

АДАПТАЦИЯ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ К ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ В УСЛОВИЯХ НЕВОЗБУЖДЕНИЯ ЧАСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

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

Предлагается метод, позволяющий при отказе части излучателей фазированной антенной решетки (ФАР) восстановить некоторые параметры исходной (номинальной) диаграммы направленности (ДН) решетки в ограниченном секторе углов за счет определенного повышения уровня боковых лепестков в других секторах. Показано, что метод может быть использован и для решения задач помехозащиты поврежденных ФАР путем формирования ДН, уровень боковых лепестков (УБЛ) в которых в отдельных направлениях ниже УБЛ в исходной ДН. Приведены результаты имитационного моделирования, иллюстрирующие возможности метода на примере шестнадцатиеlementной эквидистантной решетки с двумя отказавшими каналами.

Постановка проблемы. Длительная успешная эксплуатация фазированных антенных решеток радиолокационных станций (РЛС) или других радиотехнических систем (РТС) в условиях, когда доступ к ним для ремонта или замены отказавших элементов невозможен или существенно затруднен, диктует необходимость алгоритмической компенсации влияния отказавших каналов на параметры ДН решетки.

Процедуры, объединяющие в единый процесс диагностику ФАР, определение искажений амплитудно-фазового распределения (АФР), вызванных неисправностями в системе управления лучом (СУЛ) или отклонением условий эксплуатации ФАР от номинальных, и компенсацию выявленных искажений АФР электрическими методами, в обзорных работах [1 – 3] получили название «адаптация СУЛ ФАР к техническому состоянию антенны и окружающей обстановке».

К факторам, искажающим АФР в ФАР в [1] отнесены: старение элементов системы управления лучом и разброс их электродинамических характеристик; отклонение температуры и влажности окружающей антенну среды от расчетных значений; резкие изменения ветровых нагрузок; изменение частоты излучающего сигнала. Целью адаптации к таким

искажающим АФР факторам является восстановление исходных (номинальных) параметров диаграммы направленности ФАР.

В ситуациях, когда РТС с ФАР попадают в экстремальные условия их эксплуатации, транспортировки или хранения, на первый план выходят другие факторы, искажающие АФР в ФАР:

- невозбуждение части излучателей (полные отказы (ПО));
- потеря управления амплитудой и (или) фазой СВЧ колебаний в трактах излучателей (частичные отказы (ЧП));
- смесь полных и частичных отказов.

Учитывая изложенное выше, можно сформулировать следующие варианты задач адаптации ФАР (или активных ФАР (АФАР)):

1) адаптация СУЛ ФАР к техническому состоянию и окружающей обстановке в условиях сохранения управляемости во всех каналах ФАР; целью адаптации при этом является восстановление исходных (номинальных) параметров ДН ФАР во всем секторе видимых углов;

2) адаптация СУЛ ФАР к техническому состоянию в условиях отказов части элементов СУЛ; ввиду того, что часть степеней управления ФАР потеряны, целью адаптации может быть максимально возможное сближение части реализуемых и исходных (номинальных) параметров ДН;

3) адаптация СУЛ ФАР к изменению помеховой обстановки в условиях отказов части элементов СУЛ; целью адаптации становится изменение уровня боковых лепестков в отдельных секторах реализованной ДН с целью максимально возможного сближения желаемой и реализованной степеней подавления помех;

4) смешанные задачи, в которых необходимо адаптироваться и к техническому состоянию, и к ПО.

Анализ последних исследований и публикаций. Достаточно давно известны и в ряде ФАР успешно применяются методы и алгоритмы адаптации ФАР к техническому состоянию и окружающей обстановке, реализуемые в антеннах, сохранивших управляемость во всех каналах ФАР [1 – 4].

Менее исследованной областью является адаптация к техническому состоянию в антеннах, имеющих полные и (или) частичные отказы. В условиях отказов необходимо «функции» неисправных каналов переложить на другие – исправные, что неизбежно ведет к изменению (пересчету) исходного (номинального) АФР. Целью пересчета является получение АФР в исправной части решетки, максимально сближающего параметры исходной (номинальной) и реализованной в поврежденной антенне ДН.

Вопросам адаптации ФАР к техническому состоянию в условиях невозбуждения части излучателей (полные отказы) посвящены работы [5 – 7].

Целью адаптации в [5, 6] ставится расчет АФР для исправной части ФАР, максимально сближающего УБЛ в поврежденной и исправной решетках. Показано, что такую задачу можно решить изменяя амплитуду и фазу СВЧ сигналов только в соседних с отказавшими каналах. Недостатком этого метода адаптации является то, что функции адаптации решетки в целом возлагаются только на несколько уцелевших каналов. Такой подход упрощает расчеты, но заметно увеличивает возмущение исходного (номинального) АФР вокруг отказавшего канала.

В [7] впервые изложена идея решения задачи расчета (синтеза) нового АФР проекционным методом, путем принудительного формирования провалов в ДН в направлениях, соответствующих ориентации нулей ДН, которую желаем получить. Это могут быть ДН, соответствующие косинусоидальному, дольф-чебышевскому, и, естественно, равномерному амплитудным распределениям.

В [7] показана реализация метода для восстановления ориентации и глубины нуля в разностной ДН. Дальнейшее исследование адаптации методом принудительного формирования нулей ДН в заданных направлениях показало, что при его помощи можно решать более широкий круг задач восстановления характеристик поврежденных ФАР.

Цель статьи – разработка метода и алгоритмов адаптации к техническому состоянию и (или) помеховой обстановке ФАР, часть излучателей в которой не возбуждаются, а в запитанных излучателях имеются ошибки в реализации АФР.

1. Постановка задачи. Исходные предположения. В качестве объекта адаптации к техническому состоянию выберем линейную эквидистантную антенную решетку (ЛЭАР) с числом излучателей N , ДН в которой формируется СУЛ с фазовращателями. Информацию об отказах излучателей и ошибках фазирования предполагается получать от встроенных систем низкочастотного или СВЧ контроля СУЛ [1, 8]. Информацию об ориентации и размерах углового сектора, в котором необходимо создать ДН с желаемым УБЛ, определяет процессор анализатора помеховой обстановки РЛС. В качестве метода адаптации используется принудительная ориентация нулей диаграммы направленности поврежденной ФАР в направления, соответствующие направлениям на нули в исходной ДН или ДН с желаемым УБЛ. Критериями качества адаптации выбраны: сохранение ориентации направления главного максимума (или нуля разностной диаграммы направленности), восстановление ширины ДН, сближение реализованного и желаемого УБЛ в заданном секторе углов сканирования ФАР.

2. Математическая модель алгоритма адаптации. В исправной ЛЭАР, содержащей N излучателей, имеется $N-1$ степень свободы и $R = N-1$ управляемых АФР нулей в ДН. В случае невозбуждения K каналов количество управляемых нулей $R = N - K - 1$.

Из общей теории антенн [9, 10] известно, что в ЛЭАР существует жесткая связь между УБЛ и ориентацией нулей в нормированной ДН решетки. Так, если $r \in 1, R$ направлений нулевого приема соответствуют обобщенным углам $\psi_r = r\psi_0$, где $\psi_0 = 2\pi N^{-1}$, то УБЛ в полностью возбужденной ЛЭАР при $R = N-1$ соответствует равномерному возбуждению решетки с амплитудным распределением $A_i = 1$.

Из [9] следует, что если в той же ЛЭАР принудительно сформировать нули в направлениях ψ_r , соответствующих ориентации нулей при дольф-чебышевском амплитудном распределении, то и УБЛ в ДН будет соответствовать выбранным параметрам дольф-чебышевского распределения.

Прием с принудительным формированием нулей в заданных направлениях оказывается полезным при управлении УБЛ в ФАР, часть излучателей которой не возбуждены. Аналитическая связь между A_i в оставшихся исправными излучателях и УБЛ в ДН ФАР неизвестна. В этом случае достичь желаемого УБЛ можно путем принудительного размещения оставшихся управляемыми $R = N - K - 1 < N - 1$ нулей в направлениях ψ_r , $r \in 1, R$. Однако, так как $R < N-1$, то и сектор углов, в котором УБЛ соответствует распределению ψ_r , будет меньше интервала видимости $\pm 2\pi\lambda^{-1}d$.

В качестве метода принудительного формирования нулей в заданных направлениях ДН можно применить проекционный метод [10, 11].

Сформируем $N \times R$ матрицу плоских волновых фронтов

$$\mathbf{F}_R = [\mathbf{f}_1 \cdots \mathbf{f}_R], \quad (1)$$

где $f_{r,i} = \exp[j(i-i_0)\psi_r]$; $i \in 0, N-1$; $r \in 1, R$; $i_0 = 0.5(N-1)$.

Матрица проектирования на R -мерное подпространство сигналов, приходящих с направлений ψ_r , имеет вид:

$$\mathbf{\Pi}_R = \mathbf{F}_R \mathbf{\Gamma}_R^{-1} \mathbf{F}_R^H, \quad (2)$$

где $\mathbf{\Gamma}_R = \mathbf{F}_R^H \mathbf{F}_R$ – матрица Грама.

Если теперь вектор АФР в решетке w_i рассчитать согласно

$$\mathbf{w} = (\mathbf{I} - \mathbf{\Pi}_R) \mathbf{E}, \quad (3)$$

где \mathbf{E} – вектор единиц ($E_i = 1$), \mathbf{I} – $N \times N$ единичная матрица, то \mathbf{w} формирует ДН, направление главного максимума в которой соответствует обобщенному углу $\psi = 0$, а в направлениях ψ_r будут сформированы нули.

Для того, чтобы рассчитанное согласно (3) новое АФР в решетке учитывало отказы в возбуждении излучателей и ошибки в функционировании СУЛ, $f_{r,i}$ необходимо представить в виде

$$\tilde{f}_{r,i} = C_i^* f_{r,i}, \quad (4)$$

где $C_i = A_i \exp(j\varphi_i)$, A_i – действительно реализованное в решетке амплитудное распределение (в невозбужденном канале $A_i = 0$); φ_i – погрешности в формировании СУЛ фазового распределения в оставшихся управляемыми каналах. В окончательном виде общая модель алгоритма синтеза АФР описывается формулами (1) – (3), в которых вместо $f_{r,i}$ используется $\tilde{f}_{r,i}$ из (4), а вместо \mathbf{E} – вектор \mathbf{C}^* .

3. Оценка эффективности алгоритма. Имитационным моделированием предлагаемого алгоритма демонстрируется возможность решения следующих задач при управлении поврежденными ФАР:

- восстановление ширины ДН;
- восстановление ориентации нуля разностной ДН или направления главного максимума (НГМ);
- восстановление или изменение номинального УБЛ в секторе углов, ограниченном числом оставшихся управляемыми нулей в ДН поврежденной ФАР.

В процессе моделирования определялись параметры ДН ЛЭАР, имеющей $N = 16$ излучателей, два из которых (12,5%) отказали. Расположение отказавших излучателей выбиралось так, чтобы они максимально искажали восстанавливаемый параметр ДН [12]. ДН излучателя ФАР описывались функцией $\sin \theta$.

При восстановлении ширины ДН, ориентации НГМ и нуля разностной ДН расположение нулей в синтезируемой ДН $\psi_r = \pm r\psi_0 = \pm 2\pi r N^{-1}$, $r \in 1, 0.5R$, если, например, R – четное, а при восстановлении УБЛ в качестве эталона взята дольф-чебышевская ДН, ориентация нулей которой определяется из соотношения [13]

$$\psi_r = \pm 2 \arccos \left\{ Z^{-1} \cos \left[\frac{(2r-1)\pi}{2(N-1)} \right] \right\}, \quad r \in 1, 0.5R, \quad (5)$$

где $Z = \text{ch}[(N-1)^{-1} \text{arch}(\beta)]$; $\beta = 10^{\Delta \cdot 20^{-1}}$; Δ – требуемый УБЛ, дБ.

В оставшихся управляемыми каналах ФАР вводились ошибки в реализации АФР, среднеквадратические отклонения которых равнялись $22,5^\circ$ по фазе и 10% по относительной амплитуде.

Результаты отдельных реализаций моделирования показаны на графиках (рис. 1 – 3). Обозначения на графиках: θ – угол, отсчитываемый от нормали к апертуре; i – номера каналов ФАР, $F_a(\theta)$ – адаптированная к отказам ДН; $F(\theta)$ – искаженная отказами ДН; $F_0(\theta)$ – идеальная ДН; $|C_i|$ – искаженное отказами амплитудное распределение; $|w_i|$ – синтезированное амплитудное распределение.

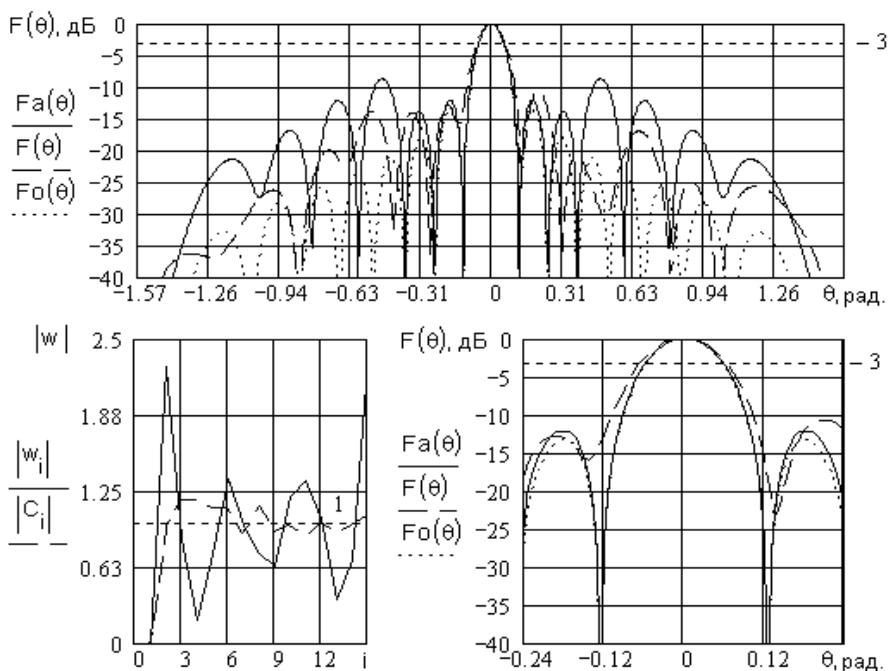


Рис. 1. Анализ ДН при отказах в ФАР

Графики на рис. 1 иллюстрируют искажения формы ДН при исходном $A_i = 1$ и отказах $C_0 = 0$, $C_1 = 0$. Из укрупненного графика центра ДН отчетливо видно расширение ДН и смещение НГМ. Главный максимум синтезированной ДН точно воспроизводит номинальную ДН. Платой за это является увеличение УБЛ в секторах, удаленных от НГМ.

На графиках (рис. 2) показана разностная ДН до и после синтеза нового АФР при тех же отказах в антенне. Из укрупненного графика центра разностной ДН видна способность алгоритма точно (при идеальном управлении) восстанавливать ориентацию нуля разностной ДН. Платой за это также является увеличение (на 5 – 7 дБ) УБЛ в секторах, удаленных от НГМ.

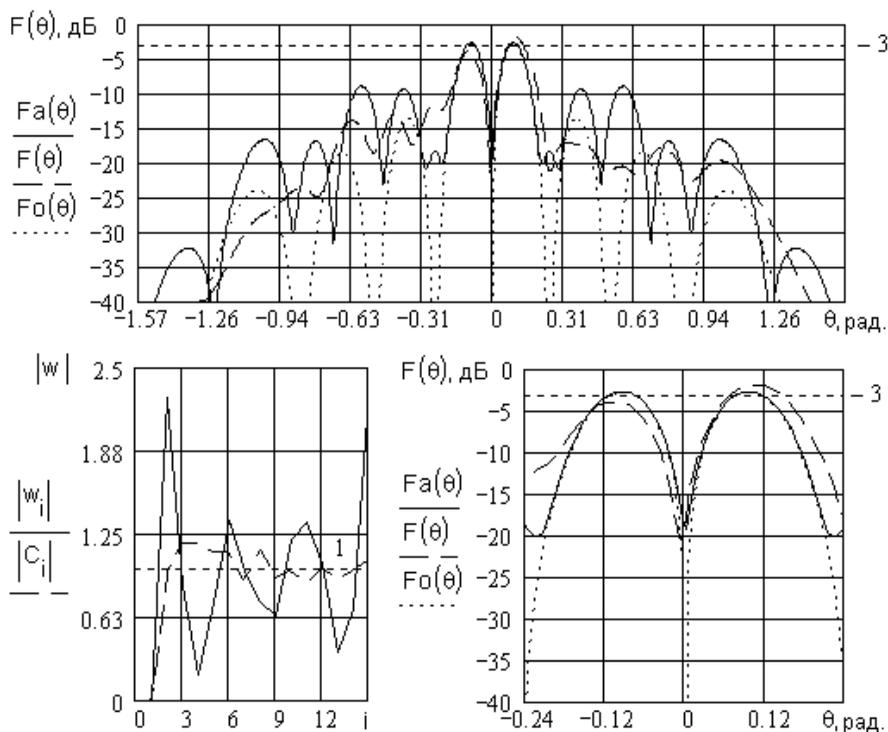


Рис. 2. Анализ разностной ДН при отказах в ФАР

В процессе эксплуатации РЛС с ФАР может возникнуть ситуация, когда необходимо подавить сигналы, принимаемые по боковым лепесткам ДН. На графиках (рис. 3) показана возможность решения этой задачи (при отказах в 6 и 9 каналах) с одной стороны от центра ДН. При этом синтезируется дольф-чебышевская диаграмма направленности с уровнем боковых лепестков примерно –30 дБ.

Платой за это является увеличение ширины диаграммы направленности и УБЛ вдали от центра диаграммы направленности. Этот же алгоритм, перестраивая направления ψ_T , может быть применен для создания диа-

граммы направленности с пониженным УБЛ в других (ограниченных) секторах, например, по обе стороны от НГМ.

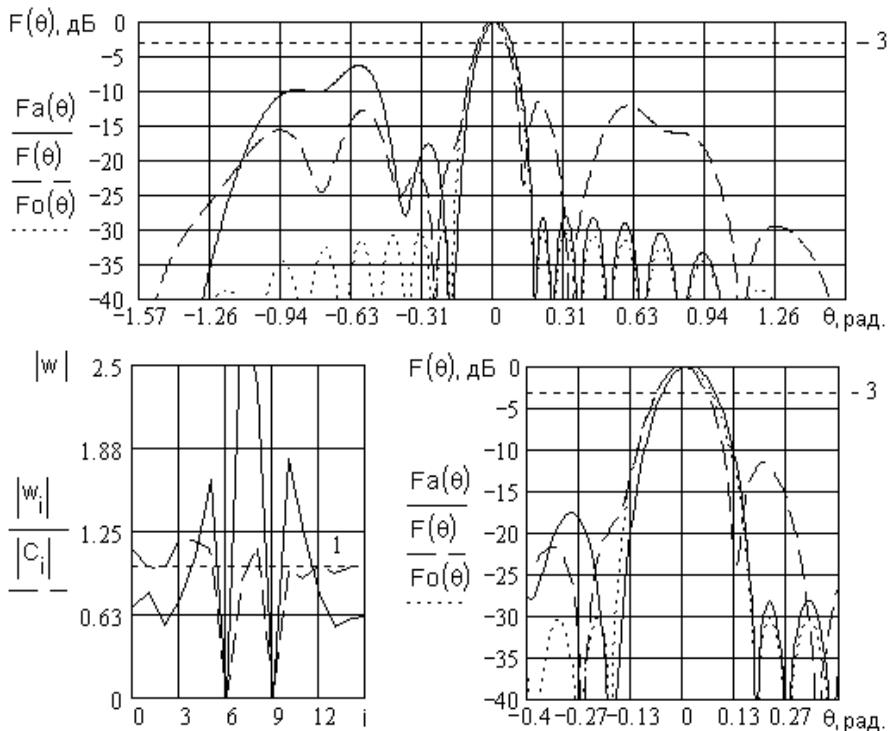


Рис. 3. Анализ дольф-чебышевской ДН при отказах в ФАР

Результаты моделирования подтверждают работоспособность и эффективность предлагаемого алгоритма синтеза (расчета) АФР и ДН в условиях невозбуждения части излучателей ФАР. При выборе решения о целесообразности применения этого алгоритма необходимо решить, что важнее для РЛС: восстановить отдельные параметры исходной ДН, но получить несколько увеличенный УБЛ (на 5 – 10 дБ) вдали от НГМ или продолжить эксплуатировать поврежденную ФАР без изменения алгоритмов управления ею.

Приведенные выше результаты моделирования позволяют предложить следующую очередность процедур измерения и расчетов при решении задач адаптации поврежденных ФАР к их техническому состоянию:

1) контроль целостности цепей управления ФАР и СВЧ диагностика СУЛ методами, описанными в [1, 6, 8];

- 2) оценка ошибок в реализации АФР и расчет параметров ДН поврежденных ФАР;
- 3) расчет нового АФР, учитывающего отказы излучателей;
- 4) оценка параметров диаграмм направленности, сформированных новым АФР;
- 5) принятие решения о целесообразности адаптации ФАР к отказам, выбор количества и направлений принудительной ориентации нулей исходя из целей адаптации. Так, например, если нужно восстановить ширину ДН и ориентацию НГМ, достаточно сформировать по два нуля слева и справа от НГМ, ориентируя их под углами $\psi_{\Gamma} = \pm \gamma\psi_0$, где $\gamma \in 1,2$;
- 6) адаптация реальной конструкции ФАР к техническому состоянию.

Необходимо отметить, что процедуры 2 ... 5 из этого перечня можно реализовать в цифровом виде на математической модели решетки, используемой в системе управления лучом, не привлекая элементы реальной конструкции.

Выводы. В статье показана возможность расчета для частично поврежденной ФАР АФР, формирующего ДН, параметры которой в ограниченном секторе углов максимально сближены с параметрами исходной ДН.

Предлагаемый метод адаптации к техническому состоянию может быть использован также для решения задач помехозащиты в поврежденных ФАР путем формирования ДН с пониженным относительно номинальной ДН уровнем боковых лепестков.

Приведены алгоритмы расчета, восстанавливающие ширину диаграммы направленности, ориентацию нуля разностной ДН и НГМ, снижающие УБЛ в определенных секторах углов. Показано, что платой за восстановление параметров диаграммы направленности является увеличение УБЛ в секторах углов, отличных от выбранного сектора восстановления диаграммы направленности. Предлагаемая методика организации измерений и расчетов позволяет, используя модель системы управления лучом ФАР, оценить эффективность применения адаптации и принять обоснованное решение о дальнейшей эксплуатации ФАР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишов Ю.А., Голик А.М., Клейменов Ю.А. и др. Адаптация управления ФАР по результатам встроенного контроля // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1990. – № 9. – С. 69 – 89.

2. Голик А.М., Клейменов Ю.А., Громов Д.А. – Интеллектуальные антенные решетки // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1992. – № 4 – 5. – С. 3 – 8.
3. Гусевский В.И., Лидский Э.А., Рыжков С.В. Принципы построения антенных систем, адаптивных к собственному состоянию // *Радиотехника и электроника*. – 1992. – Т. 37, № 6. – С. 351 – 357.
4. Есин С.В., Каганов В.И. Системы автоматического фазирования в передающих ФАР и устройствах сложения мощности СВЧ сигналов // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1986. – № 8. – С. 39 – 48.
5. Levitas M., Horton D.A., Cheston T.C. Practical failure compensation in active phased arrays // *IEEE Trans. Ant. and Prop.* – March 1999. – Vol. 47, No. 3. – P. 524 – 535.
6. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Конашекова. – М.: Радиотехника, 2004. – 566 с.
7. Shifrin Y.S., Liepin U.R., Golovina L.V. Method and algorithms of PAA RP synthesis adaptive to its elements failure // *Proc. of the third Int. Conf. an Antenna Theory and Techniques*. – Sevastopil, Ukraine. – 1999. – P. 297 – 298.
8. Шифрин Я.С., Лиепинь У.Р. Бесфазовые методы диагностики фазированных антенных решеток // *Антенны*. – 2000. – Вып. 1 (44). – С. 84 – 99.
9. Schelkunoff S.A. A mathematical theory of linear arrays // *Bell Syst. Techn. F.* – 1943. – Vol. 22. – P. 143 – 152.
10. Журавлев А.К., Лукошин А.П., Поддубный С.С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. – Л.: ЛГУ, 1983. – 240 с.
11. Радиозлектронные 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.
12. Бейдер А.Б. Статистический анализ ДН ФАР при отказах излучателей // *Радиозлектроника*. – 1990. – № 2. – С. 28 – 33 (*Изв. высш. уч. зав.*).
13. Бененсон Л.С. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования. Обзор зарубежных работ. – М.: Сов. радио, 1966. – 367 с.

Поступила 24.12.2004

ЛИЕПИНЬ Улдис Робертович, канд. техн. наук, доцент Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных исследований – адаптивные антенные системы.

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

СВИТЕНКО Николай Иванович, старший научный сотрудник. В 1996 году окончил Харьковский военный университет. Область научных исследований – диагностика ФАР, антенные измерения.