

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ АДАПТИВНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИИ.

*Рассмотрены возможность использования трехмерной антенной решетки для построения адаптивных антенн. Приведены результаты моделирования.*

Адаптивная антенна, спутниковая радионавигация, модель объемной антенной решетки

### Введение

Перспективным направлением решения проблемы повышения помехоустойчивости аппаратуры спутниковой радионавигации является использование адаптивных антенн [1,2,3]. Адаптивные антенны (АА), построенные на базе антенных решеток (АР), позволяют в результате анализа сигнально-помеховой обстановки формировать в автоматическом режиме амплитудно-фазовое распределение на элементах АР таким образом, чтобы создавались провалы в диаграмме направленности в направлении прихода помех.

Разработка АА затрагивает целый ряд вопросов, связанных с выбором параметров АР, синтезом алгоритмов адаптации, учетом дестабилизирующих факторов.

В литературе по адаптивной компенсации помех не акцентировалось внимание на конфигурации АР.

Авторами получены и опубликованы некоторые результаты в области построения АА с линейными и плоскими АР [4,5]. В настоящей работе впервые делается попытка оценки возможности использования пространственных антенных решеток для построения АА.

### Математическое моделирование объемной АА.

Рассмотрим трехмерную АР, в которой излучающие элементы расположены в узлах пространственной решетки и ориентированы параллельно осям координат (рис. 1).

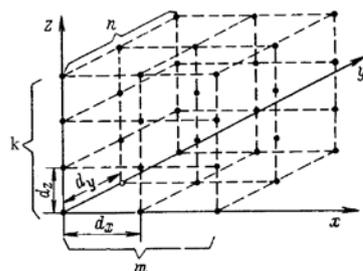


Рисунок 1.

Пусть начало координат совпадает с одной из вершин решетки. В направлениях  $x, y, z$  расположены  $N_x, N_y, N_z$  излучающих элементов соответственно. Расстояния между элементами равны  $dx, dy, dz$ . Излучатели идентичны и изотропны. Амплитудное распределение электромагнитного поля в апертуре равномерное.

Как показано в [6], множитель объемной АР можно представить в виде:

$$f(\theta, \varepsilon) = \sum_{n=0}^{N_x-1} \sum_{m=0}^{N_y-1} \sum_{k=0}^{N_z-1} \exp \psi_{n,m,k}, \quad (1)$$

$$\text{где } \psi_{n,m,k} = j \frac{2\pi}{\lambda} (n \cdot dx \cdot \sin \theta \cdot \cos \varepsilon + m \cdot dy \cdot \sin \theta \cdot \sin \varepsilon + k \cdot dz \cdot \cos \theta),$$

$\theta, \varepsilon$  – угол места и азимут направления прихода,

$\lambda$  – длина волны принимаемого сигнала.

Исходя из (1) множитель адаптивной АР примет вид

$$f_A(\theta, \varepsilon) = \sum_{n=0}^{N_x-1} \sum_{m=0}^{N_y-1} \sum_{k=0}^{N_z-1} \omega_{n,m,k} \exp \psi_{n,m,k}, \quad (2)$$

где  $\omega_{n,m,k}$  – весовые коэффициенты адаптации.

При условии, что излучатели в плоскостях, перпендикулярных осям  $x, y, z$  имеют равные относительные амплитудные и фазовые распределения выражение (2) можно привести к виду [6]:

$$f_A(\theta, \varepsilon) = f_x(\alpha) \cdot f_y(\beta) \cdot f_z(\theta), \quad (3)$$

где

$$f_x(\alpha) = \sum_{n=0}^{N_x-1} w_n \cdot \exp \left( j \frac{2\pi}{\lambda} n \cdot dx \cdot \cos \alpha \right),$$

$$f_y(\beta) = \sum_{m=0}^{N_y-1} w_m \cdot \exp \left( j \frac{2\pi}{\lambda} m \cdot dy \cdot \cos(\beta) \right),$$

$$f_z(\theta) = \sum_{k=0}^{N_z-1} w_k \cdot \exp \left( j \frac{2\pi}{\lambda} k \cdot dz \cdot \cos \theta \right),$$

$$\cos \alpha = \sin \theta \cdot \cos \varepsilon,$$

$$\cos \beta = \sin \theta \sin \varepsilon.$$

Выражения  $f_x(\alpha)$ ,  $f_y(\beta)$ ,  $f_z(\theta)$  – представляют собой множители линейных АР с направлениям прихода фронта волны, характеризуемыми направляющими косинусами  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$ ,  $\cos \theta$ .

Углы  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  – вычисляются в модели измерителя углов, синтезированной по критерию максимума функции правдоподобия [1].

Весовые коэффициенты для каждой из линейных решеток определяем согласно выражению [4]:

$$w^\xi = [\Phi^\xi]^{-1} \cdot \beta^\xi, \quad (4)$$

где  $w^\xi$  – вектор весовых коэффициентов;

$\Phi^\xi$  – матрица фазовых распределений принимаемых сигналов и помех вдоль линейной АР;

$\beta^\xi$  – вектор с элементами равными 0 в помеховых строках и  $N_\xi$  – в сигнальных строках системы уравнений (4) соответственно для  $\xi$  – по осям  $x, y, z$ .

Исследование математической модели, построенной согласно выражениям (1-4) проводилось при следующих исходных данных:

- сигнал детерминированный, помеха случайная;
- $N_x = N_y = N_z = N = 2$ ;
- $dx = dy = dz = 0,5\lambda$ ,  $\lambda = 0,2\text{м}$ ;
- при приеме помехи с направления  $\theta_p = 70^\circ$  и  $\varepsilon_p = 19^\circ$ , сигнала –  $\theta_c = 20^\circ$  и  $\varepsilon_c = 50^\circ$ ;
- отношение помеха/сигнал – 40дБ;
- при усреднении по  $10^4$  реализаций;
- моделирование проводилось для линейной, плоской и объемной АР.

Показатель подавления помехи определялся согласно выражению

$$Q = \frac{1}{KR} \sum_{i=1}^{KR} Q_i,$$

$$\text{где } Q_i = 20 \lg \left[ \frac{1}{N^3} |f_i(\theta_p, \varepsilon_p)| \right] - 20 \lg \left[ \frac{1}{N^3} |f_i(\theta_c, \varepsilon_c)| \right],$$

KR – число реализаций.

На рис.2 изображена диаграмма направленности пространственной адаптивной антенны для рассматриваемой модели.

Получены следующие значения показателя Q:

- для линейной АР – -55дБ;
- плоской АР – -87дБ;
- для объемной АР – -119дБ.

Как видим, добавление третьего измерения позволило улучшить показатель подавления помехи АА более, чем на 30%.

Улучшение показателя подавления помех именно за счет пространственной АР может оказаться существенным, когда габариты антенны в плоскости строго ограничены. Так при размещении АА на борту самолета, добавление, например, одного слоя полотна 4-х элементной АР может оказаться более приемлемым, чем увеличение площади полотна. При этом усложнение разводки возбуждающих элементов может быть незначительным.

Кроме того, может оказаться существенным добавление третьего измерения АР для уменьшения приема сигналов с зеркального направления.

Сказанное позволяет считать перспективным дальнейшие исследования объемных адаптивных антенн.

#### **Выводы:**

Применение адаптивных антенн для повышения помехоустойчивости аппаратуры спутниковой навигации в настоящее время общепризнано. Исследование методов повышения эффективности этих антенн тем более актуально, что разработка их в Украине находится в начальной стадии.

Полученные результаты показали, что применение пространственных адаптивных решеток в принципе позволяет улучшить показатель подавления помех. О перспективности их использования можно будет заключить после проведения дальнейших исследований.

#### **Список литературы:**

1. Ковалевский Э.А., Конин В.В. Адаптивная антенна контрольных станций спутниковых навигационных систем // Материалы 9-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», – Севастополь 1999. – с.161-163
2. Гордиенко Д.Н. Возможности использования адаптивных антенных решеток для повышения помехоустойчивости аппаратуры спутниковых систем // Новости навигации. НЦ «Интернавигация» и РОИН, 2001, №1.
3. Williams D., Clark S., Cook J. etc. Four-Element Adaptive Array Evaluation for United States Navy Airborne Applications/ ION GPS 2000, 19-22 September 2000, Salt Lake City, p.2523-2532.
4. Ковалевський Є.А., Конин В.В. Антенна система с адаптацією на основі прогноза о сигнально-помехової обстановці // Матеріали VII Міжнародної конференції «Авіа-2006», т.1, Київ, 2006, с.21.17-21.20.
5. Ковалевский Э.А. Адаптивная антенна СРНС с коррекцией оценки угла прихода помех // Матеріали VII Міжнародної конференції «Авіа-2006», т.1, Київ, 2006, с.21.37-21.40.
6. Кюн Р. Микроволновые антенны./ пер. с немецкого под ред. М.П. Долуханова. Ленинград, «Судостроение», 1967. – 517с.

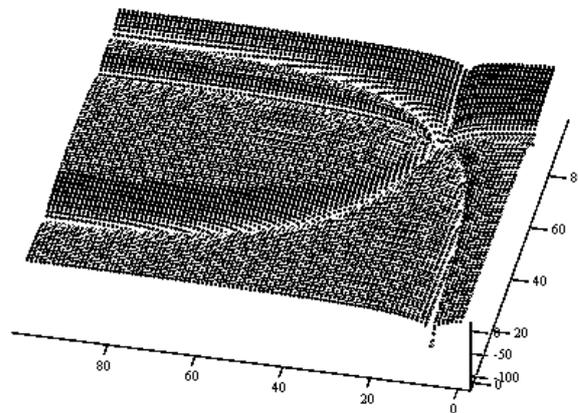


Рисунок 2