

РАСЧЕТ ДИФРАКЦИОННОГО ФОКУСИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА АНТЕННЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ЛОКАТОРА

Г. И. Грейсух¹, Е. Г. Ежов², И. В. Минин³, О. В. Минин³, С. А. Степанов¹

¹Государственная архитектурно-строительная академия
440028 г. Пенза 28, Титова, 28. E-mail: guess_rg@aport2000.ru

²Самарский государственный аэрокосмический университет

³Институт прикладных физических проблем. E-mail: iapp@online.sinor.ru.

Показана эффективность использования оптико-геометрического метода проектирования дифракционных объективов для разработки микроволновых антенн автомобильных локаторов, включающих дифракционный фокусирующий элемент. Приведены параметры рассчитанных антенн, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к таким устройствам.

Введение

Примерно с начала 90-х годов в различных странах мира интенсивно развивается автомобильная локация [1]. Автомобильный локатор предназначен для обеспечения безопасности движения в сложных метеорологических условиях: при дожде, снеге, тумане, в условиях сильной загрязненности атмосферы выбросами промышленных предприятий. Для работы автомобильного локатора выделен специальный диапазон радиочастот 76–77 ГГц [2].

Производители автомобилей предъявляют к локаторам весьма жесткие технические требования, формулируемые с учетом типа автомобиля и специфики его конкретной модели. В то же время при всей широте и многообразии требований, некоторые из них являются наиболее общими. В эту группу основных требований, как показал анализ опубликованных данных, можно включить следующие [3]:

- должна быть предусмотрена работа локатора с фиксированной ориентацией диаграммы направленности (ДН), в многолучевом и сканирующем режимах;
- ширина основного лепестка ДН-антенны должна быть близка к дифракционному пределу;
- уровень боковых лепестков не должен превышать –20 дБ;
- усиление антенны должно быть не менее 20 дБ;
- локатор должен выдерживать значительный (до 300 км/ч) скоростной напор воздуха;
- локатор должен быть водо(влаго)непроницаемым;
- диапазон рабочих температур от –45 до +85°С;
- антенна должна быть технологичной и иметь малую стоимость в серийном производстве.

При разработке новой модели локатора в зависимости от предъявляемых к нему требований выбирается тип фокусирующего элемента и сканирующего устройства антенны. Затем, как правило, локатор с антенной “встраивают” в готовую конструкцию автомобиля, размещая их за такими деталями, как решетка радиатора, бампер и т.д. Это, несомненно, ухудшает работу локатора. Иной подход к созданию миллиметровых локаторов для перспективных автомобилей был предложен в [4]. Ее авторами предлагалось в качестве фокусирующих элементов антенн использовать элементы дифракционной квазиоптики [3], то есть элементы, осуществляющие преобразование фронта электромагнитной волны за

счет ее дифракции на зонной структуре элемента. Такие элементы, в принципе, могут иметь любую форму, что открывает возможность выполнить антенну локатора как часть типовой детали или узла автомобиля (бампера, капота, фары или радиатора), служащей одновременно и аэродинамическим обтекателем.

В настоящей статье показаны некоторые возможности улучшения сканирующих свойств антенн, фокусирующим элементом которых является дифракционная линза (ДЛ) со структурой, размещенной на сферической или асферической поверхности.

1. Компоновка схемы и результаты оптимизации

Разработка антенны автомобильного локатора предполагает параллельное решение двух основных задач: обеспечение независимости эффективной апертуры антенны от направления оси ДН и снижение aberrаций до уровня, при котором диаграмма достаточно близка к дифракционно-ограниченной в максимально широком диапазоне углов сканирования. Первая задача может быть решена благодаря использованию апертурной диафрагмы переменного диаметра, а вторая – за счет выноса этой диафрагмы в пространство предметов, то есть в пространство между облучателем и фокусирующим элементом. При этом фокусирующий элемент должен иметь ненулевую сферическую aberrацию, ибо только в этом случае вынос зрачка позволит влиять на все полевые aberrации, начиная с комы.

Направлением оси ДН-антенны, состоящей из облучателя и ДЛ, можно управлять, смещая облучатель относительно оси линзы. Однако более рациональным является использование линейки облучателей, установленной в передней фокальной плоскости линзовой антенны (в варианте более сложного локатора, служащего для построения двумерного изображения препятствий, может быть использована матрица облучателей). В этом случае легко реализуется любой из выше оговоренных режимов работы локатора, не требуется механика и исключается инерционность. Единственным существенным недостатком такого решения является дискретность возможных углов сканирования ДН, определяемая шагом линейки облучателей.

При сопряжении линейки облучателей с ДЛ независимость эффективной апертуры антенны от угла сканирования и вынос зрачка можно обеспечить следующим образом. Оси ДН всех облучателей

линейки должны пересекаться в одной точке оси ДЛ, отстоящей от самой линзы на требуемое расстояние выноса зрчка t . Ширина же ДН каждого облучателя должна зависеть от его расстояния до оси ДЛ и выбираться из условия обеспечения постоянства эффективной апертуры антенны в целом.

Проектирование антенн, рассматриваемых в настоящей статье, проводилось в два этапа. Сначала методами геометрической оптики [5, 6] определялись конструктивные параметры антенн, а затем методами вычислительного эксперимента изучались диаграммо-формирующие свойства антенны в скалярном приближении.

Оптико-геометрический расчет параметров антенны проводился следующим образом. От каждого облучателя к ДЛ направлялся расходящийся пучок лучей с числовой апертурой, обеспечивающей постоянную и заданную ширину (в меридиональной плоскости) пучка лучей, дифрагировавших на структуре линзы в рабочий порядок дифракции. Именно ширина дифрагировавшего (в первом приближении коллимированного) пучка и определяет эффективную апертуру антенны D для того угла сканирования, под которым распространяется этот пучок (рис. 1).

Аберрационная расхожимость протифрагировавших пучков снижалась путем оптимизации до приемлемого уровня, в максимально возможном для данной схемы диапазоне углов сканирования. При расчете антенны, включающей ДЛ, структура которой размещена на сферической поверхности, оптимизация осуществлялась по таким параметрам, как кривизна поверхности c , расстояние от ее вершины до входного зрчка t , коэффициенты асферической деформации эйконала записи дифракционной линзы $b_{2\rho+3}$. При этом предполагалось, что распределение пространственной частоты структуры этой ДЛ описывается выражением вида:

$$\Omega(\rho) = \frac{1}{\lambda_0} \left[\Phi \rho - 2 \sum_{\rho=0} (\rho+2) b_{2\rho+3} \rho^{2\rho+3} \right] \quad (1)$$

где ρ - расстояние от оптической оси; $\Phi = 1/f$ - оптическая сила дифракционной линзы, а f - ее фокусное расстояние; λ_0 - длина волны записи, равная в данном случае рабочей длине волны локатора λ ; $b_{2\rho+3}$ - коэффициенты асферической деформации эйконала записи [5, 6].

При расчете антенны, включающей ДЛ, структура которой размещена на асферической поверхности, к вышеперечисленным параметрам добавлялись коэффициенты асферической деформации поверхности $\sigma_3 - \sigma_7$, входящие в уравнение этой поверхности:

$$cz - 1 + \sqrt{1 - (c\rho)^2} - \frac{1}{8} \sigma_3 (c\rho)^4 - \frac{1}{16} \sigma_5 (c\rho)^6 - \frac{5}{128} \sigma_7 (c\rho)^8 = 0 \quad (2)$$

Оптимизация проводилась методом, описанным в работе [7] с использованием функций Q_1 и Q_4 , оценивающих качество по параметрам диаграммы рассеяния лучей [8]. Расчеты выполнялись для двух значений отношения эффективной апертуры антенны к рабочей длине волны: $D/\lambda = 30$ и $D/\lambda = 60$.

Результаты оптимизации приведены в таблицах 1 и 2. В них ω - предельно допустимый угол сканирования, а 2θ - дифракционный предел для угла раскрытия ДН по первым нулям.

Из таблиц 1 и 2, в частности, следует, что диапазон допустимых значений углов сканирования существенно шире при $D/\lambda = 30$, причем ограничен он в этом случае тем, что при превышении предельного угла часть лучей, идущих от излучателя, будут перекрываться краем ДЛ, как это показано на рис. 1.

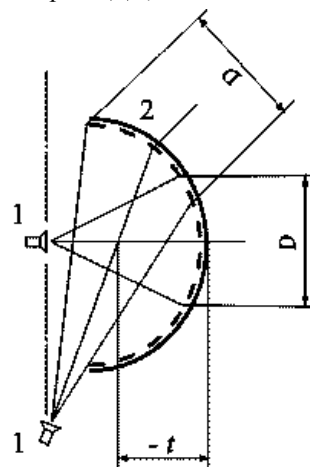


Рис. 1. Схема антенны с дифракционным фокусирующим элементом:

1 - излучатели; 2 - дифракционная линза.

Кроме того, из представленных таблиц 1 и 2 также следует, что переход от сферической к асферической поверхности ДЛ-антенны дает выигрыш в увеличении углов сканирования порядка ширины диаграммы направленности 2θ . В то же время технологические трудности изготовления асферической поверхности существенно выше, чем чисто сферической.

Таблица 1. Конструктивные параметры и характеристики антенны, включающей дифракционную линзу на сферической поверхности

Параметры антенны	Значения параметров при отношении эффективной апертуры к рабочей длине волны D/λ	
	30	60
f , мм	148,64	297,13
cf	-1,3373	-1,3203
$b_3 f^3$	1,5714	1,1970
$b_5 f^5$	-5,4624	-5,2262
$b_7 f^7$	10,5055	14,099
$b_9 f^9$	-7,1143	-14,300
t/f	-0,5470	-0,603
$\pm\omega$, град.	36	27,7
2θ , град.	4,66	2,33

Таблица 2. Конструктивные параметры и характеристики антенны, включающей дифракционную линзу на асферической поверхности

Параметры антенны	Значения параметров при отношении эффективной апертуры к рабочей длине волны D/λ	
	30	60
f , мм	152,71	307,13
cf	-1,0313	-1,0133
b_3f^3	3,0671	2,0654
b_5f^5	-22,008	-15,339
b_7f^7	51,168	47,566
b_9f^9	-19,404	-76,002
$\sigma_3 f^3$	18,0	43,146
$\sigma_5 f^5$	-19,711	-344,63
$\sigma_7 f^7$	0	950,18
t/f	-0,46	-0,4878
$\pm\omega$, град.	40,9	31
2θ , град.	4,66	2,33

2. Сравнение оптико-геометрического и волнового моделирования

Анализ диаграммо-формирующих свойств ДЛ, применимость в рассматриваемом случае методов геометрической оптики и достоверность полученных результатов проверялись путем вычисления интеграла Френеля-Кирхгофа, алгоритм вычисления которого применительно к ДЛ на произвольной поверхности рассмотрен в [9, 10]. Проведенная серия вычислительных экспериментов в целом подтвердила тенденции изменения основных характеристик ДЛ, выявив при этом и некоторые количественные отличия. Сразу же следует отметить, что при расчете ДЛ методом геометрической оптики не учитывались ограниченность дифракционной эффективности ДЛ и конечное (малое) число зон на апертуре ДЛ. Кроме того, как оптико-геометрическое, так и волновое моделирование проводились в приближении бесконечно тонкой структуры ДЛ. При вычислении дифракционного интеграла в первом приближении проводился учет потерь, связанных с выполнением ДЛ из диэлектрического материала, следующим образом. В каждой точке интегрирования на поверхности ДЛ определялся угол падения луча и с помощью процедуры, аналогичной описанной в [10] для плоской зонной пластинки, вычислялись потери на отражение и поглощение в материале ДЛ. Было принято, что диэлектрик характеризуется следующими оптическими постоянными: показатель преломления 1.5, коэффициент поглощения 0.001. Такая процедура эквивалентна введению закона облучения апертуры ДЛ, отличного от равномерного.

На рис. 2, в качестве примера, приведены ДН для антенны с ДЛ на асферической поверхности при апертуре $D/\lambda = 60$ для четырех значений углов ска-

нирования: 0, 15, 30 и 40 градусов. ДН трех других антенн, представленных в табл. 1 и 2, качественно не отличаются от представленной на рис. 2.

$20\lg(|E|/|E_{\max}|)$

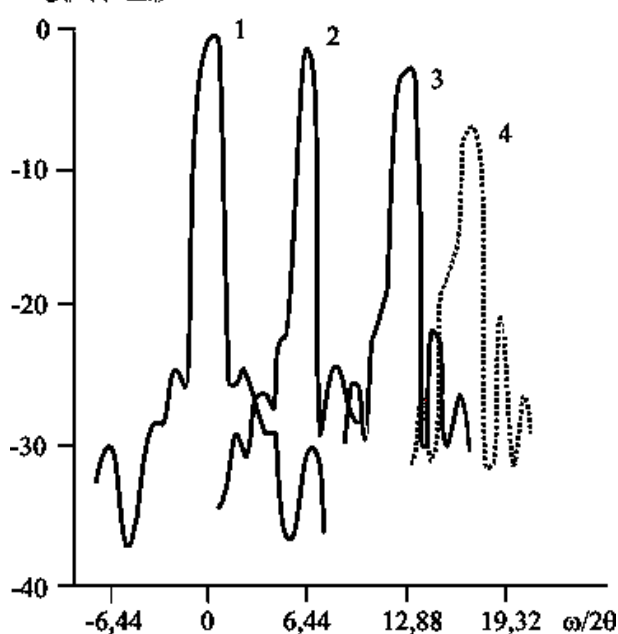


Рис.2. Диаграммы направленности антенны с ДЛ на асферической поверхности при апертуре $D/\lambda = 60$ для четырех значений углов сканирования: 0, 15, 30 и 40 градусов, кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Поскольку понятие “качество ДН” не является строго определенным, при проведении вычислительных экспериментов необходимо было полностью контролировать форму ДН: ее ширину по уровню половинной мощности и по первым минимумам, уровень и характер расположения первых боковых максимумов, падение усиления в главном максимуме. На последний параметр имеется общепринятый допуск: падение усиления по напряженности электрического поля в главном максимуме не должно превышать -3 дБ.

Как следует из представленных кривых, уровень боковых лепестков ДН во всем диапазоне углов сканирования не превышает -17 дБ, а падение усиления в главном максимуме менее -3 дБ в диапазоне до 30 градусов. Напомним, что при оценке предельного угла сканирования по диаграмме рассеяния лучей для данного варианта антенны, было получено $\pm\omega = 31$ град. (см. табл. 2).

С точки зрения работы автомобильного локатора в целом, важным является не только абсолютное значение предельно допустимых углов сканирования $\pm\omega$, но и число элементов разрешения в этом поле зрения, то есть значение поля зрения в единицах ширины ДН-антенны локатора: $n_\phi = \pm\omega / 2\theta$. Соответствующие данные приведены в табл. 3 как для оптико-геометрического, так и волнового расчетов. Из приведенных результатов видно, что увеличение значения относительной апертуры

ДЛ приводит к существенному увеличению параметра n_φ , хотя переход от сферической поверхности ДЛ к асферической слабо влияет на изменение n_φ .

В то же время конструктивный диаметр ДЛ на асферической поверхности заметно меньше, чем на чисто сферической. При этом ширина последней киноформной зоны в структуре ДЛ у асферической линзы шире, чем у сферической.

Таблица 3. Дополнительные конструктивные параметры и характеристики антенн

Параметр		Сферическая ДЛ		Асферическая ДЛ	
		$D/\lambda = 30$	$D/\lambda = 60$	$D/\lambda = 30$	$D/\lambda = 60$
Поле зрения, n_φ	Геометр.	7,7	11,9	8,8	13,3
	Волновой	7,1	11,0	8,3	12,9
Число полных киноформных зон в структуре ДЛ		16	32	13	23
Максимальный конструктивный диаметр ДЛ, в ед. λ		53	118	49	88
Ширина последней зоны, в ед. λ		1,50	1,43	1,60	1,57

Анализ характеристик, рассматриваемых антенных систем показывает, что очевидной “платой” за существенное увеличение угла сканирования, достигаемое при выносе апертурной диафрагмы в пространство между облучателем и ДЛ, является увеличение конструктивного диаметра ДЛ (рис. 1).

Таким образом, в настоящей работе рассмотрен один из путей увеличения углов сканирования у антенн дифракционно-линзового типа. Достигаемые при этом характеристики по основным параметрам (углы сканирования и искажения ДН) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к антенным системам автомобильных локаторов. Следует также отметить, что предложенный в статье подход двухэтапной оптимизации параметров ДЛ (оптимизация на основе оптико-геометрического расчета и уточнение характеристик на основе волнового моделирования) достаточно эффективен. Дальнейшее уточнение предельных параметров антенн возможно на основе волновой оптимизации.

В заключение отметим, что тип антенных систем, рассмотренный в данной статье, может, по мнению авторов, найти применение также и в устройствах подвижной СВЧ-связи [3, 11].

Литература

1. Workshop “Microwave Vehicular Technology”, IEEE MTT-S Conf., Orlando, FL, May, 1995.
2. European Radiocommunications Committee, ERC Decision of 22 October, 1992.
3. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика и ее применения. Новосибирск: СибАгс, 1999. 308 с.
4. I.V. Minin, O.V. Minin Low Cost multibeam antennas in the mm-wave regime for radar systems of

transport means // USNC/URSI National Radio Science Meeting, Orlando, Florida, USA, July 11-16, 1999. P. 327.

5. Бобров С.Т., Грейсук Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем // Л., Машиностроение. 1986. 223 с.
6. G.I. Greisukh, S.T. Bobrov, S.A. Stepanov Optics of Diffractive and Gradient-Index Elements and Systems // Bellingham, WA: SPIE Press. 1997. 414 p.
7. Грейсук Г.И., Степанов С.А., Ежов Е.Г. Тройные склеенные радиально-градиентные объективы // Оптический Журнал. 1999. Т. 66. № 10. С. 92-96.
8. Бобров С. Т., Грейсук Г. И. Взаимная корреляция числовых критериев оценки качества изображения // Опт. и спектр. 1985. Т. 58. В. 5. С. 1068-1073.
9. Минин И.В., Минин О.В. Антенные системы миллиметрового диапазона на основе элементов дифракционной квазиоптики // Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн: сб. научн. трудов Харьков. ИРЭ АН УССР. 1991. С. 120-127.
10. J. M. Van Houten, M.H.A.J. Herben Analysis of Phase-Correcting Fresnel-Zone Plate Antenna With Dielectric Transparent Zones // J.Electromagnetic Waves and Applications. 1994. V. 8, № 7. P. 847-858.
11. I.V. Minin and O.V. Minin Antennas of mm-range based on the quasioptical diffraction elements for the communication systems // 50th Vehicular Technology Conference VTC 1999-Fall, September 19-22, Amsterdam, The Netherlands. Softcover. 1999. P. 3040-3046.