Notas de Análisis Matemático IV

Cristo Daniel Alvarado

25 de mayo de 2024

Índice general

Capítulo 1

Transformación de Fourier

La transformada de Fourier de una función de $\mathbb{R}^n$ en $\mathbb{C}$ generaliza en cierta forma la noción de coeficietes de Fourier de funciones periódicas

1.1. Conceptos Fundamentales

Definición 1.1.1
Se define el **producto escalar usual en** $\mathbb{R}^n$ como

$$\langle x|y\rangle = \sum_{k=1}^{n} x_k y_x, \quad \forall x, y \in \mathbb{R}^n$$

en ocasiones también denotado como $(x|y) = \langle x|y\rangle$.

Definición 1.1.2
Sea $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$. Se definen $\mathcal{F}f, \mathcal{F}^*f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{C}$ como

$$\mathcal{F}f(x) = \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} f(y)\, dy \quad \text{y} \quad \mathcal{F}^*f(x) = \int_{\mathbb{R}^n} e^{i\langle x|y\rangle} f(y)\, dy$$

para todo $x \in \mathbb{R}^n$. Las funciones $\mathcal{F}f$ y $\mathcal{F}^*f$ se llaman las **transformaciones de Fourier de** f. Las aplicaciones $\mathcal{F}$ y $\mathcal{F}^*$ de $\mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ en el conjunto de funciones de $\mathbb{R}^n$ en $\mathbb{C}$ se llaman las **transformaciones de Fourier**.

Observación 1.1.1
Se tiene lo siguiente:

i. Los operadores $\mathcal{F}$ y $\mathcal{F}^*$ son lineales de $\mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ en el espacio de funciones de $\mathbb{R}^n$ en $\mathbb{C}$.

ii. Las funciones $\mathcal{F}f(x)$ y $\mathcal{F}^*f(x)$ están definidas para todo $x \in \mathbb{R}^n$ si y sólo si $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$.

iii. En caso de existir, se tiene que $\mathcal{F}f(x) = \mathcal{F}^*f(-x)$.

Demostración:
De (i): Es claro que si $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ entonces $\mathcal{F}f(x)$ y $\mathcal{F}^*f(x)$ están definidas para todo $x \in \mathbb{R}^n$. Para la recíproca, en particular están definidas para $x = \vec{0}$, es decir que

$$\mathcal{F}f\left(\vec{0}\right) = \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle\vec{0}|y\rangle} f(y)\, dy = \int_{\mathbb{R}^n} e^{0} f(y)\, dy = \int_{\mathbb{R}^n} f(y)\, dy < \infty$$

luego $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$.

De (ii): Es inmediata. ■

Definición 1.1.3
Sea $f \in \mathcal{L}_1([0,\infty[, \mathbb{C})$. Se definen

$$\mathcal{F}_c f(x) = \int_0^\infty f(y)\cos xy\, dy \quad \text{y} \quad \mathcal{F}_s f(x) = \int_0^\infty f(y)\sin xy\, dy$$

para todo $x \in \mathbb{R}$. Las funciones $\mathcal{F}_c f$ y $\mathcal{F}_s f$ se llaman **las trasnformadas coseno y seno de Fourier de** f.

Definición 1.1.4
Sea $f : [0,\infty[\to \mathbb{C}$ una función. Se definen las funciones f^P y f^I de $\mathbb{R}$ en $\mathbb{C}$ como

$$f^P(x) = \begin{cases} f(x) & \text{si} \quad x \geqslant 0 \\ f(-x) & \text{si} \quad x < 0 \end{cases}$$

y,

$$f^I(x) = \begin{cases} f(x) & \text{si} \quad x \geqslant 0 \\ -f(-x) & \text{si} \quad x < 0 \end{cases}$$

Proposición 1.1.1
Sea $f \in \mathcal{L}_1([0,\infty[, \mathbb{C})$. Se tiene

$$\mathcal{F}f^P(x) = 2\mathcal{F}_c f(x) \quad \text{y} \quad \mathcal{F}f^I(x) = -2i\mathcal{F}_2 f(x)$$

para todo $x \in \mathbb{R}$.

Demostración:
Sea $x \in \mathbb{R}$, entonces

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}f^P(x) &= \int_{\mathbb{R}} f^P(y)e^{-i\langle x|y\rangle}\, dy \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} f^P(y)e^{-ixy}\, dy \\
&= \int_{-\infty}^{0} f^P(y)e^{-ixy}\, dy + \int_0^\infty f^P(y)e^{-ixy}\, dy \\
&= \int_{-\infty}^{0} f(-y)e^{-ixy}\, dy + \int_0^\infty f(y)e^{-ixy}\, dy \\
&= \int_0^\infty f(y)e^{ixy}\, dy + \int_0^\infty f(y)e^{-ixy}\, dy \\
&= \int_0^\infty f(y)\left[e^{ixy} + \overline{e^{ixy}}\right]\, dy \\
&= \int_0^\infty f(y)\left[2\Re(e^{ixy})\right]\, dy \\
&= \int_0^\infty 2f(y)\cos xy\, dy \\
&= 2\int_0^\infty f(y)\cos xy\, dy \\
&= 2\mathcal{F}_c f(x)
\end{aligned}$$

y,

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}f^I(x) &= \int_{\mathbb{R}} f^I(y)e^{-ixy}\,dy \\
&= \int_{-\infty}^{0} f^I(y)e^{-ixy}\,dy + \int_0^{\infty} f^I(y)e^{-ixy}\,dy \\
&= \int_{-\infty}^{0} (-f(-y))e^{-ixy}\,dy + \int_0^{\infty} f(y)e^{-ixy}\,dy \\
&= -\int_0^{\infty} f(y)e^{ixy}\,dy + \int_0^{\infty} f(y)e^{-ixy}\,dy \\
&= \int_0^{\infty} f(y)\left[-e^{ixy} + e^{-ixy}\right]\,dy \\
&= \int_0^{\infty} f(y)\left[-\cos xy - i\sin xy + \cos(-xy) + i\sin(-xy)\right]\,dy \\
&= \int_0^{\infty} f(y)\left[-2i\sin xy\right]\,dy \\
&= -2i\int_0^{\infty} f(y)\sin xy\,dy \\
&= -2i\mathcal{F}_s f(x)
\end{aligned}$$

lo que prueba el resultado. ■

Corolario 1.1.1
Sea $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R},\mathbb{C})$.

I. Si f es par, entonces $\mathcal{F}f(x) = 2\int_0^{\infty} f(y)\cos xy\,dy$ para todo $x \in \mathbb{R}$.

II. Si f es impar, entonces $\mathcal{F}f(x) = -2i\int_0^{\infty} f(y)\sin xy\,dy$ para todo $x \in \mathbb{R}$.

Ejemplo 1.1.1
Se tiene lo siguiente:

I. Sea $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ la función $f = \chi_I$ donde I es un intervalo con extremos $a < b$ en $\mathbb{R}$. Entonces,

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}f(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} \chi_I(y)e^{-ixy}\,dy \\
&= \int_a^b e^{-ixy}\,dy \\
&= \begin{cases} \frac{e^{-ixb}-e^{-ixa}}{-ix} & \text{si} \quad x \neq 0 \\ b-a & \text{si} \quad x = 0 \end{cases}
\end{aligned}$$

En particular, si $a > 0$ se tiene que

$$\mathcal{F}\chi_[-a,a](x) = \begin{cases} \frac{2\sin ax}{x} & \text{si} \quad x \neq 0 \\ 2a & \text{si} \quad x = 0 \end{cases}$$

Como $\mathcal{F}\chi_[-a,a]$ no es integrable en $\mathbb{R}$ se concluye que, en general, la transformada de Fourier de una función integrable no necesariamente es integrable.

II. Sea $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ la función

$$f(x) = e^{-k|x|}, \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

donde $k > 0$. Como f es integrable, entonces

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}f(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-k|y|} e^{-ixy}\, dy \\
&= \int_{-\infty}^{0} e^{ky} e^{-ixy}\, dy + \int_{0}^{\infty} e^{-ky} e^{-ixy}\, dy \\
&= \int_{0}^{\infty} e^{-ky} e^{ixy}\, dy + \int_{0}^{\infty} e^{-ky} e^{-ixy}\, dy \\
&= \int_{0}^{\infty} e^{-ky} e^{(-k+ix)y}\, dy + \int_{0}^{\infty} e^{-ky} e^{(-k-ix)y}\, dy \\
&= \frac{-1}{-k+ix} + \frac{-1}{-k-ix} \\
&= \frac{k+ix+k-ix}{k^2+x^2} \\
&= \frac{2k}{k^2+x^2}
\end{aligned}$$

Ejemplo 1.1.2
Sea $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ la función

$$f(x) = e^{-kx^2}, \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

donde $k > 0$. Como f es par se tiene que

$$\mathcal{F}f(x) = 2 \int_{0}^{\infty} e^{-ky^2} \cos xy\, dy$$

Sea $g(x) = \int_0^\infty e^{-ky^2} \cos xy\, dy$ para todo $x \in \mathbb{R}$. Se afirma que

$$g'(x) = -\int_{0}^{\infty} y e^{-ky^2} \sin xy\, dy, \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

En efecto, observemos que

$$\left| y e^{-ky^2} \sin xy \right| \leqslant y e^{-ky^2}, \quad \forall y \geqslant 0$$

donde la función de la derecha es integrable e independiente de x (se nota fácilmente que una de sus antiderivadas es $y \mapsto -\frac{1}{2k} e^{-ky^2}$, por el T.F.C. II evaluando en 0 e ∞ se obtiene que la función original es integrable en $[0, \infty[$). Por el Teorema de derivación se sigue que

$$g'(x) = -\int_{0}^{\infty} y e^{-ky^2} \sin xy\, dy, \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

Veamos ahora que

$$\begin{aligned}
g'(x) &= \int_0^\infty ye^{-ky^2}\sin xy\,dy \\
&= -\left[-\frac{1}{2k}e^{-ky^2}\sin xy\Big|_0^\infty + \frac{1}{2k}\int_0^\infty xe^{-ky^2}\cos xy\,dy\right] \\
&= -\left[0 - 0 + \frac{x}{2k}\int_0^\infty e^{-ky^2}\cos xy\,dy\right] \\
&= -\frac{x}{2k}\int_0^\infty e^{-ky^2}\cos xy\,dy \\
&= -\frac{x}{2k}g(x), \quad \forall x\in\mathbb{R}
\end{aligned}$$

Luego,

$$\begin{aligned}
g'(x) + \frac{x}{2k}g(x) = 0, &\quad \forall x\in\mathbb{R} \\
\Rightarrow e^{\frac{x^2}{4k}}\left(g'(x) + \frac{x}{2k}g(x)\right) = 0, &\quad \forall x\in\mathbb{R} \\
\Rightarrow \frac{d}{dx}\left(e^{\frac{x^2}{4k}}g(x)\right)(x_0) = 0, &\quad \forall x_0\in\mathbb{R} \\
\Rightarrow e^{\frac{x^2}{4k}}g(x) = c, &\quad \forall x\in\mathbb{R}
\end{aligned}$$

En particular,

$$\begin{aligned}
c &= g(0) \\
&= \int_0^\infty e^{-ky^2}\,dy \\
&= \frac{1}{\sqrt{k}}\int_0^\infty e^{-u^2}\,du \\
&= \frac{1}{2}\cdot\sqrt{\frac{\pi}{k}}
\end{aligned}$$

Por ende,

$$g(x) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{k}}e^{-\frac{x^2}{4k}}, \quad \forall x\in\mathbb{R}$$

De donde se sigue que

$$\mathcal{F}f(x) = \sqrt{\frac{\pi}{k}}e^{-\frac{x^2}{4k}}, \quad \forall x\in\mathbb{R}$$

En particular, si $k=\frac{1}{2}$ entonces $f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}$ para todo $x\in\mathbb{R}$ y,

$$\mathcal{F}f(x) = \sqrt{2\pi}e^{-\frac{x^2}{2}} = \sqrt{2\pi}f(x)$$

es decir que f es un vector propio del operador transformada de Fourier.

Proposición 1.1.2
Sea $f\in\mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n,\mathbb{C})$.

I. Si $g(x) = e^{i\langle a|y\rangle}f(x)$ para todo $x\in\mathbb{R}^n$, entonces

$$\mathcal{F}g(x) = \mathcal{F}f(x-a), \quad \forall x\in\mathbb{R}^n$$

II. Si $g(x) = f(x-a)$ para todo $x \in \mathbb{R}^n$, entonces

$$\mathcal{F}g(x) = e^{-i\langle x|a\rangle}\mathcal{F}f(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

III. Si $g(x) = \overline{f(-x)}$ para todo $x \in \mathbb{R}^n$, entonces

$$\mathcal{F}g(x) = \overline{\mathcal{F}f(x)}, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

IV. Sea $\lambda \in \mathbb{R}\setminus\{0\}$. Si $g(x) = f(\frac{x}{\lambda})$ para todo $x \in \mathbb{R}^n$, entonces

$$\mathcal{F}g(x) = |\lambda|^n\, \mathcal{F}f(\lambda x), \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

Demostración:
De (i): Veamos que

$$\begin{aligned}\mathcal{F}g(x) &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} g(y)\, dy \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} e^{i\langle a|y\rangle} f(y)\, dy \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x-a|y\rangle} f(y)\, dy \\ &= \mathcal{F}f(x-a)\end{aligned}$$

para todo $x \in \mathbb{R}^n$.
De (ii): Veamos que

$$\begin{aligned}\mathcal{F}g(x) &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} g(y)\, dy \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} f(y-a)\, dy \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|u+a\rangle} f(u)\, du \\ &= e^{-i\langle x|a\rangle}\mathcal{F}f(x)\end{aligned}$$

para todo $x \in \mathbb{R}^n$.
De (iii): Veamos que

$$\begin{aligned}\mathcal{F}g(x) &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} \overline{f(-y)}\, dy \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{i\langle x|y\rangle} \overline{f(y)}\, dy \\ &= \overline{\int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} f(y)\, dy} \\ &= \overline{\mathcal{F}f(x)}\end{aligned}$$

para todo $x \in \mathbb{R}^n$.

De (iv): Veamos que

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}g(x) &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} g(y)\, dy \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} f\left(\frac{y}{\lambda}\right)\, dy, \text{ haciendo el cambio de variable } u = \frac{y}{\lambda} \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|\lambda u\rangle} f(u)\ |\lambda|^n\, du \\
&= |\lambda|^n \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle \lambda x|u\rangle} f(u)\, du \\
&= |\lambda|^n\, \mathcal{F}f(\lambda x)
\end{aligned}$$

para todo $x \in \mathbb{R}^n$. ■

Teorema 1.1.1
Si $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$, entonces,

$$|\mathcal{F}f(x)| \leqslant \mathcal{N}_1(f), \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

Así pues, $\mathcal{F}f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{C}$ es una función acotada. Si $\mathcal{B}(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ denota al espacio de funciones acotadas de $\mathbb{R}^n$ en $\mathbb{C}$ provisto de la norma uniforme, entonces $\mathcal{F}\cdot$ es una aplicación lineal continua de $L_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ en $\mathcal{B}(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ tal que $\|\mathcal{F}\cdot\| = 1$.

Demostración:
Para todo $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$, se tiene que

$$\begin{aligned}
|\mathcal{F}f(x)| &= \left|\int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} f(y)\, dy\right| \\
&\leqslant \int_{\mathbb{R}^n} |f(y)|\ dy \\
&= \mathcal{N}_1(f), \quad \forall x \in \mathbb{R}^n
\end{aligned}$$

Notemos también que $\|\mathcal{F}\cdot\| \leqslant 1$.

Para probar la otra desiguladad se busca una función $P \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ tal que $\mathcal{N}_\infty(\mathcal{F}P) = \mathcal{N}_1(P) > 0$. Por ejemplo, la función $P : \mathbb{R}^n \to \mathbb{C}$ dada por:

$$P(x) = e^{-\sum_{k=1}^n |x_k|}, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

satisface

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}P(x) &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} P(y)\, dy \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} P(y)\, dy \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-|y_1| - ix_1y_1} \cdots e^{-|y_n| - ix_ny_n}\, dy_1 \cdots dy_n \\
&= \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-|y_1| - ix_1y_1}\, dy_1\right) \cdots \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-|y_n| - ix_ny_n}\, dy_n\right)
\end{aligned}$$

Se sabe por ejemplos anteriores que la transformada de $t \mapsto e^{-|t|}$ es $\frac{2}{1+t^2}$, para todo $t \in \mathbb{R}$, así pues,

$$\mathcal{F}P(x) = \frac{2^n}{(1 + x_2^2) \cdots (1 + x_n^2)}, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

de donde,

$$\mathcal{N}_\infty\left(\mathcal{F}P\right) = 2^n$$

Por otra parte,

$$\begin{aligned}
\mathcal{N}_1\left(P\right) &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-\sum_{k=1}^n |x_k|}\,dx_1\cdots dx_n \\
&= \left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{-|t|}\,dt\right]^n \\
&= 2^n\left[\int_0^{\infty} e^{-|t|}\,dt\right] \\
&= 2^n
\end{aligned}$$

Por tanto,

$$\begin{aligned}
\mathcal{N}_1\left(P\right) &= \mathcal{N}_\infty\left(\mathcal{F}P\right) \\
&\leqslant \|\mathcal{F}\cdot\|\mathcal{N}_1\left(P\right) \\
\Rightarrow 1 &\leqslant \|\mathcal{F}\cdot\|
\end{aligned}$$

por tanto, de lo anterior se deduce que $\|\mathcal{F}\cdot\| = 1$. ■

Proposición 1.1.3
Si $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$, entonces $\mathcal{F}f$ es uniformemente continua en $\mathbb{R}^n$.

Demostración:
Basta probar que si $\{x_\nu\}_{\nu=1}^\infty$ y $\{y_\nu\}_{\nu=1}^\infty$ son dos sucesiones en $\mathbb{R}^n$ tales que $\lim_{\nu\to\infty}\|x_\nu - y_\nu\| = 0$, entonces

$$\lim_{\nu\to\infty}|\mathcal{F}f(x_\nu) - \mathcal{F}f(y_\nu)| = 0$$

Considere entonces dos sucesiones que cumplan lo anterior. Se tiene

$$\begin{aligned}
|\mathcal{F}f(x_\nu) - \mathcal{F}f(y_\nu)| &= \left|\int_{\mathbb{R}^n}\left(e^{-i\langle x_\nu|z\rangle} - e^{-i\langle y_\nu|z\rangle}\right)f(z)\,dz\right| \\
&= \left|\int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x_\nu|z\rangle}\left(1 - e^{-i\langle y_\nu - x_\nu|z\rangle}\right)f(z)\,dz\right| \\
&\leqslant \int_{\mathbb{R}^n}\left|\left(1 - e^{-i\langle y_\nu - x_\nu|z\rangle}\right)\right||f(z)|\,dz
\end{aligned}$$

donde

$$\lim_{\nu\to\infty}\left|1 - e^{-i\langle y_\nu - x\nu|z\rangle}\right||f(z)| = 0, \quad \forall z \in \mathbb{R}^n$$

y, además

$$\left|1 - e^{-i\langle y_\nu - x\nu|z\rangle}\right||f(z)| \leqslant 2\,|f(z)|\,, \quad \forall z \in \mathbb{R}^n$$

donde la función de la derecha es integrable e independiente de ν. Por Lebesgue se sigue que

$$\lim_{\nu\to\infty}|\mathcal{F}f(x_\nu) - \mathcal{F}f(y_\nu)| = 0$$

así, $\mathcal{F}f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{C}$ es una función uniformemente continua. ■

Observación 1.1.2
$\mathcal{F}f$ es una función uniformemente continua y acotada en $\mathbb{R}^n$ si $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$.

Teorema 1.1.2 (**Teorema de Riemman-Lebesgue**)
Si $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$, entonces

$$\lim_{|x|\to\infty} \mathcal{F}f(x) = 0$$

Demostración:
Se probará por casos:

I. Sea $P = I_1 \times \cdot \times I_n \subseteq \mathbb{R}^n$ un rectángulo acotado en $\mathbb{R}^n$ donde I_k es un intervalo de extremos $a_k \leqslant b_k$ para todo $k \in [\![1, n]\!]$. Se considera el caso en que $f = \chi_P$. En particular, notemos que

$$f(x) = \chi_{I_1}(x_1) \cdots \chi_{I_n}(x_n), \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

Entonces,

$$\begin{aligned}\mathcal{F}f(x) = \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|z\rangle} f(z)\, dz \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-ix_1z_1}\chi_{I_1}(z_1)\cdots e^{-ix_nz_n}\chi_{I_n}(z_n)\, dz_1\cdots dz_n \\ &= \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ix_1z_1}\chi_{I_1}(z_1)\, dz_1\right)\cdots\left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ix_nz_n}\chi_{I_n}(z_n)\, dz_n\right)\end{aligned}$$

luego,

$$\mathcal{F}f(x) = \varphi_1(x_1)\cdots\varphi_n(x_n), \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

donde

$$\varphi_k(x_k) = \begin{cases} \frac{e^{-ix_kb_k} - e^{-ix_ka_k}}{-ik}, & \text{si} \quad x_k \neq 0 \\ b_k - a_k & \text{si} \quad x_k = 0 \end{cases}$$

para $k \in [\![1, n]\!]$. Es claro que $\lim_{x_k\to\infty} \varphi_k(x_k) = 0$ para todo $k \in [\![1, n]\!]$. Por otra parte,

$$\begin{aligned}|\varphi_k(x_k)| &\leqslant |\mathcal{F}\chi_{I_k}(x_k)| \\ &\leqslant \mathcal{N}_1(\chi_{I_k}) \\ &= b_k - a_k\end{aligned}$$

para $k \in [\![1, n]\!]$. Sea

$$c = \max_{1\leqslant k\leqslant n}\{b_k - a_k\}$$

Dado $\varepsilon > 0$ existe $R > 0$ tal que para todo $k \in [\![1, n]\!]$ es tiene

$$|x_k| > R \Rightarrow |\varphi_k(x_k)| < \varepsilon$$

Si se toma la norma cúbica $\|\cdot\|$ de $\mathbb{R}^n$, al suponer que $\|x\| > R$ se tendrá que $|x_k| > R$ para algún $k \in [\![1, n]\!]$, luego

$$\|x\| > R \Rightarrow |\mathcal{F}\chi_P(x)| = |\varphi_1(x_1)\cdots\varphi_n(x_n)| \leqslant c^{n-1}\varepsilon$$

Así pues, el Teorema es cierto para $f = \chi_P$. Claramente por linealidad de la transformación de Fourier el Teorema sigue siendo cierto si f es una función escalonada en $\mathbb{R}^n$.

II. Sea $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ y tomemos $\varepsilon > 0$. Por la densidad de $\mathcal{E}(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ en $\mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$, existe $\varphi \in \mathcal{E}(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ tal que

$$\mathcal{N}_1(f - \varphi) < \frac{\varepsilon}{2}$$

Entonces,

$$\begin{aligned}
|\mathcal{F}f(x)| &= |\mathcal{F}f(x) - \mathcal{F}\varphi(x)| + |\mathcal{F}\varphi(x)| \\
&= |\mathcal{F}(f-\varphi)(x)| + |\mathcal{F}\varphi(x)| \\
&\leqslant \mathcal{N}_1(f-\varphi) + |\mathcal{F}\varphi(x)|, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n \\
&< \frac{\varepsilon}{2} + |\mathcal{F}\varphi(x)|, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n
\end{aligned}$$

Por tanto, de (i) existe $R > 0$ tal que

$$\|x\| > R \Rightarrow |\mathcal{F}\varphi(x)| < \frac{\varepsilon}{2}$$

de donde se sigue que

$$\|x\| > R \Rightarrow |\mathcal{F}f(x)| < \frac{\varepsilon}{2} + |\mathcal{F}\varphi(x)| < \varepsilon$$

lo que prueba el resultado.

■

Teorema 1.1.3
Si $f, g \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$, entonces $\mathcal{F}(f * g) = (\mathcal{F}f)(\mathcal{F}g)$.

Demostración:
Sean $f, g \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$. Se tiene que

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}(f*g)(x) &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} f*g(y)\,dy \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle}\,dy \int_{\mathbb{R}^n} f(z)g(y-z)\,dz
\end{aligned}$$

ya se sabe que $(y,z) \mapsto f(z)g(y-z)e^{-i\langle x|y\rangle}$ es integrable en $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$ para todo $x \in \mathbb{R}^n$. Por Fubini:

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}(f*g)(x) &= \int_{\mathbb{R}^n} f(z)\,dz \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} g(y-z)\,dy, \text{ haciendo el cambio de variable } y = u+z \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} f(z)\,dz \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|u+z\rangle} g(u)\,du \\
&= \left(\int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|z\rangle} f(z)\,dz\right)\left(\int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} g(y)\,dy\right) \\
&= (\mathcal{F}f(x))(\mathcal{F}g(x))
\end{aligned}$$

lo que prueba el resultado. ■

Teorema 1.1.4
Sea $\mathcal{C}_0(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ el álgebra de Banach de las funciones de $\mathbb{R}^n$ en $\mathbb{C}$ continuas y nulas en el infinito provisto de la norma uniforme. Entonces la aplicación $\mathcal{F}\cdot : L_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C}) \to \mathcal{C}_0(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ es un homomorfismo continuo entre ambas álgebras de Banach.

La norma de $\mathcal{F}\cdot$ considerada como aplicación lineal es $\|\mathcal{F}\cdot\| = 1$.

Demostración:
Es un resumen de las propiedades anteriores. ■

Observación 1.1.3
Más adelante se verá que $\mathcal{F}\cdot$ es inyectiva pero no es suprayectiva.

Proposición 1.1.4
Sea $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{C}$ y $r \in \mathbb{N}$. Se supone que $x \mapsto x_1^{m_1} \cdots x_m^{m_n} f(x)$ e sintegrable en R^n para toda colección $m_1, ..., m_n \in \mathbb{N}$ tales que $m_1 + \cdots + m_n \leqslant r$. Entonces, $\mathcal{F}f$ es de clase C^r en $\mathbb{R}^n$. Si $k \in [\![1, k]\!]$ y $\alpha_1, ..., \alpha_k \in [\![1, n]\!]$ se tiene que

$$\partial_{\alpha_1} \cdots \partial_{\alpha_k} \mathcal{F}f = \mathcal{F}g$$

donde $g(x) = (-ix_{\alpha_1})(-ix_{\alpha_2}) \cdots (-ix_{\alpha_k})f(x)$.

Demostración:
Se tiene

$$\mathcal{F}f(x) = \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i(x_1y_1+\cdots+x_ny_n)} f(y)\, dy$$

Al aplicar el operador $\partial_{\alpha_1} \cdots \partial_{\alpha_k}$ a $x \mapsto e^{-i(x_1y_1+\cdots+x_ny_n)} f(y)$ obtenemos

$$(-iy_{\alpha_i}) \cdots (-iy_{\alpha_k}) f(y)$$

Esta función en valor absoulto es menor o igual a

$$|y_{\alpha_1} \cdots y_{\alpha_k} f(y)|$$

la cual por hipótesis es integrable en $\mathbb{R}^n$ e independiente de x. Por el Teorema de derivación parcial de funciones definidas por integrales, se tiene que

$$\partial_{\alpha_1} \cdots \partial_{\alpha_k} \mathcal{F}f = \mathcal{F}g$$

y, además $\mathcal{F}f$ es de clase C^r en $\mathbb{R}^n$. ■

Observación 1.1.4
Si $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{K})$ y existe $\lim_{x\to\infty} f(x)$, necesariamente

$$\lim_{x\to\infty} f(x) = 0$$

Proposición 1.1.5
Sea $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ función de clase C^r en $\mathbb{R}^n$. Se supone que f y todas sus derivadas parciales hasta el orden r (inclusive) son integrables. Si $k \in [\![1, r]\!]$ y $\alpha_1, ..., \alpha_k \in [\![1, n]\!]$, entonces

$$\mathcal{F}(\partial_{\alpha_1} \cdots \partial_{\alpha_k} f)(x) = (ix_{\alpha_1}) \cdots (ix_{\alpha_k}) \mathcal{F}f(x)$$

Demostración:
Basta probar que

$$\mathcal{F}(\partial_j f)(x) = (ix_j)\mathcal{F}f(x)$$

con $j \in [\![1, n]\!]$ pues el resto se sigue por inducción. Se tiene que

$$\begin{aligned}\mathcal{F}(\partial_j f)(x) - (ix_j)\mathcal{F}f(x) &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle}[\partial_j f(y) - ix_j f(y)]\, dy \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\partial}{\partial y_j}\left[e^{-i\langle x|y\rangle} f(y)\right]\, dy\end{aligned}$$

de donde, por el Teorema de Fubini

$$\mathcal{F}(\partial_j f)(x) - (ix_j)\mathcal{F}f(x) = \int_{\mathbb{R}^{n-1}} dy_1 \cdots dy_{j-1} dy_{j+1} \cdots dy_n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial y_j} \left[e^{-i\langle x|y\rangle} f(y) \right] dy_j$$

El Teorema de Fubini asegura que existe un conjunto despreciable $Z_1 \subseteq \mathbb{R}^{n-1}$ tal que para todo $y' = (y_1, ..., y_{j-1}, y_{j+1}, ..., y_n) \in \mathbb{R}^{n-1} \backslash Z_1$ existe la integral

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial y_j} \left[e^{-i\langle x|y\rangle} f(y) \right] dy_j$$

o sea que $y_j \mapsto \frac{\partial}{\partial y_j} \left[e^{-i\langle x|y\rangle} f(y) \right]$ es integrable en $\mathbb{R}$. Por el 2° T.F.C. para intervalos abiertos

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial y_j} \left[e^{-i\langle x|y\rangle} f(y) \right] dy_j = \lim_{y_j \to \infty} e^{-i\langle x|y\rangle} f(y) - \lim_{y_j \to -\infty} e^{-i\langle x|y\rangle} f(y)$$

puesto que la función $y \mapsto e^{-i\langle x|y\rangle} f(y)$ es integrable en $\mathbb{R}^n$, por el Teorema de Fubini existe un conjunto $Z_2 \subseteq \mathbb{R}^{n-1}$ tal que para todo $y' = (y_1, ..., y_{j-1}, y_{j+1}, ..., y_n) \in \mathbb{R}^{n-1} \backslash Z_2$, la función $y_j \mapsto e^{-i\langle x|y\rangle} f(y)$ es integable en $\mathbb{R}$. Sea $Z = Z_1 \cup Z_2 \subseteq \mathbb{R}^{n-1}$. Por la última observación, los límites a la derecha de la ecuación anterior deben ser 0 para todo $y' = (y_1, ..., y_{j-1}, y_{j+1}, ..., y_n) \in \mathbb{R}^{n-1} \backslash Z$. Por tanto,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial y_j} \left[e^{-i\langle x|y\rangle} f(y) \right] dy_j = 0$$

para todo $y' = (y_1, ..., y_{j-1}, y_{j+1}, ..., y_n) \in \mathbb{R}^{n-1} \backslash Z$. Se sigue entonces que

$$\mathcal{F}(\partial_j f)(x) - (ix_j)\mathcal{F}f(x) = 0$$

lo que prueba el resultado. ■

1.2. Teoremas de Transferencia e Inversión

Teorema 1.2.1 (**Teorema de Transferencia**)
Sean $f, g \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{K})$. Entonces

$$\int_{\mathbb{R}^n} f \cdot \mathcal{F}g = \int_{\mathbb{R}^n} \mathcal{F}f \cdot g$$

y,

$$\int_{\mathbb{R}^n} f \cdot \mathcal{F}^* g = \int_{\mathbb{R}^n} \mathcal{F}^* f \cdot g$$

Demostración:
Como $\mathcal{F}f$ y $\mathcal{F}g$ son continuas acotadas en $\mathbb{R}^n$ y $f, g \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{K})$, ambas integrales existen (pues en particular $\mathcal{F}f, \mathcal{F}g \in \mathcal{L}_\infty(\mathbb{R}^n, \mathbb{K})$). Se tiene

$$\int_{\mathbb{R}^n} \mathcal{F}f(x) \cdot g(x)\, dx = \int_{\mathbb{R}^n} g(x)\, dx \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} f(y)\, dy$$

ya se sabe que $(x, y) \mapsto e^{-i\langle x|y\rangle} g(x) f(y)$ es integrable en $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$ (pues en módulo es igual al módulo del producto tensorial de g y f, siendo éste integrable). Por Fubini podemos invertir el orden de integración, lo que resulta:

$$
\begin{aligned}
\int_{\mathbb{R}^n} \mathcal{F}f(x) \cdot g(x)\, dx &= \int_{\mathbb{R}^n} f(y)\, dy \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle x|y\rangle} g(x)\, dx \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} f(y)\, dy \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle y|x\rangle} g(x)\, dx \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} f(y) \cdot \mathcal{F}g(y)\, dy \\
\Rightarrow \int_{\mathbb{R}^n} f \cdot \mathcal{F}g &= \int_{\mathbb{R}^n} \mathcal{F}f \cdot g
\end{aligned}
$$

para la $\mathcal{F}^*\cdot$ el procedimiento es análogo. ■

Lema 1.2.1 (**Efecto de la transformación de Fourier sobre sucesiones de Dirac**)
Sea $\{\rho_\nu\}_{\nu=1}^{\infty}$ una sucesión de Dirac en $\mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$. Defina

$$h_\nu = \mathcal{F}\rho_\nu, \quad \forall \nu \in \mathbb{N}$$

Entonces,

I. $|h_\nu(x)| \leqslant 1$ para todo $x \in \mathbb{R}^n$.

II. $\lim_{\nu\to\infty} h_\nu(x) = 1$, para todo $x \in \mathbb{R}^n$.

Demostración:
De (i): Se tiene

$$
\begin{aligned}
|h_\nu(x)| &= |\mathcal{F}\rho_\nu(x)| \\
&\leqslant \mathcal{N}_1(\rho_\nu) \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} \rho_\nu \\
&= 1
\end{aligned}
$$

para todo $x \in \mathbb{R}^n$.

De (ii): Sea $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{K})$. Entonces $\{f * \rho_\nu\}_{\nu=1}^{\infty}$ es una sucesión en $\mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{K})$ que converge en promedio a f. Como la transformación de Fourier es un homomorfismo continuo del álgebra de Banach $L_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{K})$ en $\mathcal{C}_0(\mathbb{R}^n, \mathbb{K})$, se debe tener que

$$\lim_{\nu\to\infty} \mathcal{F}(f * \rho_\nu) = \mathcal{F}f \text{ uniformemente en } \mathbb{R}^n$$

pero,

$$\mathcal{F}(f * \rho_\nu) = \mathcal{F}f \cdot \mathcal{F}\rho_\nu = h_\nu \mathcal{F}f$$

es decir,

$$
\begin{aligned}
\lim_{\nu\to\infty} h_\nu \mathcal{F}f &= \mathcal{F}f \text{ uniformemente en } \mathbb{R}^n \\
\Rightarrow \mathcal{F}f \lim_{\nu\to\infty} h_\nu &= \mathcal{F}f \text{ uniformemente en } \mathbb{R}^n
\end{aligned}
$$

Fijando f de tal suerte que $\mathcal{F}f(x) \neq 0$ para todo $x \in \mathbb{R}^n$ se concluye que

$$\lim_{\nu\to\infty} h_\nu(x) = 1$$

(por ejemplo, tome $f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}$). ■

Observación 1.2.1
Si $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$, entonces no necesariamente su transformada de Fourier es integrable. Por ejemplo

$$\mathcal{F}\chi_{[-1,1]} = \begin{cases} \frac{2\sin x}{x} & \text{si} \quad x \neq 0 \\ 2 & \text{si} \quad x = 0 \end{cases}$$

es continua, nula en el infinito pero no es integrable en $\mathbb{R}$.

Teorema 1.2.2 (Teorema de Inversión de Fourier)
Si $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ es tal que $\mathcal{F}f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$, entonces

$$\mathcal{F}^*(\mathcal{F}f) = \mathcal{F}(\mathcal{F}^*f) = (2\pi)^n f \text{ c.t.p. en } \mathbb{R}^n$$

Si además f es continua en $\mathbb{R}^n$, la fórmula es válida en todo punto de $\mathbb{R}^n$.

Demostración:

■

Proposición 1.2.1
La transformación de Fourier $\mathcal{F}\cdot$ es un homomorfismo inyectivo del álgebra de Banach $L_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ en el álgebra de Banach $\mathcal{C}_0(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$.

Demostración:
Basta probar que el kernel de $\mathcal{F}\cdot$ se reduce a 0. En efecto, sea $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ tal que $\mathcal{F}f = 0$ en $\mathbb{R}^n$, luego $\mathcal{F}f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$. Así se puede aplicar el Teorema anterior, que resulta en que

$$0 = \mathcal{F}^*0 = \mathcal{F}^*(\mathcal{F}f) = (2\pi)^n f \text{ c.t.p. en } \mathbb{R}^n$$

en $\mathbb{R}^n$. Por tanto, $f = 0$ c.t.p. en $\mathbb{R}^n$. ■