

КОРРЕКЦИЯ АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ ФАР К ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКЕ В УСЛОВИЯХ НЕВОЗБУЖДЕНИЯ ЧАСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Н.И. Свитенко, Г.А. Головин
(представил д.т.н., проф. Я.С. Шифрин)

Показан простой и эффективный способ коррекции алгоритма реализации и проекционного метода расчета амплитудно-фазового распределения (АФР), формирующего нули в диаграмме направленности (ДН) ФАР в направлении прихода помех, в условиях возбуждения части излучателей.

Постановка проблемы. Длительная эксплуатация ФАР в составе РЛС или других радиотехнических систем (РТС) в условиях, когда доступ к ФАР для ее ремонта невозможен, предполагает алгоритмическую компенсацию влияния возбуждения части излучателей на уровень боковых лепестков (УБЛ) в диаграмме направленности (ДН) поврежденной ФАР. Подобную задачу, то есть "самолечение" антенной решетки, предполагается решать также в программе создания бортовых многофункциональных ФАР (Smart Skins technology program) [1]. "Самолечение" или адаптация ФАР к техническому состоянию предполагает решение следующих задач:

- определение номера (расположения) возбужденного излучателя;
- синтез нового АФР в решетке, сближающего реализованную в поврежденной ФАР ДН с номинальной (исходной).

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [2] приведен анализ влияния координат возбужденных излучателей на основные параметры ДН ФАР. Показано, что отказы центральных излучателей слабо влияют на форму главного максимума ДН, но заметно увеличивают УБЛ. Это обстоятельство означает, что в условиях, когда РЛС с повреждениями в центральной части ФАР подавляется мощными активными шумовыми помехами (АШП), необходимо реализовать алгоритм синтеза АФР, формирующего глубокие и широкие провалы в направлениях прихода (НП) АШП, по возможности не изменяя главный максимум ДН.

Известны методы и алгоритмы сближения реализованного УБЛ в ДН поврежденной ФАР с исходным УБЛ [3 – 6] в заданном секторе углов. Недостатком метода описанного в [4, 6], является то, что для вос-

становления ДН поврежденной ФАР используются только ближайшие к невозбужденным излучатели. Это заметно ограничивает возможности метода и позволяет только сблизить реализованные УБЛ с исходным. Недостатком метода, описанного в [3, 5] является то, что при его реализации резко возрастает УБЛ, находящихся за пределами восстанавливаемого сектора ДН. Метод становится нерациональным, когда на РЛС с ФАР воздействует всего 1 – 2 источника АШП. В этом случае выгоднее формировать узкие и глубокие провалы в НП АШП, не изменяя остальную часть реализованной ДН, если она не вышла за рамки допусков.

Одним из методов, позволяющих сохранить условия приема полезного сигнала и формировать глубокие провалы в НП АШП, является проекционный метод [6, 7].

Цель статьи. Целью статьи является оценка влияния невозбуждения части излучателей на степень подавления помех проекционным методом и коррекция алгоритма, позволяющая сблизить реализуемые и потенциальные степени подавления АШП.

Рассматривается ситуация, когда на линейную эквидистантную антенную решетку, содержащую N излучателей, воздействуют два источника АШП с известных, по результатам анализа помеховой обстановки, направлений [6]. Известными считаются также номера отказавших излучателей (по результатам встроенного контроля [6]). Требуется: определить ожидаемую степень подавления помех проекционным методом без учета информации о невозбужденных излучателях; скорректировать алгоритм синтеза АФР этим методом с целью учета отказов, и определение ожидаемой степени подавления АШП скорректированным алгоритмом. Оценка степени подавления помех в статье реализуется имитационным моделированием соответствующего алгоритма и состояния решетки.

Изложение основного материала. Для аналитической записи алгоритма подавления АШП проекционным методом необходимо задать матрицу волновых фронтов \mathbf{H} , формирующую $N \times U$ пространство подавляемых сигналов

$$\mathbf{H} = [\mathbf{f}_1 \dots \mathbf{f}_u \dots \mathbf{f}_U], \quad u \in 1, U; \quad (1)$$

где

$$\mathbf{f}_{iu} = \exp[j(i - i_0)\psi_u], \quad i \in 0, N - 1; \quad (2)$$

$i_0 = 0,5(N - 1)$; U – число направлений, в которых необходимо сформировать «нули»; $\psi_u = 2\pi\lambda^{-1}d\sin\theta_u$, θ_u – направление прихода u -й активной шумовой помехи; λ , d – длина волны и межэлементное расстояние в ФАР, соответственно.

Проекционная матрица (проектор) формируется в виде

$$\mathbf{\Pi} = \mathbf{H}\mathbf{\Gamma}^{-1}\mathbf{H}^H, \quad (3)$$

где $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{H}^H\mathbf{H} - U \times U$ матрица Грама векторов f_{iu} .

Вектор АФР w , формирующий провалы в направлениях θ_u и сохраняющий неизменным направление главного максимума (НГМ), вычисляется согласно формуле (4)

$$w = (\mathbf{I} - \mathbf{\Pi})V_0, \quad (4)$$

где $\mathbf{I} - N \times N$ единичная матрица; $V_0 - N \times 1$ вектор волнового фронта, задающего НГМ, $V_{0i} = \exp\{j(i - i_0)\psi_0\}$.

В ситуациях, когда ФАР повреждена, и часть излучателей не возбуждается, обнаруженные диагностикой неисправности необходимо внести в векторы f_{iu} , формирующие подпространство подавляемых сигналов (направлений, в которых нужно сформировать нули в ДН). Реализовать это можно путем умножения f_{iu} на C_i , т.е. образуя вектор

$$\hat{f}_{iu} = f_{iu}C_i, \quad (5)$$

где C_i принимает два значения: 1 – в возбужденных и 0 – в невозбужденных каналах. Следовательно, коррекция алгоритма адаптации ФАР к помеховой обстановке заключается в реализации расчета wa_i согласно выражений (1) – (4), в которых вместо f_{iu} используются \hat{f}_{iu} .

Оценка ожидаемой степени подавления АШП этим методом, при идеально точном управлении амплитудно-фазовым распределением (АФР), может быть получена из соотношения

$$q_u = 20 \log \left\{ \left| F_a(\theta_u) F_i^{-1}(\theta_u) \right| \right\}, \quad qk_u = 20 \log \left\{ \left| F_k(\theta_u) F_i^{-1}(\theta_u) \right| \right\}, \quad (6)$$

где

$$F_i(\theta_u) = \sum_i C_i \exp\{j(i - i_0)\psi_u\}; \quad (7)$$

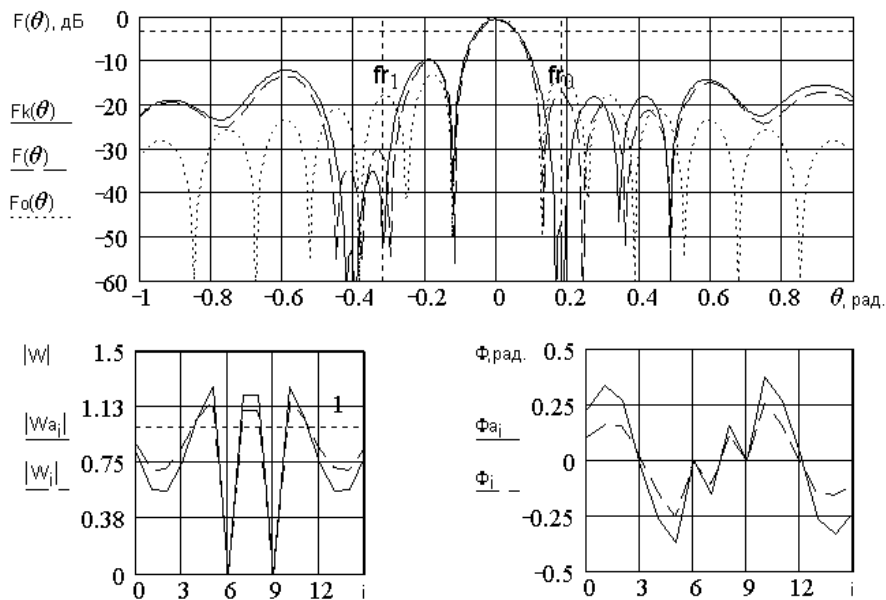
$$F_a(\theta_u) = \sum_i C_i w_i \exp\{j(i - i_0)\psi_u\}; \quad (8)$$

$$F_k(\theta_u) = \sum_i C_i wa_i \exp\{j(i - i_0)\psi_u\}. \quad (9)$$

Используя такую модель, можно оценить ожидаемые степени подавления помех, принимаемых с направлений θ_u , в исправной (все $C_i = 1$) и в поврежденной ФАР (часть $C_i = 0$), сохранившей точность

управления в исправных каналах. Такое упрощение сделано специально, для исключения влияния на степень подавления АШП других факторов (например, искажений конструкции ФАР), кроме невозбуждения излучателей.

Для подтверждения эффективности предлагаемого метода коррекции алгоритма расчета «весов» w_i проведено имитационное моделирование. Результаты приведены на рис. 1 и 2; на графиках сделаны следующие обозначения: $F_k(\theta)$ – ДН, формируемая скорректированным алгоритмом; $F(\theta)$ – ДН, формируемая w_i без учета C_i ; $F_0(\theta)$ – исходная, невозмущенная ДН; распределения $|w_{a_i}|$, Φ_{a_i} – амплитудное и фазовое распределение (АФР), формируемые с учетом отказов, $|w_i|$, Φ_i – АФР, формируемое без учета отказов.

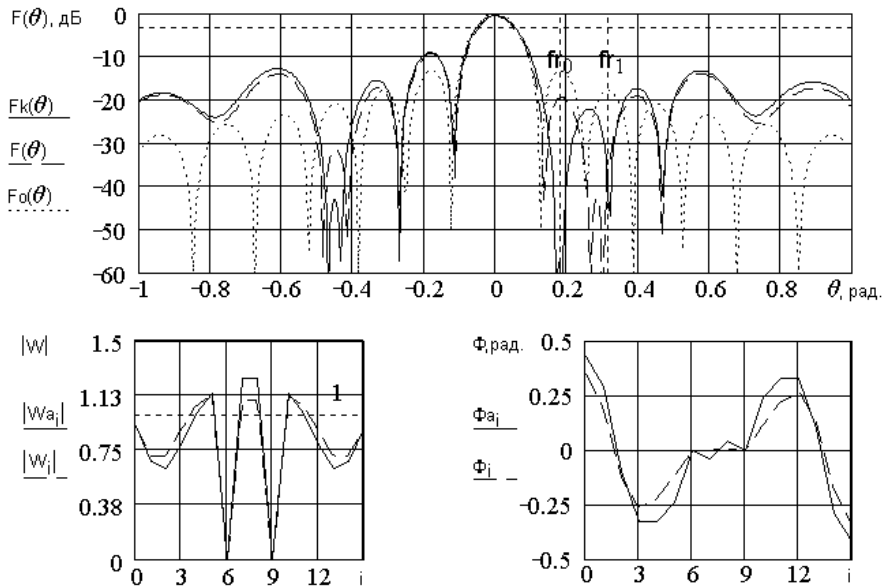


$$sko = 2.214 \times 10^{-4} \quad q^T = (-7.979 \quad -14.298) \quad qk^T = (-87.608 \quad -66.252)$$

Рис. 1. Формирование нулей в направлениях центров первого справа и центра второго слева боковых лепестков

Моделировались ситуации, в которых необходимо сформировать два нуля в направлениях центров первого (справа, fr_0) и центра второго (слева, fr_1 , рис. 1, справа, fr_1 , рис. 2) боковых лепестков.

Невозбужденными считаются 6-й и 9-й излучатели. Среднеквадратические ошибки (СКО – SKO) при реализации w_{a_i} и w_i в исправных каналах равны $SKO = 2,2 \cdot 10^{-4}$ (выведено на графики).



$$sko = 2.214 \times 10^{-4} \quad q^T = (-9.967 \quad -16.223) \quad qk^T = (-74.84 \quad -68.654)$$

Рис. 2. Формирование нулей в направлениях центров первого справа и центра второго справа боковых лепестков

На графиках показаны также результаты расчета степени подавления двух сигналов, принимаемых с указанных выше направлений: q^T – соответствует степени подавления АШП алгоритмом, в котором множители C_i не учитываются; qk^T – с учетом C_i .

Результаты моделирования подтверждают эффективность предлагаемой коррекции алгоритмов расчета w_i и показывают, что учитывая при расчетах АФР отказы, можно сохранить степень подавления АШП в поврежденных ФАР на уровне $(-60 \dots -80)$ дБ (при сохранении СКО в реализации АФР в исправных каналах на уровне $2 \cdot 10^{-4}$). Без учета невозбуждения части излучателей степень подавления сигналов с этих же направлений снижаются до $(-8 \dots -15)$ дБ.

Выводы. Разработан простой вариант коррекции, позволяющий учесть невозбуждение части излучателей в алгоритме формирования провалов в диаграмме направленности ФАР в НП АШП. Показано, что предлагаемый метод коррекции, в условиях сохранения СКО в реализации амплитудно-фазового распределения в неповрежденных каналах на уровне $2 \cdot 10^{-4}$, способен сохранить степень подавления помех на уровне $(-60 \dots -80)$ дБ в частично поврежденной ФАР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голик А.М., Клейменов Ю.А., Громов Д.А. Интеллектуальные антенные решетки // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1992. – № 4 – 5. – С. 3 – 8.
2. Бейдер А.Б. Статистический анализ диаграммы направленности ФАР при отказах излучателей // *Радиоэлектроника (Изв. высш. уч. зав.)*. – 1990. – № 2. – С. 28 – 33.
3. Shifrin Y.S., Liepin U.R., Golovina L.V., *Method and algorithms of PAA RP synthesis adaptivc to its elements failure* // *Proc. of the third Int. Conf. an Antenna Theory and Techniques*. – Sevastopil, Ukraine. – 1999. – P. 297 – 298.
4. Levitas M., Horton D.A. and Cheston T.C. *Practical failure compensation in active phased arrays* // *IEEE Trans. Ant. and Prop.* – March 1999. – Vol. 47, No. 3, – P. 524 – 535.
5. Лиупинь У.Р., Ставицкий О.Н. Алгоритмическое восстановление параметров ДН частично невозбужденной антенной решетки // *Радиотехника (Всеукр. межвед. н-т сб)*. – Х.: ХТУРЭ. – 2001. – Вып. 118. – С. 73 – 76.
6. *Активные фазированные антенные решетки* / Под ред. Д.И.Воскресенского, А.И. Конашекова. – М.: Радиотехника. – 2004. – Гл. 11. – С. 351 – 370.
7. *Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: Справочник* / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин и др. Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «Маквис», 1998. – 828 с.

Поступила 1.10.2004

СВИТЕНКО Николай Иванович, старший научный сотрудник Научного метрологического центра (военных эталонов). В 1996 году окончил Харьковский военный университет. Область научных интересов – диагностика ФАР, антенные измерения.

ГОЛОВИН Глеб Анатольевич, курсант Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов – моделирование антенных систем в системах компьютерной математики.