

FOURIEROVA TRANSFORMACE

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

FOURIEROVA VĚTA

V kapitole o Fourierových řadách byla dokázána Fourierova věta (připomeňte si, že $\widehat{f}(x) = (f(x_+) + f(x_-))/2$):

VĚTA. Necht' f je po částech hladká na \mathbb{R} a $\int_{\mathbb{R}} |f|$ konverguje. Potom

$$\widehat{f}(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \cos(u(x-v)) \, dv \, du.$$

Výsledek je možné nyní přeformulovat s použitím komplexních funkcí. Fourierova řada

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos(\pi n x / l) + b_n \sin(\pi n x / l) \right)$$

lze přepsat do tvaru

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{i\pi n x / l}, \text{ kde } c_n = \frac{a_n - i b_n}{2} \text{ pro } n \geq 0, c_n = \frac{a_{-n} + i b_{-n}}{2} \text{ pro } n < 0.$$

Odtud snadno vyplývá, že pro všechna celá n je

$$c_n = \frac{1}{2l} \int_{-l}^l f(x) e^{-i\pi n x / l} \, dx.$$

Pokud znovu provedete postup, který vede k rovnosti ve Fourierově větě, a použijete předchozí modifikovaný zápis Fourierových řad, dostanete Fourierovu větu v následujícím tvaru:

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace
kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace
posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin
komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace
inverzní Laplaceova transformace
inverze a rezidua
Aplikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

VĚTA. Necht' f je po částech hladká na \mathbb{R} a $\int_{\mathbb{R}} |f|$ konverguje. Potom

$$\widehat{f}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(u) e^{-ivu} du \right) e^{ivx} dv.$$

Na základě této věty se definuje Fourierova transformace:

DEFINICE. Pro reálné funkce f a F definované na \mathbb{R} se definuje

$$\mathcal{F}(f)(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-ist} dt, \quad \mathcal{F}_{-1}(F)(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(s) e^{its} ds.$$

Funkce $\mathcal{F}(f)$ se nazývá **Fourierova transformace** funkce f , funkce $\mathcal{F}_{-1}(F)$ se nazývá **inverzní Fourierova transformace** funkce F .

Fourierovu větu lze nyní formulovat ve tvaru:

Necht' φ je po částech hladká na \mathbb{R} a $\int_{\mathbb{R}} |\varphi|$ konverguje. Potom

$$\mathcal{F}(\mathcal{F}_{-1}(\varphi)) = \mathcal{F}_{-1}(\mathcal{F}(\varphi)) = \widehat{\varphi}.$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace
kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace
posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin
komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace
inverzní Laplaceova transformace
inverze a rezidua
Aplikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Sinová a kosinová Fourierova transformace

Je-li funkce f nebo F sudá, lze Fourierovu transformaci vyjádřit jiným způsobem:

$$\mathcal{F}(f)(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) (\cos(st) - i \sin(st)) dt = 2 \int_0^{+\infty} f(t) \cos(st) dt ,$$

$$\mathcal{F}_{-1}(F)(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(s) (\cos(ts) + i \sin(ts)) ds = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} F(s) \cos(ts) ds .$$

Podobně lze vyjádřit Fourierovu transformaci liché funkce:

$$\mathcal{F}(f)(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) (\cos(st) - i \sin(st)) dt = 2i \int_0^{+\infty} f(t) \sin(st) dt ,$$

$$\mathcal{F}_{-1}(F)(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(s) (\cos(ts) + i \sin(ts)) ds = \frac{i}{\pi} \int_0^{+\infty} F(s) \sin(ts) ds .$$

Jedná se o podobnou situaci jako u Fourierových řad sudých nebo lichých funkcí: ve výsledku se vyskytovaly nenulové koeficienty jen u \cos , resp. u \sin .

Tzv. kosinová Fourierova řada funkce f byla Fourieriova řada funkce, která se rovnala f na $[0, \infty)$ a byla doplněna na sudou funkci na záporných číslech.

Podobně sinová Fourierova řada funkce f byla Fourieriova řada funkce, která se rovnala f na $(0, \infty)$ a byla doplněna na lichou funkci na záporných číslech.

Stejně lze postupovat u Fourierovy transformace.

Aby nebylo nutné si pamatovat dvě různé konstanty před integrály, změní se jedna konstanta na 1 a druhá na $2/\pi$:

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin

komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace
inverze a rezidua

Applikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

DEFINICE. Pro reálné funkce f a F definované na $(0, \infty)$ se definuje

$$\mathcal{F}^c(f)(s) = \int_0^{+\infty} f(t) \cos(st) dt, \quad \mathcal{F}_{-1}^c(F)(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} F(s) \cos(ts) ds.$$

Funkce $\mathcal{F}^c(f)$ se nazývá **kosinová Fourierova transformace** funkce f , funkce $\mathcal{F}_{-1}^c(F)$ se nazývá **inverzní kosinová Fourierova transformace** funkce F .

$$\mathcal{F}^s(f)(s) = \int_0^{+\infty} f(t) \sin(st) dt, \quad \mathcal{F}_{-1}^s(F)(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} F(s) \sin(ts) ds.$$

Funkce $\mathcal{F}^s(f)$ se nazývá **sinová Fourierova transformace** funkce f , funkce $\mathcal{F}_{-1}^s(F)$ se nazývá **inverzní sinová Fourierova transformace** funkce F .

Z Fourierovy věty se dostává:

VĚTA. Necht' φ je po částech hladká na $(0, \infty)$ a $\int_0^\infty |\varphi|$ konverguje. Potom

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^c(\mathcal{F}_{-1}^c(\varphi)) &= \mathcal{F}_{-1}^c(\mathcal{F}^c(\varphi)) = \widehat{\varphi}, \\ \mathcal{F}^s(\mathcal{F}_{-1}^s(\varphi)) &= \mathcal{F}_{-1}^s(\mathcal{F}^s(\varphi)) = \widehat{\varphi}. \end{aligned}$$

Poznámky 1 Příklady 1 1

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace
kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace
posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin
komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace
inverzní Laplaceova transformace
inverze a rezidua
Aplikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

VLASTNOSTI FOURIEROVY TRANSFORMACE

Následující vlastnosti jsou i s důkazy (kromě poslední vlastnosti o součinu a konvoluci) podobné těm z teorie Laplaceovy transformace.

V následujících vzorcích lze předpokládat, že uvedené funkce jsou po částech spojitě absolutně integrovatelné.

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Posunutí

Posunutí funkce f o a je funkce $f(t - a)$.

Fourierova transformace posunuté funkce a posunutá Fourierova transformace (oboje posunutí o a) se spočítá snadno:

$$\mathcal{F}(f(t - a))(s) = e^{-ias} \mathcal{F}(f(t))(s)$$

$$\mathcal{F}(f(t))(s - a) = \mathcal{F}(e^{iat} f(t))(s).$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Zvětšení

Zvětšením (nebo zmenšením) funkce f se míní funkce $f(at)$ pro $a \neq 0$. Následující výpočty jsou velmi jednoduché (druhá rovnost plyne z první):

$$\mathcal{F}(f(at))(s) = \frac{1}{|a|} \mathcal{F}\left(f\left(\frac{t}{a}\right)\right)\left(\frac{s}{a}\right)$$

$$\mathcal{F}(f(t))(as) = \frac{1}{|a|} \mathcal{F}\left(f\left(\frac{t}{a}\right)\right)(s).$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Derivace

Vztah derivace a Fourierovy transformace je podstatný pro použití na řešení diferenciálních rovnic.

Rovnosti se dokáží snadno pomocí integrace po částech. Je nutné předpokládat, že všechny uvedené integrály konvergují. spojitá.

$$\mathcal{F}(f'(t))(s) = is\mathcal{F}(f(t))(s)$$
$$\frac{d}{ds}\mathcal{F}(f(t))(s) = \mathcal{F}(-itf(t))(s).$$

Indukcí se dokáží rovnosti pro derivace vyšších řádů:

$$\mathcal{F}(f^{(n)}(t))(s) = (is)^n \mathcal{F}(f(t))(s)$$
$$\frac{d^n}{ds^n} \mathcal{F}(f(t))(s) = \mathcal{F}((-it)^n f(t))(s).$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Integrace

Vzorce na integraci Fourierovy transformace se získají z předchozích vzorců pro derivace:

Je-li g primitivní funkce k f na \mathbb{R} taková, že $\lim_{t \rightarrow -\infty} g(t) = \lim_{t \rightarrow +\infty} g(t) = 0$, pak

$$\mathcal{F}(g)(s) = \mathcal{F}(f)(s)/(is).$$

Funkce $\mathcal{F}(f)(s)$ je primitivní k funkci $\mathcal{F}(-f(t)/(it))(s)$ na \mathbb{R} .

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Konvoluce

Na rozdíl od Laplaceovy transformace převádí Fourierova transformace součin funkcí na konvoluci obrazů. V případě funkcí na \mathbb{R} se konvoluce definuje trochu jinak:

DEFINICE. Konvoluce na \mathbb{R} dvou funkcí f, g je funkce

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(t - \tau) \, d\tau .$$

Vlastnosti konvoluce jsou probrány v *Otázkách*.

Platí

$$\begin{aligned}\mathcal{F}(f * g) &= \mathcal{F}(f) \mathcal{F}(g) \\ \mathcal{F}(f g) &= \frac{1}{2\pi} \mathcal{F}(f) * \mathcal{F}(g) .\end{aligned}$$

Použití Fourierovy transformace na hledání řešení diferenciálních a integrálních rovnic je podobné použití Laplaceovy transformace – viz příklady.

Příklady 2 Otázky 2 2

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace
kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace
posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin
komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace
inverzní Laplaceova transformace
inverze a rezidua
Applikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

KOMPLEXNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE

Na rozdíl od Laplaceovy transformace, která se dá použít i pro funkce neomezené v nekonečnu, Fourierova transformace (jako reálná funkce) nelze aplikovat ani na nulové konstantní funkce. Tento nedostatek se dá odstranit umožněním komplexních hodnot.

Definice Fourierovy transformace má smysl i pro komplexní funkce reálné proměnné f a pro komplexní čísla s . Dostane se pak komplexní funkce komplexní proměnné (změníme označení proměnné):

$$\mathcal{F}(f)(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-izt} dt.$$

Kde je tato funkce definována a kde je holomorfní?

VĚTA. Necht' f je po částech hladká a $|f(t)| \leq ke^{-at}$ pro $t > 0$ a $|f(t)| \leq ke^{-bt}$ pro $t < 0$ a pro nějakou konstantu k . Potom $\mathcal{F}(f)(z)$ je holomorfní v pásu $b < \Im(z) < a$.

Jak to vypadá s inverzní transformací pro $\mathcal{F}(f)(z)$?

Obecně ji nelze definovat jako pro reálné funkce, protože $\mathcal{F}(f)(z)$ nemusí být na reálné ose (tj. pro $\Im(z) = 0$) vůbec definována.

Necht' je $\mathcal{F}(f)(z)$ definována na přímce $\Im(z) = c$. Potom $\mathcal{F}(f)(s + ic)$ je definována na \mathbb{R} a rovná se $\mathcal{F}(e^{ct}f(t))(z)$. Tedy platí

$$e^{ct}f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{F}(f)(s + ic)e^{ist} ds = \frac{e^{ct}}{2\pi} \int_{-\infty+ic}^{+\infty+ic} \mathcal{F}(f)(u)e^{iut} ds$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin

komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace
inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua
Aplikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

kde pro poslední integrál byla použita substituce $u = s + ic$ a uvedené meze značí integraci po přímce $\Im(z) = c$.

Po zkrácení výrazem e^{ct} se dostane inverzní transformace pro uvedený případ, takže

$$\widehat{f}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty+ic}^{+\infty+ic} \mathcal{F}(f)(s) e^{ist} ds,$$

jakmile je $\mathcal{F}(f)(z)$ definována na přímce $\Im(z) = c$.

Shrneme předchozí výsledky do věty:

VĚTA. Necht' f je po částech hladká a $|f(t)| \leq ke^{-at}$ pro $t > 0$ a $|f(t)| \leq ke^{-bt}$ pro $t < 0$ a pro nějakou konstantu k . Potom pro libovolné $c \in (b, a)$ je

$$\widehat{f}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty+ic}^{+\infty+ic} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-its} dt \right) e^{ist} ds,$$

Poznámky 3 Příklady 3 3

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

INVERZNÍ LAPLACEOVA TRANSFORMACE

Laplaceova transformace se dá vyjádřit pomocí Fourierovy transformace:

$$\mathcal{L}(f)(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-ts} dt = \mathcal{F}(f)(-is),$$

jestliže definujeme $f(t) = 0$ pro $t < 0$.

Stejně jako u Fourierovy transformace je v definici Laplaceovy transformace možné chápat proměnnou s jako komplexní číslo a $\mathcal{L}(f)$ je tedy komplexní funkce komplexní proměnné.

Pokud je f exponenciálně omezená, tj. $|f(t)| \leq ke^{bt}$ pro nějaká reálná čísla k, b , je podle předchozí části funkce $\mathcal{F}(f)(-iz)$ holomorfní pro $\Re(z) > b$ (ukážte to). Použitím předchozí části na získání inverze pro $\mathcal{F}(f)(-is)$ se dostane následující tvrzení.

VĚTA. Necht' f je po částech hladká komplexní funkce reálné proměnné, která je rovna 0 pro $t < 0$ a $|f(t)| \leq ke^{bt}$ pro nějaká reálná čísla k, b a pro $t > 0$. Potom $\mathcal{L}(f)(z)$ je holomorfní funkce na polorovině $\Re(z) > b$ a pro libovolné $c > b$ je

$$\widehat{f}(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \mathcal{L}(f)(s)e^{ts} ds.$$

Uvedená integrace je po přímce kolmé k ose x v bodě c .

Nyní je možné počítat inverzní Laplaceovu transformaci pomocí uvedeného vzorce. Nicméně, přímý výpočet tohoto integrálu může být komplikovaný.

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace
kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace
posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin
komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace
inverzní Laplaceova transformace
inverze a rezidua
Applikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

V některých případech je možné s výhodou použít reziduovou větu. Integrace po uvedené přímce se spočte limitou integrálů přes zvětšující se intervaly, které se doplní (většinou polokružnicí) na uzavřenou křivku.

Následující věta popisuje velkou třídu funkcí, pro které je možné takto inverzní Laplaceovu transformaci spočítat.

VĚTA. Necht' g je holomorfní funkce v $\mathbb{C} \setminus \{z_1, \dots, z_n\}$ a existují $k, p > 0$ tak, že $|g(z)| \leq k|z|^{-p}$ pro $z \in \mathbb{C} \setminus \{z_1, \dots, z_n\}$. Potom pro $c > \max\{\Re(z_1), \dots, \Re(z_n)\}$ je

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{c-\infty i}^{c+\infty i} g(z)e^{tz} dz = \sum_{i=1}^n \text{res}_{z_i}(g(z)e^{tz}).$$

Přeformulováním předchozí věty se dostává tvrzení o výpočtu inverzní Laplaceovy transformace:

DŮSLEDEK. Necht' g je holomorfní funkce v $\mathbb{C} \setminus \{z_1, \dots, z_n\}$ a existují $k, p > 0$ tak, že $|g(z)| \leq k|z|^{-p}$ pro dostatečně velká $|z|$. Potom

$$\mathcal{L}_{-1}(g(z))(t) = \sum_{i=1}^n \text{res}_{z_i}(g(z)e^{tz}).$$

Poznámky 4 Příklady 4 Otázky 4 4 5 6

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
 Fourierova transformace
 kosinová Fourierova transformace
 sinová Fourierova transformace
 vlastnosti Fourierovy transformace
 posunutí
 zvětšení
 derivace
 integrace
 konvoluce
 součin
 komplexní Fourierova transformace
 inverzní komplexní transformace
 inverzní Laplaceova transformace
 inverze a rezidua
 Aplikace Fourierovy transformace
 diskrétní Fourierova transformace
 rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
 1 2 3 4 5 6 7 8 9
 Příklady
 1 2 3 4 5 6 7 8 9
 Otázky
 1 2 3 4 5 6 7 8 9
 Cvičení
 1 2 3 4 5 6 7 8 9
 Učení
 1 2 3 4 5 6 7 8 9

APLIKACE FOURIEROVY TRANSFORMACE

Klíčové kroky zajímavých aplikací

1. Transformace signálu.
2. Potřebné úpravy ve frekvencích.
3. Inverzní transformace.

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Diskrétní Fourierova transformace

Nahradíme spojitý signál f za diskrétní posloupnost:

$$\{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}.$$

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) z této konečné posloupnosti vytvoří diskrétní posloupnost jejich obrazů

$$\{F_0, F_1, \dots, F_{N-1}\}$$

pomocí vzorečku

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k \left(e^{-2\pi i n / N} \right)^k .$$

Inverzní DFT je pak inverzní proces pomocí vzorečku

$$f_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k \left(e^{-2\pi i n / N} \right)^k .$$

Pro zpracování zvuků (MP3) se používá modifikace DFT, modifikovaná Diskrétní kosínová Fourierova transformace se vzorečkem

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k \cos \left(\pi i \left(k + \frac{1}{2} \right) / N \right) .$$

DFT jde snadno rozšířit do více dimenzí a slouží mimo jiné ke zpracování obrazů (JPEG).

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace

kosínová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí
zvětšení

derivace
integrace

konvoluce
součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Rychlá Fourierova transformace

Vzoreček pro diskrétní Fourierovu transformaci

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k \left(e^{-2\pi i n / N} \right)^k$$

je ve skutečnosti počítáním hodnoty polynomu $P(x) = \sum f_k x^k$ s koeficienty f_k v bodech

$$x = \omega_N^0, \omega_N^1, \dots, \omega_N^{N-1},$$

kde

$$\omega_N = e^{-2\pi i / N}$$

je N -tá odmocnina z jedničky.

Rychlá Fourierova transformace (FFT) počítá hodnoty DFT pomocí následujícího triku.

Všimneme si, že výpočet hodnoty polynomu N -tého stupně potřebuje řádově N operací:

$$p(x) = a_0 + x(a_1 + x(a_2 + \dots + x(a_{n-2} + xa_{n-1}) \dots)).$$

Nechť je N sudé. Pro DFT máme počítat N hodnot polynomu $P(x) = \sum f_k x^k$ stupně $(N - 1)$. Tedy lze očekávat řádově N^2 operací.

Trik spočívá v tom, že místo toho budeme počítat dva polynomy stupně nejvýše $N/2$

$$S(y) = f_0 + f_2 y + f_4 y^2 + \dots$$

$$L(y) = f_1 + f_3 y + f_5 y^2 + \dots$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

v $N/2$ bodech

$$(\omega_N^0)^2, (\omega_N^1)^2, \dots, (\omega_N^{N-1})^2,$$

(je jich sice N , ale některé jsou v seznamu dvakrát, TRIK!!!), protože

$$P(x) = S(x^2) + xL(x^2).$$

Tedy místo N^2 operací na jeden problém velikosti N s kvadratickou náročností dostaneme zhruba polovinu, protože zjednodušení vede na dva problémy poloviční velikosti, tedy $(N/2)^2 + (N/2)^2$ operací.

Podobně se použije FFT pro inverzní DFT:

$$f_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k \left(e^{-2\pi i n/N} \right)^k.$$

STANDARDY z kapitoly

FOURIEROVA TRANSFORMACE

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace
kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace
posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin
komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace
inverzní Laplaceova transformace
inverze a rezidua
Applikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

FOURIEROVA VĚTA

V kapitole o Fourierových řadách byla definována průměrovací operace na funkci $\widehat{f}(x) = (f(x_+) + f(x_-))/2$.

VĚTA. Necht' f je po částech hladká na \mathbb{R} a $\int_{\mathbb{R}} |f|$ konverguje. Potom

$$\widehat{f}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(u) e^{-ivu} du \right) e^{ivx} dv.$$

DEFINICE. Pro reálné funkce f a F definované na \mathbb{R} se definuje

$$\mathcal{F}(f)(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-ist} dt, \quad \mathcal{F}_{-1}(F)(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(s) e^{its} ds.$$

Funkce $\mathcal{F}(f)$ se nazývá **Fourierova transformace** funkce f , funkce $\mathcal{F}_{-1}(F)$ se nazývá **inverzní Fourierova transformace** funkce F .

Neht' φ je po částech hladká na \mathbb{R} a $\int_{\mathbb{R}} |\varphi|$ konverguje. Potom

$$\mathcal{F}(\mathcal{F}_{-1}(\varphi)) = \mathcal{F}_{-1}(\mathcal{F}(\varphi)) = \widehat{\varphi}.$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace
kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace
posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin
komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace
inverzní Laplaceova transformace
inverze a rezidua
Applikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9
Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Sinová a kosinová Fourierova transformace

DEFINICE. Pro reálné funkce f a F definované na $(0, \infty)$ se definuje

$$\mathcal{F}^c(f)(s) = \int_0^{+\infty} f(t) \cos(st) dt, \quad \mathcal{F}_{-1}^c(F)(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} F(s) \cos(ts) ds.$$

Funkce $\mathcal{F}^c(f)$ se nazývá **kosinová Fourierova transformace** funkce f , funkce $\mathcal{F}_{-1}^c(F)$ se nazývá **inverzní kosinová Fourierova transformace** funkce F .

$$\mathcal{F}^s(f)(s) = \int_0^{+\infty} f(t) \sin(st) dt, \quad \mathcal{F}_{-1}^s(F)(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} F(s) \sin(ts) ds.$$

Funkce $\mathcal{F}^s(f)$ se nazývá **sinová Fourierova transformace** funkce f , funkce $\mathcal{F}_{-1}^s(F)$ se nazývá **inverzní sinová Fourierova transformace** funkce F .

Z Fourierovy věty se dostává:

VĚTA. Necht' φ je po částech hladká na $(0, \infty)$ a $\int_0^\infty |\varphi|$ konverguje. Potom

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^c(\mathcal{F}_{-1}^c(\varphi)) &= \mathcal{F}_{-1}^c(\mathcal{F}^c(\varphi)) = \widehat{\varphi}, \\ \mathcal{F}^s(\mathcal{F}_{-1}^s(\varphi)) &= \mathcal{F}_{-1}^s(\mathcal{F}^s(\varphi)) = \widehat{\varphi}. \end{aligned}$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace
vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin

komplexní Fourierova transformace
inverzní komplexní transformace
inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua
Applikace Fourierovy transformace
diskrétní Fourierova transformace
rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

VLASTNOSTI FOURIEROVY TRANSFORMACE

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Derivace

$$\mathcal{F}(f'(t))(s) = is\mathcal{F}(f(t))(s)$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Konvoluce

DEFINICE. Konvoluce na \mathbb{R} dvou funkcí f, g je funkce

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(t - \tau) \, d\tau.$$

Platí

$$\mathcal{F}(f * g) = \mathcal{F}(f) \mathcal{F}(g).$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

KOMPLEXNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE

VĚTA. Necht' f je po částech hladká a $|f(t)| \leq ke^{-at}$ pro $t > 0$ a $|f(t)| \leq ke^{-bt}$ pro $t < 0$ a pro nějakou konstantu k . Potom $\mathcal{F}(f)(z)$ je holomorfní v pásu $b < \Im(z) < a$.

VĚTA. Necht' f je po částech hladká a $|f(t)| \leq ke^{-at}$ pro $t > 0$ a $|f(t)| \leq ke^{-bt}$ pro $t < 0$ a pro nějakou konstantu k . Potom pro libovolné $c \in (b, a)$ je

$$\widehat{f}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty+ic}^{+\infty+ic} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-its} dt \right) e^{ist} ds,$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace
sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí
zvětšení
derivace
integrace
konvoluce
součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

APLIKACE FOURIEROVY TRANSFORMACE

Klíčové kroky zajímavých aplikací

1. Transformace signálu.
2. Potřebné úpravy ve frekvencích.
3. Inverzní transformace.

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Diskrétní Fourierova transformace

Nahradíme spojitý signál f za diskrétní posloupnost:

$$\{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}.$$

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) z této konečné posloupnosti vytvoří diskrétní posloupnost jejich obrazů

$$\{F_0, F_1, \dots, F_{N-1}\}$$

pomocí vzorečku

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k \left(e^{-2\pi i n / N} \right)^k .$$

Inverzní DFT je pak inverzní proces pomocí vzorečku

$$f_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k \left(e^{-2\pi i n / N} \right)^k .$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta
Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí
zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Rychlá Fourierova transformace

Vzoreček pro diskrétní Fourierovu transformaci

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k \left(e^{-2\pi i n / N} \right)^k$$

je ve skutečnosti počítáním hodnoty polynomu $P(x) = \sum f_k x^k$ s koeficienty f_k v bodech

$$x = \omega_N^0, \omega_N^1, \dots, \omega_N^{N-1},$$

kde

$$\omega_N = e^{-2\pi i / N}$$

je N -tá odmocnina z jedničky.

Rychlá Fourierova transformace (FFT) počítá hodnoty DFT pomocí následujícího triku.

Všimneme si, že výpočet hodnoty polynomu N -tého stupně potřebuje řádově N operací:

$$p(x) = a_0 + x(a_1 + x(a_2 + \dots + x(a_{n-2} + xa_{n-1}) \dots)).$$

Nechť je N sudé. Pro DFT máme počítat N hodnot polynomu $P(x) = \sum f_k x^k$ stupně $(N - 1)$. Tedy lze očekávat řádově N^2 operací.

Trik spočívá v tom, že místo toho budeme počítat dva polynomy stupně nejvýše $N/2$

$$S(y) = f_0 + f_2 y + f_4 y^2 + \dots$$

$$L(y) = f_1 + f_3 y + f_5 y^2 + \dots$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

v $N/2$ bodech

$$(\omega_N^0)^2, (\omega_N^1)^2, \dots, (\omega_N^{N-1})^2,$$

(je jich sice N , ale některé jsou v seznamu dvakrát, TRIK!!!), protože

$$P(x) = S(x^2) + xL(x^2).$$

Tedy místo N^2 operací na jeden problém velikosti N s kvadratickou náročností dostaneme zhruba polovinu, protože zjednodušení vede na dva problémy poloviční velikosti, tedy $(N/2)^2 + (N/2)^2$ operací.

Podobně se použije FFT pro inverzní DFT:

$$f_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k \left(e^{-2\pi i n k / N} \right)^k.$$

LEKCE37-FOU

Fourierova věta

Fourierova transformace

kosinová Fourierova transformace

sinová Fourierova transformace

vlastnosti Fourierovy transformace

posunutí

zvětšení

derivace

integrace

konvoluce

součin

komplexní Fourierova transformace

inverzní komplexní transformace

inverzní Laplaceova transformace

inverze a rezidua

Aplikace Fourierovy transformace

diskrétní Fourierova transformace

rychlá Fourierova transformace

STANDARDY

Poznámky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Příklady

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Otázky

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cvičení

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Učení

1 2 3 4 5 6 7 8 9