

УДК 621.396.677

Расширение диаграммы направленности фазированной антенной решетки КА-диапазона

05, май 2012

Михеев В.А.

*Студент,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»*

*Научный руководитель: Овечкин В.С.,
ассистент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства»*

МГТУ им Н.Э. Баумана
miheev.v.a@gmail.com

На современные бортовые радиолокационные системы возлагается решение широкого круга задач, включающих обзор пространства, сопровождение нескольких целей и наведение средств вооружений с учетом помеховой обстановки. Эффективность РЛС в решении указанных задач во многом определяется возможностями антенной системы.

На сегодняшний день наибольшими функциональными возможностями обладают активные фазированные антенные решетки (АФАР), но подобные изделия являются крайне сложными и дорогими, особенно в КВЧ-диапазоне. В силу этого пассивные ФАР применяются значительно шире.

В АФАР формирование ДН осуществляется как фазовым, так и амплитудным распределением возбуждения на излучающем раскрыве. По существу возможности АФАР ограничиваются только размерами раскрыва. В то же время пассивные ФАР работают при неизменяемом амплитудном распределении, что существенно сужает спектр реализуемых форм ДН антенны.

Использование методов фазового синтеза позволяет в какой-то степени скомпенсировать указанный недостаток пассивных ФАР [2] и приблизить их функциональность к функциональности АФАР, но в силу ограниченной вычислительной мощности бортовых систем использовать все возможности фазового синтеза в режиме реального времени не удастся. Поэтому актуальным является разработка методов быстрого фазового синтеза ДН.

Наиболее часто встречающимися задачами являются формирование ДН с расширенным лучом в одной и двух плоскостях для ускорения обзора пространства, а также ДН с низким уровнем в направлении помехи. Последняя из названных задач является более общей, стоит особняком от первых двух и решается специальными методами, основанными, как правило, на минимизации некоторого функционала.

Задача фазового синтеза в общем виде формулируется следующим образом: при заданном амплитудном распределении $(A_1, A_2, \dots, A_N)$ найти фазовое распределение $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N)$, удовлетворяющее следующему условию

$$(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N) = \arg \inf_{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N} \|F_d(u_x, u_y) - F(u_x, u_y)\| \quad (1)$$

где

$F_d(\theta, \varphi)$ - требуемая диаграмма направленности,

$F(\theta, \varphi)$ - диаграмма направленности ФАР,

$u_x = \sin \theta \cos \varphi$, $u_y = \sin \theta \sin \varphi$ - угловые переменные.

Для плоской ФАР с произвольным расположением излучающих элементов [1]

$$F(u_x, u_y) = \sum_{m=1}^N A_m e^{j\varphi_m} e^{-jk(x_m u_x + y_m u_y)} \quad (1)$$

При формировании ДН в заданной плоскости удобным является переход к эквивалентной линейной ФАР. Если интерес представляет ДН ФАР в плоскости то формула (2) может быть переписана в виде

$$F(u) = \sum_{n=0}^{N'} A'_n e^{i(k u x'_n + \varphi'_n)} \quad (2)$$

где A'_n и φ'_n - амплитуда и фаза излучения n-го элемента;

x'_n - координата n-го излучателя;

$u = \cos(\theta)$ - угловая переменная;

Амплитудные коэффициенты $\{A'_n\}$ получены из амплитудных коэффициентов $\{A_n\}$ суммированием величин, соответствующих излучающим элементам с одной координатой x с учетом их фаз. С целью упрощения записи в нижеследующих выкладках для величин, характеризующих эквивалентную линейную ФАР, сохранены прежние обозначения без штриха.

В исходной формулировке метод парциальных веерных диаграмм (МПВД) является приближенным прямым методом расчета фазового распределения для линейной антенной решетки [3]. Рассмотрим эквидистантную линейную решетку, состоящую из N излучающих элементов, расположенных на расстоянии d .

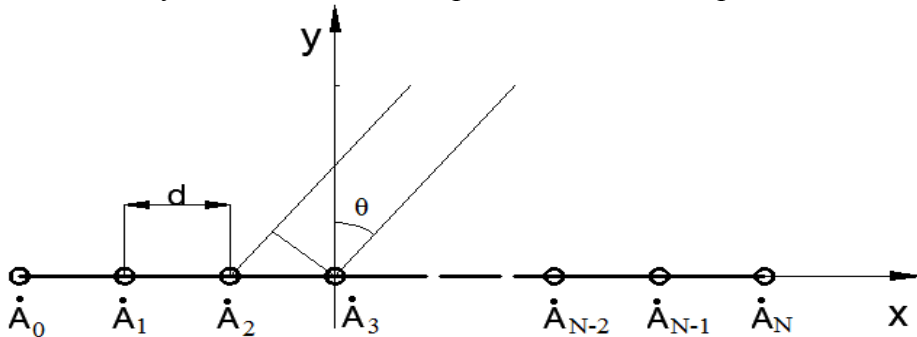


Рис. 1. Линейная эквидистантная фазированная антенная решетка

Суть МПВД становится понятна из следующих математических преобразований

$$\begin{aligned}
\sum_{n=0}^N A_n^g e^{ikux_n} &= \left(A_0^g + \frac{1}{2} A_1^g e^{ikux_1} \right) + \left(\frac{1}{2} A_1^g e^{ikux_1} + \frac{1}{2} A_2^g e^{ikux_2} \right) + \dots \\
&+ \left(\frac{1}{2} A_{N-1}^g e^{ikux_{N-1}} + A_N^g e^{ikux_N} \right) = \\
&= e^{\varphi_0} e^{ikux_0} F_1(u) + e^{\varphi_1} e^{ikux_1} F_2(u) + \dots + e^{\varphi_{N-1}} e^{ikux_{N-1}} F_N(u)
\end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, решетка изотропных излучателей трансформируется в решетку некоторых фиктивных излучателей с амплитудами

$$A_p^{im} = \begin{cases} A_{p-1} + \frac{1}{2} A_p, & p = 1 \\ \frac{1}{2} (A_{p-1} + A_p), & p = 2, \dots, N-1 \\ \frac{1}{2} A_{p-1} + A_p, & p = N \end{cases} \quad (4)$$

и диаграммами направленности

$$F_i(u) = \frac{1}{2} \left(A_{i-1} + A_i e^{i\Delta\varphi_i} e^{ikud} \right), \quad (5)$$

расположенных в узлах сетки (уже неэквидистантной) с координатами

$$x_p^{im} = \frac{A_{p-1}^2 x_{p-1} + A_p^2 x_p}{A_{p-1}^2 + A_p^2}. \quad (6)$$

$F_i(u)$ представляют собой ДН двух изотропных излучателей, расположенных на заданном расстоянии d друг от друга. Максимум $F_i(u)$ соответствует угловому направлению $u_i = -\Delta\varphi_i / kd$.

Основная идея метода парциальных веерных диаграмм заключается в том, что плотность потока мощности поля $F_m^2(u_m) / \Delta u_m$ приравнивается к среднему потоку мощности, соответствующему требуемой ДН

$$\frac{F_m^2(u_m)}{\Delta u_m} = f_{cp}(u_m) \quad (7)$$

Из общего соотношения (5) можно получить соотношение для секторной ДН

$$\Delta u_m = \frac{F_m^2}{F_{m-1}^2} \Delta u_{m-1} \quad (8)$$

Относительные фазовые сдвиги между соседними излучающими элементами определяются по формуле $u_m = -\Delta\varphi_m / kd$. Тогда фаза излучения каждого элемента может быть определена следующим образом

$$\left. \begin{aligned} \varphi_m &= \sum_{i=1}^m \Delta\varphi_i, \quad m > 0 \\ \varphi_0 &= 0, \quad m = 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Достоинством МВПД является гибкость, простота и интуитивная понятность. Он может быть расширен на неэквидистантные ФАР с произвольным амплитудным

распределением. Но данный метод является приближенным, поскольку при расчете не учитывается взаимный фазовый сдвиг между фиктивными излучателями. Тем не менее с его помощью удастся получать в реальных условиях ДН с характеристиками, предельно близкими к заданным.

Проверка результатов синтеза ДН с помощью рассмотренного алгоритма проводилась на макете ФАР. Исследуемый макет антенной системы содержит антенную решетку проходного типа, работающую в Ка-диапазоне волн, состоящую из 640 элементов на основе волноводных ферритовых фазовращателей фарадеевского типа, моноимпульсный облучатель (МИО), систему управления лучом (СУЛ).

Схема стенда для измерения диаграмм направленности макета антенной системы представлены на рисунке 2.

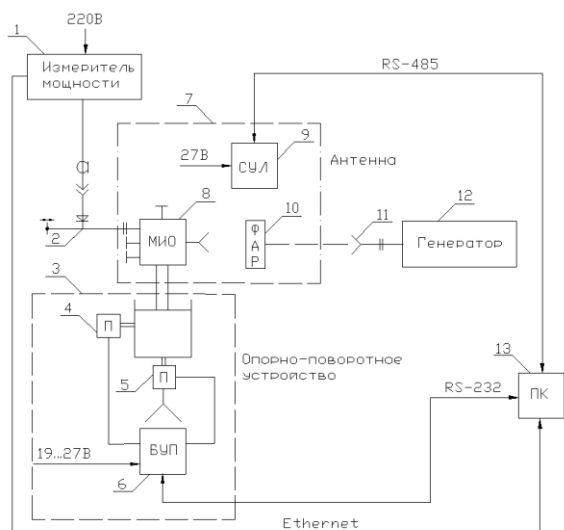


Рис. 2. Схема стенда для измерения диаграмм направленности макета антенной системы

В практической части работы были произведены измерения ДН, формируемых синфазным ФР в раскрыве, и ДН, формируемых распределениями, полученными в результате математического моделирования. Программный аппарат СУЛ позволяет изменять ФР в раскрыве антенной решетки путем загрузки в память фазовых сдвигов, рассчитанных для различных ДН, а также дает возможность переключения между различными ДН в процессе работы системы.

В первом этапе измерений были получены ДН, формируемые синфазным ФР в раскрыве антенной системы, и проведено их сравнение с расчетными ДН при математическом моделировании системы.

В состав стенда входят следующие узлы: 1 – измеритель мощности типа Anritsu-ML4564A; 2 – детекторная секция из комплекта измерителя мощности Anritsu-ML4564A; 3 – опорно-поворотное устройство, в состав которого входят: 4, 5 – приводы и 6 – блок управления приводами (БУП); 7 – исследуемый макет антенной системы, в состав которого входят: 8 – моноимпульсный облучатель, 9 – система управления лучом и 10 – фазированная антенная решетка; 11 – передающий рупор; 12 – генератор Г4-156; 13 – персональный компьютер (ПК).

В практической части работы были произведены измерения ДН, формируемых синфазным ФР в раскрыве, и ДН, формируемых распределениями, полученными в

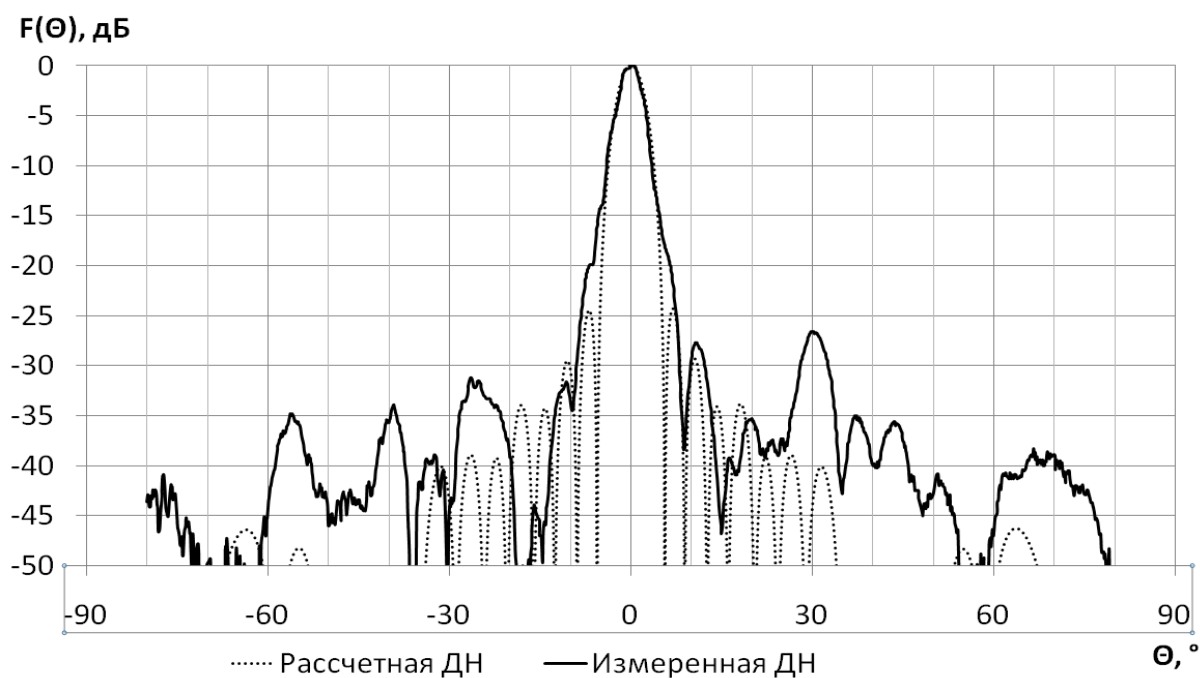


Рис. 3. Сравнение расчетной и измеренной стандартной суммарной диаграммы направленности в азимутальной плоскости

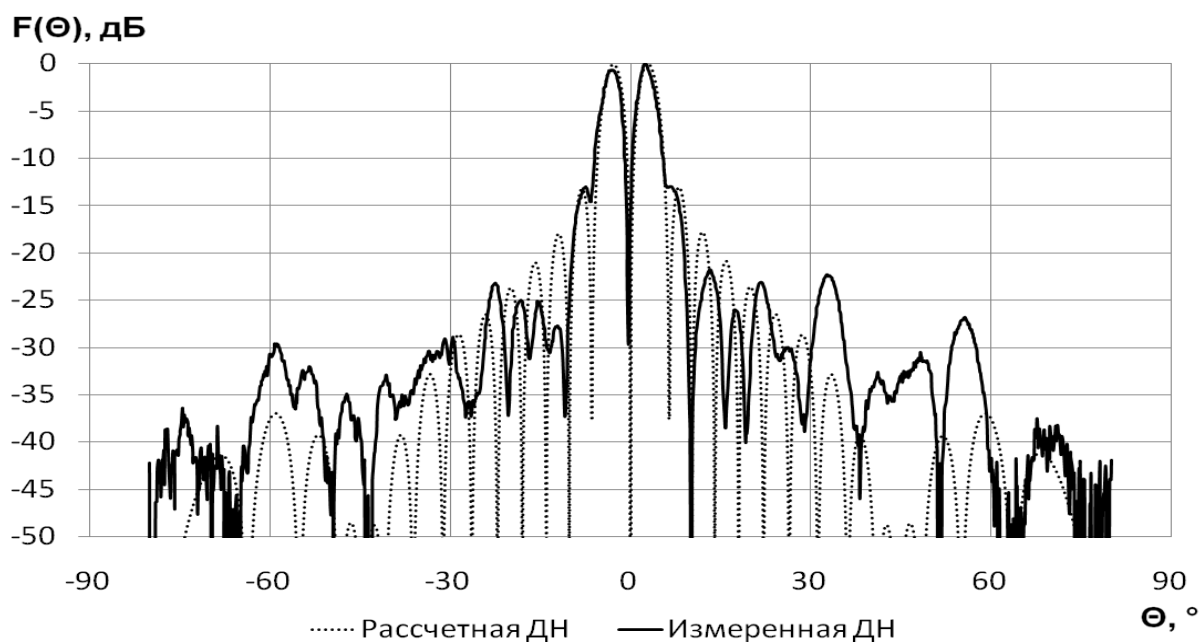


Рис.4. Сравнение расчетной и измеренной стандартной разностной диаграммы направленности в азимутальной плоскости

Полученные ДН близки по характеристикам, в частности: ширина главного лепестка суммарной ДН не превышает 5 градусов (рисунок 3), в измеренной разностной ДН провал составляет менее -25 дБ (рисунок 3), уровень боковых лепестков не более -20дБ (рисунок 3 и 4). Данные значения удовлетворяют требованиям, предъявленным к антенной системе.

На втором этапе измерений, получены расширенные ДН и диаграмма типа « $\text{cosec}^2(\theta)$ ».

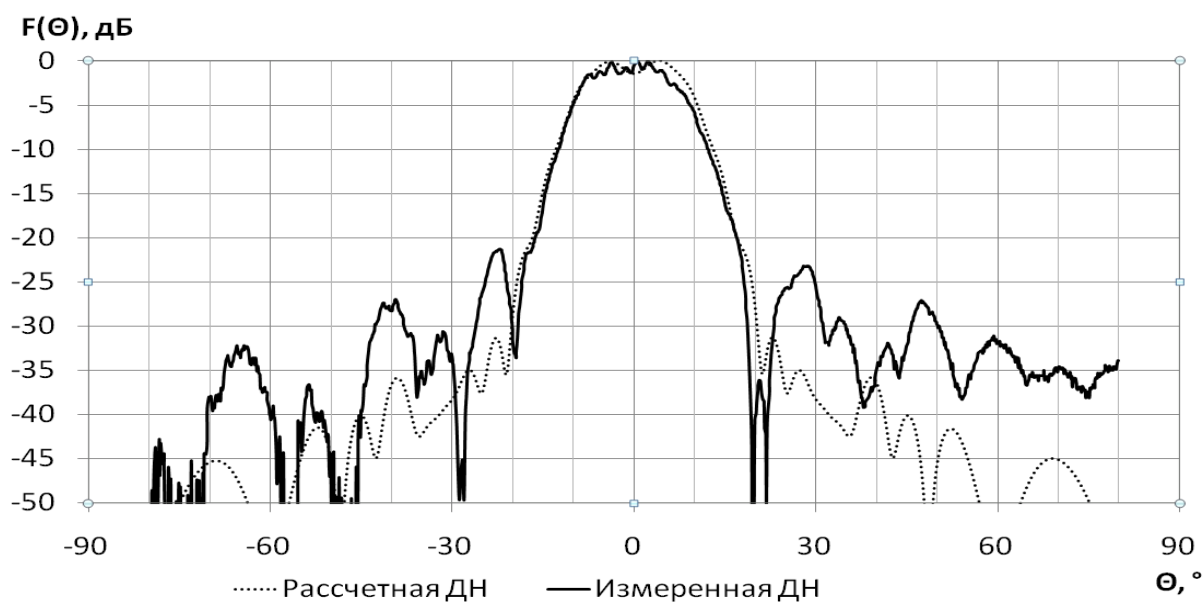


Рис. 5. Сравнение расчетной и измеренной расширенной суммарной диаграммы направленности в азимутальной плоскости

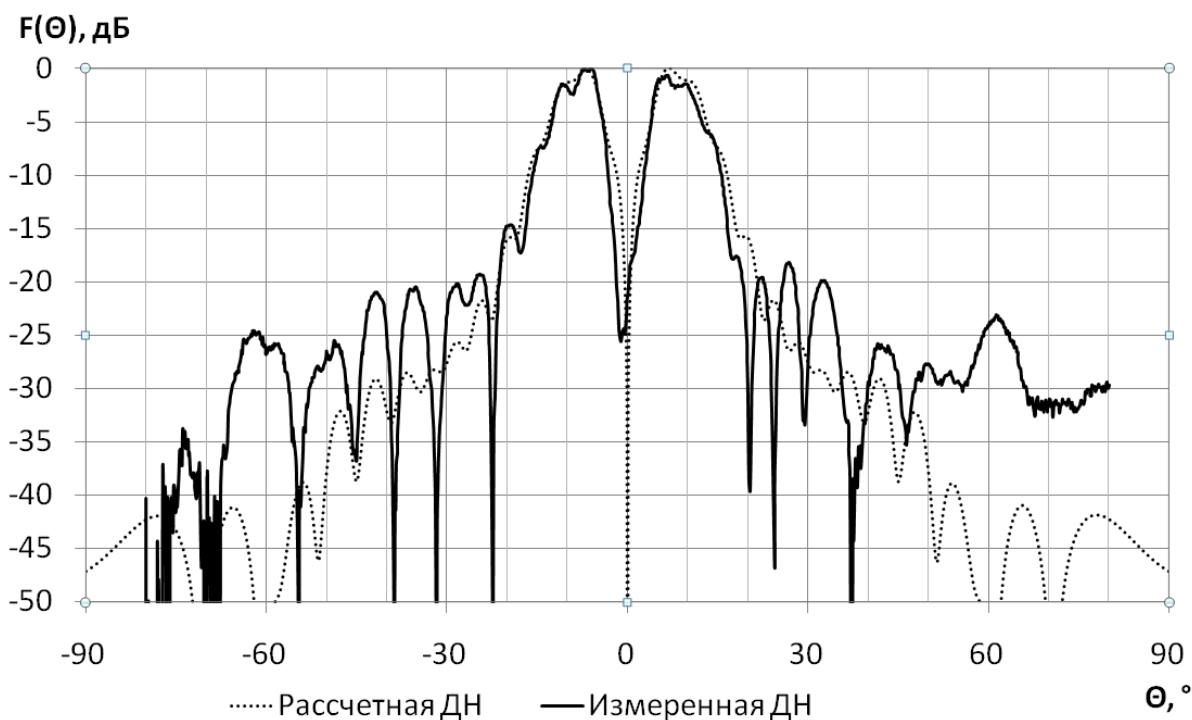


Рис.6. Сравнение расчетной и измеренной расширенной разностной диаграммы направленности в азимутальной плоскости

Полученные результаты показывают достаточное совпадение расчетной ДН и измеренной (рисунок 5 и 6) - уровень боковых лепестков на расширенных диаграммах не превышает -15 дБ, в расширенной разностной ДН не наблюдается значительных колебаний и провалов на возрастающих участках пеленгационной характеристики.

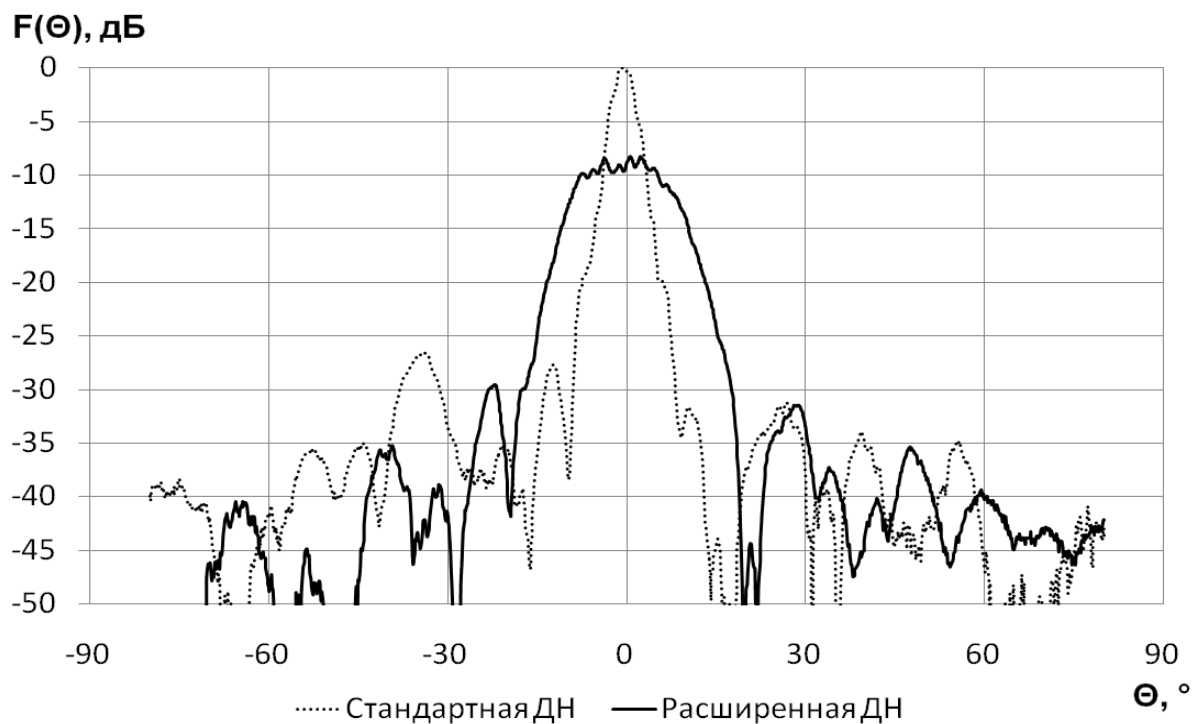


Рис. 7. Сравнение измеренных стандартной и расширенной суммарной диаграммы направленности в азимутальной плоскости

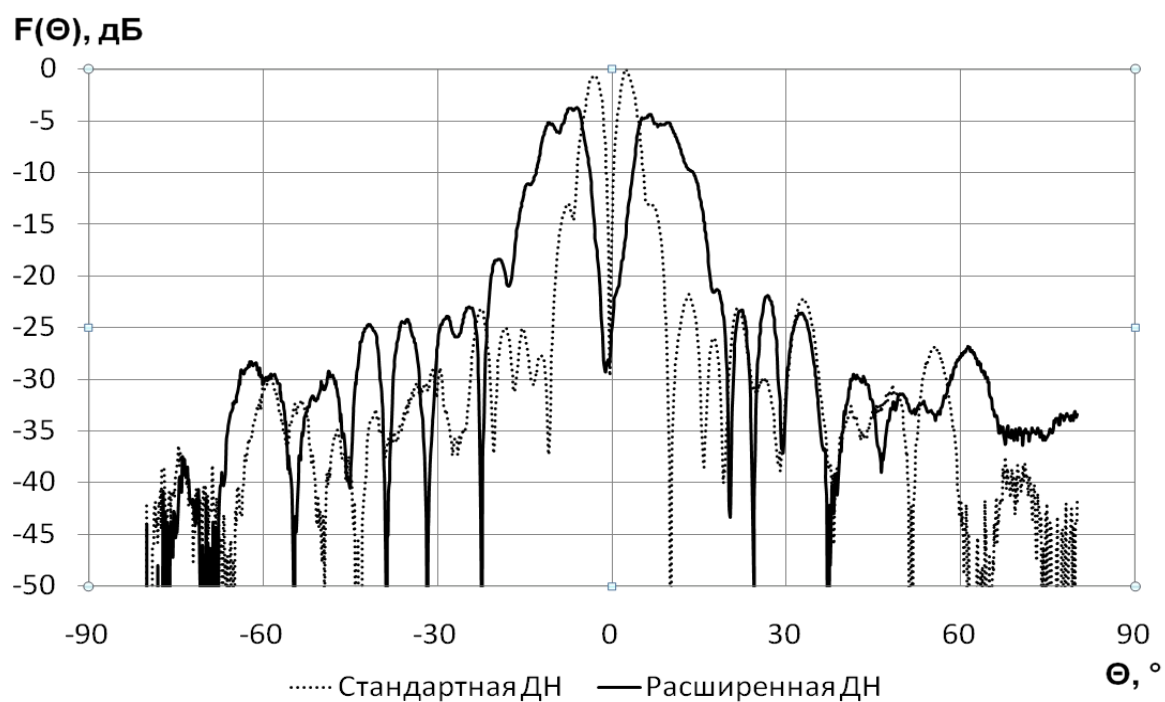


Рис. 8. Сравнение измеренных стандартной и расширенной разностной диаграммы направленности в азимутальной плоскости

Диаграммы направленности, приведенные на рисунках 7 и 8, нормированы по максимальному коэффициенту усиления стандартных ДН, соответственно, по ним

можно определить уменьшение коэффициента усиления ФАР при расширении главного лепестка ДН антенны.

Приведенные выше результаты позволяют сделать следующие выводы:

- описанный алгоритм синтеза специальных форм ДН работоспособен и, несмотря на приближенность, позволяет получать требуемые результаты с приемлемым уровнем вычислительных затрат;

- системы управления лучом, выполненные на современном уровне элементной базы, позволяют реализовывать специальные формы ДН, используя как внесенные в память массивы расчетных фазовых сдвигов, так и производя их расчет во встроенном спецвычислителе;

- реализуемый набор форм ДН позволяет использовать алгоритм и принципы аппаратной реализации СУЛ в широком классе радиолокационных систем различных диапазонов;

- дальнейшим развитием сферы применения алгоритма является получение ДН ФАР с провалами в направлении постановщиков помех.

Список литературы:

1. Антенны. Изд. 2-ое, перераб. и доп. / Марков Г.Т., Сазонов Д.М. // М., «Энергия», 1975. – 528 с.
2. Методы синтеза антенн. Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием / Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. // М.: Сов. Радио, 1980. – 296 с.
3. Грибанов А.Н. Фазовый синтез лучей специальной формы в фазированных антенных решетках бортовых РЛС: Дисс. канд.техн.наук. Москва. 2007. 208 с.