

Рівневий набір гармонійних функцій

А. В. Тор

Для $\theta \in [0, \pi/2[$, розглянемо множини

$$\begin{aligned}\Sigma_{1,\theta} &= \{a \in \mathbb{C} \setminus]-\infty, -1] : \Re \left(\int_{[1,a]} e^{i\theta} \sqrt{p_a(z)} dz \right) = 0\}; \\ \Sigma_{-1,\theta} &= \left\{ a \in \mathbb{C} \setminus \left[1, +\infty \right[: \Re \left(\int_{[-1,a]} e^{i\theta} \sqrt{p_a(z)} dz \right) = 0 \right\}; \\ \Sigma_\theta &= \left\{ a \in \mathbb{C} \setminus [-1, 1] : \Re \left(\int_{[-1,1]} e^{i\theta} \sqrt{p_a(z)} dz \right) = 0 \right\};\end{aligned}$$

де $p_a(z)$ - комплексний многочлен, визначений формулою

$$p_a(z) = (z - a)(z^2 - 1).$$

Лемма 1. Нехай $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}[$. Тоді кожна з множин $\Sigma_{1,\theta}$ та $\Sigma_{-1,\theta}$ утворюється двома гладкими кривими, які локально ортогональні відповідно при $z = 1$ та $z = -1$. Точніше:

$$\begin{aligned}\lim_{\substack{a \rightarrow -1-1 \\ a \in \Sigma_{-1}}} \arg(a+1) &= \frac{-2\theta + (2k+1)\pi}{4}, \quad k = 0, 1, 2, 3; \\ \lim_{\substack{a \rightarrow +1 \\ a \in \Sigma_{1,\theta}}} \arg(a-1) &= \frac{-\theta + k\pi}{2}, \quad k = 0, 1, 2, 3.\end{aligned}$$

Дві криві, що визначають $\Sigma_{1,\theta}$ (відповідно $\Sigma_{-1,\theta}$), перетинаються

лише при $z = 1$ (відповідно $z = -1$). Більше того, для $\theta \notin \{0, \frac{\pi}{2}\}$, вони розходяться по-різному до ∞ в одному з напрямків

$$\lim_{\substack{|a| \rightarrow +\infty \\ a \in \Sigma_{\pm 1, \theta}}} \arg a = \frac{-2\theta + 2k\pi}{5}, \quad k = 0, 1, 2, 3, 4$$

Для $\theta = 0$, (відповідно $\theta = \frac{\pi}{2}$), один промінь $\Sigma_{1, \theta}$ (відповідно $\Sigma_{-1, \theta}$) розходиться до $z = -1$ (відповідно $z = 1$).

Доведення. Нехай задано непостійну гармонічну функцію u , визначену в деякій області \mathcal{D} of \mathbb{C} . Критичними точками u є саме ті, де

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - i \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0$$

Вони ізольовані. Якщо v є гармонічним спряженням u у \mathcal{D} , скажімо, $f(z) = u(z) + iv(z)$ аналітична у \mathcal{D} , тоді за Коші-Ріманом,

$$f'(z) = 0 \iff u'(z) = 0$$

Встановлений рівень

$$\Sigma_{z_0} = \{z \in \mathcal{D} : u(z) = u(z_0)\}$$

u через точку $z_0 \in \mathcal{D}$ залежить від поведінки f поблизу z_0 . Точніше, якщо z_0 є критичною точкою u , ($u'(z_0) = 0$), то існує околиця \mathcal{U} околу z_0 , голоморфної функції $g(z)$ визначена на \mathcal{U} , така, що

$$\forall z \in \mathcal{U}, f(z) = (z - z_0)^m g(z); g(z) \neq 0$$

Взявши гілку m -го кореня з $g(z)$, f має локальну структуру

$$f(z) = (h(z))^m, \forall z \in \mathcal{U}.$$

Звідси випливає, що Σ_{z_0} локально утворена m аналітичними дугами які проходять через z_0 і перетинаються там під рівними кутами π/m . Через регулярну точку $z_0 \in \mathcal{D}$, ($u'(z_0) \neq 0$), теорема про неявну функцію стверджує, що Σ_{z_0} є локально єдиною аналітичною дугою. Зауважте, що множина рівнів гармонічної функції не може закінчуватися у звичайній точці.

Розглянемо багатозначну функцію

$$f_{1,\theta}(a) = \int_1^a e^{i\theta} \sqrt{p_a(t)} dt, a \in \mathbb{C}$$

Інтегруючи вздовж відрізка $[1, a]$, можна припустити, що без втрати загальності, що

$$f_{1,\theta}(a) = ie^{i\theta}(a-1)^2 \int_0^1 \sqrt{t(1-t)} \sqrt{t(a-1)+2} dt = (a-1)^2 g(a) \quad (1)$$

$$g(1) \neq 0$$

Очевидно, що:

$$\forall a \in \mathbb{C} \setminus]-\infty, -1], \{t(a-1) + 2; t \in [0, 1]\} = [2, a+1] \subset \mathbb{C} \setminus]-\infty, 0].$$

Отже, при фіксованому виборі аргументу та квадратного кореня всередині інтеграла, $f_{1,\theta}$ та $g \in$ однозначними аналітичними функціями в $\mathbb{C} \setminus]-\infty, -1]$.

Припустимо, що для деяких $a \in \mathbb{C} \setminus]-\infty, -1], a \neq 1$,

$$u(a) = \Re f_{1,\theta}(a) = 0; f'_{1,\theta}(a) = 0$$

Тоді,

$$(a-1)^3 g'(a) + 2f_{1,\theta}(a) = 0.$$

Беручи справжні деталі, ми отримуємо

$$\begin{aligned} 0 &= \int_0^1 \sqrt{t(1-t)} \Im \left(e^{i\theta} (a-1)^2 \sqrt{t(a-1)+2} \right) dt \\ 0 &= \Re \left((a-1)^3 g'(a) \right) = \int_0^1 t \sqrt{t(1-t)} \Im \left(\frac{e^{i\theta} (a-1)^3}{2\sqrt{t(a-1)+2}} \right) dt. \end{aligned}$$

За неперервністю функцій всередині цих інтегралів на відрізьку $[0, 1]$, існують $t_1, t_2 \in [0, 1]$ такі що

$$\Im \left(e^{i\theta} (a-1)^2 \sqrt{t_1(a-1)+2} \right) = \Im \left(\frac{e^{i\theta} (a-1)^3}{2\sqrt{t_2(a-1)+2}} \right) = 0;$$

а потім

$$e^{2i\theta} (a-1)^4 (t_1(a-1)+2) > 0, \left(\frac{e^{2i\theta} (a-1)^6}{t_2(a-1)+2} \right) > 0.$$

Взявши їх співвідношення, отримуємо

$$\frac{(t_1(a-1)+2)(t_2(a-1)+2)}{(a-1)^2} > 0.$$

яка не може виконуватись, оскільки, якщо $\Im a > 0$, то

$$\begin{aligned} 0 &< \arg(t_1(a-1)+2) + \arg((t_2(a-1)+2)) \\ &< 2 \arg(a+1) < \arg((a-1)^2) < 2\pi. \end{aligned}$$

Випадок $\Im(a) < 0$ є аналогічним, тоді як випадок $a \in \mathbb{R}$ можна легко відкинути. Таким чином, $a = 1$ є єдиною критичною точкою $\Re f_{1,\theta}$. Since $f''_{1,\theta}(1) = 2g(1) \neq 0$, виводимо локальну поведінку $\Sigma_{1,\theta}$ поблизу $a = 1$.

Припустимо, що для деяких $\theta \in]0, \frac{\pi}{2}[$, промінь $\Sigma_{\pm 1,\theta}$ розходиться до певного моменту в $] -\infty, -1[$; або приклад,

$$(\overline{\Sigma_{1,\theta}} \setminus \Sigma_{1,\theta}) \cap \{z \in \overline{\mathbb{C}} : \Im z \geq 0\} = \{x_\theta\}$$

Нехай $\epsilon > 0$ так, що $0 < \theta - 2\epsilon$. Для $a \in \mathbb{C}$ задовольняє $\pi - \epsilon < \arg a <$

π , $0 < \theta - 2\epsilon < \theta + 2 \arg a + \arg \int_0^1 \sqrt{t(1-t)} \sqrt{t(a-1)+2} dt < \frac{\pi}{2} + \theta - \frac{\epsilon}{2} < \pi$, що суперечить (1). Інші випадки подібні. Таким чином, будь-який промінь з $\Sigma_{\pm 1, \theta}$ повинен розходитись на ∞ . Випадок $\theta = 0$ є простішим.

Якщо $a \rightarrow \infty$, тоді $|f_{1, \theta}(a)| \rightarrow +\infty$; since $\Re f_{1, \theta}(a) = 0$, we have $|\Im f_{1, \theta}(a)| \rightarrow +\infty$. Звідси випливає, що

$$\arg(f(a)) \sim \arg\left(\frac{4}{15} e^{i\theta} a^{5/2}\right) \rightarrow \frac{\pi}{2} + k\pi, k \in \mathbb{Z} \text{ as } a \rightarrow \infty$$

Ми отримуємо поведінку будь-якої дуги $\Sigma_{1, \theta}$, яка розходитьсь до ∞ . Зокрема, з принципу максимуму модуля, два промені з Σ_{θ} не можуть розходитись у ∞ . $\Sigma_{1, \theta}$ не можуть розходитись до ∞ в одному напрямку.

Якщо $\Sigma_{1, \theta}$ містить регулярну точку z_0 (наприклад, $\Im z_0 > 0$), яка не належить дугам $\Sigma_{1, \theta}$, що виходять з точки $a = 1$. Два промені кривої набору рівнів γ , що проходять через z_0 розходяться до ∞ у двох різних напрямках. Звідси випливає, що γ має проходити через $z_1 = 1 + iy$, для деяких $y > 0$, або $z_1 = y$, для деяких $y > 1$. Легко перевірити, що в обох випадках, для будь-якого вибору аргументу,

$$\Re \int_1^{z_1} \left(e^{i\theta} \sqrt{p_{z_1}(t)} dt \right) \neq 0$$

і отримуємо протиріччя. Таким чином, $\Sigma_{1, \theta}$ утворюється лише двома двома кривими, що проходять через $a = 1$. Таку саму ідею дає структура $\Sigma_{-1, \theta}$; навіть більше, з співвідношення

$$\Re f_{\pm 1, \theta}(a) = 0 \iff \Re f_{\pm 1, \frac{\pi}{2} - \theta}(-\bar{a}) = 0 \quad (2)$$

доступних для довільного $\theta \in [\pi/4, \pi/2[$, можна легко побачити що $\Sigma_{-1, \frac{\pi}{2} - \theta}$ і $\Sigma_{1, \theta}$ симетричні відносно уявної осі (2). Це приводить нас до того, щоб обмежити наше дослідження випадком.