Анализ и оптимизация на софтуерни приложения

Александър Пенев

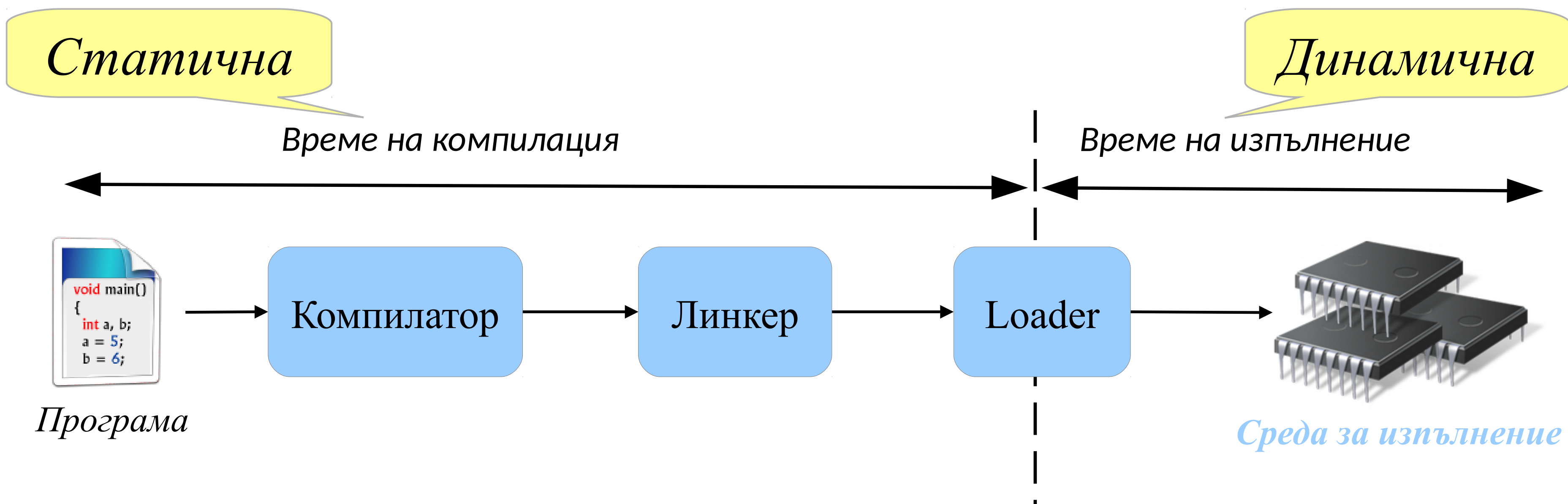
Васил Василев

Какво могат и какво не могат компилаторите

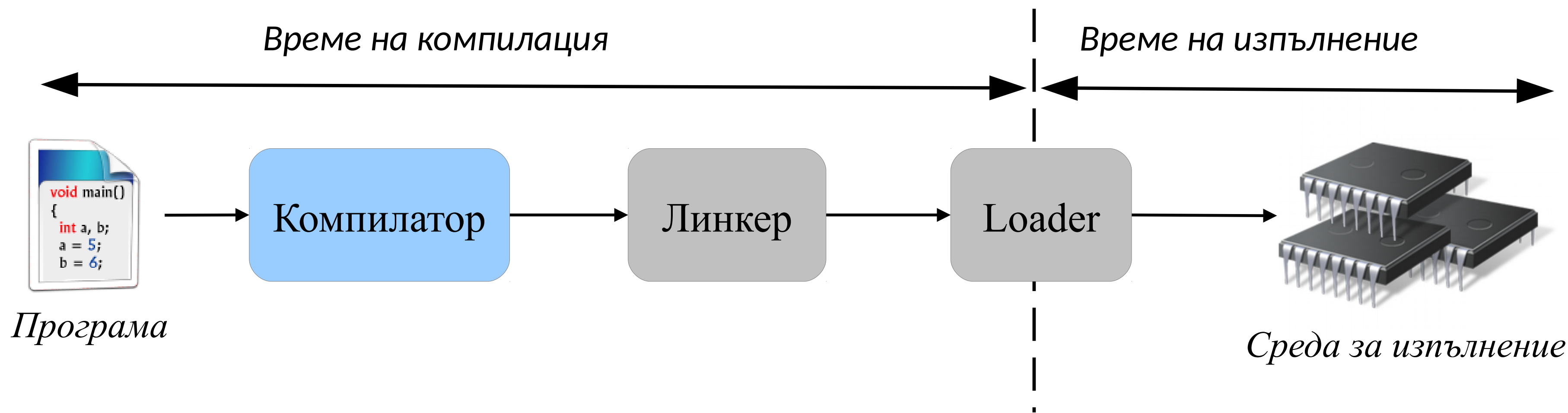
Съдържание

1. Оптимизационен континуум
2. Някои известни видове оптимизации

Оптимизационен континуум

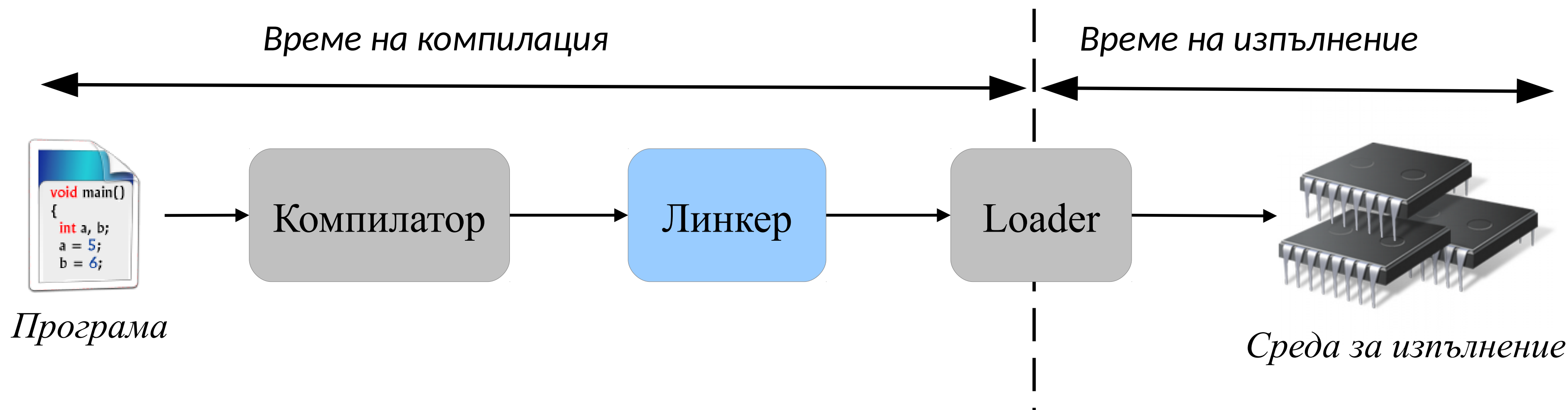


Оптимизационен континуум



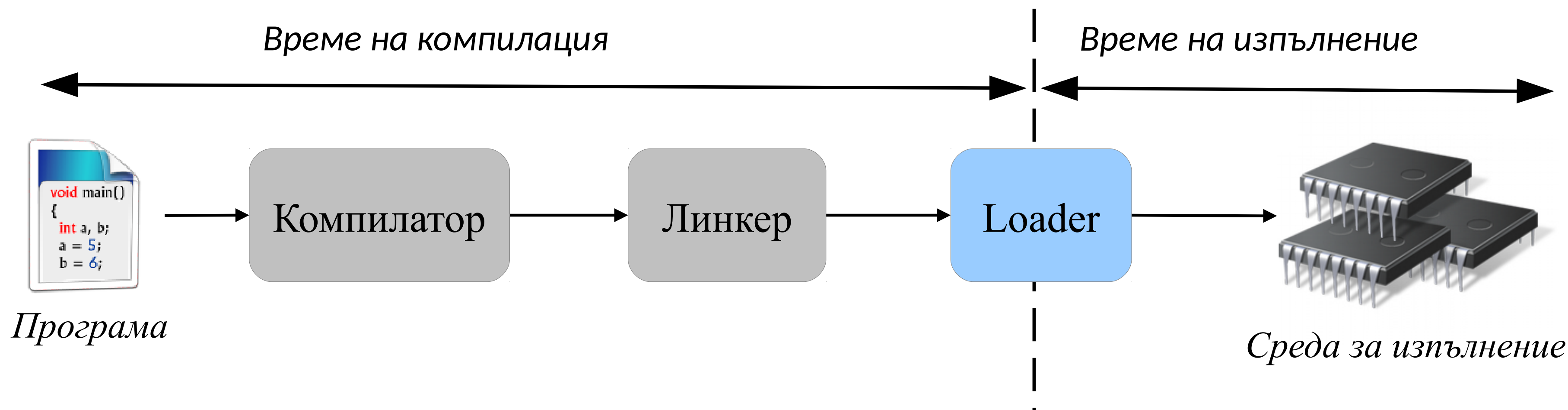
- Знае цялата входна програма
- Лесно управляват трансформациte от високо ниво към ниско ниво
- Времето на компилация не е проблем
- Не вижда цялата програма
- Не знае (много) за средата на изпълнение
- Не знае (много) за архитектурата на изпълнение

Оптимизационен континуум



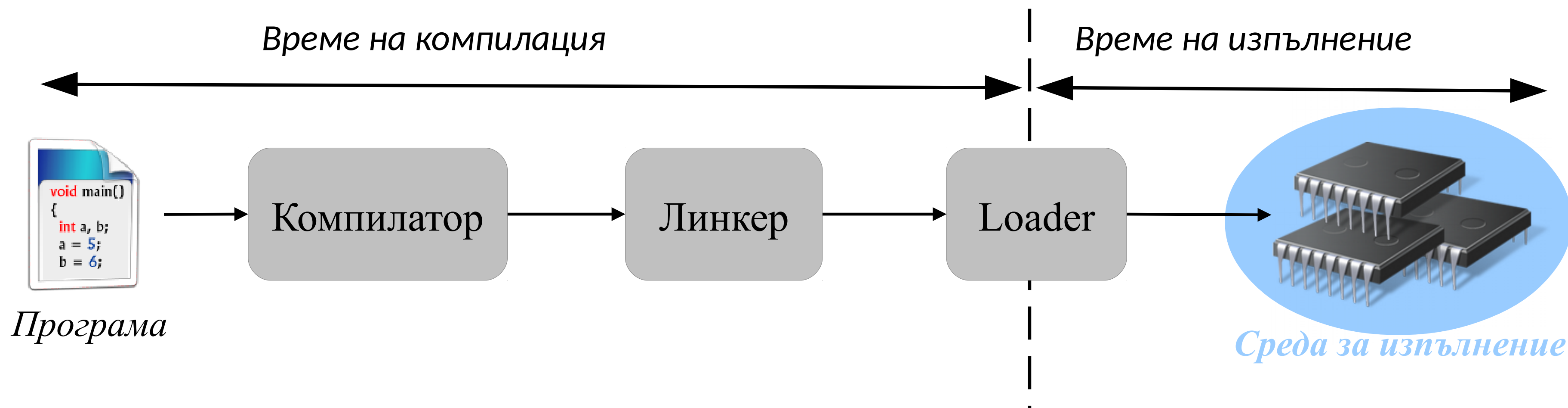
- Знае цялата входна програма
- Може да не вижда цялата програма
- Няма достъп до сорс кода
- Не знае (много) за средата на изпълнение
- Не знае (много) за архитектурата на изпълнение

Оптимизационен континуум



- Знае цялата входна програма
- Може да не вижда цялата програма
- Няма достъп до сорс кода
- Не знае (много) за средата на изпълнение
- Не знае (много) за архитектурата на изпълнение

Оптимизационен континуум



- Знае цялата входна програма
- Знае за средата на изпълнение
- Няма достъп до сорс кода
- Времето за оптимизации отнема от времето за изпълнение

Анализ на потока данни

Data Flow Analysis

Техниката се използва за събиране на информация за възможното множество от стойности, изчислени в различни точки на програмата

По време на компилация получаваме информация за стойностите по време на изпълнение за променливи или изрази. Намира:

- Кои оператори за присвояване са били използвани за получаване на текущата стойност на променливата в дадената точка
- Кои променливи имат стойности, които не се използват от дадена точка нататък в програмата
- Какъв е множеството възможни стойности на променливата в дадената точка на програмата

Пример

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + y*(t1+t2);
  }

  return x;
  x++;
}
```

Пример

```
 ****   int calc(int N, int t1, int t2){
 9      .loc 1 2 0
10      .cfi_startproc
11      pushq %rbp
12   .LCFI0:
13      .cfi_def_cfa_offset 16
14      .cfi_offset 6, -16
15      movq  %rsp, %rbp
16   .LCFI1:
17      .cfi_def_cfa_register 6
18      movl  %edi, -20(%rbp)
19      movl  %esi, -24(%rbp)
20      movl  %edx, -28(%rbp)
****    x = 0;
21      .loc 1 6 0
22      movl  $0, -8(%rbp)
****    y = 0;
23      .loc 1 7 0
24      movl  $0, -4(%rbp)
****    for (i = 0; i <= N; i++) {
25      .loc 1 9 0
26      movl  $0, -12(%rbp)
27      jmp   .L2
28   .L3:
29      .loc 1 10 0 discriminator 2
****    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
30      movl  -28(%rbp), %eax
31      sall  $3, %eax
32      movl  %eax, %edx
33      sarl  $31, %edx
```

```
34      idivl -24(%rbp)
35      movl  %eax, %edx
36      imull -12(%rbp), %edx
37      movl  -20(%rbp), %eax
38      movl  -12(%rbp), %ecx
39      leal  (%rcx,%rax), %esi
40      movl  -20(%rbp), %eax
41      movl  -12(%rbp), %ecx
42      addl  %ecx, %eax
43      imull %esi, %eax
44      addl  %edx, %eax
45      addl  %eax, -8(%rbp)
46      .loc 1 11 0 discriminator 2
****    x = x + y*(t1+t2);
47      movl  -28(%rbp), %eax
48      movl  -24(%rbp), %edx
49      addl  %edx, %eax
50      imull -4(%rbp), %eax
51      addl  %eax, -8(%rbp)
****    for (i = 0; i <= N; i++) {
52      .loc 1 9 0 discriminator 2
53      addl  $1, -12(%rbp)
54   .L2:
****    for (i = 0; i <= N; i++) {
55      .loc 1 9 0 is_stmt 0 discriminator 1
56      movl  -12(%rbp), %eax
57      cmpl  -20(%rbp), %eax
58      jle   .L3 ****   }
****    return x;
59      .loc 1 14 0 is_stmt 1
60      movl  -8(%rbp), %eax ****   }
```

Разпространение на константи

Constant Propagation

Анализ

- Ако при всички възможни пътища на изпълнение, стойността на променливата е константна за дадена точка на използване

Трансформация

- Замества се променливата с тази константа

Последствия:

- Няма нужда да се съхранява тази стойност в променлива
  Освобождава се памет или регистър
- Може да доведе до нужда от допълнителна оптимизация

Разпространение на константи

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + y*(t1+t2);
  }

  return x;
  x++;
}
```

Разпространение на константи

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + y*(t1+t2);
  }

  return x;
  x++;
}
```

Разпространение на константи

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + y*(t1+t2);
  }

  return x;
  x++;
}
```

Не е константа при всички пътища на изпълнение

Разпространение на константи

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + y*(t1+t2);
  }

  return x;
  x++;
}
```

Не е константа при всички пътища на изпълнение

Разпространение на константи

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + y*(t1+t2);
  }

  return x;
  x++;
}
```

Разпространение на константи

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + 0*(t1+t2);
  }

  return x;
  x++;
}
```

Опростяване на изрази

Algebraic Simplification

Анализ

- Ако даден израз е изчислим по време на компилация
- Ако могат да се използват по-бързи инструкции

Трансформация

- X * 0 = 0; X * 1 = X; X * 32 = X << 4
- X + 0 = X; X + X = X << 2

Последствия:

- По-малко работа по време на изпълнение
- Може да доведе до допълнителна оптимизация
- Машината, която изпълнява кода може да се държи различно от тази, на която е компилиран

  Например: underflow, overflow
- Проблеми с комутативността и транзитивността

Опростяване на изрази

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + 0*(t1+t2);
  }

  return x;
  x++;
}
```

Опростяване на изрази

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + 0*(t1+t2);
  }

  return x;
  x++;
}
```

Опростяване на изрази

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + 0;
  }

  return x;
  x++;
}
```

Опростяване на изрази

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x + 0;
  }

  return x;
  x++;
}
```

Опростяване на изрази

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x;
  }

  return x;
  x++;
}
```

Разпространение на копията

Copy Propagation

Анализ

- Ако се правят излишни копия на променливи

Трансформация

- Y = X → Z = 3 + X
  Z = 3 + Y

Последствия:

- По-малко генерирани инструкции
- По-малко използвана памет/регистри
- Може да доведе до неправилно заделяне на регистри (register spills)

Разпространение на копията

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);
    x = x;
  }

  return x;
  x++;
}
```

Разпространение на копията

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);

  }

  return x;
  x++;
}
```

Елиминиране на общите подизрази

Common Expression Elimination

Анализ

- Ако един и същ подизраз се изчислява повече от един път

Трансформация

- Подизразът се присвоява на променлива и се използва променливата на останалите места

Последствия:

- По-малко генерирани инструкции
- По-малко изчисления
- Има нужда от допълнителна памет/регистри и може да доведе до неправилно заделяне на регистри (register spills)
- Може да възпрепятства паралелизацията като добави излишни зависимости

Елиминиране на общите подизрази

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);

  }

  return x;
  x++;
}
```

Елиминиране на общите подизрази

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    x = x + (8*t2/t1)*i + (i+N)*(i+N);

  }

  return x;
  x++;
}
```

Елиминиране на общите подизрази

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y, t;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + (8*t2/t1)*i + t*t;

  }

  return x
  x++;
}
```

Какво може да се направи още?

Елиминиране на мъртъв код

Dead Code Elimination

Анализ

- Ако резултатът от изчислението не се използва
  Dead store
- Ако няма път на изпълнение, по който да се стигне до оператора
  Unreachable code

Трансформация

- Премахва се

Последствия:

- По-малко генерирани инструкции
- Може да освободи ресурса по-рано
- По-малко памет/регистри (няма нужда от съхраняване на резултата)

Елиминиране на мъртъв код

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y, t;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + (8*t2/t1)*i + t*t;

  }

  return x
  x++;
}
```

Елиминиране на мъртъв код

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, y, t;

  x = 0;
  y = 0;

  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + (8*t2/t1)*i + t*t;

  }

  return x
  x++;
}
```

Елиминиране на мъртъв код

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, t;

  x = 0;


  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + (8*t2/t1)*i + t*t;

  }

  return x
  x++;
}
```

Елиминиране на мъртъв код

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, t;

  x = 0;


  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + (8*t2/t1)*i + t*t;

  }

  return x
  x++;
}
```

Елиминиране на мъртъв код

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, t;

  x = 0;


  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + (8*t2/t1)*i + t*t;

  }

  return x

}
```

Изваждане на инварианти от цикли

Loop Invariant Removal

Анализ

- Ако изчислението не зависи от итерациите на цикъла

Трансформация

- Изважда се извън цикъла

Последствия:

- Много по-малко работа в цикъла
- Трябва да съхрани в променлива извън цикъла, което увеличава областта на видимост и жизнения цикъл на променливата и може да доведе до неоптимално алокиране на регистрите (register spills)

Изваждане на инварианти от цикли

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, t;

  x = 0;


  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + (8*t2/t1)*i + t*t;

  }

  return x

}
```

Изваждане на инварианти от цикли

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, t;

  x = 0;


  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + (8*t2/t1)*i + t*t;

  }

  return x

}
```

Изваждане на инварианти от цикли

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, t, u;

  x = 0;

  u = (8*t2/t1);
  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + u*i + t*t;

  }

  return x

}
```

Замяна на операции

Strength Reduction

Анализ

- Ако може да замени операция с друга изискваща по-малко изчисления

Трансформация

- for(i=0) t=a*i; → t=0; for(i=0) t=t+a;

Последствия:

- По-малко изчисления
- Трябва да съхрани в променлива извън цикъла, което увеличава областта на видимост и жизнения цикъл на променливата и може да доведе до неоптимално алокиране на регистрите (register spills)
- Въвежда зависимост и паралелния цикъл става последователен.
  Оправя се с инверсната (обратната) оптимизация

Замяна на операции

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, t, u;

  x = 0;

  u = (8*t2/t1);
  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + u*i + t*t;

  }

  return x

}
```

Замяна на операции

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, t, u;

  x = 0;

  u = (8*t2/t1);
  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + u*i + t*t;

  }

  return x

}
```

```
u*0 → v = 0
u*1 → v = v+u
u*2 → v = v+u
u*3 → v = v+u
...
```

Замяна на операции

```
int calc(int N, int t1, int t2)
{
  int i;
  int x, t, u, v;

  x = 0;
  u = (8*t2/t1);
  v = 0;
  for (i = 0; i <= N; i++) {
    t = i+N;
    x = x + v + t*t;
    v = v + u;
  }

  return x

}
```

Какво спира оптимизациите

Оптимизаторът трябва да гарантира еквивалентността на програмата:

- За всички възможни входни данни
- За всички възможни начини на изпълнение
- За всички възможни архитектури

За да оптимизира програмата, компилаторът трябва да знае за и да разбира:

- Потока инструкции (Control Flow)
- Начинът на достъп до данните

През повечето време компилаторът не разполага с цялата информация за програмата. Тогава той:

- Редуцира региона, където трансформацията е приложима
- Редуцира агресивността на трансформациите
- Не оптимизира

Анализ на потока инструкции

Control Flow Analysis

Техниката се използва за събиране на информация изпълнението на отделни оператори, инструкции или извиквания на подпрограми

Представяния в компилатора:

- Граф на извикванията (Call graph)
- Граф на изпълнението (Control flow graph)

Какво възпрепятства анализа:

- Указатели към функции
- Индиректни преходи
- Изчислими goto оператори
- Големи switch оператори
- Цикли с exit и break оператори
- Цикли с неизвестни граници
- Условия с непредвидими преходи

Анализ на достъпа до данни

Data Accessors Analysis

Кой още може да чете и пише по данните

Представяния в компилатора:

- Дефинирай-използвай верига (Def-Use chain)
- Вектор на зависимостите

Какво възпрепятства анализа:

- Променливи по адрес
- Глобални променливи
- Параметри
- Масиви
- Указатели
- Volatile променливи

Instruction Scheduling

Правилната последователност от инструкции, които биха използвали максимално възможностите на процесора

Непоследователно изпълнение:

- Хардуера се опитва да разпредели инструкциите, които да бъдат изпълнени
- Компилаторът също може да помогне

  Хардуерът няма достатъчно време да оптимизира инструкциите, а и няма цялата информация

Последователно изпълнение:

- Разпределението на инструкции е КРИТИЧНО

Ограничения при разпределяне на инстр.

От данните

Ако две инструкции използват една променлива те могат да зависят една от друга

- Видове зависимости:
  - RAW/True: запис – четене
    Когато инструкция 1 записва стойност и тя се използва от инструкция 2
  - WAR/Anti: четене – запис
    Когато инструкция 1 чете стойност, която по-късно е презаписана от инструкция 2
  - WAW/Output: запис – запис
    Когато инструкция 1 записва стойност и инструкция две записва стойност в една и съща променлива

От последователността на изпълнение

От ресурсите