

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В СИСТЕМАХ АКТИВНОГО РАДИОВИДЕНИЯ

О.В.Минин

Институт прикладных физических проблем

## Введение

Конец 20-го и начало 21 века характеризуется резким увеличением числа террористических актов с применением взрывных устройств и оружия, происходящих в большинстве стран мира. Наибольшее их число происходит на воздушном транспорте с применением взрывных устройств, огнестрельного и холодного оружия. Обычные системы в контрольно-пропускных пунктах высокой безопасности включают в себя детекторы металла для контроля персонала и рентгеновские устройства для контроля багажа. Однако такие системы не эффективны для обнаружения пластмассовых или керамических ружей и ножей, взрывчатых веществ, особенно если они скрыты на теле человека.

Быстродействующие системы радиовидения с заполненной апертурой, основанные на моделировании оптических методов построения изображения – квазиоптическое радиовидение – могут быть созданы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [1-2]. Системы квазиоптического радиовидения соединяют методы современной когерентной и некогерентной оптики с достижениями СВЧ техники.

В настоящее время квазиоптическое радиовидение в основном развивается по двум направлениям:

- формирование изображения с помощью различного вида радиообъективов – прямое радиовидение;
- построение изображения голографическими методами – голографическое радиовидение.

Методы прямого радиовидения могут быть подразделены в зависимости от схемы расположения приемника и излучателя энергии СВЧ относительно контролируемого объекта:

- на прохождение (двусторонний доступ);
- на отражение (односторонний доступ);
- комбинированные.

При выборе реальных систем радиовидения, обеспечивающих возможность получения изображения объектов на больших расстояниях, необходимо руководствоваться следующими требованиями [3]:

- максимальное разрешение по объекту;
- достаточная удаленность элементов системы от наблюдаемого объекта;
- экономичность системы;
- минимум искажений в изображении объекта, вызванных конечным размером апертуры и низким (по сравнению с оптическим диапазоном)

качеством используемых радиооптических элементов (объективы, излучатели и т.п.).

Основные сравнительные характеристики голографического и прямого квазиоптического методов радиовидения представлены в таблице 1.

Формирование радиоизображений в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн имеет определенную специфику. Она состоит в том, что размеры системы, формирующей изображение, и наблюдаемые объекты (их характерные размеры) оказываются сравнимы с длиной волны. Поэтому при расчете структуры изображения необходимо принимать во внимание его дифракционный характер.

В миллиметровом диапазоне, как и в оптическом, для целей формирования радиоизображений объекта используются диэлектрические линзы и зеркальные СВЧ антенны [4]. Применение этих фокусирующих элементов не решает полностью задачи, так как для формирования качественных радиоизображений необходимы объективы с достаточно большими апертурами (даже в коротковолновой части миллиметрового диапазона - порядка единиц метров). Наиболее практичными для указанных целей являются линзы, имеющие коэффициент преломления 1.3 - 1.6 и фокусное расстояние, равное апертуре [1-2]. При этом толщина линзы составляет несколько десятков процентов от размера апертуры. Заметим, что для дифракционных линз и объективов толщина не зависит от величины апертуры.

Однако изготовление подобных радиообъективов связано со значительными технологическими трудностями. Такой радиообъектив имеет большую массу, велики потери энергии, связанные с поглощением проходящего излучения в материале линзы (так как даже лучшие диэлектрики в миллиметровом диапазоне длин волн, такие, как плавленый кварц, фторопласт, полистирол, полиэтилен, имеют значительные потери, и реальный радиообъектив с апертурой  $D/\lambda \sim 250$  имеет пропускание около 10%). Использование же зеркал для получения радиоизображений ограничивается тем, что объект и его изображение находятся с одной стороны от фокусирующей системы. Кроме того, стоимость зеркальной антенны растет как  $D^{2.5-2.6}$  [5] и требования к относительной точности изготовления поверхности выше, чем у дифракционных зеркальных антенн.

Перспективными аналогами линз в СВЧ-диапазоне являются радиообъективы на основе дифракционных элементов [1-2].

Таблица 1.

Характеристика	Голографический метод	Квазиоптический метод	
		активный	пассивный
Поперечное разрешение: <i>реальное</i>  <i>предельное</i>	$\Delta_x = \frac{\lambda}{D} \sqrt{r^2 + (D/2 + x_1)^2}$ $\Delta l \rightarrow \frac{\lambda}{2} \Big _{D \rightarrow \infty}$	$\Delta \approx \frac{1.22\lambda r}{D_0}$ $\Delta \geq \lambda/2$	$\Delta l \approx \frac{1.22\lambda r}{D_0}$ $\Delta l \geq \lambda/2$
Продольное разрешение:  <i>реальное</i>  <i>предельное</i>	$\Delta_z = \frac{\lambda}{D} \frac{\left[ r^2 + \left( \frac{D}{2} + x_1 \right)^2 \right]^{3/2}}{\Gamma \left( \frac{D}{2} + x_1 \right)}$ $\Delta_z \approx \frac{\lambda D}{4\Gamma} \Big _{D \gg r}$ $\Delta_z \approx \frac{2\lambda r^2}{D^2} \Big _{D \ll r}$	-	-
Глубина резкости	-	$\Delta_z \approx \frac{4.88\lambda r^2}{D^2}$	$\Delta_z \approx \frac{4.88\lambda r^2}{D^2}$

Реальная система визуализации объемных предметов в миллиметровой области спектра должна обеспечивать просмотр области пространства не менее  $(10^5 - 10^8)\lambda^3$ , при этом в данной области необходимо надежно идентифицировать предметы, характерные размеры которых составляют несколько единиц длин волн. Например, для идентификации пистолета система визуализации должна обеспечивать разрешение в предметной области не хуже 5-6 мм. В классических системах получения изображения, т.е. в системах, использующих в качестве формирующих изображение элементов линзы, зеркала, высокое поперечное (относительно оптической оси радиообъектива) разрешение достигается при больших значениях числовой апертуры. Однако при увеличении разрешения на объекте, глубина резкости объектива (и, следовательно, продольное разрешение) уменьшается, причем учитывая, что

$$\delta_{\text{прод}} \sim 2\lambda(F/D)^2 \quad \text{и} \quad \delta_{\text{поп}} \sim 1.22\lambda(F/D),$$

легко получить следующую оценку:

$$\delta_{\text{прод}} \sim 1.34\delta_{\text{поп}}^2/\lambda.$$

При построении реальной системы для получения радиоизображений предметов с глубиной резкости большей, чем задается обычным изображением, необходимо реализовать сканирование объекта по трем координатам. Применение механического сканирования, например, по глубине объекта, затрудняет, а порой делает невозможным получение полного радиоизображения объекта в реальном времени.

Таким образом, возникает противоречие: стремясь увеличить разрешение на объекте в поперечном направлении, глубина резкости формирующей системы уменьшается по квадратичному закону. Следовательно, задача получения радиоизображе-

ния объемного предмета, протяженность которого в продольном направлении составляет несколько десятков длин волн, с высоким пространственным разрешением становится практически неразрешимой в классической постановке.

Перспективным выходом из этой ситуации является использование частотных свойств элементов дифракционной оптики миллиметрового диапазона, т.е. зависимости фокусного расстояния от длины волны излучения.

#### **Энергетическая эффективность дифракционной оптики миллиметровых волн**

Сравнение эффективностей фокусировки зонной пластины Френеля и линз в СВЧ-диапазоне приведено в работе [6]. Потери радиообъектива складываются из дифракционных потерь и потерь на отражение и поглощение излучения в материале объектива. Дифракционная эффективность  $\eta_{\text{зп}}$  (отношение мощности, дифрагированной в  $i$ -фокус, ко всей излучаемой мощности) для зонной пластины Френеля в [6] определялась из условия, что половина падающей мощности пройдет без потерь через открытые зоны Френеля, вторая же половина мощности отражается и поглощается на фазовращающих зонах:

$$\eta_{\text{зп}} = 0.17[1 + (1 - r_{\text{ф}})(1 - \alpha_{\text{ф}})],$$

где  $r_{\text{ф}} = [(n-1)/(n+1)]^2$ ;  $\alpha_{\text{ф}} = \exp(-\pi n \text{tg} \delta / (n-1))$  - коэффициенты отражения и поглощения излучения по мощности фазоинверсной зонной пластины;  $n$ ,  $\text{tg} \delta$  - коэффициент преломления и тангенс угла потерь материала радиообъектива. Материалы, применяемые при изготовлении оптических дифракционных элементов, как правило, имеют достаточно малый тангенс угла потерь, однако в микроволновом и

терагерцовом диапазоне длин волн это не так. Поэтому необходимо учитывать отражение излучения от двух границ дифракционного элемента, а коэффициент  $r_{\phi}$  определять, в отличие от работы [6], с учетом не только значения показателя преломления материала, но и тангенса угла потерь.

Коэффициент прохождения  $|T|^2$  и набег фазы прошедшей волны  $\psi$  для однослойной стенки с потерями в зависимости от угла падения  $Q$  могут быть выражены, например, по соотношениям из [7].

Дифракционная эффективность линзы с учетом потерь определялась по выражению:

$$\eta_{Л} = 0,84(1-r_{Л})(1-\alpha_{Л});$$

где

$$r_{Л} \sim \left[ \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} + \frac{(4n-n^2-1)}{16n^3(n^2-1)(kF)^2} \times \frac{(1-(1+p^2+0.5p^4)\exp(-p^2))}{(1-\exp(-p^2))} \right];$$

$\alpha \sim (n/(n-1))\text{tg}\delta(p^2-1)$  - коэффициенты отражения и поглощения линзы соответственно;  $p = (\pi M)^2$ ;  $M = b^2/\lambda F$ ;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $b, F$  - радиус и фокусное расстояние линзы соответственно [6]. Это выражение приведено для случая плоско-выпуклой полусферической линзы в параксиальном приближении  $F \gg b$ .

На следующих рисунках 1-2 показана зависимость относительной дифракционной эффективности от оптических констант материала.

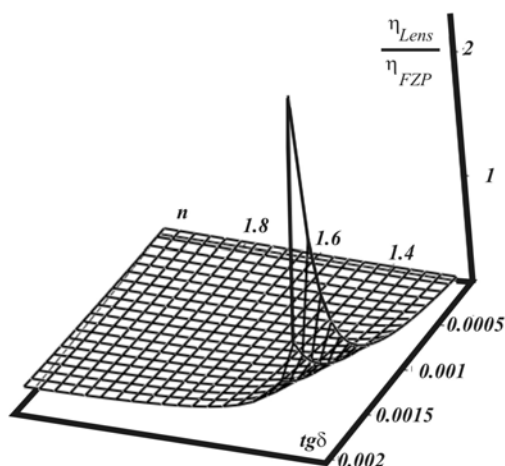


Рис.1. Зависимость относительной дифракционной эффективности от параметров оптических констант материала диэлектрика.

Учет потерь на отражение и поглощение в материале дифракционного элемента в зависимости от угла падения излучения на его апертуру позволил определить оптимальные параметры оптических констант материала диэлектрика, когда дифракционная эффективность рассматриваемых систем становится выше дифракционной эффективности линзы. Данная зависимость, характеризующая область оптимальных параметров, приведена на следующем рисунке 3.

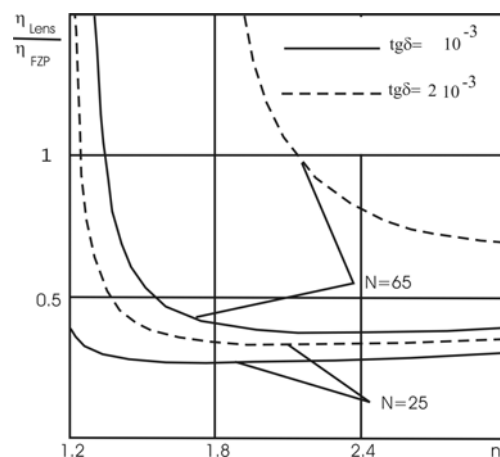


Рис.2. Относительная дифракционная эффективность для различных значений тангенса угла потерь в материале диэлектрика и количества зон Френеля на его апертуре.

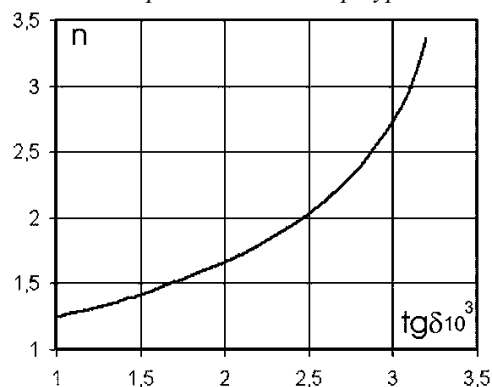


Рис.3. Область оптимальных значений оптических постоянных материала диэлектрика.

Таким образом, показано, что при определенных значениях  $n, \text{tg}\delta$  и относительной апертуры  $F/D$  применение зонной пластины в миллиметровой области спектра в качестве фокусирующего устройства становится целесообразным с энергетической точки зрения.

Учет потерь на поглощение в материале диэлектрика, зависимости потерь на отражение от угла падения излучения на диэлектрик, величины тангенса угла потерь материала диэлектрика, позволил методами вычислительного эксперимента определить влияние этих факторов на величину дифракционной эффективности дифракционной антенны. Так, моделирование на основе строгого вычисления дифракционного интеграла показало, что при изменении величины тангенса угла потерь материала диэлектрика с  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$  дифракционная эффективность падает примерно на 0,7%.

### Особенности построения радиоизображения предмета за диэлектрической преградой

Из рис. 4 легко получить выражения для смещения фокусируемой точки по глубине ( $l_c$ ), дефокусировки по глубине ( $\Delta l$ ) и дефокусировки поперек ( $\Delta a$ ) для случая фокусировки пучка сквозь плоско-параллельную прозрачную среду:

$$\Delta a = d \operatorname{tg} \alpha \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right),$$

$$\Delta l = \frac{\Delta a}{\operatorname{tg} \alpha} \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right),$$

$$l_c = \Delta l_{\alpha=0} = d \frac{n-1}{n},$$

где  $d$  – толщина плоскопараллельного диэлектрика,  $n$  – его коэффициент преломления,  $\alpha = \operatorname{arctg}(D/2L)$  – апертурный угол оптической системы диаметра  $D$  при удалении  $L$  от объекта.

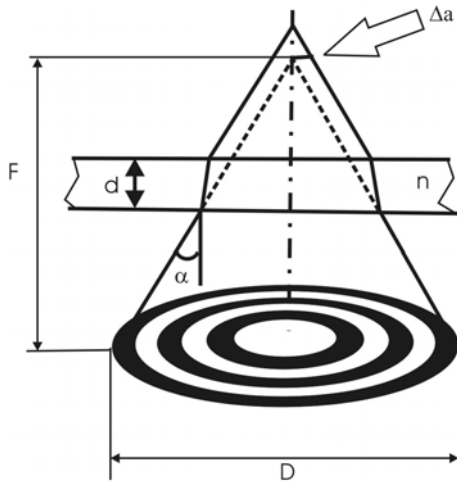


Рис. 4. Схема расчета дефокусировки оптической системы.

При повороте диэлектрической пластины на угол  $\gamma$  от оптической оси, величина поперечной дефокусировки определяется как:

$$\Delta a = d(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}(\beta + 2\gamma)),$$

$$\operatorname{tg} \beta = \sin \alpha / \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}.$$

На рис. 5 приведены графики функций  $\Delta a(\alpha)$ ,  $\Delta l(\alpha)$  и радиуса пятна Эйри:

$$R_e = 1,22 \lambda \frac{L}{D} = 1,22 \frac{\lambda}{2 \operatorname{tg} \alpha},$$

при  $n=1,5$ ,  $\lambda=2$  мм.

Из рис. 5 видно, что при построении изображения сквозь радиопрозрачную преграду увеличенные апертуры оптической системы приводит к улучшению разрешения лишь до некоторого предела. При дальнейшем увеличении апертуры разрешение ухудшается. Увеличение толщины пластины приводит к уменьшению эффективного апертурного угла. В то же время незначительный поворот диэлектрической пластины позволяет использовать оптическую систему с большим апертурным углом. Из приведенных соотношений очевидно, что увеличение длины волны излучения приводит к сдвигу оптимальных значений апертурного угла в большую сторону.

Частично скомпенсировать эффект ограниченности максимального оптимального значения апер-

турного угла можно осуществить путем перефокусировки оптической системы на величину  $l_c$ , например, за счет использования частотных свойств элементов дифракционной квазиоптики.

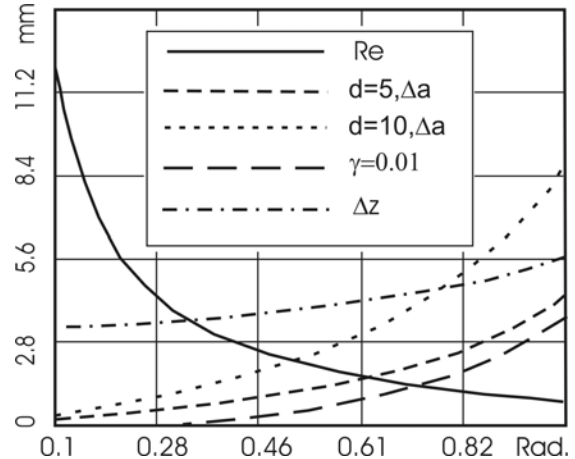


Рис. 5. Зависимость дефокусировки от апертурного угла  $\alpha$  оптической системы для  $n=1,5$ :

сплошная линия – радиус Эйри, штриховая линия – поперечная дефокусировка при  $d=5$  мм, мелкая штриховая линия – поперечная дефокусировка при  $d=10$  мм, крупная штриховая линия – поперечная дефокусировка при повороте диэлектрической пластины толщиной  $d=5$  мм, штрих-пунктир – продольная дефокусировка.

#### Метод сфокусированного приема

При сквозном формировании большого количества изображений с различными положениями уровней создается объект и в этих изображениях нерезкие детали заглушаются посредством отфильтровывания через фильтр преимущественно с высокочастотной характеристикой, так что посредством суммирования этих отфильтрованных сигналов составляется полное изображение объемного объекта, и соответствующее неотфильтрованное изображение добавляется к отфильтрованному. При этом фильтрация может происходить с помощью фильтра с линейно повышающейся частотной характеристикой, так как считается, что при сквозном фокусировании и суммировании (интегрировании) контрастность при высокой частоте гетеродина сильно уменьшается. Например, при рассмотрении распределения интенсивности светлых точек на черном фоне и после суммирования этого объекта появляется точечное изображение с широким ореолом.

Описанный способ разъясняется математически следующим образом: дефокусированная деталь с дефокусировкой  $\alpha=0,5K \sin^2 u$  изображается с функцией переноса вида [8]:

$$D(f, \alpha) = \frac{\sin(2\alpha |f| - \alpha f^2)}{2\alpha |f|}.$$

При этом  $U$  обозначает апертуру,  $k = 2\pi/\lambda$  и  $f$  – частоту гетеродина.

Если отфильтровывается  $F(f) = 2|f|/\pi$ , то получается

$$D_F = \frac{\sin(2\alpha |f| - \alpha f^2)}{\pi\alpha}$$

После информации об  $\alpha$  получается:

$$\langle D_F \rangle = \int_{-\alpha_1}^{\alpha_1} D_F(f, \alpha) d\alpha = \frac{2S_i[\alpha_1(2|f| - f^2)]}{\pi}$$

Функция переноса относится не только к средней плоскости, но почти ко всем плоскостям, если  $\alpha_1$  больше глубины объекта. Указанный способ позволяет просуммировать несколько десятков дефокусированных послойных изображений объекта.

Изменение фокусного расстояния оптической системы на основе дифракционных элементов осуществляется за счет изменения частоты излучения облучателя. Для осуществления селекции отраженного от объекта сигнала от излученного и автоматического "отслеживания" области фокусировки вдоль одной из координат, например, оптической оси, целесообразно использовать либо внеосевые дифракционные элементы, либо дифракционные элементы с внеосевым положением области фокусировки. Для целей радиовидения первые являются более предпочтительными, поскольку они сохраняют свои фокусирующие свойства в большем частотном диапазоне, чем элементы с внеосевым положением фокуса.

На рисунке 6 показана принципиальная схема разработанного и испытанного устройства для получения радиоизображений объемных предметов при сканировании сфокусированным излучением по глубине объекта и автоматическим приемом отраженного из области фокусировки излучения [1-2]. Работа устройства основана на частотных свойствах внеосевых дифракционных элементов, в данном случае – внеосевых зонных пластин. Это позволяет электронным способом осуществить просмотр контролируемой сцены по глубине и автоматически отслеживать положение области фокусировки, что увеличивает качество получаемого радиоизображения (в основном за счет улучшения отношения сигнал/шум и селекции дефокусированных слоев радиоизображения).

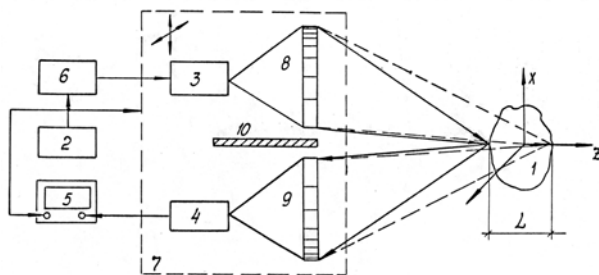


Рис. 6. Принципиальная схема установки для получения радиоизображений существенно трехмерных объектов.

1 – объект, 2 – генератор пилообразного напряжения, 3, 4 – источник и приемник СВЧ излучения, 5 – видеоконтрольное устройство, 6 – управляемый источник питания, 7 – устройство трех мерного сканирования, 8, 9 – передающая и приемная внеосевые зонные пластины, 10 – экран.

Устройство работает следующим образом. Источник излучения 1 облучает передающий радиообъектив 3, фокусирующий излучение в точке на объекте 5, положение которой по глубине сцены определяется текущей длиной волны излучения. Отраженное от объекта 5 излучение из области фокусировки радиообъектива 3 принимается приемным радиообъективом 4 и поступает на приемник излучения 2. Сканирование по строкам и кадрам осуществляется за счет перемещения объекта.

### Концепция системы радиовидения на основе дифракционной оптики с увеличенной глубиной фокуса

Основная идея построения системы прямого квазиоптического радиовидения на основе элементов дифракционной оптики миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов заключалась в возможности частотного сканирования по одной координате (глубине сцены). Вследствие этого преодолелись ограничения по пространственному разрешению и глубине просматриваемого пространства.

Возможность получения дифракционных оптических элементов с увеличенной глубиной фокуса в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах открывает путь по созданию других типов систем радиовидения. В данном случае возможен следующий подход.

Для просмотра сцены по глубине достаточно сформировать слабо расходящийся пучок (дифракционную линию) протяженностью не менее требуемой глубины просмотра сцены. Принципиальным в данном случае является возможность сканирования таким пучком пространства по другой координате путем изменения положения источника (приемника) излучения и коррекция длины (протяженности) области фокусировки за счет изменения длины волны излучения. Следовательно, отпадает необходимость сканирования области контроля по глубине сцены.

В то же время, при использовании непрерывного излучения, при таком подходе становится невозможным осуществить обработку получаемого изображения путем селекции неинформативных слоев.

### Список литературы

1. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика, М.: ИнформТЭИ, 1992, 180с.
2. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика и ее применения, Новосибирск, СибАГС, 1999, 308 с.
3. Экспериментальная радиооптика./ Под ред. В.А. Зверева и Н.С. Степанова. – М.: Наука, 1979, 255 с.
4. Зелкин Е.Т., Петрова Р.А. Линзовые антенны. - М.: Сов. радио, 1974. - 279 с
5. Mehmet Safak. Limitation of reflector antenna gain by random surface errors, pointing errors and the angle of arrival jitter. // IEEE Trans. On antennas and propagation, 1990, v. 38, N1, p.117-121.
6. Щукин И.И. О потерях в линзах и зонных пластинках // В сб.: Твердотельная радиоэлектроника. - Воронеж, 1973. - с. 127-130.
7. Каплун В.А. Обтекатели антенн СВЧ. - М.: Сов. Радио, 1974, 240с.
8. Пат. ФРГ 265525