I.

Moderní kryptografie

Vlastimil Klíma

verze: 2.1, 11.4.2007

Abstrakt.
Cílem třech přednášek (I. Moderní kryptografie, II. Symetrické šifrovací systémy, III. Mody činnosti blokových šifer a hašovací funkce) je

a) ukázat, že moderní kryptologie se zabývá mnohem širším okruhem věcí než jen utajováním zpráv a jejich luštěním,
b) seznámit s některými novými myšlenkami,
c) a věnovat se více jedné části moderní kryptologie, tzv. symetrickým schématům.

Vzhledem k rozsahu těchto přednášek, které mají úvodní přehledový charakter, nebude možné postihnout ani klíčové, ani nejkrásnější myšlenky této vědy, ale jen některé nejpoužívanější. Následující texty vychází částečně z citované a doporučené literatury, jsou však nutně zatíženy subjektivním výkladem.

Doporučená literatura:

*Základní příručka **on-line**:*
Alfred J. Menezes, Paul C. van Oorschot, Scott A. Vanstone, *Handbook of Applied Cryptography*, CRC Press, 1996, dostupné celé on-line na
http://www.cacr.math.uwaterloo.ca/hac/

Často doporučovaná alternativa:
Doug Stinson, *Cryptography: Theory and Practice*, CRC Press, 1995

Historie:
David Kahn, *The Codebreakers*, Scribner, 1996

O historii kryptologie v češtině:
Pavel Vondruška: *Kryptologie, šifrování a tajná písma*, edice OKO, Albatros, 2006
Jiří Janeček: *Rozluštěná tajemství, Luštitelé, dešifranti kódy a odhalení*, naklad. XYZ, 2006
Fred Piper, Sean Murphy: *Kryptografie, Průvodce pro každého*, Dokořán, 2006
Simon Singh: *Kniha kódů a šifer*, Dokořán, 2003
Jiří Janeček: *Válka šifer. Výhry a prohry československé vojenské rozvědky (1939-1945)*, Olomouc, Votobia 2001.
Jiří Janeček: *Gentlemani nečtou cizí dopisy*, BOOKS, Brno, 1998
Jiří Janeček: *Odhalená tajemství šifrovacích klíčů minulosti*, Naše vojsko, Praha, 1994

Internetový portál:
http://theory.lcs.mit.edu/~rivest/crypto-security.html
Kontakt a osobní stránky:
v.klima@volny.cz, http://cryptography.hyperlink.cz

Obsah

1. Rozvoj kryptologie a souvislosti

Klasická kryptografie se zabývala především **šiframi**, tj. způsoby **utajení** zpráv. Patřily sem zejména šifrovací systémy jako jednoduchá záměna, jednoduchá a dvojitá transpozice, Vigenerova šifra a podobně. Často jsou nazývány historické **šifrovací systémy**.

Druhá světová válka přinesla nebývalý zájem o kryptografii i o kryptoanalýzu. O dříve zatajovaný i opomíjený obor se silně začaly zajímat hlavy států a generální štáby armád. Není divu, kryptoanalytici jim přinášeli čisté informace z nejvyšších míst velení nepřítele, bez jediného výstřelu a bez rizika. Kryptoanalýza se stala tichou, neviditelnou a účinnou zbraní. Kvalitní kryptografie byla naopak obranným štítem, který umožnil dopravovat tajné zprávy jak do týlu nepřítele, tak na frontu. Nebylo to poprvé, kdy kryptografové a kryptoanalytici zasáhli přímo do bojů, aniž by opustili své kanceláře daleko od fronty. Fascinující historii kryptologie od dávné minulosti až do osmdesátých let minulého století popisuje jedinečná kniha Davida Kahna [8] (v angličtině). Výběr podstatných událostí a některé nové informace přináší kniha Simona Singha Kniha kódů a šifer (překlad do češtiny [13]).

O historii české kryptografie a kryptoanalýzy viz v úvodu citované práce Jiřího Janečka, bývalého armádního kryptoanalytika ([16], [17], [18], [19]).

Všechny historické práce ukazují za prvé propojení kryptologie s mocí a za druhé její ohromující (dříve pečlivě utajovaný) význam.

Ve druhé světové válce přínos kryptoanalytiků vyvrcholil. Byl tak nepřehlédnutelný a široký, že zasáhl na všech frontách a ovlivnil všechny hlavní válčící strany. Proto si po válce všechny mocnosti začaly budovat mohutná kryptografická a luštící centra, kryptografická zařízení byla zařazena do kategorie zboží dvojího užití a posuzována stejně jako vývoz tanků nebo letadel.

Obr.: Budova NSA, Fort Meade, MD, USA, http://www.nsa.gov/

Začalo se více dbát na rozvoj teorie. V rámci tohoto poválečného dění Claude E. Shannon nejprve v roce 1948 publikoval práci **A Mathematical Theory of Communication** [1], která je pokládána za základ teorie informace, a rok poté práci **Communication Theory of Secrecy Systems** [2], která je pokládána za základ moderní kryptologie. Není bez zajímavosti, že byla publikována díky nepozornosti vládních agentů, měla zůstat utajena.

Shannon využil pojmů z teorie informace k ohodnocení bezpečnosti známých šifer. Definoval entropii jazyka, vzdálenost jednoznačnosti, dokázal absolutní bezpečnost Vernamovy šifry, zavedl pojmy difúze a konfúze a ukázal, jak posuzovat a konstruovat šifrové systémy kombinací různých typů šifer. Zavedl také model komunikačního kanálu, který se používá při popisu kryptografických systémů dodnes.

Nečekané impulsy pro kryptologii přinesla počítačová revoluce v sedmdesátých letech. Nové technologické možnosti přinesly nové koncepty. Vznikly moderní blokové šifry a byl objeven princip kryptografie s veřejným klíčem [5], [6]. Ochrana dat ve státní sféře v USA si pak vynutila i vydání veřejné "státní" šifry DES [9].

V ČR neexistuje veřejný národní šifrovací standard. Změňte to!

Tato šifra byla však oslabena v délce klíče, takže americká luštící služba NSA si vytvořila předpoklady pro luštění DES hrubou silou. Později W. Schwartau zjistil, že tento luštící stroj skutečně pro potřeby vlády vyráběla firma The Harris Corporation. Také tehdejší sovětský blok pravděpodobně na podobném stroji pracoval nebo jej vlastnil. Důkazy však dosud nebyly předloženy.

Poznámka.
Luštící stroj nakonec zkonstruovali také američtí dobrovolníci kolem organizace EFF v červenci roku 1998 proto, aby ukázali, že DES je zastaralý a lze ho luštit hrubou silou, tj. zkusit daný šifrový text odšifrovat pomocí všech jeho 2^{56} možných klíčů. DES-Cracker

prohledává klíčový prostor pomocí speciálních čipů, které pracují paralelně. Každý z nich má z řídícího procesoru přidělenu část klíčového prostoru. Čipy pracují autonomně a na řídící čip se obrací jen v případě nalezení správného klíče nebo při skončení prohledávání přiděleného prostoru. Čím více čipů je použito, tím rychleji je klíč nalezen. DES-Cracker, používá několik stojanů, ve kterých je zasunuto 29 desek, každá s 64 čipy. Toto množství čipů je schopno provést 90 miliard zkoušek klíčů za sekundu, což umožňuje prohledat celý klíčový prostor v garantované době 9 dní. Čistá cena HW stála asi byla 130 000 USD a vývoj celého stroje, sponzorovaný mj. organizací EFF, stál asi 210 000 USD. Prakticky byl DES-Cracker nasazen na luštění DES několikrát. Například v rámci soutěže DES-Challenge III byl za pomoci DES-Crackeru neznámý klíč DES zjištěn za 22 hodin. Historie kolem DES a DES-Crackeru je velmi zajímavá a společně s technickým popisem DES-Crackeru ji můžete nalézt na stránce organizace EFF [3].

Obr.: DES-Cracker

Dnes se dá takový luštící stroj vyrobit už ve velikosti PC.

Průmysl informačních a komunikačních technologií převrátil původní poválečný koncept co největšího zahalování kryptologie do státního aparátu. Kryptologie dostala nové impulsy a vymkla se státní kontrole.

V roce 1982 se konala první veřejná mezinárodní konference kryptologů a o dvacet let později se tato věda a její aplikace probírají nejméně na dvaceti mezinárodních konferencích ročně [10], o dalších pět let později, v roce 2007, je to o deset více.

Šifrovací technologie se masově používají například

- V domácích PC na ochranu dat (soubory, disky, e-maily)
- V mobilních telefonech
- Na internetu k ochraně spojení
- V elektronickém bankovnictví
- V platebních terminálech a systémech platebních karet
- V satelitních televizních kanálech
- V počítačových sítích nejrůznějších typů
- Aj.

Další oblasti, v nichž kryptografie sehraje klíčovou roli, budou nepochybně

- Elektronické peníze
- Elektronické volby

Vznikla řada nových myšlenek v kryptografii i v kryptoanalýze. Na přelomu tisíciletí byly objeveny **nové principy kryptoanalýzy**. Dokonce se spekuluje, že se vyrovnává potenciál tajné státní vědy a veřejné kryptologie.

Na přelomu tisíciletí se také na veřejnost po 50 letech od svého vzniku dostávají odtajněné informace o luštění ve druhé světové válce. Veřejnost současně začíná postupně odhalovat skutečný cíl mohutných odposlouchávacích objektů a umístění moderních podzemních špionážních a luštících center tajných služeb [11].

Obr.: Centrum F83, rozsáhlé podzemní pracoviště systému Echelon

Po ukončení studené války v posledním desetiletí minulého století dochází k přeměně zaměření těchto center na průmyslově orientovanou špionáž. Do této pasti padají nakonec i vlastní spojenci. Navíc se projevuje mezinárodní terorismus. Na jedné straně existují snahy o omezování kryptografie z obavy z jejího zneužití teroristy a zločinci, na druhé straně je silná snaha veřejnosti o absolutní uvolnění kryptografie z důvodu ochrany vlastního soukromí.

Spojení moci s kryptologií vyvolává nekonečné **etické** diskuse a **právně-obchodní** bariéry při vývozu a dovozu kvalitních šifrovacích technologií, které jsou stále aktuální.

Obr.: Budova luštitelské služby v Moskvě

2. Moderní kryptografie a bezpečnostní cíle

Moderní kryptografie, kterou můžeme datovat cca od roku 1970, se zabývá i jinými službami (než je pouhé utajení), které se uplatňují v oblasti komunikačních a počítačových technologií, a to nejen ve vládním (jako dříve), ale i v soukromém sektoru.

2.1. Bezpečnostní cíle

Moderní kryptografie zajišťuje následující **bezpečnostní cíle**:

- **Důvěrnost dat** – tj. utajení informace před neoprávněnými uživateli. Existuje řada přístupů, jak zajistit důvěrnost dat. Například řízením fyzického přístupu k datům nebo kryptografickými metodami, kdy se data převedou do nesrozumitelné podoby šifrováním.
- **Integrita dat** – tj. zajištění, aby data nebyla úmyslně nebo neúmyslně změněna neoprávněným uživatelem, například pozměněním, vložením, smazáním části dat nebo jejich zopakováním ve zprávě apod.
- **Autentizace entit** - ověřuje proklamovanou ***identitu daných entit*** (uživatele, počítače, zařízení, programu, procesu apod.).
- **Autentizace dat** - ověřuje proklamovanou ***identitu dat***, tj. například jejich obsah, čas jejich vzniku, jejich původ apod. Vedlejším produktem autentizace dat je zajištění jejich integrity.
- **Nepopiratelnost** – zajišťuje, aby daný subjekt později ***nemohl popřít to, co předtím vykonal***. Například v případě sporu dvou stran může díky ní třetí (nezávislá) strana rozhodnout o tom, zda daný úkon proběhl nebo ne. Nepopiratelnost může být mnoha typů, například se rozeznává:
  - nepopiratelnost původu – dokazuje, že původce zprávu vytvořil
  - nepopiratelnost odeslání – dokazuje, že odesílatel odeslal zprávu
  - nepopiratelnost podání – dokazuje, že doručovatel přijal zprávu k přenosu
  - nepopiratelnost přenosu – dokazuje, že doručovatel doručil zprávu
  - nepopiratelnost příjmu – dokazuje, že příjemce přijal zprávu
  - nepopiratelnost znalosti – dokazuje, že příjemce se se zprávou seznámil
- **Důvěryhodné vyznačení času** – garantované připojení času k události
- **Důvěryhodný monitoring** – garantovaný záznam událostí
- **Řízení přístupu** – tj. zajištění, že pouze oprávněné subjekty (osoby, stroje, programy,...) mají přístup k definovaným objektům (zdrojům, datům, programům,...)
- **Autorizace** – zajištění toho, že určitou činnost mohou vykonávat pouze určité oprávněné subjekty (mající k těmto činnostem autorizaci)

Poznámka: Bezpečnostním cílem může být například také ochrana doby trvání nějaké operace v informačním systému nebo ochrana toho, že nějaká událost v systému v daném čase nastala (například, že se na komunikačním kanálu odesílá zpráva).

2.2. Základní kryptografické služby

Mezi základní kryptografické služby patří **důvěrnost, integrita, autentizace a nepopiratelnost**. Pomocí nich se dá zajistit většina bezpečnostních cílů.

Poznamenejme, že uživatelem nemusí být vždy osoba, v kontextu konkrétního informačního nebo komunikačního systému to může být program nebo proces, zprávou nemusí být e-mail, ale může to být libovolný soubor dat, program, položka v databázi apod.

2.3. Kryptografické nástroje

Moderní kryptografie má pro zajištění **bezpečnostních cílů** řadu kryptografických nástrojů, které rozšířily původně jediný cíl – utajení a jediný nástroj - šifry. Mezi **kryptografické nástroje (mechanismy, primitiva)** patří:

- Šifrovací systémy s tajným klíčem
- Hašovací funkce
- Generátory náhodných znaků
- Autentizační kódy zpráv a klíčované hašové autentizační kódy zpráv
- Šifrovací systémy s veřejným klíčem
- Schémata digitálních podpisů
- Schémata výměny klíčů nebo dohody na klíči
- Schémata sdíleného tajemství
- Autentizační a identifikační schémata
- A další

2.4. Informačně bezpečnostní služba

Informačně bezpečnostní služba je metoda zajištění určitého bezpečnostního cíle. Například integrita přenášených dat na komunikačním kanálu je bezpečnostní *cíl* a metoda jeho zajištění je bezpečnostní *služba*. Tato bezpečnostní služba se může zajistit různými kryptografickými *nástroji*, například digitálním podpisem, autentizačním kódem zprávy nebo klíčovaným hašovým autentizačním kódem.

2.5. Definice moderní kryptografie

Metod pro zajištění informační bezpečnosti je celá řada, například fyzické, personální, technické, administrativní apod. Kryptografie hraje důležitou roli, ale nikoli jedinou.

Data lze chránit uzavřením počítače do trezoru. Přenos dat může být zajištěn převozem trezoru.

Moderní kryptografie se zabývá ***matematickými*** metodami pro zajištění (cílů) informační bezpečnosti.

2.6. Pojmy kryptografický systém, algoritmus, zobrazení a transformace

V klasické kryptografii splývaly pojmy kryptografický systém, kryptografický algoritmus a kryptografická transformace, neboť v rámci jedné služby (zajištění důvěrnosti dat) nemělo příliš velký smysl tyto pojmy rozlišovat. Rozlišování a definice těchto pojmů není v současné době ještě ustálená, zejména se spojují pojmy systém a algoritmus, což v konkrétním kontextu může být jedno a totéž. Obecně bychom tyto pojmy mohli rozlišit následovně od nejnižší úrovně k nejvyšší.

Příklad: Pojmy kryptografický systém, algoritmus, zobrazení a transformace na příkladu proudové šifry

Transformace, zobrazení, algoritmus, pravidla a kryptosystém

<table>
<tr><td>transformace zašifrování
$E_{k(i)}$: M → C: m → m xor k(i)</td><td>zobrazení E</td><td rowspan="3">algoritmus
proudové šifry
(G, E, D)</td><td rowspan="4">kryptografický systém
šifrování dat proudovou šifrou</td></tr>
<tr><td>transformace dešifrování
$D_{k(i)}$: M → C: m → m xor k(i)</td><td>zobrazení D</td></tr>
<tr><td>transformace generátoru G:
v daném čase t nebo z daného klíče k vygeneruje posloupnost klíčů
G(t, k) = {k(1), k(2),...}</td><td>transformace G</td></tr>
<tr><td>pravidla: Klíčová posloupnost je posloupností náhodných nezávislých veličin, nabývajících hodnot 0 a 1 se stejnou pravděpodobností 0.5, každá z vygenerovaných posloupností se použije k šifrování otevřeného textu pouze jednou a má stejnou délku jako otevřený text</td><td>pravidla</td><td>pravidla</td></tr>
</table>

Obr.: Pojmy kryptografický systém, algoritmus, zobrazení a transformace na příkladu proudové šifry

2.6.1. Kryptografická transformace

Kryptografická transformace (funkce, operace) je *funkce*, definující zpracování dat pomocí daného konkrétního klíče.

2.6.2. Kryptografické zobrazení

Kryptografické zobrazení je zobrazení, které každému klíči nebo jinému parametru kryptografického systému přiřadí konkrétní kryptografickou transformaci.

Příklad:

1. U kryptografického nástroje šifrování dat máme pro konkrétní klíč *e kryptografickou transformaci zašifrování* dat E_e: m → E_e(m), tj. způsob zašifrování dat pomocí daného konkrétního klíče (e) a *kryptografickou transformaci dešifrování* dat D_d: c → D_d(c), tj. způsob dešifrování dat pomocí daného konkrétního klíče (d). U symetrických systémů je e = d = k, u asymetrických je klíčový pár (e, d) generován *transformací* G, která každému tajnému počátečnímu nastavení (seed) k přiřadí klíčový pár (e, d).
2. V případě kryptografického nástroje digitálního podpisu máme pro konkrétní privátní klíč (d) *kryptografickou transformaci vytvoření podpisu* D_d: m → p = D_d(m) a pro konkrétní veřejný klíč (e) *kryptografickou transformaci ověření podpisu* E_e, například E_e: (m, p) → {ANO, NE}.

2.6.3. Kryptografický algoritmus

Kryptografický algoritmus je souhrn všech kryptografických *zobrazení* a *transformací* daného kryptosystému.

Příklad:

1. U symetrického kryptografického systému šifrování to může být dvojice zobrazení (E, D), které konkrétnímu klíči k přiřazují konkrétní transformaci zašifrování a dešifrování, E: k $\rightarrow E_k$ a D: k $\rightarrow D_k$.
2. V případě digitálního podpisu je to trojice (G, S, V), přičemž
   - transformace G je generátor, který pro každé tajné počáteční nastavení (seed) *k* vytváří klíčový pár veřejného a privátního klíče (e, d),
   - zobrazení *S* každému privátnímu klíči *d* přiřadí konkrétní transformaci vytvoření podpisu S_d a
   - zobrazení *V* každému veřejnému klíči *e* přiřadí transformaci ověření podpisu V_e.

2.6.4. Kryptografický systém

Kryptografický systém (kryptosystém, kryptografické schéma, kryptoschéma) je celková matematická metoda, zajišťující některou informačně bezpečnostní službu. Kryptosystém zahrnuje celý proces zpracování dat a klíče a všechny jeho okolnosti, zahrnující všechny relevantní kryptografické *algoritmy, zobrazení, transformace* ***a pravidla***, které daný kryptosystém používá a řídí se jimi.

Příklad:

1. V případě šifrování dat patří do kryptosystému zejména způsob generování a použití šifrovacích klíčů a definice kryptografického algoritmu šifrování dat.
2. V případě digitálního podpisu dat je to způsob generování klíčů a definice kryptografického algoritmu vytvoření digitálního podpisu a kryptografického algoritmu verifikace podpisu.
3. Dále například u Vernamova kryptografického systému máme transformaci zašifrování E_k a transformaci dešifrování D_k. Kryptografický algoritmus je tvořen trojicí (G, E, D), kde G je transformace generování hesla (klíče), a navíc *pravidlem*, jak tvořit a používat klíč (vygenerovaný klíč musí být náhodný a k šifrování se může použít pouze jednou).

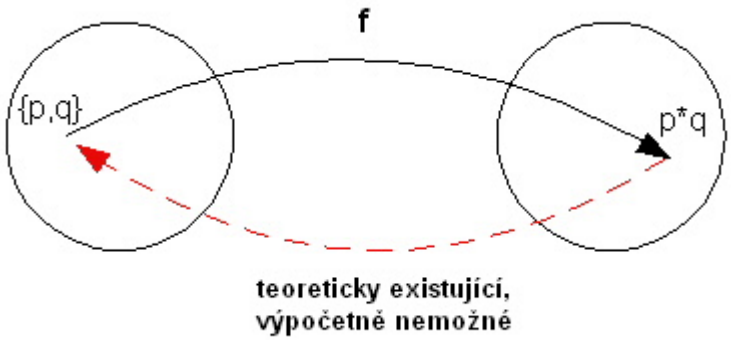
Příklady poručení pravidel: dvojí použití hesla u šifrování v MS Office 2003. (MS Office 95 používal Vigenerovu šifru). Domácí úkol: ověřit chybu v MS Office 2007.

3. Nové myšlenky kryptografie

Počítačová revoluce přinesla řadu nových myšlenek, které jsou velmi krásné a svým způsobem fantastické [5], [6]. V tomto úvodu jich uvedeme ve zkratce jen několik.

3.1. Jednosměrné funkce

První z nich jsou **jednosměrné funkce**. Jsou to takové funkce f: X $\rightarrow$ Y, pro něž je snadné z jakékoli hodnoty x $\in$ X vypočítat y = f(x), ale pro nějaký náhodně vybraný obraz y $\in$ f(X) nelze (neumíme, je to pro nás výpočetně nemožné) najít její vzor x $\in$ X tak, aby y = f(x). Přitom víme, že takový vzor existuje nebo jich existuje dokonce velmi mnoho. Je to třeba jako když smícháme dvě složky lepidla. Za několik vteřin vytvoří novou sloučeninu se zcela novými vazbami atomů a molekul, které nelze jednoduše rozpojit a vrátit do původní podoby. Podobně to probíhá s ohromnými čísly. Dokážeme je snadno spojit vynásobením. Číslo, které obdržíme, má však zcela jinou "molekulární" strukturu, původní dvě složky pevně váže v nové číselné sloučenině a my v současné době neznáme dostatečně rychlou metodu jak tato čísla separovat.



Obr.: Jednosměrná funkce

Příklad: Prokazování autorství
Hašovací funkce se mohou použít i k prokázání autorství například tímto způsobem. Někdo vytvoří určité dílo (například objev z určité oblasti), nechce však z určitých důvodů toto dílo zveřejnit ihned, má však obavy, aby později někdo nemohl popřít, že dílo D je jeho a vzniklo už třeba před několika lety nebo měsíci. Postačí zveřejnit jednocestný obraz f(D) tohoto díla.

Předpověď vývoje ekonomiky v České republice roce 2004 je popsána v práci D, kterou zveřejním 1.1.2005.
f(D.doc) = A085F5701D56B55CA5843ED952546A88ED6F80D9
Alois Předvídavý, 11.11.2003

Obr.: Prokazování autorství

Příklad: Ukládání přihlašovacích hesel
Další zajímavou aplikací hašovacích funkcí je **ukládání přihlašovacích hesel** v počítačových systémech. Hesla uživatelů, passwordy $pswd_i$, nemohou být ukládána do systémů přímo, protože by je šlo jednoduše vyhledat a zneužít. Ukládají se proto ve formě $h(pswd_i)$, kde h je jednosměrná funkce. Díky její jednocestnosti není z této hodnoty, uložené v systému, možné odvodit vlastní hodnotu přihlašovacího hesla $pswd_i$. V reálných systémech se navíc používá metoda solení znesnadňující slovníkový útok nebo odhalení shodných passwordů.

uživatel	Jednosměrný obraz passwordu
Langerová	A085F5701D56B55CA5843ED952546A88ED6F80D9
Horváth	BDE45D6S52F5640A059CD5856454E4A488B40458
Bílá	014DA256B954CF65E156200C00A127521D45A44E
Vondráčková	014DA256B954CF65E156200C00A127521D45A44E
...	...

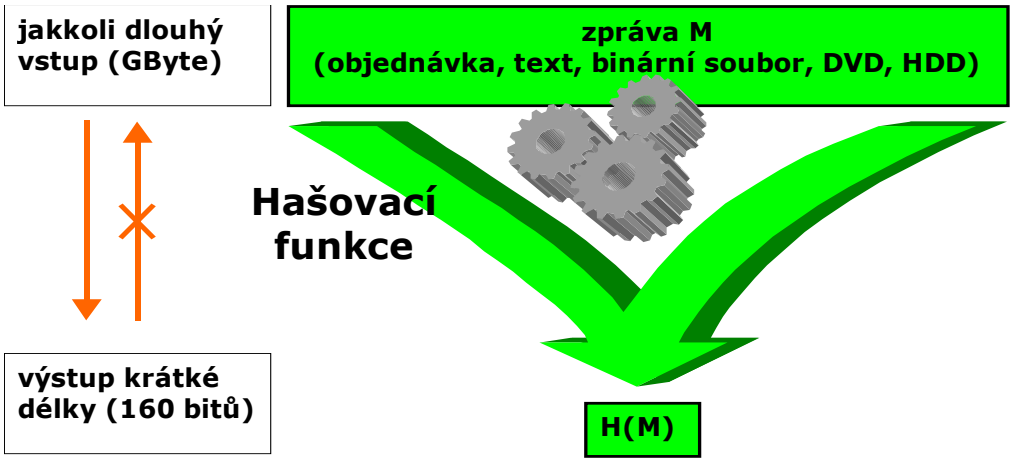
Obr.: Ukládání přihlašovacích hesel

3.2. Hašovací funkce – jednosměrné funkce s přídavnými vlastnostmi

Důležitou odnoží jednosměrných funkcí jsou **hašovací funkce**. Hašovací funkce kromě jednosměrnosti požadují i vlastnost „bezkoliznosti“ (nalezení dvou různých zpráv, které mají stejný obraz je výpočetně neuskutečnitelné) a délka jejich výstupu je pevně dána velikostí hašovacího kódu (tj. navíc mají vlastnost „komprese“ zprávy).

Hašovací funkce umí vytvořit z jakkoliv velkých dat jejich identifikátor - digitální otisk dat. Data lze nyní identifikovat (a to i z právního hlediska) podle jejich digitálního otisku majícího řádově obvykle pouze pár set bitů.

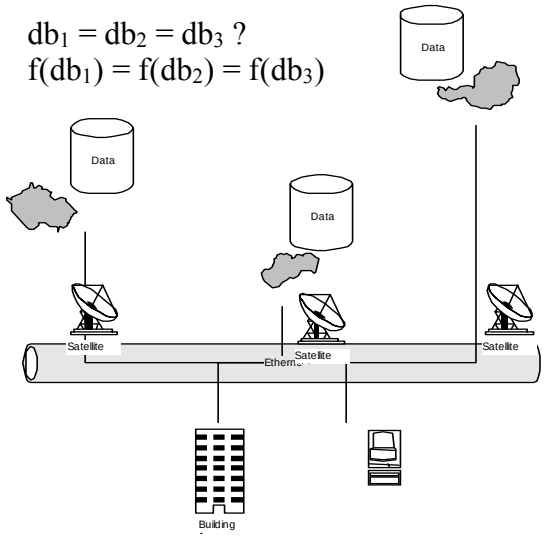
„Čistě matematicky“ těžko přijatelná a pochopitelná vlastnost (tvrzení), že jakkoliv dlouhá data lze jednoznačně identifikovat a ztotožnit je s jejich (například) 128 bitovou reprezentací, je zabudována do právního řádu mnoha států. Prolomení hašovací funkce může mít proto i právní následky. Kryptografové musí dosáhnout toho, aby prolomení hašovací funkce mělo mnohem menší riziko, než že se naleznou dva lidé se stejným otiskem prstu. Lidé přijali důkaz identity dat pomocí digitálního otisku stejně jako důkaz identity člověka podle jeho otisku prstu.



Obr.: Hašovací funkce

Příklad: Kontrola shody databází, otisky dat

Uveďme si příklad banky, která ukládá všechna data ze všech účtů klientů do databázového systému, který je on-line zálohován, takže se vyskytuje současně na třech, geograficky vzdálených místech Evropy. V určitý okamžik je nutné zjistit, zda tyto systémy jsou opravdu totožné. Proto na určitou dobu uvedeme databáze do klidu. Nyní bychom mohli klasicky přenášet z jednoho i druhého záložního centra jednotlivé sektory pevných disků nebo záznamy v databázi do centra a porovnávat je řetězec za řetězcem. Možná za několik dní nebo týdnů bychom mohli být hotovi, v závislosti na objemu dat a přenosové kapacitě spojení. Místo toho však stačí na všech třech místech vypočítat pouze hašový obraz databází nebo jednotlivých jejich částí (sekcí apod.) f(db) a přenést tyto obrazy k porovnání do centra. Na rozdíl od jejich vzorů se jedná jen o stovky bitů. Pokud jsou hodnoty $f(db_1)$, $f(db_2)$ a $f(db_3)$ shodné, máme jistotu, že se databáze nebo jejich části neliší ani o jeden bit. Digitální otisky dat působí stejně jako otisky prstů. V řadě zemí byly digitální otisky dat z hlediska identifikace dat nepřímo legislativně postaveny na roveň otisků prstů.

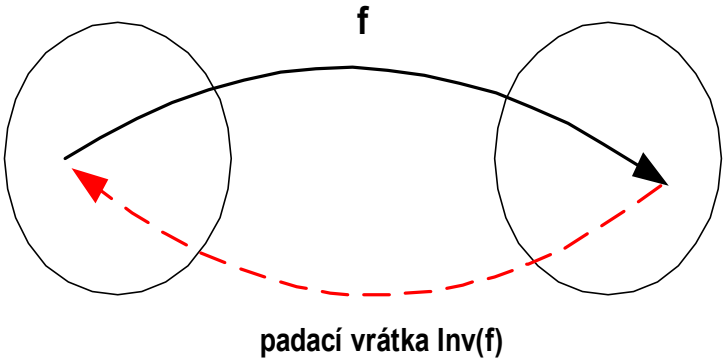


Obr.: Kontrola shodnosti vzdálených rozsáhlých databází

Hašovací funkce jsou použity v desítkách různých variantách.

3.3. Jednosměrné funkce s padacími vrátky

Druhou odnoží jednosměrných funkcí jsou **jednosměrné funkce s padacími vrátky**. Bývají také nazývány jednosměrné funkce se zadními vrátky, pokud je zřejmé, že se nejedná o pirátská vrátka do systému.



Obr.: Jednosměrné funkce s padacími vrátky

Pomůžeme si příměrem. Do hladomorny mohou být uvrženi všichni, ale jen ten, kdo zná tajný kámen, může po zatlačení na něj otevřít tajný východ. **Jednosměrné funkce s padacími vrátky způsobily revoluci v moderní kryptologii**. Jsou to takové jednosměrné funkce f, které lze invertovat jen za předpokladu znalosti jejich padacích vrátek. Tato podmínka se vztahuje nejen na transformace jako celek, ale i pro jednotlivé funkční hodnoty. Je to obdoba klíče k poštovní schránce. Všichni do ní mohou vhazovat dopisy, ale jen vlastník klíče od schránky ji může vybrat a přečíst si všechny dopisy.

Padací vrátka nazýváme privátním klíčem (d), který umí funkci f invertovat, tj. systematicky umět vypočítávat vzory od předložených obrazů. Příklady s poštovní schránkou a hladomornou ukazují také vlastnost **asymetrie** - vypočítat funkční hodnotu y = f(x) mohou všichni neboť je to pro všechny veřejně dostupný úkon, ale jen vlastník privátního klíče d může tuto akci invertovat, tj. vypočítat $f^{-1}(y)$.

Veřejnou cestu (E) charakterizuje *veřejný klíč* (e) a *privátní cestu* (D) ven *privátní klíč* (d). Protože jsou obě cesty různé, odpovídající funkce označujeme různě. Máme tedy transformace

$$y = f(x) = E_e(x)$$
a
$$x = f^{-1}(y) = D_d(y).$$

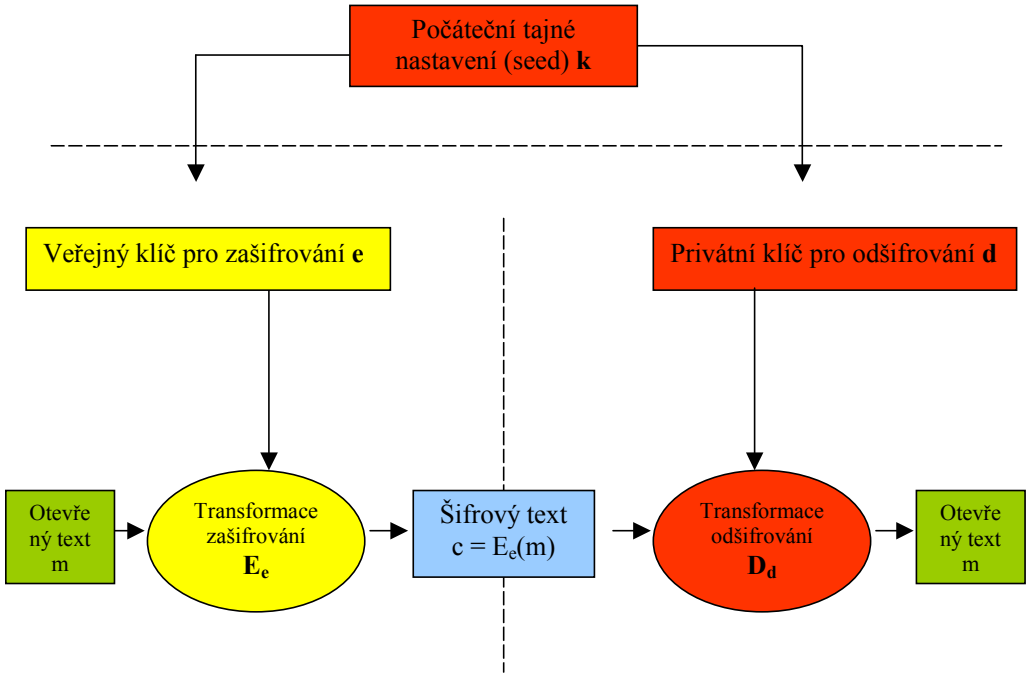
U jednocestných funkcí s padacími vrátky pak platí, že pro každý (útočníkovi neznámý) klíčový pár (e, d) a pro skoro všechna y je výpočetně nemožné nalézt takové x, že $y = E_e(x)$.

Poznámka: Pro ta y, které si útočník vytvoří sám, neboť pro libovolné x může vypočítat $y = E_e(x)$, je pochopitelně schopen inverzi $x = f^{-1}(y)$ určit. Také pro určité klíčové páry, které si vytvoří sám, je schopen z transformace E_e odvodit D_d. Definice proto musí obsahovat kvalitativní **neschopnost útočníka systematicky invertovat** zvolené nebo zadané obrazy jednosměrné funkce s padacími vrátky.

Poznámka. Zatímco u hašovacích funkcí byl základní požadavek bezpečnosti, aby žádná padací vrátka neexistovala, u asymetrických systémů je existence padacích vrátek jejich základní vlastností. Obě třídy funkcí mají vynikající odlišné vlastnosti.

3.4. Asymetrické kryptografické systémy

První aplikací jednocestných funkcí s padacími vrátky jsou **asymetrické kryptografické systémy**, z nichž nejprve uvedeme **šifrovací systémy s veřejným klíčem**. U historických **symetrických šifrovacích systémů** bylo nutné na obě strany komunikačního kanálu dopravit stejné klíče – odesílateli klíč pro zašifrování a příjemci (tentýž) pro odšifrování. U asymetrických kryptosystémů (kryptosystémů s veřejným klíčem), které jsou určeny pro šifrování, je možné klíč pro zašifrování poslat neutajeně nebo ho rovnou uveřejnit v telefonním seznamu. V tajnosti se uchovává jen klíč privátní. V praxi to funguje tak, že uživatel si oba dva klíče, které nazýváme klíčový pár, vygeneruje a veřejný klíč poskytne potenciálním komunikujícím stranám. Poté je už schopen od kohokoliv přijímat zašifrované zprávy, které je schopen rozšifrovat za použití privátního klíče. Ostatní uživatelé znají jen jednosměrnou funkci E_e a pro libovolnou zprávu x umí vytvořit $c = E_e(x)$, tj. zašifrovat ji. Nikdo, kromě příjemce, však neumí invertovat zachycený šifrový text, protože nezná padací vrátka.



Obr.: Asymetrický šifrovací systém

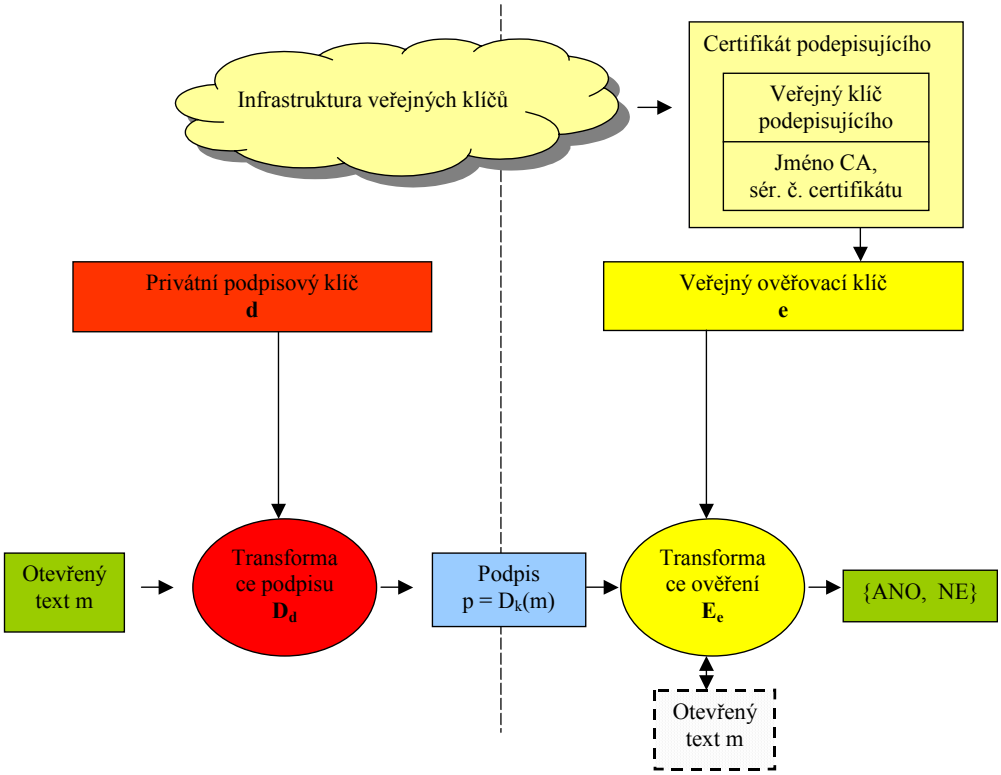
3.5. Digitální podpisy

Další aplikací jednocestných funkcí s padacími vrátky jsou digitální podpisy (obecně kryptografické systémy pro digitální podpis). V případě operací šifrování a odšifrování platilo $D_dE_e = I$. Uvažujme na okamžik, že transformace E_e a D_d jsou komutativní (nemusí tomu tak vždy být), tj. $E_eD_d = I$ a vysvětlíme princip digitálního podpisu.

Mějme nějaký dokument (smlouvu apod.) *m* a příslušný kryptosystém s veřejným klíčem (E_e, D_d). Dokument *m* podepíšeme tím, když k němu připojíme hodnotu podpisu $p = D_d(m)$. Proč? Každý si může veřejnou transformací E_e ověřit, že $E_e(p) = E_eD_d(m) = m$, tj. že *m* a *p* patří k sobě. Přitom hodnotu *p* z *m* mohl vytvořit pouze vlastník padacích vrátek - privátního podpisového klíče *d*. Aby to fungovalo správně, musí být ještě zajištěno, že transformace (E_e, D_d) patří opravdu danému člověku. Toto ujištění obvykle poskytuje nezávislá třetí strana, certifikační autorita, která spojuje identitu uživatele s jeho transformací E_e (tj. s jeho veřejným klíčem).

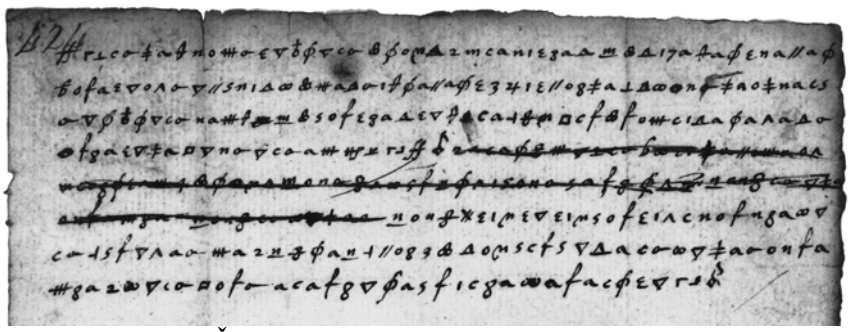
Poznamenejme na okraj, že i v této ilustraci principu digitálního podpisu musí *m* mít určitý formát (nemůže to být náhodný řetězec), jinak by útočník mohl pro libovolně zvolené *r* prezentovat $E_e(r)$ jako zprávu *m* a hodnotu *r* jako její podpis *p*, neboť platí $E_e(p) = m$.

V obecnějších schématech digitálního podpisu aplikujeme veřejnou transformaci E_e na dvojici (*m*, *p*) a obdržíme nikoli data (*m*) jako v předchozím výkladu, ale pouze prvek z množiny {Ano, Ne}, tj. rozhodnutí, zda podpis je platný nebo neplatný. Tak pracují schémata digitálního podpisu s dodatkem. Pokud je výsledkem přímo zpráva *m*, jsou to tzv. schémata digitálního podpisu s obnovou zprávy. Transformace E_e a D_d nemusí být vždy zašifrovací a odšifrovací transformace. V případech schémat digitálních podpisů hovoříme o **transformaci podepisovací** a **transformaci ověřovací**.



Obr.: Asymetrický systém pro podepisování zpráv

Poznámka. Digitální podpisy a nepopiratelnost
Digitální podpisy mají také onu praktickou vlastnost, že při případném sporu může třetí nezávislá strana rozhodnout, zda podpis je platný nebo nikoli, aniž by musela znát jakékoliv privátní klíče. To v éře symetrické kryptografie nebylo možné. Například u přijaté šifrované zprávy nebylo možné prokázat, zda ji skutečně vytvořil odesílatel nebo si ji vymyslel příjemce. Z důvodu symetrie případný soudce nemá možnost ani se znalostí tajného klíče rozhodnout, kdo zprávu vytvořil. Tuto službu je však možné i u symetrických technik zajistit pomocí nezávislé třetí strany. **Obecně ověření toho, zda se nějaká akce stala nebo ne, nezávislou třetí stranou, se nazývá nepopiratelnost.**
Na obrázku vidíme zachycený šifrovaný dopis Marie Stuartovny. Luštitel, který znal šifrovací klíč, vložil závěrečnou část zprávy, žádající sdělení jmen a adres spiklenců, spolupracujících s Marií Stuartovnou. Na základě toho byli spiklenci odhaleni.



Obr.: Šifrovaný dopis Marie Stuartovny [13]

Zajištění integrity přenášených (šifrovaných) zpráv je kupodivu velkým praktickým problémem mnoha moderních systémů a přetrvává do současnosti, stejně jako mýtus, že šifrování řeší všechny problémy bezpečnosti.

3.6. Další myšlenky moderní kryptografie

Zajímavých myšlenek moderní kryptografie je mnohem více, než jsme zmínili, určitě sem patří také výměna tajného klíče na nechráněném komunikačním kanálu, systém sdíleného tajemství, hraní karetních her na dálku bez možnosti podvádění, současný podpis smlouvy smluvními stranami najednou, protokoly výměny klíčů, vzájemné autentizace, průkaz nějaké znalosti bez jejího odhalení apod.

4. Typy bezpečnosti kryptografických systémů

Šifry mají sloužit k zajištění utajení zpráv, je tedy přirozený požadavek, aby útočník nemohl otevřený text získat, a to na základě jakéhokoliv reálného útoku, tj. například výše uvedenými čtyřmi základními typy útoků. Protože typů útoků přibývá, požadavky na systémy ochrany dat se zvyšují – měly by odolat jakémukoliv známému typu útoku. Proto nejspolehlivější míra bezpečnosti je založená na informačně-teoretickém přístupu.

4.1. Nepodmíněná bezpečnost a absolutní bezpečnost

Řekneme, že *kryptografický systém* je **nepodmíněně bezpečný**, jestliže zůstává bezpečný i přes to, že útočník může mít k dispozici neomezené materiální prostředky k luštění. Důvodem nepodmíněné bezpečnosti je to, že **luštitel nemá k jeho luštění dostatek *informací***.

Nepodmíněně bezpečné *šifrovací* systémy se často nazývají absolutně bezpečné (perfect secrecy). Pojem zavedl C.E Shannon a dokázal, že Vernamova šifra je absolutně bezpečná. Drtivá většina kryptografických systémů tuto vlastnost nemá.

4.2. Dokazatelná bezpečnost

Řekneme, že kryptografický systém je **dokazatelně bezpečný**, jestliže jeho prolomení je (v zásadě, přibližně, řádově) stejně náročné, jako řešení známého problému, jehož složitost je velmi vysoká (například problém faktorizace nebo problém diskrétního logaritmu).

4.3. Výpočetní bezpečnost

Řekneme, že kryptografický systém je **výpočetně bezpečný**, jestliže jeho prolomení je s použitím nejefektivnějších známých útoků natolik složité, že převyšuje výpočetní možnosti a zdroje útočníka.

V současné době se za výpočetně bezpečné pro komerční účely považují systémy s výpočetní složitostí minimálně X operací, kde X se pohybuje v intervalu $<2^{80}, 2^{128}>$. Pro vojenské použití se většinou požaduje hranice $X = 2^{256}$.

5. Literatura

[1] Claude E. Shannon, *A Mathematical Theory of Communication*, The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948
http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf

[2] Claude E. Shannon, *Communication Theory of Secrecy Systems*, Bell System Technical Journal, vol.28-4, pp. 656 - 715, 1949,
http://www.cs.ucla.edu/~jkong/research/security/shannon1949.pdf

[3] Domácí stránka DES-Crackeru na webu organizace EFF: http://www.eff.org/descracker/

[4] *FIPS PUB 198: HMAC*, NIST, http://csrc.nist.gov/CryptoToolkit/tkhash.html, viz též RFC 2104, http://www.rfc-editor.org/

[5] W. Diffie, M. Hellman, *New directions in Cryptography, IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 22, No. 6, 1976, pp. 644 - 654

[6] Ronald L. Rivest, Adi Shamir and Leonard M. Adleman, *A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems*, Communications of the ACM, Vol. 21, No. 2 (Feb. 1978), pp. 120 – 126

[7] AES, FIPS PUB 197, domovská stránka http://csrc.nist.gov/encryption/aes/

[8] David Kahn, *The Codebreakers*, Scribner, 1996

[9] DES, *Data Encryption Standard*, FIPS PUB 46-3, October 1999, http://csrc.nist.gov/CryptoToolkit/tkencryption.html

[10] International Association for Cryptologic Research, nezisková vědecká organizace, http://www.iacr.org/

[11] Systém Echelon, http://www.heise.de/tp/english/inhalt/te/6929/1.html

[12] Dorothy Denning, *Cryptography and Data Security*, Addison-Wesley, 1982

[13] Simon Singh: *Kniha kódů a šifer*, český překlad, Argo a Dokořán, 2003, http://www.simonsingh.net/Crypto_Corner.html

[14] Fred Piper, Sean Murphy: *Kryptografie, Průvodce pro každého*, Dokořán, 2006

[15] PKCS#5 v2.0: *Password-Based Cryptography Standard*, RSA Labs, March 25, 1999

[16] Jiří Janeček: *Rozluštěná tajemství, Luštitelé, dešifranti kódy a odhalení*, XYZ nakladatelství, 2006

[17] Jiří Janeček: *Gentlemani nečtou cizí dopisy*, BOOKS, Brno, 1998

[18] Jiří Janeček: *Odhalená tajemství šifrovacích klíčů minulosti*, Naše vojsko, Praha, 1994

[19] Jiří Janeček: *Válka šifer. Výhry a prohry československé vojenské rozvědky (1939-1945)*, Olomouc, Votobia 2001.

[20] Pavel Vondruška: *Kryptologie, šifrování a tajná písma*, edice OKO, Albatros, 2006