

§ 41. Классификация квадрик в пространстве

Б.М.Верников

Уральский федеральный университет,
Институт естественных наук и математики,
кафедра алгебры и фундаментальной информатики

Этот параграф по своему содержанию аналогичен § 38. Его цель — указать все типы поверхностей второго порядка. Начнем с точного определения этого понятия.

Определение

Квадрикой в пространстве (или *поверхностью 2-го порядка*) называется множество всех точек пространства, координаты которых в подходящей системе координат удовлетворяют *уравнению 2-го порядка с тремя неизвестными*, т. е. уравнению вида

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_1x + 2a_2y + 2a_3z + a_0 = 0, \quad (1)$$

где по крайней мере один из коэффициентов a_{11} , a_{22} , a_{33} , a_{12} , a_{13} и a_{23} отличен от нуля.

Примерами квадрик в пространстве являются девять поверхностей, упоминавшихся в § 39 и 40: эллиптический, гиперболический и параболический цилиндры, конус, эллипсоид, однополостный и двуполостный гиперболоиды, эллиптический и гиперболический параболоиды. Рассмотрим еще несколько уравнений вида (1) и выясним, какие квадрики они задают.

Примеры квадрик в пространстве (2)

- 1) $x^2 - y^2 = 0$. Это уравнение задает *пару пересекающихся плоскостей* с уравнениями $x - y = 0$ и $x + y = 0$.
- 2) $x^2 - 1 = 0$. Это уравнение задает *пару параллельных плоскостей* с уравнениями $x - 1 = 0$ и $x + 1 = 0$.
- 3) $x^2 = 0$. Это уравнение равносильно уравнению $x = 0$ и потому задает плоскость. В теории квадрик в пространстве квадрику, задаваемую уравнением $x^2 = 0$, принято называть *парой совпавших плоскостей*. Этот термин объясняется так же, как в § 38 объяснялся термин «пара совпавших прямых».
- 4) $x^2 + y^2 = 0$. Это уравнение равносильно равенствам $x = y = 0$ и потому задает в пространстве *прямую* (ось Oz).
- 5) $x^2 + y^2 + z^2 = 0$. Это уравнение равносильно равенствам $x = y = z = 0$ и потому задает в пространстве *точку* (начало координат).
- 6) $x^2 + 1 = 0$. Ясно, что геометрическим образом этого уравнения является *пустое множество*.

Оказывается, что никаких других квадрик, кроме упомянутых на предыдущем слайде, не существует. А именно, справедлива следующая

Теорема 41.1

Всякая квадрика в пространстве является или цилиндром (эллиптическим, гиперболическим или параболическим), или конусом, или эллипсоидом, или гиперболоидом (одноплостным или двуплостным), или параболоидом (эллиптическим или гиперболическим), или парой плоскостей (пересекающихся, параллельных или совпавших), или прямой, или точкой, или пустым множеством.

Доказательство. Пусть в системе координат $Ox_1y_1z_1$ квадрика σ задается уравнением (1). Нам предстоит в несколько шагов заменить систему координат так, чтобы максимально упростить это уравнение. Как и в случае квадрики на плоскости, этот процесс называется *приведением квадрики к каноническому виду*.

Шаг 1. На этом шаге мы хотим найти такую систему координат, в которой уравнение нашей квадрики не содержит произведений неизвестных (т. е. в которой все три коэффициента при таких произведениях равны 0).

Определение

Сумма слагаемых второй степени, входящих в уравнение (1), т. е. выражение

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz,$$

называется *квадратичной формой старших членов* этого уравнения.

С учетом этого определения, цель первого этапа можно переформулировать так: найти систему координат, в которой квадратичная форма старших членов уравнения квадрики имела бы канонический вид.

Доказательство классификационной теоремы: приведение квадратичной формы старших членов к главным осям (1)

Обозначим квадратичную форму старших членов уравнения (1) через f . Чтобы достичь указанной на предыдущем слайде цели, приведем форму к главным осям. Алгоритм приведения квадратичной формы к главным осям изложен в § 33 (см. там алгоритм 33.1). Его применение в описываемой ситуации имеет одну особенность: замену переменных $X = TY$, о которой идет речь в этом алгоритме, следует применять ко всей левой части уравнения (1), а не только к форме f . Уточним, что мы имеем в виду. Пусть $T = (t_{ij})$,

$$X = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad \text{а} \quad Y = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}.$$

Тогда замену $X = TY$ можно переписать в координатном виде:

$$\begin{cases} x = t_{11}x' + t_{12}y' + t_{13}z', \\ y = t_{21}x' + t_{22}y' + t_{23}z', \\ z = t_{31}x' + t_{32}y' + t_{33}z'. \end{cases}$$

Приводя квадратичную форму f главным осям, правые части трех последних равенств надо подставлять во все слагаемые из (1), а не только в слагаемые формы f .

Доказательство классификационной теоремы: приведение квадратичной формы старших членов к главным осям (2)

Обозначим через A матрицу квадратичной формы f . После осуществления замены $X = TY$ мы получим, что в некоторой системе координат наша квадрика будет иметь уравнение вида (1), в котором матрица квадратичной формы старших членов диагональна. Обозначим эту матрицу через D . Тогда $D = T^T A T$. Поскольку матрица T невырожденна, из следствия 24.1 вытекает, что $r(D) = r(A)$. Но матрица A ненулевая. Следовательно, $r(A) \neq 0$, откуда $r(D) \neq 0$, а значит и матрица D ненулевая. Таким образом, в уравнении квадрики в новой системе координат по крайней мере один из коэффициентов при квадратах переменных будет отличен от нуля. Отметим еще, что система координат, к которой мы перейдем, состоит из старого начала координат и того ортонормированного базиса пространства, состоящего из собственных векторов матрицы A , который будет найден в процессе приведения формы f к главным осям (именно векторы этого ортонормированного базиса записаны в столбцах матрицы T).

Доказательство классификационной теоремы: редукция к трем случаям (1)

Шаг 2. В силу сказанного выше далее можно считать, что уравнение квадрики имеет вид

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_1x + 2a_2y + 2a_3z + a_0 = 0, \quad (2)$$

где по крайней мере один из коэффициентов a_{11} , a_{22} и a_{33} отличен от нуля. Предположим, что $a_{11} \neq 0$. Выделив полный квадрат по x , получим равенство

$$a_{11} \cdot \left(x + \frac{a_1}{a_{11}}\right)^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_2y + 2a_3z + a'_0 = 0,$$

где $a'_0 = a_0 - \frac{a_1^2}{a_{11}}$. Сделав замену неизвестных

$$\begin{cases} x' = x + \frac{a_1}{a_{11}}, \\ y' = y, \\ z' = z \end{cases},$$

(геометрически ей соответствует сдвиг вдоль оси Ox), мы получим уравнение $a_{11}(x')^2 + a_{22}(y')^2 + a_{33}(z')^2 + 2a_2y' + 2a_3z' + a'_0 = 0$, не содержащее линейного слагаемого по x . Аналогично, если $a_{22} \neq 0$ [соответственно $a_{33} \neq 0$], то сдвигом вдоль оси Oy [соответственно Oz] можно избавиться от линейного слагаемого по y [соответственно по z].

Доказательство классификационной теоремы: редукция к трем случаям (2)

Таким образом, можно считать, что если в уравнении (2) отличен от нуля коэффициент при квадрате некоторой неизвестной, то в нем нет линейного слагаемого по той же неизвестной. Переименовав при необходимости неизвестные, мы можем считать, что квадратика σ задается уравнением одного из следующих трех типов:

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + D = 0, \text{ где } A, B, C \neq 0, \quad (3)$$

$$Ax^2 + By^2 + 2Cz + D = 0, \text{ где } A, B \neq 0, \quad (4)$$

$$By^2 + 2Cx + 2Dz + E = 0, \text{ где } B \neq 0. \quad (5)$$

Шаг 3. Дальнейшие рассмотрения распадаются на три случая в зависимости от того, к какому из уравнений (3), (4) и (5) мы пришли.

Случай 1: квадрака задается уравнением вида (3). Здесь возможны два подслучая.

Подслучай 1.1: $D \neq 0$. Ясно, что в этом случае уравнение (3) можно переписать в виде

$$\frac{x^2}{-D/A} + \frac{y^2}{-D/B} + \frac{z^2}{-D/C} = 1. \quad (6)$$

Возможны 4 варианта.

а) $-\frac{D}{A}, -\frac{D}{B}, -\frac{D}{C} > 0$. Введя обозначения $a = \sqrt{-\frac{D}{A}}, b = \sqrt{-\frac{D}{B}}, c = \sqrt{-\frac{D}{C}}$, мы получим уравнение $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$, т. е. каноническое уравнение эллипсоида.

Доказательство классификационной теоремы: случай 1 (2)

б) Среди чисел $-\frac{D}{A}$, $-\frac{D}{B}$ и $-\frac{D}{C}$ есть два положительных и одно отрицательное. Без ограничения общности можно считать, что $-\frac{D}{A} > 0$, $-\frac{D}{B} > 0$ и $-\frac{D}{C} < 0$ (в противном случае следует соответствующим образом переименовать неизвестные). Введя обозначения $a = \sqrt{-\frac{D}{A}}$, $b = \sqrt{-\frac{D}{B}}$, $c = \sqrt{\frac{D}{C}}$, мы получим уравнение $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$, т. е. каноническое уравнение однополостного гиперболоида.

в) Среди чисел $-\frac{D}{A}$, $-\frac{D}{B}$ и $-\frac{D}{C}$ есть одно положительное и два отрицательных. Можно считать, что первые два из них отрицательны, а третье положительно (в противном случае, как и ранее, следует соответствующим образом переименовать неизвестные). Введя обозначения $a = \sqrt{\frac{D}{A}}$, $b = \sqrt{\frac{D}{B}}$, $c = \sqrt{-\frac{D}{C}}$, мы получим уравнение $-\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$. Умножив его на -1 , получим каноническое уравнение двуполостного гиперболоида.

г) $-\frac{D}{A}, -\frac{D}{B}, -\frac{D}{C} < 0$. Тогда уравнение (б) не имеет решений, и потому его геометрическим образом является пустое множество.

Подслучай 1.2: $D = 0$. В этом случае уравнение (3) имеет вид $Ax^2 + By^2 + Cz^2 = 0$ или

$$\frac{x^2}{1/A} + \frac{y^2}{1/B} + \frac{z^2}{1/C} = 0. \quad (7)$$

Возможны 2 варианта.

а) Числа A , B и C имеют один и тот же знак. Тогда уравнение (7) имеет единственное решение $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$, и потому его геометрическим образом является точка (начало координат).

б) Среди чисел A , B и C есть хотя бы одно положительное и хотя бы одно отрицательное. Умножив, если потребуется, уравнение (7) на -1 , можно добиться того, чтобы среди этих чисел было два положительных и одно отрицательное. Более того, можно считать, что $A > 0$, $B > 0$ и $C < 0$ (в противном случае, как обычно, следует соответствующим образом переименовать неизвестные). Введя обозначения $a = \sqrt{\frac{1}{A}}$, $b = \sqrt{\frac{1}{B}}$, $c = \sqrt{-\frac{1}{C}}$, мы получим уравнение $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$, т. е. каноническое уравнение конуса.

Доказательство классификационной теоремы: случай 2 (1)

Случай 2: квадрика задается уравнением вида (4). Здесь возможны три подслучая.

Подслучай 2.1: $C \neq 0$. В этом случае уравнение квадрики можно упростить, избавившись от свободного члена. Для этого перепишем уравнение (4) в виде

$$Ax^2 + By^2 = -2Cz - D = -2C\left(z + \frac{D}{2C}\right).$$

Сделаем замену неизвестных

$$\begin{cases} x' = x, \\ y' = y, \\ z' = z + \frac{D}{2C}, \end{cases},$$

которой соответствует сдвиг вдоль оси Oz . Уравнение квадрики в новой системе координат будет иметь вид $Ax'^2 + By'^2 = -2Cz'$ или

$$\frac{x'^2}{-C/A} + \frac{y'^2}{-C/B} = 2z' \quad (8)$$

(чтобы уравнения не становились излишне громоздкими, мы не меняем здесь и ниже обозначения для неизвестных после их замены). Возможны 2 варианта.

Доказательство классификационной теоремы: случай 2 (2)

а) Числа $-\frac{c}{A}$ и $-\frac{c}{B}$ имеют одинаковый знак. Если оба этих числа отрицательны, то, умножив уравнение (8) на -1 , а затем сделав замену неизвестных $x' = x$, $y' = y$, $z' = -z$ (т.е. изменив направление вдоль оси Oz), мы придем к уравнению того же вида, в котором $-\frac{c}{A} > 0$ и $-\frac{c}{B} > 0$. Поэтому можно сразу считать, что выполнены два последних неравенства. Можно считать также, что $-\frac{c}{A} \geq -\frac{c}{B}$ — в противном случае надо сделать замену неизвестных

$$\begin{cases} x' = y, \\ y' = x, \\ z' = z. \end{cases} \quad (9)$$

Введя обозначения $a = \sqrt{-\frac{c}{A}}$, $b = \sqrt{-\frac{c}{B}}$, мы получим уравнение $\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 2z$, где $a \geq b$, т.е. каноническое уравнение эллиптического параболоида.

б) Числа $-\frac{c}{A}$ и $-\frac{c}{B}$ имеют разные знаки. Можно считать, что $-\frac{c}{A} > 0$ и $-\frac{c}{B} < 0$ — в противном случае надо сделать замену неизвестных (9).

Введя обозначения $a = \sqrt{-\frac{c}{A}}$, $b = \sqrt{\frac{c}{B}}$, мы получим уравнение $\frac{x'^2}{a^2} - \frac{y'^2}{b^2} = 2z$, т.е. каноническое уравнение гиперболического параболоида.

Доказательство классификационной теоремы: случай 2 (3)

Подслучай 2.2: $C = 0$, $D \neq 0$. В этом случае уравнение (4) можно переписать в виде

$$\frac{x^2}{-D/A} + \frac{y^2}{-D/B} = 1. \quad (10)$$

Возможны 3 варианта.

а) $-\frac{D}{A}, -\frac{D}{B} > 0$. Можно считать, что $-\frac{D}{A} \geq -\frac{D}{B}$ — в противном случае надо сделать замену неизвестных (9). Введя обозначения $a = \sqrt{-\frac{D}{A}}$, $b = \sqrt{-\frac{D}{B}}$, мы получим уравнение $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, где $a \geq b$, т.е. каноническое уравнение эллиптического цилиндра.

б) Числа $-\frac{D}{A}$ и $-\frac{D}{B}$ имеют разные знаки. Можно считать, что $-\frac{D}{A} > 0$ и $-\frac{D}{B} < 0$ — в противном случае надо сделать замену неизвестных (9).

Введя обозначения $a = \sqrt{-\frac{D}{A}}$, $b = \sqrt{\frac{D}{B}}$, мы получим уравнение $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$, т.е. каноническое уравнение гиперболического цилиндра.

в) $-\frac{D}{A}, -\frac{D}{B} < 0$. Тогда уравнение (10) не имеет решений, и потому его геометрическим образом является пустое множество.

Подслучай 2.3: $C = D = 0$. В этом случае уравнение (4) имеет вид

$$Ax^2 + By^2 = 0. \quad (11)$$

Возможны 2 варианта.

а) Числа A и B имеют одинаковые знаки. Тогда решениями уравнения (11) являются тройки чисел вида $(0, 0, z)$, где z — любое число, и только они. Следовательно, это уравнение задает прямую (ось Oz).

б) Числа A и B имеют разные знаки. Умножив, если потребуется, уравнение (11) на -1 , можно прийти к ситуации, когда $A > 0$ и $B < 0$. Введя обозначения $a = \sqrt{A}$, $b = \sqrt{-B}$, мы получим уравнение $a^2x^2 - b^2y^2 = 0$ или $(ax + by)(ax - by) = 0$. Геометрическим образом последнего уравнения является совокупность плоскостей с уравнениями $ax + by = 0$ и $ax - by = 0$. Очевидно, что главные векторы этих плоскостей, т. е. векторы $\vec{n}_1 = (a, b, 0)$ и $\vec{n}_2 = (a, -b, 0)$, не пропорциональны. Следовательно, эти плоскости пересекаются (см. теорему 13.2). Итак, в рассматриваемом случае квадрика есть пара пересекающихся плоскостей.

Случай 3: квадрика задается уравнением вида (5). Покажем, что в этом случае можно, заменив систему координат, получить уравнение квадрики σ , содержащее не более одного линейного слагаемого. Предположим, что $C, D \neq 0$ (в противном случае требуемая цель уже достигнута). Сделаем следующую замену неизвестных:

$$\begin{cases} x = x' \cos \alpha - z' \sin \alpha, \\ y = y' \\ z = x' \sin \alpha + z' \cos \alpha. \end{cases}, \quad (12)$$

Как показывают формулы (8) из § 11, эта замена соответствует повороту системы координат вокруг оси Oy на угол α . Подставив правые части равенств (12) вместо x , y и z в (5), получим уравнение

$$B(y')^2 + 2(C \cos \alpha + D \sin \alpha)x' + 2(-C \sin \alpha + D \cos \alpha)z' + E = 0.$$

Можно считать, что $0 < \alpha < \pi$ (если найдется удовлетворяющий этому ограничению угол α , при повороте на который получается уравнение квадрики с нужным нам свойством, то этого будет достаточно для наших целей). В частности, $\sin \alpha \neq 0$. Приравняем коэффициент при z' к нулю: $-C \sin \alpha + D \cos \alpha = 0$. Разделив обе его части на $D \sin \alpha$, получим, что $\operatorname{ctg} \alpha = \frac{C}{D}$.

Выбрав в качестве α решение последнего уравнения, мы приведем уравнение квадрики к виду

$$By^2 + 2Cx + E = 0, \quad (13)$$

достигнув тем самым поставленной цели.

- Заметим, что для того, чтобы применить формулы (12) при решении конкретных задач, нам надо найти $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$. Поскольку значение $\operatorname{ctg} \alpha$ известно, для этого надо использовать формулу $1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha = \frac{1}{\sin^2 \alpha}$. Это позволит найти два возможных значения для $\sin \alpha$. Выбрав любое из них, можно найти $\cos \alpha$ по формуле $\cos \alpha = \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha$.

Дальнейшие рассуждения распадаются на два подслучая.

Подслучай 3.1: $C \neq 0$. В этом случае уравнение квадрики можно упростить, избавившись от свободного члена. Для этого перепишем уравнение (13) в виде

$$y^2 = -\frac{2C}{B}x - \frac{E}{B} = -\frac{2C}{B}\left(x + \frac{E}{2C}\right).$$

Сделаем замену неизвестных

$$\begin{cases} x' = x + \frac{E}{2C}, \\ y' = y, \\ z' = z \end{cases},$$

которой соответствует сдвиг вдоль оси Ox . Уравнение квадрики в новой системе координат будет иметь вид $y^2 = -\frac{2C}{B}x'$. Полагая $p = -\frac{C}{B}$, получим уравнение $y^2 = 2px'$. Если $p > 0$, оно является каноническим уравнением параболического цилиндра. Если же $p < 0$, то мы приходим к тому же результату после замены неизвестных $x' = -x$, $y' = y$, $z' = z$.

Подслучай 3.2: $C = 0$. Уравнение (13) в этом случае можно переписать в виде

$$y^2 = -\frac{E}{B}. \quad (14)$$

Возможны 3 варианта.

а) $-\frac{E}{B} > 0$. Тогда, полагая $a = \sqrt{-\frac{E}{B}}$, мы получим уравнение $y^2 = a^2$, геометрическим образом которого является пара параллельных плоскостей $y = a$ и $y = -a$.

б) $-\frac{E}{B} = 0$. Тогда уравнение (14) имеет вид $y^2 = 0$. Оно, очевидно, равносильно уравнению $y = 0$, которое задает пару совпавших плоскостей.

в) $-\frac{E}{B} < 0$. Тогда уравнение (14) не имеет решений и потому его геометрическим образом является пустое множество.

Мы завершили разбор всех возможных случаев и подслучаев. Как видим, в процессе этого разбора возникли все пятнадцать видов квадрик, упомянутых в формулировке теоремы, и не возникло никаких других. Теорема полностью доказана. □