

УДК 621.396.677.31

В.Ю. Куприц, А.А. Мещеряков, Г.С. Шарыгин

## Моделирование характеристик направленности антенных решеток с элементами Вивальди на наземных трассах

Рассмотрены изменения характеристик направленности антенной решетки с элементами Вивальди в условиях работы на наземных трассах. Для сравнения рассмотрены характеристики квадратных гребенчатых рупорных антенн в тех же условиях и с такой же апертурой. Приведены расчетные и экспериментальные характеристики антенн и созданных на их основе пеленгаторов в сантиметровом диапазоне частот.

**Ключевые слова:** антенна Вивальди, антенная решетка, широкополосность, наземные трассы распространения радиоволн.

Перспективность применения антенных решеток (АР) для различных радиотехнических систем была отмечена уже в 60–70-х гг. прошлого века. В настоящее время благодаря применению современных СВЧ-материалов и использованию цифровых диаграммообразующих схем преимущества АР стали очевидны.

Для повышения эффективности работы пассивных радиолокационных систем (ПРЛС) необходимо учитывать искажения поля в раскрыве приемной антенны, связанные с условиями распространения радиоволн на наземных трассах. Изменение формы диаграммы направленности (ДН) АР, возникающие в результате искажения поля, могут существенно влиять на характеристики ПРЛС, например увеличить ошибку пеленгования. Влияние этих искажений на характеристики направленности антенной решетки рассматривается в настоящей статье. Путем моделирования оцениваются ожидаемые ошибки пеленгования источника радиоизлучения (ИРИ) равносигнальным методом [1].

В условиях реальных наземных трасс амплитудно-фазовое распределение поля в раскрыве приемной антенны имеет значительную долю случайной составляющей, связанной с наличием переотражающих объектов на трассе и их случайным расположением. Переотражающими объектами могут быть как местные предметы вблизи трассы, так и рельеф подстилающей поверхности [2].

Зависимость уровня сигнала на выходе приемной антенны от угла ее поворота на реальной трассе будем в дальнейшем называть реализацией кажущейся диаграммы направленности (КДН) приемной антенны [3], которая может существенно отличаться от ее диаграммы направленности, измеренной в безэховой камере.

Для исследования изменений КДН была разработана модель трассы с использованием методики, описанной в [4]. В предложенной модели реальные переотражатели представлены точечными элементами, имеющими диаграмму переизлучения со случайными параметрами. Схема моделирования поясняется на рис. 1.

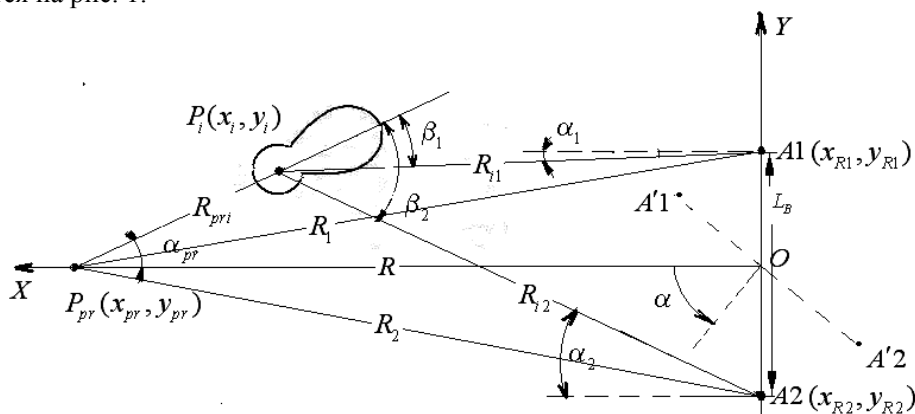


Рис. 1. Геометрия трассы в азимутальной плоскости:  $P_{pr}(x_{pr}, y_{pr})$  – передатчик;  $P_i(x_i, y_i)$  –  $i$ -й переотражатель;  $A1(x_{R1}, y_{R1})$ ,  $A2(x_{R2}, y_{R2})$  – приемные антенны

Две приемные антенны пеленгатора разнесены в азимутальной плоскости  $XOY$  на расстояние  $L_B$  – базу пеленгатора, образуемую из-за реальных размеров антенн. Центр базы расположен в начале координат, а ось  $OX$  направлена на источник. Максимумы ДН антенн имеют отклонение от оси  $OX$  на некоторый угол для реализации равносигнального амплитудного метода пеленгования.

Реализации КДН антенн получены в процессе имитации вращения базы пеленгатора относительно центра (точки  $O$ ) в секторе  $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  ( $\alpha$  – угол между перпендикуляром к базе и осью  $OX$  – направлением на источник).

В качестве приемных использовались антенны двух типов с одинаковой апертурой: АР из элементов Вивальди [5] и квадратный гребенчатый рупор [6], внешний вид которых показан на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Внешний вид антенной решетки с элементами Вивальди

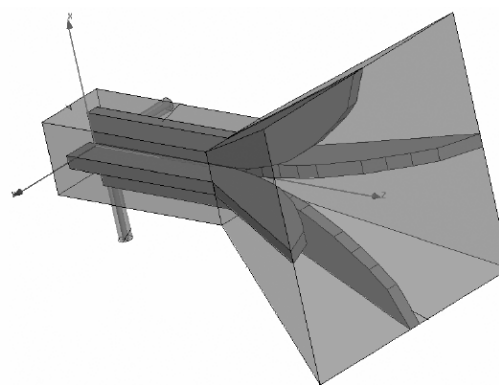


Рис. 3. Общий вид квадратной гребенчатой рупорной антенны

Моделировались два режима излучения:

– наведенный режим, когда максимум ДН антенны источника был направлен на центр базы приемной антенной системы;

– режим сканирования антенны источника от направления на центр базы пеленгатора в секторе  $-90^\circ \leq \alpha_{pr} \leq 90^\circ$ . В этом режиме направление максимума ДН передающей антенны задавалось случайно с равномерным распределением в указанном секторе и оставалось неизменным в процессе имитации измерения реализации КДН обеих антенн.

Сигнал в приемной антенне представлен суммой комплексных составляющих регулярной  $\dot{E}_p$  и рассеянных  $\dot{E}_{ci}$  компонент поля:

$$\dot{E}(\alpha) = \dot{E}_p(\alpha) + \sum_{i=1}^N \dot{E}_{ci}(\alpha), \quad (1)$$

или

$$\dot{E}(\alpha) = A_p(\alpha)e^{j\varphi_0} + \sum_{i=1}^N A_{ci}(\alpha)e^{j(\varphi_0 + \varphi_i(\alpha))}, \quad (2)$$

где  $N$  – число отражателей;  $A_p$  и  $\varphi_0$  – амплитуда и начальная фаза регулярной составляющей сигнала;  $A_{ci}$  и  $\varphi_i(\alpha)$  – случайные амплитуда и фаза сигнала от  $i$ -го отражателя.

Регулярная составляющая сигнала в антеннах А1 и А2 может быть представлена в виде [4]

$$\dot{E}_{pk}(\alpha) = A_p F_{ak}(\alpha) e^{j(\varphi_0 + \Delta\varphi_{smk}(\alpha))}, \quad (3)$$

где  $F_{ak}(\alpha)$  – ДН каждой из антенн системы в свободном пространстве;  $\Delta\varphi_{smk}(\alpha)$  – дополнительный набег фаз принятых каждой антенной сигналов за счет поворота базы пеленгатора.

Рассеянная случайная составляющая сигнала  $i$ -го отражателя в приемных антеннах А1 и А2 может быть представлена в виде

$$\dot{E}_{cik}(\alpha) = A_{ci} F_{pr}(\alpha_{pr}) S_0 F_{ni}(\beta_k) F_{ak}(\alpha_k) e^{j(\varphi_0 + \varphi_{ki}(\alpha) + \Delta\varphi_{smk}(\alpha))}, \quad (4)$$

где  $F_{ap}(\alpha_{ap})$  – ДН передающей антенны:

$$F_{ap}(\alpha_{ap}) = \frac{\sin k_p \alpha_{ap}}{k_p \alpha_{ap}}, \quad (5)$$

$$k_p = 2,81/\theta_{0,5pr}; \quad (6)$$

$F_{n1i}(\beta_1)$  и  $F_{n2i}(\beta_2)$  – диаграммы переизлучения  $i$ -го отражателя:

$$F_{n1i}(\beta_1) = \left( \frac{S_p + e^{-k_n \beta_1^2}}{1 + S_p} \right), \quad F_{n2i}(\beta_2) = \left( \frac{S_p + e^{-k_n \beta_2^2}}{1 + S_p} \right), \quad (7)$$

где  $k_n = 1,39/\theta_{0,5i}$ ;  $\theta_{0,5pr}$  – ширина ДН передающей антенны по половинной мощности;  $\theta_{0,5i}$  – ширина диаграммы переизлучения по половинной мощности;  $S_0$  – коэффициент ослабления переизлученного сигнала от  $i$ -го отражателя в максимуме диаграммы переотражения по отношению к регулярному сигналу;  $S_p$  – коэффициент (характеристика) пьедестала, отражающий уровень бокового и обратного переизлучения по отношению к максимуму главного лепестка диаграммы переизлучения.

Углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  определяются из геометрических соотношений (см. рис. 1), а параметры  $\theta_{0,5i}$ ,  $S_0$ ,  $S_p$  являются случайными величинами с равномерным законом распределения.

В результате моделирования в обоих режимах излучения были получены ансамбли реализаций КДН двух АР из элементов Вивальди и ансамбли КДН двух квадратных гребенчатых рупорных антенн (ГРА). При моделировании максимум ДН первой и второй АР и соответственно первой и второй ГРА имели отклонение на угол  $15^\circ$  относительно оси  $OX$  (см. рис. 1). В качестве примера на рис. 4 показан результат усреднения ансамбля по 1000 реализациям КДН в наведенном режиме излучения при частоте сигнала 10 ГГц.

Адекватность модели реальным условиям на трассе проверялась сравнением модельных и экспериментально полученных КДН антенн в летнее время года на трассе протяженностью 23,7 км на среднепересеченной местности с растительностью в виде отдельных лесных массивов и кустарников.

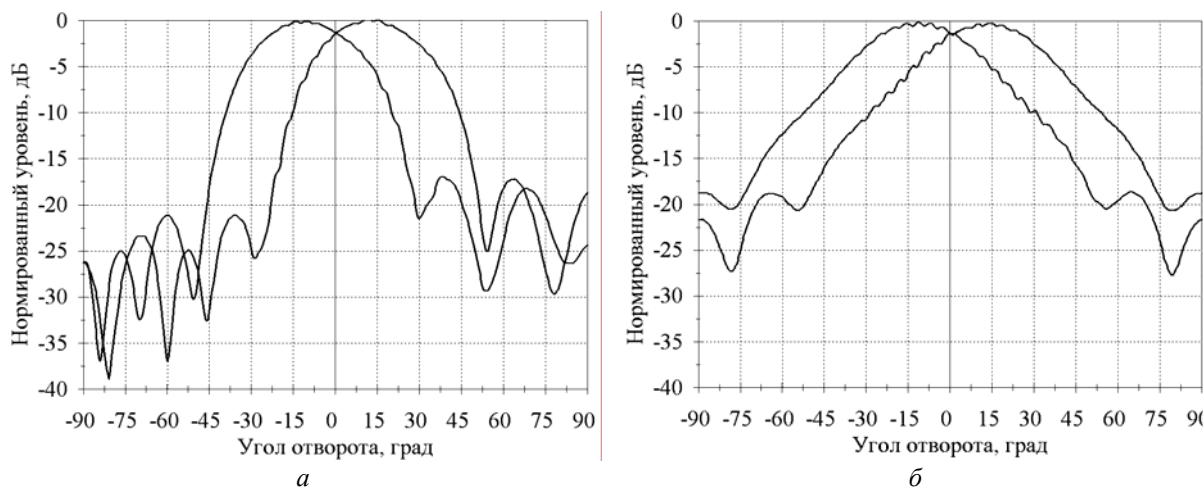


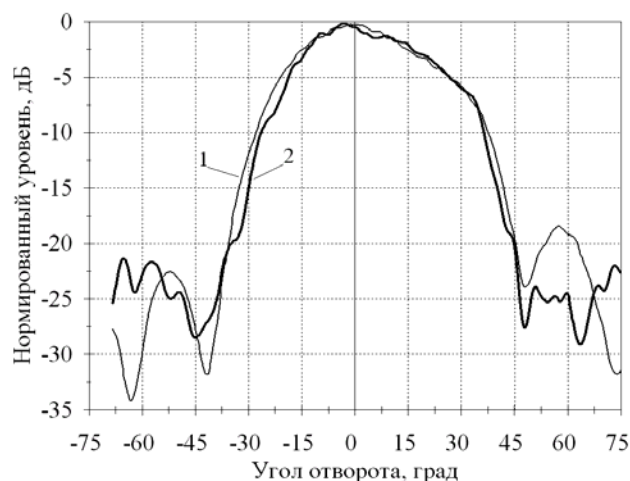
Рис. 4. Усредненные КДН приемных антенных систем с АР (а) и квадратными рупорами (б)

На рис. 5 приведен пример сравнения модельной (кривая 1) и полученной экспериментально (кривая 2) КДН АР с элементами Вивальди на частоте 10 ГГц.

Результаты моделирования влияния трассы на характеристики направленности антенных систем использовались для оценки ошибки пеленгования моноимпульсным равноточным методом пеленгования, с использованием АР на элементах Вивальди и квадратных гребенчатых рупорных антенн.

Были получены значения СКО пеленга по ансамблю КДН на разных частотах сигнала. Оценки СКО приведены в таблице.

Рис. 5. Нормированные модельная (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) КДН АР с элементами Вивальди



**СКО пеленга амплитудного пеленгатора**

Частота сигнала, ГГц	Тип режима работы передающей антенны	Линейный участок ПХ, град	СКО пеленга, град	
			АР с элементами Вивальди	Квадратные рупоры
10	Наведенный	30	0,86	0,88
10	Сканирующий	30	1,97	2,55
18	Наведенный	15	0,18	0,21
18	Сканирующий	15	1,07	1,66

Из таблицы видно, что в наведенном режиме СКО пеленга на различных частотах амплитудным пеленгатором с АР из элементов Вивальди и с рупорными антеннами примерно совпадают, а в сканирующем режиме излучения в случае применения элементов Вивальди ошибки на 20–30% меньше.

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Ошибки пеленгования амплитудным методом зависят от формы ДН приемных антенн системы. При использовании двух разных антенных систем с одинаковой шириной ДН по половинной мощности и разной шириной ДН на «нулевом» уровне антенная система с более узкой «по нулям» ДН обеспечивает меньшую ошибку пеленгования.

2. Антенная решетка с элементами Вивальди имеет более узкую КДН на «нулевом» уровне, чем квадратная гребенчатая рупорная антенна при равной ширине КНД на уровне половинной мощности. Таким образом, применение антенных решеток с элементами Вивальди в приемной антенной системе малогабаритных широкополосных амплитудных пеленгаторов при сканирующих антеннах ИРИ позволяет снизить ошибку пеленгования за счет условий распространения радиоволн примерно на 30% по сравнению с аналогичными широкополосными амплитудными пеленгаторами с рупорными антеннами.

#### Литература

1. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
2. Чимитдоржиев Н.Б. Распространение и регулирование дифракционных УКВ полей / Н.Б. Чимитдоржиев, П.Н. Дагуров, Ю.Л. Ломухин. – Новосибирск: Наука, Сиб отд., 1987. – 151 с.
3. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. – М.: Сов. радио, 1970. – 382 с.
4. Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 231 с.
5. Куприц В.Ю. Широкополосные антенные решетки с элементами Вивальди для систем радиомониторинга / В.Ю. Куприц, А.А. Мещеряков, М.В. Крутиков // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 1 (23). – С. 18–21.
6. Dehdasht-Heydari R. Quad Ridger Horn Antenna for UWB Applications / R. Dehdasht-Heydari, H.R. Hassani, A.R. Mallahzadeh // Progress In Electromagnetics Research. – 2008. – Vol. 79. – P. 23–38.

**Куприц Владимир Юрьевич**

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НИИ радиотехнических систем (РТС) ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-89

Эл. почта: tomskvlad@mail.ru

**Мещеряков Александр Алексеевич**

Канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-34-55

Эл. почта: gwplab@rts.tusur.ru

**Шарьгин Герман Сергеевич**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-98

Эл. почта: gssh@mail.tomsknet.ru

Kuprith V.Yu., Mescheryakov A.A., Sharygin G.S.

**Modeling of characteristics of the orientation of antenna array with Vivaldi elements on land routes**

The paper presents the changes of characteristics of the orientation of an antenna array with Vivaldi elements working on land routes. We also compared the characteristics of square edge horn antennas in the same conditions and with the same aperture. Design and experimental characteristics of antennas and the direction finders created on their basis are provided in centimetric wave band.

**Keywords:** Vivaldi antenna, antenna array, broadband, land routes of distribution of radio waves.

---