

УДК 621.396.677

ЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК НА ОСНОВЕ АППАРАТА ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Д. С. Махов

Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко,
350063, Краснодар, ул. Красина, д. 4

Статья поступила в редакцию 5 мая 2019 г., после доработки – 22 мая 2019 г.

Аннотация. Проведен сравнительный анализ существующих методов логического синтеза антенных решеток. Проведено численное моделирование существующих методов. Предложен новый подход, позволяющий получать более гибкое решение многокритериальной задачи логического синтеза за счет использования аппарата теории нечетких множеств. В качестве функций принадлежности нечетких множеств амплитуд излучателей выбраны интервалы значений амплитудных распределений, границами которого являются значения амплитудных распределений для двух различных требований к диаграмме направленности. Изменение формы функций принадлежности за счет нечетких логических операций позволяет получить лучшее по сравнению с известными методами решение двухкритериальной задачи.

Ключевые слова: антенная решетка, логический синтез, нечеткое множество, функция принадлежности, системный анализ, радиотехническая система, многокритериальная задача.

Abstract. Contrastive analysis of the existing methods of a logical synthesis of antenna arrays is carried out. It is shown that methods of a logical synthesis are applicable for a solution of multicriteria tasks in which qualifying standards can contradict each other. Computational modeling of the existing methods of a logical synthesis is carried out. Their advantages and shortcomings are shown. The new approach to a logical synthesis of antenna arrays allowing us to receive more flexible solution of a multicriteria problem of a logical synthesis in comparison with the known methods is offered. Advantage of the offered approach is the use of the device

of the theory of fuzzy sets. The example of a two-criteria task is given, where intervals of values of amplitude distributions, which borders are values of amplitude distributions for two different requirements to the direction characteristic, are selected as functions of accessory of fuzzy sets of amplitudes of radiators. Change of a form of functions of accessory due to fuzzy logical actions allows receiving the best solution of a two-criteria task in comparison with the known methods. The possibilities of application of the theory of indistinct sets and a fuzzy logic allowing us to receive a compromise solution of multi-criteria problems of synthesis of antenna arrays are presented in the work.

Keywords: antenna array, logical synthesis, fuzzy set, function of accessory, system analysis, radio engineering system, multicriteria task.

1. Введение

С позиций теории систем и системного анализа радиотехнические системы (РТС) и комплексы относятся к сложным системам. Понятие сложной системы подразумевает неопределенный характер взаимосвязей между ее элементами, что усложняет процесс оптимизации и синтеза эффективной РТС. Важным вопросом при оценивании сложности системы является ее целевое пространство. Если целевое пространство системы не полностью пересекается с пространством надсистемы (средой функционирования, объектами локации или связи), то появляются дополнительные степени свободы для оптимизации, управления и совершенствования системы [1, 2]. РТС является ярким примером сложной системы, целевое пространство которой не в полной мере пересекается с пространством надсистемы. Преобразование информации из надсистемы осуществляется через наиболее важные элементы РТС - антенно-фидерные устройства, в частности, антенные решетки (АР). В связи с этим задачи синтеза и оптимизации структуры и параметров АР являются актуальными несмотря на существующее многообразие и глубокую проработку методов их оптимизации [3].

Актуальность решения задач синтеза АР обусловлена стремлением разработчиков к унификации, многофункциональности АР, повышению мобильности отдельных классов РТС, разработкой РТС в защищенном исполнении. Кроме того организация обмена защищенной информации по радиоканалу во многом зависит от свойств радиоканала, основные характеристики которого определяются структурой и параметрами антенн.

В рамках системного анализа определение и достижение единого критерия оптимизации системы является сложной задачей. Поэтому часто в результате процесса декомпозиции общий критерий (макрокритерий) разбивается на несколько критериев более низкого уровня, зачастую противоречивых [4]. В связи с этим задача оптимизации сложной системы, в частности АР, формулируется в виде многокритериальной задачи.

В такой постановке применительно к АР могут иметь место задачи уменьшения ширины главного максимума характеристики направленности (ХН) АР при уменьшении уровня боковых лепестков (УБЛ), увеличения коэффициента направленного действия (КНД) при уменьшении общей потребляемой мощности и пр. Задача оптимизации также формулироваться для большего количества требований, как это показано, например, в работе [5].

Предъявление к АР нескольких различных требований, зачастую противоречивых, заставляет искать решение задачи на допустимом множестве. При этом вклад в общее решение определяется некоторой степенью принадлежности. Поиск решения при таком подходе может осуществляться методом главного критерия, методом крайней точки или арбитражных схем Нэша [6, 7].

Одним из направлений для решения многокритериальных задач синтеза АР с точки зрения выбора альтернатив могут являться методы логического синтеза, описанные в работах [8-10].

АР с логическим синтезом являются разновидностью антенн с нелинейной обработкой сигнала [7, 8]. Характеристика направленности (ХН) АР формируется при сравнении амплитуд принятых сигналов на отдельные или

группы элементов антенн при использовании логических функций, например «И-НЕ» «ИЛИ». Применение данных логических функций позволяет снизить уровень боковых лепестков, запирая основной канал для всех сигналов ниже установленного уровня, формировать провалы в направлении дифракционных максимумов, помеховых сигналов и пр.

Однако для достижения требуемого эффекта применение «чётких» логических операций сопряжено с усложнением аппаратной части АР и разработкой схем управления из множества переключающих логических устройств. С точки зрения упрощения конструкции данных схем представляется возможным применение аппарата нечеткой логики, реализуемой нечеткими логическими контроллерами [11], которые позволят снизить нагрузку на вычислительные операции системы управления АР.

Целью статьи является анализ методов логического синтеза антенных решеток и обоснование возможности применения нечетких логических операций для поиска оптимального решения двухкритериальной задачи.

2. Сравнительный анализ методов логического синтеза антенных решеток

Рассмотрим задачу синтеза АР в следующей постановке: дана линейная эквидистантная АР $N, n = \overline{1, N}$ изотропных элементов с межэлементным расстоянием $d = \lambda / 2$, λ - длина волны. Необходимо найти такое амплитудное распределение, позволяющее синтезировать ХН с шириной главного максимума, не превышающей значения ε при уменьшении УБЛ ниже ζ :

$$A^* \rightarrow F(A^*, p): \left| \max_{|F(A^*, p)| > 0.707} \arg F(A^*, p) - p_0 \right| < \varepsilon, \quad p_1 < p < p_2, \quad (1)$$

$$A^* \rightarrow F(A^*, p): |F_{A^*}(p)| < \zeta, \quad p < p_1, p > p_2, \quad (2)$$

где A^* - искомое амплитудное распределение;

$F(A^*, p)$ - ХН АР;

p - пространственная координата;

p_0 - направление максимума при условии соблюдения симметрии ХН.

Существует два основных подхода к логическому синтезу. В первом подходе, описанном в [10], демонстрируется применение логических операций к ХН различных АР, которые в частном случае могут являться подрешетками единой АР. Так, в частности, для получения ХН $F_1(p)$ с низким УБЛ в заданном секторе пространственных углов и требуемой шириной главного максимума может формироваться вспомогательная ХН $F_2(p)$. К данным ХН может быть применен, например, логический оператор выбора (эквивалентности) [12]:

$$\mathfrak{Z}(F_1(p), F_2(p)) = \begin{cases} F_1(p) & \text{при } F_1(p) \leq F_2(p) \\ F_2(p) & \text{при } F_2(p) < F_1(p) \end{cases} \quad (3)$$

Результат применения такого оператора к двум ХН, представленным на рис. 1, выражается в виде ХН, УБЛ которой в области $p < p_1, p > p_2$ соответствует $F_1(p)$, а в области $p_1 < p < p_2$ соответствует уровню $F_2(p)$.

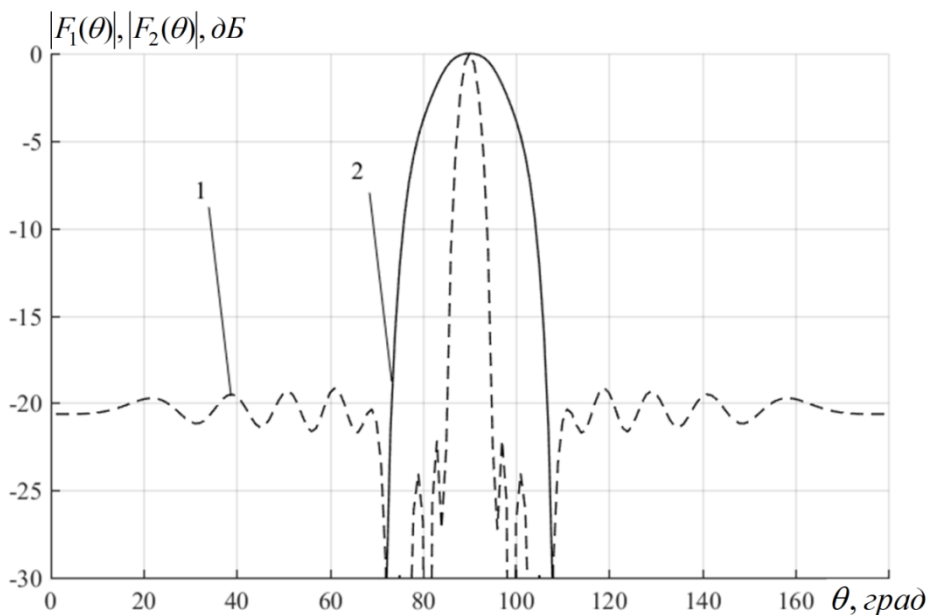


Рис. 1. ДН АР с узким главным лепестком (кривая 1), ДН АР с низким УБЛ (кривая 2).

На рис. 1 кривая 1 представляет диаграмму направленности (ДН), реализующую требование (1) к ширине главного максимума без ограничения на УБЛ, кривая 2 представляет ДН, реализующую требование (2) к низкому

уровню УБЛ. Результат достигается формированием ХН $F_1(p)$, для которой основным требованием является минимизация ширины главного максимума, формированием ХН $F_2(p)$, для которой минимизируется УБЛ. Затем данные ХН подвергаются воздействию логического оператора \mathfrak{Z} (3), в результате чего получается ХН $F_{\mathfrak{Z}}(p)$. Выполнение вышеуказанных операций над ХН не позволяет однозначно оценить амплитудное распределение полученной ХН $F_{\mathfrak{Z}}(p)$ в результате применения (3).

Другой подход [8, 9] основан на проведении логических операций над АФР формируемых ХН подрешеток или отдельных АР. В данном случае процесс логического синтеза может быть представлен типовой последовательностью. На первом этапе формируют ХН $F_1(p)$, которая обеспечивает требование (1). УБЛ при этом не выполняет требования (2). Принятые комплексные амплитуды сигнала $A_n^{(1)}$ запоминаются.

На втором этапе формируют ХН $F_2(p)$, которая удовлетворяет требованию (2) и в секторе $p_1 < p < p_2$ формирует широкий главный максимум, не удовлетворяющий требованию (1). Принятые комплексные амплитуды сигнала $A_n^{(2)}$ также запоминаются.

Покажем формирование результирующей ХН на примере применения логической функции сравнения (оператора эквивалентности) двух амплитудных распределений для синтеза линейной эквидистантной АР:

$$A_n \rightarrow \mathfrak{R}(A_n^{(1)}, A_n^{(2)}) = \begin{cases} A_n^{(1)} & \text{при } A_n^{(1)} \leq A_n^{(2)} \\ A_n^{(2)} & \text{при } A_n^{(2)} < A_n^{(1)}. \end{cases} \quad (4)$$

Для простоты будем рассматривать амплитудные ХН в области пространственных углов θ . Для получения АФР $A_m^{(1)}$ и $A_m^{(2)}$ можем воспользоваться методом наименьших квадратов, для чего построим заданные ДН $F_i^{<0>}(\theta), i = 1, I$, описывающие требования (1) и (2). В данном случае количество требований $I = 2$.

С использованием $F_1^{<0>}(\theta)$ и $F_2^{<0>}(\theta)$ получим искомые АФР по следующему методу. Пусть ХН линейной эквидистантной АР изотропных $N, n = \overline{1, N}$ элементов описываются выражением:

$$f_n(\theta) = \exp(-jkx_n \sin \theta), \quad (5)$$

где j - мнимая единица;

k - волновое число;

x_n - координата n -го элемента;

θ - значение угла, отсчитываемого от нормали к АР.

Построим вектор, учитывающий требования $F_i^{<0>}(\theta)$ для АР:

$$\boldsymbol{\eta}_i = \mathbf{f}(\theta)^T \mathbf{F}_i^{<0>}(\theta). \quad (6)$$

Амплитудные распределения получаем согласно выражению:

$$\mathbf{A}_i = (\mathbf{S}^{-1})^T \boldsymbol{\eta}_i, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{S} = \mathbf{f}(\theta)^T \mathbf{f}(\theta). \quad (8)$$

ХН получим на основании выражения:

$$F_i(\theta) = \mathbf{f}(\theta)^T \mathbf{A}_i. \quad (9)$$

Результат позволяет получить ХН, свойства которых позволяют удовлетворять требованиям (1) и (2) по отдельности (рис. 2 и 3).

Применим логический оператор \Re (4) для формирования распределения \mathbf{A}_0 . В результате применение операции получают распределение, которому соответствует фиктивная диаграмма $F_3(\theta)$, вычисленная по (9), близкая к $F_1(\theta)$ в интервале пространственных углов $\theta_1 < \theta < \theta_2$ и к $F_2(\theta)$ в интервале $\theta < \theta_1, \theta > \theta_2$ (рис.4).

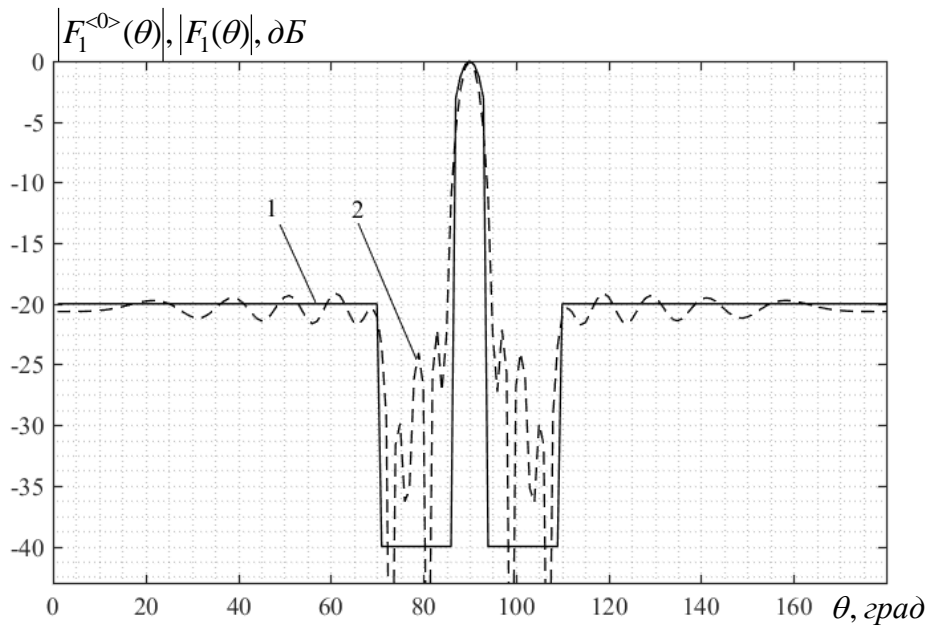


Рис.2. Заданная ДН (кривая 1) и ДН сформированной ХН по требованию (1) (кривая 2).

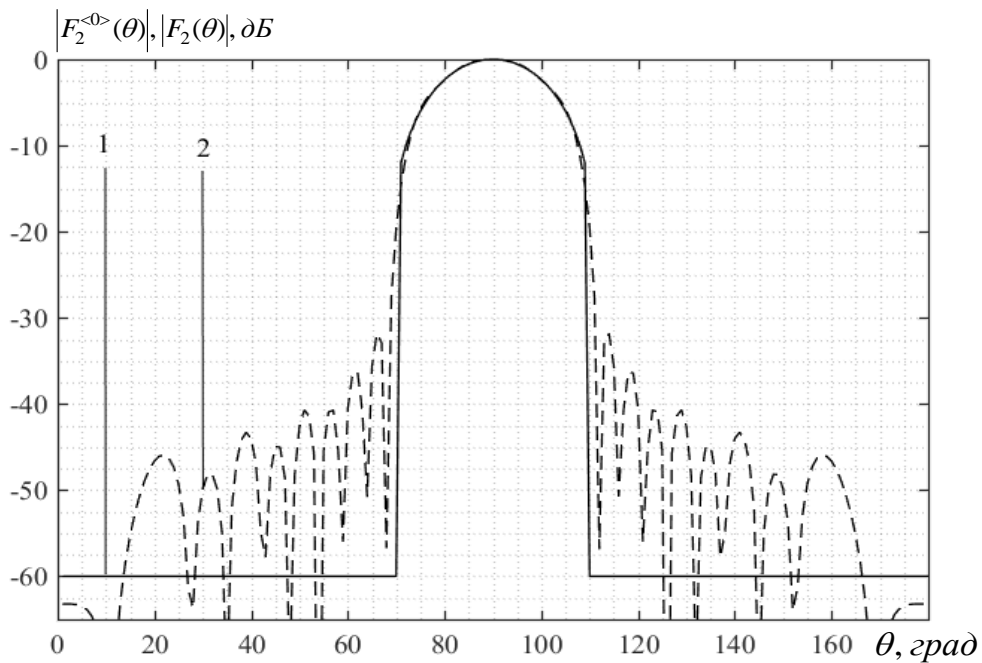


Рис. 3. Заданная ДН (кривая 1) и ДН сформированной ХН по требованию (2) (кривая 2).

Анализ кривых рис. 4 позволяет сделать вывод, что применение операторов сравнения в прямой постановке не дает удовлетворительный результат, подобный рисунку 1. Уровень первых боковых лепестков имеет

значение -9.5 дБ, а ширина главного максимума не удовлетворяет заданным требованиям (1).

В ходе численных исследований было выявлено, что уменьшение ширины главного максимума заданной ДН $F_2^{<0>}(\theta)$ позволяет получить фиктивную ХН, в лучшей степени удовлетворяющую требованиям (1) при сохранении условия выполнения требования (2). Решение задачи сильно зависит от параметров заданных ДН, таких как ширина луча и УБЛ.

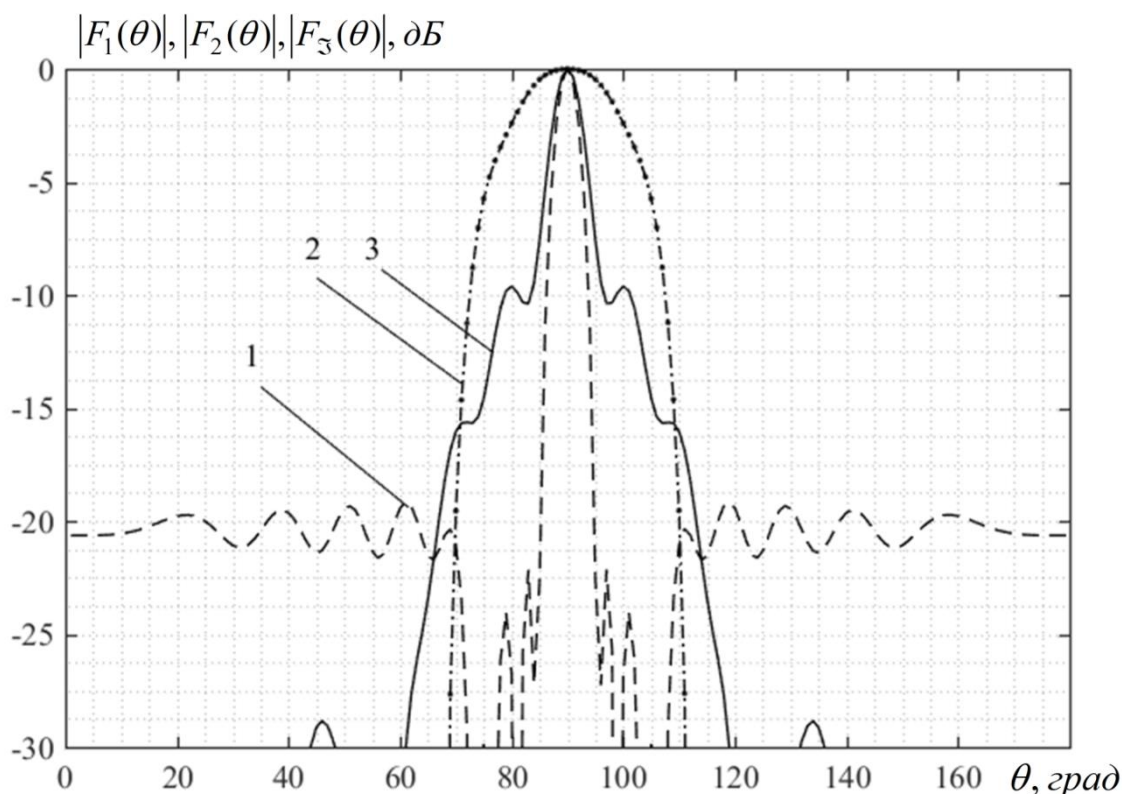


Рис. 4. ДН, удовлетворяющая критерию (1) (кривая 1), ДН, удовлетворяющая критерию (2) (кривая 2), фиктивная ДН (кривая 3).

Распределение \mathbf{A}_0 , полученное в результате применения логического оператора \mathfrak{R} , а также распределения \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 , вычисленные по методу наименьших квадратов для ХН $F_1(\theta)$ и $F_2(\theta)$, представлены на рис.5.

В виду многообразия логических функций и их комбинаций эффект от применения указанного подхода далеко неоднозначен и неочевиден. В связи с этим возникает определенный интерес построения единого подхода к анализу и

формированию фиктивных ХН АР для обеспечения преимущества в логической обработке.

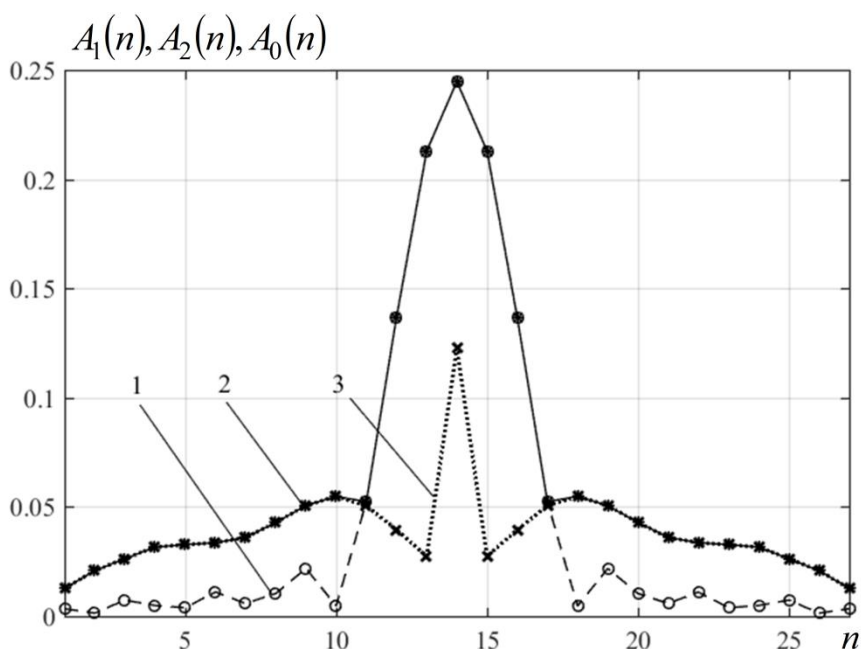


Рис. 5. Амплитудное распределение, удовлетворяющее требованию (2) (кривая 1), амплитудное распределение, удовлетворяющее требованию (1) (кривая 2), фиктивное амплитудное распределение (кривая 3).

3. Метод логического синтеза антенной решетки с использованием нечетких множеств

Применим новый подход, позволяющий получать более гибкое решение при логическом синтезе и выстроить математический аппарат по оценке результатов применения логических операций для решения задач синтеза АР.

Известно [13], что существо логических операций в двузначной математической логике сводится к операции над двумя переменными a_1 и a_2 , в результате которых появляется значение одной из них. В результате одной из 16 логических операций над двоичными числами результирующее АФР состоит из совокупности значений или A_1 или A_2 . На основе этого предложим, что значения амплитуд $A_n^{(1)}$ и $A_n^{(2)}$ на каждом элементе АР могут характеризовать границы области допустимых решений для задачи синтеза АР,

удовлетворяющий совместным требованиям (1) и (2). То есть с точки зрения принадлежности требованию (1) значение $A_n^{(1)}$ на каждом элементе означает 1, то есть максимум, а значение $A_n^{(2)}$ - минимум. А с точки зрения принадлежности требованию (2) значение $A_n^{(1)}$, наоборот, означает 0, а значение $A_n^{(2)}$ - 1. Это дает основание сформировать множество значений $\mu_n(h) \in [0, 1]$, в котором нулю будет соответствовать значение $A_n^{(1)}$, а единице - $A_n^{(2)}$, и искать решение в интервале значений $h_n = dA_n = |A_n^{(1)} - A_n^{(2)}|$. На данном множестве можно построить функции принадлежности [14] (ФП) значений амплитудных распределений критериям, выражающим требования (1) и (2), для каждой пары значений амплитуд на элементе АР.

4. Реализация предлагаемого метода

Выразим принадлежность A_i требованиям в виде треугольных ФП вида:

$$\mu_{A_i}(h_n) = \begin{cases} 0 & \hat{A}_n^{(i)} \leq h_1 \\ \left(\frac{\hat{A}_n^{(i)} - h_1}{h_2 - h_1} \right) & h_1 < \hat{A}_n^{(i)} \leq h_2 \\ \left(\frac{h_3 - \hat{A}_n^{(i)}}{h_3 - h_2} \right) & h_2 < \hat{A}_n^{(i)} \leq h_3 \\ 0 & h_3 < \hat{A}_n^{(i)} \end{cases} \quad (10)$$

где $h_l, l = 1, 2, 3$ - точки, определяющие положение основания и высоты ФП.

В (10) $\hat{A}_n^{(i)}$ на каждом элементе изменяется в интервале $h_n \in [A_n^{(1)}, A_n^{(2)}]$. Число значений H каждого интервала влияет на качество решения. В данном случае H для всех N интервалов выбирается равным. В результате формируется $H \times N \times I$ степеней принадлежности значений N комплексных амплитуд количеству I требований. На рис. 6 показаны ФП двух АФР одного элемента требованиям (1) и (2).

Выражение принадлежности в виде ФП безусловно дает некоторый произвол выбора вида самой ФП. Вопрос выбора того или иного вида ФП

остается за рамками работы. Преимущество заключается в том, что ФП позволяют регулировать приоритет того или иного критерия, например путем возведения ФП в степень.

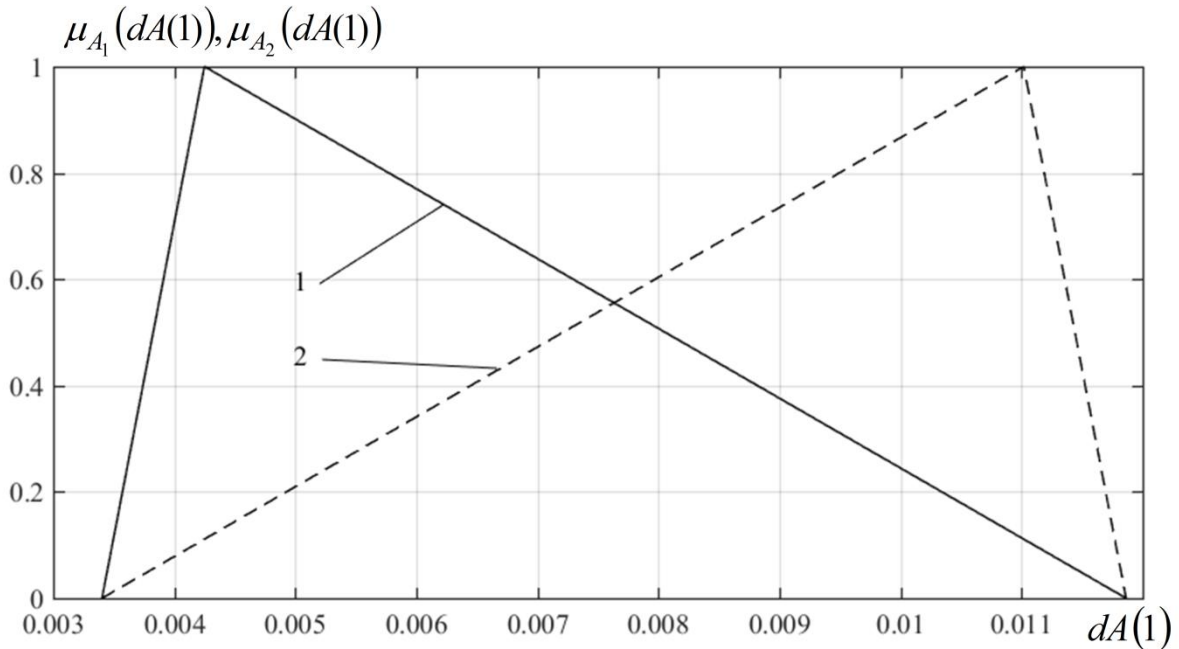


Рис 6. ФП амплитудного распределения, лучше обеспечивающего требование (1) (кривая 1), и ФП амплитудного распределения, лучше обеспечивающего требование (2) 1-го элемента АР множеству значений АФР в интервале $h_1 \in [A_1^{(1)}, A_1^{(2)}]$.

Можно использовать механизм получения квазиоптимального решения применив операцию пересечения по Заде [15]

$$\mu_{\hat{A}_0}(h_n) = \min(\mu_{A_i}(h_n)) \quad (11)$$

и процедуру деффазификации, например, по методу центра тяжести

$$\hat{A}_0 = \frac{\sum_h h_n \cdot \mu_{\hat{A}_0}(h_n)}{\sum_h \mu_{\hat{A}_0}(h_n)}. \quad (12)$$

В результате деффазификации (12) $\mu_{\hat{A}_0}(h_n)$ получим распределение \hat{A}_0 значений из интервалов h_n , соответствующих точкам пересечения ФП $\mu_{A_i}(h_n)$. Следует отметить, что операция пересечения (11) производится между функциями каждого элемента АР. Результат деффазификации представлен на

рис. 7. На рисунке представлено распределение A_0 (кривая 1), полученное в результате логического синтеза и распределение, полученное в результате деффазификации \hat{A}_0 (кривая 2).

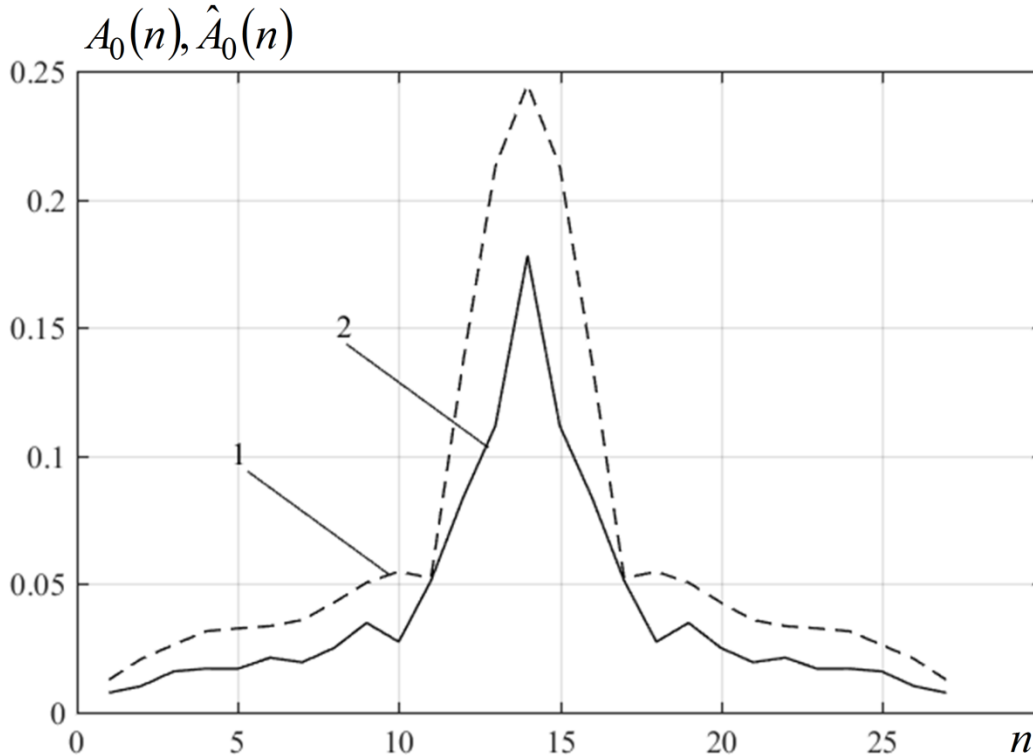


Рис. 7. Результат деффазификации результирующих ФП (11).

Синтез ХН по \hat{A}_0 в случае применения треугольных ФП не дает удовлетворительного решения. Попробуем приблизиться одновременно к требованиям (1) и (2) путем увеличения амплитуды в области крайних элементов по сравнению с A_0 . Поэтому ничего не мешает воспользоваться оператором эквивалентности и получить распределение вида:

$$\tilde{A}_n \rightarrow \mathfrak{R}(\hat{A}_0, A_n^{(1)}) = \begin{cases} A_n^{(1)} & \text{при } A_n^{(1)} \leq \beta A_n^{(2)} \\ \hat{A}_0 & \text{при } A_n^{(2)} < \beta A_n^{(1)}. \end{cases} \quad (13)$$

В (13) β означает коэффициент, введение которого позволяет управлять степенью функции принадлежности значения амплитудного распределения в каждом элементе АР.

Результаты применения (13) представлены на рис. 8. Анализ графиков рис. 8 показывает, что ДН, синтезированная по правилу (13) (кривая 4), лучше приближается к требованию (1) по сравнению с ДН четким логическим синтезом, однако при этом требование (2) выполняется хуже.

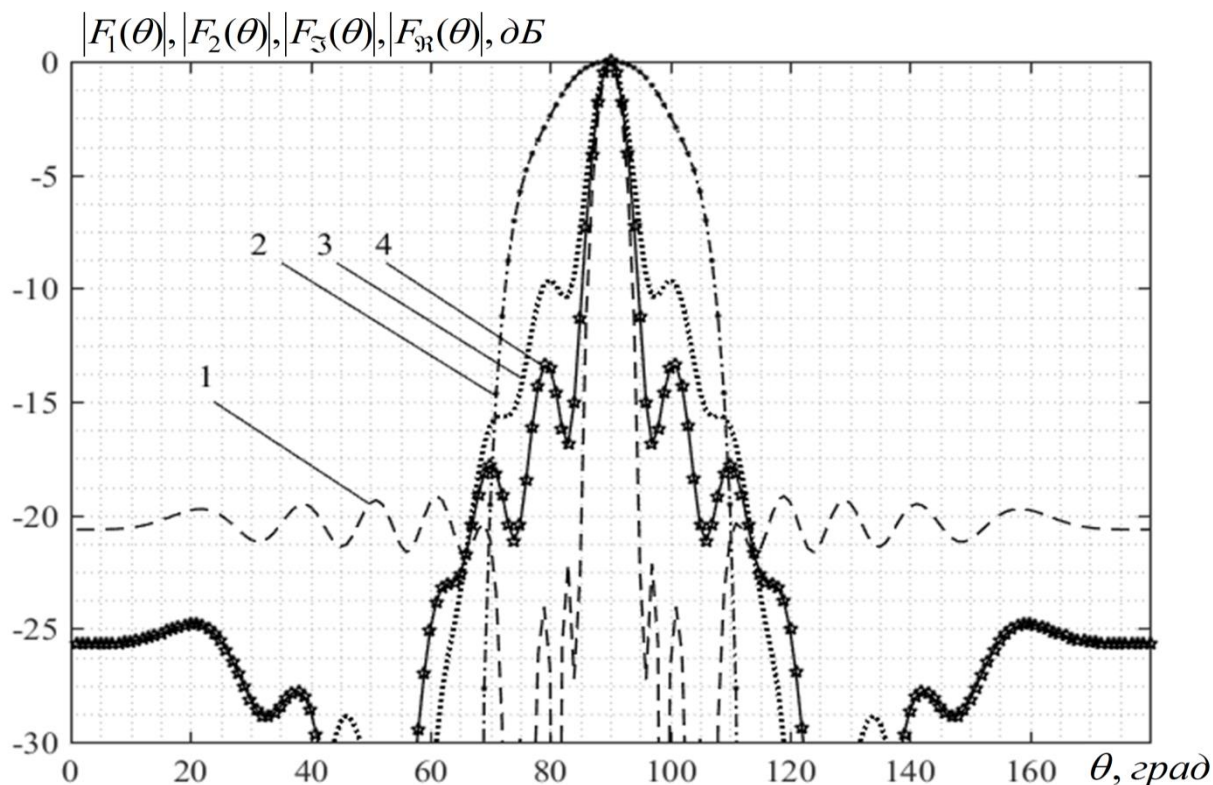


Рис. 8. ДН АР, выполняющая требование (1) (кривая 1), требование (2) (кривая 2), ДН АР с амплитудным распределением A_0 (кривая 3), ДН АР с амплитудным распределением \tilde{A} (кривая 4).

Выходом из данной ситуации может являться изменение приоритетов критериев для амплитудных распределений, выполняемое путем возведения ФП в степень.

В любом случае приближение к совместному выполнению требований (1) и (2) возможно лишь с определенной степенью точности. Большой эффект может быть достигнут при построении системы управления адаптивных АР, когда в определенном интервале времени тот или иной критерий обладает большим приоритетом.

5. Примеры численных исследований и сравнительный анализ предлагаемого и известного методов логического синтеза АР

Пусть дана линейная эквидистантная цифровая АР системы связи из $N = 27$ элементов, расположенных на расстоянии $d = 0.5\lambda$, ХН которых по описывается выражением (5), $\theta = [-90^\circ, 90^\circ]$. Спецвычислитель АР записывает значения отсчетов сигналов в течение некоторого интервала времени и позволяет складывать сигналы с различными весовыми коэффициентами. Первый набор коэффициентов позволяет получить ХН с главным максимум узкой ширины, второй – ХН с низким уровнем боковых лепестков. ХН рассматриваемой АР в плоскости θ описывается выражением

$$F(\theta) = \sum_n^N \dot{A}_n \exp(-jkx_n \sin \theta), \quad (14)$$

где \dot{A}_n - комплексные амплитуды.

Требования (1) и (2) выразим заданными ХН $F_1^{<0>}(\theta)$ и $F_2^{<0>}(\theta)$:

$$F_1^{<0>}(\theta) = \begin{cases} 0.01 & -20^\circ < \theta < -6^\circ, 6^\circ < \theta < 20^\circ, \\ \cos(\theta) & -6^\circ \leq \theta \leq 6^\circ, \\ 0.1 & -90^\circ < \theta < -20^\circ, 20^\circ < \theta < 90^\circ. \end{cases},$$

$$F_2^{<0>}(\theta) = \begin{cases} \cos(\theta) & -20^\circ < \theta < 20^\circ, \\ 0.001 & -90^\circ < \theta < -20^\circ, 20^\circ < \theta < 90^\circ. \end{cases}$$

На основании (6) и (7) получим АФР \mathbf{A}_i и амплитудные распределения АР $|\mathbf{A}_i|$, удовлетворяющие требованиям (1) и (2). Для анализа возможностей предложенного метода логического синтеза на основе нечетких множеств вместо ФП, описываемых выражением (10) будем использовать сигмоидные ФП (рис 9):

$$\mu_{\mathbf{A}_i}(h_n) = \left(\frac{1}{1 + \exp(-\nu(h_n - \zeta))} \right)^\eta, \quad (15)$$

где ν, ζ - высота и альфа-уровень сигмоидной ФП;

η - коэффициент предпочтения ФП;

$h_n = [A_n^{(1)}, A_n^{(2)}]$ - диапазоны значений по числу излучателей АР, элементы которых распределены от $A_n^{(1)}$ до $A_n^{(2)}$.

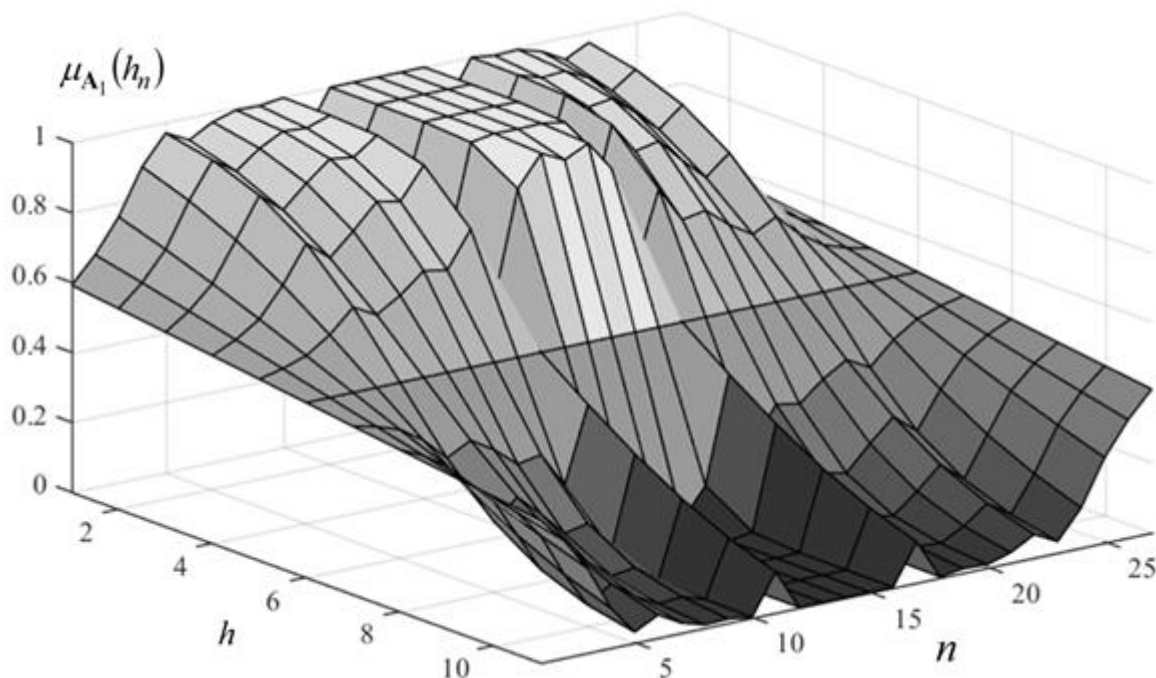


Рис. 9. Функции принадлежности амплитудного распределения, удовлетворяющего требованию (1) множеству интервалов h_n .

На рис. 9 представлено распределение ФП A_1 множеству h_n . При увеличении h_n значение ФП уменьшается, поскольку верхней границей h_n являются значения амплитудного распределения, соответствующего требованию (2). Распределение ФП симметрично в силу симметрии амплитудного распределения по раскрыву АР. Для амплитудного распределения, удовлетворяющего требованию (2), ФП строится зеркально симметрично на основе (15).

Применим операцию пересечения (11) и операцию деффагификации (12) к массивам ФП амплитудных распределений A_1 и A_2 оптимальному решению. Получаемый на основе применения метода синтеза на основе нечетких множеств результат \hat{A}_0 соответствует точкам попарного пересечения функций

принадлежности обоих распределений (рис. 10). На рис.10 приведены амплитудное распределение, соответствующее требованию (1) (кривая 1), амплитудное распределение, соответствующее требованию (2) (кривая 3) и амплитудное распределение, полученное предлагаемым методом (кривая 2). Также на рис. 10 показан интервал h_{18} из множества интервалов, по которым строятся функции принадлежности.

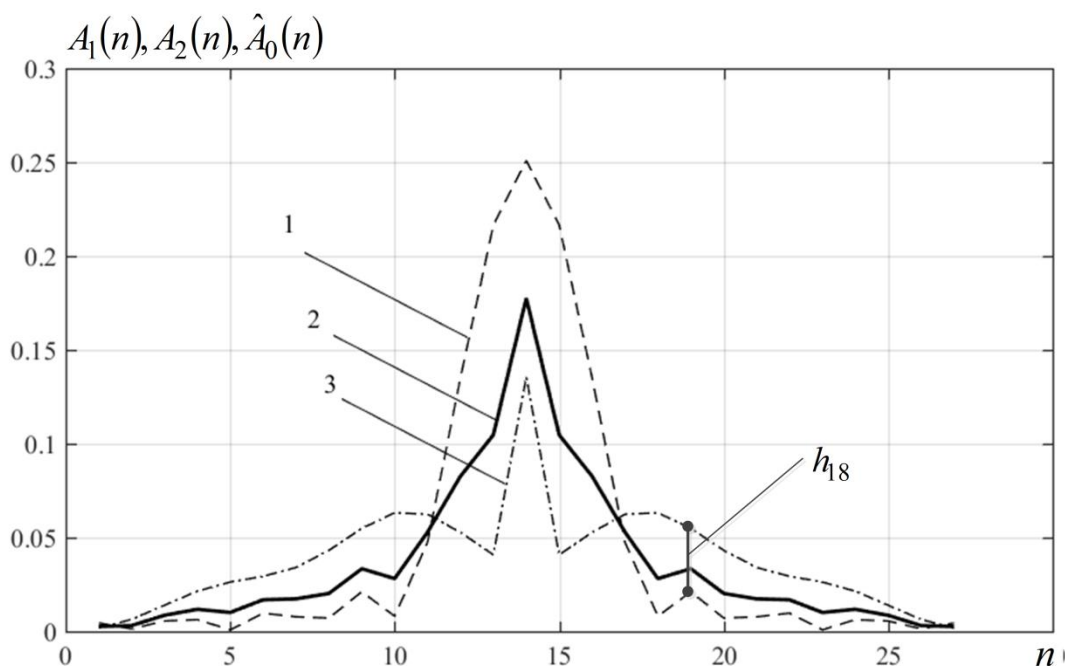


Рис. 10. Амплитудное распределение, удовлетворяющее требованию (1) (кривая 1), фиктивное амплитудное распределение (кривая 2), амплитудное распределение, удовлетворяющее требованию (2) (кривая 3).

На рис. 11 приведены фиктивные ДН исследуемой АР, полученные известным и предлагаемым методом. Кривая (1) соответствует ХН АР, полученной методом логического синтеза на основе нечетких множеств, а кривая (2) соответствует ХН АР, полученной известным методом логического синтеза, описанном в [8, 9], на основе выражения (4). Сравнительный анализ кривых рис. 11 позволяет сделать вывод о преимуществах предложенного подхода по сравнению с известным.

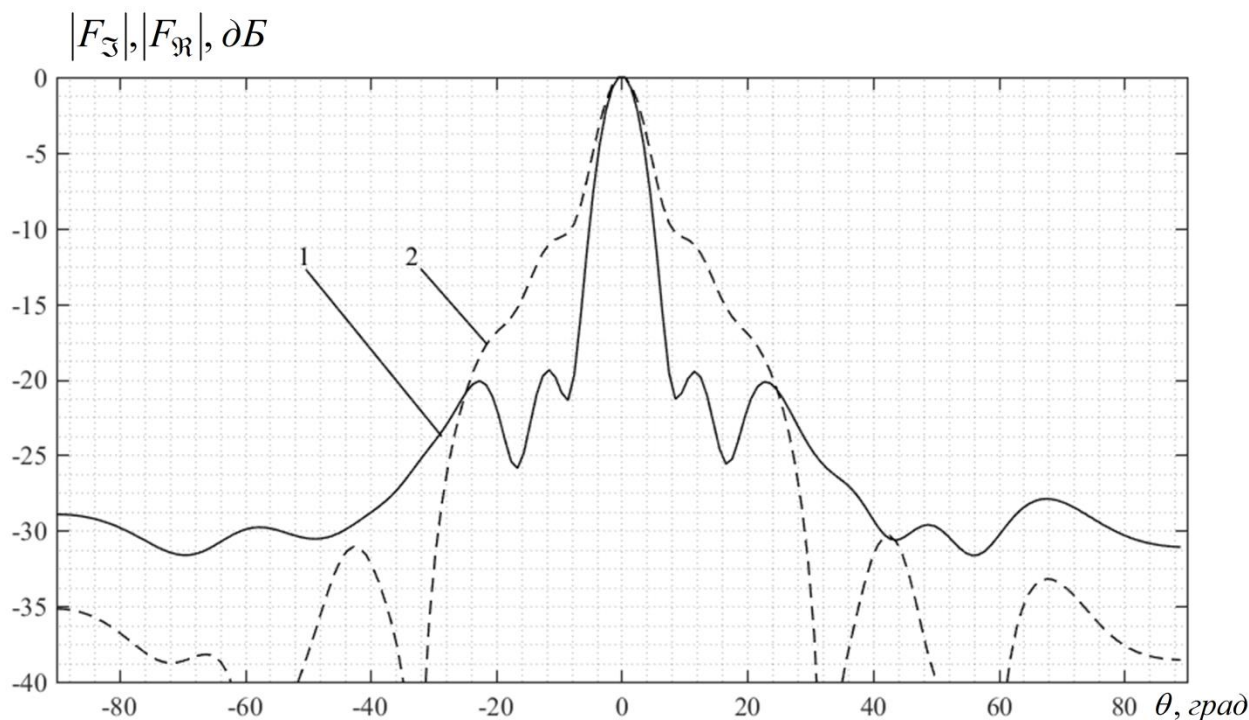


Рис. 11. ДН АР с амплитудным распределением \hat{A}_0 (кривая 1) по предлагаемому методу, ДН АР с амплитудным распределением A_0 (кривая 2), полученная известным методом логического синтеза АР.

Применение ФП нечетких множеств позволяет получить выигрыш в области первых боковых лепестков в 10 dB при уменьшении ширины главного максимума на 8° по уровню -10 dB . В области средних и задних боковых лепестков уровень ХН, полученной предлагаемым методом, выше по сравнению с известным методом. Это обусловлено более высоким приоритетом выполнения требования (1). Несмотря на увеличение количества операций предлагаемого метода по сравнению с известным, количество варьируемых параметров ФП позволяет получить более гибкое решение двухкритериальной задачи логического синтеза АР.

6. Заключение

Таким образом, в работе проведен анализ известных методов логического синтеза АР и предложен новый подход к решению задачи логического синтеза АР, который позволяет за счет использования функций принадлежности нечетких множеств получать решение в виде фиктивной ХН, лучше

удовлетворяющее несколько противоречивых требований по сравнению с известным методом. Преимущества предлагаемого метода базируются на особенностях аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики. Применение аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики в логическом синтезе АР позволит решать следующие задачи:

1. Определение степени принадлежности АФР оптимальному решению
2. Оценка вклада каждого элемента АР в ДН
3. Управление (включение/выключение) элементами АР для формирования нескольких ДН
4. Определение необходимого количества элементов и структуры подрешеток в АР для формирования нескольких ДН.

Решение данных задач на основе предложенного подхода позволит повысить качество решения задач радиолокации, связи и навигации, а также может быть использовано на этапе разработки перспективных многофункциональных РТС. В теоретическом аспекте применение предложенного подхода позволит внести вклад в решение многокритериальных задач синтеза АР, при рассмотрении их как сложных систем с позиций системного анализа. Недостатками предлагаемого подхода является увеличение количества операций метода и отсутствие готовых решений по выбору оптимальных параметров функций принадлежности. Следует отметить, что численные исследования в работе проводились с использованием изотропных излучателей линейной АР без учета взаимной связи между элементами. Усложнение моделей АР внесет изменения в функции принадлежности, в связи с чем помимо вышеуказанных направлений интерес представляют исследования, касающиеся влияния модели на вид и параметры функций принадлежности нечетких множеств, обеспечивающих наилучшее решение задачи синтеза АР.

Литература

1. Системный анализ измерительных комплексов / В.В. Васильев, Н.Б. Резвцов, А.В. Аношкин, В.И. Мороз и др. – М.: Военная академия РВСН, 1994. 497 с.
2. Алгазинов Э.К., Сирота А.А. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем. – М.: Диалог МИФИ, 2009. 405 с.
3. Зелкин, Е.Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием / Е.Г. Зелкин, В.Г. Соколов // М.: Сов. радио, 1980, 296 с.,ил.
4. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. 488 с.
5. Амплитудно-фазовый синтез оптимальной по Парето антенной решетки // А.А. Безуглов, А.В. Литвинов, С.В. Землянский, С.Е. Мищенко. Вестник РГУПС, № 1, 2016, С. 71-78.
6. Коротченко А.Г., Кумагина Е.А, Сморякова В.М. Введение в многокритериальную оптимизацию. Нижний Новгород: ИИТММ, 2017, 55 с.
7. Многокритериальная оптимизация: Математические аспекты / Б.А. Березовский, Ю.М. Барышников, В.И. Борзенко, Л.М. Кемпнер. М.: Наука, 1989, 128 с.
8. Минкович Б.М., Яковлев В.П., Теория синтеза антенн. – М.: «Советское радио», 1969, 296 с.
9. Проблемы антенной техники / Под ред. Л.Д. Бахраха, Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1989. 368 с.
10. Антенные решетки. Реферативный сборник зарубежных работ / Под ред. Л.С. Бененсона. – М., 1986, 367 с.
11. Чернов В.Г. Нечеткие контроллеры. Основы теории и построения: учеб. Пособие по курсу «Интеллектуальные системы управления». Владимир, Владим. гос. ун-т, 2003. 148 с.
12. Верещагин Н.К., Шень А., Лекции по математической логике и теории алгоритмов. – М.: МЦНМО, 1999. 128 с.

13. Мельников Г.П. Алфавит математической логики. - М.: Знание, 1967, 97 с.

14. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab.- М.: Горячая линия – телеком, 2007. 288 с.

15. Чернов В.Г. Основы теории нечетких множеств. Решение задач многокритериального выбора альтернатив. Владимир: Изд-во ВГУ, 2005. 100 с.

Для цитирования:

Д. С. Махов. Логический синтез антенных решеток на основе аппарата теории нечетких множеств. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/12/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.5.12