

## Использование керамических микрополосковых антенн в задачах поляризационного обужения диаграммы направленности

А.С. Антонов<sup>1</sup>, А.С. Анохин<sup>1</sup>, А.С. Антонова<sup>1</sup>, П.Ю. Белявский<sup>1</sup>, А.В. Еськов<sup>1</sup>, В.С. Ребо<sup>2</sup>,  
Е.А. Хвостова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>АО «НПП «Радар ммс»

**Аннотация:** рассмотрена возможность применения микрополосковых антенн на основе керамических диэлектриков с высоким значением диэлектрической проницаемости для создания сверхкомпактных антенных решеток L-диапазона. Показано, что использование керамических подложек позволяет уменьшить размеры одиночного излучателя до  $0,2\lambda$  и обеспечить межэлементное расстояние порядка  $0,27\lambda$ , что является критическим для реализации метода поляризационного обужения диаграммы направленности. Предложенная конфигурация шестиэлементной решетки с последовательным поворотом элементов на  $60^\circ$  и двумя ортогональными точками питания каждого излучателя обеспечивает формирование двух независимых обуженных диаграмм направленности. Комплексирование метода поляризационного обужения с алгоритмами пространственной обработки сигналов (LMCV, MVDR, STAP) позволяет повысить точность фазовой пеленгации навигационных космических аппаратов и обеспечить помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей ГНСС в условиях сложной помеховой обстановки.

**Ключевые слова:** Керамические микрополосковые антенны, поляризационное обужение диаграммы направленности, сверхкомпактные антенные решетки, фазовая пеленгация, пространственная обработка сигналов.

### 1. Введение

На сегодняшний день в антенной технике широкое применение находят керамические диэлектрики [1], получаемые методом высокотемпературного твердофазного синтеза (HTCC). Одним из перспективных композитных материалов является титанат магния [2] и комозитные материалы на основе системы титанат магния – титанат стронция  $(1-x)MgTiO_3-xSrTiO_3$  [3]. Малые диэлектрические потери ( $tg\delta$  составляет порядка  $10^{-3} \dots 10^{-4}$ ) позволяют использовать данную керамику в качестве подложки микрополосковых антенн. Возможность получения различных значений диэлектрической проницаемости материала в широких пределах (10–130) за счет варьирования пропорций магния и стронция в составе предоставляет дополнительную степень свободы для разработчиков антенн. Увеличение диэлектрической проницаемости материала позволяет миниатюризировать размеры микрополосковых антенн, однако сопровождается сужением рабочей полосы частот. Реализации электрически малых частотно-избирательных антенн позволяет решить задачу создания малоэлементных сверхкомпактных антенных решеток (АР) L-диапазона для навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ГНСС, размещаемых на подвижных платформах, что накладывает дополнительные ограничения на габариты и энергопотребление, а также способных осуществлять фазовую пеленгацию навигационных космических аппаратов (НКА).

## 2. Анализ

Пеленгация отдельных НКА с помощью малоэлементной АР возможна исключительно при применении методов пространственной обработки сигналов, обеспечивающих сверхразрешение. Одним из таких методов является поляризационное обужение диаграммы направленности (ДН) [4]. Его реализация предполагает размещение шести антенн с линейной поляризацией равномерно на окружности диаметром, равным длине волны, с последовательным поворотом антенн на 60 градусов. Данная конфигурация обеспечивает функционирование в двух основных режимах:

Режим круговой поляризации формируется при последовательном фазовом сдвиге между элементами на 60 градусов; ДН в этом режиме имеет слабо выраженный максимум, ширина луча определяется геометрическим размером раскрыва АР;

При синфазном режиме возникает выраженный провал ДН, обусловленный деструктивной интерференцией полей элементов. Направление этого провала совпадает с направлением максимума ДН в режиме круговой поляризации.

Формирование разностной ДН путем цифрового комбинирования сигналов, принимаемых в этих двух режимах, позволяет получить существенно обуженный главный лепесток, что повышает разрешающую способность и точность угловых измерений.

Следует отметить, что для реализации метода, описанного в [2], принципиальным является использование в качестве одиночного элемента решетки антенны линейной поляризации, что делает невозможным использование популярных в ГНСС аппаратуре спиральных антенн. Наиболее целесообразным является использование микрополосковых антенн с двумя ортогональными точками питания и осуществление независимой обработки сигналов с каждого выхода. Это позволяет использовать каждый антенный элемент как два виртуальных канала, поляризации которых ортогональны друг другу. Для перспективной НАП этот подход удваивает число степеней свободы при реализации алгоритмов пространственной обработки сигналов (LMCV, MVDR, STAP) и позволяет формировать две независимые обуженные ДН, что потенциально повышает точность угловых измерений.

Для пеленгации НКА требуется очень широкий рабочий сектор углов (угол места 0–90 градусов для любого азимута), что приводит к требованию минимизации расстояния между антеннами в решетке. Размеры микрополосковых антенн, выполненных на квазिवоздушных подложках или на подложках из распространенных СВЧ-диэлектриков типа Rogers 4003С, не позволяют компоновать их в сверхкомпактные АР, где межэлементное расстояние составляет менее  $0,5\lambda$  и приближается к  $0,25\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны). Использование керамических диэлектриков в качестве материалов подложки для элементов АР позволяет уменьшить их размер до  $0,2\lambda$ , а сами элементы разместить на окружности диаметром 100 мм. В данной конфигурации расстояние между соседними элементами составит порядка  $0,27\lambda$ , что позволяет отнести такую АР к сверхкомпактным.

Пеленгационная характеристика АР определяется выражением:

$$G(\theta, \varphi, t) = \left( \frac{|\sum_{n=1}^6 \dot{R}_n(t) \dot{W}_{cn} \dot{W}_{\varphi\theta n}|}{|\sum_{n=1}^6 \dot{R}_n(t) \dot{W}_{\varphi\theta n}|} \right) \cdot \left( \frac{|\sum_{n=1}^6 \dot{R}_n(t) \dot{W}_{cn} \dot{W}_{\varphi\theta n}|}{|\sum_{n=1}^6 \dot{R}_n(t) \dot{W}_{\varphi\theta n}|} \right)_{\perp}, \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол места,  $\varphi$  – азимут,  $n$  – номер антенны,  $\dot{W}_{\varphi\theta n} = e^{\frac{2\pi}{\lambda}(X_n \sin(\theta) \cos(\varphi) + Y_n \sin(\theta) \sin(\varphi))}$  – вектор весовых коэффициентов, определяющий поворот луча ДН,  $X_n, Y_n$  – координаты элементов антенной решетки,  $\dot{R}_n(t)$  – корреляционная функция сигнала, принятого  $n$ -ым элементом антенной

решетки,  $[W_c] = \begin{bmatrix} e^{j0} \\ e^{j\frac{\pi}{3}} \\ e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ \vdots \\ e^{j\frac{5\pi}{3}} \end{bmatrix}$  – вектор весовых коэффициентов для формирования режима

круговой поляризации, индекс  $\perp$  обозначает ортогональную поляризацию.

Теоретически получаемая бесконечно малая ширина обуженной ДН на практике имеет конечное значение, определяемое уровнем шумов приемного устройства. С этой точки зрения дополнительным преимуществом является частотная избирательность керамических микрополосковых антенн, поскольку она позволяет увеличить отношение сигнал/шум, особенно в условиях воздействия шумоподобных помех.

На рис. 1 представлены результаты моделирования пеленгации НКА в MATLAB для истинного навигационного поля (а) и ситуации прихода сигналов на всех литерях с одного направления (б).

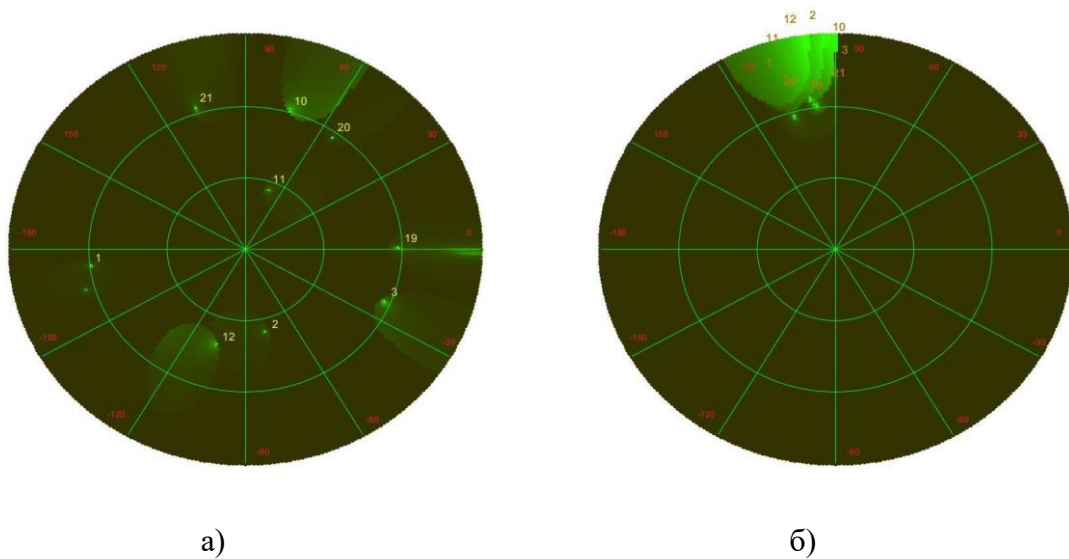


Рисунок 1. Результаты моделирования пеленгации НКА в MATLAB

### 3. Выводы

Таким образом, использование микрополосковых антенн на подложках из керамических диэлектриков с высоким значением диэлектрической проницаемости позволяет реализовать АР L-диапазона, обеспечивающую комплексирование известных методов пространственной обработки сигналов (LMCV, MVDR, STAP) с поляризационным обужением ДН, позволяя осуществлять фазовую пеленгацию НКА. Это открывает новые перспективы для создания НАП, способной контролировать истинность навигационного поля и штатно функционировать в условиях воздействия различного рода помех.

#### Список литературы

1. Sebastian M. T., Ubic R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties // International Materials Reviews. – 2015. – Т. 60. – №. 7. – С. 392-412.
2. Jo H. J., Kim J. S., Kim E. S. Microwave dielectric properties of MgTiO<sub>3</sub>-based ceramics // Ceramics International. – 2015. – Т. 41. – С. S530-S536.
3. Разработка керамического диэлектрика для применения в антенной технике / А. С. Антонова, А. С. Анохин, А. В. Еськов, А. С. Антонов // Антенны и распространение радиоволн 2025 (АРР'25) : Сборник докладов VI Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 01–03 октября 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский

- государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2025. – С. 85-87.
4. Антонов, А. С. Кольцевая антенная решетка S-диапазона круговой поляризации / А. С. Антонов, А. В. Кочетов, Е. А. Хвостова // Антенны и распространение радиоволн 2025 (АРР'25) : Сборник докладов VI Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 01–03 октября 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2025. – С. 14-16.