

ДИФРАКЦИОННЫЕ АНТЕННЫ-ОБТЕКАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ДИФРАКЦИОННОЙ КВАЗИОПТИКИ

Минин И.В., Минин О.В.

Институт прикладных физических проблем, Новосибирск

1. Антенны-обтекатели сверхзвуковых летательных аппаратов

Одной из особенностей дифракционных фокусирующих элементов является то, что они могут быть выполнены на произвольной поверхности. При этом возможно совместить свойства собственно диаграммо-формирующего элемента и аэродинамического обтекателя, например, летательного аппарата в одном конструктивном элементе.

Задача создания современных антенн-обтекателей на основе элементов дифракционной квазиоптики носит комплексный характер. С одной стороны, необходимо создать диаграммо-формирующий элемент с заданными параметрами (диаграмма направленности, уровень боковых лепестков, углы сканирования и т.п.), с другой стороны - он должен обеспечить требуемые аэродинамические характеристики. Решение этой задачи возможно по двум направлениям. В первом подходе за основу берутся диаграммо-формирующие свойства антенны-обтекателя - по ним определяют оптимальную форму поверхности дифракционной антенны-обтекателя (ДАО), а по полученным параметрам минимизируется (или добиваются требуемого, если это возможно) аэродинамического сопротивления. В другом подходе за основу берутся необходимые аэродинамические характеристики ДАО, определяют форму ее поверхности, а затем уже на заданной форме поверхности создают (синтезируют) собственно диаграммо-формирующий элемент. Выбор того или иного подхода определяется "приоритетностью" аэродинамических или диаграммо-формирующих свойств ДАО.

Антенна-обтекатель, выполненная на оптимальной для сканирования поверхности.

Можно показать [1], что для обеспечения значительных (до $\pm 20-30$ градусов) углов сканирования за счет смещения фазового центра источника излучения, форма поверхности ДАО должна быть близка к сферической, при этом удлинение ДАО (отношение максимальной стрелки прогиба к ее диаметру) должно не сильно отличаться от 1.

С другой стороны, на сверхзвуковых режимах полета, соответствующих числу $M=2...4$, волновое сопротивление таких тел достаточно велико.

Выходом из этой противоречивой ситуации может быть использование ДАО со сферической поверхностью и установленной на ней аэродинамической иглой. При этом следует решить следующие основные проблемы:

- влияние аэродинамической иглы на диаграммо-формирующие свойства собственно ДАО;
- выбор оптимальной конфигурации "ДАО+аэродинамическая игла" с точки зрения минимизации волнового сопротивления S_x тела;

- оценить теплофизические параметры работы ДАО для определения требований на материал ДАО.

Изучение указанных проблем проводилось методом вычислительного эксперимента [2] на программном комплексе [3], метод расчета и структура которого описаны в работе [4].

Не вдаваясь в детали особенностей поведения аэродинамических характеристик рассматриваемых конфигураций, укажем лишь основные выводы, существенные для проектирования ДАО.

Введем параметр $l = \frac{2L}{1-d}$, где l - относительная

длина "иглы", d - ее диаметр в единицах диаметра ДАО. В зависимости от величины l иглы можно выделить три основных режима обтекания тела [5]:

- "короткая игла", когда расстояние отхода ударной волны (УВ) от обтекаемого тела больше, чем длина иглы. Картина обтекания в этом случае определяется, в основном, формой ДАО;

- "средняя игла", когда длина иглы достаточна для изменения формы головного скачка, превращая его из почти прямого (в окрестности оси симметрии) в косой скачок;

- "длинная игла", когда длина иглы больше расстояния отхода УВ от тела. Здесь основной скачок уплотнения возникает от застойной зоны перед телом.

При сверхзвуковых скоростях полета ($M>1$) минимальное значение коэффициента волнового сопротивления тела S_x обеспечивается при реализации третьего из указанных выше режимов обтекания. В общем случае общая длина "ДАО+игла" ограничена, поэтому при определении оптимальной конфигурации необходимо оптимизировать как минимум три параметра: l , d , и форму затупления цилиндрического тела (форму ДАО). Проведенные численные исследования показали, что в случае сферической формы ДАО с $R \sim D$ оптимальное значение l для скорости, соответствующей $M=2$, составляет $l \sim 3.00$ ($l=1.56$, $S_x=0.79$; $l=3.00$, $S_x=0.31$; $l=3.67$, $S_x=0.38$). Увеличение скорости до $M=4$ приводит к возрастанию минимального значения S_x до 0.4 (при оптимальном l).

Для минимизации аэродинамического сопротивления тела при сохранении достаточных диаграммо-формирующих свойств ДАО были исследованы конфигурации, представленные на рисунке 1. С точки зрения аэродинамических характеристик оптимальным оказался 4-й вариант из рассматриваемых конфигураций. Это обусловлено тем, что в данном варианте в области сопряжения цилиндрического тела с ДАО поток газа всегда направлен к оси тела и регулируя этот процесс можно управлять формой застойной зоны в области возвратно-циркуляционного течения. Оптимальное значение

$Sx \sim 0.23$ при $M=2$ наблюдается при следующих параметрах "козырька": длина $0.13D$, толщина 0.1 его длины.

С точки зрения выработки требований к материалу ДАО необходимо отметить еще одну особенность аэродинамики подобных конфигураций. Известно [6], что при $0.3 < l < 3$ наблюдаются нестационарные периодические режимы обтекания конфигурации "затупленное тело - аэродинамическая игла". На рисунке 2 показано распределение давления вдоль поверхности образующей тела во времени, наглядно демонстрирующие рассматриваемый эффект. Колебательный режим обтекания приводит, в частности, к тому, что термические нагрузки на поверхность ДАО имеют также периодический характер. Исследования показали, что в найденной оптимальной конфигурации при скоростях полета, соответствующих числу $M=2$, диапазон пульсаций температуры в области сопряжения аэродинамической иглы и ДАО достигает $\Delta T \sim 600$ К. Абсолютное значение температуры (средняя величина) вдоль поверхности ДАО составляет при $M=4$, $T \sim 1400$ К. Такие особенности аэродинамики рассматриваемых конфигураций накладывают дополнительные требования на выбор материала ДАО.

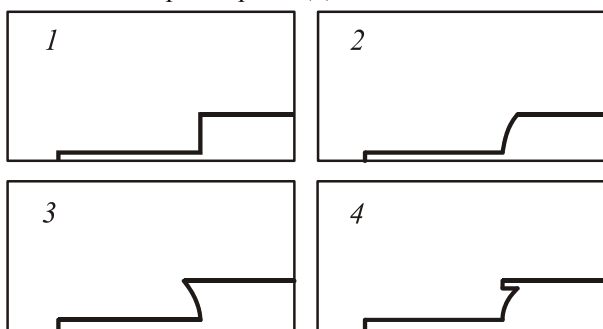


Рис.1. Варианты исследованных конфигураций антенн-обтекателей.

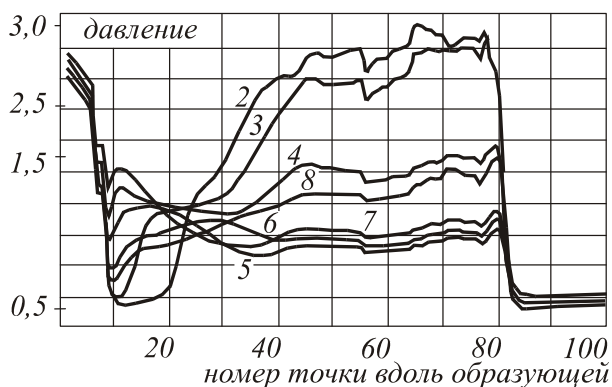


Рис.2. Пульсации давления вдоль образующей поверхности ДАО.

Оценка влияния аэродинамической иглы на фокусирующие свойства ДАО

Наличие в раскрытии линзовой антенны – обтекателя аэродинамической иглы приводит к деформации направленных свойств антенны из-за появления в апертуре затененных участков и рассеяния энергии на них и участках иглы.

Оценить влияние аэродинамической иглы на диаграмму направленности ДАО можно следующим образом. При аксиальном затенении раскрыва, диаграмма направленности круглой апертуры имеет вид [7]:

$$F(u) = \int r f(r) J(ur) dr - \eta^2 \int r f(r\eta) J(ur\eta) dr.$$

Здесь $\eta = Ra / R, 2Ra$ – диаметр теневого диска, $2R$ – диаметр ДАО, $u = 2\pi R \sin(\vartheta / \lambda)$.

Так как $\eta \ll 1$, то

$$F(u) = \int r f(r) J(ur) dr - 0.5 \eta^2 \Lambda(u\eta) \quad (1)$$

где $\Lambda(z)$ – цилиндрическая функция первого рода.

Оценки по (1) показывают, что затенение апертуры приводит к росту боковых лепестков рассеяния и к уменьшению ширины диаграммы направленности. При величине затенения апертуры менее 5% рост уровня боковых лепестков составляет менее 0.5 дБ.

Для экспериментальных оценок влияния аэродинамической иглы на диаграммо-формирующие свойства ДАО использовались элементы дифракционной квазиоптики, выполненные на конической [7] (угол полураствора конуса 35 градусов), сферической ($R \sim D$ и $R \sim D/2$) [1] и параболической [8] поверхностях. Внешний вид ДАО на сферической поверхности с $R \sim D$ и оптимальной аэродинамической иглой показан на рисунке 3. Численное моделирование диаграммо-формирующих свойств ДАО в дальней зоне проводилось с использованием разработанного алгоритма вычисления дифракционного интеграла [9].

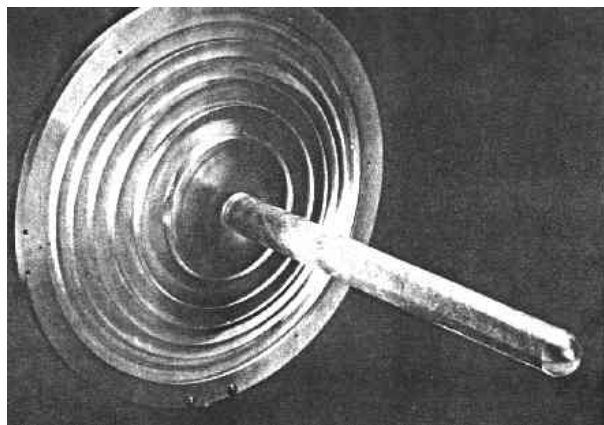


Рис.3. Внешний вид дифракционной антенны-обтекателя с аэродинамической иглой.

При проведении экспериментальных исследований соблюдалось условие дальней зоны, при этом неравномерность фазового распределения не превышала $\pi/8$. Усиление ДАО определялось по методу сравнения с эталоном. Уровень минимально регистрируемого сигнала составлял -35 дБ, суммарная погрешность измерений приведена в таблице 1. Исследования были проведены в миллиметровом диапазоне длин волн.

В экспериментах исследовались ДАО двух типов (для каждого типа поверхности): фазовая структура которых была рассчитана в приближении "бесконеч-

но тонкого" элемента и с учетом толщины диэлектрического материала, включая толщину "технологического" слоя, на котором собственно и выполняется фазокодирующий профиль [1].

Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что влияние аэродинамической иглы

на диаграммо-формирующие свойства ДАО сводятся к увеличению уровня боковых лепестков рассеяния на 0.6-0.9 дБ во всем диапазоне исследованных углов сканирования - см.таблицу 2.

Таблица 1.

Уровень сигнала, дБ	Погрешность измерения уровня сигнала, дБ	Погрешность углового положения, мин.
-10	± 0.54	11.8
-20	± 1.44	19.5
-30	± 3.73	45.4

Таблица 2.

Коэффициент усиления, дБ (без иглы)	Коэффициент усиления, дБ (с иглой)	Полуугол сканирования, град.
27.5	26.9	0
25.6	25.3	5
24.9	25.0	10
25.2	24.8	15
26.9	26.1	25

Экспериментальными исследованиями и сравнением с результатами работы [9] установлено, что коэффициент усиления ДАО не зависит от стрелки прогиба ее поверхности. При заданной величине стрелки прогиба поверхности усиление ДАО не зависит и от ее формы (конус, парабола, сфера). Кроме того, учет "технологического" фазового слоя при определении фазокодирующего профиля ДАО приводит к сужению диаграммы направленности ДАО, снижению уровня боковых лепестков рассеяния, увеличению углов сканирования и снижению коэффициента редукции антенны более чем в два раза по сравнению с "бесконечно тонкой" ДАО.

Измерения коэффициентов отражения ДАО по измерению коэффициента стоячей волны показал (рис.4), что в рамках точности измерений коэффициент отражения очень мал (величина КстU практически не изменяется).

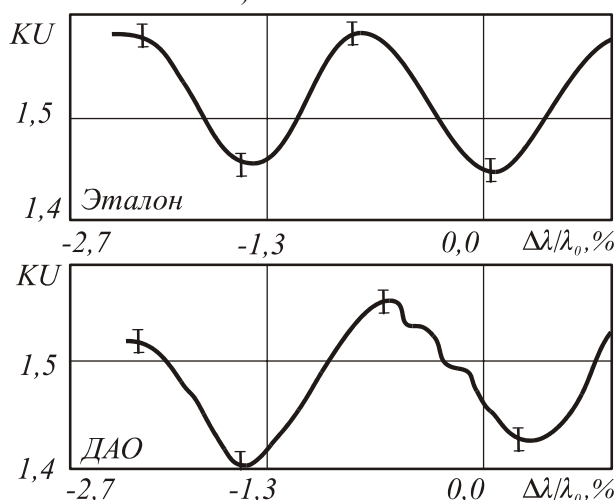


Рис.4. Экспериментальные зависимости коэффициента стоячей волны.

Выполнение ДАО на оптимальной аэродинамической поверхности

Как показали проведенные исследования, оптимальной (по коэффициенту волнового сопротивления) аэродинамической формой ДАО является т.н. оживальная форма поверхности. Для такой конфигурации возможно достичь минимальных значений S_x в широком диапазоне скоростей. Однако диаграммо-формирующие свойства такого ДАО вряд ли будут приемлемыми.

Для проверки этого утверждения была экспериментально исследована ДАО оживальной формы, показанная на рисунке 5 .

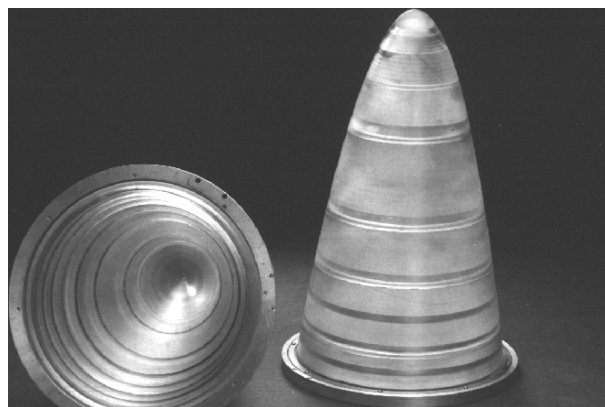


Рис.5. Дифракционная антенна-обтекатель оживальной формы.

Экспериментальные исследования такого типа дифракционной антенны, которая демонстрирует, по-видимому, предельный случай, показали следующее. При прочих равных условиях, сравнение с характеристиками ДАО на сферической, конической и параболической поверхностях (без аэродинамической иглы) сводится к следующим выводам: усиление ДАО с оживальной формой поверхности меньше усиления ДАО на сферической и параболической поверхностях в среднем на 3 дБ; уровень первого максимума диаграммы направленности увеличива-

ется по сравнению с указанными ДАО на 6-8 дБ; уровень первого минимума соответственно на 10-12 дБ. Более того, в ДАО оживальной формы по видимому не возможно достичь углов сканирования диаграммой направленности более $\pm 2-5$ градусов.

Данные особенности связаны в основном с большими углами падения электромагнитной волны на поверхность ДАО и значительными углами дифракции. Снизить этот эффект возможно, по видимому, с помощью применения специальных согласующих покрытий.

2. Применение дифракционных антенно-обтекателей в автомобильной технике и спутниковых антеннах

В настоящее время всё более широкое распространение получают системы непосредственного спутникового телевизионного вещания (НСТВ), обеспечивающие передачу телевизионных программ с ИСЗ непосредственно на домашние телевизоры [10]. Важным элементом приёмного оборудования является антенна, параметры которой во многом определяют качество приёма. В настоящее время в системах НСТВ в основном используются зеркальные параболические антенны и их модификации - параболические антенны со смещённым облучателем. Как правило, облучатели параболических зеркальных антенн находятся в фокусе зеркал, т.е. на пути распространения радиоволн, что вызывает дополнительные потери. Отрицательно сказывается затенение от системы питания облучателя, элементов его крепления и обычно совмещённого с облучателем преобразователя частоты. Параболические зеркальные антенны имеют значительные размеры, низкую ветровую устойчивость, ограниченный дизайн, недостаточную электромагнитную совместимость.

Ожидаемое заполнение орбитальных позиций, выделенных на геостационарной орбите для систем связи и вещания, ужесточит требования к наземным пунктам приёма. Так, решение Федеральной комиссии связи США о допустимом угловом разnose между соседними ИСЗ в 2° запрещает уменьшение размера наземных антенн, т.к. главный лепесток их диаграммы направленности подвержен сильному воздействию помех от соседних ИСЗ. В настоящее время, для работы, например, со спутником типа "Астра" в диапазоне частот 11.2-11.45 ГГц требуются приёмные антенны с шириной диаграммы направленности не более 3° [11] для приёма спутниковых программ без помех от различных спутников.

С учетом возросших требований по удержанию ИСЗ на геостационарной орбите и их электронной совместимости возникает необходимость разработки антенных устройств, позволяющих использовать одну антенну для одновременного приёма сигналов от нескольких корреспондентов или быстрого сканирования диаграммой направленности антенны при неподвижной её апертуре. Основные преимущества такого устройства: относительно невысокая стоимость антенны, относительная простота монтажа и технического обслуживания (отсутствуют ме-

ханизмы поворота, система наведения и управления), возможность одновременного приёма сигналов от вещательных ИСЗ находящихся в секторе $40-50^{\circ}$. Такое антенное устройство, выполняющее одновременно и функцию аэродинамического обтекателя, может быть разработано на основе дифракционных антенн [9,12]. Основные преимущества таких антенн следующие:

- Для одновременного приема сигналов от нескольких спутников (источников) используется система детекторов, расположенных вдоль фокальной поверхности антенны при неподвижной собственно антенне;
- Применение антенн линзового типа позволяет достичь сразу двух эффектов – использовать такую антенну в качестве аэродинамического обтекателя для снижения ветровых нагрузок и улучшить условия работы приемного блока путем его защиты от воздействия окружающей среды;
- Обеспечить возможность выбора произвольного внешнего вида антенны;
- Использование зеркальных элементов дифракционной квазиоптики в качестве антенн позволяет уменьшить их эффективную поверхность рассеяния (ЭПР) за счет частотной избирательности на нерабочих частотах. Такие зеркальные дифракционные антенны могут найти применение для решения задачи электромагнитной совместимости, например, в радиотехнических комплексах, в которых используются несколько антенных устройств различных частотных диапазонов, размещаемых в непосредственной близости друг от друга.

На рисунке 6 показан макет разработанной дифракционной антенны для приема спутникового телевидения (материал антенны – пенополистирол, $n = 1.3$, диаметр 1.2 м.). Такие антенны позволяют улучшить их эстетическое восприятие и их согласованность с внешним интерьером зданий, сооружений и архитектурных строений.

Другое перспективное направление применения ДАО заключается в следующем. В последние годы наряду с традиционными направлениями развития автомобильной техники началось интенсивное развитие нового класса бортовых радиосредств - радиолокационных систем и датчиков автомобиля. При этом, вместе с ранее известными радиолокационными датчиками измерения скорости и дальности, в ряде стран (США, Германия, Россия, Франция, Япония, Корея) началось создание многофункциональных систем радиолокационного "видения", которые, обладая большой информативностью, позволяют получать радиолокационные изображения автодороги, автомобилей, окружающей местности, а также измерять все необходимые параметры движения автомобилей. Такие системы позволяют повысить безопасность движения, создать систему автоматического управления автомобилем, управлять автомобилем в условиях отсутствия или ограниченной

оптической видимости и дать еще целый ряд дополнительных возможностей.

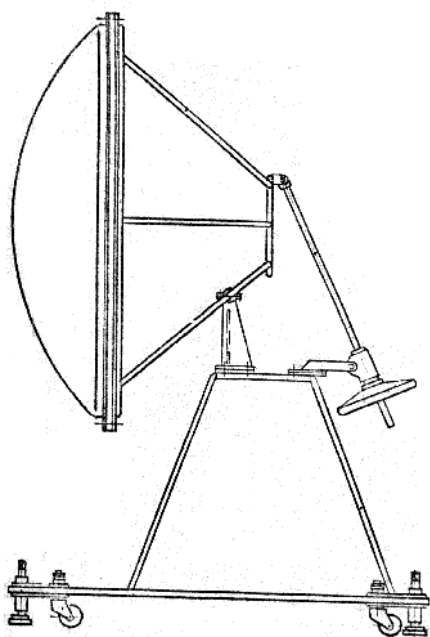


Рис.6. Макет дифракционной антенны для многопозиционного приема сигналов спутникового телевидения.

Одним из основных компонентов этой системы является антенна. Простая многолучевая антенна на основе элементов дифракционной квазиоптики линзового или зеркального типа может быть вписана в элемент конструкции автомобиля, например, части капота, не нарушая его дизайна [13,14]. На рисунке 7 приведен один из вариантов исполнения такой ДАО применительно к проблеме создания автомобильного локатора. Основные преимущества такого подхода следующие [14]: простота исполнения; дешевизна; совмещение функций аэродинамического обтекателя антенны, диаграммо-формирующего устройства и элемента конструкции автомобиля; как следствие – улучшение параметров диаграммы направленности собственно антенны и снижение габаритов локатора; существенное снижение стоимости локатора за счет исключения ряда его составных частей и т.п.

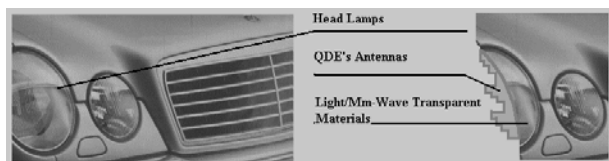


Рис.7. Пример выполнения ДАО в элементе конструкции автомобиля.

Литература

1. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика. – М., ИнформТэи, 1992, 180С.

2. Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V. The calculation experiment technology. - Proc. of the Int. Symp. On Intense Dynamic Loading and its Effects. Chengdu, China, July 9-12, 1992, p.431-433.

3. Душин В.Р., Минин И.В., Минин О.В., Федотов В.Г. Пакет прикладных программ для расчета пространственных задач обтекания //Сб. Численные методы механики сплошной среды, Часть 2, - Красноярск, 1987, с.66-67.

4. Душин В.Р., Минин И.В., Минин О.В., и др. Исследование пространственного сверхзвукового обтекания осесимметричных тел реальным газом //Вестник МГУ, сер.1, вып.4, 1989. – с.41-49.

5. Давыдов Ю.М., Коробицын Г.П., Постников В.Г. Обтекание затупленных тел с иглами и кавернами //Инженерно-физический журнал, 1979, т.37, вып.4, с.712-716.

6. Антонов А.Н., Елизарова Т.Г., Павлов А.Н. и др. Математическое моделирование колебательных режимов при обтекании тела с иглой //Математическое моделирование, 1989, т.1, вып.1, с.13-23.

7. Минин И.В., Минин О.В. Элементы дифракционной квазиоптики сверхвысокочастотного диапазона //Приборы и техника эксперимента, 1990, N 6, с.201-202.

8. Минин О.В., Минин И.В. Дифракционные объективы на параболических поверхностях //Компьютерная оптика, 1988, вып.3, с.8-15.

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. науч. тр. Харьков: ин-т радиофизики и электроники АН Украины, 1991, с. 120-127.

10. Гвозденко А.А. Спутниковые службы непосредственного вещания // Зарубежная радиоэлектроника. М: Радио и связь. 1992, N 4-5, с. 81-110.

11. "New Scientist" (Англия), т. 127, N 1733, 8 сентября 1990 г., с. 42.

12. Минин И.В., Минин О.В. Элементы дифракционной квазиоптики и системы миллиметрового диапазона на их основе. //Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн: сб. науч. тр. Харьков: ин-т радиофизики и электроники АН Украины, 1991, с. 102-109.

13. Minin I.V., Minin O.V. Elements of diffraction quasi-optics. Part 2. The main applications. //Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 1994, p.63-69.

14. Minin I.V., Minin O.V., Russer P. et al. Cost effective production of multidirectional antennas in the mm-wave regime// The final Scientific report on Contract N G005830106 of DaimlerChrysler AG, 1998, 71 p.