Reverzní inženýrství

2. Analýza toku kódu

Ing. Tomáš Zahradnický, EUR ING, Ph.D.
Ing. Josef Kokeš

FACULTY
OF INFORMATION
TECHNOLOGY
CTU IN PRAGUE

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií
Katedra počítačových systémů

Verze 2019-10-03

Obsah I

Rozklad funkce do základních bloků

Nyní, když máme zanalyzovaný zásobník a identifikovány lokální proměnné, začneme s analýzou toku kódu. Nejprve vytvoříme graf toku kódu (Control Flow Graph, CFG), a ten použijeme pro analýzu jazykových konstruktů jako **if-then-else** nebo smyček **do-while/for/while**. Vytváření CFG začíná rozložením kódu na základní bloky.

Základní blok [MI-GEN]

Základní blok (Basic Block, BB) je maximální posloupnost po sobě jdoucích instrukcí, do které lze vstoupit jedině první instrukcí posloupnosti a opustit ji jedině poslední instrukcí.

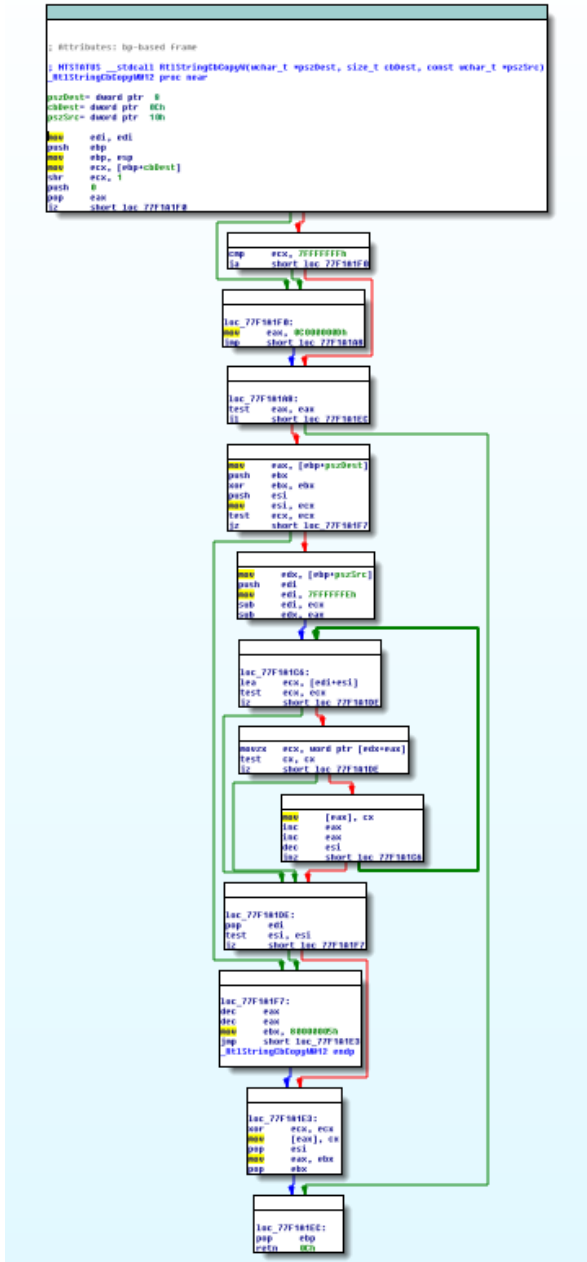
Tvorba grafu toku kódu

Jakmile máme funkci rozdělenou na základní bloky, můžeme vytvořit graf toku kódu (CFG), kde:

- každý základní blok je vrcholem;
- tok kódu vytváří orientované hrany z jednoho BB do druhého.

CFG nám dává prvotní vysokoúrovňový náhled na funkci, kterou analyzujeme.

CFG slouží jako jeden ze vstupů do dekompilátoru, který se v něm snaží rozpoznat známé vzorce a rekonstruovat vysokoúrovňový kód. Vytvoření CFG nemusí být vždy zcela přímočaré, zejména pokud jsou použity obfuskační techniky (např. neprůhledné predikáty).



Příkaz If I

Bez instrukce CMP/TEST

Toto je nejjednodušší varianta podmíněného skoku. Příkaz má tuto strukturu:

C

```
if( podmínka )
  výraz;
```

Pseudokód v assembleru

```
  aritmetická operace počítající podmínku
  jxx přeskočit
  výraz
přeskočit:
```

```
77e3c798 kernel32!StringCbPrintfW
77e3c798  mov  edi, edi          // 2-byte NOP pro hot patching
77e3c79a  push ebp
77e3c79b  mov  ebp, esp
77e3c79d  mov  ecx, [ebp+c]      // Načti 2. parametr do ECX
77e3c7a0  shr  ecx, 1            // Neznaménkové dělení 2, nastaví ZF a CF
77e3c7a2  push 0
77e3c7a4  pop  eax

// Instrukce shr nastaví/smaže ZF, pokud výsledek je/není nula
// Push a pop nemění příznaky
77e3c7a5  jz   short loc_77e3c7e5
...
77e3c7e5  mov  eax, 80070057h    // HRESULT_FROM_WIN32( ERROR_INVALID_PARAMETER )
77e3c7ea  jmp  short loc_77e3c7af
```

Příkaz If II

S instrukcí CMP/TEST

Příkaz má stejnou strukturu jako minule, ale pro nastavení příznaků v registru EFL používá instrukci `cmp` nebo `test`.

C

```
if( podmínka )
  výraz;
```

Pseudokód v assembleru

```
  aritm. operace počítající operand podmínky
  cmp instr. nastaví příznaky na základě podmínky
  jxx přeskočit
  výraz
přeskočit:
```

```
77e3c798 kernel32!StringCbPrintfW
...
77e3c7a0  shr  ecx, 1
77e3c7a2  push 0
77e3c7a4  pop  eax
77e3c7a5  jz   short loc_77e3c7e5

// Instrukce cmp nastaví příznaky podle výsledku porovnání
77e3c7a7  cmp  ecx, 7fffffffh
77e3c7ad  ja   short loc_77e3c7e5
...
77e3c7e5  mov  eax, 80070057h   // HRESULT_FROM_WIN32( ERROR_INVALID_PARAMETER )
77e3c7ea  jmp  short loc_77e3c7af
```

Příkaz if-then-else

Tento příkaz přidává k předchozímu alternativní větev.

C

```
if( podmínka )
  výraz1;
else
  výraz2;
```

kód v assembleru

```
77e2a8cd kernel32!UIntPtrToInt
77e2a8cd  mov  edi, edi
77e2a8cf  push ebp
77e2a8d0  mov  ebp, esp
77e2a8d2  mov  eax, [ebp+8]
77e2a8d5  cmp  eax, 7fffffffh
77e2a8da  ja   loc_77e5547c
77e2a8e0  mov  ecx, [ebp+c]
77e2a8e3  mov  [ecx], eax
77e2a8e5  xor  eax, eax // Propadne do společné části

77e2a8e7 loc_77e2a8e7:
77e2a8e7  pop  ebp
77e2a8e8  retn 8

77e5547c loc_77e5547c:
77e5547c  mov  eax, [ebp+c]
77e5547f  or   dword ptr [eax], 0ffffffffh
77e55482  mov  eax, 80070216h // HRESULT_FROM_WIN32( ERROR_ARITHMETIC_OVERFLOW )
77e55487  jmp  loc_77e2a8e7   // Skok zpět
```

Smyčky I

Smyčka while

C

```
while( podmínka )
  tělo;
```

Kód v assembleru

```
00401561   push   ebp
00401562   mov    ebp,esp
00401564 loc_0401564:
00401564   mov    eax,dword ptr [ebp+c]
00401567   movsx  ecx,byte ptr [eax]
0040156a   test   ecx,ecx // Test podmínky
0040156c   je     loc_040158c // Nesplněno, skok za smyčku
0040156e   mov    edx,dword ptr [ebp+8]
00401571   mov    eax,dword ptr [ebp+c]
00401574   mov    cl,byte ptr [eax]
00401576   mov    byte ptr [edx],cl
00401578   mov    edx,dword ptr [ebp+8]
0040157b   add    edx,1
0040157e   mov    dword ptr [ebp+8],edx
00401581   mov    eax,dword ptr [ebp+c]
00401584   add    eax,1
00401587   mov    dword ptr [ebp+c],eax
0040158a   jmp    loc_0401564 // Skok na další iteraci
0040158c loc_040158c:
0040158c   pop    ebp
0040158d   ret
```

Smyčky II

Smyčka do-while

C

```
do {
  tělo;
} while(podmínka);
```

Kód v assembleru

```
00401340   mov    edx,dword ptr [esp+4]
00401344   mov    eax,dword ptr [esp+8]
00401348 loc_0401348:
00401348   movzx  ecx,byte ptr [eax]
0040134b   lea    eax,[eax+1]
0040134e   mov    byte ptr [edx],cl
00401350   movzx  ecx,byte ptr [eax-1]
00401354   test   cl,cl          // Test podmínky
00401356   jne    loc_0401348h // Skok na další iteraci
00401358   ret
```

Všimněte si, že tato funkce nevytvořila rámec zásobníku. Na parametry je odkazováno přímo přes registr `ESP`. Tento přístup vede na kratší a rychlejší kód, ale každá instrukce `push` mění offset parametrů a lokálních proměnných na zásobníku.

Vynechání rámce zásobníku si lze vyžádat během kompilace pomocí `-fomit-frame-pointer` v GCC nebo `/Oy` v MSVC.

Smyčky III

Smyčka for

C

```
for(
  inicializace;
  podmínka;
  inkrement
)
{
    tělo;
}
```

Kód v assembleru

```
00401280   mov    ecx,dword ptr [esp+4]
00401284   xor    eax,eax
00401286   test   ecx,ecx          // Vstoupit do smyčky?
00401288   jle    loc_040129c      // Ne - skok za smyčku
0040128a   lea    ebx,[ebx]

00401290 loc_0401290:
00401290   mov    dword ptr [eax*4+403020h],eax
00401297   inc    eax              // Provést inkrementaci
00401298   cmp    eax,ecx          // Test podmínky
0040129a   jl     loc_0401290      // Skok na další iteraci

0040129c loc_040129:
c0040129c  ret
```

V příkazu `for` může být kterákoliv z částí prázdná. To nám dovolí zkonstruovat `while` smyčku vynecháním inicializace a inkrementu. Generovaný kód by pak byl totožný jako u smyčky `while`. Z toho důvodu nelze rozpoznat, jestli původní kód používal `for` nebo `while`. Dekompilátor obvykle preferuje jeden z nich a ten vždy použije.

Switch I

s použitím sub/dec

C

```
switch( arg ) {
  case 1:
    výraz_1;
    break;

  case 2:
    výraz_2;
    break;

  case 4:
    výraz_4;
    break;

  default:
    výraz_n;
    break;
}
```

Kód v assembleru

```
00401000   mov    eax, [ebp+8]
00401004   dec    eax
00401005   jz     short loc_401042
00401007   dec    eax
00401008   jz     short loc_401031
0040100A   sub    eax, 2
0040100D   jz     short loc_401020
0040100F   push   offset defaultCase
00401014   call   ds:printf
0040101A   add    esp, 4
0040101D   xor    eax, eax          // vrátit 0, duplikováno
0040101F   retn                     // konec funkce, duplikováno
00401020   push   offset třiParametry
00401025   call   ds:printf
0040102B   add    esp, 4
0040102E   xor    eax, eax          // vrátit 0, duplikováno
00401030   retn                     // konec funkce, duplikováno
00401031   push   offset jedenParametr
00401036   call   ds:printf
0040103C   add    esp, 4
0040103F   xor    eax, eax          // vrátit 0, duplikováno
00401041   retn                     // konec funkce, duplikováno
00401042   push   offset bezParametrů
00401047   call   ds:printf
0040104D   add    esp, 4
00401050   xor    eax, eax          // vrátit 0, duplikováno
00401052   retn                     // konec funkce, duplikováno
```

Switch II

s použitím instrukce cmp

C

```
switch( arg ) {
  case 1:
    výraz_1;
    break;

  case 2:
    výraz_2;
    break;

  case 3:
    výraz_3;
    break;

  case 4:
    výraz_4;
    break;

  default:
    výraz_n;
    break;
}
```

Kód v assembleru

```
8048389    mov    0x8(%ebp),%eax    // Načíst arg. do EAX
804838c    cmp    $0x2,%eax
804838f    je     0x80483df
8048391    jle    0x80483c0
8048393    cmp    $0x3,%eax
8048396    je     0x80483b2
8048398    cmp    $0x4,%eax
804839b    nop
804839c    lea    0x0(%esi,%eiz,1),%esi
80483a0    jne    0x80483d1
80483a2    movl   $0x8048595,(%esp)
80483a9    call   0x8048350 <puts@plt>
80483ae    xor    %eax,%eax         // Vrátit 0;
80483b0    leave
80483b1    ret
80483b2    movl   $0x8048589,(%esp)
80483b9    call   0x8048350 <puts@plt>
80483be    jmp    0x80483ae
80483c0    dec    %eax              // I zde se běžně používá instr. dec/sub!
80483c1    jne    0x80483d1
80483c3    movl   $0x8048570,(%esp)
80483ca    call   0x8048350 <puts@plt>
80483cf    jmp    0x80483ae
80483d1    movl   $0x80485a1,(%esp)
80483d8    call   0x8048350 <puts@plt>
80483dd    jmp    0x80483ae
80483df    movl   $0x804857e,(%esp)
80483e6    call   0x8048350 <puts@plt>
80483eb    jmp    0x80483ae
```

Switch III

se skokovou tabulkou

C

```
switch( arg ) {
  case 1:
    výraz_1;
    break;

  case 2:
    výraz_2;
    break;

  case 3:
    výraz_3;
    break;

  case 4:
    výraz_4;
    break;

  default:
    výraz_n;
    break;
}
```

Skoková tabulka

```
00401068 dd offset loc_401011
0040106C dd offset loc_401022
00401070 dd offset loc_401033
00401074 dd offset loc_401044
```

Kód v assembleru

```
00401000   mov    eax, [ebp+8]
00401004   dec    eax
00401005   cmp    eax, 3
00401008   ja     short loc_401055
0040100A   jmp    ds:off_401068[eax*4]   // Skok na adresu dle tab.
00401011   push   offset bezParametrů
00401016   call   ds:printf
0040101C   add    esp, 4
0040101F   xor    eax, eax          // vrátit 0, duplikováno
00401021   retn                     // konec funkce, duplikováno
00401022   push   offset jedenParametr
00401027   call   ds:printf
0040102D   add    esp, 4
00401030   xor    eax, eax          // vrátit 0, duplikováno
00401032   retn                     // konec funkce, duplikováno
00401033   push   offset dvaParametry
00401038   call   ds:printf
0040103E   add    esp, 4
00401041   xor    eax, eax          // vrátit 0, duplikováno
00401043   retn                     // konec funkce, duplikováno
00401044   push   offset třiParametry
00401049   call   ds:printf
0040104F   add    esp, 4
00401052   xor    eax, eax          // vrátit 0, duplikováno
00401054   retn                     // konec funkce, duplikováno
00401055   push   offset defaultCase
0040105A   call   ds:printf
00401060   add    esp, 4
00401063   xor    eax, eax          // vrátit 0, duplikováno
00401065   retn                     // konec funkce, duplikováno
```

Shrnutí

Nyní bychom měli:

- rozumět prologu a epilogu;
- rozumět rámci zásobníku a jeho struktuře;
- chápat, co je to základní blok;
- umět zkonstruovat graf toku kódu funkce, a
- rozumět tomu, jak jsou jazykové konstrukty C kompilovány do assembleru, a dokázat je přeložit zpět do čitelného kódu s výšší úrovní abstrakce.

Nyní se detailněji podíváme na to, co dělá běhové prostředí při spuštění programu. To zahrnuje:

- co je to vstupní bod a k čemu slouží;
- volání inicializačních funkcí;
- volání funkce `main`;
- volání ukončovacích funkcí.

Hlavní vstupní bod

Funkce `main`/`wmain`/`_tmain` **nejsou** vstupním bodem do programu. Skutečným vstupním bodem je funkce, jejíž relativní virtuální adresa (RVA) je uvedena v poli `AddressOfEntryPoint` v Optional Header PE souboru.

Vstupní bode, kdepak jsi?

```
// Přetypovat HMODULE na ukazatel na začátek PE image v paměti
HMODULE             hSelf = GetModuleHandle(NULL); // = LoadLibrary, ...

// Na začátku image je MZ... - DOSová hlavička
PIMAGE_DOS_HEADER   pDosHeader = (PIMAGE_DOS_HEADER)hSelf;

// Nová hlavička se nachází e_lfanew bajtů od začátku image
PIMAGE_NT_HEADERS32 pNTHeaders = (PIMAGE_NT_HEADERS)(((BYTE*)pDosHeader) + pDosHeader->e_lfanew);

// Nakonec přečteme relativní virtuální adresu vstupního bodu a přičteme ji k začátku image
void*               pfnEntryPoint = (void*)(((BYTE*)pDosHeader)
                                    + pNTHeaders->OptionalHeader.AddressOfEntryPoint);

printf("Adresa vstupního bodu: %p\n", pfnEntryPoint);
```

```
Adresa vstupního bodu: 00402390
```

Měli bychom se ptát, **kdo** vytváří vstupní bod, **odkud je volán**, a **proč** to není funkce `main`?

Kdo volá vstupní bod?

To už jsme viděli v přednášce 1.

```
Adresa vstupního bodu: 00402390
```

Call stack pro vstupní bod

```
004136C0  Tokens.exe!main(int argc, const char* * argv) // Vstupní bod v C
00402259    Tokens.exe!__tmainCRTStartup()
0040239D      Tokens.exe!mainCRTStartup()                // Vstupní bod programu
75C4EE0A        kernel32.dll!@BaseThreadInitThunk@12()
775A37C4          ntdll.dll!___RtlUserThreadStart@8()
775A37A3            ntdll.dll!__RtlUserThreadStart@8()
```

Kdo vytváří vstupní bod programu?

Vstupní bod programu poskytuje runtime knihovna jazyka. Nalezneme ho v `crtexe.c`:

```
int mainCRTStartup( void )
{
  /*
   * The /GS security cookie must be initialized before any exception
   * handling targetting the current image is registered. No function
   * using exception handling can be called in the current image until
   * after __security_init_cookie has been called.
   */
  __security_init_cookie();

  return __tmainCRTStartup();
}
```

Poznámky

Jméno této funkce je závislé na nastavení programu (zda používáme "Use Unicode Character Set", tj. máme `#define UNICODE 1`) a na tom, zda se používá `main` nebo `WinMain`. Možná jména jsou:

1. mainCRTStartup
2. wmainCRTStartup
3. WinMainCRTStartup
4. wWinMainCRTStartup

__tmainCRTStartup()

Každý program v zkompilovaný MSVC začíná tímto kódem:

```
__declspec(noinline) int __tmainCRTStartup( void )
{
  __try {
    ...
    // Run initializers placed into .crt$xia ... .crt$xiz segs (merged into .rdata)
    // __xi_a and __xi_z bound initializer data start and end
    // calls pre_c_init(), by default initialize C, sets default FPU mode,
    // sets the unhandled exception filter to __CxxUnhandledExceptionFilter
    if( _initterm_e( __xi_a, __xi_z ) != 0 )
      return 255;

    // Run initializers placed into .crt$xca ... .crt$xcz segs (placed into .rdata)
    // calls pre_cpp_init(), sets atexit(_RTC_Terminate), prepares parameters for main,
    // calls all constructors of static objects and registers a stub calling appropriate
    // destructors using the atexit function.
    _initterm( __xc_a, __xc_z );

    // Call whichever main function we have!
    mainret = main(argc, argv, envp);
    ...
    exit(mainret);
  }
  __except( _XcptFilter( GetExceptionCode(), GetExceptionInformation() ) ) {
    // _XcptFilter terminates, inaccessible
    mainret = GetExceptionCode();
    ExitProcess(mainret);
  }
  return mainret;
}
```

Inicializační kód

Kompilátor za nás odvede množství práce a my se nemusíme starat o runtime detaily. Pokud chceme použít globální C++ třídu, stačí napsat:

Příklad kódu s inicializovanou třídou

```
// Globální inicializovaná třída
Initializer g_InitializerClassInstance;

class Initializer {
  public:
    Initializer() {
      printf("Pozdrav z kódu před main.\n");
    }

    ~Initializer() {
      printf("Pozdrav z kódu za main.\n");
    }
};
```

Pozn.: GCC používá speciální klíčová slova `__attribute__((constructor))` a `__attribute__((destructor))`; to dovoluje použít inicializátory i z C a nechat zavolat funkci během inicializační nebo ukončovací fáze běhu programu.

Ruční inicializace

Pokud potřebujeme jemnější kontrolu, musíme použít konstrukty `#pragma`.

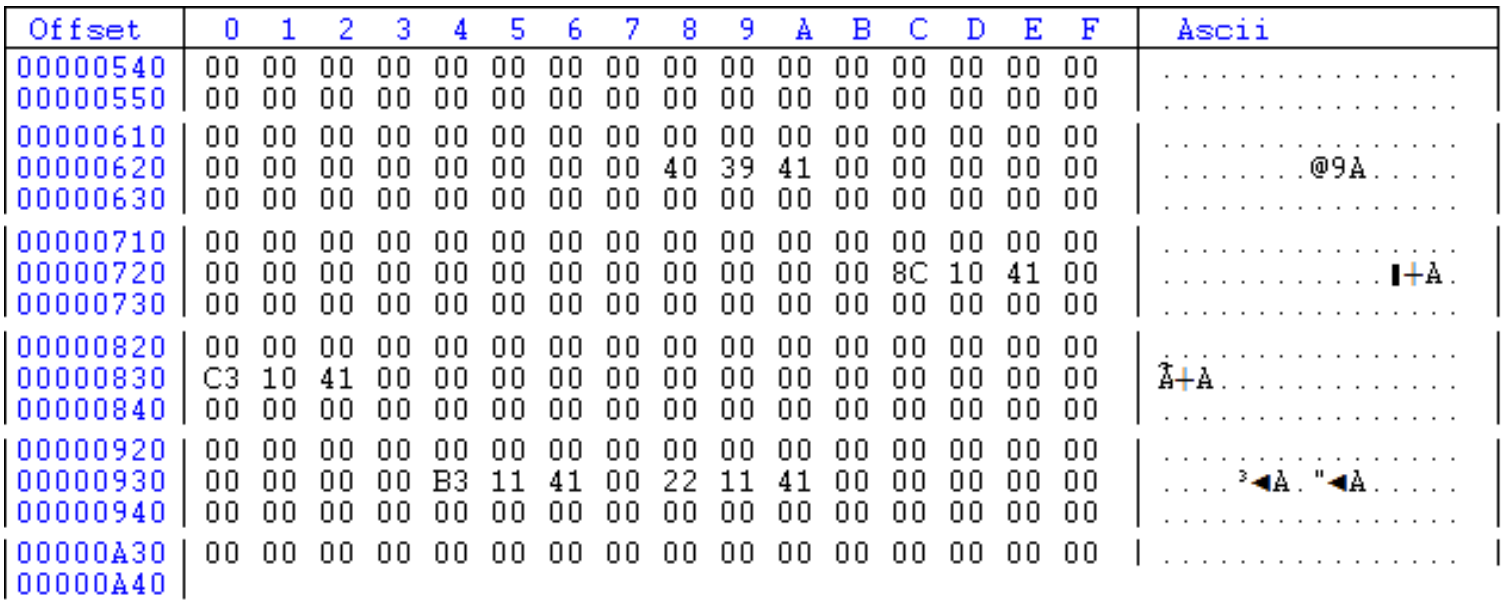
Detailní řízení inicializace

```
#pragma section(".CRT$XIB")
__declspec(allocate(".CRT$XIB")) int (*g_MyInit_PreC)(void) = MyInit_PreC;

#pragma section(".CRT$XIY")
__declspec(allocate(".CRT$XIY")) int (*g_MyInit_PostC)(void) = MyInit_PostC;

// XCT = pre static objects constructors
// XCU = post static objects constructors
#pragma section(".CRT$XCB")
__declspec(allocate(".CRT$XCB")) void (*g_MyInit_PreCPP)(void) = MyInit_PreCPP;

#pragma section(".CRT$XCZ")
__declspec(allocate(".CRT$XCZ")) void (*g_MyInit_PostCPP)(void) = MyInit_PostCPP;
```

Inicializátory v sekcích `.CRT$XIxxx` mohou vracet hodnoty. Nenulová návratová hodnota způsobí, že se inicializace programu přeruší a program skončí s chybou 255.

Kde jsou inicializátory umístěny? I

Funkce `_initterm_e` a `_initterm` mají na vstupu ukazatele na začátek a konec části sekce `.rdata`, následující po IAT. Podívejme se na obsah této sekce:



Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	Ascii
00000540	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000550	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000610	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000620	00	00	00	00	00	00	00	00	40	39	41	00	00	00	00	00	.....@9A.....
00000630	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000710	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000720	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	8C	10	41	00	.....▌+A.
00000730	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000820	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000830	C3	10	41	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	Ã+A.....
00000840	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000920	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000930	00	00	00	00	B3	11	41	00	22	11	41	00	00	00	00	00	....³◀A."◀A....
00000940	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000A30	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	.....
00000A40																	

Obrázek: `__xi_a` až `__xi_z` v debug verzi programu.

Každá položka v tomto seznamu reprezentuje ukazatel na inicializační funkci v jazyku C:

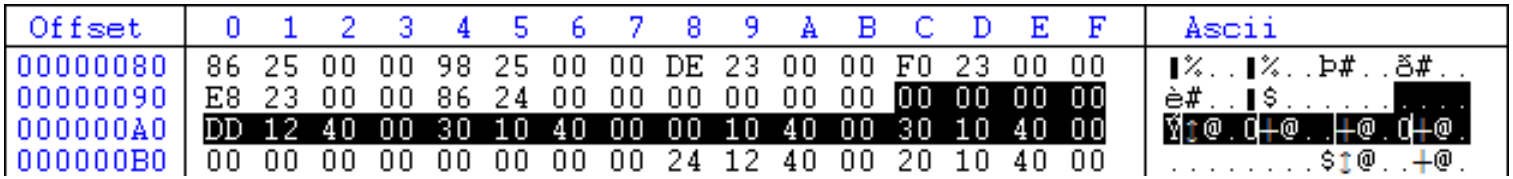
- 413940 `pre_c_init`
- 41108c `jmp MyInit_PreC` pro debug, respektive `MyInit_PreC` pro release
- 4110c3 `jmp __atonexitinit` pro debug, resp. `__atonexitinit` pro release
- 4111b3 `jmp MyInit_PostC` pro debug, resp. `MyInit_PostC` pro release
- 411122 `jmp ___CxxSetUnhandledExceptionFilter` pro debug, resp. přímý skok v release

Kde jsou inicializátory umístěny? II

```
int _initterm_e(int (**pSegStart)(void), int (**pSegEnd)(void))
{
  int initResult = 0;

  while ( pSegStart < pSegEnd && !initResult )
  {
    if ( *pSegStart )
      initResult = (*pSegStart)();

    ++pSegStart;
  }

  return initResult;
}
```

Pole obsahuje ukazatele na inicializační funkce. Pokud ukazatel není null, bude zavolán. Všimněte si, že se volání C-inicializátorů ukončí v okamžiku, kdy první inicializátor vrátí nenulovou hodnotu (na rozdíl od C++ inicializátorů).

Kde jsou inicializátory umístěny? III



Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	Ascii
00000080	86	25	00	00	98	25	00	00	DE	23	00	00	F0	23	00	00	▮%..▮%..Þ#..ð#..
00000090	E8	23	00	00	86	24	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	è#..▮$.....
000000A0	DD	12	40	00	30	10	40	00	00	10	40	00	30	10	40	00	Ý↕@.0►@..►@.0►@.
000000B0	00	00	00	00	00	00	00	00	24	12	40	00	20	10	40	00	........$↕@..►@.

Obrázek: `__xc_a` až `__xc_z` v release verzi.

Každá položka v tomto seznamu reprezentuje ukazatel na inicializační funkci v jazyku C++:

```
000000    -
4012dd    pre_cpp_init
401030    MyInit_PreCPP
401000    Initializer constructor stub
401020    MyInit_PostCPP
```

```
00401000  mov   ecx,4031B8h // Ukazatel na this
00401005  call  Initializer::Initializer
0040100A  push  401930h     // adresa volání destruktoru
0040100F  call  atexit      // zaregistrovat k volání před ukončením programu
00401014  pop   ecx         // vyčištění zásobníku
00401015  ret
...
00401930  mov   ecx,4031B8h // Ukazatel na this
00401935  jmp   Initializer::~Initializer
```

Terminátory I

Viděli jsme, že byla masivně používána funkce `atexit` k zaregistrování funkcí, které při ukončení programu zavolají destruktory. `Atexit` využívá dynamicky alokované pole, na které ukazují dva zakódované globální ukazatele `__onexitbegin` a `__onexitend`. Do tohoto pole jsou umístěny zakódované ukazatele na funkce. Když je zavolána C funkce `exit` (ale ne `TerminateProcess`), jsou postupně volány funkce zaregistrované pomocí `atexit`. Pokud navíc používáme staticky přilinkovanou runtime knihovnu, zavolají se zde i před-ukončovací a ukončovací funkce zaregistrované v segmentech `.crt$xpXXX` a `.crt$xtXXX`, obdobně jako u inicializátorů.

Terminátory II

Funkce atexit (atonexit.c)

```
int __cdecl atexit(void (__cdecl *func)()) {
  return _onexit(func) == NULL ? -1 : 0;
}

_onexit_t __cdecl _onexit(_onexit_t Func) {
  int (__cdecl *pfnFunc)();

  _lockexit();
  pfnFunc = _onexit_nolock(Func);
  _unlockexit();
  return pfnFunc;
}
```

Funkce exit (crt0dat.c)

```
void __cdecl exit( int code ) {
  doexit(code, 0, 0); /* full term, kill process */
}
```

Terminátory III

Pseudokód funkce doexit (crt0dat.c)

```
void __cdecl doexit(int code, int quick, int retcaller) {
  if ( !retcaller && check_managed_app() ) // V managovaném procesu zavolej CorExitProcess
    __crtCorExitProcess(uExitCode);
  ...
  if ( !quick ) {
    onexitbegin = DecodePointer(__onexitbegin); onexitend = DecodePointer(__onexitend);
    while ( 1 ) { // Iteruj přes všechny ukončovací funkce
      // Najdi první "nenulovou" funkci
      while ( --onexitend >= onexitbegin && *onexitend == EncodePointer(NULL) );
      // Ukončovací podmínka
      if ( onexitend < pfn__onexitbegin ) break;
      // Dekóduj, zavolej, a odstraň ze seznamu
      pfnExitProc = (void (*)(void))DecodePointer(*onexitend);
      *onexitend = EncodePointer(0);
      pfnExitProc();
      ...
    }
    #ifndef CRTDLL
      _initterm(__xp_a, __xp_z); // Zavolej před-ukončovací funkce
    #endif
  }
  #ifndef CRTDLL
    _initterm(__xt_a, __xt_z); // Zavolej ukončovací funkce
  #endif
  ...
  if ( ret ) return;
  if ( !ret ) __crtExitProcess(code);
}
```

Kódování ukazatelů

Ukazatele na zásobníku nebo na haldě by mohly být přepsány a zneužity ke spuštění útočníkova kódu. API `EncodePointer` a `DecodePointer` tomu brání. Jejich volání jsou interně mapována na `RtlEncodePointer` resp. `RtlDecodePointer` API z NTDLL.DLL:

```
77F1A290    db 5 dup(90h)
77F1A295 RtlEncodePointer:
77F1A295    mov  edi, edi
77F1A297    push ebp
77F1A298    mov  ebp, esp
77F1A29A    push ecx
77F1A29B    push 0                  ; ReturnLength
77F1A29D    push 4                  ; ProcessInformationLength
77F1A29F    lea  eax, [ebp+ProcessInformation]
77F1A2A2    push eax                ; ProcessInformation
77F1A2A3    push 24h                ; ProcessInformationClass = process cookie
77F1A2A5    push 0FFFFFFFFh         ; ProcessHandle = GetCurrentProcess()
77F1A2A7    call _ZwQueryInformationProcess@20
77F1A2AC    test eax, eax
77F1A2AE    jl   loc_77F4276F
77F1A2B4    mov  eax, [ebp+ProcessInformation]
77F1A2B7    mov  cl, al
77F1A2B9    xor  eax, [ebp+arg_0]
77F1A2BC    and  cl, 1Fh
77F1A2BF    ror  eax, cl
77F1A2C1    leave
77F1A2C2    retn 4
```

Podpora pro Hot Patching

Na začátku poslední funkce jste si mohli všimnout instrukce `mov edi,edi`. Před začátkem funkce je navíc 5 instrukcí `nop`. Tyto instrukce zajišťují podporu pro hot patching, mechanismus, který nám dovoluje snadno upravit funkci za běhu bez nutnosti restartovat aplikaci. Poskytují 7 bajtů volného místa, které můžeme použít pro upravenou funkci. Instrukce `mov edi,edi` bude nahrazena instrukcí `jump short`, která skočí na začátek nopů, kam bude vložena instrukce `jmp [addr]`. Kód pak vypadá takto:

Neupravený kód

```
     90    nop
     90    nop
     90    nop
     90    nop
     90    nop
začátek_funkce:
  8B FF    mov edi,edi
     55    push ebp
  8B EC    mov ebp,esp
```

Upravený kód

```
skok_na_upravenou_funkci:
  E9 xx xx xx xx    jmp dword ptr [&upravená_funkce]
začátek_funkce:
           EB F9    jmp short skok_na_upravenou_funkci
              55    push ebp    // Nedosažitelné
           8B EC    mov ebp,esp // Nedosažitelné
```

Call na instrukci jmp? I

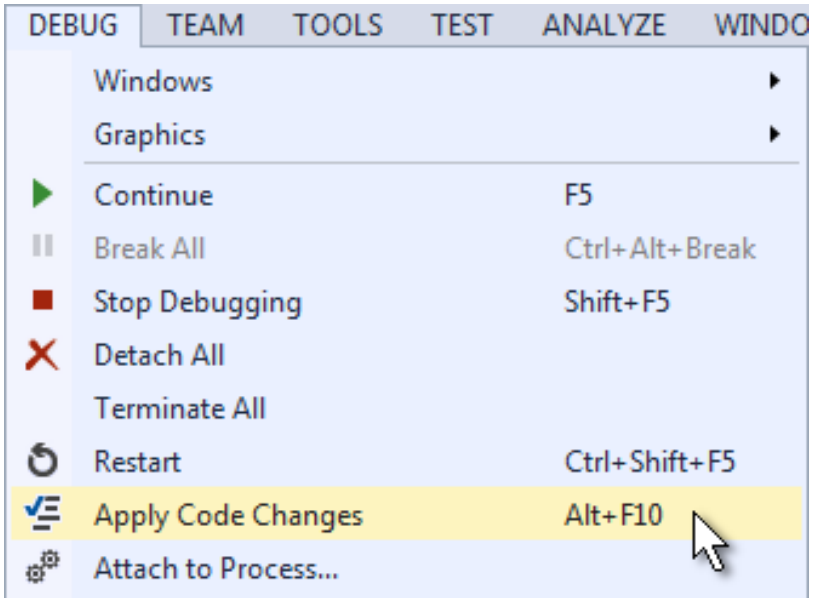
V debugovací verzi byly všechny funkce volány přes další úroveň nepřímého skoku. Co to mělo za smysl?

```
main:
00413130  push  ebp
00413131  mov   ebp,esp
00413133  sub   esp,48h
00413136  push  ebx
00413137  push  esi
00413138  push  edi
00413139  mov   dword ptr [result],0
00413140  call  PEDUMP (4110BEh)

...
PEDUMP_real:
004125F0  push  ebp
004125F1  mov   ebp,esp
004125F3  sub   esp,50h
...
```

```
_GetCurrentProcess@0:
004110B4  jmp   GetCurrentProcess (4131D0h)

___report_securityfailure:
004110B9  jmp   __report_securityfailure (413640h)

PEDUMP:
004110BE  jmp   PEDUMP_real (4125F0h)

___atonexitinit:
004110C3  jmp   __atonexitinit (413220h)

___report_securityfailureEx:
004110C8  jmp   __report_securityfailureEx (413750h)

__FindPESection:
004110CD  jmp   _FindPESection (413FC0h)

MyInit_PreCPP:
004110D2  jmp   MyInit_PreCPP (412340h)

_LoadLibraryW@4:
004110D7  jmp   LoadLibraryW (4131EEh)

__configthreadlocale:
004110DC  jmp   _configthreadlocale (4143EEh)

Initializer:: Initializer:
004110E1  jmp   Initializer:: Initializer (412390h)
```

Call na instrukci jmp? II

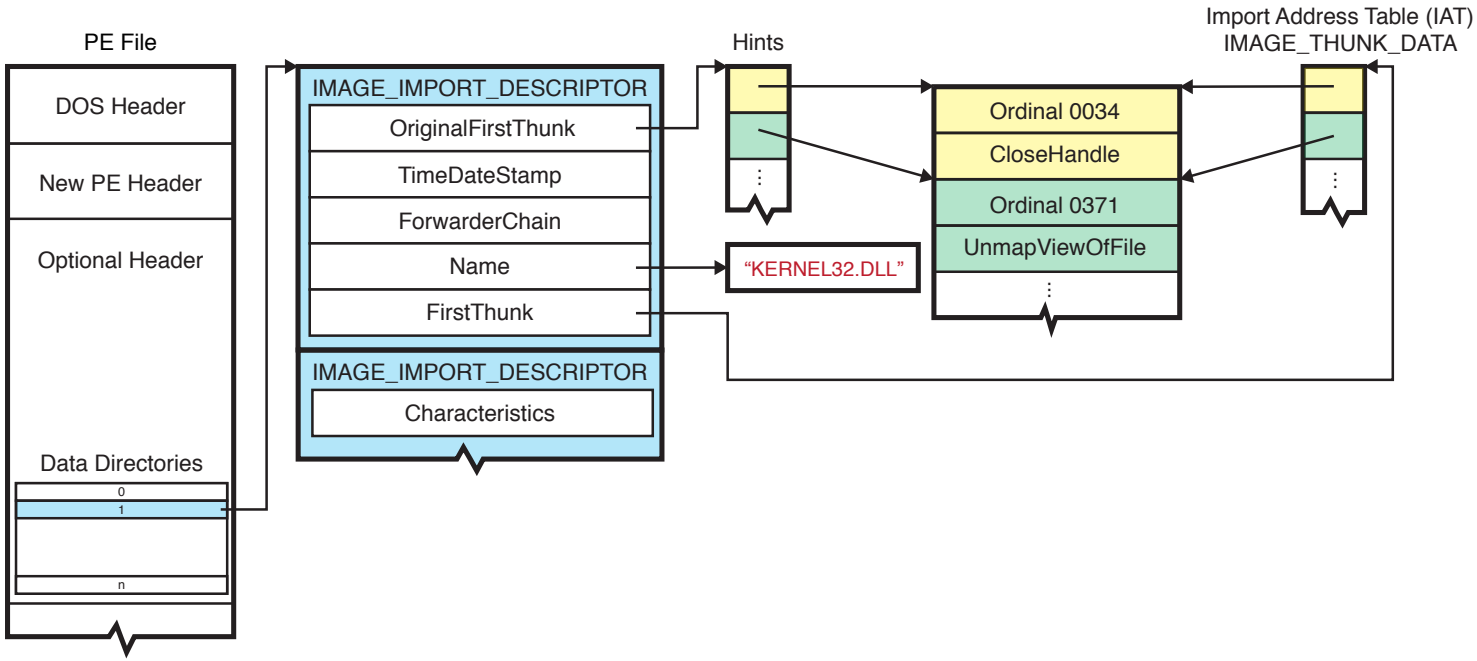
Pokud je povoleno inkrementální linkování, je do všech volání funkcí zabudován další nepřímý skok. To nám umožňuje **za běhu nahradit libovolnou funkci**. Jednoduše zkompilujeme nový kód, vložíme ho do paměti procesu a upravíme nepřímý skok tak, aby ukazoval na novou implementaci. MSVC k tomu používá "Apply Code Changes", Apple používá "Fix and Continue", ale princip je v obou případech stejný.



Obrázek: MSVC Apply Code Changes.

Import Address Table I

Modul může záviset na jiných modulech. Tyto moduly a jména symbolů nebo jejich pořadová čísla nalezneme v importním adresáři (Import Directory, ID) v PE souboru.



Obrázek: Importní adresář PE a Import Address Table.

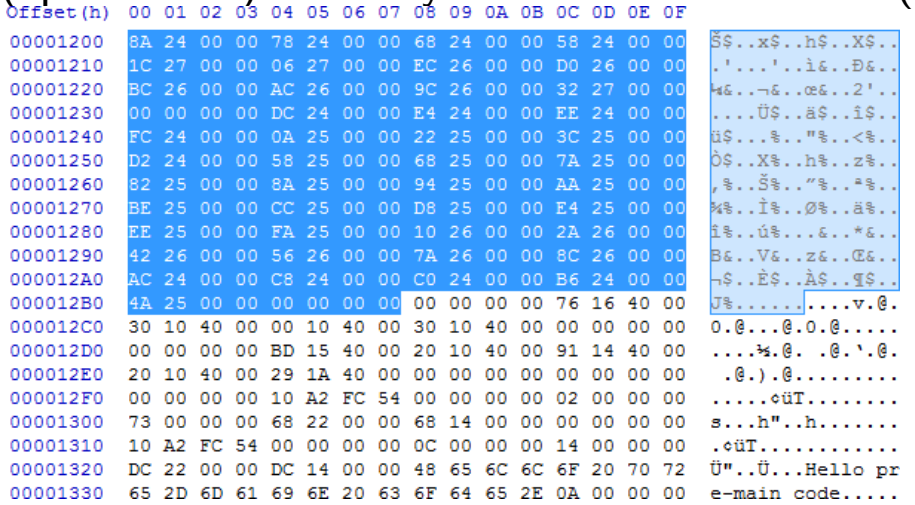
Import Address Table II

Procházení importního adresáře

```
PIMAGE_IMPORT_DESCRIPTOR pImports = (PIMAGE_IMPORT_DESCRIPTOR)(((BYTE*)pDosHeader)
  + pNTHeaders->OptionalHeader.DataDirectory[IMAGE_DIRECTORY_ENTRY_IMPORT].VirtualAddress);

PIMAGE_IMPORT_DESCRIPTOR pImportsEnd = (PIMAGE_IMPORT_DESCRIPTOR)(((BYTE*)pImports)
  + pNTHeaders->OptionalHeader.DataDirectory[IMAGE_DIRECTORY_ENTRY_IMPORT].Size);

for (; pImports < pImportsEnd && pImports->OriginalFirstThunk != NULL; ++pImports)
{
  char* pszDLLName = (char*)((BYTE*)pDosHeader + pImports->Name);
  printf("DLL: %s\n", pszDLLName );

  if (pImports->Characteristics != NULL)
  {
    PIMAGE_THUNK_DATA pSymbolData = (PIMAGE_THUNK_DATA)(((BYTE*)pDosHeader) + pImports->OriginalFirstThunk);

    for (; pSymbolData->u1.AddressOfData != NULL; ++pSymbolData )
    {
      // pozor, napřed bychom měli otestovat typ importu...
      PIMAGE_IMPORT_BY_NAME pImport = (PIMAGE_IMPORT_BY_NAME)(((BYTE*)pDosHeader)
        + pSymbolData->u1.AddressOfData);

      printf("%04hx %s\n", pImport->Hint, pImport->Name);
    }
  }
}
```

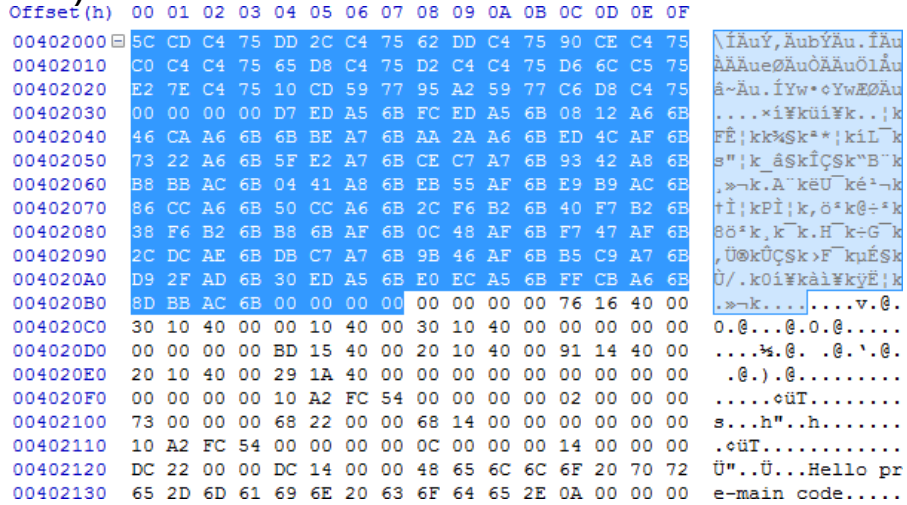
Import Address Table III

Poté, co byl image načten do paměti, nahradí loader všechny odkazy do IAT (RVA struktur `IMAGE_THUNK_DATA32` v 32-bitovém PE souboru) (vlevo) ukazující na `IMAGE_IMPORT_BY_NAME` (vpravo dole) skutečnými ukazateli na funkce (vpravo).



Offset(h)	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F	
00001200	8A 24 00 00 78 24 00 00 68 24 00 00 58 24 00 00	Š$..x$..h$..X$..
00001210	1C 27 00 00 06 27 00 00 EC 26 00 00 D0 26 00 00	.'...'..ì&..Ð&..
00001220	BC 26 00 00 AC 26 00 00 9C 26 00 00 32 27 00 00	¼&..¬&..œ&..2'..
00001230	00 00 00 00 DC 24 00 00 E4 24 00 00 EE 24 00 00	....Ü$..ä$..î$..
00001240	FC 24 00 00 0A 25 00 00 22 25 00 00 3C 25 00 00	ü$...%..."%..<%..
00001250	D2 24 00 00 58 25 00 00 68 25 00 00 7A 25 00 00	Ò$..X%..h%..z%..
00001260	82 25 00 00 8A 25 00 00 94 25 00 00 AA 25 00 00	‚%..Š%..”%..ª%..
00001270	BE 25 00 00 CC 25 00 00 D8 25 00 00 E4 25 00 00	¾%..Ì%..Ø%..ä%..
00001280	EE 25 00 00 FA 25 00 00 10 26 00 00 2A 26 00 00	î%..ú%...&..*&..
00001290	42 26 00 00 56 26 00 00 7A 26 00 00 8C 26 00 00	B&..V&..z&..Œ&..
000012A0	AC 24 00 00 C8 24 00 00 C0 24 00 00 B6 24 00 00	¬$..È$..À$..¶$..
000012B0	4A 25 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 76 16 40 00	J%..........v.@.
000012C0	30 10 40 00 00 10 40 00 30 10 40 00 00 00 00 00	0.@...@.0.@.....
000012D0	00 00 00 00 BD 15 40 00 20 10 40 00 91 14 40 00	....½.@. .@.'.@.
000012E0	20 10 40 00 29 1A 40 00 00 00 00 00 00 00 00 00	.@.).@.....
000012F0	00 00 00 00 10 A2 FC 54 00 00 00 00 02 00 00 00	.....¢üT.....
00001300	73 00 00 00 68 22 00 00 68 14 00 00 00 00 00 00	s...h"..h.....
00001310	10 A2 FC 54 00 00 00 00 0C 00 00 00 14 00 00 00	.¢üT.....
00001320	DC 22 00 00 DC 14 00 00 48 65 6C 6C 6F 20 70 72	Ü"..Ü...Hello pr
00001330	65 2D 6D 61 69 6E 20 63 6F 64 65 2E 0A 00 00 00	e-main code.....

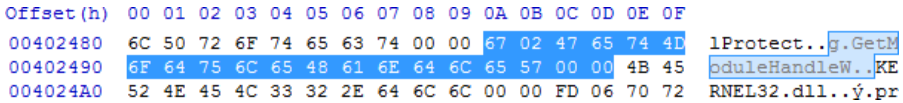
Obrázek: IAT na disku.



Offset(h)	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F	
00402000	5C CD C4 75 DD 2C C4 75 62 DD C4 75 90 CE C4 75	\ÍÄuÝ,ÄubÝÄu.ÎÄu
00402010	C0 C4 C4 75 65 D8 C4 75 D2 C4 C4 75 D6 6C C5 75	ÀÄÄueØÄuÒÄÄuÖlÅu
00402020	E2 7E C4 75 10 CD 59 77 95 A2 59 77 C6 D8 C4 75	â~Äu.ÍYw•¢YwÆØÄu
00402030	00 00 00 00 D7 ED A5 6B FC ED A5 6B 08 12 A6 6B	....×í¥küí¥k..¦k
00402040	46 CA A6 6B 6B BE A7 6B AA 2A A6 6B ED 4C AF 6B	FÊ¦kk¾§kª*¦kíL¯k
00402050	73 22 A6 6B 5F E2 A7 6B CE C7 A7 6B 93 42 A8 6B	s"¦k_â§kÎÇ§k“B¨k
00402060	B8 BB AC 6B 04 41 A8 6B EB 55 AF 6B E9 B9 AC 6B	¸»¬k.A¨këU¯ké¹¬k
00402070	86 CC A6 6B 50 CC A6 6B 2C F6 B2 6B 40 F7 B2 6B	†Ì¦kPÌ¦k,ö²k@÷²k
00402080	38 F6 B2 6B B8 6B AF 6B 0C 48 AF 6B F7 47 AF 6B	8ö²k¸k¯k.H¯k÷G¯k
00402090	2C DC AE 6B DB C7 A7 6B 9B 46 AF 6B B5 C9 A7 6B	,Ü®kÛÇ§k›F¯kuÉ§k
004020A0	D9 2F AD 6B 30 ED A5 6B E0 EC A5 6B FF CB A6 6B	Ù/.k0í¥kàì¥kÿË¦k
004020B0	8D BB AC 6B 00 00 00 00 00 00 00 00 76 16 40 00	.»¬k........v.@.
004020C0	30 10 40 00 00 10 40 00 30 10 40 00 00 00 00 00	0.@...@.0.@.....
004020D0	00 00 00 00 BD 15 40 00 20 10 40 00 91 14 40 00	....½.@. .@.'.@.
004020E0	20 10 40 00 29 1A 40 00 00 00 00 00 00 00 00 00	.@.).@.....
004020F0	00 00 00 00 10 A2 FC 54 00 00 00 00 02 00 00 00	.....¢üT.....
00402100	73 00 00 00 68 22 00 00 68 14 00 00 00 00 00 00	s...h"..h.....
00402110	10 A2 FC 54 00 00 00 00 0C 00 00 00 14 00 00 00	.¢üT.....
00402120	DC 22 00 00 DC 14 00 00 48 65 6C 6C 6F 20 70 72	Ü"..Ü...Hello pr
00402130	65 2D 6D 61 69 6E 20 63 6F 64 65 2E 0A 00 00 00	e-main code.....

Obrázek: IAT v paměti.

První `IMAGE_THUNK_DATA` (4 bajty) obsahuje RVA `0000248A` (vlevo). Tato adresa, když ji namapujeme do paměti procesu, ukazuje na strukturu `IMAGE_IMPORT_BY_NAME` obsahující pořadové číslo (0267) následované nulou ukončeným jménem funkce (`GetModuleHandleW`) (vpravo dole). Funkce pochází z `kernel32.dll` a je umístěna na adrese `75C4CD5C`, která je zapsána zpět do IAT (vpravo). IAT je umístěna v sekci `.rdata`, tudíž je **pouze pro čtení**.



Offset(h)	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F	
00402480	6C 50 72 6F 74 65 63 74 00 00 67 02 47 65 74 4D	lProtect..g.GetM
00402490	6F 64 75 6C 65 48 61 6E 64 6C 65 57 00 00 4B 45	oduleHandleW..KE
004024A0	52 4E 45 4C 33 32 2E 64 6C 6C 00 00 FD 06 70 72	RNEL32.dll..ý.pr

Import Address Table IV

Při "svázání" (bind) externího symbolu je zjištěna jeho adresa a všechny odkazy na tento symbol jsou zaktualizovány prostřednictvím relokační tabulky (BI-BEK, přednáška 2). Tak to platí pro objektové soubory; u spustitelných souborů by to při každém startu vynucovalo relokaci volání externích symbolů. Proto se používají nepřímé skoky a stačí změnit **jeden** údaj pro každý symbol – ten v IAT!

Volání funkce skrze IAT

```
// Voláme funkci
00401072  push  0
00401074  call  dword ptr [__imp__GetModuleHandleW@4 (402000h)]

// IAT
00402000  .dd 075C4CD5Ch      // KERNEL32.DLL!GetModuleHandleW
00402004  .dd 075C42CDDh      // KERNEL32.DLL!VirtualProtect
...
004020B0  .dd 06BACBB8Dh      // MSVCR120.DLL!__amsg_exit
004020B4  .dd 0               // - konec -

// Implementace funkce
_GetModuleHandleWStub@4:
75C4CD5C  mov   edi,edi
75C4CD5E  push  ebp
75C4CD5F  mov   ebp,esp
```

Hackování IAT I

Jak jsme viděli, všechna volání daného externího API jsou provedena skrz jediný bod v programu — záznam symbolu v IAT. Co by se stalo, kdybychom obsah tohoto údaje změnili?

Hackování IAT II

Jak jsme viděli, všechna volání daného externího API jsou provedena skrz jediný bod v programu — záznam symbolu v IAT. Co by se stalo, kdybychom obsah tohoto údaje změnili?

Všechna volání tohoto API napříč celým programem by byla přesměrována!

Hackování IAT III

Jak jsme viděli, všechna volání daného externího API jsou provedena skrz jediný bod v programu — záznam symbolu v IAT. Co by se stalo, kdybychom obsah tohoto údaje změnili?

Všechna volání tohoto API napříč celým programem by byla přesměrována!

IAT je standardně jen pro čtení, ale můžeme použít API jako `VirtualProtect` k povolení zápisu a přesměrovat všechna volání napříč celým programem na naši funkci.

```
BOOL WINAPI VirtualProtect(
  LPVOID lpAddress,      // IAT_start
  SIZE_T dwSize,         // ( IAT_size + page_size - 1 ) & (  page_size - 1 )
  DWORD flNewProtect,    // PAGE_READWRITE
  PDWORD lpflOldProtect
);
```

Hackování IAT IV

Dokážeme se dostat za hranice našeho procesu? Odpověď je jednoznačně ANO. Můžeme použít buď funkce jako `VirtualAllocEx`, `ReadProcessMemory`, `WriteProcessMemory`, `VirtualProtectEx`, `CreateRemoteThread` pro hacknutí jiného procesu a injektování svého kódu nebo DLL, nebo využít tzv. Native API!

Win32 API

```
BOOL WINAPI VirtualProtectEx(
  _In_ HANDLE hProcess,
  _In_ LPVOID lpAddress,
  _In_ SIZE_T dwSize,
  _In_ DWORD flNewProtect,
  _Out_ PDWORD lpflOldProtect
);
```

NT API

```
NTSYSAPI NTSTATUS NTAPI
NtProtectVirtualMemory(
  IN HANDLE ProcessHandle,
  IN OUT PVOID *BaseAddress,
  IN OUT PULONG NumOfBytesToProtect,
  IN ULONG NewAccessProtection,
  OUT PULONG OldAccessProtection
);
```

Literatura


Russinovich M., Solomon D. A., Ionescu A.: *Windows Internals Part 1*, 6$^{\text{th}}$ ed., 2012.


Russinovich M., Solomon D. A., Ionescu A.: *Windows Internals Part 2*, 6$^{\text{th}}$ ed., 2012.