

Списъци

Трифон Трифонов

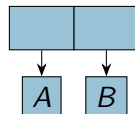
Функционално програмиране, 2022/23 г.

25 октомври–8 ноември 2022 г.

Тази презентация е достъпна под лиценза Creative Commons Признание-Некомерсиално-Споделяне на споделеното 4.0 Международен © ⓘ ⓘ ⓘ

Наредени двойки

(A . B)



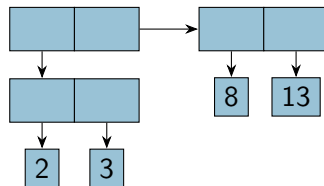
- (cons <израз₁> <израз₂>)
- Наредена двойка от оценките на <израз₁> и <израз₂>
- (car <израз>)
- **Първият** компонент на двойката, която е оценката на <израз>
- (cdr <израз>)
- **Вторият** компонент на двойката, която е оценката на <израз>
- (pair? <израз>)
- Проверява дали оценката на <израз> е наредена двойка

Примери

```
(cons (cons 2 3) (cons 8 13))
```

↓

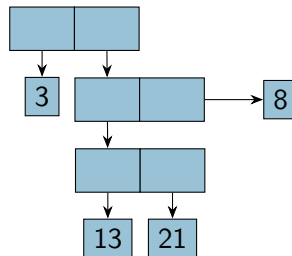
```
((2 . 3) . (8 . 13))
```



```
(cons 3 (cons (cons 13 21) 8))
```

↓

```
(3 . ((13 . 21) . 8))
```



S-изрази

Дефиниция

S-израз наричаме:

- атоми (булеви, числа, знаци, символи, низове, функции)
- наредени двойки $(S_1 \ . \ S_2)$, където S_1 и S_2 са S-изрази

S-изразите са най-общият тип данни в Scheme.

С тяхна помощ могат да се дефинират произволно сложни структури от данни.

All you need is λ — наредени двойки

Можем да симулираме cons, car и cdr чрез lambda!

Вариант №1:

```
(define (lcons x y) (lambda (p) (if p x y)))  
(define (lcar z) (z #t))  
(define (lcdr z) (z #f))
```

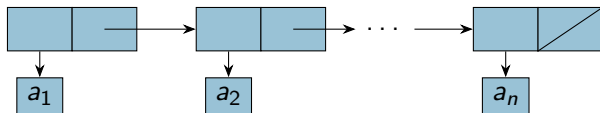
Вариант №2:

```
(define (lcons x y) (lambda (p) (p x y)))  
(define (lcar z) (z (lambda (x y) x)))  
(define (lcdr z) (z (lambda (x y) y)))
```

Списъци в Scheme

Дефиниция

- ❶ Празният списък $()$ е списък
- ❷ $(h . t)$ е списък ако t е списък
 - h — глава на списъка
 - t — опашка на списъка



$$(a_1 . (a_2 . (\dots (a_n . ())))) \iff (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n)$$

Вградени функции за списъци

- `(null? <израз>)` — дали <израз> е празният списък `()`
- `(list? <израз>)` — дали <израз> е списък
 - `(define (list? l) (or (null? l) (and (pair? l) (list? (cdr l)))))`
- `(list {<израз>})` — построява списък с елементи <израз>
- `(list <израз1> <израз2> ... <изразn>)` \iff
`(cons <израз1> (cons <израз2> ... (cons <изразn> '())))`
- `(cons <глава> <опашка>)` — списък с <глава> и <опашка>
- `(car <списък>)` — главата на <списък>
- `(cdr <списък>)` — опашката на <списък>
- `()` не е наредена двойка!
- `(car '())` \longrightarrow Грешка!, `(cdr '())` \longrightarrow Грешка!

Съкратени форми на car и cdr

Нека $l = (a_1 a_2 a_3 \dots a_n)$.

- $(\text{car } l) \longrightarrow a_1$
- $(\text{cdr } l) \longrightarrow (a_2 a_3 \dots a_n)$
- $(\text{car } (\text{cdr } l)) \longrightarrow a_2 \longleftarrow (\text{cadr } l)$
- $(\text{cdr } (\text{cdr } l)) \longrightarrow (a_3 \dots a_n) \longleftarrow (\text{cddr } l)$
- $(\text{car } (\text{cdr } (\text{cdr } l))) \longrightarrow a_3 \longleftarrow (\text{caddr } l)$
- имаме съкратени форми за до 4 последователни прилагания на car и cdr

Форми на равенство в Scheme

- **(eq? <израз₁> <израз₂>)** — връща #t точно тогава, когато оценките на <израз₁> и <израз₂> заемат едно и също място в паметта
- **(eqv? <израз₁> <израз₂>)** — връща #t точно тогава, когато оценките на <израз₁> и <израз₂> заемат едно и също място в паметта или са едни и същи по стойност **атоми** (без функции), дори и да заемат различно място в паметта
 - Ако (eq? <израз₁> <израз₂>),
то със сигурност (eqv? <израз₁> <израз₂>)
- **(equal? <израз₁> <израз₂>)** — връща #t точно тогава, когато оценките на <израз₁> и <израз₂> са едни и същи по стойност **атоми** или **наредени двойки**, чиито компоненти са равни в смисъла на equal?
 - В частност, equal? проверява за равенство на списъци
 - Ако (eqv? <израз₁> <израз₂>),
то със сигурност (equal? <израз₁> <израз₂>)

Вградени функции за списъци

- `(length <списък>)` — връща дължината на <списък>
- `(append {<списък>})` — конкатенира всички <списък>
- `(reverse <списък>)` — елементите на <списък> в обратен ред
- `(list-tail <списък> n)` — елементите на <списък> без първите n
- `(list-ref <списък> n)` — n-ти елемент на <списък> (от 0)
- `(member <елемент> <списък>)` — проверява дали <елемент> се среща в <списък>
 - По-точно, връща <списък> от <елемент> нататък, ако го има
 - Връща #f, ако <елемент> го няма в <списък>
 - Сравнението на елементи става с `equal?`
- `(memv <елемент> <списък>)` — като `member`, но сравнява с `eqv?`
- `(memq <елемент> <списък>)` — като `member`, но сравнява с `eq?`

Обхождане на списъци

При обхождане на `l`:

- Ако `l` е празен, връщаме базова стойност (**дъно**)
- Иначе, комбинираме главата (`car l`) с резултата от рекурсивното извикване над опашката (`cdr l`) (**стъпка**)

Примери: `length`, `list-tail`, `list-ref`, `member`, `memqv`, `memq`

Конструиране на списъци

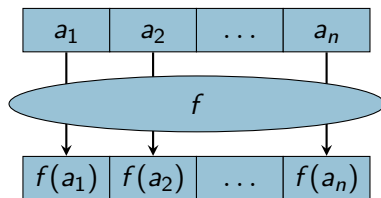
Използваме рекурсия по даден параметър (напр. число, списък...)

- На дъното връщаме фиксиран списък (например `()`)
- На стъпката построяваме с `cons` списък със съответната глава, а опашката строим чрез рекурсивно извикване на същата функция

Примери: `from-to`, `collect`, `append`, `reverse`

Изобразяване на списък (map)

Да се дефинира функция (**map** <функция> <списък>), която връща нов списък съставен от елементите на <списък>, върху всеки от които е приложена <функция>.



```
(define (map f l)
  (if (null? l) '()
      (cons (f (car l)) (map f (cdr l)))))
```

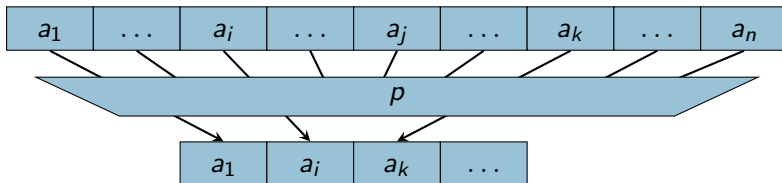
Изобразяване на списък (map) — примери

```
(define (map f l)
  (if (null? l) '()
      (cons (f (car l)) (map f (cdr l)))))
```

- `(map square '(1 2 3))` \longrightarrow `(1 4 9)`
- `(map cadr '((a b c) (d e f) (g h i)))` \longrightarrow `(b e h)`
- `(map (lambda (f) (f 2)) (list square 1+ odd?))` \longrightarrow `(4 3 #f)`
- `(map (lambda (f) (f 2)) (map twice (list square 1+ boolean?)))` \longrightarrow `(16 4 #t)`

Филтриране на списък (filter)

Да се дефинира функция (**filter** <условие> <списък>), която връща само тези от елементите на <списък>, които удовлетворяват <условие>.



```
(define (filter p? l)
  (cond ((null? l) l)
        ((p? (car l)) (cons (car l) (filter p? (cdr l))))
        (else (filter p? (cdr l)))))
```

Филтриране на списък (filter)

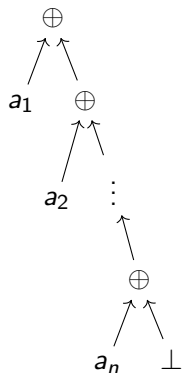
```
(define (filter p? l)
  (cond ((null? l) l)
        ((p? (car l)) (cons (car l) (filter p? (cdr l))))
        (else (filter p? (cdr l)))))
```

- `(filter odd? '(1 2 3 4 5))` \longrightarrow `(1 3 5)`
- `(filter pair? '((a b) c () d (e)))` \longrightarrow `((a b) (e))`
- `(map (lambda (x) (filter even? x)) '((1 2 3) (4 5 6) (7 8 9)))`
 \longrightarrow `((2) (4 6) (8))`
- `(map (lambda (x) (map (lambda (f) (filter f x)) (list negative? zero? positive?))) '((-2 1 0) (1 4 -1) (0 0 1)))`
 \longrightarrow `(((-2) (0) (1)) ((-1) () (1 4)) (() (0 0) (1)))`

Дясно свиване (foldr)

Да се дефинира функция, която по даден списък $l = (a_1 a_2 a_3 \dots a_n)$ пресмята:

$$a_1 \oplus \left(a_2 \oplus \left(\dots \oplus (a_n \oplus \perp) \dots \right) \right),$$



```
(define (foldr op nv l)
  (if (null? l) nv
      (op (car l) (foldr op nv (cdr l)))))
```

Дясно свиване (foldr) — примери

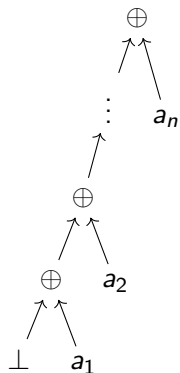
```
(define (foldr op nv l)
  (if (null? l) nv
      (op (car l) (foldr op nv (cdr l))))))
```

- `(foldr * 1 (from-to 1 5))` \rightarrow 120
- `(foldr + 0 (map square (filter odd? (from-to 1 5))))` \rightarrow 35
- `(foldr cons '() '(1 5 10))` \rightarrow (1 5 10)
- `(foldr list '() '(1 5 10))` \rightarrow (1 (5 (10 ())))
- `(foldr append '() '((a b) (c d) (e f)))` \rightarrow (a b c d e f)
- `map`, `filter` и `accumulate` могат да се реализират чрез `foldr`

Ляво свиване (foldl)

Да се дефинира функция, която по даден списък $l = (a_1 a_2 a_3 \dots a_n)$ пресмята:

$$\left(\dots \left((\perp \oplus a_1) \oplus a_2 \right) \oplus \dots \right) \oplus a_n$$



```
(define (foldl op nv l)
  (if (null? l) nv
      (foldl op (op nv (car l)) (cdr l))))
```

Ляво свиване (foldl) — примери

```
(define (foldl op nv l)
  (if (null? l) nv
      (foldl op (op nv (car l)) (cdr l))))
```

- $(\text{foldl } * 1 (\text{from-to } 1 5)) \rightarrow 120$
- $(\text{foldl } \text{cons } '() '(1 5 10)) \rightarrow (((() . 1) . 5) . 10)$
- $(\text{foldl } (\text{lambda } (x y) (\text{cons } y x)) '() '(1 5 10)) \rightarrow (10 5 1)$
- $(\text{foldl } \text{list } '() '(1 5 10)) \rightarrow (((() 1) 5) 10)$
- $(\text{foldl } \text{append } '() '((a b) (c d) (e f))) \rightarrow (a b c d e f)$
- foldr генерира линеен рекурсивен процес, а foldl — линеен итеративен

Функции от по-висок ред в Racket

В R^5RS е дефинирана само функцията `map`.

В Racket са дефинирани функциите `map`, `filter`, `foldr`, `foldl`

Внимание: `foldl` в Racket е дефинирана по различен начин!

`foldl` от лекции

```
(define (foldl op nv l)
  (if (null? l) nv
      (foldl op (op nv (car l))
              (cdr l))))
```

$$\left(\dots \left((\perp \oplus a_1) \oplus a_2 \right) \oplus \dots \right) \oplus a_n$$

`foldl` в Racket

```
(define (foldl op nv l)
  (if (null? l) nv
      (foldl op (op (car l) nv)
              (cdr l))))
```

$$a_n \oplus \left(\dots \left(a_2 \oplus (a_1 \oplus \perp) \right) \dots \right),$$

Свиване на непразен списък (foldr1, foldl1)

Задача. Да се намери максималният елемент на списък.

```
(define (maximum l) (foldr max ? 1))
```

Можем ли да пропуснем нулевата стойност за непразен списък?

$$a_1 \oplus (\dots \oplus (a_{n-1} \oplus a_n) \dots)$$

```
(define (foldr1 op l)
  (if (null? (cdr l)) (car l)
      (op (car l)
          (foldr1 op (cdr l)))))
```

$$(\dots ((a_1 \oplus a_2) \oplus \dots) \oplus a_n$$

```
(define (foldl1 op l)
  (foldl op (car l) (cdr l)))
```

Работа с дълбоки списъци

```
((1 (2)) (((3) 4) (5 (6)) () (7)) 8)
```

Задача. Да се преброят в атомите в дълбок списък.

Подход: Обхождане в две посоки: хоризонтално и вертикално

- **Хоризонтално дъно:** достигане до празен списък `()`
- **Вертикално дъно:** достигане до друг атом
- **Хоризонтална стъпка:** обхождане на опашката `(cdr l)`
- **Вертикална стъпка:** обхождане на главата `(car l)`

За удобство можем да дефинираме функцията `atom?`:

```
(define (atom? x) (and (not (null? x)) (not (pair? x))))
```

Примери

Задача. Да се преброят в атомите в дълбок списък.

`(count-atoms '((1 (2)) (((3) 4) (5 (6)) () (7)) 8))` \longrightarrow 8

```
(define (count-atoms l)
  (cond ((null? l) 0)
        ((atom? l) 1)
        (else (+ (count-atoms (car l)) (count-atoms (cdr l))))))
```

Задача. Да се съберат всички атоми от дълбок списък.

`(flatten '((1 (2)) (((3) 4) (5 (6)) () (7)) 8))` \longrightarrow (1 2 3 4 5 6 7 8)

```
(define (flatten l)
  (cond ((null? l) '())
        ((atom? l) (list l))
        (else (append (flatten (car l)) (flatten (cdr l))))))
```


Примери

Задача. Да се обърне редът на атомите в дълбок списък.

`(deep-reverse '((1 (2)) (((3) 4) (5 (6)) () (7)) 8))` \longrightarrow
`(8 ((7) ()) ((6) 5) (4 (3))) ((2) 1))`

```
(define (deep-reverse l)
  (cond ((null? l) '())
        ((atom? l) l)
        (else (append (deep-reverse (cdr l))
                        (list (deep-reverse (car l)))))))
```

Свиване на дълбоки списъци

(deep-foldr <х-дъно> <в-дъно> <операция> <списък>)

```
(define (deep-foldr op term nv l)
  (cond ((null? l) nv)
        ((atom? l) (term l))
        (else (op (deep-foldr op term nv (car l))
                    (deep-foldr op term nv (cdr l))))))
```

```
(define (count-atoms l) (deep-foldr + (lambda (x) 1) 0 l))
```

```
(define (flatten l) (deep-foldr append list '() l))
```

```
(define (snoc x l) (append l (list x)))
```

```
(define (deep-reverse l) (deep-foldr snoc id '() l))
```

Директна реализация на deep-foldr

Как работи deep-foldr?

- пуска себе си рекурсивно за всеки елемент на дълбокия списък
- при достигане на вертикално дъно (атоми) прилага term
- и събира резултатите с op

Можем да реализираме deep-foldr чрез map и foldr!

```
(define (branch p? f g) (lambda (x) (p? x) (f x) (g x)))
(define (deep-foldr op term nv l)
  (foldr op nv
    (map (branch atom?
              term
              (lambda (l) (deep-foldr op term nv l)))
      l)))
```

Задача. Реализирайте функция за ляво свиване на дълбоки списъци deep-foldl.

Вариадични функции — приемащи произволен брой аргументи

- `(lambda <списък> <тяло>)`
- създава функция с `<тяло>`, която получава `<списък>` от параметри
- `(lambda ({<параметър>}+ . <списък>) <тяло>)`
- създава функция с `<тяло>`, която получава няколко задължителни `<параметър>` и `<списък>` от опционални параметри
- `(define (<функция> . <списък>) <тяло>)`
- еквивалентно на
`(define <функция> (lambda <списък> <тяло>))`
- `(define (<функция> {<параметър>}+ . <списък>) <тяло>)`
- еквивалентно на
`(define <функция> (lambda ({<параметър>}+ . <списък>) <тяло>))`

Примери

- `(define (maximum x . l) (foldl1 max (cons x l)))`
- `(maximum 7 3 10 2) → 10`
- `(maximum 100) → 100`
- `(maximum) → Грешка!`
- `(define (g x y . l) (append x l y l))`
- `(g '(1 2 3) '(4 5 6)) → (1 2 3 4 5 6)`
- `(g '(1 2 3) '(4 5 6) 7 8) → (1 2 3 7 8 4 5 6 7 8)`

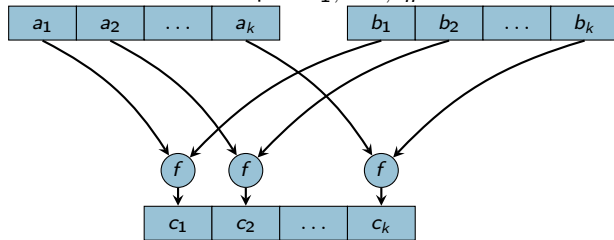
Прилагане на функция над списък от параметри (apply)

- `(apply <функция> <списък>)`
- прилага <функция> над <списък> от параметри
- **Примери:**
- `(apply + '(1 2 3 4 5)) → 15`
- `(apply append '((1 2) (3 4) (5 6))) → (1 2 3 4 5 6)`
- `(apply list '(1 2 3 4)) → (1 2 3 4)`

```
(define (append . l)
  (cond ((null? l) '())
        ((null? (car l)) (apply append (cdr l)))
        (else (cons (caar l)
                      (apply append (cons (cdar l) (cdr l)))))))
```

Вариадичен `map`

- Функцията `map` може да се използва с произволен брой списъци!
- `(map <n-местна функция> l1 ... ln)`
- Конструира нов списък, като прилага <n-местна функция> над съответните поредни елементи на списъците l_1, \dots, l_n



- `(map + '(1 2 3) '(4 5 6)) → (5 7 9)`
- `(map list '(1 2 3) '(4 5 6)) → ((1 4) (2 5) (3 6))`
- `(map foldr (list * +) '(1 0) '((1 2 3) (4 5 6))) → (6 15)`

Оценяване на списък като комбинация (eval)

- `(eval <списък> <среда>)`
- връща оценката на **оценката на** `<списък>` в `<среда>`
- `(interaction-environment)` — текущата среда, в която оценяваме
- `(define (evali x) (eval x (interaction-environment)))`
- **Примери:**
- `(define a 2)`
- $a \longrightarrow 2$
- `(evali a) \longrightarrow 2`
- `(evali 'a) \longrightarrow 2`
- `(evali ''a) \longrightarrow a`
- `(evali (evali ''a)) \longrightarrow 2`

Примери за eval

- `(evali (list '+ 5 7 a))` \longrightarrow 14
- `(evali (list 'define b 5))` \longrightarrow Грешка!
- `(evali (list 'define 'b 5))` \iff `(define b 5)`
- `b` \longrightarrow 5
- `(evali (list 'if (list '< 2 5) (list 'quote 'a) 'b))` \longrightarrow a
- `(define (apply f l) (evali (cons f l)))`

Програмите на Scheme могат да се разглеждат като данни!