Hardening: текущий статус и перспективы развития

Авторы

Роман Русяев

- Разработчик компиляторов для различных аппаратных архитектур
- Team Lead компиляторного направления

Юрий Грибов (yugr, the_real_yugr),
https://github.com/yugr

- Разработчик и фанат системного ПО (компиляторов, рантаймов, инструментов верификации и т. п.)

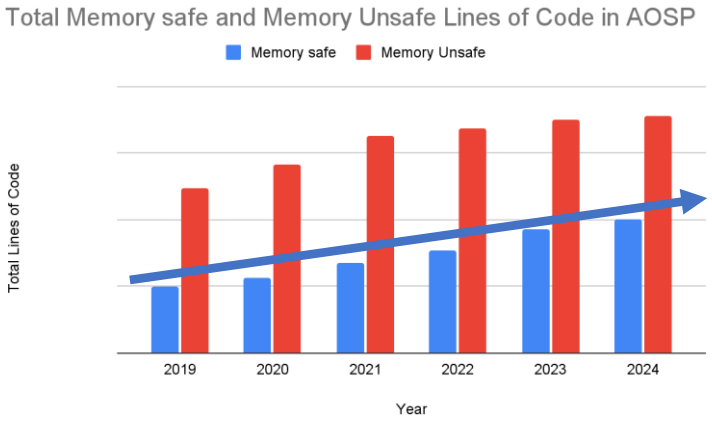
Что такое hardening

- Средства обнаружения и/или предотвращения различных видов уязвимостей
  - Уменьшение поверхности атаки
  - Например выход за границу буфера, обращение по невалидному адресу, переполнение целочисленной переменной и т.п.
- Можно использовать в продуктовом коде релизной версии

Mario Simoes, https://snl.no/Mount_Everest

Актуальность

- Почему безопасность и стабильность программного обеспечения так актуальна для C/C++:
  - 70% уязвимостей в продуктах Microsoft - ошибки памяти
    - MSRC Blog: A proactive approach to more secure code (2019)
  - 70% high/critical багов в Chromium – ошибки памяти
    - Chromium Security: Memory Safety (2025)
  - 70% ошибок памяти – 0-day уязвимости
    - Improving Memory Safety without a Trillion Dollars (2024)
  - 75% 0-day – ошибки памяти
    - Safer with Google: Advancing Memory Safety (2024)
  - Лидирующие позиции в рейтинге наиболее опасных уязвимостей
    - Mitre CWE Top 25 2024 (места 2, 6, 8, 20, 21)
  - Появление новых более безопасных языков
  - Госзаказчики и регуляторы в различных странах *рекомендуют* использование безопасных языков
    - The case for memory safe roadmaps (US CISA, NSA, FBI)



Google Security Blog

Актуальность: некоторые цитаты

- Safer with Google: Advancing Memory Safety (2024)
  - The first pillar of our strategy is centered on further increasing the adoption of memory-safe languages
  - While we won't make C and C++ memory safe, we are eliminating sub-classes of vulnerabilities in the code we own
- The Case for Memory Safe Roadmaps (2023)
  - Authoring agencies urge senior executives at every software manufacturer to reduce customer risk by prioritizing design and development practices that implement Memory Safe Languages

Цель

- Детальный обзор Hardening
  - Какие средства имеются
  - Как использовать в своих приложениях
  - Какие накладные расходы
- Дальнейшее развитие в языке

https://itoldya420.getarchive.net/amp/media/dart-board-darts-target-sports-6aa47e

Суть Hardening

Чем является Hardening

- Правила безопасных
  - Разработки (secure development process)
  - Поставки (deploy)
    - удаление символов (symbol stripping)
    - сокрытие символов библиотек (hidden visibility)
  - Выполнения
    - защиты в компиляторе, библиотеке, ядре

Правила безопасной разработки

- Концепция Secure Development Lifecycle (например Safe Coding)
- Безопасные аналоги библиотечных функций
  - Annex K (memset_s et al.) и другие расширения
  - Могут легко фальсифицироваться при отсутствии контроля!
- Ограничения на использование небезопасных функций
  - rand, strcpy, etc.
- Статический анализ
  - Обязательно `-Wall -Wextra -Werror`
  - Желательно `-Wformat=2 -Wconversion -Wsign-conversion`
  - Тулы: Clang Static Analyzer, Clang-Tidy, etc.
- Проверки спецификаций (Design-by-Contract)
  - Asserts/контракты

Чем является Hardening

- Hardening – интегральный подход!
- В *этом* докладе рассматриваем только рантайм-проверки
  - Компилятор и библиотека
  - В основном mitigation, а не prevention

Linux Hardening Guide

Last edited: March 19th, 2022

Linux is not a secure operating system. However, there are steps you can take to improve it. This guide aims to explain how to harden Linux as much as possible for security and privacy. This guide attempts to be distribution-agnostic and is not tied to any specific one.

Contents

1. Choosing the right Linux distribution
▶ 2. Kernel hardening
3. Mandatory access control
▶ 4. Sandboxing
5. Hardened memory allocator
6. Hardened compilation flags
7. Memory safe languages
▶ 8. The root account
9. Firewalls
▶ 10. Identifiers
▶ 11. File permissions
▶ 12. Core dumps
13. Swap

Требования к Hardening

- Минимальные накладные расходы (не более 2-3%)
- Высокая точность – отсутствие false positives
- Легкая интеграция
  - Совместимость ABI
  - Простота использования

Методы обнаружения на этапе QA

- Hardening – крайняя мера, лучше обнаруживать ошибки на этапе QA
  - Инструменты QA мощнее и могут найти больше багов
- Fuzzing, concolic testing, property-based testing, etc.
- AddressSanitizer (≥ 2x)
  - Stack/heap/static overflow, double free, use-after-free/return, etc.
  - State-of-the-art
  - Может ограниченно использоваться в проде для A/B тестирования
    - Особенно варианты с низкими накладными расходами (GWP-Asan, HWASan)
- Отладочные проверки STL (≥ 2x)
  - Например `-D_GLIBCXX_DEBUG` в libstdc++ или `-D_LIBCPP_ABI_BOUNDED_ITERATORS` в libc++
  - Меняют ABI => требуется полная пересборка зависимостей
- Valgrind (20-50x)
  - Только ошибки кучи: heap overflow, double free, use-after-free, etc.
  - Намного медленнее Asan, но может найти доп. ошибки
- Другие инструменты
  - ElectricFence (только heap overflow), DirtyFrame, etc.

Уязвимости buffer overflow

Переполнения буфера

- Morris Worm (1988)
- Запись чрезмерно большого объёма данных в переменную программы

```
char local_buf[32];
sprintf(buf, “Message from user: %s”, received_data);
```

- Переполнение стека (stack overflow)
  - Атаки Stack Smashing, Return-to-libc, Return-Oriented Programming
  - Наиболее стандартизованный и технологичный вид атак
- Переполнение кучи (heap overflow)

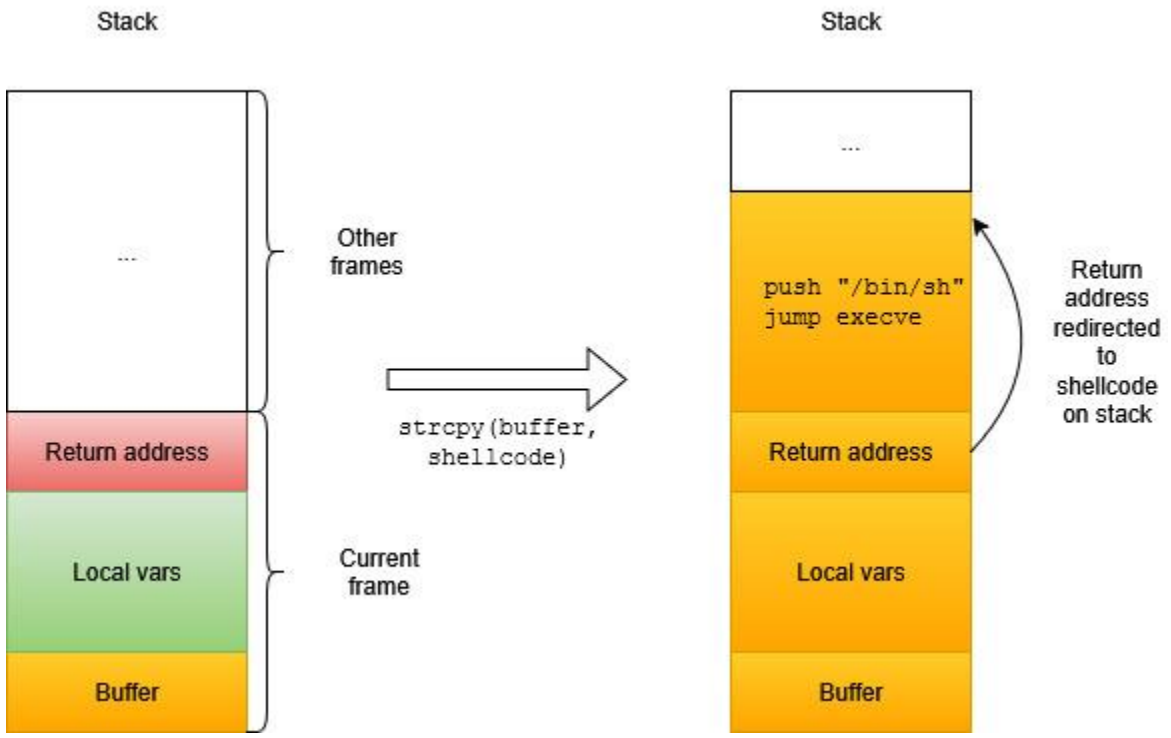
https://www.rawpixel.com/image/5958324/free-public-domain-cc0-photo

Распространённость buffer overflow уязвимостей

- Лидирующие позиции в рейтинге наиболее опасных уязвимостей
  - Mitre CWE Top 25 2024 (места 2, 6, 20)
- 70% уязвимостей в продуктах Microsoft и Chromium вызваны ошибками памяти
- 40% атак, вызванных ошибками работы с памятью, вызваны buffer overflow
  - Google Project Zero(2024)
- 80% Memory Safety CVE и 46% Memory Safety KEV в 2024
  - 20%+ из них это stack overflow (наиболее опасная уязвимость)
  - Не лучшая метрика (большая часть CVE это уязвимости веб-приложений)

Атаки на стек: Stack Smashing

- Smashing The Stack For Fun And Profit (Aleph One, 1996)
- Запись вредоносного кода на стек и его вызов при возврате функции
- Неактуальна из-за современных защит



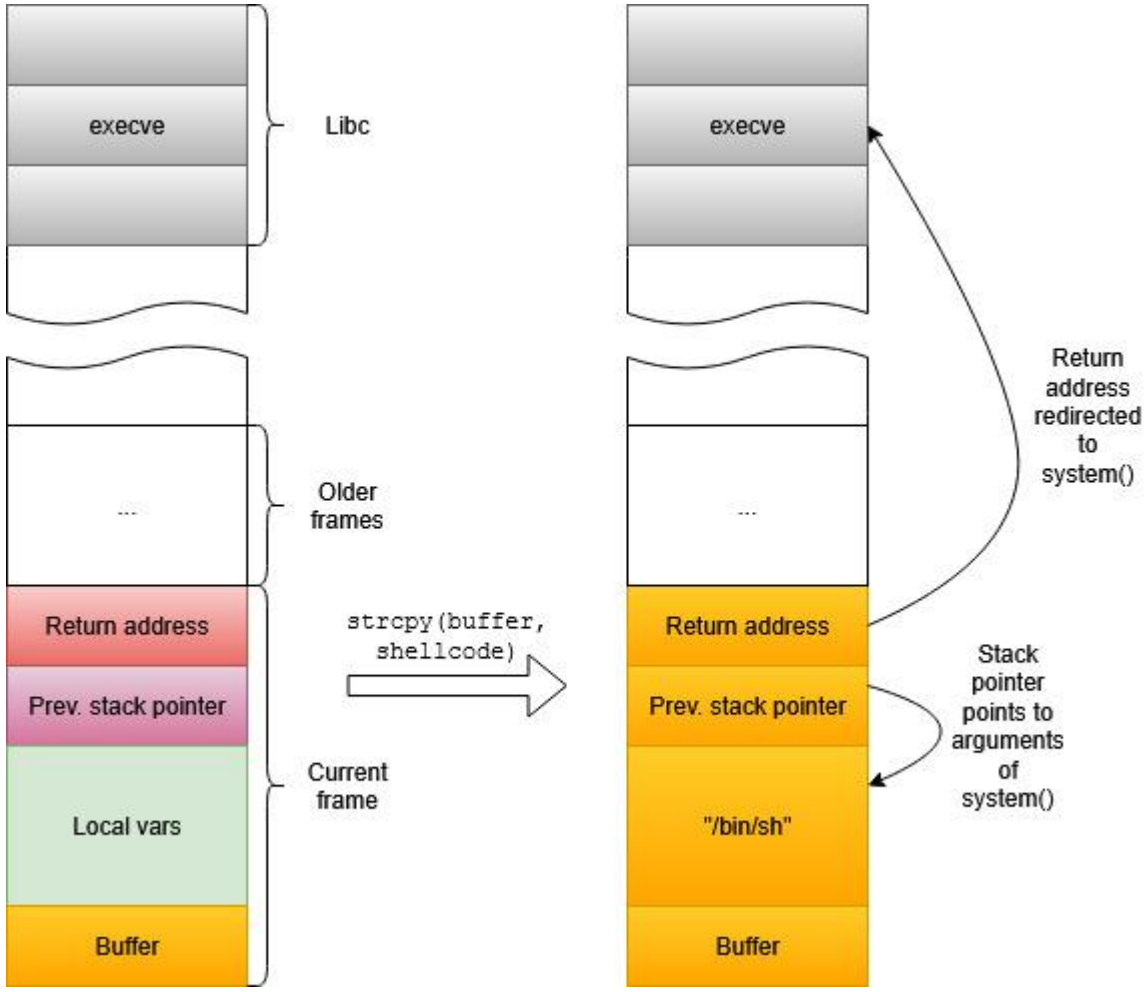
Пример: Stack Smashing

```
int main() {
  char buf[32];
  strcpy(buf, code);
}

// Входная строка пользователя
const char code[] =
  "\x31\xc0"    // xorl %eax, %eax
  "\x50"        // pushl %eax
  "\x68""//sh"  // pushl $0x68732f2f
  "\x68""/bin"  // pushl $0x6e69622f
  ...
  PAD
  // Return address
  "\x0c\xde\xff\xff"
;
```

```
$ CFLAGS='-Wl,-z,execstack -fno-stack-protector -w'
$ PAD=
$ for i in `seq 1 128`; do
  echo PAD=$i
  gcc -m32 -DPAD="\"$PAD\"" -march=i686 $CFLAGS repro.c
  setarch -R env -i ./a.out
  PAD="$PAD\\xff"
done

PAD=1
PAD=2
PAD=3
...
PAD=20
Segmentation fault (core dumped)
PAD=21
Segmentation fault (core dumped)
...
PAD=25
$    # Получен доступ к shell
```

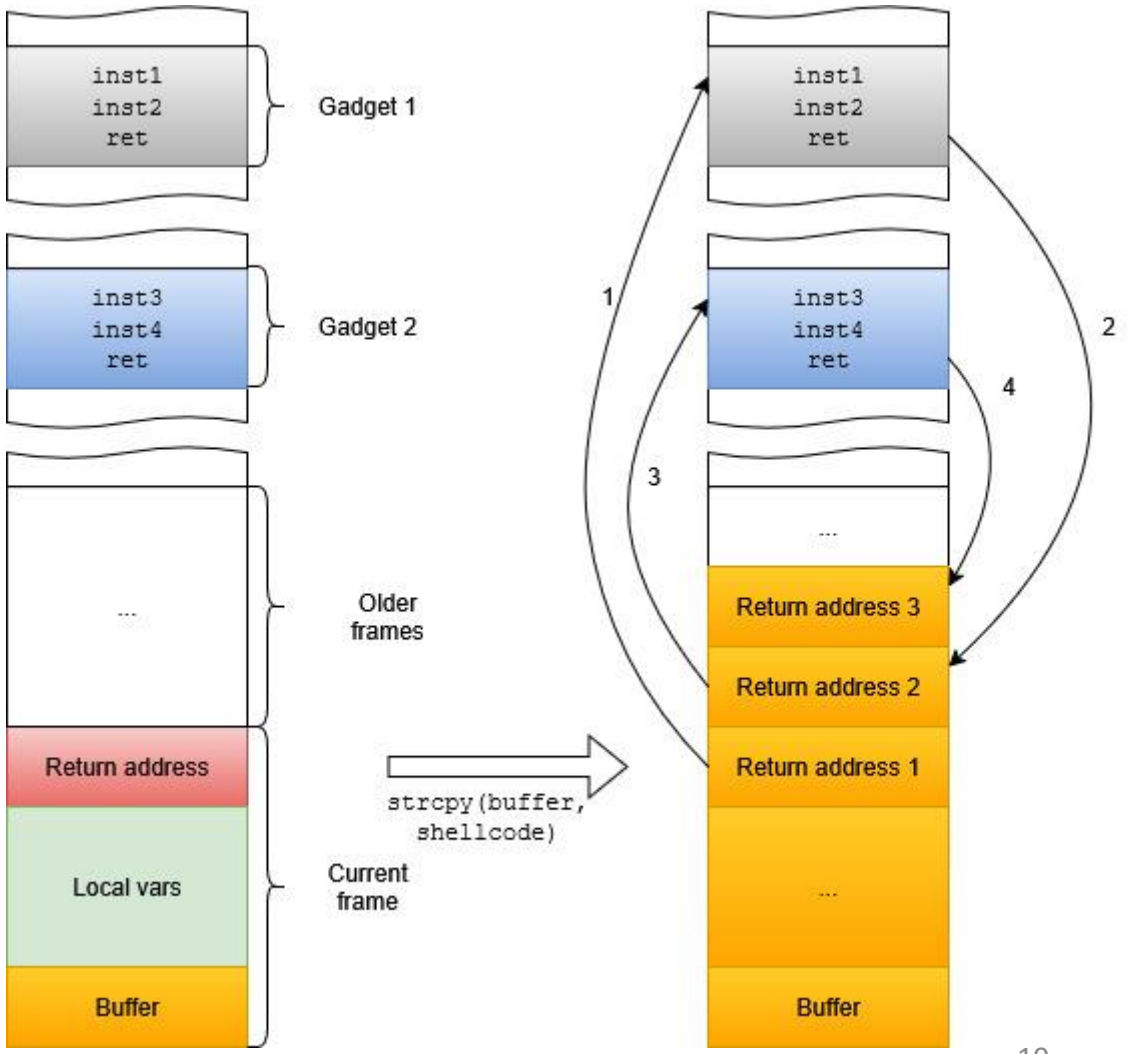
Атаки на стек: Return-to-libc

- Solar Designer, 1997
- Вызов при возврате из функции стандартной библиотечной процедуры
  - Обычно `execve("bin/sh")` или `system("/bin/sh")`
- Вариант атаки: return-to-plt
- Работала на 32-битном x86 (аргументы на стеке)



Атаки на стек: Return-oriented programming

- Nergal, 2001 и Shacham, 2007
- Наиболее актуальная проблема
- Сборка программы из эпилогов различных функций
- Запись на стек множества адресов возврата



Атаки на кучу

https://kingsvilletimes.ca/2022/10/common-sense-health-rake-up-the-leaves-this-fall/

- Эксплуатируют ошибки типа Heap Overflow
  - Переполнение буфера в куче
  - Более сложные и разнообразные чем Stack Overflow
- Основные типы:
  - Испортить данные в несвязанном буфере (например указатели на функции или vtables)
  - Испортить метаданные аллокатора
    - Заставить его при вызове несвязанного malloc/free писать по контролируемому адресу
    - Например испортить адрес malloc hook и вызвать его при следующем malloc (атака House of Force)

Неисполняемые сегменты данных

Введение

- W^X / NX bit / Data Execution Prevention
  - Отключение права на исполнения кода в сегменте стека
  - Осуществляется на уровне OS
  - Также применяется ко всем writable-сегментам (куче и глобальным переменным)
- Одна из первых hardening защит
  - Впервые появилась в OpenBSD (2003) и Windows (2004)
  - Полностью исключает (приведённую выше) атаку Stack Smashing
- Включена по умолчанию во всех современных дистрибутивах (и в GCC, и в Clang) и Windows

Проблемы

- Требуется чтобы весь код программы был собран в режиме неисполняемого стека
  - В том числе статически связанные динамические библиотеки
    - Но не загруженные динамически с помощью dlopen (BZ #32653)
  - Линкер предупредит при сборке
    - Рекомендуется использовать `LDFLAGS += -Wl,--fatal-warnings`
  - Основные причины execstack в коде:
    - Забыли проаннотировать ассемблерный код
    - Использование указателей на GNU nested functions (редко)
- Накладные расходы отсутствуют

Address Space Layout Randomization (и PIE)

Введение

- Address Space Layout Randomization
  - Рандомизация расположения основных сегментов программы (стека, кучи, библиотек) на уровне ОС
  - Лишает хакера знания о том какие адреса возврата использовать в Stack Overflow-атаках
- Сильно снижает риски любых buffer overflow атак (ROP, heap overflow, etc.)
  - Пример Stack Smashing стабильно падает с Segmentation fault
- Одна из первых hardening-защит:
  - PaX патч, 2001
  - Linux, 2005
  - Windows, 2007 (Vista, оверхед для 32-битных Windows намного выше из-за архитектуры DLL)
    - Takes decades to add security ... (Theo de Raadt)

https://picryl.com/media/shipping-containers-cargo-port-industry-craft-9326e8

Position-independent Executable (PIE)

- Необходим для так называемого Full ASLR:
  - Сборка основной программы в специальном режиме PIE
  - Сгенерированный компилятором код не использует абсолютные адреса
  - Это позволяет ОС размещать программу по случайному адресу
- Включена по умолчанию в Ubuntu/Debian (GCC и Clang) и Windows
  - Но не во всех дистрибутивах (например Fedora)
  - Некоторые критические программы в Debian собраны без PIE
    - /usr/bin/python3 (Launchpad #1452115)
  - Рекомендуется указывать принудительно флагами `-fPIE -pie`
  - `-fPIE ≈ fPIC + -fno-semantic-interposition + -Bsymbolic`

Накладные расходы

- Накладные расходы на современных архитектурах ничтожны
  - Не удалось обнаружить замедления на бенчмарке Clang
  - На 32-битном x86 замедление до 20%
    - Too much PIE is bad for performance (2012)
- ASLR несовместима с предлинковкой (prelinking) библиотек для ускорения загрузки
  - C++Russia 2024: Динамические библиотеки и способы ускорения их работы

Недостатки: false negatives

- Уязвимость к info leakage attacks (например Format string attacks):
  - Рандомизируется только базовый адрес приложения/библиотек
  - Хакер знает относительные смещения кода, глобальных переменных, таблиц GOT/PLT
  - Если становится известен адрес хотя бы одной сущности – защита скомпрометирована
  - В частности использование fork компрометирует ASLR (Zygote-процесс в Android)

Недостатки: false negatives

- Недостаточная рандомизация
  - Рандомизируется только база mmap-адресов (delta_mmap)
    - Относительный библиотек и mmap-регионов фиксирован
    - Android рандомизирует порядок загрузки библиотек и промежутки между ними
  - Небольшое число рандомизируемых битов
    - 16 или даже 8 в 32-битных Windows и ранних Android
  - Не все биты адреса одинаково случайны
  - Windows
    - Рандомизация каждого приложения делается однократно при его первой загрузке (для ускорения)
    - Одна и та же библиотека может грузиться по одному адресу в разных приложениях (для ускорения)
  - Linux
    - Рандомизация делается однократно при старте сервиса
    - Уязвима к brute force (особенно на 32-битных платформах)
- Рекомендуется делать регулярный рестарт сервисов !

ASLR: дальнейшее развитие

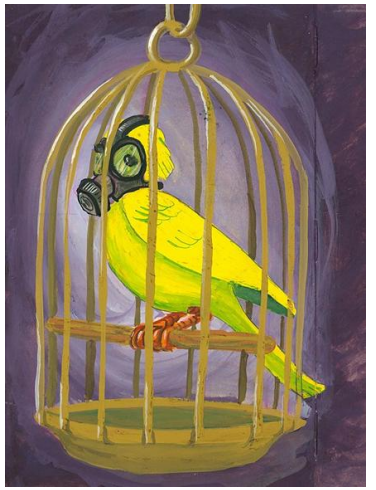
- Compile-time диверсификация
  - Линковка объектных файлов или функций программы в случайном порядке
  - Используется в Safe Compiler (ИСП РАН), OpenBSD (ядро перелинковывается при каждой загрузке), etc.
- Рантайм-диверсификация:
  - Загрузка функций программы
  - Используется в Safe Compiler (ИСП РАН)
- Moving Target Defense
  - Динамическое перемещение функций в рантайме

Stack Protector

Stack Protector (Stack Canary)

- Суть Stack Overflow атак – модификация адреса возврата
- Идея:
  - Разместить перед адресом неизвестное хакеру число (stack canary, stack cookie)
  - Перед возвратом из функции проверять что канарейка не поменялась
  - При переполнении нельзя изменить адрес возврата, не поменяв канарейку
- Одна из первых hardening-защит:
  - StackGuard (1997)
  - ProPolice (2001, IBM)
  - StackProtector (2005, RedHat), StackProtectorStrong (2012, Google)
- Сильно снижает риски stack overflow атак (return-to-libc, ROP)
  - Пример Stack Smashing стабильно падает с

```
*** stack smashing detected ***: terminated
Aborted (core dumped)
```



David & Angie, https://www.flickr.com/photos/studiomiguel/3946174063

Дополнительные меры безопасности

- Скалярные переменные кладутся ниже по стеку чем массивы
  - Чтобы при переполнении массива нельзя было модифицировать флаги, адреса функций и т.п.
- Один из байтов канарейки всегда нулевой (чтобы остановить строковый buffer overflow)

Недостатки

- Существенные накладные расходы:
  - Загрузка значения канарейки, сохранение на стек, чтение и проверка перед возвратом
  - 2% на бенчмарке Clang
  - The Performance Cost of Shadow Stacks and Stack Canaries: 0-9% (2015)
- False negatives:
  - Уязвима к info leakage: если канарейка утекла, то защита скомпрометирована
  - Не защищает от переписывания адреса возврата без overflow
  - Не защищает от переполнений в куче

Разделение стека

Введение

https://picryl.com/media/reaching-shadow-heart-nature-landscapes-d62bda

- SafeStack, ShadowStack, backward-edge CFI
  - Основная причина stack overflow – адрес возврата хранится вместе с локальными массивами
  - Можно разделить стек на две несвязные части:
    - адрес возврата (и в случае SafeStack скалярные переменные, адрес которых не берётся)
    - все остальные
- Первое найденное упоминание: StackShield (~2000)
- Сравнение со StackProtector:
  - Дополнительная рандомизация для критических данных
  - Позволяет защитить пользовательские указатели на функции на стеке
  - StackProtector по прежнему может применяться к unsafe stack для обнаружения overflow

Недостатки

- Производительность:
  - 3% на бенчмарке Clang
  - 0.1% по замерам авторов (Clang documentation: SafeStack)
- False negatives:
  - SafeStack сейчас не поддерживает инструментацию динамических библиотек (возможно легко добавить: OpenSSF #267)
  - ShadowStack:
    - Поддерживает только AArch64 и RISC-V
    - Защищает только адреса возврата

Stack Clashing (Stack Probes)

Методы hardening: Stack Clashing

- Стек отделён от других сегментов незамапленой страницей (guard page)
  - Обнаруживает исчерпание стека
  - Появилась в Linux в 2010
- Проблема:
  - Не обнаружит переполнение при больших локальных массивах (>4096 байт) или alloca
  - Хакер может перезаписать кучу или стек другого потока
- Уязвимость обнаражена группой Qualys в 2017:
    - The Stack Clash (10 proof-of-concept атак)
- Идея:
  - Перед выполнением функции пройти по новому фрейму, чтобы спровоцировать SEGV

Накладные расходы

- Накладные расходы минимальны:
  - Нет замедления на бенчмарке Clang
  - Не обнаружены регрессии в Firefox
    - Bringing Stack Clash Protection to Clang / X86 (2021)

Фортификация (_FORTIFY_SOURCE)

Пример защиты

```
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

unsigned n = 4096;

int main() {
  char *a = malloc(1);

  memset(a, 0, n);
  asm("" :: "r"(&a) : "memory");

  a = malloc(200);
  asm("" :: "r"(&a) : "memory");

  return 0;
}
```

```
# No _FORTIFY_SOURCE

$ gcc -U_FORTIFY_SOURCE repro.c -O2 &&
./a.out

Fatal glibc error: malloc.c:2599
(sysmalloc): assertion failed:
(old_top == initial_top (av) &&
old_size == 0) || ((unsigned long)
(old_size) >= MINSIZE && prev_inuse
(old_top) && ((unsigned long) old_end
& (pagesize - 1)) == 0)

Aborted (core dumped)


# _FORTIFY_SOURCE=3

$ gcc repro.c -O2 && ./a.out

*** buffer overflow detected ***:
terminated

Aborted (core dumped)
```

Реализация

- Из Glibc string.h:

```
#if _FORTIFY_SOURCE > 0
__attribute__((always_inline, __nothrow__, leaf))
void *memset (void *__dest, int __ch, size_t __len)
{
  // memset_chk определена в libc.so.6 и содержит проверку диапазона
   return __builtin___memset_chk (__dest, __ch, __len,
                                  __glibc_objsize0 (__dest));
}
#endif
```

- `__glibc_objsize0` вызывает интринсик компилятора `__builtin_object_size` или `__builtin_dynamic_object_size` (в зависимости от уровня защиты)
  - `__builtin_object_size` проверяет указатели на стековые объекты
  - `__builtin_dynamic_object_size` осуществляет dataflow-анализ и применима например к объектам кучи

Введение

- Проверки диапазонов в функции стандартной библиотеки C (там где это возможно)
  - Появились в Glibc 2.3.4 (2004)
- ~80 защищённых функций (конкретный список можно уточнить в Glibc headers)
  - string.h APIs (memcpy, memset, strcpy, strcat, bzero, bcopy, etc.) - проверки диапазона
  - unistd.h APIs (read, pread, readlink, etc.) - проверки диапазона
  - printf and friends - %n допускается только в readonly-строках
- Защищает от stack и heap buffer overflow
- Требует совместной работы
  - библиотеки (подмена стандартной функции на chk-версию)
  - компилятора (вычисление размера из контекста)

Накладные расходы

- `-D_FORTIFY_SOURCE=2`: нет изменений на бенчмарке Clang
- `-D_FORTIFY_SOURCE=3`: 2% на бенчмарке Clang
- 3% `-D_FORTIFY_SOURCE=2` на ffmpeg
  - FORTIFY_SOURCE and Its Performance Impact (2017)

Недостатки

- Конфликтует с Address- и MemorySanitizer:
  - Asan не умеет анализировать XXX_chk-функции (sanitizers #247)
  - Совмещение Asan с фортификацией приводит к false negatives (пропуску ошибок)
    - GCC (не Clang) вставляет доп. минимальную инструментацию в месте вызова для memcpy_chk, memset_chk, но её недостаточно
  - Из-за того что фортификация включена по умолчанию во многих дистрибутивах лучше явно отключать её в санитарных сборках:
    - `-U_FORTIFY_SOURCE` или `-D_FORTIFY_SOURCE=0`
- Поддержана только в Glibc и Bionic (не в musl или Visual Studio)
  - Есть standalone реализация: fortify-headers
- Работает только в -O режиме и только если подключены стандартные .h файлы (нет implicit declarations)
- Не проверяет trailing-массивы в структурах (требуется `-fstrict-flex-arrays`)
- Компилятор не всегда может вывести допустимый размер указателя из контекста
  - Ограничен рамками функции

-fsanitize=bounds

- Подход фортификации можно расширить на скалярные обращения к массивам известной длины
- Опция `-fsanitize=bounds` в компиляторах GCC и Clang
  - Аналог `-D_FORTIFY_SOURCE=2`: массивы константных размеров или VLA
- Включена в Android для некоторых критичных модулей
  - Android Developers Blog: System hardening in Android 11
- Нет накладных расходов на бенчмарке Clang
  - Аналогично `-D_FORTIFY_SOURCE=2`

Проверки STL

Пример

```
#include <stdio.h>
#include <vector>

int main() {
  std::vector<int> v(5, 0);
  asm(“”
    :: "r"(&v)
    : "memory");
  return v[10];
}
```

```
$ g++ tmp.cc
$ ./a.out

$ g++ -
D_GLIBCXX_ASSERTIONS
tmp.cc
$ ./a.out
/usr/include/c++/12/bits/s
tl_vector.h:1123: ... :
Assertion '__n < this-
>size()' failed.
Aborted
```

Введение

- Hardened STL
- Конкретные проверки зависят от компилятора и уровня защиты
  - Всегда включены проверки индексов (а также `front`, `back`, etc.) в `std::vector`, `std::deque` и `std::string`
    - Защищают от ошибок buffer overflow
  - GCC:
    - Проверки на NULL в умных указателях (защита от NULL dereference)
    - Проверки предусловий (параметры мат. функций и распределений и т.п.)
  - LLVM:
    - Проверки на Strict Weak Ordering компараторов
      - C++Russia 2023: Как правильно писать компараторы
  - Visual Studio:
    - Аналогичные проверки имеют слишком большой оверхед и их планируют переписать

История и будущее

- Хронология:
  - Впервые появились в GCC debug containers как QA-проверка (начало 2000-х)
    - До сих пор можно (и нужно) использовать по `-D_GLIBCXX_DEBUG`
    - Бинарно несовместима с обычной сборкой
  - Опция `-D_GLIBCXX_ASSERTIONS` для hardening в GCC (2015)
    - Бинарно совместима с обычной сборкой
  - Аналогичная проверка в libc++ и Safe Buffers proposal (2022)
- В будущем STL hardening скорее всего станет частью Стандарта C++
  - Далее расскажем подробнее

Недостатки

- Накладные расходы:
  - 3.5% на бенчмарке Clang
  - 0.3% в серверных приложениях Google
    - Retrofitting spatial safety to hundreds of millions of lines of C++ (2024)
    - Только при условии включённых ThinLTO и PGO, иначе 1-2% (2024)
- False negatives:
  - Покрывает только подмножество ошибок (некорректные индексы, только STL)
  - Некоторые ошибки обнаруживать слишком дорого (например ошибки в итераторах)

Усиленные аллокаторы

Пример ошибки (1)

```
#include <string.h>
#include <stdlib.h>

void *a, *b;
unsigned n = 4096;

int main() {
  a = malloc(100);
  memset(a, 0xff, n);
  b = malloc(100);
}
```

```
$ gcc -O2 repro.c
$ ./a.out
malloc(): corrupted top size
Aborted
```

Пример ошибки (2)

```
#include <stdlib.h>

void *a, *b;

int main() {
  a = malloc(1);
  free(a);
  b = malloc(1);
  // Ошибка copy-paste
  free(a);
  return 0;
}
```

```
$ gcc -O2 repro.c

# Glibc не видит ошибку
$ ./a.out

# Hardened-аллокатор
$
LD_PRELOAD=libhardened_malloc.so ./a.out
fatal allocator error:
double free (quarantine)
Aborted
```

Введение

- Дополнительные меры в динамическом аллокаторе для затруднения и быстрого обнаружения атак на кучу
- Scudo (Android), hardened_malloc, OpenBSD allocator, Glibc MALLOC_CHECK_, etc.
- Защита от ошибок кучи (heap overflow, double free, use-after-free, free of invalid address)
  - Метаданные физически отделены от аллоцируемой памяти (нет "хедеров")
  - Рандомизация адресов внутри блоков
  - Контрольные суммы и/или канарейки для обнаружения перезаписи данных и/или метаданных
  - Карантин (отложенное переиспользование освобождённой памяти)
  - Зануление данных на free и проверка на malloc

Недостатки

- Накладные расходы:
  - 9% на бенчмарке Clang (hardened_malloc vs Glibc allocator)

Защита таблиц диспетчеризации (Full RELRO)

Введение

- Вызовы функции из динамических библиотек делаются через специальные трамплины (PLT stubs)
- Функции-трамплины читают и обновляют таблицу GOT, содержащую указатели на функции
  - Т.н. отложенное связывание (lazy binding)
  - Ускоряет запуск приложения
- Таблицу приходится держать в writable-сегменте и у хакеров есть возможность её скомпрометировать
  - Более редкая атака чем buffer overflow (мне неизвестны соответствующие CVE)
- Решение (read-only relocations, RELRO):
  - Инициализировать содержимое таблицы на старте программы и сразу пометить сегмент как readonly

Пример

```
#include <stdio.h>

void shellcode() {
  printf("You have beeen pwned%s\n", "");
}

extern void *_GLOBAL_OFFSET_TABLE_[];

int main() {
  // Имитируем действия хакера
  _GLOBAL_OFFSET_TABLE_[POS] = shellcode;

  puts("Hello world!\n");
  return 0;
}
```

```
$ for i in `seq 0 16`; do
    gcc -Wl,-z,norelro repro.c -
DPOS=$i
    ./a.out
    i=$((i + 1))
  done
  Segmentation fault
  Segmentation fault
  Segmentation fault
  You have beeen pwned
  Hello world!
  Hello world!
  Hello world!
  ...
```

История

- Подход RELRO уже использовался ранее для инициализации таблиц виртуальных функций и глобальных деструкторов (partial RELRO)
  - Ian Lance Taylor: Linker relro
- Потребовалась лишь небольшая адаптация для GOT (Full RELRO)

Недостатки

- Практически не влияет на производительность
  - Не обнаружили никакого замедления в работе компилятора Clang
  - Но может только замедлить старт программы из-за необходимости разрешения всех символов
  - На X86 имеет смысл совмещать с `-fno-plt` (до 10% прироста производительности)
- False positives:
  - Могут сломаться некоторые программы, если в них были отсутствующие символы (которые не вызывались)
- False negatives:
  - Не защищает пользовательские таблицы функций (и библиотечные, например atexit handlers)

Автоинициализация

Пример

```
void foo() {
  char password[32];
  ...
}
void bar() {
  char message[1024];
  if (cond) strcpy(message, “...”);
  // Сливаем пароль если !cond
  printf(message);
}
void baz() {
  foo();
  bar();
}
```

Введение

- Инициализация всех локальных переменных
  - Случайными значениями для debug, нулями для hardening
  - Только если компилятор не смог доказать что они всегда будут инициализированы в программе
- История:
  - В коммерческих тулчейнах автоинициализация появилась давно
  - InitAll добавлен в Visual Studio в 2019
    - CppCon 2019: Killing Uninitialized Memory
  - Решение в GCC в 2021
    - Первое обсуждение в mailing list в 2014
  - Планируется включить в Стандарт C++26 (P2795, см. ниже)
- Распространённость:
  - 10% CVE root cause в продуктах Microsoft в 2018 (из Killing Uninitialized Memory)
  - 12% exploitable багов в Android (из P2723)

Накладные расходы

- Замеры:
  - 4.5% на бенчмарке Clang
  - 1% на Firefox (из Trivial Auto Var Init Experiments)
  - До 10% в горячем коде (virtio, Chrome)
  - 1-3% в среднем на Postgres, но до 20% на некоторых сценариях (Ubuntu #1972043)
  - <1% в Windows (Killing Uninitialized Memory)
- Основной проблемный кейс: большой локальный массив (например для IO) на горячем пути

```
while (std::getline(maps, line)) {
      char modulePath[PATH_MAX + 1] =
"";
      // -ftrivial-auto-var-init
      // вставит здесь memset...
      ret = sscanf(line.c_str(),
                   "%lx-%lx %6s %lx %*s
%*x %" PATH_MAX_STRING(PATH_MAX)
                   "s\n",
                   &start, &end, perm,
&offset, modulePath);
    }
```

Другие недостатки

- Автоинициализация ломает обнаружение багов в Valgrind и Msan
  - Необходимо обязательно отключать её в соответствующих сборках !
  - По крайней мере флаг сохраняет предупреждения компилятора (`-Wuninitialized` и `-Wmaybe-uninitialized`)
- В некоторых ситуациях может привести к дополнительным уязвимостям:
  - Инициализация нулями (обычно рекомендуется для прода): в Linux “0” это например id суперпользователя
  - Инициализация не-нулями: провоцирование buffer overflow
- Применяется только к локальным переменным
  - Глобальные и так инициализируются
  - Для кучи можно использовать hardened allocators

Проверка целочисленных переполнений

Пример ошибки

```
// Из OpenSSH 3.3
nresp = packet_get_int();
if (nresp > 0) {
  // Переполняем целое число до нуля здесь ...
  response = xmalloc(nresp*sizeof(char*));
  // ... и вызываем heap buffer overflow тут
  for (i = 0; i < nresp; i++)
    response[i] = packet_get_string(NULL);
}
```

Введение

- Проверки целочисленных операций на переполнение
  - Дефолтный рантайм UBsan выдаёт слишком много отладочной информации поэтому не подходит для релизной сборки
  - Выход – использование специального минимального рантайма (с immediate abort)
- Критичность:
  - Наиболее известные примеры:
    - Инцидент с облучателем Therac-25 (1985)
    - Катастрофа ракеты Ariane 5 (1996)
  - ~1% CVE и 1.5% KEV в 2024
  - 23 место в рейтинге Mitre CWE Top 25 2024 (8 в рейтинге 2019 года)
- История:
  - `-ftrapv` появилась в GCC в 2000 (patch for -ftrapv option)
    - За фичей не следили и она быстро протухла (например BZ #35412 открыт в 2008)
  - Работы John Regehr в 2010
  - Создание UBsan в 2014 (на волне популярности Asan)
    - State-of-the-art

Недостатки

- Накладные расходы:
  - 30% замедление на бенчмарке Clang
  - До 2x на SPEC (из статьи про PartiSan, 2018)
  - Проверка переполнений дефолтно отключена в Rust из-за накладных расходов
  - Применяем “местно” !
- Другие проблемы:
  - UBsan несовместим с `-fno-strict-overflow` и `-fwrapv`
  - False positives:
    - Isan может выдавать ложные срабатывания (например нужен blacklist для кода из <random>, полагающегося на беззнаковое переполнение)
  - False negatives:
    - Может не обнаруживать некоторые баги, которые успел "перехватить" оптимизатор (особенно под `-O2`)

Отключение небезопасных оптимизаций

Пример ошибки

```
static void
__devexit agnx_pci_remove (struct pci_dev *pdev)
{
  struct ieee80211_hw *dev = pci_get_drvdata(pdev);
  struct agnx_priv *priv = dev->priv;

  // Компилятор удалит эту проверку
  if (!dev) return;

  ... do stuff using dev ...
}
```

Введение

- Некоторые компиляторы могут излишне агрессивно реагировать на код, содержащий неочевидные для программиста ошибки, и генерировать небезопасный ассемблер
  - В основном выбрасываются пользовательские проверки
  - Visual Studio менее агрессивен чем GCC/Clang
- Compiler Introduced Security Bugs
  - Термин появился в статье Silent Bugs Matter: A Study of Compiler-Introduced Security Bugs (2023)
  - Соответствующих CVE мало (например CVE-2009-1897), но в статьях приводят сотни CISB в open-source коде
- Для кода с повышенными требованиями безопасности рекомендуется отключать такие оптимизации

Накладные расходы

- 4.5% замедление на бенчмарке Clang
- Слабый (до 1%) оверхед для Phoronix Test Suite
  - Performance Impact of Exploiting Undefined Behavior in C/C++ (2025)

Как использовать ?

- Обычно для GCC/Clang отключают
  - `-fno-delete-null-pointer-checks`
  - `-fno-strict-overflow` (`== -fwrapv -fwrapv-pointer`)
  - `-fno-strict-aliasing`
- Соответствующие баги можно также обнаруживать с помощью UBSanitizer и TypeSanitizer
- Использование:
  - Флаги по умолчанию выключены во всех компиляторах и дистрибутивах
  - Но многие пакеты в дистрах собираются по крайней мере с `-fno-strict-aliasing`
    - Т.к. правила алиасинга особенно легко нарушить
  - Chrome собирается со всеми тремя флагами
    - build/config/compiler/BUILD.gn
  - Firefox собирается с `-fno-strict-aliasing`

Control-Flow Integrity

Пример

```
include <stdio.h>

struct A { virtual void foo() {} };
struct B : A { void foo() override {} };

struct Evil { virtual void foo() {
  printf("You have been pwned\n"); }
};

A *tmp = new B;

int main() {
  A *a = new A;
  Evil *e = new Evil;
  // Портим vtable
  asm("mov %1, %0" : "+r"(a) : "r"(e));
  a->foo();
}
```

```
# Подмена объекта успешна
$ clang++ repro.cc -O2
$ ./a.out
You have been pwned

# CFI обнаруживает подмену
$ clang++ -fsanitize=cfi -flto
-fvisibility=hidden repro.cc -
O2
$ ./a.out
Illegal instruction
```

История

- Control Flow Integrity это generic-термин для обнаружения любых нарушений исходного control-flow программы
  - В том числе подмена адреса возврата
  - Впервые введён Abadi et al. в 2005 (CFI: Principles, Implementations and Applications)
- Два типа:
  - forward-edge (проверка call/jump)
  - backward-edge (проверка return)
- Множество различных методик в статьях
  - Например Stack Protector и Shadow Stack – тоже CFI
- Но обычно под CFI понимают один из методов:
  - LLVM CFI, 2015 (2015, Clang 3.7)
  - Microsoft Control Flow Guard, 2014
  - grsecurity RAP, 2016
  - Аппаратные методы: Intel CET, 2020 (спецификация 2016) и AArch64 BTI/PAC (2018)

LLVM CFI

- Компиляторная инструментация для forward-edge проверок
- Реализована только в Clang (не поддержана в GCC)
- Проверяет совпадения статического и динамического прототипа при вызове функции по указателю
  - Поддерживаются vtables и обычные указатели на функции
  - (алгоритмы проверки сильно различаются)
- Также может использоваться для доп. проверок (корректность C++ кастов, vtable hijacking и пр.)

Аппаратные методы: Intel CET и AArch64 CFI

- Поддержаны в GCC и Clang
- Более грубые проверки чем LLVM CFI
- Проверки косвенных переходов (вызовов по указателю, возвратов из функций):
  - Все места, на которые может быть косвенный переход (бранч/вызов/возврат), помечаются инструкцией-хинтом ENDBR64
  - Аппаратно проверяется что косвенный переход делается на корректный адрес
- Pointer Authentication (AArch64)
  - Верхние биты адреса возврата используются для хранения криптостойкой контрольной суммы (адрес возврата + адрес фрейма + секрет процесса)
  - Чексумма проверяется перед возвратом

Накладные расходы

- Бенчмарк Clang:
  - Нет изменений на Intel CET
  - 6% оверхед на LLVM CFI
- LLVM CFI менее 1% в Chrome (Chrome: Control Flow Integrity, 2025)
  - Но 10% увеличение кода (повышенная нагрузка на кэши I$ и BTB)
- Нет оверхеда на Android при LLVM CFI (Android: Security: Control flow integrity, 2025)

Недостатки

- Фрагментация
  - Три несвязанных решения с разными наборами защит
  - GCC не поддерживает LLVM CFI
- False positives:
  - Большое количество софта надо дорабатывать для LLVM CFI (всевозможные `reinterpret_cast<void *>`, etc.)
  - Например Clang не проходит CFI-проверки без фильтров
- False negatives:
  - LLVM CFI:
    - Только несоответствия на уровне типов (хакер может вызвать неправильную функцию если типы совпадают)
    - Тяжелая интеграция (требует LTO, проблемы с проверкой вызовов между границами DSO)
  - Intel/AArch64: вообще не проверяет типы
  - Не проверяются jump tables, сгенерированные для switch-конструкций (только в CET есть `–mcet-switch`, дефолтно выключен)

Опции для включения защит

Защита	Флаги
Noexecstack	Включена по умолчанию
Full ASLR (PIE)	`-fPIE -pie`
Stack Protector	`-fstack-protector-strong`
Safe Stack	`-fsanitize=safe-stack`
Stack Clashing	`-fstack-clash-protection`
_FORTIFY_SOURCE=2	`-D_FORTIFY_SOURCE=2` (или `3`), `-fsanitize=bounds` (рекомендуется также `-fstrict-flex-arrays=1`)
STL hardening	`-D_GLIBCXX_ASSERTIONS` (libstdc++), `-D_LIBCPP_HARDENING_MODE=...` (libc++)
Hardened allocator	`LD_PRELOAD=path/to/allocator.so` `MALLOC_CHECK_=3` или `GLIBC_TUNABLES=glibc.malloc.check=3` (Glibc)
Full RELRO	`-Wl,-z,relro -Wl,-z,now`
Autoinitialization	`-ftrivial-auto-var-init=zero`
Integer Overflow	GCC: `-fsanitize-trap=signed-integer-overflow,pointer-overflow` Clang: `-fsanitize=signed-integer-overflow,pointer-overflow -fsanitize-minimal-runtime` (рекомендуется также `integer`)

Отключение оптимизаций	`-fno-delete-null-pointer-checks`
	`-fno-strict-overflow` (== `-fwrapv -fwrapv-pointer`)
	`-fno-strict-aliasing`

Control-flow integrity	LLVM: `-fsanitize=cfi -flto=thin -fvisibility=hidden -fsanitize-cfi-cross-dso` Intel CET: `-fcf-protection` AArch64: `-mbranch-protection=standard` (непонятно почему не `-fcf-protection`)

Использование в реальном коде

Дистрибутивы Linux

Защита	Ubuntu 24.04			Debian 12			Fedora 42		
	GCC	Clang	Пакеты	GCC	Clang	Пакеты	GCC	Clang	Пакеты
Noexecstack	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Full ASLR (PIE)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	Y
Stack Protector	Y	N	Y	N	N	Y	N	N	Y
Safe Stack	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Stack Clashing	Y	N	Y	N	N	N*	N	N	Y
_FORTIFY_SOURCE	Y (2)	N	Y (2)	N	N	Y (2)	N	N	Y (3)
STL hardening	N	N	N	N	N	N	N	N	Y (libstdc++)
Hardened allocator	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Full RELRO	Y	N	Y	N	N	Partial	N	N	Y
Autoinitialization	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Integer Overflow	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Отключение оптимизаций	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Hardware CFI (Intel CET, AArch64 BP)	Y	N	Y	N	N	N*	N	N	Y

- Наборы защит в дистрибутивах отличаются
- В Clang включено намного меньше защит
- Многие новые защиты по умолчанию не включены
- Пакеты системы защищены лучше пользовательских программы
- Дефолтные защиты могут быть отключены в конкретных пакетах (например нет PIE/Full RELRO в python3 в Debian 12, только 85% пакетов Debian 10 имели StackProtector)

* Будет включена в следующей версии Debian

Браузеры

Защита	Chrome (140.0.7313.1)	Firefox (142.0b1)
Noexecstack	Y	Y
Full ASLR (PIE)	Y	Y
Stack Protector	Y (weak)	Y
Safe Stack	N	N
Stack Clashing	N	Y
_FORTIFY_SOURCE=2	Y	Y
STL hardening	Y (libstdc++)	N
Hardened allocator	Y	N
Full RELRO	Y	Y
Autoinitialization	Y	N
Integer Overflow	N	N
Отключение оптимизаций	Y	Y
CFI	Y (LLVM на X86, AArch64 CFI)	N

- Рассматривались дефолтные флаги Linux-версии

Использование в безопасных языках

Hardening в Rust

Защита	Актуальность	Статус в Rust	Замечания
Noexecstack	Только unsafe/внешний код	Включена	Prooflink
ASLR	Только unsafe/внешний код	Включена	Prooflink
Stack Protector	Только unsafe/внешний код	**Nightly-опция**	Prooflink
Safe Stack	Только unsafe/внешний код	**Nightly-опция**	Prooflink
Stack Clashing	Актуальна	Включена	Prooflink
_FORTIFY_SOURCE, STL hardening	Нет	Нет	Уже есть в языке
Hardened allocator	Только unsafe/внешний код	Есть биндинги к hardened_malloc	Prooflink
Full RELRO	Только unsafe/внешний код	Включена	Prooflink
Autoinitialization	Нет	N/A	Уже есть в языке
Integer Overflow	Актуальна	Есть опция (дефолтно отключена)	
CFI	Только unsafe/внешний код	**Nightly-опция**	Prooflink

- Все Rust CVE, связанные с ошибками памяти, вызваны ошибками в unsafe code (Xu et al., 2021)
- 50% популярных крейтов содержат unsafe-код (Evans et al., 2020)
- stdlib::core 8.5% unsafe-кода, nalgebra 4.5%, rav1e 7%, tokio 5%, veloren 15%
  - (по модулю ошибок в наших скриптах)
- В стабильном Rust нет опций для некоторых ключевых защит

Опции, о которых мы не рассказали

- Опции для очистки секретов (паролей, ключей, etc.):
  - Stack scrubbing – очистка стека при выходе из функции (`-fstrub`)
  - Очистка регистров при выходе из функции (`-fzero-call-used-regs`)
- Опции для защиты от аппаратных атак (Spectre, etc.)
- `-fhardened` – зонтичная опция для наиболее важных защит
  - Хороший дефолтный флаг, но пока реализован только в GCC (LLVM #122687)
  - Включает все опции, рекомендованные OpenSSF (см. `--help=hardened`)

Анатомия фортификации

Как работает фортификация?

- При включенном макросе _FORTIFY_SOURCE стандартные функции вызывают встроенные функции компилятора (builtins)
- Builtins раскрываются
  - В обычные функции
    - если не удалось определить размер dst
    - либо известно, что размер dst >= src
  - В *_chk версии, которые проверяют размер объекта в рантайме

__builtin_object_size

```
size_t __builtin_object_size (const void *ptr, /*detail*/)
```

- Возвращает
  - размер объекта, на который указывает ptr
  - -1, если не удалось статически вычислить размер

```
size_t __builtin_dynamic_object_size(const void *ptr, /*detail*/)
```

- То же что __builtin_object_size, но размер может быть вычислен динамически
  - нужен для malloc, alloca, VLA

Пример с strcpy

```
int main(int argc, char *argv[]) {
  strcpy(a, argv[1]);
  puts(a);
}
```

```
int main(int argc, char *argv[]) {
  __builtin___strcpy_chk (a, argv[1], __builtin_object_size(a, ...));
  puts(a);
}
```

__builtin_object_size(...) > src_len

__builtin_object_size(...) ≯ src_len

```
extern char a[];

int main(int argc, char *argv[]) {
  strcpy(a, argv[1]);
  puts(a);
}
```

```
char a[4];

int main(int argc, char *argv[]) {
  __strcpy_chk(a, argv[1], dst_len);
  puts(a);
}
```

Пример с strcpy

```
int main(int argc, char *argv[]) {
  __strcpy_chk (a, argv[1], dst_size);
  puts(a);
}
```

```
char * __strcpy_chk(char *dest, const char *src, size_t destlen){
  size_t len = strlen(src);

  if (len >= destlen)
    abort();

  return memcpy(dest, src, len + 1);
}
```

Побочные эффекты в Clang

```
int main() {
  void *p;
  size_t n;
  if (getenv("TEST")) {
    p = &n;
    n = sizeof n;
    puts("Hello");
  } else {
    p = nullptr;
    n = 0;
  }
  memset(p, 0, n);
}
```

С фортификацией

```
int main() {
  getenv("TEST");
  puts("Hello");
}
```

- При фортификации у параметра memset выставляется атрибут nonnull
- Следствие - компилятор выбросит nullptr-ветку
- Детали в LLVM #60389

Поддержка Hardening в языке

Новый тип поведения в C++

- Типы поведения
  - Undefined
    - оптимизатор может делать любые преобразования
  - Unspecified
    - Недокументированно зависит от реализации
  - Implementation-defined
    - Документированно зависит от реализации

Новый тип поведения в C++

- Типы поведения
  - Undefined
    - оптимизатор может делать любые преобразования
  - Unspecified
    - Недокументированно зависит от реализации
  - Implementation-defined
    - Документированно зависит от реализации
  - **Erroneous**

Erroneous behavior

- Определенное поведение для некорректного кода
  - Не должно приводить к уязвимостям
- Противопоставляется UB
- В C++26 пока только для неинициализированных переменных (P2795)
  - Возможно для некоторых missing return (P2973)
- Вероятно будет реализовано на базе флага `-ftrivial-auto-var-init`

```
int foo(){
  int x;
  return x ? 1 : 1;
}
```

C++23 (UB)

```
int foo(){
  abort();
}
```

```
int foo(){
  while(true);
}
```

```
int foo(){
  return 0x42;
}
```

C++26 (Erroneous)

```
int foo(){
  return 1;
}
```

[[indeterminate]] атрибут

- Отключает Erroneous Behavior для локальной переменной или параметра функции (не будет инициализации, возврат к UB)
- Используется для оптимизации

```
void f(int);

void g() {
  int x [[indeterminate]]; // indeterminate value
  int y;                   // erroneous value

  f(x); // undefined behavior
  f(y); // erroneous behavior
}
```

Standard library hardening в Стандарте

- P3471
- Стандартизация предусловий для некоторых функций стандартной библиотеки
  - Hardened preconditions
    - Например `idx < size` в `vector::operator[]`
  - Будут реализованы на контрактах (precondition assertions)
- Тулчейны будут предоставлять флаги для включения
  - Например `-fhardened` или `-D_LIBCPP_HARDENING_MODE`

C++ Profiles

- Развитие и стандартизация C++ Core Guidelines
- Подмножества языка
  - Запрет небезопасных или непроверяемых конструкций
  - Контролируется локальным статическим анализом
- Средства миграции
  - C++ Safe Buffers, Clang-Tidy fix-its
    - Уже используется в Chrome
- Кандидаты для включения в Safety Profiles:
  - Hardening стандартной библиотеки
  - Запрет сырых указателей
  - Явное владение ресурсом (RAII)
  - Запрет небезопасных приведений типов
  - И т.д.
- Станут ли профили единым механизмом для унификации hardening?

Safety Profiles:
Type-and-resource Safe programming in ISO Standard C++

Bjarne Stroustrup
Columbia University
www.stroustrup.com
Gabriel Dos Reis
Microsoft

Заключение

Выводы

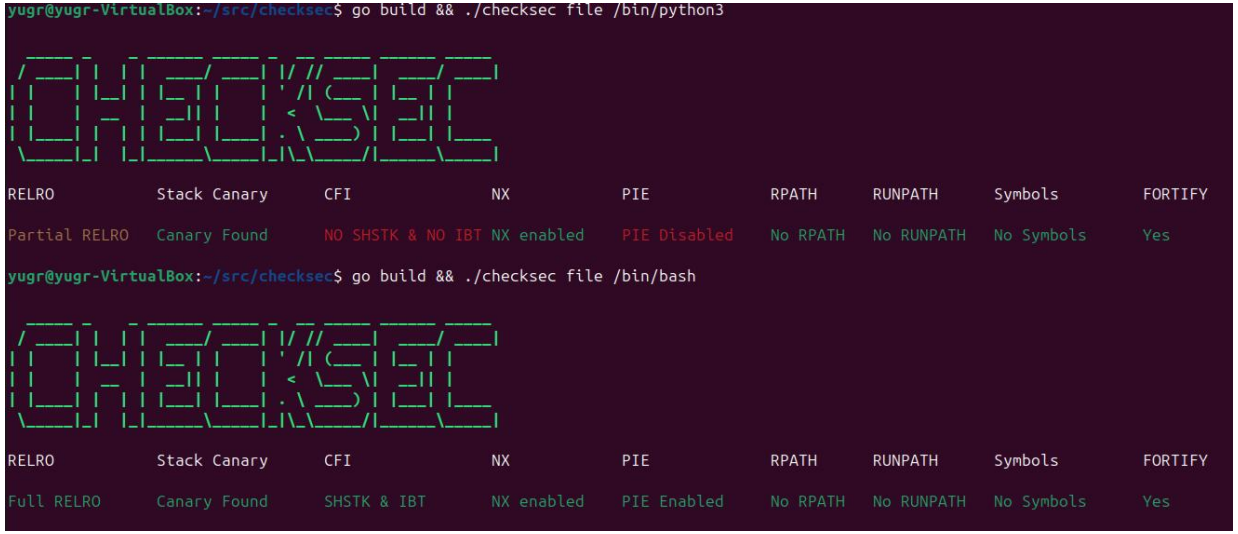
- Hardening это state-of-the-art часть разработки современного ПО
- Существует большое количество методов с разной степенью защиты и оверхеда
- Они будут всё больше применяться на практике из-за развития безопасных языков и ужесточения требований заказчиков и регуляторов
  - В том числе стандартизовываться в языке
- Даст ли это конкурентные преимущества C++ в соревновании с Memory Safe языками ?

Что стоит сделать ?

- Проверить опции сборки продуктового кода и дистрибутива
  - В том числе опции компилятора, включенные по умолчанию
- Решить с Security Team какие hardening-методы включить и в каких компонентах
- *Минимальный* рекомендуемый набор:
  - ASLR: `-fPIE -pie`
  - Stack Protector: `-fstack-protector-strong`
  - Фортификация: `-D_FORTIFY_SOURCE=2`
  - Full RELRO: `-Wl,-z,relro -Wl,-z,now`
  - Защита от Stack Clash: `-fstack-clash-protection`
  - Control-flow Integrity: `-fcf-protection` на X86, `-mbranch-protection` на AArch64

Что стоит сделать ?

- Поиск недозащищённых программ (no-PIE, etc.) можно автоматизировать с помощью утилиты checksec
  - Обязательно собирать самому (в дистрибутивах устаревшая версия checksec.sh)
  - Лучше также явно проконтролировать флаги сборки



- Может проверить наличие noexecstack, PIE, _FORTIFY_SOURCE, RELRO, etc.
  - Только динамически слинкованные приложения/библиотеки
  - Пока (?) не поддерживает некоторые новые защиты: Stack Clashing (#300), Safe Stack (#301), LLVM CFI

О чём мы не рассказали ...

- Hardening в других популярных дистрибутивах Linux (RedHat/Alma, OpenSUSE, Alpine, etc.) и встроенных системах
  - Building Embedded Systems Like It's 1996 (2022)
- Hardening в других OS (Android, Windows, macOS, BSDs)
- Hardening в ядре OS
  - Linux Kernel Defence Map (2025)
- Hardening-защиты в критическом ПО
  - Чаты, почтовые клиенты, мультимедиа, интерпретаторы, БД, офисное ПО, ридеры
- Hardening в других безопасных языках (Java, Swift, Ada, Solidity, etc.)
- Hardening в JIT-компиляторах
- Аппаратный hardening (AArch64 TBI и MTE, CHERI)

Что почитать ?

- Руководства по hardening
  - OpenSSF Compiler Options Hardening Guide for C and C++
  - Linux Hardening Guide
- Обзоры защит
  - Обзор механизмов усиления защищенности операционных систем и пользовательских приложений (ИСП РАН)
- Обзоры атак
  - Nightmare
  - Overview of GLIBC heap exploitation techniques
- Блоги
  - Google Security Blog
  - Embedded in Academia (John Regehr): A Guide to Undefined Behavior in C and C++ и UB in 2017

Благодарности

- Сергей Бронников (VK Tech/Tarantool)
  - https://bronevichok.ru/
- Роман Лебедев (Spectral::Technologies)
- Программный комитет C++ Zero Cost

Спасибо за внимание !

- Последняя версия слайдов доступна по адресу
  - https://github.com/yugr/slides/blob/main/CppZeroCost/2025/RU.pptx

- Вопросы ?

Приложения

Воспроизведение результатов

- Версии дистрибутивов:
  - Проверялись последние *стабильные* версии
  - Debian 12 (bookworm), Fedora 42, Ubuntu 24.04 (noble)
- Версии браузеров:
  - Firefox: https://github.com/mozilla-firefox/firefox (тег FIREFOX_142_0b1_RELEASE)
  - Chrome: https://chromium.googlesource.com/chromium/src (тег 140.0.7313.1)
- Замеры производительности Clang:
  - Компилировали CGBuiltin.cpp с -O2 (самый большой файл)
  - https://github.com/yugr/slides/tree/main/CppZeroCost/2025/bench
- Подсчёт CVE/KEV-метрик:
  - https://github.com/yugr/slides/tree/main/CppZeroCost/2025/scripts
- Пруфлинки и дополнительная информация доступны в файле:
  - https://github.com/yugr/slides/blob/main/CppZeroCost/2025/plan.md

Stack Protector: Как включить ?

- Включен по умолчанию только в компиляторе Ubuntu GCC (нет в Fedora и Debian, нет в Clang) и Windows
  - Рекомендуется явно указывать флаг `-fstack-protector-strong`
  - Пакеты в Debian, Fedora, Ubuntu собираются с этим флагом
    - В Debian 10 только 85% пакетов использовали SP (Building Embedded Systems Like It's 1996)
- Включён в релизной сборке Firefox
- В Chrome включён слабый вариант Stack Protector

Safe Stack: Как включить ?

- Несколько реализаций:
  - SafeStack: `-fsanitize=safe-stack` (наиболее распространённый флаг)
  - Intel CET Shadow Stack: `-fcf-protection`
  - ShadowCallStack: `-fsanitize=shadow-call-stack`
- Защита не включена по умолчанию в дистрибутивах и браузерах Chrome/Firefox

Stack Clashing: Как использовать ?

- Включен по умолчанию только в компиляторе Ubuntu GCC (нет в Fedora и Debian, нет в Clang)
  - Рекомендуется явно указывать флаг `-fstack-clash-protection`
  - Пакеты в Debian, Fedora, Ubuntu собираются с этим флагом
- Использование в дистрибутивах:
  - Пакеты Fedora и Ubuntu дефолтно собираются с Stack Clash
  - Статус на Debian неясен (compiler-flags-distro #12)
    - На Debian 12 (stable) не защищены даже уязвимые программы: bash, bzip2, curl, ffmpeg, perl, python, etc.
- Firefox использует защиту от Stack Clash (BZ #1852202), а Chrome нет

_FORTIFY_SOURCE: Как включить ?

- Для явного включения используются макросы –`D_FORTIFY_SOURCE=2` или –`D_FORTIFY_SOURCE=3`
  - Пока не появится –`D_FORTIFY_SOURCE=4` ☺
- Включена по умолчанию в компиляторе Ubuntu GCC (–`D_FORTIFY_SOURCE=3`)
  - Не включена в Debian и Fedora
  - Для Clang не включена по умолчанию нигде
- Использование в реальных проектах
  - В Debian пакеты дефолтно собираются с –`D_FORTIFY_SOURCE=2`
  - В Ubuntu с –`D_FORTIFY_SOURCE=3`
  - В Fedora: пакеты дефолтно собираются с –`D_FORTIFY_SOURCE=3` (с 2023)
  - Chrome и Firefox собираются с –`D_FORTIFY_SOURCE=2`

STL hardening: Как включить ?

- Libstdc++: `-D_GLIBCXX_ASSERTIONS`
  - (дефолтная STL в GCC и Clang)
- Libc++: `-D_LIBCPP_HARDENING_MODE=...`
  - (включается в Clang по флагу `-stdlib=libc++`)
- Visual Studio: `-D_ITERATOR_DEBUG_LEVEL=1`
- По умолчанию не включена в компиляторах в дистрибутивах Debian, Ubuntu и Fedora
- Использование в реальных проектах:
  - Включена по умолчанию для пакетов Fedora, но не для Debian и Ubuntu
  - Google: Chrome and server systems
    - Retrofitting spatial safety to hundreds of millions of lines of C++

Hardened allocators: Как включить ?

- Обычно просто `LD_PRELOAD=path/to/allocator.so`
- Проверки в Glibc включаются по `MALLOC_CHECK_=3` или `GLIBC_TUNABLES=glibc.malloc.check=3`
- Использование в реальных проектах:
  - Большинство дистрибутивов Linux используют Glibc
  - Android использует Scudo по дефолту
  - Chrome использует hardened-аллокатор PartitionAlloc
    - Efficient And Safe Allocations Everywhere!
  - Firefox использует не-hardened аллокатор :(
    - Firefox and Chromium: Memory Allocator Hardening

Full RELRO: Как включить ?

- Опции линкера для включения Full RELRO: `-Wl,-z,now -Wl,-z,relro`
  - В Ubuntu включены по умолчанию в GCC, но не в Clang (в Clang только partial RELRO)
  - В Debian и Fedora не включены по умолчанию ни в GCC, ни в Clang
- Использование в реальных проектах
  - В Ubuntu и Fefora пакеты дефолтно собираются с Full RELRO
  - В пакетах Debian Full RELRO дефолтно не включён
  - Включён по дефолту в Chrome (BUILD.gn) и Firefox (flags.configure)

Автоинициализация: Как включить ?

- Флаг `-ftrivial-auto-var-init=zero` в GCC и Clang
  - Не включён по умолчанию в компиляторе в Ubuntu, Debian, Fedora
- Скрытый флаг -initiall в Visual Studio
- Использование в реальных проектах:
  - Не включён по умолчанию в пакетах Ubuntu, Debian, Fedora
  - Дискуссия в трекере Ubuntu (#1972043)
- Включён в Chrome (Chromium #40633061)
  - Исправление и отключение hot paths заняло ~4 месяца
- Пока не включён в Firefox (Trivial Auto Var Init Experiments)
- Включён в Android user- и kernelspace (System hardening in Android 11)

Целочисленные переполнения: Как включить ?

- GCC: `-fsanitize-trap=signed-integer-overflow,pointer-overflow`
  - GCC не поддерживает `integer`
  - Ещё раз отметим что `-ftrapv` *неработоспособна*
- Clang: `-fsanitize=signed-integer-overflow,pointer-overflow -fsanitize-minimal-runtime`
  - Рекомендую также добавлять `-fsanitize=integer` (может потребоваться добавить некоторые STL хедеры, например <random>, в blacklist)
- Использование в реальных проектах:
  - Защита не используется в Ubuntu, Debian, Fedora, а также в браузерах Chrome и Firefox
  - Включена в Android media stack:
    - Android Developers Blog: Hardening media stack
    - Android Developers Blog: Compiler-based security mitigations in Android P

CFI: Использование

- Включена по дефолту на Android
- LLVM CFI не включена дефолтно для пакетов в Ubuntu, Debian, Fedora
  - LTO + отсутствие поддержки в GCC
- Intel CET и AArch64 CFI дефолтно включён для пакетов в Ubuntu, Fedora и Debian
- Chrome использует LLVM CFI для X86 и AArch64 CFI для ARM
  - Firefox не использует никакой вариант CFI

CFI: Как включить ?

- LLVM CFI:
  - Не включена по умолчанию ни в GCC, ни в Clang в Ubuntu, Debian, Fedora
  - Включается по `-fsanitize=cfi` (также требует `-flto=thin -fvisibility=hidden`)
  - (LTO нужна для построения полного call graph программы, visibility для сокращения внешних вызовов)
  - Для межбиблиотечных вызовов нужна `-fsanitize-cfi-cross-dso` (замедляет выполнение)
- Intel CET:
  - Включается по `-fcf-protection`
    - Раньше ещё нужно было указывать флаги `-mcet`, `-mshstk` и `-mibt`, но теперь нет
  - Включена по умолчанию в GCC в Ubuntu (Toolchain: Compiler flags)
- AArch64 CFI:
  - Включается по `-mbranch-protection=standard`
  - Никто не знает почему не использовали `-fcf-protection` :(