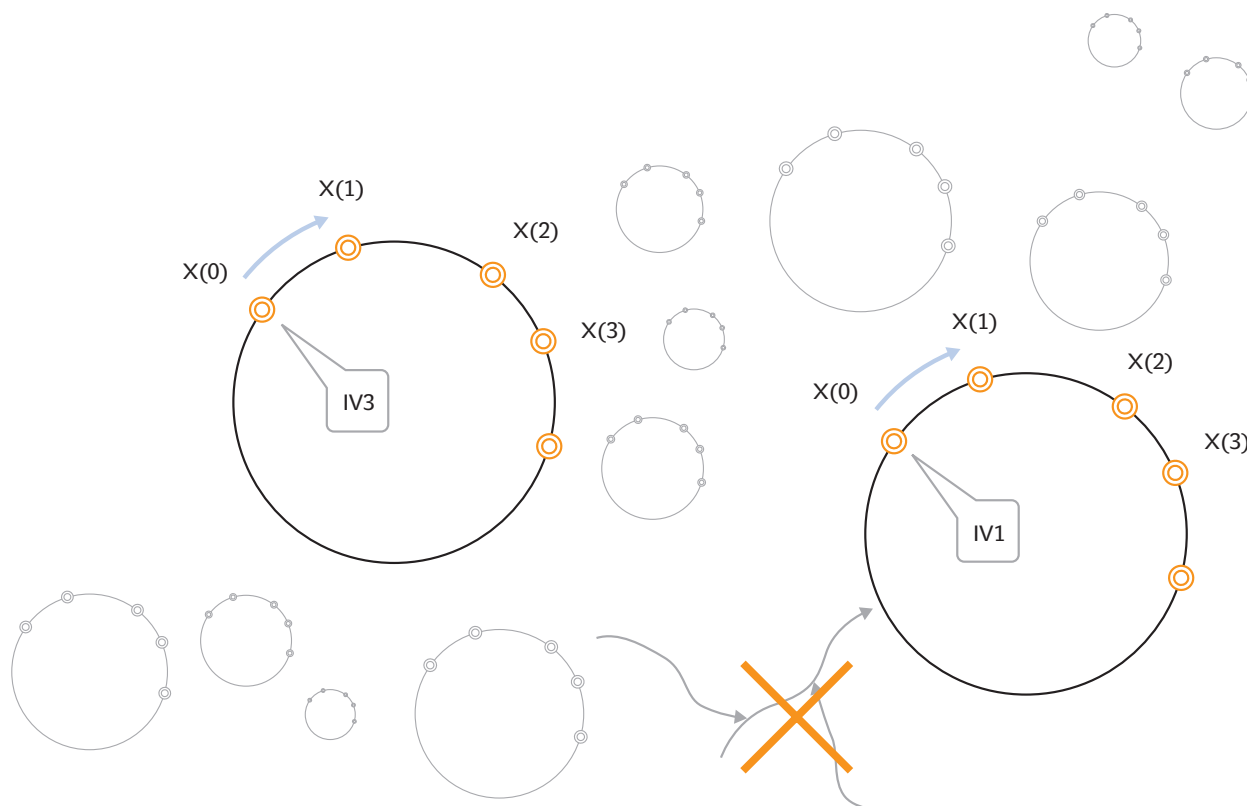
V tomto článku vás seznámíme s novým využitím blokové šifry jak pro generování náhodných čísel, tak pro šifrování. Ukážeme vám, jak lze blokovou šifru výhodně přeměnit na proudovou pomocí běžného čítače. Tento nový operační modus byl oficiálně navržen americkým standardizačním úřadem NIST.

KVALITNÍ PSEUDONÁHODNÝ GENERÁTOR ZADARMO

Pokud jste někdy potřebovali rychle nějakým způsobem generovat náhodná data pro svůj program, určitě jste si byli vědomi toho, že jakákoliv nevhodná odchylka generovaných dat může cíl tohoto programu zhatit. Často je prostě potřeba mít jis-

totu, že data jsou pořádně „zamíchaná“ a nemají žádné strukturální vlastnosti (pokud vám stačí lineární kongruentní generátory, podívejte se např. na [1]).

Často je ale na dosah ruky nějaká knihovna s proudovými nebo blokovými šiframi a stačí ji jen použít. Zdrojové kódy šifer jsou totiž volně dostupné na internetu, ■



Obr. 2: Množina všech možných 128bitových řetězců se při generování blokovou šifrou v modu OFB rozpadá do cyklů.

PŘÍPRAVA KLÍČOVÉ TABULKY

Šifrovací klíč (zarovnaný na bajty) cyklicky vepisujeme do pole $K(0), K(1), \dots, K(255)$. Zvolíme identickou počáteční permutaci S , tj. $S(i) = i$, $i = 0 \dots 255$, a promícháme ji prostřednictvím hodnot $K(i)$ podle následujícího pseudokódu takto (+ je sčítání v modulu 256):

$j = 0$

for $i = 0$ to 255 do

{

$j = (j + S(i) + K(i)) \bmod 256$

v tabulce S vyměň hodnoty $S(i)$ a $S(j)$

}

GENEROVÁNÍ HESLA $h(i)$

$x = y = 0$

for $i = 0$ to n do

{

$x = x + 1$

$y = y + S(x)$

v tabulce S vyměň hodnoty $S(x)$ a $S(y)$

$h(i) = S(S(x) + S(y))$

}

ŠIFROVÁNÍ

Jednotlivé bajty hesla $h(i)$ je poté xorují na otevřený text (při zašifrování) nebo šifrovaný text (při dešifrování).

■ například na [2], takže zbývá jen vědět, jak na to. Ukážeme si, že je to vlastně velmi jednoduché.

PROUDOVÉ ŠIFRY JAKO

GENERÁTORY NÁHODNÝCH ZNAKŮ

Proudové šifry (jako všechny ostatní šifry) používají nějaké tajné nastavení – šifrovací klíč, na němž závisí celá jejich výstupní posloupnost. Ta se nazývá heslo, které se obvykle xoruje bajt po bajtu na otevřený text. Pokud by někdo v tomto hesle objevil nějaké strukturální závislosti včetně sebe-menších statistických odchylek, narazil by ve skutečnosti na slabinu šifry, což by vedlo k jejímu odsunu na pohřebiště neúspěšných, rozbitých šifer.

U kvalitních šifer předpokládáme, že jejich výstupní posloupnost je posloupností nezávislých náhodných znaků. Stačí proto zvolit nějaký ani ne tajný klíč a z dané šifry tuto posloupnost používat v roli generátoru náhodných znaků. Velmi rychlá je například šifra RC4 (viz [3]), jejíž zdrojový kód můžete vidět na obrázku 1. Z posledních prací vyplývá, že jejich prvních 512 (pro puristy 3072) bajtů hesla $h(i)$ je vhodné „zahodit“ a používat až další produkci, neboť určité statistické nuance zde nalezeny byly. Dále byly nalezeny určité strukturální závislosti i ve velmi

dlouhém výstupu, ale jedná se o velmi složité vztahy mezi nejnižšími bity výstupních bajtů, přičemž desítky megabajtů zde hrají roli základních měrných jednotek pro měřitelné odchylky. Běžné aplikace to pochopitelně nevádí, ale v případě, že chceme „ještě kvalitnější“ výstup, můžeme použít některou kvalitní blokovou šifru.

BLOKOVÉ ŠIFRY JAKO

GENERÁTORY NÁHODNÝCH ZNAKŮ

Blokové šifry lze ke generování náhodných znaků použít podobným způsobem jako proudové, jde jen o to, čím plnit jejich vstup a jak využívat výstup, čili o tzv. operační modus. Zvolíme si nějaký klíč pro vybranou šifru, řekněme AES (viz [4]), a nyní ji budeme chtít využít tak, aby nám poskytovala proud znaků. Máme na vybranou „starý“ modus OFB (přehledově o modech viz [7]), nebo „nový“ čítačový modus. Jsou skoro stejně staré, ale o čítačovém modu se dlouho nehovořilo, i když ho Diffie s Hellmanem publikovali už v roce 1979 (viz [5]). Připomeňme si tedy Output Feedback (OFB) neboli modus zpětné vazby z výstupu šifry. Pokud naši šifru AES se zvoleným klíčem K označme jako funkci f , jde o to naplnit její vstup na počátku nějakou inicializační hodnotou (IV , je to 128bitový řetězec) a tuto hodnotu

Obr. 1: Kód proudové šifry RC4

- tu „točit přes šifru stále dokola“. Formulou by to bylo takto: $x(0) = IV$, $x(1) = f(x(0))$, $x(2) = f(x(1))$, ..., tedy zkráceně $x(i+1) = f(x(i))$, přičemž hodnoty $x(i)$, $i = 1, 2, \dots$ bychom použili jako náhodná čísla.

ABYCHOM SE NEZAMOTALI PŘILÍŠ BRZO

Je zřejmé, že v obdržené posloupnosti nemůžeme pokračovat donekonečna, protože možných binárních řetězců délky 128

trik ale převádí všechny body z obrázku 2 do jediného (!) cyklu o délce přesně 2^{128} .

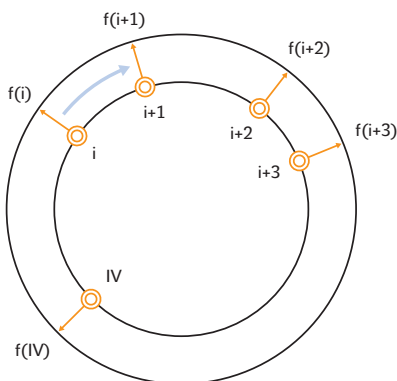
ČÍTAČ V ŠIFROVÁNÍ

Běžný čítač je velmi jednoduchá funkce, kdy se obsah daného registru, v našem případě 128bitového, zvýší o jedničku, přičemž ze stavu (hex.) 0xFF...FF se přechází do nulového stavu. Triviálně vidíme, že tento čítač má periodu 2^{128} , ať začneme

Pokud kontinuálně šifrujeme hodnoty čítače, generujeme zaručeným způsobem posloupnost maximální délky, sestávající z náhodně vyhlížejících bloků.

bitů je jen 2^{128} . Zákonitě se tedy v generované posloupnosti $x(i)$ musíme jednou dostat do bodu, kde jsme už jednou byli. Protože funkce f je reverzibilní („zpětný chod“ je vlastně dešifrování), je zřejmé, že do každého bodu $x(i)$ vede jen jeden předchůdce, neboli vzniká čistý cyklus bez „přívodních větví“, viz obr. 2. Protože f je náhodně zobrazení, celá množina možných řetězců $x(i)$ se rozpadá do řady takových náhodných cyklů. Z teorie pravděpodobnosti pak vyplývá, že průměrná délka cyklu je 2^{127} . To je určitě pro mnoho aplikací, kde jsou potřeba náhodná data, dostatečné.

Pro šifrování chceme mít ale jistotu o něco větší. Ostatně nešifrujeme data jen tak pro nic za nic, takže bychom přivítali, kdybychom o délce tohoto cyklu mohli něco tvrdit. Může se totiž stát, že se náhodně trefíme do cyklu o délce 2 nebo tisíc bloků, což je velmi málo, a došlo by k tzv. dvojímu použití hesla, o němž budeme hovořit dále. Následující



Obr. 3: Čítačový módus zaručuje, že všech 2^{128} možných 128bitových binárních řetězců se objeví v generované posloupnosti $f(IV)$, $f(IV+1)$, $f(IV+2)$,...

z jakéhokoliv počátečního bodu $x(0) = IV$. Takže čítač projde všechny různé 128bitové stavy. To bychom přesně potřebovali od šifry. Trik je v tom, že jako výstup nepoužijeme přímo stavy čítače, ale jejich šifrované obrazy. Dostáváme ale jediný cyklus? Protože funkce f je reverzibilní, nemůže se stát, že by obrazy dvou různých stavů čítače byly stejné, protože pak i jejich vzory, získané odšifrováním, by musely být stejné. Maximální délka posloupnosti tedy zůstává 2^{128} a navíc posloupnost šifrovaných obrazů se u kvalitní šifry jeví jako dostatečně kvalitní zdroj náhodných znaků.

Je tu určitá teoretická výjimka, která nám asi v praxi nebude příliš vadit. Naše nová posloupnost je přece jen „pravidelná“, a to sice v tom, že právě nikdy během generování 2^{128} 128bitových bloků nedojde k tomu, že by byly vygenerovány dva stejné bloky. U náhodné posloupnosti to téměř jistě nastane, a to podle tzv. narozeninového paradoxu už s 50% pravděpodobností někdy v prvních 2^{64} blocích. V jiném pohledu však u kvalitní šifry nejsme schopni tuto posloupnost odlišit od posloupnosti náhodných znaků. Kdybychom mezi těmito obrazy našli jakékoliv využitelné statistické nebo analytické vztahy, danou šifru bychom tím vlastně „rozbili“ nebo odhalili její slabosti.

DVOJÍ POUŽITÍ HESLA

Za okamžik si uvedeme oficiální a formální definici čítačového módu. Nyní si připomeneme, oč vlastně z kryptografického hlediska jde.

Pokud používáme stejný klíč, viděli jsme, že dostáváme jedinou funkci f , a tím i jediný cyklus, v kterém se pohybujeme. Hodnoty $f(i)$ používáme přímo jako heslo, které xorujeme na otevřený text. Pokud bychom použili pro dvě zprávy stejnou inicializační hodnotu pro

- čítač, obdrželi bychom i stejný proud hesla. Označíme-li proud bajtů hesla, otevřených a šifrových textů $h(j)$, $OT1(j)$, $OT2(j)$ a $ŠT1(j)$, $ŠT2(j)$, pak bychom v tomto případě dostali $ŠT1(j) = OT1(j) \oplus h(j)$ a $ŠT2(j) = OT2(j) \oplus h(j)$. Z toho jednoduchou úpravou vyplývá, že $ŠT1(j) \oplus ŠT2(j) = OT1(j) \oplus OT2(j)$. Vidíme, že heslo z tohoto vztahu zcela vypadlo, přičemž hodnotu šifrových textů známe. Známe proto i hodnotu proudu bajtů $OT1(j) \oplus OT2(j)$. Nyní použijeme například metodu předpokládaného slova, znázorněnou na obrázku 4. Je to ve skutečnosti prosté vyzkoušení hodnoty $OT1(j)$ nebo $OT2(j)$. Ze zna-

Zašifrováním dat se sice docílí jejich utajení, ale zapomíná se na to, že integrita dat není nijak chráněna. Téměř se vžilo, že když je něco zašifrované, je to bezpečné. A to je omyl.

losti výrazu $OT1(j) \oplus OT2(j)$ pak dopočítáme vždy druhý otevřený text. Pokud vyjdou nesmysly, zkusíme jiné slovo nebo jinou pozici tak dlouho, až nám vyjde smysluplný text.

Získané texty v $OT1$ i v $OT2$ pak rozšiřujeme na obě strany, až dostaneme oba dva otevřené texty v plné délce. Je tedy zřejmé, že dvojímu použití hesla musíme zabránit i v případě čítačového modu. Zde vidíme velmi jasně, že je potřeba zajistit, aby hodnoty $IV1$ a $IV2$, které inicializují příslušné úseky hesla, byly dostatečně vzdálené, aby nedošlo k překryvu na obrázku 5.

CO NA TO NORMA

Norma velmi přísně stanoví, že pokud se k šifrování používá tentýž klíč K s různými inicializačními hodnotami pro různé zprávy, nikdy nesmí dojít k překryvu hesla za celou dobu platnosti klíče K . Norma umožňuje různé postupy inkrementace čítače, například může probíhat jen

Těmito všemi možnými opatřeními se docílí podmínky, aby nikdy nebylo použito totéž heslo.

Úplný popis čítačového modu naleznete ve speciální publikaci NIST [6], která přejímá definice i dalších čtyř klasických modů (ECB, CBC, CFB a OFB) tak, jak byly definovány v osmdesátých letech v normě FIPS 81.

JEDNA VÝHODA ZA VŠECHNY

Oproti výše jmenovaným čtyřem klasickým modům má čítačový modus jednu neobyčejnou výhodu. Můžeme pomoci něho nezávisle na čemkoli odšifrovat nebo zašifrovat jakýkoliv bajt na jakékoliv pozici daného souboru nebo proudu dat, a to velmi rychle. Postačí vypočítat odpovídající hodnotu čítače a z ní jedním voláním funkce f obdržet příslušné heslo. U modu OFB bychom museli počítat všechny stavy funkce f , abychom ji dostali do odpovídající pozice. U modu CBC a CFB bychom zase potřebovali znát okolí daného bajtu šifrového textu, abychom mohli správně

v dolní m -bitové části b -bitového čítače (tj. mod 2^m). Dále je možné čítač (nebo jeho dolních m bitů) považovat za lineární posuvný registr se zpětnou vazbou a jeho stavy obnovovat posunem apod. Dále je tu zajímavá možnost nastavit horních $b-m$ bitů čítače na hodnotu, která je nějak jednoznačně spojena se zprávou, jež se šifruje (napadá vás možná $b-m$ bitů haše zprávy), zatímco zbylých m bitů se klasicky inkrementuje.

PLACENÁ INZERCE



EIZO
chrání Váš zrak

15" LCD panel EIZO L365

16.390,- Kč
(bez dph)

Avnet Applied Computing s.r.o.
Nad Kazankou 41, 170 00 Praha 7
tel.: 283 851 997, www.eizo.cz

PÁR TIPŮ PRO PROGRAMÁTORY

Představme si, že pro nějakou hru (program) potřebujeme generovat náhodná čísla 0 až 9, přičemž by bylo vhodné nabídnout uživateli tutéž hru (například totéž rozdání karet) si zahrát ještě jednou. Za prvé to znamená umět vygenerovat náhodná čísla, za druhé umět to přesně zopakovat. Řešení vás už určitě napadá – prostě číslo hry bude rovno inicializačnímu vektoru a klíč bude někde v programu nastaven na konstantu, nebo obráceně – klíč bude číslo hry a IV bude konstantní. Variací určitě naleznete více.

Další poznámka se týká úpravy hesla. Obdržené bajty jsou v rozsahu hodnot 0 – 255, ale my potřebujeme hodnoty 0 – 9. Stačilo by třeba využívat číslo $h(i) \bmod 10$, ale v tom případě bychom nedostali jednotlivé číslice stejně pravděpodobné. Číslice 0 až 5 by byly oproti ostatním „ve výhodě“, protože na ně vedou čísla 250 až 255, zatímco v ostatních desítkách jsou výskyty rovnoměrné. Proto pokud narazíme na bajty v rozsahu 250 – 255, ignorujeme je a žádoucí číslici z nich nevytváříme. Tím ve skutečnosti upravujeme původní zdroj náhodných znaků z rozsahu 0 – 255 na zdroj náhodných znaků v rozsahu 0 – 245, a tedy po modulování na 0 – 9. Pokud by se jednalo o karetní aplikaci, kde potřebujeme čísla 0 – 31, stačí využívat z proudu hesla vždy dolních pět bitů, nebo šetřit a proud bajtů „sekat“ rovnou po pěti bitech.

Určitě vás napadne, že podobným způsobem lze z klíče ve formě textové fráze nebo passwordu (pokud je použijeme jako klíč nebo IV) podobným způsobem vygenerovat posloupnost znaků v jakémkoliv požadovaném rozsahu, třeba PIN apod.

OT1:..... schůzka skupiny Balkán se bude konat v Praze někdy v prosinci ...
 H: kasůfkaiqpoirksdaũirtpqiwerrũasktpioerqũkdjairqipiraskgaũirup ...
 ŠT1: áilkjěšdgiqkwšpěitũšaeigqškcjtéiqšštqegqšdlgšrlflũšleglladgwá ...
 OT2:..... místě bude dohodnuta nová trasa, krytí skupiny Balkán bude za ...
 H: kasůfkaiqpoirksdaũirtpqiwerrũasktpioerqũkdjairqipiraskgaũirup ...
 ŠT2: ělůáčtnpydnqtpúagmawígjdũilkuqwgsvũpáwkwkýkčyabpdáščhqũ ...

VYMASKOVÁNÍ DVAKRÁT POUŽITÉHO HESLA:

ŠT1 xor ŠT2 = OT1 xor OT2 =
ũjdphtaghačwfpáiwěũksnbyxnũaepťqšátaihjvyvymvukflbzrhelkl...

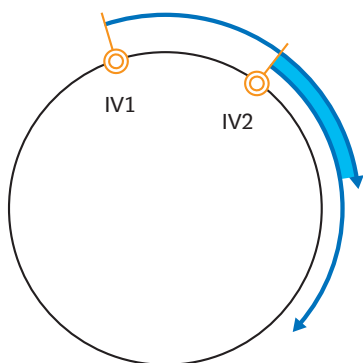
HLEDÁNÍ

OT1: Balkán ěkdy v p
 OT2: dnuta no Balkán

Obr. 4: Luštění metodou předpokládaného slova

- nastavit zpětnou vazbu. To například u databázových aplikací nemusí být vždy možné, protože náš šifrovací/dešifrovací modul může dostat někdy jen část šifrovaného záznamu.

Čítačový modus je v tomto ohledu velmi jednoduchý, jeho nevýhodou je nutnost splnit podmínku různých čítačů. V praxi je to nejlépe možné udělat tak, že inicializační hodnotu generujeme náhodně.



Obr. 5: Překryv hesla

JEDNA NEVÝHODA ZA VŠECHNY

Vlastností jak blokových, tak proudových šifer je, že (alespoň v základním tvaru) nezajišťují integritu dat. Data sice utají, tj. poskytují důvěrnost, ale proti jejich modifikaci obecně nic moc nezmohou. Tato vlastnost bývá tak často opomíjena, že se téměř všichni, že když je něco zašifrované, je to bezpečné. To je pochopitelně zásadní omyl.

Pokud změněme šifrový text u blokové šifry (kromě modu OFB a čítačového modu, které právě přetváří blokovou šifru na proudovou), dojde ke špatnému odšifrování ve

dvou blocích otevřeného textu. Naproti tomu u čistě proudové šifry dojde ke špatnému odšifrování pouze ve znaku, který odpovídá místu změny v šifrovaném textu.

Toho lze pochopitelně zneužívat k různým útokům, pokud útočník ví, jaký druh informace se kde nachází (například v souborech bankovních transakcí, databázích apod.). Vzhledem k tomu, že změna ⊕ D na šifrovaném textu vede ke změně ⊕ D v otevřeném textu, útočník může snadno otevřený text měnit, aniž by znal příslušný šifrový klíč.

SHRNUTÍ

Seznámili jsme se s novým operačním modem blokových šifer, čítačovým modem. Jeho výhodou je snadnost použití i jednoduchost výpočtu hesla pro danou pozici otevřeného/šifrovaného textu. Lze jej využít jak k proudovému šifrování, tak jako zdroj náhodných znaků pro modelování různých situací, které často vznikají při programování různých aplikací. ■ ■ ■

Vlastimil Klíma, autor@chip.cz

LITERATURA:

[1] Klíma, V.: Generátory náhodných čísel I až IV, Chip 3 – 6/98
 [2] zdrojové kódy šifer:
<ftp://ftp.funet.fi/pub/crypt/cryptography/symmetric/>
 [3] Klíma, V.: RC4: Šifra, která míchá karty, Chip 9/99, str. 42 – 44
 [4] Klíma, V.: AES – Nová šifra nastupuje, Chip 5/02, str. 142 – 144
 [5] Diffie, W., Hellman, M. E.: „Privacy and authentication: An introduction to cryptography“, Proceedings of the IEEE, 67 (1979), 397 – 427
 [6] Recommendation for Block Cipher Modes of Operation, Methods and Techniques, NIST Special Publication 800-38A, 2001, dostupné na
<http://csrc.nist.gov/encryption/tkmodes.html>
 [7] Klíma, V.: Šifry s mnoha tvářemi, Chip 7/00, str. 50 – 53
 [8] Elektronický archiv uvedených i dalších článků:
<http://www.decros.cz/bezpecnost/kryptografie.html>

PLACENÁ INZERCE

Originalní vánoční dárek od Memorexu
OPTICKÁ MYŠ
 PODLOŽKY POD MYŠKY

www.diskus.cz
DISKUS
 ❖ Praha 8, tel.: 266 315 401, fax: 266 315 399
 ❖ Praha 2, tel./fax: 224 923 345
 ❖ České Budějovice, tel./fax: 386 353 047, 603 465 623
 ❖ Ostrava - Mariánské Hory, tel./fax: 596 624 745
 ❖ Brno, tel./fax: 545 213 082