

# Оценка влияния адаптивного управления амплитудной диаграммой направленности антенной решетки на ошибки фазовых измерителей

М.Л. Паринов, email: pml\_27\_2\_8@mail.ru  
Р.С. Нистратов, email: jack3.5mme@gmail.com  
К.Я. Солайман

ВУНЦ ВВС «ВВА»

***Аннотация.** В статье рассматриваются модели процессов управления амплитудным распределением антенной решетки фазовых измерителей и оценки влияния последнего на соотношение сигнал/шум при определении относительных пространственных фазовых набегов в задачах нахождения параметров линии положения источников излучения.*

***Ключевые слова:** фазовые методы, диаграмма направленности, измеритель фазы, источник излучения, линия положения.*

## **Введение:**

Существенной проблемой в настоящее время является решение задачи поиска, обнаружения и определения пространственного положения многоцелевых беспилотных летательных аппаратов и других летно-подъемных средств (ЛПС). Возникновение подобного рода обстоятельств обуславливается, в первую очередь, достижениями в области разработки специальных покрытий, обеспечивающих значительное снижение эффективной площади рассеивания ЛПС, что практически исключает возможность их обнаружения и оценки пространственного положения методами активной локации. В таких условиях информативной составляющей координатометрии ЛПС является электромагнитное излучение канала управления, сравнительная оценка параметров которого в различных точках пространственно-временного континуума позволяет определять линию положения (ЛП) и координаты источника излучения (ИИ).

Как показали исследования, проведенные в работах [1-3], наиболее рациональными, с точки зрения точности формирования параметров пространственной линии положения, являются способы, ориентированные на оценку величины относительного пространственного фазового набег электромагнитной волны (ЭМВ) в

нескольких разнесенных на расстояние, не превышающее половины длины волны, точках.

Вместе с тем, принимая во внимание возможные меры по снижению энергетических затрат, при формировании канала управления ЛПС в интересах, в том числе, увеличения временного ресурса, которые могут заключаться в реализациях функций пространственно-временной и энергетической адаптации, следует ожидать существенного снижения эффективности фазовых методов определения линии положения ИИ, вследствие значительного уменьшения энергии сигнала.

Подобные условия определяют необходимость формирования способов, направленных на адаптивное, применительно к сигнально-помеховой обстановке, управление амплитудной диаграммой направленности (АДН) антенной решеткой (АР), фазовых измерителей в интересах повышения значения соотношения сигнал/шум при реализации фазовых методов определения направления на ИИ.

Сказанное выше обуславливает цель настоящей статьи, заключающуюся в моделировании процессов управления АДН антенной решеткой и оценке относительного фазового набега ЭМВ в интересах определения влияния изменяющейся пространственной структуры АДН, пересчитанной в соотношение сигнал/шум в направлении на ИИ, на ошибки фазовых измерений, при решении задач нахождения параметров линии положения последнего.

## 1. Способ адаптивного управления амплитудной диаграммой направленности

Обобщенная структура способа адаптивного управления АДН при реализации функции фазовых измерений в условиях определения линии положения ИИ представлена в следующем виде:

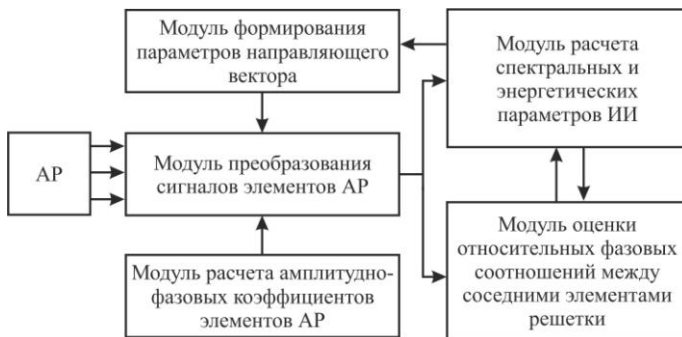


Рис. 1. Структурная схема способа адаптивного управления АДН

В соответствии с приведенной на рис. 1 структурой, предварительная оценка пространственных параметров ИИ производится на основе фазовых измерений, базирующихся на известных вычислительных алгоритмах оценки фазы сигнала, ориентированных на минимизацию логарифма функционала правдоподобия, определяемого в следующем виде [4]:

$$q(\varphi) = \frac{2}{N} \int_0^T \xi(t) s(t, \varphi) dt \quad (1)$$

где  $N$  – спектральная плотность мощности шума;  $T$  – время накопления;  $s(t, \varphi)$  – функция, определяющая опорный сигнал, в качестве которого может рассматриваться сигнал одного из вибраторов решетки.

Применительно к гармоническому монохроматическому сигналу без угловой и амплитудной модуляций  $s(t, \varphi) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$  точку экстремума функции  $q(\varphi) - \hat{\varphi}$  определим решением следующего уравнения:

$$\frac{dq(\varphi)}{d\varphi} = 0 \Rightarrow A \cdot \int_0^T \xi(t) \sin(\omega t + \varphi) = 0 \quad (2)$$

Решив (2) относительно  $\hat{\varphi}$ , окончательно получим:

$$\hat{\varphi} = -\arctg \frac{\int_0^T \xi(t) \sin \omega t dt}{\int_0^T \xi(t) \cos \omega t dt} \quad (3)$$

Опираясь на выражение (1) и принимая во внимание результаты, полученные в [4], величину дисперсии оценки относительного пространственного фазового набега определим в следующем виде:

$$D_{\hat{\varphi}} = - \left( \frac{d^2 q(\varphi)}{d\varphi^2} \right)^{-1} \Bigg|_{\varphi = \hat{\varphi}} = - \frac{1}{\frac{2}{N} \int_0^T A^2 \cdot \cos(\omega t + \varphi) \cdot \cos(\omega t + \hat{\varphi}) dt} \approx \frac{N}{2E \cdot \cos(\varphi - \hat{\varphi})} \Bigg|_{\varphi = \hat{\varphi}} = \frac{N}{2E} \quad (4)$$

Таким образом, соотношение (4) позволяет определить, как влияет соотношение сигнал/шум, изменяемое вследствие управления пространственной структурой амплитудного распределения АР, на точность оценки относительной фазы сигналов ее элементов.

## 2. Алгоритм управления диаграммой направленности антенной решетки

Известно, что оптимальный вектор весовых коэффициентов  $\dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}$ , обеспечивающий требуемое положение главного лепестка диаграммы направленности по критерию максимизации соотношения сигнал/шум, определяется значениями элементов ковариационной матрицы сигналов  $\dot{\Phi}_{xx}$  и направляющего вектора  $\dot{\mathbf{V}}_{\text{нв}}$  [5]:

$$\dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}} = (1/\eta) \dot{\Phi}_{xx}^{-1} \dot{\mathbf{V}}_{\text{нв}} \quad (5)$$

где  $\eta = (\dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}^T \dot{\mathbf{V}}_{\text{нв}} / \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}^T \dot{\Phi}_{xx} \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}})$  – параметр (комплексное число) АР в установившемся режиме.

Значения элементов направляющего вектора определяются в соответствии с особенностью структуры опорного вектора  $\mathbf{D}$ , формируемого на основе взаимных фазовых коэффициентов опорного сигнала и сигналов элементов АР.

Аналитическое соотношение, характеризующее направляющий вектор запишем в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{V}}_{\text{нв}}^T = \mathbf{D}^T \cdot u_0(t) / U_c = [1 \quad \dots \quad \exp j\varphi_{0ij} \quad \dots \quad \exp j\varphi_{0Nj}] \quad (6)$$

где  $u_c$  – амплитуда сигнала в антенном элементе (АЭ),  $\varphi_{0ij}$  – фазовый сдвиг опорного сигнала в  $i$ -м АЭ относительно  $j$ -го.

Таким образом, процедура формирования главного лепестка ДН в направлении обнаруженного ИИ состоит в предварительном определении угловых координат с последующим расчетом направляющего вектора  $\dot{\mathbf{V}}_{\text{нв}}^*$  [5].

## 3. Модель влияния ширины амплитудной диаграммы направленности на дисперсию оценки фазы

Принимая во внимание изложенное выше, структуру модели, позволяющей производить оценку влияния АДН на дисперсию фазы, определим в виде, представленном на рис. 2:

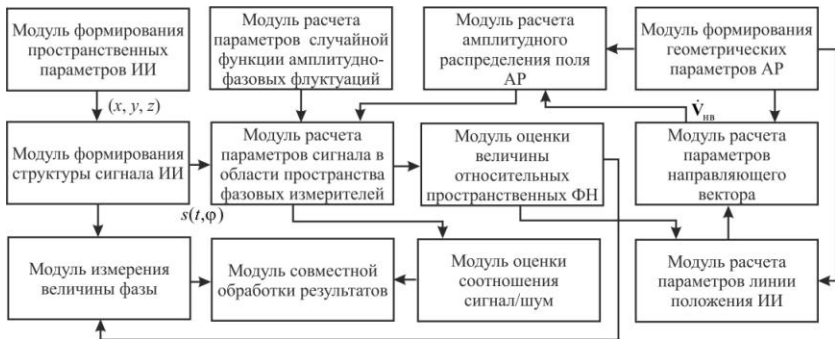
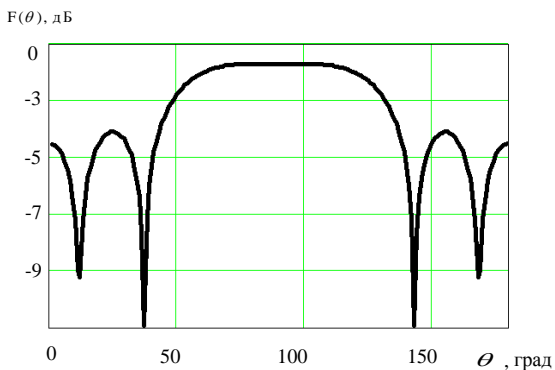


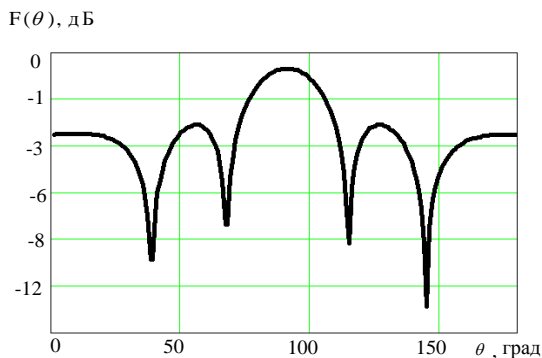
Рис. 2. Структура модели влияния ширины АДН на дисперсию оценки фазы

Представленная вычислительная структура реализована в среде Mathcad. В интересах проведения вычислительного эксперимента определим исходные данные в следующем виде: пятиэлементная линейная антенная решетка при воздействии на нее гармонического сигнала и отсутствии помех, антенные элементы представляют собой полуволновые несимметричные вертикальные вибраторы. На рис. 3 а представлена исходная ДН главный лепесток которой шириной  $2\theta_{3\text{дБ}} = 100^\circ$  ориентирован в направлении  $\theta = 100^\circ$ .

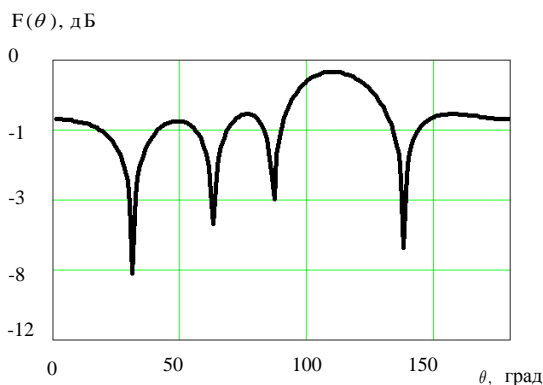
Результирующие структуры амплитудных распределений представлены на рис. 3 б и в.



а - диаграмма направленности ААС для одновременного просмотра сектора пространства  $\Delta\theta = 100^\circ$



*б* – результирующая ДН в направлении ИРИ с  $\theta_c = 90^\circ$



*в* – результирующая ДН в направлении ИРИ с  $\theta_c = 110^\circ$

*Рис. 3.* Результирующие ДН при адаптивном управлении АДН

Анализ представленных на рис. 3. АДН показывает, что изменение фазовой структуры направляющего вектора в соответствии с предварительными оценками направления на ИИ приводит к незначительной деградации симметрии распределения с одновременным смещением направления максимального излучения на величину, характеризующуюся угловой координатой источника. При этом ширина ДН уменьшается согласно результатам (см. рис. 3 *б, в*) с  $2\theta_{3дБ}^\circ = 100^\circ$  до  $2\theta_{3дБ}^\circ = 30^\circ$  ( $\theta_{max} = 110^\circ$ ) и  $2\theta_{3дБ}^\circ = 25^\circ$  ( $\theta_{max} = 90^\circ$ ).

Изменение ширины ДН, как это показано на рис. 4, приводит к увеличению соотношения сигнал/шум применительно к направлению на ИИ (главный максимум ДН), так при сужении главного лепестка с  $2\theta_{3дБ} = 150^\circ$  до  $2\theta_{3дБ} = 100^\circ$ , соотношение сигнал/шум увеличивается с  $q=10$  до 16. Следует отметить, что поведение функции  $q(\Delta\theta)$  зависит от исходного соотношения сигнал/шум (рис. 4), так, при  $q_0 = 3$   $\frac{dq}{d\Delta\theta} \approx 0,04$ , а при  $q_0 = 10$   $\frac{dq}{d\Delta\theta} \approx 0,16$  (производная определялась при условии линеаризации области анализа функции).

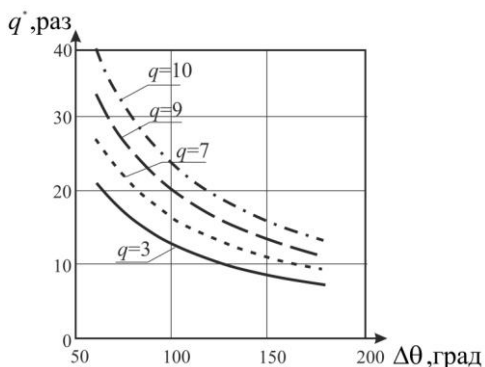


Рис. 4. Зависимость соотношения сигнал/шум от ширины лепестков ДН

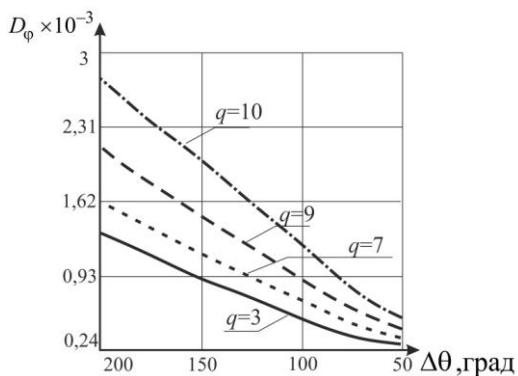


Рис. 5. Зависимость дисперсии оценки фазы от ширины лепестков ДН

Следствием изменения соотношения сигнал/шум при корректировке амплитудного распределения является увеличение (уменьшение) дисперсии оценки относительного пространственного фазового набега, как это показано на рис. 5. Так, при изменении  $2\theta_{3dB}^{\circ}$  со  $150^{\circ}$  до  $50^{\circ}$  дисперсия фазы уменьшается более чем в 2,5 раза, что является существенным, с точки зрения последующей оценки параметров линии положения ИИ.

### **Заключение**

Таким образом, в настоящей статье разработана модель, позволяющая реализовать функционал корректировки амплитудного распределения АР в соответствии с результатами предварительной оценки направления на ИИ. Помимо этого, представленная в статье модель обеспечивает формирование величины дисперсии оценки фазы сигналов антенных элементов решетки, как функции от ширины ее ДН.

Полученные результаты могут быть использованы в интересах формирования требований к пеленгаторным антенным системам и алгоритмам функционирования их диаграммо-образующих схем, при которых обеспечивается заданное качество пеленгования и координатометрии источников радиоизлучения.

### **Список литературы**

1. Козирацкий Ю.Л. Модели пространственного и частотного поиска. Монография. – М.: Радиотехника, 2014.
2. Козирацкий Ю.Л., Паринов М.Л.,. Методический подход к определению местоположения источника электромагнитного излучения / Ю.Л. Козирацкий, М.Л. Паринов, Ахмад аль Рахья // Радиотехника. – 2010. – №8. – С.77-82.
3. Козирацкий, Ю.Л. Методика определения местоположения источника электромагнитной волны по фазовому портрету фронта волны на плоскости / Ю.Л. Козирацкий, М.Л. Паринов, Э.К. Алгазинов // Материалы X международной научно-методической конференции “Информатика: проблемы, методология, технологии”. – Воронеж: ВГУ, 2010 г., – С.136-141.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320с.
5. Особенности методов пространственно-временной обработки для повышения отношения сигнал/помеха на входе аппаратуры потребителей глобальной навигационной спутниковой системы / В.А. Павлов [и др.] // Радиотехника. – 2018. – №7. – С. 94-100.