

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ В АВИАЦИОННЫХ РАДИОЛИНИЯХ

Б.Б. Поспелов, канд. техн. наук, Д.Л. Четкин, М.В. Грушенко

Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба

В статье на основе анализа влияния начальных значений весовых коэффициентов на эффективность адаптивных антенных систем делаются выводы об оптимальном выборе начальных значений весовых коэффициентов при априорно известном направлении прихода полезного сигнала, при априорно неизвестном направлении прихода полезного сигнала, а также поведено исследование влияние начального усиления (ослабления) диаграммы направленности на эффективность адаптивной антенной системы.

* * *

У статті на основі аналізу впливу початкових значень вагових коефіцієнтів на ефективність адаптивних антенних систем робляться висновки про оптимальний вибір початкових значень вагових коефіцієнтів при априорно відомому напрямку приходу корисного сигналу, при априорно невідомому напрямку приходу корисного сигналу, а також поведене дослідження впливу початкового посилення (ослаблення) діаграми спрямованості на ефективність адаптивної антенної системи.

* * *

In clause the influence of initial meanings of weight factors on efficiency adaptive aerial of systems is analysed. The conclusions about an optimum choice of initial meanings of weight factors are made at a direction, known prior to the beginning experience, of arrival of a useful signal, at unknown prior to the beginning experience a direction of arrival of a useful signal, and also made research influence of initial amplification (easing) of the diagram of an orientation on efficiency by the adaptive aerial of system.

Постановка проблемы и анализ публикаций

Одним из перспективных направлений модернизации и развития бортового радиоэлектронного оборудования самолетов 4-го и 5-го поколения является использование в составе авиационных радиолиний (АРЛ), вместо традиционных антенн, адаптивных антенных систем (ААС).

Бортовые ААС как правило включают несколько традиционных антенн выходные сигналы которых адаптивно взвешиваются и суммируются, образуя выходной сигнал адаптивной системы. В состав системы также входит блок управления адаптивным взвешиванием, реализующий заданный алгоритм адаптации системы. Замена традиционных антенн на ААС в АРЛ позволяет существенно повысить помехоустойчивость радиолиний в нестационарных условиях их радиоэлектронного подавления без снижения полетной способности.

К бортовым ААС, которые используются в

АРЛ, предъявляются повышенные требования к эффективности их функционирования в нестационарных условиях, обусловленных прежде всего высокой подвижностью объектов авиационной техники и постоянным изменением во времени ориентации объектов относительно направления приема волн от источника полезного сигнала и помех. Поэтому повышение скорости адаптации бортовых ААС является актуальной задачей. Известные направления повышения скорости адаптации [1,2,5] оказываются в силу их сложности и громоздкости не всегда приемлемыми в условиях борта. Более подходящими в этом случае являются направления, требующие меньших реализационных затрат. Повышение эффективности функционирования бортовых ААС следует рассматривать в двух направлениях: повышение эффективности в переходном режиме и повышение эффективности в установившемся режиме.

В большинстве работ посвященных исследованию алгоритмов адаптивной обработки [1-4] рассматриваются установившиеся режимы работы. В тоже время, изменяя начальные значения весовых коэффициентов можно значительно улучшить показатели переходного режима работы ААС.

Обычно в ААС настройка весовых коэффициентов осуществляется путем последовательного приближения к экстремуму заданных функционалов качества, начиная с некоторых начальных значений весовых коэффициентов. При этом возможно предположить, что выбором начальных значений весовых коэффициентов можно улучшить переходные процессы, увеличив при этом скорость настройки и повысив тем самым эффективность бортовых ААС в целом [5,6]. В этом случае удачными начальными весовыми коэффициентами являлись бы такие, при которых обеспечивалось бы максимальное усиление полезного сигнала и полное подавление помех. Однако в реальных условиях функционирования авиационных радиолиний такое начальное приближение получить не представляется возможным, поскольку количество и направление прихода помех априори неизвестны и изменяются в процессе функционирования радиолиний. При определенных условиях можно считать известными некоторые сведения о полезном сигнале, например, о форме сигнала, о виде его модуляции, о примерном направлении прихода, о частотно-временной структуре в случае сигналов с программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) или только о том, что помеха превышает по уровню полезный сигнал.

Цель статьи: провести анализ влияния начальных значений весовых коэффициентов на эффективность функционирования бортовых ААС.

Влияния начальных значений весовых коэффициентов на эффективность функционирования бортовых ААС

При реализации адаптивной пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС) в авиацион-

ных радиолиниях можно выделить два характерных случая. Первый из них характеризуется одновременным наличием на входе приемной ААС полезного сигнала, помех и шумов, а второй - только помех и шумов. Следуя работе [5], эффективность ААС возможно оценивать близостью среднего значения вектора весовых коэффициентов к оптимальному. Наиболее предпочтительными в этих случаях является применение алгоритмов адаптации минимизирующих среднеквадратическое отклонение (МСКО) и максимизирующих выходное отношение сигнал помеха (МОСП) или выходную мощность (МВМ). Для средних значений вектора весовых коэффициентов $W(k+1)$ на $k+1$ шаге, определяемых в соответствии с алгоритмами МСКО и МОСП будем иметь

$$M\{W(k+1)\} = [I - \mu R_{xx}]^{k+1} W(o) + \mu \sum_{i=0}^k [I - \mu R_{xx}]^i R_{xs} \quad , \quad (1)$$

$$M\{W(k+1)\} = [I - \mu R_{nn}]^{k+1} W(o) + \mu \sum_{i=0}^k [I - \mu R_{nn}]^i H \quad , \quad (2)$$

где μ - параметр релаксации,

H - матрица опорных сигналов,

R_{xs} - матрица взаимных корреляций,

R_{xx} - корреляционная матрица входных сигналов,

R_{nn} - корреляционная матрица помех.

При правильно выбранном значении параметра релаксации μ вторые слагаемые в (1) и (2) приближаются к соответствующим оптимальным векторам весовых коэффициентов, а нормы первых слагаемых стремятся к нулю. По этой причине скорость сходимости (1) и (2) обычно определяется как скорость убывания этих норм. Скорость убывания норм связана с максимальными собственными числами матриц R_{xx} и R_{nn} [5,6]. В системах координат, где R_{xx} и R_{nn} диагональные (1) и (2) принимают вид

$$\begin{aligned}
M\{W(k+1)\} &= Q^{-1}[I - \mu\Lambda]^{k+1}QW(0) + \\
&+ \mu Q^{-1} \sum_{i=0}^k [I - \mu\Lambda]^i QR_{xs}, \\
M\{W(k+1)\} &= Q_1^{-1}[I - \mu\Lambda_1]^{k+1}Q_1W(0) + \\
&+ \mu Q_1^{-1} \sum_{i=0}^k [I - \mu\Lambda_1]^i Q_1 H
\end{aligned}$$

где Q, Q_1 -матрицы преобразований координат, столбцами которых являются собственные векторы матриц R_{xx}, R_{mn} ; Λ, Λ_1 - диагональные матрицы, элементы которых определяются собственными числами матриц R_{xx} и R_{xs} .

Известно, что сходимость по норме

$$\|W(k) - W_{opt}\| \rightarrow 0 \quad (3)$$

не является необходимой, для начального участка процесса адаптации [5]. Поэтому целесообразно рассматривать адаптацию в смысле полного подавления помех (A) и в смысле близости настраиваемого вектора весовых коэффициентов к оптимальному (B). Очевидно, что адаптация в смысле A зависит как от выбора $W(0)$, так и текущей помеховой обстановки и определяется наименьшим собственным числом λ_H корреляционной матрицы входных сигналов. адаптация в случае

$$\lambda_H > \lambda_{\min} = \sigma_{\psi i}^2$$

в смысле B определяется выполнением условия (3) и зависит от $\lambda_{\min} = \sigma_{\psi i}^2$ т.е. при заданной $\sigma_{\psi i}^2$ определяется только $W(0)$. Таким образом, согласно (3) и выполнения требований максимизации выходного отношения сигнала к помехе плюс шум (ОСПШ), для достижения наибольшей скорости адаптации в смысле близости настраиваемых весовых коэффициентов к оптимальным, вектор $W(0)$, целесообразно выбирать согласованным с вектором опорных сигналов, т.е. $W(0)$ должен обеспечивать ориентацию максимума результирующей характеристики направленности бортовых ААС в направлении прихода полезного сигнала. В рассматриваемом

случае это означает, что

$$W(0) = K_0 \vec{V}_s^*, \quad (4)$$

где K_0 - постоянный коэффициент,

\vec{V}_s^* - вектор фазовых сдвигов, определяющий направление прихода полезного сигнала.

На рис.1,а приведены пошаговые зависимости выходного ОСПШ в двухэлементной ААС, реализующей алгоритм МСКО, а на рис.1,б, реализующей алгоритм МОСП. Расстояние между элементами в ААС выбиралось равным половине длины волны, а отношение мощностей полезного сигнала и помех к мощности шумов на входе антенных элементов составляло 13 дБ и 40 дБ соответственно. Направления приема полезного сигнала и помех определялись относительно оптической оси ААС и составляли 0^0 и 45^0 соответственно. Кривые 1 и 2 соответствуют случаю выбора $W(0)$ с учетом (4) и равному $W^T(0) = [1000]$. В этом случае исходная характеристика ААС определяется собственной характеристикой направленности одного антенного элемента. Это означает, что направление прихода полезного сигнала совпадает с максимумом характеристики направленности этого антенного элемента. Там же для сравнения приведены соответствующие зависимости (кривые 3 и 4) при направлении приема помехи, равном 15^0 . Из анализа приведенных зависимостей следует, что выбор $W(0)$ в соответствии с (4) позволяет улучшить переходные характеристики ААС, а также увеличить выходное ОСПШ. В противном случае, когда $W(0)$ отличается от (4), близости $W(k)$ к W_{opt} в смысле (3) не удастся достичь даже при числе шагов, превышающем на порядок значение, необходимое для достижения условия подавления помехи [6]. При этом скорость адаптации в

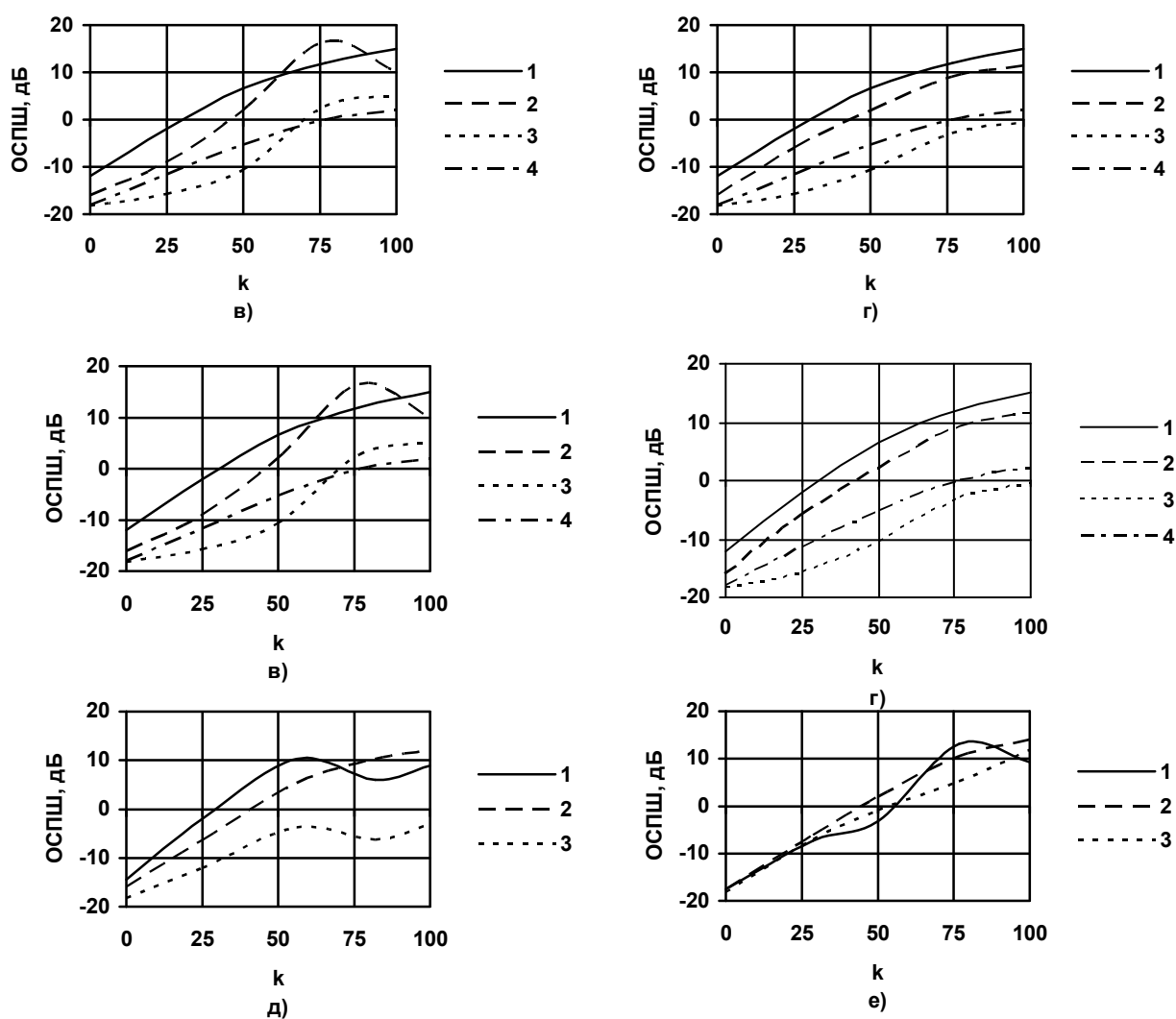


Рис. 1. Результаты исследований по влиянию начальных значений весовых коэффициентов на эффективность ААС

смысле подавления помехи практически не зависит от $W(0)$, и определяется в основном параметрами алгоритма и помеховой обстановки (собственных чисел корреляционной матрицы принимаемых сигналов).

Достаточно типичной для авиационных радиолиний является ситуация, при которой полезный сигнал не может быть устранен из принимаемого сигнала, поскольку постоянное изменение количества и местоположения корреспондентов затрудняет непосредственное применение известных решений [7]. При этом в ААС, реализующих МОСП, имеет место эффект подавления полезного сигнала на вы-

ходе ААС. Зависимости выходного ОСПШ для этого случая приведены на рис.1,в (исходные данные соответствуют рис.1,а). Учитывая, что в авиационных радиолиниях уровень полезного сигнала может существенно изменяться случайным образом, для исключения подавления полезного сигнала на выходе ААС, $W(0)$ целесообразно выбирать таким, чтобы исходная характеристика направленности ААС по возможности была равномерной для всех предполагаемых и возможных направлений приема полезных сигналов. В частном случае такой вектор может определяться как $W(0) = [1000]$.

Исследуем влияние начального вектора весо-

вых коэффициентов на эффективность ААС, реализующей, например, алгоритм МВМ. Алгоритм адаптации в этом случае имеет вид

$$W(k+1) = W(k) - \mu y(k) [X^*(k) - W(k)y^*(k)]. \quad (5)$$

Для установившегося режима (5) будем иметь

$$M \{y(k) [X^*(k) - W_{ycm} y(k)]\} = 0. \quad (6)$$

Принимая во внимание, что $y(k) = W_{ycm}^T X^*(k)$, перепишем (6) в виде

$$R_{xx} W_{ycm} = W_{ycm} M \{y(k)y^*(k)\}, \quad (7)$$

где $M \{y(k)y^*(k)\} = \lambda_{\min}$ - минимальное собственное число матрицы R_{xx} .

Следовательно, при $k \rightarrow \infty$ вектор весовых коэффициентов приближается к собственному вектору матрицы R_{xx} , соответствующему ее минимальному собственному числу. Поэтому рассмотренные выше адаптации A и B в случае алгоритма МВМ приобретают иной смысл. При отсутствии в принимаемом сигнале полезного сигнала λ_{\min} в (7) будет определяться дисперсией шумов $\sigma_{ш}^2$. В этом случае скорость адаптации будет определяться только скоростью подавления помехи. При этом остается справедливым вывод о выборе $W(0)$ в виде (4). Если в принимаемом сигнале присутствует полезный сигнал, то при числе степеней свободы ААС равно суммарному числу полезных сигналов и помех (в рассматриваемом случае двухэлементной ААС это соответствует ситуации воздействия полезного сигнала и помехи) $\lambda_{\min} = \lambda_H$. В случае же когда число степеней свободы ААС превышает суммарное число полезных сигналов и помех $\lambda_{\min} = \sigma_{ш}^2$. Следовательно, в первом случае ААС будет подавлять только помеху и $W(0)$ целесообразно выбирать в соответствии с (4) поскольку при этом уровень полезного сигнала на выходе ААС, как правило, выше чем при $W^T(0) \approx [1000]$. При этом скорость адаптации будет определяться только

скоростью подавления помех. Во втором случае наряду с подавлением помех будет осуществляться подавление полезного сигнала со скоростью, определяемой также $\lambda_{\min} = \sigma_{ш}^2$. Для уменьшения этого нежелательного эффекта возможно воспользоваться, например, выбором такого $W(0)$, который бы определял близкую к изотропной характеристику направленности ААС в предполагаемом секторе возможных направлений приема полезных сигналов (в идеальном случае изотропную характеристику направленности).

Результаты моделирования воздействия одной помехи на фоне шумов на двухэлементную ААС приведены на рис.1,г. Здесь кривые 1,2 соответствуют параметрам помехи аналогичным рис.1,а, а кривые 3,4 тем же параметрам помехи и $W(0)$, но при воздействии на ААС полезного сигнала.

Влияния величины начального усиления (ослабления) диаграммы направленности на эффективность ААС

Определенный интерес представляют также исследования влияния на эффективность ААС величины начального усиления (ослабления) диаграммы направленности, определяемой $W(0)$. Результаты таких исследований для случая двухэлементной ААС приведены на рис.1,д и рис.1,е при реализации алгоритмов МСКО и МОСП соответственно. При этом $W^T(0) = [\alpha 000]$, где $\alpha \in [0,1-10]$. Здесь кривые 1,2,3 соответствуют значениям $\alpha = 1, 10$ и $0,1$ соответственно, остальные исходные данные соответствуют предыдущему случаю.

Из анализа приведенных зависимостей следует, что значения α практически не влияют на выходное ОСПШ. Однако с точки зрения максимизации последнего величину α целесообразно выбирать близкой к единице, поскольку при $\alpha > 1$ происходит нежелательное увеличение шумов, а при $\alpha < 1$ нежелательное ослабление полезного сигнала, а

также снижение скорости адаптации при реализации алгоритма МСКО. Таким образом, для алгоритма МСКО, а также алгоритма МОСП, используемого при наличии полезного сигнала, максимальное значение η достигается при выборе $W(0)$, совпадающего с фронтом волны принимаемого полезного сигнала. При этом также возрастает скорость адаптации в смысле сходимости $W(k)$ к оптимальному. Естественным ограничением практического использования указанных алгоритмов является необходимость в наличии априорной информации о направлении приема полезного сигнала.

ААС, реализующие алгоритм МВМ, целесообразно применять в случае, когда полезный сигнал отсутствует в принимаемом сигнале. При этом максимум η достигается также при $W(0)$, совпадающем с направлением возможного приема полезного сигнала. Вместе с тем, потенциально достижимое значение η в этом случае оказывается несколько меньше, чем в случае алгоритма МОСП.

Вывод

Во всех случаях, когда направление приема полезного сигнала не известно или полезный сигнал не может быть исключен из принимаемого сигнала в бортовых ААС, реализующих алгоритмы МСКО, МОСП и МВМ, целесообразно использовать в качестве начального вектора весовых коэффициентов $W(0)$ вектор, обеспечивающий начальную изотропную характеристику направленности бортовых ААС (или близкую к изотропной в секторе возможных направлений приема полезного сигнала). Такое начальное приближение не оказывает существенного влияния на снижение скорости адаптации, а

имеющее при этом место снижение реально достигаемого значения η по сравнению с оптимальным, применительно к рассматриваемым радиолиниям, не является существенным ограничением к использованию ААС. При этом начальное усиление ААС целесообразно выбирать близким к единице.

Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на текущей оценке возможных направлений или секторов возможных направлений приема полезных сигналов. Такая возможность на борту летательного аппарата имеется.

Литература

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986г. – 448с.
2. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989г. – 440с.
3. Уидроу Б., Монтерей и др. Адаптивные антенные решетки. – ТИИЭР, 1967г., т.55, №12, с.78.
4. Стратанович Р.Л. Принципы адаптивного приема. – М.: Советское радио, 1973г. – 144с.
5. Абрамович Ю.И., Неврев А.И. О влиянии начального приближения на скорость сходимости процессов адаптивной настройки систем компенсации помех. Радиотехника и электроника, 1983, т.38, №7, с.1312-1316.
6. Kikuma N., Takao K. Effect of initial values of adaptive arrays. IEEE Trans., 1986, v.AES-22, №6, pp.688-693.
7. Melove D.R., Coleman E. A versatile interference adaptive antenna design approaches. IEEE/AIAA. 5, Dig. Avionics System Conf., Washingt., 1983, pp.1061-1066.

Поступила в редакцию 07.08.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Костенко П.Ю., Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, г. Харьков