

УДК 621.396.677

## СИНТЕЗ АМПЛИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ВХОДАХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НАД ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТОДОМ РОЯ ЧАСТИЦ

И.А. ФАНЯЕВ<sup>1</sup>, В.П. КУДИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18 сентября 2017

**Аннотация.** Произведен синтез амплитудного распределения на полосковых излучателях вертикальной (горизонтальной) поляризации фазированной антенной решетки над проводящей цилиндрической поверхностью по критерию минимальности уровня боковых лепестков диаграммы направленности, используя две модификации метода роя частиц, а именно CBPSO и APSO.

**Ключевые слова:** антенная решетка, амплитудное распределение, метод роя частиц, весовой коэффициент, уровень боковых лепестков, ширина главного лепестка.

**Abstract.** The amplitude distribution on strip radiators of vertical (horizontal) polarization of phased array antenna above conducting cylindrical surface synthesized by the criterion minimum sidelobe levels radiation pattern using two modifications of the particle swarm optimization, namely, CBPSO and APSO is made.

**Keywords:** antenna array, amplitude distribution, particle swarm method, weight coefficient, sidelobe level, main lobe width.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 108, No. 6, pp. 89-96**

**Amplitude distribution at inputs of radiators of the phase antenna array above cylindrical surface by the particle swarm optimization**

**I.A. Fanyayev, V.P. Kudzin**

### Введение

На данном этапе развития ЭВМ и науки существует огромное количество оптимизационных методов, использующихся в различных областях. Наиболее привлекательной, с точки зрения простоты реализации и эффективности алгоритма, является оптимизация методом роя частиц [1–5] (PSO – Particle Swarm Optimization). Кроме PSO, существует множество других интеллектуальных методов оптимизации тех или иных характеристик (параметров) как в антенной технике, так и в других областях науки, а именно GA [6], DEA [7], САВ [8] и др.

Помимо классического метода роя частиц в литературе встречается достаточное количество работ по его модификации. Модификации носят разносторонний характер и все, в подавляющем большинстве, направлены на улучшение эффективности алгоритма и ускорение поиска экстремума той или иной функции. Из наиболее распространенных модификаций метода PSO можно выделить следующие: RegPSO [9], Parallel PSO [10], QPSO [11], CBPSO [12]; APSO [13].

Большое количество работ, в которых использованы интеллектуальные методы для синтеза амплитудного или амплитудно-фазового распределения, нацелены на исследования линейных или же плоских антенных решеток (АР). Синтез амплитудного распределения

на входах излучателей фазированной антенной решетки (ФАР), расположенной над проводящей цилиндрической поверхностью методом роя частиц, в литературе отсутствует. Основные математические выводы по ФАР, расположенной над проводящей цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной (горизонтальной) поляризации, описаны в [14, 15].

Из рассмотренных методов наиболее простым в реализации и эффективности алгоритма можно считать метод адаптивного роя частиц (APSO), а также алгоритм оптимизации хаотического двоичного роя частиц (CBPSO). На основании сказанного, целью данной работы является синтез амплитудного распределения на полосковых излучателях вертикальной (горизонтальной) поляризации ФАР над проводящей цилиндрической поверхностью по критерию минимальности уровня боковых лепестков (УБЛ) диаграммы направленности (ДН), используя две модификации метода роя частиц, а именно CBPSO и APSO.

### Метод роя частиц

В методе оптимизации роем частиц для поиска оптимального положения выступают частицы в пространстве параметров. В начале частицы разбросаны в  $N$ -мерном пространстве случайным образом и имеют произвольные координаты и вектора скоростей. Далее для каждого положения частицы вычисляется значение целевой функции. Каждая частица запоминает, какое лучшее значение целевой функции она нашла сама, а также все частицы в процессе обмена информации знают, где лучшее из пройденных всеми частицами решений. На каждой итерации частицы корректируют свою скорость (модуль и направление), чтобы, с одной стороны, быть поближе к лучшей точке, которую частица нашла сама, и в то же время приблизиться к точке, которая в данный момент является глобально лучшей. Через определенное число итераций частицы соберутся вблизи наиболее оптимального положения (глобального экстремума), однако возможно, что часть частиц останется в локальном экстремуме.

Направление и длина вектора скорости каждой частицы в классическом методе роя частиц описывается следующей формулой:

$$V_{i+1} = V_i + c_1 \text{rand}(0;1)[pbest_i - x_i] + c_2 \text{rand}(0;1)[gbest_i - x_i], \quad (1)$$

где  $V_i$  – скорость  $i$ -й частицы;  $c_1$ ,  $c_2$  – постоянные ускорения;  $\text{rand}(0;1)$  – функция генерации случайных чисел в указанном диапазоне (от 0 до 1 включительно);  $pbest_i$  – лучшая найденная частицей точка;  $gbest_i$  – лучшая точка среди всех частиц;  $x_i$  – текущее положение частицы.

После вычисления направления вектора  $V$  частица перемещается в точку  $x_{i+1} = x_i + V_i$ .

Формула (1) для коррекции скорости частиц является сущностью алгоритма. Многие исследования были проведены для подбора коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$ .

Существуют многочисленные модификации алгоритма роя частиц. Одна из модификаций алгоритма состоит в том, что к скорости добавляется весовой коэффициент  $\omega$  (коэффициент инерции), благодаря которому скорость изменяется более плавно:

$$V_{i+1} = \omega V_i + c_1 \text{rand}(0;1)[pbest_i - x_i] + c_2 \text{rand}(0;1)[gbest_i - x_i]. \text{ Этот коэффициент может быть константой, а может зависеть от номера итерации } k, \text{ например, линейно уменьшаться, начиная от величины, меньшей 1, и до какой-то другой величины, отличной от нуля.}$$

$$\omega_k = \omega_{\max} - k \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{\max}$  – максимальный коэффициент инерции;  $\omega_{\min}$  – минимальный коэффициент инерции;  $k_{\max}$  – общее число итераций;  $k$  – текущий номер итерации.

Одной из модификаций весового коэффициента, которая была использована в этой работе, является [12]

$$\omega_k = \left[ \omega_{end} + (\omega_{start} - \omega_{end}) \left( \frac{k_{max} - k}{k_{max}} \right)^\delta \right] rand(0, 1), \quad (3)$$

где  $\omega_{start}$  – начальный коэффициент инерции ( $\omega_{start} = 0,9$ );  $\omega_{end}$  – конечный коэффициент инерции ( $\omega_{end} = 0,1$ );  $\delta$  – степень прогиба функции ( $\delta = 1,6$ ).

Данная модификация используется в методе хаотического двоичного роя частиц (CBPSO). Поведение весового коэффициента показано на рис. 1.

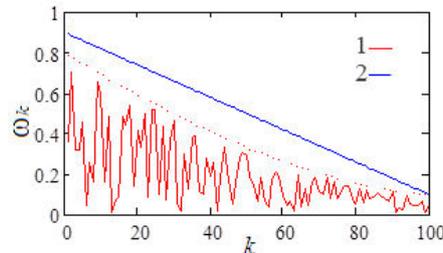


Рис. 1. Зависимость весового коэффициента от номера итерации

Кривая под номером 1 описывает хаотически спадающее изменение весового коэффициента из (3), а кривая 2 – линейный спад (2). Пунктиром показана степень прогиба кривой 1 ( $\delta = 1,6$ ).

В работе также использовалась еще одна модификация метода роя частиц, а именно адаптивный рой частиц (APSO) [13]. Суть метода заключается в том, что весовой коэффициент изменяется адаптивно для каждой частицы, при этом также изменяются постоянные ускорения:

$$\omega_i = 1,1 - \frac{gbest}{\langle pbest_i \rangle}, \quad c_{1,2} = 1 + \frac{gbest}{pbest_i}, \quad (4)$$

где  $\langle pbest_i \rangle$  – среднее арифметическое среди лучших позиций частиц.

Для примера на рис. 2 представлена зависимость весового коэффициента от номера итерации для первых 5 частиц.

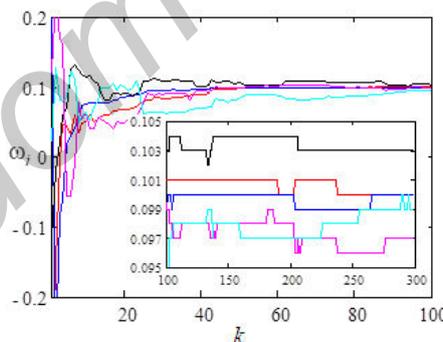


Рис. 2. Зависимость весового коэффициента для каждой частицы от номера итерации

Как видим (рис. 2), даже на последних итерациях происходит изменение весового коэффициента, пусть и незначительное, что позволяет каждой частице отдельно корректировать свою скорость.

### Синтез амплитудного распределения

Рассмотрим два варианта АР над цилиндрической поверхностью из излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации. Для удобства были приняты обозначения: АР  $V$ -типа и АР  $H$ -типа. Рассчитывались кольцевая антенная решетка из  $N = 32$  вертикальных (горизонтальных) излучателей с сектором возбуждения  $\alpha$ , равным  $120^\circ$ , с параметрами: расстояние между излучателем и цилиндрической поверхностью  $\Delta = \lambda/4$ , ширина излучателя  $w = 0,05\lambda$ , длина излучателя  $L = 0,5\lambda$ , зазор  $h = 0,01\lambda$ ;  $V$ -типа:  $d_z = 0,7\lambda$ ,  $d_\phi = 0,6\lambda$ , сопротивление линии передачи –  $Z_{inc} = 144 + 34j$  Ом;  $H$ -типа:  $d_z = 0,6\lambda$ ,  $d_\phi = 0,7\lambda$ ,  $Z_{inc} = 105 + 22j$  Ом.

Проведем поиск амплитудного распределения в раскрыве по критерию минимальности УБЛ, используя два оптимизационных метода, а именно СВPSO и APSO. При использовании разработанных в среде MathCAD программ для метода СВPSO были применены следующие параметры:  $\omega_{start} = 0,9$ ;  $\omega_{end} = 0,1$ ;  $\delta = 1,2$ ;  $k_{max} = 200$ .

Для наглядности на рис. 3 продемонстрировано вычисление целевой функции при каждой итерации двумя методами для двух вариантов АР. Целевая функция определяет максимальное значение (дБ) среди всех побочных лепестков, а также ограничивает ширину главного лепестка. Кривые 1 и 2 показывают два расчета для СВPSO, а кривые 3 и 4 – для APSO.

В процессе тестирования программ были выявлены некоторые закономерности для каждого метода. В СВPSO необходимо использовать большее количество частиц, чем в APSO. Для ускорения поиска оптимального амплитудного распределения в методе APSO в формуле (4) для весового коэффициента необходимо использовать числовой коэффициент 1,2, вместо 1,1, а для постоянных ускорения подходящим оказалось число не 1, а 1,3.

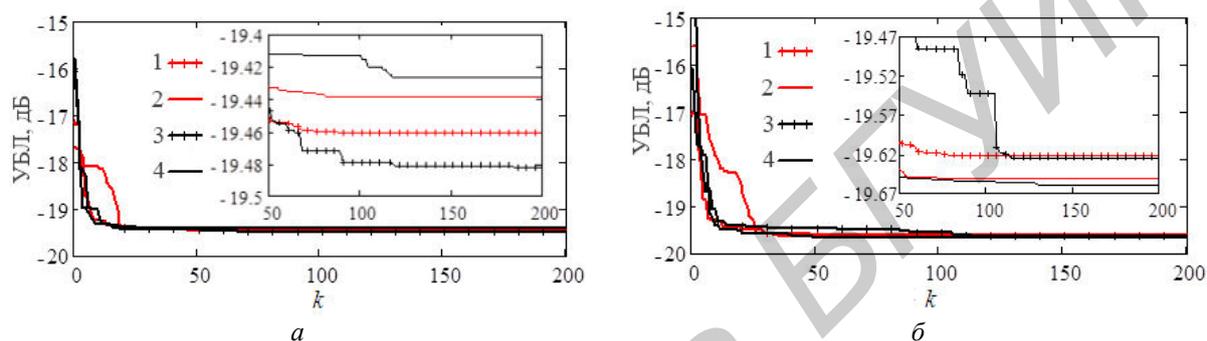


Рис. 3. Значение целевой функции при каждой итерации для цилиндрической ФАР из вертикальных (а) и горизонтальных (б) излучателей

Рис. 3 показывает, что оба метода очень быстро находят минимальный УБЛ при заданной ширине ДН. Для СВPSO достаточно использовать не более  $k_{max} = 100$  итераций, а для APSO  $k_{max} = 200$  итераций.

Ниже на рис. 4, а, в, д показаны ДН АР V-типа, а на рис. 4, б, г, е – АР H-типа при возбуждении синтезированными амплитудными распределениями. Кривая 1 – ДН при равноамплитудном распределении; кривая 2 – ДН для распределения найденного СВPSO (график амплитудного распределения (справа)); кривая 3 – ДН для распределения найденного APSO (график амплитудного распределения (слева)). У графиков амплитудного распределения ось абсцисс обозначает номер излучателя, а ось ординат – нормированную амплитуду напряжения. Для рис. 4, а, б была взята ширина главного лепестка как при равноамплитудном распределении  $\Delta\theta = 4,989^\circ$  и  $\Delta\theta = 4,389^\circ$  соответственно. Как показали результаты, существует такое амплитудное распределение, при котором можно снизить УБЛ на 3,3 дБ для АР V-типа и на 1,5 дБ – для АР H-типа.

Далее был проведен ряд компьютерных экспериментов, где в целевой функции производилось одинаковое увеличение  $\Delta\theta$ . На рис. 4, в  $\Delta\theta$  была увеличена всего на  $2,28^\circ$ , и это позволило снизить УБЛ до уровня  $-21,8$  дБ. Метод APSO дал несимметричное распределение амплитуд относительно центрального 6 излучателя. Для АР H-типа (рис. 4, г) УБЛ снизился для СВPSO до уровня  $-19,53$  дБ с  $\Delta\theta = 6,69^\circ$ , а для APSO – до уровня  $-19,64$  дБ с  $\Delta\theta = 6,13^\circ$ . Несмотря на то, что для APSO показания УБЛ и  $\Delta\theta$  получились лучше, у метода СВPSO коэффициент направленного действия (КНД) снизился до отметки 29,34 дБ, а у APSO КНД получился ниже и составил 27,7 дБ.

В последнем случае (рис. 4, д)  $\Delta\theta$  была увеличена на  $6,2^\circ$ , при этом УБЛ составил  $-28,2$  дБ. Оба метода нашли разные амплитудные распределения, однако, если судить по кривым 2 и 3, то APSO справился чуть лучше СВPSO. Для АР H-типа (рис. 4, е) оба метода синтезировали практически одинаковое амплитудное распределение. Ширина главного лепестка у ДН отличалась друг от друга всего на  $0,46^\circ$ , при этом УБЛ составил  $-26,78$  дБ.

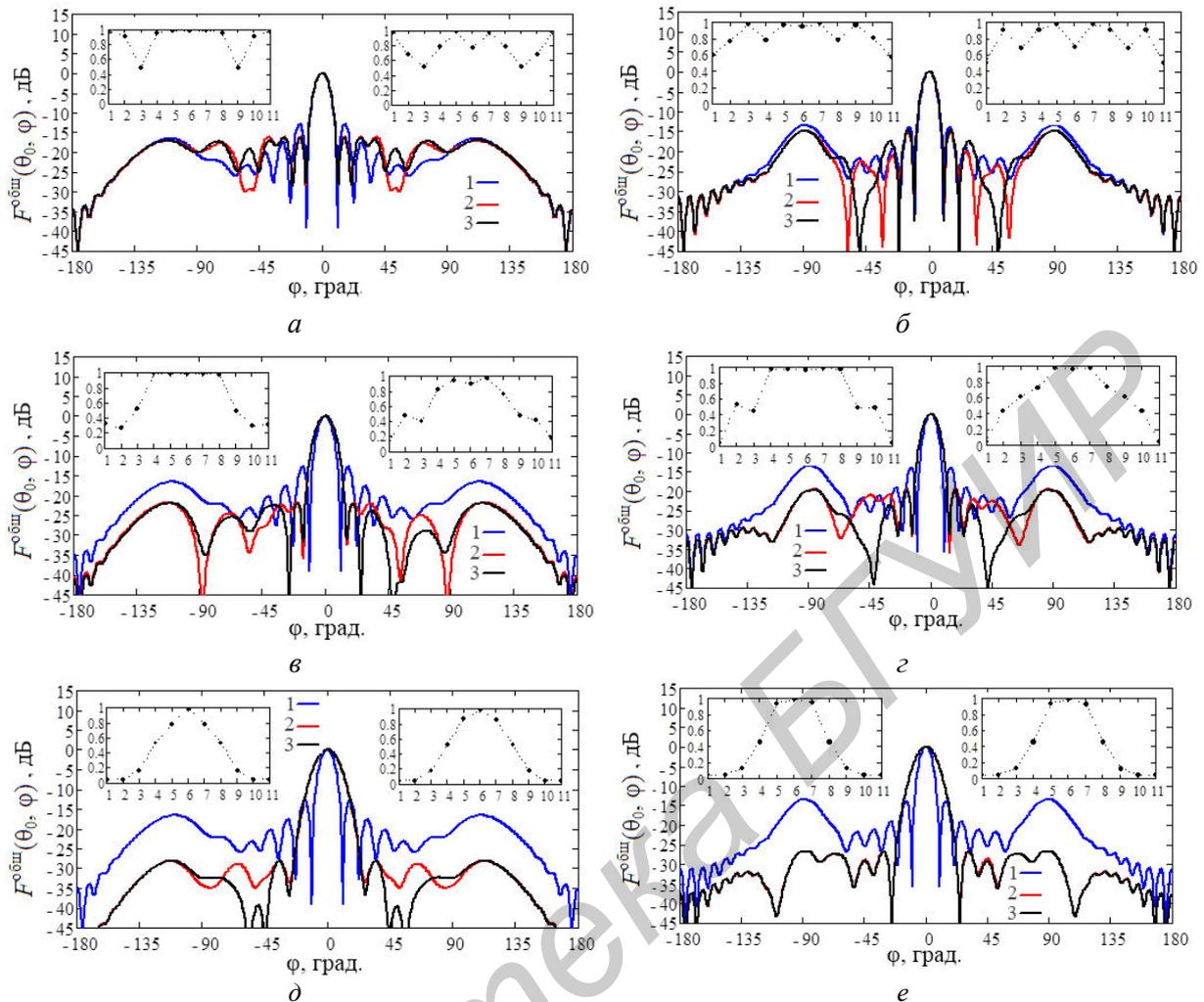


Рис. 4. ДН двух типов АР при разных амплитудных распределениях синтезированных двумя методами PSO

Из полученных распределений ясно, что два разных оптимизационных метода позволяют получить разные амплитудные распределения для АР  $V$ - $H$ -типа, однако оба метода достигают примерно одинакового УБЛ (максимальная разница составила всего 0,1 дБ). В некоторых случаях оба метода могут дать несимметричное распределение амплитуд относительно центрального 6-го излучателя, при этом УБЛ можно снизить до приемлемого уровня за счет увеличения ширины главного лепестка ДН АР.  $F^{\text{общ}}(\theta_0, \varphi)$

Более детальное исследование полученных ДН позволило описать поведение выходных характеристик для двух АР. В качестве выходных характеристик рассматривались: ширина главного лепестка  $\Delta\theta$ , КНД и УБЛ. На рис. 5 приведены выходные характеристики двух АР для разных распределений амплитуд, найденных двумя методами.

Кривые под номером 1 показывают значения для СВPSO, а кривые под номером 2 – для APSO. Номер распределения обозначен через букву  $n$ . Ширина главного лепестка увеличивается практически одинаково для двух методов (рис. 5, а). Как уже отмечалось ранее, УБЛ получается одинаков (рис. 5, д) при использовании СВPSO и APSO. УБЛ монотонно спадает при увеличении  $\Delta\theta$  и носит зеркальный характер по отношению к  $\Delta\theta$ . А вот исходя из рис. 5, в видно, что больший КНД получается при использовании метода СВPSO.

Если же проанализировать результаты для АР  $H$ -типа, то видим, что ширина главного лепестка ДН при использовании СВPSO получается во всех случаях чуть шире, чем для метода APSO (рис. 5, б). Однако УБЛ получается одинаков для обоих методов (рис. 5, е). А вот исходя из рис. 5, г видно, что больший КНД получается при использовании метода СВPSO и отличие между методами доходит вплоть до 3,8 дБ.

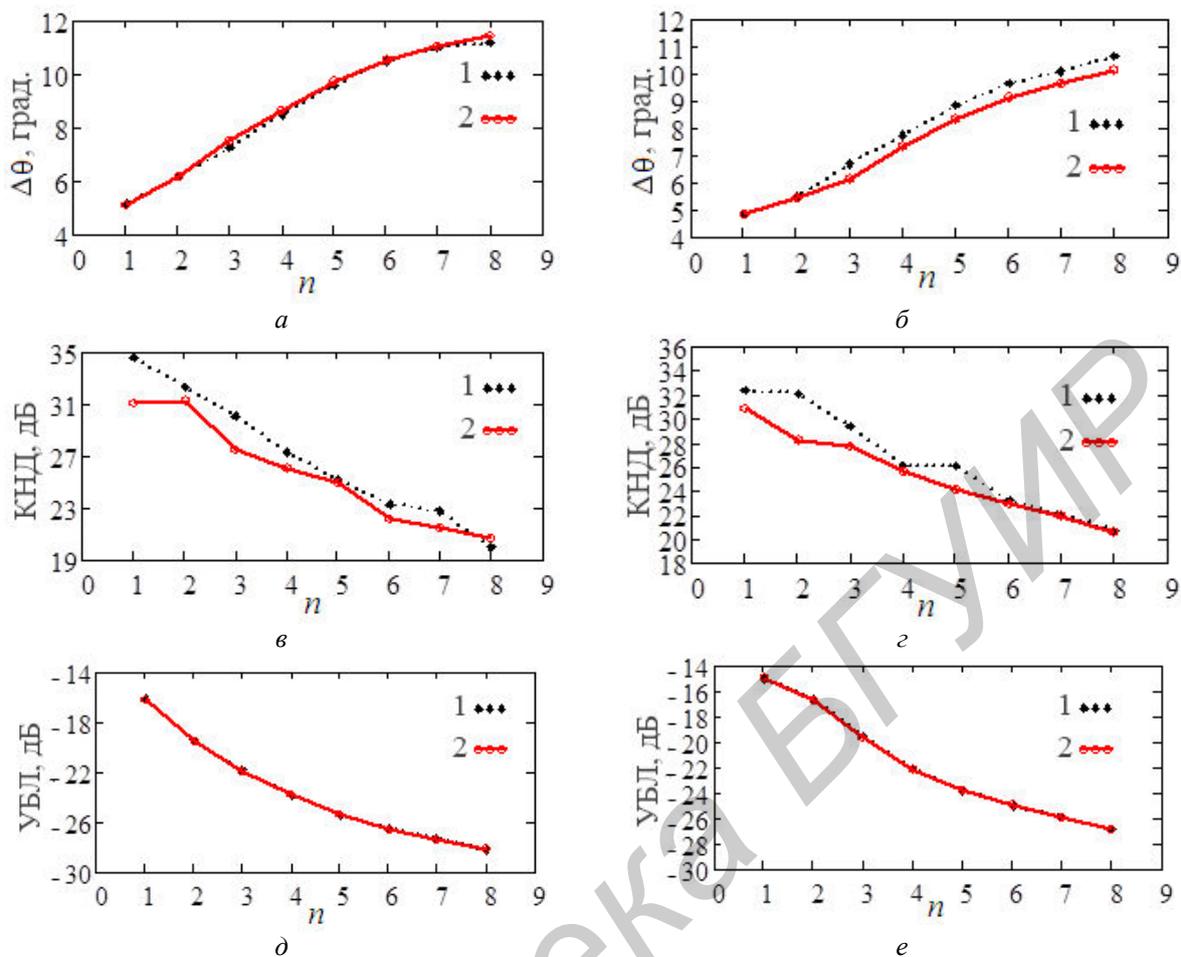


Рис. 5. Выходные характеристики двух АР для разных распределений амплитуд

### Заключение

Для оптимизации амплитудного распределения на полосковых излучателях по критерию минимума УБЛ ДН использовались две модификации метода роя частиц: хаотически двоичный метод роя частиц (CBPSO) и адаптивный метод роя частиц (APSO). В процессе использования двух методов были выявлены определенные закономерности и сформулированы следующие выводы: для ускорения поиска оптимального амплитудного распределения в методе APSO для весового коэффициента и постоянных ускорения необходима корректировка числовых постоянных; для CBPSO достаточно использовать не более 100 итераций, для APSO требуется 200 итераций.

Анализ выходных характеристик для двух АР при разных синтезированных амплитудных распределениях двумя оптимизационными методами показал, что:

- два разных оптимизационных метода позволяют получить разные амплитудные распределения, однако оба метода достигают одинакового УБЛ;
- в некоторых случаях оба метода могут дать несимметричное распределение амплитуд относительно центрального 6-го излучателя;
- для антенной решетки *V*-типа при увеличении ширины главного лепестка от  $4,99^\circ$  до  $11,4^\circ$  снижаются УБЛ с  $-12,87$  дБ до  $-28,2$  дБ и КНД с  $34,6$  дБ до  $19,5$  дБ;
- метод CBPSO синтезирует такое амплитудное распределение на излучателях АР *V*-типа, при котором КНД и  $\Delta\theta$  ДН выходят чуть большие в сравнении с результатами APSO;
- для АР *H*-типа УБЛ снижается с  $-13,34$  дБ до  $-26,78$  дБ и получаются различные КНД, спадающие от  $32,4$  дБ до  $20,57$  дБ, максимальная разница при этом составляет  $3,8$  дБ.

Оба метода имеют собственные достоинства и хорошо себя зарекомендовали для поиска или оптимизации различных параметров ФАР над цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной (горизонтальной) поляризации.

## Список литературы

1. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // International conf. on Neural Networks. Perth, Australia, 27 Nov.–1 Dec. 1995. P. 1942–1948.
2. Poli R., Kennedy J., Blackwell T. Particle swarm optimization. An overview // Swarm Intelligence. 2007. Vol. 1. P. 33–57.
3. Rini D.P., Shamsuddin S.M., Yuhaniz S.S. Particle Swarm Optimization: Technique, System and Challenges // International Journal of Computer Applications. 2011. Vol. 14, № 1. P. 19–27.
4. Clerc M. Particle swarm optimization. London: ISTE, 2006.
5. Ebrahimi N., Pirhadi A., Karimipour M. Optimum design of shaped beam cylindrical array antenna with electronically scan radiation pattern // Advanced Computational Techniques in Electromagnetics. 2013. Vol. 2013. P. 1–11.
6. Genetic Algorithms in the Design and Optimization of Antenna Array Patterns / Francisco J. Ares-Pena [et al.] // Trans. on Antennas and Propagation. 1999. Vol. 47, № 3. P. 506–510.
7. Lin C., Qing A., Feng Q. Synthesis of unequally Spaced Antenna Arrays by a new Differential Evolutionary Algorithm // IJCNIS. 2009. Vol. 1, № 1. P. 20–25.
8. Optimized Hyper Beamforming of Linear Antenna Arrays Using Collective Animal Behaviour / G. Ram [et al.] // The Scientific World Journal. 2013. Vol. 2013. P. 1–13.
9. Evers G.I., Ghalia M.B. Regrouping Particle Swarm Optimization: A New Global Optimization Algorithm with Improved Performance Consistency Across Benchmarks // International Conf. on Systems, Man and Cybernetics, San Antonio, USA, 11–14 Oct. 2009. P. 3901–3908.
10. Parallel global optimization with the particle swarm algorithm / J.F. Schutte [et al.] // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2004. Vol. 61. P. 2296–2315.
11. Mikki S.M., Kishk A.A. Quantum Particle Swarm Optimization for Electromagnetics // Trans. on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, № 10. P. 2764–2775.
12. Wang W.-B., Feng Q.-Y., Liu D. Synthesis of thinned linear and planar antenna arrays using binary PSO algorithm // PIER. 2012. Vol. 127. P. 371–387.
13. Patterns Antennas Arrays Synthesis Based on Adaptive Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms / B. Kadri [et al.] // IJCSI. 2013. Vol. 10, № 2. P. 21–26.
14. Фаняев И.А., Кудин В.П. Фазированная антенная решетка кругового обзора над проводящей цилиндрической поверхностью из излучателей вертикальной поляризации // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. 2014. № 6(87). С. 191–198.
15. Фаняев И.А., Кудин В.П. Фазированная антенная решетка кругового обзора над проводящей цилиндрической поверхностью из излучателей горизонтальной поляризации. Часть 1: Методика электродинамического моделирования // Антенны. 2016. № 2. С. 3–10.

## References

1. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // International conf. on Neural Networks. Perth, Australia, 27 Nov.–1 Dec. 1995. P. 1942–1948.
2. Poli R., Kennedy J., Blackwell T. Particle swarm optimization. An overview // Swarm Intelligence. 2007. Vol. 1. P. 33–57.
3. Rini D.P., Shamsuddin S.M., Yuhaniz S.S. Particle Swarm Optimization: Technique, System and Challenges // International Journal of Computer Applications. 2011. Vol. 14, № 1. P. 19–27.
4. Clerc M. Particle swarm optimization. London: ISTE, 2006.
5. Ebrahimi N., Pirhadi A., Karimipour M. Optimum design of shaped beam cylindrical array antenna with electronically scan radiation pattern // Advanced Computational Techniques in Electromagnetics. 2013. Vol. 2013. P. 1–11.
6. Genetic Algorithms in the Design and Optimization of Antenna Array Patterns / Francisco J. Ares-Pena [et al.] // Trans. on Antennas and Propagation. 1999. Vol. 47, № 3. R. 506–510.
7. Lin C., Qing A., Feng Q. Synthesis of unequally Spaced Antenna Arrays by a new Differential Evolutionary Algorithm // IJCNIS. 2009. Vol. 1, № 1. P. 20–25.
8. Optimized Hyper Beamforming of Linear Antenna Arrays Using Collective Animal Behaviour / G. Ram [et al.] // The Scientific World Journal. 2013. Vol. 2013. P. 1–13.
9. Evers G.I., Ghalia M.B. Regrouping Particle Swarm Optimization: A New Global Optimization Algorithm with Improved Performance Consistency Across Benchmarks // International Conf. on Systems, Man and Cybernetics, San Antonio, USA, 11–14 Oct. 2009. P. 3901–3908.
10. Parallel global optimization with the particle swarm algorithm / J.F. Schutte [et al.] // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2004. Vol. 61. P. 2296–2315.
11. Mikki S.M., Kishk A.A. Quantum Particle Swarm Optimization for Electromagnetics // Trans. on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, № 10. P. 2764–2775.

12. Wang W.-B., Feng Q.-Y., Liu D. Synthesis of thinned linear and planar antenna arrays using binary PSO algorithm // PIER. 2012. Vol. 127. P. 371–387.
13. Patterns Antennas Arrays Synthesis Based on Adaptive Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms / B. Kadri [et al.] // IJCSI. 2013. Vol. 10, № 2. P. 21–26.
14. Fanjaev I.A., Kudin V.P. Fazirovannaja antennaja reshetka krugovogo obzora nad provodjashhej cilindricheskoj poverhnost'ju iz izluchatelej vertikal'noj poljarizacii // Izvestija GGU im. F. Skoriny. 2014. № 6(87). S. 191–198. (in Russ.)
15. Fanjaev I.A., Kudin V.P. Fazirovannaja antennaja reshetka krugovogo obzora nad provodjashhej cilindricheskoj poverhnost'ju iz izluchatelej gorizonta'noj poljarizacii. Chast' 1: Metodika jelektrodinamicheskogo modelirovanija // Antenny. 2016. № 2. S. 3–10. (in Russ.)

#### **Сведения об авторах**

Фаняев И.А., старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.

Кудин В.П., доктор технических д.т.н., доцент, профессор кафедры «Информатика» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

#### **Адрес для корреспонденции**

246019, Республика Беларусь,  
г. Гомель, ул. Советская, д. 104,  
Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины  
тел. +375-44-754-01-57;  
e-mail: fanyaev@gmail.com  
Фаняев Иван Александрович

#### **Information about the authors**

Fanyaev I.A., senior lecturer of department of radiophysics and electronics of Gomel state university named after F. Skaryna.

Kudin V.P., D. Sci., associate professor, professor of the department «Informatics» of Gomel state technical university named after P.O. Suhoj.

#### **Address for correspondence**

246019, Republic of Belarus,  
Gomel, Sovetskaya, 104,  
Gomel state university  
named after F. Skaryna  
tel. + 375-44-754-01-57;  
e-mail: fanyaev@gmail.com  
Fanyaev Ivan Alexandrovich