Лекции по введению в топлогию

Лектор: Миллионщиков Д.В.
Автор конспекта: Ваня Коренев*

2 курс. Осенний семестр 2024,г.
28 сентября 2024 г.

*tg: @gallehus

Содержание

1 Лекция 1

Повторение определений из мат. анализа: окрестность точки, открытое множество, замкнутое множество, непрерывная функция, компакт, связность, метрическое пространство. Так же было отмечено, что топлогию можно задать через систему окрестностей.

Замечание 1.1. *$\rho(x, y) = |x - y|$ - метрика, при $x, y \in \mathbb{R}^1$.*

Определение 1.2. *Пара (X, ρ) называется метрическим пространство, если $\rho : X \times X \leftarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ удовлетворяет аксиомам метрики.*

Теорема 1.3. *$\big(\mathbb{R}^1, \rho = |x - y|\big)$ является метрическим пространством.*

Определение 1.4. *Топологическое пространство (X, τ), где τ - совокупность подмножеств - тополгия, удовлетворяющие следуюущим свойствам*

1. *$\emptyset \in \tau$*
2. *$X \in \tau$*
3. *$\bigcap_{i=1}^{k} U_k \in \tau$*
4. *$\bigcup U_k \in \tau$*

Пример 1.5.

1. *антидискретная(тривиальная) топология $\tau = \{\emptyset, X\}$*
2. *дискретная топология $\tau = 2^X$*
3. *$X = \{1, 2\}$, способы задания топологии: $\tau_1 = \{X, \emptyset, \{1\}\}$, $\tau_1 = \{X, \emptyset, \{2\}\}$*

Определение 1.6. *Пусть X - метрическое пространство. Открытый шар $O_r(x_0) = \{x \in X \mid \rho(x, x_0) < r\}$*

Определение 1.7. *Пусть X - метрическое пространство. $U \subset X$ - открыто, если $\forall x \in U$ $\exists$ окрестность точки(=открытый шар, содержащий x) x, содержащаяся в U.*

Определение 1.8. *В X произвольном топологическом пространстве $U \subset X$ является замкнутым, если дополнение к нему открыто.*

Пример 1.9. *Топология Зарисского определяется в $\mathbb{C}^1$, можно обобщить до $\mathbb{C}^n$. - что-то из алгебраическое геомерии.*

Замкнутое множество - это конечное множество точек.

Задача 1.10. *Доказать, что это топология.*

Определение 1.11. *База топологии $\beta \subset \tau \subset 2^X$, если любое открытое множество $U \in \tau$ можно выразить в виде объединения элементов из базы β, т.е. $U = \bigcup_{\alpha \in A} B_\alpha$, где B_α - элемент базы.*

База топологии необходима для уменьшения количестав задаваемых открытых множеств для определения топологии.

Лемма 1.12 (Достаточное условие на базу топологии)**.** *Пусть $\beta \subset 2^x$ - набор подмножеств. Если выполняются следующие условия*

1. *$\forall x \in X \exists B_x \in \beta$ такой, что $x \in B_x$.*
2. *$\forall B_1, B_2 \in \beta \Rightarrow (x \in B_1 \cap B_2 \Rightarrow \exists B_3 \in \beta : x \in B_3 \subset B_1 \cap B_2)$*

то β является базой топологии.

Доказательство. Вводим всевозможные $U_\alpha = \bigcup_\gamma B_\gamma^{(\alpha)}$. Проверим все свойства из опредления топологии.

Легко проверить, что выполняются первые 2-а свойства из опредедления топологии. В качество $\emptyset$ можно взять объединение пустого числа множеств, а в качестве X - объединение всех элементов базы, оно будет равно X, т.к. для каждого $x \in X$ существует элемент базы, содержащий его.

Докажем выполнение 3-его свойства. Благодаря принципу математической индукции достаточно доказать, что $k = 2$.

$$U_1 \cap U_2 = \bigcup_{\alpha \in A_1} B_\alpha^{(1)} \cap \bigcup_{\alpha \in A_2} B_\alpha^{(2)} = \bigcup_{\alpha_1 \in A_1, \alpha_2 \in A_2} B_{\alpha_1}^{(1)} \cap B_{\alpha_2}^{(2)} = \bigcup_{\alpha_1 \in A_1, \alpha_2 \in A_2} \bigcup_{x \in B_{\alpha_1}^{(1)} \cap B_{\alpha_2}^{(2)}} B_{3,x}^{(\alpha_1, \alpha_2)}$$

Тут $B_{3,x}^{(\alpha_1, \alpha_2)}$ существует из-за пункта 2. В итоге мы получили, что $U_1 \cap U_2$ можно выразить в виде объединения элементов базы.

Докажем выполнение 4-го свойства.

$$\bigcup_{\alpha \in A} U_\alpha = \bigcup_{\alpha \in A} \bigcap_{i \in I} B_i^{(\alpha)} = \bigcup_{(\alpha, i) \in A \times I} B_i^\alpha$$

Опять получили объединения элементов базы.

Итого всевозможные объединение элементов базы задают топологию на X. □

Задача 1.13. *Повторить доказательство для базы метрического пространства.*

Можно еще уменьшить количество задаваемых элементов.

Определение 1.14. *π называется предбазов топологии, если $\pi \subset \beta \subset \tau \subset 2^X$ и каждое U представляется в виде объединения конечного пересечения элементов предбазы, т.е. $forallU \in \tau$ выполняется*

$$U = \bigcup \bigcap_{i=1}^{k} P_i, \text{ где } P_i \text{- элемент предбазы.}$$

Замечание 1.15. *Любое множество задает предбазу.*

Следующее утверждение не дописано.

Пример 1.16. *Пусть $X = 1, 2, 3, 4, 5$.*
$\pi = \{\{1, 2, 3\}, \{2, 3, 4\}, \{3, 4, 5\}\}$ - предбаза.
*$\beta = \{\{1, 2, 3\}, \{2, 3, 4\}, \{3, 4, 5\}, \{2, 3\}, \{3, 4\}, \{3\}, \{1, 2, 3, 4\}, \{2, 3, 4, 5\}, \{$**что-то**$\}, \emptyset\}$*
$\tau = \{\ldots, \ldots\}$
Причем $\pi \subset \beta \subset \tau \subset 2^X$

Определение 1.17. *$f : X \to Y$ - непрерывная функция, если для каждого открытого $U \subset Y$ выполняется $f^{-1}(U)$ - открыто в X.*

2 Лекция 2

Литература:

1. В.В. Федорчук - Введение в топологию
2. 4 автора - Введение в топоплогию

Определение 2.1. *Пусть (X, ρ) - метрическое пространство. Из метрического можно построить топологические пространство (X, τ). Такие пространства называеются метризуемыми.*

Замечание 2.2 (Критерий метризуемости. Накаты Ю.М.Смирнова. 1950-1951)**.**

Определение 2.3. $O_\varepsilon(x_0) = \{x \in X : \rho(x, x_0) < \varepsilon\}$

Теорема 2.4. *Шары $O_\varepsilon(x)$ образуют базу топологии.*

Доказательство. 1. $\forall x \in X\ \exists\ O_\varepsilon(x) : x \in O_\varepsilon(x)$

2. рассмторим $(O_{\varepsilon_1}(x_1) = B_1) \cap (B_2 = O_{\varepsilon_2}(x_2))$ найдем окрестность точки x, лежащий в этом пересечении, чтобы вся окрестность тоже лежала в этом пересечении $\rho(x, x_1) < \varepsilon_1, \rho(x, x_2) < \varepsilon_2$. Пусть $\varepsilon = \min\{\varepsilon_1 - \rho(x_1, x), \varepsilon_2 - \rho(x_2, x)\}$ Проверим условие $O_\varepsilon \subset O_{\varepsilon_1}(x_1) \cap O_{\varepsilon_w}(x_2)$

Проверим $y \in O_{\varepsilon_1}(x_1) \Rightarrow \rho(y, x_1) < \varepsilon_1$.

$$\rho(y, x_1) \leq \rho(y, x) + \rho(x, x_1) < \varepsilon - \rho(x, x_1) + \rho(x, x_1) = \varepsilon$$

Аналогично для второго шара.

Т.о. по достаточному условию на базу открытые шары будет образовывать базу. □

Простой способ сравнения топологий. Пусть X - множество. τ_1, τ_2 - топологии, определенные на X. ЧУМ - частично упорядоченное множество.

Определение 2.5. $\tau_1 \leq \tau_2 \Leftrightarrow \tau_1 \subset \tau_2$

Обычными словами: любое открытое множество в τ_1 будет открытым в τ_2.

Пример 2.6. *Рассмотрим антидискретную и дискретную топологии.*

$$\tau_1 = \{\emptyset, X\} \subset \tau_2 = 2^X$$

Можно считать, что это два полюса сравнения, где слева - слабейшая, справа - сильнейшая.

Любую топологию можно сравнить с этими двумя. Но точно существуют не сравнимые.

Задача 2.7. *Метризумые ли тривиальные топлогии(= антидискретная и дискретная)?*
1. можнов ввести дискретную метрику $\rho_D(x, y) = (1, x = y; 0, x \neq y)$. Получим дискретную топологию.
2. неметризуемо.

Определение 2.8 (индуцированная топология подространства)**.** *Пусть* (X, τ) *- топологическое пространство,* $Y \subset X$*.* $\tau_Y = \{U \cap Y : U \in \tau\}$*.*

Доказательство. Очевидно, что выполняются аксиомы топологии. □

Пример 2.9. $\mathbb{R}^2 = X$ *- метрическое пространство,* $Y \subset X$*.*

Определение 2.10. U *- окрестность точки* $x \in X$ $= U \in \tau$ *такое, что* $x \in U$*.*

Замечание 2.11 (Есть тут глубокий смысл?)**.**

$$\bigcap_{i=1}^{n} \textit{окрестность точки } x = \textit{окрестность точки } x$$

$$\bigcup_{\alpha} \textit{окрестность } x = \textit{окрестность}$$

Утверждение 2.12. $A \subset X$ *- открыто* $\Leftrightarrow$ *для каждой точки* $x \in$ *сущесвтует ее окрестность, лежащая в* A*.*

Доказательство. ($\Leftarrow$): Рассмоторим $C = \bigcup_{x \in A} O(x) \in \tau$. Очевидно, что $A \subset C$. А т.к. для каждого $x \in A$ верно $O(x) \subset A$, то также выполняется включение в другую сторону.

($\Rightarrow$): раз A - открыто, то A является окрестностью. □

Определение 2.13. *Пусть* $x \in X$*,* $\{x\} \in \tau$*, то* x *называется изолированной точкой.*

Замечание 2.14. *Если топлопгия дискретная, то все точки изолированные.*

Определение 2.15. *Пусть* $A \subset X$*,* $x \in X$*.* x *- точка прикосновения множества* A*, если для любой окрестности* $O(x)$ *выполняется* $O(x) \cap A \neq \emptyset$*.*

Определение 2.16. $x \in A$ *- внутренння точка множества* A*, если существует* $O(x)$*:* $O(x) \subset A$*.*

Определение 2.17 (A1)**.** *Замыкание множества* A *- множество всех точек прикосновения* A*. Обозначается* $\overline{A}$*.*

Определение 2.18 (B1)**.** *Внутренность - множество всех внутренних точек. Обозначается* $Int(A)$*.*

Задача 2.19. $Int(A) \subset A \subset \overline{A}$

Определение 2.20 (A2)**.** $\overline{A} = \bigcap_{\text{по всем возможным } F} = F : 1.F - \text{замкнуто}, 2.A \subset F$ $\overline{A}$ *= наименьшее замкнутое множество, содержащее* A*.*

Определение 2.21 (B2)**.** $Int(A) = \bigcup_{\text{по всем } U} U : U \in \tau, U \subset A$ $Int(A)$ *= наибольшее открытое в* A*.*

todo:

Определение 2.22. $x \in X$ *- граничная точка* A*, если* x *- точка прикосновения и* $x \notin Int(A)$*.*

Граница - множество граничных точек. Обозначается $Bd(A)$*.*

Замечание 2.23.

$$Bd(A) = \overline{A} \setminus Int(A)$$

Теорема 2.24. *Это определния эквивалентны.*

Доказательство. Докажем эквивалентность определний B1 и B2.

Пусть $Int(A)$ - множество точек в смысле определения B1. Докажем B2. Докажем проверкой включений.

($\subseteq$): если $x \in A$ - внутрення точка, то существует $O(x) \subset A$, тогда $x \in Int(A)$ в смыле другого определения.

($\supseteq$): $x \in Int(A)$ в смысле определния B2, тогда x принадлежит каком-то одному открытому $V \subset A$, тогда можем взять V за окрестность точки x. □

Определение 2.25 (понятие непрерывного отображения)**.** *Пусть* $f : X \to Y$*.* f *непрерывно в точке* $x_0 \in X$*, если для каждой* $O(f(x_0))$ *существует такая окрестность* $O(x_0)$*, что* $f(O(x_0)) \subset O(f(x_0))$*.*

f *- непрервыное отображение топологических пространств, если оно непрервыно во всех* $x \in X$*.*

Утверждение 2.26. *Следующие условия эквивалентны:*

1. f *- непрерывно*
2. *прообраз любого открытого множества является открытым, т.е.* $U \in \tau_X \Rightarrow f^{-1}(U) \in \tau_Y$
3. *прообраз любого замкнутого замкнут*
4. $f(\overline{A}) = \overline{f(A)}$ *- на лекции было дано так, но это утвреждение неверно*

Доказательство. Докажем только (1) $\Leftrightarrow$ (2).

($\Rightarrow$): пусть f - непрерывно. Нужно доказать, что $f^{-1}(V)$ - открыто, можем воспользоваться утверждением при критерий открытости.

($\Leftarrow$): пусть $x \in X$, V - окрестность точки $f(x_0)$, тогда по предположению $f^{-1}(V)$ - открыто, следовательно существует $O(x) \subset f^{-1}(V)$ □

Задача 2.27. *Доказать остальные эквивалентности в утверждении выше.*

3 Лекция 3

Повторение определения непрерывности и про эквивалентные утверждения из прошлой лекции.

Замечание 3.1 (философское)**.** *Проверять непрерывность $f : X \to Y$ удобно проверять на уровне базы или предбазы. Пусть $\beta \subset 2^Y$ - база топологии Y. Прообраз базы (предбазы) открыт: $f^{-1}(\beta) \subset \tau_X$*

Пример 3.2.
1. *$f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ - непрерывные функции одной переменной из математического анализа*
2. *$f(x) = e^{2\pi i x} = \cos(2\pi x) + i \sin(2\pi x)$, $f : \mathbb{R}^1 \to S^1$ - общее название таких отображений (накрытие)*
3. *тривиальный пример - постоянное отображение. $f(x) = y_0$, где $f : X \to Y$ и $y_0 \in Y$.*
4. *композиция непрерывных - непрерывное отображение $X \to_f Y \to_g Z$, тогда $g(f)$ - непрерывно.*
5. *$Z \subset X \to_f Y$, где на Z индуцирована топология X. $i : Z \to X$, $i(x) = x$, тогда i непрерывно в индуцированной топологии.*

Непрерывность в метрических пространствах.

Определение 3.3 (По Коши)**.** *f непрерывно в точке x_0, если для каждого $\varepsilon > 0$ существует $\delta > 0$ такое, что $f(O_\delta(x_0)) \subset O_\varepsilon(f(x_0))$*

Определение 3.4 (По Гейне)**.** *...*

Задача 3.5. *Доказать эквивалентность определений.*

Теорема 3.6 (Кривая Пеано)**.** *Существует непрерывное отображение $f : [0,1] \to [0,1] \times [0,1]$*

Докажем эту теорему потом.

Определение 3.7. *$f : X \to Y$ - гомеоморфзим, если f - биекция и f, f^{-1} - непрерывны.*
Если сущесвтует гомеоморфзим между X и Y, то эти пространства гомеомрфны.

Замечание 3.8. *Гомеомрфзим задает отношение эквивалентности.*
Чтобы доказать, что пространства не являются гомеоморфными, нужно найти свойства пространств, которые должные сохраняться, но у этих пространств они отличаются.

Пример 3.9. *$f(x) = tg(x) : (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}) \to_f (-\infty, +\infty) = \mathbb{R}$ - гомеоморфзим.*

Связность и линейная связность.

Определение 3.10. *Пространство X называется несвязным, если его можно представить в виде объединения двух непересекающихся непустых открытых подмножетсв.*
X - связно, если нельзя так разбить.

Пример 3.11.
1. *Рассмотрим X с дискретной топологией. X - всегда несвязно, если содержит более двух точек.*
2. *Рассмотрим X с антидискретной топологией. X - всегда связно.*
3.

Теорема 3.12. *Отрезок $I = [0,1]$ с индуцированной топологией - связен.*

Доказательство. От противного. Используя теорию действительных чисел. □

Утверждение 3.13. *Непрерывный образ связного множества - связен, т.е. если X - связен, $f : X \to Y$ следовательно $f(X)$ - связно*

Доказательство. От противного. Пусть выполняется $f(X) = A \cup B$, тогда $X = f^{-1}(A) \cup f^{-1}(B)$ - противоречие. □

Определение 3.14. *Пусть в топологическом пространстве, соединяющий $x_0, y_0 \in X$, это непрерывное отображение $\gamma : [0,1] \to X$ такое, что $gamma(0) = x_0$, $gamma(1) = y_0$.*

Замечание 3.15. *$\gamma([0,1])$ - связно.*

Определение 3.16. *Пространство X является линейно связным, если для каждый двух точек, существует путь, соединяющий их.*

Теорема 3.17. *Пусть X линейно связно, тогда X - связно.*

Доказательство. От противного. Пусть $X = A \cup B$. Тогда $x_0 \in A$, $y_0 \in B$ можно свзять отображением γ, тогда получим, что $\gamma([0,1]) = \gamma([0,1]) \cap A \cup \gamma([0,1]) \cap B$ - противоречие. □

Замечание 3.18. *Обратное неверно. Пример - график $f(x) = \sin \frac{1}{x}$ с добавлением отрезка $[-1,1]$.*

4 Лекция 4

Компактность

Пусть X - топологическое пространство.

Определение 4.1. *X - компактно, если из любого покрытия можно выделить конечное подпокрытие.*

Раньше это называлось бикомпактностью, а под в компакте требовалось счетность изначального покрытия.

Пример 4.2. *$[a, b]$ - компактен, для доказательстве нужно использовать факт существования точной верхней грани у ограниченности подмножества $\mathbb{R}^1$.*

Доказательство. □

Лемма 4.3 (О вложенных отрезках)**.** *Пусть есть система вложенных отрезков $\{[a_n, b_n]\}$, где $[a_n, b_n] \subset [a_{n-1}, b_{n-1}]$.*

Тогда их пересечение не пусто. Дополнительно, если $|b_n - a_n| \to 0$, тогда их пересечние состоит из одной точки.

Определение 4.4. *Центрированння система множеств $\{X_\alpha \subset X\}$, если пересечение любого конечного числа множеств X_α не пустно.*

Лемма 4.5 (Обобщение леммы для топологических пространств)**.** *Пусть X - топологическое пространство, тогда существует последовательность замкнутых не пустых подмножеств $X \supset F_1 \supset F_2 \dots$ и $\bigcap F_i \neq \emptyset$.*

Доказательство: игра в понятия(определения). Мы знаем, что

$$F_i - \text{замкнуто} \Leftrightarrow U_i = X \setminus F_i \text{- открыто}$$

□

Лемма вышея является следствием леммы ниже.

Лемма 4.6. *Топологическое пространство компактно $X \Leftrightarrow$ любая центрируемая система замкнутых подмножест имеет непустые пересечение*

Доказательство. $(\Rightarrow)$: Пусть $\bigcup_i F_i = \emptyset$, тогда что можно сказать про $\{U_i\}$? Рассмотрим $\bigcup_i (X \setminus F_i) = X \setminus \bigcap_i F_i$

$$\bigcup_i U_i \supset X \Rightarrow \text{существует конечное подпокрытие в силу компактности} X$$

$$U_{\alpha_1} \cup \dots U_{\alpha_k} \supset X$$

Следовательно $\{F_i\}$ удовлетворяют условию. □

Задача 4.7. *Доказать утверждение в обратную сторону.*

Определение 4.8. *X называется локально компактным, если $\forall x \in X$ существует $O(x)$, для которой существует $V(x)$ такая, что 1) $Cl(V(x)) \subset O(x)$; 2) $Cl(V(x))$ - компактно.*

Определение 4.9. *Семейство подмножеств $X_\alpha \subset X$ называется локально конечным, если существует $O(x)$, которая пересекаяется с конечным числом множеств из системы $\{X_\alpha\}$.*

Определение 4.10. *Топологичесоке пространство X называется паракомпактном, если в любое его открытое покрытие множ вписать локально конечное подпокрытие.*

Пример 4.11. *$\mathbb{R}^1$ и $\mathbb{R}^n$ является паракомпактном*

Лемма 4.12 (наследование компактностей)**.** *Пусть $X \supset A$, если A - замкнутно, то A сохраняет следующие свойтсва топологического протсрантсва X*

1. *компактно*
2. *локально компактно*
3. *паракомпактно*

Задача 4.13. *Доказать лемму выше.*

Утверждение 4.14. *Пусть $f : X \to Y$ - непрерывное отображение топологических пространств. Тогда, если X компактно, тогда $f(X) \subset Y$ тоже компактно.*

Доказательство. Очевидно. □

Задача 4.15. *Рассмотреть похожие утверждения для локальной компактности и паракомпактности.*

Определение 4.16 (Аксиомы отделимости)**.**

1. *T_0 (аксиома Колмогорова): X удовлетворяет T_0 тогда и только тогда, когда выполнятеся следующиее или существует $O(x)$ такая, что $y \notin O(x)$, или существует $O(y)$ такая, что $x \notin O(y)$ - для каждый двух различных элементов $x, y \in X$.*
2. *T_1: для двух ралзичных точек найдутся окрестности, удовлетворяющие следующим свойствам $x \notin O(y)$ и $y \notin O(x)$.*
3. *T_2 (аксиомы Хаусдорфа): для двух различных точек существуют непересекающиеся окрестности.*

Задача 4.17. *Пространство, удовлетворяющие T_1, но не удовлетворяющие T_0.*