

Алгоритмы в математике (*теория чисел*)

Михайлов Максим

17 июня 2022 г.

Оглавление

Лекция 1	3 марта	2
1	Алгебраическое тело	2
Лекция 2	11 марта	
Лекция 3	18 марта	
Лекция 4	29 марта	
Лекция 5	2 апреля	10
2	Введение в кватернионы	10
Лекция 6	9 апреля	14
2.1	Напоминание о кватернионах	14
3	Кватернионы и $SU(2)$	15
4	$SU(2)$ и $SO(3)$	17
Лекция 7	16 апреля	19
5	Алгебраические топологические тела	19
Лекция 8	23 апреля	22
6	Топологические группы	22
6.1	Топология	22
Лекция 9	30 апреля	25
6.2	Топологические группы	25

Лекция 1

3 марта

1 Алгебраическое тело

Определение. Алгебраическое тело — множество T с бинарными операциями $+$ и \cdot , такими, что:

1. $(T, 0, +)$ — абелева группа:

- $\forall \alpha, \beta, \gamma \quad \alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$
- $\exists 0 : \alpha + 0 = \alpha = 0 + \alpha$
- $\forall \alpha \in T \quad \exists (-\alpha) : \alpha + (-\alpha) = 0 = (-\alpha) + \alpha$
- ★ $\forall \alpha, \beta \in T \quad \alpha + \beta = \beta + \alpha$

2. $((T \setminus \{0\}), 1, *)$ — группа:

- $\alpha(\beta\gamma) = (\alpha\beta)\gamma$
- $\exists 1 : \alpha \cdot 1 = \alpha = 1 \cdot \alpha$
- $\forall \alpha \neq 0 \quad \exists \alpha^{-1} : \alpha\alpha^{-1} = 1 = \alpha^{-1}\alpha$

★ Если умножение не коммутативно, то T — тело, иначе — поле.

3. Дистрибутивность: $\alpha(\beta + \gamma) = \alpha\beta + \alpha\gamma, (\alpha + \beta)\gamma = \alpha\gamma + \beta\gamma$

Пример. \mathbb{F}_p — поле вычетов по модулю p .

$$\mathbb{F}_p = \{0, 1, 2, \dots, p-1\}$$

1. $\mathbb{F}_2 = \{0, 1\}$

+	0	1	·	0	1
0	0	1	0	0	0
1	1	0	1	0	1

Таблица 1.1: Таблицы сложения и умножения в \mathbb{F}_2

Пусть есть поле $\mathbb{F}_k, k = n \cdot m, m \neq 0, n \neq 0$. Т.к. $n < k$ и $m < k$, то $n \cdot m = 0$. Таким образом, в поле есть делители нуля.

Примечание. Переход от \mathbb{Q} к \mathbb{R} — топологическая конструкция, поэтому будем рассматривать переход из \mathbb{Q} в \mathbb{C} над рациональными числами.

Определение. $\mathbb{C} \cong K[t] / (t^2 + 1)K[t]$

·	1	i
1	1	i
i	i	-1

Теорема 1 (Фробениуса). Дано тело T , такое что $T \supset \mathbb{R}$. Тогда:

1. Каждый элемент \mathbb{R} коммутирует с каждым элементом T .
2. Каждый элемент T представим как:

$$x = x_0 + x_1 i_1 + x_2 i_2 + \dots + x_n i_n$$

Из этого следует, что выполнено одно из:

1. T это \mathbb{R}
2. T это \mathbb{C}
3. T это \mathbb{K}

Если $i_1, i_2 \dots i_n$ — базис \mathbb{I} , то $\dim \mathbb{I} \in \{0, 1, 3\}$

Лекция 2

11 марта

$$\mathbb{L} = \{z \mid z^2 \in \mathbb{R}, z^2 \leq 0\}$$

Примечание. $\mathbb{R} \cap \mathbb{L} = \{0\}$

Теорема 2. $\mathbb{R} \oplus \mathbb{L} = T$

Лемма 1. Если $z \in \mathbb{L}$, то $\forall \alpha \in \mathbb{R} \quad \alpha z \in \mathbb{L}$.

Доказательство.

$$(\alpha z)^2 = \alpha^2 z^2 \leq 0 \Rightarrow \alpha z \in \mathbb{L}$$

□

Лемма 2. Если $z \in \mathbb{L}$ и z^{-1} существует, то $z^{-1} \in \mathbb{L}$, где z^{-1} это такой элемент \mathbb{L} , что $zz^{-1} = 1$.

Доказательство.

$$z^2(z^{-1})^2 = \underbrace{zz}_{<0} z^{-1}z^{-1} = 1 \Rightarrow z^{-1}z^{-1} < 0 \Rightarrow z^{-1} \in \mathbb{L}$$

□

Лемма 3. Всякий элемент x из T представим единственным образом в виде:

$$x \stackrel{!}{=} a + z, \quad a \in \mathbb{R}, z \in \mathbb{L}$$

Доказательство. $\langle x \in T, \{x^0, x, x^2 \dots x^{n+1}\}$ — линейно зависимые, т.к. пространство размерности $n + 1$, а элементов $n + 2$. Тогда по определению линейной зависимости $\exists \{\alpha_i\}_{i=0}^{n+1} \subset \mathbb{R}$, такие что:

$$\alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_{n+1} x^{n+1} = 0$$

Тогда x является корнем многочлена вида $x - a = 0$ и тогда $x = a$, либо x является корнем многочлена вида $x^2 + 2\alpha x + \beta = 0$ и тогда x можно представить в виде $a + z$.

Покажем единственность. Пусть $x = a + y$ и $x = b + z$, где $a, b \in \mathbb{R}$, $y, z \in \mathbb{I}$.

$$\begin{aligned} a + y - b - z &= 0 \\ a + y - b &= z \\ \underbrace{(a - b)^2}_{\in \mathbb{R}} + 2(a - b)y + \underbrace{y^2}_{\in \mathbb{R}} &= \underbrace{z^2}_{\in \mathbb{R}} \\ 2(a - b)y &= 0 \end{aligned}$$

Таким образом, либо $a = b$, а следовательно $y = z$, либо $y = 0 \implies x \in \mathbb{R} \implies z = 0$ \square

Лемма 4. Пусть $u, v \in \mathbb{I}$, $a, b \in \mathbb{R}$. Тогда $uv + vu = \xi \in \mathbb{R}$ и $au + bv = \eta \in \mathbb{I}$.

Доказательство. Положим, что $\{1, u, v\}$ линейно зависим, т.е. $\exists \alpha, \beta, \gamma : \alpha + \beta u + \gamma v = 0$.

$$\begin{aligned} \beta u &= -\alpha - \gamma v \implies \alpha = 0 \implies u = -\frac{\gamma}{\beta}v \\ uv + vu &= -\frac{\gamma}{\beta}v^2 - \frac{\gamma}{\beta}v^2 = \frac{-2\gamma}{\beta}v^2 \in \mathbb{R} \\ -\frac{\alpha\gamma}{\beta}v + bv &= \left(b - \frac{\alpha\gamma}{\beta}\right)v \in \mathbb{I} \end{aligned}$$

Положим, что $\{1, u, v\}$ линейно независим.

$$\begin{aligned} \eta^2 &= (\beta + z)^2 = (au + bv)^2 = a^2u^2 + b^2v^2 + ab(uv + vu) \\ (\beta + z)^2 &= a^2u^2 + b^2v^2 + ab(\alpha + y) \\ \beta^2 + 2\beta z + z^2 &= a^2u^2 + b^2v^2 + ab(\alpha + y) \\ 2\beta z &= ab(\alpha + y) \end{aligned}$$

Если $z = 0$, то $\{1, u, v\}$ линейно зависим ($\beta = au + bv$) — противоречие.

$$\langle z \neq 0, z = \frac{ab}{2\beta}y$$

$$\begin{aligned} au + bv &= \beta + \frac{ab}{2\beta}y \\ a'u + b'v &= \beta' + \frac{a'b'}{2\beta'}y \\ (a - a')u + (b - b')v &= (\beta - \beta') + \left(\frac{ab}{2\beta} - \frac{a'b'}{2\beta'}\right)y \end{aligned}$$

Тогда мы можем выбором a и b занулить $\frac{ab}{2\beta} - \frac{a'b'}{2\beta'}$, поэтому $\{1, u, v\}$ линейно зависимы.

Не дописано \square

Лемма 5.

- $u, v \in \mathbb{I}$
- $u^2 = -1$
- $v^2 = -1$
- $w = u \cdot v$

Тогда:

$$u^2 = v^2 = w^2 = -1$$

$$uv = -vu = w$$

$$vw = -wv = u$$

$$wu = -uw = v$$

Доказательство. Дома.

□

Лекция 3

18 марта

Пример (split complex number). Это не тело.

Числа представимы в виде $z = a + bj$, есть дополнение $z^* = a - bj$ и тогда $zz^* = a^2 - b^2$. Изотропные элементы $e_1 = \frac{1+j}{2}$ и $e_2 = \frac{1-j}{2}$ образуют базис в этих числах. Кроме того, $e_1 e_1^* = e_2 e_2^* = 0$

Таблица 3.1: Таблица Кэли

	1	j
1	1	j
j	j	1

Пример. $\mathbb{R}[t]/t^2\mathbb{R}[t]$, $z = a + bd$

Лемма 6. Пусть $u^2 = -1, v^2 = -1, w = uv$. Тогда $w = uv \in \mathbb{I}, w^2 = -1, uv = -vu = \omega, v\omega = -\omega v = u$ и т.д.

Доказательство.

$$\triangleleft (uv)(vu) = -vu = 1 \Rightarrow vu = (uv)^{-1}$$

$$\mathbb{R} \ni uv + vu = uv + (uv)^{-1} \in \mathbb{I} \Rightarrow uv - vu = 0 \Rightarrow uv = -vu$$

□

Теорема 3.

- $\mathbb{I} = \{0\} \Rightarrow T \cong \mathbb{R}$
- $\mathbb{I} = \{x\}, i := \frac{x}{\sqrt{-x^2}}, i^2 = -1 \Rightarrow T \cong \mathbb{C}$

- $\mathbb{I} = \{x, y\}, i := \frac{x}{\sqrt{-x^2}}, iy =: b + z, j_0 := iy - b = z, j = \frac{j_0}{\sqrt{-j_0^2}} \implies \exists k = ij \implies q = \alpha + i\beta + j\gamma + k\delta \implies T \cong \mathbb{K}$
- $\{i, j, k, m\} \in \mathbb{I}$.

Тогда пусть $im = a + x, jm = b + y, km = c + z$, где $a, b, c \in \mathbb{R}, x, y, z \in \mathbb{I}$. Рассмотрим $l_0 = m + ai + bj + ck \in \mathbb{I}$, при этом $l_0 \neq 0$ и $il_0, jl_0, kl_0 \in \mathbb{I}$. Тогда $il = -li, jl = -lj, kl = -lk$.

$$\left. \begin{array}{l} ilj = -ijl = -kl \\ jli = -lji = lk \end{array} \right\} \implies kl = -kl = 0$$

Лекция 4

29 марта

Лемма 7. $-u^2 =$

???

Доказательство.

$$\mathbb{R} \ni uv + vu \in \mathbb{I}$$

Мы доказывали, что ???

Мы доказывали, что $z \in \mathbb{I} \Rightarrow z^{-1} \in \mathbb{I}$

По другой лемме $ab \in \mathbb{R}$, $u, v \in \mathbb{I} \Rightarrow au + bv \in \mathbb{I}$

Тогда $uv + vu = 0$ и $uv = -vu$.

$$\omega^2 = uvuv = uv(-vu) = -u^2 = -1$$

□

Остальная часть лекции рассказана повторно на пятой лекции.

Лекция 5

2 апреля

2 Введение в кватернионы

Будем обозначать $q = q_0 + \tilde{q}$, где q_0 — вещественная часть, а \tilde{q} — мнимая. Также можно неформально говорить, что $q_0 \in \mathbb{R}$, а $\tilde{q} \in \mathbb{R}^3$.

Пространство кватернионов \mathbb{K} в некоем смысле изоморфно \mathbb{R}^4 . В этом пространстве можно выделить подпространство мнимых кватернионов, изоморфное \mathbb{R}^3 . Распишем \tilde{q} :

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k$$

Операция сложения работает “поэлементно”:

$$p + q = (p_0 + q_0) + (\tilde{p} + \tilde{q}) = (p_0 + q_0) + (p_1 + q_1)i + (p_2 + q_2)j + (p_3 + q_3)k$$

Умножение более интересно и определяется следующими правилами:

$$\begin{aligned} ij &= k = -ji \\ jk &= i = -kj \\ ki &= j = -ik \\ i^2 &= j^2 = k^2 = ijk = -1 \end{aligned}$$

Тогда умножение в явном виде:

$$\begin{aligned} (p_0 + p_1 i + p_2 j + p_3 k)(q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k) = \\ p_0 q_0 - \langle \tilde{p}, \tilde{q} \rangle + p_0 \tilde{q} + q_0 \tilde{p} + [\tilde{p} \times \tilde{q}] \end{aligned}$$

$$[p \times q] := \det \begin{vmatrix} i & j & k \\ p_1 & p_2 & p_3 \\ q_1 & q_2 & q_3 \end{vmatrix}$$

Нейтральные элементы:

- По сложению: $0 = 0 + \tilde{0}$
- По умножению: $1 = 1 + \tilde{0}$

Определение. Сопряженным к кватерниону $q = q_0 + \tilde{q}$ называется кватернион:

$$q^* = q_0 - \tilde{q}$$

Определение (норма кватерниона).

$$\|q\| = qq^* \quad |q| = \sqrt{\|q\|} = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}$$

Определение.

$$q^{-1} = \frac{q^*}{\|q\|}$$

Определение (единичная сфера).

$$S = \{q \in \mathbb{K} \mid \|q\| = |q| = 1\}$$

Примечание. Если $|q| = 1$, то $q^{-1} = q^*$

Свойства.

1. $(q^*)^* = (q_0 - \tilde{q})^* = q_0 + \tilde{q} = q$
2. $q + q^* = 2q_0$ — “след”
3. $(pq)^* = q^*p^*$
4. $qq^* = (q_0 + \tilde{q})(q_0 - \tilde{q}) = q_0^2 - \tilde{q}\tilde{q} = q_0^2 - \overbrace{[\tilde{q} \times \tilde{q}]}^0 + \langle \tilde{q}, \tilde{q} \rangle = q^*q = \|q\| = \|q^*\|$
5. $\|pq\| = (pq)(pq)^* = (pq)(q^*p^*) = p(qq^*)p^* = p\|q\|p^* = \|q\|\|pp^*\| = \|q\|\|p\| = \|p\|\|q\|$
6. $\|q\| = 1$ — **единичный кватернион**.

$\angle q \in \mathbb{K}$ такое, что $\|q\| = 1$, т.е. $q_0^2 + |\tilde{q}|_{\mathbb{R}^3}^2 = 1$

$$\exists \varphi \in \mathbb{R} : \begin{cases} \cos^2 \varphi = q_0^2 \\ \sin^2 \varphi = |\tilde{q}|_{\mathbb{R}^3}^2 \end{cases}$$

$$\exists ! \varphi \in [0, \pi] : \begin{cases} \cos^2 \varphi = q_0^2 \\ \sin^2 \varphi = |\tilde{q}|_{\mathbb{R}^3}^2 \end{cases}$$

Очевидно, не любой кватернион так можно представить. Поэтому $\langle \tilde{u} = \frac{\tilde{q}}{|\tilde{q}|}$. Тогда:

$$q = q_0 + |\tilde{q}| \cdot \tilde{u} = \cos \varphi + \tilde{u} \sin \varphi$$

$$\mathcal{L}(v) \quad \mathcal{L} : \mathbb{K} \times \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{K} \quad \mathcal{L}_q(v) = q\tilde{v}q^*$$

Лемма 8. $\forall v \in \mathbb{R}^3 \quad |v| = |\mathcal{L}_q(v)|$ при $|q| = 1$

Доказательство. Фиксируем $v \in \mathbb{R}^3, q \in \mathbb{K}$ такой, что $\|q\| = 1$.

$$\|\mathcal{L}_q(v)\| = \|q\tilde{v}q^*\| = \|q\| \cdot \|\tilde{v}\| \cdot \|q^*\| = \|\tilde{v}\| = \|v\|_{\mathbb{R}^3}$$

□

Лемма 9. $\forall q \in \mathbb{K} : \|q\| = 1 \quad \forall \alpha \in \mathbb{R} \quad \mathcal{L}_q(\alpha p + s) = \alpha \mathcal{L}_q(p) + \mathcal{L}_q(s)$

Доказательство.

$$\mathcal{L}_q(\alpha p + s) = q(\alpha p + s)q^* = \alpha qpq^* + qsq^* = \alpha \mathcal{L}_q(p) + \mathcal{L}_q(s)$$

□

Лемма 10. $\forall \alpha \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \quad \forall q \in \mathbb{K} : \|q\| = 1 \quad |\alpha \tilde{q}| = |\mathcal{L}_q(\alpha \tilde{q})|$

Доказательство. С помощью расписывания определения через координаты:

$$\mathcal{L}_q(v) = (q_0^2 - |\tilde{q}|^2)v + 2\langle \tilde{q}, \tilde{v} \rangle \tilde{v} - 2q_0[\tilde{q} \times \tilde{v}] \quad (1)$$

$$\mathcal{L}_q(\alpha \tilde{q}) = \alpha \mathcal{L}_q(\tilde{q}) = \alpha((q_0^2 - |\tilde{q}|^2)\tilde{q} + 2\langle \tilde{q}, \tilde{q} \rangle \tilde{q} - 2q_0[\tilde{q} \times \tilde{q}]) = \alpha(q_0^2 + |\tilde{q}|^2)\tilde{q} = \alpha \tilde{q}$$

□

Теорема 4. $\langle q \in \mathbb{K} : |q| = 1$. Тогда q можно представить как $q = \cos \varphi + \tilde{u} \sin \varphi$. Кроме того, $\mathcal{L}_q(v) = q\tilde{v}q^* = q\tilde{v}q^{-1}$.

Тогда действие \mathcal{L}_q на \mathbb{R}^3 — поворот на угол 2φ относительно оси u .

Доказательство. Зафиксируем $v \in \mathbb{R}^3$. Разложим v как $v = \vec{a} + \vec{b}$, где $\vec{a} \parallel \vec{u}$, а $\vec{b} \perp \vec{u}$

$$\mathcal{L}_q(v) = \mathcal{L}_q(\vec{a} + \vec{b}) = \mathcal{L}_q(\vec{a}) + \mathcal{L}_q(\vec{b})$$

$$\mathcal{L}_q(\vec{a}) \stackrel{\exists K \in \mathbb{R}: a=k\tilde{q}}{=} \vec{a}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_q(\vec{b}) &= (q_0^2 - |\tilde{q}|^2)\vec{b} + 2\langle \vec{b}, \tilde{q} \rangle \tilde{q} - 2q_0[\vec{b} \times \tilde{q}] \\ &= (q_0^2 - |\tilde{q}|^2)\vec{b} - 2q_0[\vec{b} \times \tilde{q}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \vec{n} + 2 \cos \varphi \cdot \sin \varphi \underbrace{[\tilde{u} \times \vec{n}]}_{\vec{n}_\perp} \\
&= \cos 2\varphi \vec{n} + \sin 2\varphi \vec{n}_\perp \\
|\vec{n}_\perp| &= |[\tilde{u} \times \vec{n}]| = |\tilde{u}| \cdot |\vec{n}| \cdot \sin \frac{\pi}{2} = |\vec{n}|
\end{aligned}$$

□

Теорема 5 (*). $\forall q \in \mathbb{K} : \|q\| = 1, q = \cos \frac{\varphi}{2} + \tilde{u} \sin \frac{\varphi}{2}$

\mathcal{L}_{q^*} — это поворот либо вектора на угол $-\varphi$, либо координатной сетки на угол φ .

Доказательство. Т.к. $\|q\| = 1, q^* = q^{-1}$.

$$\mathcal{L}_{q^{-1}}(\mathcal{L}_q(v)) = q^{-1}(qvq^{-1})q = eve = v$$

□

Теорема 6. $\forall p, q \in \mathbb{K} : \|p\| = \|q\| = 1$. Тогда $\mathcal{L}_q \circ \mathcal{L}_p = \mathcal{L}_{q \cdot p}$.

Доказательство. Фиксируем $p, q \in \mathbb{K}, v \in \mathbb{R}^3$.

$$\mathcal{L}_q(\mathcal{L}_p(v)) = q(pvp^*)q^* = qp v (qp)^* = \mathcal{L}_{q \cdot p}(v)$$

□

$$q = q_0 + \tilde{q} = \cos \frac{\varphi}{2} + \tilde{u} \sin \frac{\varphi}{2}$$

Подставим в (1):

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_q(v) &= \left(\cos^2 \frac{\varphi}{2} - \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right) \tilde{v} + 2 \sin \frac{\varphi}{2} \langle \tilde{u}, \tilde{v} \rangle \cdot \tilde{u} - 2 \cos^2 \frac{\varphi}{2} [\tilde{u} \times \tilde{v}] \\
&= \cos \varphi \tilde{v} + (1 - \cos \varphi) \langle \tilde{u}, \tilde{v} \rangle \tilde{u} - \sin \varphi [\tilde{u} \times \tilde{v}]
\end{aligned}$$

Пример. $\forall u = \frac{1}{\sqrt{3}}(1, 1, 1)$, поворот на $\frac{2\pi}{3}$.

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_q((1, 0, 0)) &= \cos \frac{2\pi}{3} \cdot i + \left(1 - \cos \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \langle (1, 1, 1), (1, 0, 0) \rangle \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} (i + j + k) \\
&\quad - \sin \frac{2\pi}{3} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (i + j + k) \times i \right] \\
&= \frac{i}{2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{i + j + k}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} i & j & k \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \\
&= -\frac{i}{2} + \frac{i + j + k}{2} + \frac{j - k}{2} = \frac{2j}{2} = j
\end{aligned}$$

Лекция 6

9 апреля

2.1 Напоминание о кватернионах

Кватернионы записываются как:

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k \stackrel{\text{def}}{=} q_0 + \tilde{q}$$

\cdot	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	$-j$
j	j	$-k$	-1	i
k	k	j	$-i$	-1

Таблица 6.1: Таблица Кэли для кватернионов

Пространство кватернионов есть прямое произведение действительных чисел и чистых кватернионов:

$$\mathbb{K} = \mathbb{R} \oplus \underbrace{\mathbb{P}_E}_{\cong \mathbb{R}^3}$$

$\langle \cdot, \cdot \rangle$	i	j	k
i	1	0	0
k	0	1	0
j	0	0	1

Таблица 6.2: Скалярное произведение кватернионов

Пусть $q \in \mathbb{K}$, $\vec{v} \in \{0\} \oplus \mathbb{P}_E$. $\llcorner \mathcal{L}_q(v) = qvq^{-1}$.

$$|q| := \sqrt{\|q\|}, \|q\| := qq^*, q^{-1} := \frac{q^*}{\|q\|}$$

Если $|q| = 1$, то $q = \cos \frac{\varphi}{2} + \tilde{u} \sin \frac{\varphi}{2}$, где $\tilde{u} = \frac{\tilde{q}}{|\tilde{q}|}$. В этом случае qvq^{-1} есть поворот на угол φ .

3 Кватернионы и $SU(2)$

Рассмотрим матрицы $A \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$, которым соответствуют операторы $\hat{A} : \mathbb{C}^2 \rightarrow \mathbb{C}^2$.

Тогда $AA^* = E$, где A^* — **эрмитово сопряжение**, т.е. транспонируем матрицу и каждый элемент комплексно сопрягаем.

Т.к. $\det(AB) = \det A \cdot \det B$, следовательно $1 = \det E = \det(AA^*) = \det A \cdot \det A^* \implies \det A = \frac{1}{\det A^*}$. Кроме того, $\det A = \det A^T$ и $\prod_i a_i^* = (\prod_i a_i)^*$ и $\sum_i b_i^* = (\sum_i b_i)^*$ и тогда:

$$\sum_j \prod_i a_{ij}^k = \sum_j \left(\prod_i a_{ij} \right)^* = \left(\sum_j \prod_i a_{ij}^* \right)$$

И следовательно $\det A^* = (\det A)^*$

Определение. $SU(2)$ — группа A таких, что $AA^* = E$ и $\det A = 1$

$$\langle A \in SU(2), A = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix}.$$

$$\det A = 1 \implies \alpha\delta - \beta\gamma = 1$$

Тогда:

$$\begin{cases} E_{11} = \alpha\bar{\alpha} + \beta\bar{\beta} = 1 \\ E_{12} = \alpha\bar{\gamma} + \beta\bar{\delta} = 0 \\ E_{21} = \gamma\bar{\alpha} + \delta\bar{\beta} = 0 \\ E_{22} = \gamma\bar{\gamma} + \delta\bar{\delta} = 1 \end{cases}$$

Из условий для E_{11} и E_{22} :

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \implies \begin{cases} \alpha = e^{i\varphi_1} \cos \theta \\ \beta = e^{i\varphi_2} \sin \theta \end{cases}$$

$$|\gamma|^2 + |\delta|^2 = 1 \implies \begin{cases} \gamma = e^{i\psi_1} \cos \chi \\ \delta = e^{i\psi_2} \sin \chi \end{cases}$$

Из E_{12} и E_{21} :

$$\begin{aligned} e^{i\varphi_1} \cos \theta e^{-i\psi_1} \cos \chi + e^{i\varphi_2} \sin \theta e^{-i\psi_2} \sin \chi &= 0 \\ e^{i(\varphi_1 - \psi_1)} \cos \theta \cos \chi + e^{i(\varphi_2 - \psi_2)} \sin \theta \sin \chi &= 0 \end{aligned}$$

$$2 \cos(\varphi_1 - \psi_1) \cos \theta \cos \chi + 2i \sin(\varphi_2 - \chi_2) \sin \theta \sin \chi = 0$$

$$\begin{cases} \cos(\varphi_1 - \psi_1) \cos \theta \cos \chi = 0 \\ \sin(\varphi_2 - \psi_2) \sin \theta \sin \chi = 0 \end{cases}$$

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} \delta & -\beta \\ -\gamma & \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\alpha} & \bar{\gamma} \\ \bar{\beta} & \bar{\delta} \end{pmatrix} \implies \delta = \bar{\alpha}, \gamma = -\bar{\beta}$$

Пусть $\alpha = a + ic$, $\beta = b + id$, где $a, b, c, d \in \mathbb{R}$.

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} a + ic & b + id \\ -b + id & a - ic \end{pmatrix} \\ &= a \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} ic & b + id \\ -b + id & -ic \end{pmatrix} \\ &= a \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\Xi_0} + b \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}}_{\Xi_1} + c \underbrace{\begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}}_{\Xi_2} + d \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix}}_{\Xi_3} \end{aligned}$$

\cdot	Ξ_0	Ξ_1	Ξ_2	Ξ_3
Ξ_0	Ξ_0	Ξ_1	Ξ_2	Ξ_3
Ξ_1	Ξ_1	$-\Xi_0$	Ξ_3	$-\Xi_2$
Ξ_2	Ξ_2	$-\Xi_3$	$-\Xi_0$	Ξ_1
Ξ_3	Ξ_3	Ξ_2	$-\Xi_1$	$-\Xi_0$

Таблица 6.3: Таблица Кэли для матриц Ξ_i

Таким образом, у нас есть соответствие $SU(2)$ и \mathbb{K} : $\Xi_0 \Leftrightarrow 1, \Xi_1 \Leftrightarrow i, \Xi_2 \Leftrightarrow j, \Xi_3 \Leftrightarrow k$. Но это не изоморфизм — ограничение на $\det A = 1$ не позволяет любому кватерниону сопоставить элемент $SU(2)$. Найдем, чему $SU(2)$ изоморфно.

Определение. Множество **нормированных кватернионов** $\mathbb{N}\mathbb{K} = \{|q| = 1 \mid q \in \mathbb{K}\}$

Определение. $\mathbb{N}\mathbb{K}$ — подгруппа (по умножению) \mathbb{K}

$$S^3 \sim \mathbb{N}\mathbb{K} \subset \mathbb{K}$$

Здесь и далее $\overset{G}{\cong}$ обозначает групповой изоморфизм.

$$\mathbb{N}\mathbb{K} \overset{G}{\cong} SU(2) \quad \{0\} \oplus \mathbb{P}_E \overset{G}{\cong} SO(3)$$

Резюмируя: мы взяли подгруппу кватернионов $\mathbb{N}\mathbb{K}$ и построили изоморфизм между этой подгруппой и $SU(2)$. На прошлом занятии мы построили изоморфизм между группой вращений $SO(3)$ и $\{0\} \oplus \mathbb{P}_E$. Эти изоморфизмы по умножению. Также есть изоморфизм по сложению между \mathbb{P}_E и \mathbb{R}^3

4 $SU(2)$ и $SO(3)$

Любое вращение трёхмерного пространства можно рассматривать как переход произвольной точки сферы в другую произвольную точку сферы. Спроектируем сферу на плоскость, которую будем считать \mathbb{C} с осями ξ и η . Оси сферы - x, y, z .

Упражнение читателю — показать, что:

$$\xi = \frac{x}{\frac{1}{2} - z} \quad \eta = \frac{y}{\frac{1}{2} - z}$$

Тогда введём комплексное число $\zeta = \xi + i\eta$. Не более сложно заметить, что:

$$\zeta = \frac{\frac{1}{2} + z}{x - iy}$$

, что следует из $x^2 + y^2 + z^2 = 1$

Нам надо научиться вращать вокруг оси z и x , тогда композицией этих двух действий мы сможем получить любое вращение.

Вращение вокруг оси z , т.е. в комплексной плоскости тривиально:

$$\zeta' = e^{i\theta} \zeta$$

Поворот вокруг оси x на угол χ (без доказательства):

$$\zeta'' = \frac{\zeta \cos \frac{\chi}{2} + i \sin \frac{\chi}{2}}{i \zeta \sin \frac{\chi}{2} + \cos \frac{\chi}{2}}$$

Тогда композиция этих преобразований имеет вид:

$$A = \frac{a\xi + b}{c\xi + d}$$

Будем кодировать вращения как вектора \vec{K} , где направление определяет ось, относительно которой происходит вращение, и модуль определяет угол поворота ($|K| \leq \pi$).

Тогда мы можем рассмотреть многообразие таких векторов. В нём отождествлены противоположные точки. Есть проблема: оно связно, но оно не односвязно, т.е. у него нетривиальна фундаментальная группа. По теореме каждое многообразие можно достроить до односвязного, такое многообразие называется **накрытием**. Для $SO(3)$ такое многообразие это $SU(2)$.

Пример. Рассмотрим накрытие для окружности. Т.к. единственное другое многообразие с размерностью 1 это прямая, то будем строить накрытие из прямой. С помощью преобразования e^{it} будем накручивать прямую на окружность. Если в какой-либо точке прекратить накручивать, то точка конца помешает. Число слоев в накрытии, соответствующих одной точке, называется **кратностью накрытия**. Кратность накрытия окружности — ∞ .

Кратность накрытия для $SO(3)$ — 2.

Лекция 7

16 апреля

5 Алгебраические топологические тела

Что общего у поля вещественных чисел, поля комплексных чисел и тела кватернионов? Разумеется, много чего, но нас интересует тот факт, что они являются евклидовыми пространствами. Для удобства будем обозначать $\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{K}$ как K .

Определение. Элементы последовательности $a_1, a_2 \dots a_n \dots$, где $a_i \in K$, **сходятся** к $a \in K$, если $\rho(a_n, a) \rightarrow 0$. Тогда обозначаем $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$.

Определение. Если на теле введено понятие сходимости, то такое тело называется **топологическим**.

На топологическом теле операции непрерывны, т.е. если $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$, то:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n + b_n = a + b \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a_n b_n = ab$$

Из этих двух равенств также следует непрерывность вычитания и умножения, т.к. $\lim_{n \rightarrow \infty} -a_n = -a$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n^{-1} = a^{-1}$.

Определение. Топологическое тело с операциями $+, \cdot, -, ^{-1}$ называется **алгебраически-топологическим**.

Норма для K :

1. $\mathbb{R} : \|r\| = \sqrt{r \cdot r}$
2. $\mathbb{C} : \|z\| = \sqrt{z \cdot z^*}$
3. $\mathbb{K} : \|q\| = \sqrt{q \cdot q^*}$

Тогда метрика на K это $\rho(z_1, z_2) = \|z_1 - z_2\|$.

Определение. Топология на K это $\tau \subset 2^K$ такое, что:

1. $\{0\}, K \in \tau$
2. $\bigcup_i T_i \in \tau$
3. $\bigcap_{\text{кон.}} T_i \in \tau$

Элементы τ называются **открытыми**.

Пример.

$$T_0 := \{z \in K \mid \|z - z_p\| < B\}, B \in \mathbb{R}_+$$

О непрерывности некоторого отображения $f : A \rightarrow B$ можно говорить только если $A, B \in \text{Top}$ ¹

Обозначение. Для тела L и $X, Y \subset L$:

- $X + Y := \{x + y \mid x \in X, y \in Y\}$
- $X - Y := \{x - y \mid x \in X, y \in Y\}$
- $XY := \{xy \mid x \in X, y \in Y\}$
- $XY^{-1} := \{xy^{-1} \mid x \in X, y \in Y\}$

Определение. Последовательность $U_1, U_2 \dots U_n \dots$, где $U_n \subset L$ и $0 \in U_{n+1} \subset U_n$ называется **системой окрестностей нуля топологического тела L** , если $\forall n \in \mathbb{N} \exists p :$

1. $(U_p + U_p) \subset U_n$
2. $U_p U_p \subset U_n$
3. $-U_p \subset U_n$
4. $(e + U_p)^{-1} \subset e + U_n$, где e — единица тела L .
5. $\forall a \in L \quad aU_p \subset U_n, U_p a \subset U_n$

Определение. Последовательность $a_1, a_2 \dots a_n \dots$, где $\forall i \quad a_i \in L$, сходится к $a \in L$, если:

$$\forall n \exists r \forall p > n \quad (a_p - a) \in U_n$$

Теорема 7. Если на теле² L определена сходимост и $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a, \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$, то:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n + b_n = a + b$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \cdot b_n = a \cdot b$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} -a_n = -a$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n^{-1} = a^{-1}$$

¹ Категория топологических пространств

² Не обязательно топологическом

Доказательство. По условию теоремы $\exists p_1 : a_{p_1} \in a + U_n, \exists p_2 : b_{p_2} \in b + U_n$. Пусть $p = \max(p_1, p_2)$.³

$$a_p + b_p \in a + b + U_n + U_n$$

По определению системы окрестностей нуля:

$$\exists p_3 : U_{p_3} + U_{p_3} \subset U_n$$

$$(a_p + b_p) - (a + b) \in U_n$$

Аналогично остальные пункты.

□

³ На лекции этого не было, но мне кажется это необходимым.

Лекция 8

23 апреля

6 Топологические группы

6.1 Топология

Определение. Топология на множестве M — система подмножеств $\tau \subset 2^M$, $\tau = \{A_i\}_{i \in I}$, для которой выполнены **аксиомы топологии**:

1. $M, \emptyset \in \tau$
2. $\bigcup_i A_i \in \tau$
3. $\bigcap_i^{\text{кон.}} A_i \in \tau$

$T = (M, \tau)$ называется **топологическим пространством**.

Примечание. Множества A_i называются **открытыми**.

Пример.

- Дискретная топология τ_d — все подмножества открыты.
- Стандартная топология на прямой τ_s — топология открытых интервалов.
- Топология Зарисского на прямой τ_z — открытые множества суть открытые интервалы, из которых выкинуто конечно или счётное число точек.
- Топология окружности τ_c
- Антидискретная топология τ_a — открыто только M и \emptyset

Определение. **Окрестность** точки P — всякое открытое множество, содержащее точку P .

Рассмотрим произвольное $S \subset M$. Мы можем классифицировать точку P относительно S :

1. Внутренняя точка — $\exists O_P : O_P \subset S$
2. Внешняя точка — $\exists O_P : O_P \cap S = \emptyset$
3. Граничная точка — $\forall O_P : O_P \cap S \neq \emptyset, O_P \cap \bar{S} \neq \emptyset$

Определение. Множество внутренних точек $\text{Int}(S)$ ¹ — **открытое ядро** S .
 ∂S — **граница** S .

$$S = \langle S \rangle \cup \langle M \setminus S \rangle \cup \partial S$$

Примечание. $\partial \langle S \rangle = \emptyset$

Рассмотрим отображение $\sigma : M_1 \rightarrow M_2$, где $2^{M_1} = \{A_i\}$, $2^{M_2} = \{B_j\}$

$$\begin{aligned} \sigma(A_i \cup A_k) &= \sigma(A_i) \cup \sigma(A_k) & \sigma(A_i \cap A_k) &\neq \sigma(A_i) \cap \sigma(A_k) \\ \sigma^{-1}(B_j \cup B_l) &= \sigma^{-1}(B_j) \cup \sigma^{-1}(B_l) & \sigma^{-1}(B_j \cap B_l) &= \sigma^{-1}(B_j) \cap \sigma^{-1}(B_l) \end{aligned}$$

Определение. Рассмотрим топологические пространства $T_1 = (M_1, \tau_1)$ и $T_2 = (M_2, \tau_2)$. Тогда $\sigma^{-1}(\tau_2)$ — топология на M_1 . Но на M_1 уже есть топология τ_1 . Если τ_1 сильнее, чем $\sigma^{-1}(\tau_2)$, то σ называется **непрерывным** отображением.

Определение. Отображение называется непрерывным в точке $P \in M$, если:

$$\forall O_{\sigma(P)} \exists O_P : \sigma(O_P) \subset O_{\sigma(P)}$$

Определение. σ непрерывно, если прообраз всякого открытого множества открыт:

$$\forall B \in \tau_2 \quad \sigma^{-1}(B) \in \tau_1$$

Эти определения эквивалентны.

Определение. **Предельная точка** последовательности — точка, в любой окрестности которой содержатся все элементы последовательности, начиная с некоторого номера.

Определение. **Точка прикосновения** множества — точка, в каждой окрестности которой находится хотя бы одна точка из множества.

Точка прикосновения — не всегда предельная точка и наоборот. Эти понятия совпадают, если выполнены **аксиомы счётности**:

1. У каждой точки есть счётная система определяющих окрестностей, т.е. любое открытое множество, содержащее эту точку, лежит в такой окрестности.
2. База топологии счётна.

¹ Также обозначается $\langle S \rangle$

Аксиомы отделимости:

1. Для любых двух точек p и q существуют окрестности O_p и O_q такие, что $q \notin O_p$, $p \notin O_q$.
2. У любых двух точек есть непересекающиеся окрестности.

Примечание. Из 2 следует 1, но не наоборот. Контрпример — τ_z .

3. Для любого замкнутого множества и точки, не лежащей в нём, существуют непересекающиеся окрестности.
4. Для любых двух замкнутых непересекающихся множеств существуют непересекающиеся окрестности.

Лекция 9

30 апреля

6.2 Топологические группы

Определение. Топологическая группа — множество G такое, что:

1. G — группа с операцией μ , отображением обратного элемента inv и единицей e .
2. G — топологическое пространство с топологией τ .
3. Операции μ, inv непрерывны в топологии τ .

Примечание. Отображение топологических пространств $f : T_1 \rightarrow T_2$ непрерывно, если:

$$\forall W \subset T_2 - \text{откр.} \exists V \subset T_1 - \text{откр.} f(V) \subset W$$

Примечание. Здесь и далее W_t, U_t, V_t обозначает открытую окрестность точки t .

Непрерывность μ :

$$x, y \in G, W = W_{\mu(x,y)} \implies \exists U = U_x, V = V_y : UV \subset W$$

Непрерывность inv :

$$x \in G, W = W_{\text{inv}(x)} \implies \exists U = U_x : U^{-1} \subset W$$

$$x, y \in G, W = W_{\mu(x, \text{inv}(y))} \implies \exists U = U_x, V = V_y : UV^{-1} \subset W$$

Пример. \mathbb{R}^2 со операцией сложения и окрестностью $O_v, v \in \mathbb{R}^2$:

$$O_v := \{u \in \mathbb{R}^2 \mid \|u - v\| < \alpha, \alpha \in \mathbb{R}_+\}$$

Пример. Группа $U(1)$ — группа поворотов окружности:

$$U(1) := \{z \mid |z| = 1\}$$

Пример. Группа всех матриц $GL(n)$.

Норма порождена скалярным произведением $\langle A, B \rangle = \text{tr } A^T B$.

Свойства.

1. $\langle \{x_i\}_{i=1}^n$ — совокупность элементов G , $\{V_i\}$ — их окрестности.
 $\langle y = x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_n^{m_n}$ и W — окрестность y . Тогда $V_1^{m_1} V_2^{m_2} \dots V_n^{m_n} \subset W$

Доказательство. По индукции. □

2. $\langle f_a, f'_b, \varphi : G \rightarrow G, f_a(x) = xa, f'_b(x) = bx, \varphi(x) = \text{inv}(x)$. Это гомеоморфизмы.

Доказательство. f_a — биекция по свойствам группы.

Непрерывность: пусть $f_a(x) = xa = y$. $\langle W = W_y$, тогда $\exists U = U_x, V = V_a : UV \subset W \implies Ua \subset W \implies f_a(U) \subset W$ □

3. $\langle P$ — подмножество G , F — замкнутое в G , U — открытое в G . Тогда $\forall a \in G$ aF, Fa, F^{-1} замкнутые и UP, PU, U^{-1} открыты.

Доказательство. $Fa = f_a(F)$, но f_a гомеоморфизм.

$UP = \bigcup_{x \in P} \underbrace{Ux}_{\text{откр.}}$ и объединение открытых множеств открыто. □

4. Однородность: $\forall p, q \in G \exists f \in \text{homo}(G) : f(p) = q$

Это значит, что топологические свойства группы однозначно определяются её свойствами в окрестности какой-либо точки.

5. Регулярность: $\langle x \in G, S \subset G$ — замкнутое, $x \notin S \implies \exists O_x, O_S : O_x \cap O_S = \{\emptyset\}$

Доказательство. Пусть e — нейтральный элемент группы G , $V = V_e$.

$$e^{-1}e = e \implies \exists U = U_e : U^{-1}U \subset V$$

Покажем, что $\overline{U} \subset V$.

$$\langle x \in \overline{U} \implies \exists O_x : O_x \cap U \neq \emptyset$$

xU содержит точку x , т.к. $e \in U$, следовательно $\exists b \in U : xb = a \in U, x = ab^{-1} \in UU^{-1} \subset V \implies \overline{U} \subset V$ □

6. Пусть H — топологическая подгруппа G . Тогда:

(a) gH открыто.

(b) H замкнуто и H — компонента связности.

Теорема 8. Пусть G — связная топологическая группа, т.е. у нее нет подгрупп. Пусть e — нейтральный элемент G , $U = U_e$.

Тогда U индуцирует все G .

Доказательство. $\langle V = U \cap \text{inv}(U) \rangle$. Тогда $V^{-1} = V$.

$\langle V_1 \subset V_2 \subset \dots \subset V_n \subset \dots \subset V_\infty$, где $V_i = V_{i-1}V$, а $V_1 = V$.

По определению $V_i = \bigcup_{p \in V} V_{i-1}p$ и объединение открытых открыто. Тогда по индукции V_∞ открыто, но при этом оно содержит все элементы группы, т.е. замкнуто. Таким образом, V_∞ открыто и замкнуто, т.е. является компонентой связности, и т.к. G связна, $V_\infty = G$. \square