

Особенности формирования пространственной избирательности многоканальной многочастотной линейной антенной решетки при регулярном распределении частот по ее элементам

Е.С. Емельянов

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
394064, Российская Федерация, г. Воронеж
ул. Старых Большевиков, 54а

Уточнены закономерности пространственной избирательности многочастотной линейной антенной решетки с регулярным распределением частот по ее элементам. Получены выражения для расчета пространственных координат максимумов многозначной функции пространственной избирательности таких антенных систем в дальней зоне облучения и приема. Полученные результаты согласуются с результатами проведенного математического моделирования.

Ключевые слова: многочастотная антенная решетка, пространственная избирательность, многоканальная, ММО.

Общей тенденцией развития радиолокационных систем является переход к многоканальным системам с целью повышения объема и качества получаемой радиолокационной информации [1]. В зарубежных изданиях многоканальные радиолокационные системы принято называть ММО¹ РЛС. Отдельным классом ММО РЛС являются РЛС с многоканальными антенными решетками (АР) [1] с совместной апостериорной обработкой результатов измерений (САОРИ) [2]. Такие РЛС – это новое и перспективное направление в радиолокации [1; 2]. Одним из вариантов реализации ММО РЛС САОРИ с неразнесенной антенной является использование многоканальной многочастотной линейной АР. Исследованию пространственной избирательности таких систем посвящены работы [3] и [4]. Полученные в указанных работах результаты позволяют установить общие закономерности формирования пространственной избирательности многочастотной АР. Однако свойства функции пространственной избирательности (ФПИ) [5] многочастотной АР с регулярным расположением узкополосных приемно-передающих элементов (далее – эквидистантной) применительно к наиболее важному с практической точки зрения случаю дальней зоны в этих работах изучены недостаточно.

Целью работы является исследование закономерностей формирования ФПИ линейной эквидистантной многоканальной многочастотной АР. Особенность задачи состоит в том, что аналитический анализ полученных общих достаточно громоздких выражений [4], описывающих ФПИ многочастотной АР, как в дальней зоне, так и в зоне Френеля, затруднителен, а результаты математического моделирования столь многообразны, что по ним невозможно установить какую-либо закономерность проявления пространственной избирательности таких АР. Поэтому в работе введены ограничения на размеры АР и приведен случай дальней зоны облучения и приема.

Рассмотрим линейную АР, расстояние между элементами которой равно d (рис. 1). Каждый элемент изотропно излучает и принимает непрерывные гармонические сигналы на своей фиксированной длине волны λ_n , $n = 1..N$, N – число элементов решетки. Для определенности положим, что $\lambda_{n-1} < \lambda_n$. Элементы решетки расположены на полярной оси. Первый элемент решетки находится в начале полярной системы координат.

Сигналы U_n , излучаемые элементами АР, можно записать в виде

$$U_n = \text{Re} \{ A_n \exp(ik_n R_n) \exp(i\omega_n t) \}, \quad (1)$$

где $k_n = 2\pi / \lambda_n$ – волновое число; A_n – амплитуда; R_n – расстояние до точки наблюдения; t – время; $\omega_n = c / \lambda_n$.

¹ Аббревиатура ММО заимствована из области современных систем связи, расшифровывается как Multiple Input – Multiple Output (много входов – много выходов)

Согласно [3] и [4], многоканальную многочастотную АР апостериори можно сфокусировать в заданную область пространства. Такая фокусировка достигается когерентным весовым суммированием излученных сигналов U_n [4]. Для анализа ФПИ, формирующейся при таком фокусировании, запишем уравнения, описывающее линии равных фаз сигнала, излучаемого n -м элементом АР в фиксированный момент времени $t = 0$. В случае изотропных приемопередающих элементов линии равных фаз в фиксированный момент времени представляют собой окружности с центром в точке расположения элемента АР и радиусами R_n . В полярной системе координат такие уравнения можно записать так:

$$\rho^2 - 2\rho nd \cos(\varphi) + (nd)^2 = \text{const} = R_n^2, \quad (2)$$

где ρ и φ – полярные координаты, $n = 0..N - 1$. Рассмотрим случай, когда АР сфокусирована в точке $P(F, \psi)$ при условии $F \gg d$, $F \gg \lambda_N$, $F > 2(dN)^2/\lambda_0$. Тогда, согласно теореме косинусов (см. рис. 1), с учетом разложения подкоренного выражения в ряд Тейлора (пренебрегая величинами $\sim 1/F^2$) получим:

$$R_n = \sqrt{F^2 + (nd)^2 - 2Fnd \cos(\psi) + m\lambda_n} \approx F - nd \cos(\psi) + m\lambda_n, \quad (3)$$

где m – целое число. Слагаемое $m\lambda_n$ учитывает, что при фокусировке АР в точке $P(F, \psi)$ линии равных фаз для каждого элемента АР представляют собой окружности, радиусы которых отличаются на целое число длин волн. Подставляя (3) в (2), получим:

$$\rho^2 - F^2 - 2nd(\rho \cos(\varphi) - F \cos(\psi)) - 2m\lambda_n(F - nd \cos(\psi)) + (m\lambda_n)^2 = 0. \quad (4)$$

Перепишем (4) с учетом $F \gg d$:

$$\rho \approx F + \frac{nd\rho \cos(\varphi)}{F} - \cos(\psi) + m\lambda_n. \quad (5)$$

После преобразований окончательно получаем уравнение вида

$$\rho = \frac{l}{1 - e \cos(\varphi)}, \quad (6)$$

где $l = F - \cos(\psi) - m\lambda_n$, $e = nd/F$. Как известно, это уравнение задает каноническое сечение, фокусы которого находятся на полярной оси, причем один из них совпадает с началом полярной системы координат [6]. Так как в рассматриваемом случае $nd/F < 1$, то данное уравнение определяет эллипс с фокальным параметром l . Для нахождения максимума ФПИ необходимо ре-

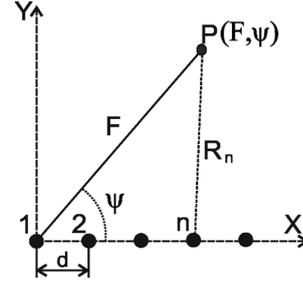


Рис. 1. Геометрия задачи

шить систему уравнений (6). Решения такой системы – точки пересечения эллипсов. При $m = 0$ (6) имеет два решения ($\varphi = \psi$, $\rho = F$) и ($\varphi = -\psi$, $\rho = F$), первое из которых определяет точку фокусировки АР, а второе является следствием изотропной направленности элементов АР и определяет второй зеркальный (относительно полярной оси) фокус АР. Однако т.к. предполагается, что элементы АР излучают непрерывные сигналы, которые существуют во всем пространстве, то в общем случае $m \neq 0$. Далее условимся, что $\varphi \in (0, \pi)$, и рассмотрим частные случаи.

Случай многоканальной², но одночастотной АР $\lambda_n = \lambda_0$, $n = 0..N - 1$ при $\psi = 90^\circ$, тогда получим систему уравнений:

$$\rho = \frac{F - m\lambda_0}{1 - \frac{nd}{F} \cos(\varphi)}, \quad n = 1..N. \quad (7)$$

Такая система имеет решение $\varphi = 90^\circ$ и $\rho = F - m\lambda_0$, m – целое число. Это решение описывает закономерность формирования ФПИ многоканальной одночастотной АР САОРИ, которая представляет собой максимумы интенсивности, отстоящие друг от друга на расстояние λ_0 вдоль направления фокусировки. Такая ФПИ позволяет определить направление и дальность до объекта. Однако дальность определяется с неприемлемой неоднозначностью, и можно считать, что в этом случае ФПИ многоканальной одночастотной АР с САОРИ совпадает с диаграммой направленности узкополосной АР с электронным управлением лучом.

Далее рассмотрим случай, когда $\lambda_n = \lambda_0 + (n - 1)\Delta\lambda$. Тогда необходимо решить систему уравнений:

$$\rho = \frac{F - m(\lambda_0 + n\Delta\lambda)}{1 - \frac{nd}{F} \cos(\varphi)}, \quad n = 1..N. \quad (8)$$

² Многоканальность, например, может быть обеспечена последовательным во времени излучением и приемом сигналов элементами АР.

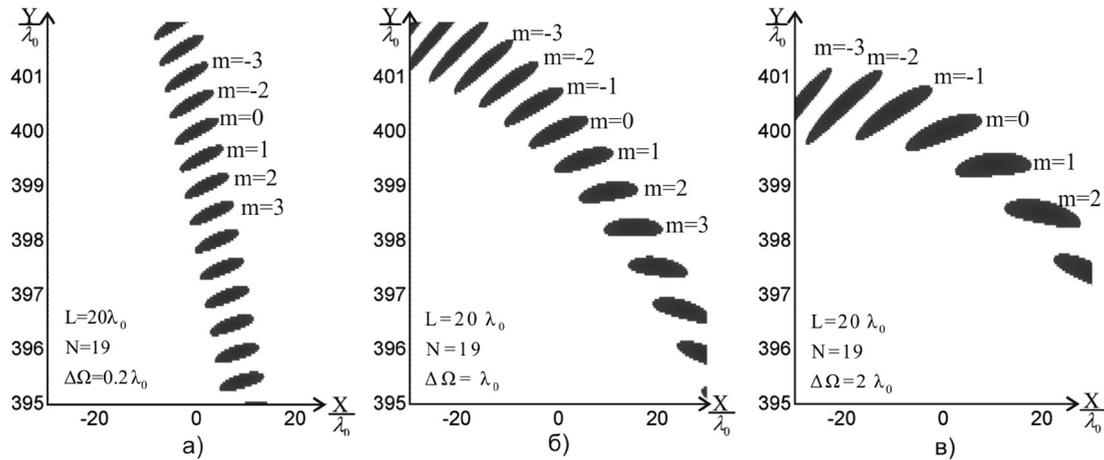


Рис. 2. Сечение ФПИ многочастотной АР на уровне 0.5

Такая система имеет точные решения. Однако удобнее записать их приближенно:

$$\varphi \approx \frac{\pi}{2} - \frac{m\Delta\lambda}{d} \text{ и } \rho = F - m\lambda_0, \quad (9)$$

При $m = 0$ максимум ФПИ совпадает с точкой фокусирования. В случае $m \neq 0$ максимумы ФПИ смещены друг относительно друга по углу и дальности. Если учесть, что $d = L / (N - 1)$, L – длина АР, и $N\Delta\lambda = \lambda_N - \lambda_0 = \Delta\Omega$, можно записать:

$$\varphi \approx \frac{\pi}{2} - m \frac{\Delta\Omega}{L}. \quad (10)$$

Основными параметрами многоканальной АР, определяющими положения максимумов ФПИ в пространстве, являются полоса частот $\Delta\Omega$, длина АР L и минимальная длина волны излучения λ_0 . Полученные результаты были проверены методом математического моделирования. На рис. 2 представлены результаты расчета координат максимумов ФПИ для различных параметров АР на математической модели. Сравнения показали, что отклонение величин рассчитанных на

математической модели и согласно полученным выражениям (9) и (10) незначительны.

Для примера в таблице представлены полярные координаты максимумов ФПИ, рассчитанные по (9) и (10) и полученные по результатам математического моделирования.

Заключение

Полученные выражения для расчета пространственных координат максимумов ФПИ линейных многоканальных многочастотных АР в дальней зоне облучения и приема согласуются с результатами проведенного математического моделирования. Результаты исследований показали, что многочастотная АР при регулярном распределении частот по ее элементам обладает многопиковой ФПИ, причем координаты (угловые и по дальности) у каждого максимума различны. Эта особенность позволяет в системах измерения дальности с многоканальной многочастотной АР однозначно определить не только дальность, но и угловое положение объекта локации.

Таблица

Координаты максимумов ФПИ

m	$\Delta\Omega = 0.2\lambda_0$		$\Delta\Omega = \lambda_0$		$\Delta\Omega = 2\lambda_0$	
	Мат. модель ($\varphi, \rho/\lambda_0$)	Расчет ($\varphi, \rho/\lambda_0$)	Мат. модель ($\varphi, \rho/\lambda_0$)	Расчет ($\varphi, \rho/\lambda_0$)	Мат. модель ($\varphi, \rho/\lambda_0$)	Расчет ($\varphi, \rho/\lambda_0$)
-3	(90,41°, 401.52)	(90,40°, 401.5)	(92,03°, 401.51)	(92,04°, 401.5)	(94,05°, 400)	(94,09°, 401.5)
-2	(90,29°, 401)	(90,27°, 401)	(90,35°, 401.03)	(91,36°, 401)	(92,71°, 400)	(92,73°, 401)
-1	(90,11°, 400.51)	(90,13°, 400.5)	(90,65°, 400.5)	(90,68°, 400,5)	(91,35°, 400,5)	(91,36°, 400,5)
0	(90°, 400)	(90°, 400)	(90°, 400)	(90°, 400)	(90°, 400)	(90°, 400)
1	(89,85°, 399.5)	(89,86°, 399.5)	(89,3°, 399.5)	(89,32°, 399.5)	(88,65°, 399.49)	(88,64°, 399.5)
2	(89,71°, 398.98)	(89,72°, 399)	(88,63°, 400)	(88,64°, 399)	(87,25°, 400)	(87,27°, 399)
3	(89,57°, 398.48)	(89,59°, 398.5)	(87,95°, 400)	(87,95°, 398.5)	(85,92°, 400)	(85,90°, 398.5)

Список литературы

1. Li J., Stoica P. MIMO. Radar Signal Processing. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 445 p.
2. Иванкин Е.Ф., Понькин В.А. Теоретические основы получения и защиты информации об объектах наблюдения. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 448 с.
3. Иванкин А.В., Иванкин Е.Ф., Понькин В.А. Функция пространственной избирательности многоканальной много-частотной радиолокационной системы // Радиотехника. 2012. № 5. С. 84–89.
4. Емельянов Е.С., Иванкин Е.Ф., Понькин В.А. Анализ пространственной избирательности многочастотной линейной антенной решетки // Радиотехника. 2012. № 5. С. 79–83.
5. Емельянов Е.С., Понькин В.А. Оценка параметров функции пространственной избирательности сфокусированных сферических антенн // Радиотехника. 2007. № 7. С. 87–91.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / под ред. И.Г. Абрамовича. М.: Наука, 1978. 831 с.

Features of the formation of multi-channel spatial selectivity of multi-frequency linear array with regular frequency allocation to its elements

E.S. Emelyanov

Refined patterns of spatial selectivity multifrequency linear array with a regular frequency distribution from its elements. The expressions for the calculation of spatial coordinates of the maxima multi-valued function of the spatial selectivity of the antenna systems in the far field radiation and reception. These results are consistent with the results of mathematical modeling.

Keywords: multi-frequency antenna array, the spatial selectivity of, multi-channel, MIMO.
