

II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2018»

**Новая концепция синтеза неэквидистантных двумерных антенных решеток с использованием матриц трансформации и Магических квадратов для декаметровых радиотелескопов и мониторинга атмосферных излучений.**

Ло Иян<sup>1</sup>, В.И. Луценко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет - Харьковский авиационный институт, 61070, Украина, Харьков, ул. Чкалова, 17, E-mail: yiyangluo@163.com

<sup>2</sup>Институт радиофизики и электроники им. Усикова НАН Украины, 61085, Украина, Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12 E-mail: lutsenko@ire.kharkov.ua

*Рассмотрена возможность, использования низкочастотных радиотелескопов для дистанционного зондирования атмосферы. Описан новый подход к синтезу неэквидистантных двумерных антенных решеток с использованием матриц трансформации и Магических квадратов для декаметровых радиотелескопов и проведен сравнительный анализ с характеристиками антенных субрешеток, разрабатываемых декаметровых радиотелескопов ГУРТ.*

*The materials concern the possibility, rationality and urgency of using low-frequency radio telescopes for remote sensing of the atmosphere. A new approach to the synthesis of non-equidistant two-dimensional antenna arrays using transformation matrices and Magic squares for decameter radio telescopes is described, and a comparative analysis is performed with the characteristics of the antenna subarrays of the developed decameter radio telescopes URAN.*

**Введение**

Декаметровый диапазон волн (частоты 3-30МГц), является предельно низкочастотным для наземных наблюдений.

Самыми крупными в мире являются украинские декаметровые радиотелескопы УТР-2, УРАН, ГУРТ [1]. Но в декаметровом диапазоне имеется множество мешающих факторов, значительно затрудняющих радиоастрономические наблюдения. К ним относятся многочисленные радиопомехи естественного и искусственного происхождения; среда распространения радиоволн, искажающая сигналы; высокая температура галактического фона, ограничивающая чувствительность [1]. Однако, с другой точки зрения, если рассматривать возможность применения радиотелескопа к мониторингу земной атмосферы, вышеуказанные факторы больше не будут помехами, а станут полезной информацией. В этом и состоит суть предлагаемой новой концепции.

Учитывая, что при использовании обычной эквидистантной антенной решетки в качестве радиотелескопа, когда количество антенн ограничено нельзя обеспечить высокое угловое разрешение. Предлагается новый метод синтеза неэквидистантных антенных решеток, когда количество антенн и длина волны являются постоянными, а разрешение по углу (ширина диаграммы основного лепестка антенны) намного уже, чем у традиционных эквидистантных антенных решеток.

**1. Возможность и актуальность использования декаметровых радиотелескопов для дистанционного зондирования атмосферы**

Участки диапазонов гектометровых и декаметровых волн, предназначены обычно для радиовещания определенных служб радиосвязи. Соответствующий диапазон частот составляет от 3МГц до 30МГц. Верхние слои атмосферы (ионосфера) содержат газ в ионизированном состоянии. Волны с частотами ниже 30 МГц испытывают сильное

преломление в ионосфере. Траектории распространения этих волн искривляются настолько, что они (волны) возвращаются на Землю.

Известно, что появлению загоризонтных РЛС предшествовала разработка и эксплуатация зондирующих ионосферу устройств, которые измеряли характеристики ионосферы в интересах повышения эффективности дальней радиосвязи на коротких волнах (КВ). В последующем данные об ионосфере использовались при решении задач исследовательского характера в загоризонтной радиолокации. С их помощью выявлялись потенциальные возможности различных коротковолновых радиолокационных систем (КВ РЛС). Ионосферные характеристики обеспечивали исходными данными конструктивные разработки загоризонтных РЛС.

Сбор подобной информации осуществляется с помощью широкой сети наземных станций зондирования ионосферы. Сеть состоит из станций нескольких типов вертикального зондирования (ВЗ), наклонного зондирования (НЗ) и возвратно-наклонного зондирования ионосферы (ВНЗ). Декаметровые радиотелескопы могут использоваться для дистанционного зондирования атмосферы, а также как приемные системы бистатических загоризонтных радиолокаторов. Конкретный метод проектирования антенных систем декаметровых радиотелескопов для дистанционного зондирования атмосферы, рассмотрен ниже.

## 2. Новые методы синтеза неэквидистантных двумерных антенных решеток с использованием матриц трансформации и Магических квадратов

В работах [2-4] была сделана попытка использовать существующие математические конструкции, например, магические квадраты для построения двумерных неэквидистантных решеток. Предложено рассматривать элементы Магических квадратов  $S_{ij}$  как расстояния между смежными элементами антенной решетки (элементы интерферометра). Это означает, например, что для элемента  $(l, j)$  квадрата значение  $S_{lj}$  будет задано как расстояние для позиции элемента  $(l, j)$  вдоль осей абсцисс и ординат от смежных элементов антенной решетки. Тогда координаты элементов, составляющих антенную решетку, можно записать в терминах значений элемента квадрата  $S_{ij}$  в  $l$  строке и  $j$  столбце:

$$x_{lj} = \sum_{j=1}^j S_{lj} = x_{lj-1} + S_{lj} \text{ и } y_{lj} = \sum_{l=1}^l S_{lj} = y_{l-1j} + S_{lj}, \quad (1)$$

где  $x_{lj}$  - абсцисса,

$y_{lj}$  - ордината.

Если вышеуказанное соотношение выразить в матричной форме, то:

$$X = S \cdot U = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} & L & S_{1,n-1} & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} & L & S_{2,n-1} & S_{2,n} \\ S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} & L & S_{3,n-1} & S_{3,n} \\ M & M & M & O & M & M \\ S_{n-1,1} & S_{n-1,2} & S_{n-1,3} & L & S_{n-1,n-1} & S_{n-1,n} \\ S_{n,1} & S_{n,2} & S_{n,3} & L & S_{n,n-1} & S_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & L & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & L & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & L & 1 & 1 \\ M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$Y = L \cdot S = U^T \cdot S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 1 & 1 & 1 & L & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & L & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} & L & S_{1,n-1} & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} & L & S_{2,n-1} & S_{2,n} \\ S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} & L & S_{3,n-1} & S_{3,n} \\ M & M & M & O & M & M \\ S_{n-1,1} & S_{n-1,2} & S_{n-1,3} & L & S_{n-1,n-1} & S_{n-1,n} \\ S_{n,1} & S_{n,2} & S_{n,3} & L & S_{n,n-1} & S_{n,n} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где X, Y, S - n на n квадратные матрицы,

U (L) - n на n верхняя (нижняя) треугольные матрицы и играют роль матрицы преобразования.

Это наводит на мысль о возможности замены этих матриц преобразования на другие матрицы преобразования.

В дополнение к вышеуказанным традиционным методам можно предложить следующие варианты:

1) Используем сокращенные верхнюю и нижнюю треугольные матрицы единиц в качестве матрицы преобразования (использование рекуррентного соотношения - чисел Фибоначчи):

$$X1 = S \cdot U_L = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} & L & S_{1,n-1} & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} & L & S_{2,n-1} & S_{2,n} \\ S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} & L & S_{3,n-1} & S_{3,n} \\ M & M & M & O & M & M \\ S_{n-1,1} & S_{n-1,2} & S_{n-1,3} & L & S_{n-1,n-1} & S_{n-1,n} \\ S_{n,1} & S_{n,2} & S_{n,3} & L & S_{n,n-1} & S_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$Y1 = L_U \cdot S = U_L^T \cdot S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} & L & S_{1,n-1} & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} & L & S_{2,n-1} & S_{2,n} \\ S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} & L & S_{3,n-1} & S_{3,n} \\ M & M & M & O & M & M \\ S_{n-1,1} & S_{n-1,2} & S_{n-1,3} & L & S_{n-1,n-1} & S_{n-1,n} \\ S_{n,1} & S_{n,2} & S_{n,3} & L & S_{n,n-1} & S_{n,n} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

2) Используя сжатую верхнюю/нижнюю треугольную матрицу единицы в качестве матрицы преобразования имеем:

$$X2 = S \cdot U_R = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} & L & S_{1,n-1} & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} & L & S_{2,n-1} & S_{2,n} \\ S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} & L & S_{3,n-1} & S_{3,n} \\ M & M & M & O & M & M \\ S_{n-1,1} & S_{n-1,2} & S_{n-1,3} & L & S_{n-1,n-1} & S_{n-1,n} \\ S_{n,1} & S_{n,2} & S_{n,3} & L & S_{n,n-1} & S_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & L & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$Y2 = L_C \cdot S = U_R^T \cdot S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 1 & 0 & 0 & L & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & L & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} & L & S_{1,n-1} & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} & L & S_{2,n-1} & S_{2,n} \\ S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} & L & S_{3,n-1} & S_{3,n} \\ M & M & M & O & M & M \\ S_{n-1,1} & S_{n-1,2} & S_{n-1,3} & L & S_{n-1,n-1} & S_{n-1,n} \\ S_{n,1} & S_{n,2} & S_{n,3} & L & S_{n,n-1} & S_{n,n} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

3) Объединяя методы 1 и 2, можно предложить следующую матрицу преобразования:

$$U_{RL} = U_R \cdot U_L = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & L & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & L & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$L_{UC} = L_U \cdot L_C = (U_R \cdot U_L)^T = U_{RL}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 2 & 0 & 0 & L & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & L & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$X3 = S \cdot U_{RL} = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} & L & S_{1,n-1} & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} & L & S_{2,n-1} & S_{2,n} \\ S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} & L & S_{3,n-1} & S_{3,n} \\ M & M & M & O & M & M \\ S_{n-1,1} & S_{n-1,2} & S_{n-1,3} & L & S_{n-1,n-1} & S_{n-1,n} \\ S_{n,1} & S_{n,2} & S_{n,3} & L & S_{n,n-1} & S_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & L & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$Y3 = L_{CR} \cdot S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & L & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & L & 0 & 0 \\ M & M & M & O & M & M \\ 2 & 0 & 0 & L & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & L & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} & L & S_{1,n-1} & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} & L & S_{2,n-1} & S_{2,n} \\ S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} & L & S_{3,n-1} & S_{3,n} \\ M & M & M & O & M & M \\ S_{n-1,1} & S_{n-1,2} & S_{n-1,3} & L & S_{n-1,n-1} & S_{n-1,n} \\ S_{n,1} & S_{n,2} & S_{n,3} & L & S_{n,n-1} & S_{n,n} \end{bmatrix}; \quad (11)$$

Вышеуказанные четыре метода, используя пару матриц преобразования, можно рассматривать как линейное преобразование для порождающей матрицы  $S$ . Из порождающей матрицы  $S$  соответствующие координатные матрицы  $X$  и  $Y$  соответственно получаются путем предварительного умножения (или умножения слева) матрицы преобразования и путем пост-умножения (или умножения) на транспонирование матрицы преобразования соответственно и могут соответственно представлять координаты вдоль абсциссы и координаты вдоль ординаты окончательно полученной антенной решетки.

Результирующие комплексные целые числа  $Z_{ij} = X_{ij} + iY_{ij}$  (матричная форма которых будет выглядеть так:  $Z = X + iY = S \cdot U + iU^T \cdot S$ ) являются Гауссовскими числами, которые определяют координаты элементов антенной решетки. Координаты элемента  $Z_{ij}$  смещены от предыдущих элементов по оси абсцисс и ординат на величину

$S_{ij}$ . В этом случае матрица  $\|Z\|$ , полученная на основе порождающей матрицы  $\|S\|$ , элементами которой являются элементами Латинского квадрата, определяет координаты элементов двумерной неэквидистантной антенной решетки.

Пространственные частоты  $x_m$ ,  $y_p$ , покрытые вдоль осей  $x$ ,  $y$ , определяются разностью координат элементов решетки

$$x_m = x_{ij} - x_{lk} \text{ и } y_p = y_{ij} - y_{lk} \quad (12)$$

С другой стороны, мы можем рассматривать квадраты  $X$  и  $Y$  как изображения. Это означает, что значение координат вдоль осей  $x$  и  $y$  представляют собой интенсивность пикселей. Квадраты  $X$  и  $Y$  можно представить в виде  $\{(1,1,x_{1,1}), (1,2,x_{1,2}), (1,3,x_{1,3}), \dots, (n,n,x_{n,n})\}, \{(1,1,y_{1,1}), (1,2,y_{1,2}), (1,3,y_{1,3}), \dots, (n,n,y_{n,n})\}$ , где первый и второй элементы - это позиция элемента в матрице, а третий - это значение координат (расстояние от исходной точки). Это дает два полутоновых изображения  $G_x$  и  $G_y$ . Можно применить метод цифровой обработки изображений, для получения их гистограмм  $H_x$  и  $H_y$ .

Объединив определения пространственных частот для элементов антенн, мы можем записать пространственные функции распределения частот  $P_x$  вдоль оси  $x$  и  $P_y$  вдоль оси  $y$ :

$$P_x(Dx) = \begin{cases} \sum_{x_0=0}^{N-Dx} H_x(x_0) \cdot H_x(Dx + x_0), Dx \in (1, N) \\ \frac{1}{2} \sum_{x_0=0}^N H_x(x_0) \cdot (H_x(x_0) - 1), Dx = 0 \end{cases}$$

и

$$P_y(Dy) = \begin{cases} \sum_{y_0=0}^{N-Dy} H_y(y_0) \cdot H_y(Dy + y_0), Dy \in (1, N) \\ \frac{1}{2} \sum_{y_0=0}^N H_y(y_0) \cdot (H_y(y_0) - 1), Dy = 0 \end{cases} \quad (13)$$

При создании антенных решеток мы стремимся создавать решетки, которые при полном покрытии требуемой области пространственных частот обладают минимальным количеством элементов и допустимыми значениями уровня боковых лепестков. Одна из важных задач - найти избыточную конфигурацию с заданным числом элементов, обеспечивающую полное покрытие центральной области максимального размера в плоскости пространственных частот ( $u$ ,  $v$ -плоскость). Для избыточных решеток полное покрытие частот в зоне расположения антенны является типичным [1, 5].

### 3. Сравнение характеристики антенной решетки для декаметровых радиотелескопов, разработанной новым методом, с существующими антенными решетками ГУРТ

Радиотелескоп ГУРТ состоит из 25-элементных активных субрешеток с аналоговым временным фазированием отдельных субрешеток и цифровым между ними [1, 5]. Для сравнения мы использовали магический квадрат матрицу пятого порядка в качестве порождающей матрицы для создания антенной решетки с 25 элементами. Именно,

$$S = S = M \begin{bmatrix} 17 & 24 & 1 & 8 & 15 \\ 23 & 5 & 7 & 14 & 16 \\ 4 & 6 & 13 & 20 & 22 \\ 10 & 12 & 19 & 21 & 3 \\ 11 & 18 & 25 & 2 & 9 \end{bmatrix} \quad (14)$$

В этом случае традиционный метод (формулы 1-2) и метод 1 (формулы 3-4), метод 2 (формулы 5-6) и метод 3 (формулы 7-10) используются для преобразования в

соответствующие координаты антенной решетки (XМ, YМ), (XМ1, YМ1), (XМ2, YМ2), (XМ3, YМ3). Получаемые при этом АР и их характеристики приведены в табл.1.

Сделаем замечания по некоторым параметрам, которые представлены в Таблице 1. Для анализа используются:

- эффективная ширина главного лепестка ( $\Delta w_{0.707}$ ) на уровне половинной мощности;

- средний уровень боковых лепестков (m):

- коэффициент заполнения антенной решетки:

$$\alpha = \frac{N_0}{v}, \quad (15)$$

где  $N_0$  - количество элементов решетки,

$v$  - количество узлов эквидистантного решетки, в котором они могут быть расположены,

или коэффициент избыточности:

$$\beta = \frac{N_0}{\sqrt{S}}, \quad (16)$$

Из анализа таблицы 1, видно, что, при использовании магического квадрата в качестве порождающей матрицы S, АР, полученные с использованием метода 3, имеют существенно лучшие характеристики. Их эффективная ширина главного лепестка ДН на уровне половины мощности более узкая, меньше коэффициенты избыточности (заполнения). Кроме того, у них более равномерное пространственное распределение частот по сравнению с АР, полученными с использованием традиционного метода. Хотя, его боковые лепестки ухудшились и стал выше их средний уровень. Следует отметить, что, хотя использование 1 и 2 методов дает очень хорошие результаты, но объединив их и создав метод 3, можно лучше использовать возможности Магического квадрата как порождающей матрицы S, чем по традиционному методу. Можно найти области пространства, соответствующие расположению неэквидистантных решеток, полученных с использованием Магического квадрата в качестве порождающей матрицы S методами 1, 2 и 3, которые будут не квадратными, а прямоугольными. В то же время следует отметить, что покрываемые пространственные частоты и гистограммы распределения координат, соответствующих АР, полученных с использованием Магического квадрата в качестве порождающей матрицы S методами 1, 2, 3 и традиционными методами, не одинаковы для абсцисс и ординат.

В дальнейшем используем лучшие две антенные решетки, которые мы разработали (XМ, YМ) и (XМ3, YМ3) для сравнения с существующим эквидистантными субрешетками радиотелескопа ГУРТ.

В литературе [5] приведено расположение антенных элементов в субрешетке ГУРТ, расстояние между которыми вдоль обеих осей x и y было выбрано равным  $dx = dy = 3.75$  м, что составляет  $\lambda/2$  на частоте 40 МГц. Из [1] известно, что частотный диапазон субрешеток ГУРТ составляет 8÷32 МГц. Мы предполагаем, что наша антенная решетка работает в режиме приема плоской электромагнитной волны одной поляризации, приходящей из зенитного направления. ДН рассчитаны на трех частотах – 15, 20, 25 МГц для четырех фиксированных плоскостей  $\Psi = \text{const}$ , две из которых проходят через оси X ( $\Psi=0$ ) и Y ( $\Psi=90^0$ ), и двух диагональных плоскостей – E ( $\Psi=45^0$ ) и H ( $\Psi=135^0$ ). Результаты симуляционного сравнения соответствующие трем частотам, показаны на рис. 1.

Из рисунка 1 видно, что эффективная ширина основного лепестка ДН на уровне половины мощности антенной решетки, полученная с использованием Магического квадрата более узкая, благодаря своей эффективной площади больше, чем субрешеток

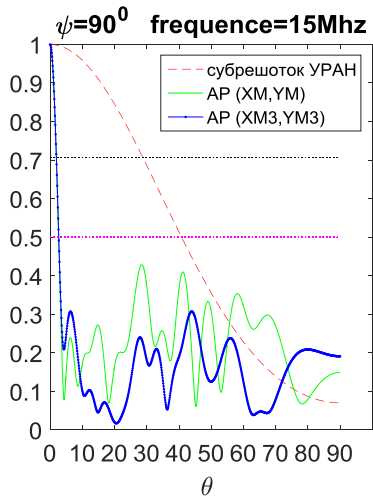
ГУРТ при с таким же количеством элементов. Хотя имеются нерегулярные боковые лепестки, значительно ниже средний уровень боковых лепестков ДН антенной решетки, полученные с использованием Магического квадрата.

Антенные решетки также синтезируются с использованием магической квадратной. По сравнению с антенными решетками (ХМ, УМ), полученными обычным способом синтеза [2-4], антенные решетки (ХМЗ, УМЗ), полученные новым методом, имеют лучше распределение боковых лепестков ДН.

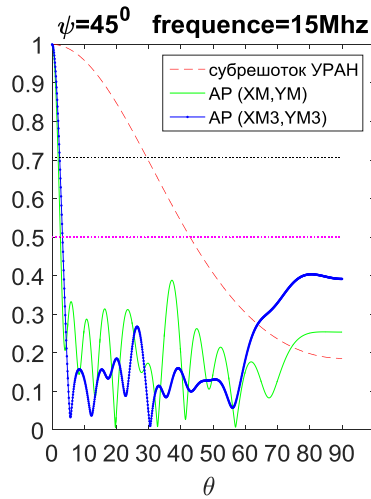
**Таблица 1. Характеристики антенных решеток.**

Название	(XM, YM)	(XM1, YM1)	(XM2, YM2)	(XM3, YM3)
Размещение элементов АР				
ДН АР в декартовой системе				
ДН АР в полярной системе				
Покрываемые пространственные частоты P(dx) и гистограмма распределения координат Н (x)				
Покрываемые пространственные частоты P(dy) и гистограмма распределения координат Н (y)				
$\Delta\omega_0$ (рад)	1.4070	1.4607	1.4929	1.3421
m	0.1986	0.1947	0.1970	0.1994
NO	25	25	25	25
M	65*65	43*44	41*42	76*78
S	4225	1892	1722	5928
$\alpha$	0.0059	0.0132	0.0145	0.0042
$\beta$	0.3846	0.5748	0.6025	0.3247

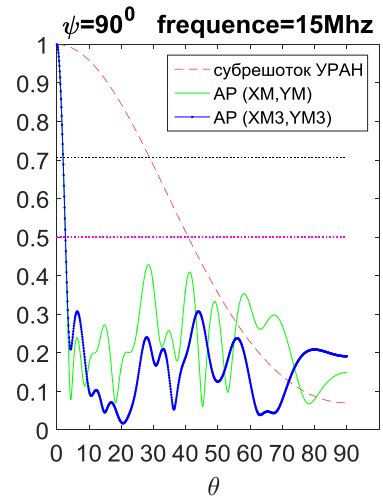




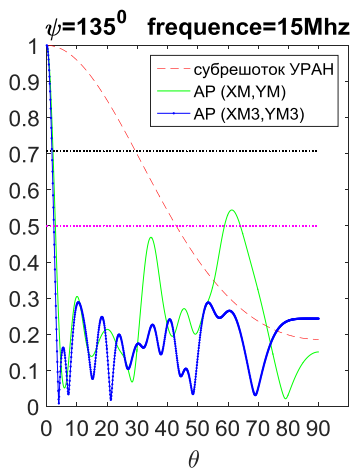
**а**



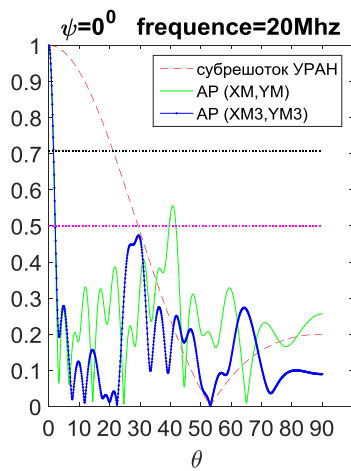
**б**



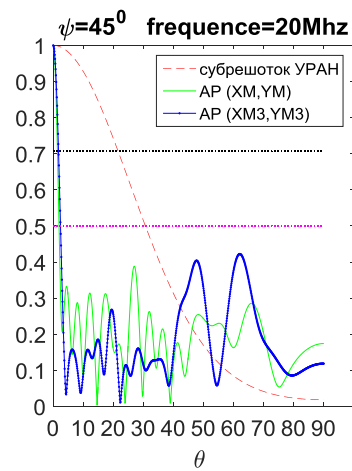
**в**



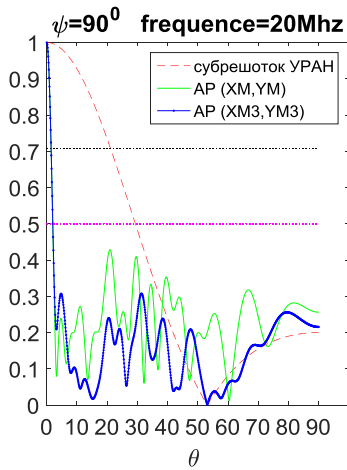
**г**



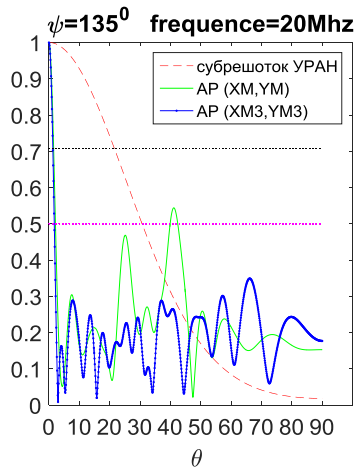
**д**



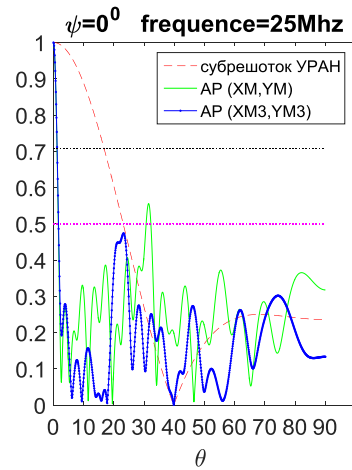
**е**



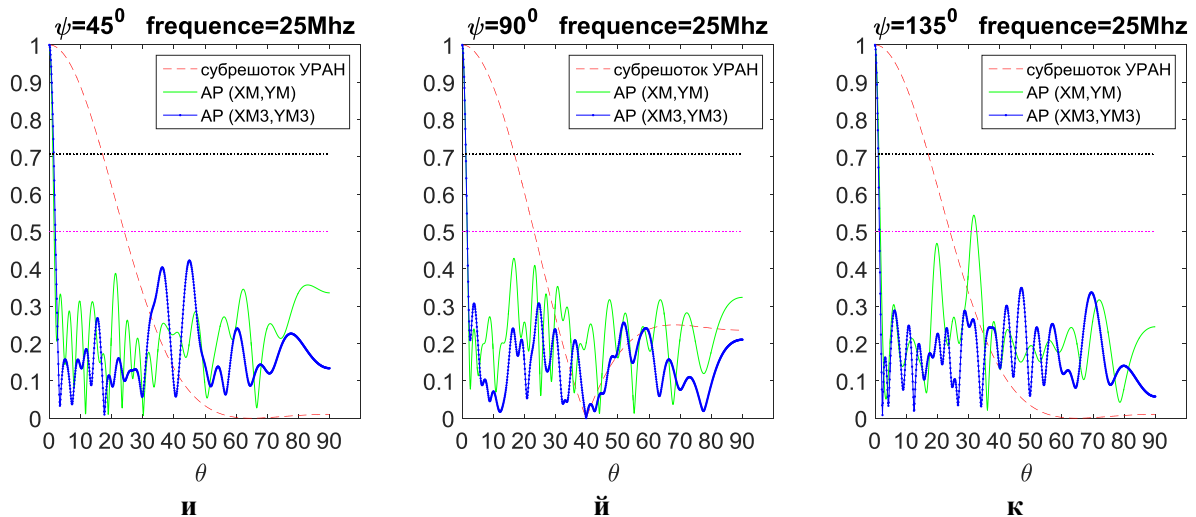
**ё**



**ж**



**з**



**Рис. 1.** Сечения нормированной диаграммы направленности секции разных АР (красные пунктирные кривые - субрешоток ГУРТ, зеленые сплошные кривые и синие толстые пунктирные кривые - решетки, полученные с помощью магической квадратной матрицы пятого порядка по традиционному методу (XМ, YМ) и новому методу (XМЗ, YМЗ) на разных частотах рабочего диапазона (а, б, в,  $z-f = 15$  МГц; д, е, ё, ж,  $-f = 20$  МГц; з, и, й, к -  $f = 25$  МГц) для плоскостей  $\Psi = \text{const}$ : а, д, з - плоскости, проходящие через оси X ( $\Psi = 0$ ); б, е, и - E-плоскость ( $\Psi = 45^\circ$ ); в, ё, й - H-плоскость ( $\Psi = 135^\circ$ ); г, ж, к - плоскости, проходящие через оси Y ( $\Psi = 90^\circ$ ).

## Выводы

Предложен новый метод синтеза неэквилидистантных двумерных антенных решеток с использованием матриц трансформации и Магических квадратов для декаметровых радиотелескопов. Новый метод синтеза АР с помощью Магических квадратов позволяет получить более высокое угловое разрешение. В то же время можно обеспечить, чтобы боковые лепестки соответствовали ДН эквидистантных решеток.

Предложенная концепция проектирования АР для декаметровых радиотелескопов обеспечит повышенное угловое разрешение при том же числе элементов, что важно при наблюдении за пространственными атмосферными неоднородностями (особенно в ионосфере или термосфере). Это закладывает основу создания приборов в области радиоастрономии для дальнейших исследований атмосферы, планет и межпланетной среды.

## Литература

1. А.А. Коноваленко. Перспективы низкочастотной радиоастрономии // Радиофизики и радиоастрономия. -2005. – Т. 10, специальный выпуск, с.
2. Lutsenko VI, Lutsenko I.V., Popov I.V., Sobolyak A.V., LUO Yi-yang. Using the properties of Magic squares for aperture synthesis. 8th International Conference Acousto-optical and radar measurement and information processing methods 20- 23 September, 2015, Suzdal, Russia Materials of the 8th International Scientific and Technical Conference / Russian National Technical University. A.S. Popova. Suzdal. Russia. 2015. P.215-219. [Russian]
3. V. I. Lutsenko, I. V. Popov, I. V. Lutsenko Luo Yiyang, A. V. Mazurenko. Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays are Based on Magic Squares. Proceedings 2016 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. -Kharkov, Ukraine, June 21-24, 2016 – 1 electron. opt. disk (CD – ROM). IEEE Catalog Number CFP16780-CDR ISBN 978-1-5090-2266-3.

4. Kravchenko V.F., Lutsenko V.I., Lutsenko I.V., LUO Yi-yang, Mazurenko A.V., Popov I.V. Non-equidistant two-dimensional antenna arrays based on "Magic" squares. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*. 2017. Vol. 8. No. 3, pp. 244-253.
5. А. А. Коноваленко, С. Н. Ерин, И. Н. Бубнов, П. Л. Токарский, В. В. Захаренко, О. М. Ульянов, М. А. Сидорчук, С. В. Степкин, А. А. Гридин, Г. В. Квасов, В. Л. Колядин, В. Н. Мельник, В. В. Доровский, Н. Н. Калиниченко, Г. В. Литвиненко, Ф. Зарка, Л. Дени, Ж. Жирар, Х. О. Рукер, М. Панченко, А. А. Станиславский, А. Д. Христенко, Д. В. Муха, А. М. Резниченко, В. М. Лисаченко, В. В. Борцов, А. И. Браженко, Я. Ю. Васильева, А. А. Скорик, А. И. Шевцова, К. Ю. Милостная. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения // *Радиофизики и радиоастрономия*. -2016. – Т. 21, №2. – С. 83-131.