

Конспект по анализу за 3 семестр

Лектор: А. А. Лодкин

Записал :taxus

2 января 2017 г.

Оглавление

1	Анализ в \mathbb{R}^n	2
§ 1	Оценка приращения дифференциального отображения	2
§ 2	Частные производные высших порядков	3
§ 3	«Многомерный» дифференциал высоких порядков	4
§ 4	Формула Тейлора для функций многих переменных	4
§ 5	Экстремумы	4
§ 6	Понятие о неявной функции	5
§ 7	Полнота пространства \mathbb{R}^n	6
§ 8	Теорема о сжимающем отображении	6
§ 9	Метод Ньютона	6
§ 10	Теорема об обратном отображении(формулировка)	7
§ 11	Доказательство теоремы об обратимости	8
§ 12	Теорема о дифференцируемости обратного отображения	10
§ 13	Теорема о гладкости обратного отображения	10
§ 14	Гладкая зависимость корней многочлена от его коэффициентов	11
§ 15	Теорема о неявном отображении	12
§ 16	Функциональная зависимость системы функций	14
§ 17	Геометрический смысл ранга матрицы Якоби	16
§ 18	Три способа локального задания поверхности	16
§ 19	Условный экстремум(нестрогий)	17
§ 20	Доказательство теоремы об условном экстремуме	18
	Использованная литература	20

Глава 1: Анализ в \mathbb{R}^n

§ 1 Оценка приращения дифференциального отображения

Утверждение 1. Пусть $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $m \geq 2$. Тогда формула Лагранжа

$$f(b) - f(a) = f'(c)(b - a)$$

не работает.

Е.г. Пусть

$$f(t) := (\cos t, \sin t), \quad b - a = 2\pi$$

Теорема 2 (об оценке приращения отображения). Пусть $f: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, G — выпуклое, f — дифференцируема,

$$\forall x \in G \quad \|f'(x)\| \leq M$$

Тогда $\forall a, b \in G \quad \|f(b) - f(a)\| \leq M\|b - a\|$

□ «Окружим» исходную функцию:

$$F = \psi \circ f \circ \varphi$$

Вот тут как раз нужна выпуклость, иначе отрезок $[a; b]$ может и не лежать в \mathbb{R}

где

$$\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$\psi: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\varphi(t) := t(b - a) + a,$$

$$\psi(y) := \langle y, \ell \rangle,$$

$$t \in [0, 1]$$

$$\ell = f(b) - f(a)$$

Заметим, что F — обычная вещественнозначная функция. Так что для неё работает формула Лагранжа:

$$\exists c \in [0, 1]: F(1) - F(0) = F'(c)(1 - 0) = F'(c)$$

Тогда из свойств нормы (по ходу дела обозначим $\varphi(c)$ за x):

$$\|F'(c)\| = \|\psi'(f(x)) \cdot f'(x) \cdot \varphi'(c)\| \leq \|\psi'(f(x))\| \cdot \|f'(x)\| \cdot \|\varphi'(c)\|$$

Здесь тонкость в обозначениях. Производные — вроде матрицы, поэтому их нормы — что-то странное на первый взгляд. На самом деле смысл немного иной.

$$dL(x, h) = f'(x) \cdot h$$

Таким образом, дифференциал — неплохое линейное отображение. А под «нормой производной» имеется в виду норма соответствующего линейного отображения.

Теперь давайте что-нибудь скажем про эти нормы.

$$1. \varphi'(t) = (b - a) \Rightarrow \|\varphi'(c)\| = \|b - a\|$$

$$2. \psi(y) = \langle y, l \rangle, \|\psi\| = \|l\|$$

Так что

$$\|F'(c)\| \leq M \cdot \|l\| \cdot \|b - a\|$$

С другой стороны:

$$F(1) - F(0) = \psi(f(b)) - \psi(f(a)) = \langle f(b), l \rangle - \langle f(a), l \rangle = \langle l, l \rangle = \|l\|^2$$

В итоге, совмещая оба выражения, приходим к утверждению теоремы. ■

§ 2 Частные производные высших порядков

Определение 1. Пусть $f: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, существуют производные k -го порядка. Тогда

$$\partial_{i_1, \dots, i_{k+1}}^{k+1} f(x) := \partial_{i_{k+1}} (\partial_{i_1, \dots, i_k}^k f)(x)$$

Замечание 1. $C^p(G)$ — класс функций, определённых в G с непрерывной производной до p -го порядка включительно. Функции из C^1 ещё называются гладкими.

Теорема 1 (Зависимость производных p -го порядка от перестановки переменных). Пусть $f \in C^p(G)$, $x \in G$. При этом

$$i = \{i_1, \dots, i_p \mid i_k \in \{1, \dots, n\}\}$$

$$j = \{j_1, \dots, j_p \mid j_k \in \{1, \dots, n\}\}$$

$$j = \pi(i)$$

$$\text{Тогда } \partial_i^p f(x) = \partial_j^p f(x)$$

Замечание 1. Тут важно, что есть целая окрестность. Одной точки не хватит.

§ 3 «Многомерный» дифференциал высоких порядков

Определение 1. Пусть $f: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $f \in C^p(G)$

$$d^p f(x) := \sum_{1 \leq i_1 \leq \dots \leq i_p \leq n} \frac{\partial^p f}{\partial x_{i_p} \dots \partial x_{i_1}} dx_{i_1} \dots dx_{i_p}$$

Утверждение 1. Если частные производные можно переставлять, то

$$d^p f(x) = \sum_{\substack{\alpha_i \geq 0 \\ \sum \alpha_i = p}} \frac{p!}{\alpha_1! \dots \alpha_n!} \frac{\partial^p f}{\partial x_1^{\alpha_1} \dots \partial x_n^{\alpha_n}} dx_{i_1} \dots dx_{i_p}$$

§ 4 Формула Тейлора для функций многих переменных

Теорема 1. Пусть $f \in C^p(G)$, $G \subset \mathbb{R}^n$, $a \in G$. Пусть также $h \in \mathbb{R}^n$: $a + h \in G$. Тогда

$$f(a + h) = \sum_{k=0}^p \frac{1}{k!} d^k f(a, h) + R_p(h)$$

Остаток $R_p(h)$ можно представить несколькими способами:

1. В форме Пеано: $R_p(h) = o(\|h\|^p)$

2. В форме Лагранжа: $R_p(h) = \frac{1}{(p+1)!} d^{p+1} f(a + \theta h, h)$, $\theta \in (0, 1)$

§ 5 Экстремумы

Определение 1. Пусть $f: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $a \in G$. Тогда говорят, что f имеет в a максимум (нестрогий), если

$$\exists U(a): \forall x \in U \quad f(x) \leq f(a)$$

Когда неравенство строгое, а окрестность проколота, то максимум — строгий. Для минимума нужно \geq .

Теорема 1 (Необходимое условие экстремума). Пусть a внутренняя точка $G \subset \mathbb{R}^n$, $f \in C^1(a)$. Тогда если f имеет в a экстремум, то

$$df(a) = 0 \Leftrightarrow \forall i \quad \partial_i f(a) = 0$$

Теорема 2 (Необходимое условие экстремума). Пусть $a \in G \subset \mathbb{R}^n$, a — внутренняя точка, $f \in C^2(a)$.

1. $df(a) = 0, d^2f(a) > 0 \Rightarrow f$ имеет в a min
2. $df(a) = 0, d^2f(a) < 0 \Rightarrow f$ имеет в a max
3. $df(a) = 0, d^2f(a) \leq 0 \Rightarrow$ ничего нет
4. $df(a) = 0, d^2f(a) \leq 0 \Rightarrow f$ не имеет в a min
5. $df(a) = 0, d^2f(a) \geq 0 \Rightarrow f$ не имеет в a max

§ 6 Понятие о неявной функции

Определение 1. Пусть $F: G \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Рассмотрим уравнение

$$F(x, y) = 0 \quad (1.1)$$

Пусть $a = (x_0, y_0)$ удовлетворяет (1.1), а U — окрестность a : $U = U_x \times U_y$. Тогда будем говорить, что уравнение (1.1) определяет неявную функцию f в U , если

$$\forall x \in P \exists! y \in Q: F(x, y) = 0 \quad (y = f(x))$$

Теорема 1 (О неявной функции). Пусть $F: G \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $F \in C^1(x_0, y_0)$, а $a = (x_0, y_0)$:

1. $F(x_0, y_0) = 0$
2. $F'_y(x_0, y_0) \neq 0$

Тогда $\exists P(x_0), Q(y_0)$: в $U = P \times Q$ уравнение (1.1) задаёт неявную функцию $f: P \rightarrow Q$. При этом

$$f \in C^1 \wedge f'(x) = -\frac{F'_x(x, y)}{F'_y(x, y)}$$

□

1. (Доказательство существования)

Рассмотрим $\varphi(y) = F(x_0, y)$. Пусть НУО $F'_y(x_0, y_0) > 0$. Тогда

$$\exists U_\varepsilon(x_0, y_0): \forall x, y \in U \quad F'_y(x, y) > 0$$

Обозначим соответствующие проекции U (шар) на координатные оси за U_x, U_y . Получается, что $\varphi \upharpoonright U_y = (y_0 - \varepsilon; y_0 + \varepsilon)$. Тогда

$$\exists V_1(x_0): \forall x \in V_1 F(x, y + \varepsilon) > 0$$

$$\exists V_2(x_0): \forall x \in V_2 F(x, y - \varepsilon) < 0$$

$$P = V_1 \cap V_2$$

Тогда из теоремы Больцано-Коши и монотонности φ

$$\forall x \in P \exists! y \in Q = U_y: F(x, y) = 0$$

В итоге получилось определение неявной функции.

2. Непрерывность в (x_0, y_0) вроде очевидна, мы же каждому x из P сопоставили 1 y из Q . Принадлежность классу C можно установить проведя аналогичные рассуждения для $x \in P(x_0)$
3. С гладкостью что-то странное. Можно наверное сделать как в Зориче.
4. $F(x, f(x)) \equiv 0 \Rightarrow F'_x \cdot 1 + F'_y f'(x) = 0$

■

§ 7 Полнота пространства \mathbb{R}^n

§ 8 Теорема о сжимающем отображении

Определение 1. Пусть (X, ρ) — метрическое пространство. Тогда отображение $T: X \rightarrow X$ называется сжимающим, если

$$\exists C \in (0, 1): \forall x', x'' \rho(T(x'), T(x'')) \leq C \cdot \rho(x', x'')$$

Теорема 1 (Банах). Пусть (X, ρ) — полное метрическое пространство, а отображение $T: X \rightarrow X$ — сжимающее. Тогда $\exists! x_* \in X: Tx_* = x_*$ (неподвижная точка).

Ещё часто ссылаются на следующий факт, появляющийся в процессе доказательства:

$$\forall x_0 \in X \exists \lim_{n \rightarrow \infty} T^n x_0 = x_*$$

§ 9 Метод Ньютона

ПОТОМ

§ 10 Теорема об обратном отображении(формулировка)

Пусть $F : G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ — гладкое. Порассуждаем, когда может существовать F^{-1} .

Рассмотрим, например, линейное отображение.

[illegible]

Понятно, что в таком случае задача поиска обратного отображения сводится к поиску обратной матрицы. Тогда из линала ясно, что для того, чтобы у нас всё вышло, нужно

$$m = n \wedge \det A \neq 0$$

Теперь попытаемся обобщить на остальные функции.

Пусть $a \in G$, $b = F(a)$

$$(?)\exists U(a), V(b) : F: U \leftrightarrow V$$

$$\Delta F = F(x) - F(a) = y - b = \Delta y \quad (1.1)$$

$$\Delta F = F'(a)dx + o(dx) \quad (1.2)$$

$$dF(a) = dy(b) \quad (1.3)$$

Условие разрешимости (1.3) — $\det(F'(a)) \neq 0$. Утверждается, что (1.3) \Rightarrow (1.1)

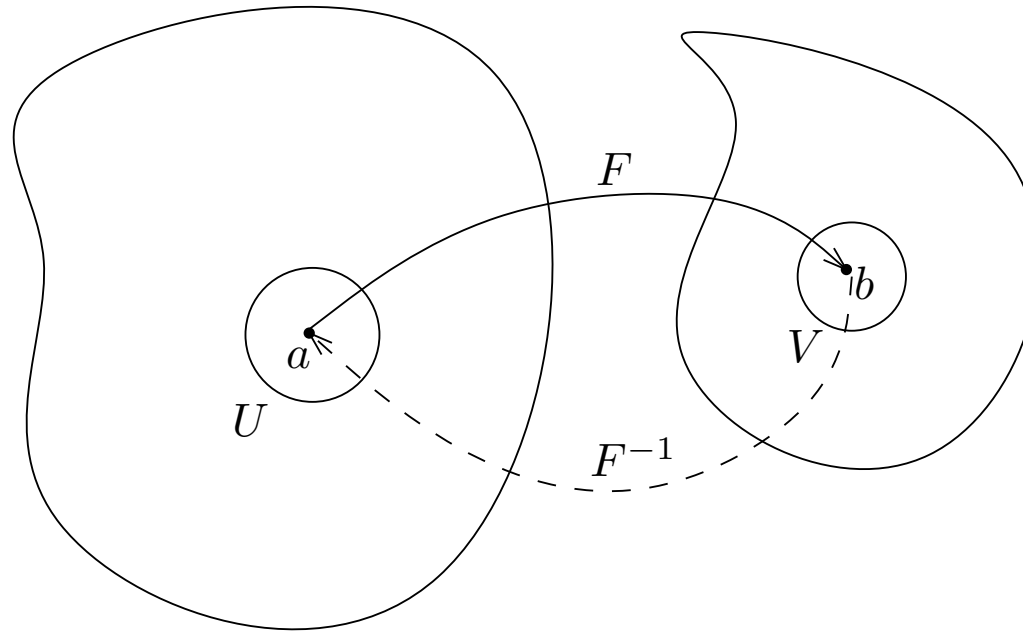
Соответственно, формулировка

Теорема 1. Пусть $F: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $a \in G$, $b = F(a)$. Пусть ещё $F \in C^1$, $\det(F'(a)) \neq 0$

Тогда

$$\exists U(a), V(b) : F: U \leftrightarrow V$$

$$\exists F^{-1}V \rightarrow U, F^{-1} \in C^1$$



§ 11 Доказательство теоремы об обратимости

□ (Теорема об обратимости отображения) Введём обозначения:

$$F'(a) = \Gamma$$

$$\Phi(x) = x - \Gamma^{-1}(F(x) - y)$$

Нетрудно заметить, что x — неподвижная точка Φ (что $\Leftrightarrow F(x) = y$). Очень хотелось бы подогнать всё под теорему Банаха (1.8.1). Тогда отображение в окрестности a будет взаимно-однозначным.

1. Сначала оценим $\|\Phi'\|$.

$$\Phi'(x) = E - \Gamma^{-1}(F'(x)) = \Gamma^{-1}(F'(a) - F'(x))$$

Можно норму оценить

$$\|\Phi'(x)\| = \|\Gamma^{-1}\| \cdot \|F'(a) - F'(x)\|$$

Последний множитель явно $\xrightarrow{x \rightarrow a} 0$ (так как $F \in C^1$) Тогда и $\|\Phi'(x)\| \rightarrow 0$. А значит найдётся $U_\varepsilon(a)$: $\|\Phi'(x)\| \leq \frac{1}{2}$.

Тогда по теореме 1.1.2

$$x, x' \in U_\varepsilon(a) \Rightarrow \|\Phi(x) - \Phi(x')\| \leq \frac{1}{2} \|x - x'\|$$

Собственно, почти победа. Осталось лишь выбрать внутри U_ε компакт $\overline{U_{\varepsilon_1}}$ (иначе множество не очень полное).

2. Теперь покажем, что

$$\exists \overline{U}: \Phi(U) \subset U$$

Попутно примем $\|y - b\| < \delta$, это потом поможет доказать непрерывность.

$$\begin{aligned} \|\Phi(x) - a\| &= \|x - a - \Gamma^{-1}(F(x) - y)\| \leq \|\Gamma^{-1}\| \cdot \|\Gamma(x - a) - F(x) + y + b - b\| \\ &\leq \|\Gamma^{-1}\| \cdot (\underbrace{\|\Gamma(x - a) - F(x) + y + b - b\|}_{\alpha} + \|y - b\|) \end{aligned}$$

Выберем произвольный $\varepsilon: 0 < \varepsilon < \varepsilon_1$.

Однако мы ещё можем подкрутить ε_1 .

$$\exists U_{\varepsilon_1}: \frac{\|\alpha\|}{\|x - a\|} < \frac{1}{2\|\Gamma^{-1}\|}$$

Это следует из формулы Тейлора (1.4.1), а применять её можно, так как шар — выпуклое множество. Ещё выберем $\delta = \frac{\varepsilon}{2\|\Gamma^{-1}\|}$. Там правда ε , а не ε_1 .

Тогда цепочка неравенств выше преобразуется к такому виду

$$\dots < \|\Gamma^{-1}\| \cdot \frac{\|x - a\|}{2\|\Gamma^{-1}\|} + \frac{\varepsilon}{2\|\Gamma^{-1}\|} \cdot \|\Gamma^{-1}\|$$

А теперь положим $\|x - a\| \leq \varepsilon$ (неравенство нужно нестрогое для полноты). Тогда

$$x \in \overline{U_\varepsilon}(a) \Rightarrow \Phi(x) \in U_\varepsilon(a) \subset \overline{U_\varepsilon}(a)$$

А теперь по теореме Банаха

$$\exists! x_0 \in \overline{U_\varepsilon}(a): \Phi(x_0) = x_0 \Leftrightarrow F(x_0) = y_0$$

Видимо, осталось пересечь окрестность a с прообразом $V(b): U = F^{-1}(V) \cap U_\varepsilon(a)$

3. Заодно получилась и непрерывность:

$$\forall U \exists V_\delta(b): F^{-1}(V_\delta) \subset U_\varepsilon$$

■

§ 12 Теорема о дифференцируемости обратного отображения

Теорема 1 (о дифференцируемости F^{-1}). Пусть $U \subset \mathbb{R}^n$, $V \subset \mathbb{R}^n$, $F: U \leftrightarrow V$. Пусть также F — дифференцируемо в $a \in U$, $F(a) = b$, $\det F'(a) \neq 0$. Тогда F^{-1} дифференцируемо в b .

□ То, что есть обратное отображение, доказали выше. Пусть $y = F(x)$. Обозначим: $h = x - a$, $k = y - b$. Отображение биективно, значит $h \neq 0 \Leftrightarrow k \neq 0$. Из дифференцируемости F

$$k = y - b = F(x) - F(a) = Ah + \alpha, \alpha = o(h) \quad (h \rightarrow 0)$$

$A = F'(a) \neq 0$, следовательно $\exists A^{-1}$

$$A^{-1}k = A^{-1}Ah + A^{-1}\alpha \Rightarrow \Delta F^{-1} = h = A^{-1}k - A^{-1}\alpha$$

Докажем, что $-A^{-1}\alpha =: \beta = o(k)$ ($k \rightarrow 0$)

$$\beta \leq \frac{-\alpha}{\|k\|} = \frac{-\alpha}{\|h\|} \cdot \frac{\|h\|}{\|k\|}$$

Покажем, что последний член — ограничен

$$\frac{\|h\|}{\|k\|} = \frac{\|h\|}{\|Ah + \alpha\|} \leq \frac{\|h\|}{\|Ah\| - \|\alpha\|} = \frac{1}{\left| \frac{\|Ah\|}{\|h\|} - \frac{\|\alpha\|}{\|h\|} \right|}$$

А последнее выражение ограничено при $\|h\| < \delta$

■

Следствие. $(F^{-1})'(b) = (F'(a))^{-1}$

§ 13 Теорема о гладкости обратного отображения

Теорема 1. Пусть $F: U \leftrightarrow V$, биективна, $\in C^p$. Пусть к тому же $\det F'(x) \neq 0$. Тогда $F^{-1} \in C^p$

□ Введём обозначения (оно всё существует по предыдущим теоремам хоть где-то)

$$F'(x) = \left(\frac{\partial F_i}{\partial x_j} \right)_{i,j=1}^n = (a_{ij}) = A$$

$$(F^{-1})'(y) = \left(\frac{\partial F_i^{-1}}{\partial y_j} \right)_{i,j=1}^n = (b_{ij}) = B$$

Вполне ясно, что $B = A^{-1}$. Из алгебры $b_{ij} = \frac{A_{ji}}{\det A}$ (здесь \mathcal{A} — алгебраическое дополнение).

Заметим, что из последнего выражения следует, что b_{ij} — рациональная функция от $\{a_{lk}\}$. Следовательно, $\widetilde{b_{ij}} = b_{ij}(a_{11}, \dots, a_{kl}, \dots, a_{nn}) \in C^\infty$. С другой стороны

$$b_{ij}(y) = \frac{\partial F^{-1}}{\partial y_j}(y) = \frac{\partial F^{-1}}{\partial y_j}(F(x)) \Leftrightarrow b_{ij}(y) = \widehat{b_{ij}}(x)$$

Так что $\widehat{b_{ij}} = b_{ij} \circ F$.

Дальше немного магии. Введём ещё одну функцию

$$\overline{b_{ij}}(x) = b_{ij}(a_{11}(x), \dots, a_{kl}(x), \dots, a_{nn}(x))$$

Заметим, что каждая $a_{ij}(x) \in C^{p-1} \Rightarrow \overline{b_{ij}} \in C^{p-1}$. Хорошо, тогда

$$b_{ij}(y) = (\overline{b_{ij}} \circ F^{(-1)})(y)$$

Раньше доказали, что $F^{-1} \in C^0$. Теперь разматываем цепочку дальше:

$$F^{-1} \in C^i \Rightarrow \overline{b_{ij}} \circ F^{-1} \in C^i \Rightarrow b_{ij} \in C^i$$

Значит, частные производные F^{-1} принадлежат C^i . Тогда сама $F^{-1} \in C^{i+1}$. Таким бобром мы доберёмся до C^p . Дальше не выйдет, так как не хватит гладкости $\overline{b_{ij}}$. ■

§ 14 Гладкая зависимость корней многочлена от его коэффициентов

Теорема 1. Пусть $P(x) \in \mathbb{R}[x]$ имеет n корней (x_j^0) , $x_j^0 \in \mathbb{R}$, таких что $\forall i, j \ x_i^0 \neq x_j^0$. Тогда

$$x_i = x_i(a_0, \dots, a_{n-1}) \in C^\infty$$

□ Пусть $P(x) = (x - x_1) \cdots (x - x_n)$. Вспомним теорему Виета (из алгебры)

$$a_0 = (-1)^n x_1 \cdots x_n$$

$$a_1 = (-1)^{n-1} \sum_i \prod_{j \neq i} x_j$$

.....

$$a_{n-1} = (-1) \sum_i x_i$$

Рассмотрим P как отображение $(x_1, \dots, x_n) \mapsto (a_0, \dots, a_{n-1})$.

$$P'(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (-1)^n \prod_{i \neq 1} x_i & (-1)^n \prod_{i \neq 2} x_i & \cdots & (-1)^n \prod_{i \neq n} x_i \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -1 & -1 & \cdots & -1 \end{pmatrix}$$

Посчитаем $\det(F')$. Этот определитель можно рассмотреть как многочлен $\in R[x_1, \dots, x_n]$. Его степень не превосходит $0 + 1 + \dots + (n-1) = \frac{n(n-1)}{2}$. Заметим, что если хоть какая-то пара столбиков равны, то определитель равен нулю. Так что $\det(F')$ делится на всевозможные многочлены вида $x_i - x_j$. А их как раз $\frac{n(n-1)}{2}$ и они неприводимые. Следовательно,

$$\det(F')(x_1, \dots, x_n) = C \prod_{i < j} (x_i - x_j)$$

А значит при условии неравенства корней он ненулевой. ¹

Дальше можно воспользоваться теоремой о гладкости обратного отображения. ■

§ 15 Теорема о неявном отображении

20:07 2016-10-15

Определение 1. Пусть $F: \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$. Рассмотрим уравнение

$$F(x, y) = 0 \quad (1.1)$$

Пусть $x^0 \in \mathbb{R}^n$, $y^0 \in \mathbb{R}^k$ такие, что $F(x^0, y^0) = 0$.

Тогда если $\exists P(x^0) \in \mathbb{R}^n, Q(y^0) \in \mathbb{R}^m$, такие что

$$\forall x \in P \exists! y \in Q: F(x, y) = 0$$

то говорят, что уравнение (1.1) задаёт неявную функцию $f: P \rightarrow Q$.

Сначала всякие комментарии.

$$(1.1) \Leftrightarrow \begin{cases} F_1(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m) = 0 \\ \vdots \\ F_k(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m) = 0 \end{cases}$$

¹Этого, конечно, не было в курсе алгебры, но там не используется ничего страшнее теоремы о делении с остатком. Вообще доказать бы надо, но лень.

Как обычно, главная идея состоит в том, чтобы всё линейаризовать

$$\begin{cases} dF_1 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ dF_k = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_1}{\partial y_j} dy_j = \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_1}{\partial x_j} dx_j \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_k}{\partial y_j} dy_j = \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_k}{\partial x_j} dx_j. \end{cases} \quad (1.2)$$

При этом dy_j мы хотим выразить через dx_j . Какие-то шансы обратить всё это дело есть лишь при условиях:

1. $k = m$
2. $\det \left(\frac{\partial(F_1, \dots, F_k)}{\partial(y_1, \dots, y_m)} \right) \neq 0$

Сейчас будем доказывать, что (1.2) \Rightarrow (1.1).

Теорема 1 (Теорема о неявном отображении). Пусть $F: G \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$, $F \in C^p$, $p \geq 1$.

$$F(x, y) = 0, \quad (x_0, y_0) \in G$$

1. $F(x_0, y_0) = 0$
2. $\det F'_y(x_0, y_0) \neq 0$

Тогда $\exists P(x_0), Q(x_0)$, такие, что (1.1) задаёт неявное отображение $f: P \rightarrow Q$. При этом $f \in C^p$ и

$$f'(x) = -(F'_y(x, y))^{-1} \cdot F'_x(x, y)$$

□ Доказательство — «обёртка» над теоремой об обратном отображении. К слову, в [1, с. 673] сразу доказывается утверждение о неявном отображении.

Итак, обозначения:

1. $\Phi: G \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$. Работает как-то так:

$$(x, y) \mapsto (u, v), \quad \begin{cases} u = x, & u \in \mathbb{R}^n \\ v = F(x, y), & v \in \mathbb{R}^m \end{cases}$$

2. $i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$ такого сорта $x \mapsto (x, 0)$

3. $\pi: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ такого сорта $(x, y) \mapsto y$

Теперь найдём определитель $\Phi'(x, y)$. Посчитав как-то частные производные, получим

$$\Phi'(x, y) = \left(\begin{array}{c|c} E_n & 0 \\ \hline F'_x & F'_y \end{array} \right) \Rightarrow \det(\Phi'(x_0, y_0)) = \det E_n \cdot \det F'_y(x_0, y_0) \neq 0$$

Чудно, значит по теореме об обратном отображении (1.10.1) $\exists \Phi^{-1}(x_0, y_0)$ и ещё окрестности $U(x_0, y_0), V(x_0, 0)$. Теперь определим окрестности из условия теоремы:

$$P(x_0) = i^{-1}(V) \cap Q(y_0) = \pi(U)$$

По сути — проекции.

В таких обозначениях $f = \pi \circ \Phi^{-1} \circ i$. Вполне очевидно, что $f \in C^p$. Ну $i, \pi \in C^\infty$, $\Phi^{-1} \in C^p$.

К тому же

$$\forall x \in P \quad x \xrightarrow{i} (x, 0) \xrightarrow{\Phi^{-1}} (x, y) \xrightarrow{\pi} y \in Q$$

При этом такой y — единственный. В итоге получилось задать неявно отображение f .

Из вышесказанного, оно сколько нужно раз дифференцируемо. Так что

$$\frac{\partial}{\partial x} F(x, f(x)) = F'_x \cdot E + F'_y \cdot f'(x) = 0$$

По условию F'_y — обратима. Следовательно,

$$f'(x) = -(F'_y(x, y))^{-1} \cdot F'_x(x, y)$$

■

§ 16 Функциональная зависимость системы функций

Определение 1. Пусть $f_1, \dots, f_m, g: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ — гладкие функции, $x_0 \in G$. Тогда эти функции называются функционально зависимыми в $V(x_0)$, если

$$\exists \varphi: U(f(x_0)) \rightarrow \mathbb{R}, \varphi \in C^1 : g(x) = \varphi(f(x)) \text{ в } V(x_0)$$

Определение 2. Пусть $f_1, \dots, f_m, g: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ — гладкие функции. Тогда эти функции называются функционально независимыми, если определение выше не выполняется ни для какой $V \subset G$

Замечание. Тут лажа какая-то с определениями, не отрицание же нифига.

Теорема 1. (о функциональной зависимости) Пусть $f_1, \dots, f_m, g: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ — гладкие функции. К тому же $a \in G$,

$f = (f_i)_i$, $y = f(x)$, $\text{rk} \begin{pmatrix} f'_1 \\ \vdots \\ f'_m \end{pmatrix} = m$ в точке $x \in U(a)$. Тогда, если $\text{rk} \begin{pmatrix} f'_1 \\ \vdots \\ f'_m \\ g' \end{pmatrix} = m$ в точке $x \in U(a)$, то $\exists V(a)$ в которой g

функционально зависит от f_1, \dots, f_m .

□ Пусть сразу $n \geq m$, иначе условие теоремы не выполняется совсем никогда (ну там m векторов всегда ЛЗ).

Введём обозначения:

$$x = (\underbrace{x_1, \dots, x_m}_{\bar{x}}, \underbrace{x_{m+1}, \dots, x_n}_{\bar{\bar{x}}}), \quad \bar{y} = (y_1, \dots, y_m, \bar{\bar{x}})$$

Из алгебры в $f'(x)$, $x \in U(a)$ существует ненулевой минор порядка m . Можно НУО считать, что он соответствует \bar{x} .

Тогда это равносильно тому, что $\det \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{x}}(a) \right) \neq 0$.

Рассмотрим такую неявную функцию

$$F: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m, \quad F(\bar{y}, \bar{x}) = y - f(\bar{x}, \bar{\bar{x}}) = 0$$

Оно всё по условию гладкое. Тогда по теореме о неявном отображении существует пара окрестностей P, Q и

$$\exists \varphi: P \subset \mathbb{R}^n \rightarrow Q \subset \mathbb{R}^m, \quad \bar{x} = \varphi(\bar{y})$$

В этих окрестностях $F \equiv 0 \Leftrightarrow y \equiv f(\varphi(y, \bar{\bar{x}}), \bar{\bar{x}})$. Заметим, что здесь $y, \bar{\bar{x}}$ — независимые переменные. Так что если $j > m$, то

$$\frac{\partial}{\partial x_j} f_i(\varphi(\bar{y}), \bar{\bar{x}}) = \sum_{k=1}^m \partial_k f_i \cdot \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j} + \partial_j f_i \equiv 0$$

Из условия на ранг известно, что

$$g'(x) = \sum_{i=1}^m \lambda_i f'_i(x), \quad x \in U(a)$$

Нам для того чтобы показать, что g функционально зависит от f , необходимо приравнять в окрестности точки a g к функции от y . Пусть снова $j > m$, тогда

$$g(x) = g(\bar{x}, \bar{\bar{x}}) = g(\varphi(\bar{y}), \bar{\bar{x}})$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_j} = \sum_{k=1}^m \partial_k g \cdot \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j} + \partial_j g$$

А вот теперь нужно воспользоваться условием на ранги. Тут очень важно, что это условие работает в окрестности a — ведь какие-то тождества в точке нам ничего интересного не дадут.

$$\frac{\partial g}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \left(\partial_k f \cdot \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j} + \partial_j f_i \right) = 0$$

Из того, что g, φ — гладкие получаем, что и функция, нужная в определении 1.16.1 тоже гладкая. Осталось только пересечь много окрестностей (из неявного отображения, условия на ранг etc). ■

§ 17 Геометрический смысл ранга матрицы Якоби

Определение 1 (Коразмерность). Пусть V — подпространство U . Тогда $\text{codim } V = \dim U - \dim V$.

Теорема 1. Пусть $F: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $a \in G$, $b = F(a)$, $\exists V(a): \forall x \in V \text{ rk } F'(x) = r$. Тогда

1. $\exists U(a): F(U)$ имеет вид графика $\bar{y} = \varphi(\bar{x})$
2. $\exists U(a) \subset F^{-1}(b)$ имеет вид графика $\bar{x} = \psi(\bar{y})$

□ Аккуратное следствие 1.16.1 и 1.15.1. ■

Замечание. Ранг, собственно, показывает сколько есть степеней свободы у значений функции, причём в довольно механическом смысле. Мало ли, вдруг мы отобразили пространство в какую-то кривую в другом.

Есть кстати шансы, что в этой теореме попутно определили размерность образа при отображении, но неточно. Собственно, график $\bar{y} = \varphi(\bar{x})$ можно считать заданным на $y \in \mathbb{R}^m$, которое уже «прямое», а дальше размерностью объявить $\dim\{\bar{y}\}$.

§ 18 Три способа локального задания поверхности

1. Параметрическое

$$f: D \subset \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n: \text{rk } f' = k \forall x \in D (\geq k)$$

Тогда $M = f(D)$ — поверхность размерности k .

Условие на ранг означает, что нигде нету изломов, параметр же по сути — скорость.

2. Задание графиком

$$D \subset \mathbb{R}^k, f: D \rightarrow \mathbb{R}^{n-k} \text{ — гладкое}$$

Тогда $M = \{(t, f(t)) \mid t \in D\} = \Gamma_f$.

Определение 1 (Поверхность(нестрого)). Множество $S \subset \mathbb{R}^m$ можно называть k -мерной гладкой поверхностью, если в окрестности любой своей точки оно задаётся графиком гладкого отображения $f: D \subset \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^{n-k}$.

3. Неявное

Пусть $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n-k}$. Тогда

$$M = \{x \in \mathbb{R}^n \mid F(x) = 0\}$$

По сути уравнения связи.

Теорема 1. Если в некой окрестности $a \in \mathbb{R}^n$ k -мерная поверхность может быть задана один из 3 способов, то она может быть задана и всеми остальными.

□

1 → 2 см 1.17.1

2 → 3 $F(t, y) = f(t) - y$, $F' = (f'_t \mid -E) \Rightarrow \text{rk } F' = n - k$

3 → 2 см 1.17.1

2 → 1 $(x, y) \mapsto (x(t), f(x(t)))$, где $t = x$. С рангами очевидно проблем нет.

■

§ 19 Условный экстремум(нестрого)

Определение 1 (Безусловный экстремум). Пусть $f: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $a \in G$ — внутренняя точка. Тогда в точке a \max / \min если

$$\exists U(a): \forall x \in U \quad f(x) \leqslant / \geqslant f(a)$$

Определение 2 (Экстремум на подмножестве). Пусть $f: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $M \subset \mathbb{R}^n$ — k -мерная поверхность, $a \in G \cap M$ — внутренняя точка. Тогда в точке a \max / \min относительно M , если

$$\exists U(a): \forall x \in U \cap M \quad f(x) \leqslant / \geqslant f(a)$$

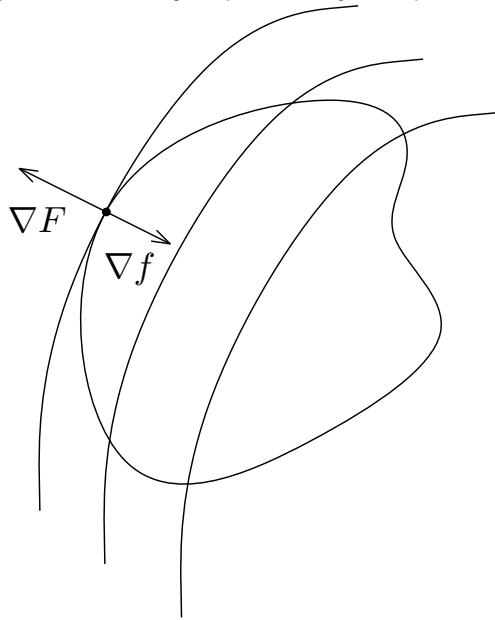
Чаще всего M задают неявно — «накладывают условия» на значения f .

Определение 3 (Условный экстремум). Пусть $f: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $F_1, \dots, F_m: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $a \in G \cap M$ — внутренняя точка, $F_1(a) = \dots = F_m(a) = 0$. Тогда в точке a *условный* \max / \min если

$$\exists U(a): \forall x \in U, F_1(x) = \dots = F_m(x) = 0 \quad f(x) \leqslant / \geqslant f(a)$$

Теорема 1. Пусть $f, F_1, \dots, F_m \in C^1(G)$, $a \in G$. Тогда если f имеет в a экстремум при условии $F(a) = 0$, то $\nabla f(a), \nabla F_1(a), \dots, \nabla F_m(a)$ линейно зависимы.

Е.г. Можно двумерный случай рассмотреть.



$$\nabla f = \lambda \nabla F$$

Следствие 1 (Правило Лагранжа). f имеет в a экстремум при условии $F_1(a) = \dots = F_m(a) = 0$, то

1. либо $\nabla F_1(a), \dots, \nabla F_m(a)$ ЛЗ
2. либо $\exists \lambda_1, \dots, \lambda_m \in \mathbb{R}: \nabla f(a) = \sum_i \lambda_i \nabla F_i(a)$

§ 20 Доказательство теоремы об условном экстремуме

□

1. Пусть $m = n - 1$. Будем доказывать от противного. Пусть в a условный тах, но $\nabla f(a), \nabla F_1(a), \dots, \nabla F_m(a)$ — ЛНЗ. Рассмотрим $\Phi(x) = (f(x), F_1(x), \dots, F_m(x))$. Тогда такое $\Phi: G \rightarrow \mathbb{R}^n$. Из линейной независимости градиентов

$$\Phi'(a) = \begin{pmatrix} \nabla f(a) \\ \nabla F_1(a) \\ \vdots \\ \nabla F_m(a) \end{pmatrix}, \det \Phi'(a) \neq 0$$

Пусть $b = \Phi(a) = (f(a), 0, \dots, 0)$. Тогда по теореме об обратном отображении (1.13.1)

$$\exists U(a), V(b) : \Phi : U \rightarrow V \text{ — диффеоморфизм}$$

Пусть $V \supset B_\varepsilon(b)$, $y = (f(a) + \frac{\varepsilon}{2}, 0, \dots, 0) \in V$, тогда $\exists! x \in U : \Phi(x) = y$. Получается, что $f(x) > f(a)$, $\forall i F_i(x) = 0$, что немного противоречит тому, что в a условный max.

2. Теперь рассмотрим случай $m < n - 1$ (всё остальное неинтересно, точно будет ЛЗ).

Будем доказывать от противного. Пусть в a условный max, но $\nabla f(a), \nabla F_1(a), \dots, \nabla F_m(a)$ — ЛНЗ. Тогда $\text{rk } \Phi'(a) = m + 1 < n$. Добавим ещё функций F_{m+1}, \dots, F_{n-1} таких, что $F_i(x) = x_{i+1} - a_{i+1}$.

Введём ещё стандартное обозначение

$$x = (\underbrace{x_1, \dots, x_{m+1}}_{\bar{x}}, \underbrace{x_{m+2}, \dots, x_n}_{\bar{\bar{x}}})$$

И не совсем стандартное

$$A = \frac{\partial(f_1, F_1, \dots, F_m)}{\partial x_1, \dots, x_{m+1}}(a)$$

Обычно такой «дробью» обозначают якобиан, но, пожалуй, сохраню обозначения с лекции.

Итак

$$\Phi'(a) = \left(\begin{array}{c|c} A & * \\ \hline 0 & E_{n-m-1} \end{array} \right) \Rightarrow \text{rk } \Phi'(a) = n$$

А теперь можно подвести всё к первому пункту. Рассмотрим $\tilde{M} = \{x \mid F_1(x) = \dots = F_{n-1}(x) = 0\}$ (а $M = \{x \mid F_1(x) = \dots = F_m(x) = 0\}$). Поскольку $\tilde{M} \subset M$, f будет иметь в a максимум и относительно \tilde{M} .

Аналогично 1 пункту получаем бред какой-то.



Замечание 1. Такая теорема может найти лишь точки, «подозрительные» на экстремум. Надо ещё отдельно думать. Например, вдруг там на компакте всё определено.

Замечание 2. Можно рассматривать функцию Лагранжа:

$$\mathcal{L}(x) = f(x) - \sum_{i=1}^m \lambda_i F_i(x)$$

Тогда если в a условный экстремум, то в a стационарная точка ($\mathcal{L}'(a) = 0$) функции Лагранжа.

Литература

- [1] Зорич В. А., Математический анализ. Часть I — 6 изд., дополн. — М.: МЦНМО, 2012
- [2] Зорич В. А., Математический анализ. Часть II — 6 изд., дополн. — М.: МЦНМО, 2012
- [3] Фихтенгольц Г. М., Курс дифференциального и интегрального исчисления. В трёх томах. Том II. — СПб.: Издательство «Лань», 1997. — 800 с.