



سیگنال‌ها و سیستم‌ها

تمرین پنجم

دانشکده مهندسی کامپیوتر

دانشگاه صنعتی شریف

نیم سال دوم ۹۹-۰۰

استاد:

جناب آقای دکتر منظوری شلمانی

نام و نام خانوادگی:

امیرمهدی نامجو - ۹۷۱۰۷۲۱۲



۱ سری فوریه

۱.۱ سوال اول

۱.۱.۱ بخش a

$$f(x) = \begin{cases} \pi - x & 0 \leq x \leq \pi \\ x - \pi & -\pi \leq x \leq 0 \end{cases}$$

ابتدا عامل DC را بدست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int f(x) dx = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^0 (x - \pi) dx + \int_0^{\pi} (\pi - x) dx \\ &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{-3\pi^2}{2} - \frac{\pi^2}{2} \right) = \boxed{-\pi} \end{aligned}$$

برای ضرایب کسینوسی داریم:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int (f(x) \cos(nx)) dx \\ &= \frac{1}{\pi} \left(\int_{-\pi}^0 (x - \pi) \cos(nx) dx + \int_0^{\pi} (\pi - x) \cos(nx) dx \right) \end{aligned}$$

ابتدا لازم است اشاره کنیم که

$$\int x \cos(nx) = \frac{1}{n^2} \cos(nx) + \frac{1}{n} x \sin(nx)$$

با توجه به این موضوع، از عبارت بالا می‌توان به راحتی انتگرال گرفت:

$$= \frac{1}{\pi} \left(\left(\frac{\cos(nx)}{n^2} + \frac{x \sin(nx)}{n} - \frac{\pi \sin(nx)}{n} \right) \Big|_{-\pi}^0 + \left(-\frac{\cos(nx)}{n^2} + \frac{\pi \sin(nx)}{n} - \frac{x \sin(nx)}{n} \right) \Big|_0^{\pi} \right)$$

بعد از ساده سازی و محاسبات داریم:

$$a_n = -\frac{2(\pi n \sin(\pi n) + \cos(\pi n) - 1)}{\pi n^2}$$

برای محاسبات ضریب سینوسی داریم:

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int (f(x) \sin(nx)) dx \\ &= \frac{1}{\pi} \left(\int_{-\pi}^0 (x - \pi) \sin(nx) dx + \int_0^{\pi} (\pi - x) \sin(nx) dx \right) \end{aligned}$$



ابتدا لازم است اشاره کنیم که

$$\int x \sin(nx) = \frac{\sin(nx)}{n^2} - \frac{x \cos(nx)}{n}$$

با توجه به این موضوع، عبارت بالا مانند بخش قبل به راحتی قابل محاسبه است. جوابی که در نهایت به آن می‌رسیم به صورت زیر است:

$$b_n = \frac{2 - 2 \cos(\pi n)}{n}$$

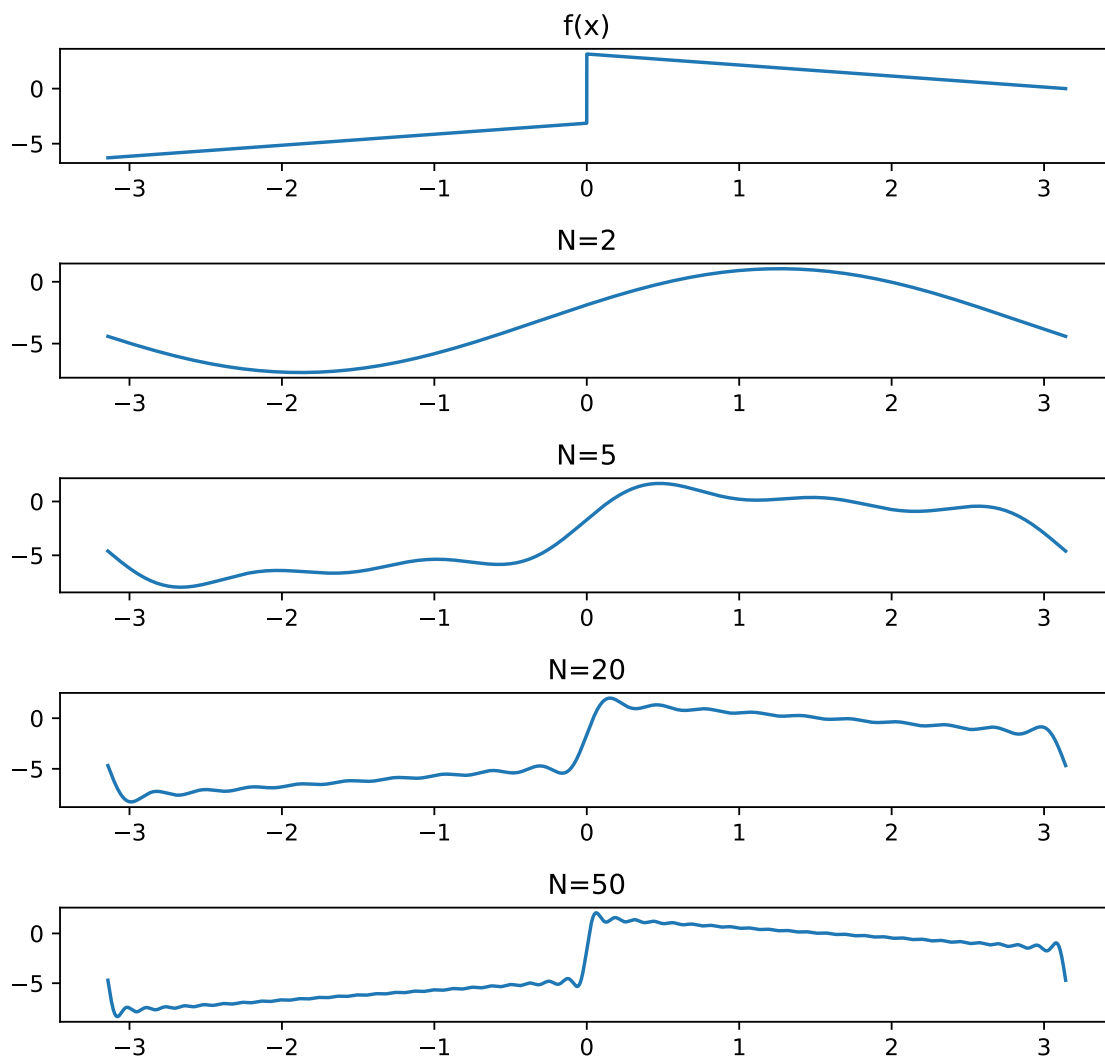
و جواب نهایی به صورت:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx))$$

خواهد بود. (تقسیم بر ۲ فرمول a_0 را به نوعی در خود انتگرال آن تاثیر داده‌ام)
کد آن در فایل P1_Q1_a.py قرار دارد. نمودار در صفحه بعد قرار گرفته است. شکل بالایی خود تابع و شکل‌های بعدی به ازای $N = 2, 5, 20, 50$ هستند.



Amirmahdi Namjoo





۲.۱.۱ بخش b

$$f(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \frac{\pi}{2} \leq x < \pi \\ 0 & -\pi \leq x < 0 \end{cases}$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int f(x) dx = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} 1 dx = \boxed{\frac{1}{4}}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int (f(x) \cos(nx)) dx$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(nx) dx = \frac{1}{\pi} \frac{\sin(nx)}{n} \Big|_0^{\pi/2} = \boxed{\frac{\sin\left(\frac{\pi n}{2}\right)}{\pi n}}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int (f(x) \sin(nx)) dx$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin(nx) dx = -\frac{1}{\pi} \frac{\cos(nx)}{n} \Big|_0^{\pi/2} = \boxed{\frac{2 \sin^2\left(\frac{\pi n}{4}\right)}{\pi n}}$$

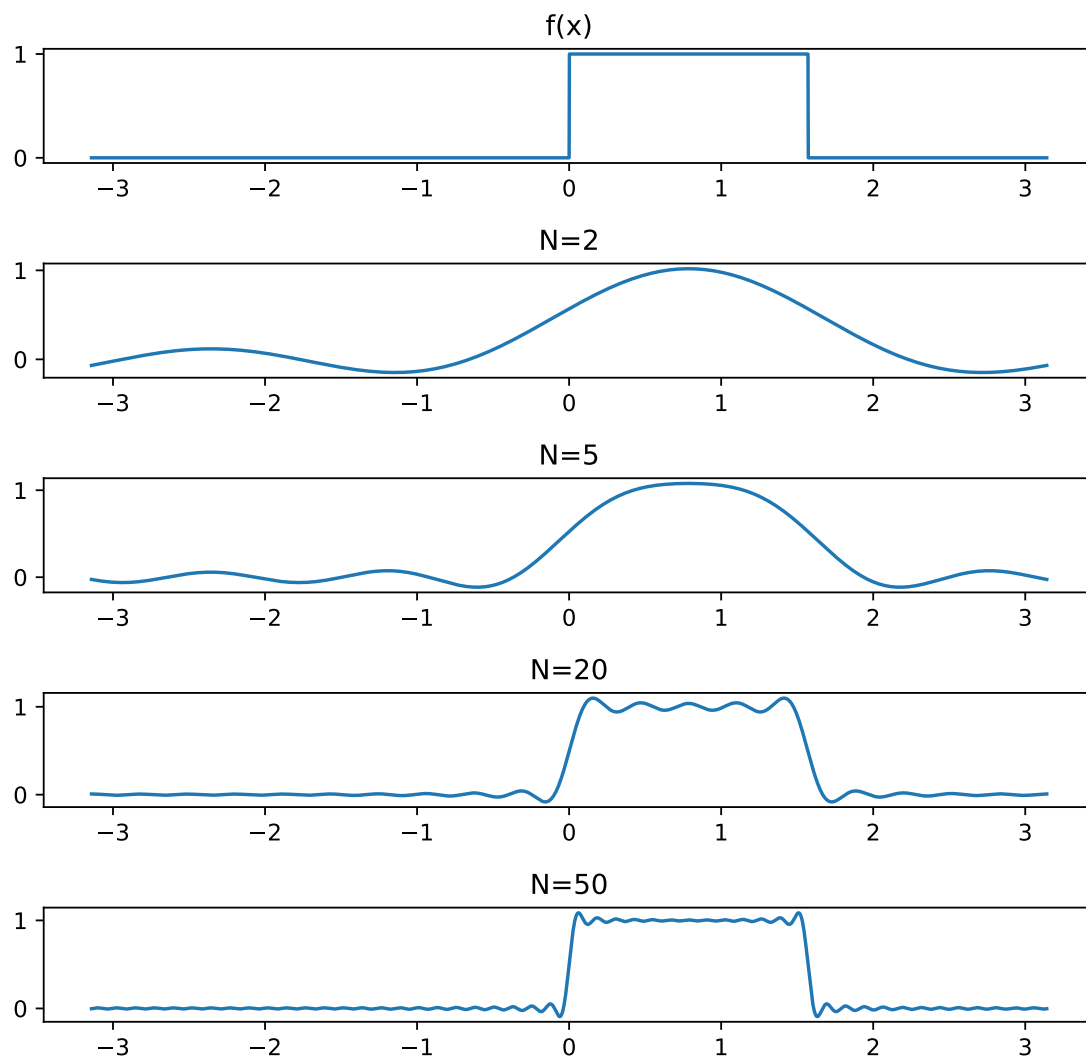
که در بالا از اتحاد $\cos(2\theta) = 1 - 2\sin^2(\theta)$ استفاده شده است.
و جواب نهایی به صورت:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx))$$

کد آن در فایل P1_Q1_b.py قرار دارد. نمودار در صفحه بعد قرار گرفته است. شکل بالایی خود تابع و شکل های بعدی به ازای $N = 2, 5, 20, 50$ هستند.



Amirmahdi Namjoo





۲.۱ سوال دوم

۱.۲.۱ بخش a

$$\cos(4t) = \frac{1}{2}e^{-4jt} + \frac{1}{2}e^{4jt}$$

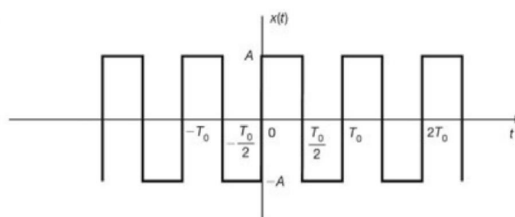
$$\sin(6t) = \frac{1}{2j}e^{6jt} - \frac{1}{2j}e^{-6jt}$$

در نتیجه ضرایب سری فوریه برای $\cos(4t) + \sin(6t)$ به صورت زیر است:

$$a_4 = \frac{1}{2}, a_{-4} = \frac{1}{2}, a_6 = \frac{1}{2j}, a_{-6} = \frac{-1}{2j}$$

و به ازای $k \neq \pm 4, \pm 6$ داریم $a_k = 0$

۲.۲.۱ بخش b



$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

$$a_k = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) e^{-jk \frac{2\pi}{T_0} t} dt$$

برای $k = 0$ به طور جداگانه محاسبه کرده و داریم:

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) dt = 0$$

برای باقی موارد داریم:

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) e^{-jk \frac{2\pi}{T_0} t} dt = \frac{1}{T_0} \left(\int_{-T_0/2}^0 (-A) e^{-jk \frac{2\pi}{T_0} t} dt + \int_0^{T_0/2} (A) e^{-jk \frac{2\pi}{T_0} t} dt \right) \\ &= \frac{1}{T_0} \left(\frac{AT_0 j (-1 + e^{jk\pi})}{2k\pi} + \frac{-AT_0 j (1 - e^{jk\pi})}{2k\pi} \right) \end{aligned}$$



$$= \frac{Aje^{-jk\pi}(-1 + e^{jk\pi})^2}{2k\pi}$$

۳.۲.۱ بخش c

دوره تناوب پایه $|\sin(x)|$ برابر π است و عملاً مانند \sin مثبتی بین 0 تا π است که در همه تناوب‌هایش تکرار می‌شود. در نتیجه باید براساس این تناوب حل کرد.

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi |\sin(x)| e^{-2jkx} dx = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sin(x) e^{-2jkx} dx$$

برای ضریب a_0 داریم:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sin(x) dx = \frac{2}{\pi}$$

برای سایر ضرایب داریم:

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2j} (e^{ix} - e^{-ix}) e^{-2jkx} dx \\ &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{e^{-j(2k-1)x}}{2k-1} - \frac{e^{-j(2k+1)x}}{2k+1} \right) \Big|_0^\pi \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2k+1} - \frac{1}{2k-1} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{e^{-j\pi(2k-1)}}{2k-1} - \frac{e^{-j\pi(2k+1)}}{2k+1} \right) \\ &= \frac{1 + e^{-2j\pi k}}{1 - 4k^2} \end{aligned}$$

۳.۱ سوال سوم

۱.۳.۱ بخش a

$$x(t) = + - 2je^{-2j\omega_0 t} + -1je^{-1j\omega_0 t} + 1je^{1j\omega_0 t} + 2je^{2j\omega_0 t}$$

$$= -\frac{4}{2j} (e^{2j\omega_0 t} - e^{-2j\omega_0 t}) - \frac{2}{2j} (e^{j\omega_0 t} - e^{-j\omega_0 t})$$

$$= -4 \sin(2\omega_0 t) - 2 \sin(\omega_0 t)$$



۲.۳.۱ بخش b

عبارت مورد نظر باید ما را به یاد سری فوریه قطار ضربه بیندازد.

$$\delta_{T_0}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega_0 t}$$

برای ضرایب فوریه چنین چیزی داریم:

$$c_k = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} \delta(t) e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{1}{T_0}$$

$$\delta_{T_0}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_0) = \frac{1}{T_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{jk\omega_0 t} \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

با توجه به این موضوع برای چیزی که در صورت سوال داده شده، می‌توانیم آن را معادل با

$$z(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{jk\omega_0 t} \delta(t - T_0 k + 2k)$$

بدانیم.

در عبارت بالا $2k$ برای زوج سازی و سپس e برای شیفت فرکانسی اضافه شده است که باعث بشود که تنها عبارت‌های فرد 1 بمانند و عبارت‌های زوج 0 شوند.



۴.۱ سوال چهارم

در سوال نمادهای e_k و d_k استفاده شده است ولی برای راحتی کار و از آن جایی که کلا دو سیگنال اصلی داریم، از a_k و b_k در جواب استفاده شده است.

$$x_1[n]x_2[n] = \sum_{k=0}^{N_0-1} \sum_{l=0}^{N_0-1} a_k b_l e^{j(2\pi/N_0)(k+l)n}$$

$$x_1[n]x_2[n] = \sum_{k=0}^{(N_0-1)} \sum_{l'=k}^{(k+N_0-1)} a_k b_{l'-k} e^{j(2\pi/N_0)'n}$$

با توجه به متناوب بودن $b_{l'-k}$ و $e^{j2\pi/N_0 l' n}$ داریم:

$$x_1[n]x_2[n] = \sum_{k=0}^{N_0-1} \sum_{l'=0}^{N_0-1} a_k b_{l'-k} e^{j(2\pi/N_0)t'n} = \sum_{l=0}^{N_0-1} \left[\sum_{k=0}^{N_0-1} a_k b_{l-k} \right] e^{j(2\pi/N_0)ln}$$

پس

$$c_k = \sum_{t=0}^{N_0-1} a_k b_{l-k}$$

و معادلا:

$$c_k = \sum_{k=0}^{N_0-1} b_k a_{l-k}$$

برای اثبات رابطه پارسوال داریم:

$$N_0 \sum_{l=\langle N_0 \rangle} a_l b_{k-l} = \sum_{\langle N_0 \rangle} x_1[n]x_2[n] e^{-j(2\pi/N_0)kn}$$

با قرار دادن $k=0$ داریم:

$$N_0 \sum_{l=\langle N_0 \rangle} a_l b_{-1} = \sum_{n=\langle N_0 \rangle} x_1[n]x_2[n]$$

در نتیجه:

$$\frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} x[n] = \sum_{k=0}^{N_0-1} a_k b_{-k}$$



۵.۱ سوال پنجم

در نتیجه سوال قبل قرار می دهیم:

$$x_2[n] = x_1^*[n]$$

در نتیجه این موضوع داریم:

$$b_k = a_{-k}^*$$

پس

$$\begin{aligned} \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} x[n] &= \sum_{n=0}^{N_0-1} a_k n_{-k} \\ \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} x_1[n] x_1^*[n] &= \sum_{k=0}^{N_0-1} a_k a_k^* \end{aligned}$$

بنابراین:

$$\sum_{k=\langle n_0 \rangle} |a_k|^2 = \frac{1}{N_0} \sum_{n=\langle N_0 \rangle} |x[n]|^2.$$



۶.۱ سوال ششم

$$f(t) = \begin{cases} t + \frac{5}{3} & -1 \leq t < 0 \\ -t + \frac{5}{3} & 0 \leq t < 2 \\ 0 & 2 \leq t < 4 \end{cases}$$

۱.۶.۱ بخش a

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{5} \int f(t) dt = \frac{1}{5} \left(\int_{-1}^0 t + 5/3 dt + \int_0^2 -t + 5/3 dt \right) \\ &= \frac{1}{5} \left(\frac{7}{6} + \frac{4}{3} \right) = \boxed{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$a_k = \frac{1}{5} \int_{-1}^5 f(t) e^{-jk \frac{2\pi}{5} t} dt = \frac{1}{5} \left(\int_{-1}^0 (t + \frac{5}{3}) e^{-jk \frac{2\pi}{5} t} dt + \int_0^2 (-t + \frac{5}{3}) e^{-jk \frac{2\pi}{5} t} dt \right)$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{5} \left(\frac{50i\pi k + e^{\frac{2i\pi k}{5}} (-75 - 20i\pi k) + 75}{12\pi^2 k^2} + \frac{-50i\pi k + e^{\frac{-4i\pi k}{5}} (-75 - 10i\pi k) + 75}{12\pi^2 k^2} \right) \\ &= \frac{e^{\frac{1}{5}(-4)i\pi k} \left(-2i\pi k + 30e^{\frac{4i\pi k}{5}} + e^{\frac{6i\pi k}{5}} (-15 - 4i\pi k) - 15 \right)}{12\pi^2 k^2} \end{aligned}$$

یا اگر روش فرمول کسینوس و سینوس را برویم داریم:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{5} \int (f(t) \cos(\frac{2\pi}{5} nt)) dt \\ &= \frac{2}{5} \int_{-1}^0 (t + 5/3) \cos(\frac{2\pi}{5} nt) dt + \int_0^2 (-t + 5/3) \cos(\frac{2\pi}{5} nt) dt \\ &= \frac{\sin^2(\frac{\pi n}{5}) (4\pi n \sin(\frac{2\pi n}{5}) + 30 \cos(\frac{2\pi n}{5}) + 45)}{3\pi^2 n^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{5} \int (f(t) \sin(\frac{2\pi}{5} nt)) dt \\ &= \frac{2}{5} \int_{-1}^0 (t + 5/3) \sin(\frac{2\pi}{5} nt) dt + \int_0^2 (-t + 5/3) \sin(\frac{2\pi}{5} nt) dt \\ &= \frac{15 (\sin(\frac{2\pi n}{5}) - \sin(\frac{4\pi n}{5})) + 4\pi n \cos(\frac{2\pi n}{5}) + 2\pi n \cos(\frac{4\pi n}{5})}{6\pi^2 n^2} \end{aligned}$$

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx))$$



۲.۶.۱ بخش b

کدهای مسئله به زبان پایتون در فایل P1_Q6_b.py موجود است و جواب قسمت‌های بعد براساس آن تولید شده است:

جملات مد نظر در ادامه نوشته شده اند. توجه کنید که به دلیل ویژگی‌های اعداد Floating-Point عموماً ضربایی که صفر بوده‌اند به صورت عددی ضربدر 10^{-33} نوشته شده‌اند.

پس از آن ابتدا در یک شکل سیگنال‌ها به ازای مقادیر N به صورت جداگانه رسم شده‌اند. سپس در اشکال بعدی، به ازای هر کدام از مقادیر، نمودار آن با رنگ نارنجی روی نمودار اصلی با رنگ آبی رسم شده است.

$$a_1 = 0.772711906482877, b_1 = 0.07175375986881644$$

$$a_2 = 0.27113541693643917, b_2 = 0.028002784979373037$$

$$a_3 = -0.004852111911900812, b_3 = -0.08960735823011712$$

$$a_4 = 0.004714960180721709, b_4 = -0.010817086948420714$$

$$a_5 = 1.5195743635847465e - 33, b_5 = 0.06366197723675814$$

$$a_6 = 0.04083290139095018, b_6 = -0.0008212742065860439$$

$$a_7 = 0.04515821107548206, b_7 = -0.011886611106858576$$

$$a_8 = -0.01831062003374954, b_8 = -0.023451895441009625$$

$$a_9 = -0.007676952848145469, b_9 = -0.00338756817877342$$

$$a_{10} = 1.5195743635847456e - 33, b_{10} = 0.03183098861837907$$

$$a_{11} = 0.017911214823682062, b_{11} = -0.0010816983697769051$$

$$a_{12} = 0.023201132067024215, b_{12} = -0.008867354363816892$$

$$a_{13} = -0.013610002113093692, b_{13} = -0.012990392854308745$$

$$a_{14} = -0.006730131246383232, b_{14} = -0.0019169012948294058$$



$$a_{15} = 1.5195743635847434e - 33, b_{15} = 0.021220659078919374$$

$$a_{16} = 0.01118956850490962, b_{16} = -0.000907051304878608$$

$$a_{17} = 0.015464268832541013, b_{17} = -0.006821294507069879$$

$$a_{18} = -0.010581176024894123, b_{18} = -0.008919232952258454$$

$$a_{19} = -0.005585535368095415, b_{19} = -0.0013214190722783403$$

$$a_{20} = 1.5195743635847419e - 33, b_{20} = 0.015915494309189534$$

$$a_{21} = 0.008076648709406326, b_{21} = -0.0007562919849315991$$

$$a_{22} = 0.011564843734622392, b_{22} = -0.005507870241109013$$

$$a_{23} = -0.008613443680564381, b_{23} = -0.006775588961597922$$

$$a_{24} = -0.004711199325475308, b_{24} = -0.0010040831881916652$$

$$a_{25} = 1.5195743635847393e - 33, b_{25} = 0.012732395447351627$$

$$a_{26} = 0.006300406249170883, b_{26} = -0.0006432609418058376$$

$$a_{27} = 0.009225781951316991, b_{27} = -0.004609416023114295$$

$$a_{28} = -0.007250921405575788, b_{28} = -0.005457578628620997$$

$$a_{29} = -0.004055794714702865, b_{29} = -0.0008081706869254678$$

$$a_{30} = 1.519574363584735e - 33, b_{30} = 0.010610329539459687$$

$$a_{31} = 0.005157489248731366, b_{31} = -0.0005579230259798711$$



$$a_{32} = 0.007669732145959915, b_{32} = -0.003959686879886606$$

$$a_{33} = -0.006256136875045252, b_{33} = -0.004566755490351168$$

$$a_{34} = -0.003553802680498653, b_{34} = -0.0006755979057181989$$

$$a_{35} = 1.5195743635847316e - 33, b_{35} = 0.009094568176679736$$

$$a_{36} = 0.00436236088597353, b_{36} = -0.0004918855395621645$$

$$a_{37} = 0.006561005399865466, b_{37} = -0.0034690828700930944$$

$$a_{38} = -0.005499407016535415, b_{38} = -0.0039249666296024815$$

$$a_{39} = -0.003159413834482431, b_{39} = -0.0005800860028377107$$

$$a_{40} = 1.5195743635847268e - 33, b_{40} = 0.007957747154594767$$

$$a_{41} = 0.003778044173238204, b_{41} = -0.00043950225495442116$$

$$a_{42} = 0.005731421240004929, b_{42} = -0.003085957785323703$$

$$a_{43} = -0.004905005087522983, b_{43} = -0.0034408366129256586$$

$$a_{44} = -0.0028423248893797424, b_{44} = -0.0005080735752180709$$

$$a_{45} = 1.5195743635847215e - 33, b_{45} = 0.00707355302630646$$

$$a_{46} = 0.0033308907366752464, b_{46} = -0.00039703351695859266$$

$$a_{47} = 0.0050875680137263376, b_{47} = -0.0027786711713284526$$

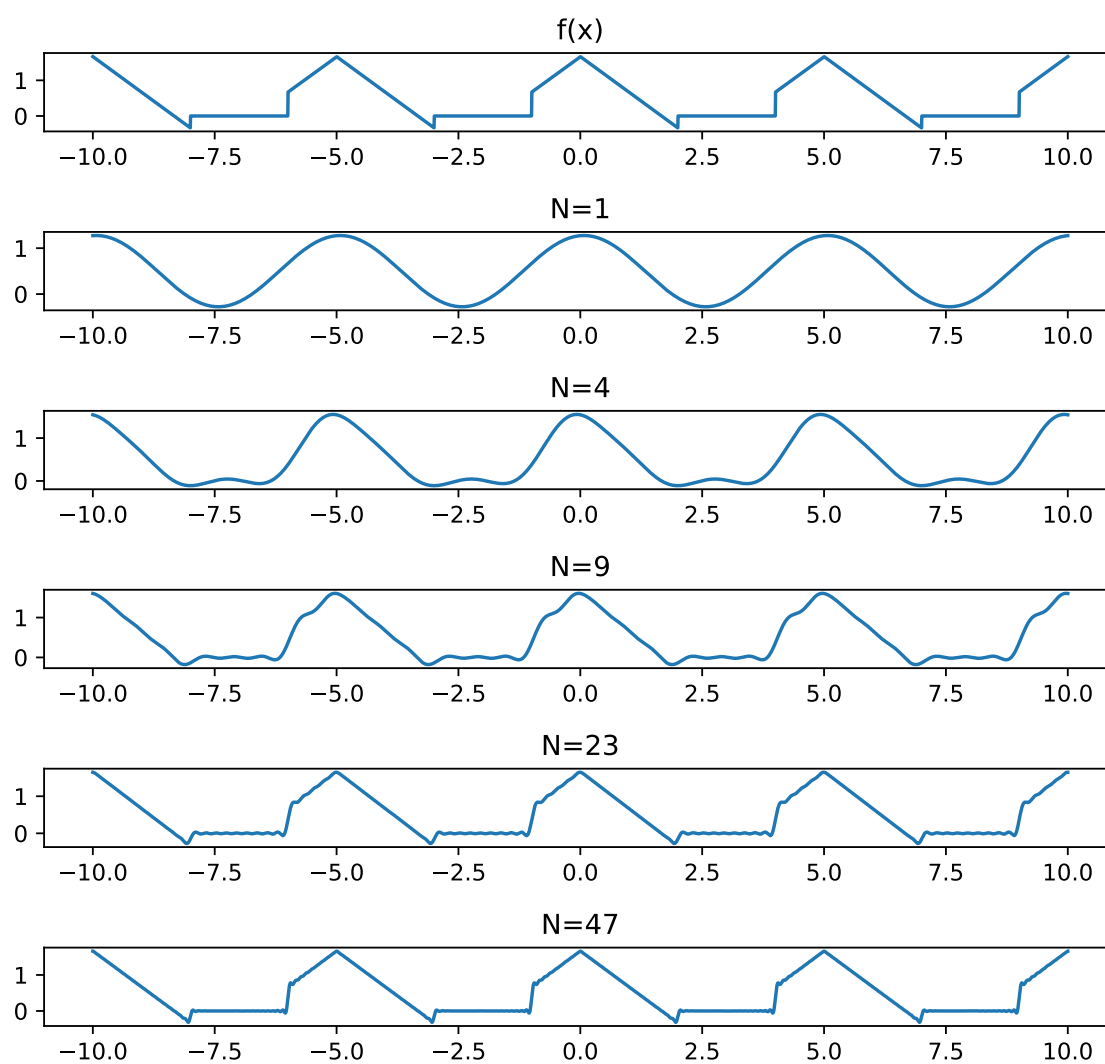
$$a_{48} = -0.004426026511190478, b_{48} = -0.003062743915561243$$

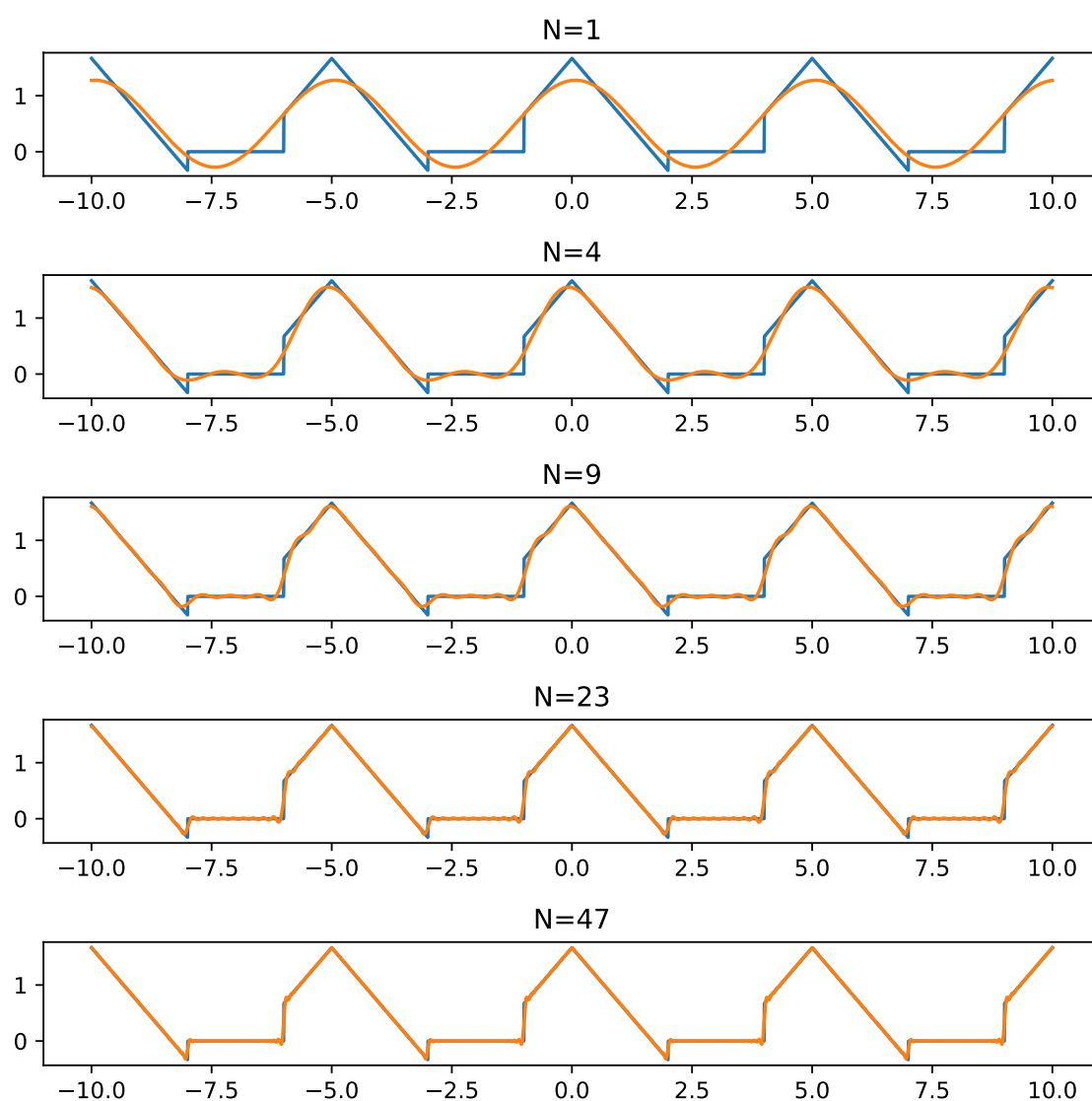


$$a_{49} = -0.0025822630276678576, b_{49} = -0.0004518742494494454$$

$$a_{50} = 1.5195743635847159e - 33, b_{50} = 0.006366197723675813$$

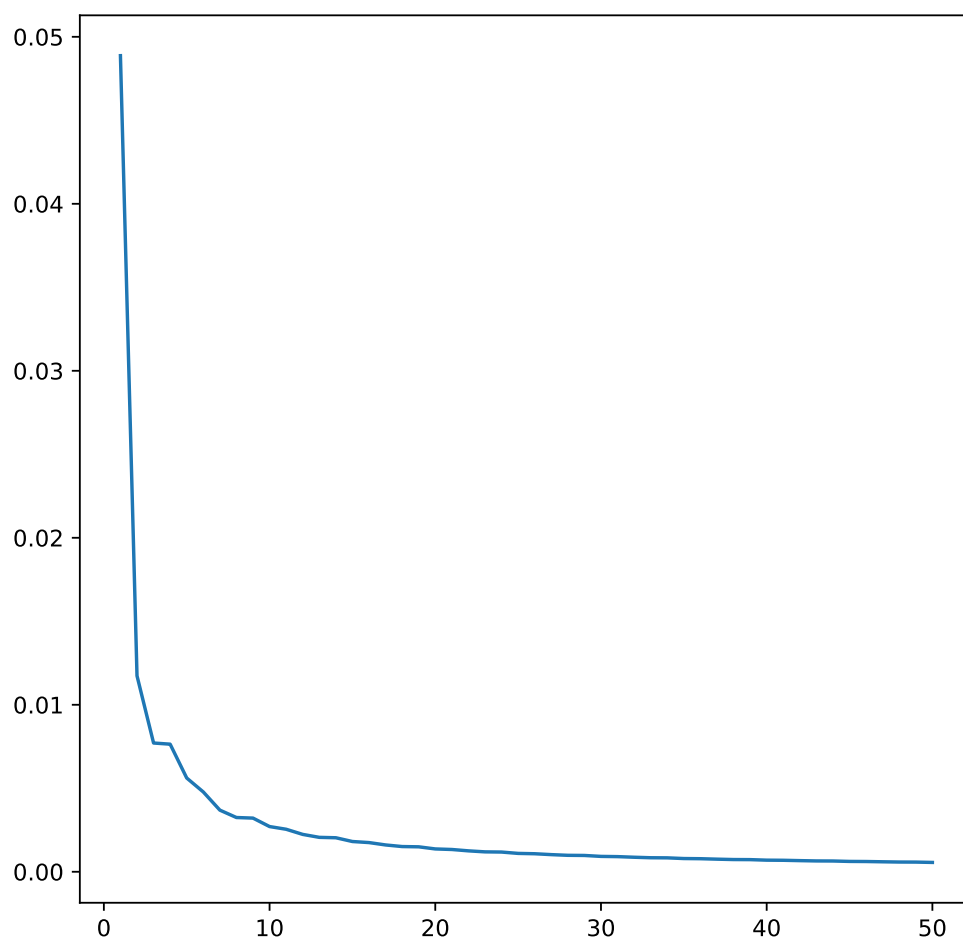
Amirmahdi Namjoo





۳.۶.۱ بخش c

کد این بخش در فایل P1_Q6_c قرار دارد.





۲ تبدیل فوریه

۱.۲ سوال اول

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

۱.۱.۲ بخش a

$$e^{-a|t|} \sin \omega_0 t$$

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a|t|} \sin(\omega_0 t) e^{-j\omega t} dt$$

$$\int_0^{\infty} \sin(\omega_0 t) e^{(-j\omega - a)t} dt + \int_{-\infty}^0 \sin(\omega_0 t) e^{(-j\omega + a)t} dt$$

$$= \int_0^{\infty} e^{-at} \sin(\omega_0 t) (e^{-j\omega t} - e^{j\omega t}) dt$$

$$= -2j \int_0^{\infty} e^{-at} \sin(\omega_0 t) \sin(\omega t) dt$$

$$= j \int_0^{\infty} e^{-at} (\cos((\omega_0 + \omega)t) - \cos((\omega_0 - \omega)t)) dt$$

$$= j(e^{-at} \left(\frac{a \cos(t(\omega_0 - \omega)) + (\omega_0 - \omega) \sin(t(\omega_0 - \omega))}{a^2 + (\omega_0 - \omega)^2} - \frac{a \cos(t(\omega_0 + \omega)) + (\omega_0 + \omega) \sin(t(\omega_0 + \omega))}{a^2 + (\omega_0 + \omega)^2} \right)) \Big|_0^{\infty}$$

با شرط $a < 0$ داریم:

$$= \frac{4a\omega_0\omega j}{(a^2 + \omega_0^2)^2 + 2\omega^2(a - \omega_0)(a + \omega_0) + \omega^4}$$



$$X(j\omega) = \int_{-1}^1 (1 + \cos(\pi t)) e^{-j\omega t} dt$$

$$X(j\omega) = \int_{-1}^1 e^{-j\omega t} dt + \int_{-1}^1 \frac{e^{j\pi t} + e^{-j\pi t}}{2} e^{-j\omega t} dt$$

$$X(j\omega) = \frac{e^{-j\omega t}}{-j\omega} \Big|_{-1}^1 + \frac{1}{2} \left(\frac{e^{j(\pi-\omega)t}}{j(\pi-\omega)} + \frac{e^{-j(\pi+\omega)t}}{-j(\pi+\omega)} \right) \Big|_{-1}^1$$

$$X(j\omega) = \frac{e^{-j\omega} - e^{j\omega}}{-j\omega} + \frac{1}{2} \left(\frac{e^{j(\pi-\omega)} - e^{j(\pi-\omega)}}{j(\pi-\omega)} + \frac{e^{-j(\pi+\omega)} - e^{j(\pi+\omega)}}{-j(\pi+\omega)} \right)$$

$$X(j\omega) = \frac{2}{\omega} \cdot \frac{e^{j\omega} - e^{-j\omega}}{2j} + \frac{1}{\pi - \omega} \cdot \frac{e^{j(\pi-\omega)} - e^{j(\pi-\omega)}}{2j} + \frac{1}{\pi + \omega} \cdot \frac{e^{j(\pi+\omega)} - e^{-j(\pi+\omega)}}{2j}$$

$$X(j\omega) = \frac{2 \sin \omega}{\omega} + \frac{\sin(\pi - \omega)}{\pi - \omega} + \frac{\sin(\pi + \omega)}{\pi + \omega}$$

$$X(j\omega) = \frac{2 \sin \omega}{\omega} + \frac{\sin(\pi - \omega)}{\pi - \omega} + \frac{\sin(\pi + \omega)}{\pi + \omega}$$