

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:

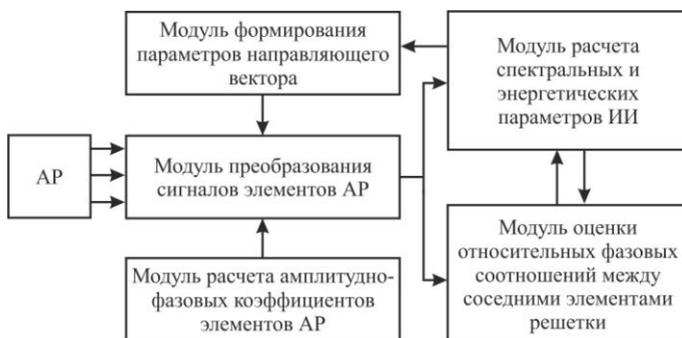


Рис. 1. Структурная схема способа адаптивного управления АДН

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:

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

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), φ_{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:

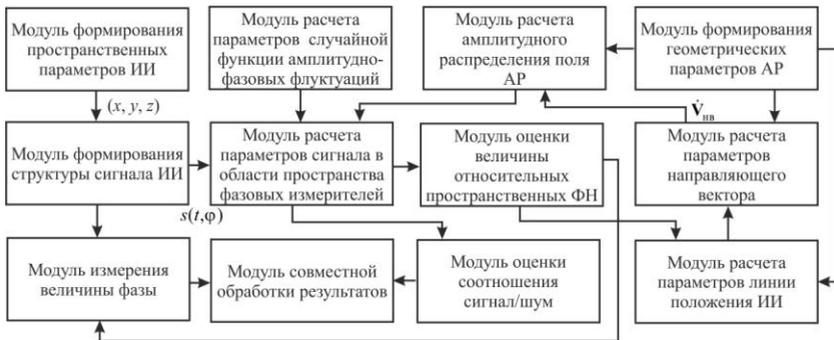
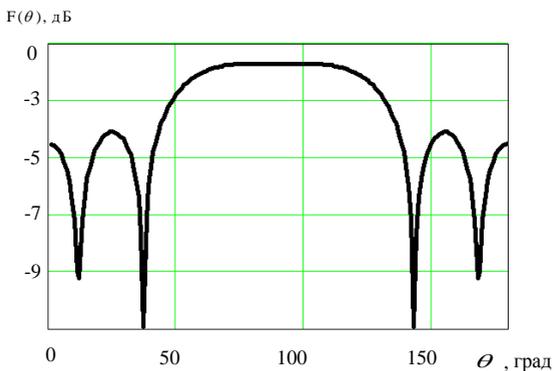


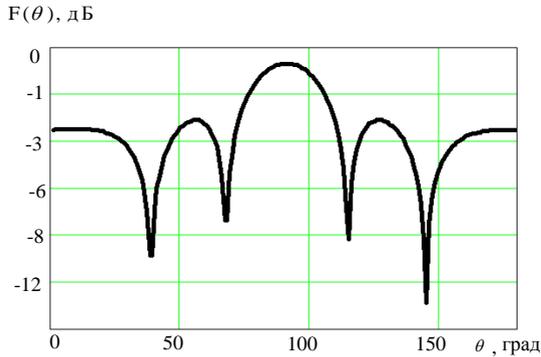
Рис. 2. Структура модели влияния ширины АДН на дисперсию оценки фазы

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 $\theta = 100^\circ$.

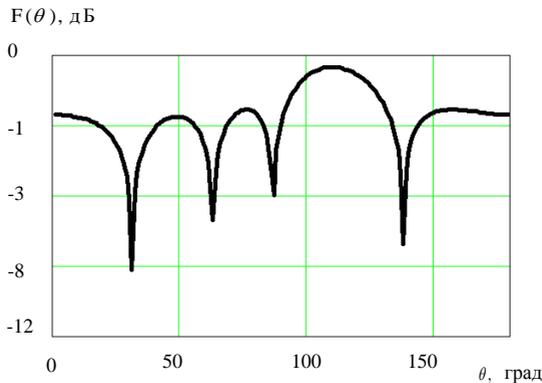
Результирующие структуры амплитудных распределений представлены на рис. 3 б и в.



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).

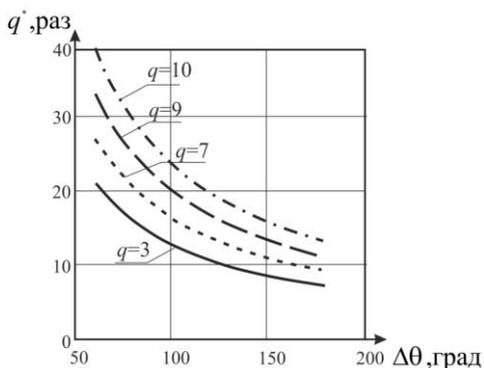


Рис. 4. Зависимость соотношения сигнал/шум от ширины лепестков ДН

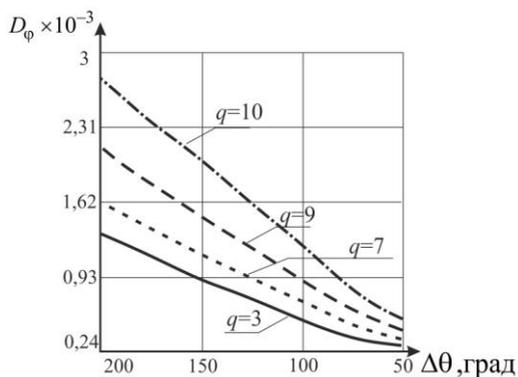


Рис. 5. Зависимость дисперсии оценки фазы от ширины лепестков ДН

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° до 50° 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.