

Мартинюк С.Є., Василенко Д.О. Дослідження міжелементного зв'язку в ультраширокопосмуговій скануючій антенній решітці з 9×9 профільованих щілинних випромінювачів. Представлено результати числового дослідження методом скінченних різниць у часовій області взаємного впливу між центральним та іншими випромінювальними елементами в ультраширокопосмуговій двовимірній скануючій антенній решітці, що складена з 9×9 планарних щілинних елементів з експоненціальним профілем щілин. Надані рекомендації щодо практичного проектування.

**Ключові слова:** профільовані щілинні антени, антенні решітки, антени Вівальді.

Мартынюк С.Е., Василенко Д.А. Исследование межэлементной связи в ультраширокополосной сканирующей антенной решетке из 9×9 профилированных щелевых антенн. Представлены результаты численного исследования методом конечных разностей во временной области взаимного влияния между центральным и другими излучающими элементами в ультраширокополосной двумерной сканирующей антенной решетке, которая состоит из 9×9 планарных щелевых элементов с экспоненциальным профилем щелей. Даны рекомендации относительно проектирования таких решеток.

**Ключевые слова:** щелевая антенна, антенная решетка, антенна Вивальди.

Martyniuk S.Y., Vasylenko D.O. Analysis of the mutual coupling effects in the ultra wideband antenna array from 9×9 tapered slot radiators. Mutual coupling effects between the central and other elements in the ultra wideband two-dimensional scanning antenna array, which consists of 9×9 tapered slot antennas with an exponential profile, are investigated and discussed.

**Key words:** tapered slot antenna, antenna array, Vivaldi antenna.

УДК 621.372.543

## ЧИСЕЛЬНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛБЕРТА ДЛЯ КРИСТАЛОПОДІБНИХ СТРУКТУР

Нелін Є. А., Імамов В. О.

Фізико-технічні принципи штучних наноструктур базуються на природних структурах і ефектах, що в них спостерігаються. Фундаментальні природні зв'язки існують як для новітніх, так і попередніх технічних розробок. Таким є зв'язок активної і реактивної складових частотних характеристик перетворенням Гілберта [1,2]. Цей зв'язок обумовлений фізичною реалізованістю в силу принципу причинності. В [3] перетворенням Гілберта отримано фазочастотну характеристику (ФЧХ) кристалоподібної структури (КС) з експериментальної амплітудно-частотної характеристики (АЧХ). Такий підхід дозволяє використовувати більш доступний скалярний аналізатор кіл замість векторного. Перетворення Гілберта має математичні особливості, які призводять до значних помилок при використанні програмно вбудованих засобів чисельного інтегрування, наприклад, у програмі Mathcad. Ще одна особливість, не врахована в [3], пов'язана з періодичністю характеристик КС. В роботі запропоновано алгоритм чисельного перетворення Гілберта, що враховує ці особливості.

### Перетворення Гілберта

Для збереження загальності аналізу незалежно від того, які характеристики розглядаються, в [1] уведено системну функцію  $h(\omega) = h_1(\omega) + ih_2(\omega)$ .

Згідно умови фізичної реалізованості функція  $h(\omega)$  має бути мінімально фазовою. Реактивна і активна складові мінімально фазової функції зв'язані перетворенням Гільберта:

$$h_2(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h_1(x) dx}{x - \omega} \quad (1)$$

Для вхідного опору  $Z$  маємо  $h_1(\omega) = \text{Re}Z$  і  $h_2(\omega) = \text{Im}Z$ , де  $\text{Re}Z$  і  $\text{Im}Z$  — активна і реактивна складові  $Z$ . Для коефіцієнта передачі  $H(\omega)$   $h_1(\omega) = \ln|H(\omega)|$ , а  $h_2(\omega) = \varphi(\omega)$ , де  $|H(\omega)|$  — АЧХ;  $\varphi(\omega)$  — ФЧХ.

### Характеристики КС

КС — штучні періодичні структури з зонними властивостями пропускання хвиль. Розглянемо використання (1) для КС, утвореної чвертьхвильовими шарами з різними показниками заломлення. На рис. 1 наведено перший період частотних залежностей КС згідно моделі лінії передачі. Параметри КС: кількість шарів — 5, відносні показники заломлення шарів — 1 і 1,5. Як видно, смуга резонансу активної складової вхідного опору набагато вужча, ніж коефіцієнта відбиття. Реактивна й активна складові вхідного опору мають бути зв'язані перетворенням Гільберта (1).

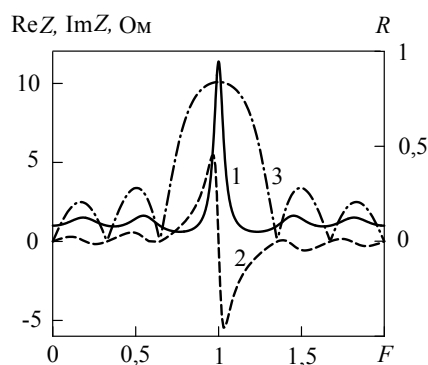


Рис. 1. Залежності активної (1) та реактивної (2) складових вхідного опору і модулю коефіцієнта відбиття  $R$  (3) КС;  $F = f/f_0$  ( $f_0$  — середня частота).

Чисельне інтегрування в програмі Mathcad для перевірки цього зв'язку призводить до значних похибок; у багатьох точках інтеграл взагалі не розраховується навіть при мінімально можливій межі машинного представлення чисел. Така особливість чисельної реалізації перетворення Гільберта пояснюється наявністю різниці змінних в знаменнику підінтегрального виразу (1), що призводить до виходу за межу мінімального представлення чисел.

Алгоритм чисельного інтегрування має враховувати можливість малих різниць змінних в (1). Точки змінних  $\omega$  і  $x$  не повинні збігатися або бути дуже близькими. Для збільшення мінімально можливої різниці цих змінних точки однієї з них мають бути між точками іншої. Наприклад, якщо  $x$  змінюється від 0 з кроком  $\delta x$ , то змінна  $\omega$  приймає перше значення  $\delta x/2$  з кроком  $\delta \omega = \delta x$ . Оскільки чисельне інтегрування є наближеним до неперервного, виходячи з допустимої похибки, необхідно визначити крок інтегрування, а з урахуванням періодичності характеристик КС — межі інтегрування.

Рис. 2 ілюструє результати реалізації алгоритму. Чисельне інтегрування виконано методом прямокутників з параметрами  $\delta x = \delta \omega = \delta F = 0,01$ , межі інтегрування —  $-4 \dots 6$  (5 періодів). На межах смуги коефіцієнта відбиття за

рівнем  $-3$  дБ похибка ФЧХ дорівнює  $2^0$  або  $3\%$ . Похибка зменшується зі зменшенням кроку інтегрування і розширенням меж інтегрування. Так, якщо крок вдвічі менше в тих же межах інтегрування, похибка ФЧХ дорівнює  $0,4^0$  або  $0,5\%$ .

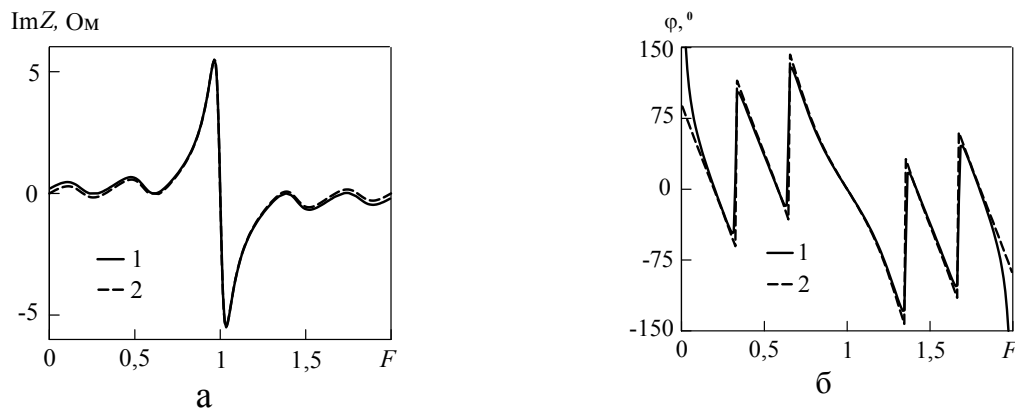


Рис. 2. Залежності реактивної складової вхідного опору (а) і ФЧХ коефіцієнта відбиття (б) згідно перетворення Гільберта (1) і моделі лінії передачі (2).

Зв'язок активної й реактивної складових характеристик перетворенням Гільберта дає додаткову інформацію про особливість формування характеристик КС. Запропонований алгоритм забезпечує з прийнятною похибкою знаходження фазових характеристик КС.

#### Література

1. Гиллемин Э. А. Синтез пассивных цепей. — М.: Связь. — 1970. — 720 с.
2. Литвиненко О. Н. Основы радиооптики. — К.: Техніка. — 1974. — 208 с.
3. Egro M., Arnedo I., Laso M. et al. Phase reconstruction in photonic crystals from S-parameter magnitude in microstrip technology // Opt Quant Electron. 2007. V. 39. N 4–6.

*Нелін Є.А., Імамов В.О. Чисельне перетворення Гільберта для кристалоподібних структур. Розглянуто особливості чисельного перетворення Гільберта для характеристик кристалоподібних структур. Запропоновано відповідний алгоритм.*

**Ключові слова:** перетворення Гільберта, кристалоподібна структура.

*Нелин Е.А., Имамов В.О. Численное преобразование Гильберта для кристаллоподобных структур. Рассмотрены особенности численного преобразования Гильберта для характеристик кристаллоподобных структур. Предложен алгоритм, учитывающий эти особенности.*

**Ключевые слова:** преобразование Гильберта, кристаллоподобная структура.

*Nelin E.A., Imatov V.O. Numeral Hilbert transform for crystal-like structures. The features of numeral Hilbert transform for crystal-like structures are considered. Algorithm taking into account these features is offered.*

**Keywords:** Hilbert transform, crystal-like structure.