

І. Прудіус, Л. Лазько.

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра радіотехнічних пристроїв

ЧИСЛОВИЙ МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ СПЕКТРА СИГНАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ АПРІОРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО РОЗВ’ЯЗОК

© Прудіус І., Лазько Л., 2001

Розглянуто використання нелінійних алгоритмів для часткового відновлення спектральних складових, втрачених при дифракційному обмеженні системи формування.

Вступ

Обмеження спектра сигналу в системі формування зображень приводить до зникнення його високочастотних складових. Проблема підвищення роздільної здатності радіолокаційних системах при відновленні зображень має першорядне значення.

При вирішенні задачі екстраполяції спектра сигналу за межі смуги пропускання необхідно враховувати «подвійну» її некоректність. З одного боку, дифракційне обмеження смуги просторових частот породжує неоднозначність розв’язку – особливість, властиву некоректним задачам. З іншого, реальні дані завжди тією чи іншою мірою зашумлені та спотворені, так що крім обмеження смуги частот, ми маємо нестійкість розв’язку на частотах, менших від граничної частоти смуги пропускання системи. Усунувши ефект тільки дифракційного обмеження, розв’язок задачі, наближений до правдивого, можна отримати, використовуючи додаткову апріорну інформацію про сигнал.

1. Формулювання проблеми

Потенційна роздільна здатність РЛСПЗ визначається з ширини смуги пропускання просторового тракту. Оскільки розміри антенної системи не можуть бути безмежними, то просторова амплітудно-частотна характеристика РЛСПЗ завжди скінченна, а значить скінченна роздільна здатність.

Розглянемо для прикладу прямокутну антенну решітку розміром $a \times b$ неспрямованих випромінювачів з некогерентним підсумовуванням випромінювання. При синфазному рівномірному амплітудному розподілі в апертурі, просторова імпульсна характеристика в координатах спрямовуючих косинусів набирає вигляду:

$$h(\Theta, \Phi) = \left| \frac{\sin(\Theta)}{\Theta} \right|^2 \cdot \left| \frac{\sin(\Phi)}{\Phi} \right|^2, \quad (1)$$

де $\Theta = \frac{2\pi a}{\lambda} \cos(\theta)$, $\Phi = \frac{2\pi b}{\lambda} \cos(\varphi)$ – спрямовуючі косинуси, θ, φ – кутові координати; λ – робоча довжина хвилі.

Просторова амплітудно-частотна характеристика (ПАЧХ) такої антени [3]:

$$H(\eta, \mu) = \Lambda\left(\frac{\eta}{f_\Theta}\right) \cdot \Lambda\left(\frac{\mu}{f_\Phi}\right), \quad (2)$$

де $f_\Theta = \frac{2a}{\lambda}$, $f_\Phi = \frac{2b}{\lambda}$; $\Lambda(x) = \begin{cases} 1 - |x|, & \text{при } |x| \leq 1 \\ 0, & \text{при } |x| > 1 \end{cases}$; η, μ – просторові частоти.

Як видно з виразу (2), ПАЧХ такої антенної системи є чітко обмежена і на просторових частотах, вищих від η, μ , тотожно дорівнює нулеві. Втрата високочастотних складових прийнятого сигналу призводить до характерного розмиття та появи осциляцій яскравості на ділянках зображення з різкими перепадами.

Використання нелінійних алгоритмів, що враховують апіорну інформацію про зображення [1,2], дає змогу частково оцінити просторові спектральні складові правдивого зображення $f(\Theta, \Phi)$. Використання нерівностей для обмеження рівня значень яскравості елементів зображення “знизу” та “зверху” забезпечує необхідну нелінійність для отримання нових спектральних складових та відповідність отриманого розв’язку визначеному класу функцій. Найбільш вживаною властивістю розв’язку задач обробки зображень є невід’ємність значень яскравості елементів зображення.

2. Дослідження

Для аналізу впливу обмежень на спектр розв’язку розглянемо простий приклад. На рис. 1, а подано рядок прийнятого зображення, який відповідає функції розсіювання і має від’ємні значення.

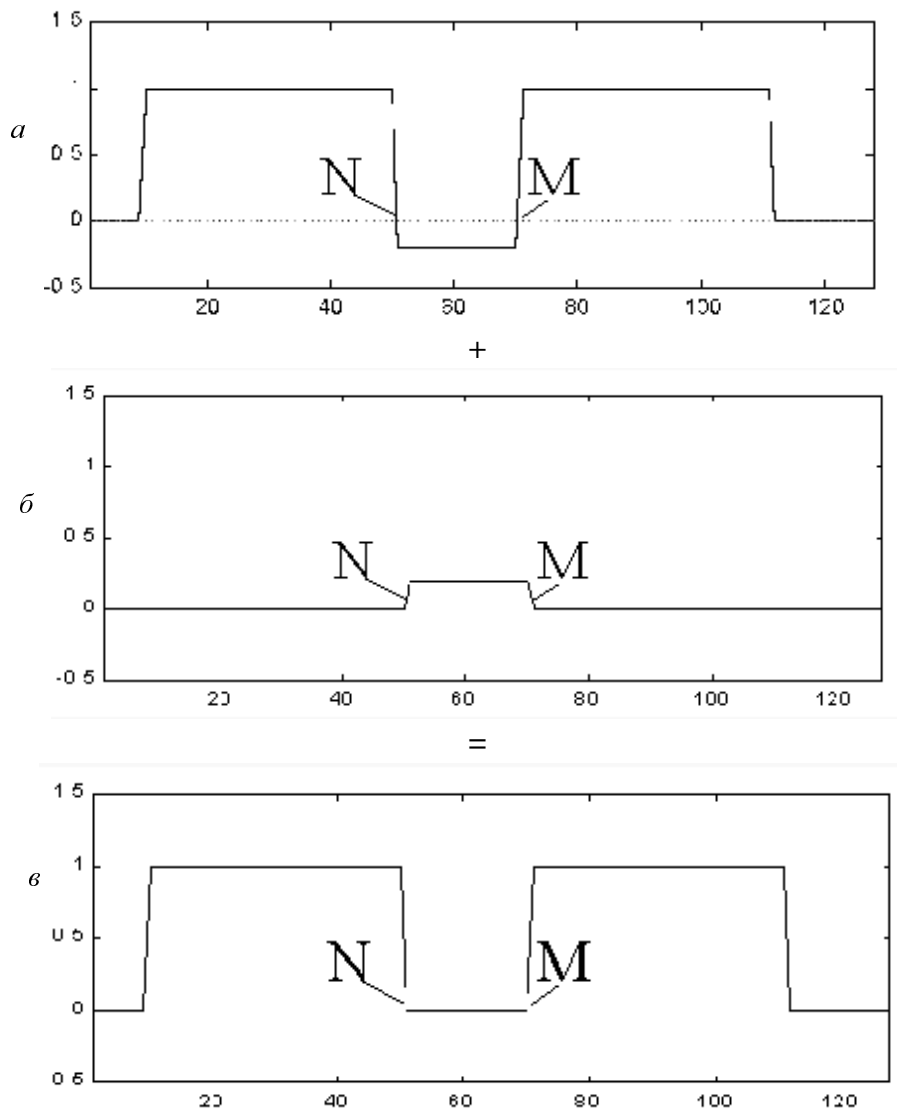


Рис.1. Функція розсіювання (а); компенсуючий рядок (б); скомпенсований рядок (в)

Зображений на рис. 1, а сигнал можна записати у вигляді:

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x), & \text{при } x < N \\ -f_2(x), & \text{при } N \leq x \leq M \\ f_3(x), & \text{при } x > M \end{cases} \quad (3)$$

де N, M – точки переходу сигналу в область від'ємних значень.

Відповідно спектр такого сигналу:

$$F(f(x)) = F(f_1(x)) - F(f_2(x)) + F(f_3(x)), \quad (4)$$

де $F(\cdot)$ – пряме перетворення Фур'є.

У випадку дифракційного обмеження складові компоненти сигналу компенсують самі себе на частотах, що перевищують деяку граничну частоту $\omega_{гр}$.

При обробці вищенаведеного сигналу за допомогою нелінійних алгоритмів від'ємні значення яскравості заміщуються нулями, що еквівалентно додаванню сигналу $f_2(x)$:

$$f_p = f + f_2, \quad (5)$$

Спектр результуючого сигналу вибраного рядка:

$$F(f_p) = F(f) + F(f_2). \quad (6)$$

Отже, у спектрі результуючого сигналу з'являються нові частотні складові, які визначаються спектром сигналу $f_2(x)$ і гарантують основну фізичну властивість зображень – невід'ємність.

Ще однією важливою для продовження спектра характеристикою сигналів та зображень є протяжність. Обмеження на т. зв. "протяжність носія" мають параметричний характер. Поява нових спектральних складових пояснюється так само, як у випадку з обмеженням на невід'ємність.

Підсилити ефект використання апріорної інформації про зображення, наприклад, невід'ємності, можна, використовуючи деяку функціональну залежність відносно $f_2(x)$. Як таку залежність можна вибрати модуль числа. Внаслідок такої заміни, окрім очікуваного ефекту покращання якості отриманого зображення, слід відзначити підвищення продуктивності алгоритму. Особливо відчутна ця перевага при реалізації алгоритму на мовах програмування вищого рівня, оскільки операція обчислення модуля виконується у 3–5 разів

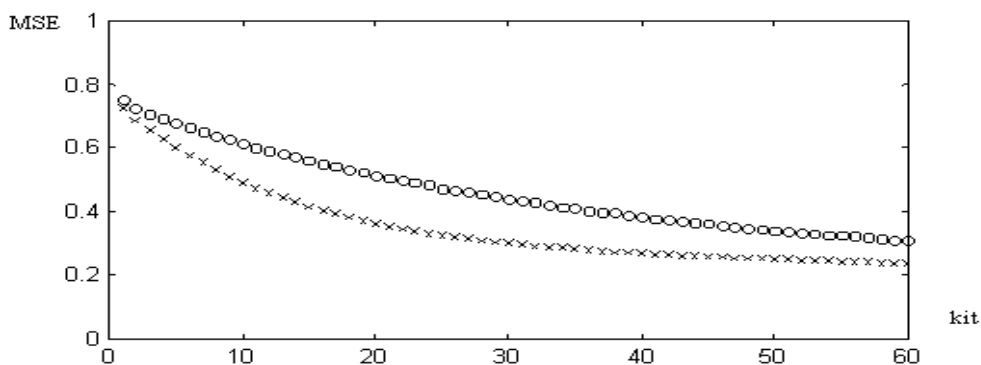
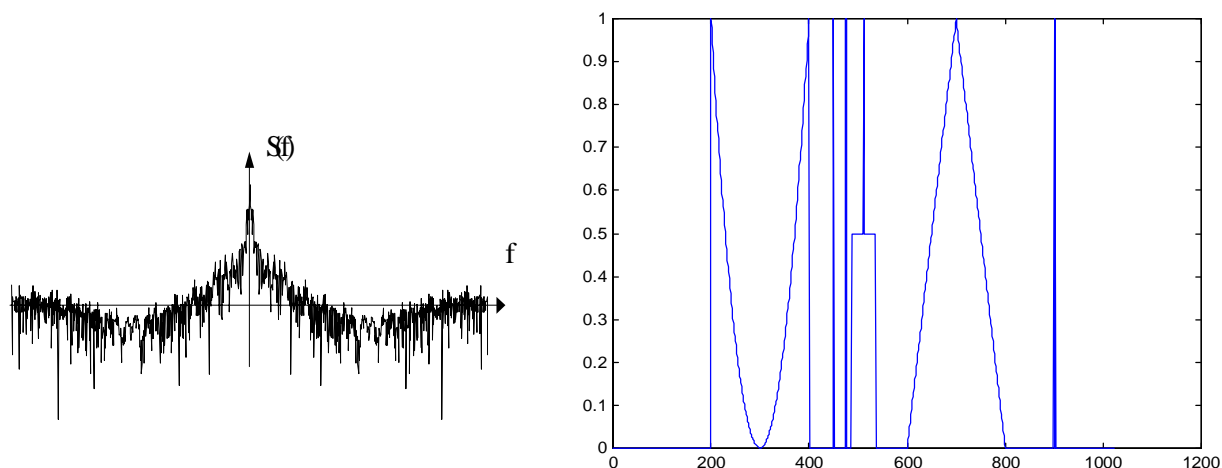
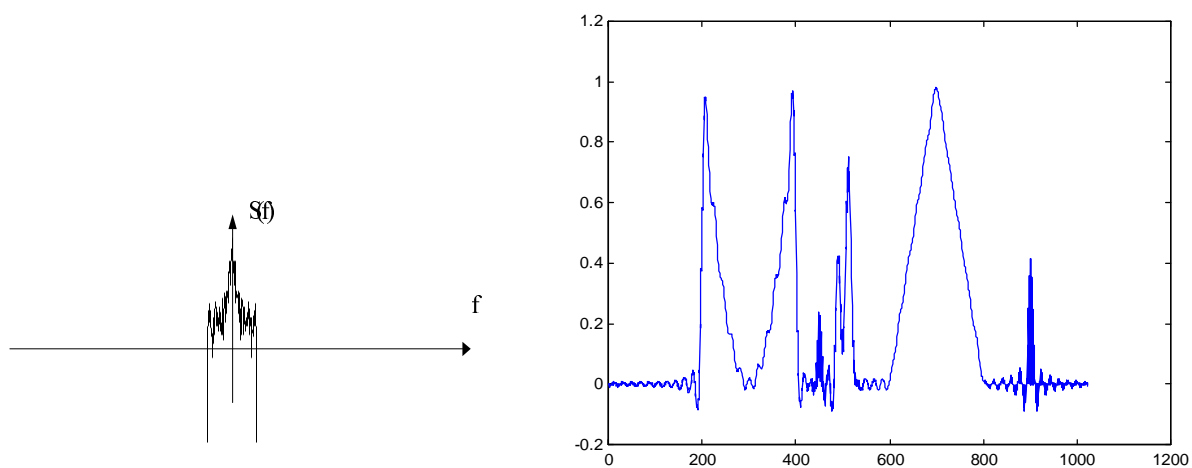


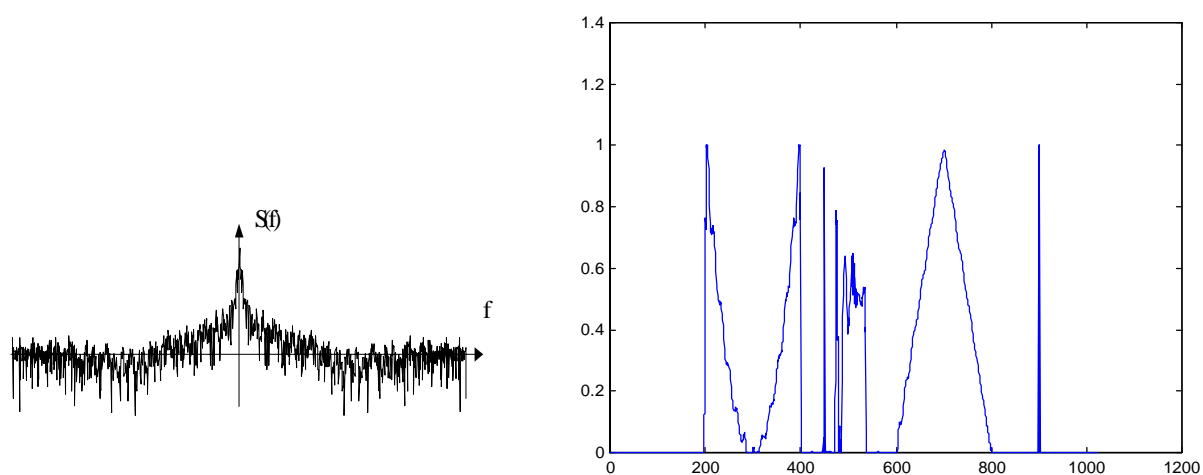
Рис. 2. Графік збіжності ітераційного процесу: MSE – середньоквадратична похибка; ooo – залежність похибки при використанні нерівності; xxx – залежність похибки при використанні модуля числа



a



б



в

Рис.3. Результат відновлення спектра та реалізації сигналу:
 а – правдивий сигнал; б – дифракційно-обмежений сигнал;
 в – сигнал з частково відновленими спектральними складовими

швидше від операції порівняння двох чисел. Відповідно і швидкодія алгоритму підвищується у 3–5 разів, залежно від мови програмування, якою реалізовано запропонований алгоритм.

Однократне застосування обмежень на розв'язок дає маловідчутний ефект, тому доцільно застосовувати ітераційні алгоритми для врахування апріорної інформації.

Згідно з теоремою про продовження аналітичних функцій необхідно забезпечити подібність спектра дифракційно-обмеженого сигналу та спектра результату. Це досягається використанням в ітераційній схемі оператора, який доповнює дифракційний оператор до одиничного $(I - D)$. Отриманий оператор діє на нелінійно обмежений сигнал і виділяє високочастотні складові, отримані при обмеженні оператором (або послідовністю операторів) N . У загальному вигляді ітераційна схема записується рекурентним рівнянням:

$$s_e^{k+1} = s_d + (I - D)Ns_e^k, \quad (7)$$

де s_e^k – сигнал з відновленим спектром на k -й ітерації; s_d – сигнал з антенної решітки; I – одиничний оператор; D – оператор дифракційного обмеження; N – нелінійний оператор або послідовність операторів обмеження.

Збіжність ітераційного процесу (рис. 2) гарантується тим, що оператори обмеження пасивні і в результаті їх дії на сигнал енергія отриманих нових високочастотних складових не перевищить енергію самого сигналу.

На рис. 3 наведено приклади рядків зображення та їх спектрів. Як видно, запропонований алгоритм забезпечує відновлення високочастотних складових, що проявляються у відновленні амплітуди та форми імпульсних об'єктів.

3. Висновок

Використання апріорної інформації про предметне зображення у вигляді нерівностей, реалізованих за допомогою нелінійних обмежень, дає можливість коректно відтворити частотні складові, які ніяк не проявляють себе у прийнятому зображенні через дифракційне обмеження системи формування. Правильно сформульовані властивості очікуваного розв'язку таких задач, як відновлення зображень та екстраполяція спектра, дає змогу працювати в частині спектра, що лежить поза смугою пропускання системи формування.

1. Клепфер Є., Прудюс І., Синявський А., Лазько Л. Використання нелінійних обмежень в ітераційних методах відновлення радіолокаційних сигналів // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 2000. № 387. С.36–46. 2. Prudyus I.N., Synyavskyy A.T., Lazko L.V. Usage of the nonlinear limitations at the radar signals restoration. „EUSAR 2000 “. Мюнхен, Німеччина. Травень 23-25. 2000. 3. Даджирон Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов / Под ред. П.П.Ярославского. М., 1988.