

УДК 621.396

# Выбор оптимальной конфигурации антенной решетки, размещаемой на мачте, в мобильном комплексе пеленгования ОВЧ-УВЧ-диапазонов (20–3000 МГц)

А. В. Дубровин

Предложена методика выбора оптимальной конфигурации восьмизлементной антенной решетки, размещаемой на мачте, для комплекса пеленгования ОВЧ-УВЧ-диапазонов при наличии конструктивных, технологических, массогабаритных и электромагнитных ограничений; предложена конфигурация антенной решетки, имеющей наилучшие показатели с точки зрения получения наивысшей точности пеленгования при минимальном уровне боковых лепестков функции правдоподобия (диаграммы направленности).

The technique of a choice of an optimum configuration by the eight-level array antenna placed on a mast, for a direction finding complex of VHF-UHF ranges is offered at presence constructive, technological, overall dimensions and electromagnetic restrictions. The configuration of the array antenna, having the best parameters from the point of view of reception of the best accuracy of direction finding at a minimum level of lateral petals of likelihood function (the diagram of an orientation) is offered.

**Введение.** В настоящее время существуют решения, позволяющие создавать комплексы определения координат источников радиоизлучений, использующих оптимальные одноэтапные процедуры [1]. В то же время в общей задаче местоопределения есть масса частных вопросов, требующих серьезного анализа на базе полученных теоретических результатов. Проблема определения опти-

мальной конфигурации антенной решетки (АР) является одной из таких задач. На выбор конфигурации АР большое влияние оказывают пространственные ограничения, связанные с конструктивными, массогабаритными, технологическими, электромагнитными и другими требованиями. Разработчик аппаратуры, как правило, связан взаимоисключающими требованиями. Чтобы иметь высокую точность, необходимо увеличивать геометрические размеры АР. При этом возрастают массогабаритные показатели, что изменяет требования к несущим способностям мачты. На сегодняшний день серийно выпускаемые в России мачты, пригодные для использования в мобильных комплексах, способны поднимать вес в районе 30–40 кг на высоту до 15 м. Помимо этого, увеличение размеров АР при фиксированном числе антенн в ней ведет к росту боковых лепестков диаграммы направленности (ДН). Необходимо также принимать во внимание наличие технологической оснастки, станочного парка, квалификацию специалистов, занятых непосредственным изготовлением. Если учесть еще и такие параметры как парусность, жесткость всей конструкции, то реально можно говорить об АР, размещаемой в пределах круга, диаметром около 2 м.

Цель данной работы – выбор оптимальной конфигурации АР при наличии конструктивных, массогабаритных, технологических, электромагнитных и других требований.

Рассмотрим АР, состоящую из восьми антенн, имеющих круговые ДН в азимутальной плоскости. Для перекрытия столь широкого

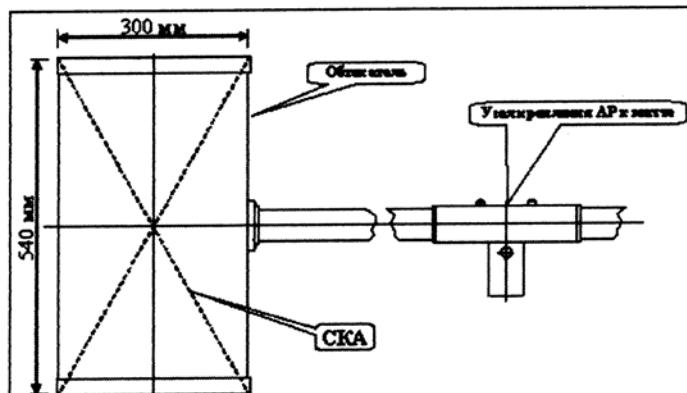


Рис. 1. Габаритный чертеж АР (вид сбоку)

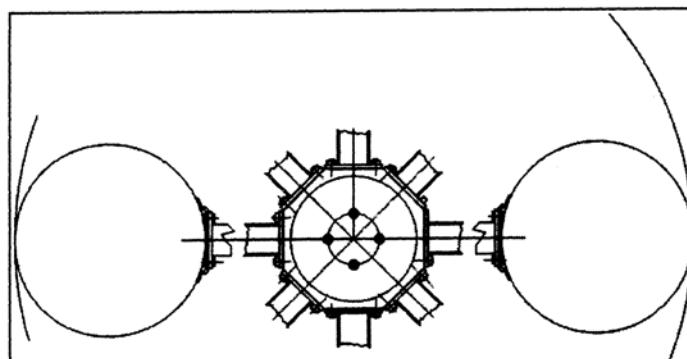


Рис. 2. Габаритный чертеж АР (вид сверху)

диапазона (20–3000 МГц) были выбраны симметричные конусные антенны (СКА). Габаритный чертеж СКА с обтекателем и узлом крепления к мачте представлен на рис. 1, а вид сверху данной конструкции – на рис. 2. Как видно из рис. 2, узел крепления к мачте представляет собой восьмигранник, к которому крепятся фланцами восемь труб. Расстояния между ними должны превышать их геометрические размеры для исключения взаимного влияния антенн друг на друга. Данное обстоятельство предопределяет диаметр АР – ориентировано 2 м. Если длины труб сделать одинаковыми, то получим регулярную круговую АР.

Для частот верхней части УВЧ-диапазона получить однозначный пеленг с такой конфигурацией нельзя. В то же время, если расстояния от центра до антенн сделать неодинаковыми, то появляется возможность разрешения неоднозначности, которая обусловлена тем, что в процессе измерения пеленга по максимуму функции правдоподобия (ФП) в измерениях участвуют не только разности фаз между сигналами, принятymi разными антеннами, но и все возможные фазовые комбинации (разности разностей фаз, разности разностей разностей фаз и т. д.).

Для решения задачи однозначного измерения пеленга необходимо провести анализ ФП для разных направлений прихода сигнала. Соотношение уровня основного лепестка к максимальному боковому будем считать основным показателем оптимальности выбранной конфигурации АР.

**Выбор правила оценки оптимальности конфигурации АР.** Комплекс пеленгования представляет собой частный случай узкобазовой подсистемы (УП), рассмотренной в [1]. Основой для измерения пеленга  $\alpha$  является ФП (формула (23) в [1]). В нашем случае ФП будет рассматриваться для угла места  $\beta=0$ .

Для удобства анализа представим формулу (23) работы [1] в виде

$$L(\alpha) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ T_h \ln \left( 1 + \sum_{m=1}^M q_m(f) \right) + L_1^2(\alpha) \right\} df, \quad (1)$$

где  $q_m(f) = \frac{aG_s(f)}{G_{\xi_m}(f)}$  – отношение сигнал/шум в  $m$ -м канале;  $G_s(f)$  – спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала;  $G_{\xi_m}(f)$  – СПМ шума;  $L_1(\alpha) = \left| \sum_{m=1}^M U_m(f) \exp(i2\pi f_0 \tau_m^\phi(\alpha)) \right|$  – функция диаграммы направленности АР;  $U_m(f) = W_m(f) / U_m(f)$ ;  $W_m(f) =$

$$= \frac{1}{G_{\xi_m}(f)} \sqrt{\frac{aG_s(f)}{1 + \sum_{m=1}^M q_m(f)}} \quad - \text{частотная характеристика}$$

входного фильтра в  $m$ -м канале;  $U_m(f)$  – сигнал, принятый  $m$ -м каналом;  $a$  – амплитуда принимаемого сигнала;  $M$  – общее число антенн в АР;  $\tau_m^\phi(\alpha) = (1/c) [(X_m - X_1) \cos(\alpha) + (Y_m - Y_1) \sin(\alpha)]$ ;  $X_m, Y_m$  – координаты  $m$ -й антенны;  $c$  – скорость распространения сигнала.

Как видно из (1) функция правдоподобия включает в себя квадрат ДН. Анализ АР можно проводить как на основе ФП, так и на основе ДН. Выберем вариант с диаграммой направленности. Для конкретизации ДН сделаем ряд упрощений. Предположим, что шумы отсутствуют, а принимаемый сигнал является гармоническим. Тогда после прохождения через входной фильтр его можно представить в частотной области как дельта-функцию с единичной площадью. В этом случае диаграмма направленности примет вид

$$L_1(\alpha, \alpha_{изл}, f_0) = \left| \sum_{m=1}^M \exp(i2\pi f_0 (\tau_m^\phi(\alpha) - \tau_m^\phi(\alpha_{изл}))) \right|, \quad (2)$$

где  $\alpha_{изл}$  – направление на излучатель;  $\alpha$  – угол в азимутальной плоскости.

На основании (2) сложно подобрать нужную конфигурацию АР, поскольку уровень максимального бокового лепестка в ДН зависит от  $\alpha_{изл}$  и центральной частоты сигнала  $f_0$ .

Чтобы исключить зависимость (2) от  $\alpha_{изл}$  сделаем следующее. Рассчитаем уровни ДН в зависимости от  $\alpha$  для всех возможных  $\alpha_{изл}$ .

Чтобы можно было сравнивать полученные ДН сместим каждую из них на величину  $\alpha_{изл}$ , т.е. сделаем замену  $L_1(\alpha, \alpha_{изл}, f_0) \rightarrow L_1(\alpha - \alpha_{изл}, \alpha_{изл}, f_0)$ . Тогда каждая ДН будет иметь максимум, равный  $M$ , при  $\alpha - \alpha_{изл} = 0$ . Значения диаграммы направленности для  $\alpha - \alpha_{изл} \neq 0$  будут разными.

Если вычислить ДН для всех возможных  $\alpha_{изл}$  и  $f_0$ , получим трехмерную матрицу размером  $N \times N_{изл} \times N_f$ , где  $N$ ,  $N_{изл}$  и  $N_f$  – соответственно числа дискретных значений  $\alpha$ ,  $\alpha_{изл}$  и  $f_0$ , определяемые диапазонами и шагами сканирования. Для  $\alpha$  и  $\alpha_{изл}$  диапазон сканирования – 0–359°. Шаг сканирования для выбранных условий целесообразно взять равным 0,5°. Просматривать частоты достаточно в УВЧ-диапазоне (300–3000 МГц), т.е. там, где длина волн меньше геометрических размеров решетки. Дискретность перебора по частоте, учитывая

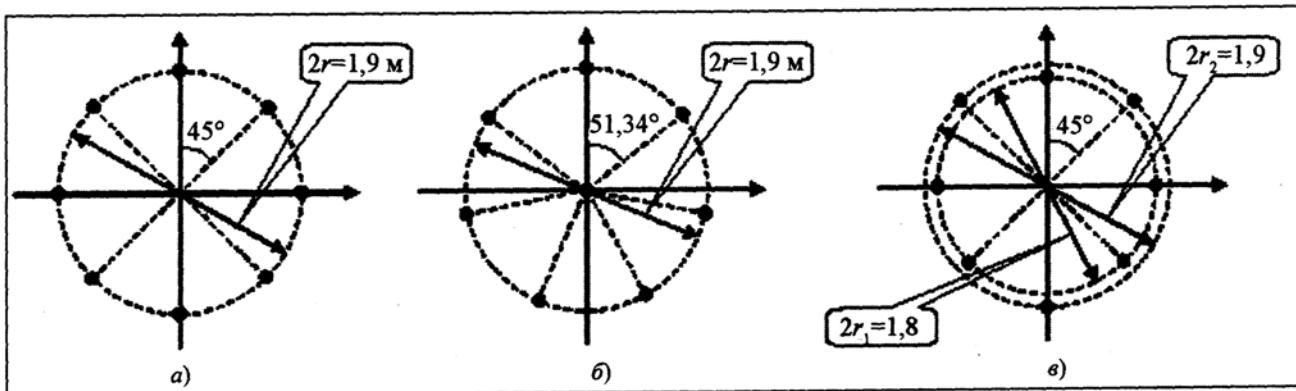


Рис. 3. Конфигурации АР: а – АР с равномерным расположением восьми антенн по кругу; б – АР с равномерным расположением семи антенн по кругу с наличием центральной антенны; в – АР с псевдоравномерным расположением антенн по кругу

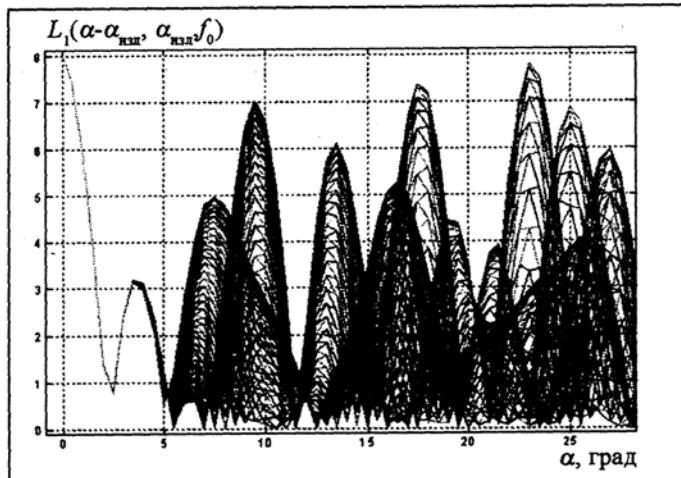


Рис. 4. Графики зависимости ДН от угла  $\alpha$ , приведенные для различных значений  $\alpha_{\text{изл}}$  при фиксированном значении частоты  $f_0$

вый большой объем вычислений по угловым координатам, можно взять равной 100 МГц.

Для того чтобы представить себе возможные пути по оптимизации конфигурации АР, рассмотрим для начала заведомо худший с точки зрения разрешения неоднозначности случай с равномерной кольцевой АР (рис. 3,а). В этом случае все антенны равноудалены от центра на расстояние  $r = 0,95$  м. На рис. 4 представлены наложенные друг на друга зависимости  $L_1(\alpha - \alpha_{\text{изл}}, \alpha_{\text{изл}}, f_0)$  для  $\alpha_{\text{изл}} = 0, 0,5, \dots, 360^\circ$  и  $f_0 = 3$  ГГц. Логично предложить для каждого значения  $\alpha$  выбирать максимальное значение  $L_1$ .

Помимо перебора по  $\alpha_{\text{изл}}$  необходимо также организовать и перебор по  $f_0$ . В итоге получим функцию

$$L_{\max}(\alpha) = \max_{\substack{\alpha_{\text{изл}} \in [0, 360^\circ] \\ f_0 \in [0,3; 3\Gamma\text{Гц}]}} \left| \sum_{m=1}^M \exp(i2\pi f_0(r_m^\theta(\alpha - \alpha_{\text{изл}}) - r_m^\theta(\alpha_{\text{изл}}))) \right|. \quad (3)$$

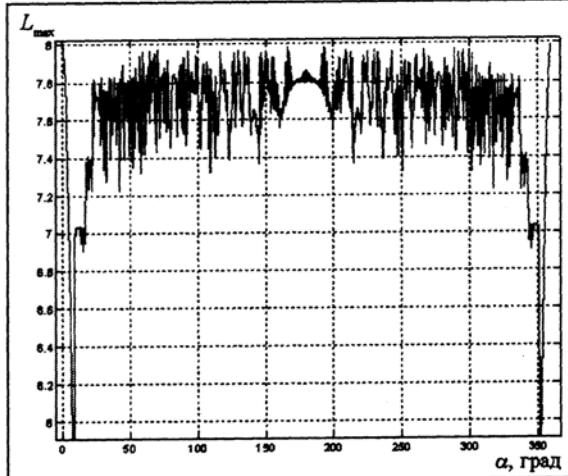


Рис. 5. График максимальных значений ДН в зависимости от угла в азимутальной плоскости  $\alpha$  для АР (рис. 3,а)

На рис. 5 представлена функция  $L_{\max}(\alpha)$  для равномерной АР. Ее вид напоминает случайный процесс со средним значением 7,7 и большим числом максимальных боковых лепестков с уровнем  $L_{\max} = 8$  (т. е. на уровне основного лепестка).

В противовес «плохой» конфигурации рассмотрим восьмизлементную АР, хорошо зарекомендовавшую себя на практике для случаев, когда разработчик не связан так жестко проблемами реализуемости конструкции, как в рассматриваемом случае с мачтой. Подобного рода АР можно применять при ее размещении на плоской поверхности, например, на крыше автомобиля.

Предлагаемая к рассмотрению АР включает в себя семь антенн, расположенных по кругу (с радиусом 0,95 м), и одну antennу в центре (см. рис. 3,б). На рис. 6 представлена функция  $L_{\max}(\alpha)$  для предлагаемой АР. Данная конфигурация антенной решетки позволяет уменьшить уровень максимальных боковых лепестков до границы  $L_{\max} = 7,4$  (92,5% от уровня основного лепестка).

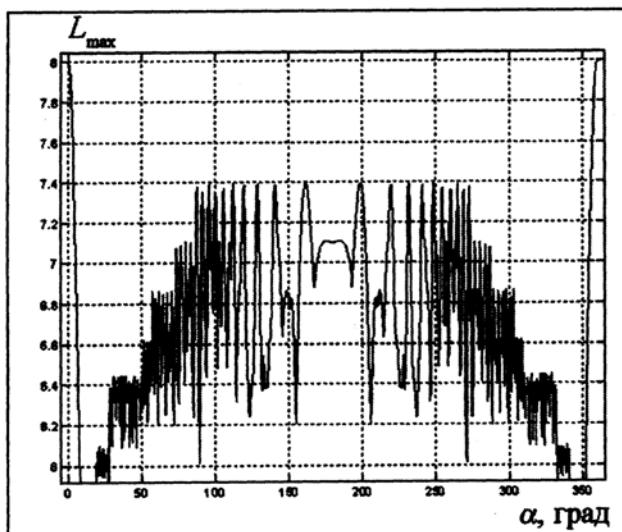


Рис. 6. График максимальных значений ДН в зависимости от угла в азимутальной плоскости  $\alpha$  для АР (рис. 3,б)

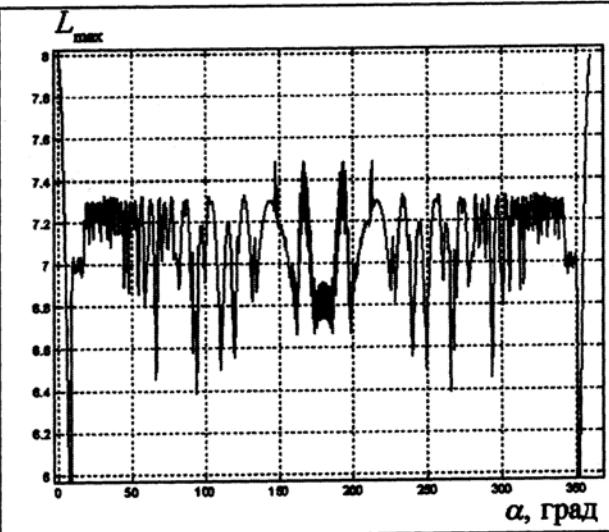


Рис. 7. максимальных значений ДН в зависимости от угла в азимутальной плоскости  $\alpha$  для АР (рис. 3,б)

Путем длительного анализа, основываясь на инженерном опыте конструктивных ограничений, связанных с размещением АР на мачте, была получена конфигурация, представленная на рис. 3,б. Предлагаемая решетка состоит из двух колец антенн с радиусами  $r_1=0,9$  и  $r_2=0,95$  м. Малое кольцо включает в себя пять антенн, большое – три. На рис. 7 представлена функция  $L_{\max}(\alpha)$  для предложенной АР. Как видим, здесь есть некоторое увеличение максимальных боковых лепестков по отношению к «хорошой» конфигурации, представленной на рис. 3,б. Здесь максимальные боковые лепестки доходят до уровня  $L_{\max}=7,49$  (93,6% от основного лепестка). В то же время основная масса боковых лепестков не превышает уровень

$L_{\max}=7,3$  (91,3%), что несколько ниже, чем у АР, представленной на рис. 3,б.

- В представленной работе получена конфигурация АР, которая по своим характеристикам хорошо подходит для решения задачи ее размещения на мачте. Полученные решения показали свою совместимость с удобством в изготовлении и монтаже, а также хорошие эксплуатационные показатели.

#### Литература

1. Дубровин А.В., Сосулин Ю.Г. Одноэтапное оценивание местоположения источника радионизлучения пассивной системой, состоящей из узкобазовых подсистем. – Радиотехника и электроника, 2004, т. 49, № 2, с. 156–170.

Поступила 20 мая 2005 г.

Дубровин Александр Викторович (1962 г.р.) – канд. техн. наук, ген. директор ЗАО «РадиоТН». Область научных интересов: пассивные системы радиолокации.