УДК 537.876

О.Г. Вендик
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Малое отклонение главного луча диаграммы направленности линейки излучателей

Обсуждаются свойства линейки или решетки излучателей с электронным сканированием луча. Рассматривается случай, когда главный луч диаграммы направленности может отклоняться на угол, составляющий малую долю ширины луча.

Ключевые слова: линейка или решетка излучателей, электронное сканирование луча, точность управления положением луча

Введение

Антенны с электронным сканированием представляют большой интерес для использования в современных системах связи, радиолокации, навигационных и метеорологических системах [1, 2]. В некоторых случаях особый интерес представляет высокоточное и прецизионное управление положением луча диаграммы направленности (ДН) антенны. Прецизионное управление диаграммой направленности антенны с электронным сканированием находит применение при измерении скорости ветра или распределения влажности по высоте в атмосфере [3].

Рассмотрим случай монотонного изменения фазового сдвига воль линейки излучателей (рис.1).

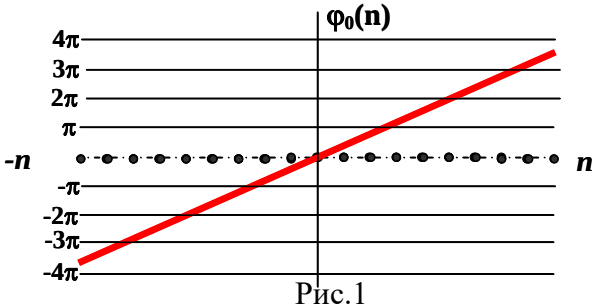

Рис.1

Здесь ***n*** – номер излучателя. Разность фаз токов в соседних излучателях φ_0:

$$\varphi_0 = 2\pi / 2^m$$

m – число разрядов двоичного кода.

Примем расстояние между соседними излучателями d = 0,5λ. Найдем направление главного луча θ_0. При заданном числе разрядов двоичного кода *m* имеем:

$$\sin\theta_0 = 1/2^{m-1}$$

Ширина луча $$\Delta\theta = \frac{\lambda}{L},$$

Где L – длина линейки излучателей.

Итак, при монотонном изменении фаз в соседних излучателях мы получаем существенное отклонение луча, которое может оказаться больше ширины луча, что нарушает приемлемый способ сбора информации с окружающего пространства.

Результаты проведенных расчетов приведены в Таблице 1.

Таблица 1

m	φ_0	φ_0 (град)	$\sin\theta_0$	θ_0 (град)
1	**π**	**180**	**1**	**90**
2	**π/2**	**90**	**0,5**	**30**
3	**π/4**	**45**	**0,25**	**14,5**
4	**π/8**	**22,5**	**0,125**	**7,2**
5	**π/16**	**11,25**	**0,0625**	**3,6**

Положение главного луча ДН при заданном распределении фаз вдоль линейки излучателей.

Используем формулу для определения положения луча линейки излучателей при заданном распределении фаз [1]:

$$\sin\theta = \frac{1}{kd}\cdot\frac{\sum\limits_{i=-n}^{n} I_i i\cdot\psi_i}{\sum\limits_{i=-n}^{n} I_i i^2} \qquad (1)$$

Здесь I_i, ψ_i - амплитуда и фаза тока в i -ом излучателе.

В случае монотонного распределения фаз токов имеем $\psi_i = i\cdot\varphi_0$.

При подстановке в формулу (1) получим традиционное выражение для положения луча линейки или решетки излучателей [1]:

$$\sin\theta_0 = \frac{\lambda}{d}\cdot\frac{\varphi_0}{2\pi}. \qquad (2)$$

Рассмотрим теперь немонотонное распределение фаз вдоль линейки излучателей, показанное на рис.2 и представленное формулой (3):

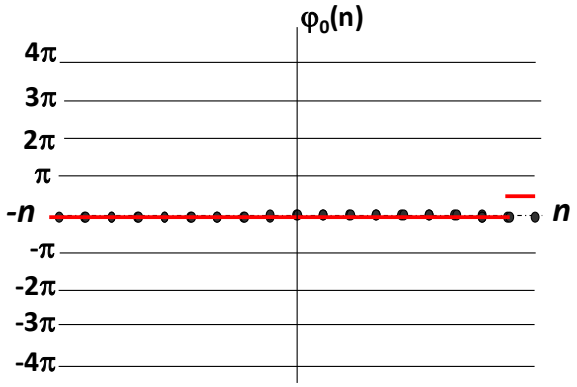

Рис. 2

$$\psi_{-n} = 0,\ \psi_{-n+1} = 0, \ldots\ldots \psi_0 = 0, \ldots\ldots \psi_{n-1} = 0,\ \psi_n = \varphi_S, \qquad (3)$$

Кроме представленной схемы распределения фаз, может быть использована другая схема, в которой сочетаются монотонный набег фазы и дополнительное скачкообразное распределение фаз. Например:

$$\psi_{-n} = \varphi_0\cdot(-n), \psi_{-n+1} = \varphi_0\cdot(-n+1), \ldots.. \psi_0 = 0, \ldots.. \psi_{n-1} = \varphi_0\cdot(n-1), \psi_n = \varphi_0\cdot n + \varphi_S. \qquad (3a)$$

В этом случае мы получим заданный фазовый сдвиг и соответственно заданное отклонение луча, определенное углом φ_0, и дополнительный фазовый сдвиг, и отклонение луча, определенное углом φ_S.

Рассмотрим более подробно фазовое распределение, заданное (3) и рис. 2. Подставим (3) в (1). Учтем, что

$$\sum_{-n}^{n} i^2 = \frac{n}{3} \cdot (2n^2 + 3n + 1)$$

В результате получим:

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\varphi_S}{2\pi} \cdot \frac{1}{2n^2 + 3n + 1}$$

Положим d = 0,5λ, $\varphi_S = 2\pi/2^m$, где *m* - число разрядов двоичного кода, и получим минимальное отклонение луча, вызванное простейшим немонотонным распределением фаз токов:

$$\delta\theta = \frac{1}{2^m} \cdot F(n), \qquad F(n) = \frac{6}{2n^2 + 3n + 1}. \tag{4}$$

Сопоставим отклонение луча с шириной луча. Пусть ширина луча

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{(2n+1) \cdot d}. \tag{5}$$

Из (4) и (5) получим при d = 0,5λ и ***n*** >> 1:

$$\frac{\delta\theta}{\Delta\theta} = \frac{1}{2^m} \cdot \frac{3}{n}. \tag{6}$$

Полученное выражение определяет отношение малого отклонения луча к ширине луча в случае немонотонного распределения фаз.

Количественная оценка малого отклонения луча.

Малое отклонение луча, вызванное немонотонным изменением фаз в излучателях, измеренное по отношению к ширине луча, зависит от числа разрядов двоичного кода ***m*** и числа элементов в линейке или решетке излучателей ***n***.

Пусть ***m*** = 3, ***n*** = 5. При этом дискрет фазы π/4, или 45°, число элементов в линейке 11. Тогда имеем:

$$\frac{1}{2^m} \cdot \frac{3}{n} \cong \frac{1}{15}$$

При этом малое управляемое движение луча составляет примерно 7% от ширины луча.

Пусть ***m*** = 4, ***n*** = 5. При этом дискрет фазы π/8, или $22{,}5^o$, число элементов в линейке 11. Тогда имеем

$$\frac{1}{2^m} \cdot \frac{3}{n} \cong \frac{1}{30}$$

При этом малое управляемое движение луча составляет примерно 3% от ширины луча.

Полученные количественные оценки отклонения луча диаграммы направленности линейки или решетки излучателей показывают, что малые отклонения луча и соответственно высокая разрешающая способность антенны с электронным сканированием не требует высокого значения двоичного кода управления лучом, а могут быть достигнуты путем немонотонного изменения фаз в излучателях. Сделанные оценки позволяют заключить, что прецизионное управление диаграммой направленности линейки или решетки излучателей может быть достигнуто при дискрете фазы ***m*** = 3 или ***m*** = 4, то есть при скачках фазового сдвига π/4 $\left(45^o\right)$ или π/8 $\left(22{,}5^o\right)$.

Нарушение монотонности фазовых сдвигов вдоль линейки излучателей приводит к появлению фазовых ошибок при формировании основного луча антенны. Существуют методы подавления фазовых ошибок, созданных специфическим распределением фазовых сдвигов вдоль линейки. В частности, эффективным методом подавление фазовых ошибок является использование рандомизированных линеек или решеток излучателей [2].

Заключение

Использование немонотонного изменения фазовых сдвигов между излучателями может обеспечить малые отклонения луча и соответственно высокую разрешающую способность антенны с электронным сканированием и при этом не требует высокого двоичного кода управление лучом. Практически обоснованное конструирование ФАР может быть осуществлено при при дискрете фазы $\boldsymbol{m}$ = 3 или $\boldsymbol{m}$ = 4, то есть при скачках фазового сдвига π/4 $\left(45^{o}\right)$ или π/8 $\left(22,5^{o}\right)$. Ограничение уровня дискретности управление фазой существенно облегчает конструирование фазовращателей или схем цифрового управления фазовым распределением. При этом следует принять во внимание способы подавления фазовых ошибок в системе формирования луча ФАР.

Библиографический список

1. О.Г. Вендик, М.Д. Парнес, «Антенны с электрическим сканированием (Введение в теорию)» / Под ред. чл.-корр. РАН Л.Д. Бахраха,- М.: *САЙНС-ПРЕСС*, 2002, с. 232, ил.
2. Г.С. Хижа, И.Б. Вендик, Е.А. Серебрякова, «СВЧ фазовращатели и переключатели. Особенности создания на p-i-n диодах в интегральном исполнении». – М.: Радио и связь. 1984. – 184 с., ил.
3. Rafael H. Medina-Sanchez, «Beam steering control system for low-cost phased array weather radars», - University of Massachusetts – Amherst, Doctoral Dissertations 2014-current.