

# Преобразование базиса Грёбнера нульмерного идеала к иному мономиальноальному упорядочению.

Федоров Глеб М33351

Октябрь 2020

# 1   Оглавление

## 1.1   Постановка проблемы

## 1.2   Дополнительная теория

## 1.3   Алгоритм FGLM

## 1.4   Примерная архитектура программы

## 1.5   Используемая литература

## 2 Постановка проблемы

Дан базис Грёбнера нульмерного идеала, построенный на мономиальном упорядочении  $m_1$ . Привести данный базис к иному мономиальному упорядочению  $m_2$ .

## 3 Дополнительная теория

### 3.1 Исключающий идеал

**Определение:** Пусть дан  $I = \langle f_1, \dots, f_n \rangle \in F[x_1, \dots, x_n]$ . Тогда  $l$ -м исключающим идеалом  $I_l$  называется идеал в  $F[x_{l+1}, \dots, x_n]$ , равный  $I \cap F[x_{l+1}, \dots, x_n]$ .

**Теорема(об исключении):** Пусть  $I \subset F[x_1, x_2, \dots, x_s]$  - идеал и  $G$  - его базис Грёбнера по отношению к лек-упорядочению с  $x_1 > x_2 > \dots > x_n$ . Тогда  $\forall l : 0 \leq l \leq n$  множество

$$G_l = G \cap F[x_1, x_2, \dots, x_s]$$

является базисом Грёбнера  $l$ -го исключающего идеала  $I_l$ .

**Доказательство:** Зафиксируем  $l$  в интервале  $(0, n)$ . Так как  $G_l \in I_l$  по построению, достаточно показать, что

$$\langle LT(I_l) \rangle = \langle LT(G_l) \rangle$$

Включение в одну сторону очевидно ( $\langle LT(G_l) \rangle \subset \langle LT(I_l) \rangle$  по построению). Докажем, что  $\langle LT(I_l) \rangle \subset \langle LT(G_l) \rangle$ . Для этого достаточно показать что  $LT(f)$ , где  $f \in I_l$ , делится на некоторый  $g \in G_l$ . Заметим, что  $f \in I$ , то есть  $LT(f)$  делится на  $LT(g)$  для некоторого  $g$  (т.к.  $G$  является базисом Грёбнера идеала  $I$ ). Так как  $f \in I_l$ , то  $LT(g)$  содержит только переменные  $x_{l+1}, \dots, x_n$ . Так как используется лек-упорядочение с  $x_1 > x_2 > \dots > x_n$ , то любой моном, содержащий хотя бы одну из переменных  $x_1, \dots, x_l$ , больше всех мономов из  $F[x_{l+1}, \dots, x_n]$ . Значит  $g \in G_l$ , что и требовалось доказать.

### 3.2 Соответствие идеала и многообразия

**Определение:** Пусть  $I \in F[x_1, \dots, x_n]$  - некоторый идеал. Положим

$$V(I) = (a_1, \dots, a_n) \in F^n : f(a_1, \dots, a_n) = 0 \forall f \in I$$

**Теорема:**  $V(I)$  является аффинным многообразием. В частности, если  $I = \langle f_1, \dots, f_n \rangle$ , то  $V(I) = V(f_1, \dots, f_n)$

**Доказательство:** По теореме Гильберта о базисе идеал  $I$  конечно порождён,  $I = \langle f_1, \dots, f_n \rangle$ . Покажем, что  $V(I) = V(f_1, \dots, f_n)$ . Если  $f(a_1, \dots, a_n) = 0$  для всех полиномов  $f \in I$ , то  $f_i(a_1, \dots, a_n) = 0$  (так как  $f_i \in I$ ). Следовательно,  $V(I) \subseteq V(f_1, \dots, f_n)$ . С другой стороны, пусть  $(a_1, \dots, a_n) \in V(f_1, \dots, f_n)$ , и пусть  $f \in I$ . Так как  $I = \langle f_1, \dots, f_n \rangle$ , то

$$f = \sum_{i=1}^s h_i f_i$$

для некоторых  $h_i \in F[x_1, \dots, x_n]$ . Но тогда

$$f(a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^s h_i(a_1, \dots, a_n) f_i(a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^s h_i(a_1, \dots, a_n) * 0 = 0$$

Следовательно,  $V(f_1, \dots, f_n) \subseteq V(I)$ , а значит эти два идеала равны.

### 3.3 Нульмерный идеал

**Определение:** Пусть  $A$  - это алгебра над полем  $K$  и  $J$  - двусторонний идеал в  $A$ . Рассматривая алгебру  $A$  как факторкольцо  $A/J$ , которое можно превратить в алгебру над  $K$ , если определить в ней умножение на элементы поля  $K$  следующим образом:

$$k(a + J) = ka + J, \forall k \in K, \forall a \in A$$

Построенная таким образом алгебра называется факторалгеброй алгебры  $A$  по идеалу  $J$ .

**Теорема:** Пусть поле  $F$  алгебраически замкнуто и  $I \in F[x_1, x_2, \dots, x_n]$ . Тогда следующие условия эквивалентны:

1. Алгебра  $A = F[x_1, x_2, \dots, x_n]/I$  конечномерна над  $F$ .
2.  $V(I) \subset F^n$  конечно.
3. Если  $G$  - базис Грёбнера идеала  $I$ , то

$$\forall i \exists m_i \geq 0 : x_i^{m_i} = LM(g)$$

для некоторого  $g \in G$ .

4. Для каждой переменной  $x_i$  исключаящий идеал  $I \cap F[x_1, x_2, \dots, x_n]$  является ненулевым.

Идеал, удовлетворяющий данной теореме называется нульмерным

### 3.4 Нормальная форма полинома

**Определение(1.1):** Пусть  $G$  - базис Грёбнера идеала  $I$ . Будем называть  $f \in F[x_1, \dots, x_n]$  редуцированным по отношению к  $G$  (или в нормальной форме по отношению к  $G$ ), если не существует такого  $g \in G$  что его старший член делит какие-либо члены из  $f$ .

**Определение:** Алгоритм редукции - алгоритм, вычисляющий нормальную форму полинома  $f$ .

**Определение:** Базис Грёбнера  $G$  называется редуцированным, если  $\forall g \in G$   $g$  - редуцирован по отношению к другим элементам  $G$ .

**Утверждение:** Данное определение редуцированного базиса Грёбнера совпадает с определением из лекции с точностью до нормировки старшего члена.

**Определение:** Пусть  $I$  - нульмерный идеал над  $F[x_1, \dots, x_n]$  и  $G$  - его редуцированный базис Грёбнера. Натуральным базисом, определяемым  $G$   $K$ -векторного пространства  $R/I$ , назовем базис  $B(G)$ , элементами которого являются мономы, редуцированные по отношению к  $G$ . Будем обозначать  $D(I)$  размерность  $K$ -векторного пространства  $R/I$  (степень идеала).

**Определение:** Пусть  $B(G)$  - натуральный базис для  $R/I$ . Тогда положим, что

$$M(G) = \{x_i b \mid b \in B(G), 1 \leq i \leq n, x_i b \notin B(G)\}$$

граница  $G$ .

**Теорема(2.1):** Пусть  $I$  - нульмерный идеал и  $G$  - редуцированный базис Грёбнера данного идеала, и  $B(G)$  - натуральный базис Грёбнера для  $R/I$ , тогда  $\forall m \in M(G)$  выполнено одно из данных условий:

1.  $\forall x_i : x_i \mid m$  выполнено, что  $m/x_i \in B(G)$ , тогда и только тогда, когда  $m$  - это старший моном элементов из  $G$ .
2.  $m = x_j m_k$  для некоторых  $j$  и  $m_k \in M(G)$ .

**Доказательство:**

1. Следует из определения редуцированного базиса Грёбнера и определения  $B(G)$
2. Пусть  $x_j$  делит  $m$  и  $m/x_j \notin B(G)$ , тогда  $m_k = m/x_j \in M(G)$ . Заметим, по определению  $M(G)$ , что  $m = x_j m_k = x_i b$ . Тогда  $i \neq j$  (если  $i = j$ , то  $m_k = b$ , что противоречит тому, что  $m_k \in M(G)$  и  $m_k/x_i = b/x_j \in B(G)$ , так как  $B(G)$ , по определению, замкнуто относительно деления. Таким образом  $m_k = x_i(b/x_j) \in M(G)$ .

**Следствие:** Пусть  $k$  число образующих редуцированного базиса Грёбнера для нульмерного идеала. Тогда  $k \leq nD(I)$

## 4 Алгоритм FGLM

### 4.1 Вычисление нормальной формы

Воспользуемся структурой векторного пространства, чтобы построить алгоритм, который найдёт координаты нормальных форм элементов  $R/I$  за полиномиальное время. Для этого рассмотрим  $n$ -линейные отображения  $\phi_i$  определённые на  $B(G)$  следующим образом:

$$\phi_i : m \rightarrow NormalForm(x_i m)$$

**Определение:** Обозначим  $T(G) = (t_{ijk})$  матрицу  $n \times D(I) \times D(I)$ , в которой  $t_{ijk} = j$ -ая координата относительно  $B(G)$  редукции элементов из  $G$   $x_i b_k (b_k \in B(G))$ .

Данная матрица будет использована для вычисления нормальной формы полинома.

**Теорема:**  $T(G)$  вычисляется за  $O(nD(I)^3)$

**Доказательство:** Рассмотрим  $MB(G) = B(G) \cup M(G)$  и упорядочим его элементы согласно  $m_1$ . Будем строить столбцы  $t_{i*k}$  в том порядке, в котором  $x_i b_k$  появляется в  $MB(G)$ . Рассмотрим  $m = x_i b_k$ . Если  $m \in B(G)$ , значит, что  $m$  - не редуцирован по отношению к  $G$  и другие  $t_{ijk} = 0$  для  $j \neq k$ , и  $t_{ikk} = 1$ . В ином случае  $m \in B(G)$ , тогда, согласно теореме(2.1), либо  $\exists g \in G : g = m + \sum_{u=1}^{D(I)} a_u b_u$ , тогда  $t_{i*k} = (-a_1, \dots, -a_{D(I)})^t$ , либо  $m = x_l m'$ , где  $m' \in M(G)$  и  $m' < m$ . Во втором случае, координаты  $m' = x_s b_h$  по отношению к  $B(G)$ , уже вычислены, и хранятся в  $t_{i*s}$ . Этого достаточно, чтобы добавить координаты  $x_l b_v$   $b_v \in B(G)$  умноженные на соответствующий коэффициент, то есть  $x_i b_k = x_l x_s b_h = x_l \sum_v t_{svh} b_v = \sum_u \sum_v t_{svh} t_{luv} b_u$ . В этом случае мы должны выполнить  $D(I)^2$  операций чтобы посчитать  $t_{i*k}$ , и, в итоге, данную операцию мы будем повторять  $nD(I)$  раз.

**Замечание:** Функция *NextMonom* возвращает следующий моном, который необходимо рассмотреть. О том, как эта функция работает будет сказано позднее, но пока будем считать что она выполняется за  $O(1)$ .

**Замечание:** Для  $i \in \{1, \dots, n\}$  матрица, связанная с  $\phi$  относительно  $B(G)$ , есть  $t_{i**}$ .



Данный алгоритм вычисляет конструкцию, описанную на предыдущей странице.

---

**Algorithm 1** Matphi

---

```

1: Input
2:    $m_1$  ▷ мономиальное упорядочение
3:   Basis ▷ минимальный редуцированный базис Грёбнера нульмерного идеала
4: EndInput

5: Output
6:    $\phi[i, m, m']$  for  $i = 1, \dots, n$  ▷  $m, m' \in B(G)$  такие, что  $\phi[i, *, *]$  - это матрица применений
    $p \rightarrow NormalForm(x_i p)$ , где  $p$  - редуцированные многочлены
7: EndOutput

8: Subfunctions
9:   NextMonom ▷ Возвращает и удаляет первый элемент списка ListOfNexts. Возвращает nil, если список
   пуст.
10:  InsertNexts(monom) ▷ Добавляет monom в ListOfNexts и сортирует его, согласно  $m_1$ 
11: EndSubfunctions

12: LocalVariables
13:   ListOfNexts ▷ Список "следующих"мономов. Отсортирован относительно  $m_1$ 
14: EndLocalVariables

15:  $monom := 1$ ,  $ListOfNexts := []$ 
16: while  $monom \neq null$  do
17:   if monom является произведением старших мономов каких-то элементов из Basis then
18:     let  $monom = x_j m$ , где  $m$  - редуцируемо относительно Basis
19:      $NormalForm[monom] := \sum \lambda_i * NormalForm(x_j m_i)$ 
20:     for all  $k$ , таких что  $monom = x_k m'$ , где  $m'$  - нередуцируемо относительно Basis do
21:        $\phi[k, m'', m'] :=$  коэффициент  $m''$  в  $NormalForm[monom]$ 
22:   else if monom - старший моном какого-то  $p \in Basis$  then
23:      $NormalForm[monom] := -rest(p)$ 
24:     for all  $j$ , таких, что  $monom = x_j m$  do
25:        $\phi[j, m', m''] :=$  коэффициент  $m'$  в  $NormalForm[monom]$ 
26:   else
27:      $NormalForm[monom] := monom$ 
28:      $InsertNexts(monom)$ 
29:     for all  $j$ , таких, что  $monom = x_j m$  do
30:

$$\phi[j, m', m] := \begin{cases} 1 & \text{if } m' = monom \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

 $monom := NextMonom$ 

```

---

**Доказательство корректности:** Корректность алгоритма следует из доказательства теоремы(2.1). Данный алгоритм представляет собой рассмотрение случаев, рассмотренных в доказательстве данной теоремы и случая, когда полином является элементом  $B(G)$ .

## 4.2 Смена упорядочения

**Теорема(2.2):** Пусть  $I$  - нульмерный идеал и  $(G_1, m_1)$  - его редуцированный базис Грёбнера, построенный для мономиального упорядочения  $m_1$ ,  $m_2$  - иное мономиальное упорядочение. Тогда можно построить базис Грёбнера  $(G_2, m_2)$  за  $O(nD(I)^3)$ .

**Доказательство:** Из  $(G_1, m_1)$  мы можем построить  $B(G_1) = \{a_1, \dots, a_{D(I)}\}$ ,  $M(G_1)$  и  $T(G_1)$ , как было показано в предыдущей главе. Построим матрицу  $C$  в которой  $i$ -й столбец будет координатами элемента  $b_i \in B(G_2)$  относительно  $B(G_1)$ . Будем строить новый базис итеративно. Пусть  $B(G_2) := \{1\}$  и  $M(G_2) := \emptyset$ . Пусть  $m = \min_{m_2} \{x_j b_i | 1 \leq j \leq n, b_i \in B(G_2), x_j b_i \notin B(G_2) \cup M(G_2)\}$ . Может возникнуть три случая:

1.  $m$  - старший терм  $g$ , какого-либо  $g \in G_2$
2.  $m$  нужно добавить в  $B(G_2)$
3.  $m$  нужно добавить в  $M(G_2)$ , но  $m$  - кратно  $LT(G)$  для некоторого  $g \in G$ .

Проверка того, что  $m$  удовлетворяет третьему пункту - старший член  $g$  строго меньше чем  $m$  при любом допустимом упорядочении и  $g$  уже добавлен в  $M(G_2)$ . Поскольку по построению,  $m = x_j b_i$  мы можем посчитать его координаты  $c(m)_h$  относительно  $B(G_1)$  используя матрицы  $C$  и  $T(G_1) = (t_{ijk})$ :

$$m = x_j b_i = x_j * \sum_k c_{ki} * a_k = \sum_k x_j * c_{ki} * a_k = \sum_k c_{ki} * \sum_h t_{jkh} * a_h = \sum_h \left( \sum_k t_{jkh} c_{ki} \right) = \sum_h c(m)_h a_h$$

Если вектор  $c(m)$  линейно независим от векторов из  $C$ , то выполняется второй пункт, и мы нашли новый  $g \in B(G_2)$ . В противном случае, мы получаем элемент  $g \in G_2$ .

---

**Algorithm 2** NewBasis

---

```
1: Input
2:    $m_2$  ▷ новое упорядочение
3:   oldBasis ▷ Базис Грёбнера нульмерного идеала относительно упорядочения  $m_1$ 
4: EndInput

5: Output
6:   newBasis ▷ Базис Грёбнера нульмерного идеала относительно упорядочения  $m_2$ 
7: EndOutput

8: Subfunctions
9:   NormalForm(polynom) ▷ Возвращает редуцированную форму полинома относительно oldBasis и  $m_1$ 
10:  NextMonom() ▷ Возвращает первый элемент ListOfNexts или nil, если ListOfNexts пуст. Первый элемент удаляется
11:  InsertNexts(monom) ▷ Добавляет в ListOfNexts произведение монома со всеми переменными, после чего сортирует список относительно  $m_2$  и удаляет дубли
12: EndSubfunctions

13: LocalVariables
14:   staircase ▷ Список ведущих мономов из NewBasis
15:   MBasis ▷ Список пар  $[a_i, b_i]$ , где  $a_i$  - мономы в нормальной форме относительно нового базиса и  $b_i = NormalForm(a_i)$ , нормальная форма  $a_i$  относительно старого базиса.
16:   ListOfNexts ▷ Список "следующих" мономов. Отсортирован относительно  $m_2$ 
17: EndLocalVariables

18:  $MBasis := []$ ;  $staircase := []$ ;  $newBasis := []$ ;  $ListOfNexts := []$ ;  $monom := 1$ ;
19: while  $monom \neq nil$  do
20:   if  $monom$  не является произведением элементов из staircase then ▷ Проверка, это пункт 1 или 2
21:      $vector := NormalForm(monom)$  ▷
22:     if есть линейная зависимость  $vector + \sum_{v \in MBasis} \lambda_v second(v) = 0$  then
23:        $pol := monom + \sum_{v \in MBasis} \lambda_v first(v)$ 
24:        $newBasis := cons(pol, newBasis)$ 
25:        $staircase := cons(monom, staircase)$ 
26:     else
27:        $MBasis := cons([monom, vector], MBasis)$ 
28:       InsertNexts(monom)
29:    $monom := NextMonom$ 
```

---

### Доказательство корректности:

**Первое:** Покажем, что *newBasis* - это базис Грёбнера того же идеала при упорядочении  $m_2$ . Для этого покажем, что элементы из *MBasis* независимы по модулю идеала, порождаемого *oldBasis*. Пусть это не так тогда существует линейная комбинация элементов из *MBasis*  $P = \sum \lambda_i * m_i$ , такая, что  $P \in \langle oldBasis \rangle$ . Тогда

$$NormalForm(P) = \sum \lambda_i NormalForm(m_i) = 0$$

...

**Второе:** Покажем что алгоритм завершается. Заметим, что дан нульмерный идеал. Это значит, что максимальное число линейно независимых нередуцируемых конечно, и равно отношению размерности кольца многочленов к размерности идеала, то есть числу нередуцируемых одночленов для любого базиса Грёбнера. Таким образом, число итераций, которые увеличивают *MBasis* конечно. После того, как все элементы *MBasis* рассмотрены, *ListOfNexts* не будет больше увеличиваться, значит, количество оставшихся итераций конечно.

**Реализация *NextMonom*:** При вставке одночлена в *ListOfNexts* полезно помнить, что он получается как произведение переменной на одночлен с известной нормальной формой. При этом один и тот же моном можно получить несколько раз...

## 5 Примерная архитектура программы

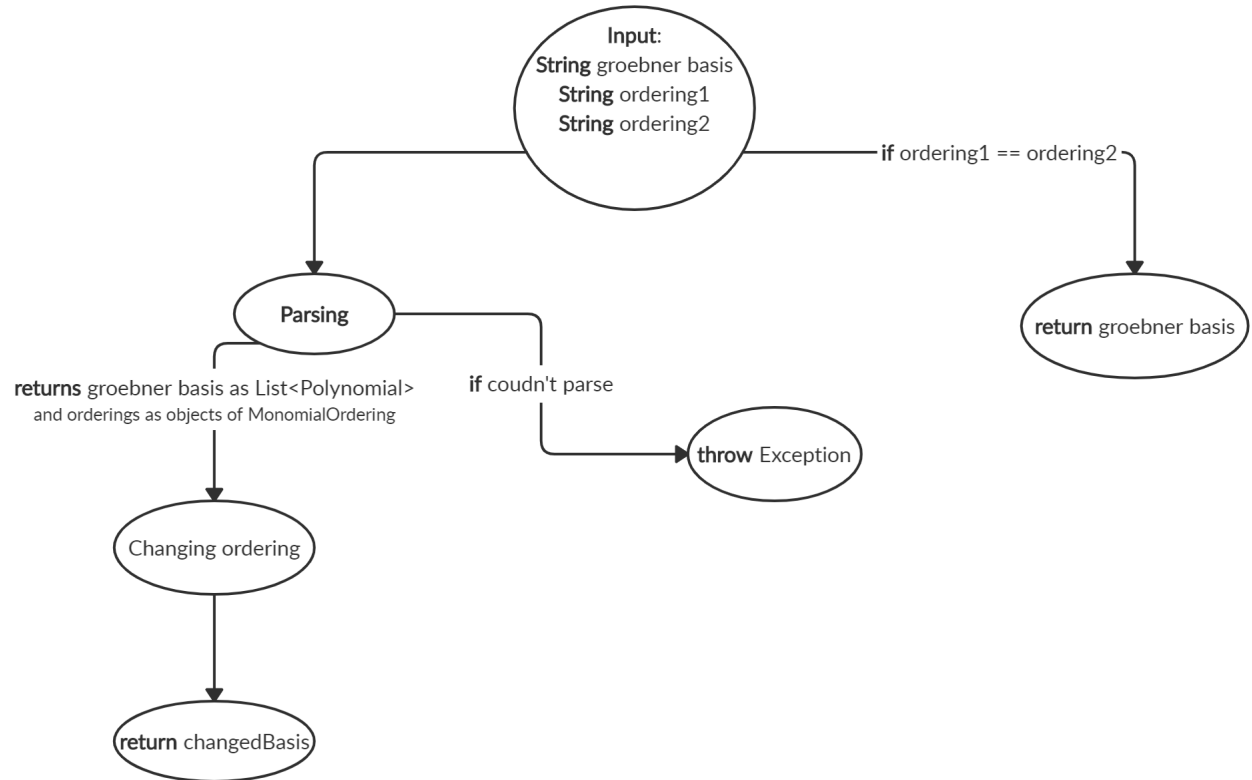


Рис. 1: Схема работы программы

## 6 Используемая литература

1. Faugère, J.C., Gianni, P., Lazard, D., Mora, T. Efficient computation of zero-dimensional gröbner bases by change of ordering (1993) Journal of Symbolic Computation, 16 (4), pp. 329-344.
2. <http://halgebra.math.msu.su/groebner.pdf>
3. Кокс Д., Литтл Дж., О'Ши Д. Идеалы, многообразия, кольца. Стр. 108. Стр. 153.
4. Презентация про FGLM алгоритм